

铝基复合材料国内外技术水平及应用状况

Domestic and Foreign Technical Level and Application Condition of Aluminum Matrix Composites

中国船舶重工集团公司 张文毓

[摘要] 铝基复合材料相对于传统基体合金具有高的比强度、比刚度和优良的高温力学性能、低的热膨胀系数、优良的耐磨性,在航空、航天、汽车、电子和交通运输工业具有十分广阔的应用前景。综述了铝基复合材料种类和制备方法、铝基复合材料国内外技术发展水平、铝基复合材料应用领域分析几方面,希望读者对铝基复合材料国内外技术水平及应用状况有所了解。

关键词: 铝基复合材料 制备方法 国内外技术水平 应用状况

[ABSTRACT] The aluminum matrix composites have the high specific tenacity, the rigidity and the fine high temperature mechanics performance, the low thermal-expansion coefficient, the fine resistance to wear compared to the traditional substrate alloy, has the extremely broad application prospect in aviation, astronautics, automobile, electronic and the transportation industry. The aluminum matrix composites type and the preparation method, the aluminum matrix composites domestic and foreign technical development level, the aluminum matrix composites application analysis are summarized, which can help readers to understand aluminum matrix composites domestic and foreign technical level and the application condition.

Keywords: Aluminum matrix composites Preparation method Domestic and foreign technical level Application condition

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.03.082

1 铝基复合材料种类和制备方法

按照不同的增强体,铝基复合材料分为纤维增强和颗粒(直径在 0.5~100 μm 之间的等轴晶粒)增强、晶须增强铝基复合材料。常用的增强颗粒主要包括 SiC、Si₃N₄、Al₂O₃、TiC、TiB₂、AlN、B₄C 以及石墨颗粒或者金属颗粒等。

常见的几种铝基复合材料的制备工艺有粉末冶金法、压力浸渗工艺、反应自生成法、高能高速固结工艺、半固态搅拌复合制造、喷射沉积法、搅拌摩擦加工法及球磨法制备纳米碳管增强铝基复合材料等。TiB₂/Al 复合材料的制备方法较多,主要有喷射沉积法、LSM、

XDTM、挤压铸造、接触反应法、自蔓延高温合成法和反应机械合金化及粉末冶金法等。常见的几种铝基复合材料的制备工艺,如表 1 所示^[1]。

表1 常用的铝基复合材料制备工艺

制备方法	适用增强材料的类型	典型铝基复合材料
扩散结合	连续纤维	B _f /Al; C _f /Al
粉末冶金	连续、短纤维、颗粒、晶须	SiC _f /Al; SiC _w /Al; SiC _p /Al
压铸	连续、短纤维、颗粒、晶须	Al ₂ O ₃ f/Al; SiC _w /Al; SiC _p /Al; Cr/Al
半固态复合铸造	颗粒	SiC _p /Al; Al ₂ O _{3p} /Al
喷射沉积	颗粒	SiC _p /Al
原位复合	连续、晶须	TiC _f /Al

2 铝基复合材料国内外技术发展水平

2.1 国外铝基复合材料技术发展水平

铝基复合材料的研究开始于 20 世纪 50 年代,近 20 年来无论从理论上还是技术上都取得了较大进步。各国在研发上都投入了大量的人力物力,它是金属基复合材料中被研究最多和最主要的复合材料。目前开发的铝基复合材料主要有 SiC/Al、B/Al、BC/Al、Al₂O₃/Al 等,其中, B/Al 复合材料发展最快,目前美国能制造 2m 以上的各种 B/Al 型材、管材等,这些材料用于航空器上,可使质量减轻 20%。铝基复合材料已经广泛用于制造歼灭机、直升机等大飞机的机翼、方向舵、襟翼、机身及蒙皮等部件。美国麦道公司在 F-15 战斗机上使用 1.8~2.25t 纤维增强铝基复合材料(FRM),使战斗机质量减轻 2%。前苏联航空材料研究所把硼纤维增强铝基复合材料用于安-28、安-72 型飞机机体结构上,在提高可靠性的同时,零件质量减轻 25%~40%。但长期以来,由于铝基复合材料还存在着制备工艺复杂,对环境和设备要求严格,成本很高等缺点,因此,其应用还不普遍。

最早采用粉末冶金生产颗粒增强铝基复合材料的厂家主要有 3 大公司:美国的 DWA Aluminum Composite、Alyn 公司和英国的 Aerospace Metal

