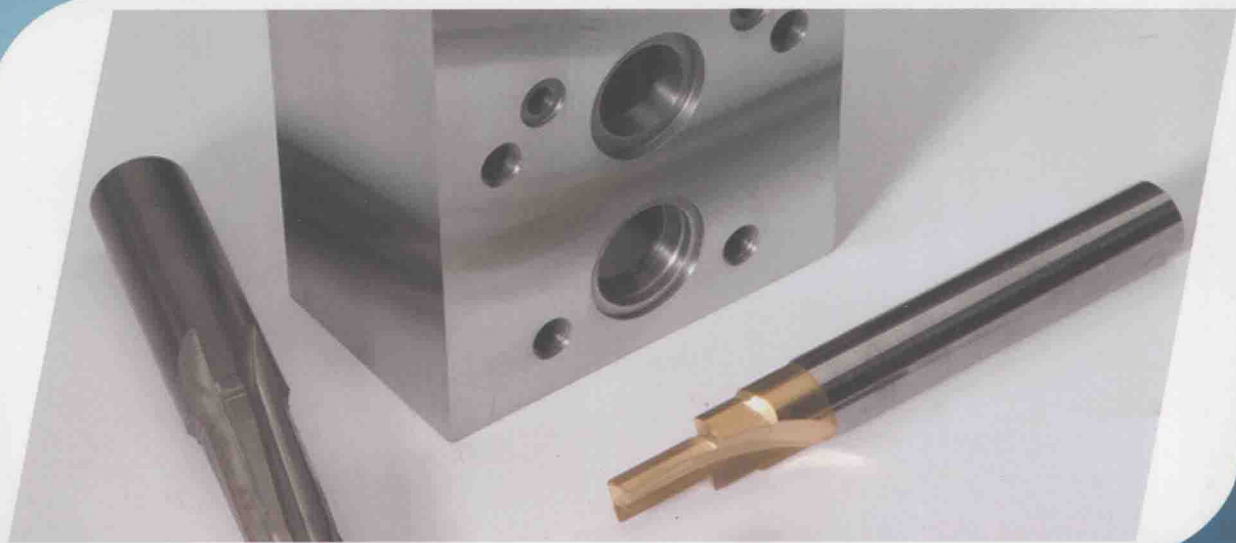




高职高专“十二五”规划教材——机械电子系列



材料科学基础

王维 刘江州 ©主编

CAI LIAO KE XUE JI CHU



西苑出版社

高职高专“十二五”规划教材——机械电子系列

材料科学基础

主 编 王 维 刘江州

副主编 阎学浩 潘 炜 朱 冰



西苑出版社
XI YUAN PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

《材料科学基础》侧重于对基本概念、基本规律和基本知识的阐述。本书既可作为高等院校材料类和机械类专业的学生及研究生的教科书和参考书,也可以为相关专业的学生及从事材料工作的科技工作者和工程技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料科学基础/ 王维, 刘江州主编. -- 北京 :
西苑出版社, 2011. 7

ISBN 978-7-80210-911-5

I. ①材… II. ①王… ②刘… III. ①材料科学—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①H591

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第011639号

材料科学基础

主 编 王 维 刘江州

出版发行 **西苑出版社**

通讯地址 北京市海淀区阜石路15号

邮政编码: 100143

电 话: 010-88624971

传 真: 010-88637120

网 址 www.xycbs.com

E-mail: xycbs8@126.com

印 刷 北京紫瑞利印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm 1/16

字 数 390千字

印 张 13

版 次 2011年7月第1版

印 次 2011年7月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-80210-911-5

定 价 35.00元

(凡西苑版图书如有缺漏页、残破等质量问题,本社邮购部负责调换)

版权所有

翻印必究

前 言

《材料科学基础》是描述材料科学与技术学科全貌的一门课程，是研究材料的成分、组织结构、制备工艺与材料性能和应用之间相互关系的新兴学科，它将金属、陶瓷、高分子等不同材料的微观特性和宏观规律建立在共同的理论基础上，对生产、使用和发展材料具有指导意义。

《材料科学基础》系统地介绍了材料科学的基础理论，探讨材料的共性和普遍规律。它内容包括材料学科的基本理论、基本研究方法、研究对象体系、以及材料在各领域的应用，着重于基本概念和基础理论，强调科学性、先进性和实用性，介绍材料科学领域的新发展，注意应用理论于解决实际问题。主要阐述了材料的成分、结构、组织与性能之间关系的基本原理。本书共分7章，其内容包括：绪论、材料学纲要、金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料、复合材料、新材料。整个教学过程中，使学生对于材料科学的研究内容有一个初步认识，懂得材料学科研究特点，了解材料的简单分类和应用，拓宽知识面，为学生成为综合型人才奠定基础。

本书既可作为高等院校材料类和机械类专业的学生及研究生的教科书和参考书，也可以为相关专业的学生及从事材料工作的科技工作者和工程技术人员提供参考。

本书由王维、刘江州任主编，由阎学浩、潘炜、朱冰任副主编，全书由刘江州统稿。

在编写过程中，作者翻阅了大量的资料，参考了许多专家及学者的研究成果，由于时间关系来不及与作者联系，在此向各位表示感谢！

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中难免有不足与疏漏之处，敬请各位专家、学者及使用本书的师生批评指正。如在使用本书的过程中有其他意见或建议，恳请向我们提出宝贵意见。

