

# SiC 颗粒增强铝基复合材料搅拌铸造过程数值模拟

毛安南<sup>1, 2</sup>, 顿亚鹏<sup>1</sup>, 林锦明<sup>3</sup>, 杨伟<sup>1</sup>, 杜安栋<sup>3</sup>, 张荻<sup>1</sup>

(1. 湖北汽车工业学院, 湖北十堰 442002; 2. 东风康明斯发动机有限公司, 湖北襄阳 441000;  
3. 机械科学研究总院海西(福建)分院有限公司, 福建沙县 365500)

**摘要:** 使用Fluent软件对不同搅拌器形成的速度场、压力场和湍流动能进行数值模拟, 并结合显微组织分析, 比较了四叶直单桨、三叶螺旋单桨和双极螺旋单桨的速度场分布、压力场结构和湍流动能大小, 以及其对SiC于熔体中分散的影响。结果表明: 双极螺旋单桨形成的速度场中有轴向漩涡和径向循环, 同时压力场中形成较大的负压通道利于颗粒进入熔体, 湍流动能也大于两种单桨的湍流动能, 带动更大范围的熔体运动, 利于颗粒分散。通过显微组织观察, 四叶直单桨没能形成良好的负压通道, 颗粒未能充分进入熔体, 三叶螺旋单桨搅拌形成的复合材料存在颗粒团聚现象, 双极螺旋搅拌流场中轴向和径向速度都较大, 压力场中形成较大的负压通道, 搅拌范围广, 形成颗粒分布较均匀的复合材料。

**关键词:** 搅拌铸造; 复合材料; 流场; 显微组织

作者简介:

毛安南(1997-), 男, 学士, 研究方向为材料成形及控制。E-mail: 1010584612@qq.com

通讯作者:

顿亚鹏, 男, 实验师。E-mail: sdrdyp@126.com

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)03-0228-05

基金项目:

国家科技重大专项资助项目(2019ZX04002030); 十堰市级引导性科研项目(19Y125); 湖北文化创意产业化设计研究中心开放基金(HBCY1911)。

收稿日期:

2019-07-22 收到初稿,  
2019-12-17 收到修订稿。

SiC增强铝基复合材料具有较好的强度、良好的耐热性、小的热膨胀系数和较好的耐磨性, 已在较多领域(如汽车、矿产加工和航空)得到应用<sup>[1-3]</sup>。目前SiC增强铝基复合材料制备方法有搅拌铸造法、喷射沉积法、粉末冶金法和压力浸渗法等。在众多方法中搅拌铸造法制作成本低、工艺流程短且颗粒尺寸适应广, 适合规模化制备。但搅拌铸造法中液态搅拌存在颗粒与铝液体润湿性差, 颗粒进入铝液较困难; 半固态搅拌法可以克服颗粒与铝液润湿性差, 易制备出颗粒均匀分布的复合材料, 但复合材料流动性较液态搅拌法差, 颗粒的团聚还会降低熔体流动性, 颗粒与半固态铝液形成的复合材料熔体流动行为复杂<sup>[4-6]</sup>, 故SiC增强铝基复合材料熔体的流动行为成为制备出颗粒均匀分布在铝基体中的关键因素。

郝世明<sup>[5]</sup>采用液态搅拌铸造工艺制备了不同体积分数的SiC增强铝基复合材料, 颗粒分布均匀, 增加了复合材料中的位错密度, SiC起到良好的支撑作用, 材料耐磨性能优良。张桢林<sup>[6]</sup>采用双级搅拌铸造制备了体积分数为20%的复合材料, 在转速800 r/min和搅拌时间20 min条件下SiC分布均匀性最佳, Yun-hui Du<sup>[7]</sup>针对Al-4.25 vol.%SiC复合材料采用电磁机械搅拌制备, 在620 °C下, 以300 r/min和600 r/min的速度进行电磁-机械搅拌铸造, 获得含有均匀分布的SiC颗粒的复合材料。

当前研究对复合材料流动性对颗粒分布影响研究较少, 本课题采用数值模拟和试验研究结合的方法, 对复合搅拌器的流场特征和速度场进行数值模拟研究, 在此基础上采用搅拌铸造工艺制备颗粒分布均匀的复合材料, 以期新型搅拌器的结构设计提供参考。

