磁性材料·元器件

Magnetic Materials and Devices

2022 5

（总第 35 期）

中国电子元件行业协会磁性材料与器件分会
浙 江 省 磁 性 材 料 行 业 协 会 主办

2022 磁性材料产业高峰论坛暨科技成果对接活动在东阳横店举行

磁性材料·元器件

（双月刊）

名誉主任

都有为　沈保根　李　卫　严　密

编委会主任　何时金

编委会副主任

毛海波　吴志坚　吴　江　李炳山

张瑞标　郭晓东　熊咏鸽　魏中华

卢杨成　姚　刚　汪小明　黄　兴

胡盛清

编委会委员（按姓氏笔画排序）

车声雷　闫阿儒　刘先松　邵　峰

何震宇　杜阳忠　吴　琛　赵国法

赵　光　胡　军　葛洪良　夏爱林

颜　冲　马　达

编　　辑　谈泮明　陈秀明

编辑单位　秘书处

通讯地址　浙江省东阳市东街1号

（老市政府）

电　　话　0579-86621399　86621136

邮　　编　322100

邮　　箱　1748539381@qq.com

主办单位　中国电子元件行业协会磁性材料与器件分会

浙江省磁性材料行业协会

主管单位　中国电子元件行业协会

（内部资料，免费交流）

目录 CONTENTS

◆科技对接◆

1. 中国计量大学磁性材料及检测技术团队介绍…… (3)

一、团队概况…… (3)

二、研究方向…… (3)

三、人才队伍…… (3)

四、科研业绩…… (3)

五、标志性成果…… (4)

六、科技成果介绍（高频低损耗软磁复合磁芯）…… (4)

七、研究工作成果汇报（高磁能积Sm_2Co_{17}磁体）…… (8)

1. 高磁能积Sm_2Co_{17}磁体…… (8)

2. 高使用温度Sm_2Co_{17}磁体…… (9)

3. 高磁能积Sm_2Co_{17}磁体温度稳定性优化……(10)

2. 磁性材料安徽省工程技术研究中心安徽大学成果介绍…(12)

一、引言……(12)

二、稀土永磁材料……(13)

三、软磁合金与电磁耦合器件……(19)

四、小结……(20)

(一)工作总结……(20)

(二)技术报告……(21)

(三)财务情况……(23)

(四)实施绩效……(24)

3. 西安交通大学智能应用磁性材料与传感团队介绍……(25)

一、团队基本情况……(25)

二、研究方向……(26)

三、研究成果与荣誉……(29)

四、西交-常德研发平台经验与启示 …… (31)

4. 西北工业大学面向生物工程应用的微型磁性机器工作团队介绍……(33)

◆行业动态◆

1. 先进软磁性材料在电机行业的应用……(36)
2. 钕磁体，凭啥让美国担心卡脖子……(38)
3. 工信部新发布14项电机标准，其中修订版8项，新制订6项，事关诸多电机厂 ……(41)
4. 什么是电子元器件……(44)

◆企业传真◆

1. 东磁器件　未来可期……(47)

◆协会工作◆

1. 2022磁性材料产业高峰论坛暨科技成果对接活动在浙江横店顺利举行……(48)
2. 《旋磁多晶铁氧体材料》《低磁导率纳米晶磁心》两项团体标准审查会在东举行……(49)
3. 横店，召开磁性材料产业人员能力提升培训工作座谈会……(50)

磁性材料·元器件

（双月刊）

立足磁性行业

探讨技术前沿

交流工作信息

服务广大企业

磁性材料及检测技术团队介绍

吴　琼

中国计量大学

■团队概况

中国计量大学磁性材料及检测技术团队现有专任教师 34 人，100% 博士，教授 11 人，高级职称 50%，40 周岁以下 52.9%。

◎磁 / 光电子材料制备及检测技术重点科技创新团队

◎新材料制备及测试高校创新团队

团队发展历程

■研究方向

◆高性能磁性材料研发：致力于研究解决磁性材料行业共性关键技术，开发高场、高频、高磁导率、低损耗、低成本磁性材料及其绿色制备技术等，促进磁性材料产业转型升级；

◆磁检测及标准化：发展磁性材料宏观性能表征与微观元素物态检测技术和弱磁检测技术研究等；

◆磁应用技术：磁性组件磁路设计研究，磁传感器校准技术研究；

◆前沿磁性材料研究：电磁屏蔽涂层材料、自旋电子学材料及器件、自组装复合磁性材料等；拓扑磁单极斯格明子材料

■人才队伍

序号	中青年人才	主要业绩
1	胡秀坤	南京大学博士毕业，特聘教授，德国 PTB 工作近 10 年，参 与多项欧盟项目，2022 年引进回国
2	俞能君	钢铁研究总院博士毕业，2021 年获批国家重点研发计划青 年科学家专项
3	杨杭福	德国 PTB 博士毕业，2022 年获批装备技术基础科研项目
4	洪波	中国科技大学博士毕业，近二年科研到款近 1000 万元
5	彭晓领	浙江大学博士毕业，出版磁性材料相关教材 3 部，2022 年 获批国企重大横向项目
6	泮敏翔	上海大学博士毕业，2022 年承担国家重点研发计划课题

■科研业绩

◎科研获奖

序号	奖励类别	获奖等级	获奖项目名称	获奖人	获奖时间
1	国家科学技术进步奖	二等	功率型高频宽温低功耗软磁铁氧体关键技术及其产业化（参与）	葛洪良	2019
2	浙江省科学技术进步奖	一等	高性能锰锌、镍锌铁氧体材料与器件研发及产业化（主持）	葛洪良	2010
3	浙江省科学技术进步奖	二等	基于硬磁主相设计的稀土永磁材料关键制备技术及产业化（主持）	葛洪良	2021
4	浙江省科学技术进步奖	二等	HD 制备均一性 NdFeB 磁粉及其研发曳引机专用大尺寸磁瓦的关键技术（主持）	张朋越	2012
5	浙江省科学技术进步奖	一等	CoPtW 纳米复相合金永磁薄膜开发及应用研究（主持）	葛洪良	2006
6	浙江省科学技术进步奖	三等	新能源汽车用高耐热冲击钕铁硼关键制备技术及其电机应用	张朋越	2020
7	浙江省科学技术进步奖	三等	粘结复合永磁体三维可控构筑技术及产业化应用化应用（主持）	吴琼	2021

◎代表性科研项目

序号	项目名称	经费	项目类别	起止时间
1	稀土磁性材料稀土原子物态检测、效能溯源与高效利用评价技术	1550 万	国家重点研发计划	2019–2021
2	元素双梯度钴基复合磁体变温磁耦合机制及调控技术	300 万	国家重点研发计划	2021–2024
3	软磁复合材料界面设计及其对高频损耗抑制作用研究	240 万	国家自然科学基金重点项目	2019–2022
4	高耐蚀耐温高性能低重稀土钕铁硼研发	390 万	浙江省重点研发计划	2021–2023
5	磁性材料高通量表征技术研究开发	300 万	浙江省重点研发计划	2017–2018

序号	项目名称	经费	项目类别	起止时间
6	生物质基高性能活性炭及成套改性装置的开发	200 万	企业委托	2020–2022
7	新型废水、废气处理用高效填料及其应用技术	200 万	企业委托	2020–2022
8	镀锡板材清洁生产成套工艺开发	200 万	企业委托	2018–2021
9	一种软磁复合材料及其制备方法	120 万	企业委托	2019–2021
10	高性能磁性材料制备技术	100 万	企业委托	2020–2021
11	石墨烯基导热复合材料研制及应用	100 万	企业委托	2018–2019
12	用于电力行业的宽幅超薄非晶合金软磁材料的研发	120 万	企业委托	2017–2019

◎标准制修订

序号	标准编号	标准类别	标准名称
1	GB/T 3217–2013	国家标准	永磁 (硬磁) 材料磁性试验方法
2	GB/T 29628–2013	国家标准	永磁（硬磁）脉冲测量方法指南
3	GB / T 35690–2017	国家标准	弱磁材料相对磁导率的测量方法
4	GB/T 17951–2022	国家标准	硬磁材料一般技术条件
5	审定稿报批中	国家标准	磁性材料居里温度检测方法 第 1 部分 永磁材料
6	审定稿报批中	国家标准	磁性材料居里温度检测方法 第 2 部分 软磁材料
7	制订中	国家标准	永磁体磁偏角测量方法
8	制订中	国家标准	永磁体表面磁场测试方法
9	IEC 63182–6	国际标准	Magnetic powdercores – guidelines on dimensions and the limits of surface irregularities– Part 6: EQ – cores

■标志性成果

◎标志性成果 1：基于硬磁主相设计的稀土永磁材料关键制备技术及产业化

项目成果突破了稀土永磁材料稀土资源利用不平衡、单位磁能成本高等行业技术瓶颈问题，发展稀土永磁材料中的高质化利用技术，实现超高性能低重稀土烧结钕铁硼关键技术的突破和产业化，形成具有我国自主知识产权的高性能稀土材料及其关键制备技术。

2020 年度获浙江省科技进步二等奖

◎标志性成果 2：稀土磁性材料稀土原子物态检测、效能溯源与高效利用评价技术

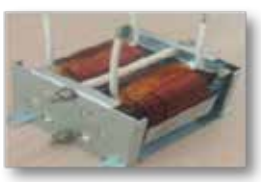
项目围绕稀土磁性材料产业发展的质量技术基础问题，综合发展了稀土磁性材料稀土原子物态检测、效能溯源与高效利用评价技术。项目制定磁性材料性能检测国家标准 4 项，修订磁性材料产品分类国家标准 3 项，申请发明专利 19 项，基于项目检测技术开发新产品 11 项，产值超 5 亿元，节约重稀土资源约 200 吨，培养了一批稀土磁性材料高层次专业人才。

“五位一体”元素物态测试技术研究

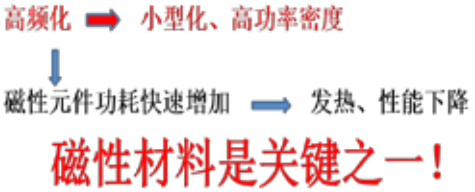
科技成果介绍
高频低损耗软磁复合磁芯

■智能化要求—高频、低损耗磁芯

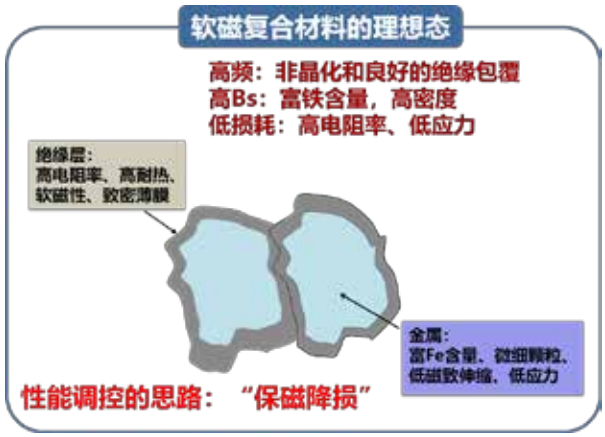
磁性元器件是智能装备的关键基础元件。高频软磁材料是制造电子变压器、功率电感、高频滤波器等器件的核心材料。



电动汽车主功率板（100kHz,PC40）和电池升压电感



■研究进展



■研究成果——合金磁粉表面氮化制备软磁复合材料

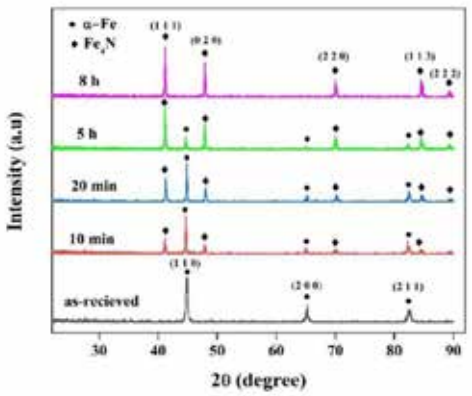


图 1 原始粉末和 550℃不同氮化时间样品的 XRD 图

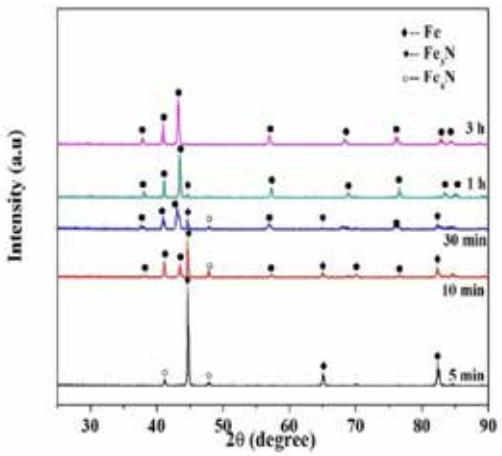


图 2 500℃不同氮化时间样品的 XRD 图

表面氮化相主要受氨气、氢气比例与氮化温度影响。

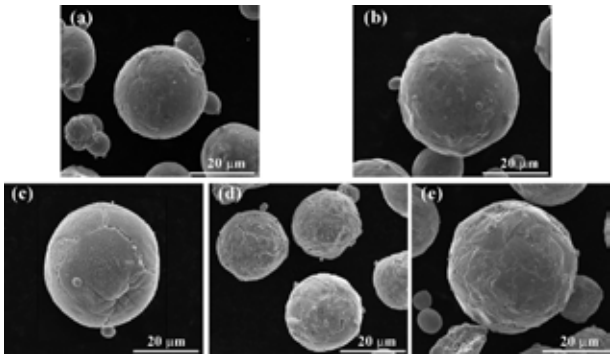


图 3 （a）Fe 粉和氮化（b）10 min（c）、20 min、（d）5 h、（e）8 h 样品的 SEM 图

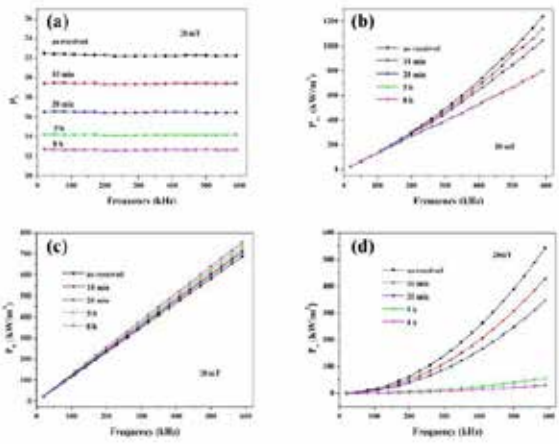


图 4 不同氮化时间样品的（a）磁导率（b）磁损耗（c）磁滞损耗（d）涡流损耗

氮化物相的增多，高频损耗显著降低，有效磁导率降低

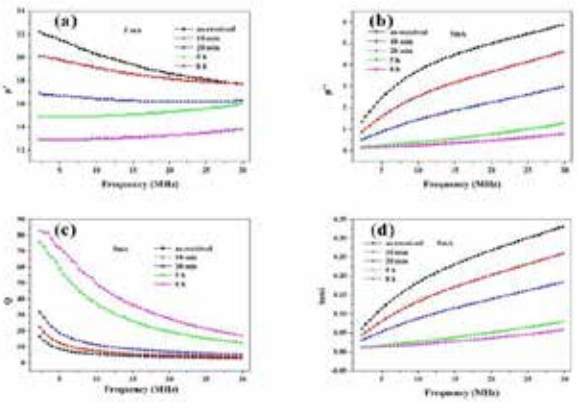


图 5 不同氮化时间样品的复数磁导率（a）实部 μ′（b）虚部 μ″（c）品质因数 Q（d）正切损耗角 tan δ

■研究成果——非晶磁粉表面的原位包覆氧化物研究

通过水热氧化反应在非晶粉末表面生成一种具有亚铁磁性的纳米级球形网状包覆层。

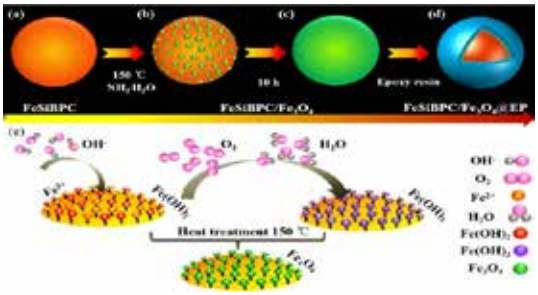


图 6 非晶复合粉芯的双层核壳典型的包覆工艺（以 FeSiBPC/Fe3O4@EP 为例）

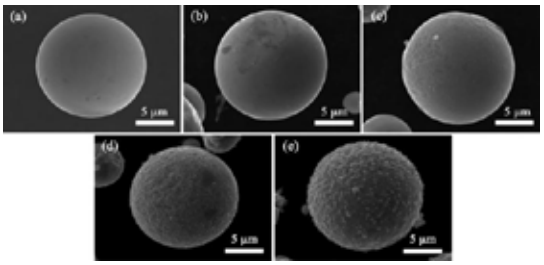


图 7 水热时间为 0、5、10、15 和 20 h 的 FeSiBPC 非晶复合粉末的表面形貌 (a)−(e)

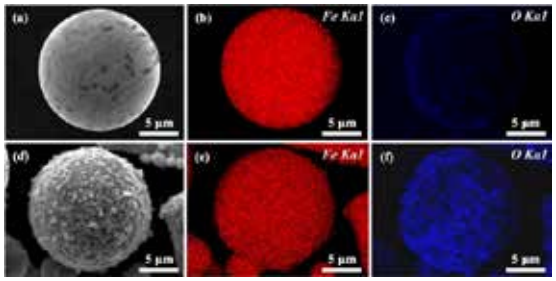


图 8 (a)−(c) 是未水热氧化的非晶态粉末的 SEM 和 EDS 元素分布；(d)−(f) 是水热氧化 20 h 复合非晶粉末的 SEM 图像和 EDS 元素分布

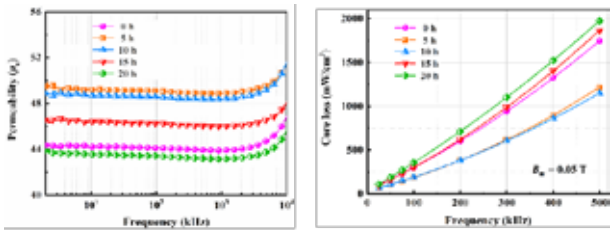


图 9 不同水热氧化条件下非晶复合磁粉芯的磁导率和损耗随频率的变化曲线

■研究成果——磁场取向制备不同体系软磁复合材料

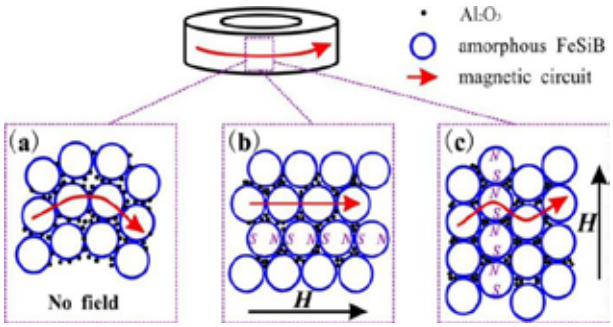


图 10 (a) 无磁场和 (b) 平行于或 (c) 垂直于磁场时球形非晶 FeSiB/Al_2O_3 软磁复合材料粒子分布示意图

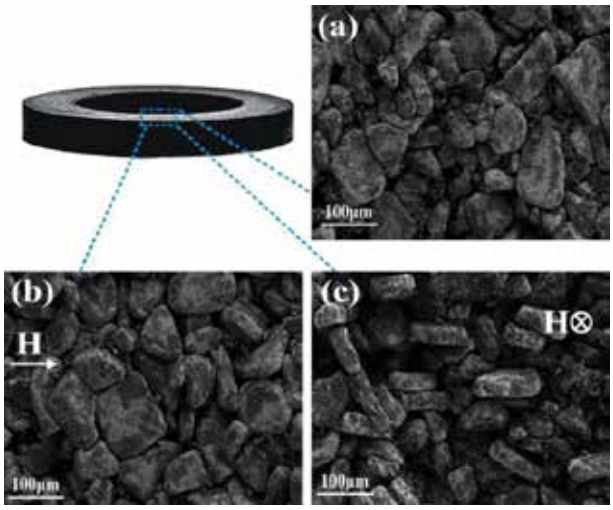


图 11 (a) 无磁场和 (b) 磁场平行或 (c) 垂直时制备的软磁复合材料的 SEM 图像

水平取向的磁环拥有最高的有效磁导率和最低的损耗，在 590 kHz、10mT 条件下为 43.693 kW/m^3。

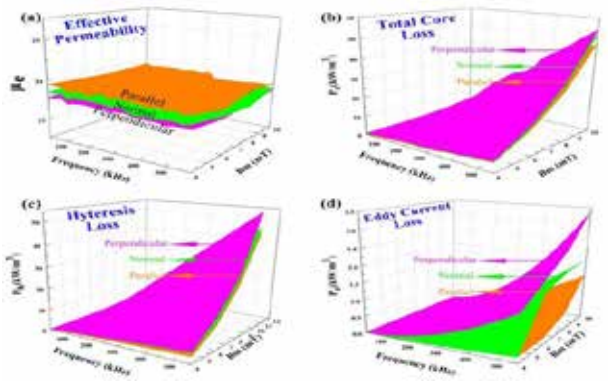
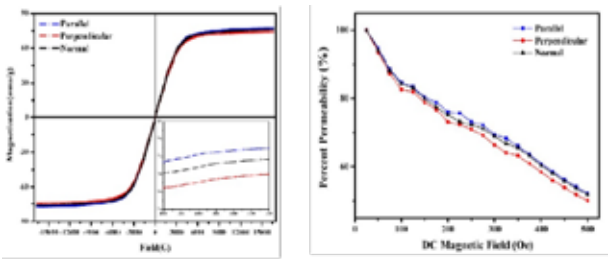


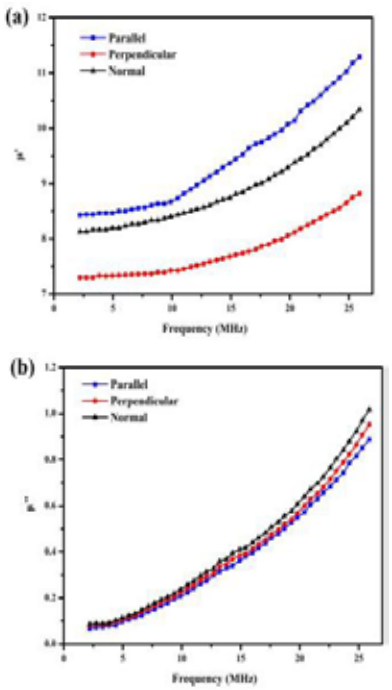
图 12　在 4~10 mT 的 20 kHz−590 kHz 范围内，球形非晶 FeSiB/Al_2O_3 软磁复合材料的 (a) 有效磁导率和 (b) 总损耗，将总损耗分离为 (c) 磁滞损耗和 (d) 涡流损耗。

水平取向的磁环具有更高的饱和磁感应强度 B_S 和更佳的直流偏置特性。



（a）　　（b）

图 13 球形非晶 FeSiB/ Al_2O_3 软磁复合材料的（a）磁滞回线和（b）直流偏置特性



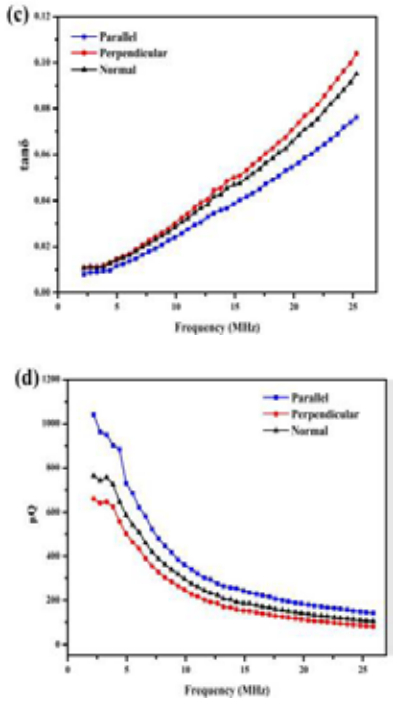


图 14 U = 0.25 V 时，球形非晶 FeSiB/Al_2O_3 软磁复合材料的复磁导率 (a) 实部 μ′ 、(b) 虚部 μ″ 、(c) 损耗角和 (d) μQ 乘积随频率从 2 MHz−26 MHz 的变化

