

# SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料流动性数值模拟与实验研究

张桢林<sup>1,2</sup>, 张志峰<sup>1</sup>, 徐 骏<sup>1</sup>, 王亚宝<sup>1</sup>, 毛卫民<sup>2</sup>

(1. 北京有色金属研究总院, 北京 100088)

(2. 北京科技大学, 北京 100083)

**摘 要:** 搅拌铸造方法易于成型大尺寸复杂的复合材料零件, 但是碳化硅颗粒加入使得复合材料的流动行为变得更加复杂, 开展复合材料流动性研究至关重要。建立了 SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料的流动模型, 采用数值模拟及实验研究相结合的方法, 研究了浇注温度及碳化硅体积分数对 SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料流动性及流动充型过程碳化硅分布的影响。结果表明, 随着浇注温度的提高 SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料的流动性提高, 这一趋势在半固态区间更为明显; 但是随着浇注温度的升高, 试样前端的碳化硅体积分数较末端减少加剧, 复合材料中碳化硅的整体分布均匀性降低; 随着碳化硅体积分数的增加, SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料的流动性降低, 且随着碳化硅体积分数的增加, 试样前端碳化硅的体积分数减少程度减弱, 整体的均匀性提高。上述的模拟结果与实验结果具有较好的一致性。

**关键词:** SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料; 搅拌铸造; 流动性; 数值模拟

**中图分类号:** TB333

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2018)11-3414-06

碳化硅颗粒增强铝基复合材料具有比强度和比刚度高、耐磨性优良、热膨胀系数低等一系列优点, 广泛应用于交通、航空航天、及电子封装等领域<sup>[1-5]</sup>, 目前其制备方法主要有粉末冶金法、搅拌铸造法、喷射沉积法、压力浸渗法等<sup>[6-8]</sup>。随着复合材料应用的不断扩展, 大型复杂复合材料零件的需求越来越大。由于复合材料硬度和耐磨性较高, 依靠机加工成型不仅加工难度大, 而且成本很高, 而搅拌铸造法易于实现近终成形, 且成本较低, 是制备大型复杂件的最有潜力的方法。但是搅拌铸造法面临的一大难题是碳化硅的加入使得熔体的流动性降低, 流动行为较普通合金熔体变得复杂<sup>[9,10]</sup>。复合材料熔体的流动行为成为搅拌铸造能否成型碳化硅分布均匀的复合材料铸件的关键。

为了研究碳化硅颗粒添加对复合材料流动性的影响, Ravi<sup>[11]</sup>等总结了影响流动性的因素, 认为颗粒的团聚和形状的不规则会降低流动性。随着粘度的增加复合材料流动性显著降低。浇注温度对于不同复合材料流动性有着不同的影响, 例如 AA6061-15% SiC<sub>p</sub>(体积分数)的流动性随着浇注温度的升高而降低。Surappa 和 Rohatgi<sup>[12]</sup>发现在不同的铝合金基体中加入 40~200 μm 的二氧化硅、石墨、碳化硅和氧化铝的增强相都会使流动性降低。Surappa<sup>[13]</sup>发现在碳化硅的体积分数相同的情况下复合材料的流动性随着碳化硅粒

径的减小而降低。Emamy<sup>[14]</sup>研究了搅拌铸造法制备的 SiC 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒增强 A357 复合材料在金属型铸造下的流动性, 发现其流动性随着增强相体积分数的增加而下降。然而前期的研究多以实验研究为主, 由于复合材料流动行为复杂, 增强相颗粒种类、尺寸及基体合金种类多样, 有必要对复合材料流动机理深入研究。本研究考虑了颗粒间的碰撞粘度及颗粒和液相间的相互作用力, 建立了复合材料流动过程中的两相流模型, 修正了复合材料的物性参数, 模拟计算了不同体积分数的 SiC<sub>p</sub>/A357 在不同浇注温度下的流动行为, 并通过流动性实验加以验证, 讨论了复合材料充型过程流动性及碳化硅颗粒分布的影响因素, 旨在提出预测复合材料流动性的数值模拟方法, 为复合材料铸件的流动和充型过程提供理论依据和实验验证方法。

