



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 材料概论

第二版

周达飞 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 材料概论

第二版

周达飞 主编



化学工业出版社

·北京·

本书是在教育部面向 21 世纪高等工程教育内容和课程体系改革计划《材料类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究》基础上编写的材料类专业基础课教材之一。

本书为第二版，在原著的基础上作了精心修订，主要包括：材料与材料科学；材料的组成、结构与性能；材料的制备方法；材料成型；10 种产品生产过程概述；材料应用；材料与环境；材料比较与选择以及新增的环境友好材料与循环利用。

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，也可作为工程技术人员了解材料、选用材料的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

材料概论/周达飞主编.—2 版.—北京：化学工业出版社，  
2009.2  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-122-04695-6

I. 材… II. 周… 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 (2009) 第 012511 号

---

责任编辑：杨 菁  
责任校对：周梦华

文字编辑：徐雪华  
装帧设计：韩 飞

---

出版发行：化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 装：北京白帆印务有限公司  
787mm×1092mm 1/16 印张 23 字数 617 千字 2009 年 3 月北京第 2 版第 1 次印刷

---

购书咨询：010-64518888 (传真：010-64519686) 售后服务：010-64518899  
网 址：<http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

---

定 价：39.00 元

版权所有 违者必究

## 第二版前言

本书出版以后，受到各方面的欢迎和喜爱。在人类漫长的岁月中，材料总是给人神秘、给人惊奇；从事材料的研究、开发、生产和应用又总是充满诱惑、充满挑战。为了引领刚进大学校门的学子早日步入材料科学与工程殿堂，一些学校在低年级设置了材料概论课，也有一些学校对认识实习进行了改革，不仅时间上提前到一、二年级，而且面向整个材料行业，使学生早接触材料、早了解材料、早熟悉材料，这是其一；随着国民经济、科学技术和国防建设发展的需要，以前面向行业，培养满足本行业工作所需要的材料类人才的培养模式已经无法适应社会需求。培养具有材料科学与工程公共基础知识、材料科学与材料工程相结合的材料类人才，是高等学校材料类专业服务社会、服务国家的己任所在这是其二。

2006年本书又获准列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。于是，我们作了精心修订，在保持原有格局的基础上，根据建设资源节约型社会和可持续发展战略对材料的要求，增加了“环境友好材料与循环利用”一章，以供学生了解材料生产和使用过程中造成的对资源、能源和环境的损害及其对策。

本书各章节的编写者为第1章（周达飞）、第2、3及第5章1~5节、第6章1, 3~5, 8节（宋鹏），第4章、第5章6~10节、第6章2, 6, 7, 9, 10节、第9章（陆冲），第7、8章（励杭泉），全书由周达飞统稿。

编者

2008. 12

# 第一版前言

人类生活在材料世界中。无论是经济活动、科学技术、国防建设，还是人们的衣食住行都离不开材料。材料是人类赖以生存并得以发展的基础和柱石。材料的多样性，决定了其分类的多样性，大处分有金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料；小处分又有黑色金属、有色金属、玻璃、陶瓷、水泥、耐火材料、塑料、橡胶、纤维、涂料、胶黏剂……从应用领域和功能性分则有包装材料、建筑材料、农用材料、电子电器材料、汽车材料、宇航材料、能源材料、生物医用材料、环境工程材料……，以往的专业设置都是建立在这种分类基础上的。

材料的研究和开发正从宏观走向微观；从定性、半定量走向定量；从传统材料转向复合材料、功能材料、智能材料和低维材料。材料生产的节能、省时、低耗、无公害越来越受到人们的关注，环境友好材料（亦称绿色材料，或环保型材料、健康型材料）正向人类走来。

高等学校人才培养有了新的要求。教育应从以往的知识型、职业型、专业型、业务型人才培养模式转向学习型、创业型、复合型、人格型的人才培养模式。培养具有创新能力和创业精神的人才显得尤为重要。创新，是民族的灵魂；创造力是跻身世界强国的根本动力。加强基础、拓宽专业面是材料类专业改革的方向，坚决而又稳妥地加速向材料专业的过渡是当务之急，为此我们提出了构建材料类公共基础课程平台的改革设想，得到了华东理工大学领导和教务部门的支持，并列入学校教改试点。这一设想，也成为教育部面向 21 世纪高等工程教育教学内容和课程体系改革计划中由四川大学牵头，北京化工大学、华东理工大学、东北大学、武汉工业大学主持，东华大学、吉林工业大学参加的《材料类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究》项目组的共识，决定编写三本材料类专业教材，《材料概论》正是其中之一，并确定该教材由华东理工大学主编，北京化工大学参编，教育部批准列入面向 21 世纪课程教材。

本书编写中，力求从材料的四大要素——制备（合成与加工）、结构与性能、性质和应用性能出发，阐释三大材料（金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料），力求使学生从材料的四大要素出发，去认识和理解材料科学与工程中的问题，使学生建立大材料的概念，为材料的研究与开发、选择和使用打下坚实的基础。为此，在“材料的组成、结构与性能”、“原材料选用”、“制造工艺过程与方法”、“材料成型”章节中，都力求表现它们的共性。然而，材料是具体品种组成的，也为配合认识实习，安排了“十种产品生产过程概述”一章，并设置了“材料应用”和“材料比较与选择”，以利学生在学习具体材料（个性）的基础上，做到举一反三，更深刻地了解各种材料的共同之处，了解材料开发和应用上的相互借鉴、相互替代、相互补充。环境问题已经引起了全人类的关注，材料在改造自然、美化环境上建立丰功伟业的同时，也对环境造成了严重影响，且也会受环境影响发生劣化，为此设立了“材料与环境”一章，并在其他章节有所述及。

