

热挤压工艺参数对挤压铸造 SiC_w/L3 复合材料组织和性能的影响^①

张文龙 王德尊 姜传海 丁冬雁 姚忠凯

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要 研究了挤压比和挤压温度对挤压铸造 SiC_w/L3 复合材料组织和性能的影响。结果表明, 当挤压温度升高时, 晶须沿挤压方向定向排列程度基本未变, 而晶须的折断程度则减弱, 导致复合材料的抗拉强度提高; 当挤压比增大时, 晶须沿挤压方向定向排列程度增大, 晶须的折断程度也增大, 这两个决定强度的相反过程造成了复合材料的抗拉强度在挤压比为 18: 1 时出现最大值。用修正的混合法则预测挤压态复合材料强度时, 必须增大基体对强度贡献部分的系数 c^* 。

关键词 SiC_w/Al 复合材料 热挤压 组织 抗拉强度

中图法分类号 TG111.7

非连续增强金属基复合材料(MMCs)由于增强体的存在, 其强度和刚度较之基体有了较大的提高, 同时由于增强体体积分数的可调性可以实现性能的可调, 因此作为结构材料具有较大的发展前途, 尤其是 SiC_w/Al 复合材料由于其高的比强度和高的比模量而备受重视^[1-4]。

对于 SiC_w/Al 复合材料而言, 为了达到最大的复合材料强化效果, 需使 SiC_w 晶须尽可能地长并沿同一方向定向排列。因此高温下的热挤压、锻造、轧制等方法经常被用于使 SiC_w 晶须实现定向排列的目的, 其中热挤压是最常使用的方法^[5-8]。然而热挤压在使 SiC_w 实现定向排列的同时, 却导致了 SiC_w 的严重折断, 减小了 SiC_w 的长径比, 从而削弱了 SiC_w 的增强效果。因此使 SiC_w 晶须的定向排列和折断能够有机地配合, 进而达到最大限度地发挥 SiC_w/Al 复合材料强度的目的, 是一个十分有意义的课题。本文的研究从挤压工艺参数入手, 揭示了晶须取向和折断与复合材料性能间的关系。

1 实验材料与方法

SiC_w/L3 复合材料用挤压铸造法制备。晶须体积分数为 15%, 铸态 SiC_w/L3 复合材料中晶须的平均长度约为 18 μm, 平均长径比为 20。

挤压实验在 400 t 油压机上进行, 挤压速度为 4 mm/s; 挤压比分别为 9: 1, 18: 1 和 25: 1。晶须长度、长径比及取向的测定采用英国 MAGISCAN 2A 图像分析仪。晶须长度和长径比测定方法如下: 在 SiC_w/L3 复合材料挤压棒上截取样品放入稀盐酸中, 将铝基体溶解掉, 滤取其中的 SiC_w, 然后拍晶须的 SEM 照片, 再用图像分析仪测定照片上晶须的长度和长径比。晶须取向是直接取挤压棒组织 SEM 照片在图像分析仪上测定。拉伸试验在 Instron 电子拉伸试验机上进行, 拉伸速度 0.5 mm/min。沿挤压棒的纵向取拉伸试样, 以保证拉伸过程中晶须分布的主方向与拉伸轴平行。

① 收稿日期: 1998-10-05; 修回日期: 1998-12-04 张文龙, 男, 33 岁, 博士

2 实验结果与讨论

2.1 挤压工艺参数对复合材料组织的影响

2.1.1 挤压比对组织的影响

图 1 为挤压比分别为 9: 1, 18: 1 和 25: 1 条件下 550 ℃挤压后挤压棒的组织。可见, 挤压比越大晶须沿挤压方向的定向排列程度和折断程度越大。图 2 为挤压棒中晶须取向分布直方图。为了定量地表示晶须取向的变化, 这里引用取向因子^[9, 10], 其值为

$$c_0 = \int_0^{\pi/2} g(\theta) \cos \theta d\theta \cdot \int_0^{\theta_0} g(\theta) \cos^3 \theta_0 d\theta \cdot$$

$$\int_0^{\theta_0} (1 - k/\cos \theta) g(\theta) d\theta \tag{1}$$

式中 $g(\theta)$ —— 纤维方向的概率密度函数;
 θ —— 晶须与拉伸轴之间的夹角;
 k —— 临界区系数;
 θ_0 —— 桥接纤维临界角;

