

# 颗粒增强铝基复合材料研究与应用发展

樊建中 石力开

(北京有色金属研究总院, 国家有色金属复合材料工程技术研究中心, 北京 100088)

**文 摘** 简要分析了颗粒增强铝基复合材料的性能优势, 综述了国外颗粒增强铝基复合材料的制备技术、性能水平、工程化应用技术以及应用发展现状, 总结了国内工程化应用研究现状, 提出了铝基复合材料在航空航天领域的应用发展方向。

**关键词** 铝基复合材料, 性能, 应用, 航空航天

## Development and Application of Particulate Reinforced Aluminum Matrix Composites

Fan Jianzhong Shi Likai

(National Engineering & Technology Research Center for Non-Ferrous Metals Composites, Beijing General Research Institute for Non-Ferrous Metals, Beijing 100088)

**Abstract** The advantages of particulate reinforced aluminum matrix composites are briefly presented in this article, followed by a review of fabrication, properties, engineering processing and applications of particulate reinforced aluminum matrix composites in the developed countries. Then, development of aluminum matrix composites in China is summarized. Afterward, some new developing strategy upon aluminium matrix composites in aeronautics and aerospace application are also discussed.

**Key words** Aluminum matrix composites, Property, Application, Aeronautics and aerospace

### 0 引言

先进航空航天飞行器不断追求轻量化、高性能化、长寿命、高效能的发展目标带动牵引了轻质高强多功能颗粒增强铝基复合材料的持续发展<sup>[1-2]</sup>。提出的低密度、高比强度、高比模量、低膨胀、高导热、高可靠等优异的综合性能要求, 传统轻质材料已很难全面满足要求, 如铝合金模量低、线胀系数较大; 钛合金密度较大、热导率极低; 纤维增强树脂基复合材料在空间环境下使用易老化等, 这严重制约了新型飞行器的发展需求。颗粒增强铝基复合材料经过 30 多年的发展, 已在国际航空航天领域得到了规模应用<sup>[3-7]</sup>, 这充分验证了与铝合金、钛合金、纤维树脂基复合材料等传统材料相比具有的显著性能优势, 奠定了颗粒增强铝基复合材料在材料体系中的地位 and 竞争态势。

### 1 颗粒增强铝基复合材料性能优势

材料的比模量( $E/\rho$ )是航空航天结构轻量化设计的关键。高比模量材料可实现结构系统的轻质和刚度

稳定, 有效满足结构轻量化要求。材料的模量是决定零件或构件振动频率的重要因素, 并与材料的疲劳寿命直接相关。铝基复合材料的比模量 $[(3.5 \sim 4.0) \times 10^{10} \text{ m}^2/\text{s}^2]$ 远高于包括铝合金、钛合金、镁合金、镍基高温合金以及钢等传统结构材料 $[(2.5 \sim 3.2) \times 10^{10} \text{ m}^2/\text{s}^2]$ , 介于纤维树脂基复合材料纵向与横向性能之间(图 1<sup>[8]</sup>)。

高性能铝基复合材料是实现先进飞行器轻量化的理想材料。美国 DWA 公司研制的  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  结构复合材料规模应用于飞机、直升机等承力关键结构件就证实了这一点<sup>[9]</sup>。

航空航天有许多应用场合包括卫星与有效载荷的光机仪表结构件和功能件、导弹与卫星的导航系统等均要求材料同时具有抵抗机械载荷和热载荷产生变形的能力。机械变形抗力取决于材料的比模量、零件的形状和加载方式, 材料的比模量越大, 变形抗力越大。热变形抗力取决于材料的线胀系数  $\alpha$  和热导

率 $\lambda$ ,  $\alpha$  较小, 构件的变形小;  $\lambda$  较高, 构件的温度梯度小, 产生的热应力小; 因此,  $\lambda/\alpha$  值越大, 更有利于减小构件在热载荷作用下的变形。综合对比空天领域光机仪表结构与功能件上可能使用的各种金属、陶瓷及复合材料的  $E^{1/2}/\rho$  和  $\lambda/\alpha$  表明(图 2<sup>[8]</sup>), 铝基复合材料制造光机、仪表系统的结构件和功能件具有显著的优势。