编 者

2011年7月

目 录

第一章 绪论.....	1	八、合金模具钢.....	32
第二章 材料学纲要.....	6	九、合金量具钢.....	33
第一节 材料的成分与组织结构.....	6	十、不锈钢.....	34
一、成分与结构.....	6	十一、耐热钢及高温合金.....	36
二、材料的组织.....	8	十二、耐磨钢.....	39
三、成分和组织结构的检测.....	8	第四节 铸铁.....	40
四、材料的成分与组织机构数据库.....	9	一、概述.....	40
第二节 材料的合成与加工.....	9	二、灰口铸铁.....	43
第三节 材料的性质与使用性能.....	10	三、球墨铸铁.....	44
一、材料的物理和化学性质及		四、蠕墨铸铁.....	45
其使用性能.....	10	五、可锻铸铁.....	46
二、材料性质数据库.....	11	六、合金铸铁.....	46
第四节 结构材料的失效.....	11	第五节 非铁金属及其合金.....	47
一、材料的变形.....	12	一、铝及其合金.....	47
二、材料的断裂.....	12	二、铜及铜合金.....	49
三、材料的磨损.....	13	三、钛及钛合金.....	52
四、材料的腐蚀.....	13	四、镁及镁合金.....	53
附录 材料的主要性能指标(参量)		五、轴承合金.....	53
及涵义.....	14	第四章 无机非金属材料.....	56
第三章 金属材料.....	17	第一节 陶瓷概论.....	56
第一节 铁及铁基合金概述.....	17	一、陶瓷材料的分类.....	56
一、纯铁.....	17	二、陶瓷材料的物质结构.....	56
二、碳钢.....	17	三、陶瓷材料的性能特点.....	59
第二节 钢的热处理.....	19	第二节 普通陶瓷材料.....	62
一、钢的热处理基本原理.....	20	一、普通陶瓷的生产工艺过程.....	62
二、钢的常规热处理.....	21	二、普通陶瓷品种.....	64
第三节 合金钢.....	23	第三节 结构陶瓷材料.....	65
一、概述.....	23	一、结构陶瓷的生产工艺.....	65
二、工程构件用钢.....	25	二、常用结构陶瓷材料.....	67
三、合金渗碳钢.....	26	三、耐火陶瓷.....	73
四、合金调质钢.....	27	第四节 功能陶瓷材料.....	75
五、弹簧钢.....	28	一、电子陶瓷.....	75
六、滚动轴承钢.....	29	二、超导陶瓷.....	79
七、合金刀具钢.....	30	三、磁性陶瓷.....	80
		四、光学陶瓷.....	84

五、生物陶瓷.....	87	三、颗粒增强金属基复合材料.....	152
六、陶瓷分离膜.....	88	四、金属基功能复合材料.....	152
七、敏感陶瓷.....	89	第六节 陶瓷基复合材料.....	153
第五节 无机建筑材料.....	92	一、纤维增强陶瓷基复合材料.....	153
一、气硬性无机胶凝材料.....	92	二、颗粒增强陶瓷基复合材料.....	155
二、水泥.....	93	三、陶瓷基功能复合材料.....	155
三、玻璃.....	97	第七节 层叠复合材料.....	155
第五章 有机高分子材料.....	102	一、双层金属复合材料.....	156
第一节 概述.....	102	二、塑料—金属多层复合材料.....	156
一、高分子的基本概念.....	102	三、夹层结构复合材料.....	156
二、历史、现在与未来.....	105	第七章 新材料.....	157
第二节 高分子的合成、结构与性能.....	106	第一节 纳米材料.....	157
一、高分子的合成.....	106	一、纳米材料的结构.....	157
二、高分子的结构与性能.....	112	二、纳米材料的特性.....	159
第三节 典型的高分子品种.....	119	三、纳米材料的制备与合成.....	160
第六章 复合材料.....	127	四、纳米材料的应用.....	162
第一节 概述.....	127	第二节 富勒烯类材料.....	163
一、复合材料的涵义.....	127	一、富勒烯的结构.....	163
二、复合材料的分类.....	127	二、富勒烯的合成.....	164
三、复合材料性能特点.....	128	三、富勒烯的分离与提纯.....	167
四、复合材料的现状与未来.....	130	四、富勒烯的应用前景.....	168
第二节 复合材料的复合理论.....	132	第三节 非晶合金.....	169
一、复合原理.....	132	一、金属玻璃的类型.....	169
二、增强机理.....	135	二、非晶合金的制备方法.....	170
三、增韧.....	137	三、非晶态合金的性能.....	171
第三节 复合材料的界面.....	140	四、非晶态合金的应用.....	173
一、树脂基复合材料的界面.....	140	第四节 高分子新材料.....	176
二、金属基复合材料的界面.....	142	一、高分子分离膜.....	176
三、陶瓷基复合材料的界面.....	143	二、磁性高分子材料.....	177
第四节 树脂基复合材料.....	144	三、光功能高分子材料.....	178
一、概述.....	144	四、导电高分子材料.....	180
二、纤维增强树脂基复合材料.....	144	五、化学功能高分子材料.....	180
三、颗粒增强树脂基复合材料.....	148	六、医用高分子材料.....	181
四、树脂基基本功能复合材料.....	148	第五节 生物材料与超导材料.....	181
第五节 金属基复合材料.....	150	一、生物材料.....	181
一、概述.....	150	二、超导材料.....	183
二、纤维增强金属基复合材料.....	150	参考文献.....	186

第一章 绪 论

材料是指人类社会可接受、能经济地制造有用器件（或物品）的固体物质。其中包括天然生成和人工合成的材料，如：土、石、钢、铁、铜、铝、陶瓷、半导体、超导体、煤炭、磁石、光纤、塑料、橡胶等，以及由它们组合而成的复合材料。

人类社会的历史就是一部利用材料和制造材料的历史，正是形形色色的材料构成了世间万物，人类的发明创造丰富了材料世界，而材料的不断更新与发展推动了人类社会的进步。目前，世界上传统材料已有几十万种，而新材料的品种正在以每年大约 5% 的速度增长；世界上现有 800 多万种人工合成的化合物，而且还以每年 25 万种的速度增长，其中相当一部分将成为工业化生产的新材料，为人类社会和科学技术的发展服务。

迄今为止，人类使用材料的历史已经历了 7 个时代。公元前 10 万年，人类开始利用石材制造各种打猎和耕作的工具，形成了所谓的石器时代。史学家又细分为旧石器和新石器时代，四五十万年以前的北京猿人就处于旧石器时代，他们群居洞穴，以狩猎为生，使用的工具是石器和骨器，这些工具制作粗糙，用途尚未分化。到新石器时代，人们逐渐掌握了从地层里开采石料的技术，对石料的选择、切割、磨制、钻孔、雕刻等工序已有一定的要求，获得了较为锐利的磨制石器。

