



“十二五”江苏省高等学校重点教材

# 难加工材料高效加工技术

(第2版)

傅玉灿◎主编



西北工业大学出版社



“十二五”江苏省高等学校重点教材(编号:2014-1-108)

NANJIAGONG CAILIAO GAOXIAO JIAGONG JISHU  
**难加工材料高效加工技术**

(第2版)

傅玉灿 主编

傅玉灿 苏宏华

丁文锋 陈燕 杨长勇 编

西北工业大学出版社

## 内容简介

本书主要介绍难加工材料的高效加工技术,其内容包括难加工材料的应用及其高效加工技术的发展现状与趋势,难加工材料的分类及其加工特点,难加工材料高效加工技术的力学与传热学基础,难加工材料高速切削与磨削的加工工艺及其装备技术,难加工材料的高效复合加工工艺及其装备技术等。本书内容丰富,层次清晰,重点突出,图文并茂,语言精练。在取材上,通过大量实例的介绍,理论联系实际,兼顾新技术、新知识在该领域中的应用。

本书既可作为高等院校机械工程及其自动化等相关专业本科生和研究生的教材,亦可作为相关工程技术人员参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

难加工材料高效加工技术/傅玉灿主编.—2版.—西安:西北工业大学出版社,2016.3  
ISBN 978-7-5612-4778-5

I. ①难… II. ①傅… III. ①超硬材料—加工 IV. ①TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 054193 号

## 难加工材料高效加工技术

傅玉灿 主编  
责任编辑 胡莉巾

\*

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072) 发行部电话:029-88493844 传真:029-88491147

<http://www.nwpu.com>

兴平市博闻印务有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×1092 1/16 印张:26.625 字数:652千字

2016年3月第2版 2016年3月第1次印刷

ISBN 978-7-5612-4778-5 定价:65.00元

## 第2版前言

本书第1版是“十一五”国防特色教材,2010年6月在西北工业大学出版社出版,受到了国内同行、专家的一致好评,入选了“十二五”江苏省高等学校重点教材。原编写者认真总结第1版编写和使用中的问题,并考虑新技术的发展,为充分反映当代课程建设与学科发展最新成果,应对机械类课程改革面临的新情况、新问题,在其基础上进行修订。

《难加工材料高效加工技术(第2版)》秉承了第1版的优点,在保持难加工材料高效加工技术体系主体结构完整性的基础上,对部分内容进行适当删减,并增加部分相关领域的最新研究成果。

本书的主要内容包括难加工材料的定义、分类及其在工业中的应用,高强韧、高硬脆及兼具强韧和高硬度特性的三大类难加工材料的材料性能及加工特性,高效加工技术中所涉及的材料学、力学及传热学等共性基础理论,高速切削加工技术,高效磨削加工技术和高效复合加工技术。

本书由有10多年从事机械加工技术相关课程教学和难加工材料高效加工技术研究经验的一线教师和业内人士共同编写。傅玉灿负责全书内容的统领、各部分内容的协调及第1章的修订工作,苏宏华负责第4章的修订工作,丁文锋负责第3章的修订工作,陈燕负责第6章的修订工作,杨长勇负责第2章和第5章的修订工作。同时,南京航空航天大学博士研究生陈玉荣、戴剑博、胡静、梁宇红、仇博、朱烨均等参与了文字素材的整理,特此表示感谢。

在编写本书的过程中参考了一些国内外文献资料,扩展和充实了本书内容。在此,对上述文献资料的作者表示感谢。

难加工材料的高效加工技术既是一门传统的技术,又是一门处于不断发展过程中的新兴技术,涉及面甚广。因此本书中难免有疏漏、不足之处,恳请读者朋友们批评指正。

编者

2016年2月于南京

# 第 1 版前言

随着科学技术的发展,钛合金、高温合金、超高强度钢、陶瓷材料、复合材料等难加工材料在航空、航天、舰船、兵器、核能等国防工业中的应用越来越广泛。同时,新产品、新装备研制的周期明显缩短,型号数量增多、批量减少的发展趋势要求制造企业必须改善零件加工质量,提高加工效率,降低生产资料消耗,这成为衡量现代企业制造加工水平高低的重要因素。为此,广泛开展难加工材料高效加工技术的研究和推广应用对于提高企业竞争力,推动国防科技工业发展具有十分重要的现实意义。

同时,在机械制造行业中,虽然已发展出各种不同的零件成形工艺,但目前仍有 90% 以上的机械零件是通过机械加工制成的。伴随着信息技术的发展,以数控机床为基础的柔性制造自动化技术的发展与应用,有效地改变了机械加工的状况,大大降低了零件加工的辅助时间,极大地提高了生产效率。从提高生产率的角度看,机床和生产过程自动化的实质是以加快空程动作的速度和提高零件生产过程的连续性,从而缩短辅助工时为目的的一种技术手段。但是,再进一步缩短加工辅助时间,不但在技术上有困难,经济上也不合算,而且对提高机床的实际生产效率意义也不大。

