




普通高等教育“十五”国家级规划教材

现代工程材料成形 与机械制造基础

上册 ■ 孙康宁 主编 傅水根 主审

 高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

现代工程材料成形与 机械制造基础

上 册

	孙康宁	主 编	
王 昕	莫德秀	张景德	副主编
毕见强	范润华	谭训彦	参 编
	傅水根	主 审	

高等教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代工程材料成形与机械制造基础.上册/孙康宇主
编.—北京:高等教育出版社,2005.3
普通高等教育“十五”国家级规划教材
ISBN 7-04-016097-8

I. 现... II. 孙... III. ①工程材料-成形-高等
学校-教材②机械制造工艺-高等学校-教材 IV.
①TB3②TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 005509 号

策划编辑 龙琳琳 责任编辑 李京平 封面设计 刘晓翔 责任绘图 朱 静
版式设计 王 莹 责任校对 胡晓琪 责任印制 孔 源

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	北京蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	北京铭成印刷有限公司		
开 本	787×960 1/16	版 次	2005 年 3 月第 1 版
印 张	25.25	印 次	2005 年 3 月第 1 次印刷
字 数	470 000	定 价	28.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 16097-00

前 言

随着知识更新的加快、学科大幅度的调整和现代工业结构的变化,“工程材料及机械制造基础”作为高等院校学生了解、认知现代工业的窗口课程和应当具备的大工程基础,其原来的知识体系与内容构成已远远滞后于时代的发展。为充分体现各学科的交叉、融合与现代工业的“综合性”特点,全面拓宽课程的知识体系,使理论、实践、素质教育、创新和现代教育技术有机地结合在一起,编者认为新的课程内容横向上不仅应涵盖常规机械制造技术,还应充分体现与现代制造技术、材料科学、现代信息技术和现代管理科学等学科的密切交叉与融合;纵向上不仅应涵盖现有工程材料成形和制造技术,还要体现工程材料和制造技术的历史传承和未来发展趋势。事实上,由于各学科、各行业对制造技术或多或少地涉及,使本课程成为不同专业共同的工业基础知识平台。再加上该课程兼有基础性、实用性、知识性、实践性与创新性等特点,使其在一定程度上成为理、工、医、文、管理、艺术等不同学科之间交叉的“点”,成为当前培养复合型人才的重要基础之一。

本书是根据教育部机械基础课程教学指导分委员会有关“重点院校金属工艺学课程改革指南”精神,借鉴国外教材内容、结构特点,并结合作者多年来取得的教学改革经验和成果编写而成的。编写指导思想是:继承教材原有的基础性、综合性、实践性特点,力求实现两个基本转变,即将金属材料制造工艺为主的课程内容向工程材料制造工艺为主的课程内容转变,实现将机械制造工艺为主向制造工艺为主的知识体系转变;展现新材料制备与制造技术在跨学科领域中的交叉渗透和通道作用,力争与国际最新教材知识体系接轨。

本书有以下主要特点:

(1) 力求处理好常规工艺与现代新技术的关系。对于仍广泛用于现代机械制造工业的常规工艺精选保留;对于过时的内容予以淘汰;对于技术上较成熟、应用范围较宽或发展前景看好的新材料、新技术、新工艺(即“三新”)作为基本内容引入,使“三新”内容在本课程理论教学中占1/3以上。例如,在新的教材中增加了材料及制造技术发展史与研究进展;制造类企业的特点与组织结构;在传统金属材料及热处理的基础上增加了部分常用工程材料的性能、材料学基础知识以及表面工程技术和非金属材料热处理的内容;增加了粉末冶金与陶瓷材料的成形工艺、高分子材料的成形工艺、复合材料的成形工艺三章;把材料与制造技术有机地联系起来,体现了将金属制造工艺为主向工程材料制造工艺为主

的课程内容的转变。

(2) 全面体现先进制造工艺技术的特点,并重点增加或增强了数控加工技术、快速成形技术、非金属材料的加工、计算机集成制造技术等先进制造工艺和应用实例,以体现现代制造技术的特征。首次增加了电子设备制造技术基础,包括集成电路制造技术、插接件制造技术、壳体制造技术和装配技术,增加了工业管理与可持续发展对制造技术的影响等相关内容,比如质量与成本、管理与效益、产品生产的可行性分析、机械制造技术与环境保护等。从而使本课程与信息技术、市场经济融为一体,体现了现代制造技术与有关学科的相互交叉与渗透。

