

材料科学与工程系列

An Introduction to the Mechanical
Properties of Ceramics

陶瓷材料 力学性能导论

David J. Green 著

龚江宏 译
关振铎 校

清华大学出版社

材料科学与工程系列

TQ174.1
26315

An Introduction to the Mechanical
Properties of Ceramics

TB321.1

陶瓷材料 力学性能导论

David J. Green 著

龚江宏 译
关振铎 校

清华大学出版社
北京

HA169/12

内 容 简 介

近年来,陶瓷材料在应用上已渗透到各个领域,在性能上也有了重大突破。深入理解陶瓷材料的力学行为对其在结构上与非结构上的应用至关重要。本书是国内第一本专门介绍陶瓷材料力学性能的译著。本书在讨论陶瓷材料所表现出来的各种力学性能的同时,也阐述了这些力学性能与结构之间的关系。

弹性是陶瓷材料形变的一种基本方式,工程结构设计也主要是以材料的弹性性质为基础,本书前4章着重讨论陶瓷材料的弹性行为。在高温下,陶瓷材料会以粘性流动、塑性形变以及蠕变等方式产生永久性变形,本书第5章到第7章将对这些问题进行讨论。如果应力进一步增大,断裂将是不可避免的,本书第8章将讨论陶瓷材料的断裂问题。第9章则主要介绍陶瓷部件工程设计所需的一些基本方法,以保证陶瓷部件在机械力和热应力作用下的可靠性。

本书可作为大学高年级和研究生在陶瓷材料力学性能方面的教学参考书,也可作为从事陶瓷材料研究、设计的工程技术人员的参考书。

EISBN: 0-521-59913-X paperback

An Introduction to the Mechanical Properties of Ceramics

David J. Green

Copyright © D. J. Green 1998

Original language published by the Press Syndicate of the University of Cambridge. All rights reserved.

Authorized simplified Chinese translation edition is published by Tsinghua University Press.

本书中文简体翻译版由清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港特别行政区、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版、发行。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2001-4396

图书在版编目(CIP)数据

陶瓷材料力学性能导论/(美)格林著;龚江宏译. —北京:清华大学出版社,2003

(材料科学与工程系列)

书名原文: An Introduction to the Mechanical Properties of Ceramics

ISBN 7-302-06860-7

I. 陶… II. ①格… ②龚… III. 陶瓷—无机材料—力学性能 IV. TQ174.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第053939号

出 版 者: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn>

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

客户服务: 010-62776969

组稿编辑: 宋成斌

文稿编辑: 曾 洁

封面设计: 郑 勉

印 装 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 172×246 印 张: 19.75 字 数: 375 千字

版 次: 2003年11月第1版 2003年11月第1次印刷

书 号: ISBN 7-302-06860-7/TB·55

印 数: 1~4000

定 价: 38.00 元

中文版序

我欣喜地得知我的这本教科书即将被翻译为中文,能参与这么一个跨越国界的项目确实是一件令人高兴的事情。这使我感觉到科学思想及其引发的兴奋是不会受到国界限制的。多年以来,向改善陶瓷材料机械可靠性进行的挑战一直是激发我努力工作的动力。在我这一生中,这一领域的研究已经取得了显著的进展。我希望本书中提出的一些想法可以把这一挑战传递给我的中国读者。在将来,与陶瓷材料有关的新技术的发展有可能改善许多人的生活。而想到我的这本书曾为此发挥过一些哪怕很小的作用,我就将获得一种巨大的满足感。

本书的目的是为大学高年级学生的陶瓷材料力学行为课程提供一本教科书。但是,本书中同时也含有一些适用于研究生水平的内容(用符号“††”标注)。本书的内容编排方式在很大程度上与 A. H. Cottrell 编写的教科书《材料的力学性能》是相似的,后者是我在研究生院学习期间的主要参考教材。在这一领域从事教学的过程中,缺乏专门介绍陶瓷力学性能的教科书一直是一件令人头疼的事情。我们经常需要考虑那些适用于其他材料的方法和理论是否也同样适用于陶瓷材料。我很幸运地在结构陶瓷得到飞速发展的时代走进了这一领域,并试图把我对这些发展的了解和认识写进这本教科书中。

