




普通高等教育规划教材

# 材料科学与工程导论

王高潮 主编

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育规划教材

# 材料科学与工程导论

主 编 王高潮  
副主编 蔡 璐 翟红雁  
参 编 谢小林 刘 好  
        王云英 郑海忠  
主 审 冯小明



机械工业出版社

本书系统地介绍了材料科学与工程领域的基本专业知识。主要内容包  
括材料概述, 工程材料的基本性能, 材料的原子结构和原子间的结合  
键, 金属材料, 陶瓷材料, 高分子材料, 复合材料, 新材料, 材料的  
强化与表面处理, 材料设计与选择。本书在内容上注重系统性、  
实用性和先进性。

本书主要作为普通高等学校材料科学与工程类学生的专业技术基  
础课教材, 也可作为其他工科专业的选修课教材, 并可供有关工程  
技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

材料科学与工程导论/王高潮主编. —北京:

机械工业出版社, 2006. 1

普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-18047-X

I. 材… II. 王… III. 材料科学-高等学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 146004 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张祖凤 版式设计: 冉晓华 责任校对: 程俊巧

封面设计: 陈 沛 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5 9.625 印张·371 千字

定价: 24.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

## 普通高等教育规划教材编审委员会名单

**主任:** 刘国荣

**副主任:** 左健民 陈力华 鲍 泓 王文斌

**委员:** (按姓氏笔画排序)

刘向东 任淑淳 何一鸣 陈文哲 陈 峻

苏 群 娄炳林 梁景凯 童幸生

## 材料成形及控制工程专业教材编委会

**主任:** 计伟志

**副主任:** 李 尧 王卫卫

**委员:** (按姓氏笔画排序)

王高潮 邓 明 齐晓杰 肖小亭 李慕勤

张 旭 周述积 侯英玮 胡礼木 胡成武

施于庆 贾俐俐 翁其金 傅建军

# 前 言

本书是根据2003年8月机械工业出版社在湖北汽车工程学院召开的普通高等教育应用型本科材料成形及控制工程专业规划教材建设研讨会的会议纪要,以及会后审定的《材料科学与工程导论》教材编写大纲编写的。

本书在编写中根据应用型本科教育的特点、专业培养目标和教学要求确定内容安排,力求通过本课程的学习,使学生系统掌握材料科学与工程的基本理论知识和常用工艺方法,了解新材料技术及其发展趋势,为深入学习材料科学与工程领域的专业知识奠定基础。

本书主要作为普通高等学校材料科学与工程类学生的专业技术基础课教材。内容上在满足了课程教学大纲的前提下,兼顾了其他工科相关专业选修课的需要,并可供有关工程技术人员参考。

本书系统地介绍了材料科学与工程领域的专业基本知识。主要内容包括材料概述,工程材料的基本性能,材料的原子结构和原子间的结合键,金属材料,陶瓷材料,高分子材料,复合材料,新材料简介,材料的强化与表面处理,材料设计与选择。本书在论述了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、材料科学与工程领域大背景、工程材料概论的基础上,以材料的原子结构和结合键为主线,找出了各大材料的共性和特性,将各类材料有机联系在一起;然后介绍了新材料,反映了材料科学与工程领域发展的最新成果;最后阐述了材料的强化、设计及选用等方面的问题。全书在内容上注重系统性、实用性和先进性。

书中各章均附有本章小结和一定量的复习思考题,以方便教学。

参加本书编写的教师有:南昌航空工业学院王高潮、谢小林、王云英、郑海忠;南京工程学院蔡璐;华北航天工业学院翟红雁;广东茂名学院刘好。本书由王高潮担任主编,蔡璐和翟红雁担任副主编。陕西理工学院冯小明教授主审。