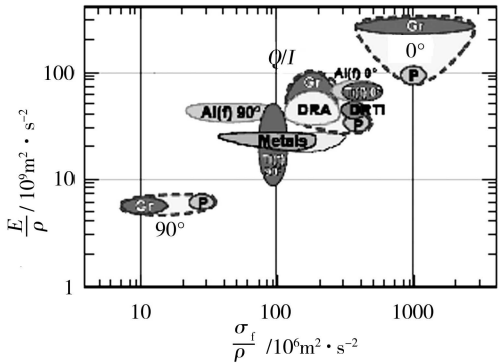


图 1 颗粒增强铝基复合材料(DRA)与传统金属合金、纤维增强铝基、钛基复合材料和纤维增强树脂基复合材料的比强度和比模量对比

Fig.1 Space stiffness vs specific strength for structural materials including DRA, conventional aerospace metals, fiber-reinforced Al[Al(f)] and Ti[Ti(f)] and aerospace organic matrix composites are shown

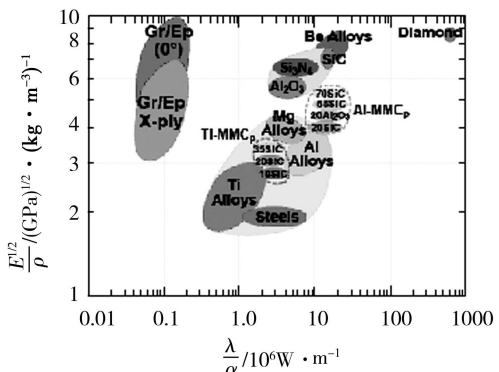


图 2 铝基复合材料(Al-MMC<sub>p</sub>)与铝、钛、镁、铍、钢等合金, 氧化铝、氮化硅、碳化硅、金刚石等陶瓷以及颗粒增强钛基复合材料和纤维树脂基复合材料的  $E^{1/2}/\rho$  和  $\lambda/\alpha$  的比较

Fig.2 Materials selection chart for resistance to mechanical (vertical axis) and thermal(horizontal axis) distortions required for precision devices

应用于空间飞行器通讯微波装置、雷达仪器板、高功率密度微处理器基板等器件的热管理材料不仅要求材料高导热、低膨胀, 而且要求材料的密度小, 图 3 比较了铝基复合材料与传统热管理材料的性能<sup>[8]</sup>, 可以看出, 铝基复合材料克服了 Kovar 合金的高密度和导热性能差、铝合金的线胀系数高、Be/BeO 的毒性等常用热管理材料应用于空间环境的性能不足, 自身表现出显著的综合性能优势, 并已在航空航天领域得到规模应用。

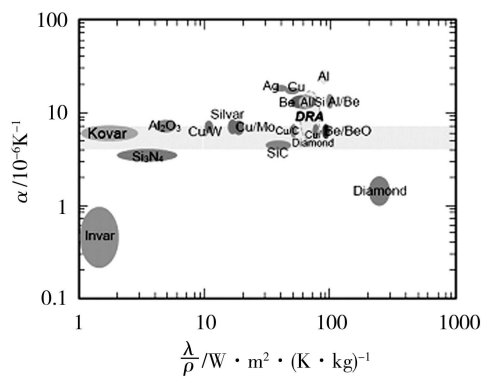


图 3 DRA 与传统的热管理材料的性能比较  
Fig.3 Materials selection chart for thermal management applications

颗粒增强铝基复合材料, 作为主要金属基复合材料之一, 创新性展现了材料性能的可设计性和性能优势, 克服了单一材料性能调整的局限性, 实现了满足工程应用的性能延伸, 对材料科学发展和满足工程领域的应用需求具有重要的意义。

## 2 颗粒增强铝基复合材料的制备

复合制备技术是颗粒增强铝基复合材料获得良好复合效应, 发挥基体与增强体各自性能优势, 实现复合材料高性能化的关键。国际上围绕影响复合质量的增强体颗粒与基体之间界面结合、颗粒分布均匀性以及组织与缺陷的控制等关键共性课题开展了大量系统的复合制备技术专门研究, 形成了以制备高性能复合材料的粉末冶金法、低成本的搅拌铸造法、高体分复合材料的浸渗法为代表的性能可控、强化作用显著的复合制备方法, 并在工业上根据使用需求得到了不同程度的应用, 发展主要制备方法的公司及相应的材料性能如表 1 所示。

