



北京市高等教育精品教材立项项目

材料科学与工程系列

# 材料工程基础

Foundations of Materials  
Engineering

王昆林 编著



清华大学出版社



北京市高等教育精品教材



205906947

材料

TB3

系列

W2401

# 材料工程基础

## Foundations of Materials Engineering



王昆林 编著

TB3  
W2401

590694

清华大学出版社

## 内 容 简 介

本书阐述了材料科学与工程的基础理论及其在材料加工工程中的应用,介绍了材料的成分、加工工艺、组织结构和性能之间的关系。主要包括原子结构与原子间结合键、晶体结构、固体中的扩散、材料的固化、相图、固态相变与金属热处理、金属的力学性能及其他性能、高分子材料的结构与性能、陶瓷的结构与性能等内容。

本书可作为高等院校材料科学、材料加工以及制造工程领域的教材,也可供有关工程技术人员参考使用。

本书为北京市高等教育精品教材。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

### 图书在版编目(CIP)数据

材料工程基础 / 王昆林编著. - 北京:清华大学出版社,2003

(材料科学与工程系列)

北京市高等教育精品教材立项项目

ISBN 7-302-07064-4

I. 材… II. 王… III. 工程材料 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 071058 号

出 版 者: 清华大学出版社

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

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客 户 服 务: 010-62776969

组稿编辑: 宋成斌

文稿编辑: 李艳青

印 刷 者: 清华大学印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×230 印 张: 24 字 数: 493 千字

版 次: 2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-07064-4/TB·60

印 数: 1~3000

定 价: 36.00 元

# 前 言

本书是根据国家教育部 1998 年调整的最新专业目录,为适应按系设置宽口径专业的改革需要,本着加强基础、淡化专业和宽口径的宗旨,作为材料加工工程专业的通用教材,并作为“材料加工原理”、“材料加工工艺”和“工程材料”的配套教材而编写的。

本书内容参照国外最新教材,按新的材料加工工程专业方向的要求,进行了较大的更新和改变。不仅系统介绍了材料科学与工程的基础理论,而且各章节均紧密结合材料加工学科的现状与发展动向,补充了较多的应用实例,介绍了前沿性科研成果,为学生进一步学习材料加工工程的专业知识打下必要的基础。如在第 3 章中,不但介绍了晶体结构的经典内容,而且介绍了准晶和液晶等新内容及分析晶体结构的 X 射线法;在第 4 章中,不仅介绍了扩散的一般特点,还介绍了离子晶体、共价晶体和非晶体扩散的特点,以及扩散与材料加工的关系等新内容;在第 5 章中,首先介绍了材料固化的一般理论,接着介绍了金属凝固和高聚物的固化等,还增加了凝固理论的实际应用部分,介绍了微重力条件下金属的凝固、定向凝固和急冷凝固技术等具有国际先进水平的新科研成果和前沿课题;既考虑到目前以金属材料为主要加工对象的现状,又注意到高分子材料和陶瓷在材料加工工程中日益广泛的应用前景。

本书不仅介绍材料组织结构的知识,而且增加了材料性能尤其是力学性能的知识,重点突出材料的成分、加工工艺、组织结构与性能的关系,使学生更好地掌握本课程学习的主线。

本书得到北京市教育委员会“北京市高等教育精品教材立项项目”和清华大学“985”教材项目的资助,特表示衷心的感谢。

本书的编写参考了国内外的有关教材、科技著作等文献。在此特向有关作者致以深切的谢意。

由于编者水平有限,本书不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

王昆林

2003 年 5 月

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 材料发展概要 .....	1
1.2 材料应用现状与新材料的发展趋势 .....	5
1.3 材料科学与工程简介 .....	10
1.4 材料的分类 .....	17
1.5 材料加工工程简介 .....	19
小结 .....	21
重要术语与概念 .....	22
习题 .....	23
<b>2 原子结构与原子间结合键</b> .....	24
2.1 原子结构 .....	24
2.2 原子序数和原子质量 .....	24
2.3 原子的电子层结构 .....	26
2.4 原子的结合键 .....	43
小结 .....	51
重要术语与概念 .....	51
习题 .....	53
<b>3 晶体结构</b> .....	54
3.1 晶体的特征 .....	54
3.2 空间点阵与晶胞 .....	55
3.3 晶系与布喇菲点阵 .....	56
3.4 典型的晶体结构 .....	58
3.5 晶向与晶向指数 .....	59
3.6 晶面与晶面指数 .....	60
3.7 三种典型晶体结构的比较 .....	63

