

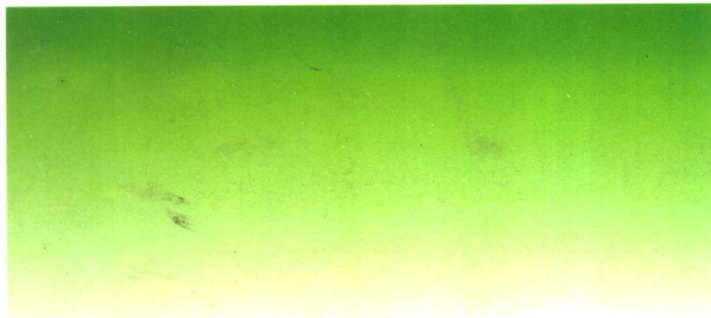
普通高等教育“九五”国家级重点教材

B

普通高等教育机电类规划教材

材料科学基础

西安交通大学 石德珂 主编



机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

材料科学基础

主编 石德珂
参编 高守义 柴惠芬 朱瑞富
柴东朗 刘光葵
主审 陈南平



机械工业出版社

《材料科学基础》被列为国家重点教材,是材料工程类专业的技术基础课教材,其中阐述了材料的成分、组织结构与性能关系的基本原理,全书除导论外共十一章,内容包括:材料的结构概论、材料的晶体结构、高分子材料的结构、晶体缺陷、相结构与相图、材料的凝固、扩散、变形与断裂、材料的电子结构与物理性能、固态相变与热处理及材料概论。

本书为全国材料工程类(原金属材料热处理、铸造、锻压、焊接等)各专业的大学本科生通用教材,也可作为有关专业的科技人员参考用书。

材 料 科 学 基 础

西安交通大学 石德珂 主编

*

责任编辑:常燕宾 版式设计:霍永明

封面设计:海之帆 责任校对:魏俊云

责任印制:何全君

*

机械工业出版社出版(北京市百万庄大街22号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张 27·字数 661千字

1999年5月第1版第1次印刷

印数 0001—3000 定价:34.00元

*

ISBN 7-111-06861-0/TG·1242(课)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

本书为国家重点教材，是根据1996年12月全国高校材料工程类专业教学指导委员会会议精神编写的。会上决定《材料科学基础》为原“金属材料热处理”专业以及原“金属热加工（包括焊接、塑性成形铸造）”各专业共用的技术基础课教材，并提出学时数控制在100~120之间。

为适应专业调整与改革及培养跨世纪人才的需要，材料工程类的专业学生除了要熟悉金属材料外，还需了解陶瓷材料、高分子材料、复合材料、结构材料及功能材料。《材料科学基础》就是阐述各种材料的共性基础知识，从材料的组织结构出发，研究材料的结构与材料的制备方法、加工工艺以及材料性能之间的关系。全书总体上可分为两大部分，第一部分是讨论材料的结构及其与性能的关系，将在第1、2、3、4章及第9章讲述，另一部分则是讲述材料的制备方法与加工工艺对材料组织结构与性能影响的理论基础，将在第5、6、7、8章及第10章讲述。

原“金属材料及热处理”专业和原“金属热加工”各专业过去一直沿用两套教材（《金属学》、《金属学与热处理》），现为加强基础与拓宽专业面而共用一种在体系上与内容上大致相同的教材，但在现阶段，两类专业教学计划的课程设置仍有一定差别，考虑到原热加工各专业在后续课程中没有热处理与金属材料方面的知识，教材中要弥补这一点。因此在教学上，对原热加工类专业的学生，需讲授第10章的全部内容及第11章材料概论（Ⅱ），而第3章及第9章如受学时数限制可以不讲。对原金属材料热处理专业学生，则只讲授第10章相变原理及第11章材料概论（Ⅰ）。考虑到本课程也是第一门专业基础课，在此之前学生并不具有工程材料方面的知识，材料概论（Ⅰ）是综合运用前述各章的基础知识，从组织结构与性能的关系方面总结和对比各种材料，使对各类材料及基本特性有一概貌性的了解，为后续工程材料课程打下基础。这两类专业的共同教学时数约占总学时数的85%。

本书第1章（5）、第4章（8）由西安交通大学柴惠芬教授编写（为便于教师使用本书，括弧内列出参考教学时数，下同），第2章（8）、第3章（5）由山东工业大学朱瑞富教授编写，第5章（18）由西安交通大学柴东朗教授编写，第6章（8）由华中理工大学刘光葵副教授编写，第7章（5）、第10章（相变原理4，热处理8）由大连理工大学高守义教授编写，导论（2）、第8章（18）、第9章（6）、第11章〔材料概论（Ⅰ）（4）、材料概论（Ⅱ）（12）〕由西安交通大学石德珂教授编写，全书由石德珂任主编。本书由清华大学陈南平教授任主审。

因为这是适应专业改革的新一轮教材，在体系与内容上有较大改变，其中必然有不少缺点与不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

1998年6月

1998.7.25

目 录

前言		
导论	1	
一、材料科学的重要地位	1	
二、各种材料概况	2	
三、材料性能与内部结构的关系	6	
四、材料的制备与加工工艺对性能的影响	7	
五、什么是材料科学	8	
参考文献	9	
第一章 材料结构的基本知识	10	
第一节 原子结构	10	
一、原子的电子排列	10	
二、元素周期表及性能的周期性变化	12	
第二节 原子结合键	14	
一、一次键	14	
二、二次键	16	
三、混合键	17	
四、结合键的本质及原子间距	18	
五、结合键与性能	20	
第三节 原子排列方式	22	
一、晶体与非晶体	22	
二、原子排列的研究方法	23	
第四节 晶体材料的组织	25	
一、组织的显示与观察	25	
二、单相组织	25	
三、多相组织	26	
第五节 材料的稳态结构与亚稳态结构	27	
小 结	29	
习 题	30	
参考文献	30	
第二章 材料中的晶体结构	31	
第一节 晶体学基础	31	
一、空间点阵和晶胞	31	
二、晶系和布拉菲点阵	32	
三、晶向指数和晶面指数	32	
第二节 纯金属的晶体结构	37	
一、典型金属的晶体结构	37	
二、多晶型性	41	
三、晶体结构中的原子半径	43	
第三节 离子晶体的结构	44	
一、离子晶体的主要特点	44	
二、离子半径、配位数和离子的堆积	44	
三、离子晶体的结构规则	46	
四、典型离子晶体的结构	48	
第四节 共价晶体的结构	49	
一、共价晶体的主要特点	49	
二、典型共价晶体的结构	50	
小 结	50	
习 题	51	
参考文献	52	
第三章 高分子材料的结构	53	
第一节 高分子材料概述	53	
一、高分子材料的基本概念	53	
二、高分子材料的合成	55	
三、高分子材料的分类	56	
第二节 高分子链的结构及构象	57	
一、高分子链的化学组成	57	
二、结构单元的链接方式和构型	58	
三、高分子链的几何形状	59	
四、高分子链的构象及柔顺性	60	
第三节 高分子的聚集态结构	62	
一、晶态聚合物的结构	62	
二、非晶态聚合物的结构	63	
三、聚合物的结晶度与玻璃化温度	64	
第四节 高分子材料的性能与结构	67	
一、高分子材料的主要性能特点	67	
二、高分子材料的性能与结构的关系	67	
三、改变高分子材料性能的途径	69	
小 结	71	

