

# 压铸态 SiC<sub>w</sub>/6061Al 复合材料中弹性模量的不均匀性

Inhomogeneity of Elastic Modulus in the SiC<sub>w</sub>/6061Al Composites as Squeeze Cast

姜传海, 吴建生 (上海交通大学教育部高温材料及高温测试重点实验室, 上海 200030)

王德尊 (哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

JIANG Chuan-hai, WU Jian-sheng

(Key Laboratory for High Temperature Materials and Tests of Ministry of Education, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

WANG De-zun (School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**摘要:** 借助图象仪与扫描电镜联机系统, 测量压铸态 SiC<sub>w</sub>/6061Al 复合材料中的晶须取向分布。基于剪滞后模型及晶须的实际分布情况, 分析复合材料弹性模量的不均匀性。采用超声声速法, 测量复合材料的弹性模量。结果表明, 压铸态复合材料中晶须在垂直压铸方向具有一定择优取向性, 晶须体积分数越高其择优取向程度越明显, 从而造成复合材料各向弹性模量的不均匀性。试验结果与理论计算基本吻合。

**关键词:** 碳化硅晶须; 铝基复合材料; 晶须取向; 弹性模量; 超声波

中图分类号: TB331 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2002) 01-0025-04

**Abstract:** By using the system of image analyzer connected with scanning electron microscope, the whisker orientation in the SiC<sub>w</sub>/6061Al composite as squeeze cast was measured. According to the shear lag model and the actual distribution of whisker in composite, the inhomogeneity of elastic modulus in composite was analyzed. With the method of ultrasonic velocity, the elastic modulus of composite was measured. The results shown that the whiskers of composite are preferred orientation normal to the direction of squeeze cast. The higher the volume fraction of whisker, the more extent of preferred orientation of it, and the inhomogeneity of elastic modulus is mainly due to the difference of whisker distribution in composite. The elastic modulus of composite as squeeze cast from experiment is close to that from theoretical calculation.

**Key words:** SiC-whisker; Al-composite; whisker orientation; elastic modulus; ultrasonic wave

碳化硅晶须增强铝基复合材料(SiC<sub>w</sub>/Al) 具有高比弹性模量、高比强度及低热膨胀系数等优点, 可广泛应用于许多工业领域<sup>[1,2]</sup>。晶须的取向分布, 是影响复合材料弹性模量的主要因素, 历来都受到人们的重视。当增强体为定向排列分布时, 利用剪滞后模型可以理论计算复合材料的弹性模量<sup>[3,4]</sup>; 然而在实际压铸态复合材料中, 晶须的取向并非为定向排列, 给弹性模量的计算带来一定难度。由于晶须在不同方向的取向概率不同, 必然导致复合材料弹性模量的各向不均匀性, 在复合材料工程应用中应予以充分考虑。

本研究了利用改进的剪滞后模型, 结合晶须的实际取向分布, 分析压铸态 SiC<sub>w</sub>/6061Al 复合材料弹性模量的不均匀性。并利用超声声速方法测量了复合材

料不同方向的弹性模量, 并与理论计算结果进行了对照研究。

## 1 模型及分析

图 1 给出了复合材料中晶须 (SiC<sub>w</sub>) 与基体 (Al) 单元体模型, Z 轴为复合材料压铸方向, 为晶须取向角, 为复合材料中 OL 方向与 Z 轴之夹角。

当对图 1 单元体施加 OL 方向的应力时, 根据改进的剪滞后模型<sup>[5]</sup>, 存在以下等式:

$$w = \left[ E_w - \frac{E_w - E_m}{2 \cos^2 \theta} \frac{\sinh(ns)}{ns} \right] \cos^2 \theta \quad (1)$$

$$n = \{ 2E_m / [E_w (1 + \nu_m) \ln(1/f)] \}^{1/2} \quad (2)$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m \quad (3)$$

$$\varepsilon_{com} = [\varepsilon_w \cos^2(\alpha - \theta)]f + \varepsilon_m(1 - f) \quad (4)$$

式中,  $\varepsilon_{com}$  为单元体  $OL$  方向平均应力,  $\varepsilon_w$  晶须轴向应力,  $\varepsilon_m$  基体  $OL$  方向应力,  $\varepsilon_{com}$  单元体  $OL$  方向平均应变,  $f$  晶须体积分数,  $E_w$  晶须弹性模量,  $s$  晶须长径比,  $E_m$  基体弹性模量,  $\nu_m$  基体泊松比。

