



面向 21 世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century



普通高等教育“九五”国家级重点教材

普通高等教育材料科学与工程专业规划教材

材料科学基础

第2版

西安交通大学 石德珂 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



材料科学基础

第三版

西安交通大学 王瑞明 主编



中国铁道出版社

第2版前言

本书第1版是遵照1996年12月全国高校材料工程类专业教学指导委员会的决定编写的。当时考虑到专业改造与发展,将本书定为原“金属材料及热处理”和原“金属热加工(焊接、铸造、塑性成形)”两类专业共用的技术基础课教材,教学时数为100~120。几年的教学实践表明,多数院校的热加工专业已将该课程时数减少了许多,以致无法共用。故这次按“材料科学与工程”专业的要求修订此书。

修订版中删去原为热加工专业编写的金属材料与热处理部分,并对原书第六章、第七章及第十章重新编写。全书共分十章,教学时数不变。

本书第六章改为“材料的凝固与气相沉积”,是因为凝固法与沉积法是现今材料制备的两种主要类型。过去传统的冶金工程只讲材料的凝固,已不能适应现在材料科学的发展。在这一章中增加了气-固转变,并介绍了沉积法在一些重要领域的应用,如硅芯片的外延生长、碳纤维的制造与纳米材料的获得。本书第七章为扩散与固态相变。在固体扩散中增加了离子晶体的扩散、烧结、纳米材料的扩散等;在固态相变中,作为材料的共性基础,增加了陶瓷材料中的脱溶沉淀反应、玻璃中的调幅分解、陶瓷材料中的马氏体相变等。此外,对原章节中内容也作了不少修改补充与说明。与第1版相比,本书无疑要更好一些,在体系与内容上都前进了一步。

本书修订工作由石德珂完成。不妥与错误之处当由个人负责,请批评指正。还要说明的是,编写中得到西安交通大学教学领导的支持与帮助,并将此书列为西安交通大学“十五”规划本科生系列教材。作者谨在此致以谢意。

编者

2003年2月

第1版前言

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“金属材料及热处理”专业以及原“金属热加工(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。

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,将在第一、二、三、四章及第九章讲述,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,将在第五、六、七、八章及第十章讲述。

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,需讲授第十章的全部内容 & 第十一章材料概论(Ⅱ),而第三章及第九章如受学时数限制可以不讲。对原金属材料及热处理专业学生,则只讲授第十章相变原理及第十一章材料概论(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学时数约占总学时数的85%。

本书第一章(5)、第四章(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学时数,下同),第二章(8)、第三章(5)由山东工业大学朱瑞富教授编写,第五章(18)由西安交通大学柴东朗教授编写,第六章(8)由华中理工大学刘光葵副教授编写,第七章(5)、第十章(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)、第八章(18)、第九章(6)、第十一章〔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

目 录

第 2 版前言

第 1 版前言

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	7
四、材料的制备与加工工艺对性能的影响	8
五、什么是材料科学	10
参考文献	11
第一章 材料结构的基本知识	12
第一节 原子结构	12
一、原子的电子排列	12
二、元素周期表及性能的周期性变化	14
第二节 原子结合键	17
一、一次键	17
二、二次键	19
三、混合键	21
四、结合键的本质及原子间距	22
五、结合键与性能	25
第三节 原子排列方式	26
一、晶体与非晶体	26
二、原子排列的研究方法	29
第四节 晶体材料的组织	30
一、组织的显示与观察	30
二、单相组织	31
三、多相组织	32
第五节 材料的稳态结构与亚稳态结构	33
小 结	35
习 题	36
参考文献	37
第二章 材料中的晶体结构	38

第一节 晶体学基础	38
一 空间点阵和晶胞	38

小 结	89
习 题	90
参考文献	91
第四章 晶体缺陷	92
第一节 点缺陷	92
一、点缺陷的类型	92
二、点缺陷的产生	93
三、点缺陷与材料行为	96
第二节 位错的基本概念	97
一、位错与塑性变形	97
二、晶体中的位错模型及位错易动性	98
三、柏氏矢量	102
四、位错的运动	104
五、位错密度	109
六、位错的观察	109
第三节 位错的能量及交互作用	111
一、位错的应变能	111
二、位错的线张力	114
三、位错的应力场及与其他缺陷的交互作用	116
四、位错的分解与合成	119
第四节 晶体中的界面	124
一、晶界的结构与晶界能	124
二、表面及表面能	127
三、表面吸附与晶界内吸附	128
四、润湿行为	130
五、界面能与显微组织的变化	132
小 结	133
习 题	134
参考文献	137
第五章 材料的相结构及相图	138
第一节 材料的相结构	138
一、固溶体	138
二、中间相	144
第二节 二元相图及其类型	149
一、相图的基本知识	149
二、一元系相图	152
三、二元系相图	154