习 题	72	第四节 相图的热力学基础	152
参考文献	73	一、吉布斯自由能与成分的关系	152
第四章 晶体缺陷	74	二、克劳修斯-克莱普隆方程	154
第一节 点缺陷	74	三、相平衡条件	155
一、点缺陷的类型	74	四、吉布斯自由能曲线与相图	157
二、点缺陷的产生	75	第五节 三元系相图及其类型	160
三、点缺陷与材料行为	78	一、三元相图的表示方法	160
第二节 位错的基本概念	78	二、三元相图的建立	162
一、位错与塑性变形	78	三、三元匀晶相图	163
二、晶体中的位错模型及位错 易动性	79	四、具有两相共晶反应的三元系 相图	168
三、柏氏矢量	82	五、三元系中的相平衡分析	172
四、位错的运动	84	六、具有四相平衡反应的三元系 相图	173
五、位错密度	88	七、三元系相图实例分析	182
六、位错的观察	88	习 题	184
第三节 位错的能量及交互作用	90	参考文献	186
一、位错的应变能	90	第六章 材料的凝固	187
二、位错的线张力	92	第一节 晶体材料熔液凝固的基本 规律	187
三、位错的应力场及与其他缺陷的 交互作用	94	一、液态的结构	187
四、位错的分解与合成	96	二、凝固的热力学条件	188
第四节 晶体中的界面	100	三、过冷现象	188
一、晶界的结构与晶界能	100	四、结晶的一般过程	189
二、表面及表面能	102	第二节 晶核的形成	189
三、表面吸附与晶界内吸附	103	一、均匀形核	190
四、润湿行为	104	二、形核率	191
五、界面能与显微组织的变化	106	三、非均匀形核	192
小 结	107	第三节 晶核的成长	193
习 题	108	一、液-固界面的微观结构	193
参考文献	110	二、熔体中晶体的生长形态	194
第五章 材料的相结构及相图	111	三、晶体长大线速度	196
第一节 材料的相结构	111	第四节 固溶体的凝固	196
一、固溶体	111	一、固溶体的平衡凝固	196
二、中间相	116	二、稳态凝固	197
第二节 二元相图及其类型	119	三、成分过冷及其对晶体长大形状 的影响	199
一、相图的基本知识	120	第五节 共晶合金的凝固	200
二、一元系相图	122	一、共晶体的形成	200
三、二元系相图	123	二、共晶体的形态	201
四、相图与性能的关系	137	第六节 凝固组织及其控制	203
第三节 复杂相图分析	138	一、晶粒尺寸的控制	203
一、分析方法	138	二、铸锭组织及其控制	204
二、复杂相图分析举例	139		
三、铁-碳合金相图	141		

三、铸锭的缺陷	205	一、施密特定律	240
四、焊缝金属的结晶组织	207	二、单滑移、多滑移和交滑移	242
第七节 凝固技术的应用	207	第五节 多晶体的塑性变形	245
一、单晶的制备	207	一、晶界和晶体位向对塑性变形的 影响	245
二、定向凝固	208	二、晶粒大小对材料强度与塑性的 影响	246
三、区域熔炼	209	第六节 纯金属的变形强化	246
第八节 材料非晶态	209	一、位错的交割	247
一、材料的非晶态	209	二、位错的反应	248
二、常用的非晶态材料	210	三、位错的增殖	248
小 结	211	第七节 合金的变形与强化	250
习 题	212	一、单相合金的变形与强化	250
参考文献	213	二、低碳钢的屈服和应变时效	251
第七章 材料中的原子扩散	214	三、第二相对合金变形的影响	254
第一节 扩散现象及扩散方程	214	第八节 冷变形金属的组织与性能	255
一、扩散现象	214	一、冷变形金属的力学性能	255
二、菲克第一定律	214	二、冷变形金属的组织	256
三、菲克第二定律	215	三、形变织构	257
四、扩散方程的应用	216	四、残余应力	258
五、柯肯达尔效应	218	第九节 金属的断裂	258
第二节 扩散的微观机制	219	一、理论断裂强度	258
一、扩散的微观机制概述	219	二、实际断裂强度	259
二、原子跃迁的距离	221	第十节 冷变形金属的回复阶段	260
三、扩散系数	221	一、回复阶段性能与组织的变化	260
四、扩散激活能	222	二、回复动力学	261
第三节 扩散驱动力	225	三、回复机制	262
第四节 反应扩散	226	第十一节 冷变形金属的再结晶	263
第五节 影响扩散的因素	227	一、再结晶的形核	263
一、温度的影响	227	二、再结晶动力学	264
二、原子键力和晶体结构的影响	229	三、影响再结晶的因素	265
三、固溶体类型与浓度的影响	230	四、再结晶后的晶粒长大	266
四、晶体缺陷的影响	231	第十二节 金属的热变形、蠕变与超 塑性	269
五、第三组元的影响	232	一、金属热变形过程以及对组织与 性能的影响	269
习 题	233	二、金属的蠕变	270
参考文献	233	三、金属的超塑性	271
第八章 材料的变形与断裂	234	第十三节 陶瓷晶体的变形	272
第一节 金属变形概述	234	第十四节 高分子材料(聚合物)的 变形	273
第二节 金属的弹性变形	235	一、热塑性塑料的变形	273
第三节 滑移与李晶变形	236	二、热固性塑料的变形	275
一、滑移观察	236		
二、滑移机制	236		
三、滑移面和滑移方向	238		
四、李晶变形	239		
第四节 单晶体的塑性变形	240		

