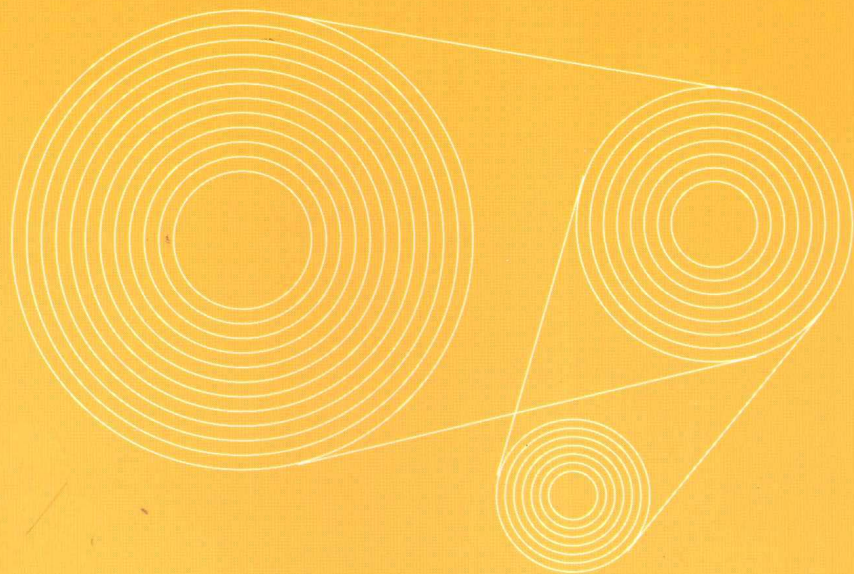




全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材



Introduction to the Foundation
of Engineering Materials

工程材料基础概论

主 编 李镇江

副主编 赵朋成

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

清华大学出版社

全国工程硕士

会推荐教材



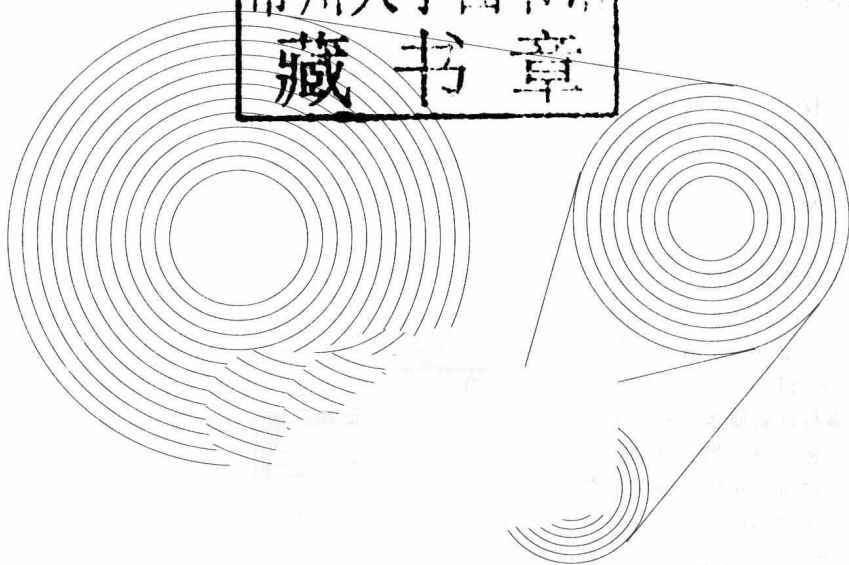
Introduction to the Foundation of Engineering Materials

工程材料基础概论

主 编 李镇江

副主编 赵朋成

参 编 侯俊英 张淼 王为波 孙士斌



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本课程是机械工程专业的一门重要技术基础课,也是一门研究工程常用材料及其检测与应用的综合性课程。

本书根据机械类工程硕士研究生的培养目标,以机械工程材料的基础知识为主线,重点介绍常用机械工程材料及其应用。全书共分9章,主要内容包括绪论、工程材料的结构、金属的凝固、二元合金及铁碳相图、结构材料、功能材料、材料的性能及测试、材料的常用表征技术及工程材料的腐蚀与防护等内容。为帮助学生复习和巩固所学知识,各章均附有思考与练习。

本书可作为机械类工程硕士研究生的专业基础教材,也可供从事工程材料教学的教师及机械设计与制造的工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

工程材料基础概论/李镇江主编.--北京:清华大学出版社,2012.6

(全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材)

ISBN 978-7-302-28137-5

I. ①工… II. ①李… III. ①工程材料—研究生—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 033648 号

责任编辑:庄红权

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm 印 张:18.25 字 数:399 千字

版 次:2012 年 6 月第 1 版 印 次:2012 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:35.00 元

产品编号:037081-01

前言

随着工程硕士研究生教育的快速发展和机械行业对高技能人才的迫切需求,高校机械类工程硕士教育各专业教学急需工程材料方面的教材。在全国工程硕士专业学位教育指导委员会的支持下,我们以多年工程硕士教学讲稿为基础,结合工程需求和科研研究,精心编写了这本书。

