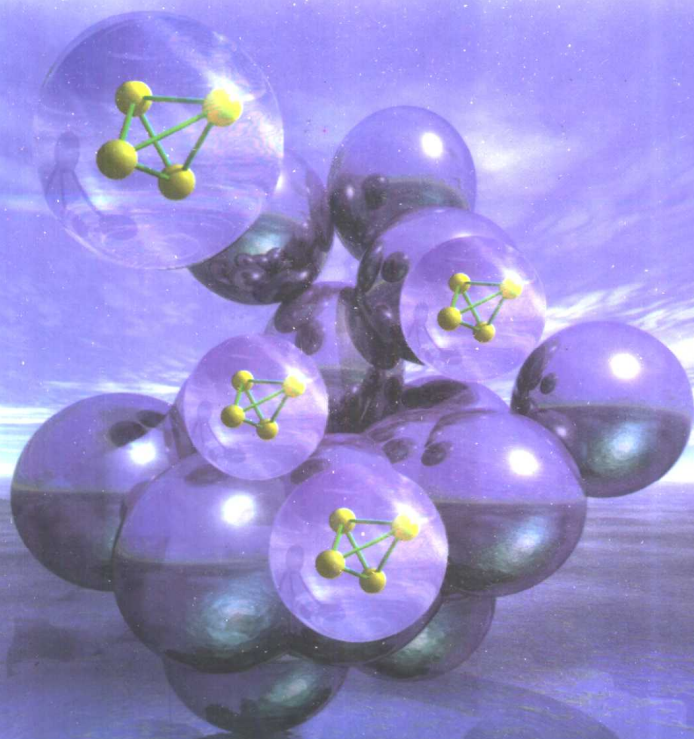


山东省教育厅“九五”立项重点教材

现代工程材料成形 与制造工艺基础

上册

孙康宁 程素娟 孙宏飞 主编



机械工业出版社
China Machine Press

山东省教育厅“九五”立项重点教材

现代工程材料成形与制造 工艺基础

上册

主编	孙康宁	程素娟	孙宏飞
参编	张文丛	张景德	尹衍升
	杨丽颖	崔焕勇	谭训彦
	刘红军	魏华凯	
主审	徐庆莘		

机械工业出版社

本书是根据教育部工程材料与机械制造基础课程指导小组的教改精神和山东省教育厅提出的面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划, 由山东省教育厅组织编写的系列教材之一。

本书由六章组成: 第一章介绍了工程材料和制造技术的历史、现状和发展; 第二章介绍了工程材料性能与表面工程技术; 第三章介绍了金属材料的成形工艺基础; 第四章介绍了高分子材料的成形基础; 第五章介绍了无机非金属材料的成形基础; 第六章介绍了复合材料的成形基础。

本书除可作为高等院校工程、管理等专业的制造技术基础类教材外, 也可作为从事材料科学与工程、机械制造、管理类技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代工程材料成形与制造工艺基础. 上册/孙康宁等
主编. —北京: 机械工业出版社, 2001.5
山东省教育厅“九五”立项重点教材
ISBN 7-111-08719-4

I. 现... II. 孙... III. 工程材料-高等学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 02375 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 董连仁 版式设计: 张世琴 责任校对: 刘志文
封面设计: 方 芬 责任印制: 路 琳

北京大地印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷
787mm×1092mm^{1/16}·15 25 印张·373 千字

0 001—6000 册

定价: 22.00 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)68993821、68326677-2527

《现代工程材料成形与制造工艺基础》 编委名单

主任委员：刘向信

副主任委员：陈国乾 孙康宁

委员：王 昕 徐庆莘 田柏龄 张平惠
徐鸿本 李振明 崔明铎 单洪标

序

为了培养面向 21 世纪综合型和创新型人才,我国高等教育的教学改革正在高等院校迅速开展并取得一系列重要成果。从高等教育的培养目标到课程内容和体系改革,从学科发展到实验室建设,从理论教学到工程实践,从考试方法到现代教育技术,从思想观念到改革实践,人们都在不停地思考着和实践着。其中课程内容和体系改革的一个十分重要的方面就是要落实到教材改革上。由孙康宁等主编的《现代工程材料成形与制造工艺基础》(上、下册)就是各参与院校课程内容和体系改革的一个重要体现。

从系统理论的观点看,现代制造业涵盖了材料、设计、工艺、管理和市场五个方面。而本书的落脚点是在材料、材料成形和制造工艺等主要方面。作者从发展的观点出发,既有选择性地保留了原教材重要的基本内容,又结合制造业的发展现状,充实了原教材所缺乏的新材料、新技术和新工艺。在上册中,大幅度地缩减了常规铸造、锻压和焊接的内容,而相应大大增加了日趋广泛的表面工程、高分子材料和无机非金属材料的篇幅;在下册中,特种加工方法和先进制造方法已占有重要地位,并考虑到计算机的普遍应用,增加了计算机及电子电器制造基础一章。这样,不但对拓宽学生的知识视野,培养学生的创新意识和创新能力将大有裨益,而且有利于在人才培养方面可以缩小学校教育与社会需求的差距,在工艺技术方面缩小与发达国家的差距。另外,本书在质量与成本控制、工业管理和环境保护等方面找到了与管理的结合点,使得现代制造与市场的衔接更加趋近。教材新内容的不断累计所产生的量变,必然导致整个课程体系的质变。尽管这样,如果在课程体系方面适当考虑零件的设计结构工艺性,就可以进一步找到制造工艺与设计的结合点。