到公元前 6000 年，人类根据长期的体验，创造了冶金术，开始了用天然矿石冶炼金属，在西亚出现了铜制品；发展到公元前 3000 年，出现了铜合金（添加锡、铅的青铜），形成了青铜器时代。由于青铜熔点低，铸造性能良好，它作为制造武器、生活用具以及生产工具等物品的材料，曾大显身手，在人类文明史上产生过重要作用。我国商、周时期，是使用青铜器的鼎盛时代，祭祀的香炉、灭火的铜鼎等都是用青铜铸造的。至于春秋战国时代的青铜兵器，更流传着许多动人的故事。越王勾践和吴王夫差的宝剑相继出土，使埋藏地下 2 500 多年的秘密大白于天下，证实了诗人“越民铸宝剑，出匣吐寒芒”的赞誉。

大约在公元前 1500 年，人类借助风箱，发明了在高温下用木炭还原优质铁矿石生产铁的方法，并在半熔状态下进行锻造制作各种器具和武器，开创了铁器时代。用上述方法制备的铁器，即使长期放置在大气中也基本不生锈，它具有和青铜不同的金属光泽，强度较高，而且可加工性能良好。由于铁具有比青铜更高的强度，所以它除可用于制造武器外，还可用作结构材料制造器件。我国的铁器时代由何时开始，至今尚难断言，但这项技术至迟始于春秋战国时期。

材料发展史上的第一次重大突破，是人类学会用黏土烧结制成容器。人类第一个划时代的发现就是，大概在公元前 50 万年发现了火。随着对土壤可塑性的感性认识，以及对火的使用和控制经验的积累，人类开始用黏土制作简单的原始陶器。最早的陶器是在竹编、木制容器上涂敷烂泥而烧成的。后来才发现把黏土直接加工成形、烧制，也能达到同样的目的。中国大约在公元前 8000—6000 年、新石器时代早期开始制作陶器。公元前 4000 年左右，古

巴比伦的城市已采用砖来筑城。

随着金属冶炼技术的发展,在公元元年左右,人类掌握了通过鼓风提高燃烧温度的技术,发现一些高温烧制的陶器,由于局部熔化而变得更加坚硬,完全改变了陶器多孔与透水的缺点而成为瓷器。这是陶器发展过程的重大飞跃,从此形成了水泥时代。中国的瓷器大约始于魏、晋、南北朝时期,至宋、元时发展到很高的水平。瓷器作为中华文明的象征,大量运往欧亚各地,以至形成了中国与瓷器(china)同词的美谈。

到了17世纪,炼铁生产趋向大型化。欧洲在中世纪出现了高炉,燃料还原剂由木炭改为煤炭,从18世纪进而改为焦炭,以焦炭为燃料的炼铁术在欧洲得到推广应用,高炉的规模逐渐扩大,产量也随之增加。随后,当人类发现钢铁在高温下也具有高强度这一事实后,便出现了以钢铁为结构材料,将蒸汽的热能转变为机械能的蒸汽机。从此,人类开始掌握了人工产生机械动力的方法,用来开动机械设备进行大规模生产,这使人类的思想和社会结构发生了巨大变革。钢铁的使用标志着社会生产力的发展,人类开始由农业经济社会进入所谓工业经济的文明社会。人们称这个时期为钢时代。

钢铁材料的广泛应用,导致了大规模的机械化生产,极大地丰富了人类社会的物质文明,引起了第一次产业革命,即工业革命。自18世纪60年代起,英国以珍妮纺纱机的问世为标志,开始了工业革命,到19世纪30年代蒸汽机的广泛应用、小汽车和轮船的出现,第一次产业革命基本完成,前后历时70载。法国的工业革命始于18世纪80年代,到19世纪中叶完成。德国的工业革命大约从19世纪30年代开始,80年代基本完成。俄国、美国到19世纪80年代也已完成了工业革命。

第二次产业革命,就是起源于19世纪70年代的工业革命,其主要标志是:内燃机、电动机代替蒸汽机,新炼钢方法的迅速推广,电力的广泛应用和化学方法的采用。在新技术的带动下,电力工业、石油工业、化学工业等新兴的工业部门迅速建立。产业结构也随之发生变化,以钢铁材料的生产及应用为代表的冶金、机械制造等重工业部门,逐渐在工业生产中占据优势。在这次工业革命中处于领先地位的是德国和美国,英、法紧随其后。这几个资本主义国家,在工业革命的基础上于19世纪末20世纪初都实现了工业化,成为典型的工业国。金属补充了石块和木材,铁路、汽车和飞机取代了牛、马和驴,蒸汽机、内燃机代替人和风力来推动车船,大量合成纤维织物与传统的棉布、毛织品和亚麻织物竞争,电使蜡烛黯然失色,并已成为只要按动开关,便可做大量功的动力之源。

伴随钢时代的发展,电子技术的发展极大地提高了物质文明,现代人类社会几乎各种工业领域都享受到这一发展所带来的硕果。1883年,爱迪生把一个和电路中阳极相连的金属板封在电灯泡里,当和阴极相连的灯丝通电发亮的时候,发现在互不接触的灯丝和金属板之间有电流通过。这个现象就叫爱迪生效应,这是电子工业的基础。1897年,英国物理学家汤姆逊在皇家学会的演说中,论述了电子的存在,使人们认识到爱迪生效应是热电子的发射。利用这一原理,1904年,英国工程师弗莱明发明了二极管,1906年,美国发明家富雷斯特朗制成了世界上第一只三极管,开创了电子管时代,出现了无线电报、电话、导航、测距、雷达、电视等产品,甚至出现了“ENIAC”第一代电子计算机。

但是,电子管的致命弱点是体积较大,无法适应电子器件小型化的要求。20世纪中叶,随着硅、锗半导体材料的出现,人类进入了硅时代。1956年,美国贝尔电话实验室的巴丁、肖克莱和布拉坦等合作发明了晶体管,晶体管逐渐代替了电子管,到了1959年,人们利用