水平取向磁体的有效磁导率增加，损耗降低

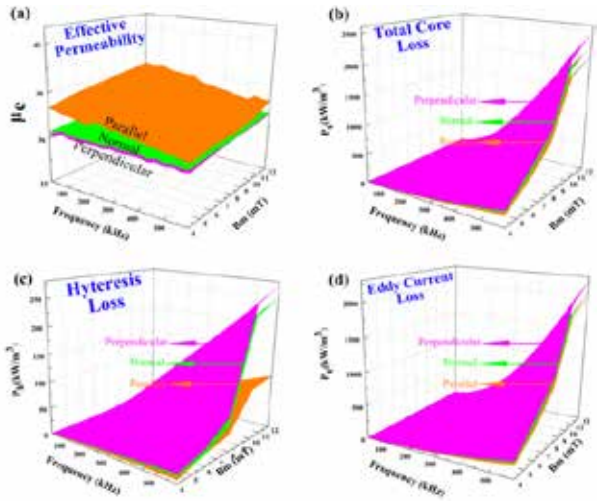


图 15　在 4~12 mT 的 20 kHz−590 kHz 范围内，片状非晶 FeSiB/Ni−Zn 铁氧体软磁复合材料的 (a) 有效磁导率和 (b) 总损耗，将总损耗分离为 (c) 磁滞损耗和 (d) 涡流损耗

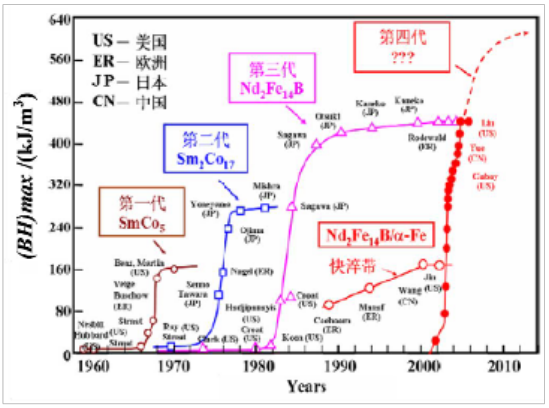
研究工作成果汇报

俞能君

中国计量大学材料与化学学院

1. 高磁能积Sm_2Co_{17}磁体

1.1 研究背景



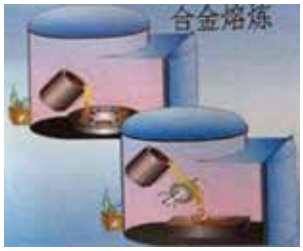
稀土永磁材料经过几十年发展，最大磁能积有了长足的进步。

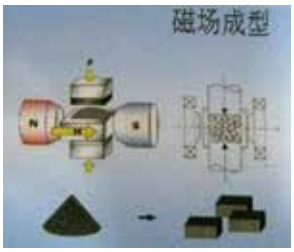
合金种类	M_s (kG)	H_A (kOe)	T_C (K)
$Nd_2Fe_{14}B$	16.0	73	585
$SmCo_5$	10.7	400	1020
Sm_2Co_{17}	12.5	85	1190

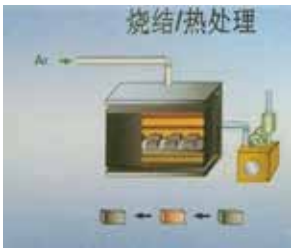
而Sm_2Co_{17}合金的M_s较低，严重限制了$(BH)_{max}$。

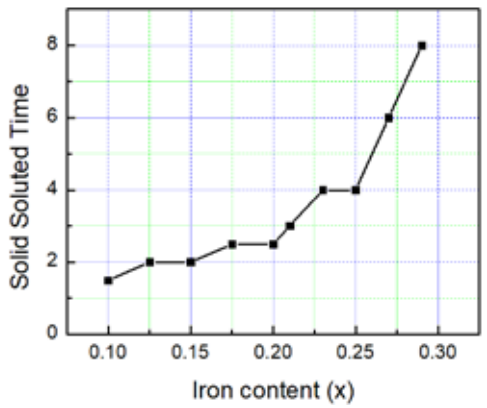
1.2 研究过程

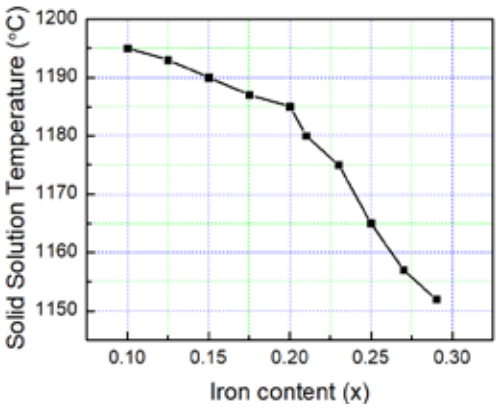
$Sm(Co_{0.925-x}Fe_xCu_{0.05}Zr_{0.025})_{7.74}$ (x=0.21~0.31)

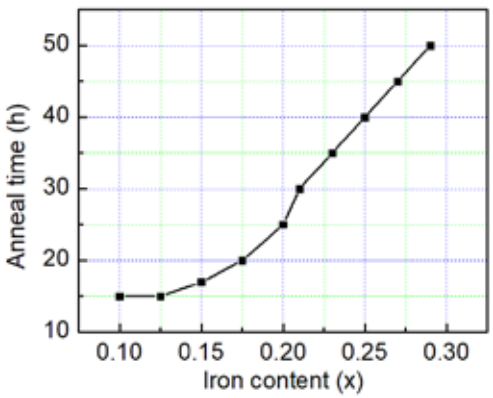


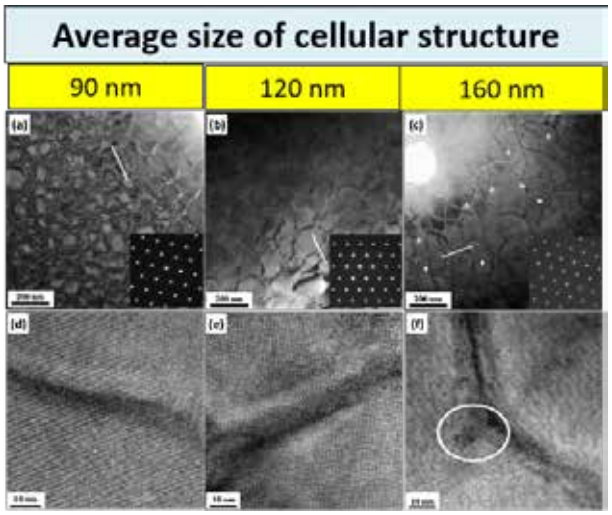




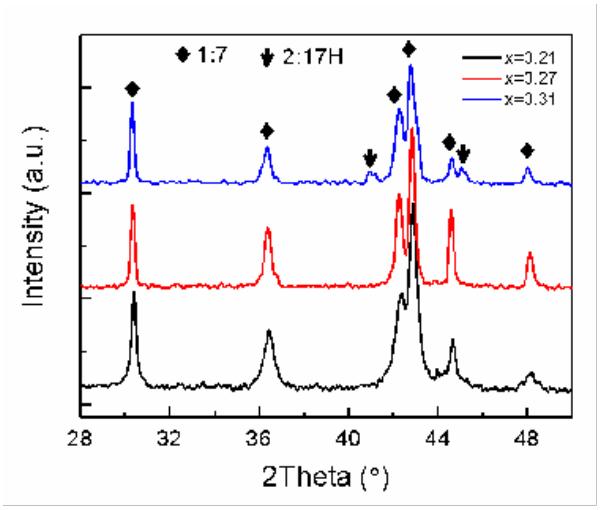






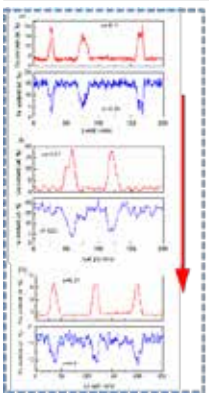


Fe 含量提升导致胞状组织增大，且 x=0.31 磁体出现不完整的胞壁相。



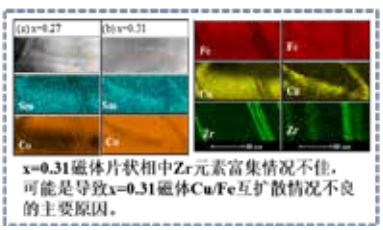
x=0.21和0.27固溶态磁体为单一的1：7H相，x=0.31固溶态磁体中出现2：17H相。

在回火后期，该 2:17H 相会分解为 2:17R 和 1:3R 相，导致原有结构破坏 x=0.31 磁体胞状组织不均匀由 2:17H 相导致。

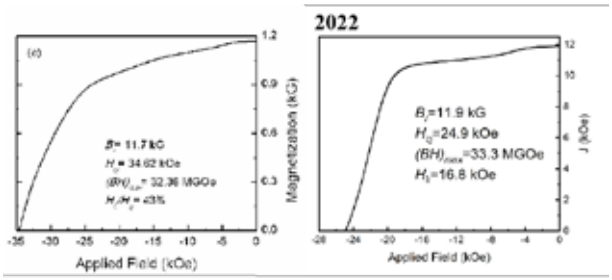


Cu in cell wall	15 at.%	11 at.%	7 at.%
Fe in cell wall	7 at.%	10 at.%	16.5 at.%
Fe in 2:17R	15.1 at.%	17.2 at.%	19.0 at.%

胞壁相Cu含量下降　胞壁相Fe含量上升
主相Fe含量上升



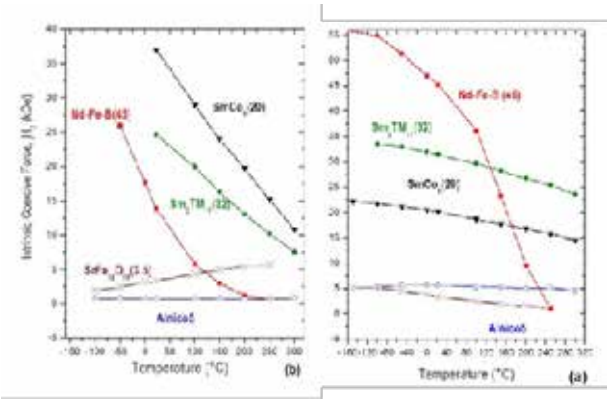
x=0.31磁体片状相中Zr元素富集情况不佳，可能是导致x=0.31磁体Cu/Fe互扩散情况不良的主要原因。

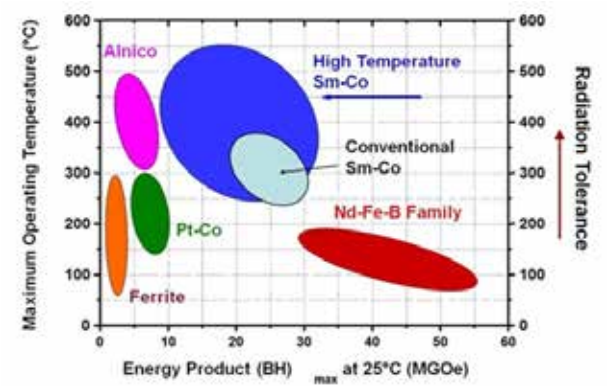


时间	B_r (kG)	H_{cj} (kOe)	$(BH)_{max}$ (MGOe)
2020	11.7	34.62	32.36
2022	11.9	24.9	33.3

2. 高使用温度Sm_2Co_{17}磁体

2.1 研究背景

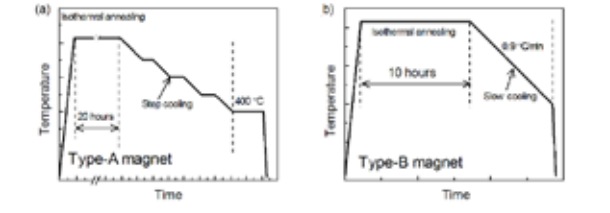




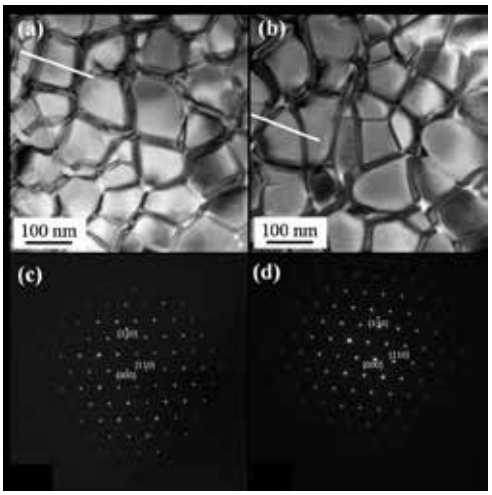
SmCo 系永磁体居里温度高 (900℃)，温度稳定性好（剩磁温度系数约为 –0.03%/℃）。

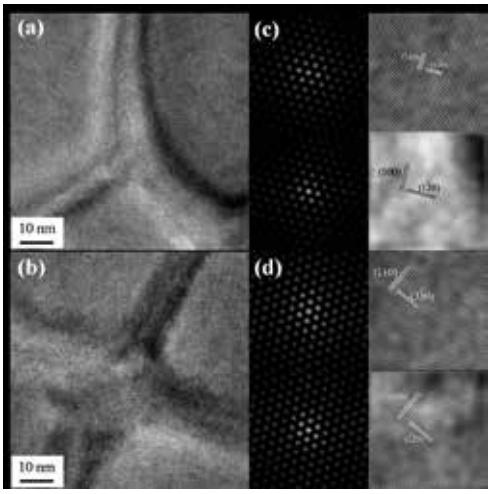
2.2 研究过程

$$Sm(Co_{bal}Fe_{0.1}Cu_{0.09}Zr_{0.03})_{7.2}$$

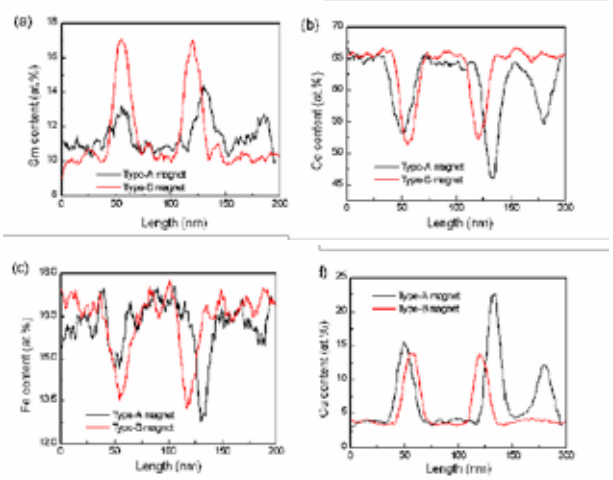


A磁体：多级回火　　**B磁体：多级回火**





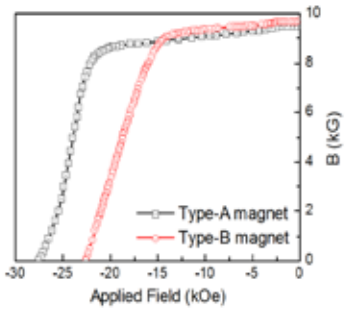
回火工艺对胞状组织平均尺寸没有影响，A、B 磁体胞状组织平均尺寸均为 90nm。但 A 磁体胞壁宽度为 12nm，B 磁体为 9nm。

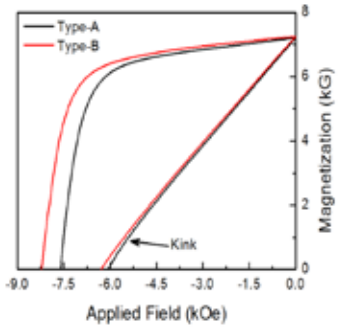


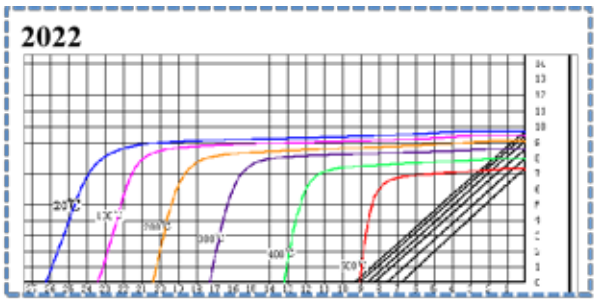
A 磁体胞壁相中平均 Cu 含量为 12 at.%，B 磁体为 8 at.%。Fe 含量一致。A 磁体胞壁中 Sm 含量较低是因为回火时间过长。

2.3 结论与成果

2017







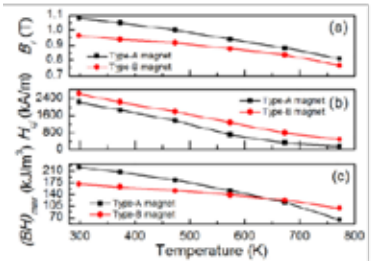
时间	温度	B_r (kG)	H_{cj} (kOe)	$(BH)_{max}$ (MGOe)
2020	室温	9.6	22.5	22.5
	500 ℃	7.2	8.2	11.9
2022	室温	9.7	26.2	23.0
	500 ℃	7.3	9.0	12.5

2017 α=-0.053 %/℃ 2022 α=-0.052 %/℃
β=-0.134 %/℃ β=-0.138 %/℃

3. 高磁能积Sm_2Co_{17}磁体温度稳定性优化

3.1 研究背景

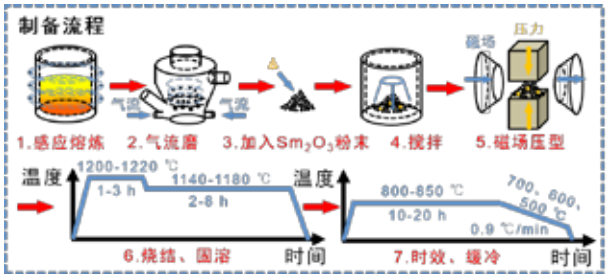
提升Fe含量和优化工艺，有效的提升了烧结Sm_2Co_{17}磁体的$(BH)_{max}$，但Fe含量提升也带来一些问题。

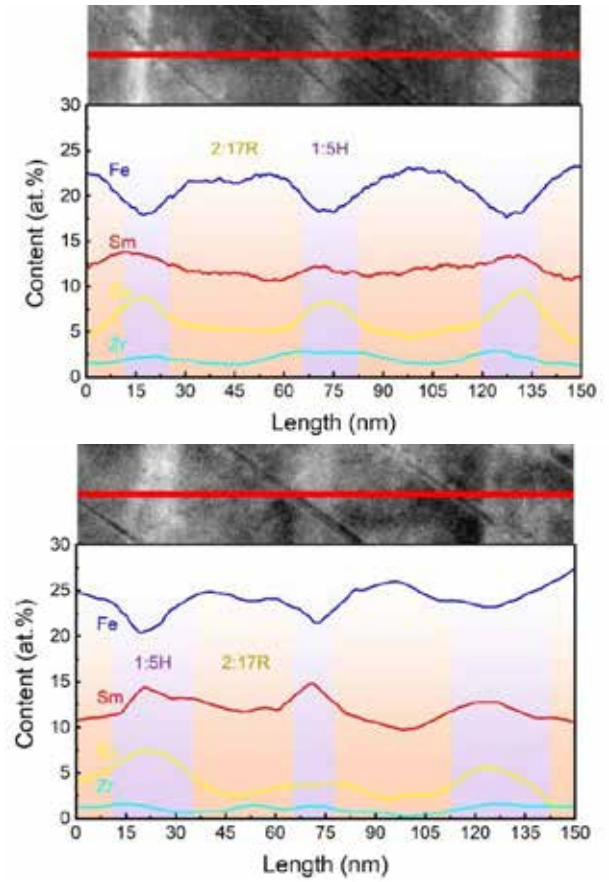


高磁能积磁体与高温磁体相比，后者胞壁相中的Cu含量较少，但铁含量较低。且胞壁更窄。

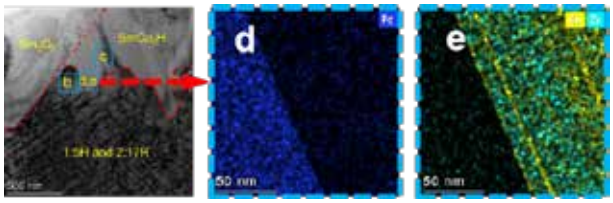
面高温Sm_2Co_{17}磁体在室温至300 ℃时，$(BH)_{max}$会低于高磁能积Sm_2Co_{17}磁体。

3.2 研究过程

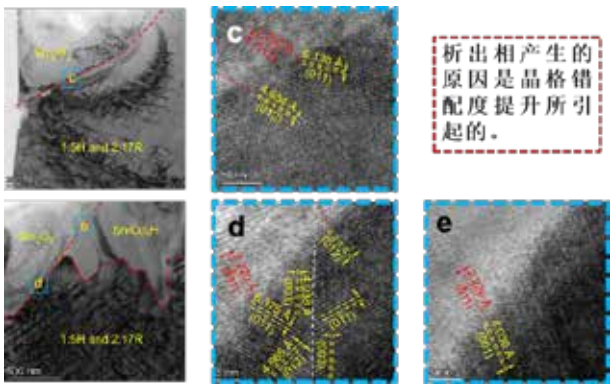




基体相元素分布有明显差异，掺杂后的 Cu 含量下降，Fe 含量呈相反趋势。

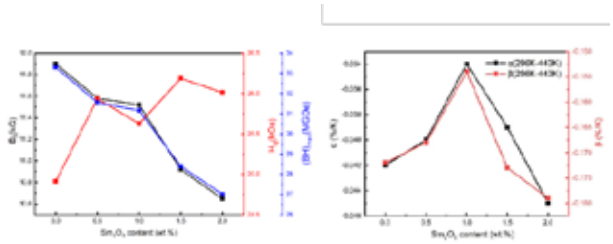


主要原因是 Sm_2O_3 相附近出现富 Cu、Zr 的析出相



析出相产生的原因是晶格错配度提升所引起的。

3.3 结论与成果



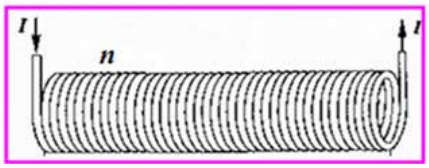
B_r (kG)	H_{cj} (kOe)	$(BH)_{max}$ (MGOe)
11.5	25.6	31.2

α=-0.034 %/℃　　β=-0.154 %/℃

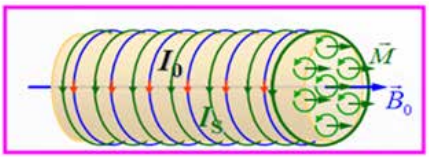
磁性材料安徽省工程技术研究中心安徽大学成果介绍

刘先松，阚绪材，冯双久，吕庆荣，杨玉杰，陈学刚

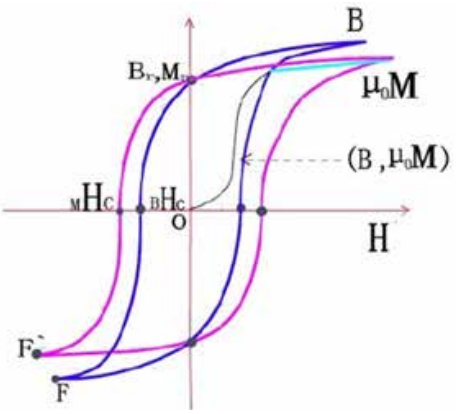
一、引言

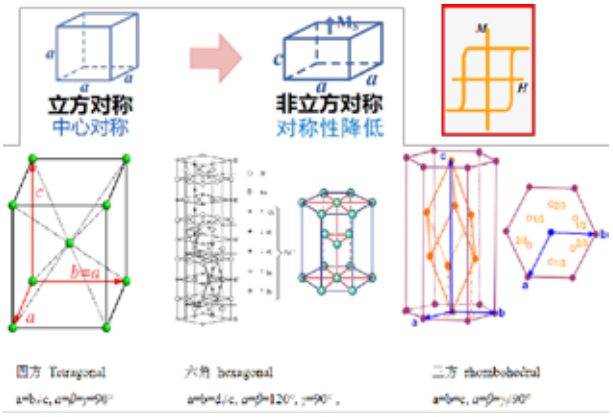


$$H = nI \qquad \vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$$

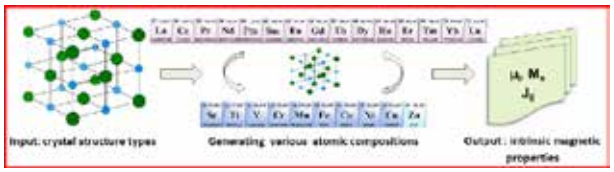


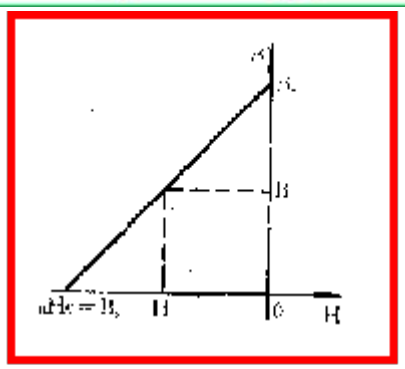
$$\vec{\mathbf{B}} = \mu_0(\vec{\mathbf{H}} + \vec{\mathbf{M}}) = \mu_0\vec{\mathbf{H}} + \mu_0\vec{\mathbf{M}}$$