本书由周达飞、宋鹞、陆冲（华东理工大学），励杭泉（北京化工大学）编写，各章节的编写者第 1 章为周达飞，第 2、3 章及第 5 章 1~5 节、第 6 章 1、3~5、8 节为宋鹞，第 4

章、第5章6~10节、第6章2、6、7、9、10节为陆冲，第7、8章为励杭泉，全书由周达飞主编，宋鹂、陆冲为副主编，东华大学沈新元教授主审。

本书的编写，是一种尝试。囿于我们的专业范围和知识水平，错误在所难免，祈望读者指正，以利修订。同时，对教育部领导，对支持编写的华东理工大学、北京化工大学以及四川大学、东北大学、武汉工业大学、东华大学、吉林工业大学的领导、同仁表示深切的谢意。

**编者**  
**2000年5月**

# 目 录

<b>第 1 章 材料与材料科学</b> .....	1
1.1 材料的地位、作用与发展 .....	1
1.2 材料的定义和分类 .....	5
1.3 材料的要素 .....	7
1.4 材料科学与工程的发展趋势 .....	11
<b>第 2 章 材料的组成、结构与性能</b> .....	13
2.1 材料的组成 .....	13
2.1.1 材料组元的结合形式 .....	13
2.1.2 材料的化学组成 .....	15
2.2 材料的结构 .....	19
2.2.1 材料中的化学键合 .....	20
2.2.2 晶体结构基础 .....	23
2.2.3 材料的结构 .....	26
2.3 材料的性能 .....	33
2.3.1 化学性能 .....	34
2.3.2 力学性能 .....	37
2.3.3 热学性能 .....	41
2.3.4 电性能 .....	44
2.3.5 光学性能 .....	48
2.3.6 磁性 .....	49
<b>第 3 章 材料的制备方法</b> .....	51
3.1 原材料的选用与合成 .....	51
3.1.1 天然矿物原料 .....	51
3.1.2 无机合成原料 .....	59
3.1.3 天然高分子化合物 .....	63
3.1.4 有机合成原料 .....	64
3.2 工艺过程与方法 .....	74
3.2.1 气相法 .....	74
3.2.2 液相法 .....	83
3.2.3 固相法 .....	91
<b>第 4 章 材料成型</b> .....	97
4.1 材料的成型加工 .....	97
4.1.1 成型方法 .....	97
4.1.2 加工方法 .....	98
4.1.3 材料成型特性 .....	98
4.2 自由流动成型 .....	99
4.2.1 金属砂型铸造 .....	99
4.2.2 橡胶浸渍成型 .....	101
4.2.3 陶瓷注浆成型 .....	103
4.3 受力流动成型 .....	107
4.3.1 塑料注塑成型 .....	107
4.3.2 玻璃吹制成型 .....	109
4.4 受力塑性成型 .....	111
4.4.1 金属锻造 .....	112
4.4.2 陶瓷挤压成型 .....	116
4.4.3 橡胶压出成型 .....	118
<b>第 5 章 10 种产品生产过程概述</b> .....	121
5.1 玻璃的生产 .....	121
5.1.1 玻璃的分类与发展历史 .....	121
5.1.2 玻璃的生产工艺 .....	126
5.2 陶瓷的生产 .....	132
5.2.1 陶瓷的概念与分类及发展历史 .....	132
5.2.2 普通陶瓷的基本制备工艺 .....	137
5.2.3 特种陶瓷生产的基本工艺过程 .....	144
5.3 水泥的生产 .....	147
5.3.1 水泥的发展历史及其分类 .....	147
5.3.2 水泥的组成 .....	148
5.3.3 原料 .....	151
5.3.4 水泥的生产方法 .....	152
5.3.5 水泥生产工艺流程 .....	153
5.3.6 生料的制备 .....	153
5.3.7 熟料的煅烧 .....	156
5.3.8 水泥的粉磨和包装 .....	159
5.3.9 水泥生产与环境的关系 .....	160
5.4 黑色金属的生产 .....	160
5.4.1 黑色金属的概况 .....	160
5.4.2 炼铁的主要原料 .....	166
5.4.3 高炉炼铁工艺流程与基本原理 .....	167
5.4.4 钢冶炼概述 .....	170
5.5 有色金属的生产 .....	176