(3) 教材内容既系统丰富又重点突出,为学生预留了足够的自学与思考的空间,每章附有学习指南和与其他章节相互关联的提示。各个章节既相互联系,又相对独立,力图建立起柔性较大的模块化教材体系,以适应培养复合型、创新型人才的需求,并方便不同专业、不同学习背景、不同学时、不同层次的学生选用。

因此,本书既是适用于工科各专业学习现代制造技术的专业基础教材,也是培养复合型人才,为理、医、文、管理、艺术等不同学科之间提供快速工业知识渗透的特色基础教材。

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,由山东大学孙康宁、王昕负责组织编写。全书分为上、下两册,上册由山东大学孙康宁主编,王昕、莫德秀和张景德任副主编。其中第一章、第二章由孙康宁编写,同时参与了第三章第三节、第四节,第七章第六节,第八章第四节,第九章第一节的编写;第三章其他节与第四章由山东大学张景德与王昕编写;第五章与第八章其他节由山东理工大学莫德秀编写;第六章由山东大学范润华编写;第七章其他节由山东大学谭训彦编写;第九章其他节由山东大学毕见强编写。

下册由山东大学李爱菊主编,林钦平、王瑞芳和周桂莲任副主编。李爱菊编写了第二章;第一章、第八章由合肥工业大学王瑞芳编写;第六章、第七章由福州大学林钦平编写;第三章、第九章由青岛科技大学周桂莲编写;第四章由山东大学龚红宇、范润华编写;第五章由山东大学李爱菊、甄玉花、卢瑶编写。

本书由清华大学傅水根教授主审。在教材编写中得到原《现代工程材料成形与制造技术基础》编写人员提供的一些宝贵资料,在此一并表示感谢!

由于编者水平所限,本书难免存在不当之处,诚请各位读者提出宝贵意见。

编 者

2004年8月

目 录

第一章 工程材料与制造技术简论	1
第一节 工程材料的发展简述	1
一、金属材料的发展简述	3
二、无机非金属材料(陶瓷)的发展简述	8
三、工程塑料的发展简述	11
四、复合材料的发展简述	13
五、其他先进材料简介	17
第二节 制造(工艺)技术发展史、现状与发展趋势	25
一、制造技术的发展史	25
二、制造技术的现状	26
三、制造业及先进制造技术的发展趋势	29
第三节 制造类企业的组织结构与运行模式	30
一、近代企业的组织结构与运行模式	30
二、现代企业的组织结构与运行模式	31
第四节 产品制造的过程简介	36
一、产品与零部件设计	36
二、产品或零件的选材与制造	39
第五节 课程的性质、任务和学习要求	40
本章学习指南	41
复习思考题	41
第二章 工程材料的性能及应用基础	42
第一节 工程材料的力学性能	42
一、强度	42
二、塑性	47
三、冲击韧性	47
四、疲劳强度	48
五、硬度	49
六、断裂韧性	51
七、材料的高温性能	52
八、高弹性和粘流性	53
第二节 材料学基础	53

一、金属学基础	54
二、陶瓷材料学简介	73
三、高分子材料学简介	78
第三节 工程材料的分类、编号及用途	79
一、金属材料	79
二、高分子材料	90
三、无机非金属材料	94
四、复合材料	96
本章学习指南	97
复习思考题	97
第三章 热处理与表面工程技术	99
第一节 钢的热处理	99
一、钢在加热和冷却时的组织转变	99
二、钢的热处理工艺	102
三、其他热处理	107
第二节 金属间化合物材料的热处理	109
第三节 非金属材料的热处理	111
一、玻璃的热处理	112
二、陶瓷的热处理	114
第四节 表面工程技术	116
一、表面工程技术分类	116
二、表面工程技术简介	117
本章学习指南	129
复习思考题	129
第四章 材料的液态成形工艺	130
第一节 金属铸造工艺简介	130
第二节 铸造工艺基础知识	131
一、液态金属的充型能力	132
二、合金的凝固特性	134
三、合金的收缩性	136
四、合金的吸气性及气孔	139
五、常用铸造合金的铸造性能特点	140
六、新型材料——金属间化合物及其铸造性能特点	141
第三节 砂型铸造	143
一、造型方法的选择	143
二、砂型铸造常见缺陷	146