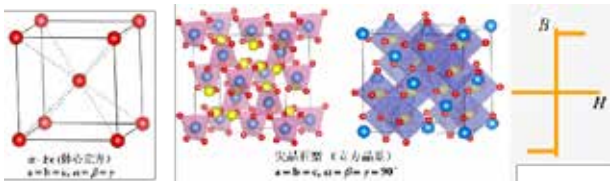


$$F_k = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 + \cdots\cdots$$





$$Br = \sigma_s \cdot \rho \cdot f = Ms \cdot f$$
$$H_{cj} = (K_1/Ms) \cdot fc$$
$$(BH)max = W_{max} = 1/2(B_dH_d)_{max} = 1/2(Br/\mu_0) \cdot 1/2Br = 1/4 \cdot Br^2/(\mu_0)$$



$$F_k = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 + \cdots\cdots$$

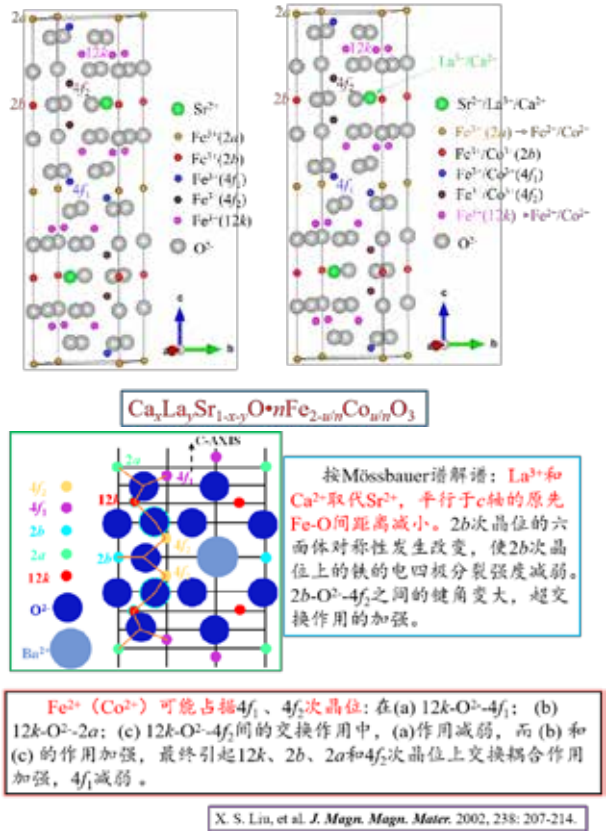
$$B = \mu_0(H + M)$$
$$B = \mu_0(H + \chi \cdot H) = \left(1 + \frac{M}{H}\right)\mu_0 H$$
$$B = \mu_0\mu_i H$$

$$\mu_i \propto \frac{1}{K_1}$$

◎电磁耦合磁集成器件应用

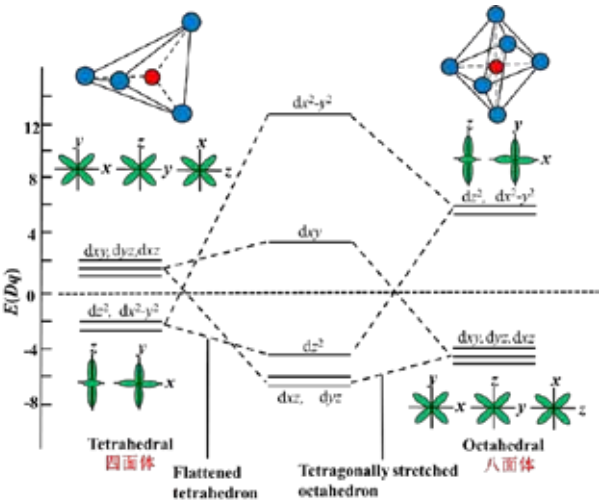
二、稀土永磁材料

2.1 稀土永磁铁氧体

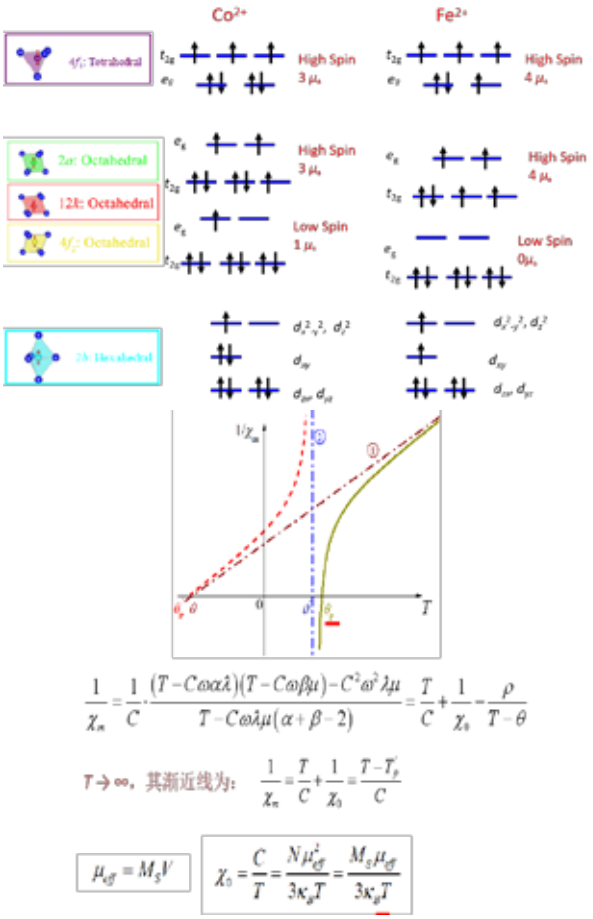


X. S. Liu, et al. *J. Magn. Magn. Mater.* 2002, 238: 207-214.

在不同晶场作用下，电子的轨道能级具有不同的能量

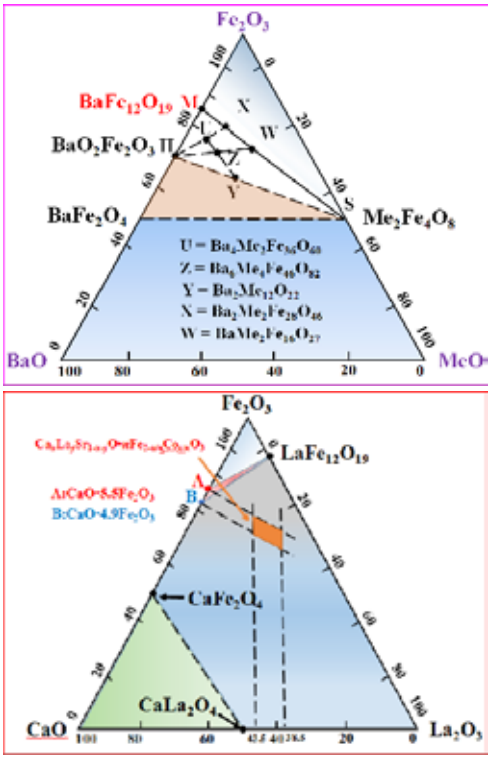


自由离子，五个d能级简并，在晶体场作用下，能级分裂，简并部分或全部消除。而分裂情况与晶体场类型有关。晶场畸变会进一步导致3d电子自旋状态的变化出现Jahn–Teller效应。



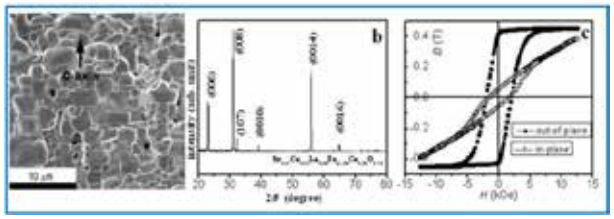
六角晶结构SrO–MeO–Fe_2O_3三元相图为基础，构建多元复杂体系的La_2O_3(SrO)–CaO–

$Fe_2O_3(Co_2O_3)$ 单轴各向异性

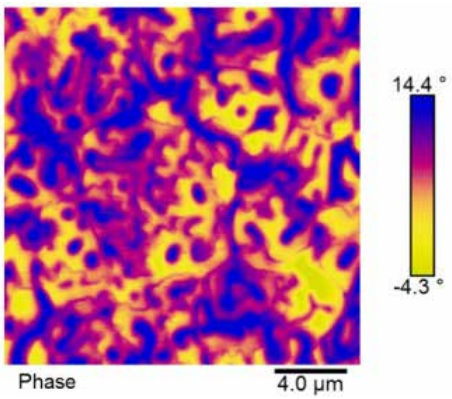


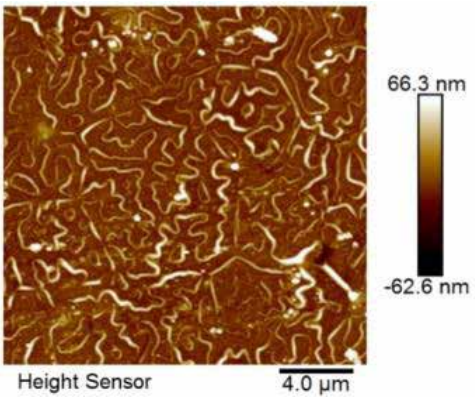
1.Liu X. S. et al. Adv. Mater. Res. 2014, 1058:107–112
2.Yang Y. J. Liu X. S. et al. IEEE Trans. Magn. 2014,50: 22001606
3.Huang X. Liu X. S. et al. J. Magn. Magn. Mater. 2015, 378: 424–428
4.Zhang C. Liu X. S. et al. Appl. Phys. A, 2017, 132: 526–5
5.Liu C. C. Liu X. S. et al. J. Magn. Magn. Mater. 2018, 445:1–5
6.Liu C. C. Kan X. C. Liu X. S. et al. J. Alloys Compd. 2019,803 :1090–1099
7.Liu C. C. Kan X. C. Liu X. S. et al. J. Magn. Magn. Mater. 2020, 494:165821

织构化重构单畴 R1–x–yCaxLayO·nFe2–zCoz/nO3 稀土磁体的磁结构



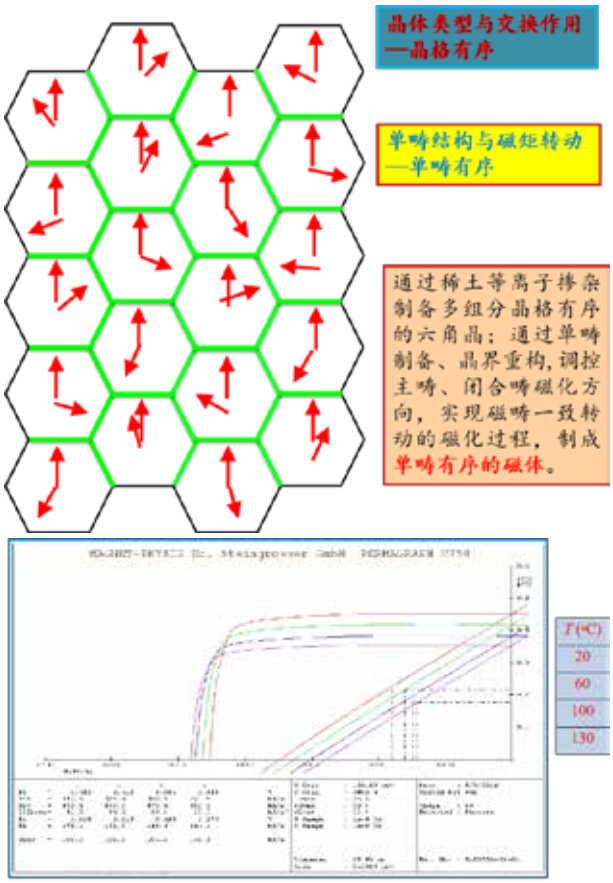
磁场取向生长的 $Ca_xLa_ySr_{1-x-y}O{\bullet}nFe_{2-u/n}Co_{u/n}O_3$ 永磁体的 TEM，XRD 和 B–H 曲线





高内禀矫顽力的稀土永磁铁氧体材料及器件

铁氧体沿 c 轴取向磁体 MFM



$Ca_xLa_ySr_{1-x-y}O{\bullet}nFe_{2-u/n}Co_{u/n}O_3$磁性能与内禀矫顽力温度系数

◎发明新型 M 型稀土永磁铁氧体的新材料

制备磁畴一致转动低温度系数 M 型稀土永磁铁氧体的新材料，支持了我国企业科技创新，保护了 50 多亿的国际市场。在该系列材料方面打破了日本的技术垄断，使我国稀土永磁铁氧体从跟跑转变为并跑。

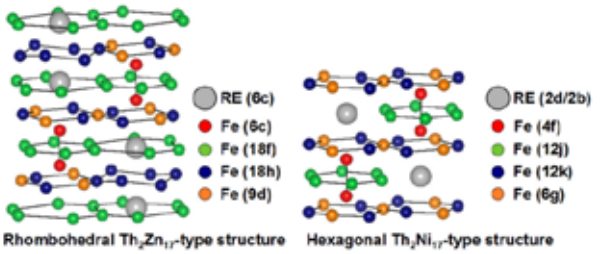
200910251673.3: $R_{1-x-y}Ca_xLa_yO \cdot nFe_{2-z/n}Co_{z/n}O_3$

Hitachi Metals, Ltd., Date of Patent : Nov. 23, 2010,
US 7837893 : $Ca_{1-x-y}R_xBa_yFe_{2n-z}Co_z$

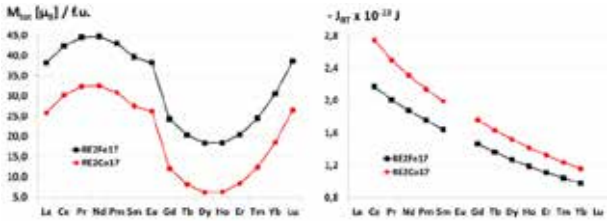
NeoMax Co., Ltd., Date of Patent: Mar. 15, 2011,
US 7906036: $A_{1-x-y+a}Ca_{x+b}R_{y+c}Fe_{2n-z}Co_{z+a}O_{19}$

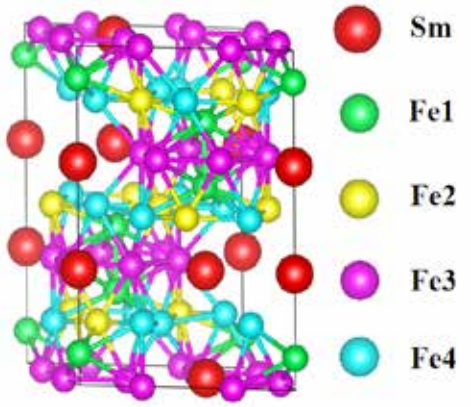
TDK Corporation, Date of Patent: Apr. 5, 2011,
US 7919007: $La_xCa_m\alpha_{1-x-m}(Fe_{12-y}Co_{y)z}$

2.2 三方钐铁氮

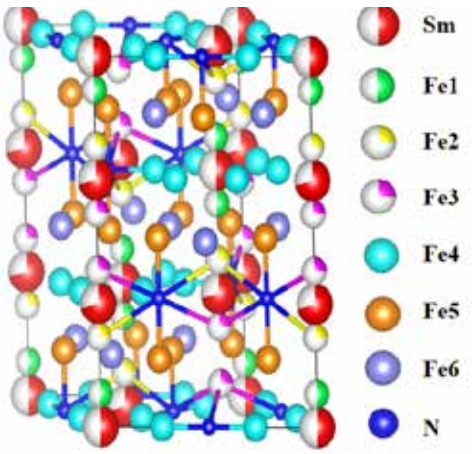


Rhombohedral Th_2Zn_{17}-type structure　　Hexagonal Th_2Ni_{17}-type structure

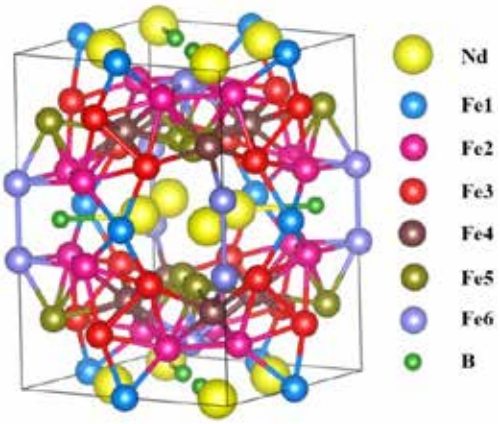




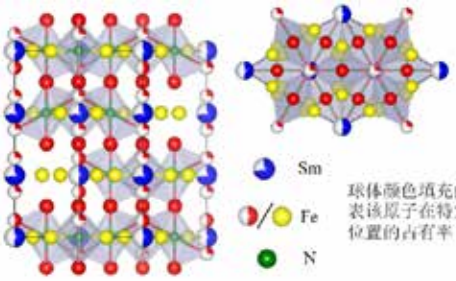
Sm_2Fe_{17} (rhombohedral), $K_1 = -0.8\times10^6$J/m³
a = b = 8.558Å, c = 12.441Å, $\alpha=\beta=90°$ $\gamma=120°$



$Sm_2Fe_{17}N_3$ (rhombohedral), $K_1 = 5.9\times10^6$J/m³
a = b = 8.728Å, c = 12.674Å, $\alpha=\beta=90°$ $\gamma=120°$

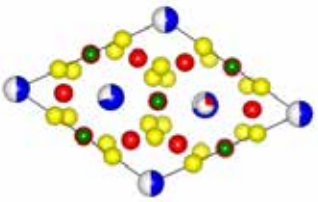


钕铁硼（四方晶系）$K_1 = 4.265\times10^6$J/m³
a = b = 8.805Å, c = 12.206Å, $\alpha=\beta=\gamma=90°$

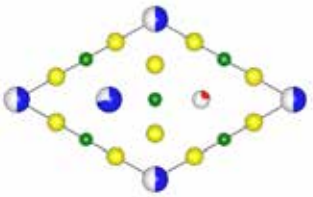


球体颜色填充的多少代表该原子在特定Wyckoff位置的占有率

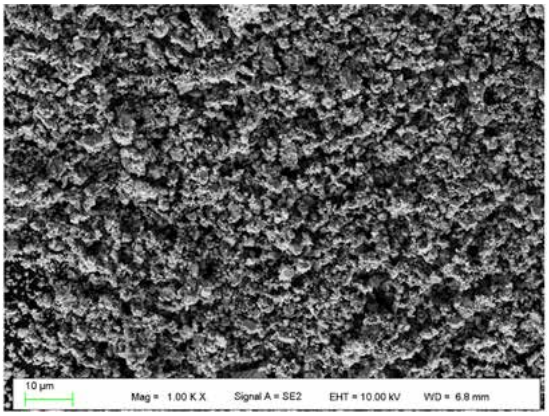
a = b = 8.728 Å　$\alpha=\beta=90°$　$K_1 = 5.9\times10^6$ J/m³
c = 12.674 Å　$\gamma=120°$