## 1 复合材料流场数值模拟

### 1.1 几何建模

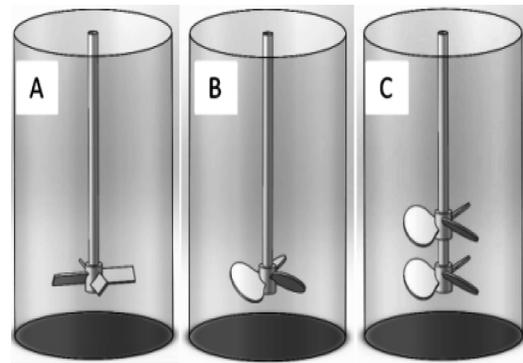
图1为通过SolidWorks设计的三种搅拌桨的三维模型, 搅拌桨离底高度为30 mm, 坩埚内径为130 mm, 高度为200 mm, 坩埚内铝液高度为100 mm。熔融的铝液为高温

并且不透明熔体,通过CFD软件可模拟显示出其速度场、压力场等,间接指导搅拌桨搅拌过程中熔体发生的剪切过程,能够有助于搅拌器的设计和优化。将模型导入ICEM CFD软件,采用四面立方进行网格划分,网格总数量为139 378,为四面体网格。三叶螺旋单桨和四叶直桨叶片的水平夹角分别为 $60^\circ$ 和 $45^\circ$ ,三叶双桨两桨距离为35 mm。选用材料为A357铝合金,热物性性能从软件数据库获取, $\text{SiC}_p$  A357复合材料密度为 $2\ 630\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,粘度为 $1.6\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ ,并且将搅拌桨设定为Wall,速度为700 rpm。坩埚其他区域设定为定区域<sup>[8]</sup>,搅拌桨附近流体设定为运动区,通过将搅拌桨Wall设定转动速度,用不可穿透的Wall带动流体产生流场,将划分和设定好的mesh文件导入Fluent软件,流体模型设定为湍流模型的k-epsilon,熔体视为不可压缩的牛顿流体,假设流场为稳态的完全湍流。

## 1.2 速度场分析

图2是三种不同搅拌桨产生流场的速度矢量图。三种搅拌桨直径为68 mm,底高为30 mm,搅拌桨转动速度为700 rpm。分析速度矢量图可以得到不同搅拌桨形成流场中速度大小,方向和范围也均有不同。

如图2a所示,流体速度方向沿搅拌杆从上向下,流场中最大速度形成在搅拌桨上方,这是由于搅拌桨有 $45^\circ$ 的斜度,在搅拌桨端部形成循环流,坩埚底部熔体被流场提升向上运动,上部熔体受流场作用向坩埚壁处运动,碰撞坩埚壁后向下运动。速度大的范围集



