

文章编号: 1004-0609(1999)04-0748-04

SiC_p/LD2 复合材料的微区力学性能^①

秦蜀懿 刘澄 陈嘉颐 王文龙 张国定

(上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030)

摘 要: 用 UMHT-3 型超显微硬度仪测试 SiC_p/LD2 复合材料界面附近基体中的硬度值, 结果表明, 由于热膨胀系数差异, 复合材料中的热残余应力超过基体的屈服极限, 导致界面附近基体内存在热残余应变, 并使基体应变硬化, 因而超显微硬度值的变化可以反映热残余应变的分布状况。界面附近基体的超显微硬度随颗粒尺寸、距界面的距离和颗粒的尖锐程度而变化, 与有关复合材料中热残余应变分布的计算结果吻合。

关键词: 金属基复合材料; 超显微硬度; 热残余应力; 热残余应变

中图分类号: TB331

文献标识码: A

大多数金属基复合材料(MMC), 由于增强体与基体的热膨胀系数(ΔCTE)有较大差异, 复合材料从制备高温冷却至室温后, 将在增强体/基体界面附近产生较大的热残余应力(TRS_s)^[1,2]。在以铝及铝合金为基体的 MMC 中, TRS_s 往往超过基体的屈服极限, 通过塑性变形松弛后, 将在界面附近的基体内产生热残余应变(TRS_n)并出现高密度位错结构^[3,4]。现已发现, 复合材料中 TRS_n 的分布状况对 MMC 的许多性能, 尤其是塑性、断裂韧性及疲劳性能有很大影响^[3,5~7], 深入研究 MMC 基体中 TRS_n 的分布状况十分必要。目前对模型化 MMC 中 TRS_s 和 TRS_n 的分布研究已有很多有限元(FEM)计算的结果^[8~12], 但仍缺乏一种直接有效的实验手段测试 MMC 中 TRS_n 的分布状况。超显微硬度(UMH)测试方法具有载荷很小、压痕小、测量方便等优点, 十分适合测试薄膜材料和复合材料的微区性能, 近来已被应用于钢的性能检测上^[13], 并被成功地引入石墨纤维增强铝复合材料基体的微区性能测试中^[14]。由于 TRS_n 的存在会导致基体发生应变硬化, 因此, 测试 MMC 基体微区硬

度的变化可直观地反映出 TRS_n 的分布状况。作者采用 UMHT-3 型超显微硬度仪测试了 SiC_p/LD2 复合材料界面附近基体的 UMH 值, 结果表明, 颗粒附近基体中 UMH 的大小与颗粒尺寸、距界面的距离和颗粒的尖锐程度有关, 其变化趋势与有关 TRS_n 的理论计算结果吻合, 证明 UMH 是一种反映 MMC 中 TRS_n 分布的有效手段。

1 实验方法

选用 LD2 铝合金为基体, 平均粒度 14 μm 的绿色碳化硅粉为增强体, 采用搅拌铸造法制备体积分数为 15% 的复合材料。铸后在 400 $^{\circ}C$ 经 10:1 的比率热挤成直径 12 mm 的圆棒, 截取 2 个高 3 mm 的圆块, 其中之一在 520 $^{\circ}C$ 固溶 1 h, 20 $^{\circ}C$ 水淬后在 160 $^{\circ}C$ 人工时效 8 h (T6 处理), 在抛光的圆块横截面上进行 UMH 实验。

UMHT-3 超显微硬度测试仪附于 PHILIPS 515 扫描电镜(SEM)样品室内, 具有

① 国家自然科学基金资助项目 59871027 收稿日期: 1998-09-17; 修回日期: 1999-01-08

秦蜀懿(1972-), 男, 26岁, 博士研究生

以下特点:

- (1) 可测试小于 1 μm 的压痕;
- (2) 载荷、加载速率和加载时间可精确控制;
- (3) 载荷精度可达 0.02 mN;
- (4) 加载过程连续。

UMHT-3 十分适于测试多相材料中感兴趣的微区力学性能, 它的性能和实验参数见表 1。所有实验中的载荷 p 、压头下降速度 v_z 、加载速率 v_e 和加载时间 t_n 都是相同的。卸载后, 压痕可在 SEM 样品室内原位观察, 并在 SEM 附带的自动图像分析仪上直接测量压痕对角线的长度。用下式计算复合材料的 UMH 值:

$$H_{um} = 0.1891p/d^2$$

式中 H_{um} , p 和 d 分别是 UMH 值、所加载荷和两条压痕对角线的平均长度。

表 1 UMHT-3 的性能和实验参数

Table 1 Properties of UMHT-3 and selected work parameters

Item	Parameter
Load range	0.02~ 20 mN
Load in the present study p	5 mN
Rate of cross head down v_z	25 μm/s
Loading rate v_e	0.25 mN/s
Loading time t_n	15 s

