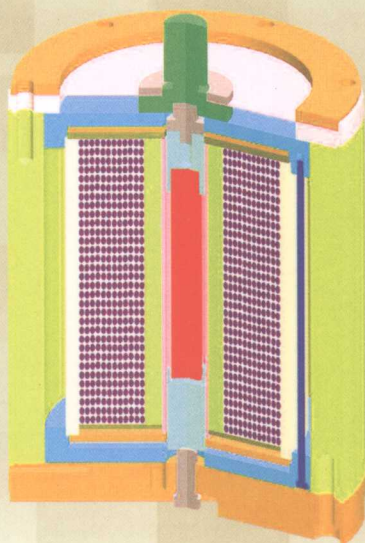



超磁致伸缩材料 微位移执行器原理与应用

Theory and Applications of Giant
Magnetostrictive Microdisplacement Actuator

贾振元 郭东明 著



 科学出版社
www.sciencep.com

超磁致伸缩材料微位移 执行器原理与应用

Theory and Applications of Giant
Magnetostrictive Microdisplacement Actuator

贾振元 郭东明 著

科学出版社

北京

TM2/1
J2

内 容 简 介

本书是多项国家自然科学基金、高等学校博士学科点专项基金、辽宁省科学技术基金等项目的研究成果总结,是一本介绍超磁致伸缩材料微位移执行器的原理、设计方法及应用的专著。本书系统地阐述了超磁致伸缩材料的材料与物理学基础、微位移执行器结构设计方法、建模理论、非线性控制技术以及超磁致伸缩薄膜的工作原理和静动态特性等,并介绍了各种超磁致伸缩材料微位移执行器的应用实例。全书共分8章。第1章介绍了超磁致伸缩材料与物理学基础;第2章介绍了超磁致伸缩材料的制备与应用特性;第3章介绍了超磁致伸缩微位移执行器设计理论与方法;第4章介绍了超磁致伸缩材料及微位移执行器的建模理论;第5章介绍了超磁致伸缩微位移执行器控制技术;第6章阐述了超磁致伸缩薄膜的物理与材料学基础;第7章阐述了超磁致伸缩薄膜材料建模理论;第8章介绍了超磁致伸缩材料的应用研究。

本书既具有理论的系统性,又具有工程技术的实用性,可供从事超磁致伸缩材料及其执行器研究工作的科技工作者、专业技术人员以及高等院校相关专业的师生参考。同时,也可供从事其他功能材料及其应用研究的科研、工程技术人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

超磁致伸缩材料微位移执行器原理与应用 = Theory and Applications of Giant Magnetostrictive Microdisplacement Actuator / 贾振元, 郭东明著. —北京: 科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-022263-3

I. 超… II. ①贾…②郭… III. 压磁材料-执行器-研究 IV. TM271 TH86
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 082918 号

责任编辑: 耿建业 / 责任校对: 包志虹

责任印制: 刘士平 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2008年5月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2008年5月第一次印刷 印张: 21 1/4

印数: 1—2 500 字数: 411 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<新欣>)

序

超磁致伸缩材料可将电磁能转换成机械能或声能,相反也可将机械能转换成电磁能,是一种重要的能量转换功能材料。超磁致伸缩材料具有应变大、能量密度高、机电耦合系数大、响应速度快和输出力大等优点,使其在众多功能材料中脱颖而出,并迅速引起了国内外学术界及工业界的极大关注。应用超磁致伸缩材料研制的微执行器、微驱动器和微传感器已在精密超精密加工、微加工、MEMS 制造、光纤作业、激光制导、生物医疗等高新技术领域展现出广阔的应用前景。