在 $g(\theta)$ 满足

$$\int_0^{\pi/2} g(\theta) d\theta = 1$$

的条件下, c_0 越大晶须定向排列的程度也越大。根据图 2 算出的 c_0 值列于表 1, 可见, 挤压比增大 c_0 也增大; 挤压比在 9: 1 到 18: 1 间 c_0 增加较快, 18: 1 到 25: 1 间增加减慢, 说明随

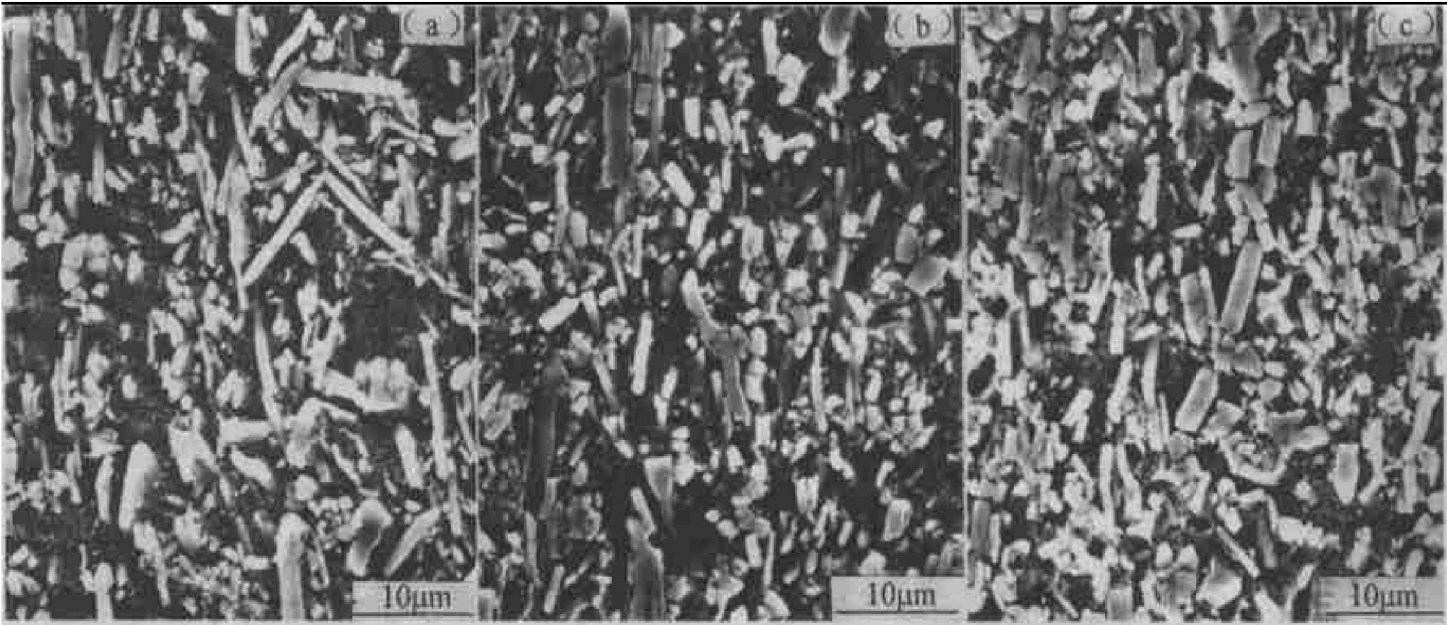


图 1 不同挤压比下挤压棒的 SEM 照片

Fig. 1 SEM photographs of extruded bars with different extrusion ratios
(a) —9: 1; (b) —18: 1; (c) —25: 1