从机械零件加工的总工时构成看,加工辅助时间的缩短,使有效加工所占的时间比例变得越来越大,对于难加工材料尤其如此。因此,要达到全面提升劳动生产率的主要矛盾已转为如何通过工艺技术的有效革新,发展适应于难加工材料特点的高效加工新技术,以减少材料的实际加工时间。为此,以高速切削、高效磨削及复合加工为代表的高效加工技术蓬勃发展,新工艺、新技术层出不穷,大幅度地提高了劳动生产率,改善了产品质量,降低了生产成本,为社会创造了巨大的物质财富。

为了提高难加工材料的加工效率,近年来,广泛开展的相关基础和应用研究工作已在许多方面获得进展,例如:难加工材料高效切、磨削加工的材料去除机理,力、热及其耦合问题,工具磨损及工具寿命,加工表面完整性,高效加工中的冷却技术,难加工材料的高效复合加工,等等。将这些重要成果编撰成书,必将有助于推动难加工材料高效加工技术的研究和应用。

本书的主要内容包括难加工材料的定义、分类及其在国防工业中的应用,高强度、高硬脆及兼具高强度和高硬脆特性的三大类难加工材料的材料性能及加工特性,高效加工技术中所涉及的材料学、力学及传热学等共性基础理论,高速切削

加工技术,高效磨削加工技术,高效复合加工技术。本书可供高等学校机械工程类专业作为研究生和本科生专业基础课程的教材,同时可供从事难加工材料高效加工研究及工作的科技人员参考。

本书由傅玉灿任主编,参加编写的有傅玉灿、苏宏华、丁文锋及陈燕。其中,傅玉灿编写了第1章,苏宏华编写了第4,5章,丁文锋编写了第2,3章,陈燕编写了第6章。在本书编撰过程中,笔者参阅和引用了国内外大量学术文献、技术资料、产品样本和实验报告等。有些正式出版的文献已在书后的参考文献中列出,供读者进一步研究难加工材料的高效加工技术时参考。由于篇幅有限,有些文献和资料的作者与单位未能一一列出,特在此说明。谨向所引用文献资料的作者表示衷心的感谢。同时,在本书编写过程中,南京航空航天大学博士研究生马可、张贝、杨树宝、张志伟、刘鹏、陈珍珍,硕士研究生詹伟强、程泽、王洪达、范敏、周恒、王波、张子煜、史德峰等做了大量的图表处理工作,特在此表示感谢。

难加工材料的高效加工技术既是一门传统的技术,又是处于不断发展过程中的新兴技术,涉及面甚广。为了提高教材质量,恳切希望读者对书中存在的不足之处给予批评指正,不胜感激。

**编 者**

2009年6月于南京

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课程的主要内容	1
1.2 难加工材料的范畴及分类	1
1.3 难加工材料在工业中的应用	2
1.4 难加工材料高效加工的发展现状与趋势	13
复习思考题	24
第 2 章 难加工材料及其加工特点	25
2.1 难加工材料的加工性判据	25
2.2 高强韧类难加工材料的加工特点	28
2.3 高硬脆类难加工材料的加工特点	36
2.4 兼具高强韧和高硬脆类难加工材料的加工特点	45
复习思考题	68
第 3 章 难加工材料高效加工技术基础	69
3.1 高效加工的材料学基础	69
3.2 高效加工的力学基础	82
3.3 高效加工的传热学基础	109
复习思考题	122
第 4 章 难加工材料的高速切削加工技术	123
4.1 概述	123
4.2 高速切削加工装备技术	131
4.3 高速切削加工刀具技术	178
4.4 高速切削加工工艺技术	194
复习思考题	218
第 5 章 难加工材料的高效磨削加工技术	220
5.1 概述	220
5.2 高效磨削加工装备技术	228
5.3 高效磨削加工工具技术	242
5.4 高效磨削加工工艺技术	276
复习思考题	302
第 6 章 难加工材料的高效复合加工技术	303
6.1 概述	303

6.2	机械-超声复合加工技术·····	304
6.3	机械-热复合加工技术·····	334
6.4	电化学-机械复合加工技术·····	368
6.5	超声-电火花复合加工技术·····	386
6.6	其他复合加工技术·····	394
	复习思考题·····	407
附录	本书常用名词、术语和符号·····	408
参考文献	·····	411



