

# 先进材料与工艺在机载导弹上的研究与应用

赵融<sup>1</sup>, 廖金华<sup>2</sup>

(1. 中航工业中国空空导弹研究院, 洛阳 471009;  
2. 中航工业北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

[摘要] 先进材料和工艺在机载导弹中的应用是实现机载导弹优异性能的基础和前提。主要讨论了用于机载导弹的复合材料、高温钛合金、铝锂合金、金属间化合物等先进材料和近无余量成形、超精密加工等先进工艺的特点以及国内外的的发展概况。

关键词: 复合材料; 高温钛合金; 铝锂合金; 金属间化合物; 超精密加工

## Research of Advanced Materials and Technologies on Airborne Missile

ZHAO Rong<sup>1</sup>, LIAO Jinhua<sup>2</sup>

(1. AVIC China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;  
2. AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] The applications of advanced materials and technologies on airborne missile are the basis and precondition of excellent airborne missile. In this paper, the domestic and international development and characteristics of advanced materials including composite materials, high temperature titanium alloy, Al-Li alloy, intermetallic compound and technologies including near net shape, ultra-precision machining technology are discussed.

Keywords: Composite; High temperature titanium alloy; Al-Li alloy; Intermetallic compound; Ultra-precision machining

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.23/24.120

制空权是决定现代战争胜负的主要因素,而机载导弹是夺取制空权的主要武器装备。因此,机载导弹的发展深深地影响着现代空战的作战模式和战争理念。如何提高机载导弹的战斗力也就成为相应设计者和制造商的主要任务。

结构的轻量化是提高机载导弹性能的主要手段之一,结构轻量化可使机载导弹体积更小,射程更远,速度更快,机动性更强<sup>[1]</sup>。随着技术的发展与变革,各种新材料和新工艺被应用在机载导弹上,为机载导弹的轻量化设计与制造奠定了基础。总体来讲,实现结构轻量化有两条途径:一是选取高强轻质材料;二是采用近无余量成形、超精密加工等工艺<sup>[2]</sup>。

导弹结构的轻量化也是国内外导弹结构设计发展的共同趋势,随着机载导弹向高机动、大过载等方向发展,对导弹结构的轻量化设计提出了更多、更高、更迫切的要求。

## 1 可用于机载导弹的先进材料

### 1.1 先进复合材料

先进复合材料(Advanced Composite Materials, ACM)在航空航天发展中具有举足轻重的地位,其主要特点是质量轻、高刚度、高强度、设计灵活等。作为主承力和次承力结构,ACM结构件已成功应用在多种飞行器上,对飞行器的轻量化作出了重要贡献。ACM主要包括树脂基复合材料(Resin matrix composites)、金属基复合材料(Metal matrix composites)和陶瓷基复合材料(Ceramic matrix composites),增强体主要是玻璃纤维、碳纤维、陶瓷纤维和有机杂环类纤维等<sup>[3]</sup>。

#### 1.1.1 树脂基复合材料

树脂基复合材料是应用在导弹结构中最多的复合材料,它的密度是钢的1/5、铝的1/2。20世纪80年代,已经有双马来酰亚胺(BMI)、氰酸酯(CE)和聚酰亚胺(PI)树脂基复合材料应用于超声速导弹。据估计,21世纪的导弹中复合材料占全弹的结构和质量的百分比为79%和60%,树脂基复合材料将得到越来越广泛的应用<sup>[4-5]</sup>。

树脂基复合材料在导弹领域中的应用非常广泛,典型应用是战斧系列导弹,其雷达天线罩、进气道和尾

翼框架采用玻纤/环氧树脂注射模塑制成,头锥使用 KEVLAR/聚酰亚胺材料,尾翼蒙皮则采用 KEVLAR/环氧材料。其中,麦道公司斯特-劳伊斯分公司制造的进气道,由 40% 的玻璃纤维增强聚碳酸酯注射塑模而成,具有介电常数低、隐身性能好等优点。此外,采用树脂转移模塑技术制成的石墨纤维增强双马复合材料壳体已经成功应用于雷神导弹。雷锡恩公司对超音速导弹用复合材料进行了大量研究,开发了多种先进双马和聚氨酯,其设计的海麻雀导弹改进型将双马/碳纤维作为舱体结构材料。美国“三叉戟-1”导弹仪器舱采用环氧树脂/碳纤维结构,共有 100 多个部件采用石墨纤维复合材料,比铝合金轻 30%,减重效果显著;美国 MX 导弹发射筒选用 HBRN-55 环氧树脂/AS-4 碳纤维复合材料代替高强度钢,减重 80% 左右;俄罗斯白杨-M 导弹也使用了复合材料结构。