在编写过程中,我们侧重于理论与应用相结合,由浅入深、循序渐进、突出重点,以掌握基本概念、强化应用、扩大知识面为教学重点,以注重能力培养为宗旨,详尽地介绍了机械工程领域常用工程材料的基础知识。本书是一门夯实学生理论基础,并将基础知识与实际应用相结合的机械工程类的基础性教材。

本书从工程硕士研究生的实际出发,改变课程教育单一讲解理论或单一讨论实际应用的情况,以机械工程材料的基础知识为主线,重点介绍了常用机械工程材料及其应用。本书主要内容包括机械工程材料基础知识、材料性能的测试技术、材料结构的表征技术、工程材料结构、合金学知识以及工程材料的腐蚀与防护等。本教材作为工程硕士研究生培养中的一门专业基础课程,内容广泛,知识覆盖面广,实践性强,对学生获取机械制造工艺知识,培养工程实践能力和创新意识及后续专业课程的学习都起非常关键的作用。学生可以通过本课程的学习,熟悉常用工程材料的种类、成分、组织、性能和检测方法,并能合理、正确选用材料,为日后学习其他有关课程,从事机械设计和制造以及高级工业管理工作奠定必要的基础。

全书共分9章:第1章绪论,主要介绍材料的发展概况和分类、机械零件主要的失效形式及选材的思路;第2章工程材料的结构,详细介绍材料的晶体结构与非晶体结构;第3章金属的凝固,系统讲述纯金属的凝固,重点包括金属结晶的基本规律、晶核的两种形核方式、晶体的长大;第4章二元合金及铁碳相图,先介绍二元相图的基本知识和相图热力学,然后结合匀晶、共晶和包晶3种基本相图,深入讨论合金的凝固过程及得到的组织,使读者对合金的成分、组织与性能之间的关系有较系统的认识,最后系统讲解工程中最常用铁碳合金的平衡结晶过程及组织结构理论;第5章结构材料和第6章功能材料,全面介绍常用的结构材料及功能材料;第7章材料的性能及测试,阐述材料的使用性能和工艺性能,并对材料的测试进行简单介绍;第8章材料的常用表征技术,主要介绍扫描电镜、透射电镜及X-ray衍

射等常用的材料表征技术；第 9 章工程材料的腐蚀与防护，详细介绍工程材料的腐蚀与防护。

本书由青岛科技大学机电工程学院李镇江教授主编，负责全书的编撰及统稿。全书具体分工如下：第 1、2、9 章由赵朋成编写，第 3、6 章由王为波编写，第 4 章由孙士斌编写，第 5 章由侯俊英编写，第 7、8 章由张森编写。

本书在编写中征求了有关同仁的见解和建议，参考了诸多相关教材，得到了全国工程硕士专业学位教育指导委员会和青岛科技大学等多个部门的支持，在此一并表示感谢。本书的编写力求适应工程硕士教育的改革与发展，但由于编者水平有限，难免有不妥之处，敬请读者批评指正，不胜感激。

编 者

2012.1

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 材料与人类文明史	1
1.2 材料科学的形成与发展	3
1.3 工程材料及其分类	14
1.4 材料的失效与选择	16
思考与练习	22
参考文献	22
第 2 章 工程材料的结构	23
2.1 材料的结构类型	23
2.2 晶体结构与非晶体结构	27
2.3 晶体缺陷	48
思考与练习	62
参考文献	63
第 3 章 金属的凝固	64
3.1 金属结晶的基本规律	64
3.2 晶核的形成	69
3.3 晶体的长大	77
3.4 结晶理论的应用	81
思考与练习	85
参考文献	86
第 4 章 二元合金与铁碳相图	87
4.1 合金的相结构	87
4.2 二元合金相图	91
4.3 合金的性能与相图的关系	102
4.4 铁碳合金相图	103
思考与练习	114

参考文献	115
第 5 章 结构材料	116
5.1 碳钢和铸铁	116
5.2 有色金属材料	129
5.3 无机非金属材料	142
5.4 聚合物材料	154
5.5 复合材料	165
思考与练习	170
参考文献	170
第 6 章 功能材料	172
6.1 电功能材料	173
6.2 磁功能材料	179
6.3 光功能材料	187
6.4 纳米功能材料	195
思考与练习	209
参考文献	210
第 7 章 材料的性能及测试	211
7.1 工程材料的使用性能	211
7.2 工程材料的工艺性能	223
7.3 工程材料的机械性能测试	224
思考与练习	230
参考文献	231
第 8 章 材料的常用表征技术	232
8.1 扫描电子显微镜	232
8.2 透射电子显微镜	240
8.3 X 射线微结构检测	245
思考与练习	255
参考文献	256
第 9 章 工程材料的腐蚀与防护	257
9.1 电化学反应	258
9.2 高温生锈	262
9.3 材料的防护	276
思考与练习	285
参考文献	286

第1章

绪 论

能力培养目标

- 了解材料的定义和不同的分类方法
- 掌握机械零件主要的失效形式
- 理解选材的思路并掌握选材的基本原则

材料是人类用于制造物品、器件、构件、机器或其他产品的物质,对于人类文明的发展起着举足轻重的作用,可以说材料的发展史就是人类文明的发展史。材料是人类赖以生存和发展的物质基础,是直接推动社会发展的动力。材料的发展及其应用是人类社会文明和进步的重要里程碑。没有材料科学的发展,就不会有人类社会的进步和经济的繁荣。