# 第1章 绪 论

## 1.1 课程的主要内容

现阶段,难加工材料及其结构在各类现代武器装备中已得到日益广泛的应用,这极大地提高了武器装备的性能。本书收集了国内外有关难加工材料高效加工的大量文献资料,并结合南京航空航天大学近年来从事的难加工材料高效加工的研究成果和教学经验,较为系统、全面地讲述了难加工材料高效加工技术各方面的主要内容。

本书首先对难加工材料进行分类并介绍其在工业中的应用;其次,系统分析了高强韧、高硬脆及兼具高强韧和高硬脆特性的三大类难加工材料的性能与加工特性;再次,对各类难加工材料高效加工技术中所涉及的材料学、力学及传热学等共性基础理论知识进行归纳总结;最后,重点讲述了可实施难加工材料高效加工的三大类加工技术,即高速切削加工技术、高效磨削加工技术和高效复合加工技术。

## 1.2 难加工材料的范畴及分类

### 1.2.1 难加工材料的范畴

总体而言,难加工材料并没有明确的定义,在本书中主要是指切(磨)削加工困难的材料,即切(磨)削加工性差的材料。须强调的是,难加工材料的范畴并不是一成不变的,随着加工技术的不断发展,现阶段切(磨)削加工困难的材料在未来也可能成为易加工材料,而难加工材料的范畴又会因不断出现的新型高性能材料而改变。

### 1.2.2 难加工材料的分类

难加工材料的种类很多,从金属到非金属范围很广。从切削加工角度,初步可分为以下几类。

#### 1. 高强韧类难加工材料

这类材料主要包括超高强度钢、钛合金、高温合金等,其特点主要包括塑性高、韧性好、强度高、导热系数低。

在切削加工中,由于高强韧类难加工材料的强度高,切削时的切削力大,不但刀具易磨损,而且切屑不易处理。同时,这类材料的导热系数很低,造成切削过程中切削温度高,刀具易产生磨料磨损、黏结磨损、扩散磨损和氧化磨损。此外,切削加工时的切削表面和已加工表面硬化现象严重。对钛、镍、钴及其他合金,这类材料化学活性大、亲和性强,切削加工时易黏结在

刀具上,与刀具材料产生化学、物理作用,元素相互扩散。

## 2. 高硬脆类难加工材料

这类材料主要包括光学玻璃、硅片、功能陶瓷、结构陶瓷等。其特点主要在于硬度高、脆性大,其加工机制与高强韧类金属材料有显著差别。这些材料由于耐磨性很好,切削时起磨料作用,故刀具主要承受磨料磨损,高速切削时也同时伴随着物理、化学磨损。此外,被加工表面易产生裂纹以及边缘破损。这些缺陷将显著降低零件的强度及使用寿命。

## 3. 兼具高强韧和高硬脆类难加工材料

这类材料主要包括金属基复合材料、陶瓷基复合材料等。其特点主要包括具有高比强度、比模量,良好的导热性、导电性、耐磨性、高温性能,低的线膨胀系数,高的尺寸稳定性等。在复合材料的高效机械加工中会出现一些常规材料所没有的问题,如增强相硬且脆(或坚韧),使刀具磨损大;某些基体材料韧且不导热,加工时产生的热量不易散发,黏刀具;层压复合材料在加工时极易分层等。根据这些特点,加工时应采取相应的措施,如选择合适的刀具和合理的加工余量,制定专门的加工工艺,采取适当的加工润滑和冷却措施,并设计专用的加工夹具以保证加工质量。

# 1.3 难加工材料在工业中的应用

## 1.3.1 高强韧类难加工材料在工业中的应用现状

### 1. 钛合金在工业中的应用现状

钛合金是20世纪50年代发展起来的一种重要的结构金属,目前已在航空、航天、核能、舰船、兵器等诸多领域获得越来越多的应用,成为重要的战略金属材料。其应用水平已成为衡量一个国家武器装备先进程度,反映一个国家的军事水平和军事实力的重要指标。钛及其合金在国防工业上的使用,主要是基于钛合金的优异性能:质量轻、比强度高、耐高温、耐腐蚀性好,另外可与复合材料结构匹配。除上述特性外,钛还具有高韧性、无磁等诸多优点。这些都为钛合金在工业中的应用提供了条件。

#### (1) 钛合金在航空领域的应用

钛合金是当代飞机和发动机的主要结构材料之一。美国在20世纪80年代以后设计的各种先进军用战斗机和轰炸机中,钛的用量已在20%以上。如第3代战斗机F-15的钛合金用量占27%,而第4代战斗机F-22的钛合金用量占41%。F-22战斗机是美国洛克西德公司、波音公司和通用动力公司设计的战术战斗机,是目前世界上具有代表性的第4代战斗机。它首次将隐身、高机动性和敏捷性、不加油超声速巡航等特性融于一体,已作为美国空军2000年以后的主力制空机种。F-22的发动机上采用了美国新发展的阻燃钛合金,用于压气机机匣、加力燃烧室筒体及尾喷管上。