## 1 实 验

### 1.1 材料及装置

A357 合金成分如表 1 所示, SiC 颗粒平均粒径为 12 μm。搅拌铸造工艺流程为将 28 kg 的 A357 铝锭在中频感应炉内熔化, 进行精炼除渣后, 调整熔体的温度并采用实验设定的搅拌速度进行搅拌, 同时用加粉器从铝液上部分别加入体积分数 10%、15%和 20%预处理过的 SiC 粉, 搅拌一定时间后得到复合材料熔体,

收稿日期: 2017-11-15

基金项目: 国家国际科技合作计划 (2015DFA51230); 国家高技术研究发展计划 (“863”计划) (2013AA030701)

作者简介: 张桢林, 男, 1988 年生, 博士, 北京有色金属研究总院国家有色金属复合材料工程技术研究中心, 北京 100088, E-mail: zhangzhenlin819@126.com

调整到实验设定温度后将熔体浇注到流动性模具中, 从铸件流道的不同长度处取样制备金相, 用 0.5%HF 溶液腐蚀 10 s, 在 Ziess-Axiovert 200 型金相显微镜上进行微观组织观察。

采用浆栅复合搅拌器进行搅拌铸造实验。电机带动搅拌器转动, 搅拌器可以在炉内升降, 铝液用中频感应炉熔化, 通过测温热电偶控制铝液温度, SiC 粉由加粉器送入铝液表面, 炉膛内充氩气保护, 整个过程通过控制柜对搅拌和浇注进行控制。

流动性实验装置示意图如图 1 所示, 流动性测试所用模具为八流道复沟型模具, 每个流道的高度为 6 mm, 顶部宽度为 4.5 mm, 底部宽度为 3 mm, 每个流道的总长度为 300 mm。浇注时定量的熔体被倒入浇杯中, 通过热电偶测定温度, 当到达实验设定温度后浇杯的堵头被提升装置快速提起, 以保证每次浇注过程的一致性, 减少实验误差。铸件的三维形状及流动状态如图 2 所示, 取 8 个流道长度的平均值作为表征流动性大小的依据, 从流道不同长度处的横截面取样, 制备金相, 观察碳化硅颗粒的分布。所选择的实验条件如表 2 所示。

1.2 数值模拟方法

1.2.1 两相流模型建立

复合材料熔体是包含碳化硅颗粒和铝熔体的两相流, 因此流动的数值模拟过程中必须建立两相流模型。采用 Euler 法处理两相流的求解连续性和动量方程, 碳化硅颗粒作为球形的颗粒悬浮在铝液中, 通过动力学理论应用获得碳化硅颗粒所受压力, 悬浮液的粘度采用颗粒浆状模型, 即碰撞残生的粘度, 动力粘度和

表 1 A357 铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of A357 alloy (wt%)

Si	Mg	Fe	Ti	Cu	Zn	Mn	Al
7.00	0.56	0.07	0.11	0.02	0.05	0.02	Bal.

