

# 铝合金铸件凝固过程二次枝晶臂间距模拟计算

车家宝<sup>1</sup>, 廖敦明<sup>1</sup>, 孙飞<sup>1</sup>, 陈涛<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉430074; 2. 武汉晨曦芸峰科技有限公司, 湖北武汉430074)

**摘要:** 以铸造CAE温度场为基础, 根据Furer-Wunderlin二次枝晶臂间距计算方法, 建立了预测铝合金铸件凝固过程二次枝晶臂间距的计算模型。计算了ZL101A阶梯形铸件在凝固过程中不同部位的局部凝固时间和各个时刻的二次枝晶臂间距大小, 对铝合金试验铸件进行金相组织观察, 测量计算得到了铸件的二次枝晶臂间距大小, 将计算结果与试验结果进行对比, 验证了计算模型的准确性。

**关键词:** 铝合金; 二次枝晶臂间距; 模拟; 凝固

铝合金具有优良的铸造性能、力学性能和物理性能, 在航空航天领域和汽车制造业中应用广泛<sup>[1-2]</sup>。随着计算机技术的不断发展和突破, 数值模拟逐步应用于铸造工艺设计和优化过程中, 铸造CAE技术对于铸件产品质量的提升起到了积极的效果<sup>[3]</sup>。屈服强度、抗拉强度等力学性能是铸件产品验收时的重要指标, 许多铸件因为力学性能未达标而报废。铸件的力学性能与其二次枝晶臂间距(简称SDAS)的大小密切相关<sup>[4]</sup>, 目前的实验手段只能通过金相组织观察来获得铸件凝固结束后的二次枝晶臂间距大小情况, 难以直接观测凝固过程中二次枝晶臂间距的变化过程。数值模拟技术可以直观地模拟预测铸件不同部位的二次枝晶臂间距大小, 从而为铸件力学性能的评估和铸造工艺的改进提供一定的参考。

铸造数值模拟领域中许多学者针对凝固过程中的枝晶生长进行了相关研究, 如清华大学的陈瑞<sup>[5]</sup>等采用元胞自动机模型对Al-7Si-Mg铸造铝合金的枝晶生长和共晶生长过程进行模拟, 预测了二次枝晶臂间距和晶粒度等参数。中北大学的康永生<sup>[6]</sup>等使用相场模型对Fe-C合金凝固时的三维枝晶生长过程进行了模拟。Chang<sup>[7]</sup>等运用改进的元胞自动机模型模拟了铸造铝合金凝固时枝晶组织的演变过程。铸件枝晶生长等微观组织模拟的求解模型通常比较复杂, 并且计算效率低、计算量大<sup>[8-9]</sup>, 在实际铸造过程中很难获得广泛的应用。因此, 针对铸件宏观上的二次枝晶臂间距模拟对于实际生产而言具有重要的意义, 可在铸造过程中起到一定的指导作用。

本文以铸造CAE温度场为基础, 根据Furer-Wunderlin二次枝晶臂间距计算方法, 建立了预测铝合金铸件凝固过程中二次枝晶臂间距的计算模型, 可获得铸件在不同凝固时刻的二次枝晶臂间距大小。运用该模型对ZL101A阶梯形铸件的凝固过程进行模拟分析, 预测了铸件的局部凝固时间和各个凝固时刻的二次枝晶臂间距。为了证明二次枝晶臂间距计算模型的准确性, 对阶梯形试验铸件进行金相组织观察和二次枝晶臂间距测量, 对比分析了二次枝晶臂间距的模拟结果与试验结果。