经过多年发展,我国的树脂基复合材料基本实现国产化,可以满足航空航天的发展需求。我国的神舟系列和风云卫星系列均使用了自主研发的环氧树脂基复合材料,不但减轻了整体质量,而且降低了发射成本。但是,某些树脂基复合材料目前的技术仅限实验室合成,远没有达到量产阶段。因此,我国在开发先进的树脂基复合材料方面任重道远<sup>[6-9]</sup>。

#### 1.1.2 金属基复合材料

根据金属基体的不同,金属基复合材料分为铝基、钛基、铜基、镁基和其他金属基复合材料。其中,铝基、钛基、镁基 3 种轻金属基复合材料因为具有低密度、高比强度、抗辐射以及良好的耐磨性能和减振性能等特点,在航空航天领域有广阔的应用前景。

在美国,作为功能材料铍的替代品,颗粒增强的 SiC/铝基新型复合材料已用于某型号惯性环形激光陀螺制导系统,该材料还用在三叉戟导弹的惯性单元,成本比铍材低约 70%<sup>[10]</sup>。DWA 复合材料公司与洛克希德·马丁公司及空军合作,用粉末冶金法制备的碳化硅颗粒增强铝基复合材料用于 F-16 战斗机的腹鳍,代替了原有的铝合金结构,刚度提高 50%,使寿命增长 17 倍。据英国国防评估研究和马特拉 BAE 动力公司联合验证,铝基复合材料可以用于制造导弹的导引头组件、推进器组件、弹体结构组件等主要部件。北京航空材料研究院研制的铝基复合材料精铸件成功应用在某卫星遥感器定标装置,并试制出了空间光学反射镜坯缩比件。

目前,镁基复合材料因其尺寸稳定性等独特的性能得到了越来越多的重视,引人注目的是美国的 TEXTRON 等公司利用 SiC<sub>p</sub>/Mg 复合材料制出导弹尾翼、内部加强汽缸等,美国的海军研究所和斯坦福大学利用

B<sub>4</sub>C<sub>p</sub>/Mg-Li 复合材料制造了航天器天线构件。我国目前已经开展了颗粒与纤维增强镁基复合材料的研发,如颗粒增强镁基复合材料的飞机液压分油盖、卫星遥感镜身和镜盒已经进入应用阶段<sup>[3]</sup>。

钛基复合材料研究始于 20 世纪 70 年代,美国、日本等国航天飞机计划的实施推动了钛基复合材料的发展。钛基复合材料作为航空器主承力部件的理想候选材料,已成功应用在涡轮发动机的叶片、整体叶环、盘、轴、机匣、传动杆等部件。美国特殊材料公司通过在碳纤维上化学气相沉积碳化硅制成短纤维,再利用等离子喷涂与钛结合,制造的钛基复合材料应用于荷兰皇家空军 F-16 起落架,达到了减重 40% 的效果。美国还准备将钛基复合材料用于 IHPTET 的燃烧室壳体,实现涡轮发动机压气机的复合材料设计。北京航空材料研究院、北京航空制造工程研究所等单位采用物理气相沉积法成功研制出了 SiC 纤维增强钛基复合材料发动机叶环模拟件,有望取代钛合金,达到减重的目的<sup>[11]</sup>。

值得注意的是,北京航空材料研究院和上海交通大学用于制备金属基复合材料的“搅拌铸造法”工艺水平处于世界领先。目前我国正在研究的工作有:用铝基复合材料制备火箭和导弹制导系统的惯导平台构件以及用镁基复合材料制备航空航天用管接头部件等。

#### 1.1.3 陶瓷基复合材料

与树脂基和金属基复合材料相比,陶瓷基复合材料具有稳定的耐烧蚀、耐腐蚀以及强韧性特点,是某些航天器关键部件材料的不二选择。例如,高超音速导弹飞行速度大于 8Ma 时,头锥瞬时温度将达到 1000℃ 以上。在如此极端环境下,导弹天线罩要求具备承载、透波等功能,超高温的陶瓷基复合材料则成为唯一的天线罩材料。

