

[文章编号] 1004- 0609(2002)03- 0525- 04

# 短碳纤维增强铝基复合材料的挤压浸渗工艺<sup>①</sup>

张广安, 罗守靖, 田文彤

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**[摘要]** 采用挤压浸渗法制备了短碳纤维增强铝基复合材料, 研究了浸渗压力、铝液浇注温度、纤维预热温度等对复合材料组织的影响。结果表明: 合适的工艺参数为铝液浇注温度 740~ 800 ℃, 预制块预热温度 350~ 400 ℃, 浸渗压力 2~ 5 MPa; 在氩气保护下, 无须对碳纤维表面进行涂层处理, 可获得组织均匀的铝基复合材料。加入 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒可以改善纤维分布的均匀性。

**[关键词]** 碳纤维; 铝基复合材料; 浸渗

**[中图分类号]** TB 331

**[文献标识码]** A

纤维增强铝基复合材料具有高比强度、高比刚度、低膨胀系数等优点, 其中碳(石墨)纤维增强体系的性能最具潜力<sup>[1~ 3]</sup>, 碳纤维价格的下降和性能的提高为复合材料的应用创造了条件。目前碳纤维增强铝基复合材料的制备方法有固相扩散法和液相浸渗法两大类<sup>[4]</sup>。液相浸渗法是把液态金属浸渗到增强体预制件中的一种方法。挤压浸渗是液相浸渗法的一种, 同固相法和一般的真空压力浸渗法相比, 挤压浸渗法工艺简单, 在压力作用下, 浸渗和冷却速度都变快, 液态金属与碳纤维接触时间变短, 减少了界面反应时间<sup>[5~ 7]</sup>。目前国内外绝大多数碳纤维增强复合材料均采用长纤维, 为控制界面反应, 须对碳纤维进行表面涂层处理, 制造工艺复杂, 纵、横方向性能差异大且无法进行进一步塑性加工, 其发展受到限制<sup>[8~ 10]</sup>。而短碳纤维的挤压浸渗工艺简单, 能适应各种形状的零件, 制件具有各相同性, 并能在半固态下直接进行挤、锻等二次塑性加工, 为复合材料的推广应用打下了基础, 被认为是目前最有效且经济的方法<sup>[11, 12]</sup>。挤压浸渗法的关键是浸渗工艺, 它将直接影响材料的组织与性能, 如材料中孔洞的产生、纤维体积分数及分布状态等。作者通过实验研究探讨了温度、压力、速度等宏观因素对挤压浸渗过程及组织的影响, 为获得高性能的短纤维增强铝基复合材料提供依据。

## 1 实验

实验所用碳纤维是吉林炭素厂生产的高强度碳

纤维, 其性能见表 1。基体采用 LY12 合金。

表 1 碳纤维的性能

Table 1 Properties of carbon fiber

Diameter / μm	Strength / MPa	Elastic modulus / GPa	Density / (g·cm <sup>-3</sup> )
7	3 200	220	1.76

浸渗工艺要求预制块具有一定的高温强度、合适的纤维长度、体积分数和分布, 但由于高强度的碳纤维微观组织是乱层石墨结构, 表面活性很低, 必须选择合适的粘结工艺才能达到要求。

纤维预制块制备采用低温粘结剂、无机高温粘结剂及烧结工艺, 具体工艺如图 1 所示。在制备过程中加入 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒是为了便于分散碳纤维, 防止加压浸渗时纤维被压合。预制块及纤维分布如图 2 所示。

浸渗是在 2 000 kN 压力机上进行的(吨位可调), 装置如图 3 所示。纤维随模具一起在氩气保护下加热到 350~ 400 ℃, 把熔炼好的铝合金熔体浇入模具, 凸模下行加压, 金属液体在压力作用下渗入纤维预制体, 气体从气孔排除, 保压一段时间后顶出。具体工艺参数如表 2 所示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 纤维分布及体积分数

预制块中的纤维分布状态对浸渗均匀性存在重

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59975023)