材料工程基础 .....	
3.8 原子体密度、面密度和线密度 .....	68
3.9 多晶型性与同素异构转变 .....	71
3.10 多晶与单晶材料 .....	73
3.11 微晶、准晶与液晶 .....	73
3.12 合金相结构 .....	76
3.13 晶体缺陷 .....	90
3.14 非晶态合金 .....	105
3.15 用 X 射线衍射法分析晶体结构 .....	105
小结 .....	106
重要术语与概念 .....	107
习题 .....	108
<b>4 固体中的扩散 .....</b>	<b>110</b>
4.1 概述 .....	110
4.2 扩散定律 .....	113
4.3 影响扩散的因素 .....	116
4.4 反应扩散 .....	119
4.5 离子晶体和共价晶体中的扩散 .....	121
4.6 非晶体中的扩散 .....	122
4.7 扩散与材料加工 .....	122
小结 .....	126
重要术语与概念 .....	127
习题 .....	128
<b>5 材料的固化 .....</b>	<b>129</b>
5.1 材料固化的概念与特征 .....	129
5.2 金属的结晶 .....	130
5.3 高聚物的固化 .....	146
5.4 材料固化理论的应用 .....	149
小结 .....	157
重要术语与概念 .....	158
习题 .....	160

<b>6 相图</b> .....	161
6.1 相图基本概念 .....	161
6.2 相律和杠杆定律 .....	163
6.3 二元匀晶相图 .....	165
6.4 二元共晶相图 .....	167
6.5 二元包晶相图 .....	175
6.6 具有中间相或化合物的相图 .....	178
6.7 相图基本类型小结 .....	179
6.8 相图与性能的关系 .....	180
6.9 铁碳合金相图 .....	182
小结 .....	197
重要术语与概念 .....	198
习题 .....	199
<b>7 固态相变与金属热处理</b> .....	200
7.1 固态相变概述 .....	200
7.2 钢的热处理原理 .....	203
7.3 钢的热处理工艺 .....	227
小结 .....	249
重要术语与概念 .....	251
习题 .....	253
<b>8 金属的力学性能及其他性能</b> .....	255
8.1 金属的应力与应变 .....	255
8.2 弹性性能 .....	263
8.3 金属单晶体的塑性变形 .....	265
8.4 金属多晶体的塑性变形 .....	271
8.5 合金的塑性变形 .....	274
8.6 塑性变形对合金组织和性能的影响 .....	276
8.7 金属及合金的回复与再结晶 .....	281
8.8 金属的断裂 .....	293
8.9 金属的疲劳 .....	299
8.10 金属的蠕变和持久强度 .....	300
8.11 硬度 .....	302

材料工程基础	
8.12 金属的磨损	304
8.13 金属的物理和化学性能	305
8.14 金属的工艺性能	308
小结	310
重要术语与概念	312
习题	314
<b>9 高分子材料的结构与性能</b>	<b>315</b>
9.1 概述	315
9.2 高聚物的结构	320
9.3 高聚物的性能	331
小结	343
重要术语与概念	344
习题	346
<b>10 陶瓷的结构与性能</b>	<b>347</b>
10.1 陶瓷材料概述	347
10.2 陶瓷的组织与结构	350
10.3 陶瓷材料的性能	358
10.4 陶瓷材料加工	363
小结	372
重要术语与概念	372
习题	373
<b>参考文献</b>	<b>374</b>



# 1 绪 论

## 1.1 材料发展概要

材料是人类用来制造各种产品的物质,是人类生产和生活的物质基础。人类社会的发展史表明,人类社会的发展伴随着材料的发明和发展,材料的发展推动着人类社会的进步,成为人类文明发展的里程碑。人类最早使用的材料是石头、兽皮等天然材料,其后,发明了陶器、瓷器、青铜器和铁器。因此,历史学家将人类早期历史划分为石器时代、青铜器时代和铁器时代。现在人类已进入人工合成材料的新时代。金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料等各类新材料得到了迅速的发展,材料和能源、信息一起成为现代科学技术的三大支柱,为现代社会的发展奠定了重要的物质基础。在材料发展的历史过程中,我们勤劳智慧的祖先,创造了辉煌的成就,为人类文明、世界进步做出了巨大贡献。