## 作者简介:

车家宝(1994-), 男, 硕士生, 主要研究方向为铸件凝固组织数值模拟。  
E-mail: chejiabao2010@qq.com

## 通讯作者:

廖敦明, 男, 教授, 博士。  
电话: 18071121688, E-mail: liaodunming@hust.edu.cn

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)04-0382-06

## 基金项目:

教育部新世纪人才支持计划(NCET-13-0229)。

## 收稿日期:

2019-11-26 收到初稿,  
2020-01-09 收到修订稿。

## 1 凝固过程二次枝晶臂间距模拟

### 1.1 铸造 CAE 温度场

凝固过程温度场是铸件二次枝晶臂间距计算的基础。本研究中, 使用课题组自主开发的铸造模拟软件计算得到铝合金铸件凝固过程中的温度场, 该软件使用有限

差分法进行规则的网格划分从而求解出温度场，得到铸件中不同网格单元在各个凝固时刻的温度值。

局部凝固时间是指铸件某一位置从凝固开始到凝固终了所需要的时间，即从液相线温度下降至固相线温度所经历的时间。根据铸件的CAE温度场可以计算得到铸件所有网格单元的局部凝固时间。局部凝固时间和冷却速度直接影响着凝固过程中二次枝晶臂间距的大小，局部凝固时间与冷却速度的关系式为：

$$t_f = \frac{\Delta T_s}{v} \quad (1)$$

式中： $t_f$ 为局部凝固时间，s； $v$ 为冷却速度， $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ； $\Delta T_s$ 为非平衡凝固温度范围， $^{\circ}\text{C}$ 。

## 1.2 凝固过程二次枝晶臂间距计算模型

枝晶的形态通常用一次主干间距 $\lambda_1$ 和二次枝晶臂间距 $\lambda_2$ 来表征<sup>[10]</sup>。在凝固组织中测量得到的 $\lambda_1$ 的值与其在生长时是相同的，而二次枝晶臂间距由于高度弯曲的分支与合金熔体长时间接触而明显增大。二次枝晶臂间距是枝晶的重要特征参数，并且对力学性能有着重要的影响。

铸造铝合金凝固过程中影响SDAS的因素包括：局部凝固时间、合金成分和溶质扩散系数等。目前许多学者的研究表明：若凝固速度越快，则SDAS越小，相应的力学性能也越好。在二次枝晶臂粗化过程中，一个可能的机制是细小的二次枝晶臂熔化，同时较粗的二次枝晶臂直径增大。这种粗化过程的驱动力是由曲率不同和界面能各异而导致的晶体化学势差异<sup>[10-11]</sup>。基于此项假设，Furer和Wunderlin建立了计算二次枝晶臂间距的数学模型<sup>[11-12]</sup>，得到SDAS与局部凝固时间的关系式：

$$\lambda_2 = 5.5(A t_f)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中： $\lambda_2$ 为二次枝晶臂间距； $A$ 为粗化系数； $t_f$ 为局部凝固时间。

其中，

$$A = \frac{\Gamma D_L \ln \frac{C_L}{C_0}}{m_L(1-k)(C_0 - C_L)} \quad (3)$$

式中： $\Gamma$ 为Gibbs-Thompson系数； $D_L$ 为液相中溶质的扩散系数； $C_L$ 为液相浓度； $C_0$ 为合金液的原始浓度； $m_L$ 为液相线的斜率； $k$ 为平衡分配系数。

根据式(2)可知二次枝晶臂间距与局部凝固时间成正比，即在粗化系数不变的情况下，局部凝固时间越长（凝固速率越小），则二次枝晶臂间距越大。一般情况下，当铸造工艺条件和合金材质等确定后，粗化系数可当作常数进行处理，因此对式(2)做一定的变换可得到：

$$\lambda_2 = M \cdot t_f^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

式中， $M$ 为常数。

粗化系数 $A$ 的值可以通过式(3)计算得到，其计算过程中涉及到多种系数和凝固参数。 $t_f$ 可基于CAE温度场计算得到，计算方法为线性插值法。图1为铸件的局部凝固时间计算示意图。

图1的温度-时间曲线中， $T_L$ 为铝合金的液相线温度， $T_S$ 为固相线温度， $t_L$ 和 $t_S$ 分别为CAE温度场中对应 $T_L$ 和 $T_S$ 的凝固时刻。 $T_1$ 、 $T_2$ 为距离液相线温度最近的两个数值模拟温度， $T_3$ 、 $T_4$ 为距离固相线温度最近的两个数值模拟温度。 $t_1 \sim t_4$ 分别为CAE温度场中对应温度 $T_1 \sim T_4$ 的不同凝固时刻。数值模拟过程中，铸件的温度场时刻地变化着，而每一时刻的温度场中不同网格单元的数值模拟温度各不相同，因此不同网格单元的降温曲线各有差异，可计算得到相应的局部凝固时间。凝固时刻 $t_L$ 和 $t_S$ 通过线性插值法计算得到，图1中将 $T_1$ 至 $T_2$ 这一段温度曲线近似为以 $(t_1, T_1)$ 和 $(t_2, T_2)$ 为两个端点的一段直线。 $t_L$ 的计算公式如下：

