

以自蔓延高温合成 SiC 颗粒为增强体的光学/仪表级铝基复合材料

Optical and Instrument Grade Aluminum Matrix
Composites Reinforced with Self-Propagating
High-Temperature Synthesized SiC Particle

崔 岩 (北京航空材料研究院, 北京 100095)

CUI Yan (Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 尝试采用自蔓延高温合成 (SHS)、具有近球形特征且表面粗糙的新型 SiC 颗粒, 以替代传统的角状磨料级 SiC 颗粒, 作为光学/仪表级的高体分 SiC_p/Al 复合材料的增强体。研究结果表明: 与传统角状 SiC 颗粒相比, SHS-SiC 颗粒的无棱角、近球形几何特征, 使其附近铝基体中的应力集中程度显著降低, 进而使材料的强度包括表征尺寸稳定性的微屈服强度明显提高; SHS-SiC 颗粒所特有的粗糙表面形貌, 使 SiC-Al 之间的界面结合通过机械镶嵌机制得到了进一步的增强, 跨越界面的载荷传递效率进一步提高, 并表现为复合材料的弹性模量有所提高。

关键词: SiC_p/Al 复合材料; 光学/仪表级; 自蔓延高温合成 SiC 颗粒; 近球形; 性能

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2001) 12-0012-04

Abstract: The reinforcing effects as the reinforcement of high volume fraction optical and instrument SiC_p/Al composites were systemically compared, between the novel near-spherical SHS SiC particle with rough surface topography and the common abrasive-grade SiC particle with angular shape and relatively smooth surface. The results show that the SHS SiC particle is more effective than the abrasive-grade SiC particle for strengthening of the aluminium matrix composites, as a result of the local stress concentration extent of Al matrix in the vicinity of the near-spherical geometry particulate is much slighter than that in the vicinity of the pointed end of the common abrasive-grade SiC particle, which will decrease the probability of crack initiation in matrix, in turn improve the strength (including micro-yield strength characterizing the dimension stability of materials). More effective mechanical keying arising from rough topography on the surface of SHS SiC, leads to stronger interface bonding and contributes to higher load transferring efficiency and elastic modulus of composite.

Key words: SiC_p/Al composites; optical and instrument grade; SHS SiC particle; near-spherical; properties

含有高体积分数 (> 40%) 细碳化硅颗粒 (3 ~ 5 μm) 的铝基复合材料, 具有许多传统材料难以匹敌的物理、力学性能集成优势, 例如: 二至三倍于钛合金的高比刚度、优于镀材的高尺寸稳定性、可与钢材及钛合金甚至是陶瓷基片匹配的低线膨胀系数、与镀材及碳化硅陶瓷相当的热导率、远高于铝合金的屈服强度以及与铸造铝合金相当的断裂韧性等等^[1-3]。这些特点使其在航空航天及空间领域大有用武之地, 尤其是作为机载、星载、弹载设备的光学及其它精密仪器零部件, 颇具竞争力。为此, 这种结构和功能一体化的新型金属基复合材料又被称为光学/仪表级 SiC_p/Al 复合材料。

光学/仪表级 SiC_p/Al 复合材料的发展已有十余年的历史, 在美国已有作为三叉戟导弹惯性导向球、光学反射镜镜体等成功应用的范例^[4,5]。然而, 日新月异的航空航天及空间技术以及其它不断改进的先进武器系统, 对其光学、精密仪器零部件的选材提出了越来越高的要求。因此, 在保持光学/仪表级 SiC_p/Al 复合材料低膨胀、高导热等功能优势的前提下, 进一步改善其强度、刚度等力学性能, 充分发挥这种材料的综合性能优势, 是使之获得广泛应用的必由之路。然而, 在过去十年当中, 尽管人们并不怀疑精心选择 SiC 颗粒增强体的类型对获得高性能铝基复合材料而言是十分必要的, 但在这方面的实验工作却开展得很

少。导致这种现状的原因首先是由于商品化微米级 SiC 颗粒的品种十分单一, 目前基本只能选用普通的市售角状磨料级产品。为此, 本研究将以光学/仪表级 SiC_p/Al 复合材料为研究对象, 探索通过采用新型 SiC 颗粒增强体来进一步改善这种复合材料力学性能的可能性。