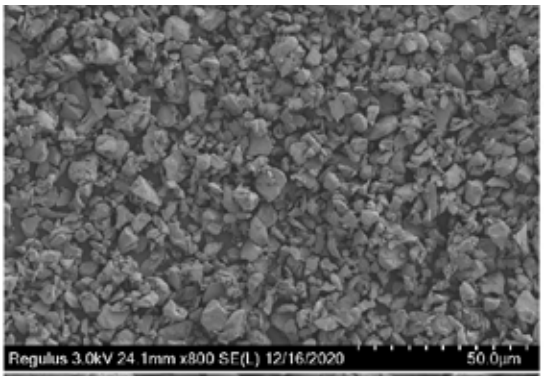


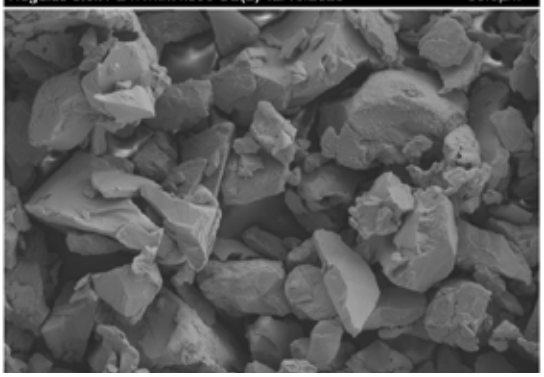
c轴方向完整的晶体结构图

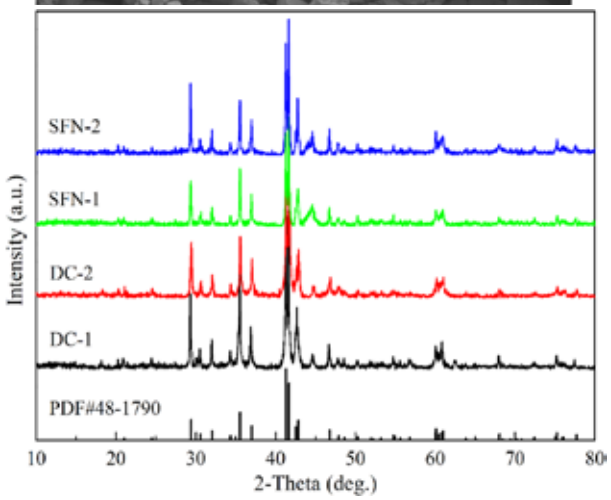


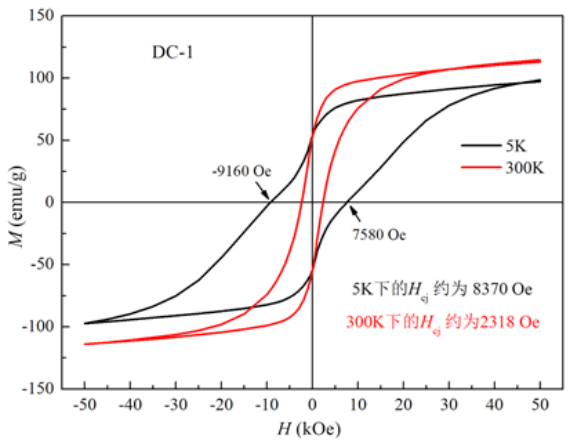
c轴方向上的单层晶体结构图

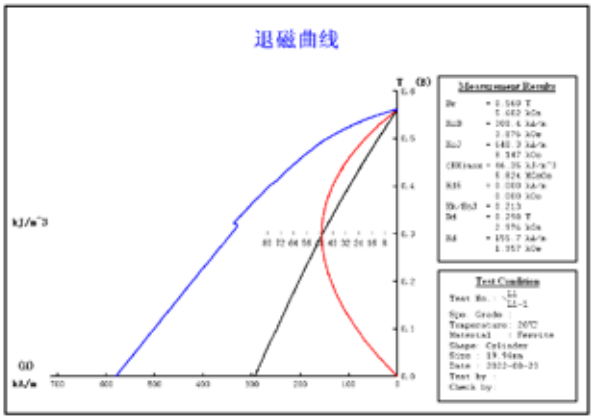




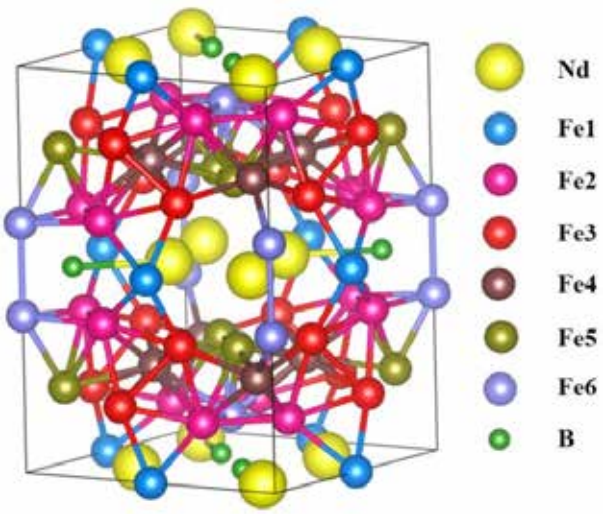




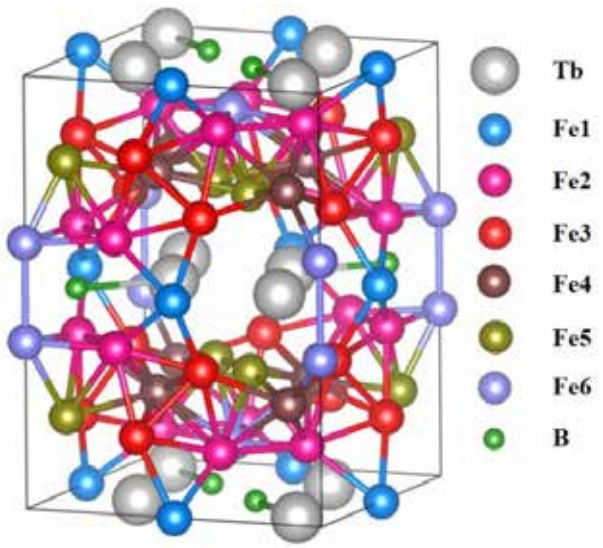




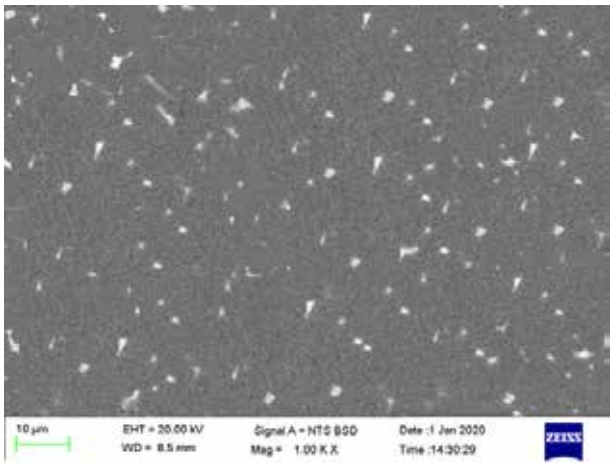
2.3晶界扩散钕铁硼磁体

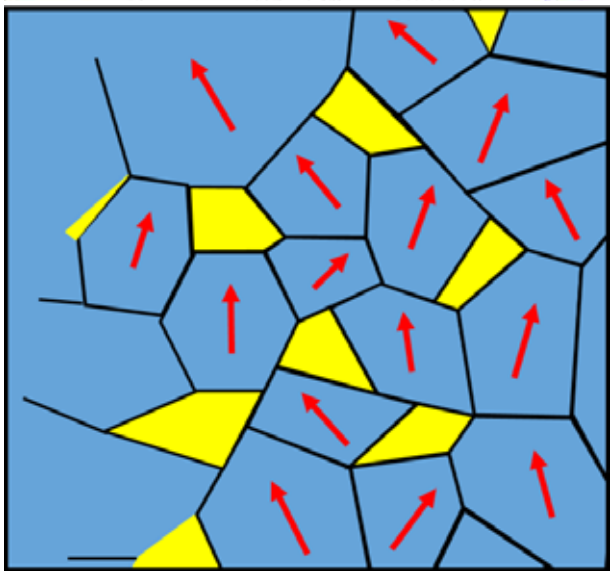


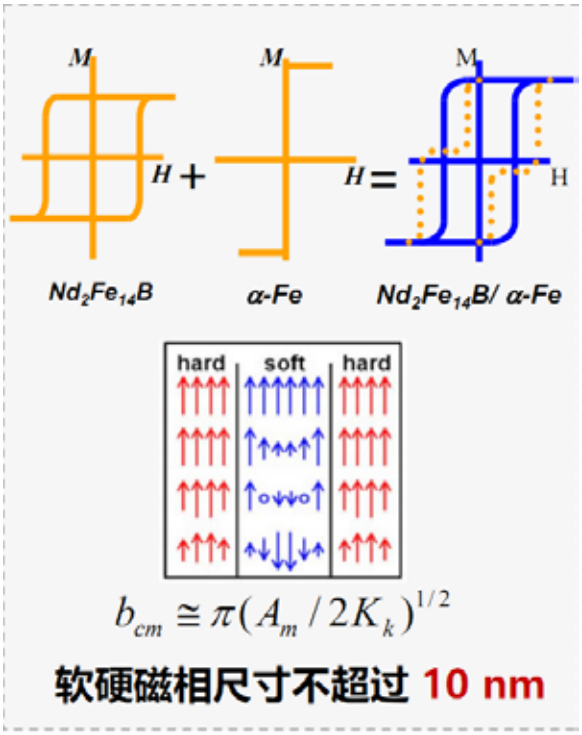
钕铁硼（四方晶系）$K_1=4.265\times10^6$J/m³
a = b = 8.805Å, c = 12.206Å，$\alpha=\beta=\gamma=90°$

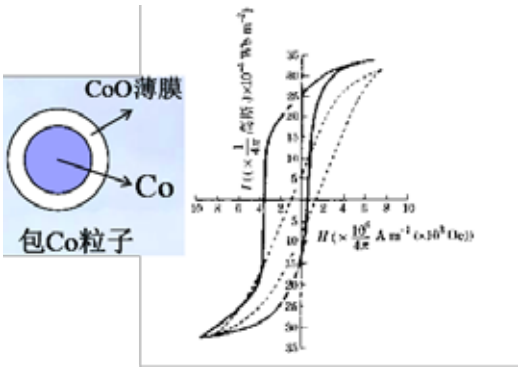


铽铁硼（四方晶系）$K_1=6.165\times10^6$J/m³
a = b = 8.758Å, c = 12.013Å，$\alpha=\beta=\gamma=90°$





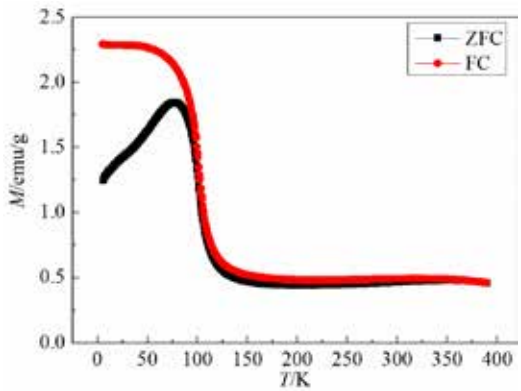


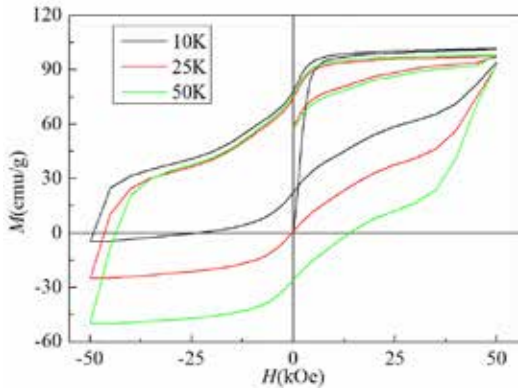


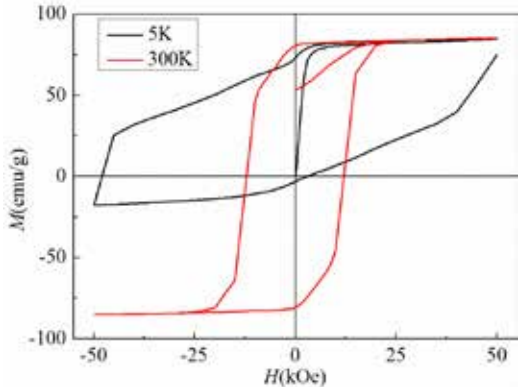
在 77K 温度下，轻微氧化的 Co 粉的磁滞回线

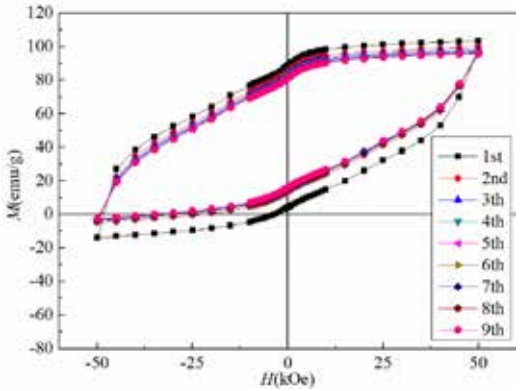
实线：磁场中冷却

虚线：无外场下冷却



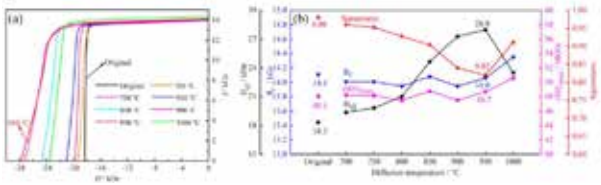




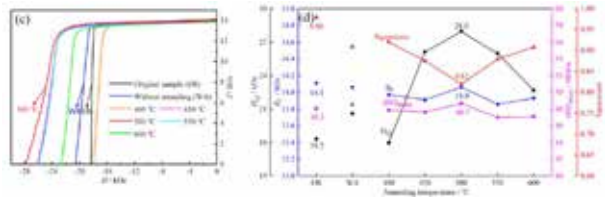


2.3.1 扩散温度和退火温度对磁控溅射镀 Tb 磁体的影响

Nd–Fe–B 磁体：$(PrNd)_{27.67}M_{71.36}B_{bal}$ (M=Fe, Al, Co, Cu, Ga, Dy, Tb, 0.64 wt%Tb)。将磁体样品切割成 8×8×7(c 轴)mm^3，置于靶材为 Tb（纯度 > 99.9%）的磁控溅射设备内，两侧依次溅射时间 25min；溅射后的样品分别在 700–1000℃扩散处理 8h，然后在氩气气氛下 400–600℃退火处理 3h。



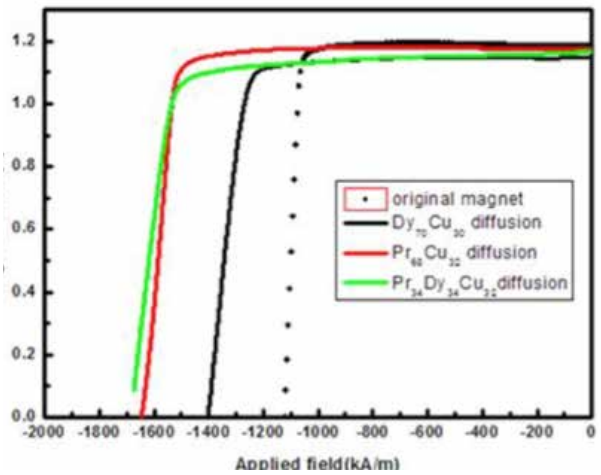
在不同温度下扩散 8h 和 500℃退火 3h 的性能变化。当扩散温度为 900℃时，磁体矫顽力由 18.3kOe 增加到 28.0kOe，剩磁略有下降，从 14.1kGs 降低到 14.0kGs。



950℃扩散 8h，500℃退火 3h 是最佳热处理条件。

2.3.2 $Pr_{68}Cu_{32}$、$Dy_{70}Cu_{30}$ 和 $Pr_{35}Dy_{35}Cu_{30}$ 晶界扩散对烧结钕铁硼的影响

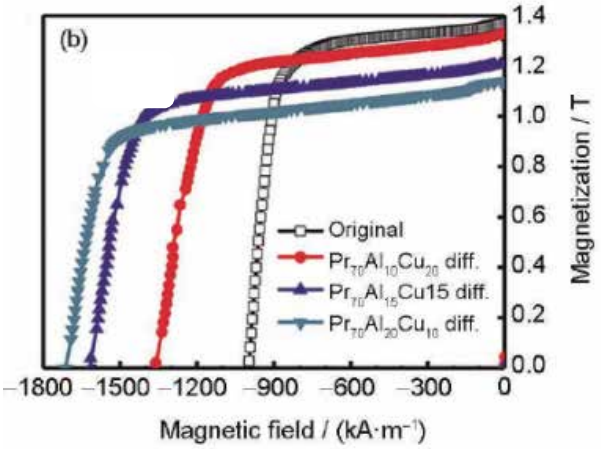
采用 $Pr_{68}Cu_{32}$、$Dy_{70}Cu_{30}$ 和 $Pr_{35}Dy_{35}Cu_{30}$ (at.%)，样品尺寸为 Φ8×5mm^3，上下表面覆盖合金带，在 900℃扩散处理 4 h，然后在 500℃退火 2 h。



$Pr_{68}Cu_{32}$ 合金扩散处理后的矫顽力由 1114.4 kA/m 增加到 1642.8 kA/m，剩磁由 1.19 T 降低到 1.18 T。扩散 $Dy_{70}Cu_{30}$ 合金处理后的磁体矫顽力由原磁体的 1114.4 kA/m 提高到 1402.7 kA/m，剩磁由 1.19 T 降低到 1.15 T。$Pr_{68}Cu_{32}$ 合金对磁体的矫顽力增强作用大于 $Dy_{70}Cu_{30}$ 合金对磁体的矫顽力增强作用。

2.3.3 不同比例 Pr–Al–Cu 合金对烧结钕铁硼磁体的影响

磁体：$Nd_{26.74}Pr_{4.68}Fe_{67.16}Co_{0.72}Mn_{0.17}Al_{0.12}Ga_{0.11}Si_{0.11}Cu_{0.09}Zr_{0.09}B_{bal}$ (wt.%)，切割成 7×7×2 mm 的薄磁体。扩散源为 $Pr_{70}Al_{10}Cu_{20}$，$Pr_{70}Al_{15}Cu_{15}$ 和 $Pr_{70}Al_{20}Cu_{10}$ (at%)（用 Al 替代 $Pr_{70}Cu_{30}$ 合金中的 Cu），在垂直于易轴 (c 面) 的上下表面覆盖扩散合金薄片，然后分别进行 800℃ ×2 h 和 500℃ × 3 h 的扩散热处理。

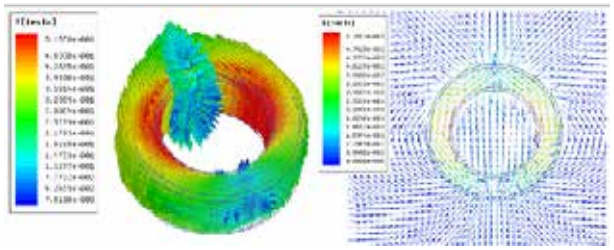


$Pr_{70}Al_{10}Cu_{20}$，$Pr_{70}Al_{15}Cu_{15}$ 和 $Pr_{70}Al_{20}Cu_{10}$ 扩散磁体的矫顽力分别由原始磁体的 1000 kA/m 提高到

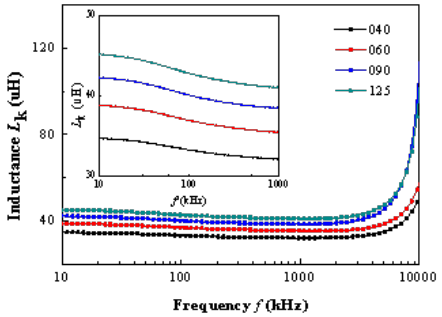
1360 kA/m、1615 kA/m 和 1714 kA/m，同时剩磁 Br 由 1.36 T 分别降至 1.33 T、1.20 T 和 1.14 T。

三、软磁合金与电磁耦合器件

3.1 电磁集成器件



大功率高频高压变压器/电感磁集成漏磁通仿真图

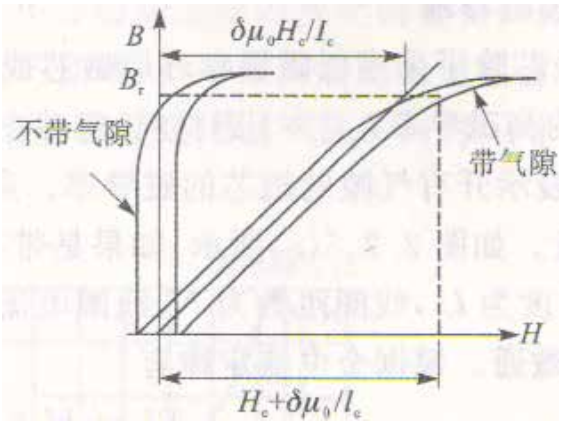


感应磁通 Φ 与初、次级间的漏磁通 Φk 相互垂直隔离，解决高频高压 (34kV) 直流变压器高损耗、温升快的技术难题。

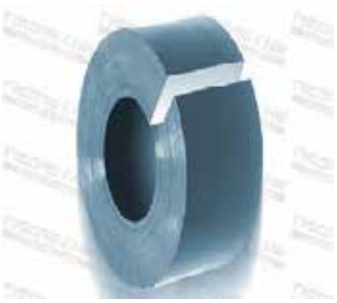
	技术目标	样机数据
变压器额定容量	120kW（3kHz）	121.14kW
电感	80uH ± 10%@200A	84.2uH
总额定效率	99%	99.48%

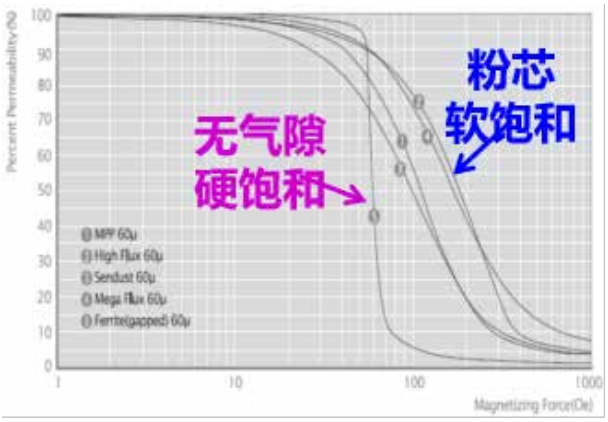
磁饱和 – 加集中式气隙 – 提高 Hs– 可绕更多匝数或提高饱和电流

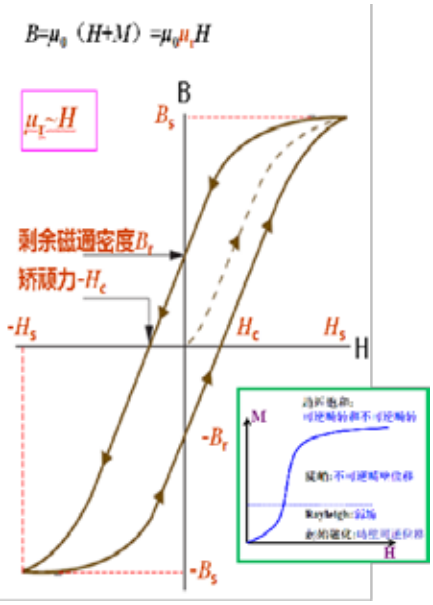
无气隙磁路



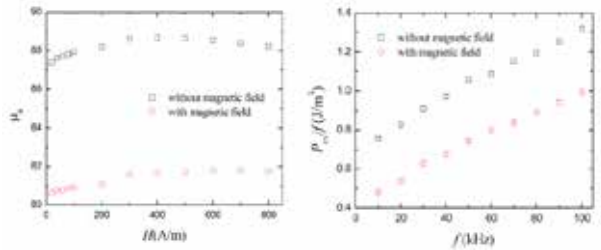
开气隙磁路







通过在对 FeSiAl 软磁粉芯施加横向磁场的方法，研究了外下偏置场对材料磁损耗特性的影响。实验发现对 FeSiAl 软磁粉芯施加横向偏置场后，材料的磁滞损耗下降了 30% 左右，同时伴磁导率下降了 10%，而涡流损耗基本上不受横向磁场的影响。产生这种结果的原因可能是横向偏置磁场使得 FeSiAl 软磁粉芯在外场方向上达到了磁化饱和，该方向的磁畴壁位移和磁矩翻转被完全钉扎，对磁滞损耗和磁导率完全没有贡献，从而使磁滞损耗降低 1/3 左右。该成果发表在 Applied Physics Letters, 117 (2020) 122402.



加横向偏置磁场前后 FeSiAl 粉芯磁导率与磁损耗的变化。

专利号：202110046166.7，

一种高磁导率、低损耗的复合材料及其制备方法

四、小结

（一）工作总结

1. 项目完成情况概述

(1) 完成了新型高饱和磁通窄带材纳米晶合金的制备，获得最窄宽度 15mm、卷绕外径达 300mm 及以上的非晶合金带材。通过增加横磁场热处理，获得高饱和磁通密度 B_s 又具有较低损耗 P_{loss} 的纳米晶磁芯。

(2) 研究了磁粉的成分和形貌对磁粉芯磁性的影响规律，并通过增塑剂、分散剂及粘结剂，研发出的磁导率高、可塑性强的磁屏蔽材料。

(3) 借助电磁仿真，设计阵列式窄带纳米晶磁芯与 UU 型各向同性铁氧体磁芯电磁耦合磁路，并采用多股利兹线并联绕制，使感应磁通与初、次级间的漏磁通 Φ_k 相互垂直隔离，解决高频高压直流变压器高损耗、温升快的技术难题。

(4) 通过工装治具、工艺流程、过程失效模式的研究，确定了高频高压直流变压器 / 电感磁集成产品最佳的生产路线，实现了项目产业化目标。

2、合同指标完成情况对照表

考核内容	考核指标	完成指标	完成情况
产品性能指标	纳米晶磁芯损耗：Pcore<30W/kg @ 500mT，20kHz	Pcore=12W/kg @ 500mT，20kHz	超额完成
	交流原理变容量：120kW（3kHz）	121.14kW	
	电感 L=60uH+10%@200A	84.2uH	
	总能效效率 η≥99%	99.48%	
产业化目标	项目期累计实现销售 3000 万元	项目累计实现销售 3500 万元	超额完成
	实现利税 1000 万元	实现利税 1000 万元	
专利	申请 6 项，授权发明专利 1 项，实用新型 4 项	申请发明专利 11 项，授权发明专利 1 项，实用新型 5 项	超额完成
新标准	1 项	2 项	超额完成
SCI 论文	发表 SCI 论文 6 篇	发表 SCI 论文 13 篇	超额完成
社会效益	引进高层次人才 1 名	引进高层次人才 1 名	超额完成
	培养骨技人才数 20 名	原博士、预士学位共计 14 人	
	引进创新团队数 2 个	引进创新团队数 2 个	

3. 取得的成果及创新性

(1) 纳米晶材料：研发高饱和磁通密度 B_s 、低损耗 P_{loss} 的纳米晶合金。

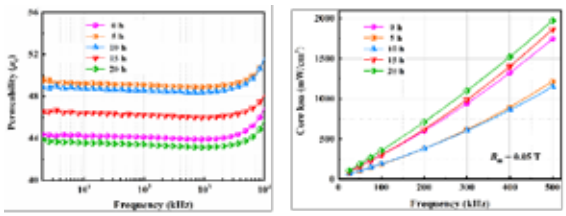
(2) 磁屏蔽材料：磁导率高、可塑性强的磁屏蔽材料。

(3) 新型磁集成器件：构建新型窄带纳米晶阵列式磁芯与铁氧体磁体的电磁耦合器件，解决了高损耗、温升快的技术难题。

(4) 联合机制：安徽大学利用研发平台优势，负责材料材料研究和磁路设计；合肥博微田村电气有限公司利用生产技术、质量管理优势，实现了项目产品的产业化和市场销售。

（二）技术报告

1. 项目背景



（a）　　（b）

◆拟解决的问题

交流配电网　1）采用多线输送，输电容量较小；　2）换流损耗大；　3）新能源：风力发电、光伏发电等是以分布式发电，接入交流配电网受频率、幅值、相位等条件的约束；　4）同步过程复杂；　5）存在电压闪变、频率波动、高次谐波污染等诸多问题。