总之,本书是在我国教育教学改革浪潮中,响应专业委员会对新教材提出的要求,对金工讲课教材内容和体系进行大力度改革的一次尝试。主编和参编者结合自己的教学、科研和改革实践为本书的出版付出了大量的心血。相信今后在试用的基础上做进一步的修改,必将使教材的内容和体系更为完善,为培养新世纪具有综合型和创造型的大学生做出更大的贡献。

教育部工程材料与机械制造基础课程指导小组组长
傅水根教授

2000 年 7 月 30 日

前 言

随着科学技术的飞速发展和社会的进步,以金属材料为主导的机械制造技术基础已发生了根本性的变化,金属在现代制造业中所占的比重日益下降,各种新材料所占的比重越来越大,各学科以计算机与信息技术为媒体相互渗透,因此机械制造技术基础已不再是仅仅涉及金属的制造技术基础,而是涉及各种不同工程材料的制造技术基础。同样道理,随着各学科的相互交叉、融合,工程材料的制造技术基础也不仅仅是局限于机械制造领域,而是涉及不同制造行业共同的制造技术基础。所以拓宽金属工艺学或机械制造技术基础的研究领域,建立一门以现代工程材料成形与制造工艺为基础的课程,是适应工程教育和现代制造技术发展的必然结果。此外,新材料的设计、制备、加工成形已不再截然分离,在很多领域,材料制备技术与加工成形技术已呈现一体化的趋势。基于上述原因,根据教育部工程材料与机械制造基础课程指导小组的教改精神和山东省教育厅提出的面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划,结合山东省教育厅重点计划教改项目“金属工艺学课程及其实验的改革与创新体系”,参照国内外课程改革的经验,由山东省教育厅组织编写了《现代工程材料成形与制造工艺基础》教材(上、下两册)。该教材是一部面向 21 世纪,建立在原金属工艺学基础上,力图把传统与先进制造工艺基础有机联系在一起,宽口径的,涉及不同学科的现代工程材料成形与制造工艺基础课程教材。该教材上册由六章组成:考虑到教学改革的要求和知识体系的完整性,第一章介绍了工程材料和制造技术的历史、现状和发展;第二章介绍了工程材料性能与表面工程技术;第三章介绍了金属材料的成形基础;第四章介绍了高分子材料的成形基础;第五章介绍了无机非金属材料的成形基础;第六章介绍了复合材料的成形基础。通过该体系,力求反映材料成形工艺基础的全貌,体现工艺与材料之间的内在联系。

课程特点 传统的金属工艺学作为重要的技术基础课,金工实习与金工实验作为重要的实践教学环节,在工科教育中曾占有不可替代的十分重要的地位。多年来它所以成为各学科共同的技术基础课,究其原因是因为金属工艺学涉及材料、材料加工工程和机械制造等多个学科的基础,而这些基础又是各学科培养有工程实践能力的高技术人才所必需的。但是随着知识经济悄然而至,新的学科体系的调整,新知识新技术的快速增加,各学科的相互渗透和交叉,市场经济对教育的无形调节,使传统的金工教学、实习体系在我国运行近 50 年后已难以在大工程背景下作为目前各学科共同的制造技术基础。除了传统知识体系的局限性、实习手段的落后、经费投入的不足外,课程的知识体系与有些学科的后续课程出现明显的脱节也是重要原因之一,这是传统课程已逐渐不适应现代工程教育的客观表现。所以建立一个既有继承性,又有创新性,同时所涉及的知识面又宽的新的知识体系是对本课程的基本要求。因此,本课程特点就是在知识体系上与现代材料成形与制造技术的发展相接轨,使之真正成为现代制造技术的基础之一。

课程基本要求 了解工程材料和现代制造(工艺)技术的发展历史、现状及其应用范围;掌握工程材料的基本制造工艺方法、特点和适用范围;能综合利用与材料、制造工艺、管理等方面有关的知识,创造性地解决基本工艺问题。

本教材上册由山东大学的孙康宁、山东工程学院的程素娟、山东科技大学的孙宏飞主编；由徐庆莘主审。另外，参编人员有：山东大学的谭训彦、张景德、尹衍升、山东建材工业学院的杨丽影、崔焕勇；哈尔滨工业大学汽车工程学院的张文丛；海军航空技术学院的刘红军、魏华凯。全书由孙康宁统稿。在编写过程中参考了有关教材和相关文献，并征求了有关机械类与非机械类学科专业及工厂企业人士的意见，在此向上述人员一并表示谢意。