[收稿日期] 2001- 07- 10; [修订日期] 2001- 09- 03

[作者简介] 张广安(1964- ), 男, 副教授, 博士研究生。

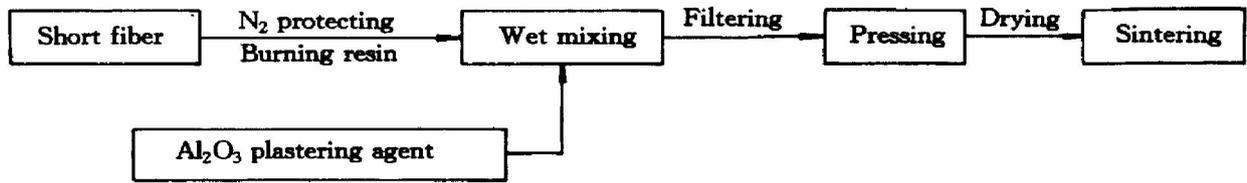


图1 预制块制作工艺

Fig. 1 Process chart of fabricating preform

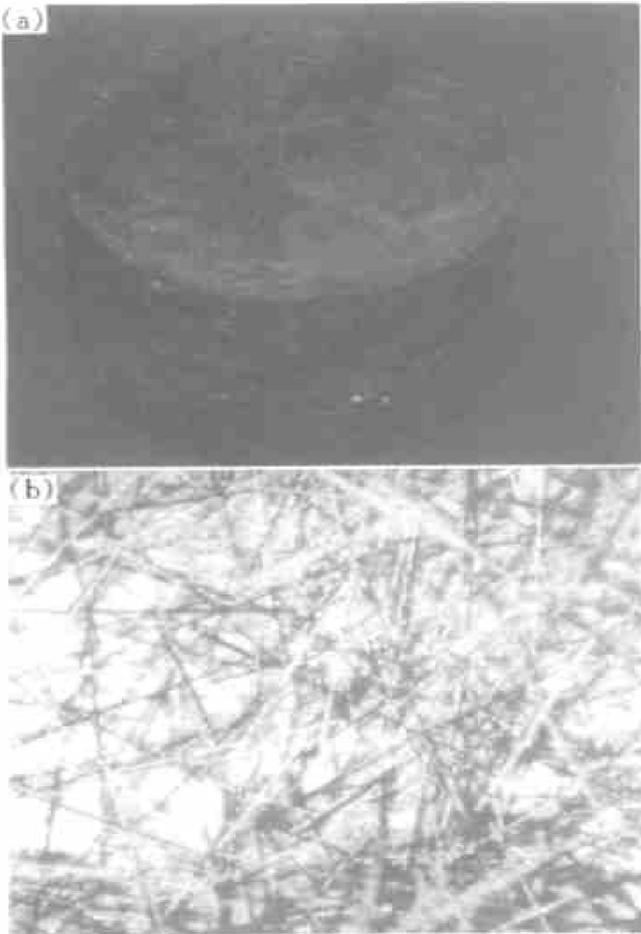


图2 预制块(a)及碳纤维分布(b)

Fig. 2 Preform (a) and distribution of carbon fibers(b)

表2 浸渗工艺参数

Table 2 Parameters of infiltration process

Preform temperature / °C	Liquid aluminium temperature/ °C	Pressure / MPa	Depressing speed / (mm·s <sup>-1</sup> )	Holding time/s
350~ 400	740~ 800	2~ 5	3	30

要影响。束状的短纤维在悬浊液的剪切力作用下分散成均匀分布的短纤维，并随着搅拌时间的增加，平均长度下降。经过过滤压制，最终得到如图2所示的预制块及纤维分布。这种分布可以简化为平面内正交分布和两平面间具有平均倾角  $\alpha$  的倾斜分布的叠加。加入2~ 3  $\mu\text{m}$  的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子后，纤维之间被粒子分离，容易分散且均匀，浸渗过程中也不