20 世纪 70 年代人们把信息、材料和能源誉为当代文明的三大支柱;80 年代以高新技术群为代表的新技术革命,又把新材料、信息技术和生物技术并列为新技术革命的重要标志。这主要是因为材料与国民经济建设、国防建设和人民生活密切相关。

1.1 材料与人类文明史

纵观人类发现材料和利用材料的历史,每一种重要材料的发现和广泛使用,都会促进生产力和生产关系的巨大发展与进步。马克思主义历史观认为,生产工具是生产力发展的标志。

按照人类制备和使用工具材料的不同,人们把人类历史分为石器、青铜器和铁器时代。

早在一百万年以前,人类开始用石头作工具,进入旧石器时代。大约一万年以前,人类知道对石头进行加工,使之成为精致的器皿或工具,从而进入新石器时代。在新石器时代,人类开始用皮毛遮身。8000 年前中国就开始用蚕丝做衣服,4500 年前印度人开始种植棉花,这些都标志着人类使用材料促进文明进步。在新石器时代,人类已知道使用自然铜和天然金,但毕竟数量太少,没有对人类社会产生重要影响。

在 8000~9000 年前的新石器时代,人们已发明了用粘土成型,再火烧固化而成为陶器。陶器的出现,不但用于器皿,而且成为装饰品,是对精神文明的一大促进,历史上虽无陶器时代的名称,但其对人类文明的贡献是不可估量的。在烧制陶器过程中,偶然发现金属铜和锡(当然那时还不明白这是铜、锡的氧化物在高温下被炭还原的产物),进而又生产出色泽鲜艳、又能浇铸成型的青铜,从而使人类进入青铜时代。这是人类较大量利用金属的开始,也是人类文明发展的重要里程碑。世界各地开始青铜时代的时间各不相同,希腊在公元前 3000 年前,埃及在公元前 2500 年前,巴比伦在公元前 19 世纪中叶,印度大约在公元前 3000 年已广泛使用青铜器。中国的青铜器在公元前 2700 年已经使用了,至今约 5000 年的历史,到商周(公元前 17 世纪到公元前 3 世纪)进入了鼎盛时期,如河南安阳出土的达 875kg 的鼎、湖北随州的编钟、西安青铜车马都充分反映了当时中国冶金技术水平和制造工艺的高超。

公元前 13—前 14 世纪前,人类已开始用铁,3000 年前铁工具比青铜工具更为普遍,人类开始进入了铁器时代。中国最早出土的人工冶铁制品约在公元前 9 世纪。到春秋(公元前 770—前 476 年)末期,生铁技术有较大突破,遥遥领先于世界其他地区,如用生铁退火而制成韧性铸铁以及生铁炼钢技术的发明,促进了中国生产力的大发展,对战国和秦汉农业、水利和军事的发展起到很大作用。生铁技术在公元前 5 世纪即春秋末期已经在黄河长江流域传播。这些技术于公元 6—7 世纪传入朝鲜半岛、日本和北欧,推动了整个世界文明的进步。

随着世界文明的进步,18 世纪发明了蒸汽机,19 世纪发明了电动机,对金属材料提出了更高要求,同时对钢铁冶金技术产生了更大的推动作用。1854 年和 1864 年先后发明了转炉和平炉炼钢,使世界钢产量飞速发展。如 1850 年世界钢产量为 6 万 t,1890 年达 2800 万 t,大大促进了机械制造、铁道交通及纺织工业的发展。随之电炉冶炼开始,不同类型的特殊钢相继问世,如 1887 年高锰钢、1900 年 18-4-1(W18Cr4V)高速钢、1903 年硅钢及 1910 年奥氏体镍铬(Cr18Ni8)不锈钢,把人类带进了现代物质文明。在此前后,铜、铝也得到大量应用,而后镁、钛和很多稀有金属都相继出现,从而使金属材料在整个 20 世纪占据了结构材料的主导地位。

随着有机化学的发展,19 世纪末西方科学家仿制中国丝绸发明了人造丝,这是人类改造自然材料的又一里程碑。20 世纪初,人工合成有机高分子材料相继问世,如 1909 年的酚醛树脂(电木),1920 年的聚苯乙烯,1931 年的聚氯乙烯及 1941 年的尼龙等,以其性能优异、资源丰富、建设投资少、收效快而得到迅速发展。目前世界三大有机合成材料(树脂、纤维和橡胶)年产量逾亿吨。而且有机材料的性能不断提高,附加值大幅度增加,特别是特种聚合物正向功能材料各个领域进军,显示其巨大的潜力。

陶瓷本来用作建筑材料、容器或装饰品等。由于其资源丰富、密度小、高模量、高硬度、耐腐蚀、膨胀系数小、耐高温、耐磨等特点,到了 20 世纪中叶,通过合成及其他制备方法,做出各种类型的先进陶瓷(如 Si_3N_4 、 SiC 、 ZrO_2 等),成为近几十年来材料中非常活跃的研究领域,有人甚至认为“新陶器时代”即将到来。但由于其脆性问题难以解决,且价格过高,作为结构材料没有得到如钢铁或高分子材料一样的广泛应用。

