

总主编 曹茂盛 蒋成禹 田永君

总主审 吴 林 马莒生 方洪渊

# 材料科学与工程系列教材(二)

根据 1998 年教育部颁布本科最新专业目录编写

4  
杨瑞成 蒋成禹 初福民 主编

# 材料科学与工程导论

哈尔滨工业大学出版社

TB3

47

# 材料科学与工程导论

杨瑞成 蒋成禹 初福民 主编

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨

## 内 容 简 介

本书以21世纪的角度看待材料问题(材料与人类文明及生存、材料与能源及环境、材料的可持续发展等)。在体现材料科学与工程领域大背景及概述主要类型工程材料的基础上,从材料的工程性能要求出发,按照材料结构层次设章,从原子结合、材料结构、材料热力学状态与动力学过程,以及如何提高、改善材料性能等方面,讲述材料科学的基本原理,并将大类材料的共性和个性有机地结合起来,注重材料科学原理的应用,同时还介绍工程材料的主要制备方法与原理。本书可为后续课程的学习奠定基础 and 提供导引。

本书为材料科学与工程类专业本科生的教材,也可供某些相关专业研究生、教师和工程技术人员的参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

材料科学与工程导论/杨瑞成等主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002.5

ISBN 7-5603-1704-9

I. 材… II. 杨… III. 材料科学 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 017324 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006  
传 真 0451-6414749  
印 刷 哈尔滨市龙华印刷厂  
开 本 787×1092 1/16 印张 15.5 字数 355 千字  
版 次 2002 年 5 月第 1 版 2002 年 5 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 7-5603-1704-9/TB·25  
印 数 1~3 000  
定 价 18.00 元

# 序 言

材料科学与工程系列教材是由哈尔滨工业大学出版社组织国内部分高校专家学者共同编写的大型系列教学丛书,其中第一系列、第二系列教材已分别被列为国家新闻出版总署“九五”、“十五”重点图书出版计划。第一系列教材9种已于1999年陆续出版。编写本系列教材的基本指导思想是:总结已有、通向未来、面向21世纪,以优化教材链为宗旨,依照为培养材料科学人才提供一个较为广泛的知识平台的原则,并根据培养目标,确定书目、编写大纲及主干内容。为确保图书品位,体现较高水平,编审委员会全体成员对国内外同类教材进行了细致的调查研究,广泛征求各参编院校第一线任课教师的意见,认真分析国家教育部新的学科专业目录和全国材料工程类专业教学指导委员会第一届全体会议的基本精神,进而制定了具体的编写大纲。在此基础上,聘请了国内一批知名的专家,对本系列教材书目和编写大纲审查认定,最后确定各册的体系结构。经过全体编审人员的共同努力,第二系列教材即将出版发行,我们热切期望这套大型系列教学丛书能够满足国内高等学校材料工程类专业教育改革发展的需要,并且在教学实践中得以不断充实、完善和发展。

在本书的编写过程中,注意突出了以下几方面特色:

1. 根据科学技术发展的最新动态和我国高等学校专业学科归并的现实需求,坚持面向一级学科、加强基础、拓宽专业面、更新教材内容的基本原则。
2. 注重优化课程体系,探索教材新结构,即兼顾材料工程类学科中金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料共性与个性的结合,实现多学科知识的交叉与渗透。
3. 反映当代科学技术的新概念、新知识、新理论、新技术、新工艺,突出反映教材内容的现代化。
4. 注重协调材料科学与材料工程的关系,既加强材料科学基础的内容,又强调材料工程基础,以满足培养宽口径材料学人才的需要。
5. 坚持体现教材内容深广度适中、够用的原则,增强教材的适用性和针对性。
6. 在系列教材编写过程中,进行了国内外同类教材对比研究,吸取了国内外同类教材的精华,重点反映新教材体系结构特色,把握教材的科学性、系统性和适用性。

此外,本系列教材还兼顾了内容丰富、叙述深入浅出、简明扼要、重点突出等特色,能充分满足少学时教学的要求。

参加本系列教材编审工作的单位有:清华大学、哈尔滨工业大学、北京科技大学、北京

航空航天大学、北京理工大学、哈尔滨工程大学、北京化工大学、燕山大学、哈尔滨理工大学、华东船舶工业学院、北京钢铁研究总院等 22 所院校 100 余名专家学者,他们为本系列教材的编审付出了大量心血。在此,编审委员会对这些同志无私的奉献致以崇高的敬意。此外,编审委员会特别鸣谢中国科学院院士肖纪美教授、中国工程院院士徐滨士少将、中国工程院院士杜善义教授,感谢他们对本系列教材编审工作的指导与大力支持。

