

高等学校“十一五”规划教材



机械设计制造及其自动化系列

**THE MACHINING TECHNOLOGY
FOR THE SPECIAL MATERIALS
IN ASTRONAUTICS**

航天用特殊材料加工技术

韩荣第 金远强 编著

哈尔滨工业大学出版社

高等学校“十一五”规划教材



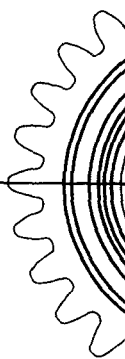
机械设计制造及其自动化系列

**THE MACHINING TECHNOLOGY
FOR THE SPECIAL MATERIALS
IN ASTRONAUTICS**

航天用特殊材料加工技术

韩荣第 金远强 编著

哈尔滨工业大学出版社



内容提要

本书主要介绍航天用特殊材料的发展趋势与分类、切削加工性及切削加工特点、适用的刀具材料及机械加工新技术新工艺,重点介绍高强度与超高强度钢、淬硬钢、不锈钢、高温合金、钛合金、蜂窝夹层材料、工程陶瓷、石英、蓝宝石、(金属基、陶瓷基、树脂基)复合材料等的制备及其加工技术。

本书内容新颖,资料丰富,数据全面,图文并茂,语言精练,理论联系实际。

本书既可作为普通高等工科学校航空宇航制造工程专业的本科生与研究生的教材,也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

Abstract

This book presents the development trend and sorts of the special materials used in astronautics and aeronautics fields. It shows the machinability of these materials and the characteristics in machining. It also shows the proper material for cutting tools, and the new machining technology and processes.

This book focuses on the preparation and machining technology for the special materials, including high strength and ultra-high strength steel, hardened steel, stainless steel, superalloy, titanium alloy, honeycomb sandwich material, engineering ceramics, quartz, sapphire, the metal matrix composites, the ceramic matrix composites and the polymer matrix composites.

This book includes up-to-date information, abundance of data and concise diction. Furthermore, there are a great amount of figures in the book.

This book is intended for use as a textbook for senior-level or graduate-level students majoring in astronautics and aeronautics manufacturing engineering in the universities. It can also be served as a valuable reference for engineers in the related fields.

图书在版编目(CIP)数据

航天用特殊材料加工技术/韩荣第,金远强编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.7

ISBN 978 - 7 - 5603 - 2285 - 8

I .航… II .①韩…②金… III .航天材料 - 加工 IV .V25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 092178 号

责任编辑 许雅莹

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451 - 86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 肇东市粮食印刷厂

开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16 印张 14.5 字数 336 千字

版 次 2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5603 - 2285 - 8

印 数 1 ~ 4 000 册

定 价 26.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

高等学校“十一五”规划教材

机械设计制造及其自动化系列

编写委员会名单

(按姓氏笔画排序)

主 任	姚英学				
副主任	尤 波	巩亚东	高殿荣	薛 开	戴文跃
编 委	王守城	巩云鹏	宋宝玉	张 慧	张庆春
	郑 午	赵丽杰	郭艳玲	谢伟东	韩晓娟

编审委员会名单

(按姓氏笔画排序)

主 任	蔡鹤皋				
副主任	邓宗全	宋玉泉	孟庆鑫	闻邦椿	
编 委	孔祥东	卢泽生	李庆芬	李庆领	李志仁
	李洪仁	李剑峰	李振佳	赵 继	董 申
	谢里阳				

总 序

自1999年教育部对普通高校本科专业设置目录调整以来,各高校都对机械设计制造及其自动化专业进行了较大规模的调整和整合,制定了新的培养方案和课程体系。目前,专业合并后的培养方案、教学计划和教材已经执行和使用了几个循环,收到了一定的效果,但也暴露出一些问题。由于合并的专业多,而合并前的各专业又有各自的优势和特色,在课程体系、教学内容安排上存在比较明显的“拼盘”现象;在教学计划、办学特色和课程体系等方面存在一些不太完善的地方;在具体课程的教学大纲和课程内容设置上,还存在比较多的问题,如课程内容衔接不当、部分核心知识点遗漏、不少教学内容或知识点多次重复、知识点的设计难易程度还存在不当之处、学时分配不尽合理、实验安排还有不适当的地方等。这些问题都集中反映在教材上,专业调整后的教材建设尚缺乏全面系统的规划和设计。