$$t_L = \frac{t_1(T_L - T_2) + t_2(T_1 - T_L)}{T_1 - T_2} \quad (5)$$

式中， $t_L$ 为液相线温度对应的凝固时刻。

同理，可得 $t_S$ 的计算公式如下：

$$t_S = \frac{t_3(T_S - T_4) + t_4(T_3 - T_S)}{T_3 - T_4} \quad (6)$$

式中， $t_S$ 为固相线温度对应的凝固时刻。

根据凝固时刻 $t_L$ 和 $t_S$ 可得到铸件全部网格单元的局部凝固时间，通过式(2)的计算，从而得到铸件各网格单元的二次枝晶臂间距大小。

## 1.3 计算流程

铝合金铸件凝固过程二次枝晶臂间距模拟的计算流程如图2所示，通过使用C++语言编程实现了二次枝晶臂间距的计算模型。

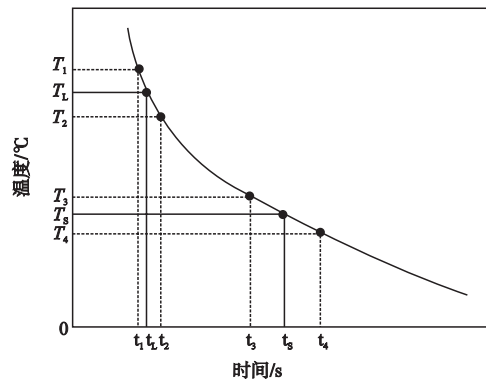


图1 局部凝固时间计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of local solidification time calculation

首先对铝合金铸件进行数值模拟得到铸件凝固过程中不同时刻的温度场,读取不同凝固时刻的温度场数据后可获得铸件各个网格单元的凝固过程温度变化数据。将每个网格单元的温度变化数据与合金的液相线温度和固相线温度进行比较,通过线性插值法分别求解得到凝固开始时刻和凝固终止时刻,根据凝固开始和终止时刻计算出铸件中每个网格单元的局部凝固时间 $t_f$ 。液相中溶质扩散系数和液相线斜率通过金属材料性能模拟软件JMatPro计算获得,依据公式 $k=C_S/C_L$ 计算得到平衡分配系数 $k$ ,其中 $C_S$ 为溶质在固相中的浓度, $C_L$ 为溶质在液相中的浓度。根据液相中溶质的扩散系数和液相浓度等相关的参数,可以求解得到粗化系数 $A$ 。将局部凝固时间 $t_f$ 和粗化系数 $A$ 代入二次枝晶臂间距计算模型中,求解得到铝合金铸件每个网格单元的二次枝晶臂间距模拟结果。最后,将二次枝晶臂间距的值赋给铸件中对应的网格单元并输出特定格式的模拟结果文件,可通过后处理模块显示铸件的二次枝晶臂间距分布。

## 2 结果与讨论

为了验证二次枝晶臂间距计算模型的准确性,对凝固阶段的铝合金阶梯形铸件进行二次枝晶臂间距数值模拟,获得了铸件不同部位的局部凝固时间和二次枝晶臂间距大小。对铝合金阶梯形铸件进行了浇注试验,通过对试样进行金相组织观察,测量计算得到了铸件的二次枝晶臂间距大小,将模拟结果与试验结果进行对比,验证了计算模型的准确性。

### 2.1 阶梯形铸件模拟计算

针对铸造铝合金ZL101A阶梯形铸件进行了凝固过程温度场和二次枝晶臂间距数值模拟。ZL101A属于Al-Si系合金,该合金成分简单,铸造性能优良,流动性好,线收缩小。ZL101A合金成分如表1所示,通过材料性能模拟软件JMatPro计算得到ZL101A的液相线温度为616.84℃,固相线温度为555℃,从而计算出非平衡凝固温度区间为61.84℃。