限于编审者的水平,疏漏和错误之处在所难免,欢迎同行和读者批评指正。

材料科学与工程系列教材编审委员会

2001 年 7 月

# 序

材料的发展是人类进步的里程碑,具有时代和文明的标志性,也是国民经济发展的支柱,它在国民经济建设和国防建设中起着重要的作用。信息、生物技术和新材料已成为21世纪最重要、最有发展潜力的领域,同时已列入我国863七个优先发展的领域。

近年来,我国高等教育正在发生着一场大的变革,21世纪又是新材料蓬勃发展的时代,国民经济的发展需求发生明显变化,这些都对本科生的培养提出了新的、更高的要求。金属材料、陶瓷材料及高分子聚合材料,以及由它们派生的功能材料在我国解放后的传统教学中分属于几个专业范畴,互相的关联很小。目前从学生就业、科研资助、国内外发展趋势和社会需求来看,要求材料学科的人才是大范围上的材料人才。近年来把这三者都归属于一个大类,形成了“材料科学与工程”学科领域。现行的教材显然不能满足教学的需要,因此各高校都在尝试编写新的教材。教材编写中应避免将几个学科的知识机械地组合或堆积在一起的现象,因为这样的教材缺乏规律性和系统性,不符合人们的认识规律,因此也就不利于教学。如何将金属材料、陶瓷材料及高分子聚合材料有机地联系在一起,找出他们的共性和规律性,编写出满足当前素质教育要求的教材是一个难题。杨瑞成等人根据多年的教学经验在这方面做了大胆尝试,克服了目前材料科学与工程教材中的不足之处,改变了讲述材料科学与工程的传统方法,开拓了新的教学思路和教学方法。本教材最突出的特点表现在:以材料的原子结构和结合键为主线,找出了各大类材料的共性和特性,将各类材料有机地联系在一起;注重内容的系统性和工程应用性,反映了材料科学与工程发展的新成果;理论介绍后都有实例,例子生动,能起到举一反三、开拓思路的作用,适于当前素质教育提出的要求。

材料科学与工程导论是一门专业基础课,本教材在编写中注意了与其他课程的衔接和分工,起到承上启下的作用。

乔生儒

2002.2于西安

## 前 言

材料科学与工程导论是材料科学与工程类专业新设立的一门技术基础课,目的是加强基础、拓宽专业方向。

类似名称的教材国内外已有多种,但体系、内容、深度等均存在很大差异。国内 20 世纪 90 年代相继出版的几种有关教材基本上是按几大类材料(金属、陶瓷、高分子等),分别论述,并多以金属材料为主体。本书的思路与体系则有所不同,其指导思想是以 21 世纪的角度看待材料问题(材料与人类文明及生存、材料与能源及环境、材料的可持续发展等),在体现材料科学与工程领域大背景(第一章)及概述主要类型工程材料(第二章)的基础上,从材料的工程性能要求出发(第三章),基本按照材料结构层次设章。用五章的篇幅(第四、五、六、七、八章),从原子结合、材料结构、材料热力学状态与动力学过程,以及如何提高、改善材料性能等方面,讲述材料科学的基本原理,并将大类材料的共性与个性有机地结合起来,注重将学生学过的力学、物理、化学,尤其是物理化学的知识运用到材料系统中来,以及材料科学原理的应用,并与材料性质、行为相联系。第九章介绍工程材料的主要制备方法与原理。

本书以材料科学与工程的基本概念、原理为基础,注重整体内容的系统性和工程实用性,注意新材料新技术的适当介绍,使学生初步建立以材料的构成—原子结合(键)—组织结构—工艺—性能为主线地学习和处理材料问题的思路,对工程材料的总貌与特性及制取加工等有一定程度的掌握与了解,并为后续课程的学习奠定基础 and 提供导引。

本书由杨瑞成、蒋成禹和初福民主编。第一、二章由蒋成禹编写,第三章由孙振国编写,第四、五、六、七章由杨瑞成编写,第八、九章由初福民编写,全书由杨瑞成负责统稿。本书由乔生儒主审,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。本书在编写过程中得到许多同志的大力支持与帮助,谨以一并致谢。