Composites (AMC)公司。这些公司已经具备规模生产能力和丰富的产品规格。DWA 铝基复合材料公司的主要产品为以 6092、2009 和 6063 为基体, SiC 颗粒为增强体的复合材料。6092/SiC 为其最早的产品系列, 主要有板材和挤压型材^[2]。

最早的航空应用实例是 20 世纪 80 年代美国洛克希德·马丁公司将 25% SiCP/6061A1 复合材料用以制作承放仪器的支架, 其比刚度较 7075 铝合金高 65%。20 世纪 90 年代末, 碳化硅颗粒增强铝基复合材料在大型客机上获得大量应用。普惠公司从 PW4084 发动机开始, 采用 DWA 公司生产的挤压态碳化硅颗粒增强变形铝合金基复合材料(6092/SiC/17.5p-T6)制作风扇出口导流叶片, 用于采用 PW4000 系列发动机的波音 777 客机上。

颗粒增强铝基复合材料耐冲击能力比树脂基复合材料强, 抗冲蚀能力是树脂基复合材料的 7 倍, 且容易发现各种损伤, 并使成本下降 1/3 以上。

日本丰田公司首次成功地用 Al_2O_3/Al 复合材料制备发动机的活塞, 重量减轻了 5%~10%, 导热性提高 4 倍左右。连杆是汽车发动机中第 2 个成功地应用金属基复合材料的零部件。日本 Mazda 公司制造的 Al_2O_3/Al 合金复合材料连杆, 比钢质连杆轻 35%, 抗拉强度和疲劳强度高, 分别为 560MPa 和 392MPa; 而且线性膨胀系数小^[3]。

2.2 国内铝基复合材料技术发展水平

我国较全面地开展了铝基复合材料方面的研究工作, 包括纤维增强、颗粒增强、层压复合、喷射沉积和原位生成等方面的研究, 取得了进展, 正走向实用。在国内, 采用压力铸造高含量 SiCp/Al 复合材料制作基座替代 W-Cu 基座、封装微波功率器件, 有望在封装领域大量替代 W-Cu、Mo-Cu 等材料。

在强化机制与制备加工研究基础上, 铝基复合材料的研制水平逐渐成熟。举例来说, 我国 20 世纪 90 年代以前的铝基复合材料塑韧性与成型加工一直没有获得突破, 因此应用受到局限。通过多年研究积累, “十五”期间我国在铝基复合材料性能与研制能力方面获得重要突破, 尽管落后于国外, 但几种典型铝基复合材料(如 SiC/Al, Al_2O_3/Al)正逐渐获得航空航天、交通运输及电子仪表等领域的认可。今后, 随着研究水平稳步提高以及新型复合材料的研发, 铝基复合材料将有望在许多领域得到应用。

近年来, 一种具有高强度、超强耐磨、抗腐蚀性能好, 可以广泛用于航空航天制造和汽车机械业的新材料——颗粒增强 SiCp 铝基复合材料, 在中铝山东分公司研发成功。这种新型铝基复合材料其密度仅为钢

的 1/3, 但比强度比纯铝和中碳钢都高, 具有极强的耐磨性, 可以在 300~350℃ 的高温下稳定工作, 因而被美国、日本和德国等发达国家广泛应用于汽车发动机活塞、齿轮箱、飞机起落架、高速列车以及精密仪器的制造等, 并形成市场化的生产规模。目前, 国际市场价格为 3 万美元/t。由于利用该材料生产终端产品的铸造工艺及其深加工关键工艺不成熟, 目前国内尚无企业进行规模化生产。该材料的研发成功, 不仅填补了我国铝基复合材料规模化生产的空白, 而且有望打破我国长期依赖进口的局面^[4]。

纵观国内外, 对铝基复合材料的应用研究方面, 主要集中在 SiC 颗粒增强铝基复合材料, 并且取得很大的成就。少数国家(如美国、日本和加拿大等)已进入应用阶段, 取得了显著的经济效益。我国在该领域的研究起步较晚, 大多数仍处于实验室阶段, 而且研究的深度和广度也很有限, 工业上的研究才刚刚开始。铝基复合材料以其优良的性能, 问世以来在汽车工业、航空航天、电子、军工和体育等许多领域得到广泛的应用。制约其发展的关键因素(如工艺复杂、成本高)等问题正逐步得到消除, 许多国家已建立了工业规模生产铝基复合材料的工厂, 相信在不久的将来, 铝基复合材料的制造工艺会更简单, 成本会更低, 使用范围会更广。