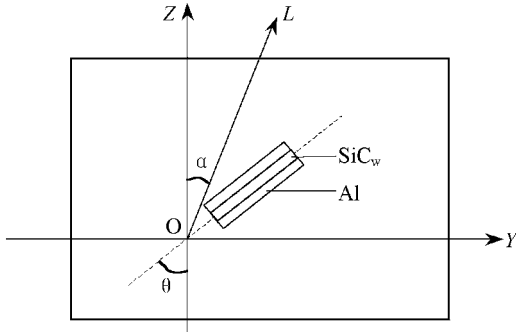


图1 复合材料中晶须 (SiC<sub>w</sub>) 与基体 (Al) 单元体模型

Fig. 1 Unit model of whisker (SiC<sub>w</sub>) and matrix (Al) in composite

结合式 (1) ~ (4), 图1 单元体  $OL$  沿方向的弹性模量为:

$$E_{com}^{com} = \frac{\sigma_{com}}{\varepsilon_{com}} = \left[ E_w - \frac{E_w - E_m}{2 \cosh(ns) - 1} \frac{\sinh(ns)}{ns} \right] \cos^4(\alpha - \theta)f + E_m(1 - f) \quad (5)$$

实际复合材料中晶须取向角存在一定分布范围, 为此定义晶须取向函数  $g(\theta)$ , 表示单位角区间晶须出现的概率。规定晶须取向函数满足归一化条件, 即:

$$\int_{-1/2}^{1/2} g(\theta) d\theta = 1 \quad (6)$$

整个复合材料沿  $OL$  方向的弹性模量为:

$$E_{com}^{com} = \int_{-1/2}^{1/2} \left\{ E_w - \frac{E_w - E_m}{2 \cosh(ns) - 1} \frac{\sinh(ns)}{ns} \right\} \cos^4(\alpha - \theta)f + E_m(1 - f) g(\theta) d\theta \quad (7)$$

因此, 利用式 (2) 及 (7) 并根据晶须的实际取向函数  $g(\theta)$  及长径比  $s$ , 即可计算出复合材料沿  $OL$  方向的弹性模量。

## 2 材料及试验

压力铸造法制备 SiC<sub>w</sub>/6061Al 复合材料, 包括制作晶须 (SiC<sub>w</sub>) 预制块及压铸复合材料两个过程<sup>[6]</sup>。预制块制作工艺为: 晶须清洗 加入溶胶 压制成形 烘干及烧结, 目的是得到具有一定强度且晶须分布均匀的预制块。压铸复合材料工艺: 预制块预热 浇注铝液 加压渗透 冷却至室温。所制备的复合材料晶

须体积分数分别为 16%, 25% 及 35%。

借助图象仪与扫描电镜联机系统, 对晶须取向角及长径比进行统计测量<sup>[7]</sup>, 取向角 规定为晶须与复合材料压铸方向 ( $Z$  轴) 之间的夹角, 最终确定晶须取向分布函数  $g(\theta)$  及平均长径比  $s$ 。利用超声声速仪及脉冲回波法, 测量复合材料横波及纵波超声声速。超声试验参数为换能器直径 5mm, 超声波频率 10MHz, 甘油耦合剂。

超声波横波声速 ( $s$ ) 及纵波声速 ( $L$ ) 与复合材料弹性模量 ( $E$ ) 的关系为<sup>[8]</sup>:

$$(s)^2 = E/[2(1 + \nu)] \quad (8)$$

$$(L)^2 = [E(1 - \nu)]/[(1 + \nu)(1 - 2\nu)] \quad (9)$$

式中,  $\rho$  为复合材料质量密度;  $\nu$  为复合材料泊松比。

由式 (8) 及 (9) 得到:

$$E = [3(L)^2 - 4(s)^2]/[(L)^2/(s)^2 - 1] \quad (10)$$

因此, 只要测得复合材料横波声速  $s$  及纵波声速  $L$ , 并且其质量密度 已知, 即可根据式 (10) 确定出复合材料的弹性模量。

## 3 结果及讨论

压铸态 SiC<sub>w</sub>/6061Al 复合材料中晶须取向函数  $g(\theta)$  的统计测量结果, 如图 2 所示。可以看出, 复合

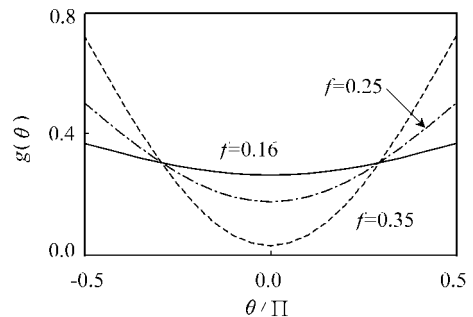


图2 压铸态 SiC<sub>w</sub>/6061Al 复合材料中晶须的实际取向函数

Fig. 2 Actual orientation function of whisker in the SiC<sub>w</sub>/6061Al composite as squeeze cast