5.5.1	有色金属的概述	176	6.4.5	光功能材料	246
5.5.2	有色金属与人类文明	179	6.4.6	形状记忆材料	248
5.5.3	冶金和冶金方法简介	179	6.4.7	梯度功能材料	249
5.5.4	铜的冶炼	181	6.5	生物材料	250
5.5.5	铝及铝合金的冶炼	183	6.5.1	生物无机非金属材料	250
5.6	合成丁苯橡胶及橡胶轮胎的 生产	186	6.5.2	生物高分子材料	251
5.6.1	概述	186	6.5.3	生物金属材料	253
5.6.2	合成丁苯橡胶的生产	187	6.5.4	生物复合材料	253
5.6.3	橡胶轮胎的生产	191	6.5.6	放射线治疗癌用和温热治疗 癌用的玻璃	254
5.7	聚乙烯及聚乙烯薄膜生产	195	6.6	化工材料	254
5.7.1	聚乙烯树脂生产	196	6.6.1	化工设备对材料的一般 要求	254
5.7.2	聚乙烯薄膜生产	204	6.6.2	金属材料的使用	258
5.8	聚氯乙烯及聚氯乙烯电缆料 生产	205	6.6.3	无机非金属材料的使用	260
5.8.1	聚氯乙烯树脂生产	206	6.6.4	高分子材料的使用	261
5.8.2	聚氯乙烯电缆料生产	209	6.7	农用材料	263
5.9	聚丙烯腈纤维的生产	211	6.7.1	在田间作业上的应用	263
5.9.1	合成纤维的概述	212	6.7.2	在农田排灌上的应用	265
5.9.2	聚丙烯腈纤维生产	213	6.7.3	在农业机械上的应用	265
5.10	环氧树脂及其玻璃钢的生产	215	6.8	纳米材料	265
5.10.1	环氧树脂生产	215	6.8.1	纳米材料的制备方法	266
5.10.2	玻璃钢生产	217	6.8.2	纳米材料的性质和应用	267
<b>第6章</b>	<b>材料应用</b>	221	6.9	复合材料	269
6.1	结构材料	221	6.9.1	复合材料组成、分类和 特点	270
6.1.1	高温结构材料	221	6.9.2	复合材料增强体	272
6.1.2	超硬结构材料	224	6.9.3	复合材料基体	273
6.1.3	高强高韧结构材料	225	6.9.4	复合材料应用	274
6.2	包装材料	227	6.10	其他材料	274
6.2.1	玻璃陶瓷包装	228	6.10.1	汽车材料	275
6.2.2	金属包装	230	6.10.2	电子电器与信息材料	276
6.2.3	塑料包装	233	6.10.3	机械材料	278
6.3	建筑材料	235	6.10.4	航天航空材料	280
6.3.1	概述	235	6.10.5	船舶材料	281
6.3.2	墙体材料	235	6.10.6	日常生活及办公用品 材料	282
6.3.3	防水密封材料	236	<b>第7章</b>	<b>材料与环境</b>	283
6.3.4	保温隔热材料	238	7.1	金属材料的腐蚀与防护	283
6.3.5	装饰装修材料	238	7.1.1	电化学作用	283
6.3.6	水泥及混凝土材料	239	7.1.2	影响腐蚀的因素	284
6.4	功能材料	240	7.1.3	腐蚀的类型	286
6.4.1	电功能材料	240	7.1.4	腐蚀的防护	290
6.4.2	磁功能材料	243	7.2	其他材料与环境的相互作用	292
6.4.3	智能材料	244			
6.4.4	敏感材料	245			



7.2.1	高分子材料的环境劣化	292	9.1.1	21世纪人类面临3大 问题	305
7.2.2	环境与废弃高分子材料	294	9.1.2	我国当前环境、资源状况	315
7.2.3	陶瓷的环境劣化	295	9.1.3	材料与环境污染	317
<b>第8章</b>	<b>比较与选择</b>	297	9.1.4	发展循环产业解决环境污染与 资源枯竭	318
8.1	概述	297	9.2	生态环境材料	321
8.2	性能比较	298	9.2.1	金属类生态环境材料	322
8.2.1	使用温度	298	9.2.2	无机非金属类生态环境 材料	330
8.2.2	强度	298	9.2.3	高分子类生态环境材料	336
8.2.3	延展性	298	9.3	资源循环利用	342
8.2.4	韧性	298	9.3.1	金属材料再生	344
8.2.5	弹性模量	301	9.3.2	无机非金属材料再生	350
8.2.6	物理性质	301	9.3.3	高分子材料再生	354
8.3	其他选择标准	301	参考文献		357
8.4	材料的未来	303			
<b>第9章</b>	<b>生态环境材料与资源循环 利用</b>	305			
9.1	环境、资源与污染	305			

# 第1章

## 材料与材料科学

### 1.1 材料的地位、作用与发展

材料是人类文明的里程碑，是人类赖以生存和得以发展的重要物质基础。正是材料的使用、发现和发明，才使人类在与自然界的斗争中，走出混沌蒙昧的时代，发展到科学技术高度发达的今天。因此，在材料学家看来，人类的文明史就是材料的发展史，并往往以不同特征的材料划分人类不同的历史时期，诸如石器时代、青铜器时代、铁器时代、高分子材料和硅材料时代……

石器时代又可以分为旧石器时代和新石器时代，这是一个极其漫长的历史时期，大致可以追溯到 250 万年前。从树上下到地面、开始直立行走的人类祖先，为了生存抵御猛兽袭击和猎取食物，逐渐学会使用天然的材料——木棒、石块等。然而，这种纯天然的材料，使用起来并不得心应手，也不够犀利。于是，先民们开始人工打制石器——石矢、石刀、石铲、石凿、石斧、石球等。打制石器用的材料大多数是石英石，少部分是燧石（俗称火石）。燧石是一种发火材料，猛烈敲击能发出火星，引燃枯草、树叶、树皮、树枝等可燃物质。燧石的使用，是人类文明的一个重要里程碑。在此之前，人类不会自己生火，无法驾驭火。每当黑暗来临，先民们只能在野兽的嗥叫声中渡过漫漫长夜，恐惧地等待着太阳的升起。学会了人工取火，结束了人类茹毛饮血的生活。熟食是人类的一大进步。

旧石器是利用一块较硬的石头砍砸另一块较软的石头打击而成，所以称砍砸器，其形状既不规则，又不固定，加工十分粗糙。但不管怎么说，这是人类制造的第一种原始材料。这段时期，大约一直延续到 1 万年前。1998 年，我国安徽繁昌县人字洞发现了众多的石制品和骨制品，据初步测定，估计距今约 200 万~240 万年，是目前欧亚大陆发现最早的文化遗存；1954 年，山西襄汾县发掘的 26400 年前的丁村遗址，发现了一大批人工打制的 200~1500g 左右的石球；1954~1957 年间在西安市半坡村，对公元前 4800~前 4300 年新石器时代遗址考古时，又发现了 240 件石球和 227 件陶制弹丸，都是证明。人工打制的石球，光滑、缺棱少角，飞行时阻力小、速度快、命中率高，用其狩猎，打得又快又准。

新石器时代开始于 1 万年前。其标志是：打制的石器更加精美、陶和玉器工艺品的出现、用石头和砖瓦做建筑材料。如：湖北屈家岭文化出土的距今约 5000 年的精细石铲、圭形石凿，还有钻了孔的石斧等，在钻孔中装上木柄，使用更方便。