(a) 四叶直桨 (b) 三叶螺旋单桨 (c) 双级三叶螺旋桨

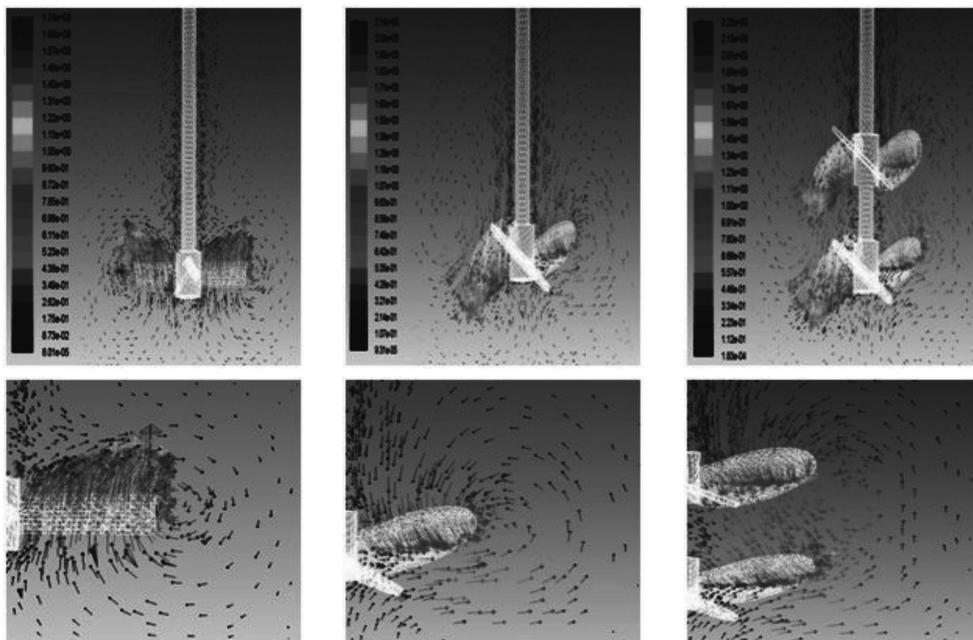
图1 搅拌桨三维建模及网格划分

Fig. 1 Three-dimensional modeling and mesh generation of stirring propeller

中在搅拌桨端部和搅拌杆附近,搅拌桨上方为最大速度,其余位置的流场速度较慢,特别是中心底部的流场和坩埚壁处,导致此处颗粒不能充分进入熔体。

图2b所示,三叶螺旋桨较四叶直桨,最大速度从1.74 m/s到达了2.14 m/s。由于斜度方向不同,环流方向从逆时针变为顺时针,存在轴向涡流。搅拌桨的下方流场速度最大,三叶螺旋桨底部的流场存在循环流,通过搅拌桨,底部的熔体被吸引进入上方的循环,同时增大了循环速度,不仅提高了对碳化硅的搅拌效率,同时增大了搅拌范围。

如图2c所示,双级三叶螺旋桨带动更大范围的熔



(a) 四叶直桨

(b) 三叶螺旋单桨

(c) 双级三叶螺旋式桨

图2 不同搅拌桨的速度矢量

Fig. 2 Velocity vectors of different agitators

体运动, 流体速度都增大, 桨间存在轴向涡流。底部熔体受搅拌桨作用向上部流动, 上下部在轴向方向循环流动。

### 1.3 压力场分析

搅拌过程产生压力差继而产生剪切力, 影响碳化硅均匀分布。模拟的压力场分布图, 可以侧面体现不同搅拌桨的工作效率。图3为压力场, 可见四叶直桨负压通道不明显, 三叶螺旋单桨的垂直负压范围要大于四叶直桨, 特别是搅拌桨上方和正下方区域。其垂直方向上方负压有利于SiC颗粒从液面顺负压通道进入熔体, 强于直桨。而下方负压, 对于铝液下方流体具有强烈吸引, 可形成循环, 防止碳化硅下沉。从图3c中看到压力明显增大, 范围较三叶单桨和四叶单桨较广, 这是双桨叠加的效果, 对熔体的流动控制更强。从径向图中可以看到, 坩埚壁附近为正压, 这有利于SiC颗粒在坩埚壁处的均匀分散。

### 1.4 湍动能分析对比

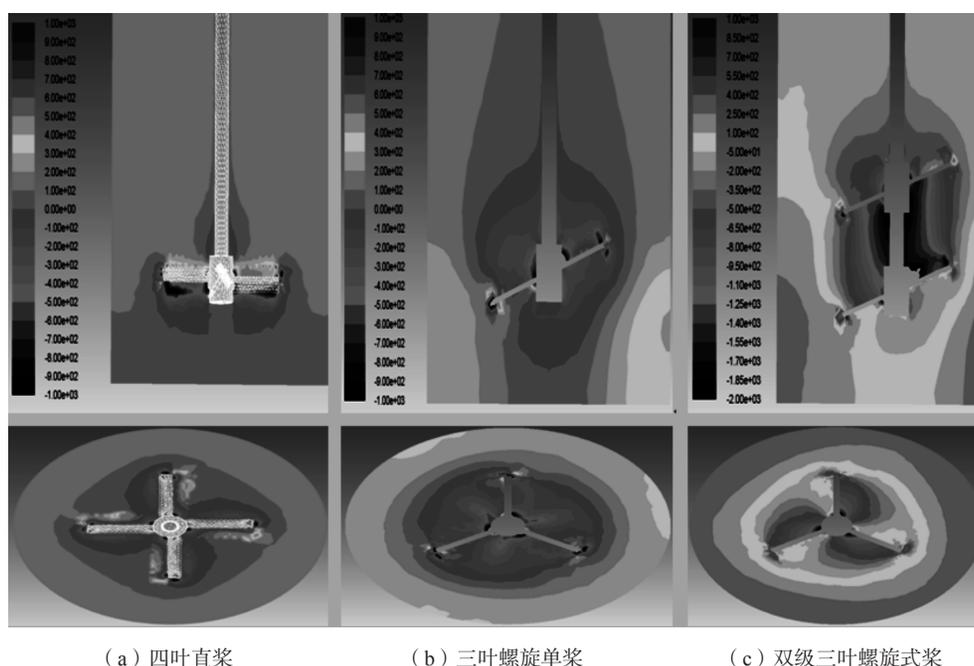
湍动能是衡量湍流混合能力强弱的重要指标。湍动能反应搅拌桨机械做功使熔体产生湍流强度和范围大小。图4为流动能分布, 可以看出直桨湍动能在流场中分布不均匀, 靠近搅拌桨附近的流体湍动能大, 靠坩埚壁侧的湍动能小。在三叶螺旋桨中湍动能有了提升(图4b), 湍动能水平范围更广, 覆盖到了坩埚壁侧。双级三叶螺旋式桨中湍流作用范围和能量均大于两种单桨(图4c)。通过模拟, 得到