20 世纪 70 年代初美国海军水面武器中心和 Iowa 大学 Ames 稀土材料研究所合作发明了 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.95}$,拉开了超磁致伸缩材料研究的序幕。近 20 多年来,随着超磁致伸缩材料制备技术的不断发展,性能不断改进,美国、日本、德国、法国等国家相继开展了超磁致伸缩材料的应用研究,已研制出多种微执行器、微传感器,并已有产品化的微驱动器;我国在“863”计划、国家自然科学基金重点项目等大力支持下已取得了可喜的研究成果,并在超磁致伸缩材料应用研究方面也取得了一些进展。但目前,国内尚未见到有关系系统介绍超磁致伸缩材料及其微位移执行器的书籍。该书作为一本论述超磁致伸缩材料微位移执行器的材料机理、执行器设计理论与方法、控制技术及应用专著,是作者在国家自然科学基金、高校博士点基金、辽宁省科学技术基金等项目资助下,进行了十余年的辛勤研究工作的总结,也是作者对所取得研究成果的很好凝聚。

作者将超磁致伸缩材料微执行器的研究成果有机地融入整书中,形成一个内容丰富、结构严谨、逻辑性强的完整体系,在思想性、科学性、内容先进性上都有其自身的特点。该书集中论述了超磁致伸缩材料的材料与物理学基础、磁化过程及执行器的建模、执行器的机械结构设计、执行器控制技术等基础理论和关键技术,同时对超磁致伸缩薄膜材料的制备方法、薄膜材料及执行器的建模等都进行了系统的讲述。作者的研究成果主要体现在本书的超磁致伸缩材料磁化模型、微位移执行器设计理论与方法、执行器控制技术、薄膜磁-机耦合模型和非线性动力学模型等几方面内容。

该书的研究内容属功能材料应用学科的前沿,将使读者耳目一新。相信该书的出版将会为超磁致伸缩材料的应用研究奠定坚实的理论和技术基础,有力地推动超磁致伸缩材料及应用的研究进展,对超磁致伸缩材料执行器的研究、设计、制造和应用有重要的启蒙和指导作用,亦对其他功能材料的应用研究具有参考价值。同时,希望该书作者能在这一研究领域取得更大成绩。



2008年4月于大连理工大学

前 言

磁致伸缩材料是将电磁能转换成机械能的功能材料。20世纪70年代初美国海军水面武器中心和Iowa大学Ames稀土材料研究所合作发明了 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.95}$ 材料,由于其磁致伸缩系数比一般的磁致伸缩材料高约 $10^2 \sim 10^3$ 倍,因此被称为超磁致伸缩材料。超磁致伸缩材料具有大的抗压特性,可以提供精密的位移输出,易于实现低压驱动,并且无疲劳失效等优点,为精密微驱动、重载微驱动以及无缆驱动等驱动方式的实现提供了新的解决途径。因此,该材料得到了世界各国国防、科技界和产业界的高度重视,并开始被广泛应用。

随着超磁致伸缩材料制备工艺的不断改进,材料成品的性能参数、尺寸、形状以及加工工艺等都更加有利于相关应用产品的开发。至今,国外已开发了近千种应用产品。在航空、航天、航海等部门中的应用包括声呐、线性电机、制动器、液体动力系统、薄膜、传感器和降噪减震系统等。在加工、制造中的应用包括精密定位系统、印刷业的雕版打印头、精密机床的工具定位和主动减震、机械手、机器人等各种自动化设备的致动器和电机及传感器等。该材料的广泛应用将对21世纪高科技产业的发展及传统产业的现代化产生重大影响。同时将带动发展一种全新的高效电能-机械能转换的智能机电产业的发展。

我国拥有丰富的稀土资源,超磁致伸缩材料制备方法及工艺的研究也具有一定的基础,如北京科技大学、包头稀土研究院等研究机构都对超磁致伸缩材料的制备进行了系统的研究,并取得了良好的成果,国内也有一部分企业在超磁致伸缩材料及应用的产业化方面做出了一定的成绩,包括甘肃天星公司、台州椒光稀土公司等。

本书针对超磁致伸缩材料在执行器领域的应用,分别对超磁致伸缩材料及超磁致伸缩薄膜两方面阐述了近年来的研究成果。书中对超磁致伸缩材料的材料学与物理学基础、磁化过程及执行器建模、超磁致伸缩微位移执行器的设计理论与方法、微位移执行器控制技术等进行了系统的叙述,同时对超磁致伸缩薄膜材料的制备方法、薄膜材料的磁-机耦合机理、非线性动力学模型等都进行了系统的论述。

