

# 基于 ProCAST 的履带板消失模铸造凝固过程数值模拟

邓超<sup>1,2</sup> 龙骏<sup>1,2</sup> 郑志斌<sup>1,2</sup> 黄勇<sup>1,3</sup> 郑开宏<sup>1,2</sup> 王娟<sup>1,2</sup>

(1.广东省科学院材料与加工研究所; 2.广东省金属强韧化技术与应用重点实验室;  
3.广州有色金属研究院新丰耐磨合金材料有限公司)

**摘要** 运用 ProCAST 软件对 ZG30SiMnMoV 钢履带板铸造凝固过程进行了模拟,分析了铸件的缺陷受浇注温度的影响情况和铸件的有效应力受浇注速度、浇注温度的影响情况,并进行了试验验证。结果表明,当浇注温度为 1 610 ℃时,履带板内部的缩孔、疏松缺陷明显减少;铸件的有效应力受到浇注速度的影响不大,适当地降低浇注温度可显著降低铸件的有效应力,可以得到品质良好的铸件。

**关键词** 消失模铸造; ProCAST 数值模拟; 凝固过程; 履带板

中图分类号 TG249.6; TP311 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Numerical Simulation of Solidification Process in Lost Foam Casting of Caterpillar Board Based on ProCAST Software

Deng Chao<sup>1,2</sup>, Long Jun<sup>1,2</sup>, Zheng Zhibin<sup>1,2</sup>, Huang Yong<sup>1,3</sup>, Zheng Kaihong<sup>1,2</sup>, Wang Juan<sup>1,2</sup>

(1.Institute of Materials and Processing, Guangdong Academy of Sciences;

2.Guangdong Provincial Key Laboratory of Metal Toughening Technology and Application;

3.Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals Xinfeng Wear-resistant Alloy Material Co., Ltd.)

**Abstract:** ProCAST software was adopted to simulate the casting solidification process of the vulnerable caterpillar board. The effect of pouring temperature on casting defects and pouring rate and pouring temperature on the valid stress of the casting were analyzed, and the experimental verification was carried out. The results demonstrate that the shrinkage cavity and porosity defects in the caterpillar board are obviously reduced when the pouring temperature is 1 610 ℃. The valid stress of the casting is hardly affected by the pouring rate, which can be significantly reduced by appropriately reducing the pouring temperature, thus resulting in good quality of castings.

**Key Words:** Lost Foam Casting, ProCAST Software, Solidification Process, Caterpillar Board

履带板是掘进机行走机构中的关键组成部件,其通过销轴连接形成履带板链,当其中某一块履带板出现问题则会影响到整条履带板链和掘进机的正常工作。因此,履带板铸造技术的改进与优化以提高其产品品质和使用寿命,对设备综合性能的提高有着十分重要的意义<sup>[1,2]</sup>。消失模铸造技术污染少、铸件尺寸精度高、加工余量小、生产效率高,被誉为“绿色铸造技术”<sup>[3]</sup>。实际生产时,通常根据经验和不断试错来制定产品最佳的铸造工艺方案,不仅增加了开发成本,还延长了制造周期,不利于企业在市场上的竞争。数值模拟技术在铸造领域的发展和应用,可以有效地减少试验次数,缩短产品制造周期<sup>[4]</sup>,是制定铸造工艺方案过程中十分重要的辅助手段。

本课题利用 ProCAST 软件对履带板的铸造凝固过程进行了模拟,通过对铸件的温度场和应力场进行仿真分析,预测铸造缺陷<sup>[5]</sup>,为企业在今后的生产中制定铸造工艺方案提供参考。

### 1 数值模拟前期处理

#### 1.1 几何模型建立

金属液与模样在充型过程中会发生热量传递,建模时应考虑对流传热控制方程<sup>[3]</sup>:

$$\rho_{LCL} \frac{\partial T}{\partial t} = \rho_{LCL} \mu + \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda_L \frac{\partial T}{\partial x^2} + \rho_p L \Delta f_s \quad (1)$$

式中,  $\rho_p$  为泡沫模样的密度;  $\rho_L$  为金属液的密度;  $\lambda_L$  为金

收稿日期:2020-10-21;修改稿收到日期:2020-10-28

基金项目:广东特支计划资助项目(2017TQ04C645);广州市科技计划资助项目(201907010026);广东省科技计划资助项目(2018A050506055)

第一作者简介:邓超,男,1985年出生,助理工程师,广州(510650),E-mail:hamjek@163.com

通信作者:龙骏,男,1990年出生,工程师,广州(510650),E-mail:longjun0929@163.com

引用格式:邓超,龙骏,郑志斌,等.基于 ProCAST 的履带板消失模铸造凝固过程数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2021,41(3):368-371.

DENG C, LONG J, ZHENG Z B, et al. Numerical simulation of solidification process in lost foam casting of caterpillar board based on ProCAST software[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(3):368-371.