双桨在搅拌的时候, 熔体的湍流作用围绕搅拌桨, 在相同搅拌速度下传递给熔体的能量更大。对比另外两种单桨, 能带动更大范围的熔体运动, 搅拌桨做的功能更多地传递给熔体, 即提高碳化硅的分散均匀性。

## 2 搅拌铸造试验与分析

依据模拟时采用的工艺参数, SiC颗粒经过酸洗后粒度分布相对均匀, 平均尺寸为 $10\ \mu\text{m}$ (图5a)。SiC颗粒在基体中的体积分数为10%, 金属基体采用A357铝合金。搅拌温度为 $600\ ^\circ\text{C}$ , 搅拌速度为700 rpm, 搅拌时间为40 min。利用5%氢氟酸溶液, 清洗SiC去除杂质, 干燥后于 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 高温氧化, 表面高温氧化成 $\text{SiO}_2$ 以增加润湿性<sup>[4]</sup>, SiC颗粒在 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 氧化4 h能够使 $\text{SiO}_2$ 层厚达到25 nm(图5b)。

采用四叶直式桨、三叶螺旋式桨和双级三叶螺旋式桨, 在最优工艺参数下进行搅拌铸造, 将试样处理后, 通过金相显微镜观察微观组织。图6a为四叶单桨搅拌铸造后的显微组织和铸锭的切割宏观断面, 由于在搅拌过程中速度小, 压力场中产生的负压通道小, 导致SiC进入熔体的量很少, 大部分漂浮在熔体上, 从宏观断面观察SiC颗粒较少, 未能制备出颗粒均匀分散的复合材料, 图6b为三叶单级螺旋单桨搅拌铸造后的显微组织和铸锭的切割宏观断面, 搅拌过程中熔体速度大于四叶单桨, 压力场中形成了明显的负压通道, 能够使熔体上部颗粒由负压通道进入熔体, 在轴向与径向流体循环中分散, 从显微组织中观察, 颗粒分散程度小, 宏观断面观察SiC颗粒不均匀且存在团聚现



