

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 9 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 10 章到第 17 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 18 章将讨论陶瓷材料的断裂问题。第 19 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。

原书作者: 美国陶瓷学会 编 龚 美 译

原书书名: 陶瓷材料力学性能 龚 美 译

译者姓名: 龚 美

译者单位: 清华大学出版社

译者地址: 北京市海淀区清华园

译者电话: 010-62770111 译者传真: 010-62770111 译者邮编: 100084

译者电子邮箱: gongmei@tsinghua.edu.cn 译者QQ: 1000000000

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 01-2008-00000000

图书在版编目(CIP)数据

陶瓷材料力学性能论 龚美 格林著 龚江宏译 北京:清华大学出版社 2008

(材料科学与工程系列)

书名原文: 陶瓷材料力学性能 龚美 译

ISBN 7-302-18000-0

I 援陶... II 援①格... ②龚... III 援陶瓷 原无机材料 原力学性能 IV 援刘 153

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 000000 号

出版者:清华大学出版社

地址:北京清华大学学研大厦

邮编:100084

社总机:010-62770175

客户服务:010-62770175

组稿编辑:宋成斌

文稿编辑:曾摇洁

封面设计:郑摇勉

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:16开 1/32 印张:16 插页:0

版次:2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-302-18000-0

印数:1-1000

定价:35.00 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 廖爱媛教授编写的教科书《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 冯景璋教授,是他把我带进了这个研究领域。我要感谢 蔡肇基教授他教给我有关陶瓷工艺方面的知识。我要特别感谢 冯景璋教授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 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 廖爱媛教授和 冯景璋教授耐心细致地校对本书的清样。感谢 廖爱媛教授审阅了本书的部分章节并提出了建设性的建议。感谢在过去的 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 廖爱媛教授和 冯景璋教授,感谢他们。

読者サービス課

圓苑年 苑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。

材料科学
与工程
系列
要求材料专业的学生在短短的 源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 学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 刚毅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,本书在几乎所有可能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,由于近十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。

刘震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。鄧聶士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,我应该向鄧聶士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鄧聶士教授失望。

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

鄧聶士 1994年 怨月于清华园

目 录

第 1 章 引 言	1
参考文献	2
第 2 章 弹性性能	3
2.1 原子键的弹性形变	3
2.2 胡克定律的失效	3
2.3 工程弹性常数	3
2.4 一点处的应变	4
2.5 应变的变换	4
2.6 膨胀应变和偏转变变	4
2.7 应变相容性	4
2.8 应变张量	4
2.9 热膨胀系数	4
2.10 应力的定义	4
2.11 广义胡克定律	4
2.12 各向异性材料的弹性行为	4
2.13 各向同性材料的弹性行为	4
2.14 影响弹性常数的各种因素	4
2.15 机械扰动的传播	4
2.16 谐振	4
2.17 弹性常数的测量	4
习 题	4
参考文献	4
第 3 章 结构对弹性行为的影响	5
3.1 弹性常数与原子间势能的相互关系	5
3.2 弹性各向异性与原子结构	5
3.3 颗粒弥散复合材料的弹性行为	5

第 4 章 复合材料改进的本构关系	40
第 5 章 无规多晶体的本构关系	41
第 6 章 气孔和微开裂对弹性常数的影响	42
第 7 章 多晶陶瓷的热膨胀行为	43
第 8 章 三明治式镶嵌板的弹性行为	44
习题	45
参考文献	46
 第 9 章 弹性应力分布	47
第 9.1 节 静定和静不定问题	48
第 9.2 节 薄壁压力容器	49
第 9.3 节 梁的弯曲	50
第 9.4 节 弹性稳定性和弯折	51
第 9.5 节 平面应力和平面应变	52
第 9.6 节 圆柱形极坐标系统	53
第 9.7 节 承受压力作用的厚壁圆筒	54
第 9.8 节 复合材料中的残余应力	55
第 9.9 节 由气孔和夹杂物导致的应力集中	56
第 9.10 节 接触力	57
习题	58
参考文献	59
 第 10 章 粘性和粘弹性	60
第 10.1 节 牛顿粘度定律	61
第 10.2 节 粘度对温度的依赖性	62
第 10.3 节 粘性流动中的简单问题	63
第 10.4 节 缓慢粘性流动的广义方程	64
第 10.5 节 非线性粘性流动	65
第 10.6 节 固态颗粒在流体中的分散	66
第 10.7 节 粘弹性模型	67
第 10.8 节 陶瓷和玻璃的滞弹性	68
习题	69
参考文献	70