习题	276	一、生核速率	307
参考文献	276	二、新相长大速率	308
第九章 固体材料的电子结构与		三、新相形成的体积速度和综合	
物理性能	277	动力学曲线	310
第一节 固体的能带理论	277	第四节 过饱和固溶体的分解转变	311
一、能带的形成	277	一、过饱和固溶体的时效	311
二、金属的能带结构与导电性	277	二、调幅分解	316
三、费密能	279	第五节 钢的加热转变	319
四、半导体与绝缘体	281	一、奥氏体的形成	319
第二节 半导体	282	二、奥氏体晶粒的大小	322
一、本征半导体	282	三、加热缺陷	324
二、掺杂半导体	283	第六节 钢在冷却时的转变	325
第三节 材料的磁性	285	一、共析钢的过冷奥氏体转变	325
一、原子的磁矩	285	二、非共析钢过冷奥氏体分解	
二、抗磁体、顺磁体和铁磁体	286	转变	329
三、磁化曲线与磁畴结构	288	三、贝氏体转变	331
第四节 材料的光学性能	291	第七节 钢的退火与正火处理	334
一、光的吸收与透射	291	一、钢的退火	334
二、材料的发光性能	292	二、钢的正火	336
第五节 材料的热学性能	294	第八节 钢的淬火	336
一、摩尔热容	294	一、钢的马氏体转变	336
二、热膨胀	295	二、淬火加热温度	342
三、导热性能	296	三、淬火冷却	343
第六节 功能材料举例	297	四、淬透性	344
一、光导纤维	297	五、淬火方法	346
二、磁性材料	298	第九节 钢的回火	347
小结	299	一、淬火钢在回火过程中的转变	347
习题	300	二、回火的组织与性能	349
参考文献	300	三、回火脆性	351
第十章 固态相变及材料热处理	301	四、钢的淬火回火热处理的应用	352
第一节 固态相变的特点及分类	301	第十节 钢的表面热处理	353
一、固态相变的特点	301	一、表面淬火	353
二、固态相变的分类	302	二、化学热处理	354
第二节 相变热力学	303	习题	359
一、形核的条件	303	参考文献	360
二、化学自由能 (体积自由能)		第十一章 材料概论	361
——相变驱动力	304	材料概论 I	361
三、界面能	305	第一节 金属材料	361
四、应变能	306	一、碳钢与微合金化钢	361
五、晶体缺陷的作用 (非均匀生核		二、合金钢	364
的能量条件)	306	三、有色金属	365
第三节 相变动力学	307	四、铸铁	367
		第二节 高分子材料	369

一、高分子材料的强度与韧性	369	二、普通碳素工具钢和低合金	
二、工程塑料与橡胶	371	工具钢	394
第三节 工程结构陶瓷材料	372	三、高速钢	394
第四节 复合材料	375	四、高碳铬钢	395
一、纤维增强作用	375	五、热变形模具钢	396
二、纤维增韧概念	377	第五节 不锈钢与耐热钢	396
三、复合材料类型及应用	378	一、金属电化学腐蚀的基本概念	396
材料概论 I	379	二、不锈钢的化学成分与腐蚀	
第一节 合金元素在钢中的作用	379	抗力	397
一、合金元素对钢性能的影响	379	三、不锈钢的脆性	398
二、合金元素对钢平衡组织的		四、不锈钢的种类	400
影响	381	五、耐热钢	402
三、合金元素对钢不平衡组织的		第六节 铸铁	403
影响	382	一、概述	403
第二节 低合金高强度钢	383	二、铸铁的石墨化及其影响因素	403
一、对低合金高强度钢的性能		三、灰铸铁	405
要求	383	四、可锻铸铁	407
二、低合金高强度钢的成分与		五、球墨铸铁	409
组织	383	六、白口铸铁	410
三、控制轧制的微合金化钢	384	第七节 铝合金	411
四、双相钢	385	一、铝合金的强化	411
第三节 合金结构钢	385	二、形变铝合金	413
一、超高强度钢	386	三、铸造铝合金	415
二、具有综合力学性能的结构钢	386	第八节 钛合金	416
三、具有高弹性极限和疲劳强度		一、钛的特性	416
的结构钢	389	二、钛合金的分类	417
四、具有高接触疲劳强度和耐磨		三、钛合金的应用	419
性能的结构钢	389	第九节 铜合金	420
五、表面具有高耐磨性和疲劳强		一、铜合金的一般特性	420
度、心部有足够强度和韧性		二、主要的铜合金及性能	420
的结构钢	390	三、铜合金的选用	422
第四节 合金工具钢	393	习 题	422
一、工具钢的分类、成分与组织	393	参考文献	424

导 论

一、材料科学的重要地位

人类使用材料的历史，从过去到现在共经历了七个时代，见表 0-1。从远古的石器时代到公元前的青铜器时代和铁器时代，金属的使用标志着社会生产力的发展，人类开始逐渐进入文明的社会。到 18 世纪钢时代的来临，引起世界范围的工业革命，因而产生了若干经济发达的强国。继钢时代之后，1950 年开始了硅时代，这是信息技术革命的时代，对当今世界产生了深远的影响。在钢时代和硅时代中，人们强烈地认识到材料科学对社会发展与进步的作用。无论是专门从事研究材料的科技人员，还是经济学家、财政金融的银行家、企业界的巨头，直到经济决策人的国家领导阶层，都密切注意材料研究的动向和发展趋势，以便及时把握住时机，作出正确判断与决策，以使

表 0-1 人类使用材料的七个时代的开始时间^[1]

公元前 10 万年	石器时代
公元前 3000 年	青铜器时代
公元前 1000 年	铁器时代
公元 0	水泥时代
1800 年	钢时代
1950 年	硅时代
1990 年	新材料时代