第四节 特种铸造	147
一、金属型铸造	147
二、熔模铸造	148
三、压力铸造	149
四、低压铸造	150
五、离心铸造	151
六、铸造方法的选择	152
第五节 铸件结构工艺性	153
一、铸件结构应利于避免或减少铸件缺陷	153
二、铸件结构应利于简化铸造工艺	155
三、铸件结构要便于后续加工	158
第六节 计算机在铸造生产中的应用简介	159
一、系统组成	160
二、测试系统的工作过程	161
三、控制系统	161
本章学习指南	162
复习思考题	162
第五章 材料的塑性成形工艺	163
第一节 塑性成形理论基础	164
一、塑性变形机理	164
二、加工硬化、回复和再结晶	165
三、冷变形、热变形、温变形	166
四、锻造比与锻造流线	166
五、塑性成形基本定律	168
六、材料的塑性成形性	169
第二节 金属塑性成形方法	171
一、自由锻	171
二、模型锻造	180
三、板材冲压成形	187
第三节 锻压件结构工艺性	202
一、自由锻件的结构工艺性	203
二、模锻件的结构工艺性	204
三、冲压件的结构工艺性	205
第四节 先进塑性成形方法	210
一、精密模锻	210
二、摆动碾压	212
三、液态模锻	213

四、径向锻造	214
五、粉末锻造	215
六、超塑性成形	216
七、高能成形	217
本章学习指南	219
复习思考题	220
第六章 材料的连接技术	224
第一节 焊接理论	224
一、焊接热过程及焊接热源	225
二、焊接化学冶金	228
三、焊接接头的金属组织和性能	231
四、焊接过程模拟	232
第二节 常用连接工艺	234
一、熔焊	234
二、压焊	239
三、钎焊	241
四、焊接新工艺的发展	242
五、各种焊接方法的比较	243
六、铆接	245
七、胶接	246
第三节 各种材料的连接	249
一、金属材料的焊接	249
二、塑料的焊接	254
三、异种材料的连接	256
第四节 焊接结构及工艺性	257
一、焊接结构材料的选择	258
二、焊缝的布置	259
三、焊接接头及其设计	263
四、焊接应力与变形	266
第五节 焊接质量检测	271
一、焊接缺陷	271
二、常用检验方法	272
本章学习指南	275
复习思考题	276
第七章 粉末冶金与陶瓷材料的成形工艺	279
第一节 粉体成形原理	279

一、粉料的基本物理性能	279
二、压制成形原理	281
三、可塑泥团的成形原理	284
四、泥浆/粉浆的成形原理	286
第二节 粉体制备技术	289
一、粉碎与机械合金化方法	289
二、合成法	290
第三节 粉末冶金的成形工艺	297
一、压制成形	297
二、粉浆浇注成形	300
三、楔形压制	301
第四节 陶瓷材料的成形工艺	301
一、普通日用陶瓷的成形工艺	301
二、高技术陶瓷的成形工艺	305
第五节 烧结	310
一、烧结工艺	311
二、烧结方法	312
第六节 陶瓷与粉末快速成形工艺	312
一、快速成形原理	313
二、快速原型技术的发展现状	314
三、快速成形技术的加工特点	315
四、粉体的分层实体制造技术	315
五、选择性激光烧结工艺	315
六、三维打印法	316
本章学习指南	317
复习思考题	318
第八章 高分子材料的成形工艺	319
第一节 高分子材料成形原理	319
一、高分子材料的结构	319
二、高分子链内旋转构象及其柔顺性	320
三、高聚物的聚集态和物理状态	321
四、聚合物的成形性能	322
五、高聚物的类型	323
第二节 塑料成形工艺	324
一、塑料的组成	324
二、塑料的性能	325
三、塑料的分类	328