鉴于本书系新设课程的教材,内容与体系均在探索之中,且限于编者的水平,书中必然存在不当之处,恳请同行和读者批评指正。

编 者

2002 年 1 月

# 目 录

<b>第一章 材料与人类</b> .....	( 1 )
1.1 材料与人类文明及社会现代化.....	( 1 )
1.2 材料循环——材料、能源与环境 .....	( 4 )
1.3 材料科学与工程.....	( 7 )
1.4 材料成分—结构—合成与加工—性能—使用效能.....	( 10 )
本章小结 .....	( 13 )
复习思考题 .....	( 13 )
<b>第二章 工程材料概述</b> .....	( 14 )
2.1 金属材料.....	( 14 )
2.2 陶瓷材料.....	( 21 )
2.3 高聚物材料.....	( 28 )
2.4 复合材料的概念与分类.....	( 33 )
本章小结 .....	( 38 )
复习思考题 .....	( 39 )
<b>第三章 工程材料的基本性能</b> .....	( 41 )
3.1 概述.....	( 41 )
3.2 工程材料的力学性能.....	( 42 )
3.3 工程材料的物理、化学性能 .....	( 54 )
3.4 不同种类材料的主要性能比较.....	( 65 )
本章小结 .....	( 70 )
复习思考题 .....	( 71 )
<b>第四章 材料的原子结构和原子间结合键</b> .....	( 72 )
4.1 材料结构的涵义.....	( 72 )
4.2 孤立原子的特性.....	( 74 )
4.3 原子间作用力和结合能.....	( 78 )
4.4 原子间的结合键——一次键.....	( 80 )
4.5 原子间的结合键——二次键.....	( 83 )
4.6 原子间结合键与材料性质——材料类型及一些原子参数.....	( 85 )
4.7 原子间结合键与材料性质——弹性模量及其他相关性质.....	( 90 )
本章小结 .....	( 93 )



复习思考题 .....	( 93 )
<b>第五章 固体材料中原子的排列与缺陷 .....</b>	<b>( 94 )</b>
5.1 聚集态与原子排列 .....	( 94 )
5.2 固体中原子的周期结构 .....	( 97 )
5.3 无机非金属材料(陶瓷)的结构 .....	( 102 )
5.4 有机聚合物的原子排列 .....	( 107 )
5.5 晶体材料的结构不完整性 .....	( 110 )
5.6 固体材料的原子排列与材料的行为及性能 .....	( 115 )
本章小结 .....	( 120 )
复习思考题 .....	( 120 )
<b>第六章 固体材料热力学状态——自由能、相图、相与组织 .....</b>	<b>( 122 )</b>
6.1 材料系统中自由能与相平衡 .....	( 122 )
6.2 材料系统影响自由能的因素 .....	( 127 )
6.3 材料系统多相平衡的自由能曲线与材料相图 .....	( 131 )
6.4 金属和陶瓷的一元相图与二元相图 .....	( 134 )
6.5 金属与陶瓷材料中的相组成 .....	( 138 )
6.6 单相与多相组织形貌及对材料性能的影响 .....	( 143 )
本章小结 .....	( 150 )
复习思考题 .....	( 150 )
<b>第七章 固体材料的动力学过程 .....</b>	<b>( 151 )</b>
7.1 材料状态改变、过程与激活能 .....	( 151 )
7.2 玻尔兹曼分布与阿伦尼乌斯定律 .....	( 153 )
7.3 材料中的原子扩散过程 .....	( 155 )
7.4 离子晶体、共价晶体和聚合物中的扩散与原子运动 .....	( 159 )
7.5 与扩散有关的几个材料现象与工程应用 .....	( 162 )
7.6 相变动力学——相变机制与转变速率 .....	( 168 )
7.7 高聚物的结晶 .....	( 175 )
本章小结 .....	( 178 )
复习思考题 .....	( 178 )
<b>第八章 工程材料强化与韧化的主要途径 .....</b>	<b>( 179 )</b>
8.1 晶体中的位错与塑性变形 .....	( 179 )
8.2 晶体材料基本强化途径 .....	( 184 )
8.3 金属材料的断裂与韧化途径 .....	( 191 )
8.4 提高非金属材料强度及增韧的途径 .....	( 198 )

8.5 金属材料表面强化及表面改性处理技术·····	(202)
本章小结·····	(207)
复习思考题·····	(207)
<b>第九章 工程材料的制备</b> ·····	<b>(209)</b>
9.1 金属材料的制备·····	(209)
9.2 高聚物材料的制备合成·····	(223)
9.3 复合材料的制备·····	(225)
9.4 现代工程材料的特殊制备简介·····	(230)
本章小结·····	(232)
复习思考题·····	(233)
参考文献·····	(235)

# 第一章 材料与人类

材料是人类进步的里程碑,时代的发展需要材料,而材料又推动时代的发展,所以人们把材料视为现代文明的支柱之一。在新的世纪里,人类面临着五大问题:人口、粮食、资源、能源与环境。为了满足时代的要求及推动时代的发展,材料科学将大有作为。在制定21世纪科学和社会发展总的规划时,世界各国无一不把材料科学和工程作为最重要发展的领域之一。从某种意义上说,材料是一切文明和科学的基础,材料无处不在,无处不有,它使人类及其赖以生存的社会、环境存在着紧密而有机的联系。本章概述材料对社会现代化和人类文明进步所起的巨大作用。