材料科学与工程领域的科学技术仍然在迅速发展之中,加之作者水平有限,书中错误和不足之处在所难免,恳请读者提出批评和改进意见。

编 者

# 目 录

## 前言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 材料的发展与人类的文明 .....	1
第二节 材料的分类 .....	9
第三节 材料科学与工程 .....	15
第四节 材料的发展趋势 .....	22
本章小结 .....	23
复习思考题 .....	24
<b>第二章 工程材料的基本性能</b> .....	25
第一节 材料的力学性能 .....	25
第二节 材料的物理、化学性能 .....	33
第三节 不同种类材料的主要性能比较 .....	41
本章小结 .....	44
复习思考题 .....	44
<b>第三章 材料的原子结构和原子间结合键</b> .....	46
第一节 材料结构和原子特性 .....	46
第二节 原子间作用力和结合能 .....	51
第三节 原子间的结合键 .....	52
第四节 原子间结合键与材料类型及性质 .....	56
本章小结 .....	61
复习思考题 .....	61
<b>第四章 金属材料</b> .....	62
第一节 金属材料的制备与合成 .....	62
第二节 金属的晶体结构及晶体缺陷 .....	76
第三节 纯金属的结晶和铸锭 .....	83
第四节 金属材料的成型工艺 .....	87
本章小结 .....	103
复习思考题 .....	103
<b>第五章 陶瓷材料</b> .....	105



第一节 陶瓷材料简介 .....	105
第二节 陶瓷材料的结构与性能 .....	114
第三节 陶瓷材料的制备工艺 .....	127
本章小结 .....	131
复习思考题 .....	131
<b>第六章 高分子材料</b> .....	<b>132</b>
第一节 高分子的制备反应和高分子材料的组成 .....	132
第二节 高分子的结构及性能 .....	141
第三节 高分子材料的成型加工 .....	152
本章小结 .....	175
复习思考题 .....	175
<b>第七章 复合材料</b> .....	<b>177</b>
第一节 复合材料基础 .....	177
第二节 复合材料的基体材料 .....	179
第三节 复合材料的增强材料 .....	182
第四节 常用复合材料 .....	186
本章小结 .....	199
复习思考题 .....	199
<b>第八章 新材料简介</b> .....	<b>200</b>
第一节 纳米材料 .....	200
第二节 超导材料 .....	205
第三节 生物材料 .....	213
第四节 智能材料 .....	219
第五节 非晶态合金 .....	225
第六节 形状记忆材料 .....	232
本章小结 .....	234
复习思考题 .....	235
<b>第九章 材料的强化与表面处理</b> .....	<b>236</b>
第一节 金属材料强化与韧化的途径 .....	236
第二节 非金属材料强化与韧化的途径 .....	255
第三节 金属表面强化与表面改性技术 .....	264
本章小结 .....	279
复习思考题 .....	279
<b>第十章 材料的设计与选择</b> .....	<b>281</b>
第一节 材料的设计 .....	281
第二节 材料的选择 .....	290
本章小结 .....	297
复习思考题 .....	297
<b>参考文献</b> .....	<b>298</b>

# 第一章 绪 论

---

材料是人类生产活动和生活必需的物质基础，人类社会的发展离不开材料。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，信息、生物技术和新材料已成为最重要、最有发展潜力的领域，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与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，它与人类及其赖以生存的社会、环境存在着紧密而有机的联系。

## 第一节 材料的发展与人类的文明

### 一、材料与人类文明及社会现代化

#### 1. 材料与物质

材料是什么？材料是宇宙间可用于制造有用物品的物质。材料是物质，但不是所有物质都可以成为材料，只有当一种物质具有可供利用的性质，而且可以被制造成有用的物品时才成为材料。有用指除了使用价值外，还需具有一定的性质，如物理性质、化学性质和力学性质等。物品可以是单件的器件和元件，可以是组装的机器与仪器，也可以是集成的系统。材料与物质不能划等号，材料的概念比物质窄得多。人们用材料制成用于生活和生产的器件、构件、机器和其他各种产品。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、砂子、石块等，还有许多复合材料都属于材料的范畴。

#### 2. 材料是人类文明的里程碑

自古以来，人类文明的进步都是以材料的发展为标志的。人类的历史也是按制造生产工具所用材料的种类划分的，由史前时期的石器时代，经过青铜器时代、铁器时代，而今正跨入人工合成材料的新时代。纵观人类发展的历史，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。人类发展的历史证明，材料是人类文明进步的里程碑。