四、塑料成形工艺	329
五、典型模具结构	332
六、塑料件的结构工艺性	339
七、常用零件的塑料选材	342
第三节 橡胶成形工艺	343
一、橡胶的组成	343
二、橡胶的成形性能	345
三、橡胶加工的工艺过程	345
四、橡胶成形方法	348
五、常用橡胶材料	350
第四节 薄膜成形技术简介	352
一、薄膜的成形工艺	353
二、拉幅薄膜的成形	354
第五节 高分子材料快速成形方法	354
一、常用高分子快速成形技术	355
二、快速成形技术的应用	359
本章学习指南	360
复习思考题	361
第九章 复合材料的成形工艺	363
第一节 复合材料简介	363
一、复合材料基本概念	363
二、复合材料使用的原材料	365
三、复合材料的增强机制和复合原则	367
四、复合材料的失效	369
第二节 金属基复合材料成形工艺	370
一、固态法	370
二、液态法	372
三、其他方法	375
第三节 树脂基复合材料成形工艺	376
一、手糊成形工艺	376
二、喷射成形工艺	377
三、袋压成形工艺	377
四、层压成形工艺	378
五、模压成形工艺	379
六、缠绕成形工艺	380
七、拉挤成形工艺	381
第四节 陶瓷基复合材料成形工艺	382

一、模压成形	382
二、等静压成形	383
三、注浆成形	383
四、热压成形	384
五、注射成形	384
六、直接氧化法	384
七、化学气相渗透工艺	385
本章学习指南	386
复习思考题	386
参考文献	387

第一章 工程材料与制造技术简论

人类为了自身的生存与发展,在各种生产活动中逐渐形成了不同的产业,这些产业包括大家熟悉的第一产业——农业,第二产业——工业,第三产业——信息与服务业。由于工业在国民经济和社会发展中的重要地位,工业化进程一直被认为是现代化的标志。现代工业门类繁多,但概括起来可分为材料工业、能源工业、建筑业和制造业等。其中材料工业与制造业密切相关。材料工业是将自然资源制备成具有各种性能或功能、能满足各种要求的材料;制造业则是将材料加工制造成各种产品,以满足人类生活、生产和社会的需求。因此就本课程而言,要想获得所需要的各种制造技术知识,除要了解制造技术的历史和现状、制造类企业的组织结构和产品生产过程外,还需要对工程材料的发展和制备技术有一个基本的了解。为此本章将重点介绍工程材料和制造技术的历史、现状和发展以及制造类企业的组织结构和产品生产过程,希望读者能在进入现代工程材料成形与机械制造基础的学习之前,对工程材料和制造技术的背景有一个比较完整的了解,以利于本课程和后续相关知识的学习。

第一节 工程材料的发展简述

材料是人类用以制作有用物件的物质,而新材料主要是指最近发展起来或正在发展之中的具有特殊功能和效用的材料。人类历史证明,材料是人类社会进步的物质基础和先导。

世界各国对材料的分类虽然不尽相同,但按照传统的分类方法可以分为金属材料、无机非金属材料(陶瓷)、有机高分子材料和复合材料四大类。这四类工程材料虽然都有漫长的发展历史,但其在不同历史阶段所具有的相对重要性却是不断变化的。在图 1-1 中对上述四类材料在不同历史年代的相对重要性进行了描述。

现代工程材料的种类更是千差万别,例如按照材料的使用功能,可以将材料分为结构材料、功能材料、生物材料、智能材料、生态环境材料、信息功能材料等。按照材料的维度,又可以将材料分为三维块体材料、二维薄膜材料、一维纤维材料和零维纳米颗粒材料等。按照组成材料的尺度,还可将材料分为毫米级材料、微米级材料、纳米级材料、分子和原子级材料等。材料种类不同,不仅用途不同,性能差异巨大,而且制备工艺与材料成形技术也各不相同,但是不管哪种材料,