单晶硅开始工业化生产集成电路,使得电子产品不断微型化和家庭化。从 20 世纪最伟大的发明——电子计算机,到家用电器,它们无不深刻影响着人类社会的发展,极大地丰富了人类的物质文明。于是人类社会进入了贝尔的“后工业社会”、托夫勒的“第三次浪潮社会”、奈斯比特的“信息社会”、堺屋太一的“知识价值社会”。

进入 20 世纪 90 年代,人类不断发展和研制新材料,这些新材料具有一般传统材料所不可比拟的优异性能或特定性能,是发展信息、航天、能源、生物、海洋开发等高新技术的重要基础,也是整个科学技术进步的突破口。人类从此进入了新材料时代。新材料按其在不同高新技术领域中的用途可分为三大类,即信息材料、新能源材料,以及在特殊条件下使用的结构材料和功能材料,如砷化镓等新的化合物半导体材料,用于信息探测传感器的碲镉汞、铋化铟、硫化铅等敏感类材料,石英型光导纤维材料,铬钴合金光存储记录材料,非晶体太阳能电池材料,超导材料,高温陶瓷材料,高性能复合结构材料,高分子功能材料,特别是纳米材料等等。新材料的广泛使用给社会带来了有目共睹的进步。

21 世纪科学技术的进步、人类生活水平的提高对材料科学技术将提出更高的要求,特别是由于世界人口迅速增加,资源迅速枯竭,生态环境不断恶化,对材料生产技术的开发与有效利用提出许多新要求。在这种背景下,知识经济的蓬勃发展与信息的网络化正促进着材料科学技术突飞猛进。以半导体材料和光电子材料为代表的信息功能材料仍是最活跃的领域;可再生能源的加速开发、核能的新发展、最重要的节能材料——超导材料的室温化、作为能源使用的磁性材料的继续发展、对贮能材料的高度重视、提高燃效减少污染的燃料电池的开发等,将使能源功能材料取得突破性进展;以医用生物材料、仿生材料和工业生产中的生物模拟为代表的生物材料在生命科学的带动下将有很大发展;智能材料与智能系统将受到更大重视;随着资源的枯竭、环境的恶化,环境材料日益受到重视;高性能结构材料的研究与开发将是永恒的主题;材料制备工艺和测试方法则是制约材料广泛应用的重要因素;21 世纪将逐渐实现按需设计材料;纳米材料科学技术将成为 21 世纪初最活跃的领域,2000 年 1 月美国提出的“国家纳米技术计划”(National Nano-technology Initiative)认为,纳米技术可导致下一代工业革命,因为这一技术涉及材料、能源、信息、医学、航空航天以及国家安全的各个方面,除纳米材料外,还有纳米电子学、光电子学和磁学、纳米医学,目前纳米技术已成为全世界科学技术的热点。

材料是人类社会进步的里程碑,材料的研究和应用促进了人类社会的进步,而人类社会的不断发展刺激了材料的不断创新。

随着社会的进步和科学的发展,材料的用途越来越广泛,人们逐渐开始了材料的改性和研制新材料,形成了材料工程。所谓“材料工程”就是着重把基础知识应用于材料的研制、生产、改性和应用,以完成特定的社会任务,解决技术上、经济上、社会上(包括环境)不断出现的问题。它和机械工程、宇航工程、土木工程、电机工程、电子工程、化学工程等紧密联系,最近又发展到与生物工程相联系。

20 世纪 20 年代以前,材料工程与基础科学的联系并不紧密,固体物理与材料工程各有自己的独立体系。随着试验设备和实验技术的发展,基础科学与工程联系日益紧密,甚至融为一体,出现了新的学科。图 1-1 表示固体物理和材料工程间的关系。在 20 年代两者是分立的,40 年代已有交叉,到 60 年代,二者的结合产生了新的学科——材料科学,它是美国学者 M. E. Fine 等人首先提出来的。“材料科学”是一门科学,它包括材料本质的发现、分

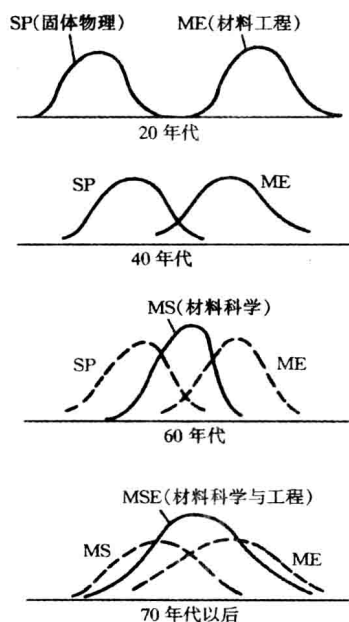


图 1-1 固体物理与材料工程间的关系

析和了解等方面的研究，目的在于提供材料结构的统一描绘或模型，以及解释材料结构与性能之间的关系。

到了 20 世纪 70 年代，由于材料制备、质量的改进和把材料加工成人们可用的器具或构件，都离不开生产工艺和制造技术等工程知识，人们往往把“材料科学”与“材料工程”相提并论，统称为“材料科学与工程”。

伴随着现代科学技术的飞速发展、新材料的不断涌现，把各类材料分别作为独立学科或从属于某一学科进行研究的方法已不能适应新的历史时代的要求，只有把各类材料和有关合成加工技术及现代分析测试技术作为一个整体考虑，形成材料的“大学科”，才能满足对材料科学与工程发展的要求，这正是现代科学技术发展的必然结果。因此，材料科学与工程实际上是一个经过多种学科与现代技术相互交叉、渗透、综合而形成的材料大学科。

美国国家科学院材料与工程调查研究委员会对“材料科学与工程”的定义是：材料科学与工程是关于材料成分、结构、工艺和性能与用途之间有关知识和应用的科学。它是“从科学到工程的一个专业连续领域，各种专业贯串整个体系”。

从 20 世纪 60 年代初至今虽然时间不长，材料科学与工程学科却获得了非常迅速的发展。尤其进入 80 年代以来，国内外许多大专院校纷纷建立材料系或材料科学与工程系（学院），标志着材料科学与工程学科进入了新的发展时期。

