磁性材料·元器件

Magnetic Materials and Devices

2022 2

（总第 32 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

CGTC
春光科技集团

● 以客户为中心、深耕产品、合作共赢

山东春光磁电科技有限公司

Shandong Chunguang magnetoelectric Technology Co., Ltd

软磁铁氧体粉料专业制造商

公司拥有10条专业化生产线，年产粉料10万余吨。
拥有高导粉料、功率料粉、镍锌粉料等三大品类。
目前根据材料的特性分4大系列，45个品种。

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

姚　刚　胡盛清　徐卫东

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

◆报告论文◆

1. 2020年全球磁性材料行业发展报告……（3）

第六章　磁性材料行业重点企业分析……（3）

第一节　全球重点企业概述……（3）

第二节　国外重点企业分析……（3）

一、日本日立金属株式会社……（3）

二、TDK株式会社……（4）

三、FDK株式会社……（5）

四、德国VAC公司……（5）

五、信越化学工业株式会社……（6）

第七章　磁性材料行业研究结论及建议……（7）

第一节　行业研究结论……（7）

第二节　发展及投资建议……（7）

一、发展方向分析……（7）

二、发展策略分析……（8）

三、发展建议……（9）

2. 中高频低损耗MnZn铁氧体材料研发进展……（13）

一、引言……（13）

二、高频低功耗对MnZn铁氧体材料的要求 ……（14）

三、研究进展……（14）

四、发展方向……（16）

3. 复合永磁锶铁氧体及其研究进展研究背景……（18）

一、研究背景……（18）

二、单相$SrFe_{12}O_{19}$铁氧体……（19）

三、$SrFe_{12}O_{19}$基复合物 ……（20）

四、结论……（22）

4. 特种金属功能材料国内外发展现状与趋势……（23）

一、功能材料简介……（23）

二、功能材料产业现状和发展趋势……（23）

三、稀土功能材料……（24）

四、稀土永磁产业技术发展方向……（26）

五、功能材料概论……（28）

六、加快发展高技术新材料的建议……(34)
七、储氢材料……(34)
八、结束语—氢能离我们还有多远？……(40)
5. 磁能积及其相关常识的理论依据……(41)
引言……(41)
一、退磁曲线与磁能积的关系……(41)
二、永磁材料追求高最大磁能积的理论依据……(41)
三、各向同性永磁材料退磁曲线上寻找最大磁能积的简单方法及理论依据……(42)
结语……(42)

◆行业动态◆

1. 漫谈eVTOL中的复合材料结构……(43)
2. 新型永磁环保节能器在玻璃行业的应用……(47)

◆协会工作◆

1. 关于撤销《中国电子元件行业协会磁性材料与器件分会专家委员会》组织机构的通知……(49)
2. 科技部战略规划司领导一行前来调研长三角G60科创走廊工作并召开座谈会……(50)
3. 关于下达2022年第二批中国电子元件行业协会团体标准制定项目计划的通知……(51)
4. 横店东磁再次荣膺“天马奖”……(52)
5. 再添“国字号”荣誉　横店东磁喜获第五枚“中国专利优秀奖”……(52)

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

2020 年全球磁性材料行业发展报告（续上期）

中电元协磁性材料与器件分会　新材料在线

第六章　磁性材料行业重点企业分析

第一节　全球重点企业概述

磁性材料行业 90% 以上的企业均分布在中国，国内企业以中科三环、横店东磁、宁波韵升、领益智造、银河磁体等为代表。国外企业则以日立金属、TDK、信越化学、日本大同、韩国双龙、CSC、美磁、阿诺德、德国 VAC 等为代表。其中，日立金属、TDK、德国 VAC、中科三环技术优势明显，高性能磁性材料产品市场占有率较大。

图表 70 国内外磁性材料重点企业列表

国家	企　业	主　营　业　务
日本	日立金属	钕铁硼永磁、永磁铁氧体、非晶纳米晶合金
日本	TDK	永磁铁氧体、软磁铁氧体
日本	信越化学	钕铁硼永磁
日本	大同特殊钢	粘结钕铁硼
日本	FDK	软磁铁氧体
韩国	双龙	永磁铁氧体
韩国	太平洋	永磁铁氧体
韩国	昌星	金属磁粉芯
法国	UGIMAG	永磁铁氧体
德国	VAC	钕铁硼永磁、软磁铁氧体、非晶纳米晶合金
美国	美磁 Magnetics	金属磁粉芯
美国	麦格昆磁 Magnequench	粘结钕铁硼
中国	中科三环	钕铁硼永磁
中国	横店东磁	永磁铁氧体、软磁铁氧体
中国	领益智造	永磁铁氧体、软磁铁氧体
中国	宁波韵升	钕铁硼永磁
中国	安泰科技	钕铁硼永磁、非晶纳米晶合金
中国	天通股份	软磁铁氧体
中国	银河磁体	粘结钕铁硼、钐钴永磁
中国	正海磁材	钕铁硼永磁
中国	龙磁科技	永磁铁氧体
中国	金力永磁	钕铁硼永磁
中国	英洛华	钕铁硼永磁
中国	北矿科技	永磁铁氧体
中国	深圳铂科	金属磁粉芯
中国	京都龙泰	永磁铁氧体
中国	风华高科	软磁铁氧体
中国	东阳光科	软磁铁氧体

资料来源：赛瑞研究整理

第二节　国外重点企业分析

一、日本日立金属株式会社

1、企业概况

日本日立金属株式会社于 1956 年设立，总部位于东京，在磁性材料领域覆盖钕铁硼永磁材料、软磁铁氧体材料、铁氧体永磁材料、磁记录材料以及非晶合金软磁材料等。日本日立于 2007 年 4 月与全球最大的钕铁硼制造商日本住友合并成立日立 NEOMAX，日本日立拥有全球销售网，日本住友拥有钕铁硼的专利和技术，合并后的日立 NEOMAX 成为了全球高性能钕铁硼永磁材料行业的龙头企业。该公司主要产品包括：按内禀矫顽力大小划分的各型号高性能钕铁硼永磁材料和高性能辐射环等。产品主要应用领域包括：混合动力汽车、EPS、VCM、消费类电子产品和医疗等。

日立金属总部位于日本东京，是全球最大的生产、销售烧结钕铁硼企业。通过并购和自行研发，日立金属目前拥有 600 多项稀土烧结钕铁硼的专利权。

中国有 200 多家钕铁硼企业，生产了几乎占全球产量 80% 的钕铁硼。日立金属只授权了中科三环等八家中国企业具有烧结钕铁硼的专利使用权，其他未获授权企业受制于日立金属的专利封锁，则无法进入美国、欧洲等高端市场，这导致国内烧结钕铁硼磁体的整体产能偏低端，产业结构无法升级。

图表 71 日立金属主营业务情况

主营业务	产品分类
磁性材料及应用	永磁材料、软磁材料和 IT 器件
高端金属制品及材料	特钢、轧辊、非晶材料、刀具
高性能部件和设备	汽车零部件、管道部件和建筑构件
电线电缆及相关产品	电线电缆、汽车电子产品、信息系统设备和材料

资料来源：赛瑞研究

2003 年，日立金属收购了霍尼韦尔国际公司的非晶态金属事业部（美国 AlliedSigNal 公司 1999 年与霍尼韦尔合并），形成目前日立金属在非晶合金领域的垄断地位。2004 年，日立金属收购了住友特殊金属并与之合并获得了钕铁硼的核心专利，通过强强联合一举成为钕铁硼行业产能最大、技术实力最强的企业。

2、经营状况

日立金属 2019 财年实现营业收入 8814 亿日元（约 577.7 亿元），同比下降 13.88%。

图表 72 2015–2019 财年日立金属营业收入情况

资料来源：日立金属年报

3、最新动态

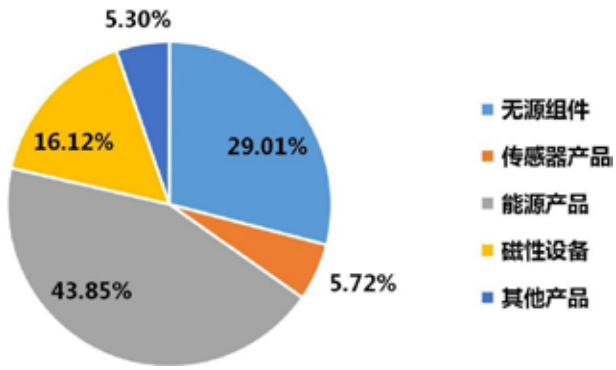
根据日立金属株式会社最新定期报告（2020 年 4 月 1 日 ~2020 年 9 月 30 日），其磁性材料和功率电子器件业务的销售收益比上年同期减少 21.1%，为 47,830 万日元。从各业务的销售收益来看，磁性材料中，稀土类磁铁，除了汽车用电装零部件减少以外，产业机器相关也随着机床和电子产品相关需求的减少而低于上年同期。铁氧体磁铁由于汽车用电装部件减少，比上年同期有所下降。在 2018 财年，日立金属为应对新能源汽车、铁路和可再生能源系统上越来越高的市场需求，计划在 Metglas Yasugi Works 和日立金属（泰国）有限公司通过加强生产线和改进工艺的方式，将纳米晶磁性材料的产能在原来的基础上扩大至 3 倍。日立金属 2017 年宣布，完成对 Santoku Corporation 的收购工作，Santoku 公司是一家综合性稀土制造商，进行从原材料到高纯度化合物和各种合金的综合生产，拥有带钢铸造工艺制造技术的相关专利，进一步加强了日立金属磁性材料业务优势。

二、TDK 株式会社

1、企业概况

TDK 株式会社成立于 1935 年，总部位于日本东京，是一家以磁性技术引领世界的综合性电子元件制造商，在电子原材料及元器件市场占有领导地位。其主营业务可分为磁性设备、能源产品、传感器产品、无源组件、其他产品五部分。其高性能钕铁硼永磁材料产品广泛应用于资讯、通讯、家用电器以及消费类电子产品等领域，如移动电话、笔记本电脑、DVD/HDD 录影机、平面显示器、汽车及其导航系统等。

图表 73 2019 财年 TDK 业务收入分布情况



资料来源：TDK 年报，赛瑞研究整理

2、经营状况

TDK 磁性产品业务主要包括记录装置（硬盘磁头、硬盘悬架）、磁铁、电源供应器等。2019 财年，TDK 实现营业收入 13630 亿日元（约 893.4 亿元），同比下降 1.36%。

图表 74 2015–2019 财年 TDK 营业收入情况

数据来源：TDK 年报

3、最新动态

2020 年 10 月，TDK 已向美国申请恢复对华为供货。

2020 年 1 月，TDK 推出改良后的爱普科斯 (EPCOS) 铁氧体磁铁设计工具。该工具能简便快速地计算所有与爱普科斯 (EPCOS) 铁氧体材料（包括用于高频开关电源的新材料）应用相关的参数，并能通过图表显示所需耗材和磁芯形状。

2018 年 7 月，TDK 通过收购 TODA Kogyo 股份加强其电子元件产品的竞争力。TODA Kogyo 是一家领先的氧化铁和电子材料制造商。此次收购将有助于材料开发，发挥双方的优势。此外，通过收购 TODA Kogyo 股份，TDK 将持有户田工业 23.93% 的已发行股份。

2017 年 5 月，TDK 公司宣布完成对 InvenSense 的全现金收购，总收购价格在 13 亿美金。InvenSense 拥有全球领先的传感器和软件平台，将进一步完善 TDK 的传感器业务，帮助其成为全球领先的传感器解决方案提供商。

三、FDK 株式会社

1、企业概况

FDK 成立于 1950 年，总部位于日本，是一家主要制造、销售和出口各种电池、可充电电池、电池设备、电子元器件和设备的制造商，产品广泛应用于工业设备、汽车用品、移动产品、通讯设备等应用。其中 FDK 是全球首家研发叠层电感的，该电感以大电流更小体积方向持续领先电感产品行业，且是唯一家高度为 0.35mm 超薄电感器。

2、经营状况

2019 财年，FDK 实现营业收入 721 亿日元（约 43.9 亿元），同比下降 0.39%。

图表 75 2015–2019 财年 FDK 营业收入情况

资料来源：FDK

3、最新动态

2016 年，FDK 推出一种新型的锰锌（Mn–Zn）类铁氧体材料——6H60T，这款材料可用于电动汽车电源变压器中。6H60T 损耗比原产品“6H60”降低 15%（使用环境 140℃），并且还能以行业标准铁芯形状“UU79/129A”进行规模化生产，不仅减少成本，还有利于节能。

四、德国 VAC 公司

1、企业概况

德国 VAC（VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG）作为欧洲重要的磁性材料生产厂商，成立于 1914 年，第一个产品是生产真空熔炼炉。1933 年，VAC 被西门子公司收购，专业生产高性能磁性材料及磁性元器件；1979 年，VAC 是欧洲第一家生产 VITROVAC® 非晶磁性材料的公司；1992 年，VAC 推出 VITROPERM® 纳米晶磁性材料；1999 年，VAC 同 Infineon、EPCOS 一样，从西门子电子零件集团独立出来。目前德国 VAC 已发展成为世界知名的磁性材料制造公司。其总部设于德国哈瑙，在德国、斯洛伐克、美国、中国、马来西亚建有工厂，同时在全世界各个国家拥有 40 余家分支机构。

2001 年，德国 VAC 集团在华投资设立瓦克华磁性材料（沈阳）有限公司。公司主要生产电感性元件，包括电流互感器，电流传感器，各种电子变压器和电感线圈，以及非晶和超微晶磁性

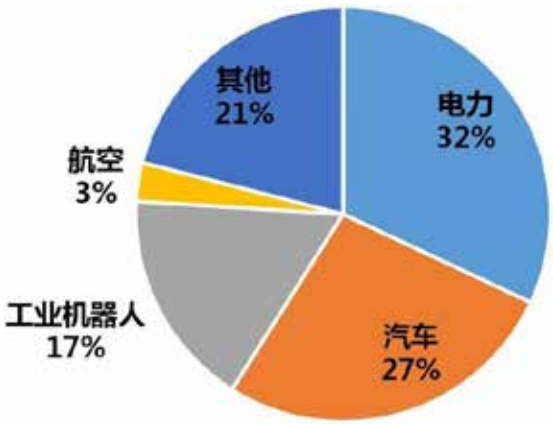
材料的深加工产品磁芯。产品主要出口欧美国家。已拥有西门子、通用电气、博世、ABB、朗讯、华为、中兴通讯等国内外知名客户。目前公司已成为集设计、生产和销售为一体的国际知名企业。

2005 年，德国 VAC 在北京与中科三环合资成立三环瓦克华，主要生产高档稀土永磁材料及器件，产能约 1500 吨。

2、经营状况

VAC 全年营业额 4.13 亿欧元，在全球拥有约 4300 名员工，近 800 项专利。

图表 76 VAC 按市场划分的收入占比情况



资料来源：VAC，赛瑞研究整理

3、产品体系

德国 VAC 作为欧洲第一大磁性材料生产厂商，产品涵盖半成品材料及其零部件、元器件及其集成系统，广泛应用于电力电子及电子工程领域。从软磁产品到高性能钕铁硼永磁材料，德国 VAC 拥有完整的磁性材料产品系列。目前，该公司高性能钕铁硼永磁材料主要应用于风力发电、EPS 及直流微特电机等领域。

4、最新动态

2019 年 8 月 5 日，德国 VAC 发布用于电机的新型钴铁磁性材料，可增强电机的扭矩，同时可提升电机效率。

五、信越化学工业株式会社

1、企业概况

信越化学工业株式会社自 1926 年成立以来，一直重视磁性材料研究，1972 年即开始研发生产稀土系磁性材料，并在日本福井县设立磁性材料研究所，能够生产完整系列的高性能钕铁硼永磁材料、高性能辐射环等。信越化学共分 6 个事业部，包括 PVC 化成品事业、有机硅事业、功能性化学品事业、半导体硅事业、电子功能材料事业、其它相关事业。其中，电子功能材料事业包括稀土磁铁、环氧膜塑料、光纤涂料、合成石英等产品。信越化学自 1926 年成立以来，一直重视磁性材料研究，1972 年即开始研发生产稀土系磁性材料，并在日本福井县设立磁性材料研究所，研发实力雄厚、产品质量优良。主要产品包括：完整系列的高性能钕铁硼永磁材料、高性能辐射环等。产品应用领域包括：混合动力汽车、EPS、VCM、消费类电子产品和医疗等。

2、经营状况

2019 财年，信越化学实现营业收入 15435 亿日元（约合 1011 亿元），同比下降 3.17%。其中电子与功能材料产品实现营收 2251 亿日元（约合 147.5 亿元）。

图表 77 2015–2019 财年信越化学电子与功能材料产品营收情况

资料来源：信越化学年报

3、最新动态

2020 年，日本信越化学将斥资 300 亿日元（约 2.85 亿美元），把光刻胶的产能提高 20%，以扩充对半导体关键材料的供应。信越化学将会在日本和台湾地区兴建工厂，位于台湾地区云林工厂将先完成，预计 2020 年 2 月开始量产，届时信越化学将得以在台湾地区生产可与极紫外光（EUV）光刻技术兼容的光刻胶，以满足台积电等台厂客户的需求。

2019 年末至 2020 年初，日本信越化学相继发布了用于高频电波印刷线路板和半导体的新材料。在通用电子设备、半导体材料的需求停滞堪

忧的情况下，信越化学紧紧抓住未来市场预期出现较高增长的 5G 设备。

第七章 磁性材料行业研究结论及建议

第一节 行业研究结论

目前，中国各种门类的磁性材料产量均居世界第一，已确立了世界磁性材料生产大国和磁性材料产业中心的地位。但总体而言，与日本等领先国家相比，我国磁性材料产业还存在较大的发展空间。

1、中国磁性材料目前已走在了从全球最大迈向最强的道路上。中国的磁性材料产业规模在全球的比重持续提升，行业总体增速明显高于全球水平；虽然产品结构还不尽合理，但随着粘结、热压、铁氮等多个类别的产品的不断研发及突破，受益于国内企业在新兴应用市场上的敏锐洞察和快速决策，未来进口替代产品及创新产品将在应用及研发创新的双重加持下加速涌现，产业增长潜力巨大。

2、中国磁性材料市场集约化程度低，企业规模小、市场集中度低仍然较突出。对比日本磁性材料产业，中国钕铁硼规模最大的企业中科三环与 TDK 在磁性材料及应用业务收入不到对方 20%；铁氧体磁性材料规模最大的企业横店东磁与日立金属、TDK 相比差距仍较大。产业集中度方面，我国从事各类磁性材料（含粉料和原料）生产经营的企业有近 1600 家，其中 7 家 A 股以磁性材料为主营业务的上市公司 2019 年磁性材料的收入占市场比重不到 20%，市场集中度仍然较低。

3、中国磁性材料市场技术含量偏低，缺乏综合竞争优势和核心竞争力的局面仍未扭转。产品结构方面，虽然中国的磁性材料规模已位居全球第一，但主要产品主要集中在中低性能磁性材料，高性能磁性材料市场主要被日本企业占据。技术创新方面，以永磁材料中市场份额最大的烧结钕铁硼为例，目前烧结钕铁硼专利主要掌握在日立金属手中，没有日立金属的授权，中国企业无法在美国、日本以及欧洲生产和销售钕铁硼。日立金属通过授权方式允许中国企业在国际市场销售烧结钕铁硼，但每年必须向日立缴纳高额的专利使用费。

4、中国磁性材料市场竞争两极分化严重，结构性过剩与短缺并存。2017 年以来，磁性行业企业发展情况差异较大，两极分化情况十分突出。主要表现在：低端产能过剩——生产中低端产品的企业靠压低人力成本和环保成本来争夺市场份额，在原材料价格大幅波动、运行成本上升的背景下，销售盈利困难；高端供不应求——生产高性能磁材的企业，拥有技术优势及较高的自动化水平，订单充足且利润率较高。

第二节 发展及投资建议

一、发展方向分析

磁性材料是国民经济的重要支柱与基础，应用十分广泛，而且近年来磁性材料的发展十分迅速，特别是新型磁性材料的不断出现，对现代工业技术进步起着巨大的推动作用。因此，它已经成为世界各国科学家们争相探索和研究的热点领域之一。在今后的几年中，赛瑞研究认为磁性材料的研究和发展将主要集中在以下几个方面：

1）加强磁性材料的基础研究和应用基础研究，虽然基础和应用基础研究工作比较繁杂和辛苦，短期内不易见到效益，而且还有一定的风险性，但是只有加强基础和应用基础研究，增加研究的投入，才能为今后磁性材料的研究和发展打下坚实的基础。

2）改造和完善现有的磁性材料，提高其磁性能，优化制备工艺，降低生产成本。

3）发展新型的磁性材料，特别是纳米磁性材料。纳米磁性材料是纳米材料中最早进入工业化生产的功能材料，应用广泛，性能优异，特别是在信息存储、处理与传输中占据重要地位，其基础研究和应用开发正方兴未艾。

4）加强研究、生产、应用三方面的结合，不断开拓磁性材料新的应用领域并促使其发展。

二、发展策略分析

1、紧密关注终端市场的变化，以市场应用为牵引

随着全球新一轮科技革命和产业变革的兴起，智能制造、移动互联网、大数据、工业机器人、新一代环保智能汽车等将蓬勃发展。作为支撑产业变革的关键性功能材料，稀土磁性材料将不断迎来新的发展机遇和增长空间。

对于软磁材料，近年来无线充电、数据中心服务器、电动汽车、NFC 等新兴市场的崛起，为软磁应用打开了新的成长空间。需紧抓市场趋势性发展需求，及时调整产品结构，加大软磁材料在电动汽车、无线充电等新兴应用领域的产业推进，提升技术和品质，积极开发高频、宽温、低功耗等性能材料，拓宽新应用领域。

对于永磁材料，据工信部数据统计，2018 年以来，新能源汽车、节能家电、电动工具、工业机器人等行业为稀土永磁材料行业发展提供了重要支撑，行业发展质量不断提升，产品产量平稳增长，重点企业效益保持良好态势，晶界扩散等先进技术进一步推广，拓展了高铁用牵引电机等新应用领域。

对于磁性材料产品与终端应用的匹配，以铁氧体为代表的软磁材料受到电子元器件向高稳定、高可靠、轻薄短小、宽适应性等方向发展的影响，未来市场中软磁铁氧体总体需求会下降，但多样化的产品需求会上升，产品朝变小与变多两个方向分化；以钕铁硼为代表的永磁材料受限于产能过剩及新兴市场增长不达预期，出现两极分化的局面，低端钕铁硼供给市场供给充足、产品差异化小，导致竞争激烈、盈利困难，而高性能钕铁硼供给市场厂商有限，仅有不到 10 家大型企业参与供给，毛利率较高。

图表 106 高性能和中低端钕铁硼的销售毛利率差异大

类　别	下游应用领域	平均毛利率
高端需求	新能源汽车	35–40%
	传统汽车	30%
	风力发电	25%
	变频空调	23%
	节能电梯	27%
	消费电子	30%
中低端需求	–	<20%

资料来源：上市公司公开信息整理、赛瑞研究整理

2、充分评估上游原料供应情况，以成本控制为市场竞争力

市场的打开除了有赖于下游应用市场的持续增长外，还需良好的成本控制配合。以新能源汽车市场为例，近年来在产销大幅增长的同时，行业也面临着补贴退坡加速、上游原材料价格上涨、产能过剩、竞争白热化以及加速洗牌的挑战，受此影响新能源汽车电机磁性材料主要供应商出现销售量增长，但产品毛利率持续下降的情况。只有通过持续降成本才能适应市场从依靠补贴到市场引导的重大变化，不断提升市场竞争力。

分产品来看：

对于烧结钕铁硼磁体，一方面需继续研发高性能磁体，通过合理调整配方，调控或优化晶粒边界、细化晶粒等技术，在保持高磁能积（或高剩磁）的条件下，进一步提高磁体内禀矫顽力。另一方面，进一步开展 La、Ce、Y 等高丰度稀土添加烧结钕铁硼永磁材料的研发，促进稀土资源的平衡利用。

对于粘结钕铁硼磁体，进一步提高国内企业生产的各向同性钕铁硼磁粉的性能，加快各种粘结磁体新技术和新产品的开发，比如混炼技术、高精度磁体制备技术、金属 / 塑料高复合度成形技术等。以满足新能源和智能驾驶汽车方面的应用；另一方面，进一步开展高性价比的各向异性磁体成形技术的开发，以满足一些特殊的需求。