## 1.1 材料与人类文明及社会现代化

### 1.1.1 材料与物质

人们周围到处都是材料,人们用材料制成用于生活和生产的物品、器件、构件、机器和其他各种产品。材料是物质,但不是所有物质都可以成为材料,如燃料、化学原料、工业化学品、食物和药物,一般都不算材料。但这个定义也并不是那么严格,如炸药、固体火箭推进剂,有人便称之为“含能材料”。就材料种类而言,金属、陶瓷、半导体、超导体、聚合物(塑料)、玻璃、介电材料、纤维、木材、沙子、石块等,还有许多复合材料都属于材料的范畴。

### 1.1.2 材料是人类文明的里程碑

人类发展的历史证明,材料是人类文明进步的里程碑。纵观人类利用材料的历史,可以清楚地看到,每一种重要材料的发现和利用,都会把人类支配和改造自然的能力提高到一个新的水平,给社会生产和人类生活带来巨大的变化。

早在100万年以前,人类就开始以石头做工具,这称之为旧石器时代。1万年以前,人类知道对石头进行加工,使之成为更精致的器皿和工具,从而进入新石器时代。在新石器时代,人类还发明了用粘土成型,再火烧固化而制成的陶器。同时,人类开始用毛皮遮身;中国在8000年前就开始用蚕丝做衣服;印度人在4500年前开始培植棉花。这些材料在被人类使用的同时,也为人类的文明奠定了重要的物质基础。

在新石器时代,人类已经知道使用天然金和铜,但因其尺寸较小,数量也少,不能成为大量使用的材料。后来人类在找寻石料的过程中认识了矿石,在烧制陶器的过程中又还原出金属铜和锡,创造了炼铜技术,生产出各种青铜器物,从而进入青铜器时代。这是人类大量利用金属的开始,是人类文明发展的重要里程碑。中国在商周(即公元前17世纪初~前256年)就进入了青铜器的鼎盛时期,在技术上达到了当时世界的顶峰。

5000年前,人类开始用铁。公元前12世纪,在地中海东岸已有很多铁器。由于铁比铜更易得到,更好利用,在公元前10世纪铁工具已比青铜工具更为普遍,人类从此由青铜

器时代进入铁器时代,一直延续到现在。由于铁便宜,大量开采和冶炼使铁成为“平民材料”,从而被普遍使用。公元前 8 世纪已出现用铁制造的犁、锄等农具,使生产力提高到一个新的水平。中国在春秋(公元前 770~前 476 年)末期,冶铁技术有很大的突破,遥遥领先于世界其他地区,如利用生铁经过退火制造韧性铸铁及以生铁制钢技术的发明,标志着中国生产能力的重大进步,这成为促进中华民族统一和发展的重要因素之一。这些技术从战国至汉代相继传到朝鲜、日本、西亚和欧洲地区,推动了整个世界文明的发展。

到了近代,18 世纪蒸汽机的发明和 19 世纪电动机的发明,使材料在新品种开发和规模生产等方面发生了飞跃。如 1856 年和 1864 年先后发明了转炉和平炉炼钢,使世界钢产量从 1850 年的 6 万 t 突增到 1900 年的 2 800 万 t,大大促进了机械制造、铁路交通的发展。随后不同类型的特殊钢种也相继出现,这些都是现代文明的标志,使人类进入了钢铁时代。在此前后,铜、铅、锌也得到大量应用,而后铝、镁、钛等稀有金属相继问世,从而金属材料在 20 世纪中占据了材料的主导地位。20 世纪初期,人工合成高分子材料问世,并发展十分迅速,如今世界年产量在 1 亿 t 以上,论体积已超过钢。有些发达国家,如美国,高分子材料的体积已是钢的两倍,所以有人说现在是高分子时代。应该指出,有些材料如木材、砖瓦、石料、水泥及玻璃等一直占有十分重要的位置,因为这些材料资源丰富,性能和价格上在所有材料中最有竞争力。20 世纪 50 年代,通过合成化工原料或特殊制备方法,制造出一系列的先进陶瓷。由于其资源丰富、密度小、耐高温等特点,很有发展前途,成为近三四十年来研究工作的重点,且用途不断扩大,有人甚至认为“新陶瓷时代”即将到来。

随着科学技术的发展,功能材料越来越重要,特别是半导体材料出现以后,促进了现代文明的加速发展。1948 年发明了第一只具有放大作用的晶体管,10 年后又研制成功集成电路,使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”。因此,功能材料占据了重要的地位,包括金属、陶瓷、高分子和复合材料所构成的各种功能材料,应用范围广泛,发展非常迅速,已成为研究与发展的热点。

