

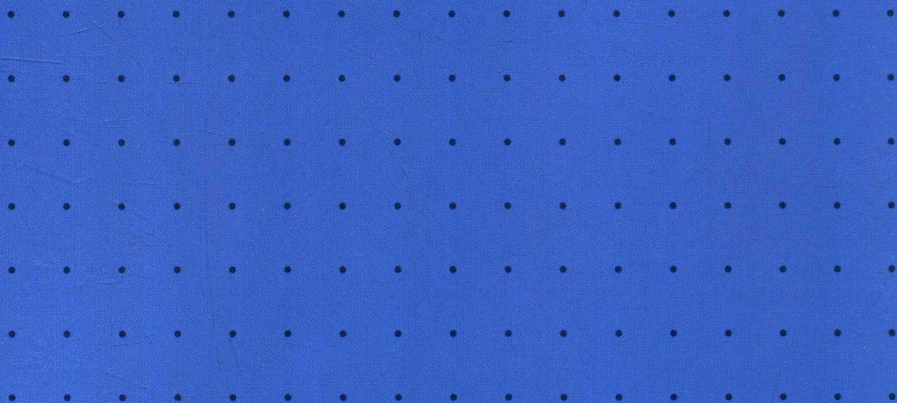


---

# 多场耦合材料断裂力学

---

郭俊宏 于 静 著



科学出版社

# 多场耦合材料断裂力学

郭俊宏 于 静 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书介绍压电、磁电弹性和准晶等多场耦合材料的断裂力学。主要研究热/力/电/磁多场耦合载荷作用下这些材料中孔洞、裂纹、孔边裂纹和夹杂等缺陷的断裂行为，注重阐述各种缺陷的解析方法和数值结果，揭示这些耦合材料的破坏机理。

本书可供高等院校力学、材料、应用数学及相关理工科专业高年级本科生和研究生作为教材使用，还可供相关研究领域的研究生、教师、专业技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

多场耦合材料断裂力学/郭俊宏, 于静著. —北京: 科学出版社, 2015.12

ISBN 978-7-03-046676-1

I. ①多… II. ①郭… ②于… III. ①耦合-材料力学-断裂力学  
IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 321674 号

责任编辑: 张中兴 / 责任校对: 彭 涛  
责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

**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>

**北京中石油彩色印刷有限责任公司** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 12 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2015 年 12 月第一次印刷 印张: 12 3/4

字数: 257 000

**定价: 59.00 元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

近年来,为了满足工程使用要求,具有多场耦合特征的材料引起了国内外研究者的广泛关注.由于多场耦合材料的结构要比经典弹性材料复杂得多,其力学行为及相关物理性能与经典弹性材料有本质性的区别,致使经典的数学弹性理论和求解方法面临着巨大的挑战.压电材料、磁电弹性材料和准晶材料的脆性特征及其在加工、制作和使用中极易产生各种裂纹、孔洞、夹杂等缺陷,常常导致这些材料在力、电、磁、热载荷单独或共同作用下失效甚至遭到破坏.因此,本书主要讨论压电材料、磁电弹性材料和准晶材料的热/力/电/磁多场耦合断裂力学问题,为这些材料及相关器件的抗断裂设计提供理论基础和重要依据.

众所周知,工程上常见的结构多数是由带孔口这样的器件连接,孔口在外部环境如应力、温度、电场或磁场等作用下会产生应力集中、电场集中和磁场集中等,从而在孔口边界处导致裂纹的出现.当材料中包含孔、夹杂和各种形状的微裂纹时,对微结构中缺陷的表征也是一个极具挑战性的问题.无论是天然材料还是人工材料,最为常见的一种微结构单元就是孔边含有一个或多个微裂纹.因此,有效地防止和预测孔边裂纹等复杂缺陷的起始与扩展,对分析工程材料和结构的强度、刚度以可靠性具有重要意义.关于经典弹性材料中孔边应力集中问题,早期出版了一些重要专著,如 G. 诺伊别尔的《应力集中》、Г. В. 柯洛索夫和他的学生 Н. И. 穆什海里什维里的《数学弹性力学的几个基本问题》(1933)、Г. Н. 萨文的《孔附近的应力集中》(1958)以及 И. Г. 列赫尼茨基的《各向异性板》(1963)等.但是,这些专著主要考虑的是各种孔边的应力集中问题,较少涉及孔边裂纹问题.自从 Bowie 于 1956 年首先利用保角映射法研究无限大体中圆孔边裂纹问题以来,许多研究者采用不同的方法致力于各种孔边裂纹问题的研究.但是,他们多数给出的是问题的数值解.可见,孔边裂纹问题是断裂力学中重要而又较难解决的问题之一,由于数学上的复杂性和难度,许多复杂的孔边裂纹等缺陷仍没有得到很好地解决.本书著者及其合作者通过构造若干新的非有理映射函数,解决了工程结构中常见的各种复杂缺陷问题,如椭圆孔边双不等长裂纹、圆孔边四个不等长裂纹、椭圆孔边四不等长裂纹、圆孔边多裂纹、星型裂纹、有限尺寸体中的裂纹等,给出了问题的解析解;并且,将这些复杂缺陷问题应用到多场耦合材料中,得到了丰富的结果,为工程上多场耦合材料及其结构的抗断裂分析提供重要的理论指导.同时,孔边裂纹等缺陷构型可为生物力学中骨移植界面提供力学模型.这些新映射函数突破了苏联力学家 Muskhelishvili 于 1953 年提出的有理函数保角映射的限制,有效地得到了若干复杂