对于热压钕铁硼，其成本和性能优于烧结钕铁硼（可以不用或少用重稀土而达到与烧结磁体相同的性能），但现阶段成型工艺受到限制，只能做成环形，从而大幅度限制了其应用范围，目前可替代部分烧结钕铁硼。目前热压磁体市场正处于培育和开发阶段，其市场前景主要取决于成

本和效率，如果成本合适，生产效率较高，客户易于接受，则下游需求要大幅增加；反之，影响下游需求。当重稀土元素 Tb 和 Dy 的价格昂贵（目前金属 Tb 的价格是 Nd 的 l0 倍左右）时，热压钕铁硼同高矫顽力烧结钕铁硼磁体相比仍有一定竞争优势。

3、追踪评估市场替代需求，并以高性能、小型化为发展目标

对于软磁材料，需重点关注软磁复合材料替代传统产品的市场。金属软磁粉芯因其具有高饱和磁感应强度、低损耗的特点，被誉为“第四代”软磁材料，是替代铁氧体的新一代高性能软磁材料，主要应用领域是新能源汽车与充电桩、家电、光伏以及储能领域，在高频电机、大功率高频开关电源变压器、高频大功率储能电感器等方面具有巨大的应用优势和广阔的市场前景。以高频电机领域为例，高效、节能的高频电机复合磁粉芯将逐步取代硅钢铁芯，目前国内主要还是采用硅钢片材料，但国外部分高频电机厂商已开始采用磁粉芯替换高频电机中的硅钢片。

对于永磁材料，需重点关注高性能铁氧体永磁在中高端市场的拓展及钕铁硼在微特电机等领域市场的增长。铁氧体永磁主要应用在电声器件和玩具电机等中低端市场，随着新兴应用市场不断开发并快速发展，铁氧体永磁器件日趋高性能化、小型化，带动高性能铁氧体永磁材料在高档汽车电机、变频空调 / 冰箱 / 洗衣机等家电用变频电机市场发展。钕铁硼永磁微特电机与其他类型微特电机相比，具有体积小、重量轻、出力大、效率高的优点；在相同的输出功率下，钕铁硼微电机的体积和重量相比于铁氧体微电机能减少 1/3。随着现代汽车零件“高效化、小型化”的发展趋势，钕铁硼微特电机的渗透率预计将持续增高。

4、重视低碳环保及资源综合利用，以高技术为先导

在低碳经济席卷全球的大势之下，世界各国都把环境保护、低碳排放作为关键科技领域给予关注。改善能源结构、发展再生能源、提高效率、节能减排、倡导低碳生活等绿色发展理念为磁性材料尤其是稀土永磁材料在风力发电、新能源汽车、节能家电、智能制造等方面提供了广阔的市场空间，同时也对稀土永磁材料的发展提出了更高的要求。

稀土永磁材料的成本构成中稀土原材料的价格占有举足轻重的地位。相对稳定的稀土原材料价格对于稀土永磁产业的健康发展是非常重要的。进一步高效利用稀土，如钕和钐是共生的，在大量使用钕的同时，导致了大量钐资源闲置，而钐铁氮、钐铁碳技术的开发能够解决这一问题，促进稀土资源的综合有效利用。另外，需积极开展各种应用产品中稀土永磁材料的回收利用。

三、发展建议

1、提前布局前沿技术

（1）软磁铁氧体

在七十年代初，TDK、FDK、飞利浦等相继开发出了第一代功率铁氧体材料，主要应用于开关电源，但是当时产品存在不少缺陷，功耗较高。后经几十年的发展，铁氧体材料历经不断的技术进步，发展为目前具有两宽（宽温、宽频）、两高（高磁通量、高 DC-Bias）、两低（低损耗、低失真）兼具的基础功能材料之一。

随着电子设备的高效率化和小型化，对软磁铁氧体提出了新的要求。在今后 10 年中，重点发展方向是：功率铁氧体向高频、低功耗化和高饱和磁通密度方向发展；高磁导率铁氧体凸显高初始磁导率 μi、宽频、宽温特性要求。

图表 107 软磁铁氧体研发方向情况

研发方向	研 发 要 求
两高（高 Bs，高 DC-Bias）软磁材料	功率：更高的饱和磁通密度 Bs，更高直流偏置特性 DC-Bias； 高导：高 μ>12000
两低（低损耗，低失真）软磁材料	功率：更低的损耗（低磁通密度下的损耗因子 tgδ/μ ＜ 8 、功耗 Pc ＜ 3 5 0 Kw/m3,120 度 ,200mT）； 高导：更低的总谐波失真系数（THD）
宽温，宽频软磁材料	更宽的使用频率和更广的温度范围

资料来源：西南应用磁学研究所

最新技术动态

1、2017 年，横店东磁完成 DMR52H 高频高 Bs 低损耗材料的开发，且 DMR96 低损宽温材料、

R12KZ高温高阻抗高Bs宽频锰锌高导材料等产品已开始批量生产。

2、2017年9月，美磁公司推出适用于信号、扼流圈和滤波器应用的新型高磁导率铁氧体M材料，其磁导率为15000，具有的优异的损耗因子、温度性能和产品一致性。

3、2017年11月，TDK公司推出锰锌铁氧体新品“PC200”，特点是高频损耗低，专为高频电源和变频器而开发，其居里温度超过250℃。

4、2017年12月，日立金属推出镍锌铁氧体新品“ND57S”，与现有产品“ND50S”相比稳定性更高，电感变化率更低。

5、2018年10月，日立金属推出锰锌铁氧体新品“ML27D”，其使用范围为300–500kHz，具有出色的降低铁损的能力。与现有材料“ML33D”相比，在300–500kHz范围内的铁芯损耗降低了30%以上。

（2）金属磁粉芯

金属磁粉芯产业化发展是从二十世纪八十年代开始。由于金属磁粉芯因天然存在的微细均匀气隙的结构，电感使用时磁场泄漏少，具有良好的电磁兼容性，减少了漏磁场所带来的涡流损耗，金属磁粉芯因此得到了广泛的应用；进入二十一世纪，随着逆变电路的高频、高功率密度化和电磁兼容性

（EMC）的更高要求，金属磁粉芯的产业化发展速度逐步超过了其它软磁材料。

目前国内金属粉磁芯还处于大规模工业化生产的初级阶段，生产设备控制精度低、自动化程度低，成为制约国内金属磁粉芯规模化发展的瓶颈。国内生产的金属磁粉芯起始磁导率在26–300之间，而26以下和300以上的材料还需要进一步研发并实现批量生产。

最新技术动态

1、2017年3月，美磁推出Kool Mu MAX铁硅铝磁芯材料，与上一代

Kool Mu材料相比，其直流偏置性能提高50%。

（3）铁氧体永磁

我国铁氧体永磁企业过去主要生产中低档产品，高性能铁氧体永磁生产水平不高，一致性和合格率难以控制。近年来，我国铁氧体永磁行业内主要企业的生产技术水平和工艺装备水平进步很快，但整体水平与国外发达国家相比还存在一定的差距，国内仅少数企业能够生产相当于日本TDK公司FB9及以上水平的高性能铁氧体产品。以日本TDK公司为例，目前我国铁氧体永磁干法生产工艺与TDK九十年代的水平相当，而湿法生产工艺则与TDK本世纪初的水平相当。

而未来中国铁氧体永磁的技术发展方向为：La–Co、La–Zn和纳米添加技术、磁粒度分布控制技术、高取向场技术、特殊工艺技术。

最新技术动态

1、2007年初，日立和TDK相继推出12系列相关铁氧体永磁材料；2010年6月，TDK推出更高性能的薄壁各向异性铁氧体永磁材料FB13B、14H材料。

2、2014年，横店东磁DM4748（12B）、DM4654（12H）产品成功进入量产化。

3、2017年，北矿磁材不断改进BMS–9、BMS–12高性能烧结产品技术，产品性能明显提升，已得到市场的充分认可，单月订单突破1000吨。

（4）钕铁硼永磁

目前，永磁材料的研究和发展方向主要有以下两个：第一个研究方向是探索和发展新型的稀土永磁材料．如ThMn_(12)型体合物、Sm2Fe17Nx、Sm2Fe17C化合物等。Sm–Fe–N系稀土永磁有与Nd–Fe–B系永磁相近的饱和磁化强度和(BH)max理论值，但各向异性场却高出2.5倍，居里温度高出160K。自问世以来，发展十分迅速，通过合理调整成分，寻求适当的制备方法，优化磁体制备工艺，充分挖掘潜在磁性能，降低生产成本，提高磁体质量，Sm–Fe–N系合金很有希望成为新型实用永磁材料。

另一个研究方向是研制纳米复相永磁材料．通常软磁材料的饱和磁化强度高于永磁材料，而永磁材料的磁晶各向异性又高于软磁材料，如将软磁相与永磁相在纳米尺度范围内进行复合，颗粒间将会产生强烈的交换耦合作用，而导致剩磁增强，这种以“交换弹性偶合”组成的纳米

复合材料是获得高磁能积的新途径，从而获得同时具有两者优点的高饱和磁化强度、高矫顽力的新型永磁材料．它的理论磁能积高达 960kJ/m^3(120MGOe)，远高于目前磁能积最高的 NdFeB 磁体，而它的稀土含量仅占 5wt%左右，从而大大降低了成本.这种材料由于具有高剩磁、高磁能积、高矫顽力和相对低的稀土含量以及相对成本较低，因此有望成为新一代永磁材料，是目前研究的热点之一。

中国钕铁硼产量高，但由于研发能力、技术水平以及专利壁垒等多方面原因，目前主要产品仍面向中低端市场，如我国钕铁硼下游应用仍主要是电声器材、磁选机等中低端市场，而面向电子信息、节能和新能源等高端市场产品占比仍然较少。目前我国多数厂家还只能生产最大磁能积（BH）max 在 40–44MGOe、矫顽力 Hcj ≥ 10kOe 的磁体。有三分之一的厂家能批量生产 360–400kj/m^3 的磁体。

由于产品磁能积已接近上限，进一步提升磁性能的空间有限，因此目前行业技术发展基本方向是提升产品综合性能，扩大产品应用领域。国内正在进行开展的技术研发方向有：1）采用双合金工艺；降低重稀土元素 Dy、Tb；2）以丰度高、价廉的稀土元素（如 La、Ce、Y 等）取代 Nd；3）减少晶粒尺寸。

最新技术动态

2017 年，北矿磁材开发出 BMS–5H 高剩磁非稀土烧结材料并实现大批量销售，产品性能稳定。

2、紧抓终端市场趋势

（1）软磁铁氧体

软磁材料具有磁电转换的特殊功能，是一种广泛应用的功能材料。新的经济形势对软磁材料器件提出了更高的要求，如需要器件向小型化、轻量化、节能化、高频化、耐高温等方向发展。除了如何提高现有材料的性能和质量外，发展综合性能优异的软磁材料已经成为磁性材料领域发展的重要目标之一。

由于电子元器件向高稳定、高可靠、轻薄短小、宽适应性等方向发展，对各种磁性材料提出了更高的要求，即高性能、高稳定和高可靠、宽适应性。软磁铁氧体发展有以下几方面：

①为满足开关电源小型化、轻量化、高性能化要求，功率铁氧体将向高频化、低功耗方向发展。

②为适应多媒体通信、数字通信和移动通信及光纤通信小型化和宽频带，高磁导率材料将向更高磁导率和更高的工作频率发展。

③为满足宽屏幕、高清晰度电视及高分辨计算机显示器的要求，应开发高饱和磁感应强度、低的损耗和严格的形状尺寸公差的软磁铁氧体磁芯。

④为适应高档小型电感器及减少、抑制、消除电磁污染和干扰的需要，高频软磁铁氧体材料及器件将向高性能、高可靠、片式化、贴装化、薄膜化方向发展。

由于开关电源、射频通讯、抗电磁干扰、高清晰度电视、新型节能照明灯具及环保等新兴产业的发展，加上家电产业和计算机、传真机、程控交换机等工业发展长盛不衰，软磁铁氧体应用范围及市场需求将保持高速增长。从产品本身看，受到电子元器件向高稳定、高可靠、轻薄短小、宽适应性等方向发展的影响，预计在未来市场中软磁铁氧体从吨位需求预计只会减少不会增加，产品的数量则只会增加不会减少，产品朝大与小两级分化。

（2）非晶纳米晶磁性材料

目前，非晶纳米晶磁性材料的发展处于快速成长阶段，国内外需求也处于快速成长时期。非晶纳米晶磁性材料行业正处在从自由竞争向垄断竞争过渡的阶段，行业集中度提高的速度将加快。未来 5–10 年是高档非晶纳米晶磁性材料快速发展期，技术优势将为企业带来新的成长性。

未来，主要下游行业对磁材的要求的高档化将带动高档非晶纳米晶磁性材料的快速发展。目前，国内市场上低档磁材已经供大于求，而高档磁材却还供不应求。

（3）铁氧体永磁

我国铁氧体永磁下游应用中低端市场占比将近 60%，主要是电声器件和玩具电机等，竞争充分，供大于求。铁氧体永磁器件日趋向高性能、小型化方向发展，出口产品从中低档逐步向中高

档方向。随着新兴应用市场不断开发并快速发展，高性能铁氧体永磁材料及产品广泛应用于高档汽车电机、变频空调、变频冰箱、变频洗衣机等家电用的变频电机中（电机磁瓦）。

随着工业自动化、家庭自动化、汽车智能化的进程加快，全球对微特电机形成了巨大的市场需求，促使铁氧体永磁行业也保持了快速发展。近十年，应用于微特电机的铁氧体永磁湿压磁瓦在我国也取得了较快发展，年产量超过 25 万吨。

因此，预计高档铁氧体的下游需求市场在未来一段时间内保持上升趋势。

（4）钕铁硼永磁

我国有充足的稀土原材料和具备竞争力的生产基础，加上国内新能源和节能环保产业迅速发展，下游领域需求比较大，中国已经成为全球钕铁硼永磁的重要生产基地和消费市场。我国是钕铁硼永磁材料以中、低端产品为主，且中、低端产品产能过剩，高性能钕铁硼永磁材料供需基本平衡。未来几年，加快淘汰落后产能，发展和扶持稀土新材料深加工是产业升级的必然方向。

图表 108 高性能钕铁硼永磁材料市场容量及未来增长趋势（单位：吨）

资料来源：金力永磁招股说明书、赛瑞研究

未来几年，国内风力发电领域对高性能钕铁硼永磁材料的需求量总体保持稳定；随着新能源汽车的爆发式增长，钕铁硼在汽车微特电机的应用不断推广，新能源汽车及汽车零部件领域对高性能钕铁硼永磁材料的需求量将呈现爆发式增长，预计到 2020 年，其占比将超过风力发电领域；同时，随着国家对节能降耗的不断重视，钕铁硼在节能变频空调、节能电梯和机器人及智能制造领域的渗透率不断提高，带动其对高性能钕铁硼永磁材料的需求稳步增长。

中高频低损耗 MnZn 铁氧体材料研发进展

张浩翔，王能超，诸葛凯，车声雷

（浙江工业大学　磁电功能材料研究所，浙江杭州　310014）

摘　要：随着第三代宽禁带半导体的应用，功率器件的小型化、高频化、轻量化对 MnZn 铁氧体材料提出了高频低损耗化的迫切需求。分析了适用于 500kHz 及以上频率的中高频 MnZn 功率铁氧体的低功耗化机理，归纳了高频 MnZn 铁氧体的发展历程，对比了几种在中高频下表现优异的典型 MnZn 铁氧体材料，指出了高频低损耗铁氧体开发中有待解决的一些问题。

关键词：MnZn 铁氧体；中高频；磁滞损耗；涡流损耗

中图分类号：TM277^{+}.1　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001−3830(2021)03−0085−05

DOI:10.19594/j.cnki.09.19701.2021.03.018

著录格式：张浩翔，王能超，诸葛凯，等 . 中高频低损耗 MnZn 铁氧体材料研发进展 [J]. 磁性材料及器件 ,2021,52(3):85−89.

Progress in the research and development of medium and high frequency low loss MnZn ferrite materials

ZHANG Hao-xiang, WANG Neng-chao, ZHUGE Kai, CHE Sheng-lei

Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

Abstract: With the application of the third generation wide band gap semiconductors, the miniaturization of power devices puts forward the urgent demand for high frequency low loss Mn-Zn ferrite materials. In this paper, the mechanism of lowering power losses of Mn-Zn power ferrites applied to the frequency of 500 kHz and above is analyzed. The development history of high frequency Mn-Zn ferrites is summarized. Some problems to be solved in the development of high frequency and low loss ferrite are pointed out.

Key words: MnZn ferrites; high frequency; hysteresis loss; eddy current loss

一、引言

MnZn 铁氧体是一种重要的软磁材料，由于其高的起始磁导率 (μ_i)、高的磁通密度 (B_s)、相对较高的居里温度 (T_C) 等一系列优良性能，在开关电源等功率器件中得到了广泛的应用 [1−3]。

随着 GaN、SiC 等第三代宽禁带半导体技术逐步走向实用化 [4]，电子器件朝着小型化、高频化、高度集成化、多功能化、可穿戴化的方向加速发展。然而，高频低功耗软磁材料的开发已严重滞后于因 GaN 等第三代半导体的应用而加速发展的高频功率器件的技术需求，成为制约开关电源等磁性器件发展的瓶颈。所以，开发高频性能优异的软磁铁氧体材料已成为了磁性材料领域的热点之一。

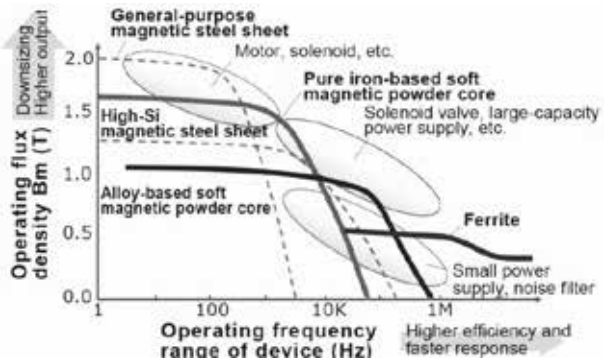


图 1 各类软磁功率材料工作条件 [5]

图 1 显示了各类软磁功率材料的工作条件。可以看出，只有铁氧体材料在中高频下仍然拥有较低的损耗。铁氧体软磁材料主要有 MnZn 铁氧体和 NiZn 铁氧体两大类，NiZn 铁氧体虽然可用

通讯作者：车声雷　　E−mail: cheshenglei@zjut.edu.cn

于 10MHz ~ 1.5GHz 的高频[6]，但其饱和磁通密度和磁导率偏低；MnZn 铁氧体兼具高饱和磁通密度、低功耗和高磁导率，已在 10 ~ 500kHz 频段的功率转换中得到了广泛应用。

为了尽快开发出可以匹配第三代宽禁带半导体驱动的高频电源的 MnZn 铁氧体材料，TDK、日立金属、飞磁等公司开始了激烈的开发竞争。TDK 公司于 2017 年底推出了一种专门为配备基于 GaN 功率半导体的高频开关电源及变频器应用而开发的高频低损耗 MnZn 铁氧体材料——PC200，此材料的使用频率范围为 700kHz 至 4MHz，与 PC50 相比可将功率密度提高约 50%[7]。但是仍需进一步优化，以满足高频电源等功率器件的要求。

中国是世界最大的磁性材料生产国，由于磁性材料产业起步相对较晚，虽然目前占据了世界磁性材料市场的最大份额，但是在顶尖产品的大规模生产上，仍与国外一些大企业有一定的差距，高频 MnZn 铁氧体的性能上更有较大的差距。因此，深入研究高频 MnZn 铁氧体材料，为我国功率器件和电子产业的发展提供材料支撑成为当务之急。

二、高频低功耗对 MnZn 铁氧体材料的要求

MnZn 功率铁氧体的功率损耗 P_{cv} 主要由磁滞损耗 P_{hv}、涡流损耗 P_{ev} 和剩余损耗 P_{rv} 构成。如图 2 所示，在中低频范围，如高导 MnZn 铁氧体，剩余损耗占比很小甚至可以忽略不计。高频中强场下，功率损耗的构成可以用以下经验式表述[8]：

$$P_{cv} = P_{hv} + P_{ev} + P_{rv} = K_H B_m^3 f + \frac{K_E D^2 B_m^2 f^2}{\rho} + P_{rv} \quad (1)$$

式中，P_{cv} 为总损耗，P_{hv}、P_{ev}、P_{rv} 分别为磁滞损耗、涡流损耗、剩余损耗，K_H 和 K_E 分别是常数，D 是平均晶粒尺寸 (μ_m)，B_m 是磁感应强度 (mT)，f 是频率 (kHz)，ρ 是电阻率 (Ω·m)。此经验公式在铁氧体的材料开发和工艺研究中具有很重要的指导意义。在 500kHz 及以上的中高频，剩余损耗逐渐占据主导地位，同时随着频率的增高，涡流损耗也会大幅度增高。高频下剩余损耗 Prv 主要来自畴壁共振和自然共振[6]，一般 Prv 与频率 f 的关系为 3 次及以上的指数函数[9]。

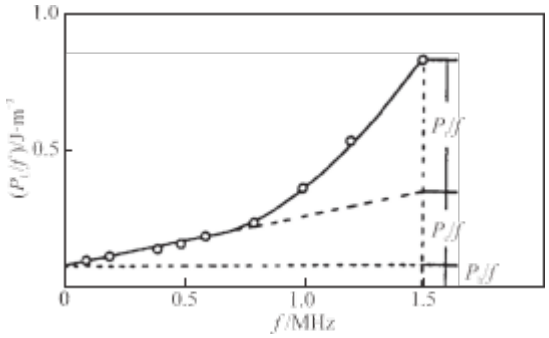


图 2 功率损耗的构成与频率的关系[8]

由于在高频下出现的剩余损耗和大幅度增高的涡流损耗，对降低 MnZn 功率铁氧体材料的功耗又提出了更高的要求。降低其功耗的主要措施是细化晶粒和提高截止频率。

(1) 细化晶粒。晶粒的细化不仅可以减小涡流损耗，也可增大单畴晶粒所占的比例、提高截止频率。通过优化烧结工艺，降低烧结温度以细化晶粒，以及加入 Ta_2O_5、Nb_2O_5 等添加剂，促进晶粒均匀致密。图 3 为 Jeong 等人[10]研究的不同晶粒大小的 MnZn 铁氧体材料在 25mT、100℃下的单位频率损耗随频率的变化，可以看到，晶粒小的铁氧体材料的损耗表现明显更好；第二是提高晶界电阻，通常是选择加入适量的 $CaO–SiO_2$ 组合，Ca^{2+} 会向晶界偏析，促使晶粒均匀、晶界明显，同时与 Si^{2+} 一同提高晶界的电阻，使涡流损耗降低。

(2) 提高截止频率。磁导率的截止频率机制在于高频下先后发生畴壁共振和自然共振，为了减小大幅度增高的剩余损耗，首先要单畴化，以提高截止频率。500kHz/10mT 下不同晶粒尺寸材料的功耗实验表明：单双畴晶粒以 4μm 为界，体积功耗相差一倍，出现突变[6]。因为单畴颗粒中不存在畴壁和畴壁共振损耗，从而使剩余损耗降低。所以单畴化也是制备高频低功耗 MnZn 铁氧体的一个重要方法。

三、研究进展

随着市场的迅速发展，材料的日新月异，为了应对开关电源的高频化、小型化发展，开关电源的工作频率从原来的几十 kHz 到了现在的几 MHz，铁氧体材料也经过了四代的发展。为了应对这种变化，研制出在中高频下 (0.5 ~ 3MHz) 拥

有优异性能的功率铁氧体材料成为了当前研究的重中之重。近年来，高频 MnZn 功率铁氧体的研究又掀起了一轮新的高潮。现将高频 MnZn 铁氧体的研究历程简述如下。

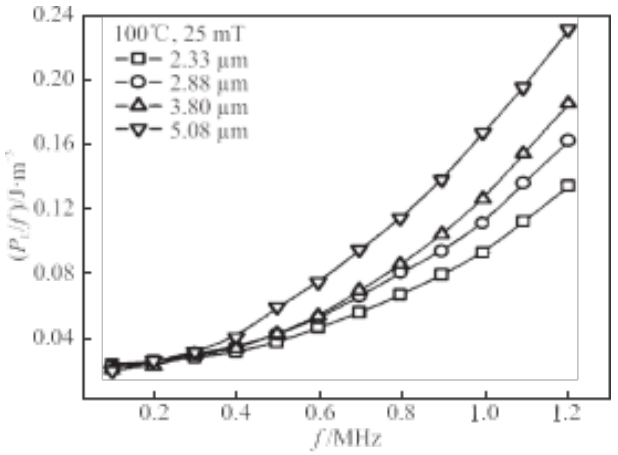


图 3 25mT、100℃下，不同晶粒尺寸的铁氧体材料单位频率损耗 (PL/f)[10]

