

# SiC 颗粒尺寸及含量对 SiCp/2024Al 复合材料性能的影响

中国科学院金属研究所 毕敬 马宗义 申红伟 吕毓雄 高荫轩

本文对粉末冶金法制备的 SiCp/2024Al 复合材料的性能进行了研究。随 SiC 颗粒尺寸的增大,复合材料的强度降低,而塑性和磨损抗力则增加。SiC 颗粒尺寸对复合材料的物理性能没有什么影响。增加 SiC 颗粒含量,复合材料的强度、模量均增大,磨损抗力亦明显增加,而塑性和热膨胀系数则降低。

**关键词:** 复合材料, SiC 颗粒, 铝合金

## Effects of SiC Size and Content on the Properties of SiCp/2024Al Composite

Bi Jing Ma Zongyi Shen Hongwei Lu Yuxiong Gao Yinxuan  
(Institute of Metal Research, Academia Sinica)

The properties of SiCp/2024Al composite fabricated by powder metallurgy technique were investigated. It is found that with increasing SiC particulate size the strength of the composite decreases, and the elongation and abrasive wear resistance increase. SiC particulate size has no effect on the physical properties of the composite. With increasing SiC particulate content, the strength, modulus and abrasive wear resistance of the composite increase, and the elongation and coefficient of thermal expansion decrease.

**KEY WORDS:** Composite, SiC particulate, aluminum alloy

### 一、前言

碳化硅颗粒增强铝 (SiCp/Al) 复合材料不仅具有高的强度、模量和良好的热稳定性,以及各向同性的性能,尤其重要的是 SiC 颗粒成本低廉来源广泛,被认为是近期内最可能被广泛使用的金属基复合材料之一。目前已在航天、航空、光学仪器、精密仪表上投入使用<sup>[1~3]</sup>。关于这种复合材料的力学性能和微观结构已进行了较多的研究,但 SiC 颗粒尺寸对复合材料性能的影响,报道较少。在本文中,对 SiC 颗粒尺寸及含量对复合材料性能的影响进行了较为系统的研究。

### 二、试验方法

基体材料为本所生产的 140 目的 2024Al (wt%: 4.20Cu-1.47Mg-0.56Mn-0.02Zr-0.40Fe-0.27Si) 微晶粉末。增强体为沈阳第一砂轮厂生产的  $\alpha$ -SiC 颗粒,尺寸为 3.5 $\mu$ m、20 $\mu$ m 两种。复合材料的制备采用粉末冶金法。复

合材料热压锭在 450℃ 以 20:1 的挤压比挤压成棒材,T6 处理后加工成棒状拉伸试样(直线段  $\phi 4\text{mm} \times 10\text{mm}$ ),在 Instron 拉力机上进行拉伸实验,拉伸断口在扫描电镜下观察。弹性模量的测定采用悬丝耦合共振法,用热膨胀仪测定复合材料的热膨胀系数。用 600# 棕刚玉磨损砂纸在 ML-10 型磨料磨损试验机上对复合材料进行磨损试验。磨损率定义为每单位磨损距离的重量损失。

### 三、结果与讨论

表 1 为不同 SiC 颗粒尺寸及含量的 SiCp/2024Al 复合材料的室温拉伸性能。在相同的 SiC 含量 (15Vol. %) 条件下,随着 SiC 颗粒的尺寸由 3.5 $\mu$ m 增大到 20 $\mu$ m,复合材料的强度由 558.17MPa 降低到 490.71MPa。屈服强度也随之降低,但复合材料的塑性却有较大幅度的提高,15Vol. %SiCp (20 $\mu$ m)/2024Al 复合材料的室温延伸率可达 9.20%。随着 SiC 颗粒 (20 $\mu$ m) 含量增加,复合材料的强度增加,塑性则降低,30Vol. %SiCp (20 $\mu$ m)/