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
2000年9月

目 录

序		
前言		
第一章 工程材料和制造技术的历史、现状和发展	1	
第一节 工程材料的历史、现状和发展	1	
一、金属材料特点与发展历史	1	
二、无机非金属材料(陶瓷)的特点、发展历史、现状和趋势	6	
三、复合材料的特点、研究现状及发展趋势	9	
第二节 制造(工艺)技术发展历史、现状与趋势	11	
一、制造技术的发展历史	12	
二、制造技术的现状	13	
三、制造业及先进制造技术的发展趋势	14	
第二章 工程材料性能与表面工程技术	16	
第一节 工程材料的力学性能	16	
一、强度	16	
二、塑性	17	
三、冲击韧度	17	
四、疲劳强度	18	
五、硬度	18	
六、断裂韧度	19	
七、高弹性和粘流性	20	
第二节 材料学基础	20	
一、金属的晶体结构	20	
二、多晶体结构及晶体缺陷	22	
三、纯金属的结晶过程	23	
四、金属的同素异构转变	24	
五、合金的相结构	24	
六、二元合金相图	25	
七、铁碳合金相图	28	
八、其它工程材料简介	32	
第三节 工程材料的分类、编号及用途	33	
一、金属材料	33	
二、高分子材料	40	
三、无机非金属材料	43	
四、复合材料	43	
第四节 表面工程与热处理技术	44	
一、表面工程技术简介	44	
二、热喷涂	44	
三、电镀与化学镀	47	
四、电刷镀	50	
五、热处理和化学热处理	51	
六、热浸镀	57	
七、涂料与涂装	59	
八、高能束技术	62	
复习思考题	62	
第三章 金属材料的成形工艺基础	63	
第一节 现代铸造成形技术	63	
一、铸造工艺特点	63	
二、砂型铸造	70	
三、特种铸造	76	
四、计算机在铸造生产中的应用简介	80	
第二节 现代塑性加工技术	82	
一、金属的塑性变形理论	83	
二、常用塑性加工方法	89	
三、其它塑性加工方法简介	104	
第三节 现代焊接技术	109	
一、焊接基础	110	
二、常用焊接方法	115	

三、常用金属材料的焊接	125	一、粉碎法	179
四、焊接结构工艺性	128	二、合成法	185
五、焊接缺陷及检验方法	132	第三节 日用陶瓷加工成形技术	190
第四节 金属成形关键新工艺		一、注浆成形	190
简介	132	二、可塑成形	191
一、铸造成形新工艺	132	三、压制成形	194
二、塑性成形新工艺	133	第四节 高技术陶瓷加工成形	
三、焊接成形新工艺	134	技术	195
复习思考题	135	一、注浆成形法	195
第四章 高分子材料的成形		二、可塑成形法	196
基础	138	三、模压成形法	197
第一节 概述	138	第五节 无机非金属材料的应用	199
第二节 聚合物成形原理	139	复习思考题	201
一、聚合物的加工性质	139	第六章 复合材料的成形基础	203
二、聚合物的流变性质	144	第一节 复合材料导论	203
三、聚合物液体在管和槽中的流动	145	一、复合材料概述	203
四、聚合物加工过程的物理和		二、复合材料的原材料	205
化学变化	146	三、复合材料的增强机制和复合原则	211
第三节 塑料加工成形技术	150	四、复合材料的损伤	214
一、工程塑料	150	第二节 聚合物基复合材料的成形	
二、塑料的成形方法	151	技术	215
三、塑料制品的加工	154	一、概述	215
第四节 塑料模具结构设计原理	155	二、预浸料	215
一、塑料模具的分类和基本结构	155	三、聚合物基复合材料的成形工艺	218
二、塑料零件的成形工艺性	158	四、复合材料的质量控制	222
三、分型面的选择	164	第三节 金属基复合材料成形	
第五节 薄膜成形技术	166	工艺	224
一、薄膜的生产方法	166	一、概述	224
二、拉幅薄膜的成形	167	二、常用金属基复合材料	224
复习思考题	168	三、金属基复合材料的制造工艺	227
第五章 无机非金属材料的成形		第四节 陶瓷基复合材料及其成形	
基础	169	工艺	227
第一节 无机非金属材料成形原理	169	一、概述	227
一、干压成形用粉体的成形性能	169	二、常用陶瓷基复合材料	227
二、可塑成形用泥团的成形性能	174	三、陶瓷基复合材料的制造工艺	230
三、注浆成形用泥浆的成形性能	176	复习思考题	231
第二节 粉体加工技术	179	参考文献	232

第一章 工程材料和制造技术的历史、现状和发展

现代制造工艺技术的研究对象是各种工程材料。要想掌握各种先进制造工艺基础，除要了解制造技术的历史和现状外，还必须对工程材料的发展有一个基本的了解。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，使读者能在进入现代材料成形与制造工艺基础的学习之前对工程材料和制造技术的背景有一个较完整的了解，以利于本课程和后续相关知识的学习。

第一节 工程材料的历史、现状和发展

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。人类社会发展的历史证明，材料是社会进步的物质基础与先导，是人类进步的里程碑。纵观人类利用材料的历史，可以清楚地看到，每一种重要新材料的发现和应⤵用，都将人类支配自然的能力提高到一个新的水平。材料科学技术的每一次重大发现，都会引起生产技术的革命，大大加速社会发展的进程，给社会生产和人民生活带来巨大的变化，把人类物质文明推向前进。

按照人类发现和使用材料的进程，人类先后经历了原始时期的石器时代；公元前 5000 年前后的青铜器时代；公元前 1300 年前后的铁器时代；18~20 世纪的钢铁时代；进入 20 世纪后半叶，作为发明之母的新材料的研制更是日新月异，出现了称之为“高分子时代”、“半导体时代”、“先进陶瓷时代”和“复合材料时代”等提法。这说明以单一种类材料为主导的时代已一去不复返了，材料的发展已进入丰富多彩的时代。但是，材料的发展并不是毫无限制的，随着资源、环境和生态对材料发展的制约，单独追求材料高的使用性能已不再是材料设计的唯一重要目标；相反，以保护资源、环境和生态为目的的材料设计思想已形成新的潮流，其中所谓“生态环境材料”，是以可持续发展为研究背景的典型概念。