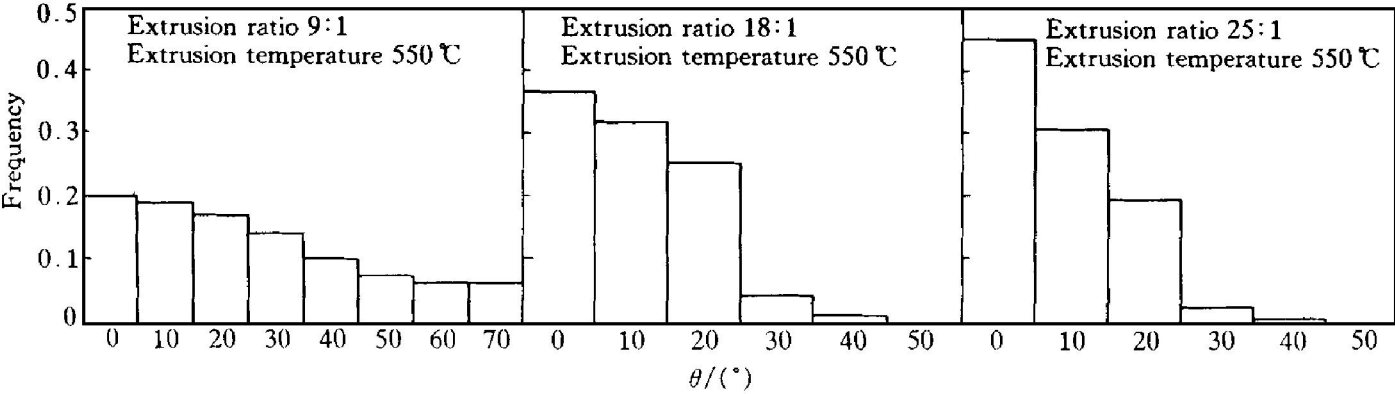


图 2 挤压棒中晶须取向随挤压比的变化

Fig. 2 Variation of whiskers' alignment with extrusion ratio in extruded bars

挤压比增大, 晶须定向排列程度的增加速率减小。

表1 不同挤压比下的 c_0

Table 1 Alignment factor c_0 at different extrusion ratios

Extrusion ratio	9: 1	18: 1	25: 1
c_0	0.559	0.887	0.97

图3为挤压棒中晶须长径比与挤压比关系曲线。由图3可知, 经挤压后晶须平均长径比均小于9, 说明挤压过程中晶须折断极其严重, 而且挤压比加大晶须折断速率也加大。

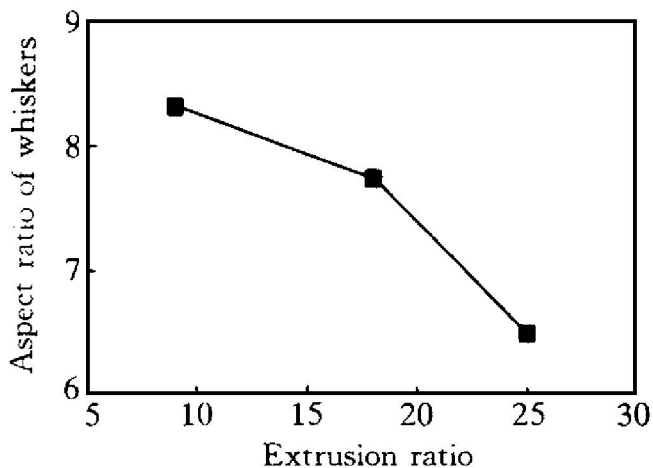


图3 挤压棒中晶须长径比随挤压比的变化

Fig. 3 Variation of whiskers' aspect ratio with extrusion ratio in extruded bars

2.1.2 挤压温度对组织的影响

图4(a), (b)及图1(a)为不同温度下挤压时 SiCw/L3 复合材料挤压棒 SEM 照片。图5及图2(a)示出了 SiCw/L3 复合材料不同温度下晶须取向分布直方图。由图5及图2(a)和式(1)计算 c_0 列于表2, 可见, 随挤压温度的提高, c_0 基本上保持不变; 即随挤压温度提高 SiCw 沿挤压方向的定向排列程度基本保持不变。图6示出了平均长径比随挤压温度的变化情况, 可见, 随着挤压温度的升高挤压棒中 SiCw 平均长径比增大。说明晶须折断程度随挤压温度的升高而减小。因此晶须取向对挤压温度不敏感, 而晶须折断对挤压温度较敏感。