(a) 四叶直桨

(b) 三叶螺旋单桨

(c) 双级三叶螺旋式桨

图3 不同搅拌桨形成的压力场

Fig. 3 Pressure fields formed by different agitators

象。图6c为双极螺旋搅拌铸造后的显微组织和铸锭的切割宏观断面图，流场中轴向和径向速度都较大，压力场中形成较大的负压通道，搅拌范围广，同时搅拌

器传递给熔体的能量较多，使SiC具备足够能量进入熔体，从宏观断面观察SiC颗粒分布较为均匀，无团聚现象，形成颗粒较为均匀分布的复合材料。

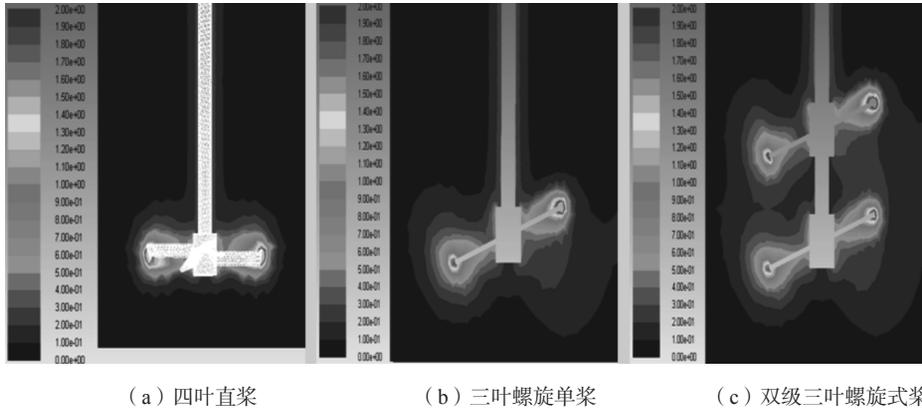


图4 不同搅拌桨形成的湍流动能  
Fig. 4 Turbulent kinetic energy generated by different agitators

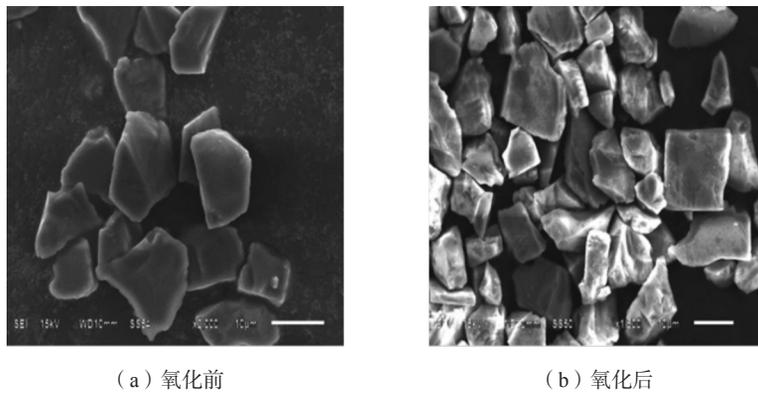


图5 SiC高温氧化前后的微观形貌

Fig. 5 Micro-morphology of SiCp before and after high temperature oxidation

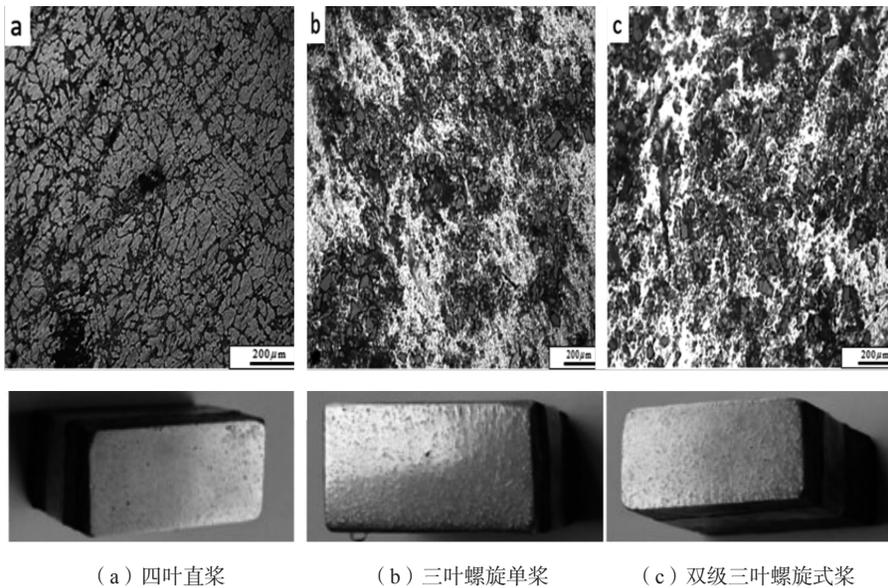


图6 搅拌后显微组织与宏观形貌  
Fig. 6 Microstructure and macromorphology of four-bladed paddle, three-bladed propeller and double stage three-bladed screw propeller after stirring casting

### 3 结论

(1) 采用计算流体力学模拟了不同搅拌桨在熔体搅拌形成的速度场、压力场和湍流动能, 双极螺旋搅拌桨形成流场中存在轴向漩涡, 对底部颗粒有提升作用, 促进颗粒分散, 径向速度明显高于三叶、四叶单桨, 使熔体在径向方向能够充分流动和混合; 压力场中形成明显的负压通道利于上部颗粒进入熔体参与流动; 相同搅拌速度下湍流动能较大, 搅拌桨做的功能更多的传递给熔体, 带动更大范围的熔体运动, 提高