属液的热导率;  $c_L$  为金属液的比热容;  $L$  为结晶潜热;  $\Delta f_s$  为泡沫模样的固相率。

图 1 为某公司生产的履带板的三维图。零件的轮廓尺寸为  $1\,500\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 433\text{ mm}$ , 其最小壁厚为  $13\text{ mm}$ , 最大壁厚为  $35\text{ mm}$ , 体积约为  $0.04\text{ m}^3$ , 质量约为  $310\text{ kg}$ 。零件壁厚不均、内部空腔体积较大且结构复杂(见图 2)。要求生产的零件结构完整, 表面没有影响强度的缺陷, 内部组织致密且无缩孔、缩松、裂纹等缺陷。

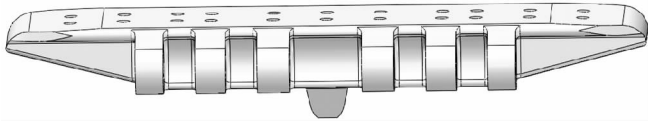


图 1 零件三维图

Fig.1 3D diagram of caterpillar board

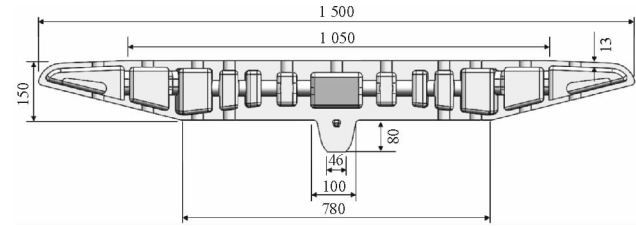
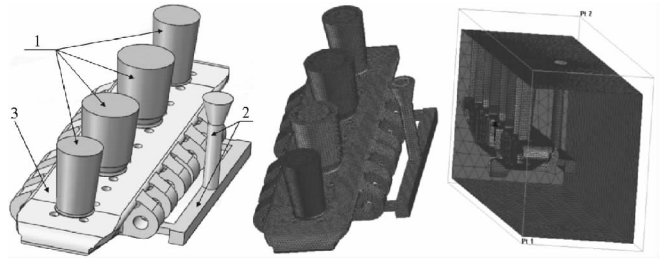


图 2 零件尺寸图

Fig.2 Dimension of caterpillar board

本课题运用 Solidworks 软件对铸件进行三维实体建模, 根据履带板零件的结构特点, 设计了消失模铸造工艺方案, 采用 4 个明冒口补缩、中部浇注: 中间最大壁厚  $35\text{ mm}$  区域内放置两个直径为  $160\text{ mm}$  的明冒口, 两侧壁厚  $13\text{ mm}$  区域内各放置 1 个  $\phi 120\text{ mm}$  的明冒口, 直浇道直径为  $50\text{ mm}$ , 高度为  $340\text{ mm}$ , 浇口大端面直径为  $120\text{ mm}$ , 横浇道截面尺寸为  $50\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ , 长  $740\text{ mm}$ , 内浇道截面尺寸为  $40\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ , 内浇道数量为 2 个, 三维模型及网格划分见图 3。



(a) 三维有限元模型

(b) 网格划分

图 3 带浇注系统的铸件三维模型及网格划分

Fig.3 Geometric model and meshing of castings

with gating system

1.冒口 2.浇注系统 3.铸件

### 1.2 有限元网格划分

将 Solidworks 生成的三维实体文件另存为 x-t 格式, 运行 ProCAST 软件, 将 x-t 格式文件导入 Visual-Mesh 程序中, 经 MeshCAST 模块检查、修复后生成三维有限元网格文件。铸件、浇注系统网格单元的长度为  $10\text{ mm}$ , 型壳及砂型网格单元的长度为  $40\text{ mm}$ , 网格总数为  $1\,498\,610$  个, 节点总数为  $96\,830$  个, 铸件及砂型的三维有限元网格划分见图 3b。

### 1.3 边界条件及参数设置

铸件牌号为 ZG30SiMnMoV 钢, 耐火涂料采用 Zircon Sand II, 砂型材料采用 Olivine Sand; 铸件和耐火涂料间接接触面类型为 COINC, 界面传热系数为  $750\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ , 耐火涂料和砂型间接接触面类型为 CONIC, 界面传热系数为  $300\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ ; 采用消失模铸造, 砂型应力类型为刚体。ProCAST 材料库提供了完整的 ZG30SiMnMoV 热物性参数, 见图 4。其中, ZG30SiMnMoV 钢固相线温度为  $1\,393\text{ C}$ , 液相线温度为  $1\,493\text{ C}$ 。