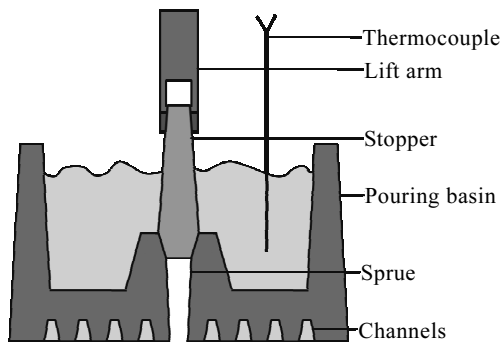


图 1 流动性实验装置示意图

Fig.1 Sketch map of fluidity test mould

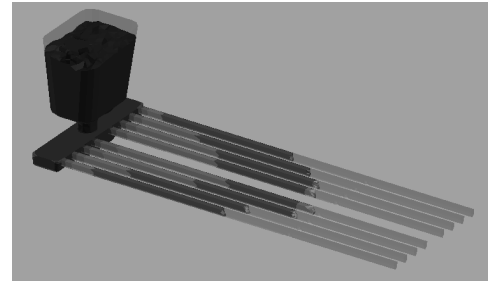


图 2 流动性铸件三维形状图

Fig.2 3d shape of fluidity casting

表 2 实验条件

Table 2 Experiment condition

Temperature/°C	600	610	630	650	670
Matrix solid fraction/%	25	14	0	0	0
Volume fraction of SiC <sub>p</sub> /%	10	15	20	0	0

摩擦粘度模型复合得到熔体的剪切粘度, 如公式 (1) 所示:

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \tag{1}$$

剪切粘度的碰撞部分如公式 (2) 所示<sup>[15]</sup>:

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \alpha_s \tag{2}$$

动力粘度采用 Syamlal<sup>[16]</sup>的模型, 如公式 (3) 所示:

$$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_s d_s \rho_s \sqrt{\theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[ 1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss}) (3e_{ss} - 1) \alpha_s g_{0,ss} \right] \tag{3}$$

式中,  $\theta_s$  为颗粒相温度,  $\alpha_s$  是颗粒相的体积分数,  $d_s$  为颗粒直径,  $\rho_s$  是颗粒密度,  $g_{0,ss}$  为粒度分布系数,  $e_{ss}$  为回弹系数。

固相粘度导致颗粒对于收缩和膨胀的阻力, 选择 Lun-et-al 公式来计算其大小, 如公式 (4) 所示:

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s^2 \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

此外, 考虑了不同相之间的相互作用, 包括颗粒相对于基体加速时产生的虚拟质量力和拖曳力。用于液液条件下的 Schiller-naumann 拖曳函数模型, 表达式如下:

$$f = \frac{C_D Re}{24} \tag{5}$$

式中,  $Re$  为相对雷诺数,  $C_D$  的表达式为:

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15Re^{0.687}) & Re \leq 1000 \\ 0.44Re & 0.44Re > 1000 \end{cases} \tag{6}$$

用于液固条件下的 Syamlal-O'Brien 模型公式如下:

$$f = \frac{C_D Re_s \alpha_1}{24 v_{r,s}^2} \quad (7)$$

式中,  $v_{r,s}$  为颗粒相的自由沉降速度,  $C_D$  的表达式为:

$$C_D = \left( 0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{\frac{Re_s}{v_{r,s}}}} \right)^2 \quad (8)$$

### 1.2.2 复合材料物性参数确定

由于碳化硅颗粒的添加导致复合材料的物性参数有别于基体合金, 为了模拟的准确性本研究对不同体积分数的复合材料物性参数进行等效计算, 以碳化硅体积分数 15% 的复合材料为例, 根据公式 (9) 计算出复合材料不同温度下的固相分数:

$$f_{st} = f_p + f_s(1 - f_p) \quad (9)$$

式中,  $f_{st}$  为总的固相分数,  $f_p$  为颗粒的体积分数,  $f_s$  为基体的固相分数。结果如图 3 所示。

复合材料的密度根据公式 (10) 计算:

$$\rho = \frac{1}{\left( \frac{\omega_{SiC} \%}{\rho_R} + \frac{1 - \omega_{SiC} \%}{\rho_B} \right)} \quad (10)$$

式中,  $\rho$  为复合材料的等效密度,  $\rho_R$  是碳化硅颗粒的密度, 取  $3.21 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_B$  为 A357 的密度,  $\omega_{SiC} \%$  是碳化硅的质量分数, 计算结果入图 4 所示。