直流配电网

1）有利于分布式发电接入；

2）提高电能质量和供电可靠性；

3）直流配电网输电容量更大；

4）降低系统的电能损耗；

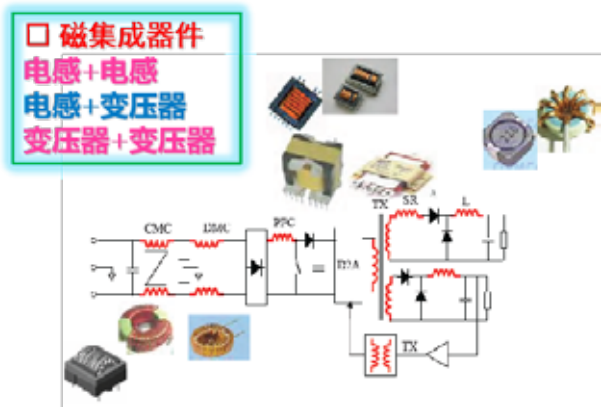
5）直流配电网干扰小。

直流环网示范工程

◆高压直流变压器 / 电感的挑战

1) 高频高压直流变压器 / 电感是直流电压等级变换、双向功率交换、提升效率等的关键装备，存在着棘手技术难题。

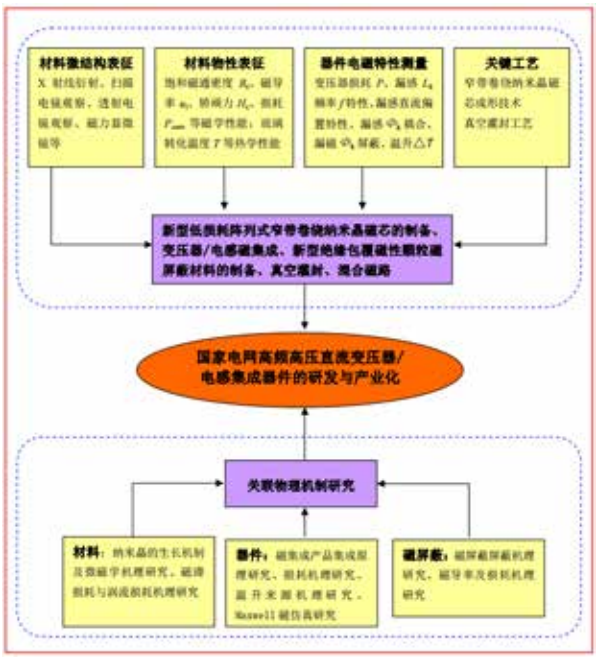
2) 磁元件存在功能单一及数量多、功率密度较低、损耗较大等问题。



1) 实现拓扑电路中的一个直流变压器与两个电感功能集成的新型器件，使高频高压直流配电核心装备尺寸缩小 30% 以上，效率提高到 99% 以上。

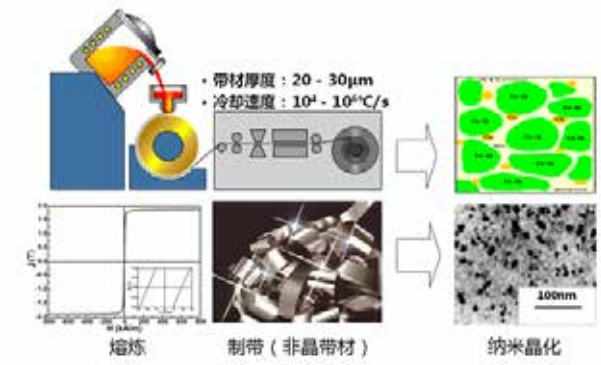
2) 推动国家直流配电技术对传统交流配电网的升级改造、解决能源危机具有重大社会意义及经济效益。

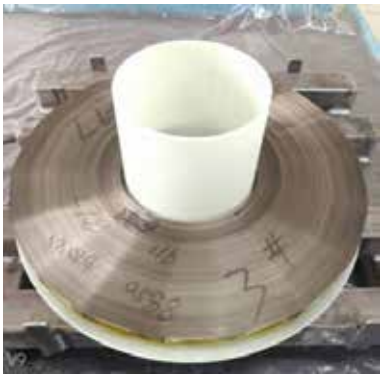
2. 项目技术方案、实现途径



材料研发→技术创新→功能集成→设计与生产

2.1 纳米晶材料



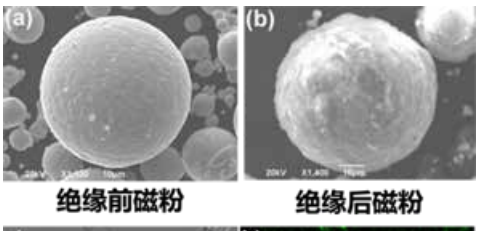


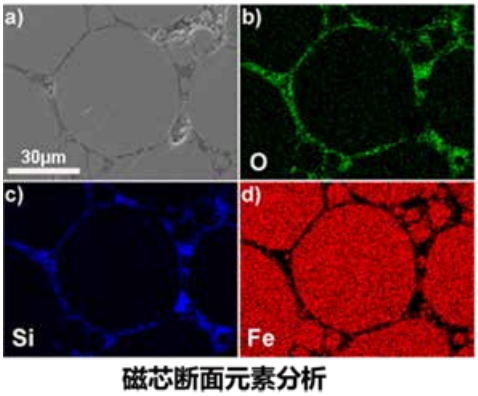
外径实现 360mm、宽度 15mm 的纳米晶带材

国家磁性材料及其制品质量监督检验中心（浙江）检测结果表

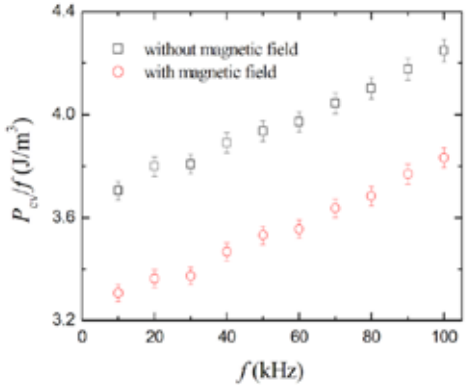
序号	样品编号	检测信息（单位）								检测数据（单位）	
		OD (mm)	ID (mm)	H (mm)	ρ (g/cm³)	T (℃)	f (kHz)	B (mT)	N (Ts)	Pcv (mW/cm³)	Pcm (W/kg)
1	S201103-01-01	25.00	15.00	10.00	6.59	25	20	500	10	80.27	12.18
2	S201103-01-02	25.00	15.00	10.00	6.59					75.27	11.42

2.2 磁屏蔽与损耗



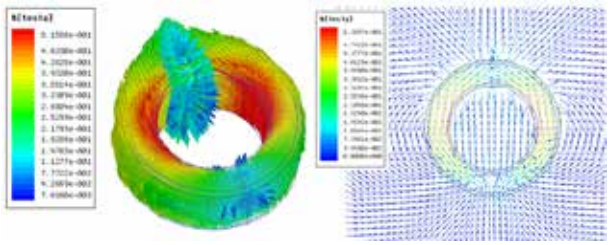


复合粉芯界面元素分布

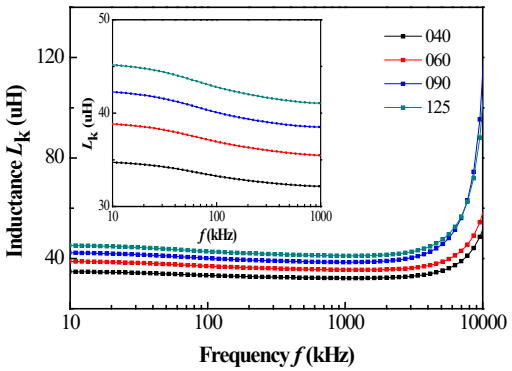


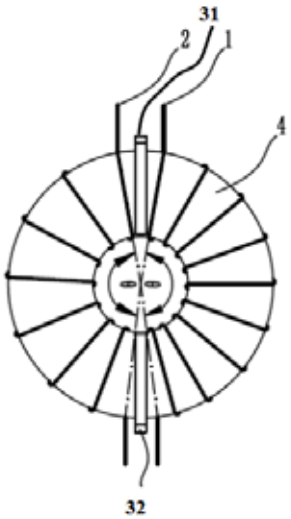
外加磁场与软磁磁芯的损耗频率曲线

2.3 新型电磁耦合设计



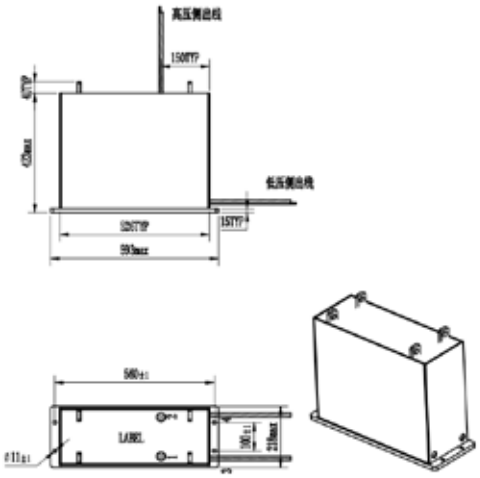
大功率高频高压变压器 / 电感磁集成漏磁通仿真图



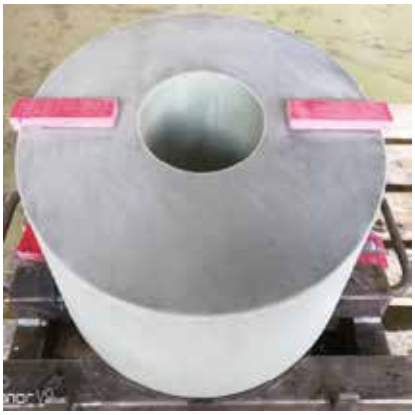


	技术目标	样机数据
变压器额定容量	120kW（3kHz）	121.14kW
电感	80uH ± 10%@200A	84.2uH
总额定效率	99%	99.48%

2.4 磁集成高压直流变压器 / 电感生产



变压器 / 电感设计



硅胶真空负压灌封

大功率高频高压变压器 / 电感安装配置结构

产品实物照

（三）财务情况

安 徽 大 学 文 件

校取〔2017〕29 号

印发《安徽大学财政性科研项目经费管理暂行办法》等 3 个办法的通知

各院、系、教学部，校直机关各部门，各直属、附属单位：

《安徽大学财政性科研项目经费管理暂行办法》《安徽大学会议费管理办法》《安徽大学差旅费管理办法（修订）》等 3 个文件业经 2017 年 7 月 5 日学校校长办公会会议审议通过，现予发布，请遵照执行。

安徽大学

2017 年 8 月 23 日

项目财务情况

截至 2022 年 6 月 10 日，本项目省财政拨款总计 500000 元（含外拨经费 100000 元），财务完成 288751.11 元（安徽大学 188751.11 元；外拨 100000 元），项目结余 211248.89 元。具体情况如下：

一、项目收支情况（安徽大学部分）

1、 购买与项目相关的实验材料费：70460.52 元；

2、 测试材料结构、电镜、磁性能等相关费用：14960 元；

3、 三年来参加磁性材料会议及与企业项目交流产生的差旅费：19594.2 元；

4、 三年来申请专利及文献检索费：10634 元；

5、 三年参加项目的学生劳务费：10000 元；

6、 到南京大学、中国科学技术大学、中科院合肥分院等单位磁学专家咨询项目涉及的激项机制问题数十次，三年来专家咨询费：28252.39 元；

7、 三年来支付参与项目的职工科研绩效为：34850 元；

二、项目收支情况（外拨至合肥博微田村电气有限公司部分）

截至 2022 年 6 月 10 日，安徽大学财务处及科技处已完成对合肥博微田村电气有限公司项目拨款 100000 元。

（四）实施绩效

超额完成合同书规定内容

支撑文件见验收申请材料：

1. 授权发明专利 1 项，实用新型 5 项受理通知 5 项，p.47–57

2. 制定企业新标准 2 项，p.58–83

3. 发表高水平 SCI 论文 13 篇， p.84–110

4. 国家权威部门检测报告， p. 111–114

5. 国内外客户订单， p. 115–142

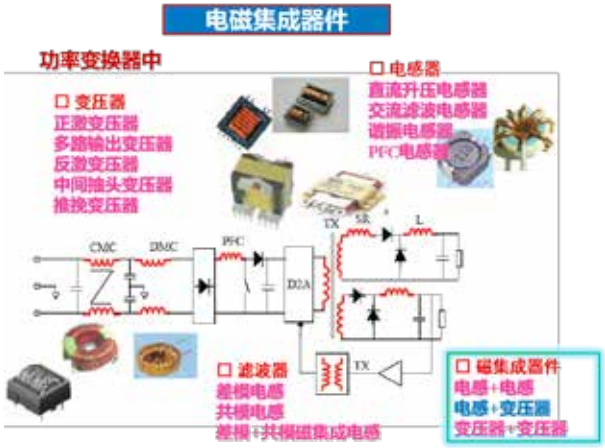
6. 中华人民共和国税收完税证明， p. 143–148

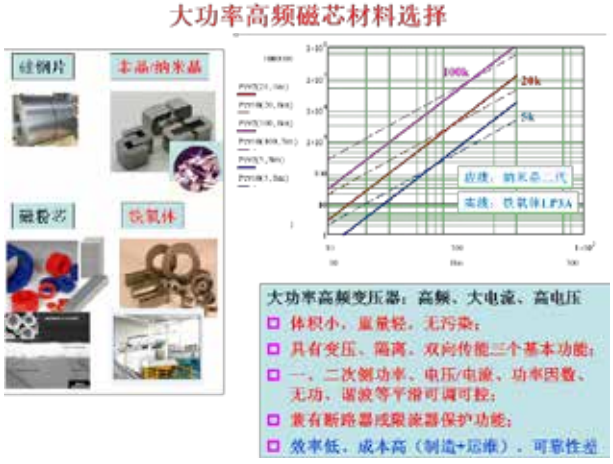
7. 国电南瑞科技股份有限公司南瑞研究院检测报告， p. 149–150

8. 引进引进高层次人才 1 名，创新团队数 2 个，p. 151–169

9. 培养科技人才获博士、硕士学位共计 14 人，p.170–

◆项目实施现场视频





智能应用磁性材料与传感团队介绍

杨　森

西安交通大学　物理学院

一、团队基本情况

◆团队成员情况介绍

杨 森（团队带头人）

西安交通大学物理学院 二级教授 / 博士生导师 西安交通大学钱学森学院　常务副院长 科技部新材料国际合作中心 主任 教育部重点实验室副主任

国家万人计划领军学者

国家优秀青年基金获得者

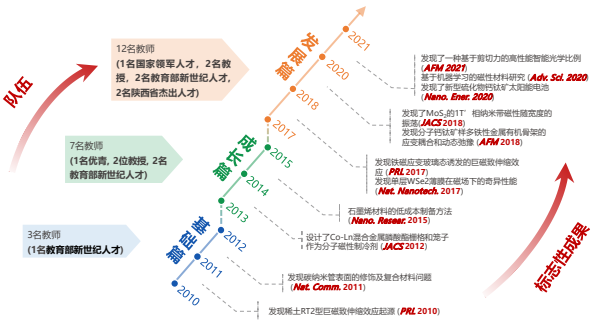
国家自然科学奖获得者

国家教学成果奖获得者

承担《固体物理》《材料与人类文明》和《磁学与磁性材料》的教学工作； 国家教学成果奖二等奖 1 项 (2018) 陕西省教学成果奖特等奖 1 项 (2015) 西安交大教学卓越奖（2019） 王宽诚育才奖（2017）

国家自然科学奖二等奖 1 项 (2016) 教育部自然科学一等奖 2 项 (2014，2003) 陕西省科学技术二等奖 1 项 (2015) 陕西高等学校科学技术一等奖 2 项 (2016，2014) 第十届陕西青年科技奖 (2014)

◆团队建设历程



◆研究团队成员

◆科研基地

▲金属材料强度国家重点实验室

▲科技部新材料国际联合研究中心

▲陕西省先进功能材料及介观物理重点实验室

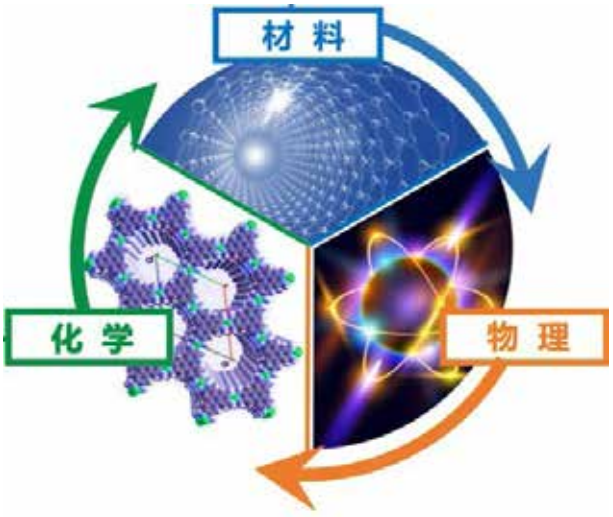
▲材料科学与工程　国家一流学科

◆国际合格

二、研究方向

◆研究领域

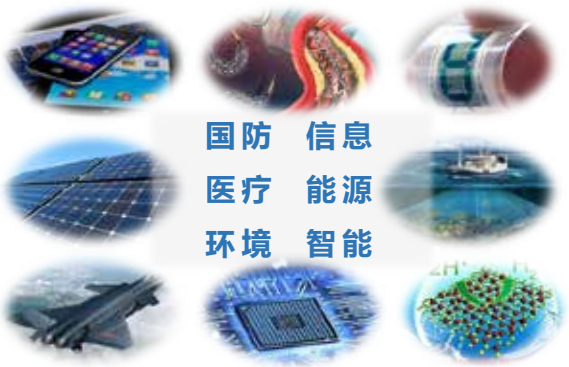
聚焦前沿 · 引领创新 · 国际视野 · 交叉融合



面向世界科技前沿

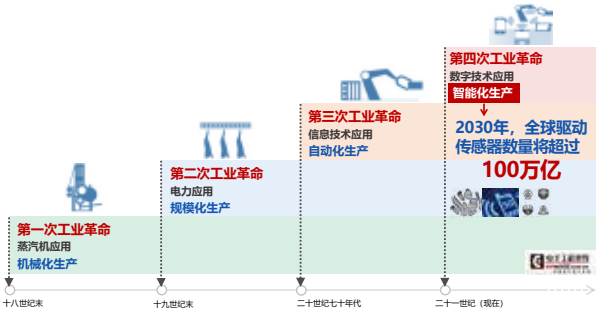
面向国家重大需求

面向国民经济主战场



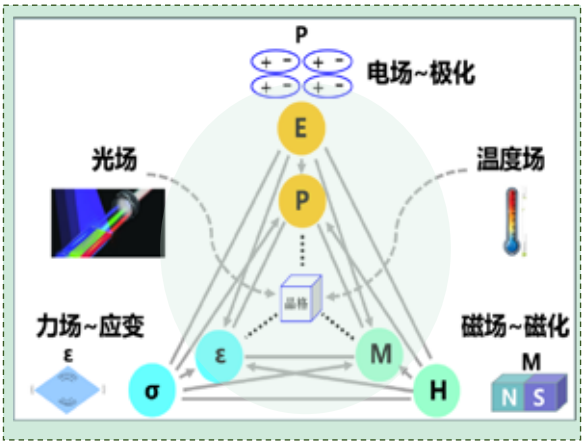
◆研究背景

第四次工业革命（智能制造 – 大数据时代）对精密驱动传感器的需求（大驱动 能力与高精度）空前提升。

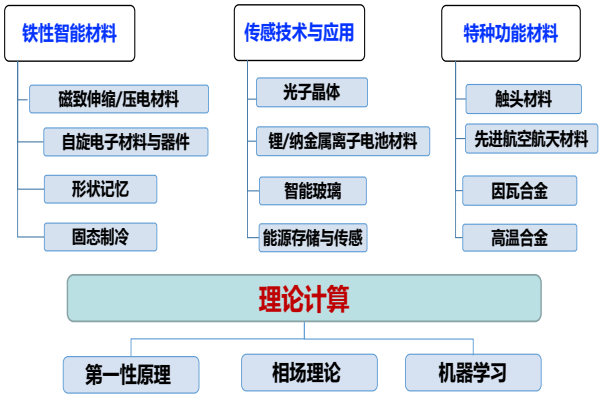


◆研究方向

铁性智能材料：能够感知力、电、磁、热等外场并实现 **驱动传感** 的重要功能材料

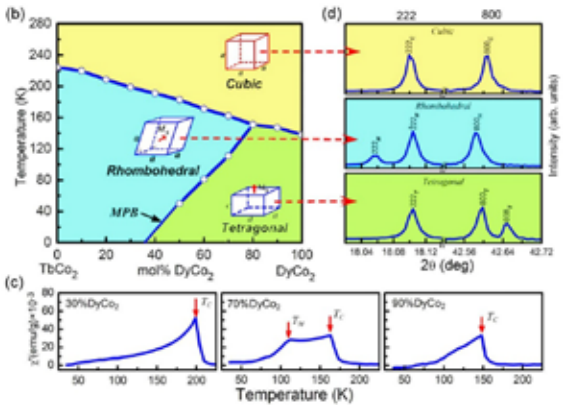


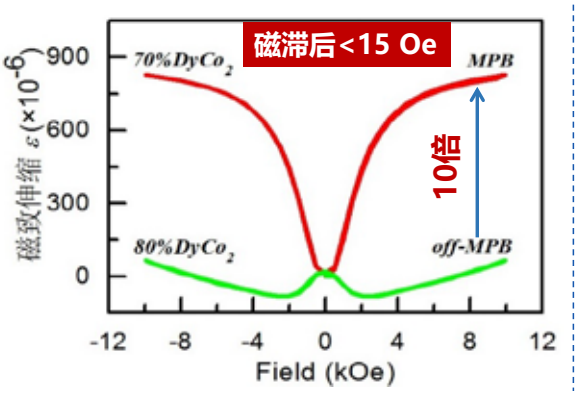
在高技术关键领域应用，彰显着一个国家的**总体科技水平** 和 **现代国防实力**。



◆准同型相界–铁磁

设计与制备出磁性准同型相界 (MPB) 材料，在 MPB 处获得了窄滞后巨磁致伸缩效应，性能提升 10 倍。



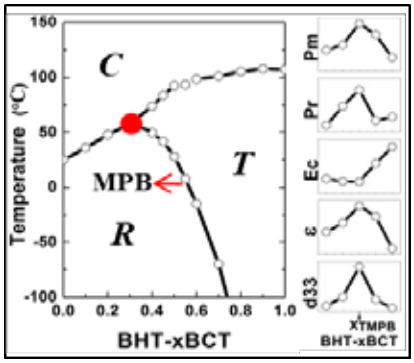


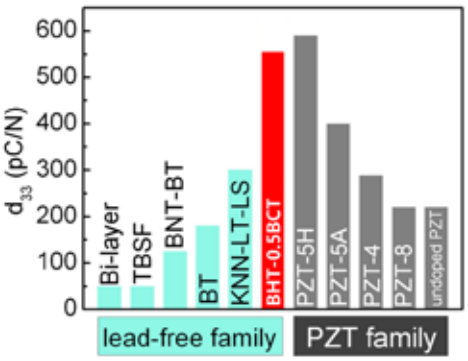
为制造大响应窄滞后的磁致伸缩材料提供了新方法

相关论文：杨森 等 Phys. Rev. Lett. (2010) (代表作 1); 杨森、任晓兵等 Phys. Rev. B (2014)

◆准同型相界–铁电

设计与制备出无铅大压电材料 BHT–0.5BCT，压电系数 d33 达到了 550 pC/N，可以媲美性能最优的含铅压电材料(PZT–5H，590 pC/N)。



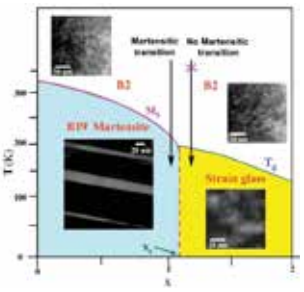


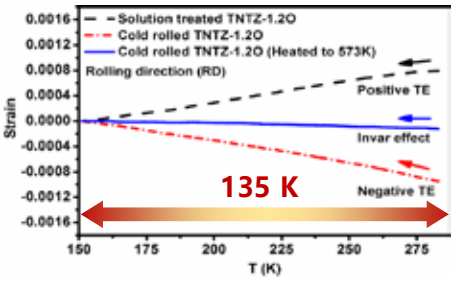
为制造大响应窄滞后的无铅压电材料提供了新思路

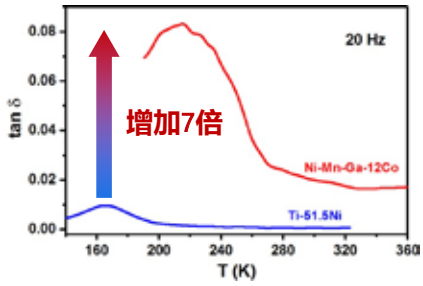
相关论文：杨森 等 Appl. Phys. Lett. (2012) (代表作 4)；张垠、周超、杨森 Appl. Phys. Lett. (2018)