在粉末冶金方法方面具有代表性的如英国 Aerospace Metal Composites Limited (AMC) 采用机械合金化粉末冶金方法研制出了高强度高塑性的 25% SiC<sub>p</sub>/2124 复合材料<sup>[10]</sup>; 美国 DWA Aluminium composites 采用粉末冶金法研制高强度高韧性的 15% SiC<sub>p</sub>/2009 和 25% SiC<sub>p</sub>/6092 复合材料。在搅拌铸造方面具有代表性的如美国 Alcan 公司研制的 20% SiC<sub>p</sub>/A359 和 20% Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub>/6061 复合材料; 近期, 美国 MC-21 公司发明了可制备颗粒含量为 20% ~ 40% 复合材料的搅拌铸造低成本化技术, 有力的推动了低成本复合材料的发展。在压力浸渗方面, 如美国的 Advanced Refractory Technologies, Inc. 公司研制的 20% SiC<sub>w</sub>/A356 复合材料; 美国的 Ceramics Process Systems (CPS) 研制的 54% SiC<sub>p</sub>/A356.2、63% SiC<sub>p</sub>/A356.2、67% SiC<sub>p</sub>/A356.2 等高体积分数复合材料。在无压浸渗方面, 美国的 Ixion Thermal Materials 公司和 M-Cubed Technologies, Inc. 分别研制了 70% SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料<sup>[3]</sup>。

表 1 颗粒增强铝基复合材料主要制备技术、代表性公司及相应的材料性能

Tab.1 Processing technology for particulate reinforced aluminium matrix composites, together with representative corporation and properties of their composites

制备技术及代表公司	复合材料产品	性能			
		$E$ /GPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%
机械合金化/粉末冶金(英国 AMC)	25%SiC <sub>p</sub> /2124	115	480	700	5
粉末冶金 (美国 DWA)	15%SiC <sub>p</sub> /2009-T4 25%SiC <sub>p</sub> /6092-T6	96 115	370 420	550 520	7 5
搅拌铸造 (美国 Alcan)	20%SiC <sub>p</sub> /A359-T6 20%Al <sub>2</sub> O <sub>3p</sub> /6061-T6	98 97	339 350	359 370	0.4 4
压力浸渗(美国 Advanced Refractory Technologies)	20%SiC <sub>w</sub> /A356	96	193	380	-
压力浸渗 (美国 CPS 公司)	54%SiC <sub>p</sub> /A356.2 63%SiC <sub>p</sub> /A356.2	167 192	427 <sup>1)</sup> 430 <sup>1)</sup>	450 <sup>1)</sup> 550 <sup>1)</sup>	- -
无压浸渗 (美国 M-Cubed Technologies, Inc)	70%SiC <sub>p</sub> /Al-Mg-Si	270	-	230	-

注:1)材料弯曲性能。

### 3 颗粒增强铝基复合材料微观组织

颗粒增强铝基复合材料的微观组织呈现多样性特征,主要组分铝合金基体和增强体颗粒,基体与增强体颗粒之间的界面以及由于基体与增强体线胀系数差产生的界面残余应力等相互交织在一起,铝合金基体、颗粒增强体、界面三者的强度匹配性、变形协调性以及损伤机制会严重影响复合材料的强韧化和断裂机制,材料中的残余应力存在又会进一步加剧上述规律的复杂性,所以,复合材料强化机制仅停留在以载荷传递机制为主的定性认识阶段,没有达到对性能量化计算与预测。

复合材料界面的形成与作用是颗粒增强铝基复合材料研究的核心。大量文献报道了界面的微观组织结构、结合状态,与制备工艺相关的界面形成机理,以及与性能相关的界面的作用机制等研究成果,确定了复合过程可控、对性能有益的界面类型,对界面的掌握程度可以定性解释清楚复合材料设计、制备以及与性能之间的关系。

### 4 颗粒增强铝基复合材料工程化制备与应用技术

20 世纪 80 年代,颗粒增强铝基复合材料逐渐进入了应用研究阶段。以美欧为代表的发达国家初步完成了颗粒增强铝基复合材料的工程化制备技术及应用工艺研究,根据应用场合的不同要求,形成了四种主要的复合材料工程化制备技术,见表 2。

其中,粉末冶金法生产的具有高强度和良好韧性宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012 年 第 1 期

的复合材料主承力结构件或结构-功能件已规模应用于航空航天领域,典型代表是美国 DWA 公司生产的坯锭最大质量已达到 450 kg,年生产能力达到 100 t;无压浸渗法制备的高体分复合材料主要应用于封装器件;搅拌铸造和压力浸渗法制备的复合材料通常应用于汽车等交通运输工具的耐磨零部件,其中,MC-21 公司采用搅拌铸造法制备的坯锭最大质量达 600 kg。