2.2 挤压工艺参数对性能的影响

表2 不同挤压温度下的 c_0

Table 2 Alignment factor c_0 at different extrusion temperatures

Extrusion temperature/ °C	520	550	580
c_0	0.556	0.559	0.567

2.2.1 挤压比对性能的影响

由实测的 SiCw/L3 复合材料纵向拉伸强度随挤压比的变化情况知拉伸强度在挤压比为 18: 1 时出现了最大值。说明 SiCw/L3 复合材料的强度并不随挤压比增加而单调增加。这是由于挤压过程中存在决定强度的两个相反的过程, 即晶须折断和定向排列。

对于短纤维或晶须增强的非连续增强 MMCs, 预测其强度的修正混合法则^[11] (ROM) 可表示为

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} \cdot \varphi_f \cdot F(l/\bar{l}) \cdot c_0 + c^* \cdot \sigma_m (1 - \varphi_f) \quad (2)$$

而

$$F(l/\bar{l}) = \begin{cases} 1 - l/2\bar{l} & (l > l_c) \\ \bar{l}/2l_c & (l < l_c) \end{cases} \quad (3)$$

式中 σ_{cu} ——复合材料的抗拉强度;

σ_{fu} ——晶须的抗拉强度;

σ_m ——复合材料断裂时基体抗力, 可近似认为是基体的抗拉强度;

φ_f ——晶须的体积分数;

c_0 ——晶须取向分布的取向因子, 平面混乱分布时为 3/8, 空间混乱分布为 1/5;

$\bar{l}$ ——晶须的平均长度;

l_c ——晶须的临界长度, $l_c = d\sigma_{fu}/2\tau$;

c^* ——考虑基体影响的经验常数, 基体为铝合金时 $c^* = 1$, 基体为纯铝时 $c^* = 2^{1/3}$ 。

从式(2)的物理意义看, 可把 $F(l/\bar{l}) \cdot c_0$ 视为增强相对基体的增强系数, 基体相同时, 该系数越大, 增强效果越好。增强系数由 $F(l/\bar{l})$ 和 c_0 决定。由式(3)可知, $F(l/\bar{l})$ 随晶须平均长度 $\bar{l}$ 的增大而增大, 而晶须取向分