缺陷问题的解析解. 所得解析解与有限元及已有数值结果比较, 吻合很好, 证实了新映射函数的有效性. 解析解很大的优点是, 当几何参数变化时, 这些复杂缺陷可模拟出若干新的缺陷构型, 如椭圆孔边双对称裂纹和单裂纹、圆孔边双不等长裂纹和单裂纹、T 型裂纹、十字型裂纹等, 充分表明所得解析解具有广泛的适用性, 在工程断裂分析中有着重要的应用. 当不考虑电场、磁场及相位子场的作用, 所得解可为经典弹性材料首次提供解析解. 特别是, 所取得的重要成果被国际著名力学家 Pak Y.E. 教授于 2012 年写入专著 *Recent Trends in Fracture Mechanics* (Chapter 6, pp 2, 24-26) 中, 并受到 Pak 教授的积极评价. Pak 教授指出, 压电材料由于其各向异性 and 多场耦合特性, 含有缺陷的边值问题的求解变得异常困难, 但我们提出的新映射函数和方法使获得复杂缺陷封闭形式的解析解变为可能.

准晶是由以色列科学家 D. Shechtman 于 1982 年 4 月 8 日发现的一种既不同于晶体又不同于非晶体的固体结构. 这一成果于 1984 年报道以后, 引起了国际上晶体学、化学、物理学、材料科学和数学界的强烈反响. 准晶不具有普通晶体的周期平移对称性, 也不具有普通晶体的  $n = 1, 2, 3, 4, 6$  次旋转对称性, 但具有准周期平移对称性和晶体学所不允许的  $n = 5, 8, 10, 12, 18$  次旋转对称性, 这种对称性被称为准周期对称性. 准晶的发现是人类认识史上的重大进步, 也是物质结构和对称性理论上的重大突破, 改写了凝聚态物理和化学, 促进了许多数学分支的发展. 2011 年, 准晶的发现者被授予诺贝尔奖.

准晶一经发现, 国内外许多科学工作者致力于准晶及其分支学科的研究, 并且取得了大量的优秀成果. 准晶的固有脆性使其弹性和断裂力学受到广泛关注, 我国范天佑教授领导的研究小组在国际上率先开展了对准晶数学弹性理论的研究, 于 1999 年出版了该领域第一本专著《准晶数学弹性理论及应用》. 随后, 他于 2010 年出版了英文版 *Mathematical Theory of Elasticity and Its Application* 和最近出版的《固体与软物质准晶数学弹性与相关理论及应用》. 接着, 刘官厅教授与李联和教授分别于 2005 年和 2013 年出版了《准晶弹性的复变方法与非线性方程的显式解》和《准晶断裂力学的复变函数方法》两本专著. 这些成果表明, 准晶的发展非常迅速, 优秀成果不断涌现, 同时展示了广大科学工作者对准晶的研究表现出浓厚的兴趣和热情. 本书一部分工作是在前辈取得的研究成果基础上, 对准晶断裂力学作进一步完善和发展, 介绍了准晶断裂力学常用的几种解析方法, 即半逆解法、Stroh 型公式和映射技术以及积分变换法. 本书的一大特色, 是考虑了准晶的热、电效应, 从宏观角度探索准晶缺陷的这些耦合效应, 极大地扩充了准晶的研究范围.

准晶对力、电、磁、热及光学都比较敏感, 由于其结构的特殊性, 准晶表现出的热、电等物理性能也与晶体有很大的区别. 本书系统地对一维准晶所有点群电弹性平面问题进行了研究, 给出控制方程和一般解; 并且, 发展了一维六方压电准晶断裂力学的半逆解法和 Stroh 型公式. 由于其显脆性, 准晶往往以粉末的形式被用

作增强相、复合材料及涂层技术. 最近实验表明, 准晶作为颗粒增强相填充在聚合物、金属基体复合材料及合金中极大地提高了这些材料的力学性能. 本书提出了一维六方压电准晶复合材料中的椭圆夹杂模型, 给出了夹杂和基体中声子场、相位子场和电场的解析解. 数值结果表明, 改善夹杂的材料性能可以有效地提高压电基体材料的力学性能, 这为准晶的广泛应用提供了重要的理论指导. 进一步, 考虑热效应, 研究了一维准晶中椭圆孔的二维广义热应力问题和二维十次对称准晶中导热椭圆孔的热弹性问题, 发现声子场和相位子场具有不同的热力学行为. 并且, 相比于绝缘椭圆孔, 考虑孔内介质的导热系数表现出有趣而又完全不同的热弹性行为.

