



中国科学院宁波材料技术与工程研究所  
浙江省磁性材料应用技术创新中心  
宁波磁性材料产业集群发展促进中心



以磁聚力  
从磁启航

MIDF2020  
第三届中国磁产业发展论坛

The 3rd Magnetics Industry Development Forum of China

会议手册

12.18

—  
12.19

中国·宁波

## 参会防疫须知

尊敬的参会领导、嘉宾：

欢迎您参加第三届中国磁产业发展论坛，为确保论坛期间公共卫生和健康安全，根据论坛组委会疫情防控要求，请在会期做好相关新冠疫情防控工作。

1、请出行时生成“健康码”绿码，进入展馆后测量体温正常，无干咳、乏力、咽痛、腹泻症状者可参会。

2、参会期间请注意全程佩戴口罩，就餐前洗手消毒，交流保持适当距离。

3、近14天内有国内中高风险地区旅居史的或“健康码”为黄码的人员，须提供本地7天内核酸检测为阴性的报告。近14天内有境外旅居史的人员及境外人员谢绝参会。

4、若身体出现异常情况请及时与会务组工作人员联系。

**会务联系：余纯冰 182 5889 1980**

**马晓华 155 1790 0593**

# 目录

# CONTENT

1、论坛指南.....	1
2、主办单位简介.....	10
3、嘉宾及演讲摘要.....	14
4、联盟企业介绍.....	104
5、技术成果集锦.....	127
6、专利分析报告.....	135

第三届中国磁产业发展论坛

第三届中国磁产业发展论坛



## 第三届中国磁产业发展论坛

为深入贯彻习近平总书记关于制造强国战略重要论述精神，深度落实宁波市“246”万亿级产业集群培育计划，建设磁性材料产业创新与先进制造高地，于2020中国（宁波）新材料科技与产业博览会期间在宁波国际会展中心举办“第三届中国磁产业发展论坛”（2020年12月18日-12月19日）。在市政府领导下，中科院宁波材料所做作为宁波磁性材料产业集群促进机构，入围工信部先进制造业集群决赛阶段，开幕式同时举行“宁波磁性材料产业集群发展促进中心”揭牌仪式，助推磁性材料产业由集聚发展向集群高质量发展。

本次发展论坛由浙江省经济和信息化厅、宁波市人民政府、科学技术部科技人才交流开发服务中心指导，中国科学院宁波材料技术与工程研究所主办，浙江省磁性材料应用技术制造业创新中心、宁波磁性材料产业集群发展促进中心承办。论坛将以“以磁聚力、从磁启航”为主题，邀请沈保根院士、都有为院士、王秋良院士等权威专家学者和产业界精英做专题演讲。论坛以推动磁性材料产业集群发展为主要任务，通过稀土永磁专场、永磁电机专场、磁材新应用专场和柔性磁电专场设置，对磁材料与器件的应用和发展进行深度探讨与交流。

中国科学院宁波材料技术与工程研究所  
浙江省磁性材料应用技术制造业创新中心  
宁波磁性材料产业集群发展促进中心

2020年12月

# 组织机构

## 指导单位

科学技术部科技人才交流开发服务中心  
浙江省经济和信息化厅  
宁波市人民政府

## 主办单位

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

## 承办单位

浙江省磁性材料应用技术制造业创新中心  
宁波市磁性材料产业集群发展促进中心

## 协办单位

宁波科宁达工业有限公司	宁波韵升股份有限公司
宁波宁港永磁材料有限公司	宁波菲仕技术股份有限公司
宁波可可磁业股份有限公司	宁波永久磁业有限公司
百琪达智能科技（宁波）股份有限公司	宁波复能新材料股份有限公司
宁波安信数控技术有限公司	横店集团东磁股份有限公司
东睦新材料集团股份有限公司	宁波招宝磁业有限公司
浙江原邦材料科技有限公司	宁波兴隆磁性技术有限公司
奥克斯集团有限公司	宁波韧和科技有限公司
宁波市磁性材料商会	宁波晶飞新材料有限公司
宁波中科毕普拉斯新材料科技有限公司	宁波市镇海区海江投资发展有限公司

## 支持单位

宁波市经济和信息化局	宁波市镇海区经济和信息化委员会
宁波市镇海区科学技术局	浙江省磁性材料协会
磁产业技术发展联盟	DT新材料

## 一、背景及目的

为深入贯彻习近平总书记关于制造强国战略重要论述精神，以新发展理念引领制造业高质量发展，建设新材料创新高地与先进制造基地，我市深度落实“246”万千亿级产业集群培育计划，构建磁性材料产业集群促进机构，打造开放协同的公共服务体系和精准有效的政策支撑体系。特定于2020中国（宁波）新材料科技与产业博览会期间同步举办“第三届中国磁产业发展论坛”（2020年12月18日-12月19日）。

论坛以呈现并推动磁性材料产业集群发展为主要任务，将通过永磁电机发展专场、稀土永磁发展专场、磁材新应用发展专场和柔性磁电发展专场等分专场的设置，分别就细分领域磁材料与器件的应用和发展进行深度探讨与交流。论坛形式多样，含专业权威报告、行业专利分析、专家技术问诊、企业观点碰撞等多种形式，共同研判行业发展趋势，探讨关键共性问题和应用方向的布局，旨在加强磁产业上下游的协同互助，构筑产学研用一体化的创新链条，挖掘技术新驱动和产业新动能！

磁聚天下英杰，质推行业发展，欢迎并感谢您共襄盛会！

**第三届中国磁产业发展论坛**  
The 3rd Magnetics Industry Development Forum of China  
暨2020中国（宁波）国际新材料科技与产业博览会

指导单位：科学技术部科技人才交流开发服务中心  
浙江省经济和信息化厅、宁波市人民政府  
主办单位：中国科学院宁波材料技术与工程研究所

承办单位：浙江省磁性材料应用技术制造业创新中心  
宁波市磁性材料产业集群发展促进中心

协办单位：

2020 December 18-19

## 二、论坛及展会地点

磁产业发展论坛地点：

2020.12.18：宁波国际会展中心会议楼B楼（203、205会议室）

2020.12.19：宁波镇海区庄市街道光明路189号高端新材料产业园2号楼

新材料展会地点：宁波国际会展中心1、5、6号馆内

## 三、会议期间餐饮

12:00-13:00 午餐（郭巨人海鲜国展店：浙江省宁波市鄞州区会展路181号）

18:00-20:00 晚餐（南苑会展商务酒店二楼多功能厅：浙江省宁波市鄞州区

## 四、周边住宿

会展路181号）

您可以根据需要自行选择住宿地点，组委会提供以下酒店协议价，具体信息如下：

酒店名称	星级	价格/房型	地址	联系人
宁波泛太平洋大酒店	五星	大床/标间 ¥450单早；¥530双早	浙江省宁波市鄞州区 民安东路99号	童老师 17815917495
宁波国大雷迪林广场酒店	五星	大床/标间 ¥498/晚，单、双早同价	浙江省宁波市州区海晏 北路800号	
宁波南苑会展商务酒店	三星	大床/标间 ¥260/晚，单、双早同价	浙江省宁波市鄞州区 会展路181号宁波国际 会展中心东门（近通余路）	

## 五、交通指南

### 1.从宁波栎社国际机场出发：

（1）出租车约24公里，全程约38分钟，费用约51元。

（2）轨道交通2号线（乘坐11站）—鼓楼站—站内转1号线—海晏北路

（A口）出，步行1.9公里至会议地点，全程约1小时41分钟，费用约5元。

### 2.从宁波火车站出发：

（1）出租车约9.6公里，全程约33分钟，费用约26元。

（2）轨道交通号线（乘坐2站）—鼓楼站—站内转1号线—海晏北路（A口）出，步行

1.9公里至会议地点，全程约51分钟，费用约4元。

## 六、会议议程

### 2020年12月18日上午 -- 论坛开幕式（国展中心会议B楼203室）

时 间	议 程
08:30-09:30	嘉宾签到
09:30-10:00	09:30-09:35 集群宣传视频播放
	09:35-09:40 主持人介绍来宾
	09:40-09:45 中科院宁波材料所领导致辞
	09:45-09:50 宁波磁性材料产业集群企业代表致辞
	09:50-09:55 宁波市人民政府领导致辞
	09:55-10:00 宁波磁性材料产业集群发展促进中心揭牌
10:00-10:10	茶歇（合影、领导巡视展会）
10:10-12:00 主旨报告	10:10-10:40 沈保根院士报告
	10:40-11:10 王秋良院士报告
	11:10-11:35 <b>高频软磁材料在SiC,GaN时代面临的挑战与对策</b> 李发伸（兰州大学 教授）
	11:35-12:00 <b>热压稀土永磁材料及其研究进展</b> 郭朝晖（钢铁研究总院 首席专家 教授）
12:00-13:00	午餐（郭巨人海鲜国展店）

## 2020年12月18日下午 -- 永磁电机和稀土永磁专场论坛议程(国展中心会议B楼203室)

时 间	邀请报告	地 点
13:00-13:25	<b>定子永磁无刷电机及其研究进展</b> 程明 (东南大学 教授)	永磁电机专场 国际会展中心 会议B楼 203会议室
13:25-13:50	<b>永磁变速恒频发电关键技术及其应用</b> 黄守道 (湖南大学 教授)	
13:50-14:15	<b>高转矩密度电机的创新与发展</b> 曲荣海 (华中科技大学 教授)	
14:15-14:40	<b>高速磁悬浮电机及应用</b> 孙津济 (北京航空航天大学 教授)	
14:40-15:05	<b>协作机器人关节永磁力矩电机及其驱动控制技术</b> 张驰 (中科院宁波材料所 研究员)	
15:05-15:20	主题讨论	
15:20-15:30	茶歇	
15:30-15:55	<b>钕铁硼永磁材料方形度优化研究</b> 岳明 (北京工业大学 教授)	稀土永磁专场 国际会展中心 会议B楼 203会议室
15:55-16:25	<b>高温时效钕钴永磁材料的组织与孪晶结构表征</b> 冯海波 (钢铁研究院-中科院宁波材料所稀土永磁材料联合创新中心)	
16:25-16:50	<b>高性能钕铁硼永磁体重稀土减量化研究</b> 陈仁杰 (中科院宁波材料所 研究员)	
16:50-17:15	<b>三维磁控溅射镀膜技术及设备在烧结钕铁硼行业应用进展</b> 王君 (宁波甬晟新材料科技有限公司 总经理)	
17:15-17:30	主题讨论	
18:00-20:00	晚餐 (南苑会展商务酒店二楼多功能厅)	

## 2020年12月18日下午 -- 磁材新应用专场论坛议程（国展中心会议B楼205室）

时 间	议 程	地 点
13:00-13:25	<b>电控自旋电子学器件及应用</b> 王开友（中科院半导体所 研究员）	磁材新应用 专场 国际会展中心 会议B楼 205会议室
13:25-13:50	<b>非互易环行器技术的新方向与进展</b> 张明（中国电子科技集团有限公司 首席专家 研究员）	
13:50-14:15	<b>永磁材料的晶体结构、各向异性与磁性</b> 刘先松（安徽大学 教授）	
14:15-14:40	<b>强永磁性纳米多孔合金的制备及其结构和磁性能研究</b> 张伟（大连理工大学 教授）	
14:40-15:05	<b>磁传动在高能耗企业智能制造中的应用方向和作用</b> 王向东（江苏金陵永磁产业研究院 院长）	
15:05-15:30	<b>用稀土钕铁硼强磁生物效应创新消化外科修复重建技术的体系构建</b> 吕毅（教授、主任医师、博导）	
15:30-15:40	茶歇	
15:40-16:05	<b>柔性磁性薄膜的磁稳定调控技术</b> 游才印（西安理工大学 教授）	
16:05-16:25	<b>5G+时代磁电功能材料应用趋势探讨</b> 伊晓辉（浙江省磁性材料应用技术创新中心 技术总监）	
16:25-16:45	<b>“产业数字化”，工业APP助力中国制造提速增效</b> 何强（北京索为系统技术股份有限公司 首席系统工程师）	
16:45-17:05	<b>工业4.0时代磁性行业的数字化工厂建设</b> 杨宗运（浙江恩大施福软件科技有限公司 总工）	
17:05-17:30	<b>莱宝真空泵在磁性材料生产中的创新应用</b> 王朋（莱宝（天津）国际贸易有限公司 工业真空市场拓展经理）	
18:00-20:00	晚餐（南苑会展商务酒店二楼多功能厅）	

**2020年12月19日上午 -- 柔性磁电发展专场（浙江省磁性材料应用技术创新中心、宁波市镇海区庄市街道光明路189号 高端新材料产业园2号楼）**

时 间	议 程	地 点
08:40-09:40	韧和开业典礼	柔性磁电专场 创新中心路演厅
09:40-09:45	主持人开场并介绍嘉宾	
09:45-10:10	<b>高效转印集成技术</b> 宋吉舟（浙江大学 教授）	
10:10-10:35	<b>“柔性电子+”与智能传感器</b> 王学文（西北工业大学 教授）	
10:35-11:00	<b>材料凝固形核过程的原子尺度计算模拟方法研究及应用</b> 牛海洋（西北工业大学 教授）	
11:00-11:10	茶歇	
11:10-11:35	<b>智能服装服饰质量安全与标准体系</b> 张海焯（深圳市计量质量检测研究院 所长）	
11:35-12:00	<b>纺织品结构设计与功能实现</b> 吕治家（魏桥创业集团研发中心 主任）	

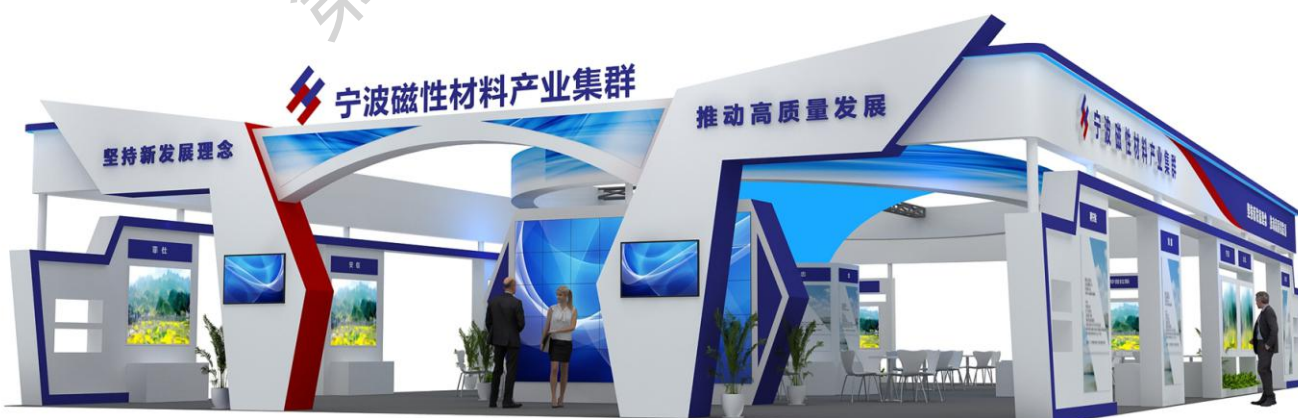
**会务咨询: 余纯冰 182 588 91980**

**马晓华 155 1790 0593**

## 七、宁波国际新材料展

2020中国（宁波）国际新材料科技与产业博览会以“集聚新材料技术，助力高质量发展”为主题，以“先进制造+国际贸易”的全新定位，围绕打造先进制造基地、扩大技术装备进口的发展思路。通过新材料展和先进装备展览、洽谈交流和论坛等形式，围绕新型功能材料产业集群建设和新型功能材料做大做强金属新材料、先进高分子材料、电子信息材料、磁性材料，重点提升海洋新能源、新能源材料、生物医用材料、石墨烯材料，集中展示一批具有基础性、战略性、前沿性的新材料、先进工艺、关键装备和科研技术，优化展示国内外新材料先进技术及国际重要科技合作交流项目。

宁波磁性材料产业集群发展促进中心携宁波科宁达工业有限公司、宁波复能新材料股份有限公司、宁波永久磁业有限公司、宁波招宝磁业有限公司、宁波菲仕技术股份有限公司、宁波中科毕普拉斯新材料科技有限公司、宁波安信数控技术有限公司、宁波宁港永磁材料有限公司、宁波可可磁业股份有限公司、横店集团东磁股份有限公司、宁波晶飞新材料有限公司、百琪达智能科技（宁波）股份有限公司、奥克斯集团有限公司、宁波兴隆磁性技术有限公司、宁波韧和科技有限公司、宁波莱宝智能装备有限公司等16家企业集体亮相2020宁波国际新材料展。展区位于国际会展中心1号馆1T-6，展位面积近400平，通过不同元素组合，打造出“开放 创新 智慧 融合”的情景化视觉展览新模式，欢迎参观！



# CNITECH



# CNITECH

## 中国科学院宁波材料技术与工程研究所简介

中国科学院宁波材料技术与工程研究所成立于2004年4月，是中国科学院在浙江布局建立的首家国家级研究机构，是中国科学院在“知识创新工程”试点工作向“创新跨越、持续发展”推进的新阶段，与地方政府共同出资建设的一个直属科研机构。不仅填补了当时中科院在全省研究机构中布局的空白，也极大地提升了宁波乃至浙江省的自主创新能力，为宁波乃至浙江新材料产业发展提供了强大的创新动力，已成为全省新材料技术研究的人才、技术和创新高地。

材料所已建设了能够满足自身发展和产业需求的平台，具备了服务和支撑区域产业发展的能力。建立了公共测试、专业研发、工程化、先进制造等四大类支撑平台，拥有近7亿元的先进科研装备。建成了碳纤维制备技术国家工程实验室、稀土永磁材料与应用技术国家工程实验室、中科院磁性材料与器件重点实验室、中科院海洋新材料与应用技术重点实验室等省部级以上各类平台近30个。目前，与国内1000多家企业和全球230多个知名机构开展了广泛合作，实现了石墨烯基重防腐涂料、大尺寸单晶金刚石、非晶软磁带材、医用CT关键材料、神经康复机器人、免维护实心发泡一体轮胎等近百项重大科技成果的转移转化，形成了所地合作多元化的合作模式。

**料要成材 材要成器 器要好用 把科技转化为生产力**

地址：浙江省宁波市镇海区中官西路1219号  
邮编：315201

网站：[www.nimte.ac.cn](http://www.nimte.ac.cn)  
电话：0574-86685115



## 中国科学院磁性材料与器件重点实验室 Key Laboratory of Magnetic Materials and Devices, CAS

中国科学院磁性材料与器件重点实验室面向国家和产业的重大需求和世界发展前沿，致力于新型磁性材料和器件的应用基础研究和高技术研发，紧密结合国家在新能源技术和新一代信息技术产业领域对磁性材料与器件的战略需求，发挥浙江省在磁性材料方面的产业集群优势，重点部署了稀土永磁材料、非晶软磁材料、磁性纳米材料、磁电子材料与器件四个研究方向，强调不同方向间交叉合作，形成应用基础研究与高技术研发兼顾的学科布局，推动我国磁性材料与器件的前瞻研究和科技成果的转移转化。

重点实验室现已建成了发改委磁性材料科技创新服务平台、磁性薄膜超高真空制备平台、硬/软磁性材料制备平台、高频磁性材料制备平台、磁体失效与防护研究平台、磁性材料测试与表征平台等，为促进科研水平的不断提高发挥了重要的支撑作用。

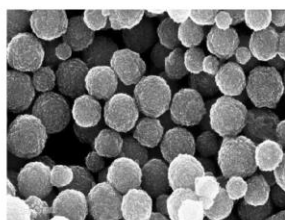
### 四大研究领域



稀土永磁材料  
钕铁硼永磁



非晶软磁材料  
非晶纳米晶软磁粉末  
及其应用



磁性纳米材料



磁电子材料与器件  
柔性可穿戴电子设备

# 宁波磁性材料产业集群发展促进中心

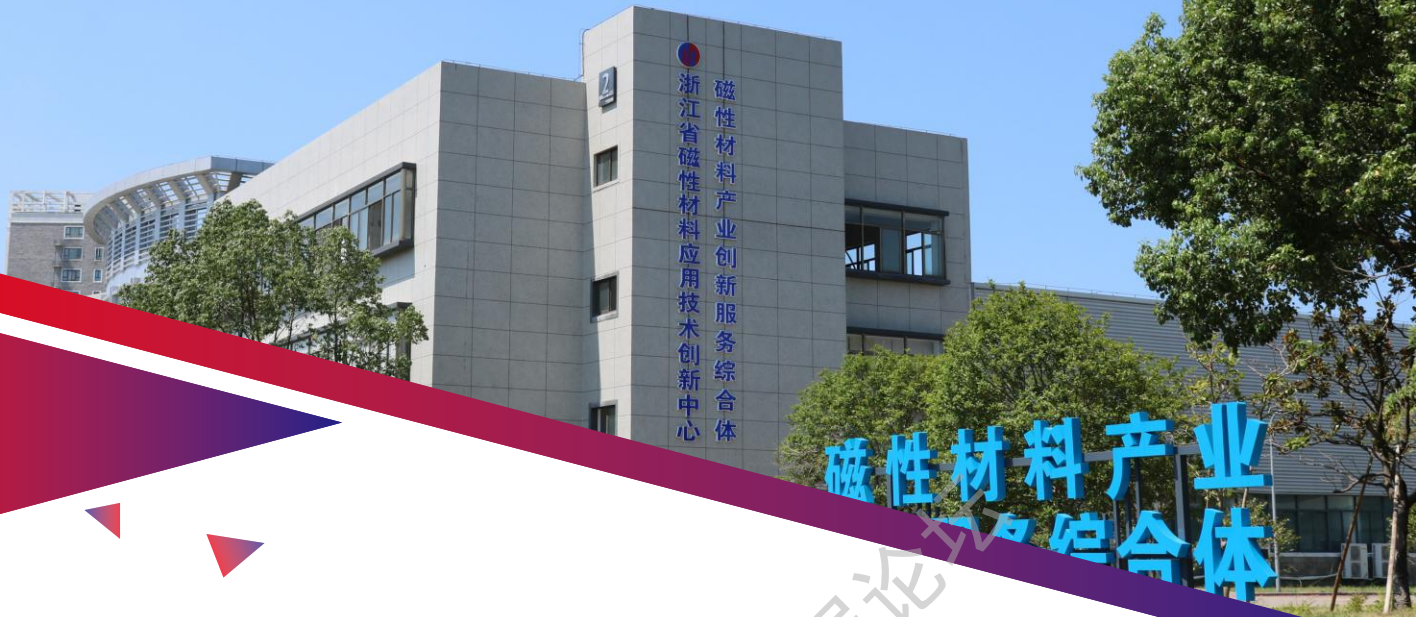
Promotion Center of Manufacturing Cluster of Magnetic Materials Industry

宁波磁性材料产业集群发展促进中心作为宁波磁性材料产业集群发展的促进机构，是宁波市为贯彻落实党中央、国务院关于加快建设制造业强国的战略部署，培育发展世界级先进制造业集群和宁波市“246”万千亿级产业集群发展战略部署设立的先进制造业产业集群发展促进机构，并于工信部组织的2020年先进制造业集群竞赛中优势胜出，在初赛中拔得头筹。促进中心隶属于中国科学院宁波材料与技术工程研究所，遵从中国科学院宁波材料与技术工程研究所的管理制度，对外代表中国科学院宁波材料与技术工程研究所行使宁波磁性材料产业集群发展的促进任务。促进中心的核心功能是作为集群成员间的“粘合剂”，通过沟通交流、协调管理、监督激励和对外合作等方式，促进集群成员达成共同目标和统一行动，促进磁性材料产业高质量发展。





浙江省磁性材料应用技术制造业创新中心  
Innovation Center for Applied Magnetics



浙江省磁性材料应用技术制造业创新中心（以下简称“创新中心”）是由中科院宁波材料所和横店集团东磁股份有限公司共同牵头，依托浙江省雄厚的磁性材料研发及产业基础，联合国内科研院校和行业龙头企业，由独立法人形式建立的宁波磁性材料应用技术创新中心有限公司负责运行的特定领域的创新平台。

中心核心定位为前沿、关键共性技术的研发和应用技术的转移转化，面向国家战略需求，重点布局磁动力、磁电子、磁传感、磁诊疗、磁制冷和高新技术六大领域的产业化项目。中心还通过一系列公共创新服务，搭建交流与合作平台，推动磁产业转型升级，促进战略性新兴产业快速发展。

目前，中心常设对外服务有——

- 1、人才培养
- 2、知识产权
- 3、检验检测
- 4、产学研合作
- 5、技术成果孵化



电话：0574-86681030 15517900593  
邮箱：magmater@icamzj.com

地址：宁波市镇海区庄市街道光明路189号  
网站：www.icamzj.com



## 沈保根

博士生导师  
中国科学院院士  
发展中国家科学院院士  
中国科学院物理研究所研究员

### 简介

现任中国科学院技术科学部副主任，中国科学院物理研究所学术委员会副主任，中国高技术产业化研究会副理事长，中国物理学会理事，中国电子学会常务理事，中国稀土学会常务理事，磁学国家重点实验室学术委员会主任，中国科学院磁性材料与器件重点实验室学术委员会主任，中国再生资源产业技术创新战略联盟专家委员会主任，《Chin. Phys. B》副主编、《物理学报》副主编、《J. Magn. Magn. Mater.》等8个杂志编委等。

### 主要研究方向

新型磁性功能材料的结构、相变、拓扑磁性和磁畴结构；  
新型稀土永磁材料探索和高性能稀土永磁材料相关基础科学问题研究。

### 过去的主要工作及获得的成果

长期从事磁学和磁性材料的研究工作，发表学术论文1005余篇，被他人引用14143余次。获国家发明专利40多项。培养博士研究生40余名。国家杰出青年科学基金获得者、国家973项目首席科学家，获香港求是科技基金会“杰出青年学者奖”，中国物理学会叶企孙物理奖，北京市科技进步奖一等奖、国家自然科学基金二等奖、何梁何利科学与技术进步奖、陈嘉庚技术科学奖等。



## 王秋良

中国科学院院士

中国科学院电工研究所研究员

### 简介

王秋良，强电磁工程与技术专家，中国科学院院士，中国科学院电工研究所研究员、博士生导师。担任中国电机工程学会高级会员，中国电工技术学会高级会员，IEEE Members会员，美国MIT物理系客座教授，ICE/TC90工作组成员，国家863计划专家组成员和咨询专家。

截至2019年11月，王秋良先后承担多项国家自然科学基金、863高技术计划、973基础研究计划、科技部支撑计划，财政部重大专项、重大国际合作以及横向等项目，兼任国家大科学工程“稳态强磁场”一级课题负责人。先后在中国国内外期刊上发表论文共233篇，其中SCI收录有92篇，EI收录有123篇，CSCD收录62篇。先后以第一完成人获得了包括国家级以及省部的科学技术奖励6项，国家发明专利 78项，授权专利35项。



## 李发伸

教授

博导

兰州大学物理与技术学院

### 报告主题

高频软磁材料在SiC, GaN时代面临的挑战与对策

### 简介

李发伸，曾任兰州大学校长，现兼任国家重离子实验室事主任、中国核物理学会穆斯堡尔学组副主任等职。九届全国人大代表，国务院学位委员会第四届物理学、天文学学科评议组成员，国际穆斯堡尔谱不应用咨询委员会委员。

李发伸教授长期从事固体物理、磁学及磁性材料穆斯堡尔谱学及自旋回波核磁共振的教学及科研工作，在磁性材料的微观特性及其与宏观磁性的关系研究方面，取得了多项研究成果。“磁性微粉及稀土——铁磁性材料的制备和穆斯堡尔研究”，荣获甘肃省科委科技进步二等奖；“新型磁性材料的制备及电磁性能的研究”，荣获甘肃省科技进步三等奖；“低Nd快淬NdFeB合金的核磁共振及穆斯堡尔谱研究”，荣获甘肃省科技进步二等奖；“2:17型稀土—铁碳化物的稳定性、磁性及穆斯堡尔谱研究”，荣获教育部科技进步二等奖。自1990年以来，已公开发表学术论文100多篇。



## 郭朝晖

首席专家

教授

钢铁研究总院功能材料所

### 报告主题

热压稀土永磁材料及其研究进展

### 简介

从事稀土永磁材料的研究与开发近三十年，先后主持国家自然科学基金重点项目、面上项目、863、973、工信部稀土专项和军品配套等课题十余项，近年来主要研究方向是：高性能稀土永磁材料的结构与磁性、热压\热变形稀土材料、稀土永磁材料的稳定性等。先后获北京市科学技术一等奖、冶金部科技进步一等奖、国家科技进步二等奖等八项省部级以上科技奖励；2012年获冶金青年科技奖（个人）；2012年入选科技部科技创新领军人才；2014年获国务院政府特殊津贴；2014年入选获国家百千万人才工程。先后发表论文五十余篇。



## 程 明

教授

博导

东南大学电气工程学院

### 报告主题

定子永磁无刷电机及其研究进展

### 简 介

现任东南大学风力发电研究中心主任、东南大学先进电机与电力电子集成系统研究所所长、东南大学学术委员会委员、电气工程学院教授委员会主任、江苏省新能源汽车电机及驱动系统工程实验室主任。主持承担包括国家“973计划”课题，国家“863计划”项目，国家自然科学基金重大项目、重点项目、重大国际合作研究项目等各类课题50余项，发表期刊论文400多篇（其中SCI收录220余篇），出版专著/教材5部，获授权发明专利130余件、PCT专利8件。以获国家技术发明二等奖、江苏省科学技术一等奖、教育部自然科学一等奖、中国机械工业科学技术一等奖等学术奖励，和江苏省“333高层次人才培养工程”中青年科技领军人才、优秀科技工作者、“六大人才高峰”学术带头人、江苏省十大优秀专利发明人、中达学者以及江苏省专利发明人奖等荣誉/称号。被聘为IEEE IAS Distinguished Lecturer in 2015/2016；享受国务院政府特殊工献津贴。

### 报告摘要

定子永磁型电机是一类永磁体和电枢绕组均位于定子的新型永磁无刷电机，可方便地对永磁体和电枢绕直接冷却以控制其温度，并易于通过“永磁+电励磁”实现对电机气隙磁场的直接控制，从而获得无刷电机的宽范围调速；凸极转子既无永磁体也无绕组，结构简单可靠，适合高速运行。本讲座将介绍了定子永磁型电机的发展背景、结构特点、工作原理、基本控制策略、磁通控制方法等，展示该类电机的最新研究进展。

第三届中国磁产业发展论坛

1



# 定子永磁无刷电机及其研究进展

程明

东南大学首席教授  
IEEE Fellow, IET Fellow

2020年12月18-19日 浙江宁波

报告提纲

2



- ❖ 背景-定子永磁型电机的提出
- ❖ 定子永磁电机结构和工作原理
- ❖ 磁通控制方法
- ❖ 初级永磁直线电机
- ❖ 对永磁材料的需求

报告提纲

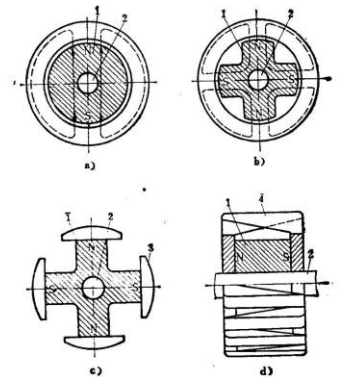
3

- ❖ 背景-定子永磁型电机的提出
- ❖ 定子永磁电机结构和工作原理
- ❖ 磁通控制方法
- ❖ 初级永磁直线电机
- ❖ 对永磁材料的需求

定子永磁型电机的提出

4

传统的转子永磁型电机

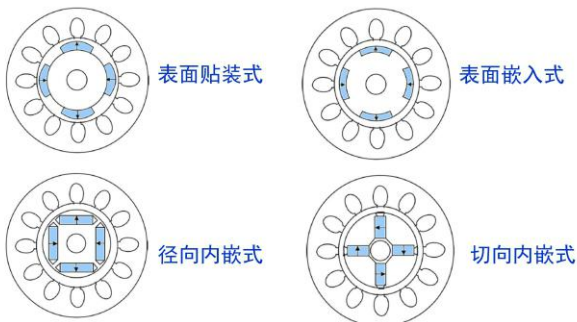


早期永磁电机  
(铝镍钴永磁)

定子永磁型电机的提出

5

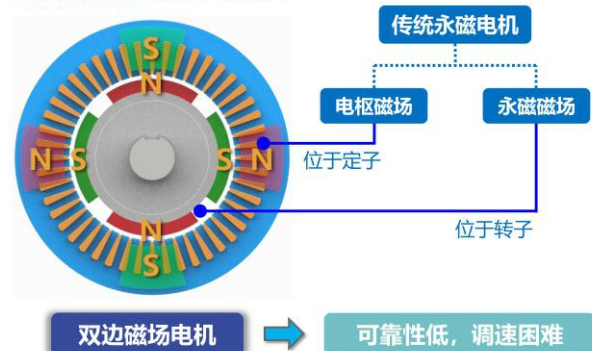
传统的转子永磁型电机 (稀土永磁)



定子永磁型电机的提出

6

转子永磁型电机存在的瓶颈

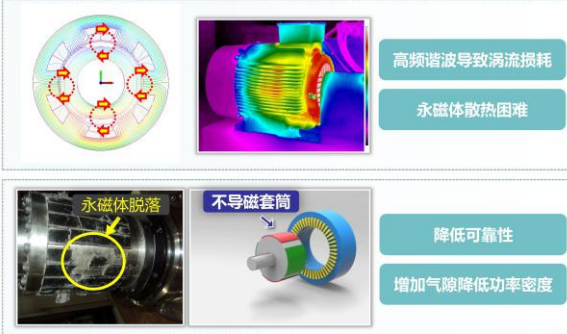


### 定子永磁型电机的提出

7

#### (1) 传统永磁电机可靠性难以提高

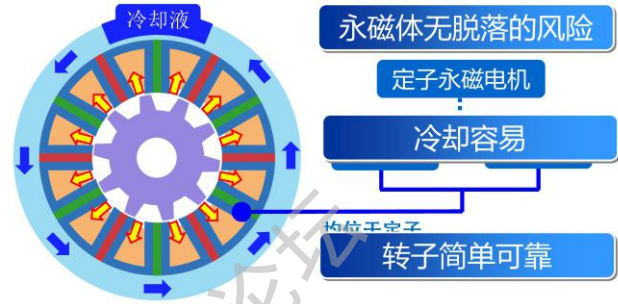
双边励磁磁场



### 定子永磁型电机的提出

8

#### 攻克传统双边磁场转子永磁电机的共性难题



### 定子永磁型电机的提出

9



### 定子永磁型电机的提出

10

#### 定子永磁型电机的结构特点

1. 保持了传统转子永磁式电机性能上的优点，包括转矩输出能力强、转矩和功率密度大、力能指标高、效率高等；
2. 克服了传统转子永磁式电机结构上的缺点，工艺简单，制造成本低；
3. 转子上既无永磁材料也无电枢绕组，结构简单可靠，特别适合高速运行，并且可方便地设计成外转子轮毂式电机；
4. 永磁体和绕组均置于定子，冷却容易；
5. 采用集中绕组，可缩短绕组端部长度，电机结构紧凑；
6. 易于改装成混合励磁型无刷电机结构。



### 报告提纲

11

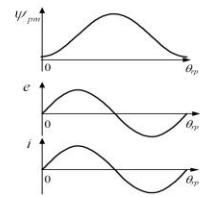
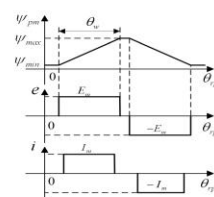


- ❖ 背景-定子永磁型电机的提出
- ❖ 定子永磁电机结构和工作原理
- ❖ 磁通控制方法
- ❖ 初级永磁直线电机
- ❖ 对永磁材料的需求

### 电机结构和工作原理

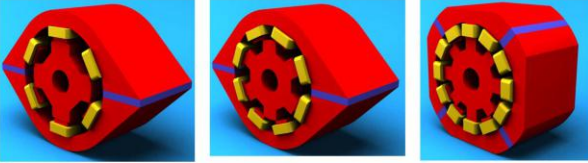
12

#### 双凸极电机 (DSPM电机) 工作原理



### 电机结构和工作原理 13

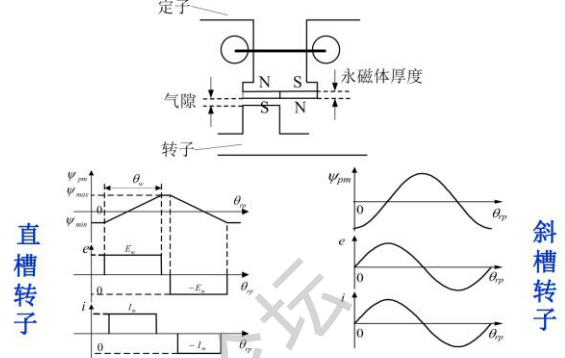
➤ DSPM电机的其他定子齿槽配合方式



6/4极DSPM电机      8/6极DSPM电机      12/8极DSPM电机

### 电机结构和工作原理 14

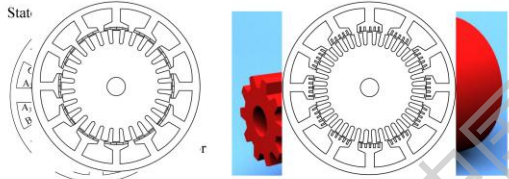
➤ 磁通反向永磁电机（FRPM电机）的运行原理



直槽转子      斜槽转子

### 电机结构和工作原理 15

➤ 磁通反向永磁电机（FRPM电机）的运行原理



定子表贴式      定子内嵌式  
12/10极FRPM电机结构  
多极式FRPM电机

### 电机结构和工作原理 16

➤ 磁通切换永磁电机（FSPM电机）的运行原理



12/10极FSPM电机      定子永磁型电机

### 电机结构和工作原理 17

➤ FSPM电机的其他定子极数配合方式



12/14极FSPM电机      6/5极FSPM电机



### 电机结构和工作原理 18

➤ FSPM电机的绕组形式



全绕组      交替绕组1  
交替绕组2      交替绕组3

### 电机结构和工作原理

19

#### 定子永磁型电机主要特性比较

电机结构	DSPM	FRPM	FSPM
转矩产生机理	定子恒定励磁经转子凸极调制而产生交变磁场，产生转矩；平均磁阻转矩可忽略不计		
定子	凸极铁心及永磁体和绕组		
转子	凸极铁心		
绕组	集中绕组		
永磁体位置	定子轭	定子齿表	定子齿内
磁体用量	少	中等	多
磁链极性	单极性	双极性	双极性
电动势	非正弦，正负不对称	非正弦，正负对称	正弦，正负对称
转矩密度	低	中	高
适宜控制模式	BLDC	BLDC	BLAC



