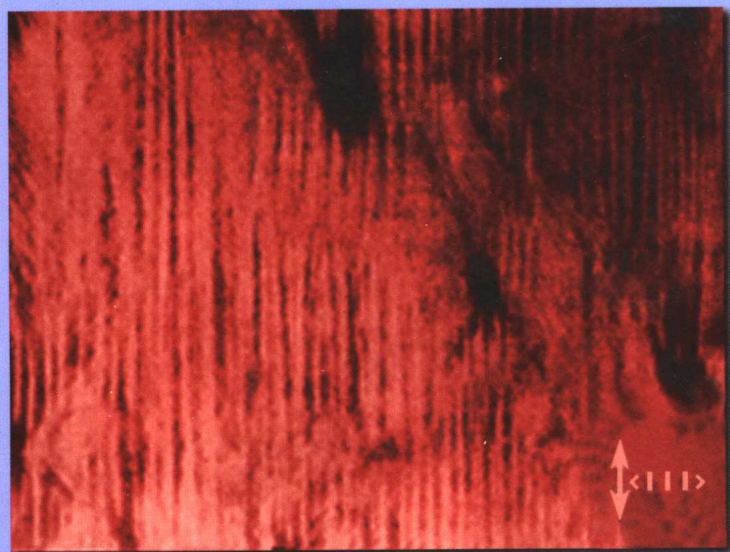


21 世纪新材料科学与技术丛书

超磁致伸缩材料 制备与器件设计

王博文 著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com>

21 世纪新材料科学与技术丛书

超磁致伸缩材料制备 与器件设计

王博文 著

北 京
冶金工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

超磁致伸缩材料制备与器件设计/王博文著. —北京:
冶金工业出版社, 2003. 8

(21 世纪新材料科学与技术丛书)

ISBN 7-5024-3289-2

I. 超… II. 王… III. ①磁性材料—制备②磁性
材料—电子元件—设计 IV. TM27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 036038 号

超磁致伸缩材料制备与器件设计

出 版 人 曹胜利(北京市东城区沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

作 者 王博文

责任编辑 张 卫(联系电话: 010-64027930; E-mail: bull2820@sina.com)

美术编辑 李 心

责任校对 侯 娟

责任印制 牛晓波

版式设计 张 青

出 版 冶金工业出版社

发 行 冶金工业出版社发行部 电话: 010-64044283; 传真: 010-64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711); 电话: 010-65289081

经 销 全国各地新华书店

印 刷 北京鑫正大印刷有限公司

开 本 850mm×1168mm 1/32

印 张 7.125 印张

字 数 186 千字

版 次 2003 年 8 月第 1 版

印 次 2003 年 8 月第 1 次印刷

印 数 1~3500 册

定 价 20.00 元

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

编者的话

材料是人类物质生活和人类文明进步的基础,新材料是支撑现代文明社会的基石和高新技术发展的先导。

在刚刚过去的 20 世纪,科学技术迅猛发展,各学科交叉融合。随着科学的发展与工业技术的进步,传统的金属材料、无机非金属材料和高分子材料越来越不能满足现代科技应用的需要,科技工作者不断研制出新材料,特别是新型功能材料,如超导材料、智能材料、纳米材料、生物医用材料、储能材料、环境材料、薄膜材料、先进陶瓷材料等等。正是这些新材料所具有的特殊性能,使其他高新技术及产业得以高速发展,同时材料科学与技术本身相关产业也将快速发展。如纳米材料和技术为功能器件的小型化、多功能化和智能化展示了其未来诱人的发展前景;又如光电子材料的研究与开发为信息技术及产品不断满足人们的需求提供了保障。

21 世纪,材料科学与技术将与信息技术、生物技术等其他科学技术一同为人类的

进步做出贡献。然而,目前有些具有美好发展前景的新型材料的研究与开发,还处于基础阶段,还需要材料工作者做大量理论研究与技术开发工作,并不断总结提高。基于此,我社将有重点、有系统地组织国内从事新材料基础研究、材料制备工艺与先进测试分析技术研制以及产品应用开发的科技工作者,将其取得的最新科技成果及时归纳总结,撰写成著作,编入《21 世纪新材料科学与技术丛书》陆续出版,以推进我国材料科学与技术及其产业化的进程,满足其他高新技术产业发展对新材料提出的更高要求;同时,让更多的科技工作者同享这些研究成果,记录我国在 21 世纪中材料科学与技术的发展历程。

欢迎承担国家“863”项目、国家自然科学基金资助项目、国家“973”项目以及省、部级重点研究课题的材料研究学者踊跃参与此项工作,欢迎广大科技工作者和读者提出建议和意见。