感谢国家自然科学基金 (11262012, 11502123) 和内蒙古自治区自然科学基金 (2015JQ01, 2015MS0129) 的资助, 感谢北京航空航天大学卢子兴教授、内蒙古师范大学刘官厅教授、美国阿克伦大学潘尔年教授以及内蒙古工业大学邢永明教授的指点和合作研究以及他们课题组成员的建议和帮助. 感谢曾指点过本人和给予过帮助的香港科技大学张统一院士、北京理工大学范天佑教授、北京航空航天大学蒋持平教授、北京大学王建祥教授、南京航空航天大学高存法教授、北京交通大学汪越胜教授、北京工业大学隋永康教授、中南大学李显方教授、中国农业大学秦太验教授、石家庄铁道大学刘金喜教授、浙江大学王慧明教授以及内蒙古师范大学李联和教授等.

本书共 9 章, 其中第 1~3、5、7 和 8 章由郭俊宏著, 第 4、6 和 9 章由郭俊宏和于静合著, 郭俊宏对全书进行统稿, 于静负责全书文字、图件、参考文献的排版、整理和校对工作. 全书 25.7 余万字, 郭俊宏撰写 20 余万字, 于静撰写约 5 万字. 限于作者的水平和经验, 书中定有疏漏和欠缺之处, 敬请读者批评指正.

作 者

2015 年 11 月

内蒙古工业大学

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 压电材料及其应用	1
1.2 磁电弹性材料的耦合性能	3
1.3 准晶的发现及其性能	5
1.3.1 准晶的发现	5
1.3.2 准晶的性能及应用	7
1.4 本书的结构与内容安排	8
第 2 章 压电材料中复杂缺陷的反平面问题	10
2.1 孔边裂纹微结构和应用	10
2.2 经典弹性孔边裂纹的研究概述	11
2.3 基本方程	12
2.4 电不可通椭圆孔边双不等长裂纹	15
2.4.1 映射函数	16
2.4.2 场强度因子	19
2.4.3 能量释放率	20
2.4.4 特殊结果与讨论	20
2.4.5 数值算例	22
2.4.6 与有限元结果的比较	26
2.5 其他电不可通复杂缺陷	27
2.5.1 圆孔边四不等长裂纹	27
2.5.2 椭圆孔边四不等长裂纹	32
2.5.3 圆孔边均匀分布多裂纹	35
2.5.4 正三角形孔边裂纹	39
2.5.5 唇形裂纹	41
2.5.6 有限高狭长体中半无限裂纹	42
2.5.7 有限高狭长中共线双半无限裂纹	44
2.6 电可通椭圆孔边双不等长裂纹	47
2.6.1 边值问题	47
2.6.2 问题的解	48

2.6.3	场强度因子	50
2.6.4	能量释放率	50
2.7	电半可通椭圆孔边双不等长裂纹	51
2.7.1	边值问题	51
2.7.2	问题的解	52
2.7.3	场强度因子	54
2.7.4	能量释放率	54
2.7.5	数值算例	55
<b>第 3 章</b>	<b>磁电弹性材料中孔边裂纹的反平面问题</b>	<b>57</b>
3.1	引言	57
3.2	基本公式	58
3.3	磁电全非渗透型圆孔边均匀分布多裂纹	60
3.3.1	边值问题	60
3.3.2	场强度因子	64
3.3.3	能量释放率	64
3.3.4	数值算例	65
3.4	磁电全渗透型椭圆孔边双不等长裂纹	71
3.4.1	边值问题	71
3.4.2	问题的解	72
3.4.3	场强度因子	74
3.4.4	能量释放率	74
<b>第 4 章</b>	<b>准晶材料断裂力学</b>	<b>76</b>
4.1	引言	76
4.2	基本方程	76
4.2.1	一维六方准晶	76
4.2.2	一维正方准晶	77
4.2.3	二维准晶	80
4.3	一维六方准晶裂纹问题的几种解析解法	84
4.3.1	半逆解法	84
4.3.2	Stroh 型公式	87
4.3.3	积分变换法	90
4.4	一维正方准晶材料中的椭圆孔	102
4.5	二维十次对称准晶中椭圆孔边裂纹	107
4.5.1	I 型裂纹平面问题	107
4.5.2	II 型裂纹平面问题	112