材料中晶须具有一定择优取向性, 沿着  $Z$  轴 ( $\theta = 0$ ) 方向的晶须取向较少, 垂直于轴 ( $\theta = \pm 1/2$ ) 方向的晶须取向较多。对比图中曲线不难发现, 复合材料中晶须的体积分数越高, 则晶须择优取向越明显。在制造晶须预制块及压铸复合材料过程中, 由于施加了  $Z$  轴方向的压力, 促使晶须往垂直于  $Z$  轴的方向转动, 最终必然是晶须在垂直于  $Z$  轴的方向择优取向。复合材料晶须体积分数  $f$  越高, 制造预制块及压铸复合材料时所施加的压力就越大, 晶须的转动角度也越大, 因

此晶须的择优取向程度越明显。

图象分析结果还表明, 当复合材料中晶须体积分数为 0.16, 0.25 及 0.35 时, 晶须长径比  $s$  的平均值分别 16.5, 13.6 及 10.9, 即晶须体积分数越高则长径比越低。在制造晶须预制块及压铸复合材料过程中由于施加压力, 晶须折断是难以避免的, 晶须体积分数越高则制造预制块及压铸复合材料时所施加的压力就越大, 晶须的折断就越严重, 即晶须长径比越低。

利用式 (2) 及 (7), 结合图 2 中  $g(\cdot)$  数据及晶须平均长径比  $s$  的测量结果, 材料参数取  $E_w = 450\text{GPa}$ ,  $E_m = 70\text{GPa}$  及  $V_m = 0.33$ , 可计算出压铸态 SiC<sub>w</sub>/6061Al 复合材料弹性模量的分布情况, 如图 3 所示。由图 3 可以看出, 复合材料各方向的弹性模量都明显高于基体合金 (70GPa), 即复合材料在各方向都得到强化; 另外, 复合材料弹性模量具有明显的各向异性, 其中在  $\alpha = 0$  方向弹性模量最小, 在  $\alpha = \pm \pi/2$  方向弹性模量最大; 而且, 晶须体积分数越大则复合材料的平均弹性模量越大, 同时弹性模量各向异性程度更加明显。

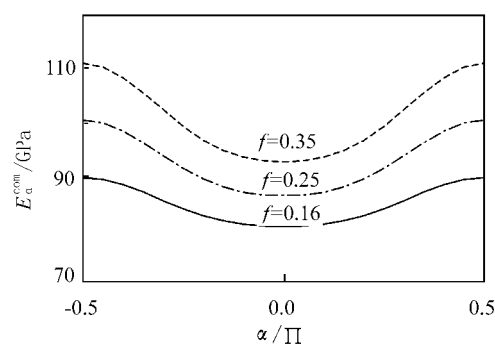


图 3 压铸态 SiC<sub>w</sub>/6061Al 复合材料中弹性模量的分布情况

Fig. 3 Distribution of elastic modulus in the SiC<sub>w</sub>/6061Al composite as squeeze cast

压铸态复合材料弹性模量的各向异性, 与晶须的取向分布差异有关; 在  $\alpha = 0$  方向晶须取向函数为最小, 此时大部分晶须与该方向之间夹角较大, 即载荷传递效应不如其它方向明显, 因此复合材料在该方向的弹性模量最小; 相反, 在  $\alpha = \pm \pi/2$  方向晶须取向函数为最大, 即载荷传递效应最明显, 因此复合材料在该方向的弹性模量最大。根据混合定律<sup>[9]</sup>, 晶须体积分数越高其承载应力就越大, 即复合材料平均弹性模量就越大。从晶须取向函数看, 晶须体积分数越高其择优取向程度越明显, 因此复合材料弹性模量的不均匀程度越明显。