全书共分为 8 章。第 1 章介绍了超磁致伸缩材料与物理学基础;第 2 章介绍了超磁致伸缩材料的制备与应用特性;第 3 章介绍了超磁致伸缩微位移执行器设计理论与方法;第 4 章介绍了超磁致伸缩材料及微位移执行器的建模理论;第 5 章介绍了超磁致伸缩微位移执行器控制技术;第 6 章阐述了超磁致伸缩薄膜的物理与材料学基础;第 7 章阐述了超磁致伸缩薄膜材料建模理论;第 8 章介绍了超磁致伸缩材料的应用研究。

本书是作者近十年来从事超磁致伸缩材料及其执行器研究工作的总结,研究工作得到了国家自然科学基金项目“超磁致伸缩材料的磁-机械正逆耦合机理与控制方法的研究”(50275021)、“Villari 效应超磁致伸缩力传感微位移执行器关键技术研究”(50775021)和“超磁致伸缩薄膜谐振微执行器及其智能控制方法研究”(50605005),教育部留学回国人员科研启动基金项目“超磁致伸缩微位移执行器驱动原理及控制技术研究”([2004]527 号),高等学校博士学科点专项科研基金项目“薄模型超磁致伸缩微型执行器的基础研究”(2000010149),辽宁省科学技术基金项目“位移与磁场自感知型超磁致伸缩微执行器及控制技术研究”(20032121)等的支持,在此表示衷心感谢。书中引用了部分国内外超磁致伸缩材料及应用领域的研究成果,在此向这些作者表示诚挚的谢意。

本书吸纳了作者指导的杨兴博士、王福吉博士、刘巍博士、王晓煜博士、武丹硕士、史纯硕士、赵岩硕士、张菊硕士、邓睿硕士、全芳瑶硕士等的研究成果,撰写和后期书稿整理过程中,得到了研究生卢晓红、任仲伟、郑新毅、刘慧芳、赵磊、王宁、赵建国、马建伟、井水森、张玲萱、李秀、任晓涛的大力帮助,在此一并向他们表示感谢。

本书的写作分工是:第 1 章、第 3 章、第 4 章和第 5 章由贾振元撰写;第 2 章由郭东明撰写;第 6 章由王福吉撰写;第 7 章由刘巍撰写;第 8 章由王晓煜撰写。最后由贾振元统稿和定稿。

深感荣幸的是,功能材料及其应用研究领域的著名专家、国家发明奖获得者孙宝元教授能在百忙之中为本书作序,对于孙宝元先生的支持与鼓励,作者在此谨向他表示最诚挚的谢意。

作者期望本书的出版能够推动超磁致伸缩材料及其执行器的研究、应用与发展,但由于水平有限,时间仓促,书中难免存在不妥之处,恳请读者不吝指正。

作 者

2008 年 4 月于大连

目 录

序

前言

第 1 章 超磁致伸缩材料与物理学基础	1
1.1 磁致伸缩现象	1
1.2 磁致伸缩现象产生的物理机理	2
1.2.1 磁致伸缩的机理	2
1.2.2 磁致伸缩的唯象理论	6
1.3 超磁致伸缩材料及其特性	8
1.3.1 超磁致伸缩材料的发展	8
1.3.2 超磁致伸缩材料分类	9
1.3.3 超磁致伸缩材料的晶体和微结构	12
1.3.4 稀土超磁致伸缩材料的性能	14
第 2 章 超磁致伸缩材料的制备与应用特性	20
2.1 超磁致伸缩材料制备	20
2.1.1 制备方法	20
2.1.2 样品制备	27
2.2 超磁致伸缩材料的应用特性	36
2.2.1 磁致伸缩特性	36
2.2.2 机电耦合特性	39
2.2.3 动态特性	41
2.2.4 其他特性	43
第 3 章 超磁致伸缩微位移执行器设计理论与方法	49
3.1 执行器总体结构与工作原理	49
3.2 微位移传递机构的设计	52
3.2.1 圆形膜片式微位移传递机构	52
3.2.2 弹性圆薄板弯曲问题的数学模型	53
3.2.3 圆形膜片式微位移传递机构的解析解及设计原理	56
3.3 磁场与位移自感知的原理与实现	60