<b>第 5 章</b>	<b>一维压电准晶的基本理论及其一般解</b> .....	116
5.1	引言 .....	116
5.2	一维压电准晶的控制方程 .....	116
5.2.1	单斜准晶 .....	119
5.2.2	正方准晶 .....	120
5.2.3	四方准晶 .....	122
5.2.4	六方准晶 .....	122
5.3	一般解 .....	122
5.3.1	单斜准晶 .....	122
5.3.2	正方准晶 .....	123
5.3.3	四方准晶 .....	127
<b>第 6 章</b>	<b>一维六方压电准晶断裂力学</b> .....	128
6.1	引言 .....	128
6.2	Griffith 裂纹 .....	128
6.3	保守积分与能量释放率 .....	131
6.4	椭圆孔 .....	133
6.4.1	Stroh 公式 .....	133
6.4.2	场变量的解析表达式 .....	134
6.4.3	数值算例 .....	137
<b>第 7 章</b>	<b>一维六方压电准晶复合材料的椭圆夹杂问题</b> .....	140
7.1	引言 .....	140
7.2	一维压电准晶的基本方程 .....	140
7.3	椭圆夹杂的反平面问题 .....	141
7.4	特殊结果与讨论 .....	144
7.4.1	均匀材料 .....	144
7.4.2	柔性椭圆夹杂或电可通椭圆孔 .....	144
7.4.3	电不可通椭圆孔 .....	145
7.4.4	线夹杂 .....	146
7.4.5	刚性夹杂 .....	147
7.4.6	界面的场变量 .....	147
7.5	数值算例 .....	148
<b>第 8 章</b>	<b>一维六方准晶断裂动力学</b> .....	152
8.1	引言 .....	152
8.2	一维六方准晶准周期场的运动方程 .....	152
8.3	椭圆孔边裂纹的动力学 .....	154

---

8.4	狭长体中半无限裂纹的动力学 .....	159
<b>第 9 章</b>	<b>准晶材料中椭圆孔的热弹性分析 .....</b>	<b>162</b>
9.1	引言 .....	162
9.2	基本方程 .....	162
9.3	一维准晶中椭圆孔的热弹性分析 .....	164
9.3.1	温度场 .....	165
9.3.2	声子场和相位子场 .....	166
9.3.3	孔边声子场和相位子场环向应力 .....	168
9.3.4	裂纹解 .....	168
9.3.5	数值算例 .....	169
9.4	二维十次对称准晶中椭圆孔的热弹性分析 .....	171
9.4.1	受均匀热流的椭圆孔 .....	171
9.4.2	声子场和相位子场环向应力 .....	174
9.4.3	数值算例 .....	175
	<b>参考文献 .....</b>	<b>180</b>

# 第 1 章 绪 论

本书主要讨论压电材料、磁电弹性材料和准晶材料的热/力/电/磁多场耦合断裂力学问题, 为这些材料及相关器件的抗断裂设计提供理论基础和重要依据。

## 1.1 压电材料及其应用

1880 年, J. Curie 和 P. Curie 兄弟<sup>[1]</sup> 研究热电现象和晶体对称性时, 在石英晶体上最先发现了压电效应, 即在压电材料某些晶体的特定方向上施加机械载荷时, 晶体的一些对应面上分别出现了正负束缚电荷, 其电荷密度与施加载荷的大小成正比。压电效应反映了压电介质的弹性和介电性的相互耦合作用。1881 年, Lippman 根据热力学原理、能量守恒及电荷守恒定律预言了逆压电效应的存在性。同年, Cuire 兄弟用实验证实了压电晶体在外加电场作用下会发生机械变形, 即逆压电效应是存在的。并且, 他们获得了与石英晶体相同的正逆压电常数。

由于压电材料具有良好的力电耦合特性, 它们在工程上不仅被广泛应用于高精度传感器、制动器、位移器、换能器等电子元器件, 而且应用于精密仪器、航空、航天、自动控制、办公自动化、微型机械系统、微装配、精密定位等领域<sup>[2]</sup>。例如, 利用正压电效应先后制成压电引信、压电电源等多种电压发生器件以及振动加速度计、流体监控器等压敏传感器件; 利用逆压电效应研制成各种用途的超声波发生器以及压电扬声器; 利用正、逆压电效应研制成压电陀螺、压电线性加速表、压电变压器、压电延迟线、声纳以及压电声表面波器件; 利用压电振子的谐振特性和伸缩特性, 研制成压电谐振器、压电振荡器、压电滤波器以及压电继电器、压电泵、压电阀门、位移发生器等器件; 利用部分压电材料具有的线性和非线性热释电效应及压电效应, 研制成电光调制器、电光偏转器、声光调制器、声光偏转器以及光参量振荡器等激光技术必不可少的器件。

压电材料可以是单晶体、多晶体 (例如陶瓷) 或非晶体 (例如聚合物)。在金属、半导体、铁磁体、生物体 (例如骨骼) 中也可发现压电效应。晶体中 32 种点群结构, 有 20 种非对称点群的晶体才可能具有压电效应, 其中的绝缘体都是压电体。目前已知的压电材料已逾 1000 种。在实际的应用中, 一般将其分为压电晶体、压电纤维、压电陶瓷和压电聚合物等几类, 其中, 应用最多的是压电陶瓷和压电聚合物这两类材料。聚偏二氟乙烯 (PVDF) 是最常用的压电聚合物, 它具有许多其他压电材料所没有的优越性质, 其优点是能制备成任意形状的薄而柔软的换能器铺设在结构

的表面上,且其机械韧性好,压电性稳定,可塑性比陶瓷高许多.压电陶瓷具有高的强度、刚度和良好的压电性能,最典型的代表是锆钛酸铅系列 PZT 和钾铌酸钠系列,其中在智能材料和结构中占有主导地位的是 PZT.