复合材料的表观粘度通过 CR-Couette 型粘度计测得, 结果如图 5 所示。

对模具进行网格划分, 为了保证模拟的精确, 采用较细的四面体网格划分, 总数量为 388 782 个, 网格划分结果如图 6 所示。

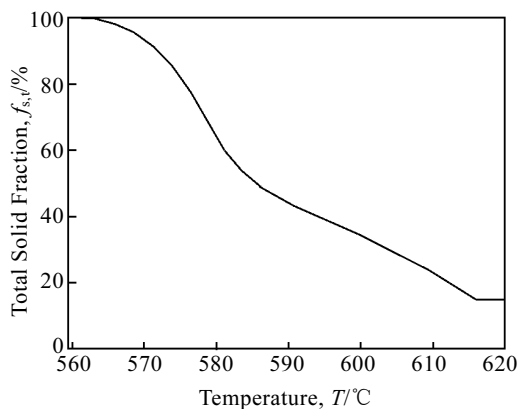


图 3 15% SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料总固相分数曲线

Fig.3 Total solid fraction curve of 15% SiC<sub>p</sub>/A357 composites

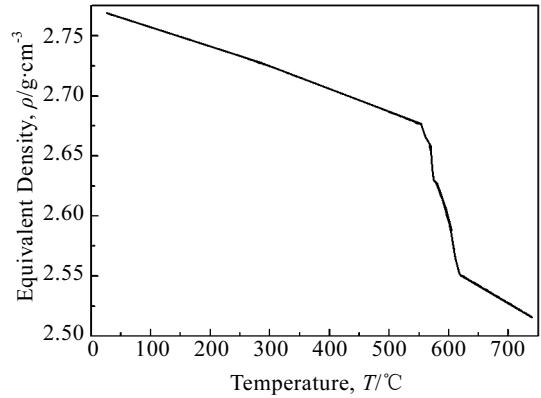


图 4 15% SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料等效密度曲线

Fig.4 Equivalent density curve of 15% SiC<sub>p</sub>/A357 composites

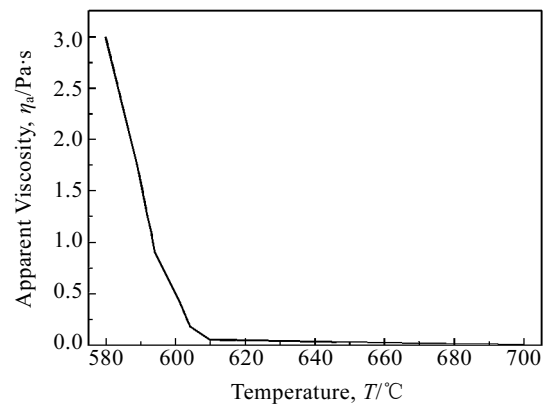


图 5 15% SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料表观粘度曲线

Fig.5 Apparent viscosity curve of 15% SiC<sub>p</sub>/A357 composites

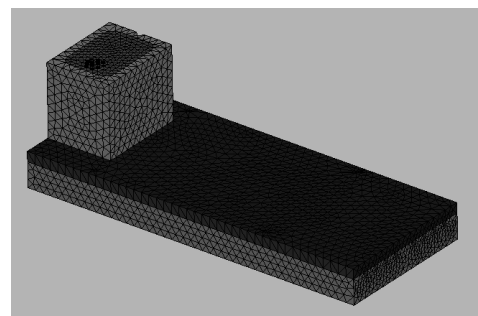


图 6 流动性模具网格划分

Fig.6 Mesh generation of fluidity mould

## 2 结果与讨论

### 2.1 浇注温度对流动性的影响

为了考察浇注温度对流动性的影响, 选择 600、610、630、650 和 670 °C 进行数值模拟浇注实验, 选取体积分数 15% 的 SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料, 其流动性模拟和实验结果如图 7, 图 8 所示, 随着浇注温度的升