近、现代历史表明,材料与社会经济发展、地区开发乃至国家振兴是休戚相关的,以英国和美国的铁路作为材料技术与社会经济变化为例,早在 1830 年就尝试以蒸汽为动力并用于交通运输,有几种明显的理由急需铁路运输,然而当时铁轨仅仅是软钢带钉在厚木板上,故急需一种便宜、具有所需性能的金属。倘若没有 KELLEY(美国)和 BESSEMER(英国)制钢技术的发展,铁路事业也不可能发展,那么美国就不可能开发西部,英国也不可能工业化。反过来,若无工业、农业对交通运输的需求,那么就缺乏对钢铁工业发展的刺激以及资本投入,当然钢铁制造技术进步的机会也就会失去。

材料与经济的另一个例子涉及硅材料。经济上,它触发了一个数十亿美元工业的兴起。从助听器到全球性的遥测技术,信息传输已十分便利,并且通过文化娱乐、各种私人计算机的出现与使用,使我们的日常生活已经和正在发生巨大的变化。

人类进入 21 世纪后,世界各发达国家都把材料科学和工程作为重大科学研究领域之一。根据材料及其在各领域的应用可划分为以下几大部分:

——与信息获取、传输、存储、显示及处理有关材料,即信息功能材料;

——与宇航事业的发展,地面运输工具的要求相适应的高温、高比刚度和高比强度的工程结构材料,及先进的陶瓷材料;

——与能源领域有关的能源结构材料、功能材料与含能材料;

——以纳米材料为代表的低维材料,也是当前材料科学技术的前沿;

——与医学、仿生学及生物工程相关的生物材料;

——与信息产业相关的智能化材料;

——与环境工程相关的环境材料,也称绿色材料。

综上所述,材料是人类赖以生存的基础,材料的发展和进步伴随着人类文明发展和进步的全过程。材料是国民经济建设,国防建设和人民生活不可缺少的重要组成部分。

### 1.1.3 材料是社会现代化的物质基础与先导

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。材料,尤其是新材料的研究、开发与应用反映着一个国家的科学技术与工业水平。例如,从电子技术的发展史来看,新材料研制与开发起了举足轻重的作用。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,导致了电子设备的小型化、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,使计算机及各种电子设备的发展发生一次飞跃。此后,集成电路发展十分迅速,这就是以硅为主的半导体材料相应发展的结果。进入90年代,集成电路的集成度进一步提高,加工技术达到 $0.3\ \mu\text{m}$ (研究水平已达 $0.1\ \mu\text{m}$ ),每位存储器的价格就降低了。这些都与硅单晶体的生长和硅片的加工技术密切相关,即对单晶纯度与缺陷的要求不断提高,单晶直径不断增加,晶片的加工精度和表面质量提高,使芯片成品率大为提高,而价格急剧降低。这就是硅材料研究与加工水平提高的直接结果,也是为什么计算机的功能越来越好而其价格却不断下降的重要原因。半导体材料的发展所导致的集成电路的发明与发展,其直接结果是微型计算机可以普及到世界的每一个角落,使人类文明发展又发生一次飞跃,成为人类进入“信息时代”的里程碑。随着计算机速度与容量的增加,以电子作为传输媒介受到限制,因而考虑光传输更为理想,即利用光子而不是电子作为携带信息的载体,于是发展了光电子材料,用光子器件制成的光计算机具有大容量、高速度,而且有助于向智能化方向发展。现代的计算机信息存储手段也在不断革新与进步(一要容量大、密度高,二要易于快速随机存取,三要能擦除和反复使用)。这些要求都要靠材料的不断进步来满足。近几年出现的光盘一张可以存储10万幅图像或50万页以上的文字信息,比一般磁盘高几百倍。计算机又是工业自动化的关键设备,但需要精度很高、性能很稳定的传感器,才能实现自动控制。因此,开发各种用途的敏感材料便成为重要环节。

通信一般采用微波、电缆来传输信号。自从1966年在理论上提出可用光波进行通信后,经过10年研究,1976年出现了国际上第一条试验性光纤通信线路,1988年建成第一条横贯大西洋的海底光缆,其造价只是1956年所建同轴电缆的百分之一。光纤传输信号容量大,且具有造价低、中继站少、保密性强等特点。因此,光导纤维的研制成功,改变了整个通信体系,为信息的传输做出了重要贡献。除了光导纤维以外,激光技术与电子技术的发展是其重要的促成因素,而这些都与材料密切相关。也正是由于材料科学的发展,使20世纪90年代初期提出来的“信息高速公路”的设想成为现实。