3 铝基复合材料应用领域分析

颗粒增强铝基复合材料和纤维增强铝基复合材料已经进入商品化应用阶段。

3.1 在交通运输工具中的应用

交通运输工具始终是铝基复合材料最重要的民用领域之一。考虑到成本以及产业化应用等相关因素, 连续纤维增强铝基复合材料以及成本偏高的非连续增强铝基复合材料就被排除在这一领域之外, 廉价的颗粒及短纤维增强铝基复合材料尚有大规模应用的可能。

铝基复合材料在汽车工业的研究起步最早。20 世纪 80 年代, 日本丰田公司就已经用硅酸铝纤维增强铝基复合材料, 成功地制造了汽车发动机活塞抗磨环和汽车连杆等汽车零部件。美国的 Duralean 公司研制出用 SiC 颗粒增强铝基复合材料制造汽车制动盘, 使其质量减轻了 40%~60%, 而且提高了耐磨性能, 噪声明显减小, 摩擦散热快; 同时该公司还用 SiC 颗粒增强铝基复合材料制造了汽车发动机活塞和齿轮箱等汽车零部件。这种汽车活塞比铝合金活塞具有较高的耐磨性、良好的耐高温性能和抗咬合性能, 同时热膨胀系数更小, 导热性更好。用 SiCp/Al 复合材料制成的汽车齿轮箱, 在强度和耐磨性方面均比铝合金齿轮箱有明显的提高。铝

合金复合材料也可以用来制造刹车转子、刹车活塞、刹车垫板和卡钳等刹车系统元件,还可用来制造汽车驱动轴和摇臂等汽车零件。上海交通大学及兵器科学研究院等单位,也针对铝基复合材料在汽车上的应用方面进行了大量的实践工作。

3.2 在航空航天领域的应用

铝基复合材料的发展使得现代航空航天领域制造轻便灵活、性能优良的飞机和卫星等成为可能。Cereast 公司采用熔模铸造工艺研制成 20% Vol+ A357SiC 复合材料,用该材料代替钛合金制造直径达 180mm、质量为 17.3kg 的飞机摄像机方向架,使其成本和质量明显降低,导热性提高。同时该复合材料还可以用来制造卫星反动轮和方向架的支撑架。美国 DWA 公司用 25% SiC_p/6061 铝基复合材料代替 7075 制造航空结构的导槽、角材,使其密度下降了 17%,模量提高了 65%。铸造 SiC 颗粒增强 A356 和 A357 复合材料可以制造飞机液压管、直升机的起落架和阀体等。

铝基复合材料由于自身的一些特殊优点,在航空、航天和军事部门备受青睐,应用十分广泛。例如, DWC 特种复合材料公司制造的 Cr/Al 复合材料应用于 NASA 公司的卫星导波管上,其导电性好,热胀系数小,比原来使用的石墨/环氧树脂导波管要轻 30% 左右。俄罗斯航空材料研究所将 B/Al 复合材料用于安-28 飞机的机体结构上,零件质量减少 25% 左右。此外, Al 基复合材料还用于制造光学和电子零件,美国亚利桑那大学研制了一种超轻空间望远镜,采用 SiC/Al 复合材料制造行架、支架和副镜等,使质量大大减轻。美国 DWA 公司和英国 AMC 公司将 SiC/Al 批量用于 EC-120 和 EC-135 直升机旋翼系统,大幅提高构件刚度和寿命。这些关键结构件的成功应用说明美国和英国对这种材料的应用研究已相当成熟。

SiC 颗粒增强的铝基复合材料薄板未来将应用于先进战斗机的蒙皮以及机尾的加强筋,美国航天航空局采用石墨/铝复合材料作为航天飞机中部长 20m 的货舱架^[4]。

3.3 在兵器武装中的应用

近 10 年来,纤维价格的降低和挤压铸造、真空吸铸及真空压渗等复合工艺的出现,使复合材料有可能用于大批量的常规兵器中。纤维增强铝基复合材料因其良好的综合性能,在兵器中的应用已越来越广,各先进国家投入了大量研究工作,试制了发动机中的连杆、活塞、战术发动机壳体、制导舵板、战斗部支撑架、军用作战桥梁的拉力弦、架桥坦克桥体和长杆式穿甲弹弹托等。美国陆军早在 20 世纪 70 年代末期就对 Al₂O₃/A206 复合材料制造履带板进行了研究,通过采用复合材料制造履