测量复合材料弹性模量的常规方法是拉伸试验, 即通过测量起始拉伸曲线的斜率, 来确定复合材料的

弹性模量; 然而由于金属基复合材料的比例极限较低, 使用拉伸试验方法测量弹性模量不太可靠。采用超声波声速法, 可在不破坏复合材料的前提下测量其弹性模量。本工作经多次重复测量, 发现 SiC<sub>w</sub>/6061Al 复合材料超声声速测量标准偏差为  $L < 8\text{m/s}$  及  $s < 15\text{m/s}$ , 相应的弹性模量测量标准偏差为  $E < 0.5\text{GPa}$ , 即超声波方法的弹性模量测量标准偏差远低于拉伸试验法。

表 1 给出压铸态 SiC<sub>w</sub>/6061Al 复合材料超声声速及弹性模量的测量结果。表中复合材料超声声速与弹性模量遵循式 (10), 复合材料密度  $\rho = 2.8\text{g/cm}^3$ 。可以看出, 复合材料超声声速在不同方向存在明显的差异, 晶须体积分数越高则超声声速越大, 而且在不同方向超声声速的差异也越大。对比图 3 及表 1 中数据还可发现, 压铸态复合材料弹性模量的理论计算值与试验结果基本吻合。

表 1 压铸态 SiC<sub>w</sub>/6061Al 复合材料超声声速及弹性模量的测量结果

Table 1 Test results for the ultrasonic velocity and elastic modulus of the SiC <sub>w</sub> /6061Al composite as squeeze cast						
$f$	0.16		0.25		0.35	
	0	$\pi/2$	0	$\pi/2$	0	$\pi/2$
$s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3310.8	3502.4	3447.0	3710.0	3568.4	3929.3
$L/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	6194.0	6552.3	6448.8	6940.7	6675.9	7351.1
$E^{\text{com}}/\text{GPa}$	79.8	89.3	86.5	100.2	92.7	112.4

SiC<sub>w</sub>/Al 复合材料最大特点在于其性能的可设计性, 增加晶须体积分数可提高复合材料的整体性能, 同时晶须取向方式直接影响到复合材料性能的各向异性。在压铸态复合材料中, 晶须既非是定向排列, 也不是完全混乱分布, 其各个方向虽然都表现出强化效应, 但不同方向的强化效应存在明显差异。因此在压铸态 SiC<sub>w</sub>/Al 复合材料的工程应用中, 必须考虑其性能的各向异性, 以充分发挥复合材料的性能潜力。

4 结论

压铸态 SiC<sub>w</sub>/6061Al 复合材料中晶须在垂直压铸方向具有一定择优取向性, 晶须体积分数越高这种择优取向程度越明显。根据剪滞后模型及晶须的实际取向分布, 理论分析复合材料的弹性模量, 发现压铸态复合材料弹性模量存在明显的不均匀性。晶须体积分数越高, 复合材料弹性模量的不均匀性越明显。利用超声声速法, 可以精确测定复合材料的弹性模量, 试验结果与理论计算基本吻合。

## 参考文献

- [1] M D Huda, M S J Hashmi and M A Ei-Baradie. MMCs: Materials manufacturing and mechanical properties [J]. Key Engineering Materials, 1995, 104-107 (Part I): 37-64.
- [2] D J Lloyd. Particle reinforced aluminum and magnesium matrix composites [J]. International Materials Reviews, 1994, 39 (1): 1-23.
- [3] M Taya and R J Arsenault. A Comparison between a Shear Lag Type Model and an Eshelby Type Model in Predicting the Mechanical Properties of a Short Fiber Composite [J]. Scripta Metallurgica, 1987, 21: 349-354.
- [4] V M Karbhari and D J Wilkins. An Engineering Modification to the Shearlag Model as Applied to Whisker and Particulate Reinforced Composites [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, 25: 707-712.
- [5] 姜传海, 王德尊, 姚忠凯. 加载情况下  $\text{SiC}_w/\text{Al}$  复合材料中基体的实际承载系数 [J]. 复合材料学报, 2000, 17 (3): 42-45.
- [6] T W Clyne and P J Withers. An Introduction to Metal Matrix Composites [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 1993: 322-334.
- [7] 姜传海, 王德尊, 张文龙, 姚忠凯.  $\text{SiC}_w/\text{Al}$  复合材料中  $\text{SiC}_w$  的空间取向函数 [J]. 理化检验, 1999, 35 (10): 435-438.
- [8] E P Papadakis. Ultrasonic Velocity and Attenuation-Measurement Methods with Scientific and Industrial Applications [M]. New York, USA: Academic Press, 1976: 1285-1292.
- [9] R J Arsenault. Strengthening of Aluminum Alloy 6061 by Fiber and Platelet Silicon Carbide [J]. Materials Science and Engineering, 1984, 64: 171-181.