随着火的利用，将黏土捏成各种形状，放在火中可烧成各种土器。先民们在枝条编织的容器上，涂抹泥土，用火烧制成最原始的陶器。陶是人类第一个人工制成的合成材料。陶的出现，为保存、储藏粮食提供了可能，标志着人类从游猎生活进入农牧生活。江西万年县出土的距今 1 万多年前的残陶碎片，提供了直接的证据。西安城外骊山脚下，被誉为“世界第八大奇迹”、在地下历经两千余年、重现“秦王扫六合”的兵马俑所展示的庞大军阵，是我国古代陶文化的奇葩。在制陶的同时，先民们发现为使陶器更精美，可在陶器上挂釉。并意外地发现了玻璃。公元前 7000 多年埃及古代遗址中出土的青色玻璃球，标志着人类已学会玻璃的制造。玻璃，迄今仍极大地丰富着人类的生活。

在新石器时代，先民们用石头做建筑材料，用土制作砖瓦。早在1万年前，人类已学会使用稻草作增强材料，掺入黏土中，用太阳晒干制砖，以后又学会了火烧制砖。利用石头和砖瓦，先民们制造了辉煌的历史，如被誉为古代世界七大奇迹的埃及金字塔、巴比伦空中花园、古希腊奥林匹亚的宙斯神庙、埃及亚历山大城的灯塔、小亚西亚埃弗兹城的月亮女神庙和摩索拉斯陵墓、地中海罗得岛上的太阳神巨像。尽管它们中的绝大部分已湮没在浩瀚的历史长河中，但金字塔、狮身人面像几千年来傲视人间，吸引了无数考古学家和一批又一批游览者，令人折服。

水泥是无机材料中使用量最大，对人类生活影响最显著的建筑材料和工程材料，在水的作用下，它可与砂、石等材料形成坚硬的石状体（混凝土），是人工的石头（“砼”）。早在2000多年前，希腊和古罗马人就将石灰和火山灰的混合物作建筑材料，这是最早应用的水泥。今日，它已发展成庞大的家族，是建房修桥筑路等领域的顶梁柱，有石材不可替代的优越性。

中国是玉器的故乡。玉器出现于新石器的中晚期，以浙江良渚文化、内蒙古红山文化等为代表，既作精美的装饰物，也是权利的象征。玉璋、玉璧、玉圭、玉环、玉珏、玉琮、玉刀、玉戈、玉雕人像、玉雕动物，千姿百态，栩栩如生。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年河北满城山中山王刘胜墓出土的“金缕玉衣”更是举世闻名，玉衣是用2498块玉、1.1kg金丝穿起来的，全长1.88m。

必须指出：有些考古学家认为，在石器时代之前，应有一个木器时代，因为来到地面的猿人，首先能得到并能使用的显然是棍、棒之类木质工具，只可惜有机质难于保存下来，无法得到明证；而在新石器时代和青铜器时代之间，我国还存在一个玉器时代。

在人类历史上，有过一个辉煌灿烂的青铜器时代。考古表明，青铜文明的源头在古代中国、美索不达米亚平原和埃及等。早在公元前8000年，先民们已发现并利用天然铜块制作铜兵器和铜工具。到公元前5000年已逐渐学会用铜矿石炼铜。考古发现，我国湖北大冶铜绿山古铜矿遗址早在3600年前的殷商时期就开始开采铜矿石，从矿区四周40万吨炼铜废渣推算，我国古代先民们在此取走了10万吨铜。因此，铜是人类获得的第二种人造材料。铜（Cu）的英文名称是由当时炼铜较出名的塞浦路斯（拉丁语 cuprus）演变而来的。随着时间的推移，先民们发现，在铜中加入部分锡，可使原来较软的铜制品变得更坚韧、更耐磨。青铜——铜锡合金，这是最原始的合金，也是人类历史上发明的第一个合金。我国商代青铜器已经盛行，并将青铜器的冶炼和铸造技术推向了世界的顶峰。我国先民们的贡献可以说是全方位的，他们已掌握了冶炼六种不同铜、锡比例的青铜技术，其配比之精确与现代研究基本一致。并且知道含锡量 $1/6$ 的青铜韧性较好，可作钟鼎；而含锡量 $2/5$ 的青铜较硬，可作刀斧（用今日的话讲，先民们已掌握了组成与性能的关系）。不仅如此，他们还为我们留下了一批精妙绝伦、震撼世界的杰作，如：高133cm、质量832.84kg商代文丁时期的遗物——司母戊方鼎，秦始皇陵墓陪葬坑新近出土的212kg的秦王鼎，湖北江陵望山一号楚墓出土的越王勾践用剑，徐州狮子山楚王陵出土的铜戟，西安秦始皇陵墓陪葬坑出土的铜剑（此剑发现时已被压在其上面的质量200kg的陶俑压弯，当抬走陶俑后，剑身竟不可思议地反弹平直了）和由8马2车2俑组成的质量达1061kg的铜马车。这些剑、戟铸造精美，虽深埋地下2000余年，但仍寒光闪闪、锋利如初，十几层厚的纸被其轻轻一划，竟一裂为二；四川广汉三星堆出土的世界上年代最久远、树枝最高最大、形象神奇多彩、高约4m的青铜神树，高2.6m的青铜立人、青铜人头像和青铜面具等，更令世人惊叹；湖北随州市曾侯乙墓出土的计64件、2500余千克的古代乐器——铜编钟，其音域之宽广堪与现代乐器媲美。1999年7月1日香港回归的庆典上，用其演奏的《交响乐1997》，更是海内外轰动。