在世界经济发展的竞争中占有一席之地。这里，让我们以英国技术政策的失误来说明这一问题。英国曾在钢时代到来之时，由于有一定预见性，因此在世界钢铁生产中占有一定的优势，也给英国的经济发展带来巨大的活力。但在二战后，日本认识到那时的世界仍是处于钢时代，必须要有自己的低成本和高质量的钢。1952 年日本才生产 700 万 t 钢，而英国却已生产 1700 万 t 钢，但到 1962 年，亦即 10 年之后，日本的钢产量猛增到 2755 万 t，英国的钢为 2082 万 t，再过 10 年，1972 年日本的钢铁产量已达 9690 万 t，而英国只有 2500 万 t，日本处于遥遥领先地位。日本这一技术政策推动了日本的汽车工业和其他一些主要用钢材的产品，使日本经济有了很大发展。在 1970 年以后，日本认识到当今世界已处于硅时代，因此，在保持钢的生产优势的同时，瞄准了硅材料，发展半导体工业，使得家用电器的生产在世界市场中占绝对优势。然而，英国却忽视了硅时代的到来，由于没有相应的技术政策和战略眼光，其结果是英国 2000 名研究硅材料的科学家流入美国硅谷，1988 年仅就信息技术产品而言，英国对日本的贸易赤字就达 2.2 亿英镑，这还不包括由硅片控制的自动聚焦的照相机之类的产品。英国人今天抱怨说：“英国没有硅工业了，英国从第一流的经济大国变为第二流的经济发达国家，而日本却从第二流的经济发达国家变为第一流的经济大国，英国的态度恰似一个仍停留在石器时代的国家，而没有进展到青铜器时代”。

现在多数发达国家已经认识到材料研究是至关重要的。1990 年美国副总统布什的科学顾问 A 布鲁姆莱 (Allany Bromley) 明确地说：“材料科学在美国是最重要的学科”。1981 年日本国际贸易和工业部选择了优先发展三个领域：新材料、新装置和生物技术。今天，生物技术研究地位有些下降，但新材料甚至更牢固地处于最优先的地位。在日本的为未来工业规划的基础技术中，有 11 个主要项目，其中 7 个项目是基于先进材料之上。1986 年《科学的美国人》杂志曾专期讨论有关材料的研究。文章指出：“先进材料对未来的宇航、电子设备、汽车以及其他工业的发展是必要的，材料科学的进展决定了经济关键部门增长速率的极限范围。”

正如表 0-1 所指出的,我们今天已处在新材料时代。这一时代的特征是:不像以前的各个材料时代,它是一个由多种材料决定社会和经济发展的时代;新材料以人造为特征,而不是在自然界中有现成的;新材料是根据我们对材料的物理和化学性能的了解,为了特定的需要设计和加工而成的。这些新材料使新技术得以产生和应用,而新技术又促进了新工业的出现和发展,从而使国家财富和就业的增加。

现在很多著名的材料科学专家都在预测未来材料科学的发展前景,但都不能清楚地描绘新材料时代的具体图像,更不能明确地说明新材料应用于生产时,将给社会生活和经济带来何等程度的变化。例如,目前电子工业是全球经济发展中最活跃的部门之一,在使用新材料方面居于首位。在大型集成电路中,生产上使用的单晶硅其直径已达到 150mm (6in),几乎无晶体缺陷(位错)和不含氧杂质,但随着集成度提高到几万 K,硅芯片因发热而会受到限制,这时 GaAs 半导体材料就可能成为超大型集成电路如高速计算机的关键材料了。再如,仅仅在 20 年前人们才认识到光学玻璃纤维可作为通信媒体,它不仅可代替铜线电缆,而且具有传输信息容量大、损耗小、清晰度高、成本低的一系列优点。就在这 20 年中,光纤通信已给国际通信交流带来了巨大的变化,美国已完成了大西洋海底光纤电缆的铺设,欧洲各国都在相继互相联网。光导纤维成为电信(Telecommunication)工业部门的关键材料。正如硅材料带动了半导体工业一样,是光导纤维推动了电信工业的发展。再比如,自 1986 年超导材料的研究有了重大突破,使超导温度由几十年的缓慢进展,突然跳跃式地升高到 95~100K,达到液氮温度以上。这样,超导的实际应用已指日可待了。现在世界各国都在致力于超导的生产应用。仅从电力运输上看,按美国的计算,如其国内用超导电缆可节约 750 亿 kW 的电能,至少每年可节省 50 亿美元;而日本曾于 1994 年计划用超导线圈制造高速列车,时速可达 500km,从东京到大阪只要 1h。可见,新材料的开发与应用,对人类社会的文明与经济的发展,有着不可估量的作用。

二、各种材料概况

工程材料按属性可分为三类:金属材料、陶瓷材料和高分子材料。也可由此三类相互组合而成复合材料。按使用性能分类,则可分为主要利用其力学性能的结构材料和主要利用其物理性能的功能材料。前者用量大,仅钢材全球每年就需求 8 亿多吨;后者用量虽小得多,但对社会文明的进步起了重大作用。

1. 金属材料

这是目前用量最大使用最广的材料。在金属材料中包括两大类型:钢铁材料和有色金属。有色金属主要包括铝合金、钛合金、铜合金、镍合金等。

在机械制造业(如农业机械、电工设备、化工和纺织机械等)中,钢铁材料占 90%左右,有色金属约占 5%。在汽车制造业中,有色金属与塑料的比例稍多些,例如,1985 年美国福特汽车公司的数据为:钢铁占 72%,铝合金占 5.3%,塑料占 8.5%,这几种材料近年来在汽车中的比例大致如图 0-1 所示。

钢铁材料在本世纪 30~50 年代,就世界范围来说,处于最鼎盛的时期。那时,钢铁是材料科学技术的中心,现在有些衰退。例如,美国在 1978 年钢的年产量为 13.7×10^3 万 t,10 年后却降至 70×10^3 万 t。究其原因,一方面可能是随着钢的强度和钢材质量的提高,导致一些经济发达国家钢材的需求量有所减少,另一方面也由于利润的驱使和对未来社会发展的预测,美国材料的研究重点转向了电子通信材料。而日本的钢铁生产则处于世界领先地位,这与日