随着科学技术的迅猛发展，新材料层出不穷，世界各国对材料的分类虽然不尽相同，但就大的类别来讲，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是不断变化的，如图 1-1 所示。

一、金属材料特点与发展历史

金属材料具有其它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，因此金属有比高分子材料高得多的模量，有比陶瓷高得多的韧性、可加工性、磁性和导电性。正是具有了这些特点，所以在其它材料体系迅猛发展的今天，金属材料同样也在不断的推陈出新，以满足工程中不断提出的使用要求。显然，认为金属材料工业属于夕阳工业的说法是不正确的，这从金属材料的整个发展过程来看，可以进一步说明这个问题。

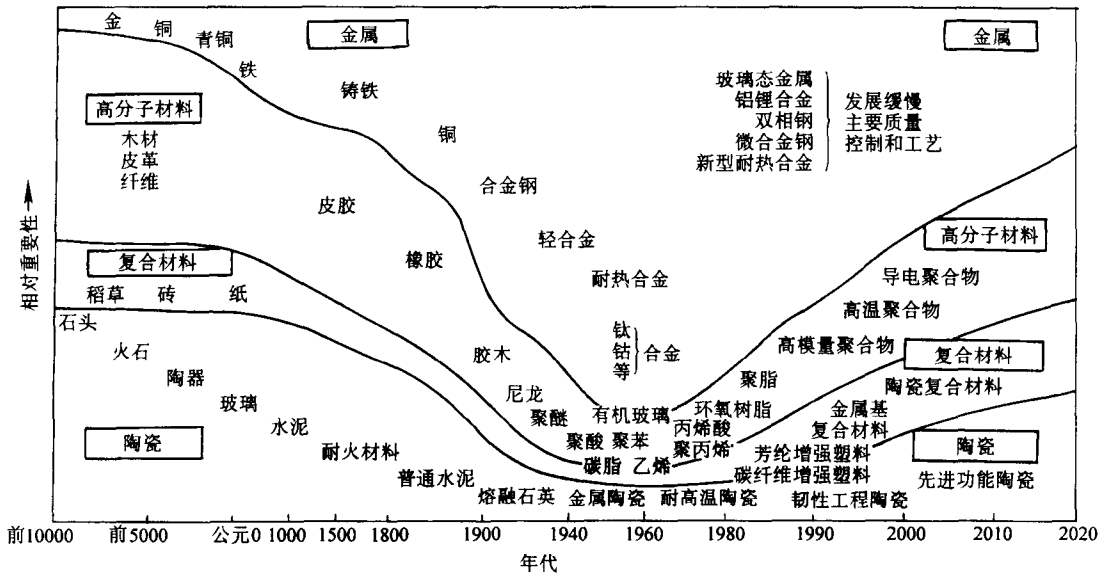


图 1-1 工程材料历史发展随时间推移的相对重要性示意图(时间是非线性的)

(一) 金属材料的发展史

早在公元前 3500 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。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,其它金属材料也得到相应的快速发展,到本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,1912 年美国的海恩兹发明用做切削刀具的钨钴钨硬质合金,1911 年德国杜伦开始时效硬化铝的工业化生产(杜拉铝),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,弗来伊公司发明钢渗氮表面硬化法,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液中加入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 Ni-Zr 合金,1970 年美国 and 瑞典研制出粉末高速钢,1973 年日本钢产量首次超过 1 亿 t。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,极大的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。

(二) 金属材料的发展现状

自本世纪 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),以及随着金属基、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”,这实质上反映了新材料对传统金属材料的竞争和挑战。在这种严峻的情况下,出现了钢铁材料业是否已进入“夕阳”工业的争论。但是,尽管新型塑料、陶瓷、复合材料的平均年增长率分别在16%、8%、7%以上,而新型金属材料平均年增长率仅2%~3%,然而新型金属材料及制品的营业额却超过了其它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,并且金属材料基数大,增长率低并没有掩盖金属材料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它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,而且金属材料也不断在推陈出新,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,在高纯状态下纯铁不仅有优异的软磁性能,良好的耐腐蚀性能,高的残余电阻率 RRR (Residual Resistivity Ratio),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、节省资源而追求的设计目标,这在航空、航天、原子能、深海潜艇等领域有极大的需求,典型代表是飞机起落架。提高材料强度,严格讲,一是指提高抵抗塑性变形的能力,二是提高材料抵抗破坏的能力。提高抵抗塑性变形能力通常叫强化,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 金属材料通常要求精加工,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,实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,因此传统金属材料则难以胜任。自1923年史律泰尔(德)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发展十分迅速,其中:硬质合金除 WC-Co 等系列外, WC-TiC-TaC-Co 系列及各种新的系列,包括各种表面陶瓷涂层刀具发展迅速。由于硬质合金和金属陶瓷是采用粉末冶金方法制备而成的,其性能不仅与材料配比有关,而且与粉末质量、粒度大小、粘结相、制坯工艺、烧结温度、烧结压力、保护气氛等都有直接的关系。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 93HRA,抗弯强度可超过 300MPa。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(Cermets)最早是为耐磨材料而设计,它是金属材料(Metals)与陶瓷(Ceramics)的复合材料。