远古时代，先民们已经使用陨铁制作武器或其他器物。河北藁城出土的商代中晚期铜钺刀口就是陨铁加热锻打而成的。陨铁来自天外，数量有限，只有当发明了从铁矿石中冶炼铁时，铁器时代来临了。小亚细亚的赫梯人约在公元前1400年开始了人工炼铁。我国在甘肃灵台的一座春秋

早期墓葬中出土了一把铜柄铁剑，再加上干将莫邪铸剑的传说和湖北大冶铜绿山古铜矿遗址一处战国时期矿井内发现的宽40cm、长60cm、质量32kg的铁斧以及铁锤、铁砧、铁锄等，可以认为我国也是较早掌握炼铁术的国家之一，且很长一段时间里都处于世界冶金技术的前列。建于宋代嘉祐六年（1061年）的湖北当阳玉泉寺山门外的砖身铁塔，高17.9m，由质量为38300kg的44块铸件组成，其拼装得天衣无缝、浑然一体，铸造技术之高超令人叫绝。尽管当阳铁塔不如高300m、质量9000t的法国巴黎艾菲尔铁塔闻名，但毕竟比其早了800多年。

炼铁技术和制造技术的发展，开创了人类文明的新时代。以蒸汽机发明为起点，近200年来，人类经历了四次技术革命。新的技术革命一次比一次迅猛、对人类的影响也一次比一次深远，进入20世纪，人类科学技术发明和创造之和超过了以往2000年的总和。

蒸汽机的发明，是人类文明史上又一重要里程碑。第一台蒸汽机出现于英国达德利城堡，时间为1712年，由铁匠纽可门和集铅管匠、釉匠和锡匠于一身的卡利制造，用于煤矿排除积水。然而，其效率极低，只利用了热量的1%。1777年苏格兰格拉斯哥大学机匠瓦特对蒸汽机作了重大改进，热量利用效率大大改善。从此，蒸汽机的普及走上了坦途。

第一次技术革命发端于18世纪后期，以蒸汽机的发明及广泛应用为主要标志，实现了高炉、转炉、平炉制造优质钢材的工业化。由此引发的纺织工业、冶金工业、机械工业、造船工业等的工业大革命，是这次技术革命的产物，使人类从手工工艺时期跃进到机器工业时代，开创了工业社会的文明。

第二次技术革命开始于19世纪末，以电的发明和广泛应用为标志，由于远距离送电材料以及通信、照明用的各种材料的工业化，实现了电气化。其结果是石油开采、钢铁冶炼、化工、飞机工业、电气工业、电报电话等迅猛发展，组成了现代产业群，使人类跨进了一个新的时代，实现了向现代社会的转变，促进了国际关系的最终形成。

第三次技术革命始于20世纪中期，以原子能应用为主要标志。1942年12月，意大利物理学家费米在美国建立了第一个核反应堆，实现了控制核裂变，使核能利用有了可能，实现了合成材料、半导体材料等大规模工业化、民用化，把工业文明推到顶点，开启了通向信息社会文明的大门。

20世纪70年代开始，人类进入了一个新的阶段——第四次技术革命，它是以计算机，特别是微电子技术、生物工程技术 and 空间技术为主要标志，新型材料、新能源、生物工程、航天工业、海洋开发等新兴技术是主攻方向。1946年世界第一台电子计算机诞生，用18000个电子管，总质量30余吨，占地180平方米，运算速度为每秒5000次，比人工运算快1000至数千倍。今天，用大规模集成电路制成的台式个人计算机每秒可运算4.5亿次。目前世界上最快的计算机每秒运算速度为1000万亿次的超级电脑。人类实现了DNA的人工合成和“克隆”技术，登上了月球、火星，实现了遨游太空。这是人类历史上规模最大和最深刻的一次革命，它对国际关系已经并将继续产生极其深远的影响。

在相当一段时间里，金属有过辉煌的地位，直到20世纪50年代，以钢铁为代表的金属材料仍居统治地位。随着无机非金属材料（尤其是特种陶瓷和硅材料）、高分子材料及先进复合材料的出现和发展，钢铁老大的地位受到了挑战。高分子材料在今天发挥的作用越来越大，从1909年第一个人工合成的酚醛塑料算起，至今还不足100年。然而，90年代初塑料产量已逾1亿吨，按体积计，已超过钢铁产量。因此，人们往往将这段时期称为高分子材料时代。从年增长率看，塑料也远远大于钢铁，例如，20世纪40年代到80年代四十年间，平均年增长率塑料为13.6%，钢为5.7%，木材为1.6%，水泥为6.4%，塑料的年增长率分别为钢、木材和水泥的2.4倍、8.5倍和2.1倍。因此，现在已经以塑钢比替代以往用钢产量衡量一个国家综合实力的统计方法。例如美国的塑钢比约在40%上下，我国的塑钢比在15%左右。值得一提的是：得益于晶体硅制造技术的进步，计算机极大普及，因特网走

进千家万户人类社会发生了深刻的变化。因此，这段时期亦称为硅材料材料时代。

汽车工业是一个国家的支柱产业。1885年，世界上第一辆汽车驶上街头，1908年美国福特发明了T型汽车，随后又实现了汽车生产工艺的重大突破——汽车部件标准化和生产装配流水线化作业。汽车制造业已成为一个大型的、综合性的加工产业，汽车工业带动并促进了相关工业（如冶金、石油化工、机械、电子电器、轻工、纺织等）和相关社会服务行业（如交通运输、石油、保险、维修、商业等）的发展，其经济效益和社会效益十分巨大。就材料而言，汽车工业涉及11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、工具和模具、金属基复合材料，仅美国每年消耗的材料就在6000万吨上下，真可谓“牵一发动全身”。从汽车本身而言，节能、安全、轻质、高速、舒适、美观是其追求的目标。汽车塑料件在20世纪60年代已开始实用化，首先采用的是以安全为目的的内饰件（通用塑料为主）；70年代后期发展到以安全、节能为目的的外装件（以工程塑料和复合材料为主）；80年代以后向节能、安全为目的的功能件发展（以工程塑料合金，尤其是高性能塑料和复合材料为主）。塑料件在轿车上的用量已接近120kg。汽车上的原材料结构组成比也发生了较大的变化，如表1-1所示。

