

中低体积分数 SiC_p/Al 在航空航天领域的应用与发展

许小静 张绪虎 王亮 李圣刚 史金靓

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 基于中低体积分数 SiC_p/Al 的性能特点,对比中低体积分数 SiC_p/Al 铝合金及钛合金的力学物理性能,讨论中低体积分数 SiC_p/Al 的性能优势,总结了中低体积分数 SiC_p/Al 在航空航天领域应用情况及目前的发展现状,并提出未来的发展方向。

关键词 中低体积分数 SiC_p/Al 复合材料,材料性能,应用现状,发展方向

Development and Application of Medium/Low Volume-Fraction SiC_p/Al Composites in Aerospace Field

Xu Xiaojing Zhang Xuhu Wang Liang Li Shenggang Shi Jinliang

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The mechanical and physical properties of medium/low volume-fraction aluminum matrix composites are compared with those of Al and Ti alloys based on the special characteristics of medium/low volume-fraction SiC_p/Al composites, and the property of medium/low volume-fraction SiC_p/Al composites in aerospace application is presented. Also, aerospace applications of medium/low volume-fraction SiC_p/Al composites and recent progress are reviewed. The development strategy of medium/low volume-fraction SiC_p/Al composites in aerospace applications is presented.

Key words Medium/low volume-fraction SiC_p/Al composite, Property, Application, Development direction

0 引言

金属基复合材料(MMC)中以铝基复合材料的发展最为迅猛,铝基复合材料以 SiC 颗粒作为其增强相的最为常见^[1-3]。对于 SiC_p/Al 复合材料而言,高体积分数 SiC_p/Al ($\text{SiC}>50 \text{ vol\%}$) 由于脆性相 SiC 含量非常高而导致塑韧性很低,加工十分困难,应用受到一定的限制。而中低体积分数的 SiC_p/Al 因其低密度、高比模量、低膨胀、高导热、低成本、优良成形性等优异的综合性能特点,成为最受关注的 MMC 材料^[1-3],在航空航天领域获得了一定的应用^[2,4-7]。该材料的模量远远高于铝合金,线胀系数又远远低于铝合金,有望成为继铝合金和钛合金之后的新型航空航天结构材料。

本文从航空航天材料应用出发,基于 SiC_p/Al 的性能优势,对比与铝合金、钛合金之间的性能差异,介绍国内外 SiC_p/Al 目前的发展及应用现状,并展望该

材料的发展方向。

1 中低体积分数 SiC_p/Al 的性能优势

表 1 列出了铝合金典型结构材料 2024^[8]、钛合金典型结构材料 TC4^[9] 以及常见中低体积分数 SiC 含量铝基复合材料^[10] 的性能对比。

通过表 1 可以发现,中低体积分数 SiC_p/Al 的密度与铝合金基本相当,且明显小于钛合金;比模量远远高于铝合金甚至钛合金;强度低于钛合金,但接近或超过铝合金;线胀系数及硬度介于铝合金和钛合金之间,且可以发现,随着 SiC 颗粒的增多,线胀系数降低而硬度增大;热导率明显高于铝合金及钛合金。当中低体积分数 SiC_p/Al 的 SiC 含量超过 20 vol%,其比模量超过 $4.0 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{s}^2$,高于绝对大多数传统结构材料,如钢、高温合金及镁、铝、钛合金的比模量 $(3.5 \sim 4.0) \times 10^7 \text{ m}^2/\text{s}^2$,这意味着在维持相同的系统刚度稳定性条件下,采用中低体积分数 SiC_p/Al ,能

收稿日期:2010-12-15

作者简介:许小静,1980 年出生,工程师,主要从事粉末冶金、激光立体成形等研究工作。E-mail:helenxj@gmail.com

够实现整体结构质量的大幅度地减轻。另外,中低体积分数 SiC_p/Al 较高的热导率 λ 会降低构件的温度梯度从而减小热应力的产生,且线胀系数 α 越低,越有利于减小构件的变形,而中低体积分数铝基复合材料的 λ/α 值显著大于铝合金及钛合金,有利于承担光学、仪表系统结构件的任务。

表 1 铝合金、钛合金及其中低体积分数 SiC_p/Al 性能对比

Tab. 1 Comparison of physical properties among medium/low volume-fraction SiC_p/Al , Al and Ti alloys

材料	ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	E / GPa	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / $\%$	比模量 / $10^7\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$	硬度 HB	α / 10^{-6}K^{-1}	λ / $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	$\frac{\lambda}{\alpha}$ / $10^{-6}\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$
2024-T4 ^[8]	2.80	72	506	390	14	2.57	120	23	121	5.26
TC4-退火 ^[9]	4.44	109	971	900	15	2.46	255~341	9.1	6.8	0.750
15vol% $\text{SiC}_p/2009$ ^[10]	2.82	97	530	365	7	3.44	175	17.5	210	12.0
20vol% $\text{SiC}_p/2024$	2.86	115	440	370	4	4.02	180~230	12.5	186	14.9
30vol% $\text{SiC}_p/2024$	2.91	127	380	323	1.5	4.36	205~235	11.8	127	10.76