美国国防部把陶瓷基复合材料列为重点发展的 20 项关键技术之首,日本早在 1989 年就把陶瓷基复合材料列为重点研究技术领域。美国海军部门研制的无压烧结 Sino 纳米陶瓷基复合材料天线罩已经用于超音速航天器。另外,美国 NASP、英国的 Hotol、德国的 Sanger 等航天飞机的机翼前缘、头锥等部位都采用了陶瓷基复合材料作为热防护系统。

我国在陶瓷基复合材料的研发和应用上一直处于世界前列,具有代表性的是西北工业大学为液体火箭发动机研制的 C/SiC 复合材料系列喷管已经成功通过考核;将被用于国产航空发动机的 SiC/SiC 悬臂瓦片也通过了高压风洞试验。上海硅酸盐研究所研制出碳纤维增韧陶瓷基复合材料,已经用于导弹端头帽和卫星的天线窗框<sup>[12-13]</sup>。针对我国在陶瓷基复合材料应用中的不足,研究重点包括:开发优质的基体和增强体材料以提

高产品的热力学性能;确定陶瓷基复合材料的疲劳性能以解决产品长期服役带来的时效问题;攻克陶瓷基复合材料与异质材料的连接难题以拓宽产品的应用领域等。

## 1.2 轻质高强的金属材料

### 1.2.1 高温钛合金

钛合金具有高比强度、高比刚度、耐腐蚀、结合性能好、耐高温、抗蠕变等特点,被广泛用于航空航天等国防领域。据统计,钛在航空航天的应用占其总产量的70%,因此也被称为“太空金属”。随着技术的不断发展,新型钛合金已经逐渐用于卫星、高超音速导弹等复杂系统中<sup>[14-15]</sup>。

新一代空空导弹追求高速化和小型化,必然引起气动热问题,这对钛合金等主要结构材料的耐热性提出了更高的要求,因此高温钛合金应运而生。高温钛合金主要应用于导弹的舱段壳体、舵面与翼面等。

应用广泛的Ti-6Al-4V合金的最高使用温度为350℃,其被应用于ALCM巡航导弹的升降副翼外壳,与4330钢相比,结构件减重15.88kg;另外,Ti-6Al-4V还被用于宇宙神洲际导弹球形气瓶、民兵洲际导弹的第二级固体发动机壳体以及大力神导弹的压力气瓶。使用温度为400℃的IMI550、BT3-1合金和使用温度为500℃的IMI679、Ti-6246合金被相继开发出来;而美国的Ti-1100合金、英国的IMI834合金以及俄罗斯的BT18Y和BT36合金使用温度达到了600℃,对于突破钛合金的“热障”温度,具有重要的意义。目前,美国的莱康明公司已经把Ti-1100合金作为核心材料应用在T55-712发动机上,英国IMI和罗-罗公司联合研制的IMI834合金应用在Trent700、EJ200和PW350等发动机上,俄罗斯的BT18Y合金也在AL-31发动机上得到大量应用。普遍认为,高温钛合金在航空发动机中使用量已成为其先进程度的主要标志之一。

我国高温钛合金的发展历史只有短短30年的时间,已取得令人瞩目的成就。我国自主研制的高温钛合金使用温度大多在550~650℃之间。其中TA12(Ti55),Ti633G和Ti53311S是3种具有代表性的国产550℃高温钛合金。中科院金属所、宝钛集团、北京航空材料研究院共同开发的TA12A合金,已经成功应用于国产先进航空发动机加力燃烧室筒体和巡航导弹弹体结构。西北有色金属院研发的550℃高温钛合金Ti53311S,也已用于卫星姿态控制发动机喷注器和神舟飞船。中科院金属所的Ti60合金和北京航空材料研究院的TG6合金使用温度已经达到600℃,2003年经全国有色金属标准化技术委员会注册,Ti60和TG6合金命名为TA29钛合金。目前,TA29合金已经具备小批量生产的能力,采用TA29制造的某型导弹舵芯锻件顺利通过了强度试

验;为国产某型号发动机设计的TA29合金整体叶盘锻件,也通过了考核试验。西北有色院研发的600℃高温钛合金Ti600,其蠕变性能优于国外同类产品,Ti600合金已经实现规模生产并出口到国外。此外,中科院金属所已经开始研发650℃高温钛合金(暂定为Ti65)。据报道,运用Ti65制成的发动机叶片通过了振动疲劳试验,其在700℃时依然能保持20min的稳定性。迄今为止,我国对高温钛合金的研究取得了许多突破性进展,但在其疲劳特性方面依然缺少数据支撑,这在一定程度上限制了可使用性。国内学者也应把高温钛合金的疲劳特性作为重点来突破,只有明确材料的全部性能,才能为选材和应用提供保障<sup>[16-19]</sup>。