最常见的压电材料是铁电体,铁电材料在一定温度范围内具有自发极化特性,而且其自发极化可以因外电场的作用而转向,材料的这种特性称为铁电性,自发极化方向称为极化轴.在居里温度下,铁电材料如  $\text{BaTiO}_3$  和 PZT 等,都有特殊的微结构——畴以及畴极化转动的特性.在稳态时,一个晶粒是由许多极化方向均不相同的畴组成的,而相邻两个极化方向不同的畴之间就形成  $90^\circ$  或  $180^\circ$  的畴壁.在外加电场作用下,新畴的形成(成核)和畴壁的运动使整个晶粒的极化强度发生了变化,即极化转动,最终可能形成只含有一个畴的晶粒.实验证明,外加应力只能引起  $90^\circ$  极化转动,而电场却能引起  $90^\circ$  和  $180^\circ$  极化转动,只有  $90^\circ$  极化转动才能产生应变.正是由于铁电畴的极化转动,铁电材料才显示出良好的压电、热电等特性.

实际使用的铁电/压电材料都是经过极化的.图 1.1 所示为铁电材料及其畴极化转动的模型.每个晶粒的极化强度是其中各个畴的极化强度的矢量和.对于未被极化的多晶铁电材料,其每个晶粒的极化强度方向呈随机分布,如图 1.1(a) 所示,此时的压电材料宏观上呈各向同性,没有压电效应.极化过程是这样进行的:在材料的居里温度附近,将一个较强的静电场(称为极化场)作用于铁电材料上,此时,晶粒内的畴都沿外加电场的方向发生极化转动(图 1.1(b)),然后将温度下降到室温而外加电场强度维持不变,结果整个晶粒的极化强度方向最接近于外加电场方向而使得系统的能量最小.正是因为极化才使得材料在宏观上呈现压电效应,不同的极化过程可以造成铁电材料在宏观上表现出不同的行为.

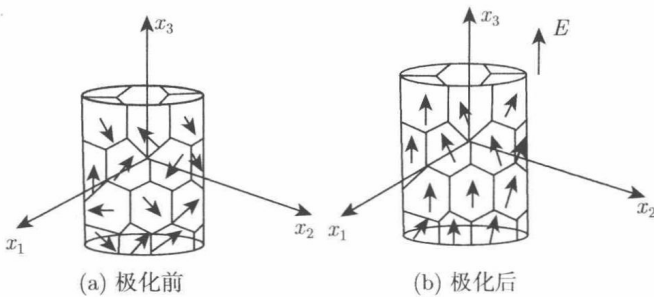
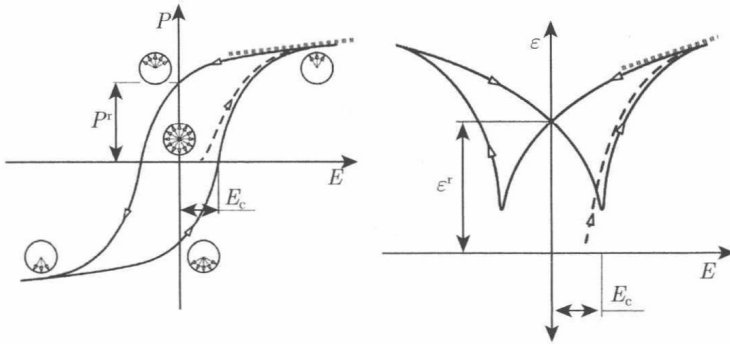


图 1.1 铁电材料及其畴极化转动<sup>[3]</sup>

一般情形下,压电材料行为呈现为各向异性,极化后的压电陶瓷关于极化方向呈现出横观各向同性.铁电材料的极化强度和变形随外加电场的变化是极其复杂的.多数使用的压电传感器都是在滞后分支尖端的饱和点进行极化,如图 1.2(a) 所示.如果施加电场变化或改变其方向,畴将重新排列,导致极化场滞后和应变场的

蝶状滞后, 如图 1.2(b) 所示. 机械应力也能引起极化的改变, 这种现象称为铁电弹性行为. 在大信号范围运作的压电和铁电组分在极化时会发生连续的局部变化, 遵循非线性滞后定律. 而在裂纹尖端具有较高的电场集中和力场集中现象, 在有限区域导致非线性行为. 关于铁电材料特性的更多介绍, 参见方岱宁和刘金喜的专著<sup>[4]</sup>.



(a) 电极化强度与电场强度关系的滞后环 (b) 机械应变与电场强度关系的蝶状环

图 1.2 铁电的非线性响应

然而, 由于压电陶瓷本身脆性, 在加工或器件的制作过程中, 不可避免地会存在各种缺陷, 如裂纹、孔洞、夹杂、位错等. 随着器件的长期使用或在复杂的外加载荷作用下, 这些缺陷会导致材料的宏观性能发生改变, 或缺陷进一步加剧导致器件失效. 对于这类材料, 建立正确的力学分析模型, 更多地从结构方面研究压电介质的破坏行为, 甚至动态行为是很有必要的. 因此, 压电材料断裂力学问题的研究<sup>[3,4]</sup>一直是现代力学研究的重要课题之一.