### 1.1.1 石器时代

石器是人类最先使用的工具,一般是将石英石和燧石等天然石材打制成石矢、石刀、石铲、石凿、石斧、石锄和石球等石器作为工具使用。我国安徽繁昌县人字洞发现了众多的石制品和骨制品,估计距今约 200 万年至 240 万年,是目前欧亚大陆发现的最早的文化遗产。石器时代经历了 200 万年至 300 万年漫长的历史时期。

早在新石器时代,不仅打制的石器更加精美,还出现了玉器、陶器和瓷器。我国是玉器的故乡。距今 3000 多年河南安阳殷墟妇好墓出土的玉器就达 700 多件;1968 年河北满城中山王刘胜墓出土的“金缕玉衣”,是用 2498 块玉、1.1kg 金丝穿起来的,全长 1.88m。随着火的使用,中华民族的先人们用粘土(主要成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ )烧制成陶器。在仰韶(河南)文化和龙山(山东、河南等)文化时期,制陶技术已经发展到能在氧化性气氛的窑中( $950^\circ\text{C}$ )烧制红陶,在还原性炉气中( $1050^\circ\text{C}$ )烧制薄胎黑陶与白陶。在 3000 多年前的殷、周时期,发明了釉陶,炉窑温度提高到了  $1200^\circ\text{C}$ 。马家窑(甘肃)文化时期的陶器以砂质和泥质红陶为主,表面彩绘有条带纹、波纹和舞蹈纹等,制品有炊具、食具、盛储器皿等。被誉为“世界第八大奇迹”、在地下历经两千余年的秦王兵马俑所展示的庞大军阵,是我

国古代陶文化的奇葩。我国在东汉时期发明了瓷器(图 1-1),成为最早生产瓷器的国家。瓷器于 9 世纪传到非洲东部和阿拉伯国家,13 世纪传到日本,15 世纪传到欧洲。瓷器成为中国文化的象征,对世界文明产生了极大的影响。直到今天,中国瓷器仍畅销全球,享誉四海。



图 1-1 瓷器



图 1-2 司母戊鼎

### 1.1.2 青铜器时代

应该说,人类进入文明社会是以使用铜器、铁器等金属材料开始的。埃及、中国等文明古国都曾先后进入青铜器时代。早在公元前 4000 年,古埃及人便掌握了炼铜技术。先民们发现,在铜中加入锡,可使原来较软的铜制品变得更坚韧、更耐磨,于是出现了铜锡合金——青铜,这是人类历史上发明的第一种合金。我国青铜的冶炼始于公元前 2000 年(夏代早期),晚商和西周是我国青铜器时代的鼎盛时期。春秋战国时期《周礼·考工记》中记载了钟鼎、斧斤等六类青铜器中的锡含量,称为“六齐(剂)”。书中写道:“六分其金而锡居一,谓之钟鼎之齐;五分其金而锡居一,谓之斧斤之齐;四分其金而锡居一,谓之戈戟之齐;三分其金而锡居一,谓之大刃之齐;五分其金而锡居二,谓之削杀矢之齐;金、锡半,谓之鉴燧之齐”。这是世界上最早的关于青铜合金成分的文字记载,表明我们的祖先已经认识到了青铜的性能与成分之间的密切关系。我国劳动人民创造了灿烂的青铜文化,为我们留下了一批精美绝伦、震撼世界的杰作。从河南安阳晚商遗址出土的“司母戊”大方鼎重达 875kg,外形尺寸为 1.33m×0.78m×1.10m,是迄今世界上最古老的大型青铜器(图 1-2),其精湛的铸造技术令世人惊叹。从湖北江陵楚墓中出土的越王勾践的两把宝剑,长 0.557m,宽 0.046m,保存完好,金光闪闪,锋利异常,剑体满饰菱形花纹,是我国青铜器的杰作。从湖北随州市曾侯乙墓出土的战国青铜编钟,计 64 件、2500 余千克,其音域之宽广堪与现代乐器媲美。另外,还有西安秦始皇陵墓陪葬坑出土的由 8 马 2 车 2 俑组成的质量达 1061kg 的铜车马,四川广汉三星堆出土的高约 4m 的青铜树、高 2.6m 的青