本钢铁生产的工艺装备先进和在工艺研究上的大量投资，最后导致了能以低的成本生产出高质量的钢材有关。

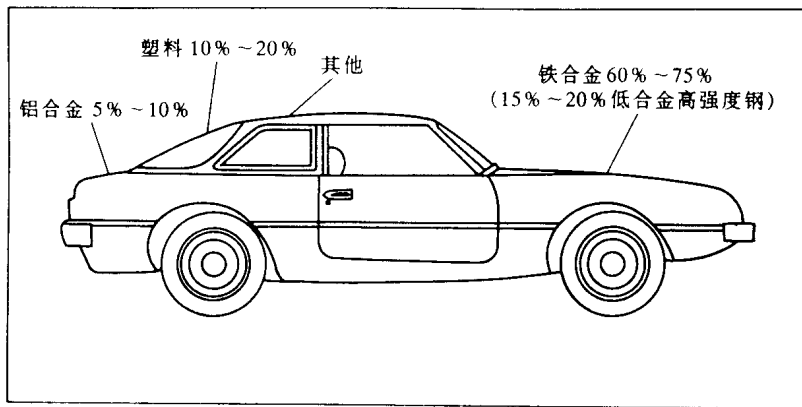


图 0-1 汽车中各种材料的大致比例

我国的钢铁工业仍在高速发展。据统计，1994 年我国钢产量 9261 万 t，其中合金钢 566 万 t，占钢生产的 6.1%，即使这样，我国特殊钢的消耗量仍不能满足要求，近几年每年要耗费 8~9 亿美元进口合金钢材，而其中不锈钢板的费用就约占 50%。特别是我国明确提出要加速发展汽车工业，到 2010 年，将与钢铁、石油、化工和建筑业一样形成国民经济的支柱产业。1994 年我国汽车产量为 138 万辆，计划到 2010 年产量将达到 600 万辆。仅就汽车工业的发展而言，钢材的需求量（约占全国钢材生产量的 20% 左右）也在不断上升。钢铁材料虽不属高科技的先进材料，但因具有优良的力学性能、工艺性能和低的成本，使其在 21 世纪中仍将占有重要地位，其他种材料如高分子材料、陶瓷或复合材料可能会少量地代替金属材料，但钢铁材料的应用不可能大幅度衰减。正如材料科学家柯垂耳 (Cottrell) 在题为“我们还将继续使用金属及合金吗？”发言稿的最后结束语中说：“我们将继续使用金属及合金，特别是钢。我们的孩子和孙子也将会这样。”由于其他种材料的兴起，钢铁材料已经走过了它最辉煌的年代，但它决不是“夕阳工业”。

除钢铁外，其他的金属材料均称为有色金属。在有色金属中，铝及其合金用得最多，这主要是因为：①重量轻，只有钢的 1/3，虽然铝合金的力学性能远不如钢，但如果设计者把减轻重量放在性能要求的首位，最合适的就是铝合金。例如，现今的波音 767 亚音速飞机，所用材料的 81% 是由铝合金制成的，见图 0-2；②有好的导热性和导电性，在远距离输送的电缆中多用铝；③耐大气腐蚀。因此，在美国，25% 的铝用来制作容器和包装品，20% 的铝用作建筑结构，如门窗、框架、滑轨挡板等，还有 10% 的铝用作导电材料。钛合金的高温强度比铝合金好，也是金属材料中迄今发现的最好的耐蚀材料。但钛的价格比铝贵，据 1984 年统计数字表明，美国铝价格为 0.8 美元/磅，钛为 4 美元/磅，在美国钛合金主要用于航空、航天部门，在日本则主要用于化工设备和海洋开发方面。

2. 陶瓷材料

传统的陶瓷材料是由粘土、石英、长石等成分组成，主要作为建筑材料使用。而新型的结构陶瓷材料，其化学组成和制造工艺都大不相同，其成分主要是 Al_2O_3 、SiC、 Si_3N_4 等。这种新型工程陶瓷在性能上有许多优点，如：①重量轻；②压缩强度可以和金属相比甚至超过

金属；③熔点高，能耐高温；④耐磨性能好，硬度高；⑤化学稳定性高，有很好的耐蚀性；⑥是电与热的绝缘材料。但它也有两个严重的缺点，即容易脆断和不易加工成形。陶瓷若要大力发展，必须克服这两个缺点。

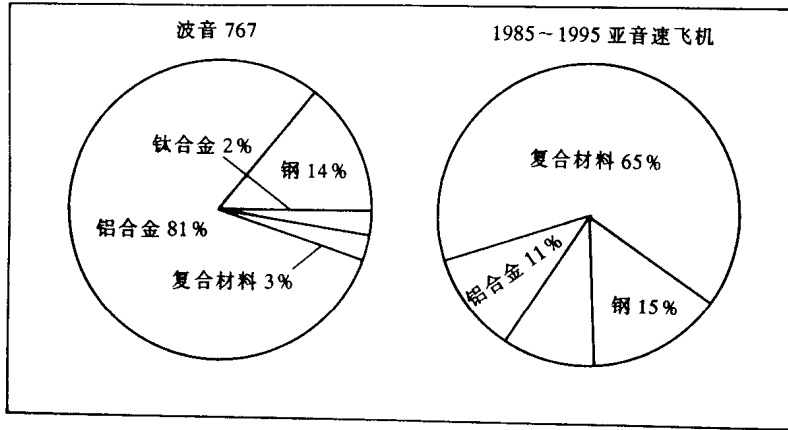


图 0-2 波音 767 飞机所用的各种材料比例

图 0-3 表示先进结构陶瓷在航天飞机上的应用。航天飞机在进入太空或返回大气层时，要经受剧烈的温度变化，在几分钟内温度由室温改变到 1260°C ，所以用陶瓷作为热绝缘材料，保护机体不受损伤，设计中用 SiO_2 纤维编织成 24,000 个陶瓷片，覆盖了机体表面的 70%。