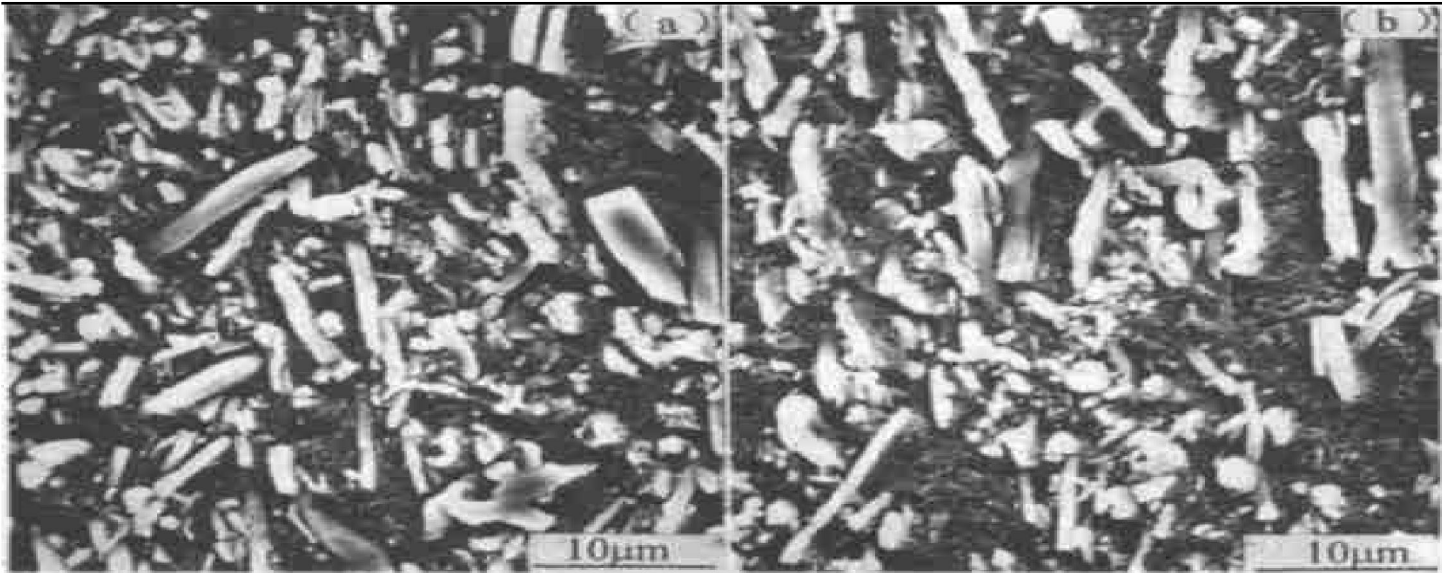


图 4 不同挤压温度下挤压棒的 SEM 照片

Fig. 4 SEM photographs of extruded bars with an extrusion ratio of 9: 1 at different temperatures
(a) -520 ℃; (b) -580 ℃

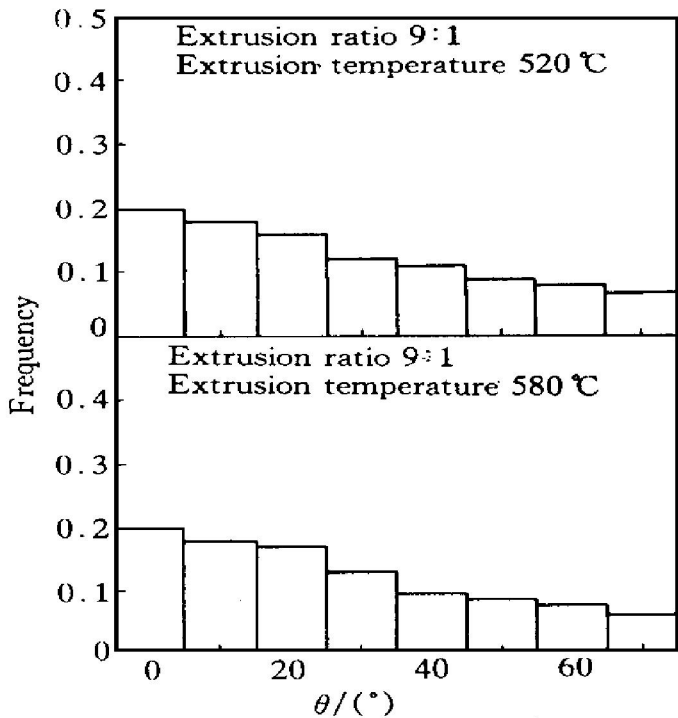


图 5 不同温度下挤压时晶须取向分布直方图

Fig. 5 Distribution histogram of whiskers' alignment when extruded at different temperatures

布的取向因子 c_0 随晶须的定向排列程度增加而增大。由前面讨论可知, 随着挤压比的增大, 一方面晶须折断严重, 另一方面晶须沿挤

压方向定向排列程度增加。前者使增强系数减小, 后者使增强系数增大, 所以挤压过程中增强系数被两个相反的过程所决定。这样随挤压比的增大, 增强系数并不会单调增大, 从而导致复合材料纵向强度也不会单调增加。这两个影响强度的相反过程决定了该种复合材料最大强度值的存在。