1 理论分析

1.1 光学/仪表级 SiC_p/Al 复合材料失效过程分析

除常规的结构破坏性失效(断裂或显著屈服)之外, 光学/仪表级 SiC_p/Al 复合材料零件还可能发生功能性失效。这是因为, 光学、精密仪器对其关键零件的功效有着特定的要求: 即在力载荷、热载荷或两者的双重作用下, 要保持高度的尺寸与形位精度, 在某些情况下, 即使发生较小的屈服甚至是微量的屈服时就可能因严重影响系统精度而导致功能性失效。上述两种失效方式的共同之处就是: 都与复合材料中铝合金基体的应力应变行为密切相关。为此, 控制、改善基体应力应变行为, 是提高此类复合材料失效抗力的重要手段。

SiC_p/Al 复合材料基体的应力状态, 不仅体现在平均应力水平上, 局部应力状态对材料失效行为的影响也是至关重要的。这是因为, 在实际复合材料中, 基体的应力状态是十分不均匀的, 在颗粒的“极”区尤其是颗粒尖角附近的基体区域内, 势必要出现应力集中。随着外加载荷水平的不断提高, 接下来将出现以下一系列的力学行为: 基体的应力集中区比作为整体的基体更早地达到流变临界应力, 在此发生局部塑性变形。高应力应变区的出现促进了复合材料的整体微屈服和屈服。在高应变区基体受到限制, 变形能力降低, 进而使该区域在较低的外部应变水平下, 形成微裂纹及早期产生孔洞。微裂纹、孔洞大量地形成与连接。宏观断裂。

由上不难看出: 基体中高应力区的局部实际应力水平, 对光学/仪表级 SiC_p/Al 复合材料失效行为有着相当程度的控制作用, 而局部应力集中行为将附加在平均应力的基础上, 对基体高应力区的应力水平产生至关重要的影响。

1.2 球形颗粒增强效果的理论预测

在影响复合材料基体应力应变行为的诸多因素中, 碳化硅颗粒类型特别是其形貌特征, 始终未得到充分的重视。碳化硅颗粒增强铝基复合材料的研究与开发已有二十年以上的历史, 曾被作为基体的铝合金种类十分繁多, 但作为铝基复合材料增强体的微米级碳化硅颗粒种类尤其是颗粒形状及其它几何参数却

极少有变化, 几乎是无例外地采用具有尖角或棱角的磨料级角状碳化硅。这种常用的市售碳化硅颗粒实际上并非为等轴状, 而是有一定的长径比的, 尽管长径比较小, 一般为 1.4~2.0。对真正等轴的、长径比为 1 的球形颗粒所对应的增强效果则缺乏研究, 尤其是实验研究。

从外载作用下的基体平均应力的角度分析, 无论是采用 Eshelby 模型^[6], 还是有限元数值模型^[7,8], 都可得出这样的预测结果: 大于 1 的长径比将通过载荷向增强体弹性传递效率的提高, 而降低了基体实际承受的平均应力水平, 进而对增强效果有所贡献, 因此应该对应着较高的复合材料弹性模量甚至是强度, 而且是陶瓷颗粒体分越高差异就越显著。已有结果表明^[4], 表面光滑的球形颗粒对应着弹性模量预测数据的低限。

从基体平均残余热应力(在 SiC/Al 复合材料系中为拉应力)的角度分析, 该应力可以显著地影响形变(特别是早期形变)力学行为, 即促发较早的基体拉伸流变, 这就相当于降低基体在外载作用下的屈服抗力, 尤其对本来就不是非常高的微屈服抗力影响更大。基于 Eshelby 方法可知^[4]: 较大的颗粒长径比将对应着较高的基体平均残余热应力水平, 这对抗变形特别是早期变形是不利的。