针对上述问题,哈尔滨工业大学机电工程学院从“机械设计制造及其自动化”专业学生应具备的基本知识结构、素质和能力等方面入手,在校内反复研讨该专业的培养方案、教学计划、培养大纲、各系列课程应包含的主要知识点和系列教材建设等问题,并在此基础上,组织召开了由哈尔滨工业大学、吉林大学、东北大学等9所学校参加的机械设计制造及其自动化专业系列教材建设工作会议,联合建设专业教材,这是建设高水平专业教材的良好举措。因为通过共同研讨和合作,可以取长补短、发挥各自的优势和特色,促进教学水平的提高。

会议通过研讨该专业的办学定位、培养要求、教学内容的体系设置、关键知识点、知识内容的衔接等问题,进一步明确了设计、制造、自动化三大主线课程教学内容的设置,通过合并一些课程,可避免主要知识点的重复和遗漏,有利于加强课程设置上的系统性、明确自动化在本专业中的地位、深化自动化系列课程内涵,有利于完善学生的知识结构、加强学生的能力培养,为该系列教材的编写奠定了良好的基础。

本着“总结已有、通向未来、打造品牌、力争走向世界”的工作思路,在汇聚多所学校优势和特色、认真总结经验、仔细研讨的基础上形成了这套教材。参加编写的主编、副主编都是这几所学校在本领域的知名教授,他们除了承担本科生教学外,还承担研究生教学和大量的科研工作,有着丰富的教学和科研经历,同时有编写教材的经验;参编人员也都是各学校近年来在教学第一线工作的骨干教师。这是一支高水平的教材编写队伍。

这套教材有机整合了该专业教学内容和知识点的安排,并应用近年来该专业领域的科研成果来改造和更新教学内容、提高教材和教学水平,具有系列化、模块化、现代化的特点,反映了机械工程领域国内外的新发展和新成果,内容新颖、信息量大、系统性强。我深信:这套教材的出版,对于推动机械工程领域的教学改革、提高人才培养质量必将起到重要推动作用。

蔡鹤皋

哈尔滨工业大学教授

中国工程院院士

丁亥年八月于哈工大

前 言

随着科学技术的发展,对工程结构材料性能的要求越来越高,特别是航空宇航工业由于工作环境的特殊,非常需要采用一些具有特殊性能的新型结构材料,如高强度与超高强度钢、淬硬钢、不锈钢、高温合金、钛合金、蜂窝夹层材料、硬脆非金属材料(工程陶瓷、石英与蓝宝石)以及各种复合材料等,这些结构材料均属难加工新材料。为适应航空宇航制造工程学科发展的需要,我们在总结多年科研成果和教学经验的基础上,特编著了《航天用特殊材料加工技术》一书。

全书共分7章。第1章绪论,重点介绍飞行器机身与发动机及载人航天系统用特殊材料、材料的切削加工性与分类、材料的切削加工特点及改善切削加工性的途径;第2章介绍高强度与超高强度钢、淬硬钢、不锈钢等特种材料的性能、切削加工特点及途径;第3章介绍高温合金及其切削加工技术;第4章介绍钛合金及其切削加工技术;第5章介绍夹层结构材料成型加工技术;第6章介绍航天用硬脆非金属材料(工程陶瓷、石英和蓝宝石)及其加工技术;第7章介绍航天用各种复合材料(树脂基、金属基、陶瓷基等)的概念、性能特点、应用、成型制备方法及切削加工特点等。

本书内容丰富新颖、结构层次清晰、图文并茂、语言精炼准确、理论紧密联系实际,既可作为航空宇航制造工程专业学生和教师用书,又可作为相关专业学生及工程技术人员的参考书。编者深信,它一定能帮助读者解决生产中的实际问题。

全书由哈尔滨工业大学韩荣第教授和金远强副教授编著,其中第1~5章由韩荣第和韩滨及刘俊岩编著,第6~7章由金远强和杨立军编著,全书由韩荣第统稿、定稿。

由于时间和水平所限,书中难免有疏漏和不足,敬请谅解,并欢迎指正!

编 者
2007年5月

目 录

// 第1章 绪 论

1.1 航空宇航用特殊材料	1
1.2 被加工材料的切削加工性	7
1.3 航天特殊材料的分类及切削加工特点	19
1.4 改善材料切削加工性的途径	21
复习思考题	42

// 第2章 航天用特种钢及其加工技术

2.1 高强度钢与超高强度钢	44
2.2 淬硬钢	56
2.3 不锈钢	63
复习思考题	83

// 第3章 航天用高温合金及其加工技术

3.1 概述	84
3.2 高温合金的切削加工特点	88
3.3 高温合金的车削加工	90
3.4 高温合金的铣削加工	96
3.5 高温合金的钻削加工	99
3.6 高温合金的铰孔	102
3.7 高温合金攻螺纹	103
3.8 高温合金的拉削	104
复习思考题	107