材料科学概论是材料科学与工程学院的第一门专业课，其教学目的是使学生初步认识材料世界的概貌。

材料品种繁多，数以十万计。为了便于认识和应用，学者们从不同角度对其进行了分类。按化学成分、生产过程、结构及性能特点，材料可分为三大类，即金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料。三大材料相互交叉、相互融合，如图 1-2 所示。由三大材料中任意两种或两种以上复合而成的材料称为复合材料。如果把复合材料作为一类便可称为四大类材料。

金属材料包括两大类：钢铁材料和非铁（有色）金属材料。这是目前用量最大、使用最广的材料。

除钢铁外，其他金属材料一般统称为非铁金属材料，主要有铝、铜、钛、镍及其合金等。铝、铜合金用得最多，钛合金主要用于航空航天等部门。

无机非金属材料主要包括陶瓷、水泥、玻璃及非金属矿物材料。陶瓷是应用历史最悠久、应用范围最广泛的非金属材料。传统的陶瓷材料由黏土、石英、长石等组成，主要作为建筑材料使用。新型陶瓷材料主要以 Al_2O_3 、 SiC 、 Si_3N_4 等为主要组分，已用作航空航天领域中航天飞机的热绝缘涂层、发动机的叶片等，还作为先进的功能材料，用于制作电子元件

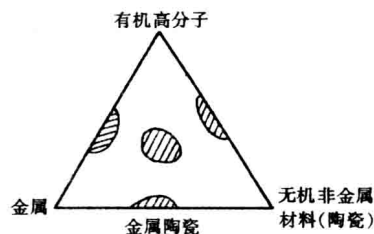


图 1-2 三大材料的交叉

和敏感元件。

有机高分子材料又称为高分子聚合物，按用途可分为塑料、合成纤维和橡胶三大类，塑料通常又分为通用塑料和工程塑料。通用塑料主要用来制造薄膜、容器和包装用品，在塑料生产中占 70%，聚乙烯就是其代表。工程塑料主要指力学性能较高的聚合物，俗称尼龙的聚酰胺、聚碳酸酯是这类材料的代表，聚碳酸酯有良好的绝缘性，常用作计算机、打印机的外壳，电子通信设备中的连接元件、接线板和控制按钮等。最近，功能高分子材料得到了迅速发展，如即将取代液晶材料的有机电致发光材料等。

复合材料就是由两种或两种以上不同原材料组成，使原材料的性能得到充分发挥，并通过复合化而得到单一材料所不具备的性能的材料。按基体可分为金属基、有机高分子材料基、无机非金属基复合材料，按强化相可分为颗粒增强和纤维增强复合材料。从广义上讲，复合材料已有悠久的历史。远古先人曾用稻草掺入黏土制作土坯，古代人曾用钢铁层压法制成刀剑。近代的复合材料以 1942 年制出的玻璃纤维增强塑料为起点。随后，为了提高纤维的弹性，开发了硼纤维、碳纤维、耐热氧化铝纤维等；为了改善树脂的耐热性，对金属基复合材料也开始研究。同时，对陶瓷等无机材料作为复合材料的基体进行了再认识，使其在研究开发的基础上获得了广泛的应用。

材料按使用性能分类，可分为结构材料和功能材料。按结构分类，可分为晶态材料（单晶、多晶、微晶、液晶、孪晶）、非晶态材料、准晶态材料。按物理性质分类，可分为导电材料、绝缘材料、半导体材料、高温材料、高强度材料、磁性材料、超导材料、透光材料等。按物理效应分类，可分为光电材料、压电材料、激光材料、热电材料、声光材料、铁光材料、智能材料、磁光材料、非线性光学材料等。按用途分类，可分为电子材料、研磨材料、电工材料、光学材料、建筑材料、结构材料、感光材料、耐酸材料、包装材料等。

本书按金属材料、有机高分子材料、无机非金属材料、复合材料和新材料的顺序扼要介绍各类材料的化学成分、生产过程、组织结构、性能和应用，为学习后续课程提供必要的基本知识。

第二章 材料学纲要

材料学的基础是固体物理、物理化学和化学等学科。这些基础学科的发展,使人们对材料组织、结构的认识逐步深入,对材料的化学成分和加工过程与其组织结构和性能之间的关系逐步明确,从而得以不断科学地开发新材料和改善材料使用性能的新技术。反过来,新材料和新技术的开发又使与之有关的理论不断深化、知识日益丰富,最终形成了独立的材料学科。概括地讲,材料学就是研究材料的成分、组织结构、合成加工、性质与使用性能之间关系的科学,这4个方面构成了材料学的基础,文献[1]认为它们是材料科学与工程的四要素。

上述4个方面中,使用性能是材料研究的出发点和目标。对使用性能的评价因其应用场合而异,制造构件使用的结构材料首先必须能够在给定的工作条件下稳定、可靠地长期服役,对其使用性能评价的主要指标是服役寿命;用于功能元件的功能材料首先要具备特定的功能,在光、电、磁、热、力的作用下,迅速、准确地发生应有的反应,其使用性能的评价指标主要是反应的灵敏程度和稳定性。使用性能不易在实验室直接测定,它主要决定于材料的力学、物理和化学性质,通过测定各种与使用性能相关的力学性能指标、物理学参量以及在各种介质中的化学行为可以间接衡量材料的使用性能。结构材料的使用性能主要由它们的强度、硬度、伸长率、弹性模量等力学性能指标衡量,功能材料的使用性能主要由相关的物理学参量衡量。正因为如此,在材料学领域中,力学性质、物理性质和化学性质已成为主要研究项目,这些性质与材料的使用性能合为一体。材料的化学成分、组织结构是影响其各种性质的直接因素,加工过程则通过改变材料的组织结构而影响其性质。另一方面,改变化学成分又会改变材料的组织结构,从而影响其性质。这4个因素构成了图2-1所示的关系。其中组织结构是核心,性能是研究工作的落脚点。