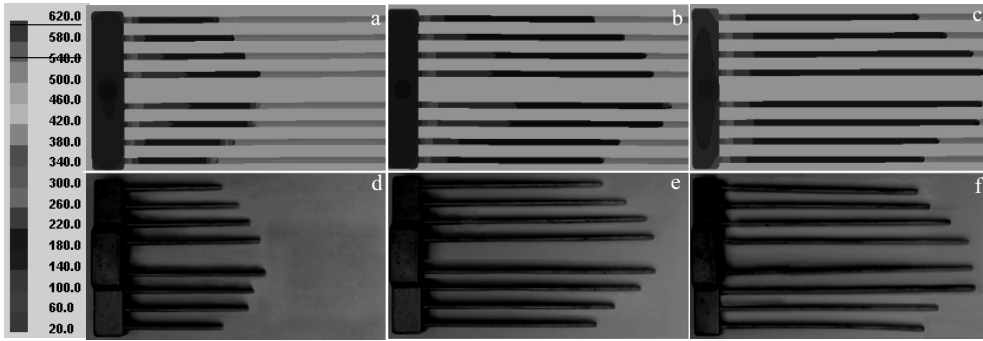


图 7 不同浇注温度下模拟与实验结果对比

Fig.7 Result comparison of numerical simulation (a~c) and experimental test (d~f) at different pouring temperatures: (a, d) 600 °C, (b, e) 630 °C, and (c, f) 670 °C

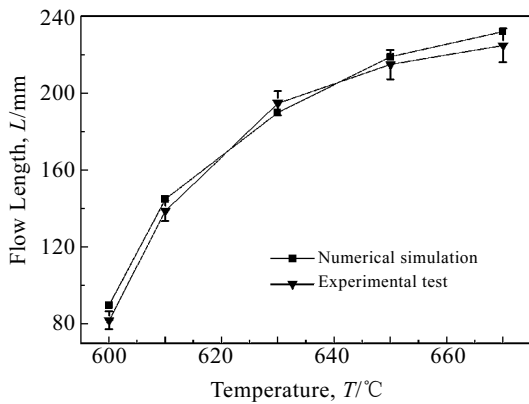


图 8 不同浇注温度下 SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料流动长度曲线

Fig.8 Flow length of SiC<sub>p</sub>/A357 composites at different pouring temperatures

高复合材料的流动性都有所提高, 在液相线以下的 610 和 600 °C 时这一现象更加明显, 这是由于当温度升高时熔体的过热度升高, 熔体的粘度下降, 同时过热度也影响冷却速度, 但是这种影响是非线性的。当在半固态区间时流动性变化更为明显, 基体固相分数的增加导致复合材料总固相分数的增大, 熔体粘度显著增大, 导致流动性降低。另一方面, 在半固态区间时一部分的凝固潜热被释放, 导致凝固速度加快。而在液相线以上时熔体的总固相分数不变, 温度升高时基体合金的粘度有所降低, 但不如半固态区间时明显, 同时冷却速度减慢, 流动性随着浇注温度的升高而逐步提高。

