复合材料学报 第17卷 第3期 8月 2000年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 17 No. 3 August 2000

文章编号: 1000-3851(2000)03-0042-04

加载情况下SiCw/Al复合材料中基体的实际承载系数

姜传海[1], 王德尊[2], 姚忠凯[2]
(1. 上海交通大学 国家教委高温材料及高温测试开放实验室, 上海 200030;
2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 根据剪滞后模型及复合材料中晶须的实际分布状况, 分析了基体的承载系数。结合X射线应力测量原理, 建立出基体承载系数的X射线应力测量方法。计算表明, 压铸态及挤压态SiCw体积分数为20%的6061Al复合材料中基体的承载系数分别为0.783及0.569。试验证实, 两种复合材料基体承载系数分别为0.742及0.557。试验结果与理论计算基本吻合。

关键词: SiCw/Al; 晶须取向; 剪滞模型; X射线应力测量; 承载系数
中图分类号: TB 331 **文献标识码**: A

FACTOR OF ACTUAL BEARING STRESS OF MATRIX IN SiCw/Al COMPOSITES UNDER LOADING STRESS

JIANG Chuan-hai[1], WANG De-zun[2], YAO Zhong-kai[2]
(1. Open Laboratory of State Education Ministry for High Material and Testing, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;
2. School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: According to the shear lag model and the actual distribution of whisker in composites, the bearing stress factors of matrix in composites was analyzed. By using the principle of X-ray stress measurement, the bearing stress factors of matrix in composites was measured. The calculation result shows that the bearing stress factors of matrix in squeeze casting and extruded vol. 20% SiCw/6061Al composites were 0.783 and 0.569, respectively. The experimental result confirmed that the bearing stress factors of matrix in two kinds of composites were 0.742 and 0.557, respectively. The bearing stress factor of matrix in composites from experiment was close to that from calculation.

Key words: SiCw/Al; whisker's orientation; shear lag model; X-ray stress measurement; matrix's bearing stress factor

载荷传递力学强化效应, 是金属基复合材料的主要强化机制之一[1,2]。人们对此已进行了大量的理论分析或数值计算工作, 然而无论是理论分析还是数值计算, 均对复合材料中增强相的形状及其分布作一定的简化处理, 分析结果与实际情况存在一定差距。因此须根据增强相的实际分布状况, 分析复合材料中基体的承载系数, 特别是有必要通过试验手段, 直接测量复合材料基体承载系数。其中利用X射线衍射技术[3~5], 可以测量复合材料中基体所受的平均应力, 是研究金属基复合材料基体受力情况的有效试验方法。

1 模型及分析

在图1中, 复合材料沿y方向施加拉应力(σ_{22}^{comp})。假定晶须(SiCw)为圆柱体形状, 晶须在基体(Al)中随机取向分布。选择一个单元体为分析对象, 晶须圆柱体半径a, 单元体半径b, 单元体长度$2L$, 单元体取向角α。

为便于分析, 建立图中$x'y'z'$坐标系, 晶须轴向为y'轴, 晶须中心为坐标原点($y'=0$)。根据剪滞后模型分析结果[6], 晶须y'轴向应力通解为

收稿日期: 1999-07-01; 收修改稿日期: 1999-09-13
作者简介: 姜传海(1963), 男, 博士后, 主要从事复合材料方面的研究。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

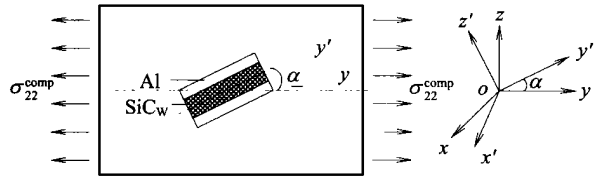

图 1 复合材料中晶须取向方式及单元体选择

Fig. 1 The orientation of whisker and the unit of composites

$$\sigma_{y'}^{f} = E_c \epsilon_{y'}^{comp} + A \sinh(ny'/a) + B \cosh(ny'/a) \tag{1}$$

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

式中: $\sigma_{y'}^{f}$ 为晶须 y' 轴向应力; $\epsilon_{y'}^{comp}$ 为复合材料 y' 方向应变; E_c 为晶须弹性模量; E_m 及 ν_m 为基体弹性模量及泊松比; $f = a^2/b^2$ 为晶须体积分数; A 及 B 为待定系数。