◆应变玻璃–铁弹

基于应变玻璃相变中热 – 结构耦合作用，成功制备出温区宽达 135K（150K~285K）的零膨胀高性能因瓦合金，和阻尼值增大 7 倍的高阻尼合金。





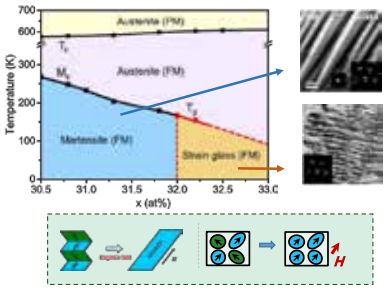


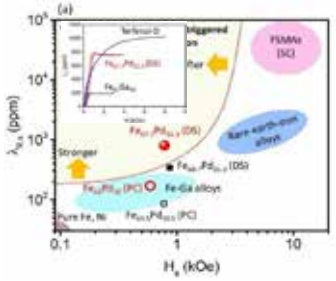
为制备宽温域、高性能金属智能材料提供了新原理

相关论文：王宇、杨森 等 Appl. Phys. Lett. (2012)（代表作 3); 王宇，杨森 等 Appl. Phys. Lett. (2013); Sci. Rept. (2014)

◆应变玻璃–铁磁

成功制备出磁性应变玻璃态，并发现低场触发巨磁致伸缩效应 (800 ppm@0.8 kOe，为目前世界报道最高值）。

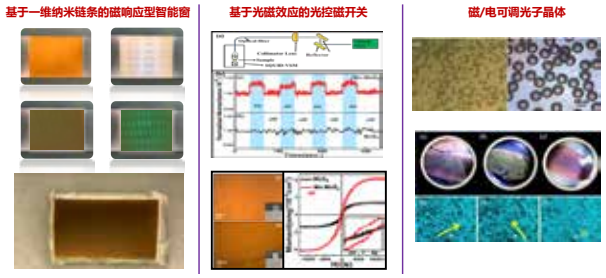




为制备高灵敏磁致伸缩材料提供新原理

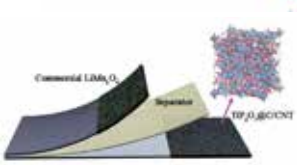
代表论文：PRL (2017, 通讯); Sci. Repts (2014, 通讯 /2015, 通讯); APL (2012, 通讯 /2013, 通讯)

◆纳米传感与技术



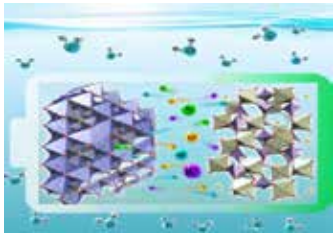
◆锂/钠/金属离子电池

- 安全性能高、环境友好/低毒性
- 低成本，易于组装
- 低粘度系数，高电导率

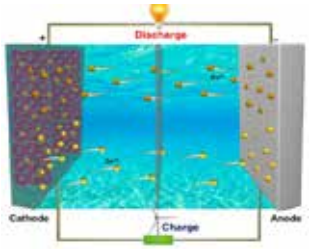


离子类型：

Li^+、Na^+、Zn^{2+}



水系锂/钠离子电池



水系锌离子电池

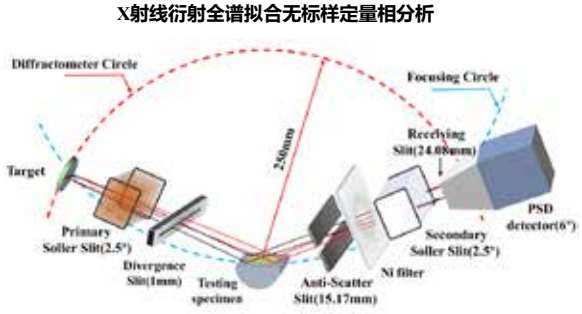
◆轻质先进航空航天材料

主要研究方向

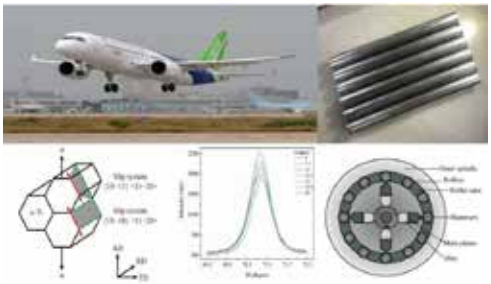
1、航空领域先进钛合金材料的结构分析和性能改善

2、钛合金管材、板材织构和残余应力的测试与分析

3、石油天然气管线材料可靠性研究

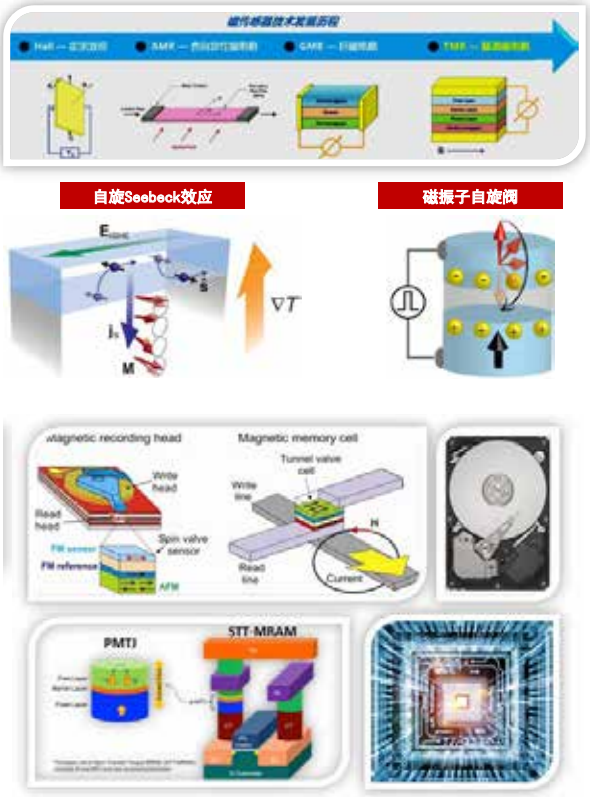


轻质航空航天用钛合金管材、旋锻加工



◆自旋电子材料与器件

应用：磁换能器、磁传感器、磁电子器件、硬盘磁头

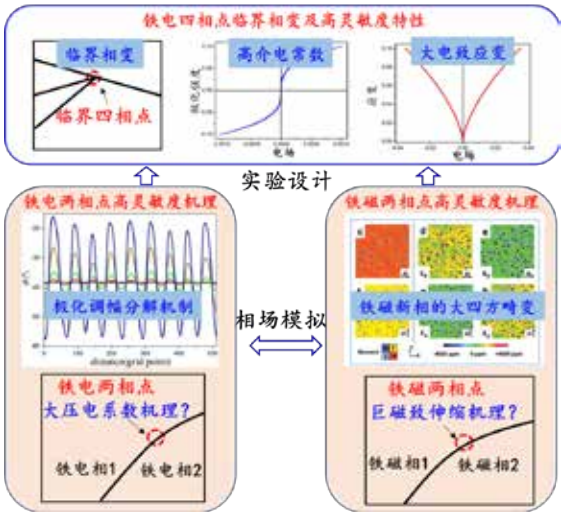


◆理论计算

1. 通过相场理论模拟的方法，揭示铁电准同型相界材料呈现高灵敏度压电响应与极化调幅分解新 电畴翻转机制有关。

2. 通过相场理论模拟的方法，揭示稀土掺杂 Fe– Ga 磁性合金呈现高磁致伸缩灵敏度的物理机制与 稀土元素进入纳米异质相产生大四方畸变有关。

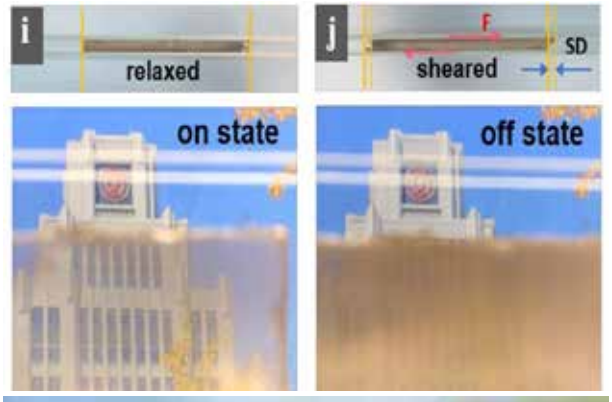
3. 在相场理论模拟的基础上，进一步设计高灵敏 度铁性智能材料，通过实验在铁电四相点获得高 介电常数、大电致应变铁电材料。

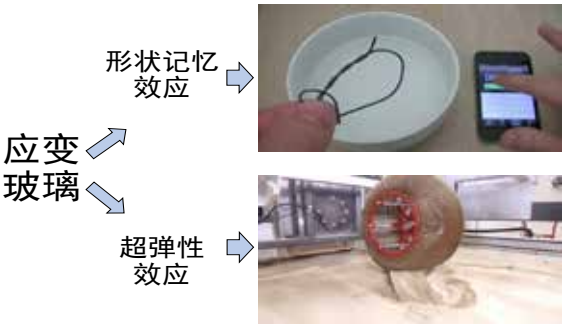


三、研究成果与荣誉

◆部分研究成果展示

基于对磁性纳米链的调控设计制备的智能窗





◆团队研究成果

自 2010 年以来取得如下主要成果：

类别	名称（第一 / 通讯）	数量
近 10 年共发表论文超过 160 余篇（其中影响因子大于 10 的 35 篇）	Nature 子刊 (Nature Nanotechnology, Nature Communications)	3
	Physical Review Letters	5
	Journal of American Chemical Society	2
	Advanced Materials / Advanced Functional Materials	1/2
	Advanced Science/Nano Energy	1/2
	JMCA/JMCC	3/4
主持和参与科研项目	国家重大重点项目（科技部重点专项，基金重点，载人航天）	33
	国家自然科学基金面上及青年项目	15
专利	授权国家发明专利	13
人才培养	国家领军学者 1+ 优青 1+ 新世纪 2+ 陕西省青年杰出人才 2	
	已毕业：博士后 3 人，博士研究生 14 人，硕士研究生 36 人	

◆高影响力学术工作

2010 年以来，团队发表被引超过百次的文章 30 篇，包含 19 篇 ESI 高被引文章，其中的代表性工作如下：

作者	期刊	影响因子
杨森 等	Nature Nanotechnology, 2017, 12, 757	37.49
张垠 等	Nature Communations, 2013, 2, 382	14.9
杨森 等	Phys. Rev. Lett., 2010, 104, 197201	9.227
杨森 等	Phys. Rev. Lett., 2017, 119, 125701	9.227
柯小琴 等	Phys. Rev. Lett., 2020，125，12762	9.227
张垠 等	Advanced Materials, 2013, 23, 4318	30.8
卢学刚 等	Advanced Function Materials，2021，2102350	18.808
杨森 等	Advanced Science，2020，7 2000566	16.802
杨森 等	Advanced Energy Materails, 2020, 2001600	29.36
杨森 等	Nano Energy. 2020,85, 105959	17.881
杨森 等	Energy Storage Materials., 2019 19,314	17.8
杨森 等	JACS, 2018,140 (47), 16206–16212	13.455

◆论文引用情况

工作被美国科学院院士、欧洲科学院院士等国际同行引用并高度评价

序号	评论人	所属单位	研究领域
1	ED Billups 教授	美国莱斯大学	美国科学院院士，碳材料领域权威专家
2	M. Wuttig 教授	美国马里兰大学	美国工程院院士，相变材料领域权威学者
3	J.M.D.Coey 教授	爱尔兰圣三一学院	爱尔兰皇家科学院院士，欧洲科学院院士
4	J. F. Scott 教授	英国剑桥大学	英国皇家学会院士、集成铁电学之父
5	沈宝根 教授	中国科学院物理所	中国科学院院士
6	都有为 教授	南京大学	中国科学院院士
7	王云志 教授	美国俄亥俄州立大学	材料领域知名学者，国家千人计划
8	G Hadjipanayis 教授	美国特拉华大学	磁学领域著名学者，美国物理协会主席
9	P. Entel 教授	德国杜伊斯堡 – 埃森大学	铁磁领域国际知名学者
10	G. Eggeler 教授	德国波鸿鲁尔大学	国际马氏体相变会议主席、强度大会主席
11	Shaffer 教授	英国帝国理工学院	国际纳米领域权威学者
12	蒋成保 教授	北京航空航天大学	国家杰青，长江学者

◆出版专著

《中国材料进展》分别于2012、2014、2016年**出版3次专集**，介绍磁性准同型相变和应变玻璃相变的相关成果。

2014年国际物理期刊*Physica Status Solidi (b)*以“Ferroic glass: Magnetic, Polar and Strain Glass”为题**出版专集**，团队的多名成员受邀撰文。

◆承担国家/国际级项目

项目组成员近 5 年主持 / 参与中国“973”计划、自然科学基金等多项科研项目，具有承担国际 / 国家大项目的丰富经验和能力。

项目类型	项目名称	项目状态
科技部重点研发计划	稀土专项 / 高性能磁致伸缩材料	杨森 课题负责人 / 在研
国家自然科学基金 重大研究计划	基于铁磁晶格畴序构调控的高灵敏窄滞后磁致伸缩材料研究	杨森 主持 / 在研
国家优秀青年科学基金	磁学与磁性材料	杨森 主持 / 结题
国家重点基础研究发展计 划（973 计划）	铁性智能材料的高性能化研究	杨森 参与 / 结题
国家自然科学基金	磁性应变玻璃的磁场诱发纳米应变畴转动机制及其功能效应的研究	王宇 主持 / 结题
国家自然科学基金	核壳材料中的光磁交换偏置效应研究	张垠 主持 / 在研

◆国际影响力

2013年国际学术研讨会：在德国杜伊斯堡召开了以“应变玻璃”为主题的专题国际学术研讨会

2014年国际马氏体会议：专门举行了圆桌会议讨论应变玻璃。这是该重要会议历史上首次专门讨论中国学者提出的新概念。

2015年美国TMS年会：专门设立“frustrated ferroic materials”分会场，讨论strain glass等铁性玻璃。

2016年ICFSMA会议：专门设立“strain glass”主题

2017年*Nature Conference*会议：由西安交通大学主办（任晓兵教授任大会主席）、首届铁性材料(包括应变玻璃)国际会议。

◆荣誉奖励

国家自然科学二等奖　1 项 (2016)

教育部自然科学一等奖 2 项 (2014/2003)

陕西省科学技术一等奖 1 项 (2006)

陕西省科学技术二等奖 3 项 (2010/2014/2015)

陕西省教学成果特等奖 1 项 (2015)

◆成果专利

共申请专利 22 项，授权 15 项，已实现转化专利 3 项

▲一种高阻尼形状记忆合金及其制备方法 ZL201410022995.1

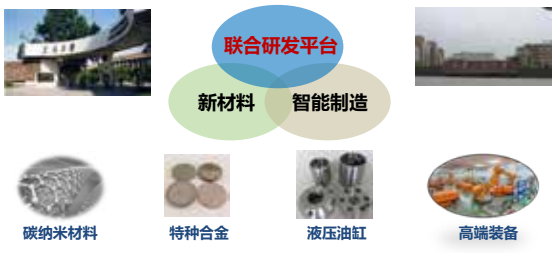
▲一种钙永磁铁氧体材料及其制备方法 ZL200910251673.3

▲多磁极各向异性永磁磁环的制备方法 ZL201210287288.6

四、西交 – 常德研发平台经验与启示

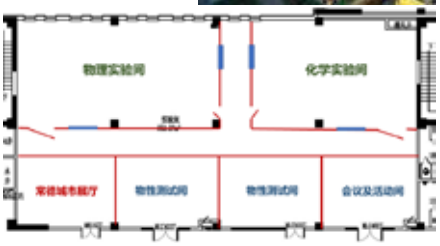
◆西安交大–常德新材料与智能制造联合研究中心

▲西安交大 – 常德新材料与智能制造联合研发平台



中心已与今年7月正式建立，目前已全面运营

“西安交大-常德市新材料与智能制造联合研究中心”签约仪式



◆常德市协同创新研究院

引才、破题、解难

◆企业调研

常德市共有 300 多家规模以上装备制造产业企业。

日期	地点	企业名称
2021.08.25	常德市高新	特力液压，瑞齐隆，沃晟
		凯，蓝天智能，常德水表
		佳鸿机械，湘沅实业，塘
		桥科技，迪格机械，长岭
		机械
2021.08.26	区	正大国际，斯盛新能源，
		旭昱新能源，百特随车，
		中凯机械，国力变压，响
		箭重工，天晟源，武陵机
		械
2021.08.27	桃源县	飞沃新能源，昱升科技，三特机械，三合新能源
2021.08.30	石门县	富博智能，湖南诚跃新能源，航天磁电，成功高分 子
2021.08.31	常德经开区	中联重科液压，天马电器

◆领导考察

近期，常德市委副书记、市长邹文辉与 科技局、高新区相关领导多次到访协同 研究中心听取工作情况汇报，肯定了我 们在建设运营方面取得的成绩。

特别地，肯定了西安交通大学 – 常德协同创新研究院关于合作建设热处理检验检测中心、 新材料研究中心、液压研究中心相关事宜及 热处理工程师能力培训方案

面向生物工程应用的微型磁性机器工作团队介绍

胡星浩

西北工业大学材料学院

◆研究团队

负责人：刘维民（中国科学院院士）

先进润滑与密封材料研究中心

教授11人

研究员1人

副教授15人

磁功能材料研究团队

微型磁性机器制备、操控及应用

胡星浩（教授）

磁纳米材料合成

杨勇（教授）

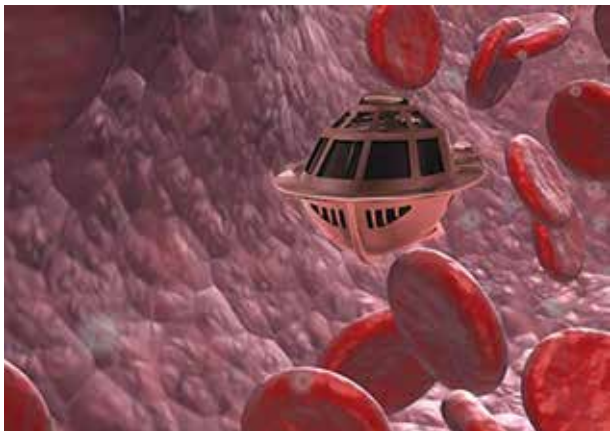
强磁场下材料组织结构调控

贺一轩（副教授）

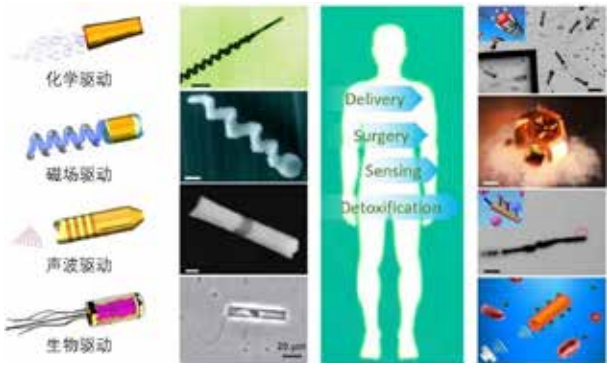
◆电影神奇之旅

1966 年科幻电影《神奇之旅》Fantastic Voyage

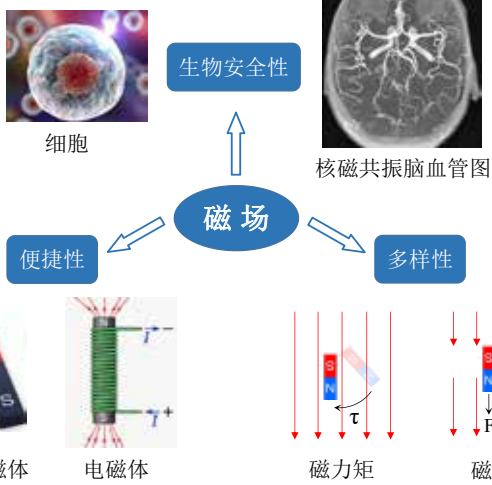
一个小型化的医疗团队被缩小到细胞尺寸，进入科 学家的血液中，以清除其大脑中的血块。



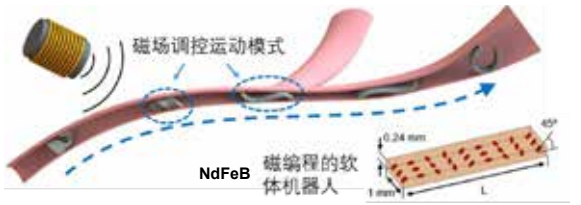
◆微纳米医疗机器人主要分类



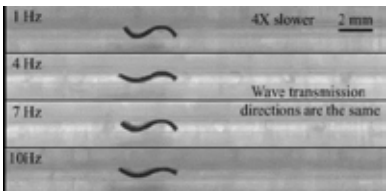
◆磁驱动特点



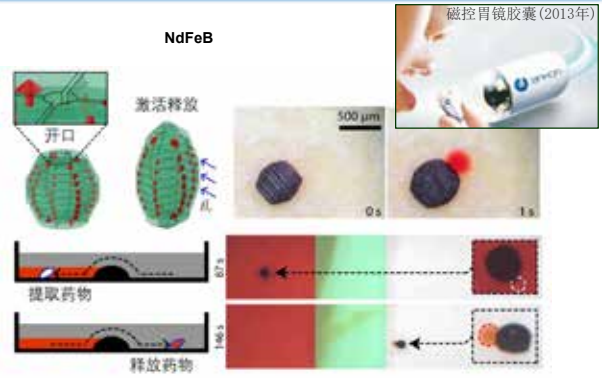
◆微型软体机器人



Science Advances 2021, 7, eabh2022



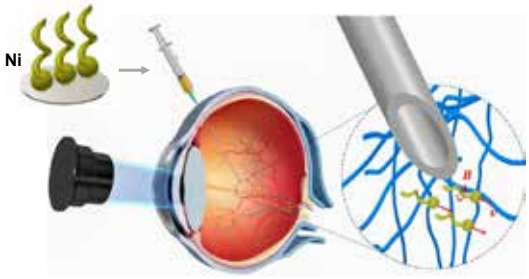
◆磁性软体机器胶囊



Science Robotics 2021, 6, eabf0112

◆眼科疾病纳米机器人

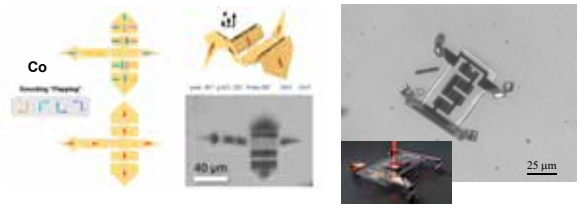
纳米机器人经过眼睛玻璃体抵达视网膜



Science Advances 2018, 4, eaat4388

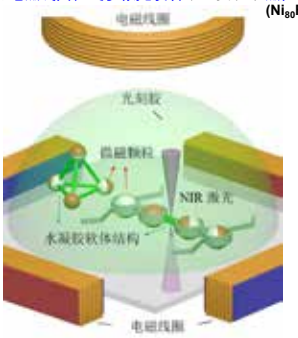
◆细胞尺度软体机器人

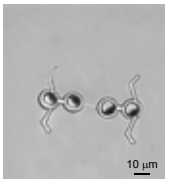
磁编程性机器人　　电驱动机器人



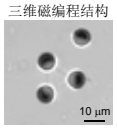
◆ 3D 打印微型软体机器人

整合电磁线圈在飞秒激光设备中，实现了磁性编程的微型软体机器的3D打印 $(Ni_{80}Fe_{20})$ 爬行机器人



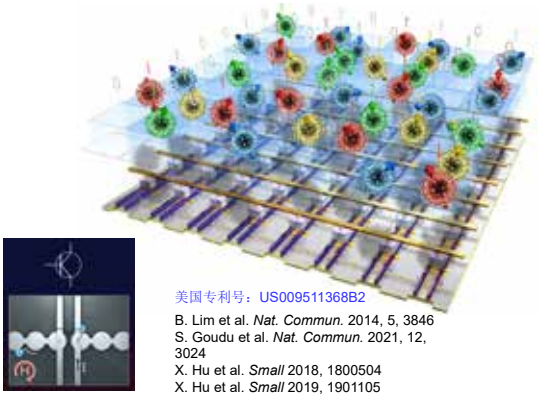


三维磁编程结构



X. Hu et al. *Science Advances* 2021, 7, eabe8436

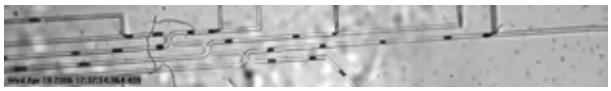
◆细胞及生物分子的编程性操控



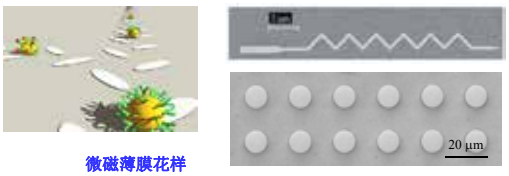
美国专利号：US009511368B2

B. Lim et al. *Nat. Commun.* 2014, 5, 3846
S. Goudu et al. *Nat. Commun.* 2021, 12, 3024
X. Hu et al. *Small* 2018, 1800504
X. Hu et al. *Small* 2019, 1901105