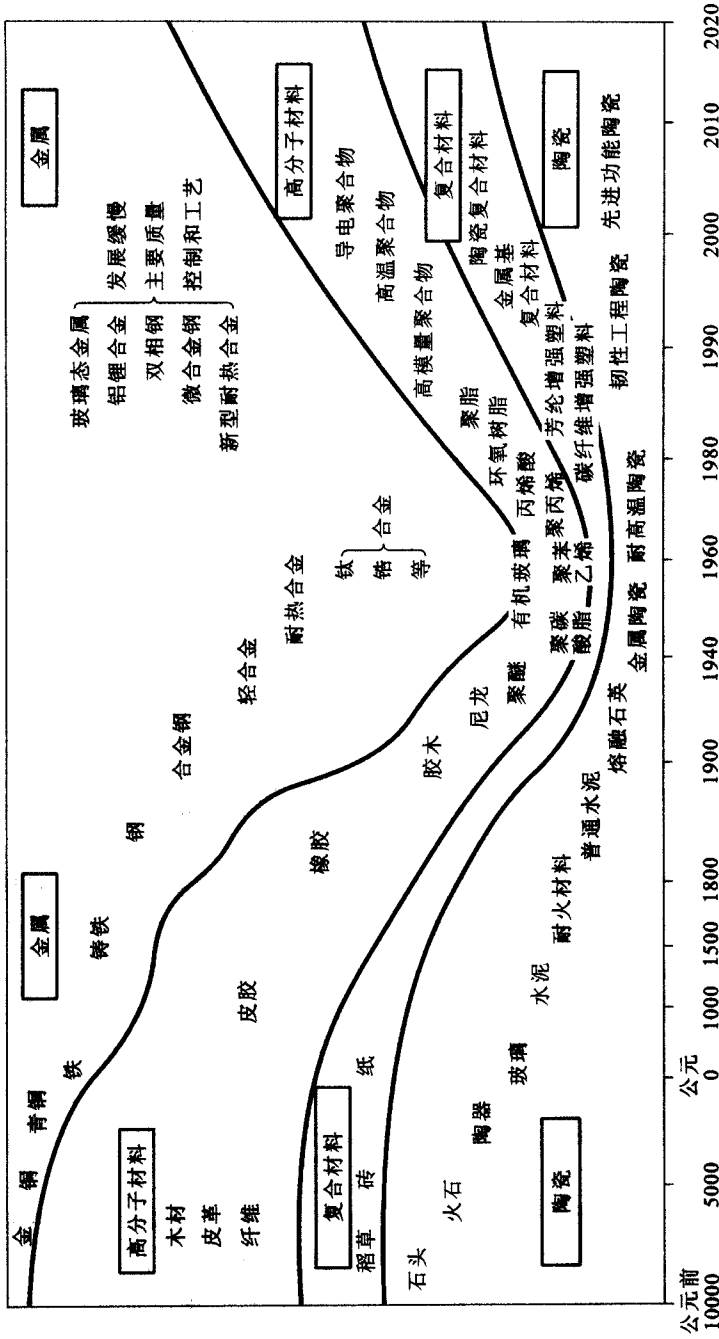


图 1-1 工程材料发展历史随时间推移的相对重要性示意图 (时间是非线性的)

它们在自己的应用领域都起着十分重要的作用。本节将结合部分材料的发展现状加以介绍。

一、金属材料的发展简述

众所周知,金属材料具有其他材料体系不可能完全取代的独特的性质和使用性能,这是由于金属材料主要通过金属键结合而成,这种键合特点使得金属有比高分子材料高得多的模量、比陶瓷高得多的韧性、可加工性、磁性和导电性。正是具有了上述特点,使金属材料迄今为止不仅难以被快速发展的其他材料体系所替代,而且是不断的推陈出新,在工程材料中占有十分重要的地位。