铜立人等。

### 1.1.3 铁器时代

人类最早使用的铁是来自宇宙空间的陨石铁(又称自然铁,也叫陨铁)。陨石铁的主要成分是铁和镍,一般含量在98%以上,其中含镍量为4%~20%,余为铁,其他杂质元素含量很低,主要有钴、磷、硫和碳。古埃及在距今5000年以前,曾用含镍7.5%的陨石铁做成铁球。

从美索不达米亚出土的文物证明,在公元前3000年就有了铁器;在公元前2000年就知道了铸铁技艺。尽管如此,他们在早期对铸铁的应用,远不能与中国古代所掌握的铸铁技术和发展应用相比拟。我国从春秋战国时期(公元前770年到公元前221年)已开始大量使用铁器。质量达270kg的铸铁刑鼎是公元前513年铸造的。春秋晚期出土的铁器有江苏六合程桥楚墓的铁丸、长沙楚墓的铁锛和铁鼎。战国时期已有韧性铸铁生产工艺。从兴隆战国铁器遗址中发掘出了浇铸农具用的铁模,说明冶铸技术已由泥砂造型水平进入铁模铸造的阶段。我国生产铸铁要比其他国家早许多个世纪。到了西汉时期,炼铁技术又有了很大的提高,采用煤作为炼铁的燃料,要比欧洲早1700多年。在河南巩县汉代冶铁遗址中,发掘出20多座冶铁炉和锻炉。炉型庞大,结构复杂,并有鼓风装置和铸造坑,可见当年生产规模之壮观。我国的铁器冶炼技术在战国、秦、汉时期就不断向外传播,战国时期传到朝鲜,汉代时期传到日本。应该说,我国在铁器时代对人类做出了贡献。我国古代创造了三种炼钢方法,第一种是从矿石中直接炼出自然钢;第二种是西汉时期的经过“百次”冶炼锻打的百炼钢;第三种是南北朝时期生产的灌钢。先炼铁后炼钢的两步炼钢技术,我国要比其他国家早1600多年。钢的热处理技术也达到了相当高的水平。西汉《史记·天官书》中有“水与火合为淬”一说,正确地说出了钢铁加热、水冷的淬火热处理工艺要点。《汉书·王褒传》中记载有“巧冶铸干将之朴,清水淬其锋”的制剑技术。钢铁生产工具的发展,对生产力的发展和社会进步起了巨大的推动作用。

### 1.1.4 钢铁工业和有色金属的发展

铸铁的发展经历了5000年的漫长岁月,只是到了瓦特发明蒸汽机以后,由于在铁轨、铸铁管制造中的大量应用,才走上了工业发展的道路,而在此以前,铸铁只用来制作农具、兵器和祭器。

15世纪以后,欧洲的社会生产力有了长足的进步。15世纪初,炼铁高炉首先在欧洲迅速发展。到了17世纪,已有高达9m、日产铁1t的高炉出现。炼钢技术则是在蒸汽机出现(1755年)、能够提供强大的鼓风和动力以后才得以发展的。1856年发明了酸性转炉炼钢;1864年发明了平炉炼钢;1879年发明了碱性转炉炼钢;1899年发明了电弧炉炼钢。由此,奠定了近代钢铁工业的基础。

19世纪后半叶钢铁工业得到了发展,这是由于当时欧洲社会生产力和科学技术的进步,对钢的生产提出了更高的要求;另外,各种炼钢方法的发明扩大了钢的生产规模,并提高了钢材质量,特别是到了20世纪50年代,出现了氧气顶吹法炼钢技术,钢的生产得到了迅速发展。从20世纪50年代初至70年代末,全世界钢的年产量由2.1亿t增加到7.5亿t。

解放以后,我国的钢铁冶炼技术有了突破性进展,目前钢产量已跃居世界首位。武汉长江大桥使用碳素结构钢A3(即Q235)钢制造,而我国自行设计和建造的南京长江大桥则用强度较高的合金结构钢16Mn制造,九江长江大桥则用强度更高的合金结构钢15MnVN制造。我国的原子弹、氢弹的研制成功,火箭、人造卫星的上天,都以材料的发展为坚实基础。