阶梯形铸件由于不同厚度的阶梯在凝固过程中冷却速度各有差异,因此非常适合用于验证不同部位二次枝晶臂间距的大小情况。ZL101A阶梯形铸件的铸造工艺模型如图3所示,其中包括铸件、浇注系统和明顶冒口,明顶冒口可以起到补缩的效果。

阶梯件凝固数值模拟的类型为重力砂型铸造,铸型使用以石英为主要成分的硅砂。通过模拟计算得到铸件、冒口和浇注系统等在此工艺条件下的凝固阶段温度场分布以及相应的数据结果。铸件凝固过程中不同时刻的温度场数值模拟结果如图4所示。

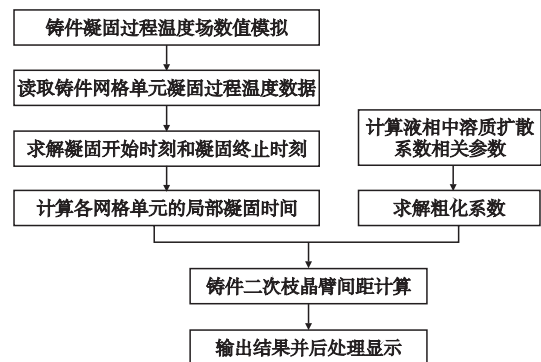


图2 计算流程图

Fig. 2 Flow chart of calculation

表1 ZL101A合金成分

Table 1 Chemical composition of ZL101A alloy

合金牌号	合金代号	主要元素 $w_B/\%$			
		Si	Mg	Ti	Al
ZAlSi7MgA	ZL101A	6.5~7.5	0.25~0.45	0.08~0.20	余量

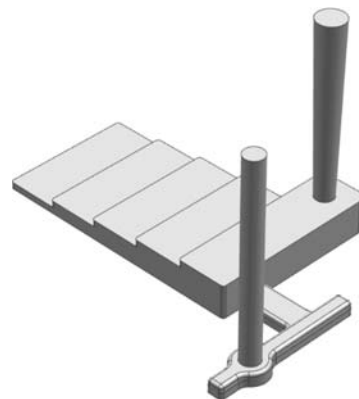


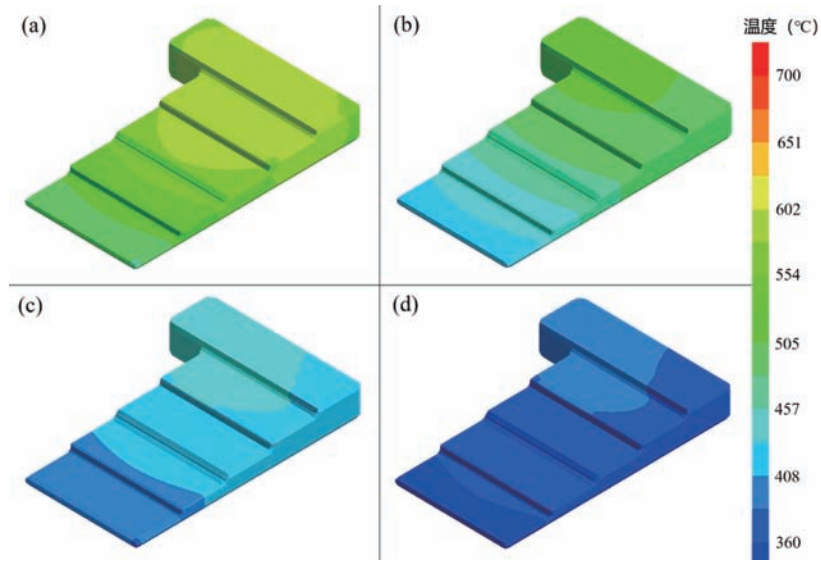
图3 阶梯形铸件铸造工艺模型

Fig. 3 Casting process model of stepped casting

铸件局部凝固时间分布如图5所示,不同凝固时刻的二次枝晶臂间距分布如图6所示。凝固过程中,厚度大的阶梯部位由于冷却缓慢,从液相线温度降至固相线温度所需的局部凝固时间较长,从而枝晶比较粗大,二次枝晶臂间距较大。厚度小的阶梯由于散热更快,因此局部凝固时间较短,二次枝晶臂间距较小。通过观察图5、图6可知,数值模拟结果与理论推测基本一致。