3.3.1	微位移感知功能的原理	60
3.3.2	驱动磁场自感知功能的原理	69
3.4	执行器内部的磁场(路)设计与研究	72
3.4.1	磁路的总体分析及设计	74
3.4.2	偏置磁场的设计	76
3.4.3	电磁线圈的功率优化及设计方法	80
3.5	驱动磁场的均匀化及分析	88
3.5.1	驱动磁场的径向均匀度分析	88
3.5.2	驱动磁场的轴向均匀度分析及均匀化	90
3.6	线圈电流与驱动磁场的测量曲线及分析	91
3.7	执行器内部温度分析及冷却系统	93
3.8	超磁致伸缩微位移执行器的有限元分析	95
3.8.1	执行器预紧机构的有限元分析	95
3.8.2	预紧机构模态分析	97
3.8.3	执行器的偏置磁场有限元分析	99
3.8.4	电磁场有限元分析	102
第4章	超磁致伸缩材料及微位移执行器的建模理论	107
4.1	磁滞的物理建模理论	107
4.1.1	铁磁磁滞	108
4.1.2	Weiss 分子场理论	108
4.1.3	Jiles-Atherton 模型	109
4.2	磁滞的数学建模理论	112
4.2.1	Preisach 算子	112
4.2.2	Preisach 权函数的确定	114
4.2.3	Preisach 算子的离散表达式	116
4.2.4	矢量 Preisach 模型	116
4.3	耦合外部应力的均质能量场模型	118
4.3.1	均质能量场模型	119
4.3.2	耦合外部应力的磁机模型	119
4.3.3	应力耦合磁化模型的离散化及求逆算法	122
4.4	超磁致伸缩微位移执行器模型	130
4.4.1	超磁致伸缩微位移执行器矢量阻抗分析模型	130
4.4.2	超磁致伸缩微位移执行器的负载矢量阻抗模型	133

4.4.3	超磁致伸缩微位移执行器结构动力学模型	137
第5章	超磁致伸缩微位移执行器控制技术	143
5.1	超磁致伸缩执行器控制系统的组成	143
5.2	高稳定度、智能化超磁致伸缩微位移执行器驱动电源	144
5.2.1	驱动电源的特点及组成	144
5.2.2	基于功率 MOSFET 的高稳定度双向可控恒流源	145
5.3	单片机控制单元设计	153
5.3.1	控制器及其外围电路设计	154
5.3.2	模拟量输入通道和输出通道设计	155
5.3.3	控制系统软件的设计与调试	158
5.4	超磁致伸缩微位移执行器控制方法概述	160
5.5	基于系统辨识模型的离线优化 PID 控制	161
5.5.1	超磁致伸缩微位移执行器的系统辨识	162
5.5.2	串联 PID 补偿器参数整定	170
5.5.3	PID 控制器参数的闭环优化	173
5.5.4	两组 PID 控制参数比较	173
5.6	执行器的前馈控制	177
5.6.1	执行器的前馈控制	178
5.6.2	执行器前馈控制的仿真	180
5.7	执行器的自适应控制	182
5.7.1	执行器的简单自适应控制	182
5.7.2	抑制传感器噪声的自适应控制	184
5.7.3	改进的执行器控制方法	184
5.8	超磁致伸缩微位移执行器的滑模变结构控制	186
5.8.1	超磁致伸缩微位移执行器的控制模型	186
5.8.2	超磁致伸缩微位移执行器的自适应离散滑模变结构控制	188
5.8.3	控制仿真实例	192
第6章	超磁致伸缩薄膜的物理与材料学基础	197
6.1	超磁致伸缩薄膜概述	197
6.2	薄膜的磁致伸缩现象机理	199
6.2.1	薄膜的磁畴	199
6.2.2	薄膜的自发磁化	201
6.2.3	薄膜的磁致磁化	202