2024Al 复合材料的抗拉强度与 15Vol. %SiCp (3.5 $\mu$ m) / 2024Al 相当, 但屈服强度较高, 塑性较低。

表 1 SiCp/2024Al 复合材料的室温拉伸性能

SiC 颗粒含量 (Vol. %)	SiC 颗粒尺寸 ( $\mu$ m)	$\sigma_b$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ MPa	$\delta$ (%)
15	3.5	558.17	411.86	4.42
15	20	490.71	364.54	9.20
30	20	558.55	459.82	2.75

图 1 为 15Vol. %SiCp/2024Al 复合材料室温拉伸断口的 SEM 照片。可以看到, 小颗粒 SiC 复合材料的拉伸断口由小韧窝组成 (图 1a), 其断口形貌特征与 SiC 晶须增强铝复合材料相似<sup>[4]</sup>。断口上极少看到裸露的 SiC 颗粒存在, 表明 SiC 颗粒与铝基体之间的界面结合是良好的。而大颗粒 SiC 增强铝复合材料断口特征则不同, 在断口上出现大量裸露的 SiC 颗粒 (图 1b), 并且一些 SiC 颗粒已碎裂成几块。SiC 颗粒之间的铝基体存在较大的塑性变形, 其断裂特征与未增强铝合金相似。关于裸露的

SiC 颗粒, 一种可能是 SiC 颗粒与铝基体之间的界面结合较弱, 拉伸时在界面处产生开裂; 另一种可能是 SiC 颗粒的断裂, 而 SiC 颗粒的断裂既可能是在拉伸时产生的, 也可能是在热挤压过程中造成的。考虑到大颗粒 SiC 增强铝复合材料较低的强度, 因而在拉伸过程中造成大量 SiC 颗粒断裂的可能性很小。由于未能进行拉伸断口的双面匹配观察, 造成大量 SiC 颗粒裸露的主导机制还难以确定, 但从断口上出现碎裂的 SiC 颗粒来看, 至少一部分裸露的 SiC 颗粒是由于挤压碎的 SiC 颗粒在拉伸时分离造成的。这种挤压碎的 SiC 颗粒会对复合材料的性能和断裂特征产生较大的影响。可以推断, 在大颗粒 SiC 增强铝复合材料中, 弱的界面结合和 SiC 颗粒的碎裂造成了这种复合材料低的强度。在 15Vol. % 相同的 SiC 含量条件下, 假定 SiC 为球形颗粒, 经过计算, 当 SiC 颗粒尺寸由 3.5 $\mu$ m 增大到 20 $\mu$ m 时, SiC 颗粒的平均间距由 1.6 $\mu$ m 增加到 10 $\mu$ m (6 倍), 即在大颗粒 SiC 增强铝复合材料中, 可自由变形的基体区域尺寸明显增大, 并且从图 1b 可以看到, 此时颗粒对基体塑性变形的约束较小, 故大颗粒 SiC 增强铝复合材料虽然其强度较低, 但其塑性却有明显的改善。