表 1-1 普通、小型乘用车的原材料构成比例

单位：%

原材料		1973年	1977年	1980年	1983年	1986年	1989年	1992年	1997年
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
	铅合金	0.6	0.6	0.8	0.9	1.2	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
	PF	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
非金属材料	PUR	0.5	0.5	0.8	0.9	1.2	1.0	1.1	0.9
	PVC	0.9	1.1	1.4	1.7	1.7	1.6	1.1	1.1
	PE	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.4
	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

由表1-1可知，随着安全、节能要求的提高，原材料构成比例发生了变化，黑色金属（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，在塑料中PP和高性能塑料的比例增加，而PVC和ABS塑料的比例在下降。汽车工业节能（节省资源消耗节省能源消耗）高效、替代燃料的呼声日益高涨，可以预期，一场新的汽车技术革命即将出现。

由上述我们不难看出，材料在人类发展中有不可替代的作用和地位。人们往往用材料的发展和应用水平，来衡量一个国家国力的强弱、科学技术的进步程度和人们生活水准的高

低。材料，过去是、今天是，将来也必然是一切科学技术、尤其是高新技术发展的先导和柱石。随着科学技术的发展，对材料的需求也不断发生变化，新的材料不断出现，新的构成发生极大的变化。表 1-2 所示为美国八个重要工业部门对材料的要求。

表 1-2 美国八个工业部门对材料的要求

所需特性	航空航天	汽车	生物材料	化工	电子	能源	金属	通讯
质轻高强	√	√	√					
耐高温	√			√		√	√	
耐腐蚀	√	√	√	√		√	√	
迅速开关					√	√		√
高效加工	√	√	√	√	√	√	√	√
近无余量成形	√	√	√	√	√	√	√	√
材料回收		√		√			√	
预测使用寿命	√	√	√	√	√	√	√	√
预测物理性能	√	√	√	√	√	√	√	√
材料数据库	√	√	√	√	√	√	√	√

高新技术的发展，均一材质的材料往往已无法满足要求，复合材料应运而生。在欧美等国家，轿车上复合材料已超过 50kg，法拉利等高级跑车、全塑汽车等的车身是以复合材料制作的。在航空航天工业中，减轻自重可以使火箭、卫星、导弹等飞得更高、更远。譬如，人造卫星质量每减少 1kg，就可使运载火箭减轻 500kg。喷气发动机每减轻 1kg，飞机可减轻 4kg，升限可提高 10m；而其工作温度每提高 100℃，推动力就可提高 15%。使用碳-碳复合材料的火箭与全金属材料相比，其射程可远 950km。因此，有人认为 21 世纪是复合材料的时代。

## 1.2 材料的定义和分类

可以用多种不同的表述方式来定义材料。譬如，材料是用来制造器件的物质；材料是经过工业加工的采掘工业、农业的劳动对象等。但不管怎么说，所谓材料必须具备如下几个要点：

(1) 一定的组成和配比 制品的使用性能主要取决于组成的化学物质（主要成分）及各成分（主要成分与次要成分）之间的配比，其中制品的力学性能、热性能、电性能、耐腐蚀性能、耐候性等为组成该制品的主要成分所支配，而次要成分则用来改善其加工性能、使用性能或赋予某种特殊性能。次要成分包括熔制或合成时的助剂和加工时用的助剂。

(2) 成型加工性 作为制品应具有一定的形状和结构特征，形状和结构特征是通过成型加工获得的。因此，作为材料必须具备在一定温度和一定压力下可对其进行成型加工，并塑制成某种形状的能力。成型加工过程会影响混合程度、颗粒大小和分布、结晶能力、结晶形态、结晶的性能和取向程度等，从而影响了制品最终性能。所以，我们可以通过成型加工赋予制品一定的形状，也可以赋予制品所需的性能。成型加工包括熔融状态下的一次加工和冷却后车、钳、刨、削等的二次加工性。通常亦将一次加工称成型，二次加工称加工。不具备成型加工性，就不能成为有用的材料。

(3) 形状保持性 任何制品都是以一定的形状出现，并在该形状下使用。因此，应有在使用条件下，保持既定形状、并可供实际使用的能力。即性能/价格比要高。

(4) 经济性 制得的制品应质优价廉，富有竞争性，必须在经济上乐于为社会和人们接受。

(5) 回收和再生性 这是作为绿色产品、符合人类持续发展战略和建设资源节约型社会所必须的，并应满足已经确定的社会规范、法律等。作为一种绿色产品，其原料生产过程、生产过程、施工过程、使用过程和废弃物的处理过程等五个环节，都应对维护健康、保护环

环境负责。然而，要完全满足五个环节的绿色产品，事实上是不存在的，更确切的说法应为环保型产品或健康型产品。随着资源的枯竭、环境的破坏，对材料制品的回收并再利用，是必须的。这是材料的开发者，在研究中必须首先加以注意并考虑的。严重污染环境、不能回收再生的制品，一开始就不应生产。

所以，材料可以这样来表述：材料是由一种化学物质为主要成分、并添加一定的助剂作为次要成分所组成的，可以在一定温度和一定压力下使之熔融，并在模具中塑制成一定形状（在某些特定的场合，也包括通过溶液、乳液、溶胶-凝胶等形成的成型），冷却后在室温下能保持既定形状，并可在一定条件下使用的制品，其生产过程必须实现最高的生产率、最低的原材料成本和能耗，最少地产生废物和环境污染物，并且其废弃物可以回收、再利用。

