# 型壳参数对 ZL101A 合金凝固过程 温度变化的影响规律

### 张荣强<sup>1</sup>,冀晓磊<sup>1</sup>,丁方政<sup>2</sup>,王 琳<sup>1</sup>,王子阳<sup>1</sup>,李园园<sup>1</sup>,邢昌勇<sup>1</sup>

(1.河北钢研德凯科技有限公司,河北保定072750;2.空装驻北京地区第六军代室,北京100095)

摘要:采用数值模拟与工艺试验相结合的方法研究了熔模铸造ZL101A铸件凝固过程中不同的 型壳预热温度和型壳厚度对金属温度变化的影响。数值模拟结果表明,在合金固相线温度以 上,型壳预热温度对金属凝固过程温度变化的影响较大,型壳预热温度越高,金属温度波动 幅度越明显;在合金固相线温度以下,型壳厚度对金属凝固过程温度变化的影响较大,且随 型壳厚度的增加影响逐渐减弱。选取型壳厚度6 mm、型壳预热温度350 ℃进行工艺试验,验 证了数值模拟的可行性与准确性。

关键词: ZL101A; 熔模铸造; 型壳预热温度; 型壳厚度; 铸件温度; 数值模拟

铝合金铸件广泛应用于航空、航天和航海等领域,逐渐向整体化、精密化和复杂化方向发展,生产出"零缺陷"和"近无余量"的铸件是现代企业所追求的目标<sup>[1-3]</sup>, 而熔模铸造技术可用于生产出不加工或少加工的精密复杂铸件,因此在铝合金成形 方面被广泛应用<sup>[4-6]</sup>。

在整个熔模精密铸造过程中型壳是液态金属凝固时排放热量的重要环节,而铝 合金凝固温度区间较大,在凝同过程中容易产生缩孔缩松等缺陷,因此型壳制备过 程的控制和预热参数的设定是极其重要的<sup>[7]</sup>。当型壳的材料确定之后,其壁厚大小和 预热温度是影响液态金属温度梯度的关键因素,而实际在铸造过程中对于型壳参数 的设定都是根据经验确定,缺乏理论依据。众多学者对型壳预热温度和型壳壁厚进 行了大量的研究,李海松等采用数值模拟方法和试验研究了型壳材料对高温合金叶 片组织和性能的影响<sup>[8]</sup>,得到无陶瓷保温棉时,氧化铝型壳铸件组织及性能较优;有 陶瓷保温棉时,莫来石型壳铸件叶根处组织及性能比氧化铝型壳铸件略优,叶身组 织及性能比氧化铝型壳铸件略差的结论。佟天夫等研究了型壳因素对精铸球墨铸铁 件组织和性能的影响<sup>[9]</sup>,得到了以莫来石或高岭石为主晶相的铝硅系耐火材料是精铸 球铁件的理想选材的结论。高成薇等对一种多联体导向叶片进行了研究<sup>[10]</sup>,研究结 果表明调整型壳预热温度、浇注温度和降低冷却速度的方法使叶片的合格率稳定在 80%左右。姜涛等研究了型壳参数对定向凝固两相区温度梯度的影响<sup>[11]</sup>,得到型壳预 热温度对温度梯度的影响主要表现在凝固前期;型壳厚度对温度梯度的影响主要本

以上研究可以表明,虽然众多学者对型壳进行了大量的研究,但系统地研究型 壳参数对熔模铸造凝固过程中金属液温度变化的影响规律鲜为报道。因此,本文作 者针对熔模铸造ZL101A合金凝固过程,借助ProCAST软件分别研究了不同型壳预热 温度和厚度对合金凝固过程温度变化的影响,并通过工艺试验验证数值模拟的可行 性和准确性,以期得到型壳预热温度和型壳厚度对合金凝固过程中温度变化的影响 规律,为铸造过程型壳参数的设定提供依据。

作者简介: 张荣强(1991-),男,硕 士,主要研究方向为轻质 合金铸造模拟研究。E-mail 905014177@qq.com 通信作者: 王琳,女,硕士。电话: 18832023705,E-mail: 272548050@qq.com