晶须根部应力取为晶须最大应力 $(\sigma_{y'}^{f}|_{y'=0})$ 与基体平均应力 $(E_m \epsilon_{y'}^{comp})$ 之和的一半[7], 即晶须根部边界条件为

$$\sigma_{y'}^{f}|_{y'=\pm L} = (\sigma_{y'}^{f}|_{y'=0} + E_m \epsilon_{y'}^{comp})/2 = [(E_c + E_m)\epsilon_{y'}^{comp} + B]/2 \tag{3}$$

带入式(1), 求得晶须 y' 轴向应力表达式

$$\sigma_{y'}^{f} = \epsilon_{y'}^{comp}\left[E_c - \frac{E_c - E_m}{2\cosh(ns) - 1}\cosh(ny'/a)\right] \tag{4}$$

式中, $s = L/a$ 是晶须长径比。晶须平均应力为

$$\overline{\sigma_{y'}^{f}} = \frac{1}{2L}\int_{-L}^{L}\sigma_{y'}^{f}\,dy' = \epsilon_{y'}^{comp}\left[E_c - \frac{E_c - E_m}{2\cosh(ns) - 1}\cdot\frac{\sinh(ns)}{ns}\right] \tag{5}$$

复合材料在 y 方向应变为 ϵ_{22}^{comp}, 与 y' 方向应变 $\epsilon_{y'}^{comp}$ 之关系为

$$\epsilon_{y'}^{comp} \approx \epsilon_{22}^{comp}\cos^2\alpha \tag{6}$$

带入式(5)得到

$$\overline{\sigma_{y'}^{f}} = \epsilon_{22}^{comp}\cos^2\alpha\left[E_c - \frac{E_c - E_m}{2\cosh(ns) - 1}\cdot\frac{\sinh(ns)}{ns}\right] \tag{7}$$

根据图 1 中的几何关系, 单元体在 y 方向的应力平衡关系为

$$(\overline{\sigma_{y'}^{f}}\pi a^2)\cos\alpha + \overline{\sigma_{22}}\frac{\pi(b^2 - a^2)}{\cos\alpha} = \sigma_{22}^{comp}\frac{\pi b^2}{\cos\alpha} \tag{8}$$

式中: $\overline{\sigma_{22}}$ 为基体在 y 方向的平均应力; σ_{22}^{comp} 是复合材料在 y 方向的加载应力。考虑到晶须体积分数 $f = a^2/b^2$, 式(8)变为

$$(\overline{\sigma_{y'}^{f}}\cos^2\alpha)f + \overline{\sigma_{22}}(1 - f) = \sigma_{22}^{comp} \tag{9}$$

可以认为

$$\overline{\sigma_{22}} \approx E_m \epsilon_{22}^{comp} \tag{10}$$

由式(7)、式(9)及式(10), 得到

$$\epsilon_{22}^{comp} = \sigma_{22}^{comp}/[E_m(1 - f) + E^* f\cos^4\alpha] \tag{11}$$

$$E^* = E_c - \frac{E_c - E_m}{2\cosh(ns) - 1}\cdot\frac{\sinh(ns)}{ns} \tag{12}$$

结合式(10)及式(11), 基体承载系数为

$$R_2 = \overline{\sigma_{22}}/\sigma_{22}^{comp} = E_m/[E_m(1 - f) + E^* f\cos^4\alpha] \tag{13}$$

通常, 晶须取向角存在一定分布范围 $(\alpha_{min} \le \alpha \le \alpha_{max})$, 为此定义晶须取向概率函数 $g(\alpha)$, 表示单位 α 角区间晶须出现的概率。规定 $g(\alpha)$ 满足归一化条件。因此复合材料基体承载系数的普遍表达式如下:

$$R_2 = E_m\Big/\left[E_m(1 - f) + \left(\int_{\alpha_{min}}^{\alpha_{max}} E^* \cdot g(\alpha)\cdot\cos^4\alpha\cdot d\alpha\right) f\right] \tag{14}$$

2 试验原理

图 2 给出 SiCw/Al 复合材料拉伸试样形状及 X 射线应力测试几何关系, 图中试样沿 y 方向施加单向拉应力 σ_{22}^{comp}。在拉伸变形过程中, 尽管复合材料整体上承受的是单向拉应力, 但在基体中则表现为三向应力状态[8,9]。