表 2 四种主要颗粒增强铝基复合材料工程化制备技术的特点与应用情况

Tab.2 Development of four kinds of processing technology for particulate reinforced aluminium matrix composites

制备技术	材料性能特点	应用场合	典型公司
粉末冶金	高模量、高强度;良好塑韧性( $\geq 5\%$ );良好导热性;适中的线胀系数	航空航天结构件;直升机旋翼连接件;飞机腹鳍、导流叶片;支撑结构件、支架	美国 DWA 公司;英国 AMC 公司
搅拌铸造	高模量;强度与塑性较差;良好导热性;成本较低	汽车刹车盘、活塞、活塞环、连杆;高速列车刹车盘	美国 Alcan 公司;美国 MC-21 公司
压力浸渗	高模量;低膨胀;高导热	汽车刹车类零件	日本公司
无压浸渗	高模量;低膨胀;高导热	封装材料	Lanxide 公司

在工程化应用技术方面,相继解决了包括热挤压、锻造、轧制、焊接、热处理、超高精密机加工、无损探伤和试验检测等一系列工艺技术,如,英国 Adtek International Ltd 和法国 Creuzet Aeronautique 完成复合材料模锻、热挤压与轧制工艺研究;法国 Forges de Bologne 开展大尺寸、复杂形状 15%SiC<sub>p</sub>/2009Al 复合材料锻件精密等温锻造工艺研究,生产直升机复合材料旋翼连接件、动环与不动环、导弹用零部件。美国 Laser Machining, In. c 从事复合材料的激光切割加工;美国 Pre-corp, Inc. 研制适合加工颗粒增强铝基复合材料的多晶金刚石刀具;美国 Sp3 从事复合材料机械加工研究,采用的刀具表面用 CVD 技术沉积金刚石膜;美国 Al-lumi Plate, Inc. 开展复合材料表面化学镀和阳极化处理研究。由美国 Daimler Chrysler、Dana、Dow、Eck Industries、Ford、General Motors、Mack Trucks 组成的汽车联盟和 MC-21、Metal Matrix Cast Composites、Oak Ridge National Lab、Pacific Northwest National Lab、Rockwell Scientific 等复合材料研究机构联合攻关地面交通用轻质、低成本的金属基复合材料构件技术,开发出了新一代低成本快速复合技术,把搅拌铸造 20%SiC<sub>p</sub>/359Al 复合材料的成本从 1.8~2.4 美元/磅降低了 50%,同时开展了汽车零件重力铸造、金属模铸造、离心铸造等

近终成形铸造技术。美国的 AC Propulsion, Inc. 采用 Duralcan 复合材料坯锭研制了高性能电动汽车的铸造刹车盘<sup>[3]</sup>。

## 5 颗粒增强铝基复合材料的应用<sup>[11]</sup>

### 5.1 在航空领域

美国 Bell Helicopter Textron, Inc. 与 Boeing 合作, 采用 40% SiC<sub>p</sub>/A206 复合材料生产 V-22 直升机的液压导管(多向接头), 美国 Boeing Military Aircraft and Missile Systems 采用 DWA 公司 15.5% SiC<sub>p</sub>/2009 复合材料生产美国海军 F/A-18-E/F 飞机落地起落架的液压部件, 采用 40% SiC<sub>p</sub>/A206 复合材料生产 AC-130Ugunship 的弹药支架, 采用 DWA 公司 17.5% SiC<sub>p</sub>/6092 复合材料坯锭经热挤压生产 Boeing777 Pratt and Whitney 4000 系列发动机导流叶片(长 610mm、宽 140~190 mm), 替代树脂基复合材料, 服役寿命提高 300%, 降低了维护成本。法国 Eurocopter European Aerospace Defence and Space company 采用 DWA 公司提供的 15% SiC<sub>p</sub>/2009 复合材料经 Forges de Bologne 等温锻造精密成型, 应用于 Dauphin AS365 N4 和 Colibri EC 120 直升机旋翼连接件和 NH90 的动环与不动环, 颗粒增强铝基复合材料应用于旋翼连接件是其首次在航空一级运动零件上使用, 实现单架直升机减重 14 kg。美国 Lockheed Martin Aeronautics Company 采用 DWA 公司 17.5% SiC<sub>p</sub>/6092 复合材料坯锭经热轧生产 F-16 上的腹鳍和加油盖。另外, 目前正在围绕飞机各类结构件(如后机身上翼片与上蒙皮, 型材、框架与隔板、机身大梁、机身龙骨、加强筋、垂直尾翼方向舵)或发动机定子、风扇箱(壳)等开展应用研究。