### 1.2.2 铝锂合金

作为航空航天材料中发展最迅速的轻量化材料,铝锂合金的特点是低密度、高弹性模量、高比强度和比刚度。锂是最轻的金属,其与铝溶解度极高。铝锂合金代替常规铝合金,可使结构件质量减轻10%~15%,弹性模量提高6%,刚度提高15%~20%。与先进复合材料相比,铝锂合金抗压强度较好,并且防雷击,造价低<sup>[20-21]</sup>。

国外,铝锂合金已经有90年的发展历史,尤其在航空航天领域得到广泛应用。早在1957年,美国的Alcoa公司就把2020铝锂合金应用在预警机RA-5C的机翼蒙皮和尾翼安定面上,全机质量减轻6%;洛克希德·马丁公司采用8090铝锂合金制成了大力神运载火箭的舱体,减重182kg;更具有代表性的是洛克希德·马丁公司与雷诺兹金属公司联合研发出的2195铝锂合金,该材料焊接成燃料贮箱被用于“奋进号”航天飞机,最终减重3405kg,创造了近7500万美元的经济效益。俄罗斯也形成了比较完整的铝锂合金体系,在铝锂合金的应用方面一直处于世界领先地位。前苏联把1420合金成功用于远程导弹弹头壳体中;“能源号”运载火箭采用1460铝锂合金制成的低温贮箱,达到了减重和抗压的双重效果;另外,米格-29、苏-27等战斗机也大量使用了铝锂合金。空客公司为实现客机减重的目标,在主要机型A330、A340、A380以及正在研制的A350中都使用了铝锂合金。

我国的铝锂合金研究始于“七五”,但直到“九五”,我国的铝锂合金产业才有了大规模的发展。在此期间,以航天型号和运载火箭筒体结构的发展规划为背景,国家提出了“高强铝锂合金研究”的科技攻关任务,并从俄罗斯引进了6t级的铝锂合金生产线。目前,我国已经具备第三代铝锂合金2195的生产能力,基本能够满足航空航天的材料需求。中航工业洪都承制的某国产大飞机机身样件于2010年顺利下线,该机机身蒙皮、长桁、地板、纵横梁、滑轨等结构已经采用了国产第三代新

型铝锂合金。鉴于国内铝锂合金的发展现状,我国需“独立”研制新型高强、高损伤容限的铝锂合金,并解决复杂结构件的钣金成形和热处理工艺问题<sup>[22-24]</sup>。

### 1.2.3 金属间化合物

金属间化合物(Intermetallics Compounds, IMC)的性能介于金属与陶瓷之间,具有耐高温、抗腐蚀、抗氧化、高强度等特性,是一种新型的结构材料和结构涂层材料。金属间化合物种类繁多,在航空航天领域得到应用的主要有Ti-Al系、Ni-Al系金属间化合物<sup>[25]</sup>。

Ti-Al系金属间化合物的典型代表是Ti<sub>3</sub>Al和Ti<sub>2</sub>AlNb。Ti<sub>3</sub>Al稳定工作温度为600~700℃,短时使用温度可达1000℃。取代镍基高温合金,Ti<sub>3</sub>Al制成的耐高温结构件应用于飞行器中,可减重40%左右。美国已经把Ti<sub>3</sub>Al应用在战斗机的发动机上;GE公司制造的Ti<sub>3</sub>Al基高压涡轮定子支撑环成功通过了发动机试车试验。在“863”计划的支持下,钢铁研究院研制出了Ti<sub>3</sub>Al合金TAC-1,室温拉伸性能和高温超塑性处于世界领先水平,使用TAC-1基合金制成的发动机壳体已经顺利通过了打压试验,其改良型TAC-1B合金成功用于神舟飞船;北京航空材料研究院使用特殊热处理工艺处理的Ti<sub>3</sub>Al基合金TD-2,主要性能超过了美国的同类产品,用TD-2合金制成的某航空发动机涡轮导向板和结合环通过了28.82h的试车试验。此外,北京航空材料研究院在TD-2基础上又开发出了抗氧化性、断裂韧性更出色的TD-3和TD-4。