6.3	超磁致伸缩薄膜材料的特性	205
6.3.1	磁致伸缩特性	205
6.3.2	磁致伸缩薄膜的磁各向异性	206
6.3.3	超磁致伸缩薄膜的动态特性	208
6.3.4	超磁致伸缩薄膜的 ΔE 效应	208
6.4	超磁致伸缩薄膜磁致伸缩性能的影响因素	209
6.4.1	材料成分对薄膜磁致伸缩性能的影响	209
6.4.2	薄膜内应力对薄膜磁致伸缩性能的影响	210
6.4.3	热处理对薄膜磁致伸缩性能的影响	210
6.4.4	磁致伸缩复合镀层	211
6.5	超磁致伸缩薄膜制备	211
6.5.1	超磁致伸缩薄膜的制备方法	211
6.5.2	超磁致伸缩薄膜靶材及基片的选择	214
6.5.3	超磁致伸缩薄膜的制备工艺参数	214
6.5.4	双层超磁致伸缩薄膜的样品制备及性能检测	217
第7章	超磁致伸缩薄膜材料建模理论	221
7.1	超磁致伸缩薄膜低磁场准静态磁机耦合特性及模型	221
7.1.1	超磁致伸缩薄膜低磁场磁机耦合特性	221
7.1.2	超磁致伸缩薄膜低磁场下准静态磁机耦合模型	223
7.1.3	超磁致伸缩薄膜低磁场下准静态磁机耦合模型的实验 分析	228
7.2	双层超磁致伸缩薄膜几何非线性变形分析及模型	232
7.2.1	双层超磁致伸缩薄膜几何非线性变形分析	232
7.2.2	双层超磁致伸缩薄膜几何非线性变形模型	233
7.2.3	双层超磁致伸缩薄膜几何非线性变形模型的实验分析	236
7.3	超磁致伸缩薄膜非线性振动模型	240
7.3.1	动态磁致伸缩等效载荷	240
7.3.2	超磁致伸缩薄膜非线性振动方程	246
7.3.3	超磁致伸缩薄膜主共振响应	252
7.3.4	超磁致伸缩薄膜超谐波共振响应	258
7.4	超磁致伸缩薄膜振动特性分析及实验研究	265
7.4.1	超磁致伸缩薄膜振动图像	266
7.4.2	超磁致伸缩薄膜共振频率的变化分析	271

7.4.3	超磁致伸缩薄膜振动幅值的变化分析	275
第8章	超磁致伸缩材料的应用研究	281
8.1	超磁致伸缩器件的应用研究概述	281
8.2	超磁致伸缩材料在执行器中的应用	282
8.2.1	在声呐系统中的应用	282
8.2.2	在直线电机中的应用	284
8.2.3	在旋转电机中的应用	285
8.2.4	在伺服阀中的应用	287
8.2.5	在超精加工中的应用	288
8.2.6	超磁致伸缩/压电混合器件中的应用	289
8.2.7	在流体控制中的应用	290
8.2.8	在振动控制中的应用	291
8.3	超磁致伸缩材料在传感器中的应用	291
8.3.1	力矩传感器	292
8.3.2	位置传感器	293
8.3.3	力传感器	293
8.4	超磁致伸缩薄膜器件的应用概述	294
8.5	超磁致伸缩薄膜在执行器中的应用	295
8.5.1	微型泵	295
8.5.2	微型阀	296
8.5.3	超声马达	297
8.5.4	微行走机械	297
8.5.5	光纤开关	298
8.5.6	伺服机构	298
8.6	超磁致伸缩薄膜在传感器中的应用	300
8.6.1	微型力传感器	300
8.6.2	光纤磁传感器	300
8.7	超磁致伸缩薄膜在微型泳动机器人中的应用	301
8.7.1	超磁致伸缩薄膜微型机器人的泳动推进模式	302
8.7.2	泳动微型机器人的结构与仿生机理	304
8.7.3	超磁致伸缩薄膜微型泳动机器人试验系统	307
8.7.4	超磁致伸缩薄膜微型机器人的泳动特性试验与分析	308
	参考文献	312