而从基体应力集中的观点来看, 根据前面 1.1 中对复合材料失效过程的分析可知: 若采用无尖角的球形颗粒或过渡较缓和的多面体颗粒, 必然会有利于减缓局部应力集中, 进而影响如前所述的铝基复合材料外载作用下的一系列力学行为, 推迟其变形、断裂现象的出现。而普通磨料级碳化硅颗粒的尖角对基体局部应力集中程度的加剧作用, 已被颗粒尖角附近基体微区纳米硬度测试结果所证实^[9]。这里所指的应力集中, 也包括无外载时基体残余热应力在颗粒尖角处的集中现象。

综合上述分析, 与普通市售磨料级碳化硅颗粒相比, 若采用理想的球形碳化硅颗粒作为增强体, 铝基复合材料的弹性模量将会略有下降; 而强度提高、降低两种可能性都存在, 但由于普通磨料级碳化硅颗粒的等效长径比还不到 2, 故长径比较小(约为 1)的球形颗粒对复合材料强度的负作用不会很明显, 反而是球形颗粒对铝基体应力集中程度(其次平均残余拉应力水平)的降低作用, 将会对材料强度产生较为显著的贡献。为此, 本研究就是从上述理论预测出发, 试图通过采用球形或接近球形的微米级碳化硅颗粒新型增强体, 以替代普通市售角状磨料级碳化硅颗粒, 来进一步改善光学/仪表级高体分 SiC_p/Al 复合材料的力学性能。

2 实验方法

为了实现单因素调整, 排除其它因素干扰, 本文将研究、对比的两种高体分 SiC_p/Al 复合材料, 除它们所用碳化硅颗粒类型不同之外, 其它参数均完全相同: 相同的基体铝合金, 相同的颗粒名义尺寸 ($3.5\mu\text{m}$), 相同的体积分数 (45%), 相同的制备方法 (液态金属浸渗法)。两种碳化硅颗粒分别为: 以尖角为形状特征的普通市售磨料级碳化硅颗粒 (中国沈阳一砂制造); 自蔓延高温合成的无棱角、近球形新型碳化硅颗粒。

采用与扫描电镜联机的图象分析仪对碳化硅颗粒的几何参数进行测定, 试样为复合材料的金相样 (未经腐蚀的机械抛光表面), 所给出的数据均为超过 300 个颗粒的统计平均值。颗粒的比表面积采用气体吸附法 (BET) 测定, 复合材料的力学性能采用三点弯曲法测试, 所给出的数值均为 5~7 试样的平均值。表征材料尺寸稳定性的微屈服强度, 又称精确弹性极限, 即材料产生 10^{-6}m/m 的残余 (塑性) 应变所需要的应力, 通常简写为 MYS。

3 实验结果与讨论

3.1 碳化硅颗粒的形貌特征

长径比这一几何参数即为颗粒的长度/宽度之比。形状因子所代表的意义可通过与一些标准几何形状的形状因子进行对比来加以理解。形状因子 (shape-factor) 的计算公式为: $4\pi \times \text{面积} / \text{周长的平方}$ 。由此式可算出: 标准圆形的形状因子为 1, 正方形的形状因子为 0.785, 而长方形的形状因子则更小。由表 1 可见: 市售普通磨料级碳化硅颗粒并非为等轴状, 而是有一定的长径比 (约为 1.5) 的, 截面形状因子小于正方形。而自蔓延高温合成的碳化硅颗粒则几乎就是等轴的 (约为 1), 截面形状与标准圆形接近。结合长径比及形状因子这两个几何参数, 可以确定自蔓延高温合成的碳化硅颗粒的几何形状与标准的球形是接近的, 属近球形。

表 1 碳化硅颗粒的主要形貌特征参数

Table 1 Morphology parameters of SiC particle

颗粒类型	SHS SiC 颗粒	普通 SiC 颗粒
长径比	1.045	1.512
形状因子	0.925	0.622
比表面积/ (m^2/g)	1.8	1.2

由扫描电镜观察可知 (见图 1 和图 2), 具有尖角

宏观几何特征的市售磨料级碳化硅颗粒, 其表面微观形貌却是非常光滑的, 而近球形的自蔓延高温合成碳化硅颗粒, 其表面却是由尺寸更小的凸起物组成, 因此表面形貌非常曲折、粗糙不平。除定性的扫描电镜直接观察外, 比表面积测定结果也证实了这一点。比表面积本应较小的球形颗粒, 其比表面积却比非规则多面体状颗粒高出 50%, 这显然是表面形貌特征对表面积的贡献。