早在 100 万年以前的旧石器时代, 人类就开始以石头做工具。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 ~ 公元前 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。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 ~ 公元前 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。从战国至汉代这些技术相继传到朝鲜、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 万吨突增到 1900 年的 2800 万吨, 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, 因此金属材料在 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, 其发展十分迅速, 如今世界年产量在 1 亿吨以上, 论体积已超过钢。有些发达国家, 如美国, 使用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,故急需一种便宜的、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,钢铁制造技术进步的机会当然也就会失去。

材料与经济的另一个例子是硅材料。硅材料触发了一个数十亿美元工业的兴起。从助听器、遥测技术、信息传输到文化娱乐、各种个人计算机硅材料的应用,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:

- (1) 信息功能材料 与信息获取、传输、存储、显示及处理有关的材料。
- (2) 工程结构材料 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材料,包括先进的陶瓷材料。
- (3) 能源材料 与能源领域有关的能源结构材料、功能材料和含能材料。
- (4) 纳米材料 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。
- (5) 生物材料 与医学、仿生学及生物工程相关的材料。
- (6) 智能化材料 与信息产业相关的材料。
- (7) 生态材料 与环境工程相关的环境材料,又称绿色材料。

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。

### 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、成本的降低,以及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20世纪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,而且有利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，就可使飞机减重 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 15 马赫，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。

综上所述可以看出，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。

## 二、材料、能源与环境

### 1. 材料的单向循环

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”的材料单向循环模式。图 1-1 给出了材料的单向循环模式。

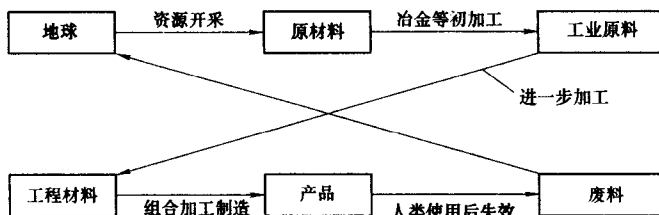


图 1-1 材料的单向循环模式

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、砂子、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10亿吨,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余万吨、1000余万吨和20余亿吨。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。这种单向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。

## 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)。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。

## 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。在全球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，主要有以下几方面：

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。

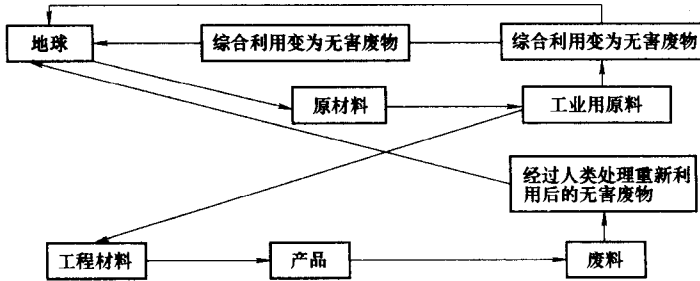


图 1-2 材料的双向循环模式

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、多部门联合作用的复杂系统工程，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寿命周期中，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。在四倍因子理论的基础上，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寿命周期评价 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



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。

## 第二节 材料的分类

通常人们所说的材料是指固体材料。材料多种多样，按照材料的用途，可分为结构材料和功能材料。结构材料是指利用材料的强度、韧性、弹性等力学性能，用于制造在不同环境下工作时承受载荷的各种结构件和零部件的一类材料，即机器结构材料和建筑结构材料。这类材料对国民经济各部门如交通运输、能源开发、海洋工程、建筑工程、机械制造等的发展影响很大。功能材料是指具有某种优良的电学、磁学、热学、声学、力学、光学、化学和生物学功能及其相互转化的功能，被用于非结构目的高技术材料。如电功能材料、磁功能材料、热功能材料、声功能材料、光功能材料、能源功能材料、化学功能材料、医用功能材料、机械功能材料、核功能材料等等。还有从专业用途来分，如电子材料、航空航天材料、核材料、建筑材料、能源材料、生物材料等。

材料按其物理、化学属性，可以分为四类：即金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料和复合材料。国外也有把固体材料分成金属、陶瓷（和玻璃）、聚合物、复合材料、半导体材料等五类。

### 一、金属材料 (metallic materials)

金属可以定义为坚硬、反光、有光泽、热与电的良好导体。金属材料是由金属元素或以金属元素为主形成的具有金属特性的材料的统称。包括金属和金属合金 (alloy)，金属间化合物以及金属基复合材料等。金属材料是最重要的工程材料之一，绝大多数为结晶质材料。