2 中低体积分数 SiC_p/Al 发展现状

近年来 SiC_p/Al 迅速发展,中低体积分数 SiC_p/Al 以其优异的机械物理性能,且可采用常规设备和工艺加工成型,其制备和生产十分经济,因而成为首先实现工业生产的 MMC 材料。

目前,美国已建成年产 11 340 t 的 SiC_p/Al 型材、棒材、铸锭以及零件的专业工厂,具有铸造单个铸锭 596 kg 的生产能力,其中低体积分数 SiC_p/Al 的生产占其总量的 70% 以上^[12]。生产的中低体积分数 SiC 颗粒增强铝基复合材料随着 SiC 含量的增加,仅伸长率下降,其他性能均大幅提高。美国拥有目前世界最先进 SiC_p/Al 专业制造公司,包括 Alyn 公司、DWA 公司、铝基复合材料联合体 (ALMMC) 等。英国目前已实现大规模生产 SiC_p/Al 型材,其中低体积分数 $\text{SiC}_p/6061$ 已批量生产,大规模应用于空军直升机关键承力件,其航天金属基复合材料公司 (AMC) 以粉末冶金方法,已经实现大批量生产颗粒增强铝基复合材料^[12-13]。

航天材料及工艺研究所目前已经建立了较为完善的中等体积分数铝基复合材料热等静压成形数据库,成功制得多种中等体积分数 SiC_p/Al 宇航零件样件,其中某型号惯性制导平台样件已通过内部质量鉴定,某型号用封装连接件已通过使用部门的考核;哈尔滨工业大学成功制备了中低体积分数 SiC_p/Al 卫星天线丝杠等部件;航空材料及工艺研究所主要针对飞机发动机用中低体积分数 SiC_p/Al 零件进行开发;中南大学开发出用于雷达 T/R 组件封装壳体的中等体积分数 SiC_p/Al ;北京有色金属研究总院实现了中等体积分数 SiC_p/Al 在惯导系统承力件中的应用。总体而言,国内研制的中低体积分数 SiC_p/Al 已基本达到国际同类材料的研制水平,具备各种管、棒、型材

总体而言,中低体积分数铝基复合材料的主要性能优势表现在低密度、高比模量、高比热容、低线胀系数等方面,正是基于这些优异的力学物理性能的组合,中低体积分数铝基复合材料符合航空航天领域某些特殊部位对材料的要求,具有极大的开发潜力。

和零件的加工能力,已经针对导弹、卫星的一些部件进行了应用研究^[14]。

尽管中低体积分数 SiC_p/Al 在航天飞机以及其他一些尖端技术领域中已经获得应用,但是用量都比较小。目前,研究人员就中低体积分数 SiC_p/Al 在航空航天领域新的应用开发研究,充分探索能够发挥其特色的应用场合,推动其在航空航天领域的深度发展。

3 SiC_p/Al 复合材料在航空航天领域的应用情况

作为结构材料,15vol% $\text{SiC}_p/2009\text{Al}$ 已被大规模应用于 EC120 和 N4 直升机旋翼系统的关键零件,基于该材料的高比模量的优势,替代铝合金,构件刚度提高 30%,减重 30 kg 以上^[11];同样,美国空军将 17.5vol% $\text{SiC}_p/6092\text{Al}$ 用于 F-16 战斗机的腹鳍,并代替 2214 铝合金蒙皮,使得材料的模量提高 50%,寿命提高幅度达 17 倍^[11];DWA 公司采用 25vol% $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ 取代 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%;Cercast 公司采用 20vol% SiC_p/Al 复合材料代替钛合金制造直径达 180 mm、质量 17.3 kg 的飞机摄像镜方向架,质量减轻 28%;采用 15vol% $\text{SiC}_p/2009\text{Al}$ 制备的液压制动器缸体已用于 F-18“大黄蜂”战斗机、军用 V-22 型“鱼鹰”直升机,与替代材料铝青铜相比,不仅质量减轻、线胀系数降低,而且疲劳极限还提高 1 倍以上^[15]。

作为仪表材料,DWA 公司生产的 25vol% $\text{SiC}_p/6061$ 仪表支架已用于承载 Lockheed 飞机上的电子设备;美国海军飞行动力实验室研制成中等体积分数 SiC_p/Al 薄板应用于新型舰载战斗机的壳体材料的制备;同时,美国的在其主力战机 F-22“猛禽”上的自动驾驶仪上采用中等体积分数的 SiC_p/Al ,减重 70%

以上^[16],而在 ALE-50 型军机诱饵吊舱、摩托罗拉铱星及“探路者”和“卡西尼”等深空探测器则装备有中等体积分数 $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ 电子构件。

作为光学级材料,美国采用中等体积分数 SiC_p/Al 研制成轻量化的空间望远镜,该空间望远镜的主镜直径 0.3 m,整体质量仅为 4.54 kg,图 1 给出的是某光镜基座^[16]。