在舰载飞机F/A-18中,钛合金主要用于飞机的承力框纵梁、翼根和尾部结构等关键部

位。所用钛合金主要有 Ti-6Al-4V 和 Ti-15Mo-3Al-3Sn-3Cr。机身和机翼接头均采用  $\beta$  退火的 Ti-6Al-4V, 而制动器扭力管用 Ti-6Al-4V 铸件。另外, 为降低成本, 提高材料利用率, 在着陆拦阻钩支架接头及发动机安装架上还采用了热等静压工艺制造的 Ti-6Al-4V。

其他如联合攻击战斗机(JSF)是一种低成本、多用途战术攻击战斗机, 将取代美国空军现役的 F-16C 和 A-10、海军的 F/A-18E/F、海军陆战队的 F/A-18 和 AV-8B 等机型。V-22 是美国贝尔直升机公司为海军陆战队研制的运输型倾转旋翼机, 具有直升机能垂直起降、悬停等优点, 又增强了固定翼飞机高速飞行与远航的优点。V-22 倾转旋翼机采用的是能与喷气发动机或直升机相媲美的技术。其中风挡密封框架、发动机短舱主结构、主防火墙等使用了钛合金, 而作为转子系统、发动机主要支撑件的传动接头, 则由 Howmet 公司用一个整体钛铸件取代了原有的 43 个元件和 536 个紧固件。

### (2) 钛合金在舰船领域的应用

钛在地壳中的储量极其丰富, 其密度低而比强度高, 又具有优异的耐腐蚀性, 耐热、耐低温性能良好。钛有很强的耐酸碱腐蚀能力, 在海水中浸 5 年不锈蚀, 钢铁在海水中则会腐蚀变质。用钛合金为船只制造外壳, 海水无法腐蚀它, 制成的潜艇, 既能抗海水腐蚀, 又能抗深层压力, 其下潜深度比不锈钢潜艇增加 80%。同时, 钛无磁性, 不会被水雷发现, 具有很好的反监测作用。一般钢铁潜艇下潜超过 300 m 就容易被水压压坏。钛潜艇下潜深度超过 300 m 不仅不会被压坏, 还能有效地避开深水炸弹的攻击, 显示了“钛潜艇”的独特魅力和优异性能。目前钛是深海领域舰船用材不可替代的材料。俄罗斯早在 1968 年便成功制造出全钛潜艇, 从 20 世纪 60 年代中期开始, 俄罗斯先后生产了 6~7 艘双层高压壳“阿尔法”级全钛潜艇, 每艘潜艇用钛达 908 t。“阿尔法”攻击潜艇由于采用了先进的钛合金为壳体材料, 最大潜深高达 900 m。另外如“鲨鱼”级核潜艇、多用途的 945 型及 988 型核潜艇等, 其水下排水量大, 水下航速快, 极限潜水深度可达 800 m, 其耐压壳体就是用钛合金建造的。我国自主研发的“蛟龙”号深海载人潜水器在马里亚纳海沟试验海区创造了 7 062 m 的下潜深度, 创下了世界同类作业型潜水器的最大下潜深度纪录, 而“蛟龙”号潜水器的耐压壳体就是采用钛合金 TC4 建造的。钛合金目前也广泛应用在鱼雷发射管道、鱼雷发射高压气瓶。用钛合金制作的泵、阀、管子、螺旋桨等, 使用效果良好, 使用寿命大大延长。

### (3) 钛合金在兵工领域的应用

随着反装甲威胁的日益增加, 防护装甲也越来越厚重, 战车质量在近 10 年中增加了 15%~20%, 严重影响其运输能力及机动性。用钛合金替代轧制均质装甲钢是减重的有效途径。

在美国, 钛合金已用于 M1 艾布拉姆斯主战坦克、M2 布莱德雷战车上。针对 M1 主战坦克, 美国陆军部研究了许多可应用钛合金的部件, 还开展了用钛合金取代轧制均质钢制造坦克其他部件的技术项目。M2 战车上, 钛主要用于指挥舱盖和顶部攻击装甲的改进。

其他如 M113 装甲人员运输车也采用钛合金附加装甲, 以提高装甲的防弹能力。火炮系统中, 两种 155 mm 轻型牵引榴弹炮大量使用了钛合金。在未来“十字军战士”155 mm 自行榴弹炮中, 有许多部件要使用钛合金。