◆微磁薄膜花样

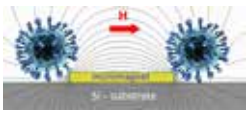


Science 315 (5813), 832-835, 2007　　微流体逻辑性操控



微磁薄膜花样

- 多物体对象同步并可单个独立操控
- 无热效应产生的副作用



磁潜能

$$U=-\frac{1}{2}\frac{V\chi_v}{\mu_0}\vec{B}^2$$

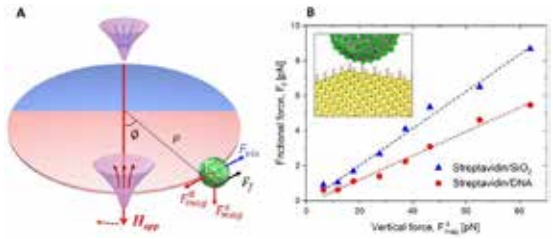
V: 磁颗粒体积
χ_v: 磁化率
μ_0: 真空磁导率
$\vec{B}$: 磁化强度

颗粒磁化强度

颗粒尺寸

X. Hu et al. *Small* 2018,

◆微纳摩擦力测量



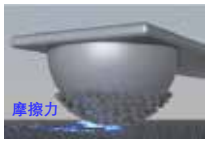
流体粘滞力

$$F_{vis}=\frac{6\pi\eta r v}{1-\frac{9r}{16h}+\frac{r^3}{8h^3}}$$

$$F_{mag}^{\phi}=F_D=F_f+F_{vis}$$

磁性驱动力

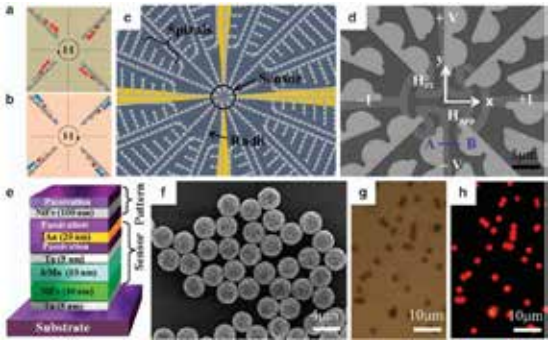
界面摩擦力 $F_f=\mu\cdot F_{mag}^{z}$



原子力显微镜探针

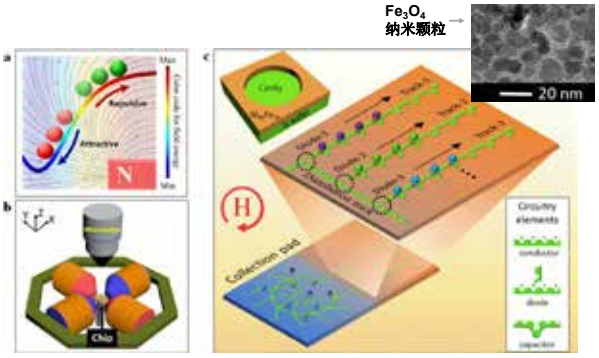
X. Hu et al. *Lab Chip* 2016, 16, 3485
X. Hu et al. *ACS appl. Mater. & interfaces.* 2018, 10, 16177

◆磁传感器集成



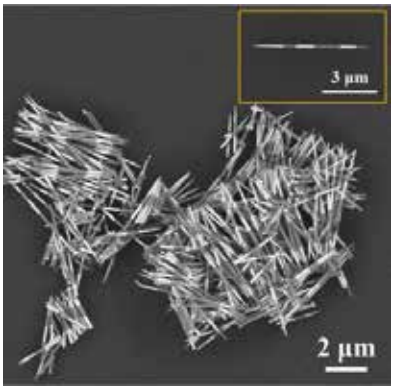
B. Lim et al. *NPG Asia Materials* 2017, 9, e369

◆铁磁流体中操控无磁性颗粒

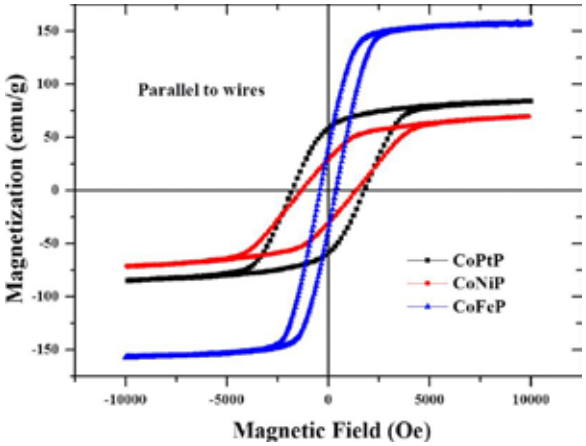


S. Goudu et al. *Nat. Commun.* 2021, 12, 3024

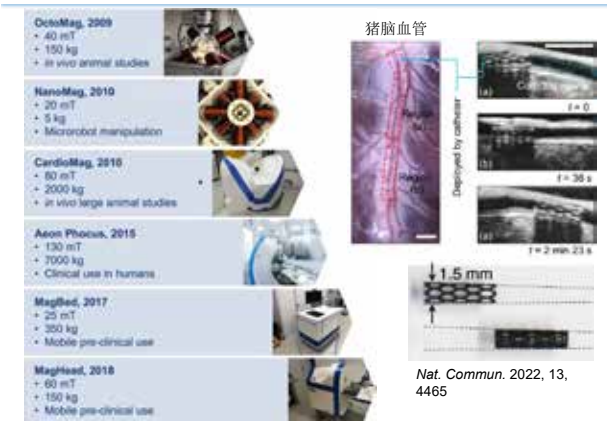
◆磁纳米线



CoPtP/Au 纳米线



◆展望



Nat. Commun. 2022, 13, 4465

先进软磁性材料在电机行业的应用

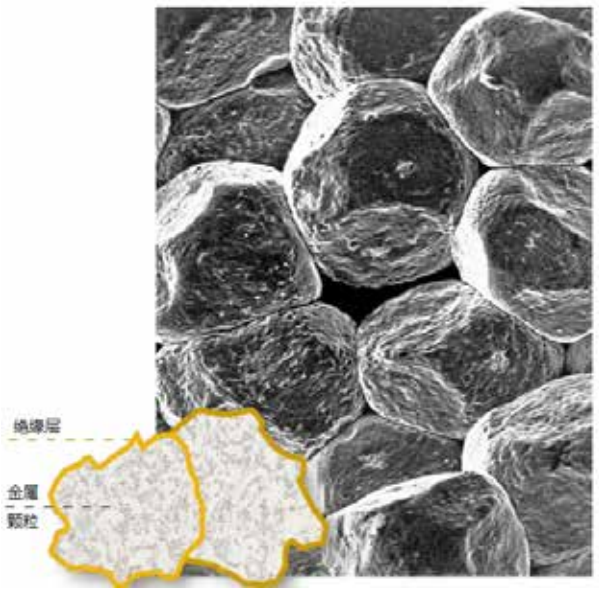
电机行业观察

最初的软磁材料零件是汽车用点火芯，在大多数通用汽车中广泛使用。它们被压实成圆形，并且没有使用绝缘胶带来保护初级绕组免受线圈的影响。

时至今日，粉末金属和软磁复合材料技术已经走了很长一段路，它提供了以前根本不存在的技术变革。正确的软磁性材料让电机磁通传输更快、消耗更少的能量、电机结构变得更紧凑。电机可以使用更高的频率，电磁更密集、高渗透，大大降低转子 / 定子的涡流损失。

电机使用来自存储在电池中的直流电（DC）或发电机、电网的交流电（AC），将电能转换为机械能。它们可用于电动汽车，小型家用电器，工业风扇和泵，机床以及用于推进的大型船舶和飞机中。对软磁复合材料（SMC）的持续研究表明，它们在直流电和交流电应用中具有巨大的潜力，通过允许工程师开发新的创新设计，改善中低频率下芯材的磁感应强度。软磁性材料由电绝缘的铁磁粉末组成，当优化粒度，形状和微结构时，它们具有许多有价值的优点，包括磁和热各向同性，高磁导率，低矫顽力，距离温度高和总铁损低。

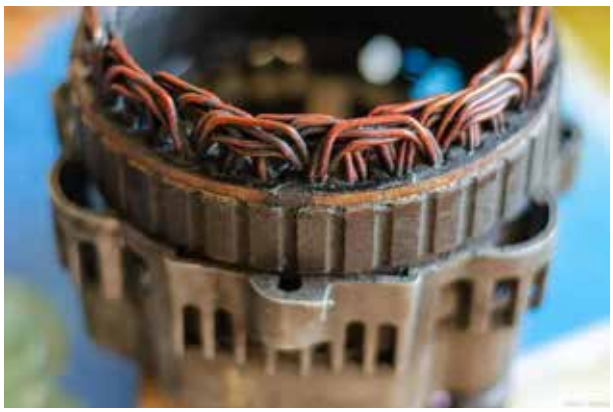
“软”是指在磁性意义上，该术语与材料的硬度无关，软磁性材料易于磁化和消磁。永久的，或 “硬”的磁铁始终保持磁化强度。软磁复合材料由具有高纯度和可压缩性的铁粉颗粒与薄而均匀层压粘合在一起材料。涂层提供高电阻率，使每个单个粒子边缘绝缘，限制了涡流的产生。软磁复合材料是理想地涂覆有均匀电绝缘膜层的铁磁粉末颗粒，就像任何其他粉末金属零件一样。软磁复合材料使用加热的模具压实，来促进更高的密度、磁导率、感应率。软磁复合材料取决于最终应用，磁性能是各项相应参数的影响，包括所用合金材料、最终部件的密度（饱和感应度和磁导率受密度影响）烧结温度、烧结后的碳和氮含量。



粉末金属磁性材料可以分类为烧结的（对于

DC 或直流应用）或软磁复合类型（对于 AC 或交流应用），与烧结材料相比，软磁复合材料的优点在于其设计具有竞争性的磁性能，具有更高的电阻率。电阻率使软磁性材料吸引那些正在制造低损耗零件（尤其是高频零件）的人的重要原因。软磁性材料的优势在于粉末的成型能力，使用软磁性粉末可以轻松实现通常通过粉末金属制成的形状，可以实现 3D 磁通量承载能力，可以高效地完成复杂的 3D 几何形状，它们在粉末颗粒之间不会具有冶金结合。相反，依靠互锁颗粒的强度加上绝缘层提供的强度。

对软磁性材料进行热处理可能会影响磁性性能，热处理的重点是双重的：改善软磁性能（减轻应力）改善机械性能，热处理或固化不是烧结的，没有形成冶金键。温度越高，软磁性材料的强度就越好，粉末冶金的性质可以使用更小的电机设计来减少材料消耗，或者从与目前的电机相似的尺寸中获得更高的功率，这为电磁设备打开了巨大的市场。这些组件能够弥合传统叠层钢芯的频率限制，尤其在几百赫兹的和几兆赫兹以上的铁氧体磁芯之间的间隙。软磁性材料可以完全消除由于铁磁层绝缘不良而引起的涡流积聚而导致的电机故障 / 过热。



钕磁体，凭啥让美国担心卡脖子?

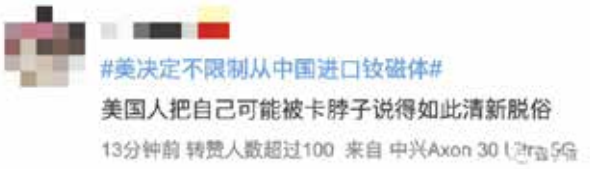
当代“永磁王”钕磁体，成为这几日热议的主角。

这是因为呀，美国一声令下，宣布“不限制主要从中国进口的钕磁体”。

理由中提到，去年美国进口的烧结钕磁体中，中国出产占到了 75%。（烧结，就是将粉状物转变成致密体，主流制造工艺）

一时间引发了热议，网友们虽然对这种“双标”操作习以为常，但依旧被恶心到了：

怎么可以把可能卡脖子说的这么清新通俗。



而事实上，作为应用于手机、汽车甚至导弹、战斗机中不容或缺的动力材料，起初是由美国参与研发，甚至在 90 年代，一度还是这个产业链上的第二主导者（第一是日本）。

但如今，在美国本土却没有一家大型参与制造企业，这究竟是怎么一回事。

“现代永磁之王”钕磁体到底是啥?

首先，还得从钕磁体这一主角开始说起。

提到磁铁，相信很多人都很熟悉，但不为大多数人所知的是，它几乎存在于所有事物中。尤其是其中能长久保持磁性的永磁体。

小到我们日常使用的智能手机、音响，大到电动汽车、红外制导导弹，永磁体成为大多数电力系统中不容或缺的部分。

前阵子美国发现在 F-35 战斗机的发动机用了中国产的合金磁铁，于是不得不暂停交付。

这其中，钕磁体，也叫做钕铁硼（NdFeB）合金，是目前世界上磁性最强的永磁材料，可吸引远重于自身重量 1000 倍的物体，有着“现代永磁之王”的美誉。

而且它的体积小、质量轻、能量密度高、稳定性强，可以以较低的成本产生更多的单位功率，饱受行业偏好，主要应用领域包括：汽车、风力发电、智能手机、机器人、计算机硬盘、军用设备等。

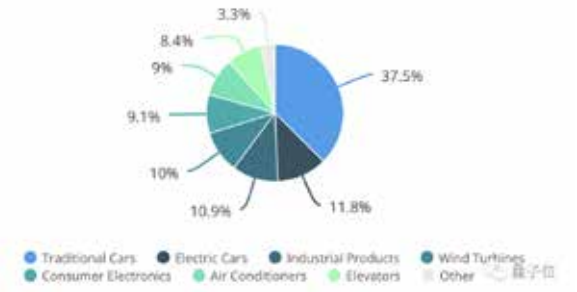
图源：Macro Polo 智库

2019 年，相较于其他永磁材料，市场占比高达 65.8%。而这种趋势随着清洁能源转型的推动，将变得更加突出。

报告显示，未来十年，假设没有重大技术突破，仅电动汽车和风力涡轮行业，就将推动 80% 的高性能钕磁体的需求，两个行业需求增长 400%。

这其中又以电动汽车为典型。

首先，汽车行业本身就是钕磁体最大的需求方，2019 年就占总需求的 49.3%。（其中，燃油车占比 37.5%）



图源：Macro Polo 智库，资料来源：华宝证券

而电动车所需的钕磁体则远高于燃油车的 10 倍以上，在未来，电动汽车的逐步渗透几乎是可以预见的。

因此电动汽车对钕磁体的需求将会呈现出

爆发式增长，据华宝证券估计，2019 年到 2025 年，电动汽车对磁铁的需求预计增长 600%，超过 35000 吨。

目前，全球只有十几家（中国有八家公司）具备为向特斯拉等汽车公司提供相应的产品和质量的能力。

这么重要的钕磁体以及可预见的爆发式需求，也就不难理解美国此举。

但如果翻开整个钕磁体的发展历程，美国曾经在产业链上有着举足轻重的位置。

美国曾主动放弃钕磁体产业

上世纪八十年代，美国的通用汽车和日本的住友几乎同时研发了钕铁硼化合物。一经推出，大家都惊叹于它的强大，并有意将它推向更多应用。

但不同的是，两家企业采用了不同工艺。美国坚持使用粘结钕磁体，日本则采用烧结工艺。

放在当时，粘结工艺应用广泛价格便宜；但烧结可以产生很强大的功率，因此更受到行业热捧。

如今，烧结钕磁体成为综合性最强的材料，前面提到的应用场景也基本上采用这个工艺。

因为没有受到行业青睐，通用汽车于 1995 年将磁铁子公司出售给了一家由中国公司组成的财团；并于 2001 年关闭了所有在美国的生产线。

从这张图可以看到，在 80 年代，美国钕磁体产量最高还占到了 25%，位列全球第二。

图源：Macro Polo 智库

而这时候，中国早已解决规模生产问题。在 2000 年后正式超越日本，成为全球钕磁体生产份额第一的国家。

众所周知，我国是稀土资源大国。资源等方面带来的优势，使得过去几十年来，我国稀土永磁材料在研制和生产上都发展神速。

2000 年代中期，中国占全球钕磁体产量的近 80%。

经过二十余年发展，如今我国几乎占据了整个稀土永磁体产业链。拥有近 60% 的开采量，超过 85% 的加工能力，产量占比超过 90%。

国内产业链上，上游稀土开发集中在内蒙古、四川、江西等地，生产制造集中在浙江。代表企业有中科三环、金力永磁、正海磁材等。

其中，中科三环隶属中科院，是国内最大的烧结钕磁体生产制造商。2022 年公司烧结钕铁硼的产能为 2 万吨，并计划在今年继续扩产 1 万吨。

金力永磁毛坯产能达到 2.3 万吨，并还在进一步扩建产线。

相比之下，美国的钕铁硼生产制造十分冷清。时至今日，美国没有一家大型企业有钕铁硼制造业务，对钕磁体的依赖非常严重。

其钕磁体进口总量中，75% 来自中国，9% 来自日本，5% 来自菲律宾，4% 来自德国。

这使得海外企业在使用钕磁体上非常慎重。

比如美国能源局一份研究报告指出，特斯拉一开始没有选用永磁体电机技术路线，就是因为担心供应链问题。

不过生产制造方面占据主导地位，并不意味着我国稀土永磁体产业就已经形成绝对长久优势。

因为在专利技术方面，我国很多企业都还是从日本拿授权。

日立金属公司在全球保有 600 多项烧结钕铁硼专利，几乎垄断了从钕铁硼成分到烧结生产全流程的专利。

目前日立金属仅把高端烧结技术授权给了我国 8 家企业，其中就有上面提到的中科三环、正海磁材。

这意味着，国内仅有 4% 的稀土永磁体企业可以生产高性能磁体。其余大多数企业，只能生产中低端产品，这在一定程度上还会造成产能过剩。

据 2018 年数据，我国生产的近 16 万吨钕磁体中，只有 15% 被认为是高性能磁体。

而统计截至 2018 年的数据，中国生产了全球 87% 的钕磁体，但高性能类型占总量的 48%，

其余来自日本和德国。

One More Thing

尽管研发起步落后于欧美日本，但我国一直在稀土永磁体研发上奋起直追。

这其中还有则趣事——

1983 年，日本住友公司金子秀夫教授宣布，他们发明了第三代稀土永磁材料，其磁能体积高达 36MGOe，也就是钕磁体。

当时，我国材料科学家谢宏祖提问：

先生，钕铁是组不成合金的，还有什么元素？

金子秀夫教授笑而不语。

最后，在美国物理学会第 29 次磁学与磁性材料年会上揭晓答案，即 Nd2Fe14B。

著名稀土永磁体专家谢宏祖

之后，正是这位向金子秀夫提问的中国科学家，带领团队在采用低氧工艺实验室，研制出了最大磁能体积为 52.2MGOe 的钕铁硼永磁材料，达到了当年世界最高水平。

1994 年，丁肇中院士为美国宇航局寻求高性能磁体时，选中的也是谢宏祖发明的永磁体材料。

据了解，谢宏祖曾被评为国家科技进步一等奖一次，国家三等发明奖一次，国家“七五”攻关优秀个人奖，并被评为有突出贡献的中青年专家，享受政府特殊津贴。

参考链接：

[1]https://macropolo.org/analysis/permanent-magnets-case-study-industry-chinese-production-supply/#:~:text=As%20of%202018%2C%20China%20produced,rest%20(see%20Figure%205).&text=Note%3A%20Japan%20and%20Germany%20likely,%E2%80%9CROW%E2%80%9D%20essentially%20means%20Germany

[2]https://www.bis.doc.gov/index.php/documents/section-232-investigations/3142-2022-09-fact-sheet-biden-harris-administration-announces-actions-to-secure-rare-earth-element/file

[3]http://www.sic.ac.cn/xwzx/kj/202005/t20200513_5578735.html

[4]https://www.politico.com/news/2022/09/07/pentagon-suspends-f-35-deliveries-china-00055202

[5]https://www.eet-china.com/news/202205111004.html

工信部新发布 14 项电机标准，其中修订版 8 项，新制订 6 项，事关诸多电机厂

2022 年 10 月 20 日，中华人民共和国工业和信息化部发布 2022 年第 23 号公告，批准《YE2 系列（IP23）三相异 步电动机技术规范（机座 号 160 ~ 400）》等 1036 项行业标准，与电机产品直接相关的标准 14 项，其中 8 项标准为修订版本，6 项标准为新制订。请各标准使用单位及时收集最新的标准版本，并对换版标准内容进行认真解读，进一步规范电机的设计、生产和制造。

14 项电机标准发布内容摘要

1 JB/T 5271–2022 YE2 系列（IP23）三相异步电动机技术规范（机座 号 160 ~ 400）

本文件规定了 YE2 系列（IP23）三相异步电动机的型式、基本 参数与尺寸、技术要求、试验方法、检验规则及标志、包装和保用 期的要求。本文件适用于 YE2 系列（IP23）三相异步电动机（机座号 160 ~ 400）的制造，凡属本系列电动机所派生的各种电动机的制造可参照 使用。

本 标 准 实 施 日 期 2023–04–01，代 替 JB/T 5271–2010。

2 JB/T 5275–2022 YE2–W、YE2–WF 系列户外 及户外化学防腐蚀型三 相异步电动机技术规范（机座号 63 ~ 355）

本文件规定了户外及户外化学防腐蚀型三相异步电动机的型 式、基本参数与尺寸、技术要求、试验方法、检验规则及标志、包 装及保用期的要求。本文件适用于户外及户外化学防腐蚀型三相异步电动机的制造。

本 标 准 实 施 日 期 2023–04–01，代 替 JB/T 5275–2010

3 JB/T 6447–2022 YCJ 系列齿轮减速三相异步电动机技术规范（机座 号 71 ~ 280）

本文件规定了 YCJ 系列齿轮减速三相异步电动机（机座号 71 ~ 280）的型式、基本参数与尺寸、技术要求、试验方法、检验规则及 标志、包装及保用期的要求。本文件适用于机座号 71 ~ 280，额定功率为 0.55kW ~ 15kW，输出转速约为 15r/min ~ 600r/min，输出转矩约为 9N·m ~ 3200N·m 的 YCJ 系列齿轮减速三相异步电动机（机座号 71 ~ 280）的制造， 采用其他系列三相异步电动机所构成的齿轮减速电动机可参照使 用。

本 标 准 实 施 日 期 2023–04–01，代 替 JB/T 6447–2010

4 JB/T 6456–2022 YEJ 系列（IP55）电磁制动三相异步电动机技术 规范（机座号 63 ~ 280）

本文件规定了 YEJ 系列（IP55）电磁制动三相异步电动机的型 式、基本参数与尺寸、技术要求、试验方法、检验规则以及标志、 包装和保用期的要求。本文件适用于 YEJ 系列（IP55）电磁制动三相异步电动机（机座 号 63 ~ 280）的制造，凡属本系列电动机所派生的各种电动机的制造 可参照使用。