在钢铁材料发展的同时,有色金属也得到了发展。电解铝自1866年被发明以来,现已成为用量仅次于钢铁的金属。1910年用钠还原得到了纯钛,从而满足了航空工业的需求。核工业的需求促进了铀及其他核燃料的发展,而电子和半导体工业则促进了单晶硅等超纯材料的发展。

### 1.1.5 非金属材料的发展

非金属材料的发展历史也十分悠久,特别是进入20世纪后,取得了重大进展。首先应该提到的是丝绸。丝绸是一种天然高分子材料,它在我国有着悠久的历史,于11世纪传到波斯、阿拉伯、埃及,并于1470年传到意大利的威尼斯,进入欧洲。中国丝绸名扬四海。人工合成高分子材料自20世纪20年代至今发展最快,其产量之大、应用之广可与钢铁材料相比。从20世纪60年代到70年代,有机合成材料每年以14%的速度增长,而金属材料的年增长率仅为4%。1970年世界合成高分子材料为4000万t,其中3000万t为塑料,橡胶产量为500余万吨,这已超过天然橡胶的产量;合成纤维产量为400万t,这和当年的天然纤维产量相当。1984年全世界合成高分子材料的产量已达1亿t。20世纪90年代初,塑料产量已逾1亿t,按体积计,已超过钢铁产量。高分子材料可以用作结构材料代替钢铁,目前正在研究和开发具有良好导电性能和耐高温的有机合成材料。

陶瓷材料除了前述的陶器、瓷器以外,近几十年的发展同样十分引人注目。陶瓷材料在冶金、建筑、化工以及尖端技术领域,已成为耐高温、耐腐蚀和各种功能材料的主要用材,如耐高温、耐腐蚀的氧化铝,将电信息转变为光信息的铌酸锂,用于切削刀具的氮化硅,具有高温超导性能的氧化钇等。另外,陶瓷材料的脆性和抗热震性正在逐步获得改善,是最有前途的高温结构材料。机器零件和工程结构已不再只使用金属材料制造了。

### 1.1.6 复合材料及新材料技术的发展

随着航空、航天、电子、通信等技术以及机械、化工、能源等工业的发展,对材料的性能

提出了越来越高的要求。传统的单一材料已不能满足使用要求,复合材料的研究和应用引起了人们的重视,如玻璃纤维树脂复合材料(即玻璃钢)、碳纤维树脂复合材料等已在宇航和航空工业中用来制造卫星壳体、宇宙飞行器外壳、飞机机身、螺旋桨、发动机叶轮等,在交通运输工业中制造汽车车身、轻型船、艇等,在石油化工工业中制造耐酸、耐碱、耐油的容器、管道等。

近年来,我国在新材料的研究和材料加工新工艺的研究工作中取得了较为重大的成果,研制成功性能优越、用途广泛的新型结构钢;研制出零电阻温度为 128.7K 的 Ti-Ca-Ba-Cu-O 超导体(铋系超导体);在  $C_{60}$  和巴基管新型碳材料的研究方面取得许多新的成果,利用巴基管作为衬底,制备出均匀、致密的金刚石薄膜,并用巴基管作为晶须增强复合材料,制作纳米复合材料。材料快速成型技术和材料表面处理技术在我国得到迅速发展。激光表面淬火、激光熔覆技术已在汽车发动机缸套、凸轮轴、石油抽油管、纺织用锭杆等零件的表面强化上得到应用。物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)可制造出高硬度、高耐磨性的 TiN、TiC 等薄膜,用于耐磨零件和装饰件的表面处理。

## 1.2 材料应用现状与新材料的发展趋势

### 1.2.1 材料应用的现状

目前,用量最大的材料是钢铁材料和铝合金、铜合金、钛合金及镍合金等有色金属。在农业机械、电工设备、化工和纺织机械等机械制造业中,钢铁材料占 90%左右,有色金属约占 5%。有色金属中,铝及其合金用量最大,因其质量轻而大量用于飞机制造业,如波音 767 飞机的用材,铝合金占了 81%。

高分子材料(又称为高分子聚合物,简称高聚物)、陶瓷材料和复合材料在不同工业部门也得到一定的应用,有些部门则大量使用这些材料。工程塑料常用于计算机外壳、接线板、控制按钮、窗玻璃、化工管道、薄膜、容器和包装用品等;传统陶瓷主要用于建筑行业,而先进陶瓷材料则在高新技术领域得到应用,如用  $SiO_2$  编织成陶瓷片作为热绝缘材料,覆盖了航天飞机机体表面的 70%,以保护机体不受损伤。复合材料尤其是金属基复合材料在航空航天部门得到了应用。