为了对比浇注温度对流动过程中碳化硅分布的影响, 从流道的前端和末端分别取样观察组织, 如图 9 所示, 随着浇注温度的升高, 流动前端碳化硅颗粒的

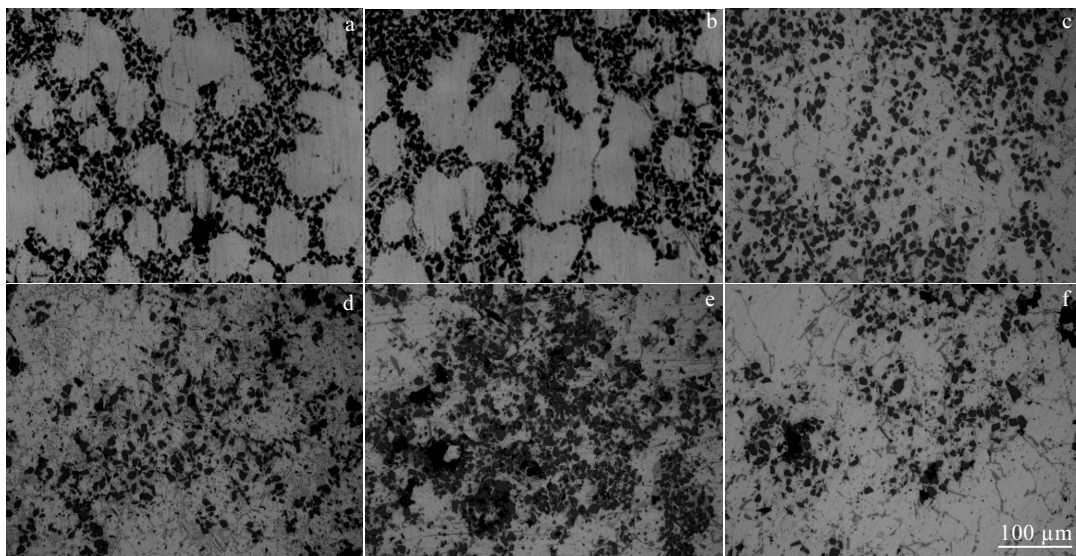


图 9 不同位置处的 SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料组织

Fig.9 Microstructures of SiC<sub>p</sub>/A357 composites at different positions: (a) end part of 600 °C, (b) front part of 600 °C; (c) end part of 630 °C, (d) front part of 630 °C; (e) end part of 670 °C, (f) front part of 670 °C

体积分数减少更加明显，这是由于温度升高复合材料的粘度降低，对碳化硅颗粒的粘滞力减弱，碳化硅颗粒更容易脱离液相的基体，同时随着浇注温度的升高，熔体在充型过程中的湍流更为剧烈，造成碳化硅颗粒相对于液相基体的位移增加，粘滞力对颗粒所做的功更多，导致颗粒更容易脱出。而在半固态区间时由于粘度的增加使得对碳化硅颗粒的粘滞力增大，同时充型也更加平稳，碳化硅颗粒分布更加均匀。

### 2.2 碳化硅体积分数对流动性的影响

选择浇注温度 650 °C 进行流动性实验，结果如图 10、图 11 所示。随着碳化硅体积分数的增加复合材料的流动性降低，这与 Emamy 等<sup>[14]</sup>的研究结果相一致。一方面碳化硅体积分数的增加导致复合材料熔体的总固相率增加，熔体的表观粘度增大，导致流动困难；另一方面，复合材料中碳化硅体积分数的增加，熔体的热容降低，凝固过程中铝基体释放的凝固潜热也减少，这都导致了凝固速度加快，从而降低了流动性。

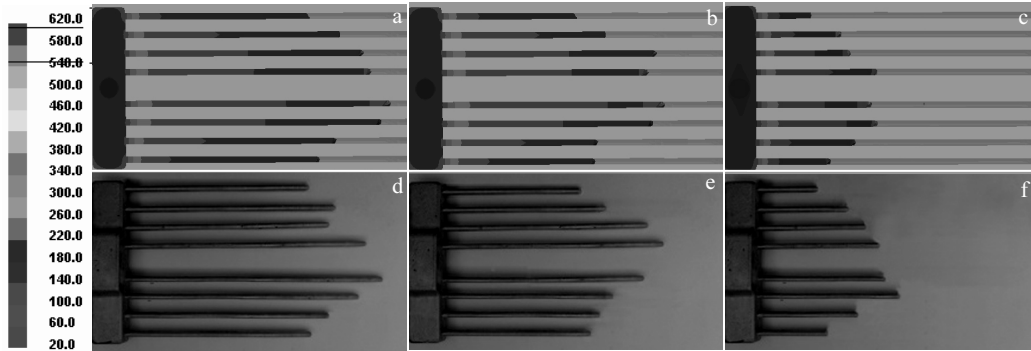


图 10 不同体积分数下模拟与实验结果对比

Fig.10 Result comparison of numerical simulation (a~c) and experimental test (d~f) with different volume fractions: (a, d) 10%, (b, e) 15%, and (c, f) 20%