第 1 章 塑性形变	1
1.1 理论剪切强度	1
1.2 位错	2
1.3 位错的应力场	3
1.4 位错的特征	4
1.4.1 非平面滑移	4
1.4.2 位错的钉扎	4
1.4.3 位错结构	4
1.4.4 位错攀移	5
1.4.5 位错速率	5
1.5 滑移几何学	5
1.5.1 岩盐结构	5
1.5.2 氧化铝	6
1.6 不全位错	6
1.7 单晶和多晶材料的塑性	6
1.8 位错运动的障碍	7
1.8.1 点缺陷	7
1.8.2 功硬化	7
1.8.3 界面上的相互作用	8
1.8.4 颗粒	8
1.9 塑性力学	8
1.10 硬度	8
习题	9
参考文献	9
第 2 章 蠕变变形	10
2.1 单晶中的蠕变	10
2.1.1 位错蠕变	10
2.1.2 应力诱导扩散	10
2.2 多晶体中的蠕变	11
2.3 蠕变机理图	11
2.4 蠕变机制的测量	11
习题	12

参考文献	页四
第 1 章 脆性断裂	页四
1.1 脆性理论劈裂强度	页四
1.2 脆性裂纹处的应力集中	页四
1.3 脆性断裂的概念	页四
1.4 脆性裂纹的成核与形成	页四
1.5 脆性弹性断裂力学	页四
1.5.1 能量方法	页四
1.5.2 应力方法	页四
1.5.3 能量方法和应力方法之间的关系	页四
1.5.4 脆性断裂准则	页四
1.5.5 脆性裂纹的稳定性	页四
1.6 脆性应力强度因子解	页四
1.6.1 脆性应力强度因子解以及试验构型	页四
1.6.2 脆性断裂韧性测试	页四
1.6.3 脆性椭圆裂纹	页四
1.7 脆性确定应力强度因子的方法	页四
1.7.1 脆性叠加	页四
1.7.2 脆性应力集中	页四
1.7.3 脆性应力分布	页四
1.7.4 脆性格林函数方法	页四
1.7.5 脆性权重函数方法	页四
1.7.6 脆性组合	页四
1.8 脆性压痕断裂	页四
1.9 脆性挠曲曲线	页四
1.10 脆性混合模式断裂	页四
1.11 脆性显微结构尺度上的裂纹扩展	页四
1.11.1 脆性裂纹尖端相互作用	页四
1.11.2 脆性裂纹尖端的屏蔽	页四
1.11.3 脆性裂纹桥接	页四
1.12 脆性亚临界裂纹扩展	页四
1.13 脆性断口形貌分析	页四
1.14 脆性接触损伤过程	页四
1.14.1 脆性点力解	页四

译者序

附录 员 一些晶体类型的刚度常数与柔度常数之间的 显函数关系	圆愿
附录 圆 不同类型单晶的杨氏模量随方向的变化	圆怨
附录 猿 各向同性材料的工程弹性常数之间的关系	猿园
附录 源 一些晶体类型的马德隆常数	猿员
附录 缘 常用强度测试构型的应力和挠度	猿圆

第 1 章 引言

在过去的 10 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 运社和 月社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 陶瓷、玻璃)	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 铁电陶瓷)	电容器
	压电性能(例如 压电陶瓷)	振子、振荡器、滤波器、换能器、激励器、火花发生器
	半导体性能(例如 半导体陶瓷)	电热调节器(温度传感器)
	热电性能(例如 热电陶瓷)	电热调节器(加热元件、电源开关)
	离子电导性能(氧化铝、氧化锆)	电热调节器(热传感器)
	超导性能(超导陶瓷)	厚膜电热调节器(热传感器)
		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
		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(氧化铝、氮化硅、莫来石、氧化铝、氮化硅) 透明性(硅酸盐玻璃)	高压钠灯灯管、晒窗口、发光管及灯泡、激光材料、光记忆元件、视频显示器和存储器、光调制元件及快门 光学纤维、容器、窗口
化学	化学传感器(氧化铝、氮化硅、氧化铝) 催化剂载体(堇青石、氧化铝) 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、氧化铝) 热稳定性(氧化铝、氮化硅)	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(氧化铝、氮化硅、氧化铝) 刚度和热稳定性(氧化铝、氮化硅)	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、氧化铝)	人造牙齿、骨、腱
核能	核裂变(铀、钚) 中子吸收(铀、钚)	核燃料、能源 包覆材料、屏蔽材料