### 5.2 在航天方面

颗粒增强铝基复合材料在火箭、导弹和卫星等航天器上应用, 受保密限制的影响, 直接公开报道较少, 多数报道停留在试制应用与演示验证研究阶段。英国 the Defence Evaluation Research Agency (DERA) 和 Matra Bae Dynamics UK Ltd 在英国国防部的支持下, 联合开展了导弹弹翼用耐短时高温颗粒增强铝基复合材料的研究与评价, 目标是开发出导弹用轻质耐热铝基复合材料结构件; 采用颗粒增强铝基复合材料替代 40% C<sub>f</sub>/6061Al 复合材料用于哈勃望远镜天线展开机构支撑杆; 作为结构材料或结构-功能一体化材料, 颗粒增强铝基复合材料在卫星有效载荷光学反射镜镜坯及支撑杆等部件上取得了应用。美国亚利桑那州立大学光学中心在 20 世纪 80 年代末采用铝基复合材料研制出了直径为 0.3 m 的超轻质空间光学望远镜系统, 其主要零部件包括主、次镜支撑件, 连接主、次镜的桁架和支杆以及次镜坯, 整套光学仪器的质量仅为 4.5 kg<sup>[12]</sup>。目前已公开报道的正在开展的应用研究包括卫星的管配件、粘接式蜂窝结构板、缸体、可展开结构

件, 机械系统万向支架、铰链, 卫星结构分系统支架、支撑件、惯导壳体、光机分系统, 液体火箭推进系统低温泵、管道、波纹管、阀、法兰盘、电源壳体, AIM-120, AMRAAM 导弹翼片限制器、导向叶片、翼片, AIM-9X 导弹翼片、叶片、导引头锥等。颗粒增强铝基复合材料在航空航天及军工领域的规模应用, 有力的推进了铝基复合材料的实用化进程, 据 1999 年欧洲 BCC 组织不完全统计表明, 金属基复合材料的用量达 2 500 t 中, 在航空航天及军工领域用量达到 137 t, 其中仅在美国采用粉末冶金法制备的、应用于航空航天领域的颗粒增强铝基复合材料质量达 50 t。

### 5.3 在核能领域

先进国家的核反应堆采用 DWA Technologies, Inc. 生产的 BORTEC<sup>®</sup> B<sub>4</sub>C<sub>p</sub>/Al 复合材料和 Ceradyne, Inc. 生产的 BORAL<sup>®</sup> B<sub>4</sub>C<sub>p</sub>/Al 复合材料制造核废料处理容器。其中, BORTEC<sup>®</sup> B<sub>4</sub>C<sub>p</sub>/Al 复合材料的组成为 10%~35% B<sub>4</sub>C<sub>p</sub>/1100(6061 或 6090), 板材尺寸规格为 4 450 mm × (225~890) mm × (1.3~25) mm, 退火态抗拉强度为 103~172 MPa, 伸长率为 0.5%~8%<sup>[9]</sup>。

### 5.4 在电子领域

美国 Motorola, Inc Semiconductor Products Sector 采用 dmc2 Electronic Components 公司的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料应用于卫星电子基片、散热基片, PCC, Ceramics Process Systems, LEC 等多家公司研制生产封装、导热材料, 应用量较大。

### 5.5 在交通运输领域

Knorr Bremse AG 采用 Duralcan 生产的 20% SiC<sub>p</sub>/AlSi<sub>7</sub>Mg 复合材料研制了高速列车刹车盘用于德国 ICE-2 高铁, 每个单元减重 500 kg。Kolbenschmidt 采用铸造法研制了 20%~30% SiC<sub>p</sub>/Al-Si 复合材料汽车刹车盘用于 Volkswagen Lupo-3L TDI, 类似的刹车盘也用于 Toyota RAV-4EV 汽车、Plymouth prowler、Ford prodigy、Lotus Elise 等。日本 Toyota Motor Corporation 制造 2ZZ-GE 发动机活塞、活塞环、刹车盘。Toyota Altezza 采用粉末冶金法研制生产了 TiB<sub>2</sub>/Ti 复合材料排气阀门, 替代 21-4N 钢。颗粒增强铝基复合材料的高成本限制了其在交通运输领域的大规模生产和应用。