新的金属陶瓷材料目前已不仅用于耐磨材料,而且已用于刀具、模具等工具。例如由 $Al_2O_3 + (W * Ti)C + Mo + Ni$ 等成分组成的金属陶瓷,其硬度达到 94.5HRA,抗弯强度达到 1250MPa,断裂韧度达到 $8MPa \cdot m^{1/2}$,性能优越。

5. 高温合金与难熔合金 由于飞机发动机进口温度高达 1240℃ 以上,因此飞机发动机喷嘴及动静叶片零件本身也必须在 1000℃ 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，其中当含铁量 $W_{Fe} > 50\%$ 时称耐热钢，当 $W_{Fe} < 50\%$ 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。

难熔合金通常是指在超高温（超过 1300°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，比如易氧化、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。其中钽基合金高温使用温度为 $1650 \sim 1930^\circ\text{C}$ ，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 2000°C 。为防止氧化，一般要在合金表面沉积硅化物，以减少氧化。难熔合金的发展方向是除具有一定强度、韧性外，还要求良好的抗氧化性。

6. 纤维增强金属基复合材料 复合材料是比强度极高的材料，其强度 σ_c (σ_c 表示复合材料强度)很大程度上取决于增强体纤维强度 σ_f (σ_f 表示纤维强度)，目前可供选择的纤维较多，例如碳纤维、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 ρ 小，弹性模量 E 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, $w_{Cr} = 1.6\%$)、Al-Al₃Ni 共晶合金 (Al₃Ni 为晶须, $w_{Al_3Ni} = 10\%$)，此外 Al₂O₃-ZnO₂ 陶瓷复合材料也在进行研究。

上述材料的优点是：基体与强化相接近热力学的平衡状态，故在高温下不用担心强化相与基体之间的反应。实验表明，共晶合金定向凝固材料的性能比同一合金非定向凝固合金高出 4 倍。该材料的缺点是：强化相一定后，则不能进一步改善，共晶合金定向凝固材料仅限于共晶成分合金或近共晶成分合金，可供选择余地小。

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. 快速冷凝金属非晶及微晶材料 快速冷凝技术是本世纪下半叶以来材料制备技术中的重大突破，由此产生了一系列非平衡态的金属合金，包括：非晶 (Amorphous)、微晶 (Microcrystallites)、纳米晶 (Nanocrystals)、准晶 (Quasicrystals)。其技术关键是极快的冷凝速度。常规冷凝速度如果在 $(10^{-5} \sim 10^3)\text{K/s}$ ，则凝固后枝晶间距为 $5000 \sim 500\mu\text{m}$ ；快速冷凝速度高达 $(10^3 \sim 10^6)\text{K/s}$ (甚至更高)，则此时枝晶间距为 $5 \sim 0.5\mu\text{m}$ ，或小于 $0.5\mu\text{m}$ 。快速冷凝之所以导致非晶和微晶材料，其冷凝机制为：

(1) 在急冷或深过冷下晶体大量形核并快速长大，使一些在平衡或近平衡凝固条件下不可能出现的非晶相得以形成 (即微晶和纳米晶)。

(2) 当冷却速度足够快或过冷度十分大时，使晶体形核与长大机制受到抑制，从而直接形成非晶和准晶，并能将这种热力学上的亚稳态保持下来而不向晶态转变。

快速冷凝方法包括：①雾化法。在高速气流下冲击金属液流 (或离心力作用下)，使之雾化成微细液滴并凝固成粉末；②液态急冷法。将液态金属直接喷射到急冷盘板或旋转的滚轮上，凝固成很薄的金属箔材或丝材；③束流表层急冷法。采用激光束或电子束熔化一层极薄的金属层，通过整块金属的自身冷却，达到 $(10^3 \sim 10^9)\text{K/s}$ 的极高冷却速度。

典型非晶和微晶金属材料：

(1) 金属玻璃 非晶态金属材料具有类似玻璃的某些结构特征，故称为“金属玻璃”。金属玻璃具有很多优异的性能，比如超耐蚀性、高磁导率、恒弹性、高强韧性、低热膨胀系数、高磁致伸缩等。目前典型合金有 Fe₈₂B₁₀Si₈ 等，主要用于变压器铁心，与普通变压器相比，空载损耗可节约 2/3，社会与经济效益十分巨大。

(2) 金属微晶材料 微晶材料的晶粒比常规材料的晶粒细小 1~2 个数量级，并具有一系列组织性能上的优点。这主要是由于快速凝固增大了溶质原子在基体中的固溶极限，同时固液界面推进速度很大，长程扩散被抑制，来不及扩散的原子被正在凝固的固相所俘获，这就导致了固溶强化及时效沉淀强化的效果显著，使材料强度增高。此外，微小的晶粒也使材料的强度、韧性、抗蚀性、耐磨性、抗疲劳断裂性能获得提高。快速凝固合金包括：快速凝固轻合金（铝、镁、钛），快速凝固铜合金，快速凝固铁合金、镍合金、钴合金以及快速凝固金属间化合物。