### (4) 钛合金在航天领域的应用

随着人类探索太空步伐的加快, 对航天飞行器的要求也越来越高。钛合金作为航天飞行

器的主要用材之一,由于其轻质高强、耐高温、耐低温和耐腐蚀等优异的特性与功能,被誉为“宇宙金属”“空间金属”,且在航天飞机、空天飞机和航天火箭等空间飞行器中占到总质量的5%~30%。1954年,美国研制出了钛合金 Ti-6Al-4V,并将其用作“阿波罗”飞船和“徘徊者”卫星等空间飞行器的结构件材料。除了钛合金 Ti-6Al-4V,美国的第1代和第2代航天飞机和空天飞机的防热系统均部分采用了钛合金 Ti1100 作为防热瓦,亚轨道单级入轨火箭运载器 X-33 也采用了钛合金 Ti1100 作为其机身背风面大面积防热系统材料。目前,我国利用低间隙元素含量钛合金 TA7ELI 研制出在液氢环境下使用的 20 L 低温钛合金气瓶,并将该气瓶用于长征系列运载火箭;钛合金 TH1 是具有“形状记忆”效应的钛-镍系合金,其主要会被用作自开天线、推杆、接触器以及航天系统减震等部件。除航天飞行器外,钛合金还广泛用于制造导弹外壳、推进剂贮箱、整流罩球形气瓶等。如美国的“斯拉姆”增强响应型远程空地导弹 AGM-84H、“战斧”Ⅲ型巡航导弹等都使用了钛合金作为战斗部壳体,“宙斯神”“大力神”等导弹的压力气瓶也均采用的是钛合金材料。

### (5) 钛合金在新能源开发领域的应用

由于钛在湿蒸汽中具有较高的耐蚀性能,因此钛管冷凝器在新能源的发电设备中得到了广泛应用。据统计,一座核电站的用钛量约为 80~100 t。我国秦山核电站和大亚湾核电站的汽轮机冷凝器、设备冷却水热交换器都选用的是全钛冷凝器。钛也是制造海水与氟利昂及氨热交换器的最好材料,如波纹板、蜂窝板、带筋管、鳍片管和波纹管等。美国夏威夷岛的温差发电站、日本挪而岛的温差发电站都采用的是钛管蒸发器和冷凝器。目前,钛合金 Ti-6-4Ru 和 Ti-3-2.5Ru 在地热钻井用管材中也得到了广泛的应用,自 20 世纪 90 年代初以来,仅美国加里弗尼亚南部的索尔顿湖地热钻井(深度达 610 m,温度高达 300℃)就已使用了多达 227 t 的 Ti-6-4Ru 热轧无缝管制作冷凝器、管道等。

## 2. 高温合金在工业中的应用现状

高温合金是指以铁、镍、钴为基,能在 600℃以上高温抗氧化或抗腐蚀,并能在一定应力作用下长期工作的一类金属材料,因其合金化程度很高,在英、美等国称之为超合金。其主要特点是含有较多的高熔点、高激活能合金元素,并具有优良的热强度性能、热稳定性能及热疲劳性能。高温合金广泛应用于航空、航天、舰船、动力及石油化工行业,是火箭发动机和航空喷气发动机中的关键材料。

### (1) 高温合金在航空发动机领域的应用

在世界先进的航空发动机中,四大热端部件,即导向器、涡轮叶片、涡轮盘和燃烧室,高温合金材料用量占总量的 40%~60%。从某种意义上来说,没有高温合金就没有先进的航空工业。

图 1.1 所示为镍基合金在发动机机匣领域的应用,图 1.2 所示为高温合金叶片。

须特别指出的是,随着航空航天发动机中构件要求的提高,零件的形状越来越复杂,组织结构完整性要求越来越高,因此,零件质量虽不大,但毛坯的质量很大,大部分材料作为切削余量被去掉。例如,美国 DC-10 飞机使用的 CF6 发动机上有 16 个不同的镍基高温合金锻件,毛坯质量超过 3 311 kg,加工成零件后总质量低于 381 kg,即 88.5%的材料要作为切屑被加工掉,加工量非常大。因此,提高镍基高温合金的加工效率和加工质量是提高航空制造技术水平的关键问题之一。