第 1 章 超磁致伸缩材料与物理学基础

1.1 磁致伸缩现象

铁磁材料和亚铁磁材料由于磁化状态的改变,其长度和体积都要发生微小的变化,这种现象称为磁致伸缩现象^[1]。磁致伸缩现象是 1842 年由著名物理学家焦耳(Joule)发现的,故又称为焦耳效应^[2]。磁致伸缩现象有三种表现形式:①沿着外磁场方向尺寸大小的相对变化,称为纵向磁致伸缩;②垂直于外磁场方向尺寸大小的相对变化,称为横向磁致伸缩;③材料体积大小的相对变化,称为体积磁致伸缩。

1. 线磁致伸缩(纵向磁致伸缩和横向磁致伸缩)

当磁体磁化时,伴有晶格的自发变形,即沿磁化方向伸长或缩短,称为线磁致伸缩,纵向磁致伸缩和横向磁致伸缩统称为线磁致伸缩。一般铁磁性物质发生线磁致伸缩时变化的数量级为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 。当磁体发生线磁致伸缩时,体积几乎不变,而只改变磁体的外形。在磁化未达到饱和状态时,主要是磁体长度变化产生线磁致伸缩。

2. 体积磁致伸缩

体积磁致伸缩是指磁体磁化状态改变时体积发生膨胀或者收缩的现象,饱和磁化以后主要是体积变化产生体积磁致伸缩。在一般磁体中体积磁致伸缩很小,实际用途也很小,在测量和研究中很少考虑,所以一般磁致伸缩均指线磁致伸缩。只有在个别特殊合金(如因瓦合金)中体积磁致伸缩较为明显,引起膨胀、弹性反常变化而被利用。

磁致伸缩不但对材料的磁性有很重要的影响,而且效应本身在实际中的应用上也很重要。利用材料在交变磁场作用下长度的伸长和缩短,可以制成超声波发生器和接收器,以及力、速度、加速度等的传感器、延迟线、滤波器、稳频器和磁声存储器等。

磁致伸缩效应的大小用磁致伸缩系数表示。

在磁化过程中,磁体沿磁化方向单位长度发生的长度变化称为线磁致伸缩系数,用 λ 表示,表达式为

$$\lambda = \frac{\Delta L}{L} \quad (1.1)$$

式中, ΔL 为材料长度变化量; L 为材料原始长度。

λ 的符号为正时, 表示随着磁场强度的增强材料的长度是伸长的, 称为正磁致伸缩; 反之, λ 的符号为负时, 表示随着磁场强度的增强材料的长度是缩短的, 称为负磁致伸缩。

而在磁化过程中, 磁体单位体积上发生的体积变化称为体积磁致伸缩系数, 以 ω 表示, 表达式为

$$\omega = \frac{\Delta V}{V} \quad (1.2)$$

式中, ΔV 为体积变化量; V 为原始体积。

1.2 磁致伸缩现象产生的物理机理

1.2.1 磁致伸缩的机理

磁致伸缩是相当复杂的现象, 从自由能极小的观点来看, 磁体材料的磁化状态发生变化时, 其自身的体积和形状都要改变, 因为只有这样才能使系统的总能量最小。产生磁致伸缩的原因可以归结为下述三个方面^[3,4]。

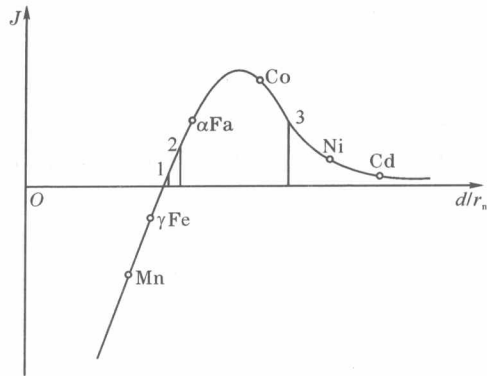
1.2.1.1 自发变形(自发的磁致伸缩)