2001 年 6 月

序

铁磁材料在磁场作用下发生长度或体积变化的现象称为磁致伸缩。磁致伸缩材料主要有三大类:镍和镍基合金,压电陶瓷材料(简称为 PZT),稀土超磁致伸缩材料。稀土超磁致伸缩材料主要是指稀土-铁系金属间化合物。这类材料的磁致伸缩值达到 $1500 \times 10^{-6} \sim 2000 \times 10^{-6}$, 比镍和镍基合金的磁致伸缩大约 2 个数量级, 因此被称为稀土超磁致伸缩材料。20 世纪 70 年代初, 人们研制出能实现电磁能-机械能高效转换的超磁致伸缩材料, 这种材料的研制, 已对尖端技术、军事技术的发展及传统产业的现代化产生了重要作用, 开辟了磁致伸缩材料的新时代。磁致伸缩材料, 在磁场作用下, 其长度发生变化, 可发生位移而做功; 在交变磁场作用下, 可发生反复伸张与缩短, 从而产生振动或声波。这种材料可将电磁能转换成机械能或声能, 相反也可以将机械能转换成电磁能, 是重要的能量与信息转换功能材料。它在声纳的水声换能器技术、电声换能器技术、海洋探测与开发技术、微位移

驱动、减振与防振、减噪与防噪系统、智能机翼、机器人、自动化技术、燃油喷射技术、阀门、泵、波动采油等高新技术领域有广泛的应用前景。稀土超磁致伸缩材料的应用可诱发一系列的新技术、新设备、新工艺的研制与应用。它是可提高一个国家竞争力的材料,是 21 世纪战略性功能材料。

美国边缘技术(Edge Technologies)公司 1989 年开始生产稀土超磁致伸缩材料。近 10 多年来,日本、俄罗斯、英国和澳大利亚等也相继研究开发出(Tb,Dy)Fe₂型磁致伸缩材料。我国在 20 世纪 90 年代初开始稀土超磁致伸缩材料的研究,实验室达到较先进水平。在器件研究方面,我国也取得了一些进展,这些都推动了稀土超磁致伸缩材料的发展。目前,国内尚未见到有关系统介绍超磁致伸缩材料及应用的书籍。《超磁致伸缩材料制备与器件设计》作为专门论述超磁致伸缩材料制备、合金相图及材料应用的专著,是作者在国家、省自然科学基金资助下,进行 10 余年的辛勤研究工作的结果,也是作者所取得的研究成果的很好概括和总结。

本书较系统地论述了磁致伸缩概念、理论、超磁致伸缩材料的制备和器件设计。主要内容包括:磁致伸缩概念、起源、理论和原子模型;磁致伸缩材料的发展历程和种类、稀土-铁二元、三元及多元合金相图;超磁致伸缩材料的制备技术,包括合金熔炼法、烧结法和粘结法。超磁致伸缩材料的磁性能与测试;超磁致伸缩材料的应用和超磁致伸缩材料的器件设计。作者的研究成果主要体现在本书的超磁致伸缩材料的制备与性能、稀土-铁合金相图及材料器件的设计等内容方面。

本书内容丰富、素材新颖、层次分明。相信本书的问世将会有力地推动稀土超磁致伸缩材料及材料器件的研究工作向前发展。同时,希望本书作者在这一研究领域取得更大成绩。

中国科学院院士
中国科学院物理研究所研究员 梁敬魁

2003年4月15日

前言

从 20 世纪 50 年代开始,随着通信技术、电子学、计算机技术的飞速发展,磁性材料的应用领域迅速扩大。一方面,传统的永磁和软磁材料不断出现新的应用领域,材料的性能不断提高;另一方面,人们加强了对新型磁性材料的性能与应用的研究,如研究超磁致伸缩材料、磁光材料、磁性液体材料、巨磁电阻材料和磁记录材料等。目前,以稀土和铁为基的超磁致伸缩材料的发展已引起磁致伸缩换能方面新应用的迅速发展,尤其在声纳、超声换能器和致动器方面的应用令人瞩目。

磁致伸缩效应最早是由 J. P. Joule 于 1842 年发现的,后来人们发现 Ni、Co、Fe 及它们的合金也具有明显的磁致伸缩效应,但是应变仅在 50×10^{-6} 以内。稀土-铁超磁致伸缩材料的磁致伸缩比纯金属镍约大 80 倍,比压电陶瓷大 5~8 倍,且承载能力强,能量转换效率高和反应速度快,可广泛用于液体阀门控制器、精密加工微定位仪、高精度高速线性马达、大功率声纳系统声磁换能