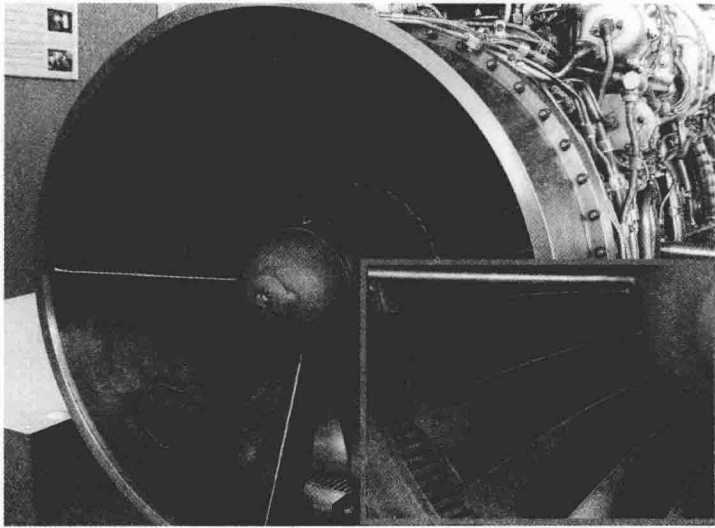


图 1.1 发动机机匣

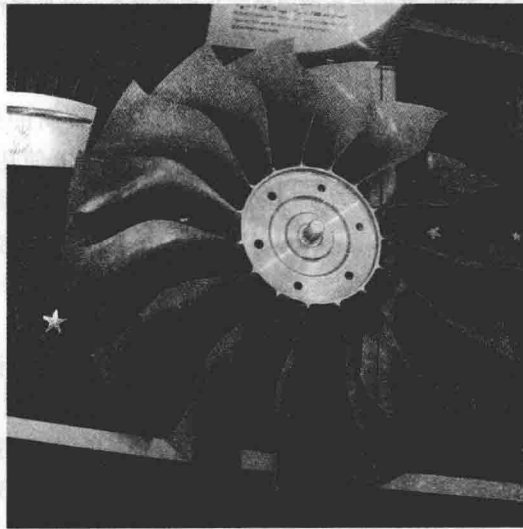


图 1.2 高温合金叶片

半个多世纪以来,航空发动机用高温材料的承温能力从 20 世纪 40 年代的  $750^{\circ}\text{C}$  左右提高到 90 年代的  $1\ 200^{\circ}\text{C}$  左右。应该说,这一巨大成就是叶片合金、铸造工艺、叶片设计和加工以及表面涂层各方面共同发展所做出的贡献。图 1.3 所示为美国、英国与中国涡轮叶片用高温合金的发展情况。可以看出,20 世纪五六十年代,发动机热端部件材料主要是铸造高温合金,其使用温度为  $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ ;70 年代中期,定向凝固高温合金开始推广应用,其使用温度提高到接近  $1\ 000^{\circ}\text{C}$ ;进入 80 年代以来,相继开发了高温单晶合金、氧化物弥散强化高温合金 (ODS 合金) 以及金属间化合物等,并且热障涂层技术得到了广泛的应用,使发动机热端部件的使用温度提高到  $1\ 200\sim 1\ 300^{\circ}\text{C}$ 。在现有基础上,可通过各种冷却技术使高温合金的使用



构陶瓷中有高温陶瓷和高强度陶瓷,包括高硬工具陶瓷。功能陶瓷包括磁性陶瓷、介电陶瓷、半导体陶瓷、光学陶瓷和生物陶瓷等。工程陶瓷具有高抗压强度、高硬度、高耐磨性、耐高温、耐腐蚀、低密度、低线膨胀系数和低导热系数等优越性能,已越来越多地应用于化工、冶金、机械、电子、能源、航天及核动力等领域。工程陶瓷可以用来制造 SUNTHAI、密封环、活塞、凸轮、缸套、缸盖、燃气轮机燃烧器、涡轮叶片、减速齿轮、耐蚀泵等。其应用领域正在不断扩大,同金属材料、复合材料一样,工程陶瓷正在成为现代工程结构材料的三大重要支柱之一。近年来先后出的许多高性能结构陶瓷和具有各种特殊性能的功能陶瓷,已优先应用于国防装备,兹扼要列举见表 1.1。

表 1.1 典型陶瓷材料种类及用途

陶瓷类别	代表性材料	用途举例
热结构陶瓷	$\text{Si}_3\text{N}_4$ , SiC, PSZ, Sialon	坦克绝热柴油机,燃气轮机
耐烧蚀陶瓷	石墨渗硅,热解石墨,喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3$	火箭喷喉,燃气舵
高硬度陶瓷	$\text{B}_4\text{C}$ , SiC, 刚玉, BeO, $\text{Be}_4\text{B}$	复合夹心装甲
透明陶瓷	蓝宝石, 镁铝尖晶石	防弹玻璃, 风挡
透红外陶瓷	硫化锌, 氟化镁, 碲化镉, 硒化锌	导弹整流罩
吸收微波陶瓷	SiC, 铁氧体	导弹, 飞机隐形涂层
透微波陶瓷	$\text{Si}_3\text{N}_4$ , Sialon	雷达天线罩
光敏陶瓷	硫化铅, 砷化镉, 碲镉汞/硅, 硒化铅, 碲化铅, 碲化镉	导弹红外探测器, 热成像瞄准具
激光陶瓷	红宝石, 掺钕钇铝石榴石, 钆酸钇	固体激光器
压电陶瓷	钛酸钡, 锆钛酸铅, 铌酸盐	压电引信, 声呐
铁电陶瓷	锆钛酸铅镧(PLZT)	核闪光护目镜
介电陶瓷	BeO, $\text{Al}_2\text{O}_3$ (白陶, 黑陶), 镁橄榄石	IC 封装和基片
磁性陶瓷	钡铁氧体, 锶铁氧体, 矩磁铁氧体	记忆元件, 雷达移相器