### 报告提纲

20



- ❖ 背景-定子永磁型电机的提出
- ❖ 定子永磁电机结构和工作原理
- ❖ 磁通控制方法
- ❖ 初级永磁直线电机
- ❖ 对永磁材料的需求

### 磁通控制方法

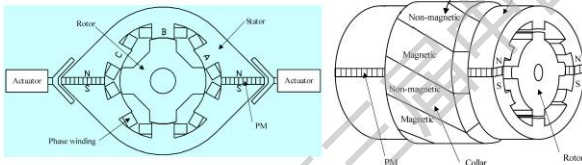
21

#### 纯永磁电机的不足：

- 磁通不可控
- 调速范围窄
- 弱磁运行时效率低

转子永磁电机和定子永磁电机共有的问题

#### 机械式磁通控制

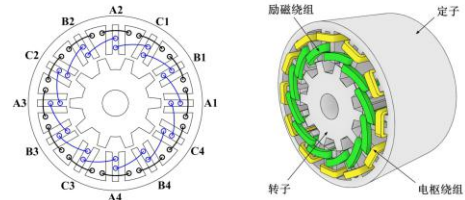


### 磁通控制方法

22

#### > 电励磁结构

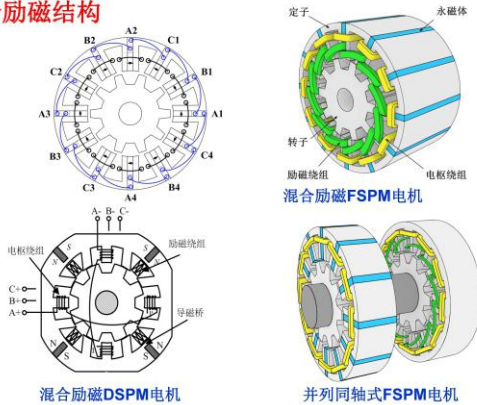
##### 电励磁FSPM电机



### 磁通控制方法

23

#### > 混合励磁结构

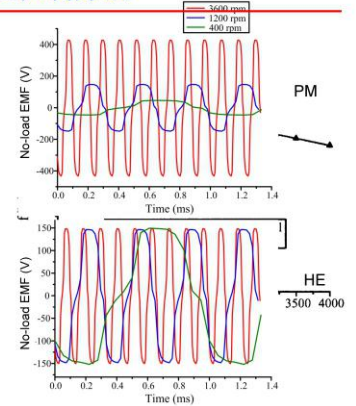


### 磁通控制方法

24

#### > 混合励磁结构

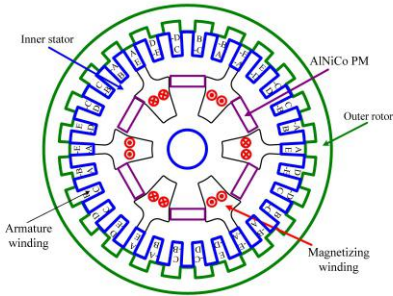
- 增磁，产生大的起动转矩
- 弱磁，扩大调速范围
- 在线效率优化，提高能量效率



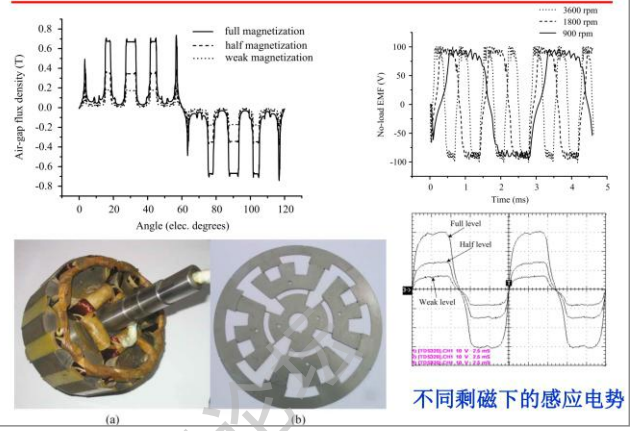
磁通控制方法 25

➤ 磁通记忆电机(Memory Motor Drive)

- 在线改变永磁体磁化水平
- 加入短时脉冲电流而不是连续直流
- 励磁损耗可忽略
- 既可弱磁，也可增磁

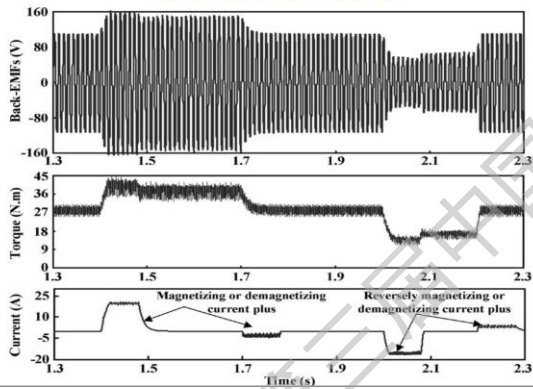


磁通控制方法 26



磁通控制方法 27

记忆电机的控制效果



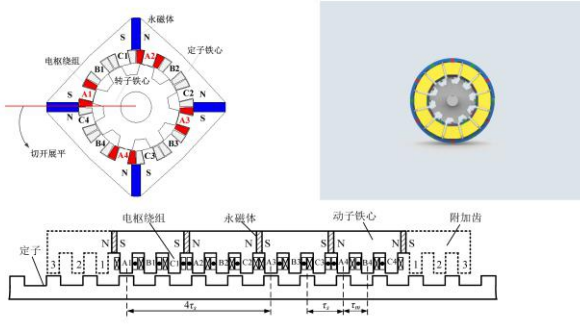
报告提纲 28

- ❖ 背景-定子永磁型电机的提出
- ❖ 定子永产电机结构和工作原理
- ❖ 磁通控制方法
- ❖ 初级永磁直线电机
- ❖ 对永磁材料的需求

初级永磁直线电机 29

➤ 直线电机结构

将旋转型定子永磁电机展开，就得到所谓的初级永磁直线电机



初级永磁直线电机-轨道交通 30

**直驱优点**

- ◆ 爬坡强、施工成本低；
- ◆ 广州地铁用直线电机；

**缺点**

- ◆ 效率低；
- ◆ 功率因数低；

**缺点**

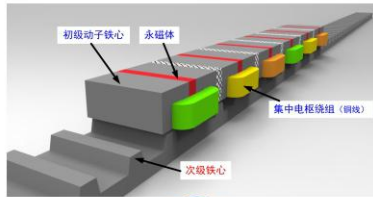
- ◆ 沿轨道铺设永磁体，(成本高、维护不便)；
- ◆ 沿轨道铺设位置传感器 (成本高、可靠性低)

传统直线电机在长距离直驱场合存在高性能和高成本冲突

### 初级永磁直线电机-轨道交通 31

提出：模块化互补型初级永磁型直线电机，解决长距离驱动系统中传统直线电机高效率 and 低成本无法兼顾的问题。

初级永磁直线电机



优点：

- 结构简单
- 成本低
- 效率高
- 功率因数高

高效率 冲突 低成本

### 初级永磁直线电机-轨道交通 32

#### 广州地铁四号线直线感应电机原材料成本

材料	重量 (kg)	成本(美元)
每台电机初级硅钢片	337.3	240.2
每台电机绕组	340	2222.7
每台电机初级总量	641.3	2462.9
每米次级铝心	5.3	11
每米次级铁心 (低碳钢)	55.3	4
每米次级总量	60.6	15
四号线240台电机总的初级成本	---	591,096
四号线来回共120km电机次级总成本	---	1,803,053

每天耗电约为448,786kWh

### 初级永磁直线电机-轨道交通 33

#### 新型磁通切换直线电机原材料成本(基于广州地铁四号线)

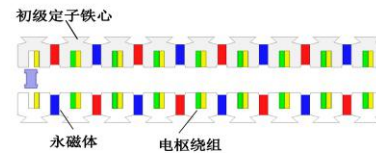
材料	重量 (kg)	成本(美元)
每台电机初级硅钢片	347.1	198.4
每台电机绕组	69	438.9
永磁体	122.2	2510.6
每台电机总初级	538.3	3147.8
每米次级硅钢片	101.8	72.4
四号线240台电机总的初级成本	---	755,485
四号线来回共120km电机次级总成本 (硅钢片)	---	8,692,799

如次级为硅钢片：采用新型电机，效率高达96%，每日可省电1.34万美元，527天收回多出的电机成本！（未考虑变频器节省的成本）

### 初级永磁直线电机-电磁弹射 34

提出双边次级无轭部初级永磁电机，解决针对短距离驱动系统中高速和高可靠无法兼顾的问题。

双边次级无轭部

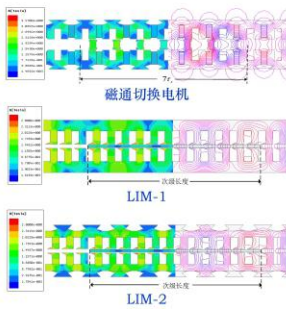


优点：

- 结构简单
- 可靠性高
- 推力密度大
- 负载能力强

高速度 冲突 高可靠

### 初级永磁直线电机-电磁弹射 35

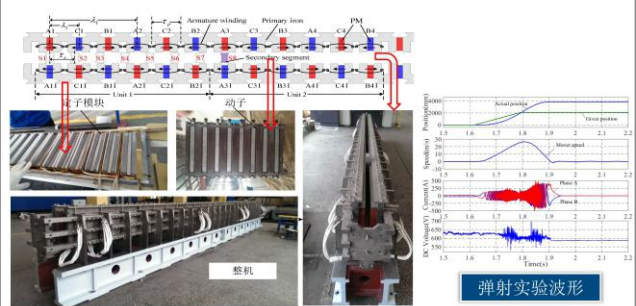


参数	磁通切换电机	LIM-1	LIM-2
速度 (m/s)	30	30	30
工作频率 (Hz)	500	150	150
电流峰值 (A)	1500	1500	1500
电压峰值 (V)	307	632	603
推力平均值 (kN)	8.32	8.15	8.15
推力波动 (kN)	0.89	2.76	2.32
电机总质量 (kg)	876.3	1023.1	893.4
效率 (%)	89.4	69.1	66.7
功率因数	0.415	0.249	0.270

- 磁通切换电机反电势接近正弦，推力大，推力波动小；
- 磁通切换电机总质量最小，所需的铁心量、铜线量均比感应电机小；
- 磁通切换电机损耗和铁耗均小于感应电机，效率和功率因数较高；

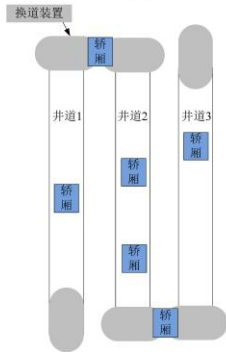
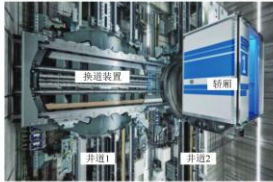
### 初级永磁直线电机-电磁弹射 36

#### 高速电磁弹射系统 (30m/s, 8300N, 5m)



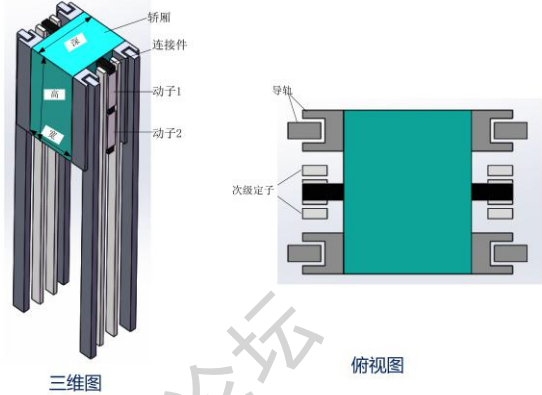
### 初级永磁直线电机-无绳电梯 37

德国蒂森克虏伯公司研制的无绳电梯——MULTI系统及其主要参数



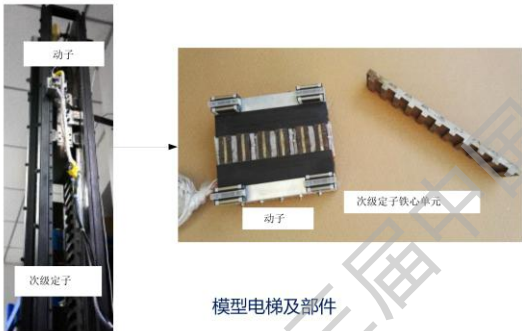
参数	数值
井道	2条运行井道, 1条备用井道
轿厢自重与载重	1680 kg
行程	80 m
额定速度	5-6 m/s

### 初级永磁直线电机-无绳电梯 38



### 初级永磁直线电机-无绳电梯 39

加工了一台 $\tau_m/\tau_s=6.5/6$ 的MTYLFSPM电机样机



### 报告提纲

40



- ❖ 背景-定子永磁型电机的提出
- ❖ 定子永产电机结构和工作原理
- ❖ 磁通控制方法
- ❖ 初级永磁直线电机
- ❖ 对永磁材料的需求

### 电机对永磁材料的需求 41

- 高工作温度
- 低温度系数
- 在工作温度下具有线性退磁曲线
- 高电阻率
- 低成本

一代永磁材料，造就一代永磁电机！

第四代稀土永磁材料路在何方？期盼中！

42

敬请批评指正！



程明  
东南大学电气工程学院  
地址：南京市四牌楼2号  
电话：025-83794152, 13701402059  
E-mail: mcheng@seu.edu.cn



## 黄守道

教授

博导

湖南大学电气与信息工程学院

### 报告主题

永磁变速恒频发电关键技术及其应用

### 简介

现任湖南大学电气与信息工程学院党委书记、享受国务院政府特殊津贴专家、国家重点研发计划项目负责人、岳麓电力传动与新型发电技术重点实验室主任、湖南大学“岳麓学者”特聘教授；兼任中国磁力材料与设备标准化工作组主任委员、中国电工技术学会常务理事、IEEE高级会员、湖南电工技术学会理事长、湖南省可再生能源学会会长等学术团体职务。

黄守道教授长期从事永磁直驱风力发电技术、特种电机设计及其控制等方向的研究，研究成果已得到应用广泛，经济与社会效益显著。已主持了国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重点项目、国家国际科技合作重点专项、国家科技支撑计划项目、军品配套、国防预研、企业委托课题等50余项。已获授权国家发明专利30余项，出版著作4部、发表高水平学术论文100多篇。获国家科技奖励5项、省部级科技奖励10余项，其中2019年获国家技术发明二等奖（排名第1）、湖南省首届“优秀研究生导师”称号。

### 报告摘要

新能源发电是构建清洁低碳、安全高效能源体系的重要举措，永磁变速恒频发电技术是新能源高效利用的最佳技术路线。报告主要介绍永磁变速恒频发电系统的运行特性及面临的技术挑战，重点讲解永磁材料应用、磁路结构优化设计、系统一体化控制技术 etc 永磁变速恒频发电系统关键共性技术。详细讲述永磁变速恒频发电系统在风力发电、中低温余热发电、生态水利发电等三个领域的典型应用及技术优势。



## 曲荣海

教授

博导

华中科技大学电气与电子工程学院

### 报告主题

高转矩密度电机的创新与发展

### 简介

IEEE Fellow（电气与电子工程师协会会员），IEEE工业应用协会武汉分会主席，IEEE多个期刊编辑，IEEE工业应用协会2019-2021年度杰出讲师，2019年度杰出会员奖获得者，同时也是国际电机会议（ICEM）的董事会成员。

拥有清华大学电机工程学士、硕士学位和美国威斯康辛大学麦迪逊分校博士学位。曾任美国通用电气公司全球研发中心总部高级专业工程师，获GE技术成就奖、杰出团队奖和管理奖等11项次奖励。2010年加入华中科技大学，曾任电气学院副院长，现任华中科技大学学位评定委员会委员，电气学院学位审议委员会主任委员，强电磁工程与新技术国家重点实验室副主任，新型电机技术国家地方联合工程研究中心主任及专家委员会副主任委员，创新电机技术研究中心主任。

发表SCI、EI核心收录论文300余篇，其中SCI收录100余篇，EI收录200余篇，其中12篇获IEEE最佳论文奖；授权/申请美国、欧洲和中国发明专利100余项。曾获得中国产学研合作创新成果奖、湖北省科技进步一等奖、内瓦国际发明展金奖主席团特许嘉奖以及罗马尼亚科学技术学会颁发的特别奖等。



## 孙津济

研究员

博导

北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院

### 报告主题

磁悬浮高速永磁电机中磁性材料的设计

### 简介

孙津济主要从事磁轴承和电机的基础理论、关键技术及应用研究。围绕高分辨率对地观测卫星对于磁悬浮惯性执行机构的迫切需求，发明并提出了多种新型永磁偏置混合磁轴承结构与设计方法，定义了混合因子和耦合度，攻克了永磁偏置混合磁轴承中永磁电磁的精确配比问题，实现了磁轴承的低功耗和高精度。作为技术骨干，参与研制成功我国首台五自由度磁悬浮飞轮型号产品，并在我国第一颗新技术试验卫星“实践九号”搭载并在轨试验成功，至今仍连续在轨运行；参与研制成功小型单框架磁悬浮控制力矩陀螺、中型单框架磁悬浮控制力矩陀螺、大型单框架磁悬浮控制力矩陀螺，以及小型双框架磁悬浮控制力矩陀螺工程样机，目前正在与航天院所合作进行成果转化。相关成果发表SCI学术论文33篇，出版专著1部，获授权发明专利38件，获国家技术发明一等奖（排名3）、第十七届全国发明展览会金奖、以及当届展览会评出的唯一的世界知识产权组织（WIPO）设立的杰出青年发明者奖、国家技术发明二等奖（排名5）和第十九届中国专利金奖（排名2），以及第十六届中国青年科技奖特别奖。

北京航空航天大学  
BEIHANG UNIVERSITY

## 磁悬浮电机技术及应用

汇报人：孙津济 教授

北京航空航天大学  
惯性技术国家级重点实验室  
北京市高速磁悬浮电机技术及应用工程技术研究中心

2020年12月18日

## 汇报内容

- 一、航天技术自主创新研究成果
- 二、成果转化—高速高能量密度电机研制进展
- 三、磁悬浮分子泵等高端仪器研制进展

### 背景及意义

- 我国高分对地观测现有水平：已实现分米级分辨率
- 新一代超高分辨率观测卫星：超稳、超静卫星平台
  - 姿态稳定度要求： $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ }^\circ/\text{s}$
  - 载荷处振动量级要求： $< 0.03 \text{ m/s}^2$

瞄准国际最高水平，比现有指标提高1个数量级以上！

超高分卫星 天文观测卫星 星间激光通信 空间攻防

挑战：如何实现分辨率从分米级到厘米级？

### 如何解决卫星平台高精度姿态机动控制？

惯性动量轮 (卫星姿态稳定控制必不可少的惯性执行机构)

基于动量交换原理，通过改变角动量的大小(转速的快慢) → 输出高精度力矩

$M = dH / dt = Jd\omega / dt$



当前力矩精度水平： $10^{-3} \text{ Nm}$  → 双超平台： $10^{-5} \text{ Nm}$

控制力矩陀螺 (卫星姿态机动控制必不可少的惯性执行机构)

基于动量交换原理，通过改变角动量的方向(框架转动改变转轴方向) → 输出大力矩

$M = H \times \omega$  (恒速：30000rpm)

### 惯性执行机构力矩精度瓶颈：转子支承方式

机械轴承惯性执行机构	磁悬浮惯性执行机构
 <p>支承特点：刚性，有接触摩擦</p> <p>力矩精度：<math>10^{-3} \text{ Nm}</math> 量级</p> <p>振动：产生不平衡振动</p> <p>转速：3000-5000 r/min</p> <p>结构特点：简单</p>	 <p>支承特点：非接触、无摩擦和润滑</p> <p>力矩精度：<math>10^{-5} \text{ Nm}</math> 量级</p> <p>振动：主动控制，可抑制振动</p> <p>转速：30000-50000 r/min (提升10倍)</p> <p>结构特点：复杂、难度大</p>

磁悬浮轴承是惯性执行机构理想支承方式！

### 北航磁悬浮惯性执行机构进展

#### (1) 低功耗混合磁悬浮轴承结构及设计方法

- 一种永磁偏置内转子径向磁轴承 [P]. ZL200710065049.5
- 一种双永磁体内转子永磁偏置径向磁轴承 [P]. ZL201010256248.6
- 一种具有冗余结构的永磁偏置内转子径向磁轴承 [P]. ZL200710063270.7

“三明治”结构

永磁体：功耗低

气隙优化：大力矩、高刚度

磁路优化：耦合小、精度高

磁轴承定子 磁轴承转子

**北航磁悬浮惯性执行机构进展** 7

**(2) 磁悬浮高速扁平转子系统的高稳定度控制方法**

**【难题】强陀螺效应扁平转子的稳定裕度，国际上缺乏定量描述**

**独创思路**

**复系数频域分析法：多变量→单变量**

临界转速：
$$\Omega_{n\pm 0} = \frac{J_r \omega_{n\pm 0} + 2k_f l_m^2 - 2l_m l_k k_i i_{n\pm 0}}{J_z}$$

幅值裕度：
$$h_n = \frac{J_r \omega_{n-0}^2 - J_z \Omega \omega_{n-0} + 2k_f l_m^2}{2l_m l_k k_i i_{n-0}}$$

相位裕度：
$$\gamma_n = \angle G_n(j\omega_c)$$

1. 一种设计磁悬浮高速转子系统动交叉参数的方法[P]. ZL200710179722.8  
2. 一种章动频率自动跟踪的高通数字滤波方法[P]. ZL200710064318.6

**首次提出强陀螺效应转子涡动模态稳定判据**

**北航磁悬浮惯性执行机构进展** 8

**(3) 提出了基于多向磁体阵列的空心杯高速电机结构**

**【难题】空间应用下，高速电机旋转功耗过大问题？**

□通过设计无定子铁心空心杯电机结构，电机永磁体与转子铁心无相对运动，实现低功耗。






多向磁体阵列电磁设计    空心杯定子    高速电机驱动系统

专利：200510111726.7、200410101898.8、200510011973.6




**北航磁悬浮惯性执行机构进展—磁悬浮惯性动量轮** 9

□研制成功系列化磁悬浮动量轮和反作用飞轮（2类6种）





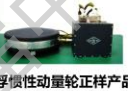


25Nms全主动(5DOF) (2007年2月)    50Nms全主动(5DOF) (2007年5月)    15Nms全主动(型号) (2011年3月)

15Nms主被动(4DOF) (2014年12月)    10Nms主被动(2DOF) (2012年11月)    68Nms主被动(4DOF) (2012年4月)

□国际第一台五自由度全主动磁悬浮惯性动量轮型号产品

太原卫星发射中心    “实践九号”新技术试验卫星    磁悬浮惯性动量轮正样产品

与国际上最好（法国）相比，功耗降低了52.6%，5自由度全主动控制，代表了国际最高水平

**北航磁悬浮惯性执行机构进展—磁悬浮控制力矩陀螺** 10

□研制成功系列化单框架磁悬浮控制力矩陀螺（3种）





小型 (2010年2月)    中型 (2011年5月)    大型 (2012年1月)

角动量：20Nms 力矩：3.3Nm 带宽：10Hz 转速：30000r/min	角动量：200Nms 力矩：33Nm 带宽：5Hz 转速：20000r/min	角动量：1000Nms 力矩：200Nm 带宽：3Hz 转速：15240r/min
---	--	--

□研制成功系列化双框架磁悬浮控制力矩陀螺（2类4种）






小型 (20Nms/3Nm)    中型 (50Nms/10Nm)    大型 (200Nms/30Nm)    主被动 (10Nms/3Nm)

**北航磁悬浮惯性执行机构—国家级成果奖励** 11

序号	获奖项目名称	获奖等级	年度	获奖人
1	卫星新型姿控储能两用飞轮技术	国家技术发明一等奖	2007	房建成
2	新型磁悬浮轴承技术及应用	国家技术发明二等奖	2017	刘刚
3	一种小体积低功耗永磁偏置外转子径向磁轴承	第十九届中国专利金奖	2017	房建成

**为提升我国新一代高分辨率对地观测系统水平提供重要技术保障！**

**汇报内容** 12

一、航天技术自主创新研究成果

二、成果转化—高速高能量密度电机研制进展

三、磁悬浮分子泵等高端仪器研制进展

13 成果转化—高速高能量密度磁悬浮电机研制进展

(一) 我国对高速磁悬浮电机的迫切需求

(二) 国外高速磁悬浮电机技术及应用研究状况

(三) 北航高速高能量密度磁悬浮电机研制进展

14 (一) 我国对高速磁悬浮电机的迫切需求

□ 提高电动机能效水平对我国当前的节能减排工作具有重要意义

- ▶ 全国总用电量中，工业用电量占75%；
- ▶ 工业用电量中，电动机的用电量占70%。

□ 提高电动机能效水平实现节能减排目标的紧迫性

低速电机 66.7% 高速电机 33.3%

高压鼓风机、压缩机用高速电机 占全国电机总消耗的比例

高压鼓风机 压缩机

电动机用量大，用电多，采用磁悬浮高速永磁电机，节能效果显著

15 (一) 我国对高速磁悬浮电机的迫切需求

■ 高速磁悬浮电机技术：通过磁悬浮轴承实现高速电机超高速、无接触稳定运转。

我国传统旋转机械的瓶颈	国际的前沿技术
最高转速：3000-5000r/min	最高转速：30000-50000r/min
有振动：产生不平衡振动	微振动：在线动平衡/主动控制
寿命：受限于轴承接触磨损	寿命：可实现高可靠、长寿命
润滑：需专门装置进行润滑	润滑：无接触、无需润滑
传动（成套设备）：需增速箱	传动：直驱、无需传动机构

高速磁悬浮电机技术在传统高速动力机械装备中具有重要的应用价值！

16 成果转化—高速高能量密度磁悬浮电机研制进展

(一) 我国对高速磁悬浮电机的迫切需求

(二) 国外高速磁悬浮电机技术及应用研究状况

(三) 北航高速高能量密度磁悬浮电机研制进展

17 (二) 国外高速磁悬浮电机技术及应用研究状况

■ 国外研究进展——磁悬浮高速永磁电机典型产品

(1) 美国Synchrony公司的高速磁悬浮永磁电机产品（2000年）

额定功率：100kW  
重量：100kg  
最高转速：60000r/min  
磁轴承类型：纯电磁轴承  
节能：38.5%

(2) 瑞典ABB公司的磁悬浮高速永磁电机产品（2005年）

额定功率：100kW  
重量：70kg  
最高转速：70000r/min  
磁轴承类型：纯电磁轴承  
节能：40.5%

18 (二) 国外高速磁悬浮电机技术及应用研究状况

■ 国外研究进展——磁悬浮压缩机产品

(3) 丹麦Danfoss公司的磁悬浮压缩机产品(2006年)

额定功率：55kW  
重量：传统压缩机重量的1/5  
最高转速：48000r/min  
磁轴承类型：混合磁悬浮轴承  
节能：35%

(4) 瑞典SKF公司的磁悬浮轴承技术及在节能装备中的应用

额定功率：55kW  
重量：72Kg  
最高转速：24000r/min  
磁轴承类型：纯电磁轴承  
节能：32.5%

瑞典SKF公司基于磁悬浮高速电机的新型制冷压缩机（2006年）

**(二) 国外高速磁悬浮电机技术及应用研究状况** 19

■国外研究进展——磁悬浮高压鼓风机产品

KTurbo的磁悬浮高压鼓风机与罗茨的机械轴承鼓风机节能效果比较 (韩国节能协会行业报告)

使用企业	罗茨鼓风机 (机械轴承) (效率低于60%)	KTurbo (磁悬浮支承) (效率高于85%)	节能
DAESANG (韩国食品厂)	319kW	204kW	35%
Nisshinbo (日本纺织厂)	185kW	112kW	40%
Sungshin (韩国水泥厂)	125.6kW	78kW	38%
POSCO (韩国钢铁厂)	75.7kW	43.5kW	43%
Lafarge Halla (法国水泥厂)	62.4kW	40.5kW	35%

**成果转化—高速高能量密度磁悬浮电机研制进展** 20

(一) 我国对高速磁悬浮电机的迫切需求

(二) 国外高速磁悬浮电机技术及应用研究状况

(三) 北航高速高能量密度磁悬浮电机研制进展

**(三) 北航高速高能量密度磁悬浮电机研制进展** 21

□习近平视察“惯性技术”国家重点实验室



习近平视察实验室 (2009.05)

2009年5月6日, 习近平考察了北航“惯性技术”国家级重点实验室和国家技术发明一等奖的成果, 高度评价了所取得的自主创新研究成果, 并指示实现技术成果的军转民, 服务国民经济建设。

**国家战略, 军民融合**

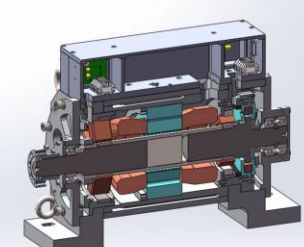

**(三) 北航高速高能量密度磁悬浮电机研制进展** 22

关键技术1、高速高能量密度磁悬浮电机总体结构及优化设计

(1) 超高速磁悬浮电机结构集成化、模块化设计

**结构特点**

- 基于实心永磁体电机转子组件的模块化技术
- 轴径向一体化三自由度低功耗磁轴承技术

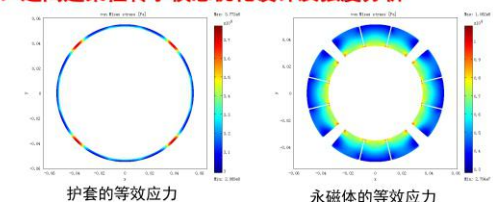



磁悬浮永磁电机结构

**(三) 北航高速高能量密度磁悬浮电机研制进展** 23

关键技术1、高速高能量密度磁悬浮电机总体结构及优化设计

(2) 超高速柔性转子模态优化设计及强度分析



315kW/20000rpm	电机转子护套	电机转子永磁体
计算值(MPa)	298.9~377.2	27.94~108.2
屈服强度(MPa)	1330	800
安全系数	3.5	7.4

实验结果: 30000r/min条件下可靠运行。

**(三) 北航高速高能量密度磁悬浮电机研制进展** 24

关键技术1、高速高能量密度磁悬浮电机总体结构及优化设计

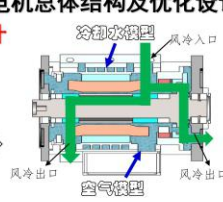
(3) 基于流固耦合的高速电机散热设计

通过优化水道设计风路来解决散热问题。

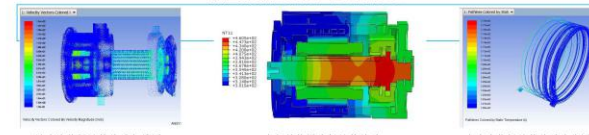
高能量密度 → 发热量大  
315kW电机功率密度1kW/kg  
与国际先进水平持平

磁悬浮支撑 → 散热困难

散热优化



流固耦合计算温度场结果



风冷流体场计算结果矢量图      电机结构温度场计算结果      水冷流体场计算结果迹线图

**(三) 北航高速高能密度磁悬浮电机研制进展** 25

关键技术2、大功率高速永磁电机设计及其驱动技术

**(1) 超高速高效永磁电机电磁设计**

针对超高速高效永磁电机 (66000rpm), 采用2极实心永磁体结构、有齿槽定子。

高强度不导磁合金钢护套 实心永磁体转子 24槽2极定子 电机定子铁心

经两台电机对拖实验验证, 在额定功率下该电机定子最高温度为120°C。

**(三) 北航高速高能密度磁悬浮电机研制进展** 26

关键技术2、大功率高速永磁电机设计及其驱动技术

**(2) 大功率高速永磁电机高效驱动控制技术**

大功率高速电机控制需要解决的问题:

- 启动电流大、损耗高
- 转速不稳定
- 电机安装位置传感器引起电机模态改变

实现目标:

- 小电流启动、低损耗运行
- 高速稳速运行
- 无位置传感器控制

控制系统框图

控制系统试验台

**(三) 北航高速高能密度磁悬浮电机研制进展** 27

□ 试验系统—30kW,60000r/min超高速磁悬浮压缩机

压缩机测试系统 电机本体 超高速电机轴 超高速离心叶轮

**国内转速最高的磁悬浮压缩实验平台(30kW,66000r/min)**

□ 试验系统—315kW,30000r/min磁悬浮鼓风机

**国内功率最大的磁悬浮鼓风机实验平台(315kW,30000r/min)**

**汇报内容** 28

一、航天技术自主创新研究成果

二、成果转化—高速高能密度电机研制进展

三、磁悬浮分子泵等高端仪器研制进展

**(一) 超高真空环境需求背景** 29

□ 超高真空系统是国防核心器件、军用高端工艺装备、尖端科学仪器研制和生产的**关键仪器设备**, 国外对我国技术封锁。

**高真空:  $10^{-2} \sim 10^{-5}$  Pa; 超高真空:  $10^{-6} \sim 10^{-10}$  Pa**

□ 分子泵是利用高速旋转的转子把动量传递给气体分子, 使之获得定向速度, 从而被压缩、被驱向排气口后为前级抽走的一种真空泵, 是超高真空系统的“心脏”。

**(一) 超高真空环境需求背景** 30

□ 急需应用领域: **电子对抗、尖端科学研究领域**

	最大功率
国外	600 W
中国	30 W

海、陆、空用超大功率激光武器 欧洲最先进的X射线激光器

**超高真空环境是大功率半导体激光器研制的必备条件!**

□ 急需应用领域: **高能物理仪器装备及工艺研制**

	主流工艺	最高水平	单片集成晶体管数量
国外	45nm	10nm	80亿
中国	180nm	28nm	<1亿

粒子加速器 高灵敏度红外探测器 高端军用集成电路

**无油、超高真空是研制超大规模集成电路的必备条件!**

□ 急需应用领域: **高端精密测量设备研制**

	最高水平
国外	横向0.1nm; 垂直7.6pm
中国	横向0.1nm; 垂直0.01nm

高精度计时原子钟 高精度纳米级表面测量

**极微振动真空环境是提高扫描隧道显微镜等高端检测仪器必备条件!**

### (一) 超高真空环境需求背景

**口国内外真空分子泵现状和发展趋势**  
1917年德国发明了并研制了第一台分子泵:  $4 \times 10^{-3}$  Pa, 1.5L/s  
1958年德国PFEIFFER公司第一次提出了涡轮分子泵:  $10^{-7}$  Pa  
机械分子泵快速发展, **极限真空已无法突破**  
制约原因: **机械轴承(有油、转速受限)!**  
1976年德国莱宝公司研制完全无接触的**磁悬浮涡轮分子泵**  
目前: 日本、法国等 超高真空磁悬浮分子泵:  $10^{-6}$  -  $10^{-8}$  Pa, 4300L/s

**超高真空、大抽速是磁悬浮分子泵技术发展的趋势!**

**口国际禁运** 美国商业部工业安全局 出口管制清单 (2017.12.27)

Technical Note 2 to 2B350.g:  
...vacuum pumps with manufacturer's specified maximum flow-rate greater than 5m<sup>3</sup>/hour ( $\geq 1.4$ L/s) ...

**必须自主研发, 打破国外禁运, 填补国内空白**

### (二) 超高真空大抽速磁悬浮分子泵关键技术

**(1) 提出了八级变截面复合转子结构 (ZL201310195542.4)**

**发明内容:** 首创了多级涡轮叶片与筒式转子牵引级螺旋槽的**一体化结构**, 颠覆了传统思路, 发明了基于多凸结构**的八级复合转子**。

**解决了涡轮级与牵引级匹配性, 实现大抽速**

### (二) 超高真空大抽速磁悬浮分子泵关键技术

**(2) 提出了基于偏置/控制绕组分离的径向磁轴承设计方法**

论文: Y. Le and K. Wang, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 4435(3):2061-2072.