1992 年 Ishin 等 [6,11] 报导，在 MnZn 铁氧体中添加 0.02 ~ 0.04mol%Ta_2O_5，不仅有利于降低涡流，还可细化晶粒使高频损耗下降 40 ~ 50%。

1993 年 Ionue 等 [6,8] 对 MnZn 功率铁氧体高频、中等强度磁场 (B_m/B_s=0.3 ~ 0.8) 下的损耗作了大量研究，包括分离磁芯损耗的每周功耗 (P_L/f) 表示式，并给出从低频到 1.5GHz(B_m=80mT,80℃) 的每周功耗 (P_L/f) 分离曲线，指出在高频高温下剩余损耗 P_r 为磁芯损耗的主要来源。

1997 年，Tung M J 等人 [12] 研究了晶界阻抗对 MnZn 铁氧体在 1MHz 以上的损耗的影响。固定 f × B=25kHz · T，测试 500kHz~5MHz 下的损耗，分析得到在中高频 (1.2~3MHz) 范围内介电损耗占主导，并指出减小中高频段的晶界电容可以提高材料的性能。

1999 年，荷兰 Philips 实验室的 Zaag P 等人 [13] 采用中子去极化技术和磁力显微镜对 MnZn 铁氧体的单畴晶粒临界尺寸进行了大量的实验研究，指出 MnZn 铁氧体单畴晶粒临界尺寸为 3.8 ± 0.7 μm，并且当晶粒为单畴结构时，高频软磁铁氧体的功耗明显下降。

2000 年，日本的 kawano 和 Fujita 等人 [14] 分析讨论了不同 MnZn 铁氧体组分下材料中 Fe^{2+} 离子浓度、复数磁导率及在 1MHz/50mT 下的磁芯损耗，分析磁芯损耗与复数磁导率虚部间的关系。这为研究高频功耗提供了重要的实验参考。

2002 到 2003 年韩国成均馆大学材料工程系 Han Y H 小组 [15-16] 详细分析了 1MHz/25mT 下 MnZn 铁氧体的磁芯损耗与晶粒尺寸间的关系，重点讨论了剩余损耗与晶粒尺寸的关系；他们修正了 1MHz 下 MnZn 铁氧体的损耗表达式，分析了电阻率随频率的变化，详细讨论了材料的复数磁导率。

2005 年，Zaspalis V T 和 Eleftheriou E 等人 [17] 探究 TiO_2 通过何种途径影响多晶 MnZn 铁氧体的磁芯损耗及电阻率。研究发现，TiO_2 可促进沿晶界的 Ca 和 Si 的均匀累积，而 Ca 和 Si 在晶界处富集可归咎于阳离子空位浓度的增大，而空位浓度增大与四价 Ti^{4+} 进入尖晶石铁氧体晶格有关。

2008 年，Beatrice C 等人 [18] 研究了 MnZn 铁氧体的磁损耗和磁导率频谱，认为涡流损耗在 10MHz 范围内贡献非常低，作者还分离了畴壁位移贡献的损耗和磁畴转动引起的损耗，认为磁畴转动机制所产生的自然共振损耗为 MHz 频段主要的磁损耗来源。

2010 年，横店集团东磁股份有限公司 [19] 在已开发的 DMR50 材料基础上，采用传统的陶瓷工艺及低温烧结技术，制备了一种在高频下具有更低功耗的材料 DMR50B，其截止频率高达 4MHz。在较宽的温度范围、100kHz~3MHz 的工作频率范围内，材料的功耗均小于 200kW/m^3。在 700kHz/30mT、100℃下的功耗只有 20kW/m^3 左右。

2014 年，日本 TDK 公司 [20] 研究了 Co 离子掺杂的 MnZn 铁氧体的磁芯损耗的高温度稳定性。发现加入 Ti、Co 离子共掺杂 MnZn 铁氧体磁芯损耗的高温度稳定性提高显著，是适合汽车用的低损耗高温稳定性材料。

2016 年，Kogias G 等人 [21] 研制了 500kHz 新型宽温 MnZn 铁氧体材料。通过探究 Sn、Co 离子的掺杂，获得了谷点温度在 80℃左右的宽温材料。

2017 年，浙江工业大学磁电功能材料研究所王佳丽等人 [22] 研制了一种高温高频低功耗高 B_s(519mT(25℃)、453mT(100℃)) 的 MnZn 铁氧体材料，其晶粒尺寸 2~3 μm，截止频率 8.2GHz。

在 1MHz/30mT、0~120℃范围内 P_{cv} 值都保持在 100kW/m^3 以下，谷点温度 120℃附近，P_{cv} 仅为 51kW/m^3。该团队近期又开发了适用于 500kHz、100mT 的高频高磁通密度 MnZn 铁氧体新材料[23]，其功率损耗比日立金属 2018 年发布的 ML27D 及 Kogias G 等 2016 年发表的实验结果[21]降低 40%以上。

在产品开发方面，TDK、日立金属和飞磁三家公司均发布了适用于 500kHz~3MHz 频率段的中高频 MnZn 铁氧体，分别构筑了各自的高频低功耗 MnZn 铁氧体产品系列，以图抢先覆盖 SiC 和 GaN 半导体驱动高频开关电源的工作频率范围。国内的一些公司和高校也积极开展了这方面的研究和开发，并取得可喜的进展。

目前，有许多 MnZn 功率铁氧体产品在中高频的频率下性能非常优异，表 1 列举了 TDK、日立金属、东磁、天通、飞磁等公司的几种典型中高频 MnZn 功率铁氧体的性能参数。

表 1 世界典型高频 MnZn 功率铁氧体及其性能 (100℃)

材料	所属公司	μ_i	Pcv/kW·m^{-3}					
			500kHz /50mT	500kHz /100mT	1MHz /50mT	2MHz /30mT	3MHz /10mT	B_s/mT (H=1194A/m)
PC50	TDK	1400	80		450			410
PC200	TDK	800	60		180	200	60	410
ML27D	日立金属	2600	136	720				410
ML91S	日立金属	900			105	148	156	430
3F46	Ferroxcube	750			170		50	430
DMR50B	DMEGC	1500	150		510		260	410
TP5	TDG	1400	80		500			380

四、发展方向

在目标功耗水平一定的条件下，功率转换用磁器件的功率转换能力正比于工作时交变场的最大磁通密度 Bm 和频率 f 的乘积 f·Bm，此值越大，则说明所用材料在该条件下的电磁转换能力越高。这个乘积被功率器件行业用作评价电磁转换器件用软磁材料的性能参数和选择材料的指标。

现阶段的研究思路大多局限于提高材料的工作频率 f，但是在 MHz 频率段，随着磁通密度 B_m 和频率 f 的提高，现有材料均呈现出功耗急剧增大的趋势，因此目前的材料在 2~5MHz 频率段几乎都只能在 10mT、30mT 等较低的磁通密度下工作，仍不能满足电源行业通过高频化实现小体积、大容量、高能效的要求。所以，应该着眼于在控制功耗的前提下提高 f·B_m，而不是单纯地追求更高的频率，以有效地提高器件的功率密度，实现小型化和高能效化。

参考文献：

[1]Xu Z, Yu Z, Sun K, et al. Microstructure and magnetic properties of Sn-substituted MnZn ferrites [J]. J Magn Magn Mater, 2009, 321(18): 2883-2889.

[2]Kogias G, Zaspalis V T. Temperature stable MnZn ferrites for applications in the frequency region of 500 kHz [J]. Ceram Int, 2016, 42(6): 7639-7646.

[3]Wei Z, Zheng P, Zheng L, et al. Effect of TiO2, and Nb2O5, additives on the magnetic properties of cobalt-modified MnZn ferrites [J]. J Mater Sci: Mater Electron, 2016, 27(6): 6048-6052.

[4] 何亮，刘扬．第三代半导体 GaN 功率开关器件的发展现状及面临的挑战 [J]. 电源学报，2016, 14(4): 1-13.

[5]Ueno T, Tsuruta H, Saito T, et al.Practical and potential applications of soft magnetic powder cores with superior magnetic properties [J]. SEI Technical Review, 2016, No.82: 9-15.

[6] 韩志全，铁氧体及其磁性物理 [M]. 北京：航空工业出版社，2010, 236, 217, 227-230, 95 .

[7]TDK.Ferrites and accessories [EB/OL]. https://cn.tdk-electronics.tdk.com/, 2017.

[8]Ionue O, Matsutani N, Kugimiya K. Low loss MnZn-ferrites: Frequency dependence of minimum power loss temperature [J]. IEEE Trans Magn, 1993, 29: 3532.

[9] 黄爱萍，何华辉，冯则坤，等．功率 MnZn 铁氧体材料的损耗分离 [J]. 电子元件与材料，2007, 26(11): 63-66.

[10]Jeong W H, Han Y H, Song B M. Effects of grain size on the residual loss of Mn-Zn ferrites [J]. J Appl Phys, 2002, 91(10): 7619-7621.

[11]Ishin K, et al. [A]. Digests ICF-6, 1992: 27.

[12]Tung M J, Tseng T Y, Tsay M J, et al. The Effect of grain boundary impedance on the power loss of Mn-Zn ferrites over 1 MHz [J]. Journal de Physique IV (France), 1997: C1-C129.

[13]Zaag P. New views on the dissipation in soft magnetic ferrites [J]. J Magn Magn Mater, 1999, 5: 315-319.

[14]Kawano T, Fujita A, Gotoh S. Analysis of power loss at high frequency for MnZn ferrites [J]. J Appl Phys, 2000, 87(9): 6214-6216.

[15]Jeong W H, Song B M, Han Y H, et al. Analysis of Power Losses in Mn-Zn ferrites [J]. Jpn J Appl Phys, 2002, 41: 2912-2915.

[16]Jeong W H, Han Y H, Song B M. Effects of grain size on the residual loss of Mn-Zn ferrites [J]. J Appl Phys, 2002, 91(10): 7619-7621.

[17]Zaspalis V T, Eleftheriou E. The effect of TiO2 on the magnetic power losses and electrical resistivity of polycrystalline MnZn-ferrites [J]. J Phys D: Appl Phys, 2005, 38(13): 2156-2161.

[18]Beatrice C, Fiorillo F, Landgraf F J, et al. Magnetic loss, permeability dispersion, and role of eddy currents inMn-Zn sintered ferrites [J]. J Magn Magn Mater, 2008, 320(20): e865-e868.

[19]Liu Y, He S. Development of high DC-bias Mn-Zn ferrite working at frequency higher than 3 MHz[J]. J Alloys Compds, 2010, 489(2): 523-529.

[20]Mori K, Yasuhara K, Nakahata I, et al. High temperature stability of Co-doped MnZn ferrites for automobiles [J]. J Jpn Soc Powder Powder Metall, 2014, 61: S224-S226.

[21]Kogias G, Zaspalis V T. Temperature stable MnZn ferrites for applications in the frequency region of 500 kHz [J]. Ceram Int, 2016, 42(6): 7639-7646.

[22] 王佳丽 , 诸葛凯 , 应耀 , 等 . 高温高频低功耗 MnZn 功率铁氧体制备及磁性能 [J]. 磁性材料及器件 , 2018, 49(5): 16-19, 27.

[23] 应耀 , 王能超 , 张浩翔 , 等 . 适用 500kHz 高磁通密度的宽温低损耗 MnZn 铁氧体 [J]. 浙江工业大学学报 , 2021, 49(1): 94-98, 118.

作者简介： 张浩翔 (1994—)，男，汉族，浙江嘉兴人，硕士研究生，研究方向为低损耗功率铁氧体。

复合永磁锶铁氧体及其研究进展

安徽工业大学　夏爱林

一、研究背景

●永磁材料

Nd–Fe–B
超强磁体
价格昂贵
居里温度低

Sm–Co
超强磁体
居里温度高
价格昂贵

铁氧体 ($SrFe_{12}O_{19}$,SrM)
化学稳定性好
性价比高
综合磁性能略差

另外：AlNiCo,FeCrCo,SmFeN……(合金)

●如何提高SrM铁氧体的磁性能?

1. 离子替代

特别是稀土离子替代 :La–Ca,La–Co,Nd,Sm,Gd, Ce, Dy, Tb……

Substitution(s)	Nominal composition	Ref(s).
Nd	$SrNd_xFe_{12-x}O_{19}(0 \leqslant x \leqslant 1)$	Mater. Chem. Phys. 141 (2013) 562
Re=Y,La,Ce,Pr,Nd, Sm and Gd	$Sr_{0.9}RE_{0.1}Fe_{10}Al_2O_{19}$	J. Alloy. Compd. 550 (2013) 198
Tb	$Ba_{0.5}Sr_{0.5-x}Tb_xAlFe_{11}O_{19}$	J. Alloy. Compd. 550 (2013) 564
La–Cu	$Sr_{1-x}La_xFe_{12-x}Cu_xO_{19}$	J. Magn. Magn. Mater. 411 (2016) 62
La–Ca	$Sr_{0.65-x}Ca_xLa_{0.35}Fe_{11.32}Co_{0.28}O_{18.435}$	IEEE Trans. Magn. 50 (2014) 2201606
Mn–Zn	$SrFe_{12-2x}Mn_xZn_xO_{19}$	J. Magn. Magn. Mater.382 (2015)10 J. Magn. Magn. Mater. 374 (2015)80
Y–La–Co	$Sr_{0.95-x}Y_{0.05}La_xFe_{11.75}Co_{0.25}O_{19}$	J. Magn. Magn. Mater. 445 (2018) 1
DyAl	$SrFe_{12-x}(DyAl)_xO_{19}$	J. Alloy. Compd. 701 (2017) 138

2. 改进制备方法

氧化物法，水热法，凝胶 – 溶胶法，化学共沉淀法……

Methods	Ref(s).
Traditional ceramic method	Ceram. Int. 40 (2014) 4033 Ceram. Int. 44 (2018) 13551 J. Alloy. Compd. 784 (2019) 276
Hydrothermal method	J. Alloy. Compd. 653 (2015) 108 J. Magn. Magn. Mater. 332 (2013) 186 Mater. Res. Bull. 63 (2015) 58
Sol–gel method	J. Magn. Magn. Mater. 374 (2015) 173 J. Magn. Magn. Mater. 389 (2015) 101 J. Magn. Magn. Mater. 393 (2015) 325
Molten salt	J. Magn. Magn. Mater. 307 (2006) 295

3. 制备复合物

利用软、硬磁相之间的交换耦合作用

最有希望提升永磁铁氧体的磁性能 , 主要问题是复合后矫顽力的下降

Composites	Ref(s).
$(Ni, Zn)Fe_2O_4/SrFe_{12}O_{19}$	J. Alloy. Compd. 768 (2018) 742 RSC Adv. 4 (2014) 18885 J. Phys. D: Appl. Phys. 47 (2014) 415004
$CoFe_2O_4/SrFe_{12}O_{19}$	J. Alloy. Compd. 653 (2015) 108 Mater. Sci. Eng. B 207 (2016) 47
$Fe–Co/SrFe_{12}O_{19}$	Mater. Lett. 120 (2014) 9
$Fe_3O_4/SrFe_{12}O_{19}$	J. Am. Ceram. Soc. 95 (2012) 60
$NiFe_2O_4/SrFe_{12}O_{19}$	Appl. Surf. Sci. 273 (2013) 684

近年来，安工大“磁性功能材料课题组”在 SrM 铁氧体方面作了系统的工作：发表 10 余篇论文，授权 9 项国家发明专利。

Method	Selected publications(截止 2022.04 被引用次数)
Different preparation/ synthesis methods	J. Magn. Magn. Mater. 332 (2013) 186 – 191(129 次) J. Magn. Magn. Mater. 393 (2015) 325 – 330(19 次) Ceram. Int. 44 (2018) 13551 – 13555 (15 次) J. Alloy. Compd. 784 (2019) 276–281(9 次) J. Phys. Chem. Solid. 163 (2022) 110565

Method	Selected publications(截止 2022.04 被引用次数)
Preparing composite ferrites	J. Phys. D: Appl. Phys. 47 (2014) 415004 (11pp) (37 次) RSC Adv. 4 (2014) 18885 – 18888(19 次) J. Alloy. Compd. 649 (2015) 760–765(6 次) J. Alloy. Compd. 653 (2015) 108–116(41 次) J. Magn. Magn. Mater. 417 (2016) 355 – 358(19 次)
Ion substitution	J. Supercond. Nov. Magn. 31 (2018) 1247 – 1251(14 次)

二、单相 $SrFe_{12}O_{19}$ 铁氧体

●特色研究工作

➢SrM 铁氧体的水热法制备

J. Magn. Magn. Mater. 332 (2013) 186 – 191

➢ 采用蛋清蛋白为金属离子络合物的溶胶 – 凝胶法制备 SrM 铁氧体

J. Magn. Magn. Mater. 393 (2015) 325 – 330

➢ 前驱体形貌对 SrM 铁氧体磁性能的影响

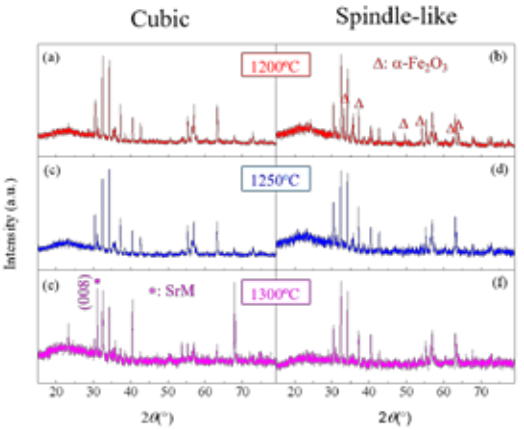
1 ）Ceram. Int. 44 (2018) 13551 – 13555

2 ）J. Alloys Compd. 784 (2019) 276–281

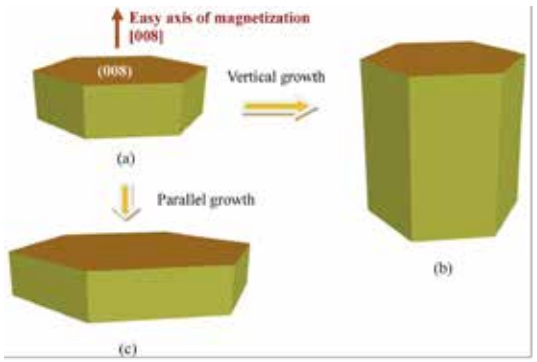
➢ 多孔 SrM 铁氧体

J. Phys. Chem. Solid. 163 (2022) 110565

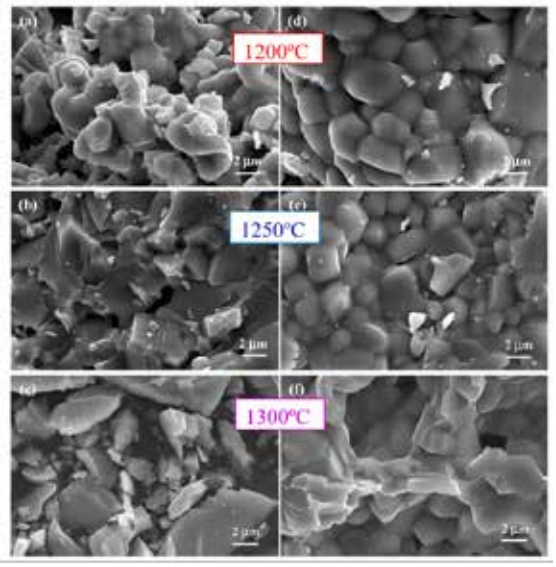
●利用不同形貌α–Fe_2O_3制备SrM铁氧体



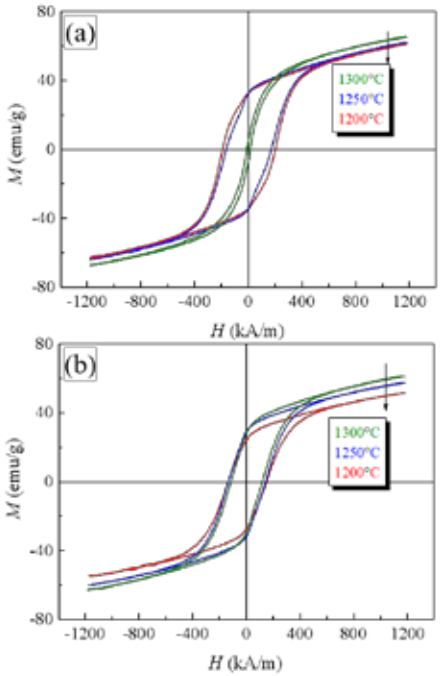
XRD patterns of sintered SrM ferrites using cubic (a,c,d) and spindle-like (b,d,f) α-Fe_2O_3, respectively.



Schematic diagram of growth of (008) crystalline face in hexagonal SrM ferrites



Typical SEM images of sintered SrM ferrites using cubic (a,b,c) and spindle-like (d,e,f) α-Fe_2O_3.

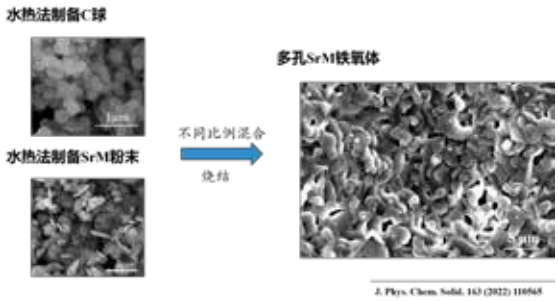


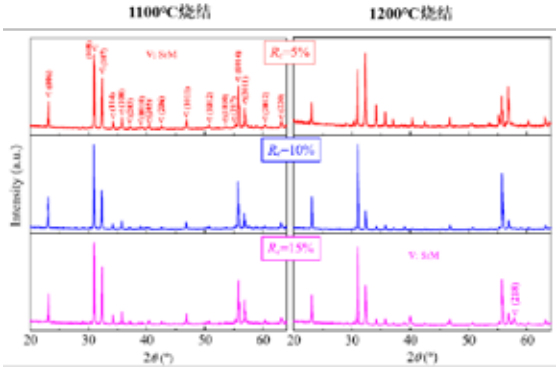
Magnetic properties of sintered SrM ferrites using cubic and spindle-like α-Fe_2O_3, respectively.

Sintering Temperature	α-Fe_2O_3	Ms (emu/g)	Hc (kA/m)
1200°C	Cubic	62.2	195.9
	Spindle-like	53.4	143.1
1250°C	Cubic	63.1	167.8
	Spindle-like	58.9	139.2
1300°C	Cubic	66.4	12.4
	Spindle-like	62.3	116.8

RT Magnetic hysteresis loops of sintered SrM ferrites using cubic (a) and spindle-like (b) α-Fe2O3, respectively.

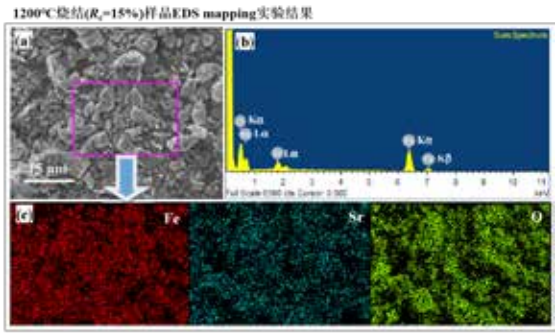
●多孔 SrM 铁氧体





➢ 高温烧结后并没有出现新的杂质。

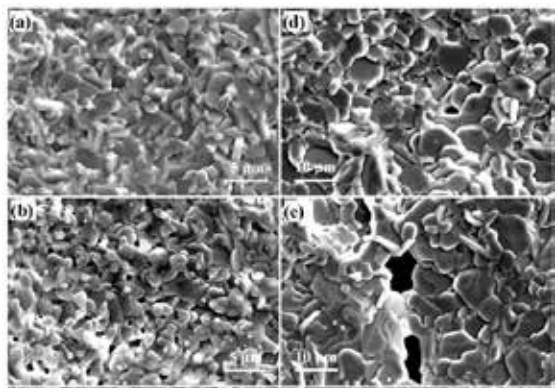
➢ 高温烧结后样品中的 C 基本上完全挥发，样品中各元素分布均匀。

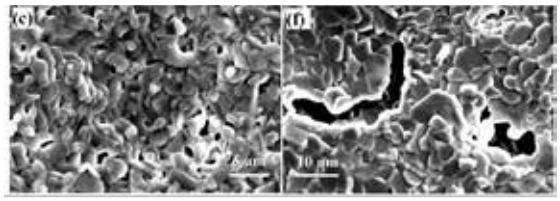


碳硫分析仪测试的1200℃烧结样品的C含量

R_c	5%	10%	15%
Carbon content (%)	0.037	0.031	0.033

J. Phys. Chem. Solid. 163 (2022) 110565

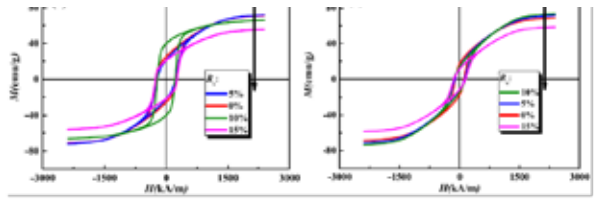




Typical SEM images of porous specimens sintered at 1100℃ (a–c) and 1200℃ (d–f). *Rc*: (a, d) 5%; (b, e) 10%; (c, f) 15%.