2 实验结果与讨论

图 1 和图 2 分别是试样横截面的光学金相显微照片和压痕的 SEM 照片。

在一个单独的颗粒周围, 基体的超显微硬度随测试点离颗粒/基体界面的距离而变化(表 2)。显然, 颗粒附近的基体中存在一 TRSn 梯度, TRSn 随距界面距离的增大而快速衰减, 在距界面距离约等于颗粒半径(7 μm)时趋于稳定。因此, 由 TRSn 导致的基体硬化区域的宽度大约等于颗粒的半径, 这与一些理论计算结果是相吻合的^[9~ 11]。

由于颗粒粒度不均匀, 颗粒大小对颗粒周



图 1 热挤出态 SiC_p/LD2 复合材料横截面金相照片
Fig. 1 Optical morphology of as-extruded SiC_p/LD2 composites on cross section

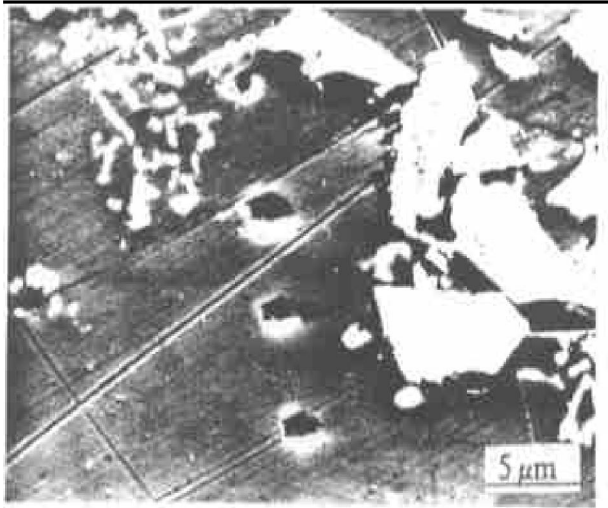


图 2 复合材料中压痕的 SEM 照片
Fig. 2 SEM graph of indentation in as-T6 SiC_p/LD2 composites

围基体的 UMH 分布有影响(表 3)。根据文献 [9] 的资料, 在 SiC 颗粒增强的 6061 铝合金复合材料中, 由 CTE 错配在基体内引发的塑性区尺寸可由下式决定:

$$r_d = r_1 \exp\{5/6 + 1/2(\sigma_y)_m \cdot [\rho - (E_m \alpha_m \Delta T)/(1 - 2\nu_m)]\}$$

式中 r_d , r_1 , $(\sigma_y)_m$, ρ , E_m , α_m , ν_m 和 ΔT 分别是基体塑性区半径、颗粒半径、基体剪切强度、内聚压、基体弹性模量、基体热膨胀系数 CTE、基体泊松比和降温区间。可见, 塑性区半径随颗粒半径增加而呈指数增加, 因此, 在距界面相同距离处, 大颗粒附近基体中的 UMH 大于小颗粒的。

表 2 单个颗粒(SiC_p/ 6061Al (as-extruded))
周围的 UMH 分布

Table 2 Ultra-microhardness distribution around
single particle in SiC_p/ 6061Al (as-extruded)

Position No.	$r/\mu\text{m}$	H_{um}/MPa
1	0.50	251.0
2	1.55	163.5
3	1.70	124.0
4	1.80	105.0
5	2.82	100.0
6	3.80	97.5
7	5.65	83.5
8	8.10	73.0
9	11.75	69.0
10	13.37	67.5
11	15.30	62.5

(r : distance from particle/ matrix interface)

表 3 不同尺寸颗粒(SiC_p/ 6061Al (as-extruded))
周围的 UMH 分布

Table. 3 Ultra-microhardness distribution around
particles with different sizes in
SiC_p/ 6061Al (as-extruded)

Particle size $/\mu\text{m}$	$r/\mu\text{m}$	H_{um}/MPa
15.44	4.90	111
	11.78	68.70
	13.38	67.80
	15.30	62.60
26.06	9.38	91.30
	13.38	87.40
	18.50	82.20
	21.75	80.00