## 1.2 磁电弹性材料的耦合性能

人们在很早以前也发现了材料的磁致伸缩效应和磁电耦合效应, 即当铁磁材料受外界磁场作用时, 由于磁化效应铁磁结构将发生变形、失稳以及振动等力学效应<sup>[5,6]</sup>. 由于具有两种固有的压电和压磁性质, 压电/压磁复合材料可以发挥各种性质的综合优势, 所以它比单种压电性质或者压磁性质的材料具有更高的磁电耦合性能. 虽然部分失去了单独的压电或者压磁性能, 但磁电耦合效应却是压电/压磁智能复合材料的一种新性能. 磁电复合材料是将铁电相与铁磁相经一定的方法复合而形成的一种新型功能材料, 不仅具有前者的压电效应和后者的磁致伸缩效应, 而且还能产生出新的磁电转换效应. 与单相磁电材料相比, 磁电复合材料具有较高的 Neel 和 Curie 温度以及较大的磁电转换系数等诸多优点, 已被应用于微波、高压输电、宽波段磁探测、磁场感应器等领域, 尤其是在微波泄漏、高压输电系统中的电流测

量方面具有很突出的优势。此外,磁电复合材料在智能滤波器、磁电传感器、电磁换能器等领域也具有巨大的应用前景。目前,磁电复合材料作为一种非常重要的功能材料,已成为当今铁电、铁磁功能材料领域的一个新的研究热点。

根据不同的制备方法,磁电复合材料可分为以下五大类<sup>[7]</sup>。

**原位磁电复合材料:**将铁电相与铁磁相混合在一起共熔制得的一种磁电复合材料。最早是在 1972 年由荷兰 Philips 实验室的 Van Suchtelen 把铁磁相  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  和铁电相  $\text{BaTiO}_3$  共熔制得了第一个原位磁电复合材料。

**固相烧结磁电复合材料:**固相烧结磁电复合材料是通过传统的粉末冶金工艺烧结形成的一种陶瓷材料。最早在 1978 年,由 Philips 实验室的 Boomgaard 等通过  $\text{BaTiO}_3$  粉末与  $\text{Ni}(\text{Co}, \text{Mn})\text{Fe}_2\text{O}_4$  粉末并外加过量的  $\text{TiO}_2$ , 进行简单烧结获得了第一个固相烧结磁电复合材料。

**聚合物固化磁电复合材料:**利用有机高分子聚合物具有较强的柔性和韧性等特点,以此为基体,将铁电相和铁磁相固体粉末分散到聚合物溶液中,经过充分的搅拌、固化而得到的一种磁电复合材料。

**层状磁电复合材料:**为避免混相磁电复合材料的各种缺点,2001 年,Jungho 等用上下两层 Terfenol-D 薄片夹持一层 PZT 薄皮,用导电胶直接粘接的结构简单的层状磁电复合材料。

**薄膜磁电复合材料:**薄膜磁电复合材料主要是利用脉冲激光沉积 (PLD)、射频溅射 (RFS)、化学溶液凝聚 (CSD)、溶胶-凝胶 (Sol-Gel) 等现代薄膜制备技术制作的一种双层或多层铁电/铁磁复合材料。对薄膜磁电复合材料铁电相与铁磁相在微小范围内调制,可实现两相在纳米或亚纳米尺寸上的耦合,产品尺寸更小,有利于制备微型智能器件。目前,薄膜磁电复合材料已成为磁电复合材料领域的一个新的研究热点。

近年来,人们的研究目标已转向磁致伸缩材料和压电材料混合而成的磁电复合材料,由于这种含有压电相和压磁相的复合材料(如  $\text{BaTiO}_3/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ) 中压电材料的力/电耦合与磁致伸缩的磁/力相互作用,压电/压磁复合材料具有了独特的磁电耦合效应<sup>[8]</sup>,从而可以实现磁信号和电信号的相互转化,但压电或压磁单相材料不具备这种新型耦合特性。在室温下,压电/压磁复合材料的耦合系数比磁电单相材料高出上百倍<sup>[9]</sup>。压电/压磁复合材料所独有的磁-电-机械能的相互转换功能在电子封装、传感器和制动器的制造,如磁场探测器、声学及超声装置等方面比本征磁电材料或压电材料具有更广泛的应用前景。因此,越来越多的研究者对压电/压磁复合材料的磁-电-弹性场的相互耦合作用及其物理力学特性的研究感兴趣。对于磁电弹性介质而言,由于其具有磁、电和力耦合效应,所以需建立更合适的力学模型来进行分析。从断裂力学的角度考虑,为了研究裂纹扩展的规律,也需要建立相应的断裂力学模型。与经典的纯弹性材料的裂纹问题研究不同,磁电弹性介质除了

外加机械载荷能导致裂纹扩展外,还必须考虑外加电场、磁场的影响以及磁-电-弹性场的耦合效应.因此,磁电弹性介质裂纹问题的研究要比纯弹性裂纹问题复杂得多.而与压电材料的断裂分析相比,磁电弹性材料的裂纹问题也要更多地考虑外加磁场和电磁耦合效应的影响.