**复磁阻—表征涡流效应**

$$R_s^{dy} = \frac{l_{Fe}}{\mu_{rs} A_{Fe}}$$

$$\mu_{rs}^{dy} = \mu_r \frac{\tanh\left(\sqrt{i\omega\sigma\mu_r} \frac{d}{2}\right)}{\sqrt{i\omega\sigma\mu_r} \frac{d}{2}}$$

**动态复磁阻磁路模型** **偏置/控制绕组分离高速径向磁轴承**

**口 阻尼系数  $1.75 \times 10^4$  N·s/m, 提高37% → 提高高频阻尼能力。**  
**口 电感仅为15.4mH, 为优化前的10% → 提高动态响应。**

**阻尼能力提高37%, 解决分子泵高频动态响应难题**

### (二) 超高真空大抽速磁悬浮分子泵关键技术

**(3) 提出了转子不平衡量辨识与振动抑制控制方法**

**难题:** 如何实现磁悬浮分子泵同频振动力高精度抑制?

**解决方案:** 采用**双闭环回路**的同频轴承力抑制策略, 克服系统**稳定性及功放带宽**的影响, 实现泵体的**极微振动控制**。

第三方(航天514所)测试

**大抽速分子泵DN400CF型:  $< 0.012 \mu\text{m}$**

**发明专利: ZL201310367769.2**

**第三方测试: 泵体振动位移优于国际最好水平**

### (二) 超高真空大抽速磁悬浮分子泵关键技术

**(4) 能量回馈电力失效补偿的高可靠电机控制方法**

**难题:** 如何在**外部电力失效**时, 提高能量转换效率, 降低**超高速转子直接跌落在保护轴承**, 减少损坏?

**口 提出并发明了基于主动反电动势控制的新型电力失效补偿方法, 降低了跌落的转速, 提高了系统可靠性和能量转换效率。**

**电路拓扑结构**

跌落转速从 8000r/min 降低至 4700r/min

**能量转换效率提高7%, 跌落转速降低了41%**

### (三) 产品研制及应用情况

**口 与国外同类产品性能对比——大抽速DN400CF型**

生产厂商	国外最好产品				
	普发 (德国)	Edwards (英国)	莱宝 (德国)	岛津 (日本)	本项目 (中国)
型号	ATH 3204	STPXA4503C	MAGW3200	TMP-X3405	DN400CF
抽速 (L/s)	3050	4300	3200	3200	4370
极限真空度 (Pa)	$6 \times 10^{-7}$	$10^{-7}$ 量级	$< 1 \times 10^{-6}$	$10^{-7}$ 量级	$4.9 \times 10^{-8}$
压缩比	$1 \times 10^8$	$5 \times 10^8$	$1 \times 10^8$	$2 \times 10^8$	$2.6 \times 10^8$
振动 ( $\mu\text{m}$ )	0.02	0.02	0.02	0.05	0.012

**口 注: 国内大抽速磁悬浮分子泵 (未见报道)**

**抽速、真空度和振动指标优于国际同类产品**

(三) 产品研制及应用情况 37

与国外同类产品性能对比—小抽速DN100CF型  
国外最好产品

生产厂家	普发 (德国)	Edwards (英国)	莱宝 (德国)	岛津 (日本)	本项目 (中国)
型号	HiPace300	STPH301C	MAGW300	TMP300	DN100
抽速(L/s)	255	300	300	280	308
极限真空度(Pa)	$1.0 \times 10^{-7}$	$10^{-7}$ 量级	$10^{-8}$ 量级	$10^{-8}$ 量级	$8.2 \times 10^{-8}$
压缩比	$1.0 \times 10^{11}$	$>10^8$	$2.0 \times 10^{10}$	$1.0 \times 10^9$	$7.5 \times 10^8$
振动 ( $\mu\text{m}$ )	0.01	0.01	0.01	0.01	0.008
典型产品					

注：国内小抽速磁悬浮分子泵 (未见报道)

**抽速和振动指标优于国际同类产品**

(三) 产品研制及应用情况 38

在雷达TR组件真空焊接设备中的应用    在半导体激光器真空镀膜设备中的应用

中国科学院电子学研究所  
IECAS Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences  
国家真空设备质量监督检验中心

中国科学院半导体研究所  
Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences

检测报告  
第三方测试报告

测试地点：高功率微波源与技术重点实验室    测试地点：中国科学院半导体所集成技术中心  
测试时间：2016.10-2016.12    测试时间：2016.8-2016.11  
应用设备：雷达TR组件真空焊接设备    应用设备：半导体激光器真空镀膜设备  
测试项目：极限真空    测试项目：抽气时间、极限真空度

A类设备指标	$2 \times 10^{-3} \text{Pa}$	A类设备指标	20分钟抽至 $2 \times 10^{-3} \text{Pa}$
本项目	$7.8 \times 10^{-5} \text{Pa}$	本项目	15分钟抽至 $5 \times 10^{-4} \text{Pa}$

总结 39

- 研制成功大、中、小三类抽速超高真空磁悬浮分子泵，指标全部达到立项批复的要求。
- 完成了在国防核心器件、尖端科学仪器及工艺设备等急需领域的六家单位的示范应用。
- 强化工程化与质量管理控制，建成磁悬浮分子泵生产基地，实现了量产，已销售213台。

**填补国内空白，打破国外技术封锁  
显著提升了我国高端科学仪器设备技术水平！**

北京航空航天大学  
BEIHANG UNIVERSITY

**磁悬浮电机技术及应用**

2020年12月



## 张 驰

研究员

博导

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

### 报告主题

协作机器人关节永磁力矩电机及其驱动控制技术

### 简 介

现任中国科学院宁波材料技术与工程研究所工会主席、所属先进制造技术所副所长、精密运动与先进机器人技术团队负责人，浙江省机器人与智能制造装备重点实验室副主任，浙江省智能装备设计院副院长；中科院“百人计划”、浙江省“万人计划”、浙江省“钱江人才计划”入选者，中科院战略新兴产业领域专家，宁波市“精密驱动控制技术科技创新团队”带头人；国际电气电子工程师学会(IEEE)高级会员，国际工程技术学会(IET)会员，英国皇家特许工程师(Chartered Engineer)，中国机械工程学会高级会员。

目前的主要研究方向为：精密运动控制技术、永磁电机设计及控制、宏微操作机器人、协作机器人技术等。主持国家重点研发计划、国家科技支撑计划、国家国际科技合作重大专项、国家自然科学基金浙江省两化融合联合基金等国家级项目5项；中科院先导专项等省部级项目（课题）8项；企业横向项目20多项。发表文章150多篇、撰写专著2部，申请专利187项，授权专利95项（其中发明专利37项）。获得获2018年中国产学研合作创新成果一等奖、2019年中国纺织工业技术发明二等奖、2015年中国专利优秀奖。

### 报告摘要

协作机器人是能人直接进行交互的机器人，具有轻量化、安全性高、柔顺性好、支持人机协作等优点，非常适合小批量多品种柔性生产和社会服务。协作机器人关节将永磁力矩电机、伺服驱动器、谐波减速器、制动器、传感器等部件集成于一体，结构紧凑、负载-自重比大，因此要求永磁力矩电机具有高力矩密度、低转矩脉动、高过载能力等性能。该报告主要介绍协作机器人关节永磁力矩电机的结构形式、永磁材料应用特点、电磁设计、伺服驱动等方面的内容。该报告还将对中科院宁波材料所精密驱动与先进机器人团队永磁电机方向的研究进展进行简要介绍。



## 岳明

教授

博导

北京工业大学先进材料研究院

### 报告主题

钕铁硼永磁材料方形度优化研究

### 简介

长期从事磁性材料和纳米材料的研究开发工作。目前开展的研究项目有纳米双相复合永磁材料、高温永磁材料、室温磁制冷材料、稀土纳米晶材料等。先后主持国家自然科学基金项目、国家高技术发展项目子课题、国家重点基础研究发展计划项目子课题、教育部重点基础研究项目、北京市自然科学基金重点及面上项目、教育部留学回国人员项目等20余项，其中国家自然科学基金面上项目4项，973、863子课题各2项。入选北京市“科技新星”、“优秀人才”和“北京高级专家数据库”。在国际会议上做特邀报告7次。2004年两次获得国内重要学术会议优秀论文奖。2006年和2008年两次获得北京工业大学优秀学术成果奖。2013年获得教育部技术发明奖。通过教育部科技成果鉴定三项。公开和授权国家发明专利30余项。发表SCI收录论文120余篇，其中60余篇发表在APL、JAP、PRB、Adv. Mater.、CRY.ENG.COMM.等国际材料物理领域的权威学术刊物。

# 钕铁硼永磁材料的方形度优化研究

岳明<sup>1\*</sup>, 李玉卿<sup>2</sup>, 刘卫强, 张东涛

<sup>1</sup>北京工业大学稀土新材料与新技术研究所, 北京市朝阳区平乐园100号, 100124

<sup>2</sup>教育部新型功能材料重点实验室, 北京市朝阳区平乐园100号, 100124

\*Email: yueming@bjut.edu.cn

技术磁化过程决定了磁性材料的性能优劣。建立磁性材料在技术磁化过程中的宏观磁化、反磁化行为和微观磁畴演化过程的关联关系, 有利于探明优化材料关键磁性能参量的有效途径, 继而基于此指导材料成分和结构的调控。

钕铁硼永磁是迄今为止磁性能最强的永磁材料, 不仅应用广泛, 而且对新能源汽车、风能发电等快速发展的绿色能源产业形成了关键支撑[1-2]。系统、深入的研究钕铁硼永磁的技术磁化过程, 对于提升其应用性能、拓宽其应用领域十分重要。

目前, 典型的钕铁硼永磁包括烧结钕铁硼永磁、粘接钕铁硼永磁、热压钕铁硼永磁等等。这些材料的化学成分和显微组织各具特征, 因此具有显著不同的技术磁化行为。对此, 本研究重点针对烧结钕铁硼永磁和热压钕铁硼永磁开展了宏观磁化行为和微观磁畴演化的研究(烧结钕铁硼磁畴演化示例如图1)。在探讨二者之间关联关系的基础上, 提出了通过优化材料成分和结构以提升其各项磁性能参量(包括剩磁、矫顽力、磁能积和退磁曲线方形度)的有效方案。

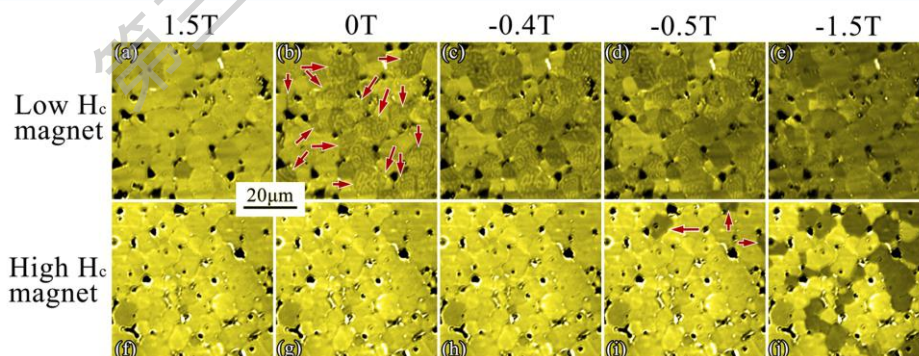


图1 晶界扩散前后烧结钕铁硼磁体磁畴反转过程对比

关键词: 钕铁硼永磁材料; 技术磁化过程; 磁畴演化; 成分及结构调控

参考文献

[1] Sagawa M, Fujimura S, Togawa N, Yamamoto H, and Matsuura Y. J. Appl. Phys. 1984, 55: 2083

[2] Gutfleisch O, Willard M, Brück E, et al. Adv. Mater. 2011, 23: 821



## 冯海波

副所长

教授级高级工程师

钢铁研究总院功能材料研究所

### 报告主题

高温时效钕钴永磁材料的组织与孪晶结构表征

### 简介

冯海波教授主要从事先进金属永磁材料的研究开发工作，研究领域包括：超高性能钕铁硼永磁材料及其制备技术、高性能钕钴永磁材料及器件的开发和应用等。研制的稀土永磁材料及器件成功应用于国防和尖端装备，开发的新型钕磁体、超高性能稀土永磁材料等新材料、新技术成功实现产业化。相关研究成果获国家科技进步二等奖和冶金科技进步一等奖，入选科技部中青年科技创新领军人才和国家高层次人才特殊支持计划领军人才。



## 陈仁杰

研究员

博导

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

### 报告主题

高性能稀土永磁材料研究进展

### 简介

中国科学院宁波材料技术与工程研究所研究员，中国电子学会应用磁学分会高级会员，中国材料研究学会青委会理事会理事。主要从事磁性材料科学研究与产业化技术的研究工作，重点开展烧结稀土永磁材料、热压/热变形稀土永磁体及纳米复合永磁材料的研究与产业化技术开发工作。作为项目组研究骨干参与国家863重大项目、科技部支撑计划、国家自然科学基金重点基金等国家重大科研项目。近年来作为负责人主持国家自然科学基金青年基金、国家科技重大专项子课题、宁波市国际合作项目，以及博世集团、韵升高科等国际知名企业委托的多项横向课题。申请国家发明专利20余项，申请国际发明专利3项，参与撰写专著2部，在Appl.Phys.Lett.、J.Appl.Phys.、J.Phys.D: Appl.Phys.等相关刊物发表学术论文近60篇，多次参与国内外同行的学术会议。

### 报告摘要

本报告简要分析了新兴应用领域对钕铁硼永磁材料的技术要求，统计分析了目前重稀土在钕铁硼中的使用情况；同时，报告介绍了近期在材料组织结构调控、晶界扩散、热压热变形等重稀土减量化技术的研究进展；最后，报告从材料设计的角度探讨了新型重稀土减量化的研究思路。



## 王君

总经理

工学博士

宁波赛晟新材料科技有限责任公司

### 简介

曾任合肥工业大学副教授、美国科罗拉多矿业大学高级访问学者、加拿大URS Flint、ASC公司研发工程师、生产经理等职。基于他在真空技术、PVD镀膜相关领域近20年的研究、教学及生产经验上，王君博士于2019年研发出用于稀土永磁体晶界扩散处理的三维磁控溅射技术及设备并成功推向市场，并于2020年创立宁波赛晟新材料科技有限责任公司致力于向宁波地区钕铁硼行业提供镉铽镀膜和设备服务。



## 黄焦宏

包钢集团公司首席技术专家  
包头稀土研究院教授级高工

### 报告主题

室温磁制冷材料及磁制冷机关键技术问题

### 简介

包钢集团公司首席技术专家，包头稀土研究院磁制冷团队负责人。主要从事稀土磁性功能材料及器件、稀土金属材料、稀土基磁制冷材料及磁制冷机的研究与开发工作。

近十年，主持承担国家级科研项目10项，省级及国内外横向项目20多项。获2016年度内蒙古科技进步奖一等奖1项，2017年度中国稀土学会和中国稀土行业协会的中国稀土科学技术奖一等奖1项，2017年度内蒙古自然科学三等奖1项，2017年度中国有色科学技术奖1项，其它奖项多项。获得国家专利27项；在国内外发表论文90多篇。培养博、硕士研究生20多名。荣获“内蒙古突出贡献专家”、“草原英才”、“草原英才”团队带头人等。

黄焦宏教授兼任中国稀土学会磁制冷技术委员会副主任委员，中国稀土协会专家组专家；内蒙古科技大学等多所高校硕导及兼职教授，中科院厦门稀土研究院特聘研究员；国际制冷学会磁制冷成员、学术期刊《稀土》编委，国内外多家学术期刊审稿人。

## 室温磁制冷材料及磁制冷机 关键问题

报告人：黄焦宏

包头稀土研究院 (BRIRE)  
白云鄂博稀土资源与综合利用国家重点实验室  
包头钢铁 (集团) 公司





第三届磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

### 室温磁制冷材料及磁制冷机关键问题

- 磁制冷概况
- 稀土基室温磁制冷材料及关键问题
- 室温磁制冷机及关键问题
- 结束语

第三届磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

### □ 磁制冷概况

#### ■ 为什么要开展磁制冷研究与开发 ?

- 地球升温: 到2100年地球升温幅度将超出预期指标——升高 4°C 2013年, 《Nature》
- 地球升温: 温室气体排放—CO<sub>2</sub>, 制冷剂
- 传统的气体压缩/膨胀制冷技术存在缺点: 排放温室效应气体、效率能耗问题
- 寻找一种对环境友好的制冷技术势在必行
- 制冷途径—
  - 气体压缩/膨胀制冷——广泛应用, 如CFCs, HCFs
  - 半导体的温差电效应制冷——小空间制冷, 如饮水机
  - 物质相变 (融化、液化、升华、磁相变) 吸放热效应
- 磁制冷?



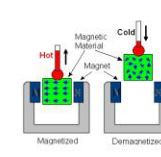
第三届磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

### □ 磁制冷概况

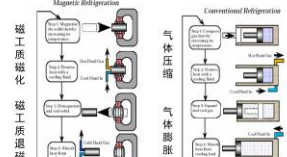
#### ■ 磁制冷——节能减排

- 环境友好  
磁制冷——制冷工质是固体, 用水或其它无污染液体传热
- 效率高、能耗低  
较早的高磁场 (超导磁体 5-7T), 实验室得到的制冷效率高于气体制冷
- 安全可靠  
磁制冷无需气体压缩机

#### ■ 磁制冷原理—磁热效应



磁工质磁化  
磁工质退磁



气体压缩  
气体膨胀

第三届磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

### □ 磁制冷概况—国内外

#### ■ 国际制冷学会 (IIR/IIR)

- 自2005年9月连续召开了八届“国际室温磁制冷 (学术) 会议” (Thermag)
- 每两年一届, 分别在瑞士、斯洛文尼亚、美国、中国 (包头)、法国、加拿大、意大利、德国 举行;
- 第九届“冷与热”国际会议 (Thermag IX), 原定 2020年6月 College Park, 美国Maryland大学
- 目前, 有30多个国家和地区开展室温磁制冷研究与开发; 主要集中在欧洲、美、加、日、韩、俄、巴西、中国等

#### ■ 国内

- 中国自2009年4月连续召开了五届“磁热效应材料及磁制冷学术会议”
- 中国稀土学会2019年成立“稀土磁制冷材料与技术专业委员会”;
- 2020年中国稀土学会——“相变制冷材料及应用” (赣州20201019-22)
- 国内开展磁制冷材料及磁制冷机的研究与开发的单位有30多家:  
中科院物理所、理化所、宁波材料所、沈阳金属所; 北科大、北工大、南京大学、四川大学、内蒙古师范大学、东北大学、西安交通、大学华南理工大学、华中科技大学……包头稀土研究院……; 海尔、格力……;




第四届国际室温磁制冷学术会议, 2019年8月 包头      第一届全国磁热效应及磁制冷学术会议, 2009年4月合肥

第三届磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

### 室温磁制冷材料及磁制冷机关键问题

- 磁制冷概况
- 稀土基室温磁制冷材料及关键问题  
——简述磁制冷材料; ——关键问题
- 室温磁制冷机及关键问题
- 结束语

第三届磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

### 室温磁制冷材料及磁制冷机关键问题

◆ 磁制冷——多学科、系统工程

◆ 磁制冷机——多学科  
物理学（磁学、热力学、流体力学），材料学（磁性材料、材料物理与化学），工程热物理、制冷，机械、电气、自动控制、机电一体，软件

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 6

### 稀土基室温磁制冷材料及关键问题

■ 具有大磁热效应的室温磁制冷材料  
——二级相变材料（Second Order）和一级相变材料（First Order）

- 金属Gd及Gd的合金（Gd-Dy、Gd-Tb、Gd-Er等），二级相变材料，应用较好！  
——磁热效应材料的基准材料，1997年，美国Ames实验室 Gd<sub>5</sub>Si<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>，一级相变材料  
——优点：熵变高；缺点：相变温跨窄，成相难，价格高，力学性能差
- 2001年，中科院物理所（沈保根）、日本（Fujieda Fujita）——La(FeSi)<sub>13</sub>  
——较大的应用前景！  
——La(FeSi)<sub>13</sub>Hx，一级相变；优点：熵变高，价格低廉；缺点：相变温跨窄，力学性能差  
——La(FeCoSi)<sub>13</sub>，二级相变；优点：熵变较高，价格低廉；缺点：相变温跨窄，力学性能差
- 2002年，荷兰 MnFe(P,As)，一级相变材料  
——优点：熵变高；缺点：相变温跨窄，初始效应问题，其它问题等等……
- 其它类型磁热效应：钙钛矿型（电阻发热）、2:17型（永磁）、NiMnGa系（磁伸）、MnCoGe系等等，  
——目前磁热效应较小，属于广泛研究课题！

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 7

### 稀土基室温磁制冷材料及关键问题

■ Gd、Er、Y等稀土金属提纯工艺——BRIRE

- 商业Gd、Er、Y等稀土金属的磁热效应性能很低；
- 经过提纯工艺，达到了磁热效应材料的要求。

■ 金属Gd及Gd合金磁工质的磁热性能（Second Order）——BRIRE

- 直接测量的金属 Gd 的  $\Delta S_m$  (1.5T)
- 直接测量的不同磁场金属Gd的  $\Delta S_m$
- 金属 Gd 在不同磁场下的等温磁焓  $\Delta S_m$
- 金属 Gd 在不同磁场下的比热容  $C_p$

工业纯（提纯）制备的金属Gd及Gd合金磁制冷工质

球型颗粒 0.425-0.85mm  
条片型 0.6×10×60mm  
薄片型，厚度0.2mm  
槽型，缝宽0.2mm，间隔0.5mm

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 8

### 稀土基室温磁制冷材料及关键问题

■ La(FeCoSi)<sub>13</sub>系磁制冷材料及磁工质磁热性能（Second Order）——BRIRE

- La(FeSi)<sub>13</sub> 磁相变点低（~200K），通过添加Co元素，相变点提高到室温

直接测量的La(FeCoSi)<sub>13</sub>和金属 Gd 的  $\Delta S_m$  (1.5T)  
直接测量的不同磁场的La(FeCoSi)<sub>13</sub>的  $\Delta S_m$   
直接测量的La(FeCoSi)<sub>13</sub>和金属 Gd 的  $\Delta S_m$  (1.5T)

棒材 板材 薄带 球形颗粒-φ0.5mm 不规则颗粒 槽型

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 9

### 稀土基室温磁制冷材料及关键问题

■ La(FeSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>系磁制冷材料及磁工质（First Order）—1——BRIRE

- La(FeSi)<sub>13</sub>系（一级相变），磁相变点低于室温，添加氢元素，将Tc提高到室温
- La/Ce(Fe,Si)<sub>13</sub>系合金饱和吸氢，再通过适当放氢，得到不同Tc的La(FeSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>系合金

La<sub>9</sub>Ce<sub>0.1</sub>Fe<sub>11.44</sub>Si<sub>1.56</sub>H<sub>x</sub>及其氢化物等温磁焓变化曲线（1.5T）  
La<sub>9</sub>Ce<sub>0.1</sub>Fe<sub>11.44</sub>Si<sub>1.56</sub>H<sub>x</sub>等温磁焓变曲线和直接测量的磁焓变（1.5T）  
直接测量La/Ce(FeMnSi)<sub>13</sub>的  $\Delta S_m$  (1.5T)  
直接测量的不同磁场的La/Ce(FeMnSi)<sub>13</sub>的  $\Delta S_m$

- La<sub>9</sub>Ce<sub>0.1</sub>Fe<sub>11.44</sub>Si<sub>1.56</sub>H<sub>x</sub>饱和吸氢后在不同放氢（Td=200-250℃）适当放氢得到不同居里温度的La<sub>9</sub>Ce<sub>0.1</sub>Fe<sub>11.44</sub>Si<sub>1.56</sub>H<sub>x</sub>
- 放氢温度过高会使最大等温磁焓变明显降低

MU Lijuan, HUANG Jiaohong\*, et al.  
Journal of Rare Earth, 2014,32(12):1135-1139.

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 10

### 稀土基室温磁制冷材料及关键问题

■ La(FeSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>系磁制冷材料及磁工质（First Order）—2——BRIRE

- La/Ce(Fe,M,Si)<sub>13</sub>系合金，通过过渡族元素替代不同的Fe，降低Tc，在饱和吸氢，得到不同Tc的La/Ce(Fe,M,Si)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>系合金
- 磁工质制备——采用粉末粘接(powder bonded method)成型，低温（175-185℃）固化；

La<sub>9</sub>Ce<sub>0.1</sub>Fe<sub>11.25</sub>Mn<sub>0.15</sub>Si<sub>1.5</sub>H<sub>x</sub>样品在1.5T磁场下粘结后的  $\Delta S_m$   
La<sub>9</sub>Ce<sub>0.1</sub>Fe<sub>11.25</sub>Mn<sub>0.15</sub>Si<sub>1.5</sub>H<sub>x</sub>样品直接测量的  $\Delta S_m$   
La<sub>9</sub>Ce<sub>0.1</sub>Fe<sub>11.44</sub>Mn<sub>0.25</sub>Si<sub>1.5</sub>H<sub>1.3</sub>样品和合金块状的抗压应力-应变曲线

La/Ce(FeMnSi)<sub>13</sub>系大块样品

Xia Wei, Huang Jiaohong\*, et al.  
Journal of Alloys and Compounds, 2015,635:124-128.

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 11

### 稀土基室温磁制冷材料及关键问题

■ La(FeSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>系磁制冷材料及磁工质 (First Order) —3—BRIFE

➢ La/Ce(Fe,M,Si)<sub>13</sub>合金粉末热压法(hot pressed method)成型 (30Mpa), 再通过吸氢, 制备La/Ce(Fe,M,Si)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>合金及磁工质

La/Ce(Fe,M,Si)<sub>13</sub>粉末在不同温度下热压合金的 $\Delta T_m$ 和 $\Delta S_m$

La/Ce(Fe,M,Si)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>系大块样品

Cheng Juan, Huang Jiaohong\*, et al. Journal of Alloys and Compounds, 2016,688:180-183.

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 12

### 稀土基室温磁制冷材料及关键问题

■ 具有大磁热效应的室温磁制冷材料——La(FeCoSi)<sub>13</sub>系、La(Fe,Si)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>系

- 国内开展研究的单位有几十家单位: 中科院物理所、北京科技大学、内蒙古师范大学、中科院宁波所、包头稀土研究院等等, 但开发应用型产品的不多;
- 国外有日本、德国、法国等二十多家单位
- 德国Vacuumschmelze GmbH公司——La(FeCoSi)<sub>13</sub>系、La(Fe,Si)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>系磁制冷材料开发最近用粉末冶金方法含 Mn 的 LaFeMnSiH<sub>x</sub>。在1T, 最大磁焓17J/kgK (339K)。

- 德国Vac公司开发的La(FeCoSi)<sub>13</sub>系、La(Fe,Si)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>系磁制冷工质
- 日本三德公司等。最近日本一家单位La(FeSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>磁带、制粉、球磨, 40Mpa下, SPS烧结, 制成0.4mm片, 吸氢
- 法国 Erasteel 物化制备La/Ce(FeMnSi)<sub>13</sub>颗粒, 然后再吸氢

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 13

### 稀土基室温磁制冷材料及关键问题

■ 问题1: La(FeSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>系材料 (First Order) ——相变温区窄

● 金属Gd、La(FeCoSi)<sub>13</sub>系、La(Fe,Si)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>系磁制冷材料对比

- 金属Gd、La(FeSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>、MnFePAs
- 直接测量的不同磁场的金属Gd、La(FeCoSi)<sub>13</sub>、La/Ce(FeMnSi)<sub>13</sub>的 $\Delta T_m$ 及半峰宽
- 金属Gd、La(FeSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>等磁焓变等温磁焓变

➢ 金属Gd, 二级相变材料: 焓变和温变高, 相变温跨(半峰宽)宽(1.5T, 30~33K);

➢ La(FeCoSi)<sub>13</sub>, 二级相变: 焓变高, 温变低, 相变温跨(半峰宽)窄: (1.5T, 20~24K; 如果在Gd的半峰宽处, 只有8K左右)

➢ La(FeSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>, 一级相变: 巨磁焓变, 温变高, 相变温跨(半峰宽)极窄(1.5T, 5~7K);

➢ 磁制冷需要在一个很宽的温区(例如: 冷藏制冷温区0~20°C); 半峰宽窄, 就需要多个不同Tc值得材料叠加, 造成制冷效率低。

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 14

### 稀土基室温磁制冷材料及关键问题

■ 问题1: La(FeSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>系材料 (First Order) ——相变温区窄

- 磁制冷是源于磁性材料所具有的磁热效应, 在相变点达到最大值;
- 磁制冷需要在一个很宽的温区(例如: 冷藏制冷温区0~20°C);
- 巨磁焓变材料均源于一级相变, 相变过程为突变, 与二级相变材料Gd相比, 磁热效应相变温区很窄。La(FeSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>半峰宽窄, 就需要多个不同Tc值得材料叠加, 单位体积制冷效率低。

- 相同相变点, 不同半峰宽的三种磁制冷材料
- 七种La(FeSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>叠加, 相变温区与Gd相当
- 多种La(FeCoSi)<sub>13</sub>叠加的相变温区

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 15

### 稀土基室温磁制冷材料及关键问题

■ 问题1: 拓宽La(FeSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>系材料 (First Order) 相变温区 (半峰宽)

- 研究一级相变材料, 拓宽半峰宽, 提高制冷温区
- 添加替代元素 (LaFeMnSiH<sub>x</sub>): 在1.5T, 将La/Ce(FeMnSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>合金的磁焓变由14.2J/kgk, 降到9.0J/kgk; 4.5J/kgk的峰宽由8.0增大到11.5J/kgk 3.75J/kgk (Gd的最大值), 峰宽由9.5增大到13J/kgk
- 由一级相变材料向二级相变材料过度, 适当降低La/Ce(FeMnSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>合金的磁焓变的峰值, 在相等磁焓变处, 能够拓宽磁焓变峰宽, 拓宽制冷温区。

中国稀土学会2020学术年会, 20201019-21, 赣州 16

### 稀土基室温磁制冷材料及关键问题

■ 问题2: 磁热效应与磁场强度的关系——磁热效应材料: 二级相变材料、一级相变材料

● 二级相变材料——典型的二级相变磁热效应材料: 金属Gd 及Gd的稀土合金

- 相变温区宽(金属Gd最佳制冷温区约 273 ~ 298K, 25K温跨)
- 绝热温变 $\Delta T_{ad}$ 大, 等温磁焓变 $\Delta S_m$ 大
- 力学性能相对好
- 磁热效应与磁场基本线性(1~2T)

- 直接测量的金属Gd在不同磁场下的绝热温变 $\Delta T_{ad}$
- 直接测量的金属Gd和Gd-Fe的绝热温变 $\Delta T_{ad}$
- 直接测量的金属Gd的绝热温变 $\Delta T_{ad}$ 随磁场变化曲线
- 直接测量的金属Gd的绝热温变 $\Delta T_{ad}$ 随磁场变化曲线

中国稀土学会2020学术年会, 20201019-21, 赣州 17

### □ 稀土基室温磁制冷材料及关键问题

#### ■ 问题2: 磁热效应与磁场强度的关系—2

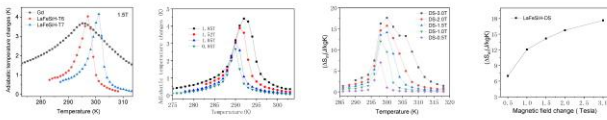
##### ● 一级相变材料——La(FeMSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub> 合金

- 绝热温变 $\Delta T_{ad}$ 大(峰值略大于Gd), 等温磁熵变 $\Delta S_m$ 大(峰值为Gd的2-3倍左右)
- 相变温区很窄(单个材料最佳制冷温约为6K, 1.5T)
- 力学性能很差
- 磁热效应与磁场基本线性(1-2T)

##### ● LaCeFeMnSiH (Tc=298, 300K)

磁场值 (T)	最大 $\Delta S_m$ (J/kgK)	半峰宽 (K)
0.5	7.0	3.2
1.0	12.1	4.7
1.5	14.2	6.6
2.0	15.8	8.6
3.0	17.6	12.6

- 金属Gd (1.5T) 半峰宽 25K  
最大制冷温差为25K

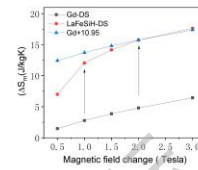


中国稀土学会2020学术年会, 20201019-21, 赣州 18

### □ 稀土基室温磁制冷材料及关键问题

#### ■ 问题2: 磁热材料与磁场(感应)强度

- 从材料的线性关系考虑, 最佳磁场为1-2T;
- 从永磁体的性价比和体积考虑, 最大磁场一般为1.5T左右;
- 研究材料的磁热效应, 从实用角度出发, 应重点研究1-2T(或1-1.5T);



LaFeSiH 和 Gd 等温磁熵变  $\Delta S_m$  随磁场变化曲线

中国稀土学会2020学术年会, 20201019-21, 赣州 19

### □ 稀土基室温磁制冷材料及关键问题

#### ■ 问题2: 磁场大小问题——磁场值 ( $\mu_0 H$ ) 对磁热效应值 ( $\Delta T_{ad}$ , $\Delta S_m$ ) 及制冷的影响

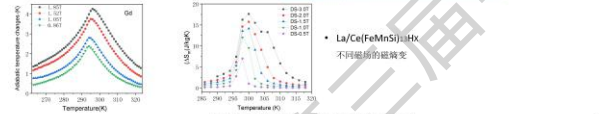
- 半峰宽与磁场值不是等比例, 磁场越低, 相变温区越窄, 半峰宽越窄;
- 磁场越低, 半峰宽越窄, 磁热效应也越低(指数降低);
- 磁场越低, 一级相变材料需要叠加的材料越多, 单位效率越低;

##### ● 金属Gd (Tc=294-295K)

磁场值 (T)	最大 $\Delta T_{ad}$ (K)	半峰宽 (K)
0.86	2.38	21
1.05	2.80	24
1.52	3.75	31
1.85	4.16	35

##### ● La/Ce(FeMnSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub> (Tc=298-300K)

磁场值 (T)	最大 $\Delta S_m$ (J/kgK)	半峰宽 (K)
0.5	7.0	3.2
1.0	12.1	4.7
1.5	14.2	6.6
2.0	15.8	8.6
3.0	17.6	12.6

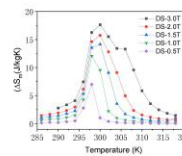


中国稀土学会2020学术年会, 20201019-21, 赣州 20

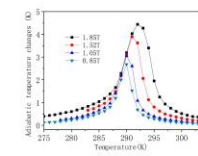
### □ 稀土基室温磁制冷材料及关键问题

#### ■ 问题3: 讨论问题

- 现有的磁制冷材料磁热效应不够大?
- La(FeSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>系磁制冷材料等温磁熵变: 1.5T, 14 J/kg K



LaFeSiH 不同磁场的磁熵变  $\Delta S_m$  (0.5-3.0T)



直接测量LaFeSiH不同磁场下的绝热温变 $\Delta T_{ad}$

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 21

### □ 室温磁制冷材料及磁制冷机关键问题

#### □ 磁制冷概况

#### □ 稀土基室温磁制冷材料及关键问题

#### □ 室温磁制冷机研发及关键问题

——简述磁制冷机; ——关键问题

#### □ 结束语

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 22

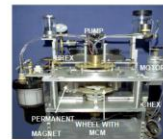
### □ 室温磁制冷机研发及关键问题

#### ■ 室温磁制冷机设计-研发概况

- 1881年Warburg在Fe外加磁场时发现磁热效应;
- 1933年Giauque用顺磁材料Gd<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·8H<sub>2</sub>O作为制冷工质获得了1K以下的超低温;
- 1976年美国Brown第一台室温磁制冷装置(第一台往复式、7T超导、金属Gd);
- 1997年美国宇航公司和Ames实验室设计研制的原型机(往复式、超导、金属Gd);
- 2001年美国宇航公司实验室设计研制的原型机(往复式、永磁、金属Gd)。



1997年 美国宇航和Ames实验室



2001年 美国宇航

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 23

### □ 室温磁制冷机研发及关键问题

#### ■ 室温磁制冷机设计-研发国家及公司

- 设计研制典型的磁制冷机：美国、日本、法国、加拿大、瑞士、巴西、西班牙、丹麦、德国、英国、韩国、意大利、斯洛文尼亚、波兰以及中国等。

#### ● 磁制冷公司：

- 法国UBIBLUE (Cooltech) 公司 (斯特拉斯堡) —— 是专门研制室温磁制冷机的企业；
- 英国Comfridge公司 (依托剑桥大学)
- 德国MagnoTherm Solutions (依托大姆斯塔特大学) —— “目标将磁制冷将磁制冷商业化, 从原型机到实际应用”
- 俄国Polymagnet LLC公司 (依托莫斯科大学)
- 开展 (涉及) 磁制冷的公司：



巴西Embraer公司、格力.....



德国MagnoTherm Solutions公司团队

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

24

### □ 室温磁制冷机研发及关键问题

#### ■ 海尔集团—美国宇航公司 磁制冷酒柜

- 2015年1月9日海尔公司宣布全球首款应用磁制冷技术的酒柜现身2015CES (该酒柜由美国宇航公司研制)
- 没有公布酒柜的运行参数
- 据海尔介绍：该酒柜功率150-200W



2015年网上公布 在海尔拍摄实物照片

#### ■ 2014年美国GE公司设计研制的磁制冷原型机



2014年GE公司 磁制冷原型机

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

25

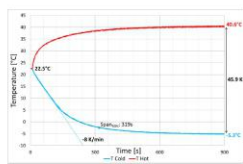
### □ 室温磁制冷机研发及关键问题

#### ■ 法国Cooltech (UBIBLUE) —— 磁制冷医用冷藏柜

- 2015年11月, 法国Cooltech公司与德国Kirsch医用设备公司在杜伊斯堡展出了磁制冷医用冷藏柜 (右图)
- 磁场: 0.8T (磁工质1.2T), 制冷空间: 350L
- 最低温度: 2°C, 室温: 22°C, 水流量: 6L/min
- 2016年6月16日, Cooltech宣称开发了首台商用磁制冷机。

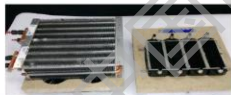


法国Cooltech医用磁制冷柜, 2015.11



无负载温跨, 频率1.2Hz

热端散热器



第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

26

### □ 室温磁制冷机研发 (国外)

#### ■ 日本多家单位联合研制磁制冷材料、磁制冷机 (前几年的New Energy and Industrial Technology Development Organization, 简称NEDO计划)

磁制冷机: 中部电力公司 (名古屋)、铁路技术研究所 (东京、宫崎)、SANDEN公司 (群马县)

磁制冷材料: 三德公司 (兵庫、明石)、东京工业大学、九州大学物理系、神户大学机械系

#### ■ 日本还有国家先进科学与技术研究所 (名古屋)、电装公司 (爱知县)、新日本综研电器 (爱知县) 东京大学机械工程系、工业科学研究所、东北大学、大阪大学、千叶大学、Fujikura 公司等

#### ■ 2014年日本中部电力公司 (平野)、铁路技术研究所等磁制冷机

Magnetic material	Gd, Gd-V, Gd-Dy	
Packing mass/unit	φ 0.5 - 0.85 mm	
Number of AMR bed/unit	3.6 kg	
AMR bed Size	12	
Flow rate/unit	30 mm×14 mm×150 mm	最大制冷温差: 21 °C
Rotation number	~ 25 liter/min	最大功率: 1.4KW, ΔT=21K
Permanent magnet	~ 60 min <sup>-1</sup>	
	NeFeB	
	B <sub>max</sub>	1.5 T



第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

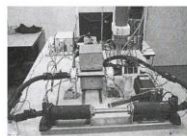
27

### □ 室温磁制冷机研发 (国外)

#### ■ 巴西圣卡塔琳娜联邦大学 (Santa Catarina) 磁制冷机

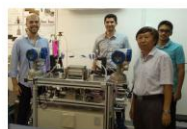
- 2007年巴西Santa Catarina大学与巴西Embraer公司 POLO制冷与热物理实验室—磁制冷原型机 (右图)

- 材料: Gd球形颗粒 (包头稀土研究院)
- 磁场: 1.6T永磁, C型 (包头稀土研究院)
- 运行方式及频率: 平行板AMR, 往复运动, 频率 0.14Hz
- 热交换: 水
- 最大制冷功率: 3.9W;
- 最大制冷温跨: ΔT=4.45K



- 2014年POLO制冷与热物理实验室—磁制冷原型机 (右下图)

- 磁工质: Gd
- 磁场: 嵌合 Halbach
- 运行方式及频率: 旋转 2Hz
- 最大制冷温差和最大功率: N/A



- 2018年POLO制冷与热物理实验室—100W磁再生装置

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

28

### □ 室温磁制冷机研发 (国外)

#### ■ 丹麦磁制冷原型机

- 主要有三家单位: 丹麦技术大学 (DTU)、Aalborg大学、南丹麦大学
- 2007-2009年丹麦技术大学 (DTU) 磁制冷原型机 (往复和旋转两台)

- 材料: 0.9mm Gd片, 间隔0.8mm, 92g; LaCaSrMnO<sub>3</sub>; La(FeCoSi)<sub>13</sub>
- 磁场: 1.4T 电磁铁
- 运行方式及频率: AMR, 往复运动, 频率 0.25Hz
- 最大制冷功率: 1.5W
- 最大制冷温跨: ΔT=10.2K (Gd); ΔT=8.5K (La(FeCoSi)<sub>13</sub>)

- 2010-2014年丹麦技术大学 (DTU) 磁制冷原型机 (旋转)

- 材料: Gd球形颗粒 (φ 0.25-0.8mm), 2.8kg (稀土院)
- 磁场: 双 Halbach
- 运行方式及频率: AMR, 旋转, 频率 10Hz (原文)
- 最大制冷功率: 1012W
- 最大制冷温跨: ΔT=25.4K

- 2010-2014年丹麦技术大学 (DTU) 磁制冷原型机 (旋转)

- 磁工质: Gd, Gd-Y; 1.7 kg
- 磁场: 单极NdFeB, 另一极是铁, 1.13T
- COP: 3.6
- 最大功率: 103W (温跨7.2°C)



第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

29

### □ 室温磁制冷机研发（国外）



#### ■ 瑞士2012年西瑞士应用科学大学磁制冷机

Year of production	2009, 2011, 2013
Type	Reciprocating and rotary
Maximum frequency	0.5 Hz
Maximum cooling power	70 W
Maximum temperature span	30 K
Type of AMR	Parallel plates
MC material(s)	Gd, La-Fe-Co-Si, others
Type of magnets	Permanent magnet

磁场：1.45T 永磁 Halbach  
磁工质：1mm, Gd片, 400g  
热交换液：硅油

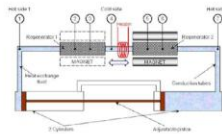


#### ■ 西班牙磁制冷原型机

西班牙有多家单位设计研制磁制冷机：巴塞罗那材料科学研究所、巴塞罗那大学、加泰罗尼亚工业大学、萨拉戈萨大学、Efficold公司等

#### ● Zaragoza 大学磁制冷原型概念机

- 材料：31g, Gd球 0.2-0.4mm
- 磁场：NdFeB 1.4T
- 运行方式及频率：往复，0.7Hz
- 无负载时最大制冷温差：19.3 °C
- 最大功率：6W



第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

30

### □ 室温磁制冷机研发（国外）

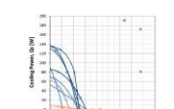
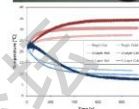
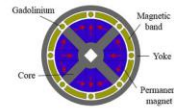