### 2.2 金相组织观察试验

对ZL101A阶梯形铸件进行实际的浇注试验,试验工艺条件与数值模拟保持一致。铸件凝固结束后,需要获得位于每个阶梯中心位置的试样。使用金相试样切割机从铸件各阶梯中心位置切取尺寸约为10 mm × 10 mm × 10 mm的试样,再利用镶样机制备尺寸为Φ30 mm × 15 mm的金相试样,金相试样经过粗磨、精磨、抛光和腐蚀后,在金相显微镜下观察金相组织。铸



(a) 200 s; (b) 600 s; (c) 800 s; (d) 1000 s

图4 铸件凝固过程不同时刻温度场数值模拟结果

Fig. 4 Numerical simulation results of temperature field at different times during solidification

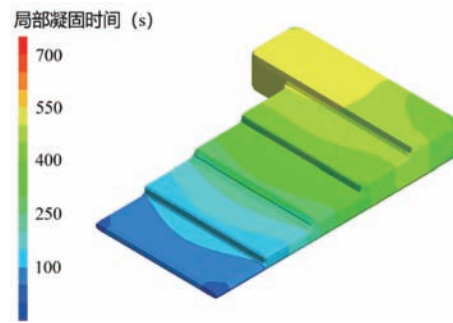
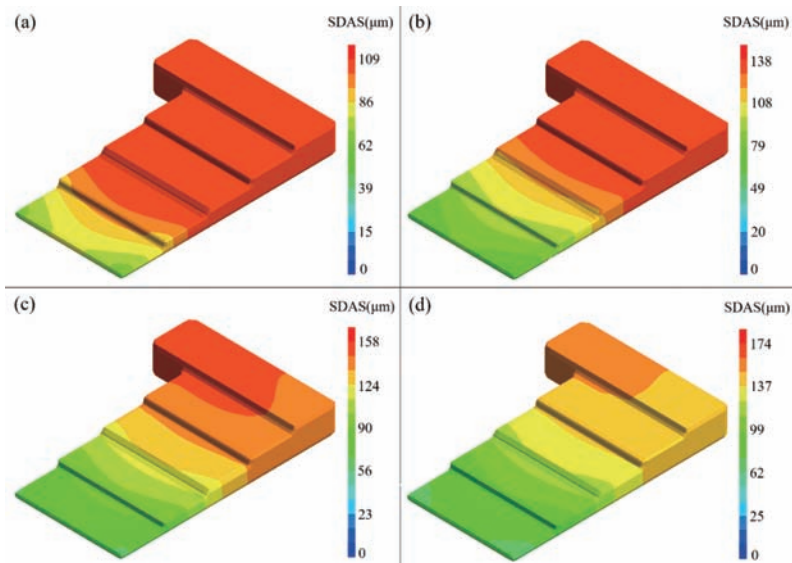


图5 铸件局部凝固时间分布

Fig. 5 Local solidification time distribution of casting



(a) 200 s; (b) 400 s; (c) 600 s; (d) 800 s

图6 铸件凝固过程不同时刻二次枝晶臂间距分布

Fig. 6 Secondary dendrite arm spacing distribution at different times during solidification



件共有5个厚度不同的阶梯，因此可以观察得到5个不同位置的金相组织，试样在铸件中的位置如图7所示。

使用枝晶法计算实际的二次枝晶臂间距，首先在观察某个金相试样时随机选取10个不同视场（ $\times 50$ ），然后在不同的视场中选择 $N$ 个连续清晰的二次枝晶，使用图像处理分析软件Image-Pro Plus测出长度为 $L$ ，SDAS则为  $D = \frac{L}{N-1}$ 。最后计算出金相试样上不同视场的二次枝晶臂间距平均值： $\lambda_2 = \frac{\sum_1^n D_n}{n}$ ， $n$ 为视场数， $D_n$ 为第 $n$ 个视场计算得到的SDAS大小。