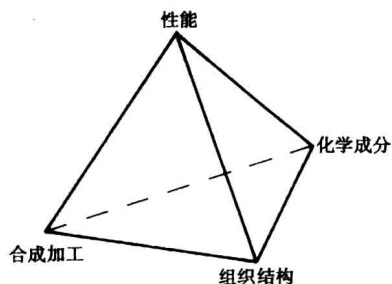


图 2-1 材料科学与工程的四要素

本章简要介绍材料成分和组织结构的含义,影响材料使用性能的主要力学性能指标、物理学参量和化学行为,以及材料的制备和加工过程,并粗浅列举它们之间的关系。

第一节 材料的成分与组织结构

一、成分与结构

材料的成分是指组成材料的元素种类及其含量,通常用质量分数(w)表示,有时也用粒子数分数(x)表示。材料的结构主要是指材料中原子(离子或分子等)。为了叙述简便,

以下统一由原子代表)的排列方式。

材料原子、分子间的结合力,即结合键决定材料的性质,它是原子、分子之间吸引力和排斥力的合力。结合键可大致分为两类:化学键和物理键,化学键有离子键、共价键和金属键等3种,而物理键包括范德华(G. D. Van der Walls)键和氢键。

原子以周期性重复方式在三维空间有规则排列的固体称为晶体,否则称为非晶体。把晶体中的单个原子或若干个原子抽象成一个几何点,它们在三维空间周期性重复排列,构成空间点阵,这些几何点称为阵点。描述空间点阵中阵点排列方式的最小体积单元是面对平行的平行六面体,称为晶胞。根据六面体的相对边长和夹角,晶体分为立方、四方、六方、菱方、斜方、单斜和三斜等七大晶系,以及14种布拉菲点阵,如图2-2和图2-3所示。

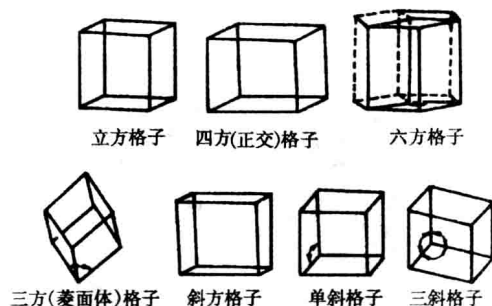


图 2-2 七大晶系

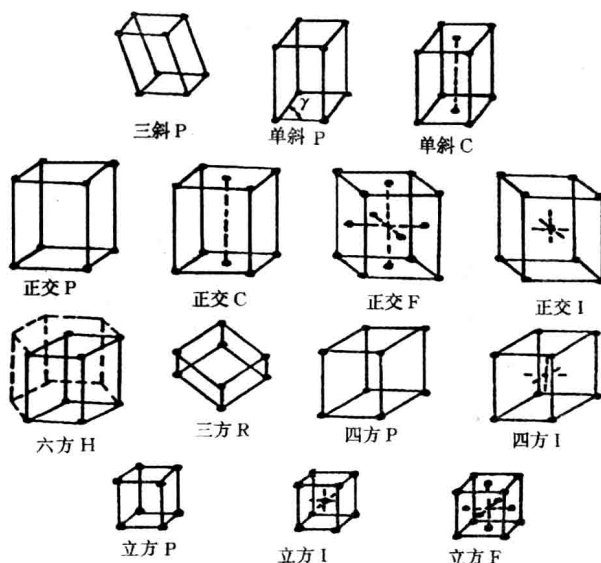


图 2-3 14 种布拉菲点阵

大部分材料是由2种或更多种元素组成的。多元晶体材料中各组元原子可能以2种不同的方式分布,分别构成固溶体和化合物。如果加盟组元原子占据基本组元原子晶体中所占位置的一部分或它们之间的某些空隙而仍保持基本组元的晶体结构,这种晶体便称为固溶体,加盟组元称为溶质,基本组元称为溶剂;如果加盟组元与基本组元以一定的比值重新组合形成新的晶体结构,这种晶体便称为化合物。溶质原子占据阵点的固溶体称为置换型固溶体,占据基本组元原子间隙的称为间隙型固溶体。常见的化合物有正常价化合物、电子化合物、间隙化合物和密排相。固溶体、化合物或单质(如铸铁中的石墨)都是多元材料的组成物,统称为组成相或简称“相”,单质材料的组成相只能是它自身,多元材料的组成相决定于其化学成分。

原子完全规则排列的晶体只是理想的物质,实际晶体总免不了存在一些原子不规则排列

的局部区域, 根据这些区域所占空间的几何特点, 分别称为点缺陷、线缺陷和面缺陷。点缺陷是指原子应占而未占的空位或间隙中不该存在而存在的间隙原子; 线缺陷是对材料性能有重大影响的一维缺陷, 称为位错, 在电子显微镜下可直接看到, 图 2-4 是刃型位错的透射电子显微形貌和高分辨原子像; 面缺陷是指多相材料组成相间的界面和单相材料晶粒间的界面, 它们在光学显微镜下即可被看到, 图 2-5(a)是铁素体晶界。