复合材料是20世纪后期发展的另一类材料。众所周知,天然材料很多是复合材料,如木材、皮革、竹子等。事实上,人类很早就制造复合材料,如泥巴中混入碎麻或麦秆用以建造房屋,钢筋水泥是脆性材料和韧性材料的复合。近几十年来,利用树脂的易成型和金属韧性好,无机非金属的高模量、高强度、耐高温,做成了树脂基复合材料或金属基复合材料,前者已得到广泛应用,后者以其制作困难、价格高而受到一定限制。为了改善陶瓷的性能,也制成陶瓷基复合材料。碳是使用温度最高的材料(可达 2500°C),为了克服热震性能差,并提高其力学性能而制出的碳-碳复合材料已广泛用于军工,并扩展到民用。

以上仅以结构材料为主线,概述了材料的发展历史。可以看出,自19世纪中叶现代炼钢技术出现以后,金属材料的重要性急剧增加,一直到20世纪中叶,人工合成有机材料、陶瓷材料及先进复合材料迅速发展,金属材料的重要性逐渐下降,但一直到21世纪上半叶,金属材料仍将占重要位置。

功能材料自古就受到重视,早在战国(公元前3世纪)已利用天然磁铁矿来制造司南,到宋代用磁化钢针制出了罗盘,为航海的发展提供了关键技术。功能材料是信息技术及自动化的基础,特别是半导体材料出现以后,加速了现代文明的发展,1947年发明了第一只具有放大作用的晶体管,10余年后又研制成功集成电路,使以硅材料芯片为主体的计算机的功能不断提高、体积不断缩小、价格不断下降,加之高性能的磁性材料不断涌现,激光材料与光导纤维的问世,使人类社会进入了信息时代。因为硅是微电子技术的关键材料,所以有人称呼“硅片为代表的电子材料时代”;再一次说明材料对人类文明起了关键的作用。

在人类漫长的历史发展过程中,材料一直是社会进步的物质基础与先导,21世纪材料科学必将在当代科学技术迅猛发展的基础上,朝着精细化、高功能化,复杂化,超高性能化和复合化、智能化、生态环境化的方向发展,从而为人类社会的物质文明建设作出更大贡献。

1.2 材料科学的形成与发展

1. 材料科学的形成与内涵

“材料”是早已存在的名词,但“材料科学”的提出只是20世纪60年代初的事。1957年苏联人造卫星首先上天,美国朝野上下为之震惊,认为自己落后的主要原因之一是先进材料落后,于是在一些大学相继成立了十余个材料研究中心,采用先进的科学理论与实验方法对材料进行深入的研究,取得重要成果。从此,“材料科学”这个名词便开始流行。

“材料科学”的形成实际是科学技术发展的结果。

首先,固体物理、无机化学、有机化学、物理化学等学科的发展,对物质结构和物性的深入研究,推动了对材料本质的了解;同时,冶金学、金属学、陶瓷学、高分子科学等的发展也使对材料本身的研究大大加强,从而对材料的制备、结构与性能,以及它们之间的相互关系

的研究也愈来愈深入,为材料科学的形成打下了比较坚实的基础。

其次,在材料科学这个名词出现以前,金属材料、高分子材料与陶瓷材料都已自成体系,目前复合材料也获得广泛应用,其研究也逐步深入。但它们之间存在着颇多相似之处,对不同类型材料的研究可以相互借鉴,从而促进学科的发展。如马氏体相变本来是金属学家提出来的,而且广泛地被用来作为钢热处理的理论基础;但在氧化锆陶瓷中也发现了马氏体相变现象,并用来作为陶瓷增韧的一种有效手段。又如材料制备方法中的溶胶-凝胶法,是利用金属有机化合物的分解而得到纳米级高纯氧化物粒子,成为改进陶瓷性能的有效途径。虽然不同类型的材料各有其专用测试设备与生产装置,但各类材料的研究检测设备与生产手段有颇多共同之处。例如显微镜、电子显微镜、表面测试及物性与力学性能测试设备等。在材料生产中,许多加工装置的原理也有颇多相通之处,可以相互借鉴,从而加速材料的发展。

第三,许多不同类型的材料可以相互替代和补充,能更充分发挥各种材料的优越性,达到物尽其用的目的。长期以来,金属、高分子及无机非金属材料自成体系,缺乏沟通,由于互不了解,不利于发展创新,对复合材料的发展也极不利。

尽管从材料发展需要和共性来看,有必要形成一门材料科学,但是由于各类材料的学科基础不同,还存在不小的分歧,特别是无机材料与有机材料之间分歧较大;但由于软物质科学的崛起,还可以软硬兼顾,互相借鉴。