摇摇说明: 氧化铝——铝钛酸铝; 氮化硅——钨钨铜氧化物; 氮化硅——掺硼的铝钛酸铝; 氧化铝——铝硅酸铝;
 氧化铝——负温度系数; 氮化硅——正温度系数; 氮化硅——临界温阻; 氮化硅——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(如图员源所示)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。图员源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

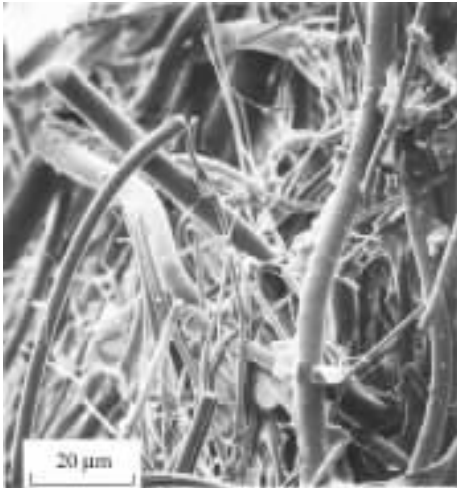


图 1.1 航天飞机用耐热瓦材料多孔石英纤维的显微结构
(扫描电镜二次电子图像 经马捷出版社(美国)许可复制)

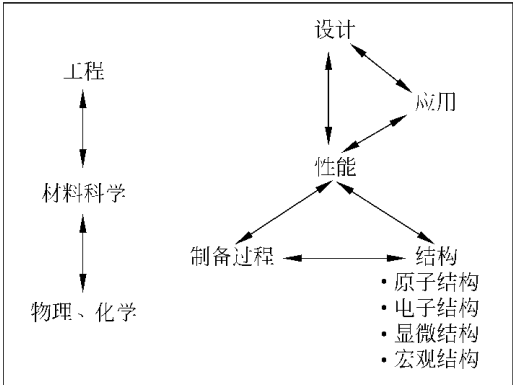


图 1.2 为技术应用而进行材料开发的一般科学方法

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

通过添加其他相或者在显微尺度上改变气孔率也将导致弹性性能的变化。把陶瓷纤维引入玻璃、高分子或金属中可以显著地提高材料的刚度,这一思路已经导致了纤维复合材料的发展。在宏观尺度上,针对不同的特殊结构和几何形状使用不同的材料是必要的,例如层状结构的弹性性能可以通过在承受最高应力作用的区域放置刚度较大的组元而得到调整,如所谓的三明治结构。如图 1.10 所示,材料科学通常是在工程和物理、化学这些基础科学之间起一个桥梁作用。

图 1.10 所示的流程图描述了一个完整的设计过程。随着设计过程从概念形成发展到最终产品,工程科学所需的设计工具越来越复杂。同时,材料科学则逐渐提高了对材料性能数据精度的要求以最终获得最佳的候选材料。在设计的前期,可以借助于一些近似的数据来选择一组最好的材料,但是在后期一般则需要采用标准的测试手段在实验室进行实际的测试。随着计算机数据库的逐渐发展,材料的选择过程也越来越复杂了。可以预期,计算机数据库将逐渐趋于复杂化和智能化。智能化的重要性在于它可以检验并修正所有的输入错误。当然,影响设计过程的还有其他许多因素,包括经济学因素和美学因素。有必要指出的是,生产一种特定的材料通常有许多种不同的工艺过程。经济发展形势的变化以及新的工艺技术的出现会在很大程度上影响最终的决定。此外还需要考虑所谓的“绿色”工艺方面的问题,现在人们已经开始用生态学的观点来研究工业过程了(即工业生态学)。