收稿日期: 2000-11-17

作者简介: 姜传海 (1963-), 男, 博士后, 现从事复合材料及 X 射线分析工作, 联系地址: 上海交通大学材料学院 X 光分析室 (200030)。

\*\*\*\*\*  
(上接第 24 页)

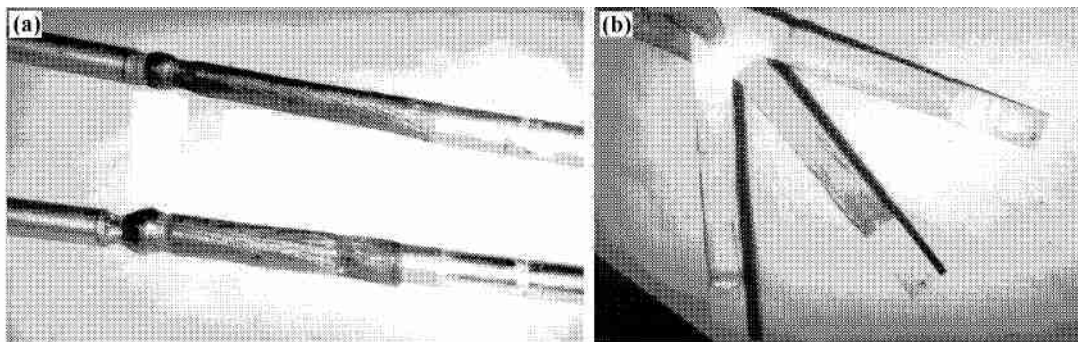


图 4 高频-超音频双频电磁成形的扁椭圆形样件 (a) 和弯月截面样件 (b)

Fig. 4 Elliptical (a) and meniscus (b) cross section aluminum sample confined by high-audio dual-frequency electromagnetic shaping

物理量和与两频率有关的改变方向和大小物理量叠加组合而成。如它们共同周期时间比流体机械性的弛豫时间短时, 双频电磁成形的物理量就为两个单独频率电磁场产生的物理量叠加之和, 双频问题就可转化为单频问题进行分析计算。

(3) 利用高频-超音频双频电磁成形方案成功地实现了扁椭圆和弯月截面复杂形状的金属熔体双频电磁成形, 说明利用双频电磁成形这门技术来获得完全无污染熔炼和成形的复杂形状构件是可能的。

## 参考文献

- [1] Muck O. German Patent: No. 422004, 1923, 10: 30.
- [2] Okress E C, et al. Electromagnetic levitation of solid and molten metals [J]. J Appl Phys, 1952, 23 (5): 525.
- [3] Getselv Z N. Casting in an electromagnetic field [J]. J Metals, 1971, 23 (10): 38.
- [4] Li B Q, Evans J W, Cook D P. An improved mathematical model for electromagnetic casters and testing by a physical model [J]. Metall Trans B, 1991, 21B: 121.
- [5] Vives C, Ricou R. Experimental study of continuous electromagnetic casting of aluminum alloys [J]. Metall Trans B, 1985, 16B: 377.
- [6] 沈军, 陈光, 李建国, 傅恒志. 板状坯件的电磁约束成形 [C]. 材料研究与应用新进展 (下卷). 北京: 化学工业出版社, 1999, 939.
- [7] Lavers J D. Computational methods for the analysis of molten metal electromagnetic confinement systems [J]. ISIJ International, 1989, 29 (12): 993.
- [8] 李双明. 金属熔体的双频电磁成形过程研究 [D]. 西北工业大学博士学位论文, 1999.
- [9] Sneyd A D, Moffatt H K. The fluid dynamics of the levitation melting process [J]. J Fluid Mech, 1982, 117 (1): 45.
- 基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目 (59995440); 航空基金资助项目 (97H53099)
- 收稿日期: 2000-08-15
- 作者简介: 李双明 (1971-), 男, 工学博士, 主要从事新型金属材料的冶炼和成形研究工作, 联系地址: 西北工业大学凝固技术国家重点实验室 (710072)。