9. 有序金属间化合物 金属间化合物是新一代高温结构材料，这类化合物与正常价化合物之间的区别在于，在金属间化合物的晶体结构中，其构成元素的原子以整数比构成化合物，不是按照化学价的概念，而是按照金属键或部分共价键结合，由于原子在晶体中作长程有序排列，因而也称有序金属间化合物。已发现的金属间化合物已达 2 万种，由两个组元 A 和 B 组成的金属间化合物一般具有 AB、A₂B、A₃B、A₅B₃、A₇B₆ 等类型。由于金属间化合物具有长程有序的特殊结构，就带来许多特殊的物理、化学、力学性质。作为结构材料，其突出的性能包括：高温强度高、抗氧化性好、弹性模量高、密度低、疲劳强度和蠕变性能也较好等特点，对某些金属间化合物的屈服强度还有随温度升高而提高的反常特性。正是其具有比陶瓷材料要高的韧性，比高温合金要低的密度，所以通常认为金属间化合物是介于高温合金与陶瓷材料之间的一类新型高温结构材料（有人称之为半陶瓷材料）。但是金属间化合物也有缺点，即其塑性和韧性较低，加工性能差。目前改善金属间化合物性能的方法包括：金属间化合物的微合金化和宏观合金化，以及制备金属间化合物与陶瓷或金属的复合材料等。就从目前我国研究工作者和美国橡树岭国家实验室等单位的研究报道看，金属间化合物的塑性已有突破性的进展。典型金属间化合物包括：Fe-Al 金属间化合物、Ti-Al 金属间化合物、Ni-Al 金属间化合物等已在很多领域获得应用。

10. 超细纳米颗粒金属材料 超细金属颗粒(Ultrafine Metallic Particles)是泛指颗粒直径小于 100nm(纳米)的金属颗粒，大于 100nm 的金属颗粒称为粉末(Powder)，小于 2nm 的金属颗粒则称为原子簇(Cluster)。超细金属颗粒具有一些明显不同于块状金属和一般粉末金属的属性，这主要是由于其表面效应与体积效应所决定的。超细金属颗粒有许多奇异的性能，例如：所有超细金属颗粒外观呈黑色(能完全吸收电磁波)，熔点比块状金属低很多(20nm 的镍粉烧结温度可从 700℃降到 200℃)，强度大幅度提高(铁超细金属颗粒断裂强度可提高 10 倍)，低温下无热阻，导热性良好，有超导性，有较大表面能(有利各种活化反应等)。正是具有上述优点，超细金属颗粒材料在电子工业、原子能工业、航空航天工业、化学工业、生物医药等方面具有广泛的用途。但是由于超细金属颗粒制备方法生产率低、成本高，超细金属颗粒易氧化、易团聚、易自燃和易爆炸等，因此超细金属颗粒的分散、存储、运输等方面尚存在不少问题有待研究。

11. 形状记忆合金 形状记忆合金是指合金材料在一定条件下，经变形后仍能恢复到变形前原始形状能力的合金。最早是由美国人 1951 年在金-镉合金中发现的。形状记忆效应是

利用了马氏体相变与其逆转变的特性，即在高温下将处理成一定形状的合金急冷下来，再在低温下经塑性变形成另一种形状，然后加热到一定温度时通过马氏体相变恢复到低温变形前的原始形状(这种马氏体相变必须是可逆的热弹性马氏体相变)。目前最有实用化前景的形状记忆合金是 Ni-Ti 系形状记忆合金，最典型的用例是美国 F14 飞机油路连接系统的 Ni-Ti 形状记忆合金管接头。此外，铁系形状记忆合金、铜系形状记忆合金等一批新材料也得到快速发展，其用途不仅适合于航空航天、核工业及海底输油管线等危险场合和检修工作方面，在火灾报警、液化气泄漏探测器、医疗器械、工业传感器等方面都具有广泛的应用前景。

12. 贮氢合金 贮氢合金是一种新型贮能材料，吸氢特性是美国布鲁海文国家实验室 1968 年在镁-镍合金中发现的。此后在钐钴合金、镧镍合金中也发现了良好的吸氢性能，尤其是 LaNi_5 合金在室温下具有良好的可逆吸放氢性能，使贮氢合金作为一种贮能材料成为可能。贮氢原理如下：当某些过渡族金属、合金和金属间化合物，由于特殊的晶体结构，使氢原子容易进入其晶格的间隙并形成金属氢化物，但氢与这些金属的结合力很弱，而且这些金属氢化物的贮氢量很大，可以贮存比其本身大 1000 ~ 1300 倍的氢，而在加热时氢就能从金属中释放出来。利用贮氢合金贮存氢气，既轻便又安全，不仅没有爆炸的危险，而且还有贮存时间长、无损耗、无污染的优点。目前贮氢合金包括：镁系贮氢合金、稀土贮氢合金、钛系贮氢合金、锆系贮氢合金、铁系贮氢合金。贮氢合金除可用于贮存氢气外，还可以利用它达到贮热或制冷的目的；另一用途是利用其高活性，在化学工业中用于催化剂。