本 标 准 实 施 日 期 2023–04–01，代 替 JB/T 6456–2010

5 JB/T 7119–2022 YR 系列（IP44）绕线转子三相异步电动机技术规 范（机座号 132 ~ 355）

本文件规定了 YR 系列（IP44）绕线转子三相异步电动机的型式、 基本参数与尺寸、技术要求、试验方法、检验规则以及标志、包装 及保用期的要求。本文件适用于 YR 系列（IP44）绕线转子三相异步电动机（机座 号 132 ~ 355）的制造，凡属本系列电动机所派生的各种电动机的制 造可参照使用。

本 标 准 实 施 日 期 2023–04–01，代 替 JB/T 7119–2010

6 JB/T 7127–2022 YD 系列（IP54）变极多速三相异步电动机技术规 范（机座号 63 ~ 315）

本文件规定了 YD 系列（IP54）变极多速三相异步电动机（机座 号 63 ~ 315）的型式、基本参数与尺寸、技术要求、试验方法、检 验规则以及标志、包装及保用期的要求。本文件适用 YD 系列（IP54）变极多速三相异步电动机（机座号 63 ~ 315）的制造，凡属本系列电动机所派生的各种电动机可参照使 用。

本 标 准 实 施 日 期 2023–04–01，代 替 JB/T 7127–2010

7 JB/T 8681–2022 YDT 系列（IP54）变极多速三相异步电动机技术 规范（机座号 80 ~ 355）

本文件规定了 YDT 系列（IP54）变极多速三相异步电动机（机 座号 80 ~ 355）的型式、基本参数与尺寸、技术要求、试验方法、 检验规则以及标志、包装及保用期的要求。本文件适用于 YDT 系列（IP54）变极多速三相异步电动机（机座号 80 ~ 355）的制造，凡属本系列电动机所派生的各种电动机的 制可参照使用。

本 标 准 实 施 日 期 2023–04–01，代 替 JB/T 8681–2013

8 JB/T 8733–2022 YG 系列辊道用三相异步电动机技术规范（机座号 112 ~ 225）

本文件规定了 YG 系列辊道用三相异步电动机（机座号 112 ~ 225）的型式、基本参数与尺寸、技术要求、特殊试验方法、检验规 则以及标志、包装和保用期的要求。本文件适用于 YG 系列辊道用三相异步电动机（机座号 112 ~ 225）的制造，凡属本系列电动机所派生的各种电动机的制可参照使 用。

本 标 准 实 施 日 期 2023–04–01，代 替 JB/T 8733–2011

9 JB/T 14193–2022 YLKK、YLKK–W、YLXKK、YLXKK–W 系 列 6kV 立 式 三 相 异 步电动机技术规范 及 能 效 分 级（机 座 号 355 ~ 630）

本 文 件 规 定 了 YLKK、YLKK — W、YLXKK、YLXKK — W 系列 6kV 立式 三相异步电动机的型式、基本参数与尺寸、技术要求、试验方法、 检验规则以及标志、包装和保用期的要求。本文件适用于一般用途 YLKK、YLKK — W、YLXKK 和 YLXKK — W 系 列 6kV 级或 3kV 级立式三相异步电动机（机座号 355 ~ 630）的制造。

本标准实施日期 2023–04–01，为新制订和发布。

10 JB/T 14194–2022 YLKK、YLKK — W、YLXKK、 YLXKK — W 系列 10kV 立式 三相异步电动机技术规 范及能效分级（机座号 400 ~ 630）

本文件规定了YLKK、YLKK — W、YLXKK、YLXKK — W 系列 10kV 立式三相异步电动机的型式、基本参数与尺寸、技术要求、试验方法、检验规则以及标志、包装和保用期的要求。本文件适用于一般用途 YLKK、YLKK — W、YLXKK 和 YLXKK — W 系列 10kV 级立式三相异步电动机（机座号 400 ~ 630）的制造。

本标准实施日期 2023–04–01，为新制订和发布。

11 JB/T 14195.1–2022 电机数字化车间运行管 理的一般要求 第 1 部分：总则

本文件规定了中小型电机数字化车间的中小型电机制造一般流 程、自动化要求、信息化要求、管理系统功能要求以及信息系统集 成要求。本文件适用于中小型电机数字化车间的建设和运行管理。

本标准实施日期 2023–04–01，为新制订和发布。

12 JB/T 14195.2–2022 电机数字化车间运行管 理的一般要求 第 2 部分：数字化嵌线车间

本文件规定了中小型电机数字化嵌线车间的运行管理流程、车 间计划与调度、数字化工艺执行管理、车间人员管理、生产物料管 理、车间设备管理以及数字化质量控制和追溯的一般要求。本文件适用于中小型电机数字化嵌线车间的运行管理。

本标准实施日期 2023–04–01，为新制订和发布。

13 JB/T 14195.3–2022 电机数字化车间运行管 理的一般要求 第 3 部分：数字化金加工车间

本文件规定了中小型电机数字化金加工车间运行管理流程、车 间计划与调度管理、数字化工艺执行管理、车间人员管理、生产物 料管理、车间设备管理以及数字化质量控制和追溯的一般要求。本文件适用于中小型电机数字化金加工车间的运行管理。

本标准实施日期 2023–04–01，为新制订和发布。

14 JB/T 14195.4–2022 电机数字化车间运行管 理的一般要求 第 4 部分：能效管理系统

本文件规定了中小型电机数字化车间能效管理系统的总体要 求、功能要求、人员管理、设备管理、能源管理、制度管理、安全 运行管理、评价以及验收。本文件适用于中小型电机数字化车间能效管理系统的建设和运 行管理。

本标准实施日期 2023–04–01，为新制订和发布。

什么是电子元器件?

用于制造或组装电子整机用的基本零件称为电子元器件，元器件是电子电路中的独立个体。

电子元件与器件有分别吗?

确实有人从不同角度把电子元器件区分为元件和器件。

有人从制造角度区分

元件：制造时没改变材料分子结构的电子产品称为元件。

器件：制造时改变了材料分子结构的产品称为器件

但是现代电子元器件的制造都涉及到很多物理化学过程，很多电子功能材料是无机非金属材料，制造过程中总伴随晶体结构的变化。

很明显，这种区分是不科学的。

有人从结构单元角度区分

元件：只有单一结构模式，单一性能特性的产品叫元件。

器件：由有两种或以上元件组合而成，形成与单个元件性能特性的不一样的产品称为器件。

按这个区分，电阻、电容等属于元件，但电阻器、电容器的叫法又同“器件”概念混淆，而且随着排阻、排容等阵列阻容元件的出现，这种区分方法变得不合理。

有人从对电路响应情况区分

电流通过它能产生频率幅度变化或改变流向的个体零件叫器件，否则就叫元件。

如三极管、可控硅和集成电路等是器件，而电阻、电容、电感等是元件。

这种区分同国际上通用的主动元件和被动元件分类相似。

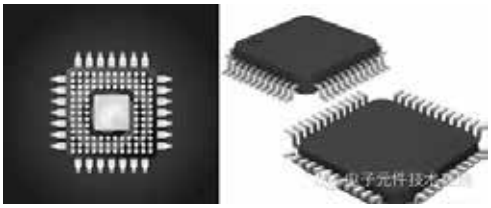
实际上很难清晰地对元件和器件进行区分，所以统称元器件，简称元件就好了!

什么是分立元器件?

分立元器件是与集成电路 (IC) 相对而言的。

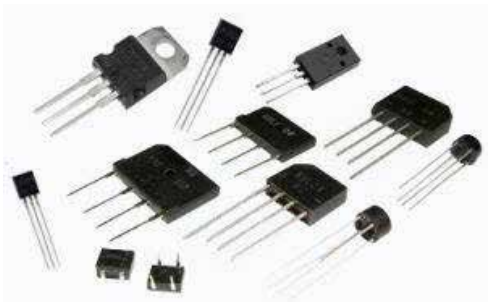
电子产业发展技术上，由于半导体集成电路的出现，电子电路有两大分支：集成电路和分立元器件电路。

集成电路（IC Integrated Circuit）是一种把一类电路中所需的晶体管、阻容感等元件及布线互连一起，制作在一小块或几小块半导体晶片或介质基片上，封装为一整体，具有电路功能的电子元器件。



分立元器件

就是指普通的电阻、电容、晶体管等单个电子元件，统称分立元件。分立元件就是功能单一、“最小”的元件，内部不再有其它元件功能单元。



主动元件与被动元件之区分

国际上对电子元器件有这么一种分类方法

主动元件：Active Components 指当获得能量供给时能够对电信号激发放大、振荡、控制电流或能量分配等主动功能甚至执行数据运算、处理的元件。

主动元件包括各式各样的晶体管、集成电路（IC）、影像管和显示器等。

被动元件：Passive Components 相对于主动元件来说的，是指不能对电信号激发放大、振荡等，对电信号的响应是被动顺从的，而电信号按原来的基本特征通过电子元件。

最常见电阻、电容、电感等就是被动元件。

有源元器件与无源元器件之分

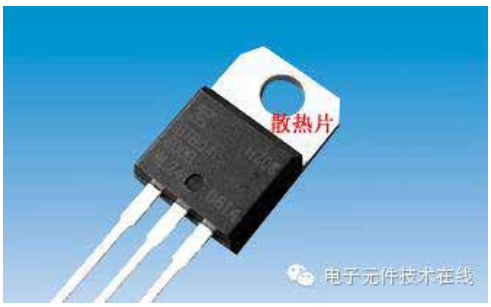
对应国际上主动元件与被动元件之区分，中国大陆通常称为有源器件和无源器件

有源元器件

有源元器件对应的是主动元件。

三极管、晶闸管和集成电路等这类电子元器件工作时，除了输入信号外，还必须要有激励电源才可以正常工作，所以称为有源器件。

有源器件自身也消耗电能，大功率的有源器件通常加有散热器。



无源元器件

与无源元件相对应的是被动元件。

电阻、电容和电感类元件在电路中有信号通过就能完成规定功能，不需要外加激励电源，所以称为无源器件。

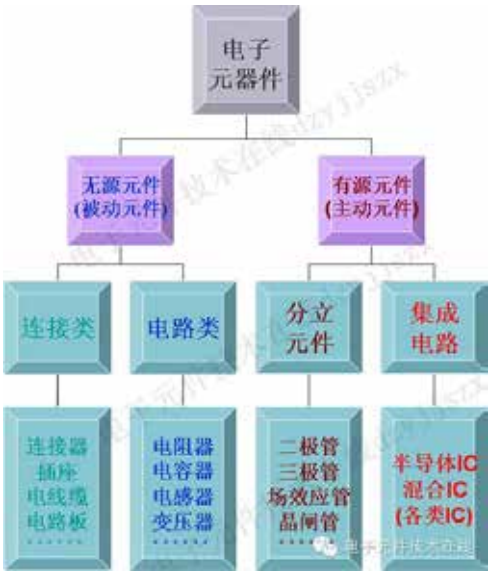
无源器件自身消耗电能很小，或把电能转变为不同形式的其他能量。

电路类元件与连接类元件区分

电子系统中的无源器件可以按照所担当的电路功能常分为电路类器件、连接类器件。

电路类元件	连接类元件
电阻器 resistor	连接器 connector
电容器 capacitor	插座 socket
电感器 inductor	连接电缆 line
变压器 transformer	电路板 PCB
继电器 relay	
按键 key	
蜂鸣器、喇叭 speaker	
开关 switch	

电子元器件分类关系图

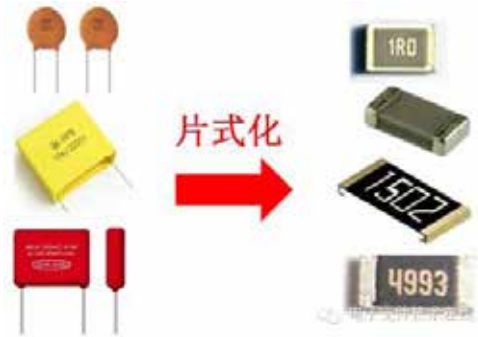


电子元器件质量认证

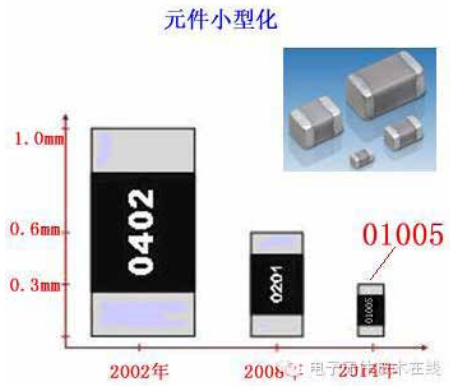
美的 UL 和 CUL 认证　德国的 VDE 和 TUV 认证　欧盟的 CE 认证　中国国内有 CQC 认证。

电子元器件发展趋势

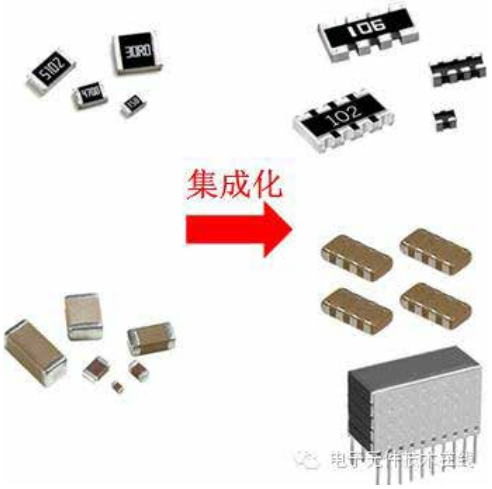
片式化



小型化



集成化

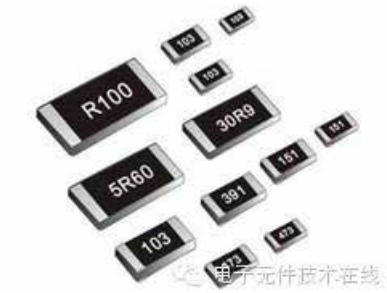


子元器件片式化三大技术

厚膜技术

厚膜技术：在绝缘基板通过丝网印刷及低温烧结工艺，制作导电、介电和电阻等功能性膜层，功能膜层较厚，一般为大于 10μm 以上。

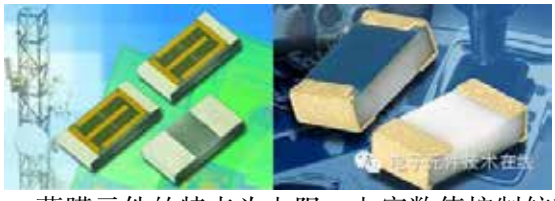
电子元件中用量最大的厚膜电阻器就是厚膜技术生产的典型产品。



薄膜技术

薄膜技术起源于半导体集成化，主要采用蒸发溅射、蚀刻工艺在绝缘基板成膜，制作导电、介电和电阻等功能性膜层，功能膜层较薄，厚度一般为小于 1μm，作为导带还可薄至 10 nm。

采用薄膜工艺在玻璃或陶瓷基片上制作的电子元件称为薄膜元件，如薄膜电路、薄膜电阻、薄膜单层电容等等。



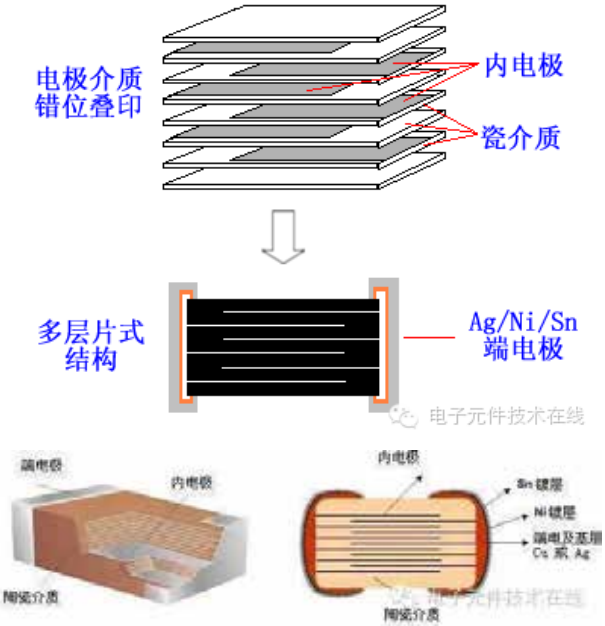
薄膜元件的特点为电阻、电容数值控制较精确，且数值范围宽，温度频率特性好，可以工作到毫米波段。并且集成度较高、尺寸较小。

薄膜技术具有很强的制造灵活性，很适合客户定制型产品制造或小批量多品种产品制造，且制造周期短。但是薄膜工艺所用设备比较昂贵、生产成本较高。

薄膜元件一般应用于：高频电子电路上如光通讯、微波通讯、无线通讯。或是对电子元件性能要求高稳定场合如传感、医疗及生物技术领域。

多层片式技术

主要采用丝网印刷工艺在介质生膜交互叠印导电浆料及高温共烧工艺，制作元件芯片主体，交互叠印层数可达 1000 层，介质膜层与导电层的厚度范围可以从 1μm 到几百 μm，导电金属层厚度范围 0.1~5um。 多层片式元件结构



利用多层片式技术，使用不同的功能材料可制造各种各样的电子元件，如：

多层片式陶瓷电容 MLCC

多层片式陶瓷电感器 MLCI

多层片式压敏电阻器 MLCV

还有贴片热敏电阻等……均是多层片式技术制造的。

多层片式技术最大的优势是设计简易、规范，易于大规模高自动化制造，可实现很低的生产成本。

东磁器件　未来可期

陶金水

横店东磁坚持“磁材+新能源”双轮驱动发展。在传统的“磁材”板块，公司持续做精做强：横向，发展全系列磁性材料，保持稳健的成长；纵向，发展器件、模组，开拓新的增长空间，不断为客户创造更高的价值。

在横店东磁软磁部自动化车间，一颗颗小小的磁芯经过机器自动化成型、绕线等工序，成为一颗颗精致的磁器件。

“通过这样的延伸，我们把自己磁性材料的优势发挥至最大化，向客户提供更高的价值。”横店东磁软磁部相关负责人说。

经过四十多年发展，公司已在“磁材+器件”“光伏+锂电”两大产业板块取得了丰硕成果。

“想要继续做大做深，就必须不断拓展新领域新产品。”横店东磁相关负责人介绍，为了拓展业务，同时为客户提供更完善的服务，公司充分发挥自身优势，积极开发以磁材为基础的器件产品。

多年前，公司主要是为器件生产企业提供材料。2004 年，公司软磁部建起磁器件生产车间，发挥软磁材料技术优势，开始自主生产器件产品。经过 10 多年深耕，软磁部不断提升相关器件研制能力，产品广泛应用于汽车、笔记本电脑、服务器、手机等领域，畅销国内外。

“器件，是我们相关材料的升级产品。我们把自主生产的磁性材料与其他元件组成器件，符合横店东磁‘磁材+器件’的战略发展方向，也有利于增加产值，拓展利润空间。今后，我们还将开发更多领域的器件，做大做强器件产业。”软磁部负责人说。

公司永磁部在 2006 年开始生产电机机壳和机壳组件。“那时我们的机壳材料依赖进口，虽然在成本上没有优势，但品质较高、服务优异，机壳和机壳组件的销量还是不断增加。”该部相关负责人说，通过多年发展，永磁部积累了丰富的生产经验，也形成了专有的成熟技术。近几年，国内制造装备技术、模具加工技术、自动化水平等迅速提升，该部生产的机壳材料达到国际先进水平。该部还抓住机遇，聚焦汽车专用电机，不断提升自动化生产水平，为客户提供了越来越多优质的组件产品。

“以前，客户采购了我们的磁瓦和机壳，要建设组装生产线，把磁瓦和其他零件装到机壳里。这样，客户要与多家供应商合作，管理和采购成本较高。后来我们自己建设组装线，为客户提供机壳组件，可节省客户投资、减少采购运输费，而我们也扩大了产品空间，实现了与客户的双赢。”永磁部相关负责人说。

几年前，看好新能源汽车的良好发展形势，永磁部提早布局，通过改进技术，进一步提高了磁瓦质量，研制出器件新产品，开辟了更大的市场。

“除了汽车领域用的电机机壳组件，我们还将开拓家电和工具领域用的组件产品。以匠心制造出器件精品，持续擦亮东磁品牌。”永磁部相关负责人充满信心地说。

此外，横店东磁下属企业——诚基电子则立足手机振动马达，发挥自身精密组装能力，拓展开发 5G 射频器件等新领域和新产品，为众多细分领域提供优质器件，满足了客户需求，在稳定原有客户和市场的基础上，为公司增添了新市场、新客户。

2022 磁性材料产业高峰论坛暨科技成果对接活动在浙江横店顺利举行

9 月 19—20 日，由中国电子元件行业协会磁性材料与器件分会、东阳市科技局主办，浙江省磁性材料行业协会、G60 科创走廊新材料产业联盟承办的 2022 磁性材料产业高峰论坛暨科技成果对接活动，在浙江横店东磁大厦顺利举行。

19 日傍晚，东磁大厦轮廓景观灯流光溢彩，周围绿叶婆娑，桂花飘香，秋高气爽。在大厦宴会厅内，会议晚宴气氛热烈，140 多个参会人员兴致高昂，交流甚欢。

20 日上午 8 时 30 分，高峰论坛准时开始。浙江省磁性材料行业协会会长、横店集团东磁股份有限公司党委副书记、副总经理郭晓东，浙江大学严密教授，中国计量大学葛洪良副校长，安徽大学刘先松教授，西北工业大学胡星浩教授，教授级高工赵光和磁性材料与器件分会汪小明副理事长，卢杨成副理事长出席了会议现场。152 名企业负责人到现场参加会议。

会议以线下 + 线上 + 直播相结合的方式举行。线上设有 12 个分会场，分别为 3 所大学和 9 家企业或单位，他们以会议连线方式出席会议。西安交大杨森、马天宇教授、西北工大闫浩教授、宁波材料所闫阿儒研究员在线上出席会议。会议由秘书长谈泸明主持。郭晓东会长作了会议致辞。严密、葛洪良等 13 位教授和专家作了报告，或进行了科技成果对接。

今天的论坛和科技对接活动，在线下和线上交叉切换进行直播，直播画面清晰，语音流畅，分会场、主会场交流互动较好，衔接有序，总体反映良好。据统计，有 4365 人在线上观看直播。本次会议，是在疫情点状频发、防控要求严格的背景下召开的，实现了会议与防控兼顾的目标，探索了一条在非常时期以较好方式呈现会议的路子。会议及活动取得圆满成功。

《旋磁多晶铁氧体材料》《低磁导率纳米晶磁心》两项团体标准审查会在东举行

9 月 27 日，中国电子元件行业协会磁性材料与器件分会在东阳举行《旋磁多晶铁氧体材料》和《低磁导率纳米晶磁芯》两项中国电子元件行业协会团体标准审查会。会议以线下与线上相结合的方式进行。磁性材料行业协会郭晓东会长出席了会议现场并讲了话；中国电子元件行业协会标准化部章怡老师重点解读了当前国家标准制订方面政策，阐述了团体标准在产业活动中的重要作用。会议由秘书长主持。

该两项团体标准分别由东阳富仕特磁业有限公司和横店集团东磁股份有限公司牵头制订；会议邀请中国计量大学、安徽工业大学、浙江师范大学教授吴琼、夏爱林、黄仕华以及有关专家为审查专家；各参与标准制订单位在线上或线下参加了审查会。

会上，专家们认真负责，一丝不苟，对标准文本逐条逐句进行了审查，提出了修改意见，以致标准更加完善。会上形成了《会议纪要》，通过了标准完善文本。会议圆满结束。

横店，召开磁性材料产业人员能力提升培训工作座谈会

10月12日上午，磁性材料产业人员能力提升培训工作座谈会在横店东磁大厦召开。浙江师范大学工学院胡院长、东阳经信局汪副局长以及浙江省磁性材料行业协会、东阳重点企业有关人员参加了座谈会。会上，大家就8月份举行的行业培训工作作了小结，提出了许多改善的意见和建议，为我们举办下一期培训，提供更好的思路的工作方案。

东阳举行磁性材料轻量级数字化改造先试先行企业项目启动会

磁性材料·元器件

Magnetic Materials and Devices

地　　址：浙江省东阳市东街 1 号
邮　　编：322100
电　　话：0579-86621399
传　　真：0579-86621136
电子邮箱：1748539381@qq.com
2022 年 10 月 12 日印刷