颗粒形状对 UMH 分布的影响如表 4 所示。SiC_p/ LD2 复合材料的有限元分析^[10,11]结果表明,颗粒形状的不规则会导致其周围基体 TRSn 分布不均匀,在颗粒的尖角端有 TRSn 严重集中的现象,且其程度随颗粒尖锐角度的减小而增加。从表 4 可知,颗粒尖端附近的 UMH 较平直界面附近基体的 UMH 大许多,但随距界面距离的增大,这种差异变小,说明颗粒尖端的 TRSn 集中效应只在距界面很近的区域内较明显,这与我们的计算结果基本

表 4 不同形状颗粒周围的
UMH 分布状况

Table. 4 Ultra-microhardness distribution
around different shape particles

Condition	Particle shape	$r/\mu\text{m}$	H_{um}/MPa
As-extruded	Pointed	2.86	200.0
		9.32	91.6
		13.36	87.5
	Planar	2.84	100.6
		8.14	73.8
		13.36	67.6
As-T6	Pointed	0.78	384.3
		1.43	113.8
		10.75	77.0
	Planar	0.73	132.6
		1.72	81.5
		10.41	59.4

上是吻合的。

3 结论

- (1) 采用 UMHT-3 超显微硬度仪测试 SiC_p/ LD2 复合材料界面附近基体的超显微硬度值,可准确反映复合材料的微区力学性能;
- (2) 由于复合材料中存在的热残余应变会导致基体的应变硬化,因此用颗粒附近基体 UMH 值的变化可直观反映基体内 TRSn 的分布状况;
- (3) 基体 UMH 的大小随颗粒尺寸、距颗粒/ 基体界面的距离和颗粒形状的变化而变化,其规律与一些关于 TRSn 的计算结果相吻合。

REFERENCES

1 Sun Z M, Li J B, Wang Z G *et al.* Acta Metall, 1992, 40 (11): 2961.
2 Arsenault R J and Taya M. Acta Metall, 1987, 35 (3): 651.
3 Cottin J P and Coudere T T. J Mater Sci, 1991, 26 (11): 2985.
4 Arsenault R J, Wang L and Feng C R. Acta Metall Mater, 1991, 39 (1): 47.
5 Shi N and Arsenault R J. Annu Rev Mater Sci, 1994,

- 24: 321.
- 6 Davidson D L. Composites, 1993, 24 (3): 248.
- 7 Davidson D L. Metall Trans, 1991, 22A (1): 113.
- 8 Li H, Sun L Z, Li J B *et al.* Scrip Metall, 1996, 36 (12): 1503.
- 9 Lee E U. Metall Trans, 1992, 23A (8): 2205.
- 10 Qin S Y, Chen C R, Zhang G D *et al.* Mater Sci Eng, 1999, A272(2): 363.
- 11 Qin Shuyi(秦蜀懿), Wang Wenlong(王文龙) and Zhang Guoding(张国定). Acta Metall Sinica(金属学报), 1998, 34 (11): 1193.
- 12 Shi N, Wilner B and Arsenault R J. Acta Metall, 1992, 40 (11): 2841.
- 13 Cai X, Yang X Y and Zhou P N. J Mater Sci Lett, 1997, 16 (9): 741.
- 14 Chen Y and Zhang G D. Trans Nonferrous Met Soc China, 1996, 6 (4): 49.

Micro-Zone Mechanical Properties of SiC_p/LD2 Composites

Qin Shuyi, Liu Cheng, Chen Jiayi, Wang Wenlong, Zhang Guoding

State Key Lab of MMCs, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030

Abstract: UMHT-3 ultramicrohardness tester was used to measure the hardness of the matrix near the interface in SiC_p/LD2 composites. Because of thermal residual stress (TRSs) caused by the different coefficients of thermal expansion (ΔCTE) between the reinforcer and the matrix in a composite exceeds the yield strength of the matrix, there is a thermal residual strain (TRS_n) in the matrix near the interface resulting in strain-hardening of the matrix. Therefore, the change of ultramicrohardness can reflect the distribution of TRS_n in the matrix. Ultramicrohardness of the matrix near the interface varies with particle size, the distance from the interface and the sharpness of particle. The results are consistent with some theoretical calculations about distribution of TRS_n in composites.

Key words: metallic matrix composites; ultramicrohardness; thermal residual stress; thermal residual deformation

(编辑 张曾荣)