#### ■ 韩国——多家单位开展磁制冷机设计与研发

韩国先进科学技术研究所、三星电子公司、国家标准研究院、LG公司、现代汽车未来能源团队以及忠北大学、江陵大学原州分校、成均馆大学、庆北国立大学

#### ■ 2009年韩国先进科学技术研究所磁制冷机

磁场：1.58T NdFeB永磁 Halbach  
磁制冷床：AMR  
无负载最大制冷温差：16K  
磁工质：Gd颗粒(Φ 0.325-0.5mm)  
运行频率：1Hz  
最大功率：？



#### ■ 韩国三星公司磁制冷机

磁场：单极NdFeB, 另一极是钕铁  
磁工质：Gd, Gd-Tb, MnFePAs  
磁制冷床：多层  
无负载最大制冷温差：31°C, 43 °C  
最大功率：？

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

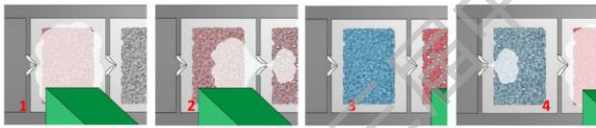
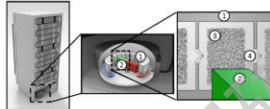
31

### □ 室温磁制冷机研发（国外）



#### ■ 德国 Fraunhofer-Institute 磁制冷机

- 热二极管（Thermal diodes）传热：  
相比于传统AMR系统在提升温跨的同时有效地提高了COP。传统AMR受限于热传递效率以及巨大的压降，导致循环频率降低、输入功率
- Thermal diodes类似虹吸管，内部流体由于温度变化蒸发、冷凝进而传递热量，不需额外的泵，因此不需输入额外的能量，可有效提高体系制冷效率、提高频率增大功率



第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

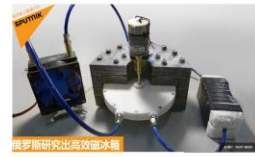
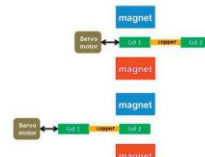
32

### □ 室温磁制冷机研发（国外）



#### ■ 俄罗斯——磁制冷机

- 2018年圣彼得堡ITMO大学、圣彼得堡理工大学、Aveiro大学磁制冷机  
无热交换器的固态磁热冷却器——基础工作



- 2018年俄罗斯固态磁冷却器
- 2019年5月俄罗斯磁冰箱

#### ● 2019年莫斯科钢铁合金学院、特维尔国立大学设计研制磁冰箱

磁场：Gd  
磁制冷床：Gd片  
制冷温差和功率：？

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

33

### □ 室温磁制冷机研发（国外）



#### ■ 德国达姆斯塔特大学磁制冷机（2018-2019年）



#### ■ 英国剑桥Combridge公司磁制冷机

设计研制中央制冷系统（磁制冷）—— 房间空调、冷藏等

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

34

### □ 室温磁制冷机研发（国内）



#### ■ 国内磁制冷原型机设计研制

- 早期（2000-2010年）：包头稀土研究院（2001年—）、四川大学（2002年—）、南京大学（2003年—）、中科院理化所（2004年—）及西安交大
- 近期还有：华南理工大学、华中科技大学、天津商业大学、海尔集团公司、格力公司……等

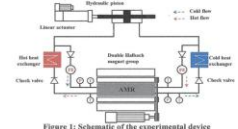


Figure 1: Schematic of the experimental device

- 2003年 南京大学

- 2018年 中科院理化所
- 材料：Gd球
- 磁场：NdFeB 1.5T
- 运行方式及频率：0.2-1.25

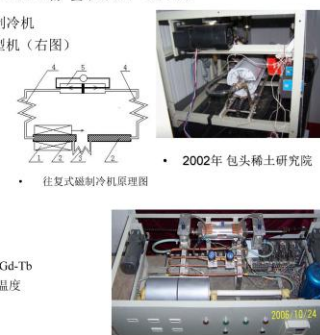
第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

35

### □ 室温磁制冷机研发（国内）

◆ 包头稀土研究院（BRIRE）室温磁制冷原型机设计与研制

- 2001年研制了第一台磁制冷机—磁流体磁制冷机
- 2002年研制成功第一台往复式室温磁制冷原型机（右图）
  - 最大制冷温差为3.5℃
  - NdFeB永磁体：1.5T
  - 往复式
- 2002-2004年研制稀土院第三台往复式室温磁制冷原型机（右下图）
  - NdFeB永磁体：1.5T
  - 材料：0.5-2mm不规则Gd颗粒，2\*350g
  - 运行方式及频率：往复式，0.16Hz
  - 最大制冷温差：17.8℃
  - 最大制冷功率：35W
- 2006年在该机采用Φ0.425~0.82mm球形Gd及Gd-Tb合金颗粒串接，得到最大制冷温差：28℃，最低温度-2.7℃，最大制冷功率：50W



2002年 包头稀土研究院  
往复式磁制冷机原理图

2002-2006年 包头稀土研究院

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 36

### □ 室温磁制冷机研发（国内）

◆ 南京大学—包头稀土研究院（BRIRE）室温磁制冷机设计与研制




第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 37

### □ 室温磁制冷机研发（国内）

◆ 包头稀土研究院——室温磁制冷机设计与研制

- 2014-2015年研制复合式室温磁制冷机研制与制冷性能
  - 2014年12月鉴定验收，获得2016年度内蒙古科技进步一等奖（右图）
  - 采用NdFeB永磁设计研制复合式室温磁制冷机—磁制冷冷藏柜（下图）
  - NdFeB永磁体：1.5T
  - 磁制冷材料：球形Gd及Gd合金颗粒Φ0.3-0.5mm
  - 制冷空间：117升
  - 运行方式及频率：旋转，0.2-0.3Hz
  - 最大制冷温差：23.0℃，最低制冷温度：-0.9℃
  - 冷端交换功率（实际测量）：120-150W



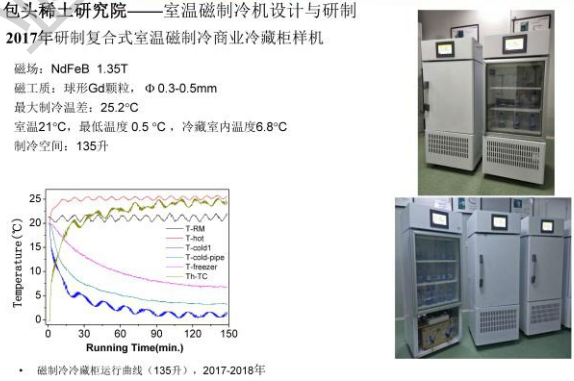
磁制冷冷藏柜运行曲线（117升），2015年

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 38

### □ 室温磁制冷机研发（国内）

◆ 包头稀土研究院——室温磁制冷机设计与研制

- 2017年研制复合式室温磁制冷商业冷藏柜样机
  - 磁场：NdFeB 1.35T
  - 磁工质：球形Gd颗粒，Φ0.3-0.5mm
  - 最大制冷温差：25.2℃
  - 室温21℃，最低温度0.5℃，冷藏室内温度6.8℃
  - 制冷空间：135升



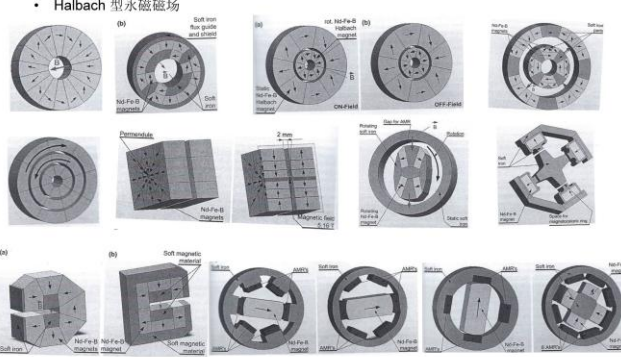
磁制冷冷藏柜运行曲线（135升），2017-2018年

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 39

### □ 磁制冷机用永磁磁场系统设计与研制

◆ 磁制冷机用永磁磁场类型


- Halbach型永磁磁场



第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 40

### □ 磁制冷机用永磁磁场系统设计与研制

◆ 包头稀土研究院（BRIRE）永磁磁场系统设计与研制



第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波 41

### □ 室温磁制冷机研发及关键问题



#### ■ 单（双）和多磁制冷床磁制冷机比较

- 目前磁制冷机从运行上分为 往复式 和 旋转式

#### ● 单（双）磁制冷床磁制冷机优缺点

- 热交换简单；
- 温差易于拉大（AMR长度）；
- 运行频率相对小，不易提高。

#### ● 多磁制冷床磁制冷机优缺点

- 热交换结构复杂；
- 温差相对不易拉大（AMR长度），相对于单制冷床；
- 运行“频率”相对较大（旋转快、磁制冷床多）。

#### ● 从工艺角度考虑

- 单磁制冷床磁制冷机易于拉大温差？
- 多磁制冷床磁制冷机易于增大制冷量？

中国稀土学会2020学术年会, 20201019-21, 赣州

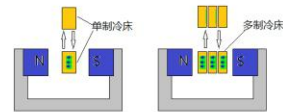
42

### □ 室温磁制冷机研发及关键问题



#### ■ 问题4——磁制冷机运行频率问题

- 单（双）磁制冷床运行频率相对小
- 多磁制冷床运行频率——多制冷床叠加（同时旋转速度快），频率相对高



• 单、多磁制冷床磁制冷机的运行频率问题

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

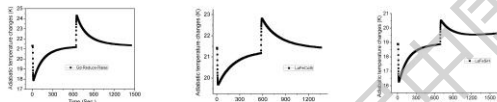
43

### □ 室温磁制冷机研发及关键问题



#### ■ 问题4——磁制冷机运行频率问题

- 由于磁热效应的弛豫和热交换时间，磁制冷机的运行频率收到热交换时间的限制
- 衡量磁制冷机的制冷量（制冷功率）——单位时间内的热交换量（制冷量）  
——单位时间内“磁制冷工质总量”的热交换
- 每次循环，磁工质和热交换液（气）体热交换问题



• 磁热效应弛豫时间和热交换时间，决定了磁制冷机的最佳运行频率

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

44

### □ 室温磁制冷机研发及关键问题



#### ■ 问题5——磁制冷机制冷温差与功率问题（讨论问题）

- 大温差、大功率磁制冷机？
- 拓展制冷温差，需要一定长度的AMR，多次反复制冷；
- 积累“制冷量”（制冷功率），需要一定量的磁制冷工质，反复制冷；
- 温差和“制冷量”均与磁场强度  $\mu_0 H$  成正比，且  $\sim \mu_0 H^X$ ， $1 < X < 1.5$

#### ■ 问题6——高于室温（30-100°C）磁制冷机（讨论问题）

- 高于室温的磁制冷材料？
- La(FeSi)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>系材料？ 或其它？

#### ■ 问题7——磁制冷机需要一种积累“制冷量”和拓展温差的技术（讨论问题）

- 目前，用AMR (Active Magnetic Regeneration) 技术蓄冷；
- 其它蓄冷技术？

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

45

### □ 结束语



- 磁制冷具有节能-环保特点，是典型的节能减排项目。
- 磁制冷应用范围广，从低温到高温、从冷藏到冷冻、空调等等，具有很大发展空间。
- 目前，磁制冷在低温领域能够应用；室温领域：已经开发商业冷藏柜样机；空调、冷冻正在进行设计研制。
- 室温磁制冷还存在诸如功率问题、温差问题、效率问题、其它问题……  
还需要进一步完善、进一步研究，正是存在这些问题，才给研究者和企业留存了较大的发展空间。

第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

46

Thank You for Your Attention !

谢谢！

欢迎参观访问  
稀土研究院



第三届中国磁产业发展论坛, 2020-12, 宁波

47



## 王开友

研究员

博导

中国科学院半导体研究所

### 报告主题

电控自旋电子学器件及应用

### 简介

国家杰出青年基金获得者，现任半导体超晶格国家重点实验室主任。当前主要研究兴趣：自旋电子学及低维微纳器件研究。2005年在英国诺丁汉大学天文物理学院获得哲学博士学位。2005年3月-5月在诺丁汉大学作研究助理，2005年6月-2009年3月在日立剑桥实验室作Researcher。曾经两次在波兰科学院物理研究所做访问研究，并作为访问教授在丹麦玻尔研究所进行短期访问研究。2009年加入半导体研究所超晶格国家重点实验室工作，并于2012年获得国家自然科学基金委的国家杰出青年基金资助。长期从事自旋电子学及半导体微纳器件物理的研究，并取得了一系列有一定影响力的研究成果，迄今在国际核心刊物上合作发表了包括Nature Materials, Nature Physics, Nature Electronics, Physics Review Letters在内的科技论文100多篇，发表的文章被引用4500多次，近五年应邀在国内外学术会议做大会或邀请报告30余次，组织并主持多次国际和国内学术会议。当前是中国物理学会理事、半导体物理专业委员会主任和多个专业委员会委员、IAAM Fellow，现任《iScience》、《Chinese Physics B》等国内外多个杂志编委；获得包括国际先进材料学会奖章在内的多个国内外奖励。

# 电控自旋电子学器件及应用

王开友

中国科学院半导体研究所半导体超晶格国家重点实验室 北京 100083

利用电学的方法对固体中的自旋进行控制是自旋电子学走向应用的重要途径，也是当前研究的重点和热点[1-3]。

利用自旋轨道转矩实现对磁性材料无磁场下的定向磁化翻转，是下一代磁非易失计算、存储以及类脑计算的基础。在不破坏薄膜结构对称性的前提下，我们提出并实现了在PMN-PT基片上具有铁磁/铁电异质结构的定向磁化翻转，通过改变外加电场在PMN-PT基板上的方向，可以使有效磁场逆转，完全取代了外磁场的可控性功能[4]，基于此器件，我们实现了简单的逻辑功能[5]。此外，我们还利用层间交换耦合[6]实现了无外磁场的磁性多层结构中的电流控制磁化定向翻转，并定量获得磁层间交换耦合大小和方向。通过设计和制备反铁磁层间交换耦合的Pt/Fm1/Ta/Fm2结构，演示了多态垂直铁磁层（Fm1）的无磁场自旋轨道矩诱导的人工突触塑性[6,7]。提出并用局域激光退火实现横向自旋轨道矩，发现即使没有垂直自旋流注入条件下，横向自旋轨道矩可以实现自旋的定向翻转，基于此方法，我们实现了多种逻辑门，并用3个器件演示了需要18个CMOS晶体管才能实现的半加器功能[8,9]。

另外，我们还基于二维磁性材料实现了全二维的自旋阀效应[10, 11]。

## 参考文献:

- [1] Yucai Li, et al., Advanced Quantum Technology 2, 1800052 (2019).
- [2] Yi Cao, Guozhong Xing, et al. iScience 23, 101614 (2020)
- [3] Kaiyou Wang, Nature Electronics 1, 378 (2018).
- [4] Kaiming Cai, Meiyin Yang, et al., Nature Materials 12, 712 (2017).
- [5] Meiyin Yang, Yongcheng Deng, et al., IEEE Electron Device Letters 40, 1554 (2019).
- [6] Yu Sheng, et al., Advanced Electronic Materials 4, 1800224(2018).
- [7] Yi Cao, A. Rushforth, et al. Advanced Functional Material 29, 1808104 (2019).
- [8] Yi Cao, Yu Sheng, et al. Advanced Materials 32, 1907929 (2020)
- [9] Nan Zhang, Yi Cao, et al. Advanced Electronic Materials 6, 202000296 (2020)
- [10] Hailong Lin, et al., ACS Applied Materials & Interfaces, 12, 43921 (2020)
- [11] Ce Hu, Dong Zhang, et al., Science Bulletin, 65, 1072(2020).



## 张明

首席专家

研究员

中国电子科技集团有限公司

### 报告主题

非互易环行器技术的新方向与进展

### 简介

中国电子科技集团有限公司研究员，发表论文50篇，撰写专题报告60多篇，涉及专业发展、项目立项、技术总结、项目评估、规划等方面。标准与出版物等22篇。标准主要涉及稀土永磁材料和永磁器件的技术要求、设计方法、测试方法及试验规范等方面、

主要研究方向为：永磁材料的结构、磁性、温度特性；永磁材料制备方法与工艺；永磁体应用设计与应用研究。

### 报告摘要

非互易环行器是通信、雷达、电磁战以及量子计算中至关重要的磁性器件，在这些重要应用中作用不可或缺。传统的环行器技术采用微波铁氧体材料，并用永磁体磁场偏置，由于微波铁氧体的磁导率张量在永磁体磁场偏置下是不对称的，打破了微波铁氧体的同向旋转和反向旋转共振模式之间的对称性，从而获得了电磁波单一方向环行（顺时针或逆时针）的特性。这种结构的环行器技术发展了六十多年，没有根本性变化，已不适应集成电路的发展速度，阻碍了磁性器件的小型化和集成化。最近十多年，人们从多个技术途径试图颠覆现有环行器技术，以实现其小型化和集成化。本报告从环行器有或无磁性材料两个方向介绍了非互易环行器技术的新方向和进展。在有磁性材料的环行器技术方向，重点介绍了自偏置六角铁氧体替代微波铁氧体和永磁体的环行器，以及磁电耦合效应复合材料形成环行器；在无磁性材料的环行器技术方向，重点阐述了基于有源晶体管、非线性以及线性周期时变电路的多种环行器结构形式和最新特性对比，并指出各自优缺点与应用场景。



## 刘先松

教授

博导

安徽大学物理学院

### 报告主题

永磁材料的晶体结构、各向异性与磁性

### 简介

国务院特殊津贴、安徽省学术技术带头人、磁性材料安徽省工程技术研究中心主任，中国电子元器件协会科学技术委员。

在新型磁性结构、磁性物理与软、硬磁性器件的电磁特性等研究中取得了有意义的进展。近年来承担着多项国家、省部级和企业委托项目，发表SCI、EI论文170余篇，单篇最高引用302次。突破低居里温度瓶颈，研制出动力电机用钕铁硼磁体；利用磁集成和电磁耦合仿真研制出的新能源用大功率电感器；依据晶格和磁畴的有序研发出钙稀土永磁铁氧体。近年获国家授权发明专利7项，第一完成人获安徽省科技进步三等奖1项、二等奖3项。



## 张伟

教授

博导

大连理工大学材料科学与工程学院

### 报告主题


强永磁性纳米多孔合金的制备及其结构和磁性能研究

### 简介

张伟于1983年和1986年分别获得大连理工大学金属材料专业学士学位和铸造专业硕士学位；于1998年获日本东北大学材料加工专业博士学位。曾任日本科学技术振兴机构（JST）研究员（1998-2004年）、日本东北大学金属材料研究所（IMR）副教授（2004-2011年）、IMR客座教授（2012-2017年）等职。主要从事非晶合金及其复合材料、磁性材料、纳米材料的制备及其组织结构和性能的研究工作。发表学术论文300余篇，被引用8000多次（H因子45）；合著专著5部；获国内外发明专利20多项。为《Scientific Reports》、《Appl. Phys. Lett.》、《Acta Mater.》、《J. Appl. Phys.》、《The Journal of Physical Chemistry》、《Philosophical Magazine Letters》等20多个学术期刊的审稿人。


  
**强永磁性纳米多孔合金的制备及其  
结构和磁性能研究**  
 张伟  
 大连理工大学  
 第三届中国磁产业发展论坛  
 中国科学院宁波材料技术与工程研究所  
 浙江省磁性材料应用技术创新中心  
 2020.12.18-19

1

  
**报告内容**

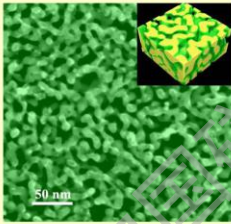
1. 研究背景
2. Fe-Pt-B非晶合金脱合金化制备纳米多孔材料及其组织结构和性能
3. Fe-Pt-B纳米复相合金脱合金化制备纳米多孔材料及其组织结构和性能
4. 结论

2

  
**研究背景**

**纳米多孔金属**  
由三维双连续的纳米尺度孔隙和金属韧带构成的功能材料。

纳米多孔金属结合了金属的高导电、导热率和抗疲劳等特点与纳米材料的表面、尺寸和量子效应，显示出诸多功能特性，在催化、分离、电子、光学、微流体等领域有着广泛的应用前景。有关其制备、形成机理、性能和应用研究正在地展开。

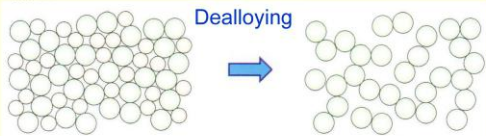


3

  
**研究背景**


**纳米多孔金属制备方法**  
模板法、水热法、烧结法、自组装技术、脱合金化法等.....

**脱合金化**  
在化学或电化学条件下，选择性地溶去先驱体合金中活泼的组元，剩余惰性组元通过表面扩散自组装形成富含剩余组元的纳米多孔结构。



先驱体合金 Dealloying → 纳米多孔金属

4


  
**研究背景**

**脱合金化先驱体合金**  
合金组元间存在较大的电极电位差；  
活泼组元含量要超过某一特定的数值（阈值）；  
合金成分和组织结构连续均匀；  
惰性组元在合金/电解液界面上的扩散速度足够快。

先驱体

- Solid solution alloys: Au-Ag、Ni-Mn、Pd-Fe、Pd-Co
- Multi-phase alloys: Au-Al、Pd-Al、Pd-Al-Mn、Pt-Fe-Al
- Amorphous alloys: Au-Cu-Ag-Pd-Si、Cu-Zr-Ti、Cu-Hf-Al

5

  
**研究背景**

**磁性纳米多孔金属**

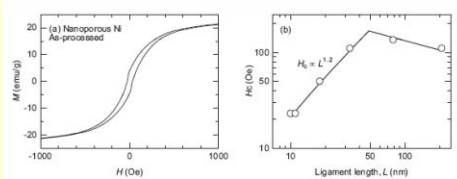


Fig. Magnetization hysteresis loop of NP-Ni and relationship between  $H_c$  and ligament size.  
 M. Hakamada, et al. Appl. Phys. Lett., 94, (2009)153105

纳米多孔永磁体作为磁过滤、磁分离（细胞、蛋白质）等材料有广泛应用前景；作为自组装的模板材料可制备新型纳米复相功能材料。

6

### 研究背景

#### 永磁纳米多孔材料的制备

Figure 1. Schematic diagram of the preparation of an FePt porous film derived from FePt nanoparticles and PS particles.

脱合金化法制备出纳米多孔永磁体?

F. Iskandar, et al. Nano Lett., 5, (2005) 1525

### 研究背景

有序面心四方结构的FePt(L1<sub>0</sub>-FePt)具有极高磁晶各向异性(K<sub>1</sub> = 6.6×10<sup>3</sup> kJ/m<sup>3</sup>), 可用于制备超高密度磁记录、高性能永磁材料。

Figure XRD patterns of melt-spun (Fe<sub>0.75</sub>Pt<sub>0.25</sub>)<sub>100-x</sub>B<sub>x</sub> (x=15-35) alloy ribbons.

Figure XRD patterns of the Fe<sub>0.75</sub>Pt<sub>0.25</sub>B<sub>25</sub> amorphous alloy annealed for 900 s at various temperatures.

W. Zhang, et al. Mater. Trans. 46 (2005) 891. D. V. Louzguine, et al. J. Alloys Compd. 402 (2005) 78. W. Zhang, et al. Scripta Mater. 54 (2006) 431.

### 研究背景

Figure J-H curves for the Fe<sub>0.75</sub>Pt<sub>0.25</sub>B<sub>25</sub> amorphous alloy annealed in the temperature range between 773 and 923 K for 900 s. Inset shows the reversibility of hysteresis for the ribbon annealed at 783 K.

Figure TEM image and EDS elemental mapping of the amorphous Fe<sub>0.75</sub>Pt<sub>0.25</sub>B<sub>25</sub> alloy annealed at 785 K for 900 s.

W. Zhang, et al. Mater. Trans. 46 (2005) 891. D. V. Louzguine, et al. J. Alloys Compd. 402 (2005) 78. W. Zhang, et al. Scripta Mater. 54 (2006) 431.

### 研究背景

低Pt含量Fe-Pt-B合金满足脱合金化前驱体的条件, 通过对其脱合金化并结合相变反应, 有望得到L1<sub>0</sub>-FePt相的永磁纳米多孔合金。

本工作以不同组织结构的Fe-Pt-B合金为前驱体进行脱合金化制备纳米多孔合金, 澄清纳米多孔形成机制的基础上, 探讨前驱体成分和结构、脱合金化条件、热处理工艺与纳米多孔合金的形成、相结构及磁性能的关系, 通过调控多孔合金的相结构和相组成, 发展出高永磁性纳米多孔材料。

### Fe-Pt-B非晶合金脱合金化制备纳米多孔材料的组织结构

Figure XRD patterns of Fe<sub>90</sub>Pt<sub>10</sub>B<sub>30</sub> amorphous alloy ribbons dealloyed in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution for different time.

Figure TEM images and corresponding SAED patterns of Fe-Pt-B amorphous alloy before (a) and after (b) dealloying.

Figure Top-view and cross-section view SEM images of Fe<sub>90</sub>Pt<sub>10</sub>B<sub>30</sub> amorphous alloy dealloyed in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution for (a, b) 500 s, (c, d) 1000 s and (e, f) 2000 s.

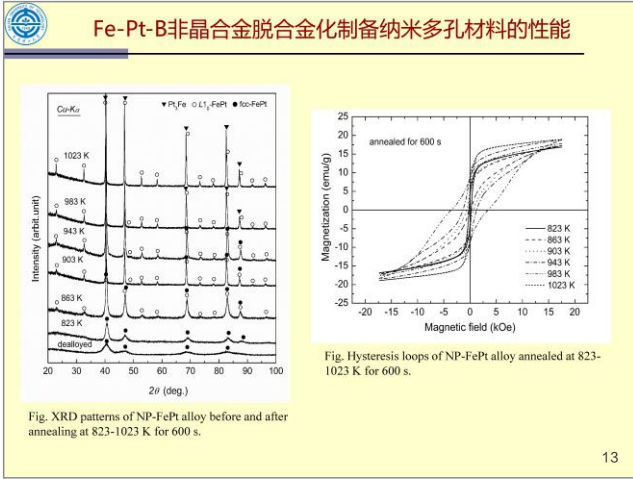
S. L. Ou, et al. J. Alloys Compd. 706 (2017) 215-219.

### Fe-Pt-B非晶合金脱合金化制备纳米多孔材料的组织结构

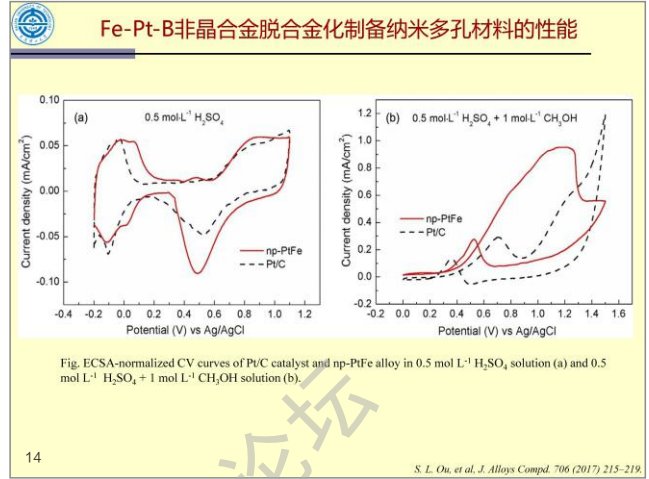
Figure SEM images of top-view (a) and cross-section-views in low (b) and high (c) magnifications, and EDX spectrum (d) of Fe<sub>90</sub>Pt<sub>10</sub>B<sub>30</sub> amorphous alloy dealloyed for 2000 s.

Element	Wt. %	At. %
Fe	13.78	35.63
Pt	86.22	64.17

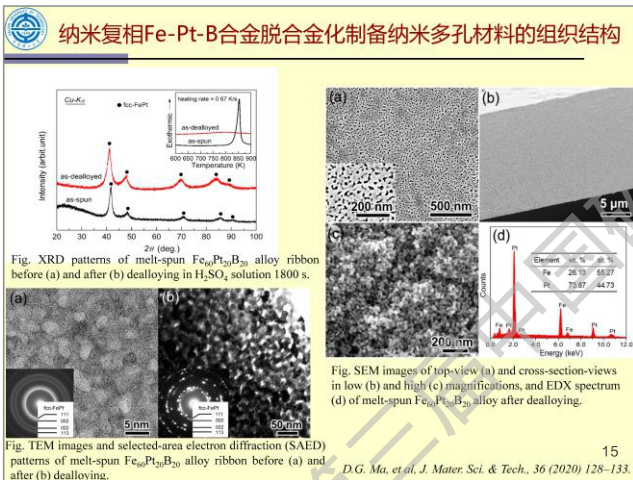
S. L. Ou, et al. J. Alloys Compd. 706 (2017) 215-219.



13

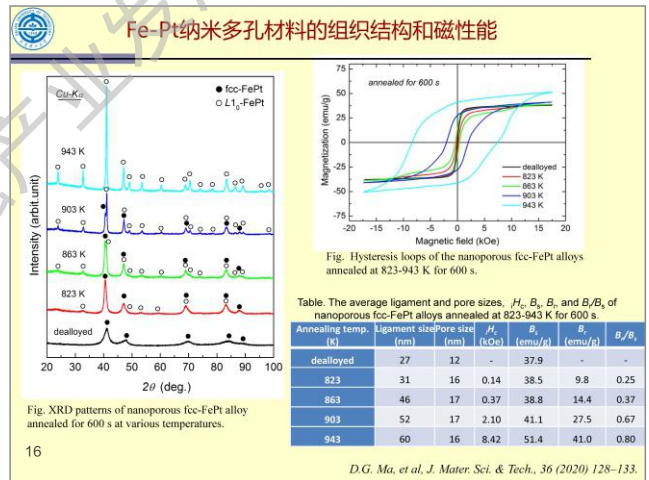


S. L. Ou, et al. *J. Alloys Compd.* 706 (2017) 215-219

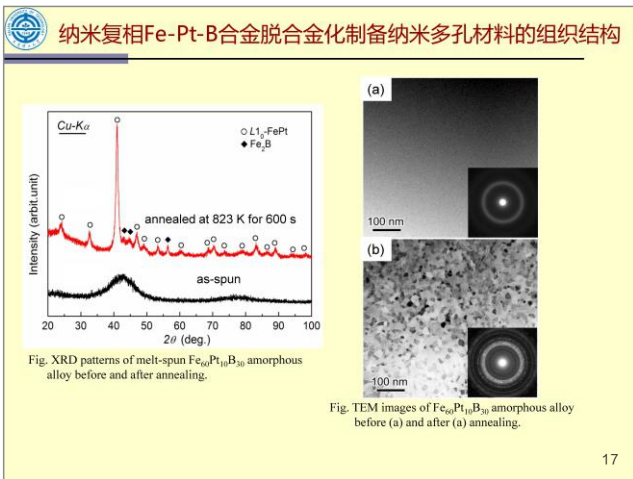


15

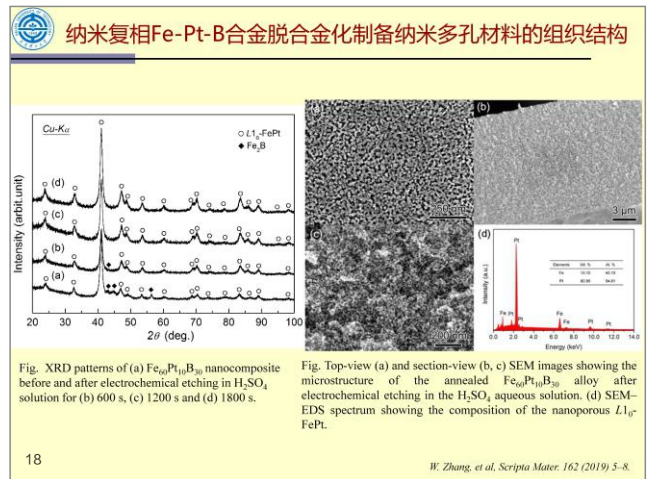
D.G. Ma, et al. *J. Mater. Sci. & Tech.*, 36 (2020) 128-133.



D.G. Ma, et al. *J. Mater. Sci. & Tech.*, 36 (2020) 128-133.



17



18

W. Zhang, et al. *Scripta Mater.* 162 (2019) 5-8.

### 纳米复相Fe-Pt-B合金脱合金化制备纳米多孔材料的组织结构

Fig. Bright-field TEM images of  $Fe_{90}Pt_{10}B_{30}$  amorphous ribbon annealed at 823 K for 900 s before (a) and after (b) electrochemical etching, and HRTEM image of the nanoporous  $L1_0$ -FePt compound in low (c) and high (d) magnifications. Insets in (a) and (b) are the corresponding SAED patterns. Insets in (c) and (d) are the corresponding FFT patterns.

19  
W. Zhang, et al. Scripta Mater. 162 (2019) 5-8.

### 纳米复相Fe-Pt-B合金脱合金化制备纳米多孔材料的组织结构

Fig. XRD patterns of the  $Fe_{90}Pt_{10}B_{30}$  nanocomposite before (a) and after (b) electrochemical corrosion.

Fig. Polarization curves of  $Fe_{90}Pt_{10}B_{30}$  ( $Fe_2B$ ) and nanoporous  $L1_0$ -FePt alloys in  $H_2SO_4$  solution.

Table. Lattice constants of  $L1_0$ -FePt phase for  $Fe_{90}Pt_{10}B_{30}$  nanocomposite and nanoporous  $L1_0$ -FePt alloys.

alloy	Lattice parameters of $L1_0$ -FePt		
	a (nm)	c (nm)	c/a
nanocomposite $Fe_{90}Pt_{10}B_{30}$	0.385	0.372	0.966
nanoporous $L1_0$ -FePt	0.385	0.373	0.970

20  
W. Zhang, et al. Scripta Mater. 162 (2019) 5-8.

### Fe-Pt纳米多孔材料的磁性能

Fig. Hysteresis loops of the nanoporous  $L1_0$ -FePt (a), together with the result of  $Fe_{90}Pt_{10}B_{30}$  nanocomposite (b).

Table 1 Magnetic properties for the nanocomposite  $Fe_{90}Pt_{10}B_{30}$  and nanoporous  $L1_0$ -FePt alloys.

alloy	Magnetic properties			
	$H_c$ (kOe)	$B_s$ (emu/g)	$B_r$ (emu/g)	$B_r/B_s$
nanocomposite $Fe_{90}Pt_{10}B_{30}$	2.4	116.0	94.8	0.73
nanoporous $L1_0$ -FePt	18.5	52.6	34.0	0.65

21  
W. Zhang, et al. Scripta Mater. 162 (2019) 3-8.

### Fe-Pt纳米多孔材料的磁性能

Fig. Microstructure, and sample geometry used for micromagnetic simulations of (a) single phase  $Fe_2B$ , (b) nanocomposite of  $Fe_2B$  and FePt, and (c) nano-porous FePt obtained after removal of  $Fe_2B$  grains, (d) simulated inplane hysteresis curves for the samples (a), (b) and (c).

22  
W. Zhang, et al. Scripta Mater. 162 (2019) 5-8.

### Fe-Pt纳米多孔材料的磁性能

Fig. Magnetic configuration of FePt ligaments at (a) 50 kOe i.e. saturated state, (b) in remanent state, (c) at a reverse field of 16 kOe, (d) to (f) magnified domain patterns for the ligament marked with white ellipse in (c). A reverse domain wall seems to exist in this ligament. Arrows in these images represent direction of magnetization. In the saturated state (at 50 kOe), all the arrows point toward right side.