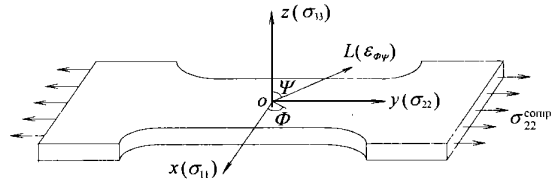

图 2 拉伸试样形状及 X 射线应力测试几何关系

Fig. 2 The configuration of tension specimens and the geometric relation in X-ray stress measurement

如果变形处于弹性阶段, 则基体中 y 方向应力 σ_{22} 与复合材料外载应力 σ_{22}^{comp} 呈线性关系, 即:

$$\sigma_{22} = \sigma_{22}^{0} + \Delta\sigma_{22} = \sigma_{22}^{0} + R_2\sigma_{22}^{comp} \tag{15}$$

式中: σ_{22}^{0} 为加载前基体 y 方向残余应力; $\Delta\sigma_{22}$ 为加载后应力改变量。

由式(15)得到拉伸方向的基体承载系数

$$R_2 = \partial\sigma_{22}/\partial\sigma_{22}^{comp} \tag{16}$$

根据 X 射线三向应力测试原理[10], y 方向应力可表示为

$$\sigma_{22} = K\left[S'(2\theta_{\Psi=0} - 2\theta_0) -\right.$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$S''\frac{\partial(2\theta_{\Phi=0})}{\partial\sin^2\Psi} - (S''-1)\frac{\partial(2\theta_{\Phi=90})}{\partial\sin^2\Psi}\Bigg] \tag{17}$$

$$\left.\begin{aligned} S' &= (1+\nu_m)/(1-2\nu_m) \\ S''/2 &= -\nu_m/(1-2\nu_m) \end{aligned}\right\} \tag{18}$$

式中: $2\theta_{\Phi\Psi}$是复合材料存在应力时基体(Al)衍射角; $2\theta_0$ 是基体无应力时衍射角; $\nu_m = 0.33$ 是基体泊松比; $K = -92$ MPa/(°)是基体X射线应力常数。

将式(17)带入式(16), 得到

$$R_2 = K\left\{S'\frac{\partial(2\theta_{\Psi=0})}{\partial\sigma_{22}^{comp}} - S''\frac{\partial[\partial(2\theta_{\Phi=0})/\partial\sin^2\Psi]}{\partial\sigma_{22}^{comp}} - (S''-1)\frac{\partial[\partial(2\theta_{\Phi=90})/\partial\sin^2\Psi]}{\partial\sigma_{22}^{comp}}\right\} \tag{19}$$

式(19)说明, 只要通过X衍射方法测得复合材料在不同外载应力 σ_{22}^{comp} 作用时基体的 $2\theta_{\Psi=0}$, $\partial(2\theta_{\Phi=0})/\partial\sin^2\Psi$ 及 $\partial(2\theta_{\Phi=90})/\partial\sin^2\Psi$ 值, 并绘制相应的 $2\theta_{\Psi=0}\sim\sigma_{22}^{comp}$, $\partial(2\theta_{\Phi=0})/\partial\sin^2\Psi\sim\sigma_{22}^{comp}$ 及 $\partial(2\theta_{\Phi=90})/\partial\sin^2\Psi\sim\sigma_{22}^{comp}$ 曲线, 确定各曲线的斜率, 根据式(19)即可计算出拉伸方向的基体承载系数。

3　试验过程

选择压铸态及挤压态SiCw 体积分数为20%的6061Al复合材料。挤压温度450℃, 挤压比17∶1。板状试样有效长度20 mm, 厚度1.2 mm, 有效宽度6 mm。压铸态复合材料的取样方向垂直于压铸方向, 挤压态复合材料取样方向平行于挤压方向。所有试样都经500℃退火, 以确保各试样具有相同状态, 便于试验对比。

借助Camscan-4扫描电镜与Magiscan-2A 图像仪联机系统, 以试样拉伸轴为参照方向, 对复合材料晶须取向进行统计测量, 每个试样所测晶须不少于300根。确定晶须取向概率及长径比与其取向角的关系。

利用卧式拉伸装置及X-300型X射线应力仪, 仪器测量参数为: 管电压23 kV, 管电流6 mA, Cr靶 K_α 辐射, 衍射面Al(222), 辐射面积4 mm×4 mm, 时间常数2 s, 扫描速度3(°)/min, 2发散光栏。