// 第4章 航天用钛合金及其加工技术

4.1 概述	108
4.2 钛合金的切削加工特点	109
4.3 钛合金的车削加工	114
4.4 钛合金的铣削加工	118
4.5 钛合金的钻削加工	124
4.6 钛合金攻螺纹	128
复习思考题	131

// 第5章 航天夹层结构材料成型加工技术

5.1 概述	132
5.2 夹层结构制造技术	133

5.3 夹层结构的机械加工	136
复习思考题	136
第 6 章 航天用硬脆非金属材料及其加工技术	
6.1 工程陶瓷材料及其加工技术	137
6.2 石英材料及其加工技术	163
6.3 蓝宝石材料及其加工技术	170
复习思考题	177
第 7 章 航天复合材料及其成型与加工技术	
7.1 概述	178
7.2 树脂基复合材料及其成型与加工技术	183
7.3 金属基复合材料及其成型与加工技术	194
7.4 陶瓷基复合材料及其成型与加工技术	209
7.5 碳/碳复合材料及其成型与加工技术	216
复习思考题	221
参考文献	222

1.1 航空宇航用特殊材料

航空宇航新材料是新型航空航天器和先进导弹实现高性能、高可靠性和低成本的基础和保证,航空航天技术发达的国家十分重视航空宇航新材料的开发和应用,并投入了大量的研究经费。如,1991 年美国“国防部关键技术计划”列举的 21 项关键技术中,与航空宇航材料及其制造技术有关的有 52 项,约占 1991 年财政年度“国防关键技术计划”总经费的 26.5%。1993 年美国 NASA 等 10 个单位根据美国“先进材料和加工计划(AMPP)”获得的复合材料、金属材料、聚合物等 7 种先进材料及其加工技术的研究经费总额达 14.42 亿美元,其中复合材料与金属材料约占该总经费的 50%。这些均为航空宇航新材料的发展创造了条件,同时也反映了先进复合材料在美国航空宇航新材料研究中的重要地位。

另外,航天飞机(NASP)和综合高性能涡轮发动机(IHPTET)等的开发和研制也推动了航空宇航新材料的发展。如美国 20 世纪 80 年代末为实现 NASP 计划制定的为期 3 年的“材料和结构阶段计划(MASAP)”投资 1.36 亿美元,其中用于新材料及其加工技术开发的经费超过 7 800 万美元,有力地促进了 Ti-Al 金属间化合物等 5 种新材料的开发利用。

1.1.1 飞行器机身用结构材料

1. 铝合金

据预测,21 世纪飞行器机身结构材料仍以铝合金为主,但必须在保证使用可靠性和良好工艺性的前提下减轻质量。有效办法就在于提高铝合金的强度、降低其密度。用锂(Li)对铝(Al)合金化成 Al-Li 合金,密度可降低 10%~20%,刚度提高 15%~20%。美国宇航局估测,2005 年航空航天器结构中,Al-Li 合金取代 65%~75%的常规铝合金用量。Al-Li 合金已用于制作大力神运载火箭的液氧贮箱、管道、有效载荷转接器,F16 战斗机后隔框,“三角翼”火箭推进剂贮箱,航天飞机超轻贮箱及战略导弹弹头壳体等。

Al-Li 合金的韧性比铝合金有明显提高,且板材的各向异性及超塑性成形技术均已获得突破。如英国 EAP 战斗机用超塑性成形 Al-Li 合金做起落架,质量减轻 20%,成本节约 45%以上。

超高强度铝合金($\sigma_b = 650 \sim 700 \text{ MPa}$)及高强超塑性铝合金也已用于美国 T-39 飞机机身隔框和英国 EAP 战斗机起落架舱门。

2. 超高强度钢

在现代飞机结构中,钢材用量约稳定在 5%~10%,在某些飞机如超音速歼击机上,钢材仍是一种特定用途材料。

飞机所用钢材为超高强度钢,其 $\sigma_b = 600 \sim 1850 \text{ MPa}$,甚至要达到 1950 MPa,断裂韧性 $K_{IC} = (77.5 \sim 91) \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

在活性腐蚀介质作用下使用的机身承力结构件,特别是在全天候条件下工作的承力结构件中广泛使用高强度耐蚀钢,其中马氏体类型的低碳弥散强化耐蚀钢和过渡类型的奥氏体-马氏体钢最有发展前景,在液氢和氢气介质中工作的无碳耐蚀钢可作为装备氢燃料发动机飞机的结构件材料。