➢C 球挥发形成孔洞，1200℃烧结样品由于孔洞合并长大，形成长条状空隙

➢ 少量 C 球可以提高样 品的 Ms，但是其 Hc 变化相对复杂。



Magnetic properties of porous SrM specimens after sintering.

T_s (℃)	R_c	M_s (emu/g)	H_c kA/m	Oe
1100	0	71.30	159.32	2000.57
	5%	71.70	224.43	2818.04
	10%	66.10	215.60	2707.54
	15%	55.72	209.55	2631.95
1200	0	60.76	111.95	1406.10
	5%	71.50	121.66	1528.08
	10%	73.30	145.77	1830.87
	15%	65.85	144.54	1815.46

J. Phys. Chem. Solid. 163 (2022) 110565

三、$SrFe_{12}O_{19}$ 基复合物

●SrM/$(Ni,Zn)Fe_2O_4$, SrM/$CoFe_2O_4$ 复合铁氧体

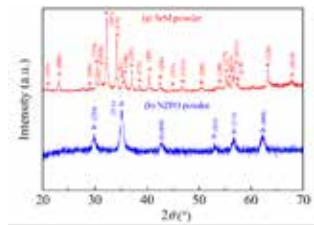
➢ 利用水热法制备铁氧体前驱体粉末；

➢ 纳米粉末可以更好地实现软、硬磁之间的交换耦合作用

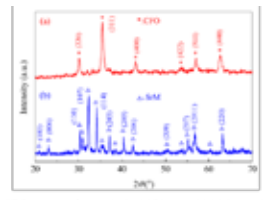
➢ 复合铁氧体的制备：

◆ 700 ℃ (900 ℃) 烧结的 SrM/NZFO 和 SrM/CFO 铁氧体分别命名为 S/N–700(900) and S/C–700(900).

➢ 结果与讨论

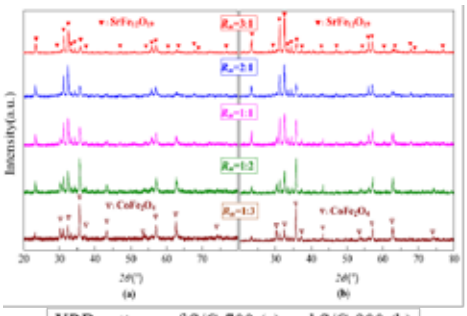


XRD patterns of as-synthesized SrM and NZFO powders



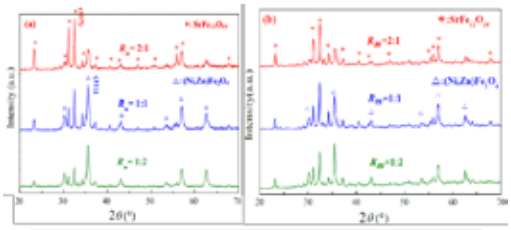
XRD patterns of as-synthesized CFO (a) and SrM (b) powders

J. Phys. D: Appl. Phys. 47 (2014) 415004 (11pp)
J. Alloy. Compd. 653 (2015) 108-116



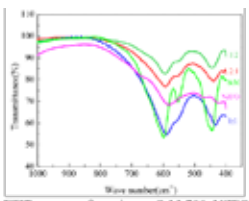
XRD patterns of S/C-700 (a) and S/C-900 (b) with different R_m.

➢ 高温烧结后并没有出现新的杂质。

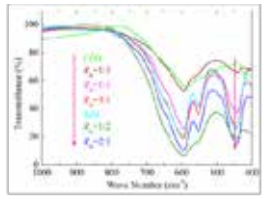


XRD patterns of the composite bulk ferrites S/N-700 (a) and S/N-900 (b) with different R_m

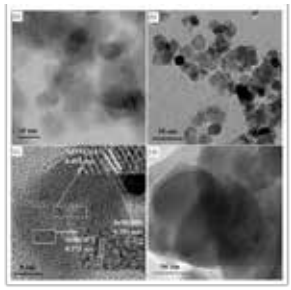
J. Phys. D: Appl. Phys. 47 (2014) 415004 (11pp)
J. Alloy. Compd. 653 (2015) 108-116



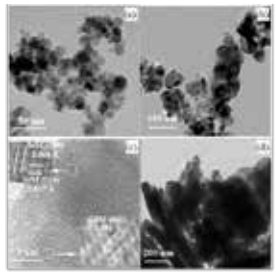
FTIR spectra of specimens SrM-700, NZFO-700 and S/N-700 with different R_m



FTIR spectra of specimens SrM-900, CFO-900 and S/C-900 with different R_m



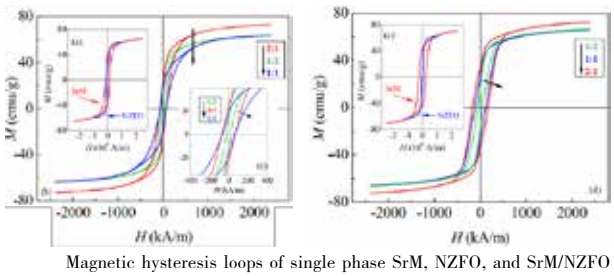
(a): HRTEM image of lattice fringes of powder before sintering; (b): TEM morphologies of crystallites in S/N-700; (c): HRTEM image of lattice fringes in S/N-700; (d): TEM morphologies of crystallites in S/N-900. (a-d): R_m=1:1.



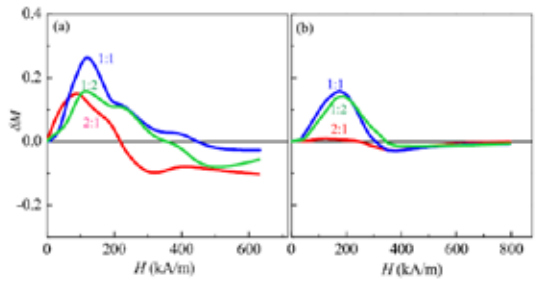
(a, b): Typical TEM morphologies of as-synthesized hydrothermal CFO powder and S/C-700, respectively; (c): HRTEM image of lattice fringes in S/N-700; (d): Typical TEM morphologies of S/C-900. (b-d): R_m=2:1.

J. Phys. D: Appl. Phys. 47 (2014) 415004 (11pp)
J. Alloy. Compd. 653 (2015) 108-116

●SrM/(Ni,Zn)Fe_2O_4复合铁氧体



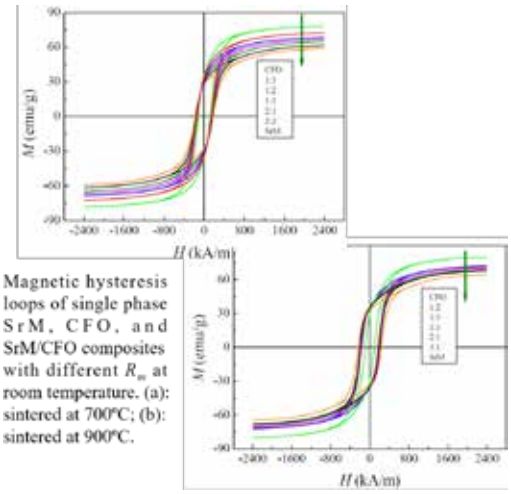
Magnetic hysteresis loops of single phase SrM, NZFO, and SrM/NZFO composite ferrites with different Rm at room temperature. (a,b): sintered at 700℃; (c,d): sintered at 900℃; (e): the magnified MHLs near the coercivity of (b).



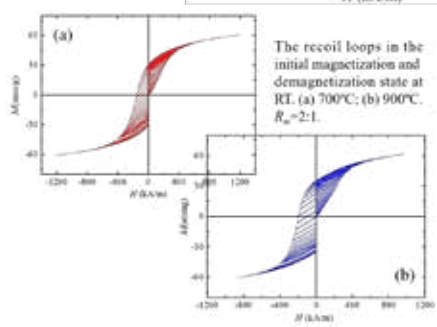
Henkel plots (δ M – H) of composite ferrites with different Rm at room temperature. (a): S/N–700; (b): S/N–900

J. Phys. D: Appl. Phys. 47 (2014) 415004 (11pp)

●SrM/$CoFe_2O_4$复合铁氧体



Magnetic hysteresis loops of single phase SrM, CFO, and SrM/CFO composites with different R_m at room temperature. (a): sintered at 700℃; (b): sintered at 900℃.



The recoil loops in the initial magnetization and demagnetization state at RT. (a) 700℃; (b) 900℃. R_m=2:1.

- The irreversible sloping recoil loop suggests the existence of exchange coupling in all the composite specimens.

J. Alloy. Compd. 653 (2015) 108-116

● SrM/(Ni,Zn)Fe_2O_4, SrM/$CoFe_2O_4$ 复合铁氧体

SrM/(Ni,Zn)Fe2O4, SrM/CoFe2O4 复合铁氧体

Magnetic properties of SrM, NZFO and SrM/NZFO composites sintered at different temperatures.

Specimen	700℃		900℃	
	M_s(emu/g)	H_c(kA/m)	M_s(emu/g)	H_c(kA/m)
R_m =2:1	65.8	68.2	72.3	173.1
R_m =1:1	63.4	64.1	65.9	118.7
R_m =1:2	64.1	24.0	66.5	51.6
SrM	65.0	150.1	70.5	239.1

NZFO	60.1	2.5	63.1	2.7

Magnetic properties of SrM, CFO and SrM/CFO composites sintered at different temperatures.

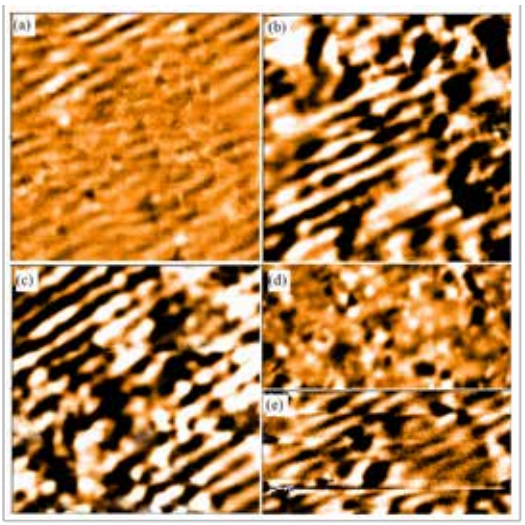
Specimen	700℃		900℃	
	M_s(emu/g)	H_c(kA/m)	M_s(emu/g)	H_c(kA/m)
R_m =3:1	61.6	162.6	68.0	200.7
R_m =2:1	65.1	152.5	68.6	193.9
R_m =1:1	66.9	145.9	70.0	187.4
R_m =1:2	68.6	142.7	72.1	180.1
R_m =1:3	72.4	141.7	71.5	169.2
SrM	59.2	173.1	64.7	232.8
CFO	78.1	123.1	80.0	93.2

➢ 用 CFO 作为软磁性相可以有效提高复合铁氧体的矫顽力。

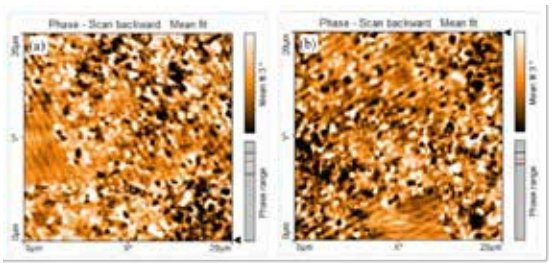
J. Phys. D: Appl. Phys. 47 (2014) 415004 (11pp)

J. Alloy. Compd. 653 (2015) 108-116

●SrM/(Ni,Zn)Fe_2O_4复合铁氧体



Typical 10 μm×10 μm MFM images of specimens S/N-700 with R_m=2:1 (a), R_m=1:1 (b) and R_m=1:2 (c); Typical 10 μm×5 μm MFM images of SrM-700 (d) and S/N-900 with R_m=1:2 (e). Span of chart data range: 3°.

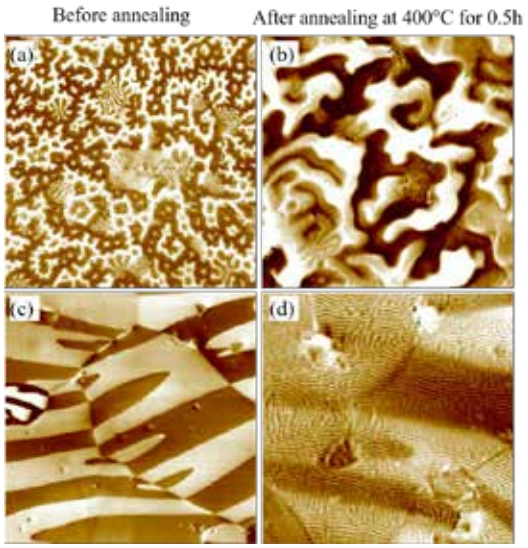


Typical 20 μm×20 μm MFM image of specimen S/N-700 with R_m=1:1; (b): 20 μm×20 μm MFM image detected at the same point of (a) with 90° rotation. Span of chart data range: 3°.

➢ 磁针旋转 90°，磁畴也跟着旋转。

J. Phys. D: Appl. Phys. 47 (2014) 415004 (11pp)

●Sm(CoFeCuZr)$_z$的磁畴结构



Typical 80μm × 80μm (a,b) or 40μm × 40μm (c,d) MFM images of Sm(CoFeCuZr)z specimens perpendicular (a,b) or parallel (c,d) to the orientation direction.

细小的条形畴可能是软磁性层被永磁相磁化的原因。

因此，可以推断 SrM/(Ni,Zn)Fe_2O_4 的条形畴也是来源于软磁性相。

Chin. Phys. Lett. 23(2006)1289-1292

四、结论

●前驱体材料的形貌对最终 SrM 铁氧体的结构和磁性能有较大的影响

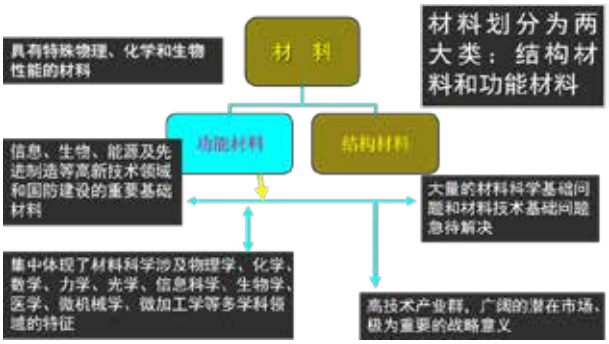
●利用碳球辅助的办法可以制备出多孔状的 SrM 铁氧体，碳球含量对磁体的性能有较大影响。

●采用水热法所得的铁氧体粉末，可以采用高温烧结的办法制备出具有软硬磁两相交换耦合作用的 SrM/(Ni,Zn)Fe_2O_4 和 SrM/$CoFe_2O_4$ 复合铁氧体，且 $CoFe_2O_4$ 作为“软磁性相”效果更佳。

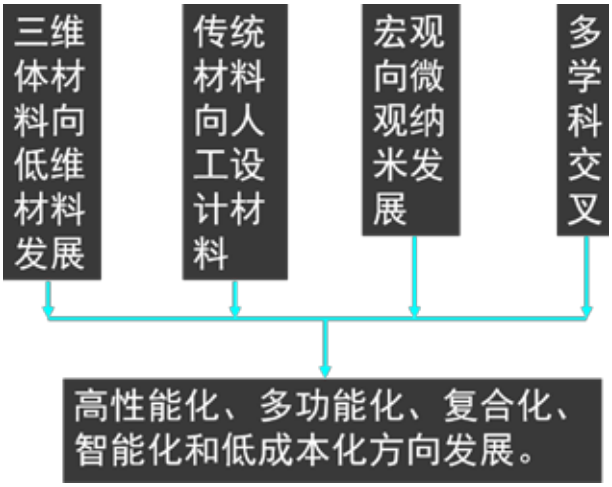
特种金属功能材料国内外发展现状与趋势

一、功能材料简介

●功能材料



●功能材料发展趋势



●功能材料主要特点

1. 功能特殊、性能优异、不可取代

2. 知识密集、技术密集、属高新科技材料，难度大，保密性强。

3. 品种规格多、形状差异大、尺寸精度高。

4. 单件用量少、生产规模小，产品价格较贵，经济效益和社会效益好。

5. 发展迅速，更新换代快。

●功能材料作用和地位：

1. 功能材料在信息时代起到基础和核心作用。

2. 是现代国防的坚强后盾，是决定武器装备是否先进的基础，是决胜的关键因素之一

3. 是国民经济水平的反映，是国民经济收入的主要成分之一。

4. 应用广泛、在许多现代装备系统中，起着大脑、心脏和经络传输等功能。

●功能材料分类：

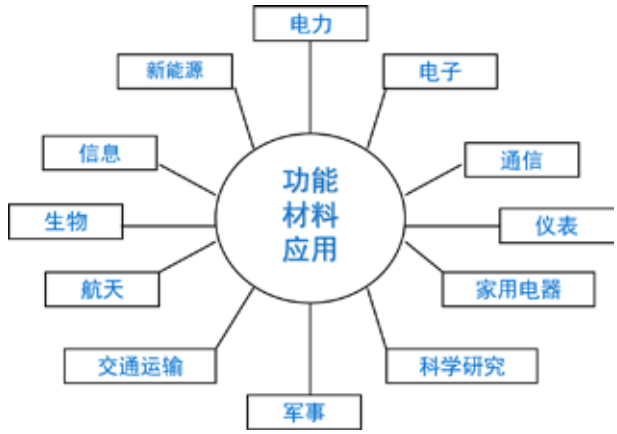
精密合金：软磁、永磁、弹性、膨胀、热双金属、电阻合金

新型功能材料：能源储存与转换材料、超导材料、半导体材料、……

功能材料结构化—结构材料功能化 ⇨ 结构功能一体化

●金属功能材料

●功能材料的应用状况



二、功能材料产业现状和发展趋势

（一）产业现状：

1. 产业体系初步建立

形成了研发、设计、生产和应用，品种和门

类较为齐全的产业体系

2. 产业规模不断壮大

“十五”、“十一五”期间，产业发展迅速，部分材料产能居世界前列

3. 部分关键技术取得重大突破

非晶合金、取向硅钢等达到或接近国际水平

4. 创新能力弱、保障能力差

（二）发展趋势：

1. 新技术的融合：

纳米技术、生物技术、信息技术等与新材料技术的融合

2. 结构与功能一体化

3. 功能材料智能化

4. 战略性新型产业需求

节能环保、信息技术、装备制造、新能源

（三）规划

《决定》中关于新材料产业的论述

大力发展稀土功能材料、高性能膜材料、特种玻璃、功能陶瓷、半导体照明材料等新型功能材料

积极发展高品质特殊钢、新型合金材料、工程塑料等先进结构材料

提升碳纤维、芳纶、超高分子量聚乙烯纤维等高性能纤维及其复合材料发展水平

（四）发展重点

●特种功能材料：

1. 稀土金属功能材料：

提高性能、扩大高端应用、增加产品附加值，发挥资源优势，壮大产业规模。大力发展稀土永磁、发光、储氢、催化、抛光材料产业。

2. 稀有金属材料：

高纯稀有金属靶材、钨钼、铼等及合金制品，硬质合金、原子能级锆材等

3. 半导体材料：

高纯度、大尺寸、低缺陷、高性能、低成本。电子级多晶硅、大尺寸单晶硅、抛光片、外延片等材料，开发 GaN、GaAs、SiC、InP 等半导体，CuInGaSn、CuInS、CdTe 等光伏薄膜材料

4. 其它功能材料：

高磁感取向硅钢、铁基非晶合金带材、超细超纯铜合金

5. 关键装备

●重大工程（专项工程）

1. 高强轻型合金材料专项工程

2. 高性能钢铁材料专项工程

3. 稀土及稀有金属功能材料专项工程

4. 碳纤维低成本化与高端创新示范工程

5. 高性能膜材料专项工程

6. 先进电池材料专项工程

7. 新型节能绿色建材示范应用专项工程

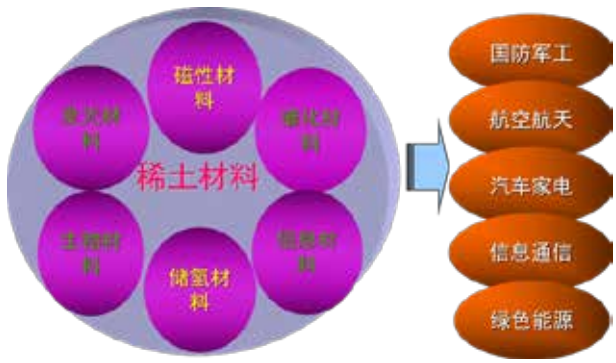
8. 电子信息功能材料专项工程

9. 生物医用材料专项工程

10. 新材料创新能力建设专项工程

三、稀土功能材料

●稀土在新材料中的应用



●稀土功能材料

发达国家：将稀土列为重要战略资源

稀土新材料研究和相关应用产业作为重点发展领域

●稀土材料产业状况分析

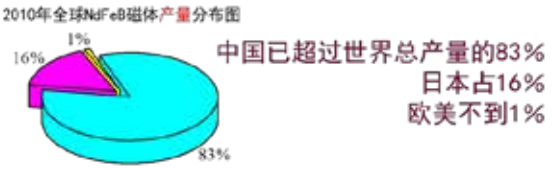
新材料应用比例已上升到应用总量的 53%，

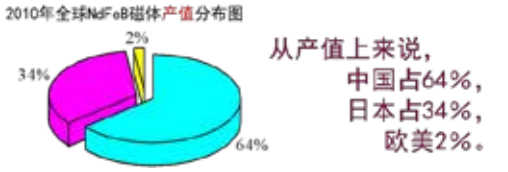
新材料应用中的 64% 为稀土永磁，9% 为稀土储氢合金

稀土永磁材料已成为稀土应用领域中发展最快和最大的产业。

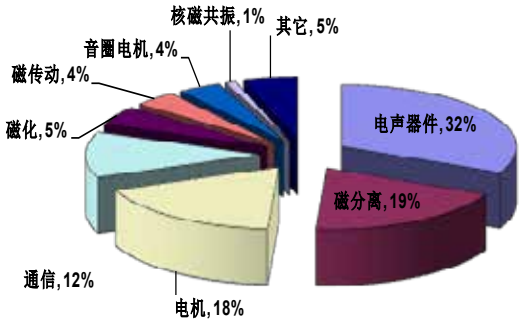
●稀土功能材料：稀土永磁

◆ NdFeB 磁体产量 / 产值分布图

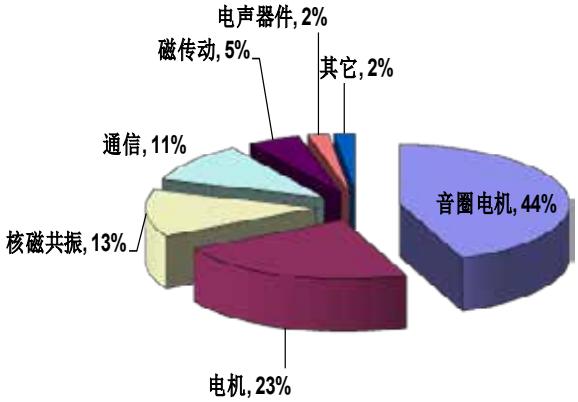




◆钕铁硼产品结构



我国钕铁硼产品结构



日本钕铁硼产品结构

◆ NdFeB 产业存在的问题

1. 专利许可

2. 产业分散

3. 缺乏向元器件和整机一体化发展

4. 高端产品占有率较低，仅为 37% 左右，而日本几乎全部为高端产品；我国生产的磁体磁能积 + 矫顽力在 56–65 之间，在耐高温及超高矫顽力 NdFeB 磁体（磁能积 + 矫顽力≥ 70）的产业化生产上仍存在一定差距。在高技术领域对永磁材料提出更为全面的技术指标要求。