4　结果及讨论

4.1　基体承载系数计算值

SiCw 体积分数为20%的6061Al复合材料晶须取向概率及长径比与取向角之关系, 如图3所示。压铸态复合材料晶须取向覆盖整个 $0\le\alpha\le0.5\pi$ 区间, 但并非是完全混乱分布, 晶须在拉伸方向($\alpha=0$)略有择优取向性; 压铸态复合材料晶须长径比分布范围为 $10.8\le s\le15.1$, 而且晶须取向角越大则长径比越小。挤压态复合材料晶须取向角分布范围为 $0\le\alpha\le0.15\pi$, 晶须在拉伸方向($\alpha=0$)具有明显择优取向性; 挤压态复合材料晶须长径比分布范围为 $3.9\le s\le6.3$, 即明显小于压铸态复合材料, 而且晶须取向角越大则长径比越小。

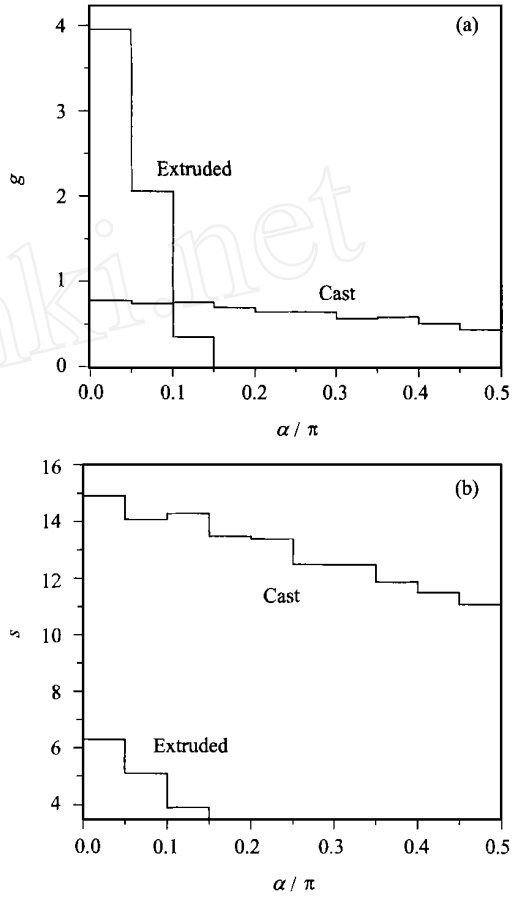

图3　SiCw 体积分数为20%/6061Al晶须取向概率 g 及长径比 s 与取向角 α 的关系

Fig. 3　The orientation's probability g and aspect ratio s of whisker in vol. 20% SiCw/6061Al composites vs the angle whisker's orientation α

复合材料基体参数取 $E_m = 70$ GPa 及 $\nu_m = 0.33$, 晶须参数取 $E_c = 450$ GPa 及 $\nu_c = 0.17$, 晶须体积分数 $f = 0.2$, 结合图3中晶须取向概率及长径比与取向角之关系, 根据式(2)、式(12)及式(14)计算基体相承载系数。计算结果为压铸态复合材料基体承载系数 $R_2 = 0.783$, 挤压态复合材料基体承载系数 $R_2 = 0.569$。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4.2 基体承载系数试验值

SiCw 体积分数为 20% 的 6061Al 复合材料拉伸应力 σ_{22}^{comp} 与基体 $2\theta_{\Psi=0}$ 及 $\partial(2\theta)/\partial\sin^2\Psi$ 的关系曲线, 如图 4 所示。图中表明, 压铸态及挤压态复合材料 $2\theta_{\Psi=0}\sim\sigma_{22}^{comp}$ 斜率分别为 1.22×10^{-3} 及 1.50×10^{-3}, $\partial(2\theta_{\Psi=0})/\partial\sin^2\Psi\sim\sigma_{22}^{comp}$ 斜率为 -1.03×10^{-3} 及 -6.44×10^{-4}, $\partial(2\theta_{\Psi=90})/\partial\sin^2\Psi\sim\sigma_{22}^{comp}$ 斜率为 -6.19×10^{-3} 及 -5.78×10^{-3}, 由式(19)得到两种复合材料基体承载系数试验值分别为 0.742 及 0.557。对照后发现, 理论计算与试验值基本吻合。