### 2.3 模拟与试验结果对比及分析

通过对阶梯形铸件的局部凝固时间和二次枝晶臂间距进行数值模拟，获得试样位置所对应的网格单元，将相应网格单元的数值模拟结果导出可得到不同试样的局部凝固时间和SDAS大小情况。表2为不同厚度的阶梯中试样的局部凝固时间数值模拟结果，通过观察可知，阶梯厚度越大，局部凝固时间越长，即冷却速度越慢，模拟结果符合实际情况。

铸件试样的金相组织如图8所示，通过测量和计算得到各试样的二次枝晶臂间距大小，二次枝晶臂间距

的数值模拟结果与金相观察结果如表3所示。

图9为二次枝晶臂间距的模拟结果和金相观察结果与阶梯厚度之间的关系图，通过分析表2、表3和图9可以看出，铸件阶梯厚度越大，SDAS越大，并且SDAS与局部凝固时间成正比关系，二次枝晶臂间距计算模型与试验结果保持一致。模拟计算得到的SDAS值与金相组织观察结果差距较小，可以认为模拟结果与试验结果对应较好，从而验证了铝合金二次枝晶臂间距预测模型的准确性。

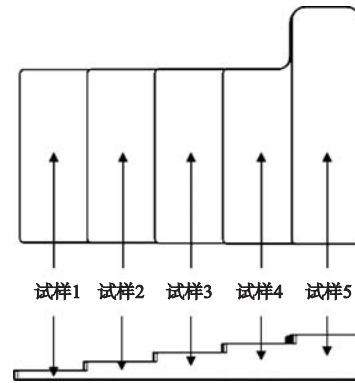
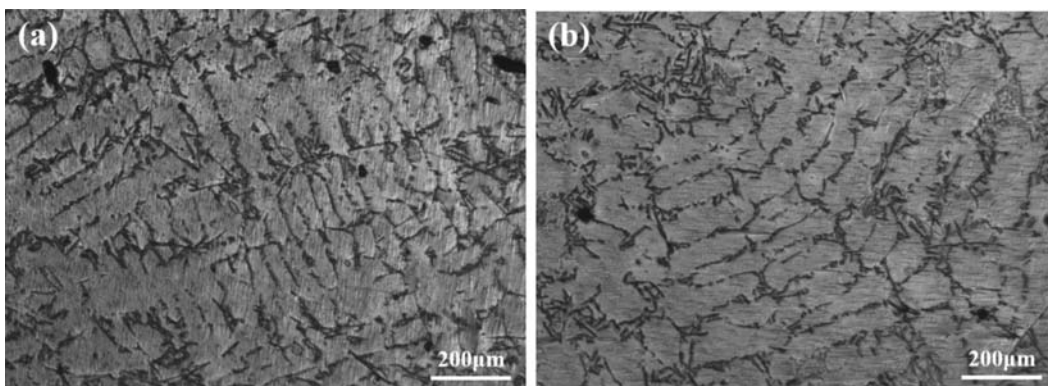


图7 铸件中试样位置示意图

Fig. 7 Position of samples in casting



(a) 厚度6 mm阶梯中试样

(b) 厚度18 mm阶梯中试样

图8 铸件试样的金相组织

Fig. 8 Metallographic structure of stepped casting samples

表2 铸件试样局部凝固时间数值模拟结果  
Table 2 Numerical simulation results of local solidification time of casting samples

试样编号	阶梯厚度/mm	局部凝固时间/s
1	6	81.210
2	12	173.190
3	18	319.462
4	24	459.389
5	30	513.992

表3 二次枝晶臂间距数值模拟结果与金相观察结果  
Table 3 Numerical simulation results and metallographic observation results of SDAS

试样编号	阶梯厚度/mm	数值模拟SDAS/ $\mu\text{m}$	金相观察SDAS/ $\mu\text{m}$
1	6	82.1	78.5
2	12	105.4	97.5
3	18	129.0	122.8
4	24	145.5	138.7
5	30	150.9	147.2