铁磁体任一小区域内的所有原子磁矩, 都按一定的规则排列起来的现象, 称为自发磁化, 这是铁磁体的基本特点。磁体由高温时的顺磁状态冷却, 通过居里温度(T_c)变为铁磁(亚铁磁)状态, 由于交换作用使其自发磁化形成磁畴, 并伴随有体积和形状的改变。自发磁化的根本原因在于相邻原子间电子的静电交换作用, 这是一种量子力学效应, 直接与电子自旋之间的相对取向有关。设 i 原子的总自旋角动量为 S_i , j 原子的总自旋角动量为 S_j , 则根据量子力学, i 、 j 原子的交换作用能为

$$F_{ij} = -2J_{ij}S_iS_j \quad (1.3)$$

式中, J_{ij} 为 i 、 j 原子的电子之间的交换积分。

交换积分与原子间距和电子轨道有密切关系。设 d 为近邻原子间的距离, r_n 为原子中未满壳层的半径, 则交换积分 J 与 d/r_n 的关系曲线(Slater-Bethe 曲线)如图 1.1 所示。

图 1.1 交换积分 J 与 d/r_n 的关系曲线

假设有一单畴的晶体，在居里温度以上是球形的，其原子间的距离为 d_1 （对应于图 1.1 曲线上的“1”点），当晶体冷却至居里温度以下时，其原子间的距离将会增至 d_2 （对应于图 1.1 曲线上的“2”点）。这是因为：由图 1.1 可知“2”点交换积分 J_2 大于“1”点的交换积分 J_1 ，根据式(1.3)可知，交换积分越大则交换能越小。由于系统在变化过程中总是力图使交换能变小，所以球形晶体从顺磁状态变到铁磁状态时，原子间的距离不会保持在 d_1 而会变为 d_2 ，因而晶体的尺寸便增大了。同理，若某铁磁体的交换积分与 d/r_n 的关系处在曲线下降段（对应于图 1.1 曲线上的“3”点），则该铁磁体从顺磁状态转变到铁磁体状态时，会发生尺寸的缩小。

1.2.1.2 形状效应

磁性材料被磁化以后，只要材料的形状不是闭合型的或不是无限长的，则材料内的总磁场强度将小于外磁场强度。这是因为材料被磁化以后要产生一个退磁场强度，当磁化均匀时，退磁场的方向在材料内部总是与外磁场的方向相反，其作用在于削弱外磁场，所以被称为退磁场。退磁场 H_d 同磁化强度 M 成正比关系，可写成下式：

$$H_d = N_d M \quad (1.4)$$

式中， N_d 是个无量纲的数，同材料的形状有关，称为退磁因子。

与外场作用时产生静磁能的情形相类似，退磁场作用在物体的磁矩上，也有退磁能的存在。单位体积的退磁能 E_d 可用下式表示：

$$E_d = -\mu_0 \int_0^M H_d dM \quad (1.5)$$

由式(1.4)和(1.5)可得

$$E_d = -\mu_0 \int_0^M N_d M dM = \frac{1}{2} \mu_0 N_d M^2 \quad (1.6)$$

由上式可知, 为了降低退磁能, 铁磁材料磁化时在磁化方向上要伸长, 以减小退磁因子 N_d , 即形状效应引起的磁致伸缩。形状效应是由退磁能引起的, 所以这一效应比较小。

1.2.1.3 场致变形

前两个磁致伸缩原因的产生是材料本身所固有的, 不受外磁场的影响, 而场致变形是由自旋与轨道耦合能和物质的弹性能平衡而产生的, 与磁化过程密切相关, 并且随应力变化而发生变化。一般所说的磁致伸缩是指由场致变形引起的。可用图 1.2 所示的简单模型来形象地说明场致变形的原理。