1. 金属材料的发展史

早在公元前 5000 年,人类就已发现并开始使用金属材料,青铜是最早发现和使用的材料之一,历史上称之为青铜器时代。中国早在公元前 2500 年就开始使用铁,公元前 1500—1200 年为铁器时代,以后随着铁和钢冶炼方法的不断发现和改进,人类社会生产力水平不断提高,社会不断进步,到了 18 世纪英国产业革命期间,钢铁工业开始迅猛发展,成为产业革命的主要潮流和物质基础,其他金属材料也得到相应的快速发展。到 20 世纪中叶,金属材料一直在材料工业中占有统治性的主导地位。例如:19 世纪 20 年代法拉第开始研究合金钢,1839 年巴比特研制出轴承合金,1856 年贝斯麦在转炉中将生铁精炼成钢,1906 年泰勒和霍特研制出切削用高速钢,1911 年德国杜伦开始时效硬化铝的工业化生产(杜拉铝),1912 年美国的海恩兹发明用作切削刀具的钨钴硬质合金,1912 年英国的布莱尔(勒)发明马氏体不锈钢,1923 年克虏伯公司发明钨钴硬质合金,弗来伊公司发明钢氮化表面硬化法,1938 年克诺尔和卢斯卡发明电子显微镜,1940 年日本北圆一郎和五十岚勇发明特超硬铝,1948 年美国的米尔斯在铸铁水中加镁成功地制成球墨铸铁,1952 年杜立确立了纯氧顶吹转炉炼钢法(LD 法),1959 年福特公司研制出 TiC 金属陶瓷(TiC - Ni - Mo 合金)切削刀具,1960 年美国瓦卡恩公司研制出超导体材料 Nb - Zr 合金,1970 年美国和瑞典研制出粉末高速钢,1973 年日本钢产量首次超过 1 亿吨。在这期间以氧气顶吹为代表的炼钢工艺,使钢铁生产能力得到前所未有的突破,以轴承合金、球墨铸铁、超硬铝、硬质合金等为代表的一大批金属新材料,极大地满足了现代工业生产的需要,以电子显微镜和钨钴硬质合金、碳化钛金属陶瓷为代表的金属材料检测仪器的发明以及切削加工材料的研制成功,反过来进一步推动了金属材料的发展。应该说金属材料的发展历史是悠久的,进入 19 世纪后呈现出异乎寻常的发展速度,出现了前所未有的辉煌。

2. 金属材料的发展现状

自 20 世纪 50 年代以后,大约近半个世纪以来,随着高分子材料(尤其是高

分子合成材料)、无机非金属材料(尤其是先进陶瓷材料)以及金属基、陶瓷基和树脂基先进复合材料的发展,开始出现一些金属材料的“代用品”。如高技术陶瓷、高分子材料、先进复合材料已经发展成为一些独立的工业体系,出现了所谓“高分子时代”、“先进陶瓷时代”、“先进复合材料时代”等提法,这实质上反映了新材料对传统金属材料的挑战,在这种严峻的形势下,出现了钢铁材料是否已进入“夕阳”工业的争论。然而,尽管新型塑料、陶瓷、复合材料的平均年增长率分别超过16%、8%、7%以上,而新型金属材料平均年增长率仅2%~3%,但是新型金属材料及其制品的营业额却超过了其他新材料及其制品营业额的总和,这说明金属材料毕竟是一种系统、完整、历史悠久的传统材料,并且其基数大,增长率低并没有动摇其在新材料发展中的重要地位,尤其最重要、最根本的原因是金属材料具有其他材料体系不可能完全取代的独特性质和使用性能,比如有比高分子材料高得多的模量、比陶瓷高得多的韧性、磁性和导电性,而且也不断在推陈出新,向极限材料挑战,所以新金属材料近几十年来已取得长足进展。归结起来主要围绕以下几个方面向纵深发展。

(1) 高纯材料 以超高纯铁为例,在高纯状态,纯铁不仅有优异的软磁性能和良好的耐腐蚀性能,残余电阻率(residual resistivity ratio, RRR)高,而且以高纯铁为基础进行合金研制,预计在高真空容器、极低温材料、核反应堆材料等方面的应用将十分引人注目。

(2) 高强度及超高强度金属材料 超高强度是当代材料科学家为减轻重量、节省资源而追求的目标,这在航空航天、原子能、深海潜艇等领域有极大的需求,典型实例是飞机起落架。提高材料强度,严格讲,一是指提高材料抵抗塑性变形的能力,二是指提高材料抵抗破坏的能力。提高材料抵抗塑性变形的能力通常叫强化,提高材料抵抗破坏的能力叫韧化,两者同时提高,则称强韧化。通常典型超高强度材料包括超高强度钢、高强度铝合金、高强度钛合金等。

(3) 超易切削钢和超高易切削钢 金属材料通常要求机械加工,据统计,切削加工费用大约占总成本的75%。若改成超高易切削钢,试验表明刀具寿命可提高30倍,因此零件成本会大幅度下降,甚至可减少一半。其社会效益和经济效益极其显著。