23  
W. Zhang, et al. Scripta Mater. 162 (2019) 5-8.

### 结论

- Fe-Pt-B非晶合金在硫酸溶液中脱合金化后，形成了平均孔径约为5 nm的fcc-FePt相纳米多孔结构。该合金呈软磁性，在酸性环境中具有良好的甲醇电催化活性，其性能优于商用Pt/C催化剂。
- fcc-FePt/非晶纳米复相Fe-Pt-B合金经脱合金化后，形成了孔径约为10 nm的fcc-FePt纳米多孔合金。经热处理后发生fcc-FePt向 $L1_0$ -FePt相变而呈永磁性，其矫顽力达到8.4 kOe；合金的韧带厚度随相变反应的进行逐渐增大。
- $L1_0$ -FePt/ $Fe_2B$ 纳米复相Fe-Pt-B合金经脱合金化后，其 $Fe_2B$ 相被腐蚀除去，残余的 $L1_0$ -FePt相形成了平均孔壁厚度约为15 nm多孔结构。该纳米多孔合金具有高达18.5 kOe矫顽力。
- 通过改变 $L1_0$ -FePt/ $Fe_2B$ 纳米复相合金的成分，可实现 $L1_0$ -FePt纳米多孔合金的结构和磁性调控。
- 该工作也为高效制备 $L1_0$ -FePt化合物提供了新方法。

24  
**Thank you for your attention!**



## 王向东

教授级高级工程师  
江苏金陵永磁产业研究院

### 报告主题

磁传动在高能耗企业智能制造中的应用方向和作用

### 简介

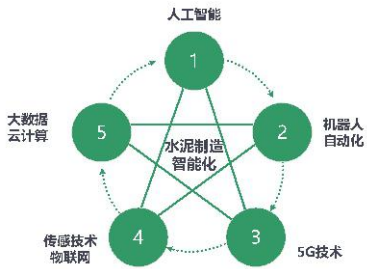
四川巴中人，江苏金陵永磁产业研究院，1993-1997，学士，哈尔滨工业大学，流体传动与自动控制；1999-2001，硕士，哈尔滨工业大学，机械电子；2001年，银河科技股份南京分公司，软件工程师/部门经理；2005年，南京艾凌节能技术有限公司，创始人/董事长；2016年，创办江苏金陵永磁产业研究院，院长；2017年，科技部“创新人才推进计划”创新创业人才；2018年，中组部第3批国家“万人计划”创业领军人才；2018年，南京市科技顶尖专家。

# 磁传动在高能耗企业智能制造中的应用方向和作用

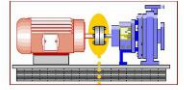


王向东  
江苏金陵永磁产业研究院  
2020年12月

## 01 技术背景



人工智能  
大数据云计算  
5G技术  
物联网  
水泥制造智能化  
机器人自动化



大部分传动系统结构图

# 目录 CONTENTS

- 01 技术背景
- 02 永磁联轴器
- 03 永磁调速器
- 04 磁轮减速机
- 05 公司简介

## 01 技术背景

### 装备升级

- 简单**：设备结构简单，拆装方便，使用寿命长，维护简单（易拆卸），拆装后快速复原，快速恢复。
- 可靠**：设备本身可靠，寿命长，维护简单。
- 高效**：设备效率高，运行稳定也高效。
- 环保**：设备不产生与接触传动，也不能产生磨损与噪音。

## 01 个人简介



王向东  
四川巴中人  
教授级高级工程师

- 1993-1997, 学士, 哈尔滨工业大学, 流体传动与自动控制
- 1999-2001, 硕士, 哈尔滨工业大学, 机械电子
- 2001年, 银河科技股份有限公司南京分公司, 软件工程师/部门经理
- 2005年, 南京艾凌节能技术有限公司, 创始人/董事长
- 2016年, 创办江苏金陵永磁产业研究院, 院长
- 2017年, 科技部“创新人才推进计划”, 创新创业人才
- 2018年, 中组部 第三批国家“万人计划”创业领军人才
- 2018年, 南京市 科技顶尖专家



## 02 永磁联轴器

## 01 技术背景

## 02 永磁联轴器



各种联轴器

### 为什么要提联轴器?

联轴器安装费时、费事，一般工人干不了，属于技术活；对中不好会引起震动。

02 永磁联轴器 9

传统联轴器可能优化升级为无机机械联动的永磁联轴器

- ◆结构简单，免维护
- ◆安装简单，直接更换原联轴器
- ◆减振50-85%，降噪
- ◆轻载启动，过载保护
- ◆节电5-40%
- ◆无级调速调速（变频+负载）

02 永磁联轴器 10

适用工况  
➢ 各种工况

适用负载  
➢ 各种转动设备

适用功率  
➢ 2级电机：20 450kW  
➢ 4级及以上电机：20 4500kW

02 永磁联轴器 11

应用案例 中海油加热炉鼓风机

改造前	改造后
电机功率 132kW	额定转速 990r/min
电压 380V	额定电流 250A
改造前运行工况	改造后运行工况
风门开度 24%	风门开度 100%
出口压力 0.68kPa	出口压力 0.68kPa
电机电流 182A	电机电流 124A

节电率23%

02 永磁联轴器 12

应用案例 神华乌海煤化工集团

负载：制冷循环水泵  
功率：400kW  
电机极数：六极

节电率：26%

改造前运行工况	改造后运行工况
水泵出口门开度 70%	水泵出口门开度 100%
新出口压力 0.45MPa	新出口压力 0.35MPa
电机电流 15.4A	电机电流 11.5A
流量 1200m³/h	流量 1200m³/h

02 永磁联轴器 13

应用案例 大连固特异轮胎

负载：冷却水泵  
功率：400kW  
电机极数：四极  
改造前功率：400kW  
改造后功率：195kW

节电率：50%

03 永磁联轴器 14

应用案例 茂名石化

负载：变相泵（1台）  
功率：75kW  
电机极数：二极  
型号：ALO410

节电率：17%

02 永磁联轴器 15

套筒异步式 套筒同步式 圆盘异步式

序号	内容	套筒异步式	套筒同步式	圆盘异步式
1	安装对中	简单	简单	简单
2	附加轴力	无	有	有
3	软启动性能	好	无	好
4	结构	最简单	简单	简单
5	多驱动同步性能	好	无	好
6	散热机械效果	好	好	好
7	免维护	免维护	免维护	免维护
8	过载保护性能	好	好	好
9	故障恢复快慢	较快	一般	一般

套筒异步式永磁联轴器是一种结构简单、安装维护最简单的新型永磁联轴器

03 永磁调速器 16

03 套筒式永磁调速技术 17

为什么要提永磁调速器呢？高压变频很成熟很广泛啊？

无论是控制精度、控制速度、节电效果都是高压变频器最好。但是高压变频用多了，产生谐波污染电网；电子元器件不容易伺候（温度、湿度、粉尘、易燃易爆等环境都不能很好适应。故障不可预测，电容和功率单元不知道什么时候坏。

03 套筒式永磁调速技术 18

03 套筒式永磁调速器 19

套筒式永磁调速技术原理

03 套筒式永磁调速器 20

- 适用工况：工艺需要频繁调节
- 适用负载：离心式风机/泵/压缩机，轴流式风机/泵
- 适用功率：2极电机：45-450kW，4极及以上电机：20-4500kW
- 性能参数：节电率：10-60%，减振：50-85%，调速范围：30-98%

03 套筒式永磁调速器 21

应用案例

扬子石化炼油厂

负载：减压引风机  
功率：220kW  
电机级数：四极  
型号：ALTS70S  
改造前电流：12.5A  
改造后电流：8.5A  
节电率：32%

调速范围为0-98%。

03 套筒式永磁调速器 22

应用案例

扬子石化热电厂

负载：引风机（6台）  
功率：500kW  
电机级数：四极  
型号：ALT750S

03 套筒式永磁调速器 23

应用案例

石家庄炼化烷基化项目

负载：酸循环泵（1台）	负载：熔体环泵（2台）
功率：1120kW	功率：500kW
电机级数：六极	电机级数：六极
型号：ALTI500H	型号：ALTI000H

该项目为中国石化首套20万吨/年聚丙烯烷基化装置，主要包括烷基化装置及系统配套4个单项工程。此套装置是由中科院、石研、洛阳工程共同开发，具有自主知识产权。该技术主要解决烷基化企业高辛烷值加剂生产的突出问题，满足市场和生产符合国际更高环保要求的高辛烷值，是中国石化2017年技术攻关“十多项”项目和重点建设项目，也是中石化第一家工业化装置，具有积极的示范作用。

03 套筒式永磁调速器 24

应用案例

大唐辽源发电厂

负载：磨区热网循环泵（3台）	负载：热网循环泵（1台）
功率：630kW	功率：900kW
电机级数：四极	电机级数：四极
型号：ALT0750H	型号：ALT1000H

**03 永磁调速器** 25

**应用案例**

安徽山鹰纸业股份公司

新建2套锅炉系统项目，其中引风机、二次风机采用永磁调速器控制：

负载：引风机（4台）	负载：二次风机（2台）
功率：1000kW	功率：800kW
电机极数：六极	电机极数：四极
型号：ALT1500H	型号：ALT1000H



**03 永磁调速器** 26

**应用案例**

华电哈尔滨第三发电厂

负载：热网循环泵  
功率：2000kW  
电机极数：四极  
型号：ALT2000H  
节电率：27%

同等工况下，5天耗电量统计对比

设备	耗电量 (kWh)					日耗9吨 (kWh)
1#永磁调速	27536	27764	27216	25697	26795	27201
4#工频运行	37966	38156	37439	37267	37392	37548



**03 永磁调速器** 27

**应用案例**

华电集团北京热电

液力耦合调速

负载：热水炉送风机（3台）  
功率：450kW  
电机极数：六极  
型号：ALT750S  
节电率：10%

说明：现场原来采用液力耦合器调速  
改造前：启动电流70A，运行电流 34.9A  
改造后：启动电流50A，运行电流 31.4A。




永磁调速




**03 永磁调速器** 28

**永磁调速概念**

永磁调速是电气原理机械实现，通过机械手接触时材料剪切力减小，从而实现对负载的调速。其本质是机械控制原理，随着剪切力减小，因此不同负载扭矩的调速。

**永磁调速特点**

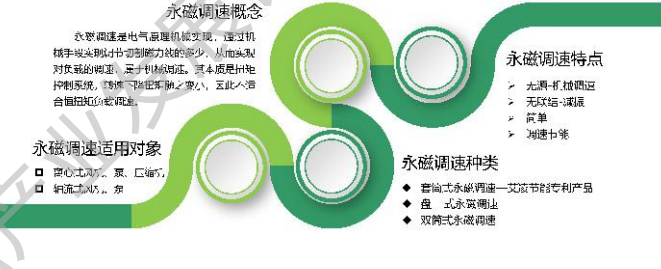
- 无刷、机械调速
- 无纹涌、调速
- 简单
- 调速中频

**永磁调速适用对象**

- 离心式风机、泵、压缩机
- 输送机、泵

**永磁调速种类**

- 套筒式永磁调速—艾奇节能专利产品
- 盘式永磁调速
- 双筒式永磁调速

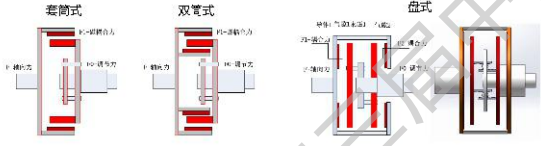


**03 永磁调速器** 29

套筒式 双筒式 盘式


序号	内容	套筒式	双筒式	圆盘式
1	耦合轴/差轴齿圈	高/低/无	简单/无	复杂/有
2	调节功率/转矩大小	简单/无	简单/小	复杂/大
3	散热结构/散热效果	最简单/最好	复杂/不好	复杂/好
4	安装维护	最简单	简单	复杂
5	冷却方式/冷却层	水冷	水冷	水冷/油冷
6	调节的线性度	最好	好	一般

结论：  
迄今为止，套筒式永磁调速器是最简单的调速技术！



**03 永磁调速器** 30

序号	内容	永磁调速	高压变频
1	调速方式	机械调速	电/磁调速
2	系统复杂程度	简单、零件少	复杂、元器件多
3	使用寿命	皮实、维护简单、恶劣环境适应能力	娇气、环境适应性差、不能适应温度高、湿度大、粉尘含量高、有谐波、易燃易爆等恶劣环境
4	环保	绿色环保，无任何污染	产生谐波污染电网
5	寿命	长（设计寿命30年）	短（设计寿命8-10年）
6	故障可预防性	通过轴承温升、振动数据可预测或避免	故障不可预测，电网晃电会跳，电子元器件故障也会跳
7	节能效果	比高压变频低1-2%	高
8	控制精度	高	非常高
9	适应载荷	交扭矩载荷	各种载荷


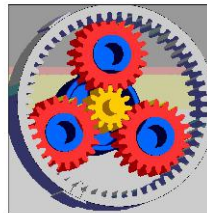


**04 磁轮减速机** 31



**04 磁轮减速机** 32

**齿轮传动**

04 磁轮减速机 33




磁轮传动                      齿轮传动

序号	磁轮传动	齿轮传动
1	无接触 (无磨损、不需要润滑)	有接触 (磨损、需要润滑)
2	无环保问题 (漏油/废油)	存在环保问题 (漏油/废油)
3	圆周受力, 强度要求低	单齿受力, 强度要求高, 有冲击
4	可靠性高、故障隔离 (过载保护)	故障率偏高、故障易扩大

当前进展 34

样机制作



当前进展 35

实验




04 永磁磁轮传动 36



04 永磁磁轮传动 37



04 永磁磁轮传动 38



05 公司简介 39

品牌定位:

创新、服务、高品质

05 公司简介 40

设计/管理理念:

简单、简单、再简单

为用户提供至简磁传动方案



## 吕毅

教授  
主任医师  
博士生导师  
西安交通大学

### 报告主题

用稀土钕铁硼强磁生物效应创新消化外科修复重建技术的体系构建

### 简介

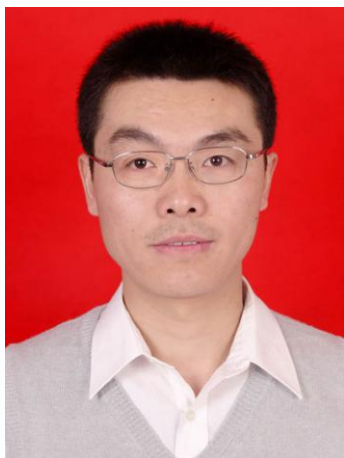
教育部创新团队学科带头人，卫生部有特殊贡献的中青年专家，陕西省“三秦学者”特聘教授。现任西安交通大学校长助理、医学部副主任、一附院肝胆病院副院长，陕西省再生医学与外科工程研究中心主任、精准外科与再生医学国家地方联合工程研究中心主任。

兼任中国医学装备协会转化医学分会磁外科创新专家委员会主任委员，中国电工技术学会生物电工专业委员会副主任委员，全国卫生产业企业管理协会医疗科技创新发展分会会长等。

全国五一劳动奖章、陕西省五四青年奖章、陕西省道德模范（敬业奉献类）奖章获得者。以第一完成人获国家科技进步奖、中华医学科技奖、教育部技术发明奖等国家及省部级奖励10余项。主持科技部重点研发计划项目、国家自然科学基金重点项目、国家重大科学仪器研制项目、重大仪器专项等国家及省部级项目20余项。发表学术论文800多篇，SCI收录283篇。授权国家发明专利46项。主持、指导开展新医疗新技术26项。

### 报告摘要

该成果在国家自然科学基金重点、面上项目及省部级科研项目的资助下，秉承医工结合理念，深入研究稀土金属钕铁硼强磁生物力学和组织效应，发明并制成安全特效的吻合器械，革新了复杂疑难消化道疾病外科治疗中的修复重建模式，诞生了一系列国内外首创性研究成果。被国内外专家评价为高度原创、临床应用优势明显，甚至在某些疾病治疗中具有不可替代性，对推进疾病治疗的微创化和实现快速康复外科具有重要意义。



## 游才印

教授  
博导  
副院长  
西安理工大学技术研究院

### 报告主题

柔性磁性薄膜的磁稳定调控技术

### 简介

陕西省“百人计划”特聘专家，西安理工大学技术研究院副院长。先后在西安理工大学获得学士学位，中国科学院金属研究所获得博士学位，期间于2001.8-2002.8月选派在韩国产业研究院合作培养一年。2003.7-2009.9先后在日本国立物质材料研究所、英国牛津大学材料系从事科学研究工作。2009.9-现在于西安理工大学材料科学与工程学院从事教学和科研工作。担任中国材料研究学会青年委员会常务理事、功能材料学会常务理事等学术职务。

研究兴趣主要集中在金属功能材料、能源材料等领域，包括稀土永磁、磁性薄膜、锂离子电池等。研究内容的主要应用背景是电子、信息存储器件及传感器、二次电池正负材料等。主持（或完成）自然科学基金委自然科学基金4项及重点类国际合作项目1项，教育部霍英东基金等省部级项目3项，参与科技部国际合作项目1项。迄今，在ACS Nano, Mater. Horizon., Acta Mater., Appl. Phys. Lett., J. Mater. Res., Electro. Acta., Sci. rep., J. Appl. Phys., Carbon等国际知名刊物发表论文70余篇，他引1000余次，获授权专利10余项。获校教学成果特等奖、二等奖各1项。


**第三届中国磁产业发展论坛**  
**柔性磁性薄膜的磁稳定调控技术**  
 报告人: 游才印  
 E-mail: caiyinyou@xaut.edu.cn  

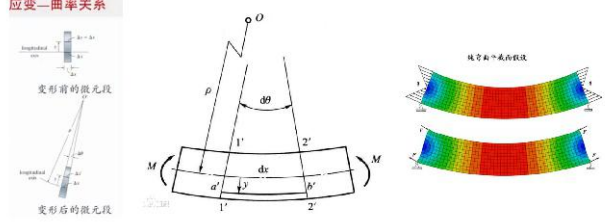

**汇报提纲**  
 一、柔性电子元器件产业需求  
 二、弯折对磁响应的潜在影响  
 三、如何克服弯折的影响-结构设计  
 四、结论及展望

**一 柔性电子元器件产业需求**

**电子元器件的柔性化需求催生了柔性电子产业**  
 柔性电源、柔性电路、柔性显示、柔性传感、柔性存储  


**产业趋势:** 从市场规模看, 柔性电子具有广阔市场, 规模迅速扩张, 成为国家支柱产业。据统计, 2018年柔性电子产业市场规模为469.4亿美元, 预测至2028年, 行业规模将达到3010亿美元, 2011年到2028年的复合增长率为30%, 处于长期高速增长态势。  
**《中国制造2025》:** 基于信息物理系统的智能装备、智能工厂等智能制造正在引领制造方式变革, 可穿戴智能产品、智能家居、智能汽车等智能终端产品不断拓展制造业新领域, 我国制造业转型升级、创新发展迎来重大机遇。

**二 弯折对磁响应的潜在影响**

**柔性 (弯折、扭曲): 非均匀的应力应变**  
 应变—曲率关系  


变形前的微元段  
 变形后的微元段  
 柔性材料弯曲应力分布

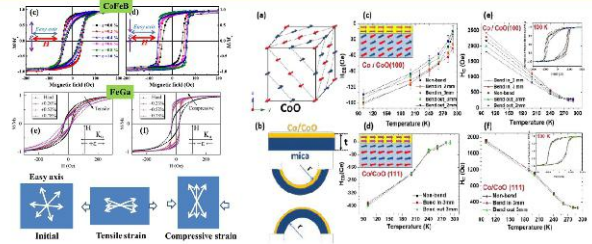
### 磁化行为与应力、应变的关联

**磁各向异性:**  $F = -JM_s [\cos \theta_M \cos \theta_H \cos(\varphi_M - \varphi_H) + \sin \theta_M \sin \theta_H] + 2\pi NM_s^2 \sin^2 \theta_M - K_u \sin^2 \theta_M + F_{MAE} + F_{ME}$

**磁矩翻转:**  $1/\gamma \tau_{90} = \gamma = 2 \sqrt{\frac{3}{4} \left[ |K_u| - \frac{3}{2} A_e \sigma_0 \cos 2\pi \right]}$   
 $1/\gamma \tau_{90} = H_0 = \frac{\pi A_e \sigma_0}{2\mu_0 M_s \cos \theta} \delta$

7

### 直接机械应力、应变调控磁性

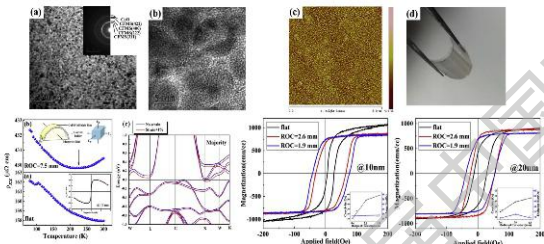


Gao, Wang, Dai, et al., Appl. Phys. Lett., 2012, 100:122407  
 Zhou, Tang, et al., Appl. Phys. Lett., 2014, 105:052401  
 Thai Duy Ha, et al., Nanoscale, 2020, 12:3284-3292

8

### 直接机械应力、应变调控磁性

机械调控自旋零带隙CoFeMnSi柔性薄膜的磁性及其输运性能

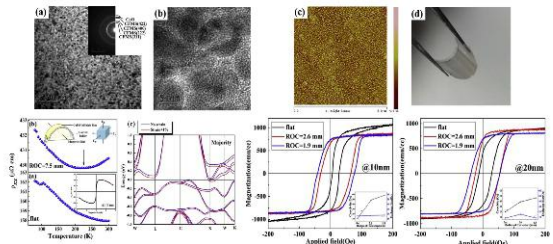


Fangfang Xiu, Cuiyun You, et al., J. Alloy. Comp., 2020, 813: 152207

9

### 直接机械应力、应变调控磁性

机械调控自旋零带隙CoFeMnSi柔性薄膜的磁性及其输运性能

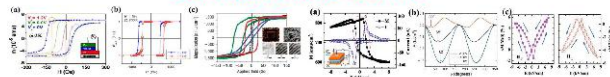


Fangfang Xiu, Cuiyun You, et al., J. Alloy. Comp., 2020, 813: 152207

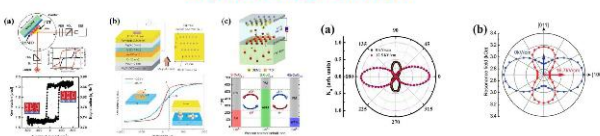
10

### 间接应力、应变调控磁性

交换偏置及磁矩的调控: 应力、离子



磁各向异性的调控: 电荷及应力

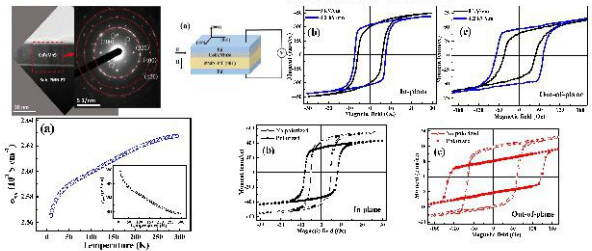


Y. Kohda, M. Ochi, N. Shimomura, et al., Appl. Phys. Lett., 2014, 104: 132601; Y. Liu, J. W. Mei, G. M. B. H. H. Tokdar, et al., Nature Mater., 2009, 7: 478-481; K. Wang, J. M. Liu, and Z. F. Ren, Science in Technol., 2010, 55: 37-44; H. A. Adnan, J. I. J. J. A. Adnan, C. N. F. Y. et al., Adv. Mater. Sci. Eng., 2018, 21: 1470-1474.

11

### 间接应力、应变调控磁性

PMN-PT/CoFeMnSi薄膜磁性的电场调控



J.R. Yu, C. Y. Wu, et al. Appl. Phys. Lett., 2018, 112: 262106

12

### 如何克服弯折的影响-结构设计

13

### 结构设计1: 弹性缓冲层舒缓或消除应力、应变

14

### 有限元计算结果: 弹性缓冲层弯曲状态下发生塌陷

解析方程:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i$$

$$\nabla \cdot \sigma = 0$$

$$\sigma = E' \cdot \epsilon'$$

$$\epsilon = \frac{1}{2} (\nabla u + \nabla u^T)$$

15

### 示例: CoFeMnSi/AF(铝箔) and CoFeMnSi/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/AF

The effect of sponge

without compression      with compression

$$\frac{t+\Delta t}{l} = \frac{R+t}{R} \frac{1}{\epsilon_1} \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad \epsilon = \frac{\Delta t}{l} = \frac{\epsilon}{2R+t}$$

$$b = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{2R-\epsilon_2}{2R-\epsilon_1} = \left(1 - \frac{\Delta t}{\epsilon_1}\right) \times \frac{2R+\epsilon_1}{2R+\epsilon_2-\Delta t} \approx 1 - \frac{\Delta t}{\epsilon_1}$$

16

### 压缩位移、应力与缓冲层模量、厚度、泊松比的关系

17

### 弹性缓冲层提升薄膜的稳定性和可恢复性

18

### 结构设计2: 纳米柱状结构舒缓或消除应力、应变

(a) CFO thin film on PI substrate with convex mold and magnetic field.  
(b) CFO nano-pillar structure on PI substrate with magnetic field.

Crystallographic axes: [001], [010], [100].

L.K. Shen, ..., C. Y. You, ..., M. Liu, C. L. Jin, Adv. Sci., 2018, 1800855

19

### 示例: Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub>, LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub>纳米柱结构

(a) CFO nano-pillar film fabrication process: Chemical Etching Process (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) of CFO film.

(b) SEM image of Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> nano-pillar film (400 nm).

(c) SEM image of LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar film (400 nm).

(d) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(e) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(f) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(g) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(h) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(i) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(j) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(k) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(l) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(m) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(n) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(o) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(p) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(q) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(r) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(s) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(t) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(u) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(v) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(w) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(x) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(y) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

(z) Magnetization curves for Co<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> and LiFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> nano-pillar structures.

L.K. Shen, M. Liu, ..., C. Y. You, et al, Mater. Horiz., 5, 250 (2018).

L.K. Shen, ..., C. Y. You, ..., M. Liu, C. L. Jin, Adv. Sci., 2018, 1800855

20

# 四

## 结论及展望

21

### 结论与展望

- 柔性电子器件性能稳定需求
  - 可穿戴、柔性装备或者器件要求功能元器件具有稳定的物理性能。
- 结构设计促进性能的稳定
  - 在柔性功能元器件设计中消除或者缓解应力应变的结构均可以促进性能的稳定。
- 结构自身的稳定性
  - 稳定物理性能的特殊结构自身的结构稳定性还未知，期待深入讨论和研究。

22

## 谢谢，恳请批评指正!

23



## 伊晓辉

技术总监

浙江省磁性材料应用技术创新中心

### 报告主题

5G+时代磁电功能材料应用趋势探讨

### 简介

中国科学院宁波材料技术与工程研究所副研究员。2007年毕业于哈尔滨工业大学，获本科学位；2010年毕业于哈尔滨工业大学，获硕士学位；2014年3月毕业于法国雷恩国立应用科学技术学院，获得化学博士学位。主要从事多功能分子材料的设计、晶体生长与光电磁性能研究；柔性多功能信息材料及器件的制备研究；电场作用下材料物性的调控规律以及相关柔性信息器件研究。获得中国博士后资助一等资助，国家自然科学基金青年基金资助，申请专利3项，其中以第一作者或通信作者身份在 Chem. Eur. J., Inorg. Chem., Dalton Trans., ACS Appl. Mater. Interfaces 等国际期刊发表文章7篇。

### 报告摘要

5G通信技术让万物互联的物联网成为了可能和现实，并推动我们的社会向高效便捷，绿色节能的方向不断发展。5G时代技术的进步和发展需要材料科学的支撑。磁性材料是信息化、自动化、机电一体化不可或缺的关键性战略材料，由磁性材料制备的元器件广泛应用于航空航天、汽车、通讯、高端装备、家电和消费电子等领域。大数据、物联网、人工智能等技术伴随着5G通信技术正加速影响磁性材料发展的方向。本报告以信息的采集、传播和存储为主线，结合5G时代相关产业应用需求，简单探讨磁性材料及器件在相关领域的发展现状和趋势。



### 报告目录

- 0-5G技术及5G时代的思考
- 1-物联网和磁传感器
- 2-5G射频-天线
- 3-5G射频-环形器等微波器件
- 4-5G-功率电感
- 5-5G-吸波材料
- 6-大数据-磁性数据存储
- 7-数字化制造与磁性材料

### 5G通信-通信频率的增加

高频信号抗干扰能力和辐射能力明显减弱

电磁波频率  $\uparrow$   $\propto$  辐射损耗

空间损耗  
雨衰损耗  
穿透损耗

频段/频率	穿透损耗	雨衰损耗	穿透损耗	雨衰损耗
28GHz VS 2.6GHz	+20dB	+10dB	+8dB	+14dB
				+5dB

经历同样的路径  
28GHz比2.6GHz多衰减57dB  
28GHz的信号功率衰减为2.6GHz的百万分之一

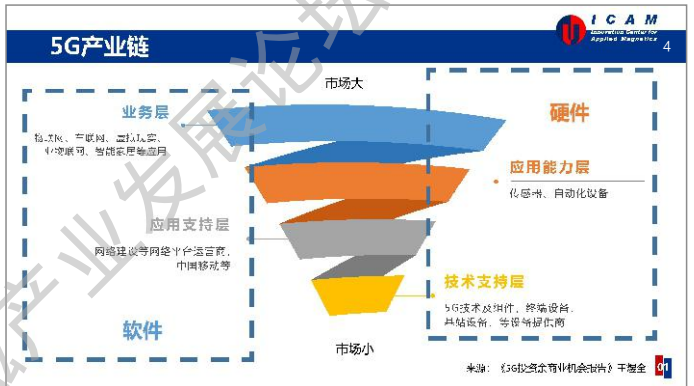
解决方法

增加基站数量:

Massive MIMO技术:

1G 2G 3G-4G 5G

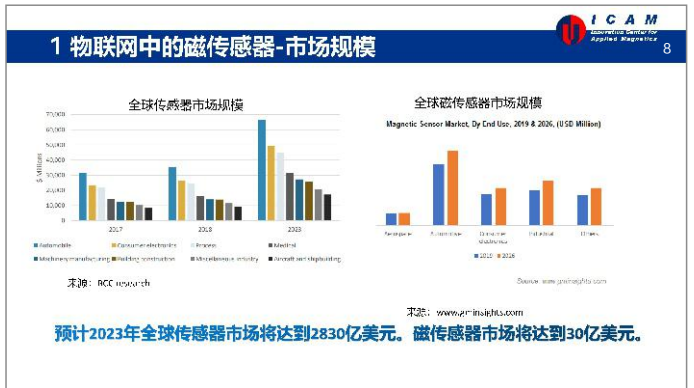
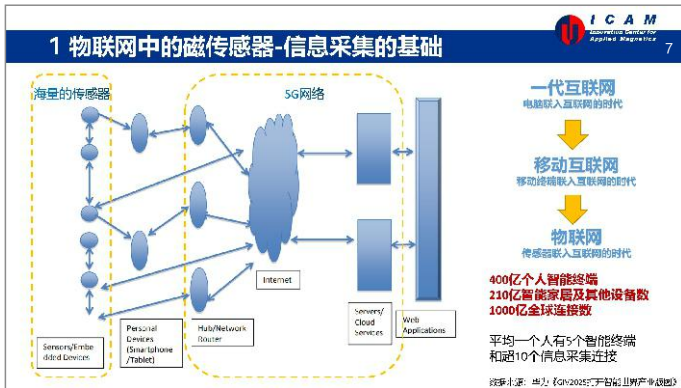
波束成形(算法+天线):



### 1 物联网中的磁传感器

互联网的发展趋势

- 第一代互联网时代: 建立一个网络, 电脑联入互联网
- 移动互联网时代: 手机联入互联网
- 物联网时代: 万物皆联入互联网



### 1 物联网中的磁传感器-特点及应用

**磁性传感器特点**

- ✓ 高灵敏度
- ✓ 低功耗
- ✓ 小型化
- ✓ 高频响应

**工业应用**  
位置、速度、位移、振动、扭矩等

**汽车领域**  
位置、速度、位移、扭矩、胎压等

**生物医疗**  
细胞、细菌、病毒等

**消费电子**  
导航、运动、惯性等

**航天军工**  
位置、速度、位移、扭矩等

### 1 物联网中的磁传感器

**高灵敏度低功耗磁传感技术**

- AMR传感
- GMR传感
- TMR传感
- GMI传感

**典型的两种效应：巨磁电阻GMR和隧道磁电阻TMR**

**柔性可穿戴应用场景中的磁传感**

**海量传感器的续航-从环境中采集能量**

### 1 物联网中的磁传感器-主要参与者

**Magnetic sensor supply chain and key players\***

**汽车**

- Magnetic sensor chips: SENSITEC, Melexis, Infineon, TE
- ASIC chips: Melexis, Infineon, TE
- Packaged sensors: Melexis, Infineon, TE
- Systems: VW/Audi, GM/PSA, Continental, Bosch, Denso, Magneti Marelli, Denso, Delphi, Johnson Controls

**电子罗盘**

- Magnetic sensor chips: AKM, ALPS, HANSA, ST, Bosch, Sensortec
- ASIC chips: AKM, ALPS, HANSA, ST, Bosch, Sensortec
- Packaged sensors: AKM, ALPS, HANSA, ST, Bosch, Sensortec
- Systems: Samsung, Apple, Huawei, Oppo, Xiaomi, Lenovo

**工业**

- Magnetic sensor chips: Allegro, Sensortec, QM, AKM, DIODES, TE, SII, HVE
- ASIC chips: Allegro, Sensortec, QM, AKM, DIODES, TE, SII, HVE
- Packaged sensors: Allegro, Sensortec, QM, AKM, DIODES, TE, SII, HVE
- Systems: Siemens, Schneider Electric, Siemens, Bosch, SICK, Schneider Electric, ABB, PVE, Wipac, Siemens, Siemens

**汽车领域**

- Allegro Microsystems, 英飞凌 (Infineon)、恩智浦 (NXP)、迈来芯 (Melexis)、TDK

**电子罗盘领域**

- 旭化成 (AKM)、雅马哈 (Yamaha)、阿尔卑斯电气 (Alps Electric)、美新 (MEMSIC)、爱森科技 (Isentek)、宇诺屯 (Voltafield)、矽奇科技 (GST)、深迪半导体 (Senodia)

**工业领域**

- 霍尼韦尔 (Honeywell) 和Diodes

数据来源: Yole development

### 2 5G射频前端-终端天线

**5G手机内置天线数量增多**

**5G频段采用Massive MIMO技术**

**手机内部空间进一步缩减**

**柔性可穿戴设备无线终端爆发增长**

2G	3G	4G	5G
800-900MHz	800-900MHz	800-900MHz	2400-2600MHz
8-8mm	4-4mm	3-4mm	2-2mm
陶瓷	FR4	陶瓷/FR4	陶瓷/FR4
1	1.2	4.5	7.8
18.15	18.15	18.15	18.15
12.25	12.25	12.25	12.25

资料来源: Yole development

### 2 5G射频前端-终端天线

**不同天线介质参数比较**

基板材料	介电常数 (ε)	损耗正切角 (tanδ)	操作频段
FR-4	3.9-4.3	0.02-0.025	<10GHz
PTFE	2.17-3.20	0.0013-0.009	<20GHz
LTCC	5.7-9.1	0.0012-0.0063	<12GHz
PI	4.0	0.004-0.007	<10GHz
LCP	2.9-3.15	0.002-0.0045	<110GHz

**天线设计的四个考虑:**

- ✓ 小型化能力
- ✓ 损耗
- ✓ 可贴合性
- ✓ 带宽

**引入磁导率有助于天线小型化、增加带宽**

**天线为什么选择LCP (liquid crystal polymer) ?**

- 1、柔性，可贴合，可充分利用空间
- 2、介电常数低
- 3、损耗低

**柔性、低介电常数、高磁导率、磁电介质?**

来源: 3C research

### 2 5G射频前端-终端天线

**市场规模**

**全球天线市场**

**全球手机天线市场**

根据Bcc research预测，2024年全球天线市场规模在260亿美元而根据Yole Development预测，终端天线市场空间将由2018年的22.3亿美元增加到2022年的30.8亿美元

### 2 5G射频前端-终端天线

**主要参与者**

**美国厂商**

- 安费诺 (Amphenol)

**日本厂商**

- 村田 (Murata)

**中国厂商**

- 信维通信、立讯精密、硕贝德等

**信维通信** **LUXSHARE ICT** **硕贝德科技 SPGDC** **Amphenol**

### 3-5G射频-环形器等微波器件

**隔离器原理示意图**

**环形器原理示意图**

产业受益产业转移+用量提升双重逻辑: 1、产业转移，环形器此前龙头厂商为 skyworks, molex 以及 TDK 等美系、日系厂商，近年来日系美系退出，国产替代浪潮，通信环形器向国内产业转移趋势明显; 2、用量提升，5G MIMO 下环形器和隔离器用量大幅增加，通道数由 4G 时期的 4 通道、8 通道，大幅增加到 64 通道，单基站用量达到 192 个，下游需求大幅提升!

### 3、5G射频-环形器等微波器件

ICAM Applied Magnetics 17

技术发展趋势:

尖晶石型铁氧体  
↓  
石榴石型铁氧体  
↓  
六角形单晶型硬磁铁氧体(巨磁阻铁氧体)

材料	磁导率	损耗	频率	温度	应用
尖晶石型铁氧体	10-100	0.01-0.1	1-100 GHz	室温-100°C	微波器件
石榴石型铁氧体	10-100	0.01-0.1	1-100 GHz	室温-100°C	微波器件
六角形单晶型硬磁铁氧体	10-100	0.01-0.1	1-100 GHz	室温-100°C	微波器件

### 3 5G射频-环形器等微波器件

ICAM Applied Magnetics 18

#### 环形器市场规模

• 5G 基站环形器市场空间有望达 115 亿元

	2019	2020E	2021E	2022E	2023E	2024E	2025E
新建 5G 基站数 (万站)	15	65	120	110	87	59	43
建设周期内基站数合计 (万站)				500			
以 64 通道为例							
单基站扇区数 (个)	3	3	3	3	3	3	3
单扇区通道数 (个)	64	64	64	64	64	64	64
单通道环形器价值量 (元)	14	14	13	12	11	10	10
国内 5G 基站环形器市场规模 (亿元)	4.0	17.5	30.0	25.3	18.5	11.4	8.4
建设周期内市场空间合计 (亿元)				115			

数据来源: 广发证券发展研究中心

### 3、5G射频-环形器等微波器件

ICAM Applied Magnetics 19

#### 环形器主要参与者

公司	所属国家	公司业务
TDK	日本	以磁性技术开发各类电子材料、材料, 产品主要用于汽车、通信和工业设备与能源市场
日立金属	日本	公司生产金属材料、功能材料(含磁性材料)两大类, 产品用于新能源汽车零件、电子元件、工业挤出成型等。
Partron	韩国	主要从事磁性材料、电子元器件、工业挤出成型、陶瓷、二极管、手机陶瓷模组等
Skyworks	美国	业务为射频及无线通信解决方案; 高功率、毫米波、微波器、二极管、定向耦合器、滤波器等等。
SDP	立金大	无线通信和微波射频解决方案的供应商
天和防务	中国	公司以子公司华德通信、欧普微、成源通为主业平台, 主要产品包括行波管、微波管等元器件, 射频微波小信号器件, 特种微波器件, 公司近期在公告, 收购成立了公司特种微波器件研发项目公司。
三晶科技	中国	从事微波与信息技术相关产品生产与销售
唯捷芯微	中国	专业从事微波器件材料、射频器件三个板块, 低损耗材料研发, 并研发高频毫米波器件业务

SDP, Skyworks, Partron, TDK, 日立金属等国外公司市场占有率超过50%

资料来源: 安信证券研究中心

### 4、5G-功率电感

ICAM Applied Magnetics 20

器件集成化及功耗问题突显 → 开关电源-第三代半导体 → 低损耗小体积功率电感

不同电感技术能效对比

High Frequency Applications

High Frequency Inductors

High Frequency Applications

Pdc-dc=Pic+Ppi+Pother

### 4、5G-功率电感

ICAM Applied Magnetics 21

理想磁芯材料: PB合金, FeAlNi, PC合金

实现小型/高效(低发热)的两全设计

传统磁芯材料: MnZn铁氧体

- 金属软磁
- 非晶纳米晶软磁
- SMC

### 4、5G-功率电感

ICAM Applied Magnetics 22

#### 全球电感市场规模 (亿元)

年份	2018	2019	2020E	2021F	2022F	2023F	2024F
市场规模	481.6	486.4	445.4				673.5

CAGR: 3.4%

#### 全球部分区域高频电源电感市场 (美元)

年份	2018	2019	2024
北美	321	335	492
欧洲	275	283	402
亚洲	516	547	824

资料来源: 中电电子元件行业协会, 安信证券研究中心

资料来源: RCC Research

### 4、5G-功率电感

ICAM Applied Magnetics 23

全球电感器主要制造商集中在日本、美国、中国大陆、中国台湾、韩国、德国等地。其中, 日本企业的整体市场占有率有半壁江山, 达到 50.1%; 中国大陆电感器制造商约占全球 8.3% 的份额 (根据中国电子元件行业)。

国家	厂商名称
美国	AEM、AVX、线艺 (Colcraft)、普昂 (Pulse)、威世 (VISHAY)
德国	爱普斯 (EPCOS)、WE
日本	兴亚 (KOA)、村田 (muRata)、松下 (Panasonic)、住友 (sumida)、太阳诱电 (TAIYO YUDEN)、TDK、TOYO、特瑞仕 (TOREX)
中国	奇力新 (CHILISIN)、美磊 (Mag-Layers)、台庆 (TAI-TFCH)、德磁 (DECM)、光磁 (YIKING)、华新科 (WALSIN)、巨匠 (YAGCO)
中国台湾	顺络、麦捷、丰晶、格莱尔、风华高科、科达磁、等

### 5、5G-吸波材料

ICAM Applied Magnetics 24

消费电子 | 智慧交通 | 其他场景

- 手机/终端内部天线增多, 内部设计空间有限, 电磁干扰问题突出
- 毫米波雷达/汽车传感器互相干扰, 车载电子与人体植入电子互相干扰
- 电路工作频率增加, 设备微型化导致空腔谐振器越来越普遍
- RFID 13.75MHz
- 无线充电 100-205kHz

### 5、5G-吸波材料

ICAM Applied Magnetics 25

#### 未来发展趋势:

- GHz高磁导率磁性材料
- 磁电复合材料
- 宽频吸波材料
- 导热吸波材料

1 传统铁氧体材料具有高频吸收性能，但磁导率较低，且对电磁波吸收频率范围窄，不能满足5G通信对宽频吸收材料的需求。

2 复合材料 将多种材料进行复合，以满足“宽、强、轻、薄”等综合性能。

3 智能化 具有吸波功能、磁电耦合、自热调控、并对信号作出反馈性响应的材料。

### 5、5G-吸波材料

ICAM Applied Magnetics 26

#### 全球电磁屏蔽市场规模

#### 中国电磁屏蔽产量和需求量

来源：观研天下，方正证券研究所

### 5、5G-吸波材料

ICAM Applied Magnetics 27

公司名称	简介
Hexcel Corporation (赫氏公司)	赫氏公司2016年收购美国ARC technologies公司，ARC technologies公司是美国最大的吸波材料生产商，同时也是此类技术的全球领导者。主要针对航空航天、国防和商业市场，提供解决微波/射频干扰、雷达吸收和EMI抑制的材料。
Laird Technologies	莱尔德科技是为电信、数据通讯、计算机、电子产品等行业提供电磁干扰(EMI)屏蔽材料、远程信息、热管理产品及无线解决方案的全球领先设计者和制造商。2011年收购Emerson & Cuming电磁屏蔽/吸波材料业务
EMC technologies	
Kitagawa Electronics Inc.	新加坡公司，隶属于北川工业株式会社，主要产品包括：电磁噪声抑制片，导热贴片，等产品
浙江原邦	是一家研发、生产和销售新型电磁功能材料的高新技术企业，专业的EMI&EMC解决方案供应商。
大连东信	大连东信微波吸收材料有限公司创立于1998年,是国内规模最大、产品最全的吸波材料生产商及方案设计承建商