又如,现代文明的另一个标志是航空航天技术的发展。由于战争的需要,20世纪40年代出现了喷气技术。而这种技术的实现是以耐高温材料及高性能结构材料为依托,特别是耐高温合金和钛合金的发展,不断提高了歼击机的性能,而且为今天大型客机的安全及有效载荷的提高,持续航行时间的延长及飞机与发动机的长寿命提供了可能。作为航空航天所用的材料,其比强度、比刚度尤为重要,因为飞机发动机每减重1kg,飞机可减重4kg;航天飞行器每减重1kg,就可使运载火箭减轻500kg。所以对高速飞行器来说,要不惜一切代价来减轻重量。新开发出来的高强度高分子纤维芳纶,其比强度较之高强度钢高出近100倍。有人设想用这种材料制成飞机,飞行速度可达15Ma,从纽约到东京只需两小时。比刚度对于飞行器也是十分关键的,高比刚度材料在相同受力条件下变形量小,从而保证了原设计的气动性能。这就是为什么要大力发展纤维增强的树脂基及金属基复合材料的重要原因。另外,热机的工作温度越高,其效率也越高,但是目前所用的金属材料由于熔点及抗氧化能力所限,不能保证更高的使用温度。因此,现代功能陶瓷就成为当前研究的重点。

综上所述,说明材料特别是新材料与社会现代化及现代文明的关系十分密切,新材料对提高人民生活,增加国家安全,提高工业生产率与经济增长提供了物质基础,因此新材料的发展十分重要。1991年美国商业部公布的资料表明,到2000年,先进材料在美国12项新兴技术中的产值居首位,即在3560亿美元中先进材料占1500亿美元,达43%。从全世界看,先进材料的产值为4000亿美元,占整个新兴技术产值10000亿美元的40%,如果把因采用新材料而得到的附加值计算在内,将10~100倍于此。

## 1.2 材料循环——材料、能源与环境

### 1.2.1 材料的单项循环模式

材料已被公认为是人类的基本资源之一。长期以来,人们形成了传统的思维或传统产业的“资源开采—生产加工—消费使用—废物丢弃”的物质单向运动模式。图1-1给出了物质的单向运动循环模式。

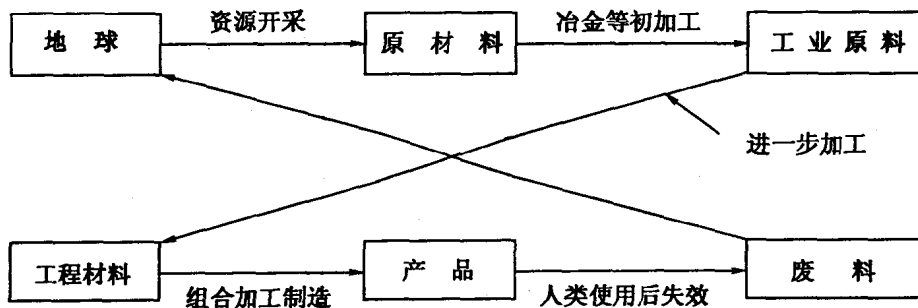


图 1-1 材料的单项循环模式

由图中可知,人类在地球上通过采矿、钻探、挖掘、采集等得到原材料,这些原材料(矿石、矿物、煤、原油、天然气、石头、沙子、木材、生橡胶等)通过冶炼及初加工被制成工业用

原料(金属、化学产品、纤维、橡胶、电子晶体等),然后进一步加工成工程材料(合金、玻璃或陶瓷、半导体、塑料、合成橡胶、混凝土、建筑材料、纸、复合材料等)。这些工程材料通过完成相应设计要求的加工制造,组成结构件、机器、装置和其他社会需要的产品为人类所使用(军用、民用)。当这些由工程材料制成的产品被人类使用后,或因服役后失效,或到了工程要求的服役期,或完成了某一特定使用要求后,人们通常把它称之为废品,这些废品作为废料又回到大地上。上述循环涉及到化工、冶金、能源、材料、环境等多个学科,多个工业部门。统计表明,与材料相关的产业既是资源消耗的大户,也是能源消耗的大户,又是环境污染的主要来源。随着这些工业的飞速发展,在不断促进人类生产和生活水平提高的同时,也越来越严重地造成了对环境的污染。例如,2000年我国工业废弃物已达10亿t,其中80%属于化学品污染。化学燃料能源转化过程的 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 和 $\text{CO}_2$ 的污染排放分别达2000余万t、1000余万t和20余亿t。全球每年化学燃料燃烧造成的硫排放已超过自然界生态过程硫循环量的4倍,严重破坏了自然生态系统硫的循环平衡。 $\text{CO}_2$ 的排放造成的温室效应也是世人关注的焦点。这种单项循环模式必然造成资源紧缺—能源浪费—环境污染的严重后果。