超易切削钢主要设计原理为:通过加入硫、铅、钙等元素,使材料本身存在空洞和软物质。

(4) 硬质合金与金属陶瓷 工具和耐磨材料通常要求高硬度、高耐磨性、耐高温、抗氧化,因此传统金属材料难以胜任。自1923年克虏伯公司发明碳化钨钴合金以来,到目前为止,各种硬质合金和金属陶瓷材料发展迅速,尤其在刀具、模具、轧辊、耐磨材料等应用领域,得到十分广泛的应用,其中硬质合金除WC-Co等系列外,WC-TiC-TaC-Co系列以及各种新的系列(包括各种表面

陶瓷涂层刀具)发展迅速。经过几十年的发展,硬质合金性能已有极大提高,例如硬度可达 93 HRA,抗弯强度可超过 300 MPa,其用途更广泛。今后仍需研究解决的问题包括:刀具与被切削材料的反应、积屑瘤问题、物理性能与杂质关系等方面的问题。

金属陶瓷(Cermet)最早是为耐磨材料而研制,它是金属材料(metal)与陶瓷(ceramic)的复合材料。新的金属陶瓷材料目前不仅用于耐磨材料,而且已用于刀具和模具,例如由 $\text{Al}_2\text{O}_3 + (\text{W}, \text{Ti})\text{C} + \text{Mo} + \text{Ni}$ 等成分组成的金属陶瓷,其硬度达 94.5 HRA,抗弯强度达 1 250 MPa,断裂韧性达 $8\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,性能优越。

(5) 高温合金与难熔合金 由于飞机涡轮发动机进口温度高达 1 240 °C 以上,因此飞机发动机喷嘴及动静叶片也必须在 1 000 °C 或更高温度下才能可靠工作。目前可用于高温合金的材料主要由铁、镍、钴组成,其中当铁的质量分数大于 50% 时,称耐热钢;当铁的质量分数小于 50% 时,称高温合金。研究表明:镍基高温合金较钴基合金发展更快,典型合金有尼莫尼克合金(Ni、Cr、Ti、C)等。

难熔合金通常是指在超高温(超过 1 300 °C)下仍具有很高强度的合金,由铌、钼、钽、钨等高熔点合金组成。但是上述合金也有缺点,如易氧化、密度大、熔点高、难熔炼、难加工等。目前已研制出的合金有铌基合金、钼基合金、钽基合金、钨基合金。制备方法包括电子束法熔炼、粉末冶金法等。其中钽基合金使用温度为 1 650 °C ~ 1 930 °C,低温使用温度为 -240 °C,该材料低温韧性好,可使用温度范围宽。钨基合金使用温度最高,可高达 2 000 °C。

(6) 纤维增强金属基复合材料 该类复合材料的比强度极高,其强度 σ_c 很大程度上取决于增强体纤维强度 σ_f 。目前可供选择的纤维较多,如硼纤维、碳纤维、碳化硅纤维、玻璃纤维、氧化铝纤维等。纤维的选择原则是:密度小,弹性模量 E_f 大,强度 σ_f 高。金属复合材料的发展目标是:制备出各种比强度、比弹性模量高的材料。

(7) 共晶合金定向凝固材料 该材料属新型复合材料,是共晶合金在特殊工艺条件下制备出来的复合材料,其性能特点是在超高温情况下呈现更高强度。它是通过温度梯度定向凝固,使共晶各相在本身的相上连续长大而成的复合材料,这种复合也叫原生复合(in situ composite)。目前已研制出的典型材料有 Cu - Cr 共晶合金(Cr 为晶须, $w_{\text{Cr}} = 1.6\%$)、Al - Al_3Ni 共晶合金(Al_3Ni 为晶须, $w_{\text{Al}_3\text{Ni}} = 10\%$),此外 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZnO}_2$ 陶瓷复合材料也在进行研究。

共晶合金定向凝固材料可广泛用于涡轮叶片等耐热材料,也可以用于偏光材料。

(8) 快速凝固金属非晶及微晶材料 快速凝固技术是 20 世纪下半叶以来