材料科学所包括的内容往往被理解为研究材料的组织、结构与性质的关系,探索自然规律,属于基础研究。实际上,材料是面向实际、为经济建设服务的一门应用科学。研究与发展材料的目的在于应用,而材料又必须通过合理的工艺流程才能制备出具有实用价值的材料来,通过批量生产才能成为工程材料。所以,在“材料科学”这个名词出现后不久,就提出了“材料科学与工程”。工程是指研究材料在制备过程中的工艺和工程技术问题。许多大学的冶金系、材料系也就此改变了名称,多数改为“材料科学与工程系”,偏重基础方面的就称“材料科学系”,偏重工艺方面的称“材料工程系”。也有不肯放弃“冶金”而称为“冶金与材料科学系”的,如英国的剑桥大学。同时,有关材料科学或材料科学与工程方面的杂志和书籍也应运而生。第一部《材料科学与工程百科全书》由美国麻省理工学院的科学家主编,由英国 Pergamon 自 1986 年陆续出版。它对材料科学与工程下的定义为:材料科学与工程就是研究有关材料组成、结构、制备工艺流程与材料性能和用途的关系的知识的产生及其运用。换言之,材料科学与工程是研究材料组成、结构、生产过程、材料性能与使用效能以及它们之间的关系,因而把组成与结构(composition-structure)、合成与制备(synthesis-processing)、性质(properties)及效能(performance)称为材料科学与工程的 4 个基本要素(basic elements)。把四要素连接在一起,便形成一个四面体(tetrahedron),如图 1.1(a)所示。

考虑在四要素中的组成与结构并非同义词,即相同成分或组成通过不同的合成或加工方法,可以得出不同结构,从而材料的性质或使用效能都不会相同。因此,我国有人提出一个 5 个基本要素的模型,即成分(composition)、合成/制备(synthesis/processing)、结构

(structure)、性质(properties)和效能(performance)。如果把它们连接起来,则形成一个六面体(hexahedron),如图 1.1(b)所示。

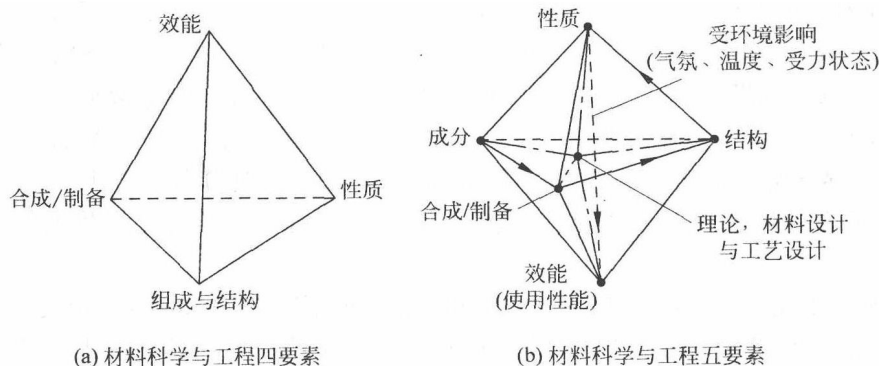


图 1.1 材料科学与工程要素图

材料科学与工程五要素模型的特点主要有两个:一是性质与效能(使用性能)有一个特殊的联系,材料的使用性能便是材料性质在使用条件下的表现。环境对材料性能的影响很大,如受力状态、气氛、介质与温度等。有些材料在一般环境下的性能很好,而在腐蚀介质下性能却下降显著;有的材料在光滑样品时表现很好,而在有缺口的情况下性能大为下降,特别有些高强度材料表现尤为突出,但凡有一个划痕,就会造成灾害性破坏。因此,环境因素的引入对工程材料来说十分重要。二是材料理论和材料设计或工艺设计有了一个适当位置。它处在六面体的中心。因为这 5 个要素中的每一个要素,或几个相关要素都有其理论,根据理论建立模型(modeling),通过模型可以进行材料设计或工艺设计,以达到提高效能、节约资源、减少污染或降低成本的最佳状态。这是材料科学与工程最终努力的目标。有人设想提出性能指标或使用效能要求,可以通过材料配方,采用最佳工艺,就可制备出符合要求的材料或器件。应该说明,目前国际流行的仍是四要素模型,五要素模型在国际上也有人引用。

根据以上所述,材料科学有三个重要属性:一是多学科交叉,它是物理学、化学、冶金学、金属学、陶瓷、高分子化学及计算科学相互融合与交叉的结果,如生物医用材料要涉及医学、生物学及现代分子生物学等学科;二是与实际使用结合非常密切,发展材料科学的目的在于开发新材料,提高材料的性能和质量,合理使用材料,同时降低材料成本和减少污染等;三是正在发展中,其不像物理学、化学已经有一个很成熟的体系,材料科学将随各有关学科的发展而得到充实和完善。

2. 先进材料是社会现代化的先导

材料既是人类社会进步的里程碑,又是社会现代化的物质基础与先导。特别是先进材料的研究、开发与应用反映着一个国家科学技术与工业水平。现仅就现代科学技术的发展

与先进材料的关系举几个典型事例来说明。

1) 电子技术的发展

从电子技术的发展可以看出材料所起的作用。1906 年发明了电子管,从而出现了无线电技术、电视机、电子计算机。1948 年发明了半导体晶体管,致使电子设备的小型化、轻量化、节能化及成本的降低、可靠性的提高与寿命的延长。1958 年出现了集成电路,使计算机及各种电工设备发生再一次飞跃。如以 1946 年电子管计算机与 1976 年微机的一些指标来对比,由于集成电路的采用,使计算机体积缩小了 30 万倍,功耗降低了 5 万多倍,重量降低了 6 万倍,平均故障率也大为减少,而且价格大幅度下降。这样为计算机的普及创造了条件。