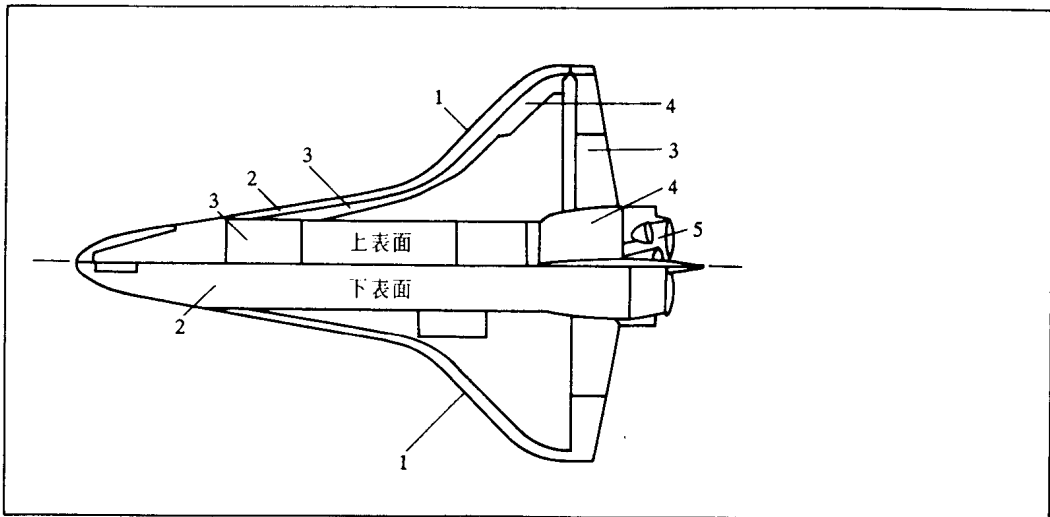


图 0-3 航天飞机上的先进结构陶瓷

1—增强的碳-碳(RCC) 2—高温再用的表面绝缘材料(HRSI) 3—Nomex 涂层(Nomex)

4—低温再用的表面绝缘材料 5—金属或玻璃

在商业市场上，陶瓷材料目前主要应用在电子元件和敏感元件上。日本在电子陶瓷的应用方面已处于绝对优势，而美国则企图在先进结构陶瓷方面居于领先地位，目前正在研制用高温结构陶瓷如 Si_3N_4 、 SiC 来代替镍基高温合金的燃气轮机的叶片。

3. 高分子材料

高分子材料又称聚合物，按用途可分为塑料、合成纤维和橡胶三大类型，而塑料中通常

又分为通用塑料和工程塑料。通用塑料主要制作薄膜、容器和包装用品，其在塑料生产中占70%，聚乙烯可看作它的代表，单就聚乙烯的产量就占整个塑料生产的35%。工程塑料主要是指力学性能较高的聚合物，抗拉强度应大于50MPa，拉伸杨氏模量应大于2500MPa，冲击韧度应大于 $5.88\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。聚酰胺（PA）俗称尼龙（其大部分用作合成纤维），和聚碳酸酯（PC）是这类材料的代表。由于聚合物有优良的电绝缘性能，聚碳酸酯常用作计算机、打字机的外壳、电子通信设备中的连结元件、接线板和控制按钮等。工程塑料中也有利用其特殊物理或化学性能的，如有机玻璃（PMMA）透光率很高，达92%（普通玻璃82%），紫外线透过率为73.5%（普通玻璃仅0.6%），故适于制作飞机或汽车中的窗玻璃和厂房中的采光天窗等；而聚四氟乙烯（PTFE）有极高的化学稳定性，能耐各种酸碱甚至王水的腐蚀，并在 $-196\sim 250^{\circ}\text{C}$ 之间有稳定的力学性能。故常用作化工管道和泵零件。据统计，1980年世界聚合物的总产量为5900万t，而1991年为11600万t，增加了一倍，可见其增长速度相当快，有人曾分析，在这10年中，塑料将在汽车用材的比例中会显著增加，例如从1980年每辆车用90kg塑料，到1990年将增加到每辆车136kg，但这种预测并未实现。

4. 复合材料

金属聚合物、陶瓷自身都各有其优点和缺点，如把两种材料结合在一起，发挥各自的长处，又可在一定程度上克服了它们固有的弱点，这就产生了复合材料。现在的复合材料可分为三大类型：塑料基的复合材料、金属基和陶瓷基的复合材料。商业上用得最多的是塑料基复合材料，而陶瓷基复合材料还处在开发阶段。

因为玻璃纤维有高的弹性模量和强度，并且成本低，而塑料容易加工成型，所以，早在40年代末就产生了用玻璃纤维增强树脂的材料，俗称玻璃钢，这是第一代复合材料。在日本有42%的玻璃钢用于建筑，25%用于造船，日本有一半以上的渔船用玻璃钢；1981年美国通用汽车公司用玻璃钢纤维增强环氧基体的材料制作后桥的叶片弹簧，只用了一片重量为3.6kg的复合材料代替了10片总量为18.6kg的钢板弹簧。到70年代碳纤维增强塑料的第二代复合材料开始应用，这类材料在战斗机和直升飞机上使用量较多，此外在体育娱乐方面，如高尔夫球棒、网球拍、划船桨等也多用此类材料制造。

金属基复合材料目前也应用在航天部门中，如使用了硼纤维增强铝基体的复合材料。美国的航天飞机整个机身桁架支柱均用B-Al复合材料管材，与原设计的铝合金桁架支柱相比，减轻重量44%。值得注意的是，在民用汽车工业上，80年代初，日本丰田汽车公司用SiC短纤维和 Al_2O_3 颗粒增强的铝基材料制造发动机的活塞，大大提高了寿命并降低了成本。

总的来说，复合材料虽然可实现材料性能的最佳结合或者具有显著的各向异性，但成本很高。现在除了碳纤维增强塑料的复合材料应用较多外，其他使用得较少，但作为先进的结构材料来说，这是个重点开发的领域。

5. 电子材料、光电子材料和超导材料

(1) 电子材料 是指在电子学和微电子学中使用的材料。主要包括半导体材料、介电功能材料和磁性材料等。

现在，以硅材料为中心的半导体集成电路已进入超大规模集成的时代。随着集成度的增加，对单晶硅的要求愈来愈高，如256K的超大规模集成电路的宽度只有 $1\sim 2\mu\text{m}$ ，任何一个微小缺陷都会造成废品。当前，硅单晶向着大直径、高纯度、高均匀度和高完整度方向发展。现科学家也正在致力于半导体砷化镓的实用研究。砷化镓可能成为继硅之后的第二种最重要