### 6、大数据与磁性信息存储

ICAM Applied Magnetics 28

#### 全球数据增长趋势

#### Global data center compute instances

#### Data center region

全球数据量在 2020 年有望达到 50ZB，产生200TWh的能耗，海量数据存储和能耗问题突出，需要更高速高效的存储处理方式。

资料来源：Statista, 2020, 367, 5481

### 6、大数据与磁性信息存储

ICAM Applied Magnetics 29

#### 技术发展趋势

Toggle MRAM (2006) In-plane STT (2012) Perpendicular STT (2018) Three-terminal MRAM (Spin-orbit torque)

Not Scalable beyond 135nm Not Scalable beyond 65nm Fully Scalable

#### STT-MRAM优势

- 读写速度快
- 功耗低
- 非易失
- 存储密度高

资料来源：“Stanford Memory Index,” <http://www.stanford.edu/stanford-memory/>

### 6、大数据与磁性信息存储

ICAM Applied Magnetics 30

#### 市场观察

#### 全球存储设备和服务器市场

#### MRAM市场规模

资料来源：Yole Développement, 4, 2018

### 6、大数据与磁性信息存储

ICAM Applied Magnetics 30

#### 主要参与者

公司	简介
Toshiba	东芝的4F1T1R技术是领先的开发者和磁RAM (MRAM) 制造商，提供独立嵌入式MRAM产品，是STT-MRAM商业化的主要参与者。
三星	三星在MRAM研发方面是业界领导者，2002年第一档了研发工作，2019年，三星发布了采用28nm工艺技术的1Gb嵌入式STT-MRAM。
台积电	2018年，台积电进行了eMRAM总产量50“M生产”，2019年生产采用22nm制程的eMRAM芯片，台积电已完成了22nm嵌入式STT-MRAM技术验证，进入量产阶段。
GlobalFoundries	GlobalFoundries正在开发FD-SOI技术，特别在22nm制程的FD-SOI，2020年，GlobalFoundries宣布其22nm FD-SOI平台eMRAM投入生产。
Intel	英特尔总是MRAM的早期参与者，该公司采用的是基于FET技术22nm制程，2018年，推出了一款基于22nm制程的MRAM技术验证。
HFC	台湾一家新兴半导体公司，从事MRAM的研发和生产。
上海英诺	上海英诺投入40nm低密度垂直隧穿磁性随机存取存储器(STT-MRAM)技术，其核心技术源于MRAM技术大拿Everspin的TDIC，且成功投入量产(量产线)，其嵌入式(embedded)存储技术和应用。
海康磁材	中国海康旗下从事MRAM存储的企业，海康磁材是与台积电以先进封装应用材料(Applied Materials)合作，海康针对STT-MRAM技术不同阶段与台积电合作。

### 7、数字化制造-磁性材料增材制造

ICAM Applied Magnetics 32

#### 增材制造结构材料

- 金属材料
- 高分子材料

#### 增材制造功能材料

- 磁性材料

#### 磁性材料增材制造优点:

- 缩短设计验证周期
- 加工复杂结构磁部件
- 磁部件近净成型
- 构造复杂磁路和磁路结构

切前工艺浪费材料 复杂形状难以加工 仿真验证周期长 复杂磁路结构难实现



ICAM  
Innovation Center for Applied Magnetics

INNOVATION CENTER FOR APPLIED MAGNETICS

www.icamzj.com | 0574-86681080

第三届中国磁产业发展论坛



## 何 强

首席系统工程师

北京索为系统技术股份有限公司

### 报告主题

“产业数字化”，工业APP助力中国制造提速增效

### 简 介

北京索为系统技术股份有限公司首席系统工程师、副总裁，系统工程研究院院长。专注于系统工程、工业APP等领域。工业互联网产业联盟工业APP特设工作组主席，中国工业技术软件化产业联盟总体组副组长，《科技导报 体系工程专刊》编委。著有《工业APP：开启数字工业时代》（机械工业出版社，2018年5月），《系统工程 基于国际标准过程的研究与实践》（机械工业出版社，2019年6月），并发表论文十余篇。主持编写《工业技术软件化白皮书》、《工业APP白皮书（2020）》，并参与多项工业APP联盟标准制定工作。

## “产业数字化”，工业APP 助力中国制造提速增效

知识自动化  
工业技术软件化



北京索为系统技术股份有限公司  
Beijing Sysware Technology Co., Ltd  
www.sysware.com.cn

何强 | 北京索为系统技术股份有限公司 | 2020.12.18

SYSWARE

**何强**

北京索为系统技术股份有限公司 首席系统工程师 副总裁  
系统工程研究院 院长

中国工业技术软件化产业联盟 (APP联盟) 总体组 副组长  
中国工业互联网产业联盟 工业APP特设组 主席

《工业APP: 开启数字工业时代》(机械工业出版社2019.5) 作者  
《系统工程: 基于国际标准过程的研究与实践》(2020.6) 作者  
《工业APP白皮书(2020)》 撰写人  
《工业技术软件化白皮书》 撰写人  
《科技导报: 体系工程》 编委




### 索为概况

工业应用验证  
12个行业  
92家龙头企业

在39种120个型号应用  
6710个工业APP

工业软件操作系统

接入103种工业软件



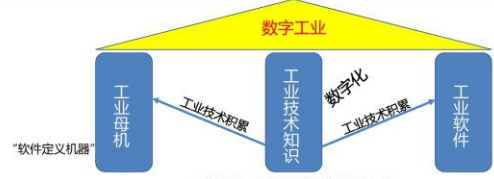
19.55

**北京索为系统**  
成立于2006年, 300+人  
总部位于北京, 在上海、成都、西安、武汉、杭州等地有分支机构  
主要服务与各大军工集团

工业技术软件化产业联盟 秘书长单位  
2018、2019、2020连续承担工信部工业APP可视化开发平台、标识平台、测试平台等项目, 总计投入超5亿  
承担发改委、科技部、JW科技委、装发重大课题

### 产业如何数字化?

产业数字化的关键在工业数字化  
工业数字化的支点在工业技术知识的数字化、软件化 (APP化)



“软件定义机器”

工业技术知识才是现代工业的核心要素  
工业母机可卖, 工业软件可卖, 工业技术知识不卖!

### 工业APP如何支撑数字工业, 进而促进产业数字化?

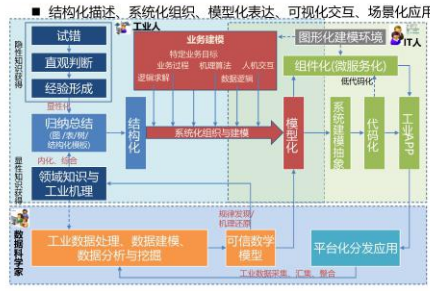
**工业APP是什么?**  
工业APP是基于松耦合、组件化、可重构、可重用思想, 面向特定工业场景, 解决具体的工业问题, 基于平台的技术引擎、资源、模型和业务组件, 将工业机理、技术、知识、算法与最佳工程实践按照系统化组织、模型化表达、可视化交互、场景化应用、生态化演进原则而形成的应用程序, 是工业软件发展的一种新形态。




6方面特征

### 从工业技术到工业APP

结构化描述、系统化组织、模型化表达、可视化交互、场景化应用、生态化演进





提升中国制造业的起点  
提升中国工业的水平

### 工业APP的价值

**工业APP的价值**

- 国家 新路径, 高起点**  
借助庞大的工业人才基数, 夯实中国制造业发展基础, 获得工业软件发展新路径  
提升制造业起点和工业水平
- 地方政府 促进地方经济发展**  
平台+特色产业APP, 服务于地方产业集群, 促进区域经济发展
- 企业 数字化转型(宏观)**  
通过APP实现企业资源(人、工业技术、知识、设施设备等)解耦并服务化
- 企业 效益改善(微观)**  
知识沉淀与转化, 解决知识传承和人才断代问题;  
提升应用效率(创新增效、提质增效、降本增效、管理增效);  
提升质量底线, 解决能力不均衡问题;  
解决规范化问题。
- 个人 价值体现**  
个人能力展现, 体现开发者个人价值  
通过整理、抽象、开发APP, 使得知识更系统化, 促进个人能力提升;  
通过使用工业APP快速补充知识短板

### 工业APP不会替代工业软件, 相互促进

**工业APP不会替代工业软件, 相互促进**

- 数据挖掘**  
对工业软件或产线设备所产生的数据深度加工与优化
- 集成**  
打通不同工业软件之间数据逻辑关系
- 知识驱动**  
通过APP承载的工业技术知识驱动传统工业软件更高效执行, 丰富功能改善性能
- 简化使用**  
通过工业APP简化传统工业软件使用, 降低使用门槛

工业APP需要依托平台, 其中包括大型工业软件平台

### 工业APP驱动部件研发质量和效率提升

**工业APP驱动部件研发质量和效率提升**

- 工程化参数设置界面, 大大提高使用效率
  - 自动完成模型、数据转换及计算
  - 参数化建模
- 例如, 拨叉有限元分析
  - 统一工作环境
  - 2个工作环境 (Creo2.0、Ansys12.0) 减少到1个环境
  - 大大减少操作步骤
  - Creo建模需要17步 → 简化为 → 3步!
  - Ansys中建立有限元模型并求解需要16大步 → 简化为 → 2分钟!
  - 大大节省时间
  - 大约2小时 (中等水平)
  - 大大降低对使用者的技术要求

### 工业APP驱动部件研发质量和效率提升

**工业APP驱动部件研发质量和效率提升**

- 300+APP集群化应用
- 所有工业APP(知识机器人)都是经过验证的知识, 设计质量更稳定
- 飞机总体的验证结果: 总体布局设计一轮迭代由过去4周→3-4天

### 工业APP可封装的工业技术知识对象

- 各种基本原理、工业机理、数学表达式、经验公式;
- 业务逻辑 (包括产品设计逻辑、CAD建模逻辑、CAE仿真分析逻辑、制造过程逻辑、运行使用逻辑、经营管理逻辑等业务逻辑);
- 数据对象模型、数据交换逻辑;
- 领域机理知识, 包括:
  - 工业领域航空、航天、汽车、能源、电子、冶金、化工、轨道交通等行业原理与机理知识,
  - 机械、电子、液压、控制、热、流体、电磁、光学、材料等专业知识,
  - 车、钻、刨、磨、铣、热、表、铸、锻、焊等工艺制造领域的知识,
  - 人-机-料-法-环、配方、配料、工艺过程与工艺参数知识,
  - 以及故障、失效等模型,
  - 还可以是人对设备操作与运行的逻辑、经验与数据,
  - 企业经营管理基本原理、知识与经验等);
- 数据建模模型 (经过机器学习验证的设备健康预测模型、大数据算法模型、人工智能算法模型、优化算法模型等);
- 人机交互。

### 工业APP在材料领域的应用

**工业APP在材料领域的应用**

- 启动SiN4介电性能仿真模块
- 输入温度、频率、材料组成数据
- 介电性能仿真计算
- 输出介电常数和损耗角正切数据

### >>> 工业APP在材料领域的应用

19-55 SYSWAVE 家为系统

■ SiO<sub>2</sub>复合材料电介性仿真APP

■ 纳米透波材料计算APP

■ 薄热瓦材料计算APP

每个APP封装了复杂的流程、算法、数据、知识

13

### >>> 工业APP在材料领域的应用

19-55 SYSWAVE 家为系统

■ 连铸工艺参数计算APP

国外产线：  
生产的6000吨钢只有一半符合标准

国产产线：  
使用该APP为国产产线计算工艺参数，  
连铸坯内部质量完全合格

14

### >>> 工业APP在材料领域的应用

19-55 SYSWAVE 家为系统

在2002年，宝钢就从工程实践中提炼总结出228个模型，通过软件化形成工业APP。

■ 全局通用型热轧带钢力学性能及板APP

材料专家利用该APP，对几十个产品的成分和工艺进行优化，每年降低成本2000万元。

15

### >>> 工业APP在材料领域的应用

19-55 SYSWAVE 家为系统

■ 金属材料冶炼APP

元素	目标值	传统配料	智能配料
C	3.00	3.6608	3.0253
Si	0.50	0.6608	0.5250
Mn	0.100	1.0034	0.9752
P	0.00	0.0224	0.0223
S	0.00	0.0171	0.0169
Cr	23.00	23.4874	22.9751
Ni	1.05	0.8040	1.0250
Mo	1.05	1.1470	1.0248
V	0.40	0.3960	0.3752
Ti	0.0000	0.0000	0.0000
Al	0.0001	0.0001	0.0001
Cu	0.008	0.0075	0.0075

16

### >>> 工业APP集群化、体系化应用，推进行业发展

19-55 SYSWAVE 家为系统

■ 航空发动机的研发技术体系

发动机研发流程

发动机研发数据

发动机设计工具

发动机研发知识

发动机研发成果

17

### >>> 工业APP集群化、体系化应用，推进行业发展

19-55 SYSWAVE 家为系统

■ 航空发动机应用

工业APP开发/运行平台

(代码库: 9500+ | 工程数据: 300+)

适配器: 300+工具, 10000+接口, 100+协议

应用APP: CAE, CFD, CAM, CAPP, PDM/PLM, ERP, MES, SCM, BI, etc.

18

### 工业APP集群化、体系化应用，推进行业发展

工业APP  
工业APP行业/运行等级  
机型型号: 9500+ | 工程算法: 300+  
适配器: 300+ | 工具: 10000+ | 接口: 100+ | 协议

19

### 工业APP集群化、体系化应用，推进行业发展

■ 商发最佳实践

- 252个工业APP, 49个技术流程
- 68个工业APP, 24个技术流程
- 56个工业APP, 28个技术流程
- 173个工业APP, 83个技术流程
- 12个工业APP, 36个技术流程

SYNWARE工程中间件平台

共计640工业APP、190个技术流程

20

### 行业性推进应用——航空发动机工业APP平台

21

### 行业性推进应用——航空发动机工业APP平台

22

### 面向磁性材料的“基通专”工业APP体系平台

23

谢谢聆听! 知识自动化  
何强 186 0120 6353 工业技术软件化

www.synware.com.cn

24



## 杨宗运

技术总工程师

浙江恩大施福软件科技有限公司

### 报告主题

工业4.0时代磁性行业的数字化工厂建设

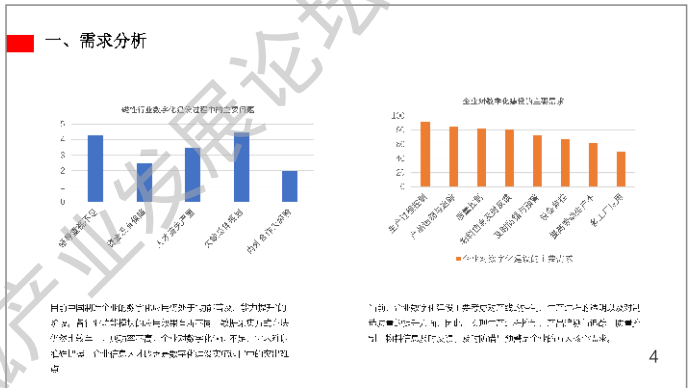
### 简介

10年软件开发设计和实施经验，专注配置平台，工作流的开发，究以配置平台为基础搭建不同应用。

制造业系统研发工作10年，08年来一直专注于磁性行业的信息化管理。精通企业生产管理事务，精通国内外知名ERP\WMS系统，精通界面设计、架构设计、前端开发，精通C/S，B/S，APP混合构建，多数据库跨域读写交互型系统的构建。拥有十年以上的团队管理经验，对定制型的项目实施拥有丰富的管理经验。

### 报告摘要

自2009年起，专门为磁性行业、家电行业定制的C/S版MES/ERP/WMS系统，并在多家磁性制造企业成功上线。自2016年起至今，构建专门为制造行业定制MES系统，涵盖ERP接口、B/S管理端、APP应用端的混合开发，产品针对制造行业定制了多项特色功能，如：可智能运算分配的精细化任务管理、实时生产可视化，系统始终保持生产数据的处理从业务管理到财务管理的全程管控。系统上线后已成功在东磁集团、惠尔普、斯贝尔等多家中大型企业成功，高效的操作体验与精准的实时数据管控，得到客户的一致好评。通过大量项目定制与实施，充分掌握与国内外知名ERP数据读写交互对接的实施方法，已形成快速对接的体系能力。2019年获得PMI认证的项目经理5A认证、2018-2020浙江智能制造专家委员会聘任为浙江省智能制造专家。



### 4.1、行业分析-数字化建设愿景



**需求明确度：**

- 无法脱离企业运营特点，契合生产流程
- 不能为数字化而数字化
- 及时捕捉客户需求动态，而非基于库存需求

**行业匹配度：**

- 符合磁性行业中生产管理流程
- 已有磁粉行业管理模型，无需从零开始定制化开发
- 不涉及国家政策限制或成熟行业，执行风险低

9

### 4.2、行业分析-数字化建设痛点



**简化程度：**

- 数字化能省人、减人
- 降低对人员素质的要求
- 操作简便，降低对员工培训的要求

**实施成熟度：**

- 实施前应对行业调研，沟通成本降低
- 成功实施和可复制性
- 配置灵活度

10

## 05 工业数字化解决方案

11

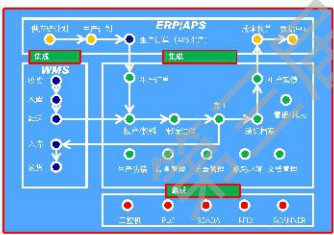
### 5.1、工厂数字化价值

工厂数字化建设为企业实现全流程互联，促进各业务环节高效展开

缩短	产品跟踪周期	提高	执行效率
降低	运营成本	提升	产品质量
减少	故障损失	增强	经验数据积累
		提升	制造透明度

12

### 5.2、数据流图



13

### 5.3、改善场景



**解决传统依靠人工跟踪**

- ① 传统人工并未感知有何问题
- ② 依赖经验判断，非数据，受个人主观判断
- ③ 数据缺乏跟踪记录，数据数据无存

**精准数据定义，精细化运营**



- ① 多个采集（SAS、PLC、摄像头），多个岗位数据采集设备
- ② 实时采集，精准化人
- ③ 实时数据共享，数据实时分析

14

### 场景例

数据采集：手机扫码识别

注：提高数据记录效率，降低数据录入误差

15

### 场景例

数据的看板采集：简单、透明度、准确、及时、不间断




16





## 王 朋

真空市场拓展经理

莱宝（天津）国际贸易有限公司

### 报告主题

莱宝真空泵在磁性材料生产中的创新应用

### 简 介

中国矿业大学（北京）机械专业硕士，作为莱宝中国工业真空市场拓展经理，多年来致力于真空泵的应用研究，尤其是将真空应用于新行业和新材料的生产制备，在粉末冶金、真空熔炼和金属3D打印等方面有着丰富的理论知识和多年的应用经验。

先进磁材料的生产也离不开真空，莱宝作为有着170年历史的跨国公司，一直关注磁材料行业的发展，莱宝产品线覆盖了市面上几乎所有的真空泵类型，莱宝愿意利用其在镀膜、热处理、新材料制备以及先进可靠的真空产品，助力中国磁产业的发展。



**莱宝真空泵在磁性材料生产中的创新应用**

Dec. 2020  
Leybold, 电话 18663707980

**目录**

- 1 典型烧结钕铁硼磁体生产流程
- 2 磁性粉末成型真空解决方案
- 3 表面涂层处理-Parylene镀膜真空解决方案
- 4 莱宝为磁性材料制备提供一站式真空解决方案

**典型烧结钕铁硼磁体生产流程**

- 钕铁硼磁体 (NdFeB magnet), 是由钕、铁、硼 (Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B) 形成的四方晶系晶体, 于1982年, 住友特殊金属的佐川真人发现钕铁硼。这种磁体的磁能积大于钕钴磁体, 是迄今为止最强的小磁材料。
- 钕铁硼 (NdFeB) 永磁材料以其优异的性能, 丰富的原料较低的价格, 正得以迅速的发展和广泛的应用, 可用于电机零件、仪器、汽车、石油化工、核磁共振、医疗保健等领域。
- 按生产工艺分类, 钕铁硼可分为烧结钕铁硼和精密钕铁硼, 烧结钕铁硼采用的是粉末冶金工艺, 其磁性优于钕钴磁体, 工艺流程可总结为制粉、成型和后处理三大部分。

**制粉** → **成型** → **后处理**

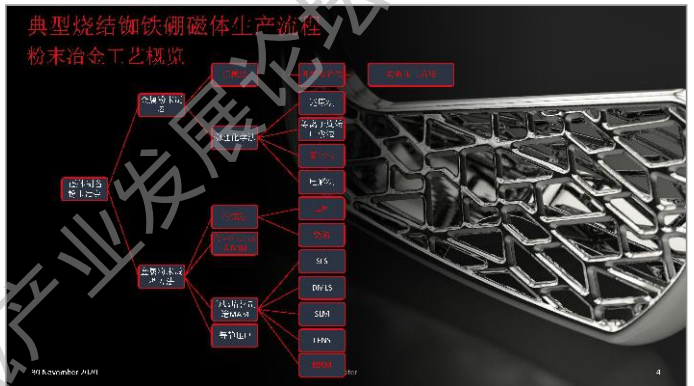
制粉: 原材料准备, 成分设计, 配料与称料, 真空冶炼(磁炉), 氧化, 气流冷却

成型: 绳料, 压型, 真空烧结

后处理: 机械加工, 真空热处理, 表面涂层处理(Parylene、镀膜), 质量检测, 包装

**典型烧结钕铁硼磁体生产流程**

粉末冶金工艺概览



1. 原材料准备  
2. 成分设计  
3. 配料与称料  
4. 真空冶炼(磁炉)  
5. 氧化  
6. 气流冷却  
7. 绳料  
8. 压型  
9. 真空烧结  
10. 机械加工  
11. 真空热处理  
12. 表面涂层处理(Parylene、镀膜)  
13. 质量检测  
14. 包装

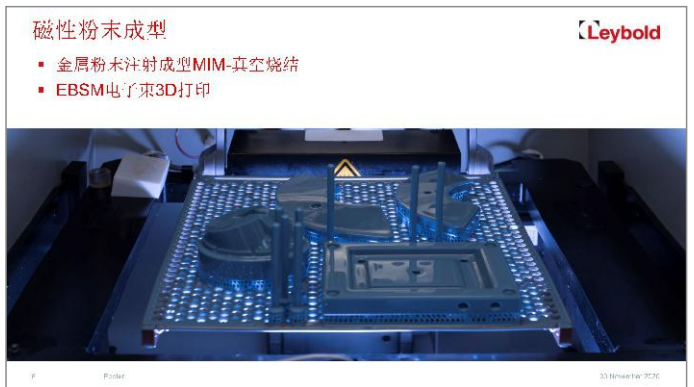
**莱宝为磁性材料制备提供一站式真空解决方案**



CERAVAC Active Sensors	COOLVAC Low Temp.	CLAWVAC Dry Claw Pump	DRYVAC Dry Compressed Screw Pump	GRAPHIX Precision Controller	LEYCON Valves
PHOENIX Ultra Leak Detector	RIVVAC Tetra Valve Pump	SCREWLINE Dry Screw with Back-Exhaust Pump	SCROLLVAC Dry Scroll with Back-Exhaust Pump	SOGEVAC Dry-Scroll Mass Flow Pump	SYSTEMS Source Filter & Gasolators
TMP Classic Line Thermodes at 100°C	TMP MAG Line Thermodes at 100°C	TURBOVAC X Maximal Throughput Temp.	TRIVAC Roller Valve Pump	UNIVEX Impedance System	VACUBE Oil-Lubricated Screw Pump

**磁性粉末成型**

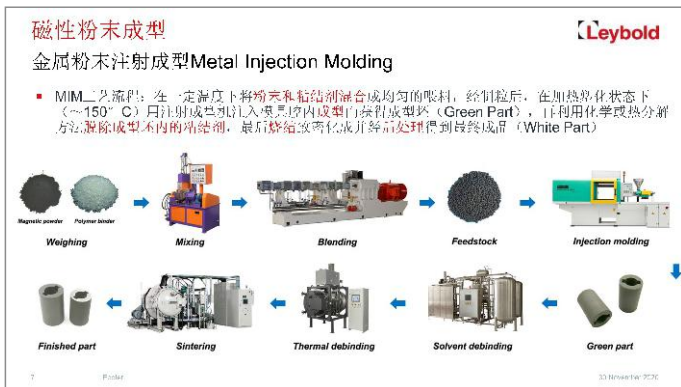
- 金属粉末注射成型MIM-真空烧结
- EBSM电子束3D打印



**磁性粉末成型**

**金属粉末注射成型Metal Injection Molding**

- MIM工艺原理: 在一定条件下将粉末和粘结剂混合成均匀的喂料, 经制粒后, 在加热软化状态下 (~150°C) 用注射成型机注入模具内成型自凝固成型件 (Green Part), 再利用化学或热分解方法溶解成型件内的粘结剂, 最后经烧结致密化并经表面处理得到最终成品 (White Part)

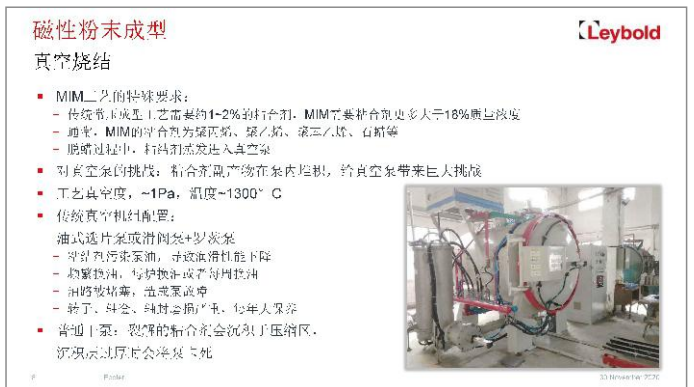


1. Weighing (Magnetic powder, Polymer binder)  
2. Mixing  
3. Blending  
4. Feedstock  
5. Injection molding  
6. Green part  
7. Solvent debinding  
8. Thermal debinding  
9. Sintering  
10. Finished part

**磁性粉末成型**

**真空烧结**

- MIM工艺的特殊要求:
  - 传统粉末成型工艺需要约1-2%的结合剂, MIM工艺结合剂更多大于18%颗粒细度
  - 通常, MIM的结合剂为聚丙烯、聚乙烯、聚四氟乙烯、石蜡等
  - 脱脂过程中, 析出物会进入真空泵
- 对真空泵的挑战: 结合剂副产物在泵内堆积, 给真空泵带来巨大挑战
- 工艺真空度: ~1Pa, 温度~1300°C
- 传统真空机1个问题:
  - 油式透片泵或滑阀泵+罗茨泵
  - 零件易带泵油, 导致磁性能下降
  - 频繁换油, 与磁铁产生油污
  - 油路堵塞, 造成泵故障
  - 转子、料仓、纯种金属粉末, 每年大量泵
- 普通干泵: 裂解的结合剂会沉积于压缩区, 沉积层以厚片会堵塞卡死



### 磁性粉末成型

#### 真空烧结-传统油泵

- 须紧密封，容易出现轴封漏油等问题
- 流式磁片在使用半年后需清洗

33 November 2020

### 磁性粉末成型

#### 真空烧结-莱宝创新解决方案

- 莱宝标准配置: SP系列螺杆泵+罗茨泵
  - 泵组整体解决方案, 包括特殊密封、前置磁粉分离器、消音器、尾气处理、开气保护
  - 泵组带冲洗功能
  - 可现场拆卸清理
  - SP-Guard监控系统实时监控

33 November 2020

### 磁性粉末成型

#### 真空烧结-莱宝创新解决方案

- SP630使用一段时间后, 结合剂产物在泵腔内堆积, 报警后, 可现场拆开泵腔清洗

33 November 2020

### 磁性粉末成型

#### 真空烧结-莱宝创新解决方案

- 客户员工现场手动清洗转子和泵腔:

28 November 2020

### 磁性粉末成型

#### 真空烧结-莱宝创新解决方案

- 在线冲洗装置(无需拆泵)

28 November 2020

### 磁性粉末成型

#### 真空烧结-莱宝创新解决方案

- 在线冲洗装置(无需拆泵)

28 November 2020

### 磁性粉末成型

#### 真空烧结-莱宝创新解决方案

#### 使用成本对比(PEG-Binder)

Year	SP630 (Euro)	ACDW-M-KM (Euro)
0	0	0
1	8,270	5,819
2	17,841	11,825
3	26,411	17,730
4	44,002	24,130
5	52,252	30,703
6	61,622	36,815
7	69,052	45,353
8	90,153	56,355
9	96,424	61,178
10	103,050	67,890

28 November 2020

### 磁性粉末成型

#### 真空烧结-莱宝创新解决方案

#### 干泵运转经验:

- 泵腔内有沉积层, 需定期清洁
- 使用气镇阀会降低沉积速率
- 泵无明显磨损或故障
- SP-Guard监控系统监测沉积程度, 可对维护做出计划!
- 清洗条件符合简单清洗要求
- 排风端消音器, 同时可作为清洗液体或结晶剂的接收罐
- 净化气体套件以保护轴承
- 若有氢气存在, 需用氢气镇阀导入惰性气体保护

28 November 2020



磁性粉末成型



真空烧结炉总结:

- 强大的泵和监控系统的结合实现可靠运转!
- 可计划何时需作维护!
- 运行成本低!

磁性粉末成型

• 3D打印成型, EBM/EBSM- 电子束熔炼

磁性粉末成型

EBM/EBSM- 电子束(选区)熔化

- EBM/EBSM 是一种增材制造技术, 利用电子束在真空室中选择性地扫描和熔化粉末层, 一层一层地制造金属零件
- 优势:
  - 生产复杂形状的零件, 零件质量超过传统制造方法
  - 材料利用率高
  - 制造步骤少, 简化生产流程
  - EBM提高了能量密度, 缩短了材料的能量吸收
  - EBM穿透强, 可在密实熔层
  - EBM提高了粉末密度, 降低热应力
  - 对金属材料适用性强

磁性粉末成型

EBM/EBSM- 电子束(选区)熔化

- EBSM 系统组成: 真空室, 电子束枪, 粉末给料机及筛粉装置, 供气室
- 工艺步骤:
  1. 每一层一层地打印出来
  2. 将粉末送到每一层粉末
  3. 电子束扫描并熔化粉末
  4. 熔化的粉末并形成了零件
  5. 平台降低, 只留下4层, 直到完成工作
  6. 打印后, 零件被包裹在一个隔热, 空气密封的粉末块中, 除去工作周围的热量, 便可获得打印模型

磁性粉末成型

EBM/EBSM- 电子束(选区)熔化

- 工艺流程:

磁性粉末成型

EBM/EBSM- 电子束(选区)熔化

- 工艺参数:
  - 0.01 to 0.05 Pa
  - 对真空度的精确: 金属粉末可能堵塞
  - 真空泵:
    - 莱宝Turbovac iIX or Mag Integra系列分子泵
    - 莱宝镀膜油泵 TRIVAC, SV NEO D
    - 莱宝小气泵: SC+涡轮泵, Ecodry多级罗茨泵

Vacuum can be so...  
**easy** reliable  
**efficient** dry

磁体表面涂层处理-Parylene镀膜莱宝解决方案

Parylene 镀膜工艺

Parylene 镀膜采用常温真空镀膜, 工艺一般分为3步

- 1: 镀膜原料(聚合物)在真空中加热汽化(130-180°C)
- 2: 聚合物热解为单体(550-650 °C)
- 3: Parylene 单体在工件上成透射薄膜, 每个工艺镀膜厚度0.2到100 μm

### Parylene 镀膜设备-现有配置

- 1) 汽化器 130-180 °C
- 2) 热解管 550-650 °C
- 3) 真空腔 本底真空: ~0.01 mbar 工作真空: ~0.02 - 1 mbar
- 4) 旋转基片台
- 5) 冷阱 液氮或者干冰  
(单体在冷阱内聚合捕集, 保护真空泵)
- 6) 真空泵 双级油泵
- 7) 控制器

25 33 November 2020

### Parylene 镀膜设备-优化配置

采用干式螺杆泵VARODRY VD65 - VD200替代油泵

- 1) 汽化器 130-180 °C
- 2) 热解管 550-650 °C
- 3) 真空腔 本底真空: ~0.01 mbar 工作真空: ~0.02 - 1 mbar
- 4) 旋转基片台
- 5) 冷阱 不需要
- 6) 真空泵 VARODRY VD65 - VD200
- 7) 控制器

26 33 November 2020

### Parylene 镀膜设备-优化配置

- 干式螺杆泵VARODRY完全无油, 不需更换油, 换油或双级油泵用于Parylene镀膜应用, 由于工艺产品(氯化物, 氟化物和有机物等)的影响, 换油频率非常高。
- VARODRY完全避免双级油泵因飞溅物的污染, 同时也避免了真空泵排气对环境的污染。
- VARODRY完全避免在Parylene应用中双级油泵常见的密封磨损故障。
- VARODRY在Parylene应用不需要大量的液氮或者干冰冷阱。

VARODRY 完全无油, 风冷, 耐粉尘, 操作简单。  
完全避免油泵在Parylene镀膜应用经常遇到的问题!

27

### Parylene 镀膜设备-工艺验证

#### VARODRY VD100测试条件

- 天气状况
- 开启排气罩保护气
- 关闭进气罩保护气

- 工艺时间 600 h
- Parylene 消耗量 12 kg Parylene 95% Parylene C 5% Parylene F
- Parylene 利用率 20-25% Parylene 镀到基片上 配置但未使用
- 冷阱 1 μm/h 油泵 1,2 μm/h VD100
- 工艺起始压强 5x10<sup>-2</sup> mbar
- 镀膜工艺压强 1 mbar

28 33 November 2020

### Parylene 镀膜设备-实测结果

结论:

- VARODRY VD100通过了9个月的连续测试 (12 kg Parylene, 镀膜工艺时间 600 h)
- 真空泵没有任何问题, 泵为基本没有工艺残留物
- 欠用方对VARODRY VD100的表现非常满意
  - 油泵3个月换油一次, 测试期间至少节省了两次换油的人工和材料成本
  - 不需要每天向冷阱内添加干冰, 节省人工和材料成本
- Parylene镀膜从此不再需要冷阱

➔ VARODRY VD65 - VD200是 Parylene 镀膜的最佳选择!