中图分类号:TG111.4; TG146.2 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2024) 12-1704-05

收稿日期: 2023-09-18 收到初稿, 2024-02-10 收到修订稿。

# 1 试验方法及模型设置

#### 1.1 试验方法

研究型壳的预热温度对金属凝固过程温度变化 的影响,考虑到温度过高铸件会产生疏松缺陷,但温 度过低会产生冷隔现象,因此,型壳预热温度的范 围选在200~500 ℃之间,即温度为200 ℃、250 ℃、 300 ℃、350 ℃、400 ℃、450 ℃、500 ℃时对金属凝 固过程温度变化的影响。研究型壳厚度对金属凝固过 程温度变化的影响,考虑到型壳太薄会影响型壳的强 度,型壳过厚会影响铸件的组织及性能,因此,型壳 的厚度范围选在4~10 mm之间,即型壳厚度为4 mm、 5 mm、6 mm、7 mm、8 mm、9 mm、10 mm时对金属 凝固过程温度变化的影响。为了研究型壳参数对金属 凝固过程温度变化的影响,利用三维软件设计了试验 模型,然后采用ProCAST软件对不同型壳参数条件下 的试验模型进行真空环境下数值模拟,得到熔模铸造 ZL101A铸件凝固过程中不同的型壳预热温度和型壳厚 度对金属温度变化的影响;随后选取型壳厚度6 mm, 型壳预热温度350 ℃时进行试验验证,验证数值模拟的 可行性与准确性。

#### 1.2 模型 | 设置

利用三维软件进行几何模型构建如图1所示,并将 三维模型导入ProCAST软件中,利用软件中的Visual-Mesh模块对其进行面网格和体网格划分,有限元模型 如图2所示;利用热电偶采集铸件凝固过程中的温度, 热电偶的位置分别置于距浇道80 mm、180 mm和 280 mm的铸件中心位置,热电偶的布置如图3所示; 使用软件中的Visual-Cast模块对其材料和边界条件等进 行设置,铝合金和型壳的热物性参数如表1所示;使用 Visual-Viewer模块查看和分析计算数值模拟得到的结 果。



图1 三维模型 Fig. 1 Three-dimensional model



图2 模型 | 有限元网格生成 Fig. 2 Model I. Finite Element Mesh Generation



图3 组合工艺及热电偶分布图 Fig. 3 Combination process and thermocouple distribution map

表1 ZL101A和型壳的热物性参数 Table 1 Thermophysical parameters of ZL101A and Shell

热物性参数	ZL101A	型壳	
液相线温度/℃	577		
固相线温度/℃	613		
结晶潜热/(J·kg <sup>-1</sup> )	430 000		
热导率/(W・m <sup>-1</sup> ・K <sup>-1</sup> )	151~168	4~7	
比热容/(kJ・kg <sup>-1</sup> ・K <sup>-1</sup> )	0.85~0.98	0.7~1.0	
密度/(kg • m <sup>-3</sup> )	2 430~2 650	2 200~2 300	

# 2 模拟结果与讨论

#### 2.1 型壳预热温度对铝合金凝固过程的影响

利用ProCAST软件设置型壳壁厚为6 mm,分别计 算不同型壳预热温度下金属凝固过程中的温度变化, 选择热电偶2作为采集目标,结果如图。

从图4中可以看出,不同型壳预热温度下,金属液的凝固温度曲线变化趋势基本一致,且型壳预热温度

# 1706 **持造** FOUNDRY 有色合金





越低,金属液达到液相线温度的时间越短;随着型壳 预热温度的增加金属液达到液相线温度的时间越长。 型壳预热温度为250℃时比200℃时达到液相线温度的 时间增加了约15 s。型壳预热温度每增高50℃,到达液 相线温度的时间就会呈现出非线性增加的趋势,且型 壳预热温度越高,对凝固过程达到液相线温度的时间 影响越明显。型壳预热温度为500℃时比200℃时达到 液相线温度的时间增加了约125 s。因此,型壳的预热 温度对固相线以上的温度影响比较明显,且随着预热 温度的增加影响越明显,但型壳预热温度对金属液凝 固过程固相线以下温度的影响较小。