3. 钛合金

提高钛合金在机身零件中使用比例的潜力巨大。据预测,钛合金在客机机身中的使用比例可达 20%,在军用机机身中可提高到 50%。

但目前 TC4 的工作温度仅为 482 ℃左右,最高的 α 型钛合金也只有 580 ℃左右。进一步提高工作温度将受到蠕变强度和抗氧化能力的限制。其解决办法,一是采用快速凝固/粉末冶金技术得到了一种高纯度、高致密性的钛合金,760 ℃时的强度与室温时相同;二是发展高强度高韧性 β 型钛合金。这种 β 型钛合金已被 NASA 定为复合材料 SiC/Ti 的基体材料,用来制作 NASP 的机身和机翼壁板。另外,具有更高热强性、热稳定性和使用寿命的“近 α ”型热强钛合金也将研制开发。

4. 金属基复合材料(metal matrix composite, MMC)

因为 MMC 具有较高的比强度、比刚度、低膨胀系数,在太空环境中不放气、抗辐射,能在较高温度(400 ~ 800 ℃)下工作,故它是 21 世纪空间站、卫星和战术导弹等的理想结构材料。

增强相材料可采用石墨纤维、B 纤维、SiC 纤维及 SiC 颗粒(SiCp)、SiC 晶须(SiCw),基体材料可采用铝合金、钛合金及 TiAl 金属间化合物。

铝复合材料 SiC_p/2124 的 σ_b 达 738 MPa, SiC_p/7001 的弹性模量 E 达 138 GPa, SiC_w/7075 (体积分数为 27%)制作的弹翼比弥散强化不锈钢制作的质量至少减轻 50%。

铝基层状复合材料作机身的蒙皮材料,质量将减轻 10% ~ 15%。

SiC 纤维增强 TiAl 金属间化合物基复合材料已被 NASA 确定为 NASP 的 X-30 试验机用壁板的备选材料。

5. 聚合物基复合材料(polymer matrix composite, PMC)

由于复合材料 PMC 具有质轻、高强度、高刚度及性能可设计等特点,故它是航天领域用量最大、应用最广的结构材料,质量可比金属减轻 20% ~ 60%。C(石墨)/环氧、Kevlar/环氧在先进战略导弹(如侏儒、MX、三叉戟-I、II)和航天器(航天飞机、卫星、太空站)上获得了广泛应用。如三叉戟-II 的第 1、2 级固体火箭发动机壳体就采用了石墨/环氧复合材料。

PMC 的发展有以下特点。

(1) 由小型简单的次承力构件发展到大型复杂承力构件

如 2 500 mm × 22 400 mm × 42 mm(直径 × 长度 × 壁厚)的 MX 导弹发射筒、三叉戟导弹仪器舱、DC-XA 液氧箱及卫星支架等。

(2) 向较高耐温方向发展

如石墨/聚酰亚胺(VCAP-75)复合材料的最高使用温度可达 316 ℃,日本已将它作为“希望号”航天飞机的主结构材料;美国正在研制耐 427 ℃的有机复合材料。

(3) 由热固性向热塑性方向发展

如热塑性树脂基复合材料已用于福克-50 飞机的 Gr/PEEK(聚醚醚酮)主起落架舱、机翼蒙皮和机翼翼盒等。

(4)由单一承载向结构/隐身、结构/透波、结构/抗核/抗激光等多功能一体化方向发展
结构/隐身复合材料已用于 B-2、F-117、EAF 等飞机和“战斧”巡航导弹,它是用 C 纤维或 C 纤维与 Kevlar 纤维、C 纤维与玻璃纤维等混杂纤维增强的 PMC。美国正在研制结构/抗激光/抗核的 Gr/PEEK 复合材料。

6. C/C 复合材料

C/C 复合材料具有较高的比强度和比刚度、良好的耐烧蚀性能和抗热震性能,它是优异的烧蚀耐热材料和热结构材料,也是当前先进复合材料的研究开发重点。

战略导弹弹头在再入大气层时,整个弹头表面将处于气动热环境中,故弹头耐热及烧蚀耐热材料的选用一直是战略导弹的关键问题。

目前美国采用三向编织 C/C,有的还采用钨丝增强。俄罗斯还采用了四向编织 C/C。

这种多向编织高密度 C/C 已用作火箭发动机喷管的耐热和结构一体化材料,C/C 全喷管已代替了传统的多段、多层、多种材料的积木式喷管,使喷管质量减轻 30%~80%,而且简化了结构,提高了可靠性。