随着芯片集成度的不断提高,单元体积和价格不断下降,图 1.2 说明集成电路发展历程及与硅晶片尺寸的关系。可以看出,40 年间(1958—1998 年),芯片集成度提高了一百万倍,每单元价格下降到一百万分之一,这是因为单元价格与特征尺寸(feature length)的平方成正比,与晶片直径的平方成反比。特征尺寸的缩小,一方面与制作技术有关,另一方面与相关材料的不断改进有直接关系。为了适应集成度的不断提高,特征尺寸不断缩小,晶片尺寸要不断减小,对硅单晶的质量要求也要不断提高。由于芯片密度的大幅度提高,用以制造计算机的性能大为提高,如 20 世纪末计算机的计算速度已逾每秒万亿次。信息存储是现代化的另一重要标志,其要求是容量大,密度高,易于快速随机存取,可擦除和反复使用,这就要求材料不断改进才能满足。迄今已出现磁存储、半导体存储和光存储等,如一张光盘可以存储 10 万幅图像或 50 万页文字信息量。计算机是工业自动化的关键,计算机控制的精度决定于传感器的敏感程度。因此,高精度、高灵敏度、性能稳定的各种类型的敏感材料便成为关键。

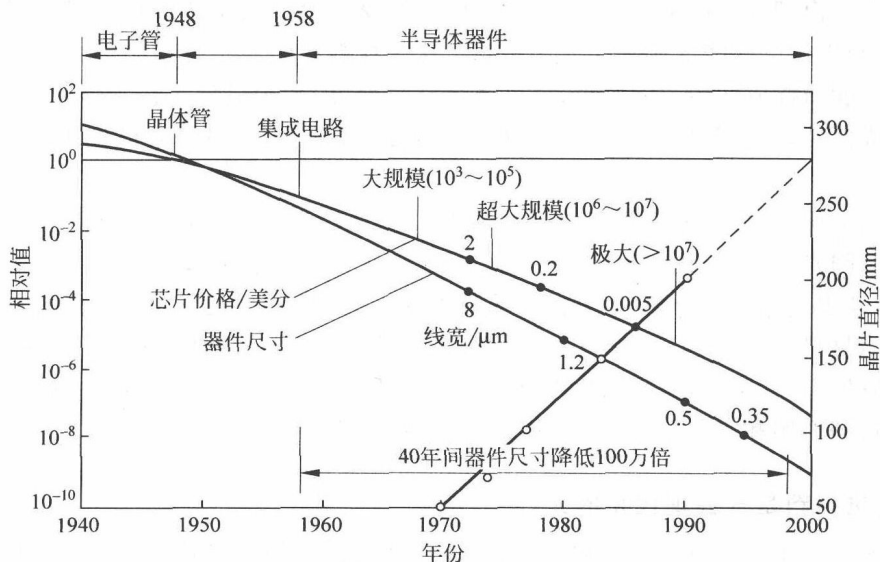


图 1.2 集成电路发展历程及与硅晶片尺寸的关系

2) 光纤通信的诞生

1966 年高琨提出当光纤传输的损耗小于 20dB/km 时可实现光通信。1970 年采用石英掺杂氧化锗等,达到了这一指标,而后光纤通信比集成电路发展更快,代替了同轴电缆。因为其信息容量比同轴电缆大几个量级,而且重量轻,消耗原材料少,保密性强,又抗电磁干扰。所以几十年内,从连接各大陆的海底电缆到很多家庭,都遍布了光缆,成为现代信息高速公路与信息网络化的重要组成部分。光纤通信除了光导纤维以外,还有激光器和探测器,这些都是化合物半导体。表 1.1 为光纤通信系统的发展历程,除第四代尚在研制阶段外,其余都达到应用状态。

表 1.1 光纤通信系统的发展历程

技术指标	第一代(短波长)	第二代(长波长)	第三代(长波长)	第四代(超长波长)
波长/ μm	0.83	1.3	1.55	2~5
光纤	熔石英	熔石英	熔石英(+铒)	氟化物玻璃
激光器	GaAlAs	InGaAsP	InGaAsP	GaInAsSb
探测器	Si	Ge, InGaAsP	InGaAsP	InAsGaSb
损耗/(dB $\cdot\text{km}^{-1}$)	2~3	0.5~1	<0.1	0.1~0.001
传输距离/km	约 10	约 30	约 400	>500

除光纤通信外,通信设备小型化是“漫游电脑”时代的必要条件,因此,促进了低电压、低功耗、高速集成电路的发展。

3) 航空航天技术的进步

21 世纪全球经济的一体化,一靠信息网络的大发展,形成全球性的电子商业;二是运输工具的高效、远程、大容量。前者是电子及光电技术发展的结果,后者是航空技术与水上、地面运输工具不断改进的结果,这些都与材料有着密切联系。以飞机而论,由于战争的需要,20 世纪 40 年代出现喷气技术,这种技术的实现是以高温材料及高性能结构材料为依托的。高温合金的发展,使涡轮温度不断提高;高比强度、高比刚度结构材料的不断进步,使今天大型客机的安全性及有效载荷大为提高,续航时间不断延长,飞机发动机寿命显著延长,油耗不断下降。有人对歼击机的发展作了一个估计,飞机性能的改善有 2/3 依靠于材料,航空发动机性能的提高在很大程度上也有赖于材料的改进。由此说明材料对飞机的重要性。地面运输工具如汽车和火车,水上运输工具如轮船的发展莫不与材料有密切关系。