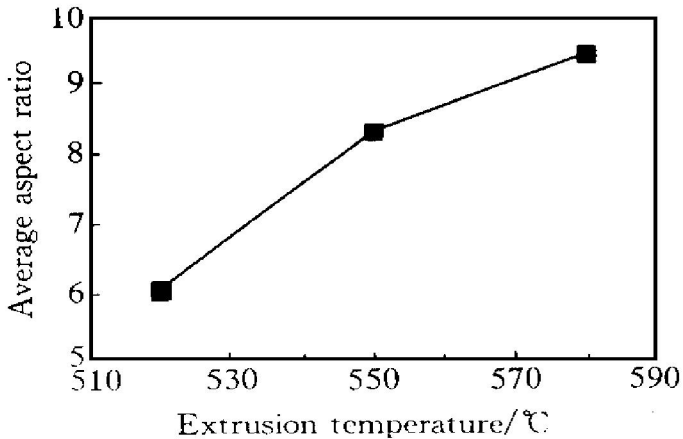


图 6 晶须长径比随挤压温度的变化情况

Fig. 6 Variation of the whiskers' aspect ratio with the extrusion temperature

2. 2. 2 挤压温度对性能的影响

随挤压温度的升高, 复合材料的纵向拉伸强度升高, 这是由于随挤压温度升高晶须定向

排列程度基本不变, 而折断程度减弱, 导致增强系数 $F(l/\bar{l}) \cdot c_0$ 随挤压温度的升高而增大, 从而使强度也随挤压温度的升高而增高。

2.2.3 以混合法则对挤压态 SiCw/L3 复合材料强度的预测

对于由 SiCw 增强的纯铝基复合材料, 计算其强度的混合法则一般为式(2), 此时 $c^* = 2$, $l_c = d\sigma_{fu}/2\tau = d\sigma_{fu}/\sigma_{ym}$, σ_{ym} 为基体的拉伸屈服强度, 实测为 31.25 MPa, σ_{fu} 可取 8 000 MPa, d 可取 0.5 μm , 则得 l_c 为 128 μm 。经过挤压后晶须的长径比变小, 可取 $F(l/\bar{l}) = \bar{l}/2l_c$, σ'_m 实测为 57.35 MPa, $V_f = 0.15$ 。因此根据实测的数据可以计算出复合材料的抗拉强度, 如表 3 中行 (Calculated value¹) 的结果。对比此计算值与实测值可以发现, 按 $c^* = 2$ 计算的铸态(挤压比为 0)复合材料拉伸强度值与实测值相差不大; 而挤压态(挤压比不为 0)的相应计算值与实测值相差很大, 达 100~200 MPa。说明这样的计算对于挤压态是不合适的。考虑到挤压变形期间晶须与基体变形的不协调性所造成的基体强化, c^* 还应该加大。故取 $c^* = 5.9$ 计算, 得复合材料强度值如表 3 中末行所示。可以看出, 此时计算值与实测值吻合较好。因此, 考虑变形过程中基体对强度贡献的增加, 对于挤压态纯铝基复合材料用修正的混合法则预测其强度时, 采用 $c^* = 5.9$ 是比较合适的; 还可发现, 随挤压工艺参数的变化, 该计算值的变化幅度没有实测值变化幅度大, 这与计算 l_c 时没有考虑到挤压变形后基体强化有关。计算 l_c 时采用的是纯铝的 σ_{ym} , 实际上挤压后复合材料中基体的状态与纯铝及纯铝挤压后的状态是有差别的, 挤压态复合材料中基体的 σ_{ym} 应该大于纯铝的。如果按挤压态复合材料中基体的 σ_{ym} 计算, 则得出的 l_c 值较小, 晶须折断对 $F(l/\bar{l}) = \bar{l}/2l_c$ 值的影响变大, 从而计算时晶须折断对增强系数 $F(l/\bar{l}) \cdot c_0$ 的影响程度加大, 进而造成随挤压参数变化取 $c^* = 5.9$ 的强度计算值变化幅度加大。所以考虑挤压过程中基体强化的影响