带板可使其质量从铸钢的 544~680kg 下降到 272~362 kg,减轻近 50%。美国海军地面武器中心把 SiC/Al 复合材料用于船舶结构体和舱板,还打算将这种材料用于多种水下工程以及鱼雷、水雷的外壳。用碳化硅纤维增强铝合金复合材料制成的跨度为 30m 的舟桥,质量只有 5t,刚度比铝合金的高 30%。随着价格和技术问题的不断解决,此类材料在兵器领域中的应用将会更加广阔^[5]。

3.4 在电子和光学仪器中的应用

铝基复合材料,特别是 SiC 增强铝基复合材料,由于具有热膨胀系数小、密度低及导热性能好等优点,适合于制造电子器材的衬装材料及散热片等电子器件。SiC 颗粒增强铝基复合材料的热膨胀系数完全可以与电子器件材料的热膨胀相匹配,而且导电、导热性能也非常好。

在精密仪器和光学仪器的应用研究方面,铝基复合材料用于制造望远镜的支架和副镜等部件。另外,铝基复合材料还可以制造惯性导航系统的精密零件、旋转扫描镜、红外观测镜、激光镜、激光陀螺仪、反射镜、镜子底座和光学仪器托架等许多精密仪器和光学仪器。

在电子封装领域中应用。自 20 世纪 90 年代以来,发达国家的一些公司大力发展用于电子封装的高含量 SiC_p/Al 复合材料。研制电子器件封装用高导热、低热膨胀金属基复合材料是新材料的最新研究发展动态之一。美国已研制成功 SiC_p/Al、Si₃N₄/Al、C/Al 等高性能电子封装用复合材料,为解决电子器件迅速传热和散热问题的关键。最近研制的电子封装复合材料是 SiC_p 含量为 60%~75% 的铝基复合材料。

3.5 其他应用

(1) 低膨胀铝基复合材料在星载大功率多工器中的应用。

(2) 在核工业中的应用。B₄C 具有吸收中子的特性,因此 B₄C 颗粒增强铝基复合材料在核废料存贮方面有良好的应用前景。DWA 公司采用 41% B₄C_p/Al 复合材料制作核废料干法存贮桶,已经取得了规模应用。

(3) 复合材料电线。ElectriPlast 材料有着广泛的市场前景,在航空航天领域,有望应用于电线电缆和除冰系统。因为该材料的平均质量比铜轻 20%,数英里长度的电缆质量可减轻数吨。

(4) 纳微米混杂增强铝基复合材料及其应用。

该材料可广泛应用于民用和军用机动车辆发动机活塞、缸体、缸盖、摇臂、刹车盘、轮箍、履带板、轻型装甲板以及高稳定性光电仪器和精密仪器仪表零部件制造上,也可在船舶、航空和电子器件上应用。目前,运

用该材料生产的军用高功率增压柴油机活塞已通过了发动机 800h 台架试验和 1.0×10^4 km 跑车试验,其综合性能优于德国马勒公司产品,完全达到进口活塞的材质要求。

(5) 石墨纤维增强铝基复合材料在空间遥感器镜筒结构中的应用。

20 世纪 60 年代,美国就采用 B/Al 复合材料管材制造航天飞机轨道器主骨架,较原设计的铝合金框架减重 45%。采用 42.2% P100 石墨纤维增强 6061 铝制成的哈勃太空望远镜天线悬架是石墨纤维增强铝基复合材料在航天器上的典型应用。

加拿大航天局分别应用碳化硅增强铝基复合材料和铍铝合金制成的超轻激光扫描镜将用于新一代的空间视觉系统(Space Vision System)。其他多种复合材料在卫星的展开式天线和空间相机的反射镜上也有所应用。

北京空间机电研究所曾经采用非连续碳化硅增强铝基复合材料(SiCp/Al)制造空间相机的镜盒和镜身。北京航空材料研究院采用无压浸渗复合方法制备了用作空间光机结构件的高体份 SiC/Al 复合材料。另外,多种树脂基碳纤维复合材料还被用来制造空间相机的遮光罩、镜筒和底板^[6]。