### 1.2.2 材料的双向循环

材料与化工、冶金、能源、环境工程等被称为过程工业。过程工业从传统意义上说就是“资源开采—生产加工—消费使用—废物丢弃”,这样一套单向运动循环模式,这必然会带来地球有限资源的紧缺和破坏,同时带来能源浪费,造成人类生存环境的污染。审视20世纪过程工业的发展历程,人们开始认识到现有的“消耗资源—制造产品—排放废物”这一单向生产模式已无法持续下去,而应当代之以仿效自然生态过程物质循环的模式,建立起废物能在不同生产过程中循环,多产品共生的工业模式,即所谓的双向循环模式(或理论意义上的闭合循环模式)。循环经济与知识经济并称为世界未来经济发展的两大模式。从人们所用产品的定义出发,可分为四大类通用的产品类型:

- 服务(如运输);
- 软件(如计算机程序);
- 硬件(如汽车、飞机、发动机械零件);
- 流程性材料(如润滑油、钢材等)。

过程工业是主要以生产流程性材料为主的工业分支。在流程性材料生产中,如果一个过程的输出变为另一个过程的输入,即一个过程的废物变成另一个过程的原料,并且经过研究真正达到多种过程相互依存、相互利用的闭合的产业“网”、“链”,那么也就真正达到了清洁生产,达到了无害循环。例如,近年来国内开发成功的数十万吨级用于磷石膏分解成二氧化硫和氧化钙的工业技术,就可以把磷肥厂、水泥厂、高硫煤矿、硫酸厂联合形成“生产产业网”,有效地解决了磷石膏污染问题,而且使资源得到充分的利用,这种“粘合”技术的优先开发无疑是发展生态工业的重要途径。这种循环可以粗略地用图1-2来表示。

### 1.2.3 材料的可持续发展战略与生态环境材料

#### 1. 材料的可持续发展战略

国际材料界在审视材料发展与资源和环境关系时发现,过去的材料科学与工程是以

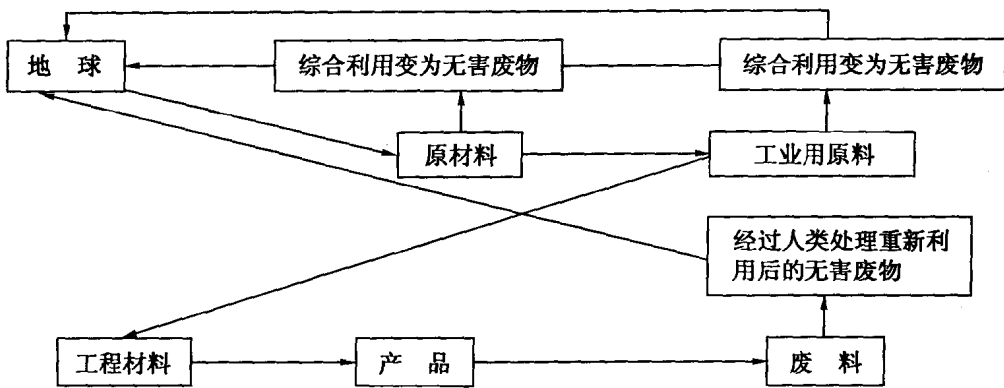


图 1-2 材料的双向循环模式

追求最大限度发挥材料的性能和功能为出发点的,而对资源、环境问题没有足够重视,没有充分考虑材料的环境协调性问题。而在全世界经济必须可持续发展的今天,对理解和认识材料科学与工程的内涵时还应予以拓宽,这主要是:

(1)在尽可能满足用户对材料性能要求的同时,必须考虑尽可能节约资源与能源,尽可能减少对环境的污染,要改变片面追求性能的观点;

(2)在研究、设计、制备材料以及使用、废弃材料产品时,一定要把材料及其产品整个寿命周期对环境的协调性作为重要评价指标,改变只管设备生产、不顾使用和废弃后资源再利用及环境污染的观点;

(3)这个定义的拓宽将涉及多学科的交叉,不仅是理工交叉,且具有更宽的知识基础和更强的实践性,不但要讲科学技术效益、经济效益,还要讲社会效益,最终把材料科技与产业的具体发展目标和各国、各地区可持续发展的大目标结合起来。

材料的可持续发展战略是一个多学科、多部门联合作战的复杂系统工程,最重要的思想就是建立“生态工业园区”。所谓“生态工业园区”就是实施生态工业的系统工程基础,其目标是通过多种产业的综合协调发展,使某一个产业的副产物或废料成为另一个企业的原料加以利用,进而形成物流的“生态产业链”或“生态产业网”,能流形成多次梯级利用,使在一定界区内的多行业、多产品联合发展,不仅可使资源在产业链中得到充分或循环利用,而且使能量资源和信息资源同时得到充分利用。