航天与卫星是科学技术现代化的重要标志之一。对材料的要求除了高比强度和高比刚度之外,还需要耐超高温、抗辐射、耐粒子云以及原子氧侵蚀等的材料,对比强度和比刚度的要求更为苛刻,因为航天飞行器每减重 1kg,可使运载火箭减轻几百千克。这就说明材料在航天技术的重要性。

以上几个方面,说明材料特别是先进材料与现代文明的关系十分密切,而且先进材料是先进技术的先导。没有半导体和其他功能材料,就不会有今天的信息社会,没有高温和超高

温材料及高比强度、高比刚度材料,就不会有今天的航空航天技术,从而全球经济的一体化、人类社会的频繁往来就会发生很大困难。

3. 传统材料在国民经济中的地位与可持续发展

谈到传统材料往往和“夕阳工业”联系在一起。实际上传统材料与国民经济支柱产业是密不可分的,钢铁曾经是衡量一个国家实力的重要标志,今天在一些工业发达国家也仍把钢铁视为支柱产业,因为钢有不可代替的优良性能,其价格又十分低廉,表 1.2 为一些结构材料的价格与其比强度的关系。钢的价格与比强度的比值仅高于木材,而比任何其他材料都低。同时根据多年统计结果,很多机械产品和材料的价格都在上涨,而钢的价格由于其工艺的不断改进、降低能耗和提高劳动生产率而长期未上涨。建筑行业在任何一个国家都视为支柱产业,建筑材料是建筑行业的重要组成部分。它涉及人民生活水平的提高,量大面广。水泥、玻璃、木材以及砖、瓦、石材都属于传统产业。汽车工业在很多国家也视为支柱产业,但是所用材料钢、铁、铝、塑料及玻璃等占了汽车用结构材料的 90%~95%。人工合成纤维、树脂、塑料、橡胶在国民经济中占有非常重要位置,而且逐年增加,这都属于传统产业。此外,机械制造、造船、机车等莫不是以钢铁及其他传统材料为基础的,所以说传统材料是国民经济的基础,不能稍有忽视。

表 1.2 一些结构材料的价格与其比强度的关系

	钢	铝	钛	水泥	Al ₂ O ₃	碳纤维	木材	聚丙烯
比强度	5.2	11.1	13.3	0.8	97.4	160.9	12.5	3.0
价格/比强度(相对值)	1	3.0	16.7	6.4	4.0	5.2	0.8	3.8

另外,传统材料有以下几个特点。

(1) 传统材料量大面广。传统材料只要有一点改进,收益就十分可观。据估计,美国道路与桥梁的使用寿命增加 1%,其收益可达 300 亿美元。世界易拉罐每年消耗量以 600 亿计,其造价每个省 1 分,则有 6 亿元的收益。所以对传统材料性能的改进和生产成本的下降必须给以足够的重视。

(2) 传统材料是矿产资源消耗大户,根据专家估计,全世界铁矿资源最多能维持 200~300 年,铝矿近百年,而铜、铅、锌矿只能够几十年。因此,除了提高矿产的收得率外,要开拓新的矿源,探索某些关键材料的代用品。如铝和镁有大致相似的性质,而镁在地壳表层储量仅次于铁、铝,居第三位,但在海水中储量巨大(2.1×10^{15} t),可以说取之不尽、用之不竭,所以开展镁代铝的研究应给予重视。

(3) 传统材料在制备过程中污染严重。根据美国统计,含毒污水的排放,近 80%来自化工、钢铁与有色金属冶炼,因而有机材料和金属是重要污染源。水泥生产除了高能耗外,也是一个重要污染源。1997 年我国生产水泥 5 亿 t,占世界产量近 40%,产生 CO₂ 近 4 亿 t, SO₂ 49 万 t, NO_x 100 万 t, 粉尘 1100 多万 t。这些废气加剧了温室效应,促进了酸雨。而炼

钢所产生的 CO_2 至少 2 倍于水泥。所以从大气污染看,材料的生产对环境的污染是十分严重的。

资源的大量消耗和环境污染都不利于材料的可持续发展。为此,必须注意以下几点。

(1) 开发节约资源、低污染的生产流程。当前正在开发一种所谓零排放流程,即所输入的原料及能源全部生成产品而没有废物排出,这当然是一种理想状况,但是至少应尽量开发充分利用资源而少污染的生产流程。

(2) 开发环境友好材料,或称环境材料(ecomaterials),就是指与环境相适应的材料,即节约资源、少污染、易回收或可降解的材料。

(3) 开发高性能、长寿命材料是节约资源、减少污染最有效的途径。因此,应把提高传统材料性能作为主要奋斗目标。如钢的强度大幅度提高;开发既能抗腐蚀又可大幅度提高强度的水泥,以减少水泥用量,从而减少污染和节约资源。