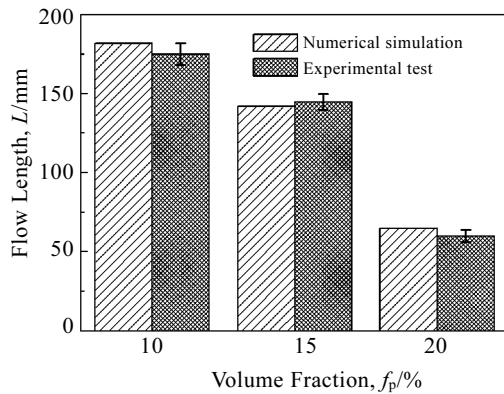


图 11 不同体积分数下 SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料流动长度曲线

Fig.11 Flow length of SiC<sub>p</sub>/A357 composites with different volume fractions

体积分数对流动过程中碳化硅分布的影响如图 12 所示，在流道的前端碳化硅颗粒的体积分数有所降低，随着碳化硅体积分数的增加，降低程度减弱，这是由于高体积分数时复合材料粘度较大，对碳化硅颗粒的粘滞力增大，颗粒脱出困难，同时体积分数增加导致颗粒间的碰撞加剧，推动碳化硅颗粒从高体分处向低体分处扩散，这也提高了颗粒分布的均匀性。

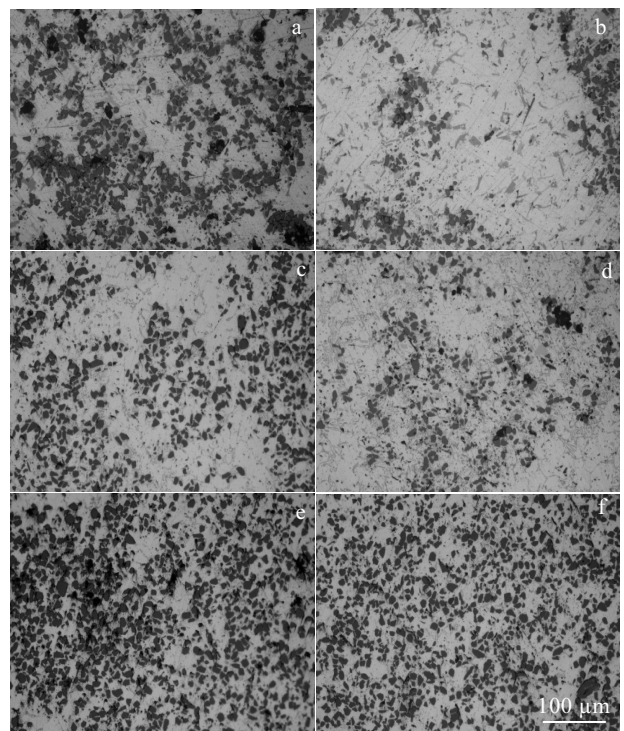


图 12 不同位置处的 SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料组织

Fig.12 Microstructures of SiC<sub>p</sub>/A357 composites at different positions: (a) end part of 10%, (b) front part of 10%; (c) end part of 15%, (d) front part of 15%; (e) end part of 20%, (f) front part of 20%

### 3 结 论

1) 建立了 SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料的流动模型, 考察了浇注温度和碳化硅体积分数对流动性的影响, 模拟结果与实验结果具有较好的一致性。

2) SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料流动性随着浇注温度的降低而降低, 在半固态区间降低明显, 流动前端碳化硅颗粒的体积分数少于末端, 随着浇注温度的升高, 碳化硅分布的不均匀性加剧。