◆我国烧结 NdFeB 研发和产业回顾

“十五”、“十一五”期间，在“863”等国家项目的支持下，我国高性能烧结钕铁硼的研发及产业化取得了一系列可喜的进步。

◎重点解决

产业化各环节关键技术

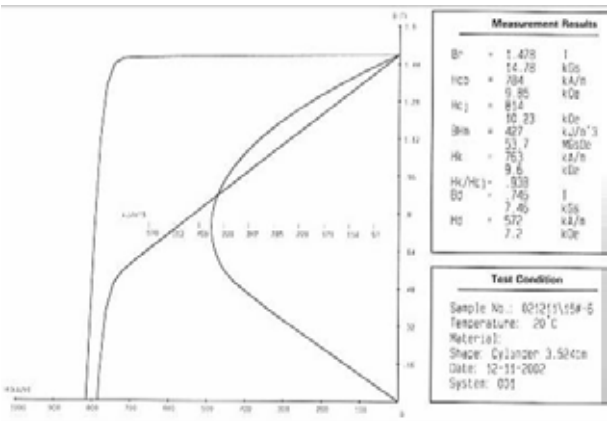
产业化技术装备和工艺

◎提升了

稀土永磁产品档次

国家稀土永磁产业的国际竞争力

◆掌握 N55 系列高档烧结钕铁硼磁体制备技术



解决了千吨级高性能钕铁硼永磁生产线中存在的共性问题，提升了我国烧结钕铁硼产业水平。

四、稀土永磁产业技术发展方向

根据国家战略规划和重大工程

对稀土永磁材料提出新的需求

●重点集中在以下六个方面

◆超高磁能积\超高矫顽力烧结钕铁硼磁体的研制

◆低成本、低重稀土永磁材料的制备

◆粘结稀土永磁材料制备与应用关键技术

◆高性能稀土永磁材料表面处理关键技术

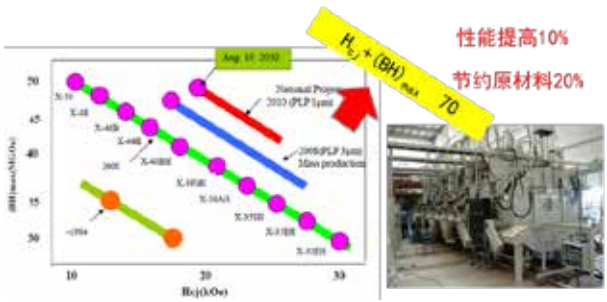
◆先进热压钕铁硼永磁材料及其规模化制备技术

◆高性能稀土永磁材料的温度稳定性和长期服役特性

1. 超高磁能积、超高矫顽力烧结钕铁硼磁体的研制

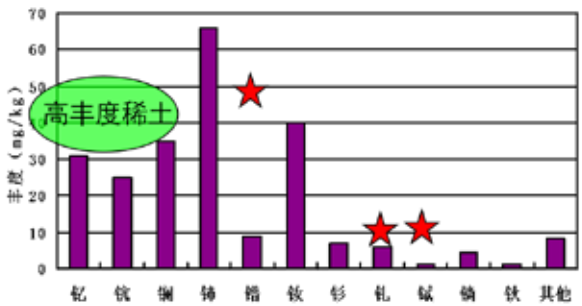
NdFeB 主要指标与理论指标对比

	Br(T)	MOHcJ(T)	(BH)MAX(kJ/m^3)
理论值	1.60	6.7	512
实验值	1.55	0.82	474
达到程度，%	97%	12%	93%



2. 低成本、低重稀土永磁材料的研究 1

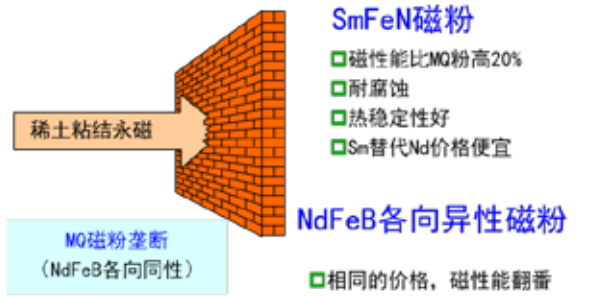
低重稀土\混合稀土



◆使用 La\Ce 等替代 Nd, 平衡利用稀土资源。

3. 粘结稀土永磁材料制备与应用关键技术

粘结稀土永磁是稀土永磁行业的一个重要分支，与烧结磁体的比例大约为 1:10。



4. 高性能稀土永磁材料表面处理关键技术

①钕铁硼磁体基体耐蚀性研究。

②烧结稀土永磁材料表面预处理技术。

③烧结 NdFeB 永磁镀层附着力、老化特性研究

④降低电镀、化学镀污染的产业关键技术

⑤新型表面防护技术的研发。

5. 先进热压钕铁硼永磁材料及其规模化制备技术

6. 高性能稀土永磁材料的温度稳定性和长期服役特性

●稀土功能材料：稀土储氢合金

●稀土储氢合金产量 / 产值

产值: 国内（亿元）、国际（亿美元），其他（万吨）

	国内						国际					
年份	2000	2005	2009	2010	2015	2020	2000	2005	2009	2010	2015	2020
产值	3.5	20	35	40	67	100	3.2	8.5	10.6	12.1	18	27
产能	0.5	1.8	2.1	2.5	5	8	1.5	3	4.0	4.2	6.5	10
产量	0.12	1.3	1.8	2.2	3	4.5	0.7	2.5	3	3.3	4.3	5.2
需求	0.5	1.1	1.5	1.7	2.6	3.4	0.7	1.9	2.4	2.6	3.5	4.4
进出口												

◆ 2010 年全球储氢合金产量分布

中国已超过世界总产量的 60%

日本韩国占 40%

◆ 2010 年全球储氢合金产值分布

中国占 50%

日本韩国占 50%

储氢材料生产主要为中日韩三国。日本质量最好，中国产量最大。主要分布在 8 个省市自治区的 10 多家家企业，年产能 2.5 万吨。

◆储氢产业与日本的主要差距

①大部分企业仍采用传统的熔铸技术和设备，无法有效控制合金的微观组织，产品性能稳定性和一致性有待提高；

②大电流充放电性能差，使用温度窄等，不能满足动力型镍氢电池的需求；

③低自放电储氢合金方面的研究相对滞后，与国外尤其是三洋公司相比还存在很大的差距（循环寿命不到 1000 次，前六个月自放电率大于 15%）。

④下游市场的应用开发环节相对较弱。

●市场需求——混合动力汽车

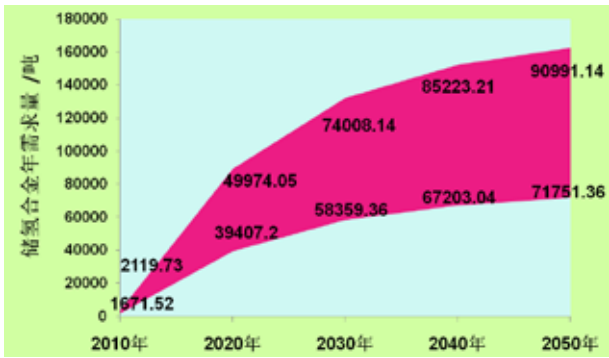
① 1997 年 10 月丰田汽车普锐斯 prius 问世，是世界上最早实现批量生产的混合动力汽车。

② 2010 年 9 月，丰田汽车宣布其混合动力汽车 prius 累计销售突破 200 万辆，未来每年销售目标为 100 万辆。2010 年，普锐斯在美国的销量，占美国新能源汽车销售总量的 70%，市场满意度高达 90%。

表 1 日本电动汽车发展预测

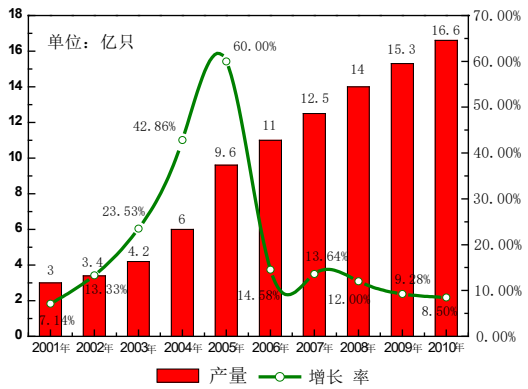
		2010 年	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
EV	万辆	0.3	66.8	214.4	286.3	326.6
	平均年增长 %		2216.7	22.1	3.4	1.4
HEV	万辆	33.7	794.5	1176.6	1354.9	1446.6
	平均年增长 %		225.8	4.8	1.5	0.7
PHEV	万辆	3	131.3	496	693.9	779.7
	平均年增长 %		427.7	27.8	4.0	1.2

根据美国能源部对每辆混合动力车所使用镍氢电池用量的评估（低度混合为 4.96 公斤，高度混合为 6.29 公斤），可以得到，混合动力汽车市场未来的需求，到 2020 年需求量为 3.9 至 5.0 万吨，到 2050 年需求为 7.2 至 9.1 万吨。



●市场需求——小型二次电池

“十二五”期间镍氢电池产量继续保持增长的趋势。



2001 年 ~ 2010 年我国 Ni-MH 的产量和年增长率

●储氢产业发展方向

①动力汽车用稀土储氢材料及动力电池：完善宽温区稀土负极材料产业化技术，实现高性能稀土储氢材料产业化，延长电池寿命、实现电池与整机结合及零部件配套及其在混合动力（电动）汽车中的应用；

②低自放电、低成本稀土储氢材料及器件产业化；

●思考与建议

◆系统研究高性能稀土材料制备过程中各环节的关键技术，实现各主要环节工艺的集成优化，不断提高产品性能，提升产业水平和国际竞争力。

◆加强稀土材料前沿技术及工程化应用技术开发，建立和完善我国稀土材料科技创新体系，推进我国稀土产业相关专利和标准体系的建立。

◆加强下游产业的技术开发，提升高端应用水平，正真形成具有我国资源优势的高科技产业

链。

◆避免稀土价格大幅波动，既要重视上游，也要关注下游，保证稀土产业链健康持续发展，这也关系到我国稀土产业的前途和其在全球的地位。

●新型功能材料

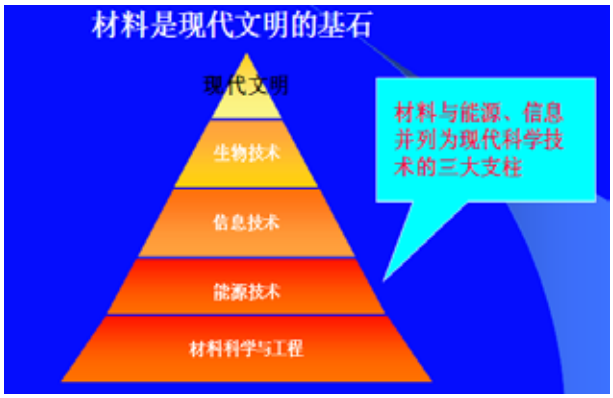
“863”计划：把新型材料定为我国高新技术规划的 7 个主要研究领域之一

“973 计划”：进一步把功能材料技术作为重点的研究项目。

本文介绍目前国内外迅速发展的各种新型功能材料的组成、结构、性能、制备和应用，着重论述反映当代功能材料科学发展的主要前沿领域。如：智能材料、形状记忆材料、梯度功能材料、储氢材料、功能陶瓷材料、超导材料、磁性材料、信息材料、光学功能材料、功能复合材料、生物医用材料等。

五、功能材料概论

一、功能材料发展和分类



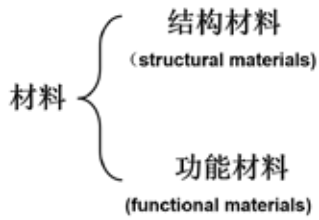
功能材料就是在这一前提下发展起来的。而新型功能材料是指新近发展起来和正在发展中的具有优异性能和特殊功能，对科学技术尤其是对高技术的发展及新产业的形成具有决定意义的新材料。

日本和欧美各国对新型功能材料的研究十分注意，这是因为功能材料是能源、计算机、通讯、电子、激光等现代科学的基础，功能材料在未来的社会发展中具有重大战略意义。

近 10 年来，功能材料成为材料科学和工程领域中最为活跃的部分。每年以 5%以上的速度增长，相当于每年有 1.25 万种新材料问世。未来世界需要更多的性能优异的功能材料，功能材料正在渗透到现代生活的各个领域。

（一）功能材料概况

●按性质和实际应用



●结构材料

利用某些材料具有抵抗外力的作用而保持自己形状和结构不变的优良力学性能（例如强度和韧性）来制造工具、机械、车辆以及修建房屋、桥梁、铁路等，这些材料统称为结构材料。

●功能材料

这类材料相对于通常的结构材料而言，一般除了具有机械特性外，还具有其他的功能特性。

功能材料是指通过光、电、磁、热、化学、生化等作用后具有特定功能的材料。在国外，常将这类材料称为功能材料 (Functional Materials)、特种材料 (Speciality Materials)) 或精细材料 (Fine Materials)。

（二）功能材料的特点与发展

①功能材料的功能对应于材料的微观结构和

微观物体的运动，这是最本质的特征。

②功能材料的凝聚态和形态非常多样化，除了晶态外，还有气态、液态、液晶态、非晶态、准晶态、混合态和等离子体态等。除了三维体相材料外，还有二维、一维和零维材料。

③结构材料常以材料形式为最终产品，而功能材料有相当一部分是以元器件形式为最终产品，集材料元件一体化。

④功能材料是利用现代化的技术，多学科交叉的知识密集型产物。

⑤功能材料的制备技术不同于结构材料的传统技术，而是采用许多先进的新工艺和新技术，如急冷、超净、超微、超纯、薄膜化、集成化、微型化、密集化、智能化以及精细控制和检测技术。

●发展

◆ 20 世纪 60 年代：微电子工业促进了半导体材料的迅速发展。

◆ 70 年代：“能源危机”促使各国开发新能源和研制储能材料。激光技术的出现，促进了光学材料、光电子材料的发展。

◆ 80 年代：以高技术为中心的新技术革命，在欧美和日本等国兴起，并迅速波动世界各国。新技术革命的主要标志：新型材料、信息技术、生物工程技术。

（三）功能材料分类

1. 根据材料的物质性进行分类

①金属功能材料

②无机非金属材料

③复合功能材料

④有机功能材料

●金属功能材料

a. 磁性合金

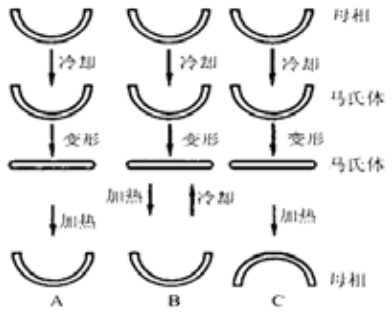
反磁性材料：在磁场中不被吸引

顺磁性材料：在磁场中被微弱吸引

铁磁性材料：在磁场中个被强烈吸引

b. 电性合金：超导材料

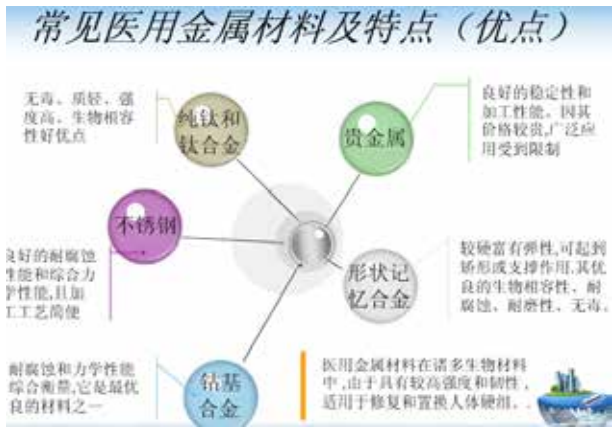
c. 形状记忆合金：合金在低温下被施加应力产生变形，应力去除后形变保留，但加热会逐渐消除形变，并回复原来形状。



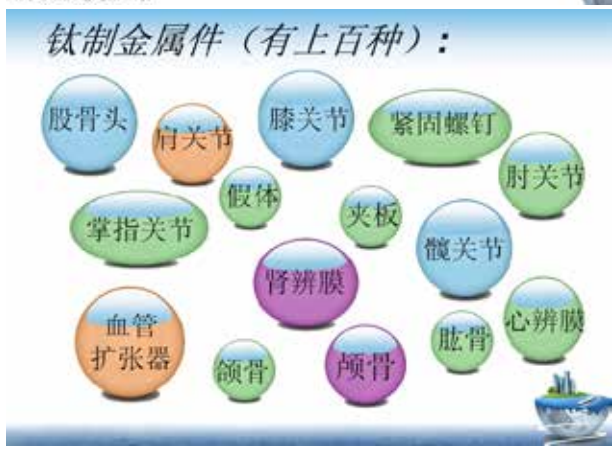
单向记忆　双向记忆　全方位记忆

形状记忆效应的三种形式

d. 医用金属材料



术后6个月，钛人工骨完全吸收，骨折愈合，患者左上臂活动恢复正常



●无机非金属材料

硅酸盐材料：以含硅物质为原料经加热制成的含硅酸盐的无机材料。

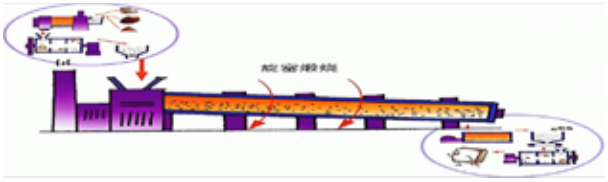
常见的硅酸盐材料有：水泥、玻璃、陶瓷

建筑离不开硅酸盐工业

a、水泥

1）制造水泥的原料是黏土、石灰石和石膏

2）制造水泥的设备：水泥回转窑



b、玻璃

1）工业制备：

①原料：纯碱、石灰石、石英

②设备：玻璃窑

③主要反应：

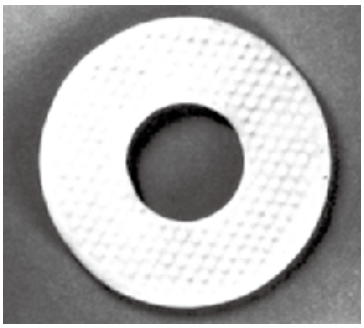
$Na_2CO_3+SiO_2 \xrightarrow{高温} Na_2SiO_3+CO_2\uparrow$

$CaCO_3+SiO_2 \xrightarrow{高温} CaSiO_3+CO_2\uparrow$

④成分：Na_2SiO_3、$CaSiO_3$、SiO_2

2）玻璃态：玻璃是非晶体物质，无固定熔点，在一定温度范围内软化。

古埃及玻璃制品



战国中晚期玻璃壁

广西贵县出土的玻璃

隋李静训墓出土的玻璃圆盒

玻璃仪器

钢化玻璃

c、陶瓷

1）主要原料：

2）优点：

3）用途：

景德镇传统名瓷之一的薄胎瓷

景德镇传统名瓷之一的雕塑瓷

景德镇传统名瓷之一的粉彩瓷

陶瓷坩埚

陶瓷电子部件

●新型无机非金属材料

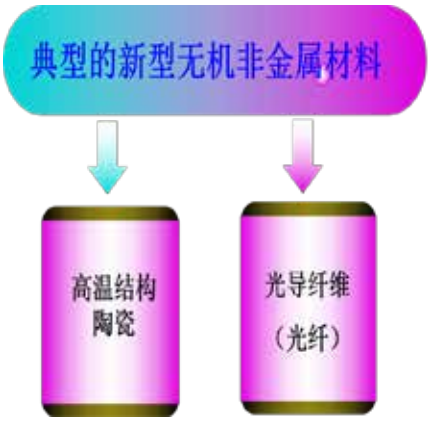
特性：

1）能承受高温，强度高

2）具有电学特性

3）具有光学特性

4）具有生物功能

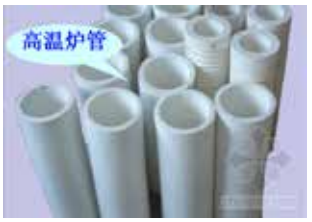


●高温结构陶瓷的特点：

耐高温、耐氧化、耐酸碱腐蚀、硬度大、耐磨损、密度小

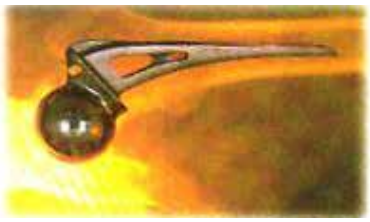
a. 氧化铝陶瓷 (人造刚玉)

透明、耐高温高压钠灯灯管



人造牙

人造骨



人造心瓣膜　　人造髋关节

b. 氮化硅陶瓷

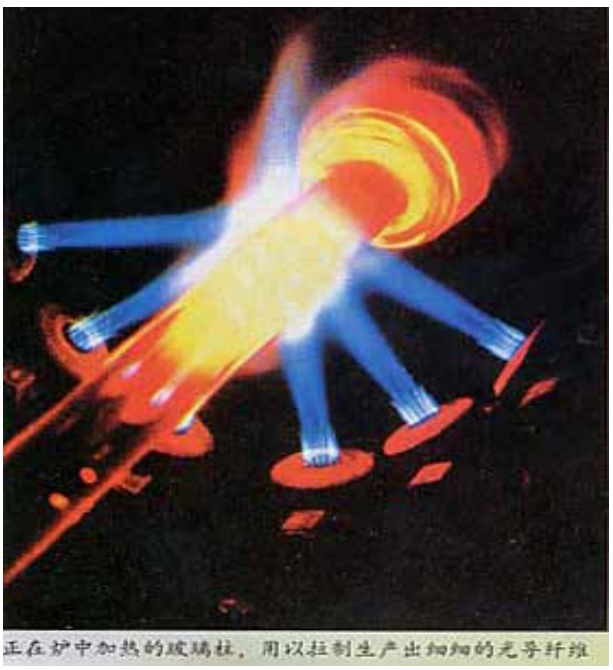
氮化硅陶瓷发动机

先进陶瓷轴承、刀具和零部件

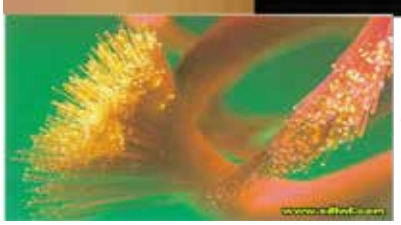
陶瓷柴油机

●光导纤维

简称“光纤”，又称“导光纤维”“光学纤维”，是一种利用光的全反射作用来传导光线的透明度极高的玻璃细丝。如果将许多根经过技术处理的光纤绕在一起，就得到我们常说的光缆。



正在炉中加热的玻璃柱，用以拉制生产出细细的光导纤维



●光缆较普通电缆有何有哪些优点呢?