7. 蜂窝夹层结构材料

常见的蜂窝夹层结构材料具有轻质高强、结构刚度大、透波性好及制造较方便等特点。

常用的有玻璃钢蜂窝夹层结构,主要用于小型中速靶标无人机机体的机翼;碳纤维蒙皮与铝蜂窝夹层结构,主要用于 FY-3 卫星推进舱和服务舱的承力筒;碳纤维增强环氧树脂基复合材料层压板蒙皮、梁、肋和玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料层压板尾缘条及 NOMES 蜂窝芯制作的飞机方向舵,还有运载火箭卫星整流罩,也采用碳/环氧蒙皮与铝蜂窝夹芯结构等(详见第 5 章)。

1.1.2 发动机用耐热材料

1. 高温合金

高温合金是航空航天发动机的关键材料。应用最多的是 Inconel718 等 Ni 基高温合金,其使用温度已接近极限,用改变合金成分来提高使用温度已非常困难。现正通过新工艺途径由普通铸造高温合金发展为定向凝固高温合金及单晶高温合金,并向弥散强化高温合金和纤维增强高温合金方向发展。

美国航天飞机的高压氧化剂泵的涡轮叶片就使用了定向凝固高温合金铸件。单晶高温合金已用作发动机的中压涡轮叶片,使涡轮发动机热端部件的耐热温度至少提高了 42℃,用氧化物弥散强化的机械合金化高温合金制作的微晶叶片,涡轮入口温度可提高到 1540~1650℃,发动机的推重比可提高 30%~50%。各类高温材料的工作温度如图 1.1 所示。

用铼(Re)合金化的热强镍(Ni)基高温合金具有更高的工作温度和持久强度,可使涡轮入口温度提高到 2000~2100 K(1727~1827℃),冷却空气耗量减少 30%~50%,耗量相同时叶片使用寿命延长 1~3 倍。

2. 金属间化合物

金属间化合物 $Ti_3Al(\alpha_2)$ 、 $TiAl(\gamma)$ 具有质轻、刚度大、高温下保持高强度等特点,故被认为是未来高性能航天飞机(NASP)理想的高温结构材料。

它们的使用温度可分别为 816℃和 982℃,密度仅为 Ni 基高温合金的 50%。预计能满

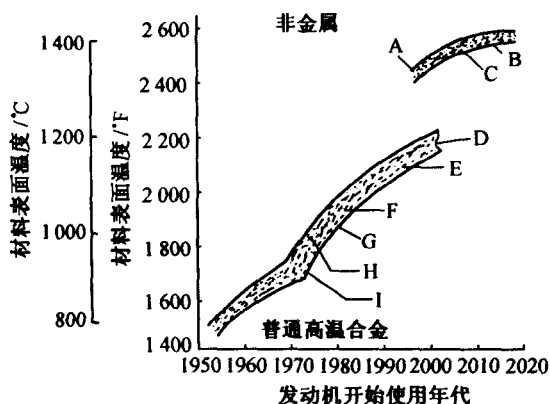


图 1.1 各类高温材料的工作温度

A—陶瓷;B—C/C;C—陶瓷基复合材料;D—金属间化合物;E—纤维增强高温合金;F—快速凝固高温合金;G—氧化物弥散强化高温合金;H—单晶高温合金;I—定向凝固高温合金

足 NASP 中温(300~1 000 °C)结构的使用要求,可制造机身和机翼壁板。 Ti_3Al 已制成高压压气机机匣、涡轮支承环、燃烧室喷管密封片等。

3. C/C 热结构材料

C/C(碳/碳复合材料)有良好的抗氧化性能,是现有复合材料中工作温度最高的材料。主要用于载人再入航天飞机的热结构、面板结构和发动机喷管烧蚀隔热结构。

由于航天飞机的需要,早在 20 世纪 70 年代就已开展了 C/C 热结构材料的研究,并制成了航天飞机的鼻锥帽和机翼前缘。美国通用电气公司(GE)又用 C/C 制造了低压涡轮部分的涡轮及叶片,运转温度 1 649 °C,比一般涡轮高出 555 °C,且不用水冷却。这为发动机部件在高温高速($\geq 6M$, M 为音速)条件下正常工作,为新一代巡航导弹发动机的研制铺平了道路。

4. 陶瓷基复合材料(ceramic matrix composite, CMC)

CMC 已用于“使神号”航天飞机的小翼、方向舵和襟翼材料,主要有 2D-SiC/SiC、2D-C/SiC 复合材料。前者的体积分数约为 40%,既有良好的抗蚀性又有优良的抗氧化性能;后者的体积分数为 45%,1 700 °C 时仍保持高强度、高韧性及优异的抗热震性能。