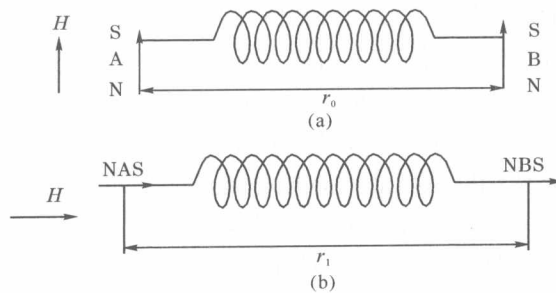


图 1.2 场致变形的简单模型

图 1.2 表示两个小磁针 A 和 B 间的相互作用。在外磁场 H 中, A 和 B 处于能量最小的平衡位置, 如图 1.2(a) 所示, r_0 表示 A 和 B 之间的平衡距离。如果把外磁场 H 的方向转动 90° , A 和 B 的相互作用能发生了变化, 因而能量最小的平衡位置变成 r_1 。如 1.2(b) 所示, $r_1 - r_0$ 即为随着磁场能量变化而产生的磁致伸缩。

对于多畴结构的铁磁体, 它的磁致伸缩机理更为复杂, 可采用图 1.3 进行唯象的解释。

如图 1.3(a), 在铁磁质中, 电子自旋磁矩可以在小范围内“自发地”排列起来, 形成一个个小的“自发磁化区”, 这种自发磁化区称为磁畴。在未磁化的多畴铁磁质中, 各磁畴在铁磁体内混乱排列, 相应于每个磁畴的磁致伸缩形变在各个方向上都有分布, 因而从统计平均的角度出发, 整个铁磁体在宏

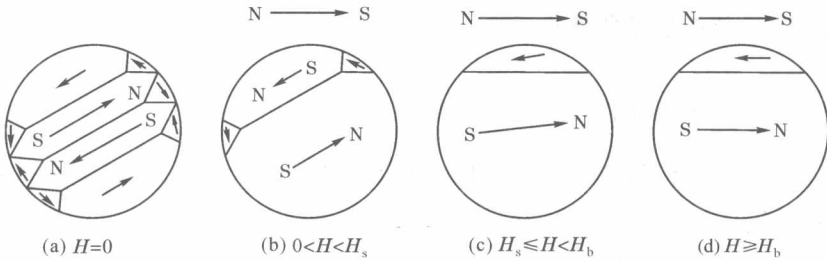


图 1.3 磁畴内磁矩随外磁场变化情况

观上并不显示出在某一方向上的伸长或缩短。当外磁场作用到铁磁体时，开始阶段由于磁场较小，只能使磁畴间的边界发生移动(即使取向与外磁场方向夹角小的那些磁畴的体积增大)，如图 1.3(b)所示；当外磁场继续增强时，磁畴内的磁矩会发生旋转，并且各个磁畴都在外磁场方向上发生磁致伸缩形变，此时磁致伸缩的数值迅速增大，如图 1.3(c)所示；倘若外磁场增加到一定的数值时，铁磁体内的磁畴基本与外磁场方向平行，铁磁体将不再伸长，即达到了饱和磁致伸缩状态，如图 1.3(d)。上述过程分别对应于图 1.4 磁场强度(H)与磁致伸缩(λ)升程曲线。同理，如果此时减小磁场，开始阶段由于磁场强度变化较小，只能使取向与外磁场方向夹角小的那些磁畴的体积减小。当外磁场继续减小时，磁畴内的磁矩才会向回旋转，并且当磁场强度减小到零时，磁畴并不能完全转回到初始状态(存在剩余磁极化强度)，于是，磁场强度与磁致伸缩的关系形成了一迟滞曲线(如图 1.4)。

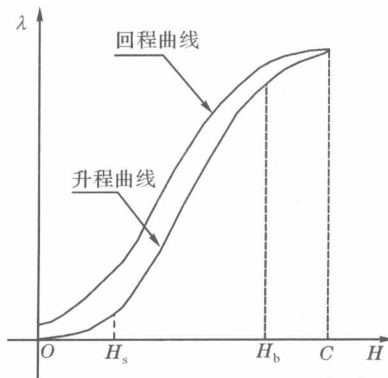


图 1.4 磁场强度与磁致伸缩的关系曲线