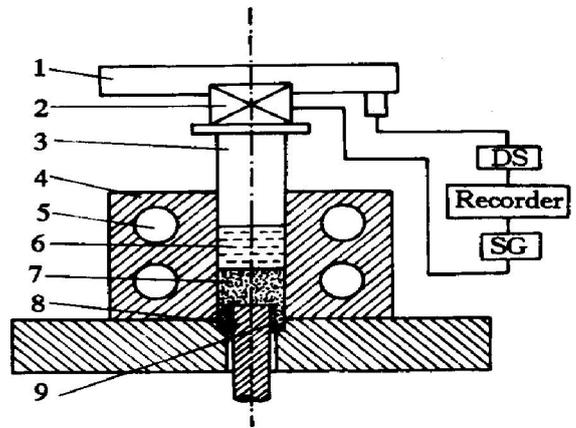


图3 浸渗装置图

Fig. 3 Schematic diagram of infiltration device

- 1—Upper plate; 2—Sensor for pressure; 3—Punch;
- 4—Female die; 5—Heating pole; 6—Liquid metal;
- 7—Preform; 8—Liftout rod; 9—Gas pole

易被压合，保证了预制体的体积分数，如图4所示。节点处由  $\text{Al}_2\text{O}_3$  溶胶连接，这样可以避免浸渗时由于间隙过小无法充填而形成微孔。

短纤维预制块与长纤维的另一个不同是纤维体积分数。由于碳纤维具有很高的强度和弹性模量，纤维太长时，加压使纤维弯曲变形，卸载时的回弹

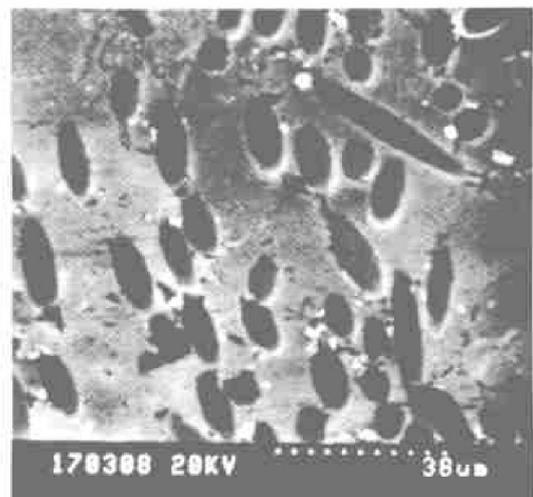


图4 加入  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒后组织及纤维分布

Fig. 4 Microstructure and distribution of fiber with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles addition

会破坏粘结结构。一般情况下, 长度 0.5 mm 以下的纤维体积分数可达 30%。

## 2.2 压力与浸渗的关系

浸渗压力大小取决于浸渗阻力, 浸渗阻力主要来自浸渗过程中的毛细作用力和凝固阻力。根据 Yong-Kelvin 方程<sup>[6]</sup>,

$$P = \frac{2\gamma_1 \cos \theta}{r}$$

式中  $P$  为毛细作用力,  $\gamma_1$  为液态金属的表面张力,  $\theta$  为液态金属与纤维的润湿角,  $r$  为毛细半径。

由于铝与碳纤维的润湿角远远大于  $90^\circ$ , 浸渗过程不能自发进行, 而必须在外力作用下进行。短纤维与长纤维在浸渗时的毛细半径不同, 短纤维分布必然存在两根纤维交叉的节点, 所形成锐角处的毛细半径小于平均半径, 实际浸渗压力将大于计算值。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的加入和粘结剂将使交叉纤维节点处形成框架结构, 保证了毛细半径不致过小, 在挤压浸渗时, 较高的压力可以实现完全浸渗。显然, 随着纤维体积分数的增加, 毛细半径减小, 浸渗压力也将增加。但压力太高时, 会使预制块体积分数变大, 甚至遭到破坏, 如图 5 所示。压力太低时, 浸渗不完全甚至不能完成浸渗。