## 1. 陶瓷发动机

自 20 世纪 70 年代初开始,美国、日本、德国以及意大利先后研制将耐高温的新型陶瓷应用于发动机上。这是因为现代化交通运输和现代战争的发展,希望各种车辆具有较好的动力性和越野性,要求发动机体积小,比功率大,热效率高,经济性好,并且轻型车、重型车的要求还有所不同。在各种汽车、拖拉机、装甲车等发动机中,汽油机质量轻、转速高,但耗油较高;柴油机热效率较高,但体积较大而且较重。因此近年来设计师们采取了一些措施,以满足不同车辆的需要。

①采用涡轮增压器,以提高内燃机的功率。

②设计了旋转式发动机,以减轻内燃机的质量并具有高的转速。

③拟设计绝热柴油机,以进一步提高热效率,并减轻质量,缩小体积,以适应载重汽车、装甲车向重型化、柴油化方向发展。

④尽管燃气轮机具有转速高、功率大的优点,人们还期望它再进一步提高热效率,关键是要提高燃气温度,用钨钴镍基超级合金,其工作极限温度也不允许超过  $1\ 090^\circ\text{C}$ 。

以上几条途径,都需要采用耐高温、耐磨、隔热的新型结构陶瓷来取代原有的金属材料才能实现。因为陶瓷的工作温度可达  $1\ 200\sim 1\ 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  而不需要强制冷却,故能大幅度地提高效率,降低燃料消耗,又能缩小发动机的体积,减轻质量,并节约 W, Co, Ni, Cr 等战略金属。

陶瓷发动机的研制工作大体上分两步进行,即先零部件后整机。目前第一步是从发动机上某些零部件逐个着手进行实验,例如内燃机的预燃室、气门、汽缸套、汽缸盖、活塞顶、火花塞、喷油器体、阀门顶杆、涡轮增压器、滚动轴承等,旋转活塞发动机的转子,燃气涡轮发动机的转子、叶片等。目前这些零部件已先后研制出样品,并在汽车上进行了运转实验,只是大多数寿命较短,还达不到要求,但其优越性已充分显示出来,国内外科研和设计工作者都在努力,一旦零部件过关后,第二步才研制全陶瓷发动机。20 世纪 70 年代中期,美国陆军和坦克-机动车辆研究发展局已制订了陶瓷发动机计划。此后 10 年来各国对陶瓷发动机研制的进展情况大体归纳见表 1.2。

表 1.2 国外陶瓷发动机研制进展概况

年份	研制单位	使用材料	使用部位
1977	美国福特汽车公司	$\text{Si}_3\text{N}_4$ 和 SiC	全陶瓷型车用燃气轮机
1980	美国福特汽车公司	$\text{Si}_3\text{N}_4$	小型客车上使用涡轮增压器
1981	日本日立公司	SiC	柴油发动机部件
1982	美国金刚砂公司	SiC	柴油机活塞和汽缸套
	美国金刚砂公司等	SiC	涡轮增压器转子
	日本京都陶瓷研究所	SiC, $\text{Si}_3\text{N}_4$ , PSZ	小轿车用的三缸柴油机
	美国卡门斯公司	PSZ	活塞、汽缸套隔热层
1984	日本京都陶瓷研究所	SiC, $\text{Si}_3\text{N}_4$ , PSZ	汽车柴油机
	美国	Sialon-201	燃气轮机叶片、箍环
	德国大众汽车公司	Sialon	小轿车发动机垫圈、滚珠轴承
	日本汽车及重工业公司等	Sialon	柴油机预燃室、火花塞、涡轮增压器转子

从表 1.2 可以看出,目前已使用在发动机上的陶瓷主要是 PSZ(部分稳定  $\text{ZrO}_2$ ), SiC,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  及 Sialon 四种。它们各自的特点是:

①PSZ 导热性低,而热膨胀与钢近似,如在发动机燃烧室内壁上用等离子喷涂一层  $0.5\sim 0.6\text{ mm}$  PSZ 作隔热层,将会明显降低活塞和汽缸套的温度,从而使燃料的经济性提高了  $3\%\sim 5\%$ ,汽缸的磨损也减少了  $20\%\sim 25\%$ 。