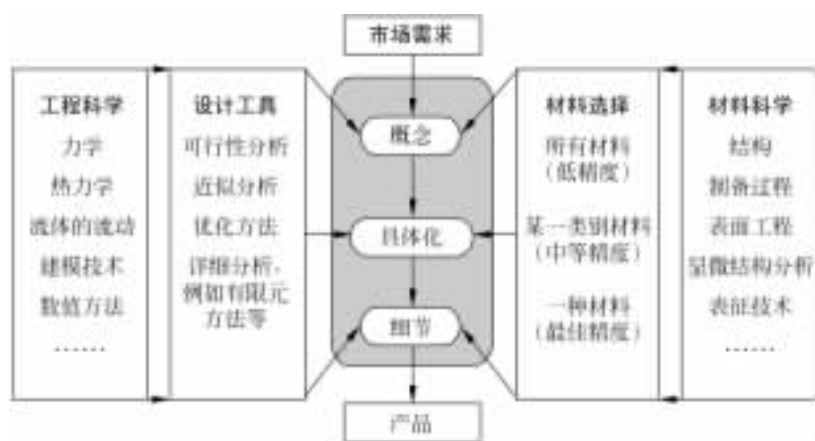


图 1.10 说明设计过程中设计工具和材料选择的流程图

(取自《陶瓷材料力学性能导论》, 机械工业出版社, 1998 年, 英国) 许可复制)

为便于说明目前已经得到应用的一些改善材料力学可靠性的技术, 我们来看看与氧化铝陶瓷这一典型材料有关的几个例子。图 1.11 所示为一种由细小的等轴晶粒 (≈ 0.5 μm) 构成的热压氧化铝材料的显微结构。从电子集成电路基

片到装甲涂覆,多晶氧化铝已经得到了极为广泛的应用。但是,直到最近我们才能够借助于一些手段使氧化铝的强度和韧性得到较大程度的提高。例如,将氧化锆作为第二相添加到氧化铝中可以获得如图 1-15 所示的显微结构。通过这一手段,一种被称为相变增韧的机制被引进到材料中以提高韧性和强度。氧化铝的韧性也可以通过在显微结构中引进陶瓷纤维、晶须或板状粒子而得到提高,例如图 1-16 示出了一种含有氧化锆板状粒子的氧化铝的显微结构。在本书第 4 章中将指出,通常情况下,裂纹桥接以及增韧体拔出时的摩擦效应是这些陶瓷基复合材料性能改善的原因。氧化铝制品的结构也可以在宏观尺度上进行调控。作为一个实例,图 1-17 示出了对一种三明治型的氧化铝镶嵌板进行加载的情况。在致密的氧化铝板之间结合一层多孔的氧化铝芯板可以获得一种在最小的重量下具有最高强度或刚度的材料,尤其是在承受弯曲荷载作用的场合。最近,具有混合层状结构的陶瓷制品的研制引起了人们的关注。在这种结构中,具有不同组成的各层依次相间叠放。图 1-18 所示为由氧化铝层和氧化锆层相间排布而构成的一种层状材料,这样一种结构对裂纹扩展行为将产生显著的影响。上面提到的几种方法强调了复合材料在调整显微结构方面的应用。另一方面,使材料在显微结构中发育出自增强体的研究也得到了发展。图 1-19 所示为一种氧化铝材料的显微结构,在这一显微结构中晶粒的形状及其排列方式是决定材料物理性能的主要因素。图 1-20 则示出了一种自补强氮化硅陶瓷的显微结构,其中纤维状晶粒的出现被证实可以提高材料的断裂韧性。

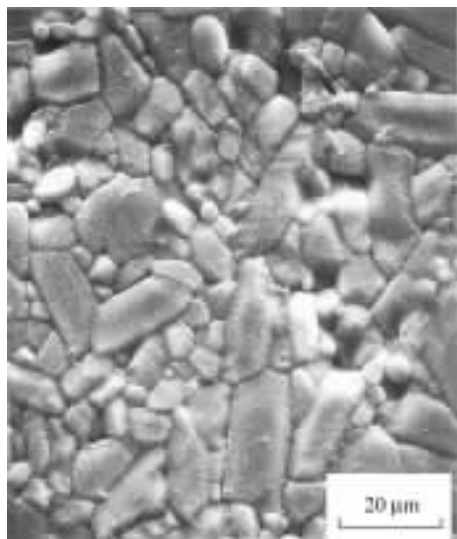


图 1-15 热压多晶氧化铝的显微结构
(由 SEM 获得的二次电子图像)