产生以上现象的原因是在凝固前期热量的主要 交换方式是铸件与型壳之间的热传导,预热温度越高 热交换就越强,铸件内温度梯度越小。随着凝固的进 行,固液两相区逐渐远离型壳,铸件与型壳之间的热 传导减弱,此时铸件通过型壳与炉壁的热辐射成为主 要散热方式。

同时,随着预热温度的不断增加,两相区温度变 化的增大趋势越来越弱,说明预热温度对温度梯度的 影响还受到其他条件的制约。

#### 2.2 型壳厚度对铝合金凝固过程温度的影响

利用ProCAST软件设置型壳预热温度350 ℃,分别 计算不同型壳厚度下金属凝固过程中的温度变化,选 择热电偶2作为采集目标,结果如图。

从图5中可以得到,不同型壳厚度下金属凝固过 程的温度曲线变化趋势大体相同,且在固相线温度以 上不同型壳厚度的凝固温度曲线基本重合;在固相线 温度以下不同型壳厚度的凝固温度曲线之间有明显 差异。在固相线温度以下,型壳厚度越厚凝固时间越 长,型壳厚5 mm比4 mm温度达到500 ℃时所用时间增 加了约25 s,且型壳厚度每增加1 mm,到达500 ℃的时 间就会呈现出非线性增加的趋势。且型壳厚度越厚,



Fig. 5 Temperature variation curves during solidification process with different shell thicknesses

对凝固过程温度的影响越小,型壳厚10 mm比9 mm温 度达到500 ℃时所用时间增加了约10 s。因此可以得出 结论:型壳厚度对金属液固相线以下的温度影响比较 明显,且随型壳厚度的增加影响逐渐减弱。

铸件在凝固过程中,铸件型壳与真空炉间辐射为 主导,型壳本身的表面积和体积随型壳厚度的增加而 增大,辐射增大,也就是说,熔模铸造的铸件型壳越 厚,在凝固的过程中散失的热量越多。因此,型壳厚 度对温度变化的影响主要体现在凝固后期热量的散失 方式上。

## 3 试验验证

#### 3.1 试验模型 | 的设置

利用压蜡机对铸件进行压蜡然后进行组焊,组焊 组合方式如图6所示,1组2件,左边为A棒,右边为 B棒。组焊完后对其进行型壳制备,型壳面层为锆英 粉,过渡层及背层为高岭石,最后进行封浆。型壳厚 度为6 mm,在浇注前型壳预热温度为350 ℃,金属浇 注温度为710 ℃,采用重力浇注,浇注时间为8s。热电 偶采集的温度曲线如图7所示。



图6 实物模型 Fig. 6 Physical model



Fig. 7 Temperature curves of different temperature measuring points in castings

#### 3.2 试验与模拟结果对比

为了验证数值模拟温度场的准确性以及数值模拟 参数设置的合理性,将数值模拟计算得到的温度场与 试棒B实际测量的温度场进行对比,对比结果如图8所 示。从图8中可以得到,模拟所得到的温度曲线与实测 温度曲线吻合良好,金属液内最大温差为5℃,最小温 差为0;结果表明了数值模拟的可行性和准确性。



Fig. 8 Numerical simulation and measured molten metal temperature curves

#### 3.3 试验模型 || 的设置

为验证数值模拟的普遍适用性,对实际铸件进行 数值模拟和试验,有限元模型如图9所示。试验中型壳 制备材料与模型 | 保持一致,型壳厚度为6 mm,型壳 预热温度为350 ℃,浇注温度为710 ℃,采用重力浇 注,浇注时间为8 s,利用热电偶采集铸件凝固过程中 的温度。实物如图10所示,图11为数值模拟与试验的 对比结果。