②SiC 除了具有耐磨、耐热、耐腐蚀性能外,由于它具有导热性高的特点,因此适宜于用作燃气轮机零部件。

③ $\text{Si}_3\text{N}_4$  的高温强度高,且耐磨,最适宜于制作涡轮增压器转子和旋转发动机的转子,因其转速可达  $50\ 000\sim 100\ 000\text{ r/min}$ ,工作条件异常苛刻。

④Sialon 是 Si, Al, O, N 四种元素的合成词,作为一种陶瓷,它实际上是  $\text{Si}_3\text{N}_4$  中 Si, N 原子被 Al 和 O 原子置换所形成的一大类固溶体的总称。Sialon 陶瓷的主要类别有  $\beta$ -Sialon,  $\alpha$ -Sialon, O-Sialon 三种,尤以前两种最为常见。这种被称为“塞隆”的新型陶瓷,其抗热冲击性、耐腐蚀性都优于纯  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,并具有显著的耐磨、耐热性能,故适宜于制造高温下工作的轴



承、转子等。

## 2. 复合装甲

陶瓷用作复合装甲大体上有两种方案：一是直接制成面板，一是用作夹心填料。此外，还有夹陶瓷芯片的柔性防护器具。如以色列和美国研制成在 Kevlar 织物中嵌入  $B_4C$  片的防弹衣或背心。美“黑鹰式”直升机的驾驶员座椅也采用了  $B_4C$ /Kevlar，可防近距离轻武器弹头及在动力负荷为 49 g 的情况下坠机使驾驶员安全无恙。在世界各国的主战坦克中，德国的豹-II，苏联的 T-72，英国的挑战者系列，美国的 M1 艾布拉姆斯，以色列的梅卡瓦等主战坦克的顶部、侧屏蔽和底部都装有碳化硅陶瓷复合装甲。德国开发的轻质陶瓷/高分子复合材料装甲系统装备于多种军用坦克装甲车辆以及军用特种运输车辆。

## 3. 整流罩

导弹整流罩对材料的要求是：有足够的强度和硬度，能抗高热激波和抗雨水冲刷，有不随温度变化的低介电常数和低介电损耗，有透过红外和透过微波的性能。“爱国者”地空导弹整流罩是采用熔融浇铸的石英玻璃，“萨姆-7”超低空导弹使用铍钾钠硅酸盐红外玻璃，“小懈树”“毒刺”“红眼”及“痛击”等地空导弹都采用透红外陶瓷的整流罩。

当试样厚度为 2 mm 时，对波长为 0.2~9.5  $\mu\text{m}$  的红外光的透光强度超过 10% 的有氧化镁、氟化镁、钛酸锶、蓝宝石、铝酸钙及硼硅冕光学玻璃；对波长为 0.2~30  $\mu\text{m}$  的红外光的透光强度超过 10% 的有碲化镉、铋化铟、硫化锌、氟化钙等。显然，透过红外范围越宽，性能越好。氮化硅则具有透过微波的性能，可用于 (6~7) Ma 速度下高速飞行器的雷达天线罩。此外，在红外和雷达的双态系统中，要使用一个公共的整流罩，此时则要求它兼具有透红外和透微波的性能。一种由氮稳定的立方晶格铝氧化物 (AlON)，有可能用来制造多功能 (透可见光、近红外、雷达和毫米波) 整流罩。

### 1.3.3 兼具高强韧和高硬脆类难加工材料在工业中的应用现状

科学技术的不断进步，促进了新材料的飞速发展，其中尤以先进复合材料的发展最为突出。对航空航天工业而言，飞机和卫星制造材料要求质量轻、强度高、耐高温、耐腐蚀，这些苛刻的条件只有借助新材料技术才能解决。复合材料具有质量轻，较高的比强度、比模量，较好的延展性，抗腐蚀、导热、隔热、隔音、减振、耐高(低)温，独特的耐烧蚀性，透电磁波，吸波隐蔽性，材料性能的可设计性，制备的灵活性和易加工性等特点，是制造飞机、火箭、航天飞行器等国防装备的理想材料。

复合材料按其组成为金属与金属复合材料、非金属与金属复合材料、非金属与非金属复合材料。按其结构特点又分为：

① 纤维增强复合材料。纤维增强复合材料是将各种纤维增强体置于基体材料内复合而成的，如纤维增强塑料、纤维增强金属等。

② 夹层复合材料。夹层复合材料由性质不同的表面材料和芯材组合而成，分为实心夹层和蜂窝夹层两种。通常，其表面材料强度高、薄；芯材质量轻、强度低，但具有一定的刚度和厚度。