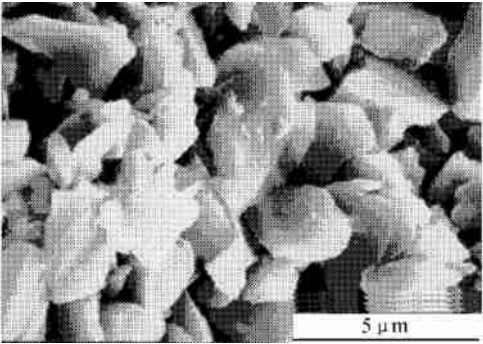


图 1 普通磨料级碳化硅颗粒形貌

Fig. 1 Morphology of the common abrasive-grade SiC particle

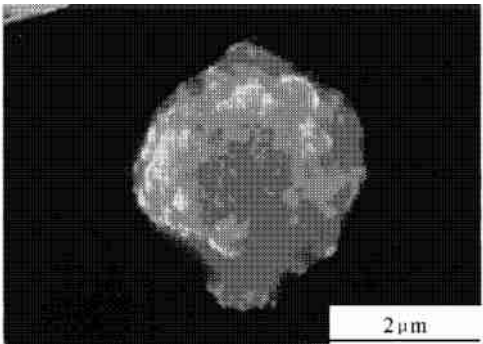


图 2 自蔓延高温合成碳化硅颗粒形貌

Fig. 2 Morphology of the SHS SiC particle

3.2 复合材料性能对比与分析

由表 2 可见, 正如前面理论分析所预测的那样: 就铝基复合材料的强度而言, 球形颗粒对基体应力集中的抑制, 起到了主导作用。所以, 近球形微米级碳化硅颗粒新型增强体的采用, 使铝基复合材料的断裂强度、屈服强度 ($\sigma_{0.01}$) 以及微屈服强度, 均明显高于以市售磨料级碳化硅颗粒为增强体时的情况。其中, 断裂强度、屈服强度高出 1/3。而微屈服强度值也提高近 1/4, 并已达到目前国际上尺寸稳定性最佳的铍材 - Be I-250 的水平, 约为国产 VHP 铍材的 4~5 倍, 这对光学构件、惯性器件等尺寸稳定性要求严格的应用背景而言, 其意义是不言而喻的。

与强度变化规律不同的是, 表 2 所给出的弹性模

量测试结果却与理论预测截然相反: 与长径比 1.5 的市售普通磨料级碳化硅颗粒相比, 长径比为 1 的近球形碳化硅颗粒不仅未使铝基复合材料的弹性模量有所降低, 反而却略有升高 (提高 ~ 15GPa)。这就意味着: 近球颗粒的长径比小, 这一对弹性模量而言的负作用, 被某一正作用所掩盖。在本研究条件下, 采用前面提及的理论模型^[6- 8] 可以计算出: 颗粒的长径比由 1.512 降至 1.045, 这一几何参数的变化, 将使铝基复合材料的弹性模量下降 10 ~ 20GPa。但是与表面光滑的理想球形体这一假设所不同的是, 本研究选用的自蔓延高温合成碳化硅颗粒具有十分粗糙的表面形貌特征 (见图 2), 因此可以推断: 在原有物理冶金结合机制的基础上, 自蔓延高温合成碳化硅颗粒独特的粗糙表面形貌又赋予 SiC-Al 界面以十分有效的机械镶嵌机制, 而这物理- 机械两种结合机制的叠加, 使 SiC-Al 界面结合得到了进一步的加强, 进而提高了跨越界面的载荷传递效率, 并表现为复合材料的表观弹性模量有所提高。

表 2 碳化硅颗粒类型对体分为 45% 的铝基复合材料性能的影响

Table 2 Effect of SiC particle type on mechanical properties of 45% Vf SiCp/ Al composites		
铝基复合材料	含 SHS SiC 颗粒	含普通 SiC 颗粒
弹性模量 E/GPa	175.6 ± 4.6	161.2 ± 3.8
抗弯强度 σ_s/MPa	659.2 ± 9.7	492.9 ± 14.7
屈服强度 $\sigma_{0.01}/\text{MPa}$	205.9 ± 9.3	151.1 ± 8.7
微屈服强度 MYS/MPa	113.1 ± 4.3	91.6 ± 6.0