材料的分类方法很多，通常是按组成、结构特点进行分类：金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料（常称高分子材料）和复合材料，每一类又可分为若干大类，如图 1-1 所示。

其实，这种分类方法是相当粗糙的，例如钢铁是钢和铁等黑色金属的总称，它们的区别主要在于含碳量（见图 1-1），而钢又可分为碳素钢、合金钢、特种钢等。组成不同，性能

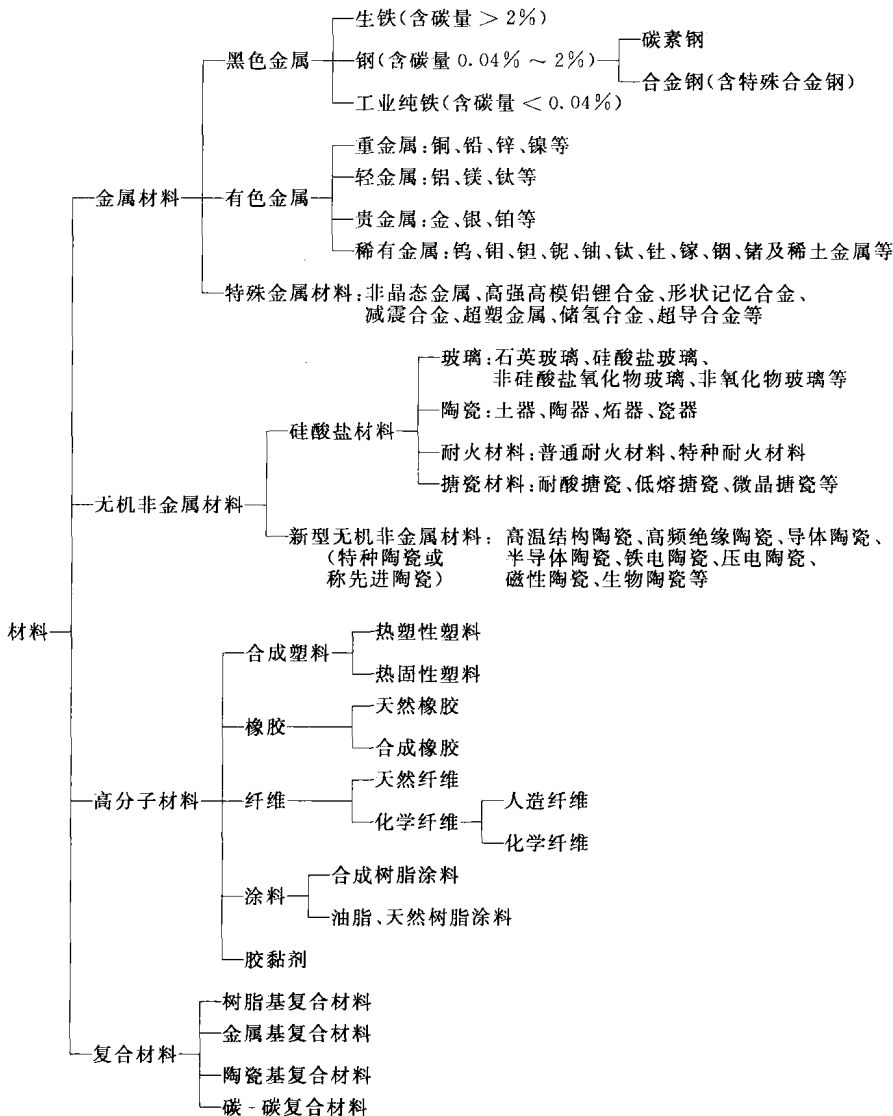


图 1-1 材料的分类

差异很大，生铁质硬而脆，杂质含量较大；钢的力学性能和工艺性能优于生铁，且杂质含量较低，金属元素的加入，改变了钢的组成和结构，使其获得不同的特性；工业纯铁则软而韧。

通常，也将材料分为传统材料和新型材料。其实，两者并无严格区别，它们是互相依存、互相促进、互相转化、互相替代的关系。传统材料的特征为：需求量大、生产规模大，但环境污染严重；而新型材料是建立在新思路、新概念、新工艺、新检测技术的基础上，以材料的优异性能、高品质、高稳定性参与竞争，属高新技术的一部分。其特征是：投资强度较高、更新换代快、风险性大、知识和技术密集程度高，一旦成功，回报率也较高，且不以规模取胜。

如以使用性能分类，则主要利用材料的力学性能的称结构材料；而主要利用材料的物理和化学性能的则称功能材料。

也可以用途进行分类，如航天航空材料、信息材料、电子材料、能源材料、生物材料、建筑材料、包装材料、电工电器材料、机械材料、农用材料、日用品及办公用品材料等。

### 1.3 材料的要素

据统计，人类已经发现的材料达 800 余万种，每年还以 25 万种的速度增长着，具有实际工业价值的也有 8 万余种。材料的种类繁多，性能千差万别，应用领域又十分广泛。表 1-3 为各种材料的主要物性。由表可知，通常情况下，几种材料的比较为：

表 1-3 各种材料的主要物性

性 能	金 属		塑 料		无机材料	
	钢铁	铝	聚丙烯	玻璃纤维增强尼龙-6	陶瓷	玻璃
熔点/°C	1535	660	175	215	2050	
密度/(g/cm <sup>3</sup> )	7.8	2.7	0.9	1.4	4.0	2.6
拉伸强度/MPa	460	80~280	35	150	120	90
比拉伸强度(拉伸强度/密度)	59	30~104	39	107	30	35
拉伸模量/GPa	210	70	1.3	10	390	70
热变形温度/°C	—	—	60	120	—	—
膨胀系数/ $\times 10^{-5} K^{-1}$	1.3	2.4	8~10	2~3	0.85	0.9
传热系数/[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	0.40	2.0	0.0011	0.0024	0.017	0.0083
韧性 <sup>①</sup>	√	√	—	√	×	×
体积电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$	$10^{-5}$	$3 \times 10^{-6}$	$>10^{16}$	$5 \times 10^{11}$	$7 \times 10^4$	$10^{12}$
燃烧性	不燃	不燃	燃烧	难燃	不燃	不燃