不对我在从事这一工作的过程中所得到的支持表示感谢是不合适的。我非常感谢 Pat Nicholson, Dave Embury 和 Dick Hoagland,是他们耐心地把带我带进了这个研究领域。我要感谢 Tom Wheat,他教给我有关陶瓷工艺方面的知识。我要特别感谢 Fred Lange,他给了我一个机会并成为我的导师。他热情而直率的指导以及风趣幽默的性格不断地激励着我去探索新的思想。我还要感谢在 Rockwell 国际科学中心期间与我的同事们之间进行的交流。我要感谢宾夕法尼亚州立大学陶瓷科学与工程专业的研究生使用了本书的不同版本。感谢 Brian Watts 和 Patty Phillips 耐心细致地校对本书的清样。感谢 George Scherer, David Clarke, David Wilkinson 以及 John Ritter 阅读了本书的部分章节并提出了建设性的建议。感谢在过去的 12 年里我所指导的所有研究生和在宾夕法尼亚州立大学工作的我的同事们。

我还应该提到我的家人,包括 Mel 和 Vera Smith, Knapp 一家, Marc, Tina

和 Tony 等给我的鼓励。Chris Cushing Green, Cyndi Asmus 和 Patty Phillips 在精神方面给我的支持对于本书的完成也同样是至关重要的。最后,我要感谢 Keiko Miller 改变了我的生活,并使我的生活充满了快乐。

David J. Green

2001 年 10 月于宾夕法尼亚州立大学

译者序

在过去的十多年里,我的主要工作都围绕着陶瓷材料力学性能测试与评价这一方向的教学和科研展开,因此有机会接触了很多在陶瓷材料方向学习的大学生和研究生,为他们进行陶瓷材料力学性能的测试与评价提供指导和帮助。这期间最深的感触莫过于我们的学生在力学理论基础知识方面的明显不足。对于那些有志于将来投身陶瓷材料领域尤其是结构陶瓷领域研究的学生来说,这一不足也许是一个致命的缺陷,因为结构材料应用的关键性能是力学性能,而脆性陶瓷材料作为结构材料使用,力学性能更是关键中的关键。没有一个扎实的力学理论基础,理解陶瓷材料的力学性能并对其加以改善就无从谈起了。

要求材料专业的学生在短短的4年时间里掌握深厚的力学理论基础显然是不现实的,而对陶瓷材料独特力学行为的深入理解又必须在掌握了一定的力学理论的基础上进行。在有限的学时内向学生传授必需的弹性力学、塑性力学、断裂力学等力学基础理论,同时又使学生了解这些必需的理论在陶瓷材料研究中为什么是必需的,这是陶瓷材料专业力学性能课程的教学面临的一个课题。陶瓷材料的力学性能是丰富多彩的,而研究这些力学性能所需的力学理论基础对于材料专业的学生来说似乎又枯燥乏味,那么我们的教科书应该如何对相关内容进行合适剪裁,才能使學生轻松愉快地完成这一课程的学习,进而轻松愉快地去面对他们即将面对的研究工作?美国宾夕法尼亚州立大学的Green教授几年前完成的这部教材应该说是迄今为止关于这一课题的最好的研究成果之一。

这部教材的最大特点是对力学理论进行了最大限度的浓缩,用不到一部经典弹性力学教科书十分之一的篇幅完成了对弹性力学、塑性力学、断裂力学中对于陶瓷材料领域而言最为精华的部分的介绍;进而,作者将这一高度浓缩的精华和陶瓷材料领域中千变万化的力学现象加以了有机的融合,从而构筑出了一个完整的陶瓷材料力学性能理论体系。完成了大学低年级普通物理学习、并具有一定的材料力学基础的大学生完全可以毫不困难地读懂全部内容;而如果在这一“读懂”的过程中适当地加入一些个人思考的成分,那么在此后的工作中理解迄今为止在陶瓷材料中已经观察到的所有力学现象都应该是没有太大问题的。当然,这里所说的大学生应该是陶瓷专业的大学生,他们在学习这门课程之前应该具备一些基本的专业知识,至少他们应该知道什么是陶瓷以及陶瓷是怎么制

造出来的。

这部教材以“陶瓷材料力学性能导论”为题,陶瓷材料自然应该是教材的基础。全书自始至终围绕陶瓷材料展开,除了力学性能本身之外,本书在几乎所有的地方都不失时机地穿插了对陶瓷材料制备工艺相关知识的介绍,而这些相关知识又无一不和力学密切相关。这就构成了本书有别于其他优秀的材料力学性能教科书的一个显著特点。读完这部教材后,再去重温一下在陶瓷工艺学或陶瓷物理化学这类课程中学过的相关知识,读者就会发现力学竟然会如此奇妙,如此无孔不入。这时,原本似乎枯燥乏味的东西或许就会开始变得有那么一些吸引力了。