法国 SEP 公司还制造了阿里安-4 的第 3 级液氢/液氧推力室 C/SiC 复合材料的整体喷管,比金属喷管的质量减轻 66.6%。该公司还在 HM7 发动机上使用 C/SiC 喷管,其入口温度高于 1 800 °C,工作时间达 900 s。

美国也正在开发能耐 1 538 °C 的陶瓷纤维。

1.1.3 载人航天系统用新材料

先进载人航天系统主要包括重复使用天地往返运输系统、空间站系统、大型运载火箭以及制导、导航、控制系统、测控通信系统、发射场与返回场及宇航员系统等。选用的新材料包括结构与耐热材料、热控材料、密封材料、推进剂材料、电子与光学和磁性材料、电源和储能材料及特殊功能材料等。

1. 结构与耐热材料

结构材料是各类载人航天器天地往返运输系统、空间站和大型运载火箭必不可少的重

要材料, 隔热材料则是重复使用载人航天器的关键材料。对于先进航天器, 结构和隔热均采用一体化设计, 所用材料应具有结构和隔热一体化功能。结构与隔热材料按材料类型分为新型结构与隔热金属材料、新型结构与隔热非金属材料及新型结构与隔热复合材料。

(1) 新型结构与隔热金属材料

① 高性能铝合金

主要用于空间站的密封主结构、大型运载火箭贮箱、航天飞机的轨道舱和外储箱及航天飞机的机身结构等。

要求铝合金具有高强度、大塑性、优良的耐蚀性和中等加工成形性能。如美国的 2124、2219、2224、7175 及前苏联的 A164、1163、B95 等牌号。

② 铝锂合金

具有高比刚度和比强度及良好的抗疲劳性能, 耐热性能优于树脂基复合材料, 是未来载人航天飞机的理想结构材料, 主要用于储箱和蒙皮结构。如美国的 Al - Cu - Li(-Zr) 系(2090、2091)、Al - Cu - Mg - Li 系(8090、8091)、Alithalite2090、Weldalite049 和 IN905XL。

③ 高温合金

具有良好的热强性、抗氧化性和耐蚀性, 主要用于运载火箭发动机的喷管、涡轮泵等高温部件以及先进载人航天器较高温区的隔热零部件。主要牌号有 Inconel718、Inconel625、Rene41、Waspaloy 等 Ni 基高温合金和 Hayness188、Hayness525 等 Co 基高温合金。

④ 新型钛合金

具有使用温度高、良好的高温和超低温强度、良好的焊接性能和耐蚀性能, 主要用于航天飞机 NASP 机体结构、先进载人航天器较低温区的隔热结构和发动机外壳等。有 Ti - 100、Ti - 6242、Timetal 或 β 21S、 β -C 和 Ti - 15V - 3Cr - 3Sn - 3Al 等。

⑤ 金属间化合物

具有高强度、高熔点且强度随温度升高而提高的特点, 主要用于发动机等高温部件和火箭与飞机的机翼结构, 包括 TiAl、Ti₃Al、Ni₃Al、Ti₃Al - Nb、Fe₃Al 和 FeAl 等。

(2) 新型结构与隔热非金属材料

① 陶瓷隔热材料

先进的陶瓷隔热材料具有隔热性好、质量轻和使用温度高等特点, 主要用于先进载人航天器较高温区和较低温区的隔热。新型刚性陶瓷材料主要有高温特性材料(HTP)、氧化铝增强热屏蔽材料(AETB)和初化整体纤维隔热材料(TUFI)等。柔性隔热材料有柔性外部隔热材料(FEI)、复合柔性隔热毡(CFBI)、可改制先进隔热毡(TABI)和先进柔性隔热毡(AFRSI)。

② 陶瓷结构材料

具有强度高、相对质量轻和耐高温、耐腐蚀性好等特点, 主要用于整流罩和发动机结构。主要有熔融硅、Al₂O₃、Y₂O₃、SiC、Si₃N₄ 和 ZrO₂ 等。

(3) 新型结构与隔热复合材料

① 树脂基复合材料

主要特点是质量轻、强度与刚度高、阻尼大, 用于先进载人航天器、空间站和固体发动机的结构件, 主要有石墨/环氧、硼/环氧、石墨/聚酰亚胺和聚醚醚酮等。

②金属基复合材料(MMC)