① “√” —优；“—” —良；“×” —差。

密度：钢铁>陶瓷>铝>玻璃纤维增强复合材料>塑料（由大到小）

耐热性：陶瓷>钢铁>铝>玻璃纤维增强复合材料>塑料（由高到低）

拉伸强度：钢铁>玻璃纤维增强复合材料>铝≈陶瓷>玻璃>塑料（由大到小）

比拉伸强度：玻璃纤维增强复合材料>铝>钢铁>塑料>玻璃>陶瓷（由高到低）

韧性：钢铁≈铝≈玻璃纤维增强复合材料>塑料>陶瓷≈玻璃（由强到弱）

导热性：铝>钢铁>陶瓷>玻璃>玻璃纤维增强复合材料>塑料（由高到低）

线膨胀率：塑料>铝≈玻璃纤维增强复合材料>钢铁>玻璃≈陶瓷（由大到小）

导电性：铝>钢铁>陶瓷>玻璃纤维增强复合材料>玻璃>塑料（由大到小）



因此，粗看起来，似乎各种材料各具特性，相互间差异很大，并无多少共同之处。

在相当长一段时间内，材料科学与工程的研究主要集中在结构与性能的关系上，关注的是使用过程中固有的性能（即宏观性能），如物理性能、力学性能、热性能、光学性能、电性能、透气性能、耐化学药品性能、耐候性能、长期使用性能、燃烧性能等。然而，随着科学技术的发展和对材料科学与工程关键问题认识的日益深化，材料研究已深入到分子、原子、电子的微观尺度研究化学结构与分子结构，如核外电子层排列方式、原子间的结合力、化学组成与结构、立体规整性、支链、侧基、交联程度、晶体结构、链形态等。人们发现，每当一种材料被创造、发现和生产出来时，该材料所表现出来的性质和现象是人们关心的中心问题，而材料的性质和现象取决于成分和各种层次上的结构，材料的结构又是合成和加工的结果，最终得到的材料制品必须能够、并且以经济和社会可以接受的方式完成某一指定的任务。因而，无论哪种材料都包括了四个要素，即：

性质和现象赋予了材料的价值和应用性；

使用性能是材料在使用条件下应用性能的度量；

结构和成分包括了决定材料性质和使用性能的原子类型和排列方式；

合成和加工实现了特定原子排列。

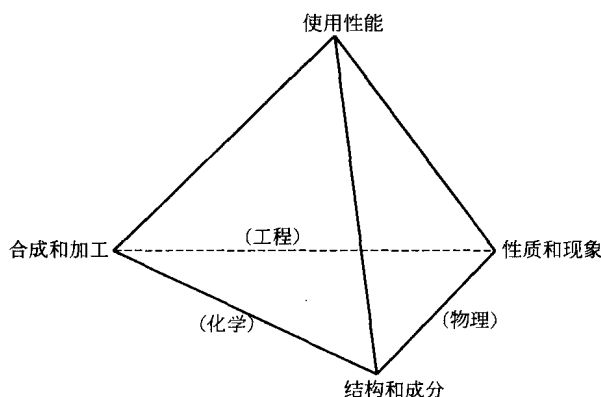


图 1-2 材料科学与工程的四个要素

图 1-2 所示为材料四个要素之间的关系。四个要素反映了材料科学与工程研究中的共性问题，其中合成和加工、使用性能是两个普遍的关键要素，正是在这四个要素上，各种材料相互借鉴、相互补充、相互渗透。抓住了这四个要素，就抓住了材料科学与工程研究的本质。而各种材料，其特征所在，反映了该种材料与众不同的个性。如果我们这样去认识，则许多长期困扰材料科技工作者的问题都将迎刃而解。我们可以依据这四个基本要素

评估材料研究中的机遇，以新的或更有效的方式研制和生产材料，判断这四个要素的相对重要性，而不必拘泥于材料类别、功用或从基础研究到工程化过程中所处的地位；同时，也使材料科技工作者可以识别和跟踪材料科学与工程研究的主要发展趋势。

(1) 性质 性能是材料功能特性和效用（如电、磁、光、热、力学等性质）的定量度量和描述。任何一种材料都有其特征的性能和应用。例如，金属材料具有刚性和硬度，可以用作各种结构件；它也具有延性，可以加工成导电或受力用线材；一些特种合金，如不锈钢、形状记忆合金、超导合金等，可以用作耐腐蚀材料、智能材料和超导材料等。陶瓷有很高的熔点、高的强度和化学惰性，可用作高温发动机和金属切削刀具等；而具有压电、介电、电导、半导体、磁学、机械等特性的特种陶瓷，在相应的领域发挥作用；但陶瓷的脆性则限制了它的应用。开发具有高延伸率的韧性陶瓷成了材料科技工作者追求的目标。利用金刚石的耀度和透明性，可制成光灿夺目的宝石和高性能光学涂层；而利用其硬度和导热性，可用作切削工具和传导材料。高分子材料以其各种独特的性能使其在各种不同的产品上发挥作用，如汽车等各类交通工具的内饰件、外装件、功能件等，建筑材料、电子电器材料、航天航空材料等；反之，高分子材料组分的迁移特征，加速了其性能的退化，也对环境（尤其是室内环境）造成损害；而其耐热性（少数使用温度在  $300^{\circ}\text{C}$  以下，多数不超过  $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ）、耐候性较差，又限制了其在需要耐热和耐候领域的应用。