尽管从英文版到中文版的变化会在一定程度上导致作者语言风格的部分丧失,我相信读者在阅读本书中文版的过程中仍然会体会到本书朴素的文风所创造出的一种独特的感觉,那是在课堂上和一个神采飞扬的大师进行交流时的感觉。精练的语言和丰富的实例使得干巴巴的基本概念和基础理论变得有血有肉,这是一部优秀的教科书之所以优秀的主要因素之一。当然,教材的文风朴素和课堂讲授的口语化还是有区别的,毕竟听的感觉和读的感觉之间并不完全一样。应该说,略显单调的句型还是稍稍对本书的可读性造成了一些轻微的影响,虽然这一点并不足以影响到本书的优秀。

我是应清华大学出版社宋成斌先生的要求,在浏览剑桥大学出版社最近几年出版的一系列材料类图书时发现这部教材的。凭着对陶瓷材料力学性能的偏爱,在阅读了本书的简介之后,我极力向宋成斌先生推荐了本书。在清华大学出版社确定翻译本书后,我粗略地翻阅了一次本书的英文版,于是偏爱转变成了厚爱。而当完成了本书的翻译之后,我产生了一种向正在大学里就读陶瓷材料专业的大学生和研究生推荐本书的强烈愿望。我相信,阅读完本书的读者应该会从中获得很多的启发。

必须指出的是,作为一个材料专业毕业的科技工作者,和上文中提到的大学生们一样,我的力学理论基础也很薄弱。因此在翻译这部每一章每一节甚至每一段落中都充满了力学术语的教材的过程中,我深感知识的贫乏,不得不借助于一些参考书来仔细核对每一个陌生的术语的确切译法。即使如此,翻译稿中的错误也是不可避免的。这一点恳请读者谅解。此外,由于近20年来陶瓷材料力学性能的研究中出现了很多新名词,这些新名词大多在中文中尚未形成普遍认可的习惯译法,因此在翻译本书的过程中我也不得不杜撰出一些中文术语。这些杜撰合适与否还有待读者的鉴定。如果读者在阅读本书中文版的过程中发现了任何的错误后及时向我指出,我将十分感谢。

Green教授在得知清华大学出版社计划出版本书中文版后,积极推动了剑桥大学出版社与清华大学出版社之间关于版权问题的磋商进程,并应我的要求

对原书的序言做了一些修改,委托我翻译后作为中文版的序言。同时,他还向我提供了一份详尽的勘误表,标出了原书中已经发现的一些错误,希望能够在中文版中予以改正。Green 教授提供的这些内容都已经在中文版中得到了反映。在本书中文版交付出版之时,我应该向 Green 教授所做的这些工作表示衷心的感谢,同时也要感谢他对我的信任,因为毕竟在此之前我们彼此并不相识。当然,我更希望这个译本不会让 Green 教授失望。

我要感谢我的恩师关振铎教授。年逾古稀的关先生在北京今年这个罕见的闷热夏天里对这个译本进行了认真仔细的审阅,并提出了很多积极的修改建议。

最后,感谢清华大学出版社和宋成斌先生给了我这个机会,把一部难得的好教材推荐给国内的读者。感谢曾洁女士对这个译本进行的认真仔细地编辑加工,她的工作确实为本书增色不少。

如果我的这一工作能够对国内目前仍然处于低迷状态的陶瓷材料力学性能研究起到一点推动作用,我将十分欣慰。

龚江宏

2002 年 9 月于清华园

目 录

第 1 章 引言	1
参考文献	9
第 2 章 弹性性能	11
2.1 原子键的弹性形变	12
2.2 胡克定律的失效	14
2.3 工程弹性常数	16
2.4 一点处的应变	22
2.5 应变的变换	27
2.6 膨胀应变和偏转应变	31
2.7 应变相容性	31
2.8 张量	32
2.9 热膨胀系数	33
2.10 应力的定义	36
2.11 广义胡克定律	40
2.12 各向异性材料的弹性行为	44
2.13 各向同性材料的弹性行为	49
2.14 影响弹性常数的各种因素	51
2.15 机械扰动的传播	52
2.16 谐振	54
2.17 弹性常数的测量	56
习题	58
参考文献	62
第 3 章 结构对弹性行为的影响	63
3.1 弹性常数与原子间势能的相互关系	63
3.2 弹性各向异性与原子结构	67
3.3 颗粒弥散复合材料的弹性行为	71