从压电材料断裂实验研究来看,其主要的研究对象是磁电耦合效应对裂纹扩展的影响,但在已有的文献中,很少发现相关的实验结果报道.因此,目前只能通过比较压电材料或纯弹性材料的断裂问题研究的结果来讨论磁电弹性介质中裂纹的扩展规律,但不足的是,这并不能考虑到磁电耦合效应对裂纹扩展的影响<sup>[10]</sup>.

## 1.3 准晶的发现及其性能

### 1.3.1 准晶的发现

直至 20 世纪 80 年代,人们把固体材料分为两大类,一类是非晶体;另一类是晶体.对于非晶体,原子的排列杂乱无章,无周期性.对于晶体,原子在空间中呈无限周期重复排列,这一性质被称为晶体结构的周期性.晶体除了具有平移对称性(长程序),还具有旋转对称性.由于平移对称性的制约,晶体只能取  $n = 1, 2, 3, 4, 6$  五种旋转对称轴,而不可能出现  $n = 5$  和  $n > 6$  次的旋转对称轴.这种抽象的数学描述可以这样直观地描述:分别表示用平行四边形、长方形和正 3~8 多边形“元胞”铺平面空间,众所周知, $n = 1 \sim 4$  和 6 次旋转对称的图能够无间隙、不重叠地铺满整个平面空间,但  $n = 5, 7$  和 8 次对称的多边形无法做到这一点.在晶体结构中不允许出现  $n = 5$  次和 6 次以上的旋转对称性,这是被写进教科书的国际学术界主流观点,一百多年没有人去怀疑它的正确性.

然而,以色列科学家 D. Shechtman 于 1982 年 4 月 8 日,在急冷的 Al-Mn 合金中首次发现了五次旋转对称衍射图,如图 1.3 所示.由于这根本违反了晶体学的基本定律,除了不被认可,Shechtman 反被取消了在实验室工作的权利.经过两年半的艰苦抗争,终于在 1984 年发表了这个成果<sup>[11]</sup>.这一成果发表后,引起了国际上晶体学、化学、物理学、材料科学和数学界的强烈反响.准晶不具有普通晶体的周期平移对称性,也不具有普通晶体的  $n = 1, 2, 3, 4, 6$  的旋转对称性,但具有准周期平移对称性和晶体学不允许的  $n = 5, 8, 10, 12$  的旋转对称性,这种对称性被称为准周期对称性<sup>[12]</sup>.准晶的发现是人类认识史上的重大进步,也是物质结构和对称性理论上的重大突破,改写了凝聚态物理和化学,促进了许多数学分支的发展.2011 年,准晶的发现者 D. Shechtman 获得了诺贝尔化学奖.

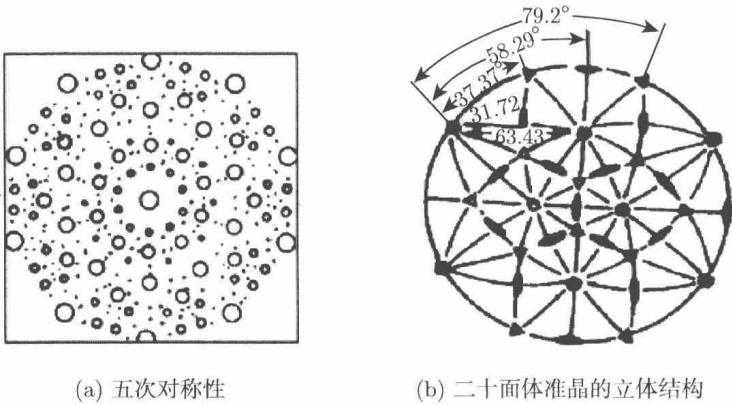


图 1.3 二十面体准晶的衍射图

其实, 早在 Shechtman 之前, 20 世纪 60 年代, 数学家就开始思考能否用有限数量的花砖堆放成一种图案不可重复的镶嵌物, 即拼出所谓的非周期性的镶嵌物. 于是, 1966 年美国数学家使用多达 20426 种不同的板块首次构造出具有五次旋转对称轴的非周期的二维镶嵌平面. 1974 年, 英国物理学家 Penrose<sup>[13]</sup> 证明用两种顶角分别是  $36^\circ$  和  $72^\circ$  的菱形即可实现这一目的, 如图 1.4(a) 所示. 然而神奇的是, Penrose 理论后来被应用于中世纪伊斯兰装饰艺术中. 这时人们才发现中世纪时期阿拉伯艺术家用五种花砖拼出了非周期的对称图案, 甚至还有 5 次和 10 次对称轴的存在. 二维的 Penrose 镶嵌毕竟形成的只是一个平面, 真正的结构是三维的. 于是美国物理学家 P.J. Steinhardt 随后发现利用三基矢夹角分别为  $63.43^\circ$  和  $116.57^\circ$  的两种菱形六面体, 就可构造出三维的 Penrose 准周期结构, 如图 1.4(b) 所示. 而且, 这种堆砌保持了二十面体对称性, 即 5 次对称轴的结构. 进一步, 人们还给出了  $n = 8$  次、12 次及 18 次堆砌的准晶结构.