### 3 结论

(1) 以铸造CAE温度场为基础, 根据Furer-Wunderlin二次枝晶臂间距计算方法, 建立了预测铝合金铸件凝固过程二次枝晶臂间距的计算模型。

(2) 运用二次枝晶臂间距计算模型对ZL101A阶梯形铸件进行模拟分析, 预测了铸件不同部位的局部凝固时间和各个凝固时刻的二次枝晶臂间距大小及分布情况。

(3) 对铝合金阶梯形铸件进行浇注试验, 通过金相组织观察和测量得到了试样的二次枝晶臂间距结果。对比分析了二次枝晶臂间距的模拟结果和试验结果, 验证了二次枝晶臂间距计算模型的准确性。

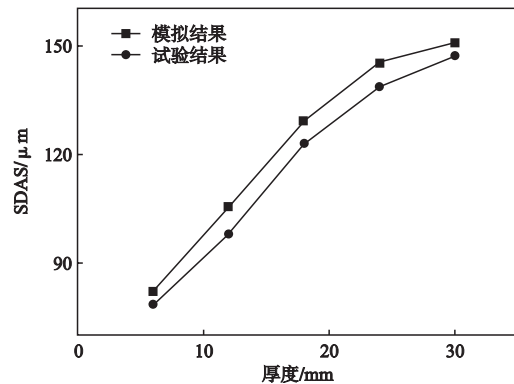


图9 二次枝晶臂间距与阶梯厚度之间的关系  
Fig. 9 Relationship between SDAS and step thickness

#### 参考文献:

- [1] SHABESTARI S G, MOEMENI H. Effect of copper and solidification conditions on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153-154: 193-198.
- [2] 陈福义, 介万奇. Al-Cu-Zn合金微观偏析的实验和Scheil模型研究 [J]. 金属学报, 2004, 40(6): 664-668.
- [3] 廖敦明, 曹流, 孙飞, 等. 铸造宏观过程数值模拟技术的研究现状与展望 [J]. 金属学报, 2018, 54(2): 161-173.
- [4] SHABANI M, MAZAHERY A. Prediction of mechanical properties of cast A356 alloy as a function of microstructure and cooling rate [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2011, 56(3): 671-675.
- [5] 陈瑞, 许庆彦, 郭会廷, 等. Al-7Si-Mg铸造铝合金凝固和热处理过程微观组织模拟和屈服强度预测 [J]. 稀有金属, 2017, 41(8): 837-849.
- [6] 康永生, 赵宇宏, 侯华, 等. Fe-C合金枝晶生长的三维相场模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(12): 1262-1265.
- [7] CHANG S R, KIM J M, HONG C P. Numerical simulation of microstructure evolution of Al alloys in centrifugal casting [J]. ISIJ International, 2001, 41(7): 738-747.
- [8] 杨云峰, 谢明, 程勇, 等. 金属凝固微观组织数值模拟研究现状 [J]. 材料导报, 2014, 28(21): 24-29.
- [9] CHEN L Q. Phase-field models for microstructure evolution [J]. Annual Review of Materials Research, 2002, 32(1): 113-140.
- [10] KURZ W, FISHER D J. Fundamentals of Solidification [M]. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2005.
- [11] 何娟, 邹勇志, 黄文貌, 等. 冷却速度对ZL114A合金二次枝晶臂间距的影响 [J]. 铸造技术, 2008, 29(9): 1214-1216.
- [12] 李晨希, 郭天明, 李荣德, 等. 二次枝晶臂间距的研究 [J]. 铸造, 2004, 53(12): 1011-1014.

## Simulation Calculation of Secondary Dendritic Arm Spacing During Solidification of Aluminum Alloy Casting

CHE Jia-bao<sup>1</sup>, LIAO Dun-ming<sup>1</sup>, SUN Fei<sup>1</sup>, CHEN Tao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Wuhan Chenxi Yunfeng Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, Hubei, China)

#### Abstract:

Based on the temperature field of casting numerical simulation and Furer-Wunderlin secondary dendrite arm spacing calculation method, a model for predicting the secondary dendrite arm spacing during solidification of aluminum alloy casting was established. The local solidification time of different parts and the secondary dendrite arm spacing at each moment in the solidification process of ZL101A stepped casting were calculated, and the actual secondary dendrite arm spacing of the casting was measured and calculated by observing the microstructure of experimental aluminum alloy casting. The accuracy of the calculation model is verified by comparing the calculation results with the test results.

#### Key words:

aluminum alloy; secondary dendritic arm spacing; simulation; solidification