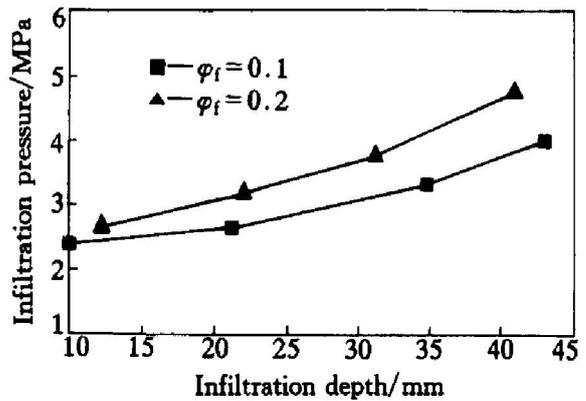


图 6 浸渗深度与浸渗压力的关系

Fig. 6 Relation of infiltration pressure and depth

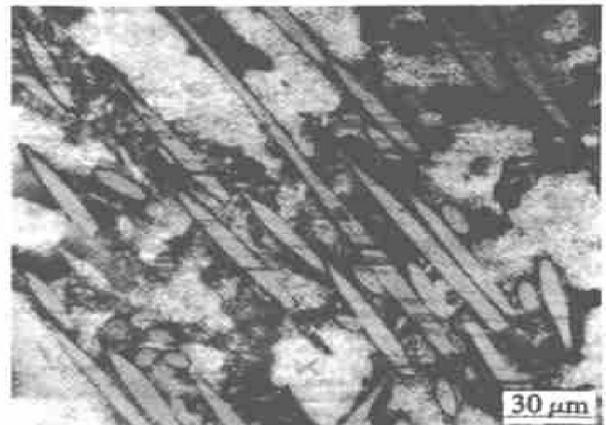


图 7 短碳纤维/LY12 复合材料的浸渗组织

Fig. 7 Infiltration microstructure of short carbon fiber/LY12 composite

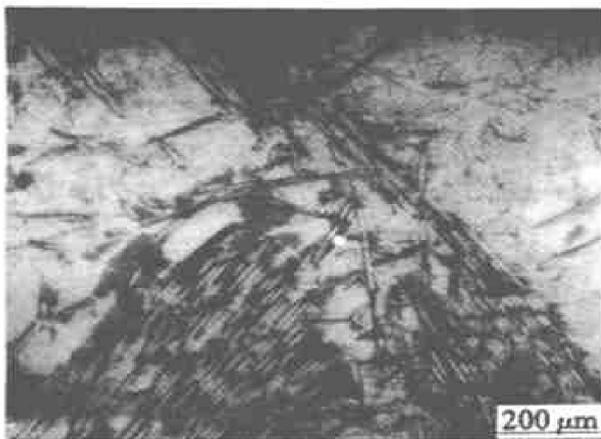


图 5 700 °C 不均匀浸渗组织

Fig. 5 700 °C non-uniform infiltration microstructure

实际浸渗时, 应采用低压浸渗、高压凝固的原则, 这样既可以保证预制块不变形和一定的纤维体积分数, 也可以保证浸渗的致密性和材料性能。图 6 和图 7 所示分别是压力-位移曲线及浸渗组织照片。

## 2.3 熔体浇注温度与纤维预制体的预热温度

随着浸渗的进行, 充填前沿的液态金属的温度不断降低, 因而形核结晶, 形成充填过程中的凝固

阻力, 甚至完全堵塞浸渗通道。如果铝液温度过低, 如在 700 °C 浸渗时, 就会使浸渗前端凝固, 浸渗无法进行, 并导致压力升高, 最终压坏预制块。为了降低凝固阻力, 需要浇注的金属有一定的过热度, 但温度过高, 会增加铝与碳纤维的反应, 生成  $\text{Al}_4\text{C}_3$ , 一般取 750~800 °C 为宜。

纤维预制体的预热与熔体浇注温度密切相关。预热温度高些有利于浸渗的进行, 但碳纤维的预热不宜超过 400 °C, 否则会因氧化而降低强度, 一般取 350~400 °C。

## 3 结论

1) 采用挤压浸渗法制备短碳纤维增强铝基复合材料时, 碳纤维分布均匀, 材料组织均匀致密, 在氩气保护下无须进行表面涂层处理。

2) 浸渗压力、熔体温度和纤维预热温度对浸渗影响较大, 合适的压力、熔体温度和纤维预热温度分别为 2~5 MPa, 740~800 °C 和 350~400 °C。

3) 加入  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒和溶胶后进行湿混, 碳纤维分散均匀, 预制块强度满足浸渗要求。