Ti<sub>2</sub>AlNb合金的工作温度为700~800℃,短时使用温度可高于1100℃。与Ti<sub>3</sub>Al相比,Ti<sub>2</sub>AlNb具有更强的抗氧化性能和高温抗蠕变性能,更具竞争力。在美国,以Ti<sub>2</sub>AlNb合金制成的轮盘离心压气机叶轮也已得到应用。我国钢铁研究总院研制的Ti<sub>2</sub>AlNb基合金已能制备出合金元素分布均匀的大型合金锭,并能加工成不同规格的棒、饼、板和环形件等型材。我国宇航工业目前正试图采用Ti<sub>2</sub>AlNb合金替代Ni基高温合金制作发动机热端部件<sup>[26-28]</sup>。

Ni-Al系金属间化合物的代表是Ni<sub>3</sub>Al,其熔点为1395℃,在熔化前能够保持组织结构有序不变。Ni<sub>3</sub>Al单相合金IC-50压缩强度为镍铬合金的3倍,在1300℃的极端环境中依然具有优异的抗氧化性。Ni<sub>3</sub>Al金属间化合物可作为抗汽蚀材料用于水中作业的机械中,也可作为高温耐磨材料用于加热炉构件。俄罗斯发展的BKHA-4Y,已制成的单晶涡轮叶片比镍基合金轻8%左右,寿命却增加了2~3倍;美国也已发展了多种Ni<sub>3</sub>Al金属间化合物用于发动机叶片和涡轮外环。我国研制的IC6和CH0定向柱晶已经应用于航空发动机,此外,钢铁研究院生产的MX246合金,在高温冲刷磨损条件

下的节能吹灰器上获得应用<sup>[25]</sup>。

## 2 用于机载导弹结构的先进工艺技术

### 2.1 近无余量成形技术

近无余量成形是零件在成形后,不需要加工或需很少加工就可用作结构件的成形技术。由于该技术在降低飞行器重量以及复杂零件整体化方面的独特优势,成为航空航天领域中复杂结构薄壁零件成形的关键技术。目前,比较成熟的近无余量成形技术有超塑成形(SPF)/扩散连接(DB)、熔模精密铸造等。

#### 2.1.1 超塑成形/扩散连接技术

超塑成形/扩散连接技术(SPF/DB)被誉为现代航空航天工业生产的开创性技术。通常认为当材料的延伸率大于100%时,即可称为超塑性,超塑成形是利用材料的超塑性成形零件的工艺方法;扩散连接是指材料在特定的温度和压力下,使接触面在不形成液相状态下通过原子间相互固态扩散而形成连接的方法。如果一种材料的超塑成形和扩散连接所需的环境条件能够兼容,则可以在一个热循环中实现超塑成形和扩散连接两种工艺,这就是超塑成形/扩散连接工艺技术。与常规连接的结构件相比,SPF/DB结构件能够减重30%左右,同时节约成本40%~50%<sup>[2]</sup>。

在美国,把SPF/DB技术运用于F-15E机身构件后,零件由772个减少到46个;此外,JSF和F-22等先进战斗机的副翼、机身隔热板等也采用了SPF/DB整体结构;俄罗斯拥有世界上最大的超塑成形研究机构;英国的罗-罗公司采用SPF/DB技术研制出的钛合金宽弦空心风扇叶片处于世界领先水平;在日本,几乎所有战斗机型号上都用到SPF/DB结构件。

我国的SPF/DB技术发展已有40多年的历史,基础研究和应用都已取得了很大发展。其中北京航空制造工程研究所在SPF/DB技术的研究及应用处于国内领先地位,以飞机、航空发动机、导弹等型号为背景,该单位在钛合金、铝合金、铝锂合金等材料的SPF/DB技术方面开展了大量的研究工作,成熟产品包括飞机腹鳍、导弹舵翼面、发动机叶片、卫星贮箱等,特别是运用“设计制造一体化”的研发模式,使得产品兼具工艺性和功能性,并缩短产品研制周期、极大提高了产品合格率<sup>[29-31]</sup>。