具有高比强度和比刚度、低膨胀系数、良好的导电性和导热性、不吸气、抗辐射、抗激光及制造性能好等特点。用于先进载人航天器的起落架等机身辅助结构及惯性器件和仪表结构等。主要有 SiC/Al、Al₂O₃/Al、SiC/Ti、SiC/TiAl、石墨/铜。

③陶瓷基复合材料

具有使用温度高、抗氧化性能好、质量轻、强度和刚度高等特点,可用于航天飞机的机头锥、机翼前缘热结构和盖板结构。主要有 C/SiC、SiC/SiC、Zr₂B/SiC、Hf/SiC,其中硼化物增强陶瓷基复合材料是抗氧化性最好的高温材料,耐热温度可达 2 200 ℃ 以上。

④C/C 复合材料

具有良好的抗氧化性能,是现有复合材料中工作温度最高的。主要用于载人再入航天器的热结构、面板结构和发动机喷管、烧蚀耐热结构。主要有增强 C/C(RCC)和先进 C/C(ACC),有 2D、3D、4D、5D、6D、7D 和更高维数的 C/C 复合材料。

⑤混杂复合材料

具有吸波、零膨胀、防声纳等特殊性能,主要用于天线及导弹头锥等。主要有金属与非金属复合材料,如芳纶纤维增强树脂/铝(ARALL)和玻璃纤维增强树脂/铝等。

2. 热控材料

载人航天器要求热控材料具有质量轻、成本低、施工安装容易、长期工作稳定性好等特点。包括热控涂层材料、隔热材料及导热填充材料等。

3. 密封材料

要求密封材料能经受住超高温、超低温、高压、微重力和腐蚀等严酷环境考验。主要用于航天器推进系统、液压系统和气动系统中的管路、阀门和箱体等部件的静动密封结构及防热系统部件的密封,如壳体、机翼端头、升降副翼和防热材料等。包括金属密封材料、非金属密封材料与复合材料密封材料等。

4. 推进剂材料(略)

5. 电子材料与光学及磁性材料(略)

6. 电源与储能材料(略)

7. 特殊功能材料

(1)形状记忆材料

形状记忆材料是具有形状记忆效应的合金和非金属材料(如聚合物),可用于先进载人航天器的管接头、紧固件、天线、温控装置以及开关、作动器、机器人部件、传感器阀门、膨胀密封件等。包括 Ni-Ti 基、Cu 基和 Fe 基形状记忆合金。

(2)梯度功能材料

梯度功能材料(FGM)又称倾斜或渐变功能材料。由于材料的成分、浓度沿厚度方向连续变化而使功能呈连续变化,从而可避免界面反应和热应力剥离。航天飞机均可采用梯度功能材料,并已制成航天飞机机体表面使用的板材和机头锥使用的半圆型材模型。还可用于火箭发动机燃烧室壁、高性能电子器件和新型光学或存储元件。材料可为金属、陶瓷及塑料、复合材料等的巧妙梯度复合,因而是一种基于全新材料设计概念而成的新型材料。

(3)智能材料

智能材料是一种具有“智能”功能的新概念设计材料,又称灵巧材料。实际上是一个具

有传感、处理与执行功能的智能材料系统和结构,既包括在材料(如复合材料)中埋入传感和致动系统(如光纤、磁致/电致伸缩材料、压电晶体、形状记忆合金和电流变体)而构成的“智能结构”,也包括具有微观结构传感器、致动器和处理器的“智能材料”。如将光纤阵列/处理系统嵌入复合材料制成的飞机“智能蒙皮”中,可对机翼和构架进行实时监测与诊断,甚至将来可自动改变翼形以满足气动要求、优化飞行参数;智能结构中可研制大型空间的可展开结构、伸展机构、观测平台和光学干涉仪等大型“精确结构”,将光纤埋入复合材料中又可制成雷达天线的智能桁架结构;此外还能用于机器人装置。总之,智能材料在未来先进载人航天系统中会有广阔的应用前景。

8. 超细微粒材料

超细微粒材料又称纳米材料,即尺寸为纳米级的固体颗粒。可为金属及其合金、陶瓷和高分子等,通过控制材料的微观结构可调制材料的特性,由于材料颗粒变小使其物理、化学性能发生重大变化。可用于光选择吸收材料、太阳电池、热交换器、磁记录器、传感器、远红外材料、极低温材料或用来研制新材料,是先进载人航天系统中最有前途的新型材料之一。