### [ REFERENCES ]

- [ 1 ] Coupard D, Goni J, Sylvain J F. Fabrication and squeeze casting infiltration of graphite/ alumina performs [ J ]. *J Mater Sci*, 1999, 34: 5307- 5313.
- [ 2 ] Hooker J, Doorbar P J. Metal matrix composites for aeroengines [ J ]. *Mater Sci and Tech*, 2000, 16: 725- 731.
- [ 3 ] Clyne T W, Withers P J. *An Introduction to Metal Matrix Composites* [ M ]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 438- 439
- [ 4 ] 吴人杰. 金属基复合材料的现状与展望 [ J ]. *金属学报*, 1997, 33(1): 78- 83.  
WU Ren-jie. The present condition and prospects on metal matrix composites [ J ]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1997, 33(1): 78- 83.
- [ 5 ] 王浩伟, 张国定, 吴人杰. 纤维增强金属基复合材料液相浸渗充填过程 [ J ]. *复合材料学报*, 1995, 12(1): 38- 41.  
WANG Hao-wei, ZHANG Guo-ding, WU Ren-jie. The liquid infiltration and filling process for fiber reinforced metal matrix composites [ J ]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1995, 12(1): 38- 41.
- [ 6 ] 胡连喜, 罗守靖. 铝/氧化铝纤维预制体的液态浸渗动力学 [ J ]. *中国有色金属学报*, 1998, 8(Suppl): 75- 79.  
HU Lian-xi, LUO Shou-jing. Kinetics of infiltration liquid aluminum into alumina fibrous preform [ J ]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1998, 8(Suppl): 75- 79.
- [ 7 ] HU Lian-xi, LUO Shou-jing. Determination of the threshold pressure for infiltration of liquid aluminum into alumina short fiber perform [ J ]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 1996, 6(4): 133- 137.
- [ 8 ] 曹峰, 彭平, 李效东, 等. 氧化铝/氧化硅溶胶对碳纤维的处理及应用 [ J ]. *复合材料学报*, 1999, 16(10): 22- 29.  
CAO feng, PENG Ping, LI Xiao-dong, et al.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  sol-gel coatings carbon fibers and its applications [ J ]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1999, 16(10): 22- 29.
- [ 9 ] 曾庆冰. 溶胶-凝胶法  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层碳纤维增强铝基复合材料的研制 [ J ]. *复合材料学报*, 1998, 15(1): 68- 73.  
ZENG Qing-bing. Study on fabrication of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coated  $\text{C}_f/\text{Al}$  by using sol-gel technique [ J ]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1998, 15(1): 68- 73.
- [ 10 ] Wielage B, Dorner A. Corrosion protection of carbon fibre reinforced aluminium composite by diamond-like carbon coating [ J ]. *Mater Sci and Tech*, 2000, 16: 344- 348.
- [ 11 ] Kalakkath Prakasan, Sambasivam Swshan. Microstructure and properties of squeeze cast  $\text{Cu}$  carbon fibre metal matrix composite [ J ]. *Journal of Materials Science*, 1999, 34: 5045- 5049.
- [ 12 ] Zhao L R, Jiang B Z. The oxidation behavior of low-temperature heat-treated carbon fibres [ J ]. *Journal of Materials Science*, 1997, 32: 2811- 2819.

## Squeezing infiltration process for short carbon fiber reinforced aluminum alloy matrix composites

ZHANG Guang-an, LUO Shou-jing, TIAN Wen-tong

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**[ Abstract ]** The influence of infiltration pressure, liquid aluminum pouring temperature, fiber-preheating temperature on the composites microstructures was studied. The results show that aluminum matrix composites with uniform microstructure is obtained without surface coating treatment on carbon fiber under the condition of appropriate processing parameters (liquid aluminum pouring temperature is 740~ 800 °C, perform preheating temperature is 350~ 400 °C, infiltration pressure is 2~ 5 MPa) and Ar gas protecting. Uniformity of fiber distribution is improved by adding  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles.

**[ Key words ]** carbon fiber; aluminum alloy matrix composite; liquid infiltration

(编辑 杨兵)