在生态工业园区规划的过程中,会发现许多“网”、“链”的断点,这就为以后的深入的实验研究和工业开发指明了方向。这种无限循环,不断深入研究,不断深入开发、应用,向着生态过程工业和可持续发展逐渐逼近,最终每一个环节和每一个单元都将是清洁的,用环境友好的生产工艺取代污染工艺,以实现良性循环的可持续发展的目标。

美国麻省理工学院在全美首先开设了生态工业学的课程,设立了跨院系的研究项目,致力于生态工业可持续发展的研究,并组织相关领域的各种定期和不定期会议,以促进学术界、政府、公司之间合作网络的建立;耶鲁大学 1997 年建立了生态工业研究中心并出版了世界第一份生态工业学杂志;普林斯顿大学的能量与环境研究中心在生态工业学研究中也取得了很好的成绩;澳大利亚、荷兰等国也开展了生态工业学的研究。

## 2. 生态环境材料研究与开发的兴起

生态环境材料正是在上述背景下提出来的,它是 20 世纪 90 年代国际上材料科学与



工程发展的最新趋势之一,已在世界各国达成共识,兴起了全球性的环境材料的研究、开发和利用热潮。生态环境材料是指同时具有优良的使用性能和最佳环境协调性能的一大类材料。这类材料对资源和能源消耗少,对生态和环境污染小,再生利用率高或可降解化和可循环利用,而且要求在制造、使用、废弃直到再生利用的整个生命周期中,都必须具有与环境的协调共存性。因此,所谓环境材料,实质上是赋予传统结构材料、功能材料以特别优异的环境协调性的材料,它是材料工作者在环境意识指导下,或开发新型材料,或改进、改造传统材料,任何一种材料只要经过改造达到节约资源并与环境协调共存的要求,它就应被视为环境材料。这种定义、概念有助于调动更广大的材料工作者的积极性,鼓励和支持它们结合本职工作,对量大面广的材料产品进行生产技术改革,实现节能、降耗和治理污染的目的。同时,要大力提倡和积极支持开发新型的环境材料,取代那些资源和能源消耗高、污染严重的传统材料。还应该指出,从发展的观点看,生态环境材料是可持续发展的,应贯穿于人类开发、制造和使用材料的整个历史过程。

国际上的材料科学技术工作者和各国政府都对材料产业环境协调发展给予了高度重视,日本和欧洲的一些国家相继成立了环境材料及相关的研究学会,组织专门的学术和相关政策研究。日本学者山本良一教授等撰写了环境材料方面的专著,首先系统介绍了环境材料的基本观点和研究的基本方法。德国能源和环境学家 von Weizsaecker 教授提出了“四倍因子理论:半份消耗,倍数产出”,其意思是在经济活动和生产过程中通过采取各种措施,将资源消耗降低一半,同时将生产效率提高一倍,由此在同样资源消耗的水平上,得到了四倍的产出。四倍因子理论的提出,得到了世界上许多政治家、经济学家、社会学家、生态学家、环境科学家以及许多其他学者的赞同,被认为对有效利用资源、改善生态环境、实现社会和经济的可持续发展具有战略性的意义。在四因子理论的基础上,一些其他学者陆续提出了十倍因子等有关提高资源效率、减少物质消耗的各种理论。

近年来,围绕生态环境材料这一主题,国际上开展的广泛研究,可以划分为材料的环境协调性评价和具体的生态环境材料设计、研究与开发两大主题。

自 1998 年起,国家 863 计划支持了首项“材料的环境协调性评价研究”,开始对钢铁、铝、水泥、塑料、陶瓷、建筑涂料等量大面广的几大类主要基础材料进行初步的全生命周期评价 LCA(Life Cycle Assessment)。到目前为止,已经完成了各类材料基本数据的调研和初步分析,并且在 LCA 数据库的建立和软件的开发中做了一些建设性的尝试,初步建立了相应的 LCA 数据库和评估软件。

## 1.3 材料科学与工程

### 1.3.1 材料科学的兴起

“材料”是早已存在的名词,但把材料作为“材料科学”的提出是 20 世纪 60 年代初及之后的事。事实上,“材料科学”的形成是科学技术发展的结果。

首先,固体物理、无机化学、有机化学、物理学等相关基础学科对物质结构和物性的深入研究,促进了对材料本质的了解;同时,冶金学、金属学、陶瓷学、高分子科学等相关应用学科的发展也对材料本身的研究大大加强,从而对材料制备、结构与性能以及它们之间的