汽车工业是一个国家的支柱产业,现以汽车工业为例,简要说明各类材料应用的现状。汽车工业涉及 10 大类材料:钢板、特种钢、结构用塑料和复合材料、非结构用塑料和复合材料、橡胶、涂料、有色金属合金、铸件、陶瓷和玻璃、金属基复合材料。汽车用材以金属材料为主,塑料、橡胶、陶瓷等非金属材料也占有一定的比例,但原材料的构成比例近年发生了较大的变化,如表 1-1 所示。

表 1-1 普通、小型乘用车的原材料构成比例

%

材 料		年 份							
		1973	1977	1980	1983	1986	1989	1992	1997
黑色 金属	生铁	3.2	3.2	2.8	2.2	1.7	1.7	2.1	1.8
	普通钢材	60.4	61.4	60.5	59.5	57.7	56.9	54.9	52.1
	特种钢材	17.5	16.1	14.7	14.3	15.0	15.1	15.3	16.9
有色 金属	电解铜	1.0	0.9	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
	铝合金	0.6	0.6	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1	1.9
	锌合金	0.5	0.5	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2
	铝合金	2.8	2.6	3.3	3.5	3.9	4.9	6.0	7.5
	其他	0.1	0.1	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
非金属 材料	酚醛塑料(PF)	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
	聚氨酯塑料(PUR)	0.5	0.5	0.8	0.9	1.2	1.0	1.1	0.9
	聚氯乙烯塑料(PVC)	0.9	1.1	1.4	1.7	1.7	1.6	1.1	1.1
	聚乙烯塑料(PE)	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.4
	聚丙烯塑料(PP)	0.5	0.5	0.9	1.2	2.0	2.4	2.5	2.8
	ABS	0.4	0.7	0.5	0.5	0.7	0.8	0.7	0.6
	其他塑料	0.3	0.4	0.7	0.6	0.4	0.3	0.4	0.3
	高性能塑料				0.2	0.7	0.9	1.1	1.3
	涂料	2.1	1.6	1.8	1.7	1.7	1.4	1.5	1.7
	橡胶	4.8	4.3	3.7	3.5	3.0	2.7	3.1	3.3
	玻璃	2.8	2.7	3.1	3.2	3.3	3.0	2.8	2.8
	纤维		0.7	1.2	1.3	1.4	1.2	1.2	1.1
	木材			0.2	0.3	0.5	0.4	0.4	0.3
	其他	1.3	1.6	1.7	2.7	2.3	2.7	3.4	2.9
	合计	13.9	14.4	16.4	18.4	19.5	18.9	19.7	19.6

随着对汽车安全、节能和环保要求的提高,钢铁材料(尤其是生铁和普通钢材)的比例在下降,而有色金属(尤其是铝合金等轻金属)和非金属材料(尤其是塑料)的比例在增加。

塑料在汽车上的应用自 20 世纪 60 年代已开始实用化。首先采用塑料件的是机械、热应力较小的汽车内饰件,以达到安全、舒适、美观的目的。内饰塑料制品主要有:坐垫、

仪表板、扶手、头枕、门内衬板、顶棚衬里、控制箱和转向盘等。以后,车身等大型结构件也开始使用塑料。目前高性能塑料和塑料复合材料已用于制造汽车顶棚、前端部、前灯壳、发动机罩、挡泥板、三角窗框、尾板等外装件,以及传动轴、悬挂弹簧、保险杠、车轮、转向节、制动鼓、车门、座椅骨架、发动机罩、格栅、车架等汽车零件。塑料件在轿车上的用量已接近 120kg。

陶瓷材料具有耐高温、耐磨损和耐腐蚀等性能,利用陶瓷材料制作活塞、活塞环、汽缸套、气门挺柱、进排气管,以及涡轮增压器叶片、转子、涡轮壳、轴承等,均已有所应用。

复合材料在轿车上应用已超过 50kg,法拉利等高级跑车、全塑汽车等的车身也是以复合材料制作的。

### 1.2.2 新材料的发展趋势

新材料的研究、制备、加工与应用具有十分重要的意义。每一种重要新材料的发现和 应用,都把人类支配自然的能力提高到一个新的水平,给社会生产和生活面貌带来巨大的 变化,把物质文明程度推向前进,所以新材料的研制与开发应用和一个国家的工业活力及 经济、军事力量的增长都有着十分密切的关系。下面简要介绍当前最为人们关注的几种 新材料。