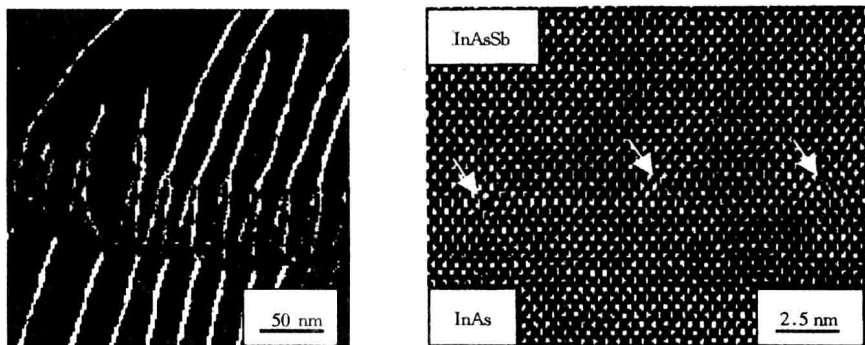


图 2-4 位错的电镜形貌

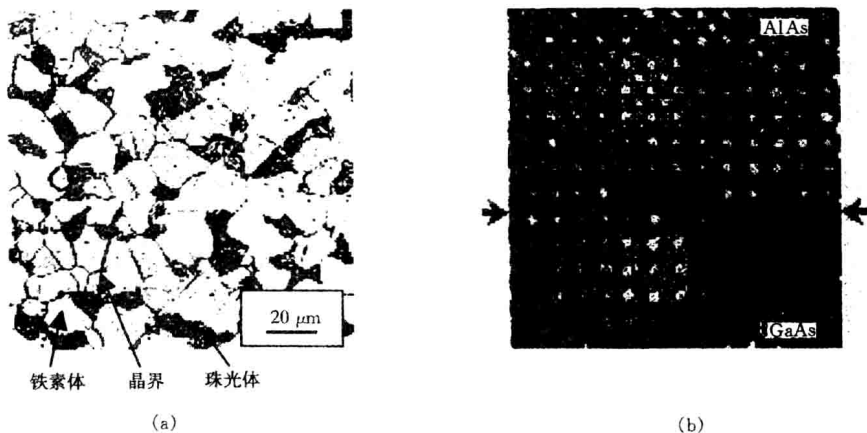


图 2-5 光学显微组织和电子显微组织
(a) 亚共析碳钢的退火组织 (b) GaAs/AlAs 的高分辨点阵像

二、材料的组织

材料性能不但决定于其组成相的性质, 而且与它们的形态、尺寸及相互分布状况有关。材料组织就是在光学显微镜或电子显微镜下可观察到, 能反映各组成相形态、尺寸及分布的图像 (图 2-5), 材料组织分析是材料研究中十分重要的工作。

三、成分和组织结构的检测

在材料成分和结构的分析方面, 先进仪器的不断出现对材料科学与工程的发展起到了决定性的作用。20 世纪 50 年代, 用于材料成分与组织结构分析的工具主要是光学显微镜、X 射线衍射仪、红外光谱和紫外光谱。目前, 高分辨率电子显微镜已能够以原子级的分

辨率显示原子的排列和化学成分,多种光谱仪能够测定材料表面的化学特性,隧道扫描显微镜能够测定材料表面和近表面原子的排列和电子结构,固态核磁共振能够测定聚合物体系的化学结构。还有双准直离子散射仪利用中能带电粒子的沟道效应和背散射离子的阻塞效应确定表面或界面上的原子结构;高分辨率电子损耗光谱仪利用单能电子束在材料表面产生非弹性散射,然后对其进行能量分析,利用散射电子束的特征能量损失可测定该表面上所吸附分子的振动模式或清洁表面的声子模式;俄歇能谱仪可用于测定表面化学成分;低能电子显微镜可用于显示表面缺陷结构;自旋极化分析仪可用于测量决定材料磁性能的与自旋有关的状态的能量分布;场离子显微镜和原子探针则可用于分析个别原子的图像。

四、材料的成分与组织结构数据库

材料成分、结构数据库分为基本信息、应用信息、商业信息三大子系统(见图2-6)。各子系统又按材料的不同分为合金、金属间化合物、高分子聚合物、陶瓷、玻璃、晶体、复合材料等类型。

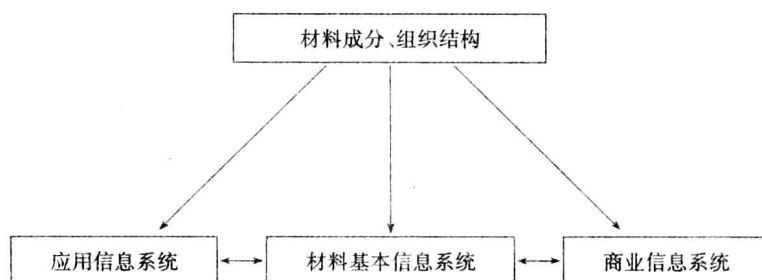


图 2-6 材料成分与组织结构数据库结构框架

材料成分、结构数据库的主要功能有:基础数据查询、其他查询、打印功能、数据传送、数据维护、材料类别选择等。

第二节 材料的合成与加工

在材料科学与工程中,合成和加工的区别近年来变得越来越模糊不清。人工合成材料的制造包含材料在原子尺度上的合成,但也常常归类于加工。陶瓷的制备过去通常是矿物衍生出来的各种氧化物混合体的烧结,目前在某些情况下也包含着很多合成的化学过程。广义地说,合成和加工形成了一个连续的范围,在这个过程中,原子、分子、分子聚合体的组合物将形成有用的产品。

在某些情况下,合成与加工的研究已经发展到可以逐个原子地制造出新材料,从而得到理想的性质,或者获得新的有时甚至是出乎意料的现象。如材料的超导性、智能化等。

但是,传统的加工方法仍然是材料制备的主要方法。如为了材料提纯、合金化的目的,可以采用熔炼的方法,把原材料加热到熔点以上,使之熔化为液态,再冷凝到固态。为了使材料成形,可以采用下列技术:(1)将熔化或重熔的高纯金属或合金熔液,直接铸造成精密零件和制品的液态加工,即传统的金属铸造。近几年来,又发展了新的半液态加工技术,明显地提高了产品质量和生产率,降低了成本。(2)用多种塑性加工方法,将坯锭制成具有一

定形状和尺寸的成品,包括金属材料的挤压、拉拔、轧制、锻造等,其中挤压、轧制也已成为高分子材料、陶瓷材料的成形所借鉴。(3)将预先制取的各种粉末材料压制、烧结或胶凝固结为制品,这是传统的陶瓷、耐火材料、水泥制品的成形方法。随着粉末冶金技术的发展,借鉴金属挤、轧等加工方法和高分子的注射成形等技术,已形成了现代精密陶瓷、无机非金属化合物、难熔金属制品较为广泛的加工成形方法,是功能材料常用的方法。(4)由聚合反应和高分子化学反应生产的高分子聚合物,必须经过加工和后处理才能成为高分子材料。塑料、橡胶、合成纤维都有其独特的加工成形方法,但使用的挤出、压制、压延方式与金属的加工方式类似。(5)当各类材料制成后,根据应用和功能要求,可将两种同类或异类材料进行连接,如焊接和黏接技术。为了改善材料的性能,还要利用热处理技术,即通过加热、保温和冷却,改变材料的组织和结构,从而改善其性能。