值得一提的是, 美国 DWA 公司作为世界上主要从事颗粒增强铝基复合材料研究与应用开发的单位之一, 对推动复合材料的发展起到了重要的作用。DWA 公司一直致力于粉末冶金技术制备颗粒增强铝基复合材料的研究, 研制出了性能优异的系列复合材料, 包括 5% SiC<sub>p</sub>/2009Al、15% SiC<sub>p</sub>/2009Al、25% SiC<sub>p</sub>/2009Al、17.5% SiC<sub>p</sub>/6092Al、25% SiC<sub>p</sub>/6092Al、40% SiC<sub>p</sub>/6092Al、15% SiC<sub>p</sub>/7xxxAl(表 3), 广泛应用于航空航

天、核能、交通等领域的关键零部件。

从 1996 年开始,分别生产了 17.5% SiC<sub>p</sub>/6092Al 复合材料导流叶片、腹鳍 5 万片和 1 700 片以上;从 1997 年开始至今,生产直升机旋翼连接件 3 000 个以

上;从 2002 年开始至今生产了 100 个以上直升机旋翼系统用动环和不动环。DWA 公司累计生产颗粒增强铝基复合材料 250 t 以上<sup>[9]</sup>。

表 3 DWA 研制的典型 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的力学性能<sup>[9]</sup>  
Tab.3 Mechanical properties of SiC<sub>p</sub>/Al composites by DWA

批次编号	取样方向	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	$\sigma_m$ /MPa	$\delta$ /%	$E$ /GPa
15% SiC <sub>p</sub> /2009Al-T4					
闭式模锻件 15QS4644	<i>L</i>	370.2	541.4	9.9	90.5
		359.0	542.2	10.1	92.1
闭式模锻件 15QS4545	<i>L</i>	379.2	552.6	10.0	95.6
		355.1	534.2	8.4	93.9
闭式模锻件 15QS4658	<i>L</i>	362.3	527.4	8.3	92.8
		355.0	544.2	9.4	95.7
平均值	<i>L</i>	363.5	540.3	9.4	93.4
标准偏差		9.550	8.660	0.81	2.03
最小值		355.0	527.4	8.3	90.5
最大值		379.2	552.6	10.1	95.7
闭式模锻件 15QS4644	<i>LT</i>	369.1	534.3	9.2	91.0
		369.2	537.4	9.3	92.0
闭式模锻件 15QS4545	<i>LT</i>	363.3	531.0	9.8	89.0
		372.2	537.2	9.0	91.7
闭式模锻件 15QS4658	<i>LT</i>	363.9	533.7	10.6	88.9
		371.5	538.0	8.5	91.6
平均值	<i>LT</i>	368.2	535.3	9.4	90.7
标准偏差		3.77	2.73	0.72	1.40
最小值		363.3	531.0	8.5	88.9
最大值		372.2	538.0	10.6	92.0
断裂韧度 $K_{Ic}$ :29 ~ 32 MPa·m <sup>1/2</sup> ; 旋转弯曲疲劳 ( $R=-1, 1 \times 10^7$ ):250 MPa					
25% SiC <sub>p</sub> /2009Al-T4					
(14 :1 挤压 棒材+模锻)	<i>T</i>	427	586	1.8	117
	<i>L</i>	448	662	2.4	121
旋转弯曲疲劳 ( $R=-1, 1 \times 10^7$ ):300 MPa					
25% SiC <sub>p</sub> /6092Al-T6 (Φ18.8 mm 挤压棒材)					
平均值	<i>L</i>	422.91	518.11	5.16	121.09
标准偏差		12.56	12.09	1.02	3.94
最小值		400.17	496.35	2.52	112.87
最大值		442.71	537.79	6.20	130.79
平均值	<i>LT</i>	400.08	483.05	4.17	114.16
标准偏差		12.35	12.12	1.24	5.09
最小值		383.90	453.47	1.29	104.87
最大值		424.10	504.49	5.86	127.76
17.5% SiC <sub>p</sub> /6092Al-T6 (Φ20.8 mm 挤压棒材)					
平均值	<i>L</i>	390.33	463.57	7.25	108.55
标准偏差		9.96	5.55	1.90	8.09
最小值		363.56	455.40	3.30	103.28
最大值		411.89	475.26	9.35	142.72