29 33 November 2020

### 莱宝为磁性材料制备提供一站式真空解决方案

镀膜工艺	SOGEVAC B & BR TRIVAC	SOGEVAC SV300B	DIJ 830	RUTA WAI1001F SV300BA
干式磁罩	SCREWLINE, DRYVAC, VARODRY & LEYVAC			
真空泵	RUVAC			
真空炉	RUTA			
衬板	DIP, DIJ, OB			
高温室, 分选器, 干燥器, 过滤器, 真空室, RGA				

30 33 November 2020

### 莱宝官微——“Leybold莱宝真空”

相关产品信息可以在官微查询

31 33 November 2020

32 33 November 2020



## 宋吉舟

教授  
博导  
副所长  
浙江大学应用力学研究所

### 报告主题

高效转印集成技术

### 简介

应用力学研究所副所长，浙江省软体机器人与智能器件重点实验室副主任。主要从事可延展柔性电子器件力学设计、高效转印制备方法与可靠性研究。至今在JMPS、Science Advances、National Science Review、AFM等国际知名期刊发表SCI论文120余篇，英文书章5篇，申请/授权发明专利15项。担任Journal of Applied Mechanics副主编及多个国际学术期刊编委。曾获香港求是科技基金会“求是杰出青年学者奖”（2014）、国家自然科学基金委优秀青年科学基金（2016）、第十六届中国力学学会青年科技奖（2019）。兼任中国力学学会理事、对外交流与合作工作委员会副主任委员。

### 报告摘要

以沉积、光刻、蚀刻等减法制造为特点的平面微纳加工工艺一直是微电子技术的基石，然而近年来不断涌现的新材料器件加工工艺兼容性不强，极大地限制了柔性电子、LED显示等新型微纳信息电子器件的研发与产业化。高效转印集成技术，是传统平面微纳加工技术的补充，将其带向多平台整合的加法制造。通过精密的转印集成方法，将在原生基板上制备的涉及不同材料、尺度、维度的异构异质元器件实现单背板的多工整合，同时简化或省略中间的封装过程，提升元件的极限微缩和集成。报告主要介绍课题组最近发展的基于界面粘附调控的热控转印集成技术，可实现低成本、可编程、适用范围广的高效转印，研究结果对提升材料组装和微纳制备水平具有重要意义。

# 高效转印集成技术

宋吉舟  
浙江大学 工程力学系

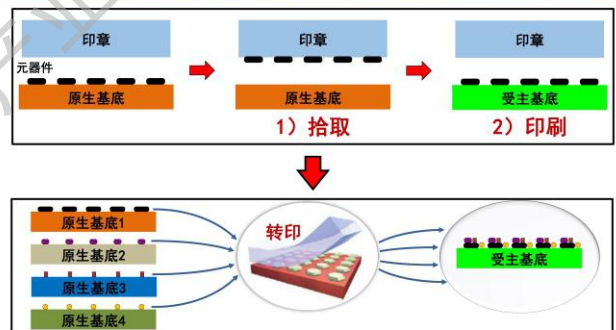
## 报告提纲

- 一、背景介绍
- 二、激光驱动非接触转印集成技术
- 三、大规模可编程热控转印集成技术
- 四、万能转印集成技术
- 五、结语

## 报告提纲

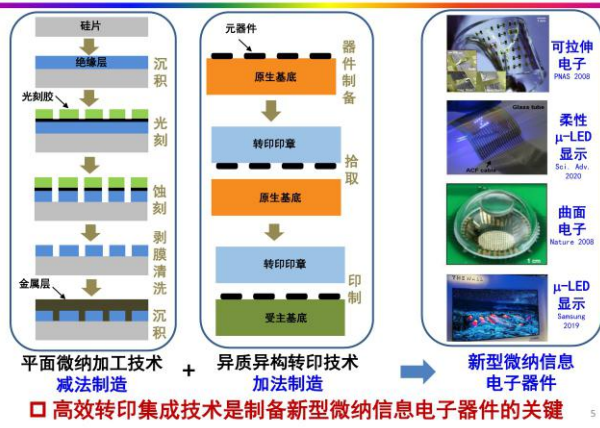
- 一、背景介绍
- 二、激光驱动非接触转印集成技术
- 三、大规模可编程热控转印集成技术
- 四、万能转印集成技术
- 五、结语

## 转印集成技术



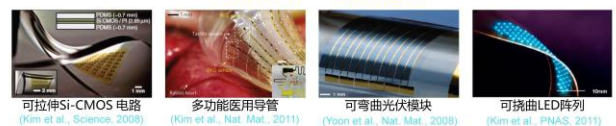
□ 一种高效异质异构集成技术，实现单背板的多工整合

## 转印集成技术

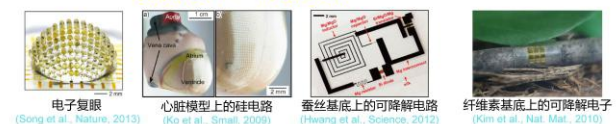


## 转印集成需求：非常规电子器件

### ■ 柔性光电集成器件：功能元件 + 柔性基底



### ■ 曲面电子：功能元件 + 曲面基底



高效转印集成技术是制备非常规电子器件的关键！

### 转印集成需求：大规模显示/能源器件

高密度元件

Micro LED 显示 (Wen et al., PNAS, 2011)

Micro 光伏阵列 (100 x 100 x 10 μm<sup>2</sup>) (Shang et al., Nat. Mater., 2014)

激光显示 (Hayashi et al., Opt. Express, 2016)

疏排大面积系统

逐一晶圆  
✓ 10-25 k/hour  
✓ 一块面板生产周期: 2-15 周  
(Manow et al., Laser-Enabled Enterprise: High Yield Technology for μLED Assembly)

**高效转印集成技术是制备大规模显示/能源器件的关键!**

### 高效转印技术挑战

Stamp

Stamp

Stamp

Strong adhesion Pick-up

Donor substrate

Weak adhesion Printing

Receiver substrate

**关键挑战: 印章/器件界面黏附的强弱转化**

### 先进转印技术

#### 接触式

Pick up at high speed

Print at low speed

动态可控转印技术  
Meitl et al., Nature Materials, 2006  
强弱粘附比低

软带转印技术  
Yan et al., Adv. Sci., 2017  
无法重复使用

有限强弱粘附比; 批量转移; 精准转移

#### 非接触式

1. PDMS Transfer Tool

2. Donor Substrate

3. Picked Layer Membrane

4. Receiver Substrate

激光驱动转印技术  
Saeidpourazar et al., J. Microelectromech. S., 2019  
界面热损伤

SMP

Pick up devices

Exact release by Laser

激光驱动表面非接触转印技术  
Huang et al., ACS Appl. Mater. Interfaces, 2016  
智能材料设计

无限强弱粘附比; 选择性转印; 快速响应

### 目标

- ◆ 基于界面粘附调控新原理，发展新型磁控/热控转印集成技术：
  - ✓ 界面无损伤
  - ✓ 大面积转印
  - ✓ 成本低
  - ✓ 粘附连续调控
  - ✓ 重复使用
- ◆ 研究转印集成技术中的界面粘附调控机理

### 报告提纲

- 一、背景介绍
- 二、激光驱动非接触转印集成技术
- 三、大规模可编程转印集成技术
- 四、万能转印集成技术
- 五、结语

### 激光驱动转印印章设计

Elastomer

Metal layer on cavity surfaces

Air

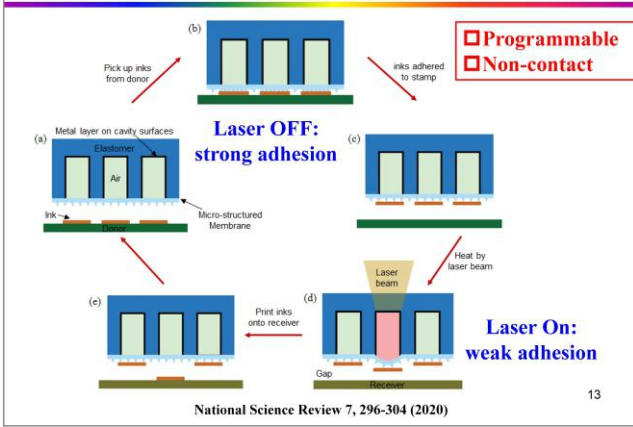
Micro-structured Membrane

Laser beam

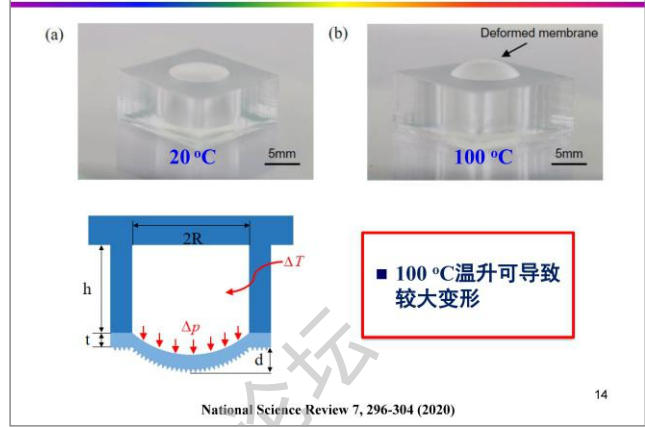
Laser Off  
"strong" adhesion

Laser On  
"weak" adhesion

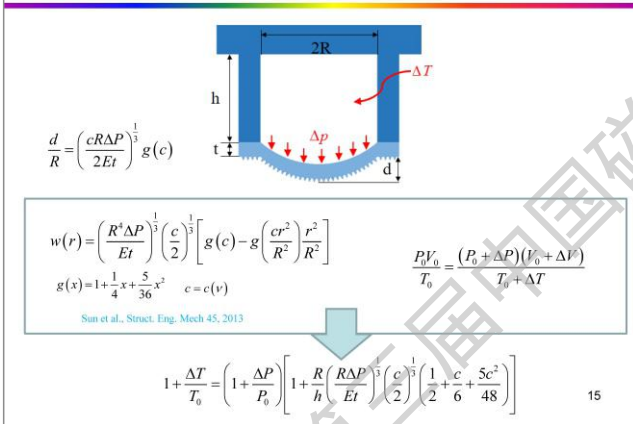
### 激光驱动非接触转印技术



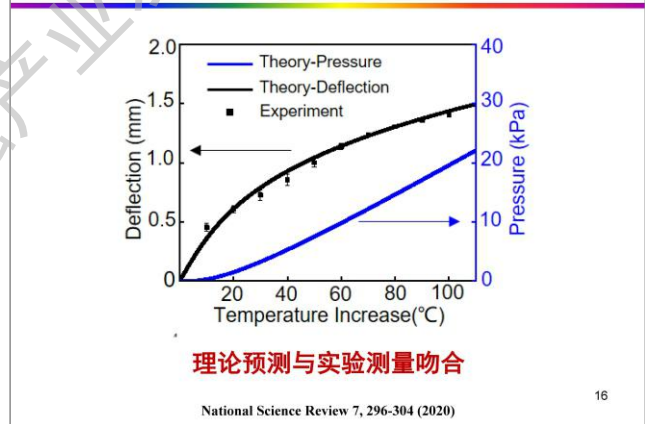
### 印章薄膜变形



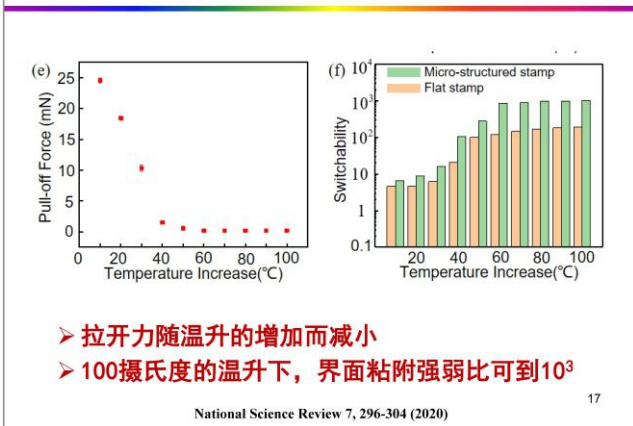
### 热控印章薄膜变形与空腔气压变化



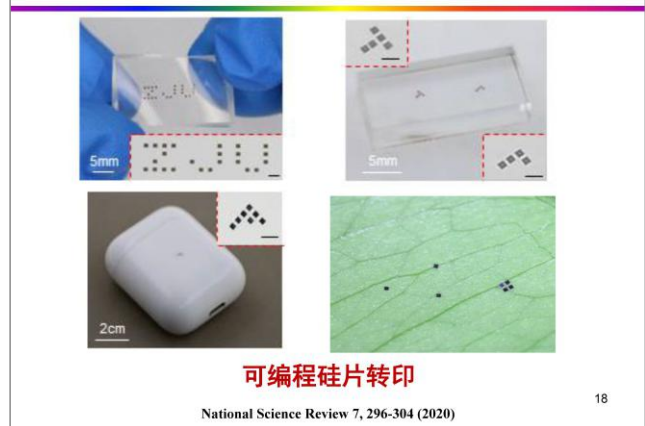
### 热控印章薄膜变形与空腔气压变化



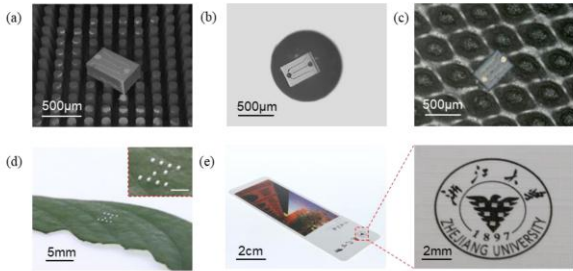
### 印章粘附表征



### 微观硅片转印结果



### 微观LED芯片转印结果

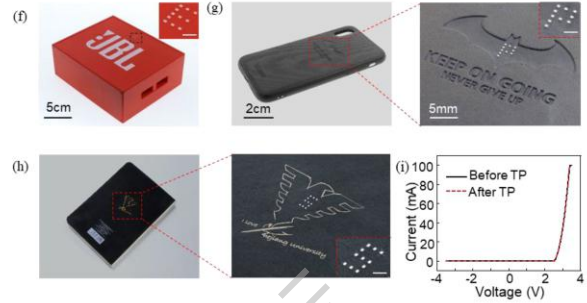


#### 可编程LED芯片转印

National Science Review 7, 296-304 (2020)

19

### 微观LED芯片转印结果



#### 可编程LED芯片转印

National Science Review 7, 296-304 (2020)

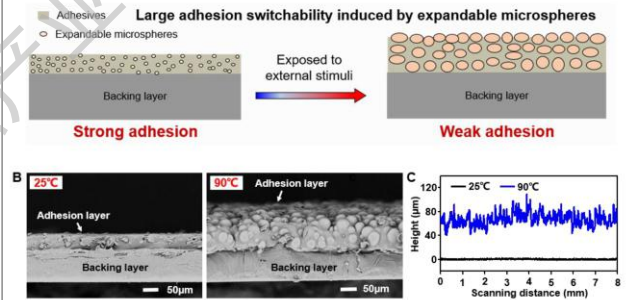
20

### 报告提纲

- 一、背景介绍
- 二、激光驱动非接触转印集成技术
- 三、大规模可编程转印集成技术
- 四、万能转印集成技术
- 五、结语

21

### 热控转印印章设计

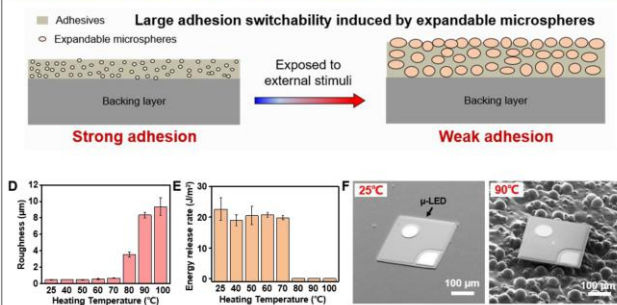


#### 温升导致表面粗糙度变化

Science Advances 6, eabb2393 (2020)

22

### 热控转印印章设计

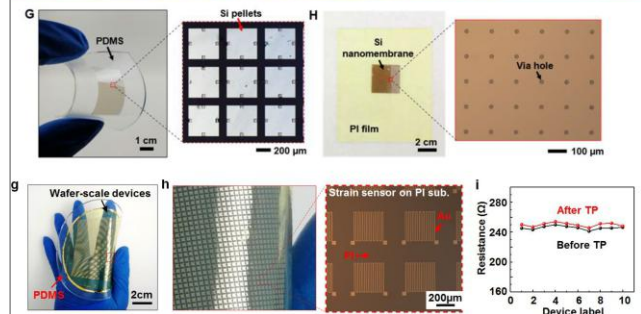


#### 温升导致表面粗糙度变化，进而引起黏附强弱变化

Science Advances 6, eabb2393 (2020)

23

### 热控全局转印

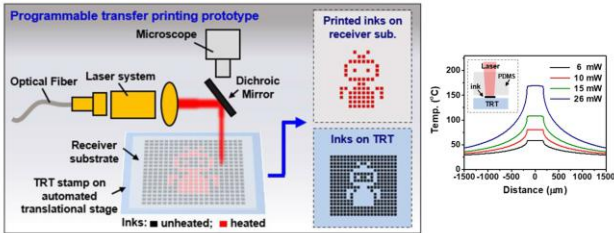


#### 大面积超薄 (~ 100nm) 薄膜与器件转印

Science Advances 6, eabb2393 (2020)

24

### 激光驱动转印策略

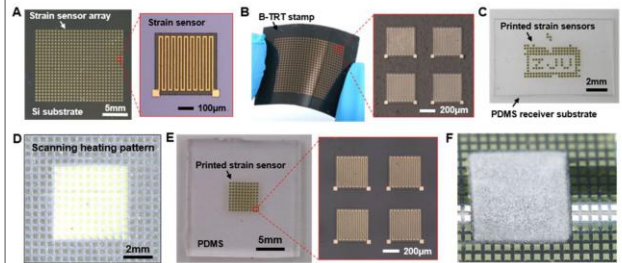


通过激光驱动实现可编程/大规模转印

Science Advances 6, eabb2393 (2020)

25

### 激光扫描转印结果

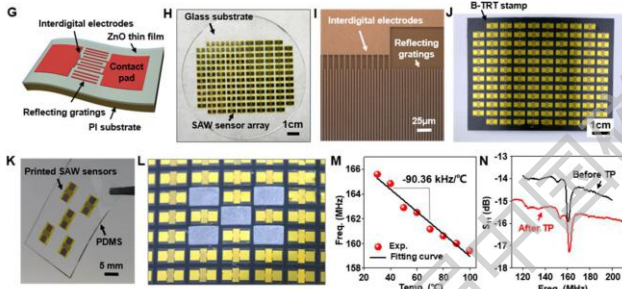


可编程/大规模应变传感器快速转印

Science Advances 6, eabb2393 (2020)

26

### 激光扫描转印结果

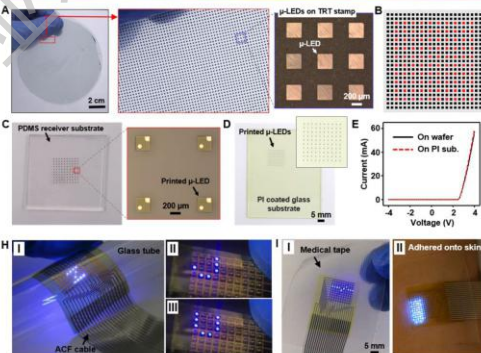


可编程/大规模SAW传感器快速转印

Science Advances 6, eabb2393 (2020)

27

### 柔性 $\mu$ -LED显示



可编程/大规模 $\mu$ -LED芯片快速转印

Science Advances 6, eabb2393 (2020)

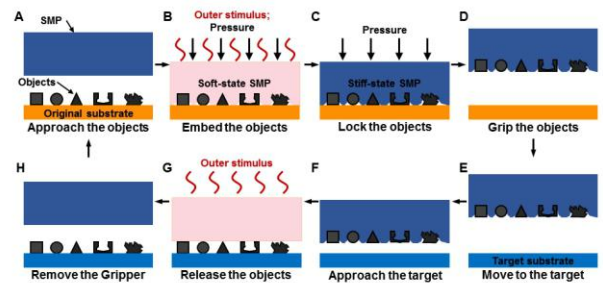
28

### 报告提纲

- 一、背景介绍
- 二、激光驱动非接触转印集成技术
- 三、大规模可编程转印集成技术
- 四、万能转印集成技术
- 五、结语

29

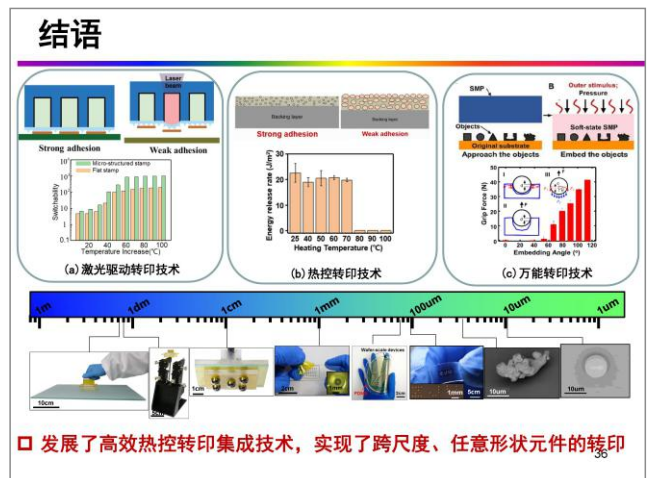
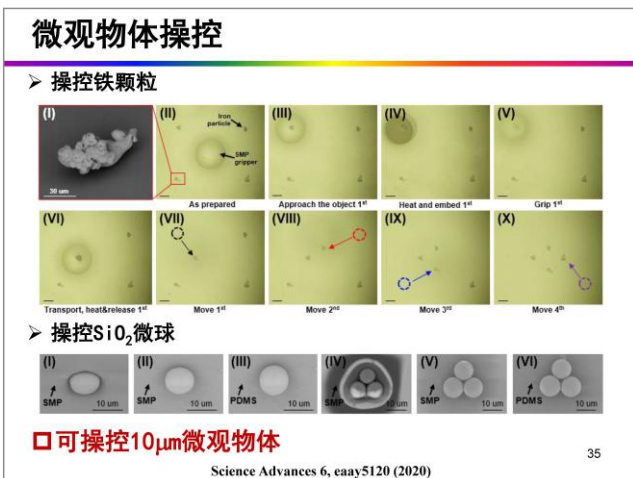
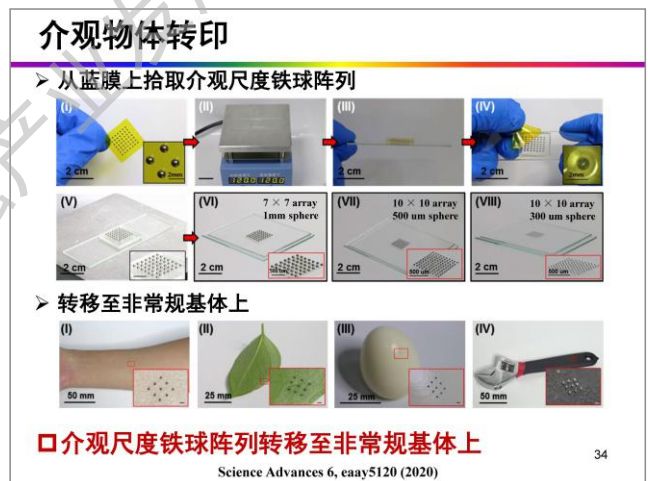
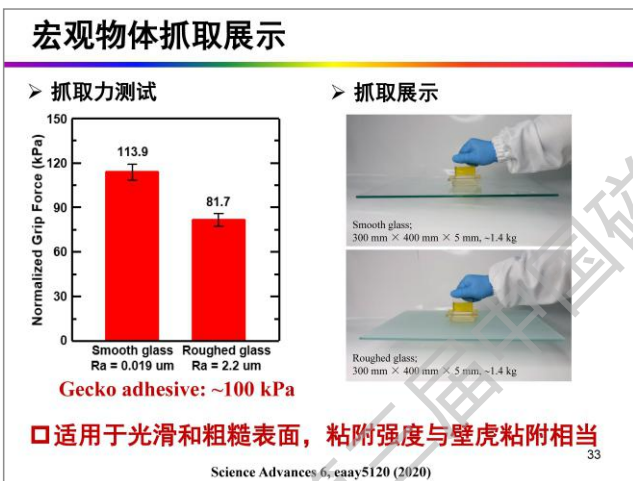
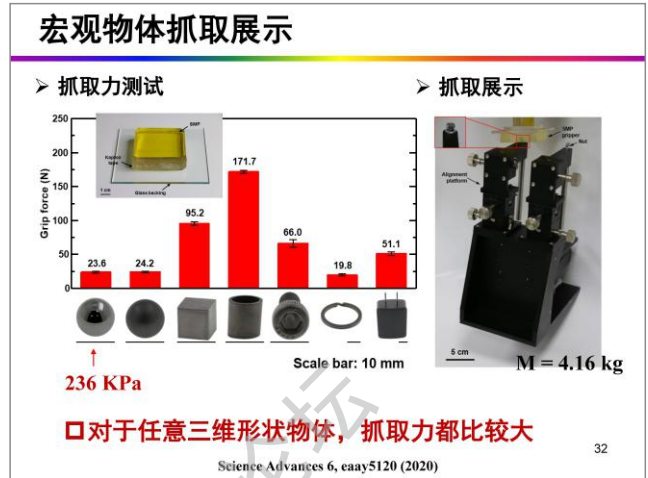
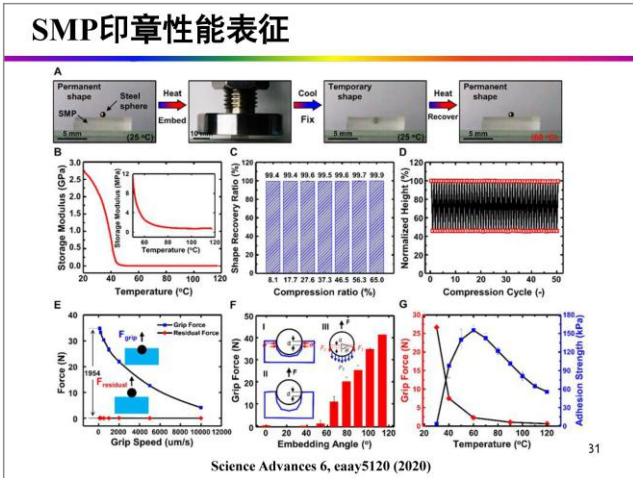
### 基于SMP印章的万能转印技术



利用SMP形状记忆效应实现抓取与释放

Science Advances 6, eaay5120 (2020)

30

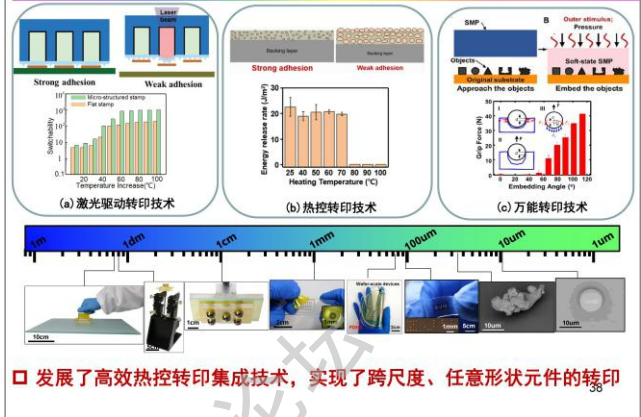


## 报告提纲

- 一、背景介绍
- 二、激光驱动非接触转印集成技术
- 三、大规模可编程转印集成技术
- 四、万能转印集成技术
- 五、结语

37

## 结语

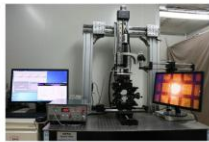


38

## 致谢

### 学生

- 罗鸿羽
- 王成军
- 令狐昌鸿



申请/授权  
11项发明专利



可延展柔性电子器件实验室：制备-表征-测试



39

谢谢大家！  
敬请批评指正！

40



## 王学文

教授

博导

西北工业大学柔性电子研究院

### 报告主题

“柔性电子+”与智能传感器

### 简介

柔性电子前沿科学中心副主任，印刷电子研究所副所长，西北工业大学“翱翔海外学者”，主要致力于柔性微纳智能传感器及相关材料研究，并探索其在健康医疗、人机交互、环境监测等战略新兴领域的应用。主持国家重点研发计划课题、陕西省重点研发计划重点项目、宁波市自然科学基金重点项目等国家级和省部级重点项目多项，已在Nature Materials, Science Advances, Nature Communications, Advanced Materials等学术期刊发表论文50余篇，他引3500余次。已申请PCT和中国发明专利20余项，获授权10项。担任Nature Communication、Research、Advanced Functional Materials、Microsystems & Nanoengineering等20多个期刊的审稿人，《材料导报》执行编委。

### 报告摘要

“柔性电子+”是支撑新一代信息技术的核心科技和战略制高点，将引领我国信息科技的颠覆式创新与跨越式发展。高灵敏/高精度柔性电子传感器是前瞻性柔性电子系统的重要组成部分之一，相关材料及微纳加工与集成技术研究势必提升我国在柔性智能电子芯片领域的国际竞争力。报告人将围绕柔性智能传感器，介绍研究团队在传感材料的制备及柔性化策略、器件的高精度微加工与集成关键技术、及面向颠覆性医疗技术的柔性仿生健康传感器等方向的研究进展，并分析了该领域未来发展所面临的挑战和机遇。



## 牛海洋

教授

博导

西北工业大学材料学院

### 报告主题

材料凝固形核过程的原子尺度计算模拟方法研究及应用

### 简介

西北工业大学翱翔海外学者。2009年本科毕业于中国石油大学（华东），2015年博士毕业于中国科学院金属研究所，师从李殿中研究员和陈星秋研究员，获中国科学院毕业生最高荣誉——中国科学院院长特别奖。2013年11月至2016年10月先后赴俄罗斯莫斯科物理技术学院和美国纽约州立大学石溪分校Artem R. Oganov教授（欧洲科学院院士）课题组从事博士生联合培养和博士后研究工作；2016年10月至2019年9月于瑞士苏黎世联邦理工学院Michele Parrinello教授（美国科学院院士、狄拉克奖章获得者）课题组从事博士后研究工作。研究工作集中在材料凝固的多尺度计算模拟研究、先进分子动力学方法研发、计算材料设计、材料结构预测与材料动力学行为的结合研究及机器（深度）学习在材料学研究上的应用等交叉学科前沿课题。以第一作者和通讯作者身份在Nature Communications、Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)、Physical Review Letters (2篇)、Applied Physical Letters、Physical Review B、Physical Chemistry Chemical Physics等国际期刊发表论文十余篇。

### 报告摘要

材料的凝固形核过程是材料科学、凝聚态物理、医药制备和气象预测等诸多领域最重要的研究课题之一。材料凝固的早期阶段涉及的空间尺度非常小，从原子尺度出发研究形核过程是洞悉材料凝固形核机理的关键。原子尺度下的计算机模拟，例如分子动力学，基本解决了形核过程研究的空间尺度问题，然而分子动力学模拟的时间尺度一般远远小于材料凝固形核的时间。本报告针对以上问题，通过引入映射材料内部原子结构的X射线衍射作为序参量等方法（PNAS, 115, 5348, 2018），采用巨分子动力学等先进分子动力学方法解决了材料凝固形核原子尺度模拟的空间和时间尺度问题，并成功应用到SiO<sub>2</sub>、水（PRL, 122, 245501, 2019）和金属镓（Nature Communications, 11, 2654, 2020）等体系的结晶形核研究。



## 张海焯

所长

深圳市计量质量检测研究院

### 报告主题

智能服装服饰质量安全与标准体系

### 简介

深圳市计量质量检测研究院 纺织服装服饰与家居用品检测事业部 部长

深圳市智能服装服饰产业发展研究会 副会长

全国纺织品标准化技术委员会 委员

全国体育用品标准化技术委员会运动服装分会 委员

全国服装标准化技术委员会智能服装工作组 成员

主要从事纺织品服装检测方法、标准研究，起草了GB/T 30135-2013《消费品质量安全风险信息描述规范》、FZ/T 74006-2017《骑行服》、FZ/T 73012-2017《文胸》、FZ/T 01148-2019《纺织品 己二酸二酰肼的测定 液相色谱-串联质谱法》、T-CNTAC42-2020《心电衣》等国家、行业标准及团体标准。

### 报告摘要

智能服装服饰是近年来研究热点，也是智能制造在纺织服装领域的探索和应用。报告介绍了国内外智能服装服饰的应用和现状，围绕智能服装服饰发展存在的技术难点和质量安全问题，以及现阶段国内外相关标准技术法规，阐述了智能服装服饰标准体系建立的重要性，并针对其未来发展提出相应建议和对策。



## 吕治家

魏桥纺织技术研发中心主任

高级纺织面料设计师

### 报告主题

纺织品结构与功能实现

### 简介

吕治家，魏桥纺织股份有限公司高级纺织面料设计师。长期从事一线产品设计、研发工作，2017年至今开展了20多项技术研发和产品创新项目，既有业内首创的品类创新，又有关键技术突破，申报国家发明专利7项，多个项目入选山东省技术创新项目，有五十余款设计开发产品获得返单，促进公司产品结构优化升级。作为国内一流纺织面料设计师，注重技艺水平和职业敏感的修炼提升，技艺精湛，业绩突出，在各项全国性顶级面料设计大赛和家纺设计大赛上屡获大奖，获评“第五届全国优秀纺织面料设计师”，第六届全国十佳纺织面料设计师，首个全国纺织面料设计最高奖“金柯桥”奖获得者。先后发表专业论文30余篇，其中全国中文核心期刊11篇，多次应邀在各类全国行业会议上做学术报告。

### 报告摘要

报告分为三个方面的内容。一是简要概述纺织行业发展方向与纺织品设计创新路径，探讨在“科技、绿色、时尚”纺织行业发展趋势下，以顾客需求导向，为满足需求而生的纺织品设计思路，探讨系统设计理论在纺织品设计方面的应用，以及技术研发模块化、产品研发平台化的研发设计思路。二是结合实际案例，介绍纺织品结构与服装家纺产品的功能实现，如中空纱线结构、复合纺纱结构（包缠，交缠）、机织物一次成型结构等。三是纺织品结构与柔性导电材料的结合，探讨柔性导电材料在功能及智能家纺、服装方面的一些应用想法，如棉包芯导电纱线、面料传感器、压力感应智能床品及服装等。



## 关于奥克斯

**735**

19年集团营收(亿元)

**30000+**

拥有员工(名)

**10**

制造基地

**5**

研发中心

**2.98**

公益事业捐款(亿元)

2019年，集团营收735亿元，总资产618亿元，员工3万余名。拥有10大制造基地：宁波（3家）、南昌、天津、马鞍山、郑州（筹）、巴西、印尼、泰国，5大研发中心。奥克斯空调在2018-2019年位居行业第三位；智能电表、电力箱行业领先；拥有医疗机构24家。

## 产业



地址：宁波市鄞州区日丽中路757号奥克斯中央大厦  
传真：0574-88220000

电话：4008-268-268  
网站：www.auxgroup.com

守法规 持续改进 以人为本 和谐诚信 保障员工健康安全



想安全事 上安全岗 做安全人

## 横店集团东磁股份有限公司

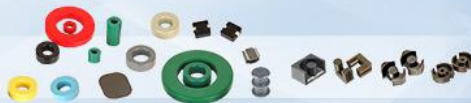
东磁是全国磁性行业的龙头企业，中国电子元件行业协会轮值理事长单位，目前全球最大的永磁铁氧体生产企业、全球最大的软磁材料制造企业，也是获得国内领跑者证书的太阳能制造企业，全国主要的振动马达生产企业之一。在磁性材料领域，主持或参与二十余项国际、国家、行业标准、团队标准、联盟标准的制定。

世界最大的  
永磁铁氧体的生产基地



不知不觉在您身边

全球最大的软磁材料  
制造企业



地址：浙江东阳市横店工业区  
电话：0579-86588271

邮箱：wang\_suping@dmegc.com  
网站：www.chinadmegc.com



# 宁波韵升股份有限公司



宁波韵升股份有限公司自1995年以来专业从事稀土永磁材料的研发、制造和销售，是国家高新技术企业。公司在宁波、包头、北京及青岛建有4个坯料生产基地，拥有达到国际一流水平的磁钢坯料生产、机械加工及表面处理生产线，具有年产坯料10000吨的生产能力，是全球最大的稀土永磁材料制造商之一。公司于2000年10月在上海证券交易所挂牌上市（股票代码“600366”）。

## 企业产品



烧结钕铁硼



注塑磁体



压制磁体

地址：浙江省宁波市国家高新区扬帆路1号  
电话：0574-27862218（总机）  
0574-87776939（投资者专线）  
传真：0574-87776466 0574-27862208

邮编：315040  
邮箱：webmaster@ysweb.com  
网站：www.yunsheng.com

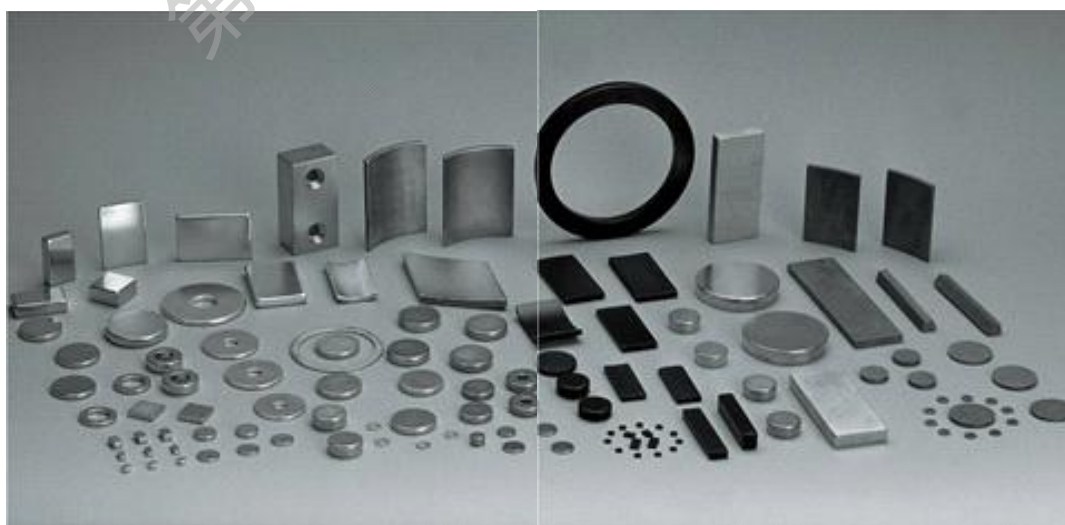


## 宁波科宁达工业有限公司

NINGBO KONIT INDUSTRIES INC

宁波科宁达工业有限公司成立于1986年，是国内上市公司北京中科三环高技术股份有限公司的全资子公司，是国内第一家专业从事烧结钕铁硼磁钢研发、生产和销售的厂家，也是目前国内最大的烧结钕铁硼磁钢供应商之一。

科宁达具备年产毛坯7500吨的生产能力，拥有员工1600人，专业技术人员20%以上。公司产品曾获国家科技进步一等奖、浙江省科技进步一等奖、国家金质奖、浙江省名牌产品等各种荣誉称号。拥有发明专利22件，实用新型专利48件。



联系人：毛伟君  
邮 箱：mwj@konit.com

电话：13805865509  
地址：宁波市北仑区科苑路18、28号



**百琪达智能科技（宁波）股份有限公司**  
Baiqida Intelligent Technology (Ningbo) CO., LTD



百琪达智能科技（宁波）股份有限公司，创立于2010年，位于宁波市奉化区，是一家以磁性材料专用装备制造、工业大数据分析为核心，以磁场成型压机、氢碎炉、磁场成型技术和粉体技术服务为主营业务，集研发、生产、销售及服务于一体的高新技术企业。



E型全自动氢碎炉



全自动磁场成型机

联系人：裘永

电 话：0574-59515245

邮 箱：qiuy@nbbqd.com

地 址：浙江省宁波市奉化区滨海新区星海路108号



## 东睦新材料集团股份有限公司 NBTM NEW MATERIALS GROUP CO., LTD.

东睦新材料集团股份有限公司是国内以粉末冶金机械零件生产为主业的上市公司（股票代码：600114），目前已发展成为中国粉末冶金行业的领导者，已连续多年在国内粉末冶金行业中处于市场领先地位，在国际粉末冶金行业及相关市场也具备一定的品牌知名度，2017年，公司成功入选国家“第二批制造业单项冠军示范企业”。

致力于成为全球金属磁粉芯行业领导者



地址：浙江省宁波市鄞州工业园区景江路1508号  
电话：0086-574-87399810  
0086-574-87886179

传真：0086-574-87831133  
网站：<http://www.pm-china.com>



## 浙江原邦材料科技有限公司

Zhejiang Yuanbang Material Technology Co., Ltd

浙江原邦材料科技有限公司成立于2012年，位于浙江省舟山市定海区科创园，是一家研发、生产和销售新型电磁功能材料的高新技术企业，专业的EMI&EMC解决方案供应商。

### 电磁噪声抑制片

本公司的电磁噪声抑制片系列产品是由微米级片状合金软磁粉末与聚合物混合、分散、压制而成，具有优异的电磁噪声抑制功能。产品性能稳定，外观精良，也可搭配铜箔、铝箔、导电布等使用。



### 高频硅胶吸波材料

本公司的硅胶吸波材料产品是由微米级片状铁基合金粉末与硅胶混合、分散再经高温固化而成的软磁材料，吸波效果、介电性能优异，耐候性强。其中导热吸波材料可以在吸收电磁波的同时，将内部热量有效的传导出去，防止温度过高对体系元器件产生损伤。



### 吸波涂料

本公司吸波涂料双组份，可常温固化，涂层光洁平整，适应不同形状目标，易施工；可涂覆在不同金属基体表面，具有优异的厘米波吸收性能，可有效降低武器装备的雷达波散射截面，提高武器装备的生存能力。





NINGBO CANMAG  
TECHNOLOGY CO., LTD  
宁波兴隆磁性技术有限公司

**CANMAG**®

宁波兴隆磁性技术有限公司（原宁波兴隆电子有限公司）专业研发生产磁性材料充磁设备、测试设备及自动的充磁与测试设备等。公司创建于1994年4月（兴隆电子）。目前已与多个世界500强企业及跨国公司建立合作关系，产品应用于磁性材料生产企业、电机企业、汽车、航空、微波通信等多领域。企业已经通过ISO9001:2000质量管理体系认证,产品通过欧盟CE认证。2013年成为国家高新技术企业。

## 企业产品



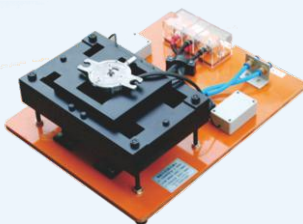
KCS-608PS Magnetic Declination Tester



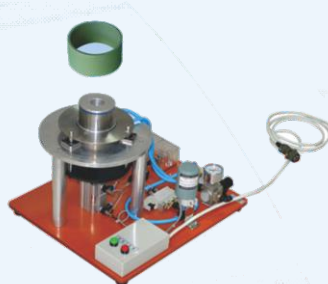
KCS-908PS Magnetic Declination Tester



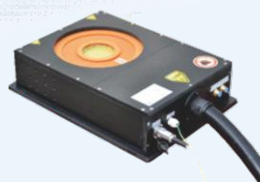
EM 30 Magnetizer



Fixture For windowpane motor



Fixture For Ring Magnet



Coil



联系人：潘光辉

电 话：15988693515

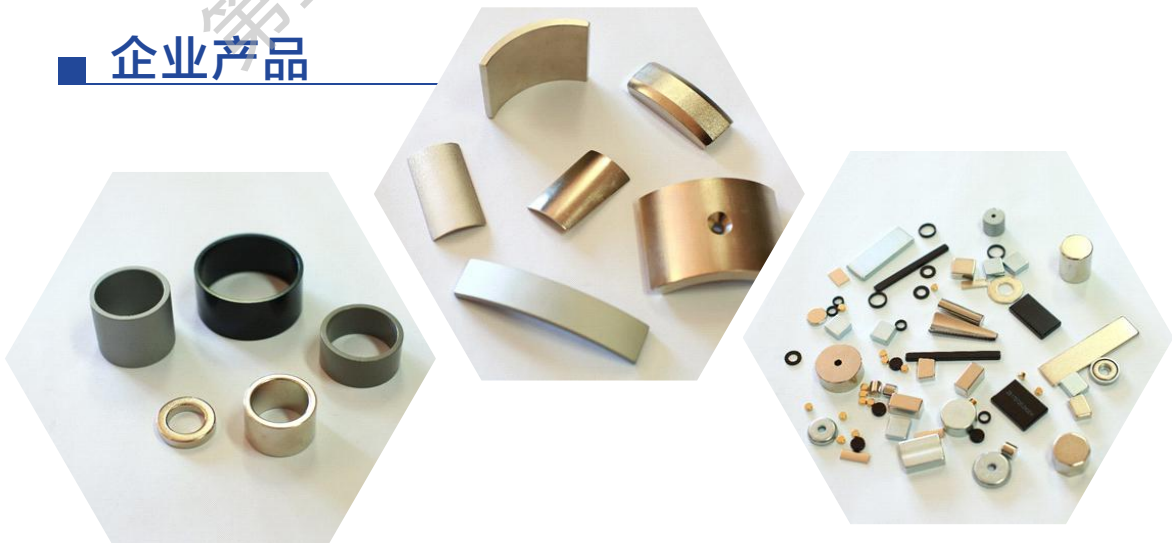
邮 箱：pgh@canmag.cn

地 址：宁波市鄞州区金谷北路228号中物科技园独栋3幢



宁波招宝磁业有限公司，是一家集稀土永磁烧结钕铁硼材料研发、生产、应用开发为一体的高新技术企业。是中国最主要的稀土永磁体（烧结钕铁硼磁钢 Sintered NdFeB Magnet）生产企业之一。公司于1999年6月份投产至今已达到产能5000T的规模。公司属于高新技术企业、宁波市“行业骨干”企业、镇海区“领军”企业、IATF 16949：2016，ISO14001:2015，ISO45001:2018和GB/T 29490：2013认证企业、宁波市专利示范企业、市级工程中心。

## 企业产品



联系人：林建强  
电 话：13777058461

邮箱：pop.lin@MSN.com  
地址：浙江省宁波市镇海区域关后海塘工业区定海路66号



## 宁波中科毕普拉斯新材料科技有限公司

Ningbo Zhongke B Plus New Materials Technology Co., Ltd.