光纤光缆	普通电缆
信息量大，每根光纤理论上可同时通过 10 亿路电话	8 管同轴电缆每条通话 1800 路
原料来源广（石英玻璃），节约有色金属	资源较少
质量小，每公里 27 g，不怕腐蚀，铺设方便	每公里 1.6 t
成本低，每公里 1 万元左右	每公里 20 万元
性能好，抗电磁干扰保密性强，能防窃听，不发生电辐射	

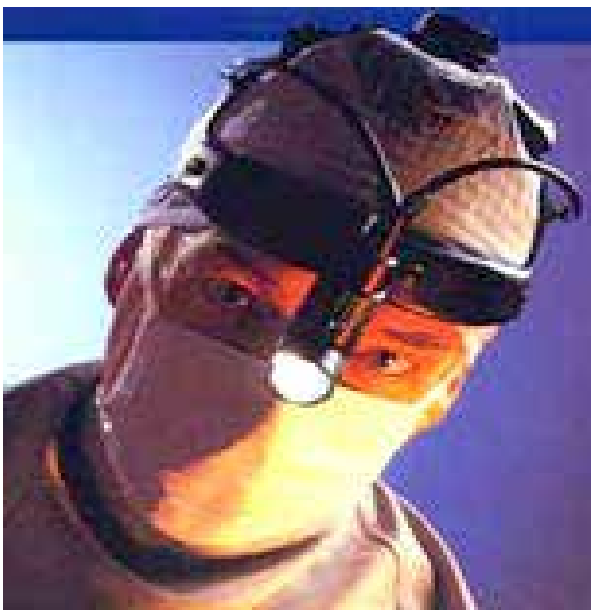
●医疗

* 独特光学设计比最好的卤素灯系统还要多输出至少 30% 光强度；

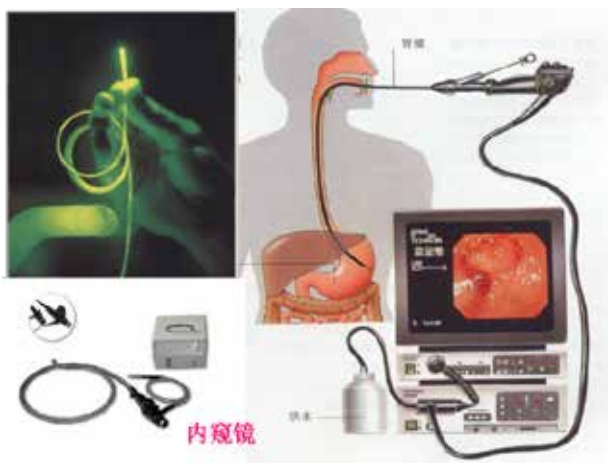
*105° 广角投射可减少扭动照明器次数；

* 微小型的照明器，最少干扰手术视野，真正视觉线——光线同轴照明；

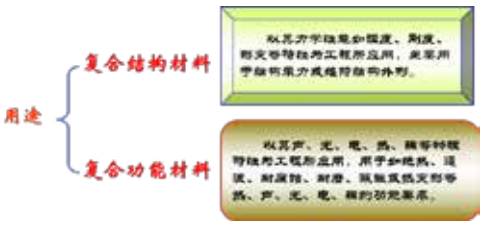
* 高度聚焦的点光源提供极其明亮的深部和细节照明。



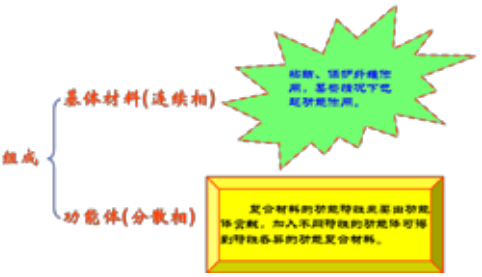
光导纤维手术头灯



（3）复合功能材料



●功能复合材料组成与特点



单一功能复合材料中其功能性质虽然由功能体提供，但基体不仅起到粘结和赋形作用，同时也会对复合材料整体的物理性能有影响。

多元功能体的复合材料可以具有多种功能，同时还有可能由于产生复合效应而出现新的功能。

●功能复合材料特点

①应用面宽。根据需要可设计与制备出不同功能的复合材料，以满足现代科学技术发展的需求。

②研制周期短。一种结构材料从研究到应用，一般需要 10–15 年左右，甚至更长，而功能复合材料的研制周期要短得多。

③附加值高。单位质量的价格与利润远远高于结构复合材料

④小批量，多品种。功能复合材料很少有大批量，但品种需求多。

⑤适于特殊用途。在不少场合，功能复合材料有着其他材料无法比拟的使用特性。

（4）有机复合材料

●根据材料的功能性进行分类

- （1）电学功能材料
- （2）磁学功能材料
- （3）光学功能材料
  - 非线性光学材料
  - 发光材料
  - 红外光学材料
  - 感光材料
  - 激光材料
  - 光电功能材料
  - 声光功能材料
  - 磁光材料
  - 光记录材料
- （4）声学功能材料
- （5）力学功能材料
- （6）热学功能材料
- （7）化学功能材料
- （8）生物医学功能材料
- （9）核功能材料

●根据材料的应用性进行分类

（1）信息材料

（2）电子材料

（3）电工材料

（4）电讯材料

（5）计算机材料

（6）传感材料

（7）仪器仪表材料

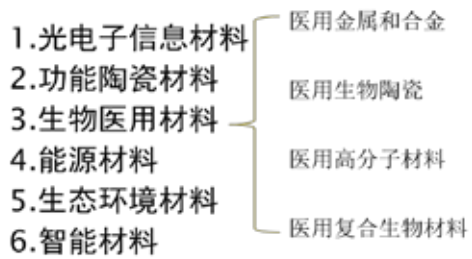
（8）能源材料

（9）航空航天材料

（10）生物医用材料

●新型功能材料

是指新近发展起来和正在发展中的具有优异性能和特殊功能，对科学技术尤其是对高技术的发展及新产业额形成具有决定意义的新材料。



六、加快发展高技术新材料的建议

（一）大力发展新材料

1. 加快发展电子信息材料

2. 注重发展高性能的结构材料

3. 努力发展新能源材料和节能材料

（二）加强科技创新能力

（三）加速新材料研究成果向现实生产力的转化

（四）加强国际交流和合作

七、储氢材料

●能源危机与环境问题

◆化石能源的有限性与人类需求的无限性—石油、煤炭等主要能源将在未来数十年至数百年内枯竭！！！

◆化石能源的使用正在给地球造成巨大的生态灾难—温室效应、酸雨等严重威胁地球动植物的生存！！！

◆人类的出路何在？—新能源研究势在必行！！！

●氢——二十一世纪的绿色能源

◆氢能热值高，如燃烧1kg氢可发热1.4×10^5kJ，相当于3kg汽油或4.5kg焦炭的发热量；

◆资源丰富，地球表面有丰富的水资源，水中含氢量达到11.1%；资源无穷无尽—不存在枯竭问题

◆干净、清洁，燃烧后生成水，不产生二次污染；

◆应用范围广，适应性强，可作为燃料电池发电，也可用于氢能汽车、化学热泵等。

氢能的利用途径多—燃烧放热或电化学发电

氢的储运方式多—气体、液体、固体或化合物

能源类型	汽油	天然气	甲醇	煤	氢气
比能量/(w•h)•kg^{-1}	12 300	9 350	6 200	8 200	28 000

氢能的开发利用已成为世界特别关注的科技领域。

●储氢材料

◆氢能利用关键是高密度安全储存和运输技术。

◆氢密度很小，单位重量体积很大。目前市售氢气一般是在150个大气压下储存在钢瓶内，氢气重量不到钢瓶重量的1/100，且有爆炸危险，很不方便。

◆氢能的存储是氢能利用的前提，进入20世纪90年代以来，许多国家对储氢技术的研究极为重视。

◆美国能源部在全部氢能研究经费中，50%用于氢能存储。

◆日本已将储氢材料的开发和利用技术列入1993~2020年的“新阳光计划”。其中氢能发电技术（高效分解水技术、储氢技术、氢燃料电池发电技术）一次投资就达30亿美元。

◆德国对氢能开发和储氢技术的研究极为重视。

◆我国科学技术部也将储氢材料及应用工程

技术的研究开发列入“九五”规划，浙江大学、南开大学、石油大学、有色金属研究总院等科研院所在储氢材料及应用技术方面进行了大量的研究工作，取得了大批可喜的成果。

●根据存储氢气的状态分：

1. 气态储氢：

1）能量密度低

2）不太安全

2. 液化储氢：

1）能耗高

2）对储罐绝热性能要求高

3. 固态储氢（用储氢材料储氢）

优势：

1）体积储氢容量高

2）无需高压及隔热容器

3）安全性好，无爆炸危险

4）可得到高纯氢，提高氢的附加值

●根据物理化学原理，目前所采用的储氢方法可分为：

物理法：储氢物质与氢分子之间只有纯粹的物理作用或物理吸附。（活性炭法、高压压缩储氢、深冷液化储氢等）

化学法：储氢物质和氢分子之间发生化学反应，生成新的合成物，具有吸收或释放氢的特性。无机化合物储氢、有机液体氢化物储氢、合金化合物储氢等）

◆为解决氢的储存和运输问题，人们研发了相应的储氢材料，主要介绍活性炭、无机化合物、有机化合物以及合金化合物等储氢材料。

常用高压氢气瓶

●活性炭储氢

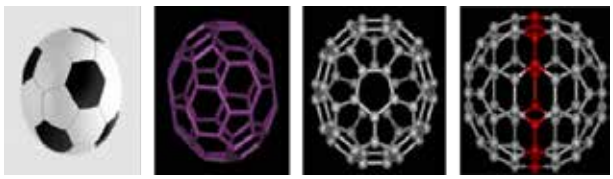
活性炭比表面积可达 2000m^2/g 以上，低温加压可吸附储氢。活性炭原料易得，吸附储氢和放氢操作都比较简单。

●碳 60 和巴基球

◆ 1985 年，美国科学家克劳特和斯莫利等用激光束去轰击石墨表面，发现了 C60。

◆ C60 的外形像足球，中心是空的，外边围砌着 60 个碳原子，它们组成了 12 个五边形和 20 个正六边形。碳 60 有一个别名：巴基球。一个巴基球的直径是 0.7 纳米。

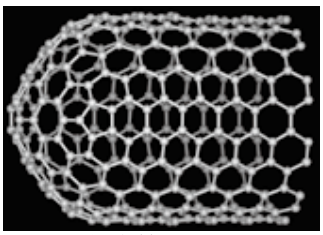
◆巴基球可以做得更大，再增加 10 个碳原子，还可以做成碳 70。如果用 9×60 个碳原子制成碳 540，有可能在室温条件下实现超导！



●碳纳米管

◆碳纳米管是由石墨中一层或若干层碳原子卷曲而成的笼状“纤维“，内部是空的，外部直径只有几到几十纳米。其比重为钢的六分之一，强度是钢的 100 倍。碳纳米管是极好的储氢材料，在未来的以氢为动力的汽车上将得到应用。

◆诺贝尔化学奖得主斯莫利教授认为，纳米碳管将是未来最佳纤维的首选材料，将被广泛用于超微导线、超微开关以及纳米级电子线路等。

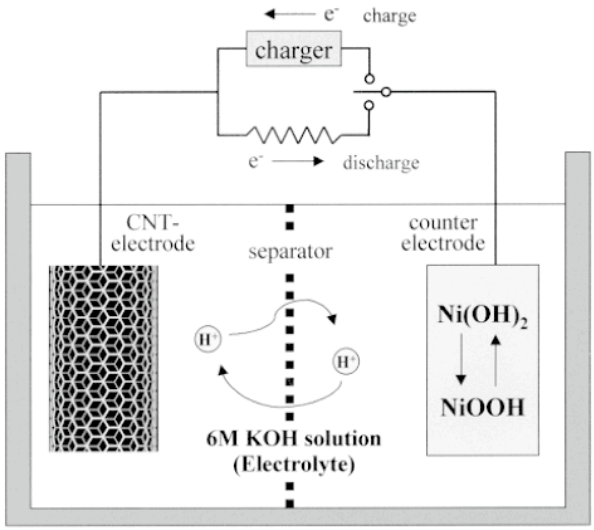


◆富勒烯 (C_{60}) 和碳纳米管 (CNT) 对氢气具有较强的吸附作用。单层碳纳米管的吸氢量比活性炭高，H_2 的吸附量可达 5% –10%（质量分数），有望成为新一代储氢材料。

富勒烯 C_{60}

碳纳迷管

●纳米碳管电化学储氢



●碳纳米管电化学储氢小结

1. 纯化处理后多壁纳米碳管最大放电容量为 1157mAh/g，相当于 4.1%重量储氢容量。经过 100 次充放电后，其仍保持最大容量的 70%。

2. 单壁纳米碳管最大放电容量为 503mAh/g，相当于1.84%重量储氢容量。经过100次充放电后，其仍保持最大容量的 80%。

●纳米材料储氢存在的问题：

◆世界范围内所测储氢量相差太大：0.01(wt)%—67(wt)%, 如何准确测定？

◆储氢机理如何？

●无机化合物储氢

◆某些无机化合物和氢气发生化学反应可储氢，然后在一定条件下分解可放氢。

◆利用碳酸氢盐与甲酸盐之间相互转化，吸氢和放氢反应为：

$$HCO_3^- + H_2 \underset{\text{释氢，70℃，0.1MPa}}{\overset{\text{吸氢，35℃，2.0MPa}}{\rightleftharpoons}} HCO_2^- + H_2O$$

◆以活性炭作载体，在 Pd 或 PdO 的催化作用下，以 $KHCO_3$ 或 $NaHCO_3$ 作为储氢剂，储氢量约为 2%（质量分数）。

◆该法优点是原料易得、储存方便、安全性好，但储氢量比较小，催化剂价格较贵。

●有机液体氢化物储氢

◆借助储氢载体（如苯和甲苯等）与 H_2 的可逆反应来实现，包括催化加氢反应和催化脱氢反应。

◆该法储氢量大，环己烷和甲基环己烷的理论储氢量分别为 7.19%和 6.18%（质量分数），比高压储氢和金属氢化物储氢的实际量都大。储氢载体苯和甲苯可循环使用，其储存和运输都很安全方便。

◆催化加氢和催化脱氢装置和投资费用较大，储氢操作比较复杂。

●合金化合物储氢

◆在一定温度和氢气压力下能多次吸收、储存和释放氢气的合金被称为储氢合金。

◆氢于许多金属、合金或金属间化合物反应生成金属氢化物，并释放出热量；金属氢化物受热时，又释放出氢气，用反应式表示为：

$$M(s)+\frac{x}{2}H_2(g)\underset{P_2,T_2}{\overset{P_1,T_1}{\rightleftharpoons}}MH_x(s)+\Delta H$$

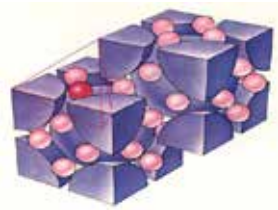
M: 金属、合金、或金属间化合物

ΔH：反应热

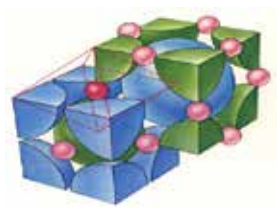
P_1、T_1：吸氢是体系需要的压强和温度

P_2、T_2：释放氢时体系需要的压强和温度

◆氢原子容易进入金属晶格的四面体或八面体间隙，形成金属氢化物，如 TiH_2、$ZrH_{1.9}$、$PrH_{2.8}$、$Ti_{1.4}CoH$、$LaNi_5H$、$MmNi_{4.5}H_{6.6}$ 等。



a



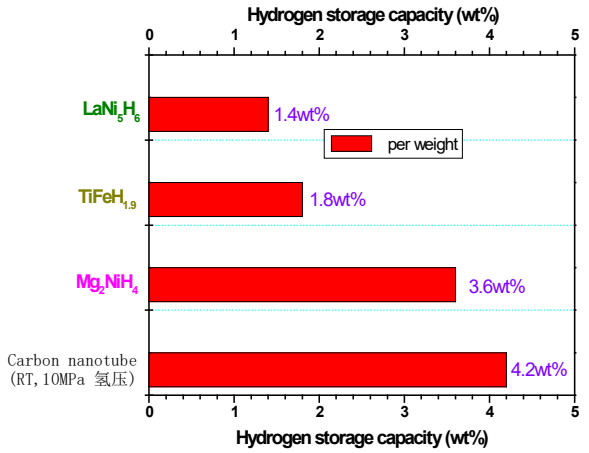
b

氢原子在合金化合物中的占位：(a) 四面体；(b) 八面体

◆实验表明，单独使用一种金属形成的氢化物生成热较大，氢的离解压低，储氢不理想。实用的储氢材料是由氢化物生成热金属和生成热为负的放热性金属组成多元金属间化合物，其中有的过渡金属元素对氢化反应时氢分子分解为氢原子的过程起着重要的催化作用。

◆储氢合金可储存比其体积大 1000–1300 倍

的氢，而且合金中存储的氢表现为 H 与 H^+ 之间的中间特性，结合力较弱，当合金氢化物受热时又可释放氢气。



储氢合金的储氢量比较

◆储氢合金材料达到实用目的，必须满足下列要求：

➢ 储氢量大，能量密度高；

➢ 吸氢和放氢速度快；

➢ 氢化物生成热小；

➢ 分解压适中；

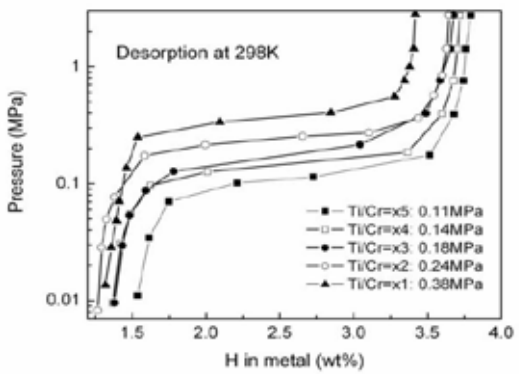
➢ 容易活化；

➢ 化学稳定性好；

➢ 在储运中安全、无害；

➢ 原料来源广、成本价廉。

四川大学材料学院储氢材料课题组首创低成本 V–Ti–Cr–Fe 四元合金体系：在温和条件下可快速吸氢饱和 :40℃，<6min



◆储氢合金材料主要有：稀土系列、镁镍系列、钛合金系列等。

◆大多数金属氢化物储氢量在 1% –4%（质量分数）、能量密度高，所需费用明显低于深冷液化储气和高压储氢，原料易得，安全可靠。储氢合金已成为各国都积极研发的一种很有前途的储氢方法。

我国生产的稀土储氢合金

●稀土系储氢合金

◆ $LaNi_5$ 是稀土系储氢合金的典型代表，由荷兰 Philip 实验室于 1969 年首先研制。

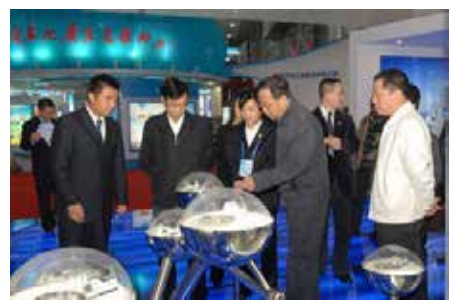
◆ $LaNi_5$ 在室温下可与一定压力的氢气反应形成氢化物，如下式所示：

$$LaNi_5 + 3H_2 = LaNi_5H_6$$

◆ $LaNi_5$ 具有优良的储氢性能，块状 $LaNi_5$ 合金储氢量约 1.4%（质量分数），分解压适中平坦，活化容易，具有良好的动力学特性和抗杂质气体中毒性。

◆ $LaNi_5$ 成本高，大规模应用受限，因此发展置换 La 和 Ni 的多元合金：$LaNi_{5-x}M_x$(M = Al、Mn、Cr、Fe、Co、Cu 等）和 $R_{0.2}La_{0.8}Ni_5$(R = Y、Gd、Nd、Th 等）。

◆用富 Ce 混合稀土 (Mm) 代替 La 可研制廉价的 $MmNi_5$ 储氢合金，在 $MmNi_5$ 基础上开发多元合金，如 $MmNi_{1-y}B_y$(B=Al、Cu、Fe、Mn、Ga、Sn、Cr 等）系列，不仅保持 $LaNi_5$ 的优良特性，而且在储氢量和动力学特性方面优于 $LaNi_5$，价格仅为纯 La 的 1/5。



2009 年，西博会上展出的川大宝生实业公司生产的稀土储氢合金电池

●钛系储氢合金

◆ TiFe 具有优良储氢特性，吸氢量约 1.75%（质量分数），室温下释氢压力约为 0.1MPa。价格较低，具有很大实用价值。

◆ TiFe 活化困难，须在 450℃和 5MPa 压力下进行活化；抗毒性弱（特别是 O_2），反复吸释氢后性能下降。

◆为改善 TiFe 合金储氢特性，可用过渡元素 (M) 置换部分铁形成 $TiFe_{1-y}M_y$(M=Cr、Mn、Mo、Co、Ni 等)。$TiFe_{0.8}Mn_{0.2}$ 可在室温 3MPa 氢压下活化，生成 $TiFe_{0.8}Mn_{0.2}H_{1.05}$ 氢化物，储氢量达到 1.9wt%。

➢ 资源丰富，价格低

➢ 室温下可逆储放氢

➢ 易被氧化

➢ 活化困难

➢ 抗杂质气体中毒能力差

实际使用时需对合金进行表面改性处理

●镁系储氢合金

◆在 300–400℃和较高氢压下，Mg_2Ni 与氢生成 Mg_2NiH_4，含氢量为 3.65wt%，理论储氢量可达 6%，但其稳定性强，释氢困难。

◆用 Ca 和 A1 取代部分 Mg 形成 $Mg_{2-x}M_xNi$，氢比物离解速度比 Mg_2Ni 增大 40%以上，活化容易，具有良好的储氢性能，性质稳定。

◆利用过渡元素 (M) 置换 Mg_2Ni 中的部分 Ni，形成 $Mg_2Ni_{1-x}M_x$ 合金 (M = V、Cr、Mn、Fe、Zn 等)，也可改善吸 / 释氢的速度，具有实用价值。

➢ 储氢容量高

➢ 密度小

➢ 资源丰富

➢ 价格低廉

➢ 放氢温度高（250 — 300℃）

➢ 放氢动力学性能较差

●储氢合金的应用

◆氢储存是储氢合金最基本的应用。

◆金属氢化物储氢密度高，采用 Mg_2Ni 制成的储氢容器与高压 (20MPa) 钢瓶和深冷液化储氢装置相比，

➢ 在储氢量相等的情况下，三者质量比为 1：1.4：1.2，体积比为 1：4：1.3；

➢ 储氢合金储氢无需高压或低温设施，节省能源；

➢ 氢以金属氢化物形式存在储氢合金中，安全可靠，便于氢的运输和传递。

◆体积比较（储 4 kg 的氢）

储氢合金储氢量与其他储氢方法储氢量的比较

◆储氢合金可分离氢气。混合气体流过储氢合金分离床，氢被吸收形成金属氢化物，杂质排出；加热金属氢化物，得到回收氢气。反复提纯可获得高纯氢气，

◆每年大量含氢尾气放空（仅合成氨工业全国每年放空尾气数十亿 m^3，含有 50% –60% 的氢气），回收利用可提供大量廉价氢气，得到巨大的能源补充。

氢气纯化工厂

氢气纯化装置

◆某些储氢合金的氢化物同氘、氚化物相比，同一温度下吸释氘氚的热力学和动力学特性有较大差别，可用于氢同位素的分离。

氢同位素的应用

◆ TiNi 合金吸收 D_2 的速率为 H_2 的 1/10，将含 7%D_2 的 H_2 导入到 TiNi 合金中，每通过一次可使 D_2 浓缩 50%，通过多次压缩和吸收，氘的浓度可迅速提高，同时回收大量高纯 H_2。

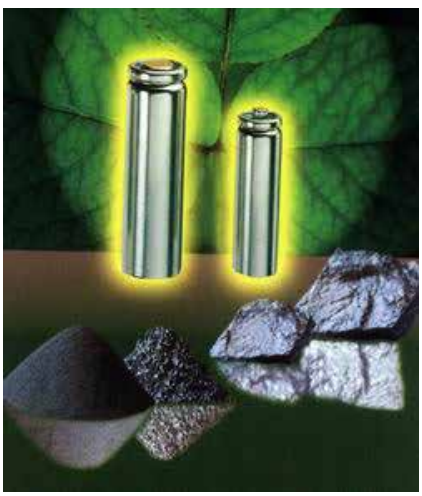
◆金属氢化物也是理想的能量转换材料。

◆氢化物热泵：以氢气为工作介质，储氢合金为能量转换材料，相同温度下分解压不同的两种氢化物组成热力学循环系统，以它们的平衡压差驱动氢气流动，使两种氢化物分别处于吸氢 (放热) 和放氢 (吸热) 状态，达到升温、增热或制冷目的。

◆德国用 $LaNi_5/Ti_{0.9}Zr_{0.1}CrMn$ 合金获得 –25℃ 低温；

◆日本用 MmNiMnAl/MmNiMnCo 制备制冷系统，连续获得 –20℃ 低温，制冷功率为 900–1000W。

◆储氢合金电极替代 NiCd 电池中的 Cd 负极，组成镍 – 氢化物电池，不但具有高能量密度，而且耐过充，放电能力强，无重金属 Cd 对人体和环境的危害。



储氢合金在镍氢电池上的应用

●钛 / 锆系 (AB2)

◆ 1966 年，Pebler 首先将二元锆基 Laves 相合金用于储氢的研究，发现其储氢容量达到 1.8 ~ 2.4wt%。

◆具有 Laves 相结构的金属间化合物

◆原子间隙由四面体构成，间隙多，有利于氢原子的吸附

◆ $TiMn_{1.5}H_{2.5}$ 日本松下（1.8%）

◆ $Ti_{0.90}Zr_{0.1}Mn_{1.4}V_{0.2}Cr_{0.4}$

◆活性好

◆用于：氢汽车储氢、电池负极

◆以 $ZrMn_2$、$TiMn_2$ 为代表的 AB_2 型储氢合金具有 Laves 相结构，所涉及的有六方结构的 C14 型 Laves 相和立方结构的 C15 型 Laves 相两种。此类合金的储氢量大，放电容量比 AB_5 型的稀土系合金电极高 30 ~ 40%，在碱性解液中形成的致密氧化膜能有效抑制电极成分的进一步氧化，稳定性好，循环寿命长。