(4) 用新技术改造传统材料生产流程。一方面提高劳动生产率,改善产品质量,降低成本;另一方面使传统材料升级换代,扩大材料的用途,以增加竞争能力。

总之,传统材料仍有很多值得探索的科学技术问题。即使在工业发达国家,也都花很大力气在这方面开展研究与开发工作,否则便无竞争能力。根据我国 1998 年在《国家重点基础研究发展规划》中的新一代钢铁材料重大基础研究的结果表明,利用钢的晶粒细化、成分的纯净化和均匀化,在不加任何元素的情况下,可使碳钢的强度从 200MPa 提高到 400MPa,使低合金钢的强度从 400MPa 提高到 800MPa,而且生产实践证明,在不明显改变现有生产条件的情况下就可实现工业生产。

4. 材料科学技术发展的重点

材料科学技术为开发先进材料、改进现有材料和合理使用材料服务。据国际动向并结合国内具体情况,材料科学技术发展的重点有以下几个方面。

1) 材料制备工艺与技术的开发

任何一种新材料从发现到应用于实际,必须经过适宜的制备工艺才能成为工程材料。高温超导自 1986 年发现以后到 20 世纪末,已有 15 年的历史,但仍不能普遍应用于电力,主要是因为没有找到价廉而稳定的生产线材的工艺。 C_{60} 也是如此,尽管在发现之初认为它的用途十分广泛,但到 20 世纪末仍处于科研阶段。传统材料也需要不断改进生产工艺或流程,以提高产品质量、降低成本和减少污染,从而提高竞争能力。

分子束外延技术的出现,可以控制薄膜的生长精确到几个原子的厚度,从而实现了“原子工程”或“能带工程”,为原子、分子设计提供了有效手段。快冷技术(即每秒冷却速度达 $10^4 \sim 10^8 \text{ K}$)的采用,为金属材料的发展开辟了一条新途径:首先是金属玻璃的形成,提高了金属强度、耐磨耐蚀性能和磁学性能;其次通过快冷可得到超细晶粒,成为改进性能的有效方法;第三是通过快冷发现了准晶,由此改变了晶体学的传统观念。所以材料制备方法的研究与开发成为材料科学技术的重点。

材料制备工艺的重点：一是工艺流程的智能化；二是实现原子或分子加工，使材料或器件依照人们的意志达到微型化、多功能化和智能化。

材料的现代制备工艺或技术往往与极端条件密切相关，如利用空间失重条件进行晶体生长，可得出无偏析或低偏析的材料；强磁场、强冲击波、超高压、超高真空以及强制快冷等都可能成为改进材料性能的有效手段。

2) 材料的应用研究与开发

材料的广泛应用是材料科学技术发展的主要动力，实验研究出来的具有优异性能的材料不等于具有实用价值，必须通过大量应用研究，才能发挥其应有的作用，本书不涉及具体的材料和应用研究，这里仅对材料的应用问题稍加讨论，以此帮助读者对材料有一个比较全面的了解。

材料的应用要考虑以几个因素：一是材料的使用性能(performance)；二是使用寿命(durability)及可靠性(reliability)；三是环境适应性(environmental compliance)，包括生产过程与使用期间；四是价格(cost)。当然，不同材料及使用的对象不同，考虑的重点就不一样，有些量大面广的材料，价格低廉是主要的，因而生产要低成本，检验不十分复杂，如建材与包装材料；相反，有些关键技术所用关键材料，如航空航天及医用生物材料，一旦发生意外，则损失严重，因而必须高质量、安全可靠，加强检验，否则后果不堪设想，所以有时检验费用比材料本身花费还高。以航空发动机所用高温合金为例，作为涡轮叶片及涡轮盘材料，一旦在飞行过程中出现断裂，很可能造成机毁人亡，因而在要求长寿命(几万小时)的同时，对可靠性的要求特别严格。为了保证材料的质量，采用三次熔炼，真空感应炉熔炼，以保证严格控制成分(去气、去除有害杂质)；再用电渣重熔，以去除非金属夹杂物；最后真空自耗电弧重熔，可以得到无宏观缺陷的合金锭，如此保证材料质量的均一性和完整性，再经锻造，或重熔铸造加工成零件，最后经过高灵敏度的检验合格后，再装机使用。对医用生物材料来说，质量保证更为严格，因为一旦因质量事故而产生不良后果，则后患无穷。

材料是否有竞争能力，除了质量和质量稳定性以外，还有材料的生产成本和价格。价格的影响因素很多，其中产量是决定因素之一。因为高产量不但可以实现自动化，而且质量稳定，成品率大幅度提高，成本明显下降。因此扩大应用范围是促进生产量的必由之路。

材料应用研究正是机械部件与电子元件失效分析的基础。失效分析的准确性与时效性代表一个国家的科学技术水平，因而通过材料的应用研究来培养一批既有实践经验又有理论基础的工程技术人才是一个重要途径。通过材料应用研究也可以发现材料中规律性的东西，进而指导材料的改进和发展。

当今是高技术主宰着社会，一方面高技术促进社会的发展，保证国防的安全，另一方面高技术是传统产业改造和发展支柱产业不可或缺的组成部分。而先进材料正是高技术的先导和基础，所以开发先进材料必须受到高度重视。根据目前情况，先进材料的重点有以下几个方面。