颗粒增强铝基复合材料经过多年的研究与发展,制备技术已相对成熟,性能优势突出,应用广泛,已逐渐成为高技术领域无法替代的主体材料。面对未来高技术领域的更高要求以及各种新材料的取代性竞争,颗粒增强铝基复合材料仍需要不断的提高和发展,面临的创新性研究工作包括:(1)降低成本。针对复合材料坯锭和零部件加工成本高,开展复合材料低成本化技术研究,包括选用低成本的增强体;选择低成本的复合制备工艺;开发零件近净成形工艺;研究高效精密机加工工艺、焊接工艺;发展功能梯度复合材料;(2)提升材料综合性能。通过研究微观组织结构与性能之间的关系、提高颗粒与基体之间的界面结合、调控颗粒粒度、优化二次加工技术等措施,进一步提高复合材料的强度、耐磨性、耐高温性能、塑性、疲劳性能等;(3)扩大复合材料应用。

## 6 颗粒增强铝基复合材料国内研究现状

我国对金属基复合材料的研究和发展非常重视。

表4 粉末冶金法制备的典型颗粒增强铝基复合材料的性能<sup>1)</sup>

Tab.4 Properties of particulate reinforced aluminium matrix composites by powder metallurgy

复合材料	技术指标										
	$E/GPa$	$\sigma_b/MPa$	$\sigma_{0.2}/MPa$	$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	$\lambda/W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	$\delta/\%$	$\psi/\%$	$\alpha_k/kJ \cdot m^{-2}$	$K_{1C}/MPa \cdot m^{1/2}$	$\sigma_{-1}(10^7)/MPa$	
15% SiC <sub>p</sub> /2009Al	97	530	365	17.5	210	8	10	-	25	250	
20% SiC <sub>p</sub> /2009Al	105	570	385	15.9	150	5	7	200	-	-	
25% SiC <sub>p</sub> /2009Al	112	600	410	14.6	130	5	6	130	-	-	

注:1)材料状态为挤压棒材+T4。

在工程化技术开发方面,国内围绕应用需求开展了较为系统全面的应用工艺研究,形成了从几十千克到几百千克的大尺寸复合材料坯锭的制备技术(图4);掌握了热挤压、热轧制、自由锻、等温锻造等各种塑性变形工艺技术,可以研制出满足不同用户需求的棒材、管材、带材、板材、环件、大尺寸复杂形状的精密锻件(图5);突破了1000mm级别的大尺寸、复杂构件的超高精密(仪表级)加工技术以及固溶强化和尺寸稳定化热处理工艺技术(图6);掌握了复合材料表面超发黑阳极氧化技术和表面镀膜技术;形成了颗粒增强铝基复合材料坯锭、锻件的超声波无损检测与质量稳定性控制工艺技术。这些关键工艺技术的形成与掌握为推动颗粒增强铝基复合材料的实用化发展提供了较完整的技术支撑。在应用研究方面,在国家“863”计划的支持下,九五末期,研制的SiC<sub>w</sub>/Al管件已用于某卫星天线丝杠, SiC<sub>p</sub>/Al复合材料精铸件(镜身、镜盒、支撑轮)用于某卫星遥感器定标装置。

近年来,随着我国航空航天、电子、核能、交通运输以及国防军工等高技术领域的快速发展,对轻质高强多功能材料提出了迫切需求,这为具有轻质高强多功能性能优势的颗粒增强铝基复合材料提供了广阔的发展机遇。围绕航空航天用大尺寸关键承力结构件、光机结构件与精密仪表零件、电子封装器件、核能

70年代末80年代初国内的许多大学和研究单位都开始了金属基复合材料的研究工作。从1987年开始,国家“863”计划将金属基复合材料作为新材料的一个重点予以支持,协调安排了国内金属基复合材料的研究开发工作,使我国金属基复合材料的研究水平有了很大提高。在颗粒增强铝基复合材料的制备技术、组织性能、应用研究等方面的研究工作取得了突破性进展。

国内以SiC<sub>p</sub>/Al复合材料体系为主,围绕界面与组织控制、颗粒分布均匀性等关键问题,开发了粉末冶金、搅拌铸造、压力浸渗和无压浸渗等制备方法,制备的复合材料性能达到了国际先进水平。其中,采用粉末冶金技术制备的高强高韧颗粒增强铝基复合材料显著的综合性能优势使其成为替代铝合金、钛合金以及树脂基复合材料,满足航空航天飞行器轻量化、高性能化需求的关键材料,具体性能见表4所示。