◆ AB_2 型 Laves 相储氢电极合金至今仍存在初期活化困难、无明显放电平台、高倍率放电性能极差等缺点，且成本较高，使其综合性能不能达到大规模应用的要求。尽管 AB_2 型储氢合金存在以上问题，但其储氢容量高和循环寿命长，被列为下一代高容量 Ni / MH 电池的首选材料。

● V 基固溶体型储氢合金

◆此合金由 C14 型 Laves 相和 V 基固溶体共同组成主相，同时存在少量 TiNi 相，在 C14 型 Laves 相和 TiNi 相的共同催化作用下，可使 V 基固溶体相具有良好的电化学吸 / 放氢性能。

◆ V 及 V 基固溶体合金 (V–Ti 和 V–Ti—Cr 等) 吸氢时可生成 VH 及 VH2 两种氢化物，其中 VH2 的储氢量高达 3.8wt%，电化学放电容量为 1018mAh / g，约为 LaNi5 型储氢合金的 2.9 倍。V 基固溶体型合金具有储氢量大，氢在合金中扩散速度快等优点，但其成本高、破碎困难、平台不明显、寿命短，而且本身在碱液中缺乏电催化活性而小具备可逆的电化学容量。

●配位氢化物储氢

◆ $NaAlH_4$ 为代表的金属配位氢化物和以 ($LiNH_2$/LiH) 为代表的化学氢化物成为新型储氢材

料的研究热点。

◆碱金属（Li、Na、K）或碱土金属（Mg、Ca）和第三主族元素 (B、Al) 可与氢形成配位氢化物，与金属氢化物之间的主要区别在于吸氢过程中向离子或共价化合物的转变。

◆主要有：$NaAlH_4$，$NaBH_4$，$LiAlH_4$，$LiBH_4$，$Mg(AlH_4)_2$ 等。

◆储氢容量高：$LiBH_4$ 理论储氢 18.51%，$NaAlH_4$,7.41%,$NaBH_4$,11.66%。

◆再氢化难 ($LiAlH_4$ 在 $TiCl_3$、$TiCl_4$ 等催化下 180℃，8MPa 氢压下获得 5%的可逆储放氢容量)

$NaAlH_4$ 加热分解，其反应式为：

$$NaAlH_4 \leftrightarrow 1/3Na_3AlH_6 + 2/3Al + H_2$$

$$1/3Na_3AlH_6 \leftrightarrow NaH + 1/3Al + 1/2H_2$$

目前研究的重点主要包括：催化剂种类（钛锆醇盐、IVA~IVB 和各种过渡金属卤化物等）、结构（微米及纳米结构等）、添加工艺（机械球磨掺杂等）及催化机理研究等方面。

金属配位氢化物的主要性能

氢化物	密度 /（g/cm3）	含氢量 %（质量分数）	分解温度
$LiBH_4$	0.66	18.5	–
$NaBH_4$	1.074	10.7	–
KBH_4	1.177	7.5	–
$Be(BH_4)_2$	–	20.8	123
$Mg(BH_4)_2$	–	14.9	320
$Ca(BH_4)_2$	–	11.6	260
$Zn(BH_4)_2$	–	8.5	50
$AL(BH_4)_3$	0.55	16.98	–
$Zr(BH_4)_4$	1.11	10.8	–
$Th(BH_4)_4$	2.59	5.5	204
$LiA1H_4$	0.92	10.6	190
$NaA1H_4$	1.28	7.5	190
$Mg(A1H_4)_2$	–	9.3	140

八、结束语—氢能离我们还有多远?

氢能作为最清洁的可再生能源，近 10 多年来发达国家高度重视，中国近年来也投入巨资进行相关技术开发研究

氢能汽车在发达国家已示范运行，中国也正在筹划引进

氢能汽车商业化的障碍是成本高，高在氢气的储存

液氢和高压气氢不是商业化氢能汽车——安全性和成本

大多数储氢合金自重大，寿命也是个问题；自重低的镁基合金很难常温储放氢、配位氢化物的可逆储放氢等需进一步开发研究，

碳材料吸附储氢受到重视，但基础研究不够，能否实用化还是个问号

氢能之路——前途光明，道路曲折！

磁能积及其相关常识的理论依据

张爽 ⋆，纪姣姣，夏爱林 ⋆⋆
安徽工业大学材料科学与工程学院

摘要：最大磁能积是表征永磁材料是否具有发展前途的重要参数。本文先介绍了最大磁能积与退磁曲线的关系，然后从简单的理论知识出发，介绍了永磁材料为什么追求最大磁能积的理论依据，并给出了一种从各向同性磁体的退磁曲线上寻找最大磁能积点的简易方法及理论依据。

关键词：永磁材料，退磁曲线，最大磁能积

引言

对永磁材料来说，一般要追求的磁性能是“三高”，即高剩余磁感应强度 (B_r)、高矫顽力 (H_c) 以及高最大磁能积 ($(BH)_m$)[1−3]。当然，不同应用领域所需要的材料磁性能可能会有所差别，但是总体来说 B_r、H_c 和 $(BH)_m$ 是永磁材料最重要的三个参数。这三个参数中，B_r 所表征的是磁性材料被外磁场磁化到饱和，退去外磁场后材料所能保留磁性的能力；H_c 则表征磁性材料抵抗外磁场磁化的能力。B_r 和 H_c 所表征的物理意义非常明确，也很容易被理解。但是，相对来说 $(BH)_m$ 的物理意义则比较难以理解。而 $(BH)_m$ 一直以来被认为是衡量永磁材料是不是有发展前途的最重要指标，因而磁学从业者有必要对 (BH)m 作更深入的理解。本文即对磁能积及其相关的几个知识点作详细的介绍，阐明关于两个磁能积相关常识的理论依据。

一、退磁曲线与磁能积的关系

图 1 左半部分为永磁材料典型的退磁曲线，可简单视为磁滞回线（B–H）的第二象限。一般，我们称退磁曲线上任意一个工作点的 B 和 H 的乘积 (BH) 为磁能积。根据简单的数学知识，因为 B=0 或者 H=0 时，(BH) 的值都为 0，因而 (BH) 必然有一个最大值（如图 1 右半部分），这个最大值即为最大磁能积 $(BH)_m$。如果 $(BH)_m$ 所对应的点 (H_d, B_d) 为永磁器件的工作点，则磁性器件可以最大程度地发挥永磁材料的磁性能，从而可以降低磁性器件的体积。从图 1 可看出，退磁曲线上可以获得永磁材料最重要的参数 B_r、H_c 和 $(BH)_m$，因而退磁曲线对永磁材料和器件研究者来说是十分重要的。

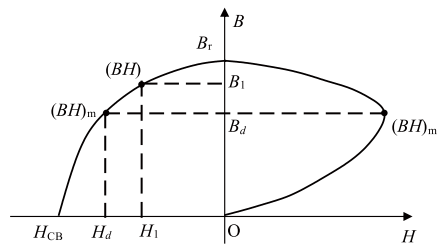


图 1 永磁材料的典型退磁曲线和磁能积的关系

二、永磁材料追求高最大磁能积的理论依据

前面说过，一般认为最大磁能积 $(BH)_m$ 代表着永磁材料是不是有发展前途的最重要指标，这有没有理论方面的依据呢?

图 2 是典型的理想静态磁路的示意图[4]。其中参数 B_g, A_g, l_g 分别代表永磁磁路的气隙磁密、气隙的横截面积和长度；B_m, A_m, l_m 则分别代表磁体磁密、磁体的横截面积和长度。

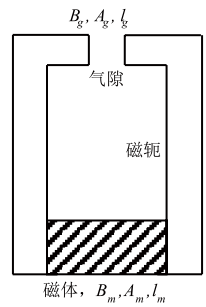


图 2 理想的静态磁路示意图

静态磁路设计常用到两个著名的基本方程，

⋆ 张爽 (1997.12−)，女，安徽六安人，安徽工业大学材料科学与工程学院硕士生，主要研究方向为永磁复合铁氧体材料。
⋆⋆ 夏爱林 (1978.04−)，男，安徽庐江人，2006 年毕业于中国科学院物理研究所获得博士学位，现为安徽工业大学材料科学与工程学院教授、博士生导师，安徽工业大学磁性功能材料团队负责人，主要研究方向为磁性材料（特别是铁氧体磁性材料）。联系方式：alxia@126.com.

即基尔霍夫第一和第二定律，又分别叫做磁通连续性原理和安培环路定律：

$$B_mS_m=B_gS_g \quad (1)$$

$$H_ml_m=-H_gl_g \quad (2)$$

在气隙处，存在：

$$B_g=\mu_0H_g \quad (3)$$

将 (1) 和 (2) 两式左右相乘，并将 (3) 式带入，则有：

$$B_g^2=\mu_0(-B_mH_m)\frac{V_m}{V_g} \quad (4)$$

上式中，$V_m=S_mL_m$ 为磁体的体积，$V_g=S_gL_g$ 为气隙的体积。从上式可见，如果能确定气隙体积 V_g 和磁密 B_g，且磁体工作在最大磁能积点上，即（B_mH_m）取最大值，则磁体的体积就可以尽可能的小；另外，如果能确定磁体和气隙的体积 V_m 和 V_g，若通过设计使得磁体工作在最大磁能积点上，则气隙磁密 B_g 可以达到最大值。可见，上式中（B_mH_m）起着十分关键的作用，可以用其最大值来表征所使用永磁材料综合磁性能的优劣，这就是永磁材料追求高最大磁能积 $(BH)_m$ 的原因。

三、各向同性永磁材料退磁曲线上寻找最大磁能积的简单方法及理论依据

一般来说，在已知退磁曲线的情况下，有一种简单的方法可以找出来各向同性永磁材料的最大磁能积点。如图 3 所示，分别沿着纵坐标的 Br 点和横坐标的 H_c 点作 H 轴和 B 轴的平行线，两者相较于 P 点，连接坐标轴 O 点与 P 点，OP 线与退磁曲线相交于 Q 点，则 Q 点即为要找的最大磁能积点。

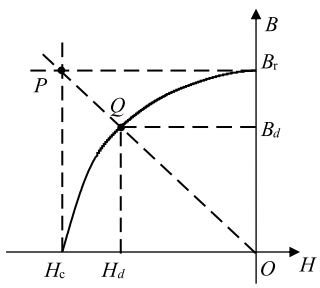


图 3 从退磁曲线上找最大磁能积点的简易方法

这是为什么呢？利用简单的微积分知识，就可以采用下面的数学方法来证明这种方法的可行性。

各向同性永磁材料的退磁曲线存在如下的经验公式 [4，5]：

$$B=B_r\frac{H_c-H}{H_c-\alpha H} \quad (5)$$

其中，a 是一个与退磁曲线形状有关的系数，可以从 B 的经验公式导出来 a 的表达式为：

$$\alpha=2\sqrt{\frac{B_rH_c}{(B\cdot H)_m}}-\frac{B_rH_c}{(B\cdot H)_m} \quad (6)$$

根据 (5) 式，左右同乘 H，则有：

$$B\cdot H=B_r\frac{H_c-H}{H_c-\alpha H}H \quad (7)$$

由微积分的原理，上式对 H 求微分，可得取 $(BH)_m$ 的条件为：

$$\alpha B_rH^2-2B_rH_cH+B_rH_c^2=0 \quad (8)$$

即可解得对应的 Hd 为：

$$H_d=\frac{1\pm\sqrt{1-\alpha}}{\alpha}H_c \quad (9)$$

另外，(5) 式也可以改写成：

$$H=H_c\frac{B_r-B}{B_r-\alpha B} \quad (10)$$

则同上方法可以得出取 (BH)m 的 Bd 值为：

$$B_d=\frac{1\pm\sqrt{1-\alpha}}{\alpha}B_r \quad (11)$$

由 (9) 式和 (11) 式，可得：

$$\frac{B_d}{H_d}=\frac{B_r}{H_c} \quad (12)$$

由图 3 和式 (12)，则 O、P 和坐标为 Q(H_d，B_d) 的三点在同一条直线上，可见 Q 点即为最大磁能积点，这就证明了式 (12) 就是上述寻找最大磁能积点的理论依据。

结语

本文从简单的理论出发，给出了为什么永磁材料要追求高磁能积的原因，同时给出了一种在各向同性永磁材料的退磁曲线上寻找最大磁能积点的方法及其理论依据，可以为磁性材料工作者作参考。

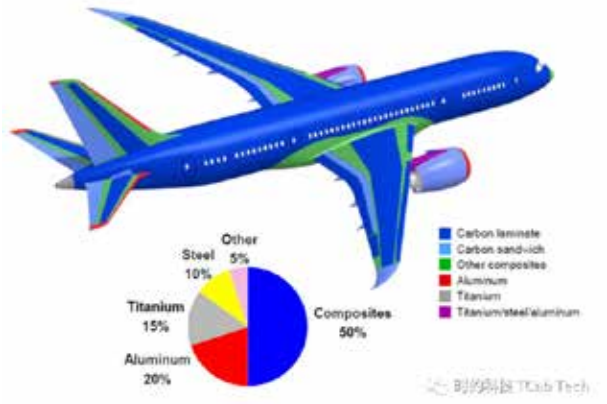
参考文献：

[1] 都有为，铁氧体，江苏科学技术出版社，1996.
[2] 宛德福，马兴隆，磁性物理学，电子科技大学出版社，1994.
[3] 周寿增，董清飞，超强永磁体－稀土铁系永磁材料，冶金工业出版社，2004.
[4] 钟文定，技术磁学 (下册)，科学出版社，2009.
[5] 林其壬，赵佑民，磁路设计原理，机械工业出版社，1987.

漫谈 eVTOL 中的复合材料结构

（转载时代科技）

如果你搭乘一趟由波音 787 执飞的航班出行，除了关注炫酷的变色玻璃窗外，你可能也感兴趣知道，这架能够容纳 300 多人的飞机约一半的结构是使用复合材料制造的。



波音 787 结构材料

或许复合材料听起来有一些陌生，但实际上，除了航空航天等高端制造业，与我们生活相关的，大到风电叶片、汽车结构，小到自行车、羽毛球拍、钓鱼竿都能见到复合材料的影子。

那么，为什么复合材料在越来越多的场景得到应用？

先说结论，简单来说，因为它质量轻、强度高。

eVTOL（电动垂直起降）飞行器作为新兴的交通出行载体，对飞行器的结构重量有着严苛的要求。这也导致现今市面上能看到的所有 eVTOL 企业，几乎无一例外的使用复合材料作为主要的机体结构。

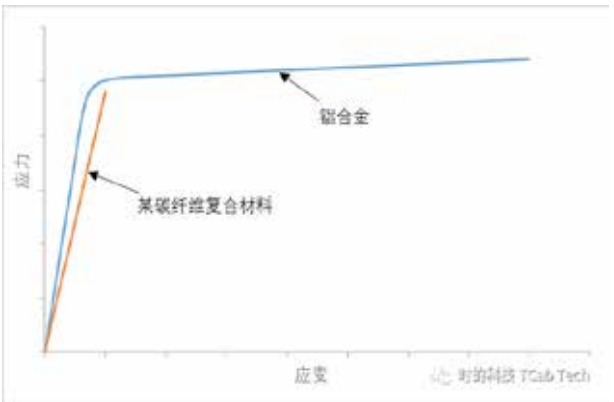
复合材料结构

复合材料结构

复合材料结构与金属结构相比，绝不仅仅只是简单的轻一些。事实上，这两种材料有着迥异的性能表现。

以航空业常使用的铝合金材料为例，业内人经常说的“2 系”或者“7 系”铝合金，实际上是铝金属中添加了不同比例的合金金属（铜、锌、镁等），从而表现出不同的力学特性（如果你买的产品号称使用航空铝，一般也就是这两个系列的铝合金）。

但，无论怎么调配，铝合金都是一种韧性材料，有着明显的屈服特性；而飞机结构常使用的碳纤维复合材料则是脆性材料，在应力 – 应变图中我们能够明显看出两种材料的区别。



应力 – 应变示意图

不同的材料特性造成金属和复合材料有着不一样的力学性能。

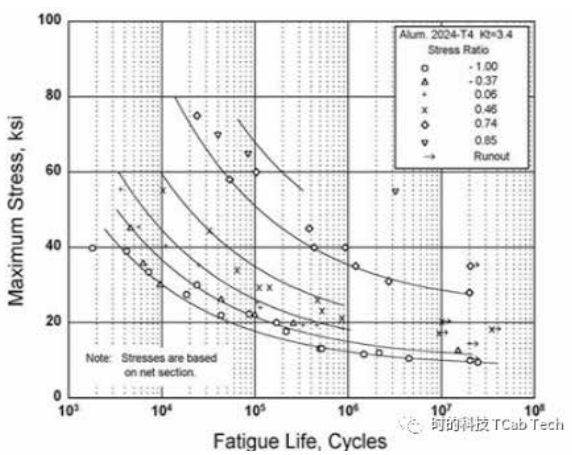
一般来说，金属结构有着较高的疲劳敏感性，破坏形式的具体表现，就是由于重复的载荷引起疲劳断裂。这些重复的载荷远小于结构设计所能承受的极限情况，但在这些载荷周而复始的交变作用下，金属结构内部萌生了细小的裂纹——也有可能原本就存在微小的缺陷。随着损伤的累积，这些裂纹 / 缺陷开始扩展，金属结构的强度也不断下降，直到某一次载荷超过了剩余强度，结构就会发生破坏。

举个简单的例子，一段铁丝想要徒手拉断，不考虑超能力的情况下一般人往往很难办到，但只要我们不断将铁丝反复弯折，很快就可以将其折断。

如果放到尺寸相对较大的金属结构上来说，一次次的飞行使得金属结构不断受到反复的拉 / 压应力，如果飞行的次数够多，裂纹总有一天开始萌生并扩展。

实际上，现代飞机由于金属结构静强度而引起的问题几乎很少见，大多数都是疲劳耐久性问题，好在这一现象以现在的技术水平是可以预测的。

所以，飞机也是有寿命的，为了保证乘客和货物的安全，工程师们会根据材料的固有特性（S–N 曲线 / 裂纹扩展速率曲线）计算出这些裂纹萌生到失效可承受的载荷循环次数，并给定足够的分散系数来确定飞机的寿命。此外，工程师们还会制定合理的检查周期，在飞机服役过程中，对不同部位安排各种各样手段的检查，以确保及时发现并消除这些潜在的裂纹对飞机的威胁。



2024 铝合金 S–N 曲线

这里补充一个知识点

民用飞机设计寿命通常在 20 年以上，某种程度上可以认为越新的飞机越安全（机龄低），检查维护保养越好的飞机越安全（正规航空公司）。

复合材料众所周知的特点是轻。碳纤维复合材料结构的密度通常在 1.6g/cm^3 以下，而航空常用的金属中，铝合金密度为 2.7g/cm^3，钢的密度为 7.8g/cm^3。虽然密度小，但复合材料在强度方面却一点都不弱，甚至表现更佳。目前 T700 级的碳纤维单向预浸带拉伸强度可以达到 2500MPa，作为对比，强度较高的 7075 铝合金拉伸强度约 530MPa，而航空用不锈钢 17–7PH 的拉伸强度也不过 1200MPa 左右。要知道，生活中常见的 304 不锈钢，拉伸强度只有 520MPa。

我们都知道金属为各向同性材料，复合材料为各向异性材料。通俗的说，金属制成的结构，在不同方向的强度性能几乎相同（实际金属材料由于工艺特性，不同方向力学性能也可能略有差异），而复合材料在各个方向的力学性能与设计有直接关系。

通常情况下，飞行器不同部位的结构在飞行过程中受载形式比较一致，这就意味着工程师完全可以利用复合材料这种可设计的特点，将重量使用到最有利的方向和位置，达到结构优化的设计目的，节省更多的重量空间来提供载重。

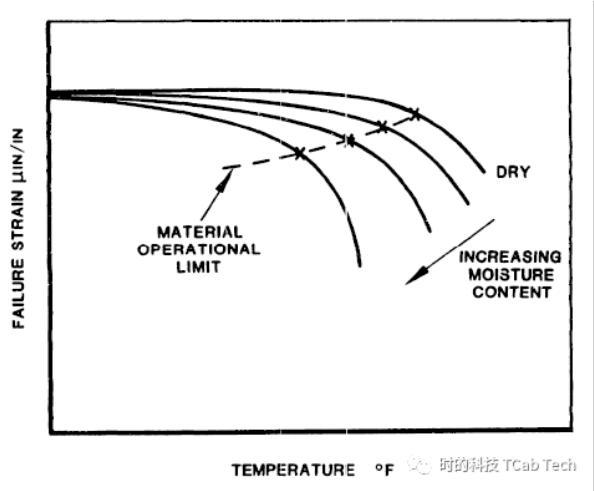
复合材料结构相对比于金属结构，除了重量优势外，还有着较优异的抗疲劳特性。经过合理设计后的复合材料结构，一般在寿命期内很难观察到损伤在疲劳载荷下的扩展，相对比其他设备的老化，几乎可以做到全寿命周期内不需要维修和更换。

硬币总有两面。复合材料虽然在重量和抗疲劳方面表现优秀，但对损伤的静强度敏感性远高于金属材料。通俗点解释，一块金属蒙皮，上面打几个钉孔对结构的静强度几乎没有太大影响，但如果它是复合材料结构，影响可能超出你的想象——相对于无损结构，含损伤的复合材料结构许用值可能下降一半以上！

湿热环境也是一个问题。我们知道，飞行器不是烧水壶，正常使用情况下，一般结构温度不

会超过几十度，这点温度对于金属来说完全不是什么问题。但复合材料结构天生五行缺陷，既怕水又怕火，错了，是对温度湿度敏感，在不同的温度湿度下，不同的力学性能会有不同的改变。变好我们自然是欢迎的，但如果变坏，我们也必须充分了解。

除了上述特点外，复合材料结构与金属结构之间还有许多的差异点。抗腐蚀性、分散性、导电性、低能量冲击、玻璃化转变温度、迟滞效应……



复合材料的温湿度影响

关于适航

前面介绍了这么多复合材料的优点，那么问题来了，怎么在飞行器上安全的使用复合材料结构呢？这就绕不开航空人最熟悉的词汇——适航。“适航指的是航空器适宜于空中飞行的性质及该航空器在预期的运行环境和使用限制下的安全性和物理完整性的一种品质”。

适航活动

我们今天能够搭乘的所有航空公司的飞机都经过了适航认证，这是适航当局为保证乘员的安全性对所有运营的飞行器提出的设计要求。我们经常会听说，航空是最安全的出行方式，这份安全来自于适航当局、航空业对适航认证的严谨态度和对生命的敬畏。

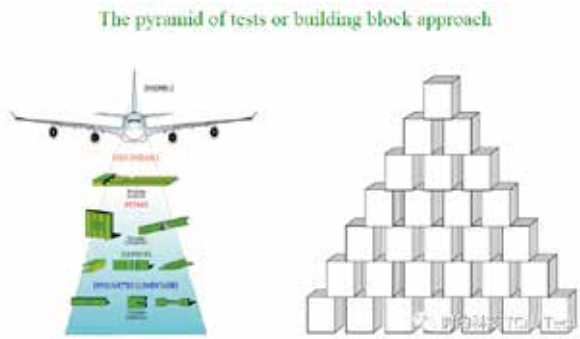
eVTOL 想要最终走入我们的生活，自然也少不了适航认证的过程。

对于复合材料结构来说，航空业使用了几十年，自然已经形成了一套较为规范的适航符合性认证方法，这就是 FAA 于 2009 年颁布的 AC20–107B：Composite Aircraft Structure。文件页数虽然不多，但对大多数人来说也确实是无趣，下面挑几个关键词给大家介绍一下。

关于积木试验方法

Building Block Approach

这个名字比较形象，复合材料的这个试验验证方法就像搭积木一样，底层的试验数量多，考虑因素全面，通过逐步增加试件复杂水平和程度，逐步增大试件尺寸和规模的作法进行分析和试验验证，能够保证工程项目的研究质量和最终的成功。这种试验方法逻辑清晰，层层递进，直到全机结构强度的验证，为航空业所认可，有时候也被叫作金字塔试验。