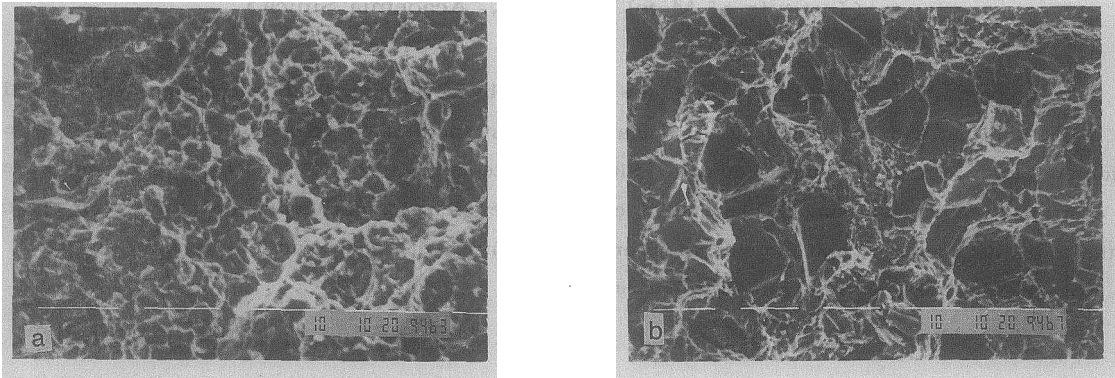


图 1 15Vol. %SiCp/2024Al 复合材料室温拉伸断口 SEM 照片

表 2 给出不同温度下复合材料的弹性模量值。在相同的 SiC 颗粒含量下, SiC 颗粒尺寸对复合材料的弹性模量没有明显的影响。15Vol. %SiCp/2024Al 复合材料的弹性模量约比基体铝合金提高 45%。随着 SiC 颗粒含量增加, 复合材料的弹性模量呈线性增加 (图 2), 30Vol. % SiCp/2024Al 复合材料的弹性模量达 130GPa, 较基体合金增加 85%。从表 2 还可以看到, 在 350℃ 时, 复合材料的弹性模量仍保持在较高水平。

表 2 SiCp/2024Al 复合材料的弹性模量 (GPa)

SiC 颗粒含量 (Vol. %)	SiC 颗粒尺寸 ( $\mu$ m)	R. T.	100℃	200℃	300℃	350℃
15	3.5	103.2	101.3	97.4	91.7	88.7
15	20	99.9	97.7	93.7	91.1	89.8
30	20	130.0	127.6	123.1	117.1	116.2

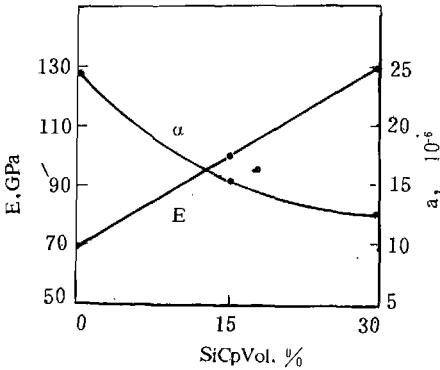


图 2 晶须体积分数对复合材料弹性模量和热膨胀系数的影响

表 3 为 SiCp/2024Al 复合材料的热膨胀系数。在相同的 SiC 含量下, SiC 颗粒尺寸对复合材料的热膨胀系数

基本上没有影响。随着 SiC 含量的增加,复合材料的热膨胀系数减小(图 2),30Vol. %SiCp/2024Al 复合材料的热膨胀系数只有基体合金的 60%,即这种复合材料具有良好的热稳定性,并且随着 SiC 颗粒含量的增加而增加。

表 3 SiCp/2024Al 复合材料的热膨胀系数( $\times 10^{-6}$ )

SiC 颗粒含量 (Vol. %)	SiC 颗粒尺寸 ( $\mu\text{m}$ )	RT ~100℃	RT ~200℃	RT ~300℃	RT ~400℃
15	3.5	15.4	15.9	16.7	17.6
15	20	15.4	16.0	16.9	17.8
30	20	12.5	13.1	13.5	14.3

图 3 为 SiCp/2024Al 复合材料的磨损率-载荷曲线。与基体合金相比, SiCp/2024Al 复合材料表现出良好的抗磨损性能。在 15Vol. % 相同的 SiCp 含量下,随 SiC 颗粒尺寸增大,复合材料的磨损抗力明显增加。在 SiC 颗粒尺寸(20 $\mu\text{m}$ )相同情况下,随 SiC 含量由 15Vol. % 增加到 30Vol. %,复合材料的磨损抗力又进一步增大。复合材料和基体合金的磨损率均随载荷的增加而增大。