#### 2.1.2 熔模精密铸造技术

熔模铸造的原理是把耐火材料涂抹在可熔的蜡模表面,并使之干燥、硬化后,再通过加热去除其中的蜡模而得到整体空腔的型壳,最终高温浇注获得铸件。熔模精密铸造出的铸件尺寸精度可达±0.05mm,且能够控制结晶来提高铸件的疲劳强度。熔模精密铸造技术是为满足航空航天系统热端部件发展起来的。采用熔模

精密铸造技术,生产成本将降低 50%~80%。据统计,为减重和节约成本,几乎所有的战斗机结构中都有熔模精铸结构件<sup>[2]</sup>。

美国把电脑工艺模拟、热等静压等技术与熔模精密铸造相结合,生产出 F-22 战斗机的机身与机翼接头,整架 F-22 飞机使用了 70 多个钛合金精密铸件。V-22 飞机采用了整体精铸钛合金转接器代替铝锻件组合,不但具有减重效果,同时节省了组装时间。黑鹰直升机发动机机匣与壳体、F-16 战斗机的进气道唇口、美国战斧巡航导弹、BAT 导弹等的壳体均采用铝合金整体精密铸件。此外,GE 公司研制的 Nb-Si 系超高温材料精密铸件已完成发动机试车。可以说,世界上的工业大国,如德国、日本、俄罗斯等国家的熔模精铸技术处于世界先进水平。

在国防工业的推动下,我国的熔模精铸技术从无到有,并形成了完整的铸造体系。国产的精铸器件已成功应用在飞机的发动机叶片、机匣、机翼中。中航工业下属有专门的精铸部门,基本能够满足我国航空发动机热端部件的生产需要。但是,国内熔模精铸生产线使用的关键设备仍依靠进口,且大部分为西方国家 20 世纪 80 年代产品。因此,我国熔模精铸技术落后西方大概 30 年。我国必须加强熔模精铸的源头建设,联合科研院所设计出长寿命、高可靠性的熔模精铸设备,这样才有希望打破西方对我国关键技术的垄断<sup>[32-33]</sup>。

## 2.2 超精密加工技术

超精密加工技术不特指一种加工方法,它是当前加工领域中所能达到的最高加工精度的各种精密加工方法的总称。超精密加工技术的发展得到了世界各国的重视,航空航天、高精度仪器仪表、惯导平台、光学等领域都离不开超精密加工,它影响到一个国家高精尖技术的发展<sup>[34]</sup>。

超精密加工技术与机载导弹的发展息息相关,必须依靠超精密加工技术才能生产出高精度的惯性陀螺、探测装置、光学器件等,这些关键器件最终决定着导弹的命中率。美国拥有 30 余家超精密加工研究机构,目前制造精度已经达到纳米级。美国的 IBM 公司利用超精密加工技术制造出了线宽为 0.5 $\mu\text{m}$  的集成电路,被应用在某巡航导弹的导引系统中,大幅提升了该型导弹的命中率;美国的劳伦斯利弗莫尔实验室研制了 LODTM 光学金刚石超精密机床,加工出的非球面红外光学零件粗糙度达到 3.5~9nm;另外,为验证爱因斯坦相对论的重力场扭曲和拖拽效应,美国制造的陀螺仪核心部件石英转子的真球度达到 7.6nm,其精度代表着现代超精密加工技术的巅峰。在日本,超精密加工技术属于高新技术产业,日本把该项技术成功用于民品制造,日本产的相

机、电视等受到全世界热捧。美国、日本、瑞士等国家代表着超精密加工技术的最高水平,这些国家的制造业也处于世界绝对领先地位。

发达国家对超精密加工技术是严格保密的,但是经过 30 多年的发展,我国在超精密加工技术领域取得了可喜成就。北京航空精密机械研究所研发的“Nanosys-300 非球面超精密复合加工系统”,打破了国外在非球面光学器件超精密加工的垄断。在 2013 年的国际超精密加工技术交流中,天津大学纳米制造技术团队的作品,得到了世界制造业的最高学术组织——国际生产工程科学院的认可,全球仅有两个小组的作品通过评测。但是,与制造强国相比,我国的超精密加工技术依然存在很大差距,必须加大对超精密加工设备研制的投入,这样才能保证超精密技术的快速发展,使我国进入世界制造强国之列<sup>[35-36]</sup>。

## 3 结束语

一般而言,机载导弹的发展推动着材料和工艺发展,而先进材料和工艺的应用又促进了机载导弹的技术进步。为实现机载导弹射程更远、速度更快、机动性更强等目标,在机载导弹的设计和制造过程中,本文叙述的先进材料和工艺有着广阔的应用前景。