四、相图与性能的关系	170
第三节 复杂相图分析	172
一、分析方法	172
二、复杂相图分析举例	173
三、铁-碳合金相图	175
第四节 相图的热力学基础	189
一、吉布斯自由能与成分的关系	189
二、克劳修斯-克莱普隆方程	192
三、相平衡条件	193
四、吉布斯自由能曲线与相图	195
第五节 三元系相图及其类型	199
一、三元相图的表示方法	199
二、三元相图的建立	201
三、三元匀晶相图	203
四、具有两相共晶反应的三元系相图	209
五、三元系中的相平衡分析	214
六、具有四相平衡反应的三元系相图	216
七、三元系相图实例分析	226
习 题	229
参考文献	231
第六章 材料的凝固与气相沉积	232
第一节 材料凝固时晶核的形成	232
一、均匀形核	232
二、形核率	235
三、非均匀形核	237
第二节 材料凝固时晶体的生长	239
一、材料的熔化熵对晶体生长的影响	239
二、温度梯度对晶体生长的影响	240
第三节 固溶体合金的凝固	242
一、合金凝固的三种典型情况	242
二、成分过冷及其对晶体生长的影响	246
第四节 共晶合金的凝固	247
一、共晶体的结构	247
二、杂质对共晶生长的影响	250
三、偏离共晶成分的合金凝固	253
第五节 制造工艺与凝固组织	253
一、铸锭与铸件的凝固组织及偏析	253

二、连续铸造和熔化焊的凝固组织	256
第六节 用凝固法材料的制备技术	257
一、区域熔炼	257
二、制备单晶	259
三、用快速冷凝法制备金属玻璃	260
四、定向凝固	261
第七节 材料非晶态	262
一、材料的非晶态概述	262
二、常用材料的非晶态	263
第八节 材料的气-固转变	265
一、凝聚-蒸发的平衡	265
二、蒸发	267
三、凝聚	268
第九节 气相沉积法的材料制备技术	269
一、硅芯片的外延生长	270
二、用化学气相沉积制取 B 纤维和 SiC 纤维	271
三、用惰性气体凝结法制取纳米材料	272
习 题	273
参考文献	276
第七章 扩散与固态相变	277
第一节 扩散定律及其应用	277
一、扩散第一定律	277
二、扩散第二定律	279
第二节 扩散机制	283
一、间隙扩散和空位扩散	283
二、互扩散和柯肯达尔效应	286
三、扩散系数的计算	286
第三节 影响扩散的因素与扩散驱动力	288
一、影响扩散的因素	288
二、扩散驱动力	290
第四节 几个特殊的有关扩散的实际问题	291
一、离子晶体的扩散	291
二、烧结	293
三、纳米晶体材料的扩散问题	295
第五节 固态相变中的形核	296
一、固相的相界面	296
二、均匀形核与非均匀形核	300

第六节 固态相变的晶体成长	301
一、扩散控制长大	301
二、界面控制长大	303
第七节 扩散型相变	305
一、Al-Cu 合金的淬火时效	305
二、陶瓷材料中的脱溶沉淀反应	307
三、合金中的调幅分解	309
四、玻璃中的调幅分解	312
第八节 无扩散相变	313
一、马氏体相变的基本特征	313
二、马氏体转变的晶体学	316
三、马氏体的形态与性能	318
四、陶瓷材料中的马氏体相变	320
习 题	321
参考文献	322
第八章 材料的变形与断裂	323
第一节 金属变形概述	323
第二节 金属的弹性变形	324
第三节 滑移与孪晶变形	325
一、滑移观察	325
二、滑移机制	326
三、滑移面和滑移方向	328
四、孪晶变形	329
第四节 单晶体的塑性变形	331
一、施密特定律	331
二、单滑移、多滑移和交滑移	333
第五节 多晶体的塑性变形	336
一、晶界和晶体位向对塑性变形的影响	336
二、晶粒大小对材料强度与塑性的影响	337
第六节 纯金属的变形强化	338
一、位错的交割	338
二、位错的反应	340
三、位错的增殖	341
第七节 合金的变形与强化	343
一、单相合金的变形与强化	343
二、低碳钢的屈服和应变时效	344
三、第二相对合金变形的影响	347