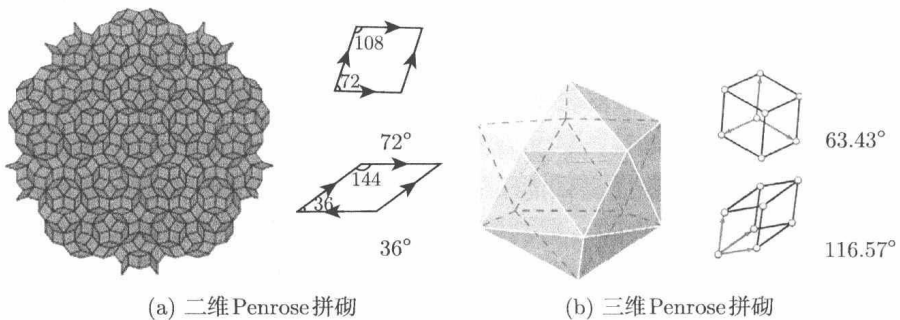


图 1.4 二维 Penrose 拼砌和三维 Penrose 拼砌



关于准晶的发现,我国科学工作者也做出了重大贡献.几乎与此同时,我国郭可信院士领导的研究小组独立地在 Ni-V 合金中也发现了准晶<sup>[14-17]</sup>,只是工作报道发表晚了几个月,同诺贝尔奖擦肩而过,不过这再次表明,中国科学工作者在准晶方面的研究处于世界领先地位.

事实上,准周期对称结构不仅存在于日常生活中,如足球,还存在于自然界中,如 C60 和病毒,如图 1.5 所示.准晶先是由人工合成,2009 年,在自然界中发现了天然的准晶<sup>[18]</sup>,这又一次证实了准晶的真实存在.

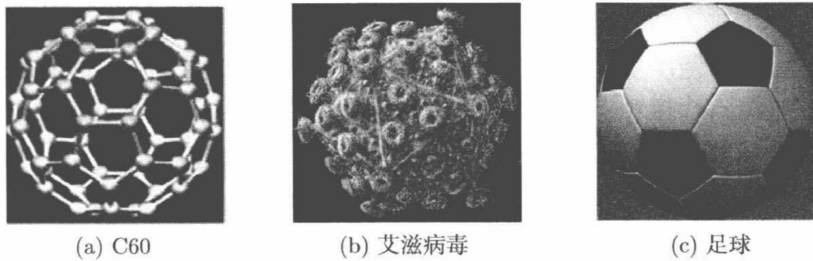


图 1.5 C60、艾滋病毒和足球结构

早期的准晶,是在二元合金与三元合金中发现的,可以称为金属合金准晶或固体准晶.1998 年, Denton 和 Loewen<sup>[19]</sup> 用模拟的方法,提出在胶体中存在准晶的可能性.六年后,这一预言被实验发现所证实.2004 年,在胶束中发现了 12 次对称准晶<sup>[20]</sup>.2005~2007 年, Takano 和 Kenichi 等<sup>[21,22]</sup> 在聚合物中发现了 12 次对称准晶.12 次对称准晶不仅在聚合物中存在,而且还在硫族化合物和树枝状分子中发现.2009 年, Taplin 等<sup>[23]</sup> 在二元纳米颗粒复合体中发现了 12 次对称准晶.2011 年, Fischer 等<sup>[24]</sup> 在胶体中发现了 12 次和 18 次对称准晶.在软物质中发现 18 次准晶意义重大,首先,软物质在一定温度和密度下,准晶态稳定存在,从理论上极大地推进了对准晶的理解;而金属合金的准晶态是在急冷条件下形成的,二者的热力学环境根本不同.再次,18 次对称准晶的发现,产生了新的点群和空间群,在对称性理论和数学的群论上意义也很大.这一发现,极大地扩充了准晶的研究范畴<sup>[25]</sup>.

### 1.3.2 准晶的性能及应用

准晶按不同的要求可以有多种分类.准晶按准周期维数可分为三维、二维和一维.三维是目前发现最多的,它是指原子结构在三维空间场做准周期排列.三维准晶主要为二十面体,包含 6 个 5 次对称轴、10 个 3 次对称轴和 15 个 2 次对称轴.二维准晶是指原子结构在主轴方向上呈周期性平移对称,而在主轴垂直的平面上呈准周期排列.二维准晶包括 8 次,10 次和 12 次旋转对称准晶.一维准晶是指原子结构具有周期性平移对称的二维晶层,在其法线方向上呈准周期性堆垛.