3) SiC<sub>p</sub>/A357 复合材料的流动性随着复合材料中碳化硅体积分数的增加而降低, 同时随着碳化硅体积分数的升高, 流动前沿的碳化硅体积分数较末端降低程度减弱, 整体均匀性提高。

#### 参考文献 References

- [1] Li S, Xiong D, Liu M *et al.* *Ceramics International*[J], 2014, 40(5): 7539
- [2] Xue C, Yu J K. *Materials & Design*[J], 2014, 53: 74
- [3] Mazahery A, Shabani M O. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2013, 23(7): 1905
- [4] Knowles A J, Jiang X, Galano M *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 615: S401
- [5] Vencel A, Bobic I, Arostegui S *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2010, 506(2): 631
- [6] Huang X, Liu C, Lv X *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011 211(9): 1540
- [7] Zhang Z, Chen X G, Charette A. *Journal of Materials Science*[J], 2007, 42(17): 7354
- [8] Kalaiselvan K, Murugan N, Parameswaran S. *Materials & Design*[J], 2011, 32(7): 4004
- [9] Tjong S C, Ma Z Y. *Materials Science and Engineering R: Reports*[J], 2000, 29(3-4): 49
- [10] Hashim J, Looney L, Hashmi M S J. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2002, 123(2): 251
- [11] Ravi K R, Pillai R M, Amaranathan K R *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2008, 456(1-2): 201
- [12] Surappa M K, Rohatgi P K. *Metallurgical Transactions B*[J], 1981, 12(2): 327
- [13] Surappa M K, Rohatgi P K. *Journal of Materials Science*[J], 1981, 16(4): 983
- [14] Emamy M, Abbasi R, Kaboli S *et al.* *International Journal of Cast Metals Research*[J], 2009, 22(6): 430
- [15] Giadspow D, Bezburuah R, Ding J. *Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization*[C]. Brisbane: New York Engineering Foundation, 1992
- [16] Syamlal M, Rogers W, O'Brien T J. *Technical Note DOE/METC-94/1004 and NTIS/DE94000087*[R]. Springfield: National Energy Technology Laboratory, 1993

## Numerical Simulation and Experimental Study on Fluidity of SiC<sub>p</sub>/A357 Composites

Zhang Zhenlin<sup>1,2</sup>, Zhang Zhifeng<sup>1</sup>, Xu Jun<sup>1</sup>, Wang Yabao<sup>1</sup>, Mao Weimin<sup>2</sup>

(1. General Research Institute for Non-Ferrous Metals, Beijing 100088, China)

(2. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Stir casting process is well suitable for large scale and complex composite components, but the flow behavior becomes complicated due to the addition of SiC particles; therefore the mould filling process is of great significance for preparing high quality composite castings. In this study, a flow model of SiC<sub>p</sub>/A357 composites was built through a numerical method, and the influences of the pouring temperature and SiC volume fraction on the fluidity and SiC particle distribution were studied by fluidity test. The results show that the fluidity of SiC<sub>p</sub>/A357 composites increases with the increase in pouring temperature, which is more obvious in the semi-solid range; in the meantime, however, the volume fraction of SiC particles at the flow-front is less than that at the end, resulting in the decreasing whole homogeneity of SiC particles. The fluidity of SiC<sub>p</sub>/A357 composites decreases with SiC volume fraction increasing, and the reduction in SiC<sub>p</sub> at flow front slows down, so the homogeneity of SiC volume fraction is improved. The numerical simulation is roughly accord with fluidity test.

**Key words:** SiC<sub>p</sub>/A357 composites; stir casting; fluidity; numerical simulation

Corresponding author: Zhang Zhifeng, Ph. D., Professor, National Engineering Research Center for Non-Ferrous Metal Composites, General Research Institute for Non-Ferrous Metals, Beijing 100088, P. R. China, E-mail: zhangzf@grinm.com