由图11可得,模拟测量得到的温度曲线与实测得 到的温度曲线吻合良好,整个铸件内最大温差为7℃,



图9 模型 Ⅱ 有限元网格生成 Fig. 9 Model Ⅱ. finite element mesh generation



图10 铸件实物模型 Fig. 10 Real model of casting

最小温差为2 ℃;验证了数值模拟的普遍适用性、可行 性和准确性。

# 1708 16 FOUNDRY 有色合金



Fig. 11 A comparison between the numerical simulations and the experimental results

#### 参考文献:

- [1] 沈桂荣, 解起东. 铝合金熔模铸造 [J]. 特种铸造及有色合金, 2000(6): 48-50.
- [2] LI Y M. Effect of the casting process variables on microporosity and mechanical properties in an investment cast aluminium alloy [J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2001 (3) : 277–280.
- [3] 纪小虎. 铝合金薄壁件熔模精密铸造研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [4] 熊艳才. 航空复杂构件精确成形技术基础研究 [J]. 航空制造技术, 2010, 53(2): 54-57.
- [5] 熊艳才. 精密铸造技术在航空工业中的应用和发展 [J]. 航空制造技术, 2008, 51 (22): 32-35.
- [6] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望 [J]. 铸造, 2012, 61 (4): 347-356.
- [7] 薛燕鹏,王效光,赵金乾,等.两种型壳温度对DD9单晶涡轮叶片凝固组织的影响[J].材料工程,2022,50(7):80-87.
- [8] 李海松,张琼元,伍林,等.型壳材料对高温合金叶片组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(1):103-107.
- [9] 佟天夫,谭锁奎.型壳因素对精铸球铁件组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,1990(4):3-8.
- [10] 高成薇,于兴福,黄爱华,等.型壳预热及浇注温度对某联体叶片铸造成形性的影响[J].铸造,2012,61(8):882-885.
- [11] 姜涛,玄伟东,邓康,等.型壳参数对定向凝固两相区温度梯度的影响 [J]. 铸造技术, 2012, 33 (5): 562-564.

# Effect of Shell Parameters on Temperature Change During Solidification Process of ZL101A Alloy

ZHANG Rong-qiang<sup>1</sup>, JI Xiao-lei<sup>1</sup>, DING Fang-zheng<sup>2</sup>, WANG Lin<sup>1</sup>, WANG Zi-yang<sup>1</sup>, LI Yuan-yuan<sup>1</sup>, XING Chang-yong<sup>1</sup>

(1. Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750, Hebei, China; 2. The Sixth Army Generation Room in Beijing, Beijing 100095, China)

#### Abstract:

The effects of different shell preheating temperature and shell thickness on the metal temperature change during the solidification process of investment casting ZL101A castings were studied by combining numerical simulation and process test. The numerical simulation results show that above the solidus temperature of the alloy, the preheating temperature of the shell has a greater influence on the temperature change of the metal solidification process, and the higher the preheating temperature of the shell, the more obvious the fluctuation range of the metal temperature. Below the solidus temperature of the alloy, the influence of the shell thickness on the temperature change of the metal solidification process is greater, and the effect gradually weakens with the increase of the shell thickness. The process test was carried out with a shell thickness of 6 mm and a shell preheating temperature of 350  $^{\circ}$ C, which verified the feasibility and accuracy of the numerical simulation.

#### Key words:

ZL101A; investment casting; shell preheating temperature; shell thickness; casting temperature; numerical simulation

# 4 结论

(1)在合金固相线温度以上,型壳预热温度对 金属凝固过程温度变化的影响较大,型壳预热温度越 高,金属温度波动幅度越明显。

(2)在合金固相线温度以下,型壳厚度对金属凝固过程温度变化的影响较大,且随型壳厚度的增加影响逐渐减弱。

(3)型壳预热温度对温度变化的影响主要表现在 凝固前期,型壳厚度对温度变化的影响主要体现在凝 固后期热量的散失方式上。

(4)试验测量得到的温度曲线与模拟吻合良好, 验证了模拟的普遍适用性、可行性和准确性。