工业上把金属及其合金分成两大部分：

(1) 黑色金属 铁和以铁为基的合金（钢、铸铁和铁合金）。黑色金属又称铁类金属 (ferrous alloys)。

(2) 有色金属 黑色金属以外的所有金属及其合金。有色金属又称非铁金属 (nonferrous alloys)。

黑色金属应用最广，以铁为基的合金材料占整个结构材料和工具材料的 90% 以上，黑色金属的工程性能比较优越，价格也比较便宜。铁族金属有 Mn、Fe、Co、Ni 等。

用铁制造工具始于公元前 1300 年的巴勒斯坦，在我国则始于战国时代。钢与铸铁都基本上为铁和碳的合金，钢的碳的质量分数不超过 2%，铸铁的碳的质量分数为 2% ~ 4%。碳的质量分数超过 2% 的合金非常脆，无法用压力加工的方法成型，只能用铸造的方法成型，铸铁由此得名。95% 的汽车发动机底座、活塞环、千斤顶、机床床身等都用铸铁制造。钢具有强度高、延展性好、来源丰富和





价格低廉等优点，在今后很长一段时期内仍占据结构材料的主流。钢虽是历史最悠久的材料之一，近年来仍不断有新的品种问世，每种都在现代设计中占有一席之地。

按照性能的特点，有色金属大致可分成：

轻金属：Be、Mg、Al等；

易熔金属：Zn、Ga、Ge、Cd、In、Sn、Sb、Hg、Pb、Bi；

难熔金属：Ti、V、Cr、Zr、Nb、Mo、Tc、Hf、Ta、W、Re；

贵金属：Cu、Ru、Rh、Pd、Ag、Os、Ir、Pt、Au；

稀土金属：Y、La、镧系（58~71号）；

铀金属：Ac、锕系（90~103号）；

碱金属及碱土金属：Li、Na、K、Rb、Cs、Fr、Ca、Sr、Ba、Ra、Sc。

主要的有色金属包括铝、铜、镍、镁、钛和锌。这六种金属的合金占了有色金属总量的90%。每年使用的铝、铜和镁有30%得到了回收利用，这就进一步增加了它们的用量。这六种金属之外值得一提的是铅，铅一般不作合金使用，而以纯态作电池的屏蔽材料。

新型金属材料除黑色金属、有色金属外，还包括特种金属材料，即指那些具有不同用途的结构和功能金属材料。其中有急冷形成的非晶态、准晶、微晶、纳米晶等金属材料 and 用于隐身、抗氢、超导、形状记忆、耐磨、减振阻尼等的金属材料。

## 二、无机非金属材料 (inorganic nonmetallic materials)

以某些元素的氧化物、碳化物、氮化物、卤素化合物、硼化物以及硅酸盐、铝酸盐、磷酸盐、硼酸盐等物质组成的材料。无机非金属材料是20世纪40年代以后，随着现代科学技术的发展从传统的硅酸盐材料演变而来的。目前已与金属材料、高分子材料一起并列为经济建设的三大材料。

无机非金属材料就其组成物质的形态、性质可分为单晶体（各种宝石、工业用矿物晶体、人工合成晶体等）、多晶体（陶瓷、水泥、废渣、粉煤灰、烧结矿等），以及非晶质体（玻璃）等三类物质状态。实际上许多已开发使用的材料属于复杂的物质状态和复杂体系，其组成既可以有晶体，同时亦可有非晶质体存在。欧美把无机非金属材料统称为陶瓷材料 (ceramics materials)。新型无机材料，也有人称之为新型陶瓷或特种陶瓷 (advanced ceramics)。狭义的陶瓷又称传统陶瓷 (traditional ceramic)。前苏联则笼统地称之为无机材料。日本将普通陶瓷统称为“窑业制品”，新型材料又称“精细陶瓷”。

陶瓷是人类应用最早的固体材料，陶瓷坚硬、稳定，可制造工具、用具，在一些特殊情况下可作结构材料。陶瓷材料就化学组成而言是一种或多种金属与一种非金属元素（通常为氧）组成的化合物，其中较大的氧原子为陶瓷的基质，较