宁波中科毕普拉斯新材料科技有限公司成立于2015年9月，是由中国科学院宁波材料所发起成立，由研究所内博士团队全职创业、独立运营管理的一家新材料高新技术企业，主要从事高性能节能软磁合金及其在下游电机、电力、电子器件等领域应用的研发、生产、销售与相关的技术服务。公司自主开发出多个系列的高性能新型非晶纳米晶软磁材料，达到国际先进水平，形成以高性能非晶纳米晶软磁材料、超低损耗电机铁芯、无线充电导磁片、高端电子元器件等为核心的系列产品，致力于解决当前电力电子器件向小型化、高频化、高效化发展对高性能软磁材料迫切需求的相关问题。

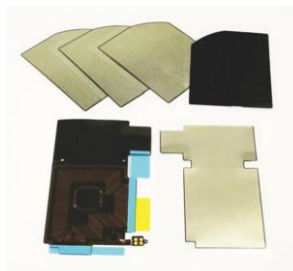
### 企业产品



新型亚纳米合金带材



亚纳米合金电力电子器件铁芯

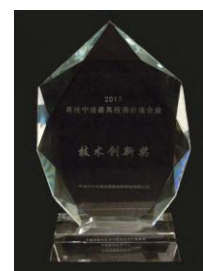


亚纳米合金导磁片



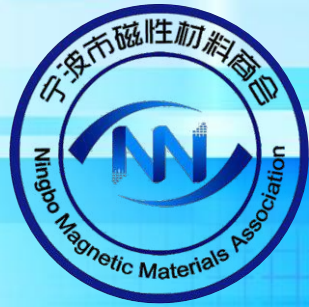
亚纳米合金电磁屏蔽材料

### 技术、荣誉展示



联系人：赵先生  
电话：15924329290

邮箱：zcl@nbbplus.com  
地址：宁波市镇海区庄市街道中官西路1818号



# 宁波市磁性材料商会

宁波市磁性材料商会，是宁波市磁性产业的行业性商会，由宁波市磁性相关企业、团体等自愿组成的非营利性社会团体组织。商会成立于2013年6月，主管单位是宁波市工商业联合会，社团登记管理部门为宁波市民政局。

## 商会主要服务内容

- 一、传达国家、省、市最新的优惠补助政策及行业内最新的法律、法规等。
- 二、向政府有关部门反映行业的医院和呼声，并就行业内重大事项进行调查、研究并提出解决方案。
- 三、企业在生产、经营中发生困难，商会将尽最大努力帮助排忧解难。
- 四、行业内企业发生争议时，商会出面进行协调、解决。
- 五、引导企业转型升级、积极开展各类技术服务、技术交流、技术咨询、职称考核等活动。
- 六、不定期举行各类丰富多彩的沙龙、茶话会等形式的联谊活动。
- 七、协助企业开展各类项目申报。
- 八、赠阅《磁材与计量》，并在宁波市磁性材料网站免费为会员企业发布宣传广告、供求信息等。
- 九、组织企业开展学习、考察、展会、讲座、论坛、培训等活动。

地址：宁波市鄞州区瑞庆路39号金融硅谷10号楼505

电话：0574-87844896 87142753

邮箱：nb\_cxcl@163.com

传真：0574-87840957

网站：nbscxcl.com

## 宁波菲仕技术股份有限公司

宁波菲仕技术股份有限公司（以下简称菲仕）成立于2001年，由民营控股、国投先进制造产业投资基金和宁波工业投资集团参股，公司始终坚持以创造高度可控的动力应用场景为使命，依托持续的技术创新，其领先的伺服产品和伺服系统解决方案覆盖工控自动化、运动控制和能量转换等各个领域，经过近20年的发展，菲仕已成为一家集研发、生产、销售为一体的集团化创新型高科技企业。

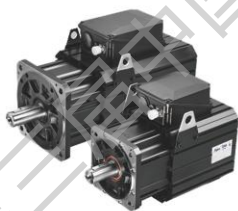
公司主要研发生产伺服产品和提供伺服系统解决方案，其中包括伺服电机（ULtractIII标准系列、Express标准系列、TW集成系列、TK直驱系列），伺服驱动器（PH300系列、AxN系列、AxN DC系列），新能源汽车电机、新能源汽车电机控制器和新能源汽车动力总成系统等。

### ▼ 企业产品

伺服电机产品



ULtract III Series Servo Motor  
ULtract III系列标准交流永磁同步伺服电机



Express Series Servo Motor  
Express 系列交流永磁同步伺服电机



TK Series Direct Drive Servo Motor  
TK 系列直驱力矩伺服电机



TW Series Integrated Servo Motor  
TW 系列一体化集成式伺服电机



BLDC Servo Motor  
BL 系列无刷直流伺服电机

## INNOVATIVE PRODUCTS

### 创新成果

菲仕始终保持与意大利等欧洲科技同步发展，消化吸收，创新发展，博采中西方优势，进行全方位引进、发明、设计和高效生产创新性产品。

Physis always keeps pace with European (e.g. Italy) technology, absorbs it for innovation and transformation, widely takes advantage of China and western countries, to introduce, invent, design in all directions, and produce innovation products efficiently.

伺服驱动器产品



PH300 Series Servo Drive  
PH300 系列高性能闭环矢量驱动器

AxN Series Servo Drive  
AxN 系列全数字交流伺服驱动器



地址：宁波市北仑区小港安居路308号  
销售热线：0086-0574-26922600  
传真：0086-574-26922541

网站网址：www.physis.com.cn  
销售邮箱：customer care2@phase.com.cn



## 宁波安信数控有限公司

NINGBO ANSON CNC TECHNIQUE CO.,LTD.

宁波安信数控技术有限公司专业致力于制造伺服系统，并为客户提供高效稳定的节能动力方案。目前，公司大功率伺服系统年产能达8万余套。截止2019年底，总供应量超60万套。公司主要产品有：伺服电机、伺服驱动器、运动控制器以及工业物联网产品及服务。

### 企业产品



联系人：王徐颖  
电话：0574-86188265

邮箱：wangxuyin@mail.haitian.com  
地址：宁波市北仑区小浃江中路518号



## 宁波复能新材料股份有限公司

Ningbo Funne New Materials Co., Ltd



复能新材料  
**FONNE**  
NEW MATERIAL

宁波复能新材料股份有限公司初创于2007年，主营业务为：稀土镨钕金属、镨铁合金、钕铁合金、金属铈、金属钕、金属镧、镧钕金属、及碳酸镧、草酸镧为主的其它稀土化合物等；是一家集稀土磁材生产、加工、新品研发、销售于一体的专业化公司。公司有稳定的供货渠道，产品经严格筛选的品质作保障，是中国六大稀土集团的战略合作伙伴，也是国内较大规模经营的稀土供应商之一。

### ■ 企业产品



镨钕金属



钕镨钕合金



钕铁硼磁体

联系人：胡科  
电 话：15869565365

邮箱：309992191@qq.com  
地址：宁波慈溪高新区新兴一路8号

# 宁波宁港永磁材料有限公司

Ningbo Ninggang Permanent Magnetic Materials Co., Ltd.

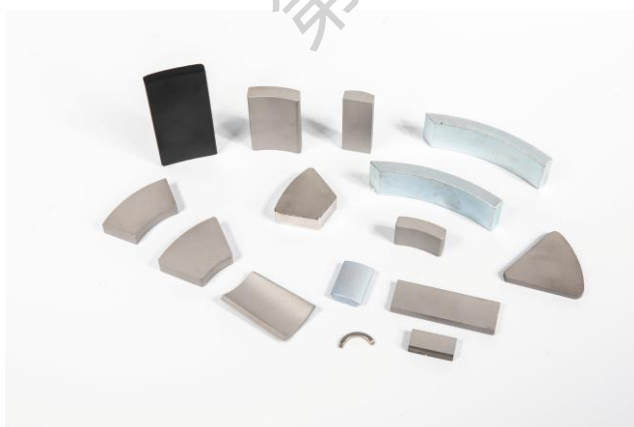


宁波宁港永磁材料有限公司



宁波宁港永磁材料有限公司是专业从事开发与生产烧结1:5、2:17钕钴磁性材料的厂家。经过三十年的创业发展，公司具有一流的技术、生产和检测能力，先后与世界知名的汽车、轨道交通、电机、航空航天、通信等领域的客户建立了长期的合作关系。公司占地面积25000平方米，厂房31700平方米，年生产能力已达1500吨，固定资产亿元以上；现有员工400多人，管理人员30多人，技术人员10人，品质管理人员35人。销售额亿元人民币以上，是当今世界上专业生产钕钴磁铁规模较大，牌号完备的企业。

## 企业产品



联系人：郭艳  
电 话：18957806718

邮箱：sales02@ngyc.com  
地址：宁波市鄞州区投资创业中心启明路505号



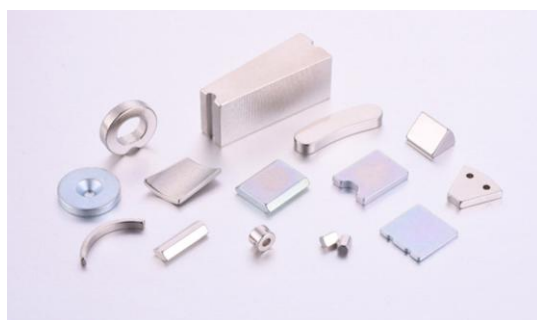
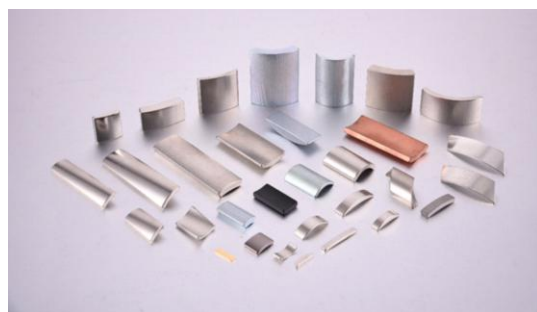
# 宁波永久磁业有限公司

Ningbo Permanent Magnetics Co.,LTD.



公司始建于1997年，是集生产与科研为一体的国家认定的高新技术企业、建有省级高新技术企业研究开发中心，专业生产高磁能积、高矫顽力、低可逆温度系数、低失重量系列稀土永磁材料及其制品。公司拥有经验丰富的烧结钕铁硼研发技术团队，致力于产学研合作，先后承担并顺利完成国家火炬计划、国家863项目的子课题等项目，现拥有发明专利十余项。公司占地面积60000m<sup>2</sup>，建筑面积50000m<sup>2</sup>，拥有国际先进的生产设备和现代化的厂房。公司拥有先进的技术和质量管理方法，先后通过TS16949、ISO9001、ISO14001和OHSAS18001等体系认证。

## 企业产品



地址：宁波市江北庄桥工业区康庄南路518号 电话：13805869343  
邮箱：rzq@pm-magnets.com



# Cocomag 宁波可可磁业股份有限公司

NINGBO KEKE MAGNET INDUSTRY CO., LTD

宁波可可磁业股份有限公司（股权代码：870147）成立于2004年，是一家专业致力于烧结钕铁硼、铝镍钴稀土永磁材料的研究、生产，销售以及应用的高新技术企业。公司生产基地位于中国浙江宁波，占地30000平方米。目前年产各种型号的中高档磁铁2000吨。钕铁硼系列包括N35~N54，N35M~N52M，N33H~N50H，N33SH~N45SH，N30UH~N42UH，N30EH~N38EH，N28AH~N33AH；铝镍钴系列包括Alnico3~Alnico9，Alnico3~Alnico8HC等。广泛用于电机马达、风力发电机、电梯曳引机、医疗器械、扬声器、磁力传动、航空航天等领域。销售至长三角、珠三角以及全国各地，同时广泛出口北美洲、欧洲和东南亚等世界各地。

## 企业产品



联系人：邱幼涑  
电话：0574-58221933 0574-62935558  
邮箱：sales@kkmagnet.com  
地址：浙江宁波余姚三七市镇安捷西路117号

## 莱宝--您的真空技术合作伙伴

莱宝公司于1850年在德国科隆创建，是真空技术的奠基者与创新者。莱宝真空致力于向全球用户提供高品质的真空产品，以先进的技术、丰富的专业经验及周到的服务为广大用户创造卓越价值。



关注微信号获取更多企业资讯

莱宝（天津）国际贸易有限公司

中国天津北辰经济开发区双辰西路8号

客户服务中心电话：4000388989 8008180033

www.leybold.com

# 您的干泵还需加油？ 莱宝VARODRY真正做到无油！



简单



高效



可靠



无油

VARODRY – 莱宝干式螺杆泵

## Leybold

莱宝中国  
莱宝（天津）国际贸易有限公司  
中国天津北辰经济开发区双辰西路8号  
客服电话：4000388989、8008180033  
[www.leybold.com](http://www.leybold.com)

**Pioneering products.  
Passionately applied.**



“莱宝真空”微信平台

# 美国博曼 XRF镀层厚度测量仪

› 镀层厚度测量 › 元素分析 › 电镀液分析



领先技术 细致服务



## › 关于博曼

美国博曼是全球涂镀层测厚和元素分析仪器的领军品牌。博曼拥有超过30年的行业经验，并始终保持创新，致力于为市场提供精准、高效和具有性价比的涂镀层检测设备。目前，博曼已在全球四大洲20余个国家建立销售和服务网络，为客户提供灵活高效的镀层厚度测量和元素分析方案。

博曼中国总部位于上海，目前并在华南、华东、西南区域设有办事处。专业的技术及服务团队有能力为客户提供极佳的镀层厚度检测方案和优质快速的售后服务。

## › 过去10年，博曼七大系列全球装机总量超过数千台

全系列产品为用户提供多样灵活的镀层厚度测量方案，目前已广泛用于电镀、紧固件、磁性材料、五金器具、汽车零部件、珠宝、线路板、连接器、半导体等行业。



# 博曼搭载行业领先的固态探测器和行业领先的算法 帮助用户实现镍/铜/镍、锡/镍/铜/镍的分层厚度检测

## ► 技术现状

第一代X射线荧光测厚仪采用气体比例计数器（Proportional Counter）作为探测器。由于其对不同能量谱峰的分辨能力不足，无法捕捉到镍镀层与镍镀层之间的信号差异，只能得到两层镍的总厚度。

## ► 技术突破

美国博曼采用最新的固态检测器(Si-Pin或SDD)，分辨能力比气体比例计数器高5-10倍；结合先进的算法，成功地将两层镍镀层的信号区分开，可分别得到两层镍镀层的厚度。

标准样品1 实测效果		
	标准值	实测值
镍 Ni	4.60um	4.78um
铜 Cu	9.53um	9.73um
镍 Ni	3.89um	3.89um
基材 磁铁		

标准样品2 实测效果		
	标准值	实测值
锡 Sn	5.30um	5.34um
镍 Ni	3.04um	3.17um
铜 Cu	5.43um	5.56um
镍 Ni	5.05um	4.95um
基材 磁铁		

## 博曼团队：30余年行业经验 – 以创新，获得业界认可



专利微电阻探头大大改善孔铜测量性能



全球第一款开槽式样品仓XRF测厚仪



全球首发point and shoot自动样品定位、自动镭射对焦



大大提高微焦X射线管的稳定性和寿命



发布多导毛细管XRF测厚仪，使用SDD检测技术



全球独家符合IPC 4552A标准的XRF制造商

发布全新G系列，采用“自下而上”的测量方式，伴随自动Z轴

1987	1988	1990	1993	1995	2002	2009	2012	2014	2017	2018	2019	
		发布全球第一款电涡流手持式孔铜测厚仪		发布全球第一款电脑控制的XRF测厚仪		利用自主知识产权的基本参数法(FP)镀层厚度演算法		发布全新XRF系统，使用Si-PIN检测器技术		多导毛细管XRF测厚仪斩获NPI产品大奖		发布全球最小毛细管光斑的X射线系统



Made in the USA

**BOWMAN** 博曼中国  
上海市普陀区真北路3199弄2号东二楼

领先技术 细致服务



银河水滴  
WATRIX. AI

中科水滴科技（深圳）有限公司

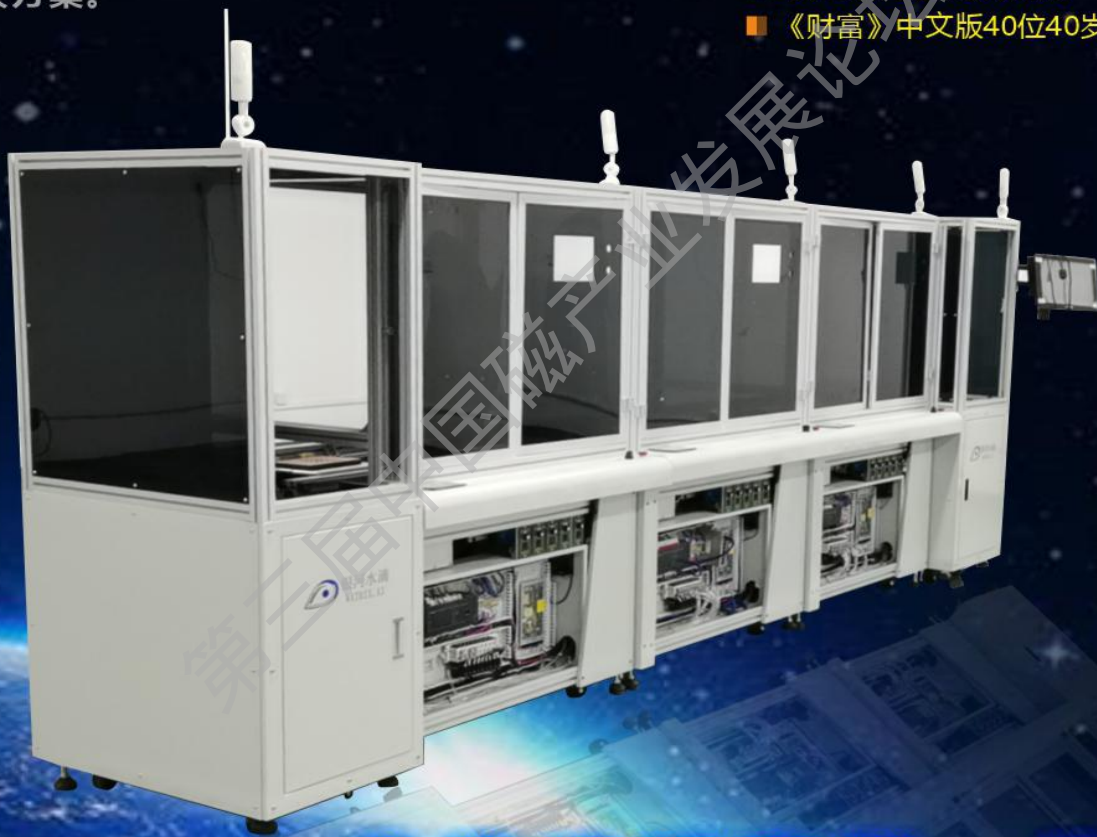
## ■ 公司简介：

中科水滴科技（深圳）有限公司是银河水滴（北京）有限公司全资子公司，2016年，银河水滴由黄永祯博士、谭铁牛院士等联合创办，中科院自动化所孵化、联想集团等知名机构联合投资。银河水滴致力于用最先进的人工智能和计算机视觉技术为制造行业提供先进的工业视觉产品及解决方案。



黄永祯  
创始人兼CEO

- 中科院科技成果转化一等奖
- VOC国际目标检测竞赛冠军
- 百度人形图像分割大赛冠军
- 第四批国家“万人计划”
- 《财富》中文版40位40岁以下商界精英



## 分选喷码充磁一体机

■ 工件形状：方形、圆形、瓦片形、柱形、环形等其他形状

## ■ 联系方式：

银河水滴：北京海淀区学院路51号首享科技大厦0701  
 中科水滴：深圳市龙岗区坂田街道天安云谷3栋B座1101  
 网址：[www.watrix.ai](http://www.watrix.ai)  
 联系人：王兴东 电话：18688726891





宁波市晟锐科技咨询有限公司

SHENGRUI

WWW.NBSRZX.COM

让创新更有价值!

企业科技管理 | 政府科技申报 | 科技财税管理 | 科技成果应用及保护

服务科技创新 助力企业发展

中国磁产业技术创新联盟成员企业

## 立足创新 专注创新 服务创新

# 企业简介

Company Profile



助力企业跨越科技创新发展的新高度

### 定位

高价值深度科创集成服务方案提供商  
企业发展和转型升级的支援者

### 专注

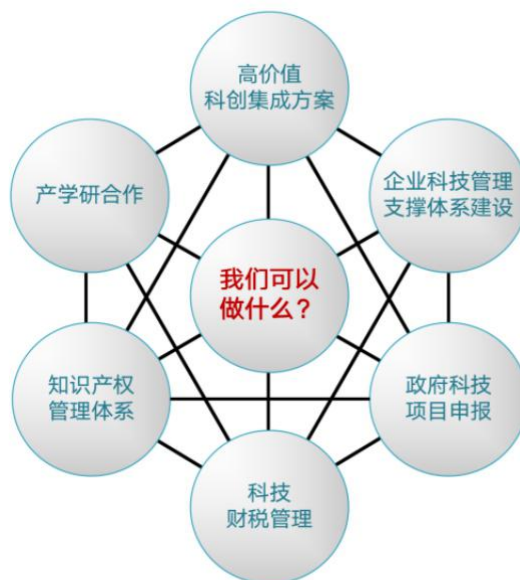
专注科技咨询服务近二十年，专注更专业  
致力于研究科技政策、科技申报技术及企业科创集成服务

### 优势

资深专家均长期任职知名企业集团或上市公司，实战经验丰富  
掌握关键核心技术，精准匹配政策和企业需求  
依托主营业务体系，提供整体科创集成服务方案



企业实实在在的收益



☎ 电话: 0574-87221786 18058235582  
 👤 Q Q: 1119582008 邮箱: nbsrkj@sina.com  
 📍 地址: 宁波市海曙区和义路 168 号万豪商务中心

值得信赖的企业科技管理和科技申报专家

# “磁海涌动”磁性材料应用技术 成果发布系列活动

为加快成果转化与项目落地，推动国家高层次人才及科研团队服务企业，进一步促进人才、技术、资金、政策、管理等与企业深度对接，促进磁性新材料及相关应用技术成果落地，培育新产业，创造新需求，在科技部人才中心指导下，中国科学院宁波材料技术工程研究所和浙江省磁性材料应用技术制造业创新中心共同推出“磁海涌动”磁性材料应用技术成果发布系列活动，目前已成功推出两场。

现诚挚向各高校院所，高层次人才及团队征集科技成果和项目。

## 项目征集方向

- 1、高性能永磁材料制备技术及绿色防护技术
- 2、磁性材料生产自动化产线技术
- 3、高频软磁材料及5G相关高端精密磁性元件技术
- 4、先进高效节能永磁电机设计制造技术
- 5、先进磁传感相关技术
- 6、其他



如果您有好的成果、项目，可以扫描上方二维码在线填写成果登记表

# 成果一

## 磁结构遗传算法预测技术

### 应用场景

- 新型二维磁性材料、斯格明子拓扑材料、磁性量子拓扑材料等优异磁性能的新型材料的快速筛选与发现、核材料的磁结构预测、磁随机存储器件的快速设计与开发、传统磁性材料的改性

### 技术优势

- 包括非共线磁性系统在内的材料复杂磁结构预测；
- 采用遗传算法预测磁结构，预测能力强、精度高、速度快；
- 已完成程序包开发及软件著作权专利的登记；

### 完成人简介



张平

北京应用物理与计算数学研究所研究员，理论与计算凝聚态物理研究领域专家，长期致力于武器物理材料与状态方程的物理建模、程序开发及大规模数值模拟研究。入选创新人才推进计划“中青年科技创新领军人才”。近年来承担科技部973、科技部创新团队、国防973、国家重大专项、国家自然科学基金重大研究计划、国家杰出青年科学基金等基金项目20余项。

扫描右方二维码  
回看成果直播吧



## 成果二

# 磁性材料光热纳米粒子辅助 HER2 CAR-T 治疗晚期乳腺癌

### 应用场景

- 通过磁性光热纳米粒子对乳腺癌进行局部光热预处理，降低肿瘤组织致密性，增加血液灌流，同时促进抗原释放与内源性免疫细胞募集，从而有效地解除微环境抑制，促进 CAR-T 细胞的渗透与杀伤效果，提升乳腺癌治疗效果。

### 技术优势

- 提高 CAR-T 细胞对肿瘤的靶向性；
- 增强 CAR-T 细胞对肿瘤的渗透性；
- 提高 CAR-T 细胞活性；
- 项目带头人及团队临床医疗经验丰富。

### 完成人简介



欧阳晨曦

中国医学科学院阜外医院主任医师，兼任中国生物医学工程学会副秘书长，入选创新人才推进计划“中青年科技创新领军人才”，2018年国家“十三五”重点研发计划首席科学家，美国斯坦福大学客座教授，德国汉诺威医科大学客座医生。2019年创立湖北贝隆医学创新基地，总面积10000m<sup>2</sup>，重点服务于广大医科院所科研人员项目转化，打造医工结合的创新型医疗器械公共服务平台。

扫描右方二维码  
回看成果直播吧



## 成果三

# 钎焊技术及其在磁性材料行业的应用前景

### 应用场景

- 由于磁性材料部件主要通过粉末冶金方法压制烧结而成，对于尺寸较大或形状复杂的磁体部件难以一次成型，使用环氧树脂粘接和机械固定等方法进行磁体连接存在不同程度的性能低、稳定性差、经济适用性低等问题。该技术主要用于解决新能源汽车、风力发电等行业存在的上述问题。

### 技术优势

- 钎焊后不影响磁体产品的整体磁性能；
- 钎焊接头抗剥离、耐久性优于机械固定或树脂粘结法；
- 钎焊接头抗开裂、抗冲击性优于机械固定或树脂粘结法。

### 完成人简介



龙伟民

研究员，博士生导师，现任中机智能装备创新研究院有限公司总经理、新型钎焊材料与技术国家重点实验室主任、先进钎焊材料与技术国际联合研究基地主任、绿色焊接国家重点领域创新团队带头人，入选创新人才推进计划“中青年科技创新领军人才”、国务院特贴专家、中原学者。

扫描右方二维码  
回看成果直播吧



# 成果四

## 高性能铁基软磁复合材料 绝缘包覆技术

### 应用场景

- 高性能铁基软磁复合材料经绝缘包覆处理后，具有高饱和磁通密度、高磁导率、低损耗，并能提供较宽的工作频率及较宽的工作温度范围、较高的阻抗以及低的总谐波失真。在家用电器、网络通讯、汽车电子、航天军工等诸多领域小型化与高性能化中具有重要意义。

### 技术优势

- 绝缘包覆后，包覆铁粉耐热温度高达 550℃；
- 制成磁芯后，磁导率高、涡流损耗低、中高频铁损小、电阻率大；
- 成本低、稳定性好、市场竞争力较强。

### 完成人简介



贾成厂

北京科技大学、教授、博导。获国家发明专利 30 余项。在国内外学术期刊上发表论文 200 余篇，主编、副主编、参编学术专著 14 本。获教育部科技进步二等奖等。主要社会兼职：中国复合材料学会等多家学协会理事或特聘专家，复合材料学报，粉末冶金技术等多家期刊编委等。

扫描右方二维码  
回看成果直播吧



# 成果五

## 高频用软磁薄膜材料制备技术及其在片上集成平面电感中的应用

### 应用场景

- 在电子通讯产品不断向着高频化、微型化和集成化的趋势发展过程中，本项目开发的 FeCo 和 FeNi 基磁性 / 介电纳米复合薄膜材料，应用于片上集成平面微电感的磁芯，可以显著提升电感的综合性能。

### 技术优势

- 开发的高频软磁薄膜，通过磁性 / 介电复合的策略，实现了 GHz 频段范围电磁特性的调控，并获得较高电阻率、良好热稳定性（在 300 °C 仍然可以稳定使用）；
- 实现了厚度达到 1 μm 以上时仍能保持良好高频软磁特性和面内单轴各向异性的磁性 / 介电复合纳米薄膜；
- 解决了电感的 MEMS 加工工艺与高性能磁性 / 介电复合纳米多层膜制备过程的兼容性问题；
- 作为磁芯应用于薄膜电感中，显著提高了电感的感量，GHz 频段下单位面积的电感值达到了 100 nH/mm<sup>2</sup> 以上。

### 完成人简介



彭栋梁

厦门大学教授，材料学院院长，国家杰出青年科学基金获得者，国家重点研发计划项目负责人，福建省“百千万人才工程”入选者，福建省“科技创新领军人才”入选者，长期致力于高频软磁材料及器件的研究工作，近年来先后承担国家重点研发计划项目、国家杰出青年科学基金、国家重大科学研究计划（973 计划）课题、国家自然科学基金重点项目等多项科研项目，获授权中国发明专利 11 项等。

### 合作方式

— 技术开发、技术入股、技术转让、技术服务、技术咨询、共建载体 —

扫描右方二维码  
回看成果直播吧



# 成果六

## 高强度、耐腐蚀性稀土永磁晶界设计与应用

### 应用场景

- 钕铁硼永磁应用广泛，但磁体强韧性差、烧结回火过程中容易开裂、机加工困难、极易腐蚀。通过晶界相调控和显微组织优化改善 NdFeB 永磁的使用寿命，节约宝贵的稀土资源，提高经济和社会效益。

### 技术优势

- 利用磁粉表面铜改性及双合金法引入纳米铝粉，磁体耐腐蚀性能提高了 3 倍以上；
- 设计开发了球磨加氢爆破复合工艺装置，简化生产流程 1/5；
- 开发了稀土永磁专用抗氧化剂。

### 完成人简介



于濂清

中国石油大学（华东）教授，博导，主持承担了国家自然科学基金项目 2 项，山东省自然科学基金 1 项，青岛市科技发展计划 2 项，获中国石油和化学工业联合会科学技术奖技术发明三等奖，青岛市技术发明二等奖。在超高性能稀土永磁钕铁硼材料规模化制备方面取得丰硕成果，参加完成的“高性能烧结稀土永磁材料制备和性能研究”项目获得 2006 年浙江省科技进步一等奖，“低成本高性能 NdFeB 永磁材料磁粉的研究和产业化”获 2004 年浙江省科技进步二等奖。在拥有授权国家发明专利 23 项，出版英文专著 1 部（章）。

### 合作方式

— 技术开发、技术入股、技术转让、技术服务、人才培养 —

扫描右方二维码  
回看成果直播吧



# 成果七

## 高频矩形波激励磁芯损耗测量仪

### 应用场景

- 用于磁芯生产厂商新磁性材料工作特征的评估、产线品质管控和电力电子厂商磁芯元件研发设计。

### 技术优势

- 测试设备上位机界面友好，拥有自主研发的核心算法和硬件电路板，可针对不同拓扑预测高频矩形波激励下占空比变化时的磁损特征；
- 建立磁滞损耗分区间模型表，精准评估磁性材料在典型直流偏置下的磁滞损耗；
- 一机多能，可测试无线供电模块互感、电感量等功能。

### 完成人简介



周岩

南京邮电大学教授，IEEE 会员、中国电源学会磁技术专委会委员、中国电源学会无线电能传输专委会委员。长期从事高频磁芯损耗建模和测试装置研发。主持多项国家自然科学基金面上项目、中国博士后基金项目等。先后入选江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师；江苏省“六大人才高峰”高层次人才；江苏省科学技术协会“首席专家（工程师）”等人才称号。

### 合作方式

— 技术开发、技术转让、技术服务、人才培养 —

扫描右方二维码  
回看成果直播吧





## 2019电感磁芯软磁材料专利技术分析报告

REPORT ON PATENTING ACTIVITY OF  
SOFT MAGNETIC MATERIALS THCHNOLOGY FOR INDUCTOR

电感元件是电子元器件产业中的三大无源器件之一，在电子行业中占据了极为重要的角色。随着第三代半导体技术及5G通信技术的逐渐普及，人工智能、物联网、云计算、区块链、视频社交、汽车电子、可穿戴设备等新技术新产业将共同驱动电子信息产业及智能设备的飞速发展。电感元件产业也因此将进入新一轮的高速发展期。作为电感元件的核心部分电感磁芯软磁材料将迎来新的机遇和挑战。

在此背景下，本报告以电感磁芯软磁材料相关专利文献为切入点，从宏观上勾勒出电感磁芯软磁材料技术发展现状，可以帮助国内磁性材料产业了解全球电感磁芯软磁材料技术发展趋势和现状，为国内高校、科研机构及企业的科学研究、产品开发、专利技术储备和专利战略布局提供参考，推动我国电感磁芯软磁材料产业转型升级及健康发展。

浙江省磁性材料应用技术创新中心

**如果您对此报告感兴趣，请与我们联系：宋女士（0574-86681030）**

# 2020 磁性电磁屏蔽 及吸波材料专利分析报告

## 2020 Report On Patenting Activity of Magnetic Electromagnetic Shielding And Absorbing Material



近年来，随着微波通信、大规模集成电路的发展和军事隐身的要求，微波电磁屏蔽及吸波材料正成为材料研究领域的一个热点。目前，单一类型的材料难以满足屏蔽/吸波材料的“薄、轻、强、宽”的需求，因此，具有多种损耗的磁性复合电磁屏蔽及吸波材料成为当前研究的主流方向。

本报告以磁性电磁屏蔽及吸波材料相关专利为研究对象，分析了磁性材料在电磁屏蔽及吸波材料中的应用情况。报告通过近180页、8万字、100张图表，旨在梳理出磁性电磁屏蔽及吸波材料领域的关键技术发展趋势和研发热点，了解国内外主要竞争对手的专利申请动向，洞悉磁性电磁屏蔽及吸波材料领域的关键技术专利竞争态势。帮助国内相关产业了解全球电磁屏蔽及吸波材料技术发展全貌与趋势，为国内高校、科研院所及企业的专利技术储备和专利战略布局提供参考，进而为我国电磁屏蔽及吸波材料产业提供技术信息支持。

浙江省磁性材料应用技术创新中心

**如果您对此报告感兴趣，请与我们联系：宋女士（0574-86681030）**

# 2020磁流体应用技术 分析报告

## 2020 Analysis Report of Ferrofluid Application Technology

磁流体兼具磁性与流动性，独特的性质有别于固体材料，在各类科学研究和工程技术部门能够产生新的变革，适用范围广，渗透至航空航天、电子设备、机械工程、生物医学等国民经济各大领域。磁流体研究是一门涉及物理、化学、力学、流变学等的边缘学科，是材料科学中的一支新秀，具有蓬勃发展动力与潜力。磁流体在全球市场仍处于早期阶段，在密封、精密抛光、阻尼等方面有广泛应用，在未来的几十年中，磁流体依旧有强劲增长趋势，制造商仍有很多潜在的发展机会。

本报告基于各类中英文期刊数据库的文献资料、磁流体行业公开信息、磁流体相关企业官网，综合多学科特点，系统介绍了磁流体结构、制备方法、性能、应用与发展趋势等内容。以此总结了磁流体的现状，预测未来发展趋势以及技术方向，拓展磁流体应用领域，为国内高校及企业的科学研究、产品开发提供参考，推动我国磁流体及应用的产业升级转型。

浙江省磁性材料应用技术创新中心

如果您对此报告感兴趣，请与我们联系：宋女士（0574-86681030）

# 2020

## 磁性材料增材制造技术 专利分析报告

Report on Patenting Activity of  
Additive Manufacturing for Magnetic Materials

增材制造技术是一种新型的从下至上的材料成型加工技术，与传统的自上而下的加工工艺相比，有非常突出的优势。首先，增材制造技术无需机械加工或任何模具，可以直接从计算机图形数据中生产复杂形状的零部件，大大缩短了新产品的开发周期。其次，增材制造技术是一种近净成型技术，只需进行少量后续处理即可投入使用，大幅度提高材料加工时的利用率，降低了制造成本。第三，增材制造技术可以实现传统制造方法无法实现的结构，使设计与材料的使用达到最优化。

磁性材料和增材制造技术的结合是近10年刚刚兴起的功能材料制造加工技术，属于交叉技术领域。本报告在检索相关专利和最新文献的基础上，从磁性材料增材制造技术的原材料，工艺技术，设备及应用四个方面对相关领域的研究现状、技术布局、参与主体等进行梳理分析，探讨磁性材料增材制造技术的未来发展趋势。

浙江省磁性材料应用技术创新中心

如果您对此报告感兴趣，请与我们联系：宋女士（0574-86681030）

以磁聚力 从磁启航

第三届中国磁产业发展论坛

第三届中国磁产业发展论坛

MIDF2020

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

---

浙江省磁性材料应用技术创新中心

第三届中国磁性产业发展论坛



官方网站 [www.icamzj.com](http://www.icamzj.com) | 咨询热线 **0574-86681030**

单位地址：浙江省宁波市镇海区庄市街道光明路189号