(三) 金属材料的发展趋势

金属材料在即将进入 21 世纪之前仍具有广阔的前景，预计在以下领域将成为研究开发热点：

- 1) 非平衡态合金的研究将会出现新的突破，这包括非晶态材料及规模化生产技术。微晶材料及其功能性研究，纳米级超微晶研究。
- 2) 高强度、高比模量、金属基复合材料及铝锂合金仍有较大的发展空间。
- 3) 在极限条件下使用的材料(包括腐蚀、磨损、辐射、高温或低温)仍然是研究热点。
- 4) 金属材料的制备新工艺及新材料将是金属新材料研究与开发的推动力。
- 5) 金属材料的功能化，以及金属与非金属结合成复合材料将是新的发展趋势之一。
- 6) 金属材料的设计制备将从宏观向微观设计发展，从微米—纳米—原子一直到电子尺度，从而可以最大限度地节省研究经费，缩短研制时间，提高设计的精确性与可靠性。有关材料设计的理论将更进一步完善。

二、无机非金属材料(陶瓷)的特点、发展历史、现状和趋势

陶瓷有两种不同的定义。广义上讲，陶瓷(Ceramic)是泛指一切经高温处理而获得的无机非金属材料，除先进(特种)陶瓷外，还包括玻璃、搪瓷、水泥和耐火材料等。从狭义上讲，用无机非金属化合物粉体，经高温烧结而成的，以多晶聚积体为主的固态物均称为陶瓷，显然该定义不含玻璃、搪瓷和金属陶瓷，主要是指先进(特种)陶瓷。

先进陶瓷的化学键是由共价键与离子键组成，具有优良的耐高温、耐磨、耐腐蚀的特点。先进陶瓷(也称精细陶瓷或高技术陶瓷)是在传统陶瓷的基础上发展起来的，除具有上述特点外，还具有相对传统陶瓷高强高韧的优良特性。

(一) 陶瓷的发展史

中国是陶瓷的发源地，最早人类利用粘土的可塑性将其加工成所需形状，然后用火烧制

成形，这就是陶器。陶器的发明和广泛应用是社会生产力的一个飞跃，同时大大方便和丰富了人类的生活。陶器的发展经历了漫长的过程，经过几千年的发展，在原料的选择和处理、成形技术、烧结工艺、器型的复杂性方面都获得长足进步。但是陶器的致密性差(存在大量微孔)、透水、强度和硬度低，极大地限制了其进一步发展和应用。陶瓷的第一次重大飞跃是人类掌握了通过鼓风提高燃烧温度的技术，利用粘土、石英、长石等矿物制成了瓷器。它与陶器不同，由于长石熔点低，这样便在焙烧过程中形成了流动性很好的玻璃液相，它们堵塞了陶器的大量微孔，而且还能加速组成之间所发生的固相反应，从而使瓷器更加坚硬、不透水和致密。前面提到的陶器与瓷器统称为传统陶瓷，以日用瓷器和卫生瓷器为典型代表。

除了日用陶瓷和卫生陶瓷以外，人们还试图将传统陶瓷用于电力行业的绝缘子，代替天然云母等方面。但是传统陶瓷的最大缺点是存在玻璃相，它妨碍了强度的进一步提高，同时也阻碍了绝缘性的进一步提高。为此从本世纪 20 年代开始，陶瓷研究人员不断通过各种技术减少玻璃相含量，甚至制造出了几乎不含玻璃相的陶瓷，比如 Al_2O_3 纯陶瓷就是最典型的例子，其含量 $w_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 可高达 99% 以上，熔点达到 2050℃，有 1000℃ 以上高温强度，莫氏硬度为 9，室温热导率达 29W/m.K，其绝缘性能非常好，其介质损耗低于 10^{-4} 。由于 Al_2O_3 陶瓷优异的性能，人们称其为高技术材料。也有人称其为精细陶瓷或先进陶瓷(Advanced Ceramics)。从传统陶瓷到先进陶瓷，是陶瓷发展过程中的第二次重大飞跃。

(二) 先进陶瓷(高技术陶瓷)的主要研究领域与研究现状

先进陶瓷的研究领域包括：粉体、结构陶瓷、功能陶瓷、生物陶瓷、薄膜及喷涂、陶瓷工艺等。其中结构、功能、生物陶瓷分属不同的应用领域；粉体及陶瓷制备工艺的研究则直接影响高技术陶瓷材料的性能、成本、应用和发展水平。作为结构陶瓷，其发展经历了几十年全球性的研究热潮后，目前正围绕陶瓷材料的弱点(脆性大,可靠性、均匀性、重复性差,加工制造成本高等方面)转入更细致的基础研究和应用研究。

(三) 结构陶瓷的研究发展趋势

1. 结构陶瓷的脆性研究 结构陶瓷以其优良高温强度、抗氧化、抗蠕变、耐磨、耐腐蚀，以及比强度、比模量高等特点，使人们对陶瓷用于结构零件寄予厚望。但陶瓷材料的脆性本质影响了陶瓷材料的应用，主要原因之一是陶瓷内部存在缺陷。为克服该缺点，提高陶瓷材料的韧性，近 20 年来经历了以下几个方面的努力和尝试。

(1) 相变增韧陶瓷 利用 ZrO_2 在应力作用下由四方相向单斜相转变时的体积膨胀效应，使裂纹尖端受闭合压力，抑制裂纹的扩展和萌生，由此提高陶瓷材料的断裂韧性，这在低温下的应用获得极大成功。主要有 ZrO_2 陶瓷及其增韧的 Al_2O_3 陶瓷、莫来石陶瓷等。