陶瓷材料力学性能导论	
3.4 $\dagger\dagger$ 复合材料改进的本构关系	75
3.5 无规多晶体的本构关系	79
3.6 气孔和微开裂对弹性常数的影响	80
3.7 多晶陶瓷的热膨胀行为	86
3.8 三明治式镶嵌板的弹性行为	89
习题	89
参考文献	93
 第 4 章 弹性应力分布	 95
4.1 静定和静不定问题	96
4.2 薄壁压力容器	97
4.3 梁的弯曲	98
4.4 弹性稳定性和弯折	102
4.5 平面应力和平面应变	104
4.6 圆柱形极坐标系统	106
4.7 承受压力作用的厚壁圆筒	107
4.8 复合材料中的残余应力	109
4.9 由气孔和夹杂物导致的应力集中	113
4.10 接触力	115
习题	118
参考文献	120
 第 5 章 粘性和粘弹性	 122
5.1 牛顿粘度定律	122
5.2 粘度对温度的依赖性	124
5.3 粘性流动中的简单问题	126
5.4 $\dagger\dagger$ 缓慢粘性流动的广义方程	129
5.5 非线性粘性流动	131
5.6 固态颗粒在流体中的分散	133
5.7 粘弹性模型	134
5.8 陶瓷和玻璃的滞弹性	142
习题	143
参考文献	145

第 6 章 塑性形变	147
6.1 理论剪切强度	147
6.2 位错	149
6.3 位错的应力场	151
6.4 位错的特征	153
6.4.1 非平面滑移	154
6.4.2 位错的钉扎	154
6.4.3 位错结构	154
6.4.4 位错攀移	155
6.4.5 位错速率	156
6.5 滑移几何学	156
6.5.1 岩盐结构	157
6.5.2 氧化铝	159
6.6 不全位错	161
6.7 单晶和多晶材料的塑性	162
6.8 位错运动的障碍	166
6.8.1 点缺陷	167
6.8.2 功硬化	167
6.8.3 界面上的相互作用	168
6.8.4 颗粒	168
6.9 塑性力学	169
6.10 硬度	171
习题	172
参考文献	174
 第 7 章 蠕变形变	175
7.1 单晶中的蠕变	176
7.1.1 位错蠕变	176
7.1.2 应力诱导扩散	177
7.2 多晶体中的蠕变	178
7.3 形变机理图	183
7.4 蠕变机制的测量	184
习题	186

参考文献	190
------	-----

第 8 章 脆性断裂	192
8.1 理论劈裂强度	192
8.2 裂纹处的应力集中	194
8.3 Griffith 概念	194
8.4 裂纹的成核与形成	197
8.5 线弹性断裂力学	199
8.5.1 能量方法	199
8.5.2 应力方法	201
8.5.3 能量方法和应力方法之间的关系	202
8.5.4 断裂准则	202
8.5.5 裂纹的稳定性	204
8.6 应力强度因子解	205
8.6.1 应力强度因子解以及试验构型	205
8.6.2 断裂韧性测试	209
8.6.3 椭圆形裂纹	210
8.7 ^{††} 确定应力强度因子的方法	211
8.7.1 叠加	212
8.7.2 应力集中	213
8.7.3 应力分布	214
8.7.4 格林函数方法	216
8.7.5 权重函数方法	222
8.7.6 组合	222
8.8 压痕断裂	223
8.9 R 曲线	225
8.10 混合模式断裂	227
8.11 显微结构尺度上的裂纹扩展	228
8.11.1 裂纹尖端相互作用	228
8.11.2 裂纹尖端的屏蔽	232
8.11.3 裂纹桥接	239
8.12 亚临界裂纹扩展	244
8.13 断口形貌分析	245
8.14 接触损伤过程	251
8.14.1 点力解	251