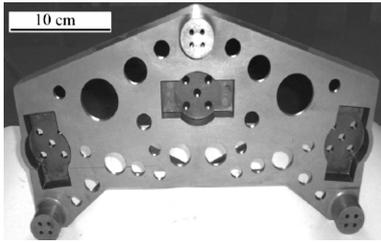


图 1 光镜基座

Fig. 1 Optical mirror substrate

4 中低体积分数 SiC_p/Al 在航空航天领域的发展

面对 21 世纪我国航空航天业发展对材料提出的更高要求,中低体积分数 SiC_p/Al 将获得重要的发展机会,基于该种材料独特的性能特征及加工特点,中低体积分数 SiC_p/Al 在未来的应用发展应侧重以下几个方面。

(1) 进一步提高中低体积分数 SiC_p/Al 应用的综合性能,特别是提高材料的塑韧性。例如能将中等体积分数的 SiC_p/Al 的塑韧性提高,复合材料将具有近似铝合金的密度,高于钛合金的模量、大大低于铝合金的线胀系数等综合优异性能,其性能优势将是单一铝合金或钛合金无法比拟的。

(2) 进一步推进中低体积分数 SiC_p/Al 大尺寸复杂构件精密成形加工研究,是一项具有高难度和高技术含量的挑战,既是一种高代价高投入的工艺技术又是高增值高回报的工艺技术,世界工业先进国家都把它放在国家尖端技术和经济振兴的重要位置。推进中低体积分数 SiC_p/Al 大尺寸复杂构件精密成形加工研究需要结合坯锭制备装备、工艺,机械加工装备、工艺的研究,为实现高性能、高质量中低体积分数 SiC_p/Al 大尺寸复杂构件精密成形加工提供全面技术支持。

(3) 完整建立中低体积分数 SiC_p/Al 的制备、检测及应用标准。虽然中低体积分数 SiC_p/Al 已经在在航空航天领域获得了应用,但是其制备、加工目前尚无统一标准,限制了该材料的应用及发展,应该尽快加强这方面的工作,建立完整的相应标准,为其在航空航天领域内的选型选材定位奠定基础。

(4) 中低体积分数 SiC_p/Al 的应用首选目标仍然

是航空航天等军工领域。而这些领域对于材料的要求非常苛刻,特别是工艺及性能稳定方面。因此,在与设计部门密切交流的基础上,充分发挥中低体积分数 SiC_p/Al 特色,找准找对应用场合。

参考文献

- [1] Geiger A L, Walker J A. The processing and properties of discontinuously reinforced aluminum composites[J]. JOM, 1991(8): 8-15
- [2] Maruyama B, Hunt W H. Discontinuously reinforced aluminum: current status and future direction[J]. JOM, 1999(11): 59-61
- [3] Jerome P. Commercial success for MMCs [J]. Powder Metallurgy, 1998, 41(1): 25-26
- [4] Alexander E, Christopher S M, Andreas M. Metal matrix composites in industry: an introduction and survey[M]. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2003
- [5] Hashim J, Looney L, Hashim M S J. The wettability of SiC particles by molten aluminum alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 119: 324-328
- [6] Mckimpson M G, Pohlenz E L, Thompson S R. Evaluating the mechanical properties of commercial DRA [J]. JOM, 1993(1): 26-29
- [7] 《工程材料实用手册》编辑委员会. 工程材料实用手册[M]. 第四卷. 北京: 中国标准出版社, 2002: 148
- [8] 《工程材料实用手册》编辑委员会. 工程材料实用手册[M]. 第四卷. 北京: 中国标准出版社, 2002: 104
- [9] 樊建中, 肖伯律, 等. 适合航空航天用 SiC_p/Al 复合材料的性能 [J]. 宇航材料工艺, 2006, 36(2): 17-23
- [10] 樊建中, 肖伯律, 等. 热处理对 SiC_p/Al 复合材料强度和塑性的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2005(6): 228-235
- [11] Bartsch K, Arnold B, Kaltofen R, et al. Effects of catalyst pre-treatment on the growth of single-walled carbon nanotubes by microwave CVD [J]. Carbon, 2007, 45(3): 543-547
- [12] 樊建中, 桑吉梅, 石力开. 颗粒增强铝基复合材料的研制应用与发展 [J]. 材料导报, 2001, 15(10): 55-61
- [13] Hunt M. Progress in powder metal composites [J]. Materials Engineering, 1990, 107(1): 33-36
- [14] 黄伯云, 肖鹏, 陈康华. 复合材料研究新进展 [J]. 金属世界, 2007(3): 46-48
- [15] Wang N, Tang Z K, Li G D, et al. Materials science: single-walled 4\AA carbon nanotube arrays [J]. Nature, 2000, 408(6808): 50-54
- [16] Arpon R, Molina J M, Saravanan R A, et al. Thermal expansion behavior of aluminium- SiC composites with bimodal particle distributions [J]. Acta Materialia, 2003(51): 3145-3156

(编辑 任涛)