(6) 纤维增强铝基复合材料在输电导线中的应用。

连续氧化铝纤维增强铝基复合芯输电导线以其重量轻、强度大、蠕变小及线膨胀系数小等优点,逐渐被研究人员重视。连续氧化铝纤维增强铝基复合材料是首次应用于输电导线,作为导线的承力部分^[7]。

铝基复合材料具有的特性使其在民用领域中得到较为广泛的应用。日本丰田公司 1983 年首次成功地用 Al_2O_3/Al 复合材料制备了发动机活塞,与原来的铸铁发动机活塞相比,质量减轻了 5%~10%,热导性提高了 4 倍。

铝基复合材料在制造自行车、医疗器具及运动器械等其他高性能要求的零部件中也得到广泛应用,如电子封装复合材料、计算机光盘及汽车刹车盘等,促进这些工业成为新的经济增长点。其作为功能材料,可望在机械、冶金及建材等工业部门得到更广泛的应用。

4 结束语

纵观国内外,对铝基复合材料的应用研究主要集中在 SiC 颗粒增强铝基复合材料,并且取得很大的成就。少数国家(如美国、日本、加拿大等)已进入应用阶段,取得了显著的经济效益。铝基复合材料的应用领域包括在交通运输工具中的应用,在航空航天领域的应用,在兵器武装中的应用,在电子和光学仪器中的应用等。

从发展趋势看,21 世纪初非连续增强铝基复合材料不仅会成为航空航天和空间领域中不可替代的重要材料,而且会逐步拓宽民用市场,预计在本世纪将会大量生产和应用。

参考文献

- [1] 王宇鑫,张瑜,严鹏飞,等. 铝基复合材料的研究. 上海有色金属, 2010, 31(4):194-199.
- [2] 刘彦强,樊建中,桑吉梅,等. 粉末冶金法制备金属基复合材料的研究及应用. 材料导报, 2010, 24(12):18-23.
- [3] 刘智雄,刘荣佩,张国强. 颗粒增强铝基复合材料的研究与发展. 昆明冶金高等专科学校学报, 2008, 24(5):5-10.
- [4] 金鹏,刘越,李曙,等. 颗粒增强铝基复合材料在航空航天领域的应用. 材料导报, 2009, 23(6):24-28.
- [5] 刘连涛,孙勇. 纤维增强铝基复合材料研究进展. 南方金属, 2008(6):1-5.
- [6] 孙德伟,张广玉,张其馨,等. 石墨纤维增强铝基复合材料在空间遥感器镜筒结构中的应用. 光学精密工程, 2009, 17(2):368-374.
- [7] 李寅雪. 纤维增强铝基复合材料在输电导线中的应用. 华北电力技术, 2010(8):29-32.

(责编 玲犀)

(上接第 77 页)

余应力分布较为平缓。

(3) 在焊接接头边缘处,激光修饰焊较激光焊,由于边缘效应而产生的残余应力释放,释放幅度较低,从 27%~42% 降到 10%~18%。

参考文献

- [1] 许飞,杨璟,巩水利,等. 铝合金激光修饰焊缝成形特征研究. 应用激光, 2010,30(5):374-377.
- [2] 雷玉成,李振南,朱延山,等. CLAM 钢激光焊 T 形接头残余应力及硬度分析. 焊接学报, 2012,33(6):73-76.
- [3] Stone H J. Comparison of three different techniques for measuring the residual stresses in an electron beam-welded plate of Waspaloy. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, V30A(7):1797-1808.
- [4] 张铭,何家文. 丝织构对薄膜 X 射线残余应力分析的影响. 机械工程材料, 2001,25(5):21-24.
- [5] 柳铭,宋瑞宏,孔德军. 用 X 射线应力仪测量凸轮轴表面激光淬火相变层的残余应力. 机械工程材料, 2007,31(7):28-31.
- [6] 徐传超. X 射线法与应变片法表征残余应力的定量关系研究. 江苏镇江: 江苏大学, 2011.
- [7] 张持重,李冬梅,庞绍平,等. 采用 X 射线法测算金属材料内部残余应力的研究. 吉林化工学报, 2001,18(4):73-75.
- [8] 梁旭坤,袁海洋,胡永会. 铝合金厚板表面边缘应力释放的实验研究. 热加工工艺, 2012,41(6):181-183.
- [9] 唐堯葵. 焊接测试技术. 北京: 机械工业出版社, 1988.

(责编 小城)