计算出的结果可能与实测值更吻合, 遗憾的是挤压后复合材料中基体的 σ_{ym} 是较难得到的。

表 3 SiCw/L3 复合材料性能数据

Table 3 Tensile strength of the SiCw/L3 composites

	Extrusion ratio ³				Extrusion temperature ⁴ / °C		
	0	9: 1	18: 1	25: 1	520	550	580
Measured value, σ/MPa	147.1	284.8	313.8	296.8	278.2	284.8	310.0
Calculated value ¹ , σ/MPa	114.4	114.9	123.3	121.2	110.1	114.9	117.5
Calculated value ² , σ/MPa		305.0	313.4	311.3	300.2	305.0	307.6

Note: Superscript 1— $c^* = 2$; 2— $c^* = 5.9$; 3— $t = 550\text{ }^\circ\text{C}$; 4—Extrusion ratio 9: 1

3 结论

- (1) 铸态 SiCw/L3 复合材料经挤压变形后, 晶须在沿挤压方向有一定的定向排列的同时, 伴随有严重折断。SiCw/L3 复合材料挤压过程中, 随挤压温度的提高, 晶须沿挤压方向定向排列程度基本保持不变, 而晶须的折断程度减小。
- (2) SiCw/L3 复合材料挤压过程中, 随挤压比的增大, 晶须沿挤压方向定向排列的程度增大, 而晶须的折断程度也增大。
- (3) 挤压态 SiCw/L3 复合材料的纵向拉伸强度在挤压比为 18: 1 时最大。
- (4) 挤压温度越高复合材料纵向拉伸强度越高, 可归因于晶须折断程度的减弱。
- (5) 用修正的混合法则预测挤压态 SiCw/L3 复合材料强度时, 必须增大基体对强度贡献部分的系数 c^* 才能得到满意的结果。

REFERENCES

1 Quigley B F, Abbaschian G J, Wounderlin R and Mehrabian R. Metall Trans, 1982, 13A: 93.

- 2 Abkowitz S and Weihrauch P. Adv Mater Proc, 1989, 7: 31.
- 3 Bittence J C. Adv Mater Proc, 1987, 7: 45.
- 4 Kainer K U, Bergman H W and Mordike B L. Powder Metall, 1984, 27: 30.
- 5 Soon H Hong, Kyung H Chung and Chi H Lee. Materials Science and Engineering, 1996, 206A: 225–232.
- 6 Stanford-Beale C A and Clyne T W. Composites Science and Technology, 1989, 35: 121–157.
- 7 Suganuma *et al.* Materials Science and Technology, 1989, 5(3): 249–254.
- 8 Zhang Wenlong, Cai Liuchun, Peng Huaxin *et al.* Trans Nonferrous Met Soc China, 1998, 8(3): 432–436.
- 9 Friend C M. J Mater Sci, 1987, 22: 3005–3010.
- 10 Fukuda H, Chou T W. J of Mater Sci, 1982, 17: 1003–1011.
- 11 Fukuda H and Chou T W. J Mater Sci, 1982, 17: 1003.

EFFECTS OF HOT EXTRUSION PARAMETERS ON MICROSTRUCTURES AND TENSILE PROPERTIES OF SiCw/ L3 COMPOSITES

Zhang Wenlong, Wang Dezun, Jiang Chuanhai, Ding Dongyan and Yao Zhongkai
*School of Materials Science and Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P R China*

ABSTRACT Effects of extrusion ratio and temperature on the microstructure and properties of 15% SiCw/ L3 composites have been investigated. Results showed that, with an increase of extrusion temperature the degree of whiskers' directional alignment along the extrusion direction nearly remains unchanged, but the breakage degree of whiskers decreases, which results in an increase of tensile strength. And with an increase of extrusion ratio the degree of whiskers' directional alignment along the extrusion direction increases and the breakage degree of whiskers increases too, which together result in a maximum value of tensile strength at an extrusion ratio of 18: 1. The coefficient c^* representing the contribution of matrix to the strength, ought to be increased when the modified Rule of Mixture (ROM) is used to predict the strength of extruded composites.

key words SiCw/ Al composite hot extrusion tensile strength

(编辑 吴家泉)