器、磁弹性波器件等许多领域。

美国能源部 Ames 实验室的科学家首先发现了稀土元素铽(Tb)具有超磁致伸缩特性。1972 年 Arthur Clark 博士研究小组在海军军械实验室(现为海军表面武器中心)把具有超磁致伸缩性能的镧(La)系元素铽(Tb)和镝(Dy)与过渡金属 Ni、Co 和 Fe 相结合,发现在室温下 Tb-Fe 合金(TbFe_2)具有特大的磁致伸缩。随后,他们与 Ames 实验室的 D. D. McMasters 合作研究发现了磁晶各向异性补偿合金 $\text{Tb}_x\text{Dy}_{1-x}\text{Fe}_2$ (Terfenol-D)。“Terfenol-D”这一名字代表了材料组成以及最初开始此项工作的 Navy 实验室的名字。这里“Ter”代表 Tb,“fe”代表 Fe,“nol”代表 Naval Ordnance Laboratory,“D”代表 Dy。之后,Edge 技术股份有限公司成立了 Etrema 分部,目的是将超磁致伸缩材料从实验室发展到应用领域,为用户提供磁致伸缩合金和磁致伸缩材料器件产品。

作者于 1995 年在中国科学院金属研究所获博士学位,1997 年在东北大学完成博士后研究工作,并先后应邀到德国阿伦工业大学、英国布莱顿大学和韩国电气技术研究院进行了合作科学研究。曾承担国家、省自然科学基金及省科技攻关等多项课题;作为主要研究者,参加了国家自然科学基金重点项目“稀土-过渡金属相图及新材料探索”的工作。作者从 1990 年开始从事稀土超磁致伸缩材料及应用的研究工作,研究成果分别在《Appl. Phys. Lett.》、《J. Appl. Phys.》和《中国科学》等重要学术刊物上发表,在国内外学术刊物上发表论文 100 余篇,其中被 SCI 收录 50 余篇。曾获国家发明四等奖、辽宁省科学技术进步三等奖和省教委科技进步二等奖等奖项。

本书的出版是作者多年从事稀土超磁致伸缩材料及器件研究工作的结果,研究工作得到了国家自然科学基金委员会(项目批准号:59131021,59871030)、河北省自然科学基金委员会(项目批准号:501027)、河北省科技厅(项目批准号:01213531D)、河北省教育厅的资助。河北工业大学磁技术与磁材料研究中心对本书的出版给予了大力的支持,英国布莱顿大学的 Busbridge 博士提供了磁畴照片,在此表示衷心感谢。此外,书中选用了国内外一些超磁致伸缩材料工作者和我的学生的研究成果,在此亦向这些作者表示诚挚的谢意。

作者深感荣幸的是,中国科学院院士、中国科学院物理研究所梁敬魁研究员能在百忙之中为本书作序。对于梁敬魁先生的支持与鼓励,作者在此深表谢意。

作者期望本书的出版能够推动稀土超磁致伸缩材料在国内的研究、应用和发展,但由于水平有限,时间仓促,书中不足之处,恳请读者不吝指正。

作 者

2003 年 2 月于天津

本书主要物理量符号、物理量名称、 单位符号、单位名称对照表

物理量符号	物理量名称	单位符号	单位名称
A	面积	m^2	平方米
B	磁感应强度	T	特[斯拉]
B_r	剩余磁感应强度	T	特[斯拉]
C	声速	m/s	米每秒
C_d	磁致伸缩棒内 部阻尼系数		Ns/m ² 牛[顿]秒每 平方米
C_l	阻尼系数	Ns/m	牛[顿]秒每米
C_r	等效阻尼系数	Ns/m	牛[顿]秒每米
d	原子间距	m	米
	压磁系数	m/A	米每安[培]
d_{33}	动态磁致伸缩系数	m/A	米每安[培]
E	杨氏模量	Pa	帕[斯卡]
		N/m ²	牛[顿]每平方米
E_{mech}	机械能密度	J/m ³	焦[耳]每立方米
f_r, f^H	共振频率	Hz	赫[兹]
f_a, f^B	反共振频率	Hz	赫[兹]
F	力	N	牛[顿]
F_σ	应力各向异性性能	J	焦[耳]
g	常数	1/T	每特[斯拉]
G	应变因子		
H	磁场强度	A/m	安[培]每米
H_c	矫顽力	A/m	安[培]每米
H_0	偏置磁场	A/m	安[培]每米
H_s	饱和磁场强度	A/m	安[培]每米
I	电流	A	安[培]