积木式试验验证示意图

试验的最底层是材料性能试验，这些试验数据用于建立复合材料的材料规范。我们今天使用金属材料，例如是 7075–T651 铝合金，不需要做额外的试验就可以立刻知道材料的弹性模量、泊松比、强度等数据，这是因为这些材料遵循着统一的材料规范生产，正规供应商提供的出厂合格的材料，拿到我们手中自然也会达到同样的性能，而且分散性较低。复合材料则不然，且不说不同碳丝和不同配比的树脂，即使你买的同一款预浸

料，不同的工艺方法、不同的设计方式、不同的制件工厂都可能生产出完全不一样的复合材料产品，这就是我们常说的金属材料是从结构开始设计，复合材料是从材料开始设计。

复合材料积木式试验

再往上就是试样级试验，这些数据主要是为了获得材料许用值。常规的拉压剪强度就不多说了，刚才提到了复合材料对损伤的敏感性，这里就要靠试验来测量到底含损伤的结构有多少的强度，常用的试验包含开孔试验、充填孔试验、低能冲击试验等，这些试验项目的设置自然都是实际结构可能遇到的情况。

有必要提一下这里的低能冲击试验。由于目前使用的复合材料都是一层一层铺设而成，这会造成结构在受到各种外来物的低能量冲击时，表面留下一个较浅的凹坑，目视很难发现，但复合材料结构内部却可能发生了纤维断裂、基体分层等损伤，使得复合材料的力学性能显著下降。这种损伤如同家里的蟑螂，最怕的是看不到的。所以为了在设计时能够涵盖住这些意外的发生，工程师在选取材料设计值时会综合考虑这些可能出现的损伤情况，用最安全的数值进行设计。

试样级往上还有元件级、次部件级试验，通过这些试验后，我们基本就可以搞清楚飞机各个部位的结构的状态，最终通过全尺寸的飞机结构强度试验来完成验证。

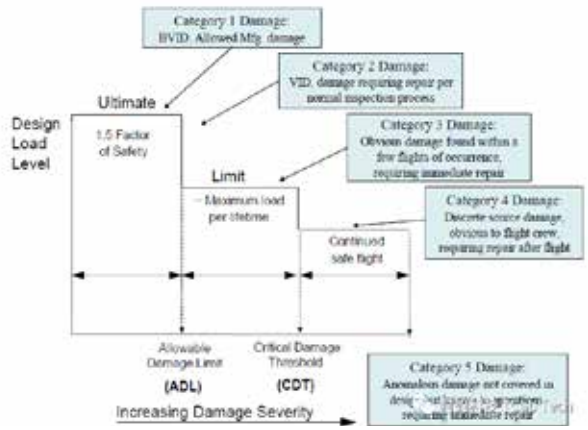
关于“损伤”

前面反复提到了一个词——“损伤”，这里再展开讲一点。

大多数情况下，我们都难以避免结构中出现损伤。它可能来源于材料的缺陷、可能是制造过程中的一个瑕疵、可能是加工过程中的一个纰漏、可能是使用过程中的开裂，甚至，是赶上了一场突如其来的冰雹……

生活教会我们，无法避免就要学会与其共存，这也是当前航空业理论“损伤容限 (Damage Tolerance)”。

损伤容限从字面意思上理解，就是结构出现损伤破坏后，仍然维持所需强度的能力。实际上，无论是对于金属结构还是复合材料结构，损伤容限都是一个重要的考虑。当然，由于材料本身的区别，两者基于的理论方法并不相似，对于复合材料结构，AC20–107B 中给出了五种损伤的分类，对应着不同的要求。



损伤分类

第一类损伤叫做“勉强目视可见损伤(BVID)”。

这个词第一次听说容易让人理解不能。实际上它指的是一个门槛值，可以理解为，在目视检查的手段下，能够发现的最小损伤尺寸，在大多数语境里，我们说到 BVID，其实是指小于等于这一门槛值的损伤。基于刚才提到的“最怕看不到”原则，这类损伤被默认为存在于复合材料结构中，为了在这种情况下仍然保证较高的安全性，FAA 要求飞机在极限载荷下，设计要涵盖住所有的 BVID。极限载荷是飞机可能遭受的最大载荷情况再乘以了一个安全系数，可以认为给与了结构足够的容错空间，这也解释了为什么我们要花大力气去测试含损伤的材料许用值，就是为了满足这种底线思维。

第二类损伤叫做“目视可见损伤 VID”。

有了刚才的介绍这里就比较容易理解。一开始我就提到，工程师会在飞行器服役过程中安排足够多次的检查程序，一旦损伤大到可检查的程度，我们自然可以对其进行维修和更换。在这种损伤下，我们需要保证结构强度能够在一个检查

周期内都不会发生破坏，当然同样需要考虑分散系数，以保证在下次检修期到来前飞机仍然是安全的。

第三类损伤叫做“易检损伤，也叫作LVID”。

这种损伤更大了，大到机组、地勤或是乘客能够比较容易的就发现。这种损伤下，飞机肯定是要马上返修的，鉴于损伤足够大，能够较快的被发现，结构强度只要满足能够承担限制载荷就足够了，要知道，限制载荷已经是飞机可能遭受的最大载荷，也就是这种损伤下结构强度仍然留有足够的裕度。所以下次坐飞机起飞降落时，一定记得把遮光板打开，你也是守护航空安全的一份子哦。

第四类损伤叫做离散源损伤。

这种事件发生概率较低，而且并不能很好的预测，例如鸟撞、强烈的雷击或冰雹等。一旦遭遇，赶紧找安全地方降落。当然，这种情况下就不能指望飞行员再带你飞一个“眼镜蛇”、“落叶飘”动作了，要做的就是尽快平稳小心的飞到最近的降落点，从强度上讲就是要求结构仍能承受回程载荷。

当然，人力终有穷，天道终有定，除了这四类损伤外还有可能出现一些离奇的意外，这样的损伤我们也应该适当考虑。

企业产品推介

新型永磁环保节能器在玻璃行业的应用

一、供应商厂家介绍

浙江顺亿世联科技有限公司是成立于 2018 年，是一家工贸一体校企合作的节能环保公司。

顺亿世联科技有限公司是研发及生产环保节能设备的高新技术企业，联合浙江工业大学研发了 SYSL 永磁环保节能器、扫频阻垢设备及新型车用节油器等一系列高科技产品。企业拥有自主品牌和多项发明专利，共有发明专利 2 项、实用型专利 2 项（专利号：202121691171.5；202110921457.6）。本公司产品通过 ISO9001 国际质量管理体系认证并在 2021 年 7 月成功入选由中国产品质量认证监督管理中心、中国品牌企业评价管理委员会在全国开展的《中国节能环保产品》评选活动、荣获 2020 年度建材与家居行业科学技术奖三等奖 (证书编号：0199–2020051–CX3–D01)。本公司 2020 年加入中国建筑玻璃与工业玻璃协会成为会员单位；2021 年 11 月加入浙江省磁性材料协会。

永磁环保节能器作为一种高效节能、科技环保的处理技术，使用纯物理处理方法，节能率根据使用环境不同能达到 3%–5%，产品安装后逐步在 1 个月后达到最佳效果，配合进行生产过程中的简单维护后，产品使用年限可长达 3–5 年，且无须额外的成本投入。可用于使用天然气 / 燃油的熔炼炉、热风炉、蒸汽炉、内燃机、槽窑、玻璃熔窑、梭式窑、辊道窑等各类设备。可用于化工行业、热电行业、金属行业、陶瓷玻璃制造等以天然气或燃油为能源的企业中。

浙江顺亿世联科技有限公司，通过对气体结构的实验研究和理论分析，运用渗透于不同学科领域的基础研究、检测技术的开发应用，积累了大量有关气体和燃油的研究资料和运行数据，为企业量身定制并设计出设备及管道的处理方案，研究出针对天然气 / 燃油节能和提高能量转化效率的相关技术，并逐步成功推广及应用到各行各业中，是一种环保节能、高效持久的气体处理器，解决了多个行业内企业的生产难题，并取得了多项环保处理技术的突破性成果。

二、应用过程

在正式开始使用前，收集了安装前 1 个月的碹顶 6 号点温度与 5# 小炉天然气设定量数据用于今后应用对比。

2021 年 8 月 14 日，我司技术人员携带两台永磁环保节能器来到一线按计划安装于东 5# 小炉 1# 枪与 3# 枪进行一个月应用，开始记录碹顶 6 号点温度等数据进行对比。9 月 15 日我司人员将节能器转移安装至西 5# 小炉 1# 枪与 3# 枪进行对比测应。因东侧安装节能器后东西火温差增大，现对东火设定气量单边下调，使东西火温差尽可能小，东西火设定气量的差值即为节能器的节气量。

2021 年 10 月 22 日我司相关技术人员将节能器由西 5# 炉安装至东 5# 炉，同时设备动力部仪表人员将天然气系统中 5# 炉设定气量东西火分开。待温度数据稳定后开始记录测应数据。

三、试用结果

第一阶段应用结果

7 月 13 日至 8 月 12 日 5# 小炉对应碹顶热电偶温度平均温度为东火 1522℃、西火 1521℃、温差 1℃，平均气量 785m^3/h（其中 7 月 15 日、7 月 16 日、8 月 9 日、10 日受设备调整影响，7 月 15–16 日、8 月 9–10 日数据剔除）；

2、8 月 14 日节能器安装至东 5# 小炉 1# 枪和 3# 枪，数据从 8 月 15 日统计至 9 月 15 日 5# 小炉对应碹顶热电偶温度平均温度为东火 1528℃、西火 1524℃、温差 4℃，平均气量 785m^3/h；

3、9 月 15 日节能器从东边 5# 小炉拆除，安装至西 5# 小炉。数据从 9 月 16 日统计至 9 月 20 日 5# 小炉对应碹顶热电偶温度平均温度为东火 1531℃、西火 1530℃、温差 1℃，平均气量 780m^3/h。

装在东 5# 炉时东火与西火的温差加大。当节能器安装在西 5# 炉时东火与西火的温差缩小，甚至有西火温度超过东火温度现象。对比以上数据，证明节能器具有节能效果。

第二阶段使用结果

10 月 22 日节能器安装至东侧使用，待温度稳定后，于 10 月 24 日开始统计数据。10 月 24 日至 11 月 14 日 5# 小炉对应碹顶热电偶温度平均温度为东火 1530℃、西火 1529℃、温差 1℃，温差相对稳定。

关于撤销《中国电子元件行业协会磁性材料与器件分会专家委员会》组织机构的通知

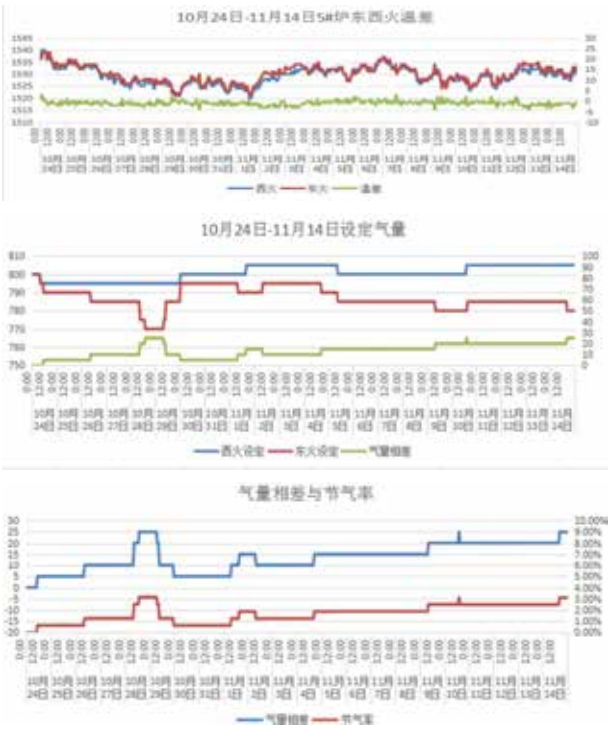
各专委会专家，各企业及有关部门和单位；

根据国家民政部《关于开展全国性社会团体、国际性社会团体分支（代表）机构专项整治行动的通知》的文件规定以及民政部“对社会团体分支（代表）机构专项整治”的电视电话会议中强调：“分支机构下不得再设任何分支机构”的精神，按照中国电子元件行业协会开展下属分支机构自查自纠的工作部署，决定对于 2016 年 11 月 12 日成立的 " 中国电子元件行业协会磁性材料与器件分会专家委员会 " 组织机构（注：刊登于《磁性材料・元器件》内刊 48 页）予以撤消，对当时聘请的专家保留分会聘请专家身份，但不作为机构成员。并且，我们还将在后续进行重新调整和完善手续。谨此，对各位专家表示诚挚歉意，并感谢各位专家长期以来的支持和帮助。期待再次合作！

特此通知

中国电子元件行业协会磁性材料与器件分会

2022 年 4 月 23 日



对比以上数据，保持东西火碹顶温度一致，节气率为 3.11%。

四、市场前景

近年来，天然气作为清洁能源被越来越广泛的接受和使用，其消费量逐年上升。数据显示，2016 年至 2020 年全国天然气表观消费量从 2058 亿立方米增长至 3240 亿立方米，复合增长率为 12%。2021 年 1—7 月国内天然气需求快速增长，总表观消费量达到 2112 亿立方米，同比增幅 17.1%，天然气节能产品具有广阔的市场空间。以温州某有限公司为例，单台永磁环保节能器节能率为 4.9%，单台费用约 15 万元，按每天用天然气量 15000m3 计算，每年可节约天然气 15000*4.9%*365=268275m3，折合标煤 356.81t，按当地天然气价格 4 元 / 方计算，每年可节省燃料费用 107.3 万元。截至 2020 年底，浙江省共有锅炉约 16575 台，全部安装节能器总费用约 24.86 亿元，每年可节省的天然气量 44.5 亿立方，折合成标煤达到 591.85 万吨以上，减少碳排放 962.09 万吨以上，节省燃料费用 178 亿元。

科技部战略规划司领导一行前来调研长三角 G60 科创走廊工作并召开座谈会

3 月 10 日，天气晴朗，春暖花开。国家科技部战略规划司战略与决策处程广宇处长一行，在浙江省科技厅协调处领导陪同下，到金义都市新区、义乌等地进行调研。金华市科技局王建国局长、王锡锋、陈英等党组成员以及新区有关领导陪同调研。

实地调研后，在金义新区管委会会议室召开了“长三角 G60 科创走廊（金华段）工作座谈会”。上述领导以及金华市其它相关部门、相关县（市）科技局和 G60 科创走廊新材料产业联盟代表参加了座谈会。会上，科技部战略司领导听取了各部门领导工作情况介绍。产业联盟副秘书长在会上也作了工作汇报。他说，G60 科创走廊新材料产业技术创新联盟成立于 2018 年，是在金华市科技局牵头下成立的 G60 区域的第一个产业联盟，联盟现有成员单位 83 家。几年来，联盟在组织行业高峰论坛、科技对接、科研机构考察合作、产业链交流、人才培训等方面开展丰富多彩的活动，并建立和形成了常态化机制。同时，他建议：一是要有重点。要厘清九城市区域内产业重点，企业重点，研发重点和区域重点，针对重点制定措施，集中资源攻关克难，统筹解决产业短板和技术共性难题；二是有抓手。对区域内产业、项目、产品开通科技奖、项目支持、平台建设等通道，完善鼓励支持政策，特别是在人才引进和科研成果转化，以及产研结合方面要有可实操性办法措施；三是要有经费。联盟组织不收会费，经费来源主要靠理事长单位，这不可长久，而且增加企业负担；四是联席办领导相对稳定，任期不应太短，造成工作连贯性脱节。

最后，程广宇处长总结讲话。他对 G60 金华段工作给予肯定，认为金华很有先天禀赋，人才济济，有很好的科技土壤、产业特色，定能赋能产业发展。他说，在长三角的指标体系中，要对 G60 有单独指标，对该区域内的重点产业及产业链进行大数据测算，摸清优劣长短。通过几年建设，长三角已经到了顶层设计的阶段，发展可期。

关于下达 2022 年第二批中国电子元件行业协会团体标准制定项目计划的通知

中电元协 2022 第 (006) 号

各有关单位 :

根据《中国电子元件行业协会团体标准管理办法》和《中国电子元件行业协会团体标准制修订工作程序》, 经研究 , 中国电子元件行业协会发布 2022 年第二批团体标准制定项目计划 (见附件), 请各有关单位加强组织领导 , 保证标准的质量水平。有关要求通知如下 :

1. 请各标准起草单位注意做好标准制定与技术创新、试验验证、知识产权处置、应用推广的统筹协调 , 做好标准起草的组织、编写、协调 , 标准征求意见稿要在中电元协官方网站 (htt:/wwwic-ceca.org.cn/) 公示 , 广泛征求各方意见 , 按时完成制定工作。

2. 请相关归口分支机构随时跟进起草单位的工作进度 , 及时安排技术审查等组织工作 , 确保标准质量。

3. 在计划的执行过程中 , 如需对标准项目进行调整 , 按有关规定办理。

附件 :2022 年第二批中国电子元件行业协会团体标准制定项目计划

中国电子元件行业协会

二〇二二年四月十一日

附件 :

2022 年第二批中国电子元件行业协会团体标准制定项目计划

序号	计划编号	项目名称	项目完成时间	主要起草单位	归口分支机构
1	YX202204001	1.27mm 印制板用自由电缆用连接器	12 个月	维峰电子 (广东) 股份有限公司、中国电子技术标准化研究院、山东龙立电子有限公司、深圳市得润电子股份有限公司、东莞高端精密电子股份有限公司、苏州瑞可达连接系统股份有限公司	中国电子元件行业协会电接插分会
2	YX202204002	0.8mm 间距浮动式印制板用连接器	12 个月	维峰电子 (广东) 股份有限公司、中国电子技术标准化研究院、山东龙立电子有限公司、深圳市得润电子股份有限公司、东莞高端精密电子股份有限公司、苏州瑞可达连接系统股份有限公司	中国电子元件行业协会电接插分会
3	Yx202204003	数据通信用 CRE 系列矩形连接器	12 个月	东莞立讯技术有限公司、中国电子技术标准化研究院、腾讯科技 (深圳) 有限公司、腾讯科技 (深圳) 有限公司、浪潮电子信息产业股份有限公司、新华三技术有限公司、烽火通信科技股份有限公司、中航光电科技股份有限公司、贵州航天电器股份有限公司、深圳金信诺高新技术股份有限公司、电连技术股份有限公司、苏州瑞可达连接系统股份有限公司、东莞理工学院	中国电子元件行业协会电接插分会
4	Yx202204004	射频连接器用硅胶柔性防护帽	12 个月	佛山市方普防护技术有限公司、中国电子技术标准化研究院、陕西华达科技股份有限公司、广州中汇腾达智能电子科技有限公司、西安航天思普电子科技有限公司	中国电子元件行业协会电接插分会
5	x202204005	低磁导率纳米晶磁心	12 个月	横店集团东磁股份有限公司、江苏集萃安泰创明先进能源材料研究院有限公司、马鞍山新康达股份有限公司、天通控股股份有限公司	中国电子元件行业协会磁性材料与器件分会
6	Yx202204006	旋磁多晶铁氧体	12 个月	东阳富仕特磁业有限公司、浙江中元磁业股份有限公司、世达普 (苏州) 通信设备有限公司	中国电子元件行业协会磁性材料与器件分会

横店东磁再次荣膺“天马奖”

4 月 22 日，第十三届中国上市公司投资者关系天马奖揭晓，横店东磁获“中国上市公司投资者关系最佳董事会奖”和“中国上市公司最佳投资者关系奖”，公司董事会秘书获评“主板上市公司投资者关系最佳董秘”。

此次获奖，彰显了投资者对横店东磁 2021 年业务发展、公司治理、投资者关系等工作的认可。展望未来，公司将继续深耕行业，保持业务高速发展、充分发挥自身优势，力做最具社会责任心的企业。

再添“国字号”荣誉　横店东磁喜获第五枚“中国专利优秀奖”

日前，第二十三届中国专利奖名单出炉，横店东磁发明专利《一种双面 PERC 太阳能电池结构及其制备工艺》获得优秀奖。截至目前，该公司已获中国专利优秀奖 5 枚，浙江省专利金奖、优秀奖各 1 枚。

序号	专利号	专利名称	专利权人
353	ZL201711391152.9	功率器件内置且双面散热的功率模组及其制备方法	华健科技（珠海）有限公司
354	ZL201611059644.3	基于多芯片堆叠工艺的芯片内部温度监控设备	天津津航计算技术研究所
355	ZL201911265382.X	干法粉末生产工艺数字验证系统及方法	中信重工机械股份有限公司
356	ZL201811317416.0	基于三维空间划分的地理坐标压缩编解码方法	苏州工业园区测绘地理信息有限公司
357	ZL201910364335.4	一种激光追火装置	上海微电子装备（集团）股份有限公司
358	ZL201810780446.9	一种双面PERC太阳能电池结构及其制备工艺	横店集团东磁股份有限公司
359	ZL201310029963.X	垃圾网页的识别方法及系统	清华大学,北京搜狗科技发展有限公司
360	ZL201811184206.9	一种铅酸蓄电池	天能电池集团股份有限公司
361	ZL201780000796.2	液晶触屏安全保护结构、保护方法、及金融支付设备	福建联迪商用设备有限公司
362	ZL201911002158.1	一种图像识别方法、装置、设备、系统及介质	腾讯科技（深圳）有限公司

本次获奖专利涉及的制备工艺，可极大降低双面电池的翘曲度，提升组件的机械载荷强度，并能有效提升电池的正面转换效率、双面率及抗 LID 能力，进一步加强公司太阳能电池和组件产品的市场竞争优势。据悉，该公司现有授权专利 1345 项，发明专利 504 项，是全国首批知识产权示范企业、浙江省专利示范企业，在“金华创造力企业五十强名单”中排名第一，并名列“2021 浙江省专利创造百强企业名单”第十五位。为带动行业知识产权布局和运营，助力产业转型升级，公司于 2016 年牵头成立了“浙江省磁性材料产业知识产权联盟”。而在最近，为优化联盟运行工作，公司又携手其他几家联盟企业，合资成立了“金华市磁盟知识产权服务有限公司”，专门负责具体运营。该公司将在强化专利分析、加强专利系统性布局、增加高价值专利申请、开展专利标准制定等方面发力，进一步完善知识产权和标准体系建设，提升横店东磁与其他联盟企业的竞争力。

CGTE
春光科技集团

致力成为世界一流的磁电专业制造商

WE ARE COMMITTED TO BECOMING A WORLD-CLASS PROFESSIONAL MANUFACTURER OF MAGNETOELECTRICITY

▷产品特性 Product Characteristics

根据材料的特性产品分为CH系列、CP系列、CB等3大系列，45个品种。

CH系列为高磁导率铁氧体材料形成宽频、宽温、高Q值、高BS、高阻抗等26个专业品种。

CP系列为低功耗锰锌铁氧体材料形成低功耗、宽温、高BS、高频等14个专业品种。

CB系列为高居里温度、高叠加锰锌铁氧体材料根据应用场景不同形成多个专业品种。

CN系列为镍锌料具有高频、宽频、高阻抗、低损耗的特点品种。

▷应用领域 Product Application

产品广泛应用于**5G网络通讯、家用电器、医疗器械、绿色能源、无线充电、汽车电子、高速高铁、仪表仪器、军工产品**等领域。

▷设备仪器 Equipment & Instruments

公司拥有**荧光分析仪、阻抗分析仪、高频分析仪、B-H分析仪、ICP微量元素检测仪**等先进检测分析仪器**150余台套**科研设备仪器。

▷科研成果 Scientific Research Achievements

公司科研实力雄厚，拥有各类工程技术人员70余人，科技创新研发平台23个，专利62项，科技鉴定成果30余项。先后承担过多项省、市级科技创新、技改项目。是国家高新技术企业、国家第三批专精特新“小巨人”企业、中国磁性材料专业十强、山东省“十强”产业集群领军企业、新材料产业领军企业10强、中小企业“隐形冠军”、“瞪羚企业”、临沂国家高新区“功勋企业”。建有省级企业技术中心、“一企一技术”研发中心、市企业重点实验室、市工程技术研究中心等研发平台等，并与国内多所知名高等院校和科研院所建立了长期、紧密的产学研合作关系。

地址：山东省临沂高新区双月湖路318号
电话：0539-7979908（销售部） zhanghua@cnlcg.com
0539-7958702（采购部） mingyongqing@cnlcg.com
网址：http://www.cnlcg.com

-山东春光磁电科技有限公司-

SHANDONG CHUNGUANG MAGNETOELECTRIC TECHNOLOGY CO., LTD

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 4 月 12 日印刷