碳化硅的分散均匀性。

(2) 四叶单桨搅拌流场中速度小, 压力场中产生的负压通道小, 导致SiC进入熔体的量很少, 大部分漂浮在熔体上面, 未能制备出颗粒均匀分散的复合材料。三叶单级螺旋单桨压力场中形成了明显的负压通道, 能够使熔体上部颗粒由负压通道进入熔体, 但存在团聚现象。双极螺旋搅拌形成的, 流场中轴向和径向速度都较大, 压力场中形成较大的负压通道, 搅拌范围广, 形成颗粒较为均匀分布的复合材料。

#### 参考文献:

- [1] YE T K, XU Y X, REN J. Effects of SiC particle size on mechanical properties of SiC particle reinforced aluminum metal matrix composite [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 753: 146–155.
- [2] KNOWLES A J, JIANG X, GALANO M, et al. Microstructure and mechanical properties of 6061 Al alloy based composites with SiC nanoparticles [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 615: S401–S405.
- [3] 邱翠榕. 车制动用SiC颗粒增强铝基复合材料的性能研究 [J]. *粉末冶金工业*, 2019, 29(4): 38–41.
- [4] 杨锐, 王筱峻, 吴星平, 等. 搅拌铸造制备SiC颗粒增强铝基复合材料研究现状 [J]. *材料导报*, 2013, 27(9): 131–136.
- [5] 郝世明, 毛建伟, 谢敬佩, 等. 陶瓷颗粒增强SiC<sub>p</sub>/Al铝基复合材料制备和性能研究 [J]. *铸造*, 2017, 66(4): 332–336.
- [6] 张桢林, 张志峰, 徐骏, 等. SiC<sub>p</sub>/Al复合材料搅拌铸造新型搅拌器流场及工艺研究 [J]. *材料导报*, 2017, 31(10): 141–145.
- [7] DU Y H, ZHANG P, ZHANG W Y, et al. Distribution of SiC particles in semisolid electromagnetic-mechanical stir-casting Al-SiC composite [J]. *China Foundry*, 2018, 15(5): 351–357.
- [8] 温文. 搅拌釜式反应器计算流体力学模拟 [D]. 无锡: 江南大学, 2008.

## Numerical Simulation of Stirring Casting Process of SiC Particle Reinforced Al Matrix Composites

MAO An-nan<sup>1,2</sup>, DUN Ya-peng<sup>1</sup>, LIN Jin-ming<sup>3</sup>, YANG Wei<sup>1</sup>, DU An-dong<sup>3</sup>, ZHANG Di<sup>1</sup>

(1. Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, Hubei, China; 2. Dongfeng Cummins Engine Co., Ltd., Xiangyang 441000, Hubei, China; 3. Haixi (Fujian) Institute, China Academy of Machinery Science & Technology Ltd., Shaxian 365500, Fujian, China)

#### Abstract:

The velocity field, pressure field and turbulent kinetic energy of different agitators were numerically simulated by Fluent software. Based on the microstructure analysis, the velocity field distribution, pressure structure and turbulent kinetic energy of four blade straight single propeller, three blade spiral single propeller and bipolar spiral single propeller were compared, and their influence on SiC dispersion in melt was also analyzed. The results show that there are axial vortex and radial circulation in the velocity field formed by the bipolar spiral single propeller, and the larger negative pressure channel formed in the pressure field is conducive to the particles entering the melt, and the turbulent kinetic energy is also larger than the turbulent kinetic energy of the two single propeller, which drives the melt to move in a larger range and facilitates the particles to disperse. Through microscopic observation, the four-blade agitator fails to form a good negative pressure channel in the flow field, and the particles fail to fully enter the melt; particle agglomeration exists in the composite materials formed by the three-blade agitator; the axial and radial velocities of bipolar spiral agitator flow field are both large, and a large negative pressure channel is formed in the pressure field, with a wide range of agitation, and a composite material with relatively uniform distribution of particles is formed.

#### Key words:

stir casting; composite material; flow field; microstructure