(2) 高精细陶瓷 以纳米陶瓷和纳米陶瓷复合材料为典型，其目的是尽量消除陶瓷内部的缺陷和玻璃相，减小陶瓷的内部缺陷的大小和数量，防止裂纹的萌生。

(3) 高韧性/高硬度 α -Sialon 陶瓷 该材料使用 α - Si_3N_4 为原料，烧结过程因部分相变可获得由细长 β - Si_3N_4 晶体穿插在等轴状 α - Si_3N_4 中，组成自增韧陶瓷，其中，目前最新研制出的具有高长径比的 α -Sialon 可获得高的硬度和高的断裂韧度。

(4) 可塑性变形陶瓷 以 Ti_3SiC_2 为代表的一类，在室温到高温总存在一个滑移系的三元合成陶瓷材料，具有金属和陶瓷双重性能，其抗热震性、导电、导热性好，耐高温(使用温度 1400℃)、抗氧化，尤其具有可加工性，是一种新型奇特材料。

(5) 金属间化合物与陶瓷复合材料 金属间化合物是由金属键与部分共价键结合而成

(陶瓷则由共价键和离子键结合而成)的新金属材料,其性能介于金属与陶瓷之间,除具有良好的耐热、耐磨、耐蚀性能以外,还具有良好的导电性和比陶瓷材料好得多的韧性和加工性。与陶瓷材料组成复合材料后,两者优势互补,新材料的强度、尤其韧性有较大的提高,而且材料制备成本大幅度下降,是目前重要的非常有价值的研究新领域。典型材料有:Fe-Al/Al₂O₃、Ni-Al/Al₂O₃ 复合材料等。

(6) 纤维及晶须增强陶瓷基复合材料 此类材料容忍陶瓷基体中存在缺陷,但缺陷对裂纹扩展不敏感,因为裂纹扩展到纤维或晶须后会发生偏折而消耗能量,它是依靠增强体纤维的特性来保持高强度,并借助纤维与基体断裂过程的能量消耗来提高材料的断裂韧度和断裂功的。该类材料在重要结构零件(如航空、航天零件、刀具、模具等)应用尤其广泛。

(7) 叠层结构陶瓷基复合材料 该材料也称仿生复相陶瓷,最初是用 SiC 薄片与石墨片交替叠层而成的结构复合材料。其断裂韧度和断裂功比常规陶瓷高几倍到几十倍,分别达 15MPa·m^{1/2}与 4250J/m²,其指导思想是人为地制造缺陷层(石墨),并利用缺陷层阻断裂纹的扩展,这是最新的研究热点,并已取得很好的成果。

综上所述,陶瓷材料发展的过程也是陶瓷增韧的发展过程,设计思想经历了“限制和减少缺陷—容忍缺陷—利用缺陷”的变化过程。

2. 结构陶瓷粉体制备的研究 粉体的优劣、加工成本高低,将直接影响结构陶瓷材料的性能、推广应用和发展。粉体的发展经历了向高纯—超细—异型结构的过程,其中微米级超细粉、纳米级超细粉的各种制备方法(从物理制备到化学合成)层出不穷,例如:燃烧合成法、低温冷冻法、固液相合成法等。超细晶粒使陶瓷材料取得了全新的性能。

3. 陶瓷材料的制备与加工技术 陶瓷材料的特点之一就是制备与加工技术的一体化。由于陶瓷材料具有熔点高、硬度大、耐磨、不导电等特点,因此在制粉—制坯—烧结—加工各个制备和加工环节都不同程度地增加了成本,也直接影响陶瓷材料的推广应用。因此,陶瓷材料的低价制备和加工技术一直是陶瓷界致力攻关的重要内容。例如:利用凝胶注模方法可使生坯固相含量达到 60%以上,固化后相对密度可高达 65%,不仅性能大大优于冷压生坯工艺,可获得更复杂形状,而且使后续烧结成本大幅度下降,是目前最新的制坯技术之一。烧结技术也在不断改进,其中无压烧结、低温烧结、微波烧结一直是陶瓷界的攻关内容,是降低成本、节能降耗的关键。陶瓷材料加工也一直是技术难题,除特种加工技术以外,利用生坯的精密成形并结合无压烧结技术,实现近精尺寸成形将是重要的发展方向。其特点是,制备和加工一体化,两者已不存在明显的技术分工。

4. 陶瓷材料的可靠性检测与评价技术 陶瓷材料可靠性、稳定性差,影响了陶瓷材料在很多重要领域的应用,因此陶瓷材料的检测和评价技术也是重要的研究前沿,除传统的研究方法以外,利用声学及声像技术检测与评价陶瓷材料是最新研究技术之一。其特点是快速、可靠、无损检测。

(四) 功能陶瓷、生物陶瓷、陶瓷基智能材料

功能陶瓷、生物陶瓷、陶瓷基智能材料,是先进陶瓷材料研究中最具活力、最有发展前景的组成部分,它是电子、信息、通信、计算机、激光、医疗、汽车、自动化、机械、建材、航空、航天、生物技术、核技术等高技术领域的关键材料,各国都把它放在重要的战略地位优先发展,也是目前的研究热点之一,鉴于本课程主要涉及结构材料,故不做详细介绍。