4 结论

- (1) 作为光学/ 仪表级的高体分 SiCp/ Al 复合材料增强体, 采用自蔓延高温合成新型碳化硅颗粒, 来替代传统的市售角状磨料级碳化硅颗粒, 可使该种复合材料的强度得到显著提高, 弹性模量也有所改善。
- (2) 与传统角状碳化硅颗粒的增强效果相比, 自蔓延高温合成碳化硅颗粒的无棱角、近球形几何特征, 使其附近铝基体中的应力集中程度显著降低, 这是使复合材料强度包括表征尺寸稳定性的微屈服强度明显提高的根本原因。
- (3) 自蔓延高温合成碳化硅颗粒独特的粗糙表面形貌, 可通过机械镶嵌机制, 来进一步增强 SiC-Al 界

面结合、提高跨越界面的载荷传递效率, 进而对复合材料的弹性模量产生贡献。

参考文献

[1] 崔岩, 史文方. 航空学报, 2000, 21 (6): 571- 574.

[2] A W Urquhart. Mater. Sci. Eng., 1991, A144: 75-82.

[3] 乌崇德, 傅丹鹰, 益小苏. 宇航材料工艺, 1999, 8 (4): 11-15.

[4] T W Clyne and P J Withers. An Introduction to Metal Matrix Composites [M] . New York: Cambridge University Press, 1995.

[5] M Hunt. Materials Engineering, 1990, 1: 33-36.

[6] M Taya and T Mura. J Appl Mech, 1981, 48: 361.

[7] Y-L Shen, M Finot, A Needleman, S Suresh. Acta Metal Mater, 1994, 42: 77

[8] 江中浩, 连建设, 等. 复合材料学报, 1999, 16 (4): 102

[9] 刘 , 张国定, M asaaki Naka. 纳米硬度法研究颗粒形状对 SiCp/ LD2 复合材料塑性的影响 2000 年材料科学与工程新进展[M] . 北京: 冶金工业出版社, 2000 年, 下卷: 1583- 1586.

基金项目: 航空基础科学基金 (99C21007) 及国防科技重点实验室基金 (99JS49. 2. 1. HT 5801) 资助项目
收稿日期: 2001-08-22
作者简介: 崔岩 (1969-), 男, 博士, 高级工程师, 长期从事高体分结构- 功能一体化颗粒/ 铝基复合材料的制备、加工及应用研究, 联系地址: 北京市 81 信箱 3 分箱 (邮编 100095)

* * * * *

金属基复合材料在航天结构中的应用

金属基复合材料 (MMC) 在航天结构中的首次应用是 B/ Al 复合材料用作航天飞机轨道器中段机身构架和加强桁架的管形支柱, 以及用作航天飞机轨道器起落架的拉杆, 每一架航天飞机中有数百件具有钛套环和端接头的 B/ Al 复合材料管形件, 仅这一项就比使用铝合金减重 40%。

MMC 另一个重要应用是 6061Al 合金/ 石墨纤维 P100 板材扩散连接而成的 Gr/ Al 复合材料 Hubble 太空望远镜的高增益天线悬架, 这种悬架长达 3. 6m, 具有足够的刚度和低热膨胀系数, 能在太空运行中使天线保持正确位置, 具有良好的波导功能, 保持飞行器和管理之间进行信号传输, 并抗弯曲和振动。

非连续增强如颗粒增强和晶须增强铝 MMC 的应用包括航天器的桁架结构的接头和连接件, 大梁, 电子封装, 热壁板, 机构壳体及套筒等。特别适于电子封装及热管理应用, 例如, 几种 SiCp/ Al 和 Grp/ Al 电子封装经过太空验证, 已应用于通讯卫星和全球定位系统卫星, 这种构件不仅重量轻而且成本低。非连续增强铝 MMC 也已替代 Cu/ W 合金用于地球同步卫星的功率半导体模块的热管理。 (全宏声)