#### 1. 先进复合材料

单一材料往往有难以克服的局限性,如陶瓷的脆性,有机材料的低模量等。把不同材 料适当的复合在一起,往往产生比原来材料性能都要好的新材料,从而成为当前材料发展 的一个重要趋势。

复合材料是由基体材料(高分子材料、金属或陶瓷)和增强剂(纤维、晶须、颗粒)复合 而成的具有优异性能的新型材料。由于它的力学性能和功能可以根据使用要求进行设计、 制造,所以自 1940 年用玻璃纤维增强树脂的玻璃钢问世以来,应用的领域在迅速扩 大,品种、数量和质量都有了飞跃的发展。20 世纪 60 年代碳纤维增强树脂复合材料的出 现,加速了航空、航天技术的发展;反之,航空航天技术发展的需要更促进了轻质、高强、高 韧先进复合材料研制工作的迅猛发展。

随着现代科学技术的发展,对于先进树脂基复合材料,不仅对增强剂的品种、质量、性 能有较高的要求,树脂基体亦由热固性、中温型向热塑性高温型发展。金属基复合材料 是当前先进复合材料研究中引人注目的重点领域之一,已有产品在航天技术中得到应用。 主要研究开发的金属基复合材料有碳纤维增强铝, SiC 纤维增强铝、粉末颗粒增强铝、硼 纤维增强铝、石墨纤维增强镁、碳化硅晶须增强铝、粉末颗粒挤压(或铸造)金属基复合材 料、加压渗透金属基复合材料等。陶瓷复合材料尚处于研究试制开发阶段,研究的品种包 括陶瓷纤维增强陶瓷和玻璃材料、金属纤维增强陶瓷和玻璃材料、晶须增强陶瓷和玻璃材

料以及纤维自增强陶瓷复合材料等,其特点是除发挥陶瓷所具有的耐高温(约 2000℃)、耐磨损、耐腐蚀、轻质、高强和抗热冲击性好的特性外,主要研究如何提高陶瓷的断裂韧性。碳/碳复合材料是另一类用于超高温、具有高模量的结构材料,主要用于军事技术。

先进复合材料是发展航空航天和国防尖端技术必不可少的高技术新材料,同时在汽车工业、民用飞机、桥梁、建筑以及体育用品等各个方面有着广泛的应用前景。

发展复合材料所遇到的关键问题是不同材料间的界面问题,还有制造成本问题。因此必须十分重视复合材料制备工艺及复合材料的焊接与连接的研究,为用复合材料制作结构件提供必要的技术手段。

## 2. 光电子信息材料

在 21 世纪,光电子信息技术对满足计算机、通信、航天工业和国防等方面的需求是至关重要的,因此,发展新型光电子材料具有十分重要的意义。

光电子信息处理材料包括量子材料、生物光电子材料、非线性光学材料等。为满足光电子工业中光通信、光计算机、光存储和激光技术应用等的需要,应首先进行作为基本材料的超高纯玻璃、新型半导体材料、先进薄膜材料以及各种非线性光学材料和激光材料等的研究。另外,由于超大容量的信息网络和超高速计算机的发展,对集成电路的要求愈来愈高,集成度逐年增加,而近年来又由二维转向三维。除了集成度的改变以外,化合物半导体材料 GaAs 受到高度重视,因为用其制作的器件运算速度比硅器件高好几倍。此外,GaAs 具有光电学效应,有可能使信息的产生、处理、检测和存储等不同功能在同一块集成电路上完成。特别是由于原子加工技术的发展,如分子束外延(MBE)、金属有机气相沉积(MOCVD)等,可以把单层分子或原子排列在一起,成为所谓的超晶格材料。如在 GaAs 基片上,把 Ga、Al、In、P、As 或 Sb 结合为多层堆积,通过不同掺杂,控制能带结构、带隙、能态密度、光学吸收系数和折射率等各种参数,从而获得多功能材料。许多先进实验室都在探索这种材料与器件一体化的新技术。