第八节 冷变形金属的组织与性能	349
一、冷变形金属的力学性能	349
二、冷变形金属的组织	349
三、形变织构	350
四、残余应力	352
第九节 金属的断裂	352
一、理论断裂强度	352
二、实际断裂强度	353
第十节 冷变形金属的回复阶段	355
一、回复阶段性能与组织的变化	355
二、回复动力学	355
三、回复机制	356
第十一节 冷变形金属的再结晶	358
一、再结晶的形核	359
二、再结晶动力学	359
三、影响再结晶的因素	361
四、再结晶后的晶粒长大	362
第十二节 金属的热变形、蠕变与超塑性	365
一、金属热变形过程以及对组织与性能的影响	365
二、金属的蠕变	367
三、金属的超塑性	368
第十三节 陶瓷晶体的变形	369
第十四节 高分子材料（聚合物）的变形	371
一、热塑性塑料的变形	371
二、热固性塑料的变形	373
习 题	374
参考文献	375
第九章 固体材料的电子结构与物理性能	376
第一节 固体的能带理论	376
一、能带的形成	376
二、金属的能带结构与导电性	377
三、费密能	378
四、半导体与绝缘体	380
第二节 半导体	381
一、本征半导体	381
二、掺杂半导体	383
第三节 材料的磁性	385

一、原子的磁矩	385
二、抗磁体、顺磁体和铁磁体	387
三、磁化曲线与磁畴结构	389
第四节 材料的光学性能	392
一、光的吸收与透射	392
二、材料的发光性能	394
第五节 材料的热学性能	397
一、摩尔热容	397
二、热膨胀	398
三、导热性能	399
第六节 功能材料举例	400
一、光导纤维	400
二、磁性材料	401
小 结	402
习 题	403
参考文献	404
第十章 材料概论	405
第一节 金属材料	405
一、碳钢与微合金化钢	405
二、合金钢	408
三、有色金属	410
四、铸铁	413
第二节 高分子材料	415
一、高分子材料的强度与韧性	415
二、工程塑料与橡胶	417
第三节 工程结构陶瓷材料	418
第四节 复合材料	422
一、纤维增强作用	422
二、纤维增韧概念	425
三、复合材料类型及应用	426
习 题	427
参考文献	428

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

表 0-1 人类使用材料的
七个时代的开始时间

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

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业，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，英国的状态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 年日本的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,但新材料更牢固地处于最优先的地位。在日本的未来工业规划的基础技术中,在 11 个主要项目中有 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,人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;新材料是根据人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机会的增加。

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,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。

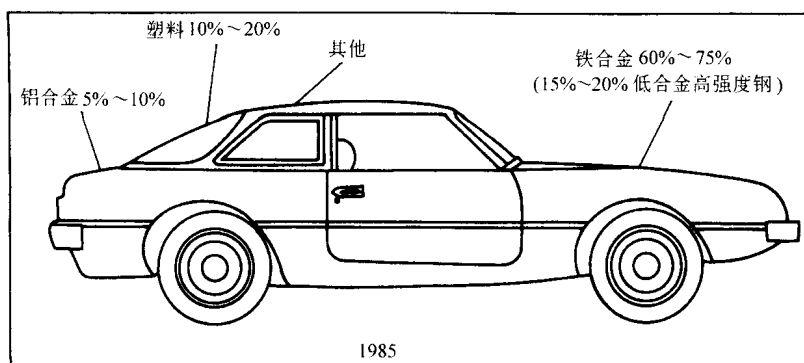


图 0-1 汽车中各种材料的大致比例

钢铁材料在 20 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 7.0×10^3 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；另一方面也是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有关，最后导致了能以低的成本生产出高质量的钢材。

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、化工和建筑行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。

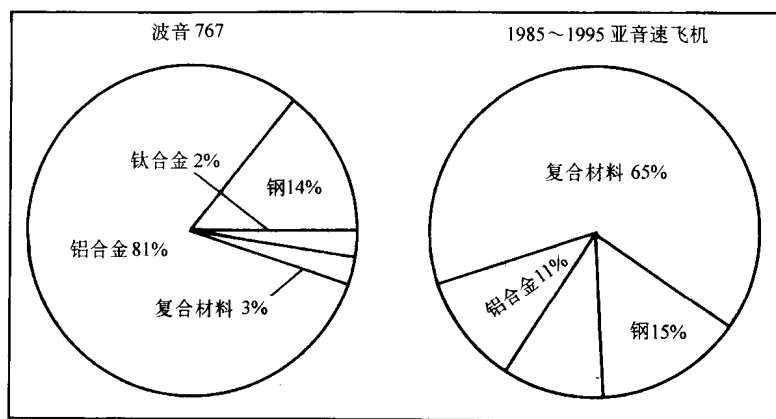


图 0-2 波音 767 飞机所用的各种材料比例

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。这种新型结构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