8.14.2 钝压头	254
8.15 $\dagger\dagger$ J 积分	256
习题	258
参考文献	260
第 9 章 强度与工程设计	263
9.1 强度测试	263
9.2 断裂统计学	264
9.2.1 Weibull 方法	264
9.2.2 试样(部件)尺寸和承载模式的影响	266
9.3 强度对时间的依赖性	267
9.4 亚临界裂纹扩展参数的确定	269
9.4.1 直接法	269
9.4.2 动态疲劳	270
9.4.3 静态疲劳	270
9.5 SPT 图	271
9.6 改善强度和可靠性	272
9.6.1 减小裂纹尺寸	273
9.6.2 改善断裂韧性或裂纹非敏感性	274
9.6.3 降低外加应力	274
9.7 强度对温度的依赖性	275
9.8 热应力和热冲击	275
9.9 热冲击阻力参数	278
9.9.1 断裂起始	278
9.9.2 损伤程度	279
9.10 残余应力	281
9.10.1 涂层和釉层	281
9.10.2 组分梯度	281
9.10.3 热回火	281
习题	282
参考文献	289
综合练习	291

附录 1	一些晶体类型的刚度常数与柔度常数之间的 显函数关系	298
附录 2	不同类型单晶的杨氏模量随方向的变化	299
附录 3	各向同性材料的工程弹性常数之间的关系	300
附录 4	一些晶体类型的马德隆常数	301
附录 5	常用强度测试构型的应力和挠度	302

第 1 章 引 言

在过去的 25 年里,在高新技术领域中陶瓷材料的应用一直表现出一种强劲的发展势头,而这一强劲发展势头中所包含的重要工作之一则是对陶瓷材料力学行为的深入了解。首先让我们来看一看表 1.1 列出的陶瓷材料具有的各种技术功能。陶瓷材料五花八门的性能并不总是被人们所注意。在结构应用方面,合适的力学性能是极为重要的。被考虑在结构部件方面应用的陶瓷材料称为结构陶瓷。在某些情况(如作为热机部件)下,对材料的要求主要是它们的高温稳定性和耐腐蚀性,这些性能的改善可以使热机的工作温度得以提高,从而使热机的总体性能得以改善。遗憾的是,陶瓷材料通常是脆性的,陶瓷材料的破坏往往会以一种灾难性的方式突然地发生。因此对陶瓷材料力学性能的研究引起了人们的高度重视,而这一研究则主要致力于改善材料的强度、韧性以及抵抗接触损伤的能力。确实有必要指出的是,在认识陶瓷材料的这些力学性能方面已经取得了很显著的进展,而相关的研究成果已经指导我们研制出了一系列新型的结构陶瓷材料。

表 1.1 陶瓷材料的功能及其技术应用

(改编自 Kenney 和 Bowen, 1983, 经美国陶瓷学会许可引用)

功能	主要特性	应用实例
电学	电绝缘性(例如 Al_2O_3 、 BeO)	电子基片及封装材料、绕线、输电线路上的绝缘子
	铁电性能(例如 BaTiO_3 、 SrTiO_3)	电容器
	压电性能(例如 PZT)	振子、振荡器、滤波器、换能器、激励器、火花发生器
	半导性能(例如 BaTiO_3 、 SiC 、 $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3$ 、 CdS 、 V_2O_5)	NTC 电热调节器(温度传感器) PTC 电热调节器(加热元件、电源开关) CTR 电热调节器(热传感器) 厚膜电热调节器(IR 传感器) 振荡器(噪声吸收器、电浪涌吸收器) 太阳能电池、窑炉加热元件
	离子电导性能(β -氧化铝、 ZrO_2) 超导性能(YBCO)	固体电解质(电池、燃料电池、氧传感器) 磁体、电子元件

续表

功能	主要特性	应用实例
磁学	软磁体(铁氧体) 硬磁体(铁氧体)	磁记录头 磁体、电动马达
光学	半透明性(Al_2O_3 、 MgO 、莫来石、 Y_2O_3 、PLZT) 透明性(硅酸盐玻璃)	高压钠灯灯管、IR窗口、发光管及灯泡、激光材料、光记忆元件、视频显示器和存储器、光调制元件及光快门 光学纤维、容器、窗口
化学	化学传感器(ZnO 、 Fe_2O_3 、 SnO_2) 催化剂载体(堇青石、 Al_2O_3) 电极材料(钛酸盐、硫化物、硼化物)	气敏元件及报警器、碳氢化合物和碳氟化合物探测器、湿度传感器 辐射控制、酶载体、沸石 电解沉积过程、光化学过程
热学	热绝缘性(玻璃纤维、铝硅酸盐纤维) 热传导性(金刚石薄膜、 AlN) 热稳定性(AZS、 Al_2O_3)	红外辐射器、宇宙航空飞行器的热保护系统 电子仪器中的散热片 耐火材料
结构	硬度(SiC 、 TiC 、 TiN 、 Al_2O_3) 刚度和热稳定性(SiC 、 Si_3N_4)	切削刀具、耐磨损材料、机械封装材料、研磨剂、装甲、轴承 陶瓷热机部件、涡轮机部件、燃烧器喷嘴、光辐射管、坩埚
生物	化学稳定性(羟基磷灰石、 Al_2O_3)	人造牙齿、骨、腱
核能	核裂变(UO_2 、 PuO_2) 中子吸收(C 、 SiC 、 B_4C)	核燃料、能源 包覆材料、屏蔽材料