领域屏蔽材料等应用背景,开展了系统深入的应用研究,部分研究成果达到了国际先进水平。



图4 采用粉末冶金技术制备的150kg复合材料坯锭

Fig.4 150 kg SiC<sub>p</sub>/Al composites billet by PM



图5 经塑性变形后Φ850mm×75mm大尺寸复合材料锻件

Fig.5 Φ850mm×75mm SiC<sub>p</sub>/Al composites forgings

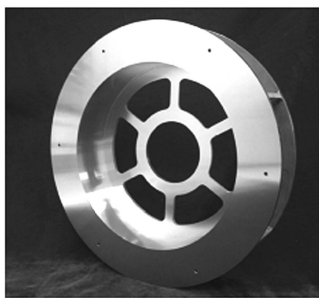


图6  $\Phi 400$  mm 复合材料精密零件

Fig. 6  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composites parts 400 mm in diameter

## 7 研究展望

在“十一五”期间,围绕颗粒增强铝基复合材料的应用技术,从材料性能、坯锭制备能力、构件塑性变形、零件精密加工到应用试验等颗粒增强铝基复合材料大尺寸复杂结构件研制全流程取得了重大突破,解决了有无问题,但距离工程化应用仍然存在成本高、制造效率低、可靠性与稳定性有待提高等新材料实用化过程中面临的共性问题,为此,“十二五”期间,需要攻关大尺寸、复杂形状颗粒增强铝基复合材料结构件低成本、高效率制备技术,突破构件的近终成型;大尺寸颗粒增强铝基复合材料及结构件的可靠性控制技术;大尺寸、复杂形状颗粒增强铝基复合材料结构件高效精密制造技术,实现多项典型应用,把颗粒增强铝基复合材料发展成为一种航空航天领域用主体材料。

### 参考文献

[1] 李成功,傅恒志,于翹. 航空航天材料[M]. 北京:

国防工业出版社, 2002: 7

[2] Geiger A L, Walker J A. The processing and properties of discontinuously reinforced aluminum composites [J]. JOM, 1991(8):8-15

[3] Alexander E, Christopher S M, Andreas M. Metal Matrix Composites in Industry: An Introduction and a Survey [M]. Kluwer Academic Publishers, 2003: 375-385

[4] Maruyama B, Hunt W H. Discontinuously reinforced aluminum: current status and future direction [J]. JOM, 1999(11):59-61

[5] Jerome P. Commercial success for MMCs [J]. Powder Metallurgy, 1998, 41(1):25-26

[6] AMC. Leading edge MMCs and powder materials [J]. Powder Metallurgy, 1997, 40(2):102-103

[7] Hunt W H, Herling D R. Aluminium metal matrix composites [J]. Advanced Materials & Processes, 2004(2):39-42

[8] Pan dey A B, Kendig K L, Watson T J. Affordable Metal-Matrix Composites for High Performance Applications [M]. A Publication of TMS, 2001:1-22

[9] <http://www.dwa-dra.com>

[10] <http://www.amc-mmc.co.uk>

[11] Alexander E, Christopher S M, Andreas M. Metal Matrix Composites in Industry: An Introduction and a Survey [M]. Kluwer Academic Publishers, 2003

[12] Mohn W R, Vukobratovich D. Recent applications of metal matrix composites in precision instruments and optical systems [J]. J. Mater. Eng., 1988, 10:225-235

(编辑 李洪泉)

## 多功能结构复合材料集成技术

由航天材料及工艺研究所、北京宇航系统工程研究所和中国运载火箭技术研究院研发中心共同完成的“多功能结构复合材料集成技术”项目,于2011年10月27日顺利通过了中国航天科技集团公司组织的成果鉴定。鉴定委员会一致认为该项目整体技术已达到国内领先、国际先进水平。

该项目首次设计出了具有多项功能的复合材料,实现了多项功能技术的高效集成,使结构减重达到35%。同时发展了结构功能一体化复合材料整体共固化成型技术,有效提高了结构性能和制造效率。

该项目成果已在多个型号研制上得到应用,取得了显著的经济和社会效益,有效地解决了我国在高效复合材料集成技术应用的问题,使我国高效复合材料集成化技术应用水平和自主创新能力得到了提升。

· 罗焱 ·