材料在加工过程中会引起组织结构的变化,对材料的性质和使用性能产生影响。如铸造过程产生的疏松、孔洞、成分偏析等缺陷,将降低材料的力学性能;而压力加工过程中由于位错密度的增加引起的加工硬化,将使材料的强度、硬度提高,而塑性、韧性降低等等。

选用材料时必须注意对它进行加工的难易程度以及加工过程中可能产生的组织缺陷及对性能的损伤,也就是说,必须考虑材料的可加工性。在生产中常用加工工艺性能表述材料的可加工性,材料的工艺性能与材料的化学成分和物理学参量有一定关系。

第三节 材料的性质与使用性能

一、材料的物理和化学性质及其使用性能

物理性质是指从物理学的观点表征材料的热学、电学、磁学、光学等性质,常用的有热容、热膨胀系数、热导率、抗磁性、顺磁性、电阻率、介电常数、光反射、折射等物性参量;化学性质是指材料发生化学反应时所显示的性质,包括化学反应和电化学反应时所表现的性质,如耐蚀性、抗氧化性、抗高温氧化性等,常用的有腐蚀速率、电极电位、应力腐蚀临界应力场强度因子等参量;力学性质是指材料在不同载荷和环境作用下表现的变形和断裂行为的描述,如材料的强度、硬度、弹性、塑性、韧性等,常用的力学性能指标有弹性模量、屈服强度、抗拉强度、伸长率、断面收缩率、冲击韧度、断裂韧度、疲劳极限、蠕变极限等。常见的力学性能指标和物理性能参量的涵义、量纲及单位符号见附录。

材料的使用性能是指材料在服役条件下所表现的特性,它是材料性质与服役条件、产品设计及加工融合在一起所决定的要素,其度量指标有寿命、速度、能量效率、安全性和寿命期及费用等。

材料的物理、化学、力学性质都是成分和结构的体现,它们决定着材料的使用范围。如金刚石的耀度和透明度导致它可用作宝石和高性能光学涂层,而其高硬度和导热性则使它可用作切削工具和传导体;金属具有良好的延展性,这种性质使它便于加工成用于导电或受力的线材;陶瓷有很高的熔点、很高的强度和化学惰性,使它可用于先进热力发动机中的火焰筒或保护涂层,而陶瓷的低塑性却是一种不利的因素,是目前限制它广泛应用的原因;聚合物独特的物理性质使它能用于各种不同的产品,诸如声纳器件、液晶显示装置、电子组件封装、汽车车内装饰材料等。然而,聚合物组分的迁移特性加速了退化,在新组装的车中存在

的“新车味”就说明了这一点。

性质测试及其分析是理论和实验物理学家、物理化学家、冶金学家、陶瓷学家、聚合物化学家和各行业的工程师的领域。表征原子尺度上的某些性质是理论物理学最前沿的研究领域,如磁性材料和铁电体内的相变理论等。与此类似,阐明脆性陶瓷和金属材料的断裂机理则是冶金学家、陶瓷学家和固体物理学家的研究焦点。搞清性质和结构之间的因果关系可以使合成化学家创造出性能更好,或者至少具有不同预定性质的材料。这种相互关系影响到材料的最终应用——材料的使用性能。

随着对材料性质与其成分和结构关系的了解不断深入,出现了按所需综合性质设计材料的机遇。例如,在过去,工程师们为缺乏强度高、韧性好的材料而苦恼;而现在,已有多种材料,从高强度钢、高强度有机聚合物复合材料到韧性陶瓷,都实现了这些性质的兼备。这些新材料转入应用常常很缓慢,原因是还需要对其准确性进行鉴定的工程设计数据。

材料的制备、材料的使用性能与零件或设备的设计之间的相互联系越来越复杂。目前和未来的产品越来越需要新型材料的密切配合,这种相互联系还将进一步复杂化。要得到最佳的方案,必须以使用性能为基础进行设计,沿用经验方法必然费时费力且代价昂贵,必须采用分析和建模的方法,并使用能够对服役环境下的使用性能进行预测与推断的先进仪器和设备。

二、材料性质数据库

材料性质数据库是材料研究与应用的基础,由于材料科学与工程迅猛发展,有关材料性质的数据已经达到了惊人的数量,依靠传统的存储方式如手册、图表等已经不能满足需求。智能化的材料数据库,已经成为计算机在材料领域中最广泛、最有实际效益的应用系统。它是以存取材料知识和性质数据为主要内容的数值数据库。

材料的各种性质是影响材料应用的最直接问题,人们总是希望使用性质优良的材料。材料性质数据库是提高材料研究水平的重要手段。

为使数据库具有标准化、统一性、正确性、完整性、可靠性、清晰性、易读性,而且操作简便直观,数据库管理软件全部设计成模块形式,由数据入库、数据打印、统计分析、数据传递、数据维护、材料类别等七大模块组成。

材料性质数据库具有检索查询、打印和库维护等功能,主要功能有:基础数据查询、其他查询、打印功能、数据统计、数据传送、数据维护等。

以材料科学为基础的数字仿真与信息储存、检索和分析的新方法相结合,不仅便于实现物质性质的最优化,而且便于实现原材料转变为有用产品的整个过程最优化。如果表明加工和使用性能关系的定量模型能用于产品从设计、制造到支援与维护,直至废弃和回收的整个寿命期,产品在其寿命期内各个阶段的质量、可靠性和经济性都会有重大改进。

第四节 结构材料的失效

材料在外加载荷和环境的作用下,会逐渐损失原有的物理、化学或力学性能,直至不能继续服役,这一现象称为失效。结构材料常见的失效形式有过量变形、断裂、磨损和腐蚀等4种。