的半导体材料，用它来做集成电路电耗小，电子迁移速度高，工作温度宽，用这样的晶体管可以制造出速度更快、功能更强的计算机。

在介电功能材料中，制造各类传感器的敏感材料和构成大型集成电路多层封装结构的电子陶瓷薄膜是重要的研究方向。

磁性材料主要用于信息的储存、声频和视频信号的记录、微波通信以及在各种电动机中的永久磁铁。在这些应用中用量最大的是磁记录，如计算机中的磁盘磁带。Nb-Fe-B合金作为第三代永磁材料，价格便宜，体积小，重量轻，磁能积 $(BH)_{\max}$ 可达 400kJ/m^3 ，在电机、打印机中都很有市场。

(2) 光电子材料 有人估计，今天光电子技术给世界带来的影响不亚于30多年前将晶体管用于计算机的影响。现在的光纤通信就是用半导体激光器作光源、将电信号变为光信号，传输介质是超高纯、低损耗的光学玻璃纤维，再由接收元件恢复为电信号，使受话机发出声音。光纤不仅可远离传输信息，而且用于医疗、遥感、遥测技术。而磁盘存储信息也将逐渐演变为光盘存储，目前各种光盘存储材料在不断涌现。

(3) 超导材料 大多数科学家相信，在10年或更长一些时间内，高温超导的研究和应用开发会有巨大进展，其中，大电流应用和电子学应用将有实质性的突破，这必将对国民经济和国防建设等带来巨大的效益。仅就用超导材料输电来说，我国目前约有15%的电能损耗在输电线路上，每年要损失900多亿度，这无疑是非常可观的数字。

这里要指出的是，我国对高温超导材料的研究，从一开始就居于世界前列。以前所研究的超导材料几乎都是金属合金，如Nb-Sn合金，临界超导温度为 23.2K 。1986年1月，瑞士苏黎世IBM实验室用钒、镧、铜、氧化物获得了 30K 的超导转变温度，在世界上就被认为是超导材料的革命，而1987年2月我国科学院赵忠贤研究组用钇、钡、铜、氧化物获得了 93K 的临界超导温度。

三、材料性能与内部结构的关系

在上述三种基本类型材料中，金属有好的导电性，有高的塑性与韧性；陶瓷材料则有高的硬度但很脆，且大多是电的绝缘材料；而高分子材料的弹性模量、强度、塑性都很低，多数也是不导电的。这些材料的不同性能都是由其内部结构决定的。从材料的内部结构来看，可分为四个层次：原子结构、结合键、原子的排列方式（晶体和非晶体）以及显微组织。在讨论材料结构对性能的影响时应包含这四个方面的影响，材料中存在结构缺陷的影响也属于此范围。

例如由于结合键的不同，性能也不同。金属键结合的材料，内部有大量自由运动的电子，导致了金属有好的导电性，在变形时也不会破坏键的结合，故有好的塑性。而共价键结合的材料，电子被束缚住不能自由运动，所以通常是不导电的，只有在温度较高并加入一些杂质元素时才能形成半导体。共价键结合力很强且有方向性，变形时要破坏局部的键结合，因此这类材料硬度高但很脆。以金属键结合的原子排列很紧密，形成的晶体结构也较简单，故金属的密度高；而以共价键结合的原子排列不够紧密，形成的晶体结构也较复杂，故共价晶体陶瓷的密度低。结合键对性能、对材料的原子排列方式都有重要影响，但结合键又是受原子结构影响的，只有容易失去电子的元素才能形成金属键，而在周期表中第IV族（C、Si、Ge）及第III~V族元素（如Ga~As）最易共价结合成稳定的电子态。原子结构除了影响键结合方式外，对材料的电、磁、光、热等物理性能也有重要影响。例如，为什么导电性很好的Cu、Ag、Au金属不具有铁磁性，而只有少数过渡族元素Fe、Co、Ni和稀土元素钆（Gd）才具有铁磁

性？这也取决于材料的内层电子结构。

组织是指用金相观察方法观察材料内部时看到的涉及晶体或晶粒大小、方向、形状排列状况等组成关系的组成物。例如，图 0-4 为低碳钢的光学显微组织。可以看到两种组织，一种称为铁素体，一种称为珠光体。材料的热处理和热加工可以显著地改变组织，而材料的力学性能（如强度、塑性）对组织的变化尤为敏感。

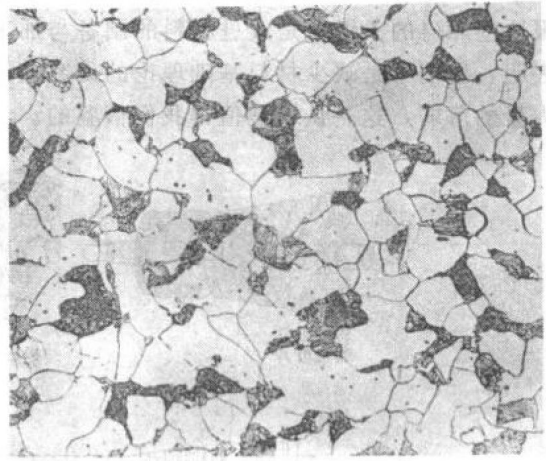


图 0-4 低碳钢的显微组织

四、材料的制备与加工工艺对性能的影响

材料的性能取决于其内部结构，只有改变了材料的内部结构才能达到改变或控制材料性能的目的，而材料的制备和加工工艺常常对材料的性能起着决定性作用。

比如，现代化的钢铁生产，一个 300t 的大型氧气顶吹转炉在 30min 时间内，就完成了冶炼任务。通过计算机控制，能够精确地调整炉内钢液成分，再隔 40min，就可连续浇铸，连续轧制成一定尺寸的合格钢材。钢的冶炼、浇铸和轧制都是影响钢材质量的重要工艺过程。而钢厂生产的钢坯供应给机械厂后，要经过自由锻造或在模具中热压加工成形、切削加工和热处理后，生产出性能符合要求的零件。这其中热处理和表面处理是影响材料性能最重要的一环。