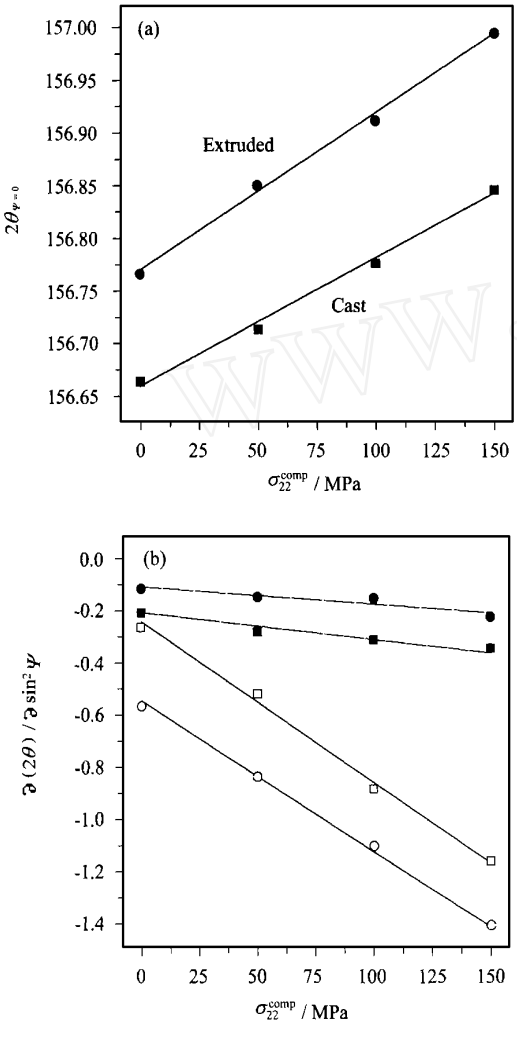

图 4 SiCw 体积分数为 20%/6061Al 拉伸应力 σ_{22}^{comp} 与基体 $2\theta_{\Psi=0}$ 及 $\partial(2\theta)/\partial\sin^2\Psi$ 关系

Fig. 4 The tensile stress σ_{22}^{comp} of vol. 20% SiCw/6061Al composites *vs* matrix's $2\theta_{\Psi=0}$ and $\partial(2\theta)/\partial\sin^2\Psi$

5 结 论

剪滞后模型是分析短纤维复合材料力学问题的有效手段, X 射线衍射方法可以测量复合材料基体相的实际受力情况。根据晶须实际取向概率函数及长径比与取向角之关系, 压铸态及挤压态 SiCw 体积分数为 20% 的 6061Al 复合材料中基体承载系数的计算值分别为 0.783 及 0.569; 本文试验结果证实, 两种复合材料基体的承载系数分别为 0.742 及 0.557, 即试验结果与理论计算基本吻合。复合材料基体相承载系数不但与两相弹性模量的差异有关, 同时还受到晶须取向分布及长径比的影响。

参考文献:

[1] Taya M, Lulay K E, Lloyd D J. Strengthening of a particulate metal matrix composite by quenching [J]. *Acta Metall Mater*, 1991, 39(1): 73-87.

[2] Liauo C S, Huang J C. Strengthening effects in AC8A/Al_2O_3 short-fiber composites as a function of temperature and strain rate [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1997, 28A: 1859-1869.

[3] Sun Z M, Li J B, Wang Z G, *et al*. Residual stress in silicon carbide particulate reinforced aluminum composites [J]. *Acta Metall Mater*, 1992, 40(11): 2961-2966.

[4] Jiang C H, Wang D Z, Yao C K. The effective stress and yield strength of matrix in SiCw/Al composites [J]. *J Mater Sci Lett*, 1999, 18: 901-903.

[5] Noyan I C, Cohen J B. Residual stress measurement by diffraction and interpretation [M]. New York: Springer-Verlag, 1987. 117-162.

[6] Clyne T W, Withers P J. An introduction to metal matrix composites [M]. Cambrige: Cambridge University Press, 1993. 20-25.

[7] Clyne T W. A simple development of the shear lag theory appropriate for composites with a relatively small modulus mismatch [J]. *Mater Sci & Eng*, 1989, A 122: 183.

[8] Levy A, Papazian J M. Tensile properties of short fiber-reinforced SiC/Al composites: Part II. Finite-element Analysis [J]. *Metallurgical Transactions*, 1990, 21A: 411-420.

[9] Christman T, Needleman A, Suresh S. An experimental and numerical study of deformation in metal-ceramic composites [J]. *Acta Metall*, 1989, 37(11): 3029-3050.

[10] 孙正明, 李家宝, 王中光, 等. 三维残余应力的 X 射线平行光束法测量[J]. 理化检验, 1992, (2), 38-41.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net