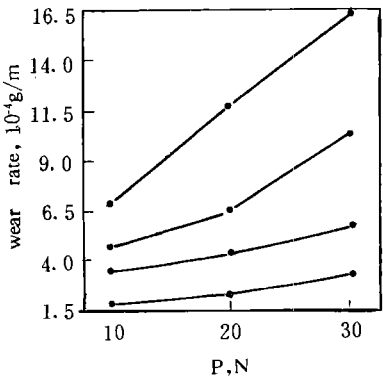


图 3 复合材料磨损率-载荷曲线

四、结 论

- 1. 小颗粒 SiC 增强铝复合材料具有较高的强度,而大颗粒 SiC 增强铝复合材料则具有高的磨损抗力和较好的塑性。
- 2. SiC 颗粒尺寸对复合材料的热膨胀系数和弹性模量没有明显的影响。
- 3. 随 SiC 颗粒含量增加,复合材料的强度,磨损抗力均增大,而塑性和热膨胀系数则降低。
- 4. 小颗粒 SiC 增强铝复合材料具有小韧窝断口特征,界面结合强度较高;而大颗粒 SiC 增强铝复合材料断口上有较多裸露的 SiC 颗粒,这与弱的界面结合和 SiC 颗粒断裂有关。

参考文献

1. P. Niskanen et al., Adv Mater Process, 3 (1988) 39

2. M. W. Mahoney and et al., ICCM—VI Vol., 2 P372  
3. W. R. Mohn and et al., J. Mater. Eng, 10 3 (1988) 225  
4. 马宗义,姚忠凯,金属学报,26 6 (1990) B423

\* \* \* \* \*

铈的开发与应用

铈作为纯难熔金属在高温结构和能源系统中,例如在航天和导弹推进系统中的应用是很有吸引力的。它可以作为纯结构材料应用,也可以作为石墨或碳-碳结构材料的内衬应用,因为铈对高温火箭发动机和热气阀的零件起耐腐蚀的作用。铈比其它传统内衬材料有更多的优点,它的熔点温度为 3180℃,除钨外高于其它所有金属,铈不形成碳化物,具有室温延展性。在 2500℃时,高温强度可以与碳复合材料相当,且能与石墨和碳复合材料很好地粘接。用铈制造的喷口零件在 2200℃下经受 10<sup>5</sup> 热疲劳循环而不发生任何明显破坏。在极限拉伸强度和持久强度方面铈也是难熔金属中最好的一种。

目前生产铈制品的主要方法有粉末冶金法和化学蒸汽沉积法两种。粉末冶金的典型工艺为在 415MPa 下冷压制坯,随后在真空或氩气中于 1200℃ 温度下进行预烧结和于 2700℃ 进行烧结。这时具有约 80% 密度的材料再经过冷加工使之收缩约 1~3%,以形成完全致密制品。粉末冶金的铈坯可以轧制成薄板,模锻或拉丝。铈制品可以焊接,包括钎焊和扩散焊。对外形复杂的零件,在粉末冶金法很难生产的情况下可以采用蒸汽沉积法生产。该方法可以生产薄壁、小直径或复杂形状的铈零件,同时根据铈的特殊性能,可以用蒸汽沉积法来涂敷碳、陶瓷和金属以形成各种不同性能的复合材料。

自 1985 年以来,美国 NASA 已将铈应用于航天和航空工业。尽管它的比重大,价格高,在无合适材料替换之前,铈的研究应用仍将不断发展。

(赵金凤)

\* \* \* \* \*

(上接 3 页)

果,具有更高强度的新合金正在研究之中,用以代替镍基合金(Inconel718)紧固件。

结 论

由于钛合金具有较高的结构效率和优良的抗腐蚀性,对于飞机应用而言,钛是一种引人注目的材料。在波音系列飞机上,钛的应用正在稳定地增长,其趋势还在不断发展。将来的研究方向将会集中在提高合金强度、降低制造成本,通过提高成本效率的途径进一步扩大钛的应用。