单就金属材料由液态变为固态的凝固过程来说，就发展出许多改进性能的工艺，它们在生产中有重要应用。例如，图 0-5 为航空发动机的构造，空气先经过压缩机，增压后进入燃烧室，混合燃烧后的燃气推动气轮机的叶片，燃气轮机叶片的工作温度很高（温度愈高热效率愈高），现一般用镍基超合金（约 $w_{Ni}60\%$ ，W，Cr，Co 约各占 10%，余为 Al4%、Mo 等以上均指质量分数）。由于叶片形状复杂，通常用失蜡浇铸，如果用通常凝固的办法，生产出的叶片组织是由许多任意取向的小晶体组成，如果改用定向凝固技术，生成许多沿一定方向（该方向和外力平行）生长的柱状晶，这可使材料的高温强度提高很多，而最好的办法则是使合金凝固时，整个叶片只形成一个晶体即单晶，这可使叶片的工作温度达到 1100°C。当叶片的合金凝固组织由任意取向的小晶体改变至单晶时，工作温度可由 850°C 提高到 1100°C，要知道镍合金的熔点只有 1450°C 左右；再如，金属在一般的冷却速度凝固后均形成晶体，但如快速凝固后可形成非晶态，由于没有晶体缺陷，可以得到磁导率极高的软磁材料。当制作变压器铁心时，其铁耗（磁滞损耗和涡流损耗）只有硅钢片的 1/3。现美国已投入数万吨级的薄片和薄带的非晶软磁材料，据悉，1985 年美通用电器公司采用 $Fe_{82}B_{10}Si_8$ 制造了 1000 台 25KVA 的变压器。

再如，钛合金的塑性较差，不易加工成形，特别是制造形状复杂的零件，如果钛合金经热处理后成极细的组织，可实现所谓“超塑性成形”，这时钛合金的行为像热加工玻璃一样（玻璃在热态可以制成管子、各种器皿），可以柔软得随意加工成某种形状。

研究各种材料的制备与加工工艺是材料工程类各专业的任务。研制与开发一种新材料，并不只是材料物理学家和材料化学家的事情，他们常常只是在实验室内获得了成功，从而论证

了开发这种材料的可行性，然而要用于生产投入市场，主要力量还需依赖材料工程师的努力。今天，先进的结构陶瓷材料所面临的状况正是这样， Si_3N_4 、 SiC 等结构陶瓷材料已获得了充分的数据，证明是可以代替镍基高温合金的，但在脆性、加工成形和成本上还有一定障碍，而克服这些障碍的关键，是改进材料的制备与加工方法。美国对材料科学与工程这一领域的调查表明，他们不是缺少材料基础理论的研究人员，而是深感在研究材料的制备与工艺方面科技力量的薄弱，这一认识是值得我们借鉴的。

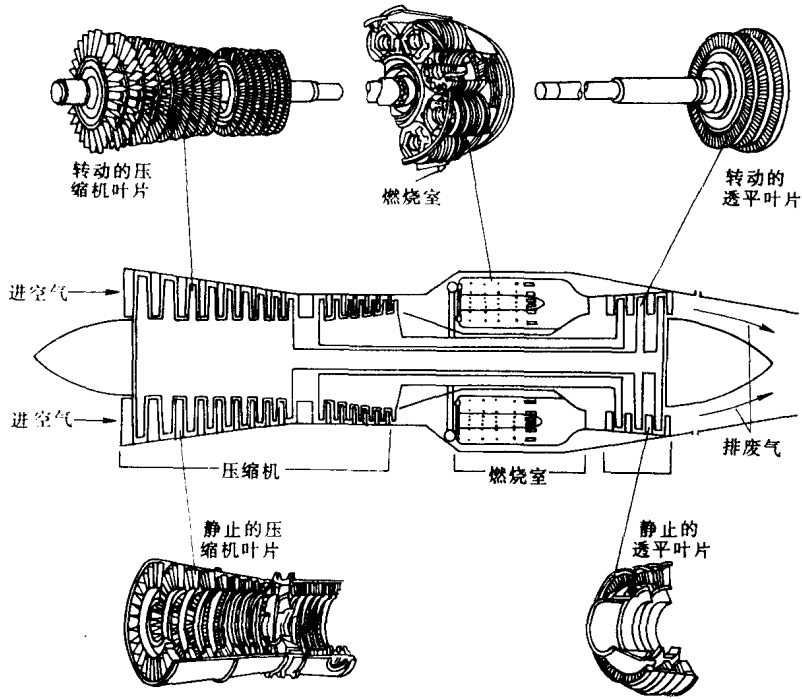


图 0-5 航空发动机的构造

五、什么是材料科学

到现在，我们还没有给“材料科学”下个明确的定义，只是先感性地给予一些有关方面的初步认识，让我们以“什么是材料科学”作为导论的结束话题。

材料科学是研究各种材料的结构、制备加工工艺与性能之间关系的科学。这一关系可用一四面体表示，如图 0-6 所示。四面体的各顶点为成分/组织结构、制备合成与加工工艺、材料的固有性能和使用或服役性能。

所谓成分/组织结构，表示材料结构所包含的四个层次：原子结构、结合键、原子

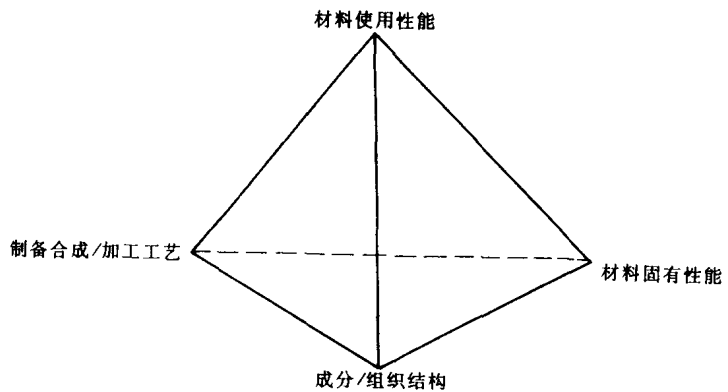


图 0-6 材料科学与工程四要素