说明: PZT——锆钛酸铅; YBCO——钇钡铜氧化物; PLZT——掺镧的锆钛酸铅; AZS——锆硅酸铝; NTC——负温度系数; PTC——正温度系数; CTR——临界温阻; IR——红外

力学性能对于非结构应用也是很关键的,认识到这一点十分必要。例如,在航天飞机热防护系统的设计中采用了多孔的石英瓦。这些材料的显微结构(如图 1.1 所示)由相互键合的纤维(通常以硅玻璃为基)阵列所构成。显而易见,采用这些材料的主要原因是它们具有低的热导率,但是材料抵抗热应力和结构应力的能力也是最终设计时必须考虑的关键因素。在一些非结构应用中,力学性能对于决定元器件的使用寿命也是很重要的。例如,已经开发出了具有高能量密度和高功率密度的钠硫电池用于运输和能量存储。这种电池使用了固态陶瓷电解质 β -氧化铝,但是充电过程导致的电解质开裂使得电池的寿命受到了影响。显然,改善电解质的力学性能会在很大程度上提高电池的经济适用性。

在对力学性能的各个方面进行详尽讨论之前,有必要对材料科学与工程这一完整的体系作一番了解。图 1.2 示出了如何利用这一学科为高新技术领域服务的一般过程。对材料的一些可能的性能进行研究,使得我们能够确定它的一

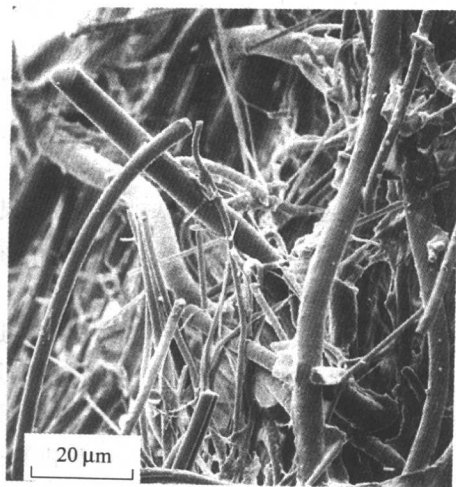


图 1.1 航天飞机用耐热瓦材料多孔石英纤维的显微结构
(扫描电镜(SEM)二次电子图像,经 Plenum 出版社(New York,美国)许可复制)

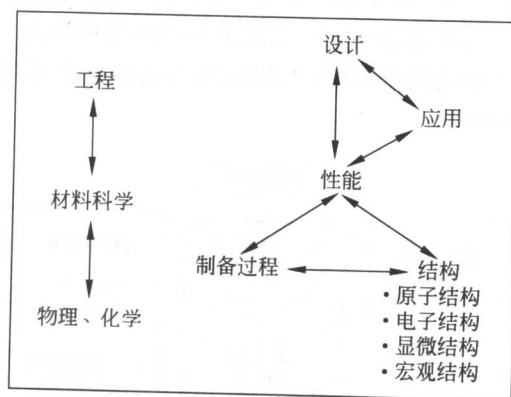


图 1.2 为技术应用而进行材料开发的一般科学方法

个特定应用背景并着手开始进行设计。这通常是工程领域的做法,而具备确定并测量材料设计过程中必需的关键性能的能力则是很重要的。材料科学虽然有一部分内容也与性能有关,但主要的研究内容则通常是性能、结构和工艺的优化,研究的目的一般是通过调整工艺以形成一个特定的结构从而获得一组最佳的性能。探索新的或者改性的材料是材料科学领域研究的一个基本特征。决定一种特定性能的材料结构可以是在不同的尺度水平上的,从电子和原子结构一直到宏观结构。例如,弹性性能基本上是由决定原子键刚度的化学键结合力决定的,因此改变弹性行为的途径之一应该是通过添加溶剂来调整化学组成。此外,通过在较大尺度上调整显微结构来改变材料的弹性性能也是有可能的,例如