## 3. 低维材料

所谓低维材料就是指超微粒子(零维)、纤维(一维)和薄膜(二维)材料,这是近年来发展最快的材料领域。

通过溶胶-凝胶(sol-gel)法、多相沉积或激光等方法,可以制备出亚微米级的陶瓷或金属粉末,其大小只有几个原子到几百个原子(1nm~100nm),一般称为纳米级超细微粒。零维的纳米粒子(尺寸小于 100nm)具有很强的表面效应、尺寸效应和量子效应,使其具有独特的物理、化学性能。纳米级金属颗粒是电的绝缘体及吸光的黑体;以纳米微粒制成的陶瓷具有较高的韧性和超塑性;纳米级金属铝的硬度是块状铝的 8 倍,等等。超细微粒有很大的比表面积和比表面能,如做成块状材料,晶界所占比例就很大,如颗粒为



5nm,每立方厘米有 $10^{19}$ 个晶界,晶界厚度为 $1\text{nm}\sim 2\text{nm}$ 时,晶界原子则占50%左右。由于比表面能高,所以超微粒的熔点低,烧结温度下降,扩散速度快,强度高而塑性下降慢。由于颗粒细小,电子态由连续能带变为不连续,光吸收也发生异常现象,可以成为高效微波吸收材料。利用其比表面积的大幅度提高,超微细粉可以成为高效催化剂。纳米级超微细粉不但在结构上有很多需要深入研究之处,在用途上也有待大力开发。

一维材料中最重要的是光导纤维,可用于通信工程材料。由于其信息传输量远比用铜、铅的同轴电缆大,而且光纤有很强的保密性,所以发展很快,目前已铺设了大西洋海底光缆和横跨美洲大陆的光缆。高纯石英玻璃的光损耗现已下降到 $0.15\text{dB/km}$ ,中继距离在 $200\text{km}\sim 500\text{km}$ ;今后发展的多组分氟化物玻璃,光损耗可望降到 $0.01\text{dB/km}\sim 0.001\text{dB/km}$ ,中继距离可增至 $2500\text{km}$ 以上。脆性块状材料在变成细丝后韧性显著增加,可用来增强其他的块状材料。细丝的直径愈小,表现的强度愈高,因而纤维就成为复合材料的重要组成部分。目前实用纤维为碳纤维、硼纤维及陶瓷纤维,如 $\text{SiC}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等。再者,高强度高分子纤维发展也很快。纤维中强度和刚度最高的要算晶须了,可以接近理论强度值,金属、陶瓷和有机化合物都可制成晶须。

薄膜(二维材料)的发展也很快,特别是电子技术的发展,需要各种类型的薄膜材料。当前发展最快的是金刚石薄膜、高温超导薄膜和半导体薄膜等。此外,L-B膜是由Langmuir及Blodgett提出和发展的一个有序、紧密排列的分子组合系统,即以某些有机或生物分子在液面上形成一层规整的单分子膜,而后移至固体载体上。由于其电子所处状态和外界环境的影响,可表现出不同的电子迁移规律,完成特定的电光、光电或电子学功能,如成为绝缘体、铁电体、导体或半导体等,从而有可能作为光学薄膜用于非线性光学、光开关、放大或调幅;作为敏感与传感元件,用于显示或探测器;用于环保或表面改性的保护膜。

#### 4. 新型金属材料

尽管非金属新材料发展迅猛,但金属材料在很长的时期内仍将占有重要地位,如镍基高温合金在现代飞机和发动机的总质量中仍将占很大比例。高性能金属新材料近期发展方向,主要是通过新技术、新工艺,提高合金化程度或改变组织,从而大幅度提高材料的性能,开发出新的品种,如通过快速冷却( $10^4\text{K/s}\sim 10^5\text{K/s}$ )可使某些合金成为非晶态,或可以得到微晶,提高合金化程度,从而使合金得到强化;进行定向结晶和单晶生长,使高温合金叶片提高了使用温度范围,或延长了使用寿命;另外,通过对合金成分的合理设计及微量元素的控制,研制出了高比强度与高比模量的Al-Li合金;再如金属间化合物,由于具有高熔点,抗氧化和低密度,已成为当今高温材料领域的研究重点。