1.2 被加工材料的切削加工性

随着航空、航天、核能、兵器、化工、电子工业及现代机械工业的发展,对产品零部件材料的性能提出了各种各样新的和特殊的要求。有的要求在高温、高应力状态下工作,有的要求耐腐蚀、耐磨损,有的要求能绝缘,有的则需要有高导电率。故在现代工程材料中出现了许多难加工材料,如高强度与超高强度钢、高锰钢、不锈钢、高温合金、钛合金、冷硬铸铁、合金耐磨铸铁及淬硬钢等;还有许多非金属材料,如石材、陶瓷、工程塑料和复合材料等,这些材料均较难或难于切削加工,其原因在地它们具有 1)高硬度;2)高强度;3)大塑性和大韧性;4)小塑性和高脆性;5)低导热性;6)有微观硬质点或硬质夹杂物;7)化学性能过于活泼等特性。被加工材料的这些特性常使切削过程中的切削力增大,切削温度升高,刀具使用寿命缩短,有时还会使加工表面质量恶化,切屑难以控制及处理,最终将使生产效率和加工质量下降。

研究被加工材料的切削加工性,掌握其规律,寻求技术措施,是当前切削加工技术中的重要课题。

1.2.1 材料切削加工性的含义

材料的切削加工性(Machinability)是指对某种材料进行切削加工的难易程度。一般只考虑材料本身性能(如物理力学性能等)对切削加工的影响,而没有考虑由材料转变为零件过程中其他因素,如零件的技术条件和加工条件的影响,故此定义有其局限性。

例如,毛坯质量对零件的加工性影响很大,形状不规整且带有硬皮的铸件、锻件常给加工带来困难。

同种材料制造但结构、尺寸不同的零件,其加工性有很大差异。如特大或特小零件、弱刚性零件或形状特别复杂零件都较难加工。

尺寸精度和表面质量要求高的零件也较难加工。

用切削性能较差的刀具加工高硬度或高强度材料显得很困难,甚至根本不能加工,如改

换切削性能好的刀具却能顺利加工。

在普通机床上使用通用夹具,加工某一零件非常困难,如改用专用机床和专用夹具加工就不困难了。

采用新型极压切削液可改善切削加工性,选用合理切削用量也可使切削加工变得顺利。

由此可见,在研究材料切削加工性的同时,还应当有针对性地研究零件的切削加工性。二者结合起来,对生产则有更大的指导意义。

生产批量对切削加工性也有影响。在相同条件下加工同一种材料制作的零件,批量小时比较容易;批量大时对生产效率有高的要求,加工难度就加大。

因此说切削加工性是相对的,某种材料的切削加工性总是相对另一种材料而言。一般在讨论切削加工性时习惯以中碳 45 钢(正火)为基准。如说高强度钢较难加工,就是相对于 45 钢而言的。另外,切削加工性与刀具的切削性能关系最密切,不能脱离刀具的具体情况孤立地讨论或研究被加工材料(或零件)的切削加工性。因此,在研究被加工材料(或零件)的切削加工性时必须与刀具的切削性能结合起来。

1.2.2 切削加工性的衡量指标

比较材料的切削加工性时应当有量的概念,不同情况可用不同参数作指标来衡量切削加工性。有时只用一项主要指标衡量切削加工性,有时则可兼用几项指标。

1. 以刀具使用寿命 T 或一定使用寿命下的切削速度 v_c 衡量

在相同切削条件下加工不同材料,刀具使用寿命较长或一定使用寿命下切削速度较高的那种材料加工性较好;反之, T 较短或 v_c 较低的材料加工性较差。例如,用 YT15 车刀加工 45 钢时的 $T = 60 \text{ min}$,加工 30CrMnSiA 钢时的 $T = 20 \text{ min}$,可见 30CrMnSiA 钢的切削加工性不如 45 钢好。

实际上经常用某种材料的 v_c 与基准材料的 $(v_c)_j$ 的比值,作为该种材料的相对加工性 K_v ,即

$$K_v = v_c / (v_c)_j$$

表 1.1 给出了几种金属材料的相对加工性,以 45 钢为基准,刀具使用寿命 T 取为 60 min。 $K_v > 1$ 时加工性优于 45 钢, $K_v < 1$ 时加工性不如 45 钢。

表 1.1 几种金属材料的相对加工性 K_v

被加工材料	$K_v = v_{c\infty} / v_{c\infty}(45)$
铜、铝合金	≥ 3
45 钢(正火)	1
2Cr13(调质)	0.65 ~ 1
45Cr(调质)	0.5 ~ 0.65
钛合金	0.15 ~ 0.5

T 、 v_c 或 K_v 是最常用的切削加工性衡量指标。刀具使用寿命不仅可用加工时间表示,也可用加工零件数或进给(走刀)长度来表示。