机载导弹作为震慑敌方和夺取制空权的主要利器,先进的材料和工艺是机载导弹研发的基础。我国用于制造导弹的材料和工艺水平与发达国家相比还有很大差距,作为一个强国,必须拥有完整的先进材料和工艺体系作为支撑。材料和工艺技术能够反映一个国家的综合实力,在相关领域,我国必须从借鉴经验向自主创新转变,只有掌握核心技术才能实现强军富民之目标。

## 参 考 文 献

- [1] 杨鸿昌. 飞航导弹复合材料的应用概况、需求及发展前景[J]. 飞航导弹, 2000(4): 60-63.  
YANG Hongchang. Applications, requirements and development prospects of composite materials on aerodynamic missile[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2000(4): 60-63.
- [2] 苑世剑. 轻量化成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 1-10.  
YUAN Shijian. Lightweight forming technologies[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 1-10.
- [3] 益小苏, 杜善义, 张立同. 复合材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 30-40.  
YI Xiaosu, DU Shanyi, ZHANG Litong. Composite materials manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 30-40.
- [4] 刘萝威, 曹运红. 高温树脂基复合材料在超声速导弹弹体上的应用[J]. 宇航材料工艺, 2002(5): 12-19.  
LIU Luowei, CAO Yunhong. High-temperature resistant resin matrix composite applications to supersonic missile airframes[J]. Aerospace Materials & Technology, 2002(5): 12-19.