物理量符号	物理量名称	单位符号	单位名称
i	交流电流	A	安[培]
J	交换积分, 角量子数		
j	虚数		
K	磁晶各向异性常数 灵敏系数	J/m ³	焦[耳]每立方米
k_{33}	磁机械耦合系数		
k_e	有效磁机械耦合系数		
K_l	等效刚度系数	N/m	牛[顿]每米
K_r	刚度系数	N/m	牛[顿]每米
L	交流应变		
l	长度	m	米
M	磁化强度	A/m	安[培]每米
	质量	kg	千克
m	质量	kg	千克
M_s	饱和磁化强度	A/m	安[培]每米
n	单位长度线圈匝数		
N	线圈匝数, 退磁因子		
Q	机械品质因数		
R	电阻	Ω	欧[姆]
	机械阻尼	kg	千克
r	半径	m	米
	电阻	Ω	欧[姆]
S	应变		
s^H, s^B	柔顺系数	m ² /N	平方米牛[顿]
s_{33}	轴向柔顺系数	m ² /N	平方米牛[顿]
S_{ii}	应变张量		
S_{pp}	动态磁致伸缩峰值		
T	温度	K	开[尔文]
		℃	[摄氏]度

物理量符号	物理量名称	单位符号	单位名称
T	采样周期	s	秒
T_d	微分时间常数	s	秒
T_i	积分时间常数	s	秒
t_r	上升时间	s	秒
t_s	调节时间	s	秒
U	电压	V	伏[特]
V	电压	V	伏[特]
	体积	m^3	立方米
v	声速	m/s	米每秒
x	成分		
x, y, z	直角坐标轴		
Y	杨氏模量	Pa	帕[斯卡]
		N/m ²	牛[顿]每平方米
Z	阻抗	Ω	欧[姆]
α	磁化强度的方向余弦		
	Stevens 常数		
β	测量方向的方向余弦		
ε	应变		
η	灵敏系数,机械效率		
θ	角度	°	度
λ	磁致伸缩		
λ_s	饱和磁致伸缩		
μ	磁导率	H/m	亨[利]每米
μ_{33}	增量磁导率		
μ_f	摩擦系数		
μ_0	真空磁导率	H/m	亨[利]每米
π	圆周率		
ρ	密度	kg/m ³	千克每立方米
	电阻率	$\Omega \cdot m$	欧[姆]每米

物理量符号	物理量名称	单位符号	单位名称
σ	应力	Pa N/m ²	帕[斯卡] 牛[顿]每平方米
Φ	磁通量	Wb	韦[伯]
ω	体磁致伸缩		
ω_0	角共振频率	Hz	赫[兹]

目 录

1 磁致伸缩	(1)
1.1 磁致伸缩效应	(1)
1.2 磁致伸缩起源	(2)
1.3 磁致伸缩的唯象理论	(5)
1.4 RFe_2 化合物磁致伸缩的原子 模型	(8)
1.5 磁致伸缩的单离子模型	(9)
1.6 磁弹性能	(11)
1.7 温度与合金成分对磁致伸缩的 影响	(14)
参考文献	(16)
2 磁致伸缩材料	(17)
2.1 磁致伸缩材料的发展历程	(17)
2.2 磁致伸缩材料的种类	(20)
2.2.1 过渡金属及其氧化物	(20)
2.2.2 稀土金属	(23)
2.2.3 稀土-过渡金属化合物	(24)
2.2.4 钐系金属化合物	(28)
2.3 磁致伸缩薄膜材料	(28)
参考文献	(31)

3 稀土-铁合金相图及其化合物	(33)
3.1 稀土-铁二元系合金相图及其化合物	(34)
3.2 稀土-铁三元系合金相图	(40)
3.3 稀土-铁多元系合金相图	(46)
3.4 Sm-R-Fe-Co 四元系相图及其化合物	(49)
3.4.1 Sm-Nd-Fe-Co 系	(50)
3.4.2 Sm-Pr-Fe-Co 系	(52)
3.4.3 Sm-Dy-Fe-Co 系	(54)
参考文献	(57)
4 超磁致伸缩材料制备技术	(59)
4.1 合金熔炼法	(59)
4.1.1 布里吉曼法	(60)
4.1.2 浮区法	(61)
4.1.3 丘克拉尔斯基法	(65)
4.2 超磁致伸缩材料的热处理	(68)
4.3 烧结超磁致伸缩材料的制备	(73)
4.4 粘结超磁致伸缩材料的制备	(76)
4.5 氢化-歧化-脱氢法(HDD 法)	(79)
4.6 薄膜超磁致伸缩材料的制备技术	(81)
参考文献	(83)
5 超磁致伸缩材料的磁致伸缩性能	(85)
5.1 稀土合金的磁致伸缩性能	(85)
5.2 铽-镱-铁合金的磁致伸缩性能	(89)
5.3 合金元素替代对 $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_2$ 合金的结构 与磁致伸缩的影响	(92)
5.4 Sm-R-Fe(R = Dy, Pr)合金的磁致伸缩性能	(97)
5.4.1 Sm-Dy-Fe 合金的磁致伸缩性能	(97)