- [5] 程功,肖军,李建军. 树脂基复合材料在机载导弹领域的应用[J]. 航空制造技术, 2010(17): 86-88.
- CHENG Gong, XIAO Jun, LI Jianjun. Application of resin matrix composites on airborne missile[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(17): 86-88.
- [6] FACCIANO A. High temperature organic composite applications for supersonic missile airframes[J]. SAMPE Journal, 2000, 36(1): 9-23.
- [7] 邱惠中, 江辉. 国外巡航导弹用材料及工艺[J]. 宇航材料工艺, 1998(4): 9-14.
- QIU Huizhong, JIANG Hui. Materials and processing technology of foreign cruise missile[J]. Aerospace Materials & Technology, 1998(4): 9-14.
- [8] THOMAS L R. Fabrication of complex high-performance composite structures at low cost using VARTM[J]. SAMPE Journal, 2002, 47(2): 1317-1329.
- [9] 赵稼祥. 航天先进复合材料的现况与展望[J]. 飞航导弹, 2000(1): 58-63.
- ZHAO Jiayang. Development status and prospects of aerospace advanced composites[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2000(1): 58-63.
- [10] 吕一中, 崔岩, 曲敬信. 金属基复合材料在航空航天领域的应用[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2007, 6(3): 1-4.
- LÜ Yizhong, CUI Yan, QU Jingxin. Application of metal matrix composites to aerospace[J]. Journal of Beijing Polytechnic College, 2007,6(3):1-4.
- [11] 曹秀中, 韩秀全, 赵冰, 等. SiC 纤维增强钛基复合材料研究现状与展望[J]. 航空制造技术, 2014(22): 109-115.
- CAO Xiuzhong, HAN Xiuquan, ZHAO Bing, et al. Research and prospect of SiC fiber-reinforced titanium matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(22): 109-115.
- [12] 王波, 矫桂琼, 杨成鹏, 等. 陶瓷基复合材料力学行为研究进展[J]. 航空制造技术, 2014(6): 54-57.
- WANG Bo, JIAO Guiqiong, YANG Chengpeng, et al. Research progress of mechanical behaviors of ceramic matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(6): 54-57.
- [13] 顾昊, 刘元云, 吴秉横, 等. 高超音速导弹天线罩用陶瓷基材料的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(19): 230-242.
- GU Hao, LIU Yuanyun, WU Bingheng, et al. Research of ceramic-based materials for hypersonic missile radomes[J]. Materials Review, 2012, 26(19): 230-242.
- [14] 唐磊, 杜仕国. 轻量化材料技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 1-15.
- TANG Lei, DU Shiguo. Lightweight materials technologies[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 1-15.
- [15] 郎利辉, 刘宝胜, 曾元松. 钛合金板材成形技术及其在航空领域的应用[J]. 航空制造技术, 2009(10): 28-31.
- LANG Lihui, LIU Baosheng, ZENG Yuansong. Titanium alloy plate forming technology and its application in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(10): 28-31.
- [16] 蔡建明, 曹春晓. 新一代 600℃ 高温钛合金材料的合金设计及应用展望[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 27-36.
- CAI Jianming, CAO Chunxiao. Alloy design and application expectation of a new generation 600℃ high temperature titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 27-36.
- [17] 侯金健, 高强强, 安晓婷. 国内外高温钛合金研究及应用的最新发展[J]. 热加工工艺, 2014, 43(10): 11-15.
- HOU Jinjian, GAO Qiangqiang, AN Xiaoting. Latest development of domestic and international research of high-temperature titanium alloy and its application[J]. Hot Working Technology, 2014,43(10):11-15.
- [18] 王清江, 刘建荣, 杨锐. 高温钛合金的现状与前景[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 1-26.
- WANG Qingjiang, LIU Jianrong, YANG Rui. High temperature titanium alloys: status and perspective[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 1-26.
- [19] BANERJEE D, WILLIAMS J C. Perspectives on titanium science and technology[J]. Acta Materialia, 2013, 61:844-879.
- [20] 霍红庆, 郝维新, 耿桂宏, 等. 航天轻型结构材料——铝锂合金的发展[J]. 真空与低温, 2005, 11(2): 63-69.
- HUO Hongqing, HAO Weixin, GENG Guihong, et al. Development of the new aircraft material—aluminum-lithium alloy[J]. Vacuum and Cryogenics, 2005, 11(2): 63-69.
- [21] 徐海进, 杨吟飞, 李亮, 等. 铝锂合金高速铣削力的试验研究[J]. 航空制造技术, 2014(13): 83-90.
- XU Haijin, YANG Yinfei, LI Liang, et al. Experimental study of cutting forces in high speed milling of aluminum-lithium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(13): 83-90.
- [22] 孙中刚, 郭旋, 刘红兵, 等. 铝锂合金先进制造技术及其发展趋势[J]. 航空制造技术, 2012(5): 60-63.
- SUN Zhonggang, GUO Xuan, LIU Hongbing, et al. Development trend of advanced manufacturing technology for aluminum-lithium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(5): 60-63.
- [23] STARKE J E A, STALEY J T. Application of modern aluminum alloys to aircraft[J]. Progress in Aerospace Science, 1996, 32(2/3): 131-172.
- [24] 程晓宇, 王晓梅. 铝锂合金研究与发展[J]. 中国有色金属学报, 2008(12): 72-73.
- CHENG Xiaoyu, WANG Xiaomei. Research and development of Al-Li alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008(12): 72-73.
- [25] 张永刚, 韩雅芳, 陈国良, 等. 金属间化合物结构材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 625-630.
- ZHANG Yonggang, HAN Yafang, CHEN Guoliang, et al. Structural intermetallics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 625-630.
- [26] 彭超群, 黄白云, 贺跃辉. Ni-Al 系、Fe-Al 系和 Ti<sub>3</sub>Al 金属间化合物研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2001(6): 27-30.
- PENG Chaoqun, HUANG Boyun, HE Yuehui. Development of intermetallic compound in Ni-Al, Fe-Al and Ti<sub>3</sub>Al base system[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2001(6): 27-30.
- [27] 张建伟, 李世琼, 良晓波, 等. Ti<sub>3</sub>Al 和 Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金的研究与应用[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 336-341.
- ZHANG Jianwei, LI Shiqiong, LIANG Xiaobo, et al. Research and application of Ti<sub>3</sub>Al and Ti<sub>2</sub>AlNb based alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(1): 336-341.
- [28] 刘巧沐, 黄顺洲, 刘佳, 等. 高温材料研究进展及其在航空发动机上的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2014, 27(4): 51-55.
- LIU Qiaomu, HUANG Shunzhou, LIU Jia, et al. Progress and application of high temperature structural materials on aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2014, 27(4): 51-55.
- [29] 李志强, 郭和平. 超塑成形 / 扩散连接技术的应用进展和发展趋势[J]. 航空制造技术, 2010(8): 32-35.
- LI Zhiqiang, GUO Heping. Application progress and development tendency of superplastic forming/diffusion bonding technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(8): 32-35.
- [30] 李志强, 郭和平. 超塑成形 / 扩散连接技术在航空航天工业中的应用[J]. 锻压技术, 2005(1): 79-80.

(下转第 132 页)