凝固过程中, 材料的热物性参数会随着温度的变化

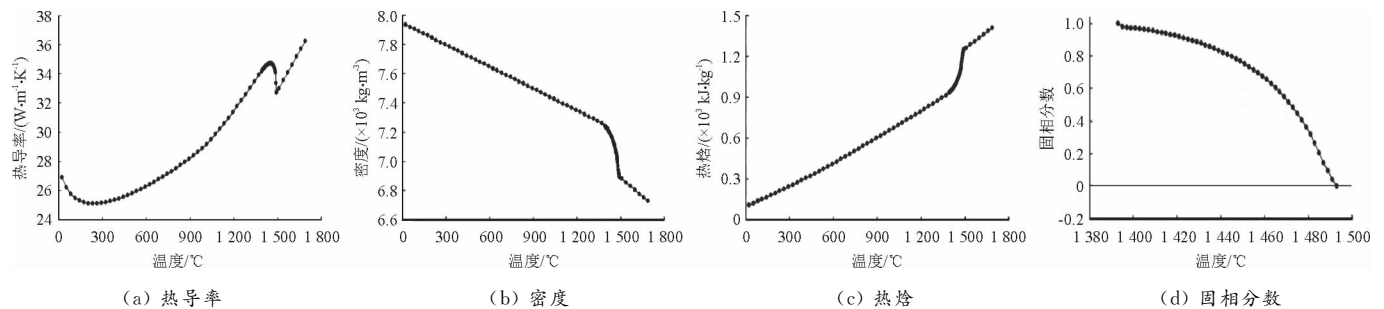


图 4 ZG35SiMnMoV 钢的热物性参数

Fig.4 Thermophysical parameters of ZG35SiMnMoV steel

而变化, 反映到数值模拟方程中, 表现为每一个时间步长都可能包含多个物性值, 所以在数值模拟计算过程中, 如果没有一个准确的热物性参数则很难保证模拟结果的准确性<sup>[6]</sup>。

## 2 模拟试验结果及分析

### 2.1 浇注温度对缺陷的影响

金属液在凝固过程中由于合金的结晶温度范围较

宽,由液态向固态生长时,先形成基本的金属骨架,此时液、固两相共存,继续向固态生长时需要金属液在骨架的枝晶间流动进行补缩。随着固相分数增加,枝晶间的流动通道逐渐凝固,形成封闭的孤立区域,区域内的液态金属完全凝固后,会在铸件内部形成缩松<sup>[7]</sup>。浇注温度过高,会使铸件的液态收缩量增大,在铸件内部形成的缩孔(缩松)体积增加。金属液由浇注温度( $T_P$ )冷却到液相线温度( $T_L$ )的体积收缩率 $\epsilon_{V液}$ 可表示为<sup>[8]</sup>:

$$\epsilon_{V液} = \alpha_{V液} (T_P - T_L) \times 100\% \quad (2)$$

式中, $\alpha_{V液}$ 为合金的液态体收缩系数。

利用 ProCAST 软件计算不同的浇注温度对铸件缺陷的影响,砂型初始温度为 25 °C(室温)、浇注速度为 14 kg/s,分别计算浇注温度为 1 610 °C 和 1 650 °C 时铸件缺陷的分布情况,使用 Cut-off 方式或者 Niyama 判据可以确认封闭的液态孤立域产生的位置,从而确定缩松、缩孔是否会在这些敏感区域内产生<sup>[9]</sup>,图 5 为最终的计算结果对比图。

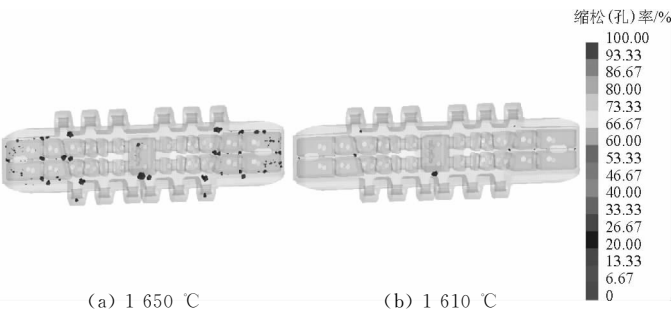


图 5 不同浇注温度下缩孔、缩松分布图

Fig.5 Distribution of shrinkage cavity and porosity in the castings at different pouring temperatures

可以看出,当浇注温度为 1 650 °C 时,履带板两端出现了大面积的缺陷,中间部位缩孔区域的孔隙率为 17.68%,对铸件的力学性能影响很大,会缩短铸件的使用寿命,使用时存在一定的安全隐患。

当浇注温度为 1 610 °C 时,履带板两端的缺陷明显减少,只存在小面积的缺陷,中间部位缩孔区域的孔隙率降至 5.42%,对铸件力学性能和使用寿命影响较小。

提高浇注温度,合金的液态收缩增加,缩孔(缩松)的总体积增加,当浇注温度由 1 610 °C 提高至 1 650 °C 时,根据式(2)可以计算出体积收缩率提高 1.5% ~ 1.75%;通过 ProCAST 模拟计算,缩孔(缩松)的总体积由 0.42 mL 提升至 3.33 mL,孔隙率由 5.42% 提高至 17.68%,可以看出,不同的浇注温度对铸件的缺陷有一定的影响,当浇注温度为 1 610 °C 时,在履带板内部形成的缩孔(缩松)明显减少。

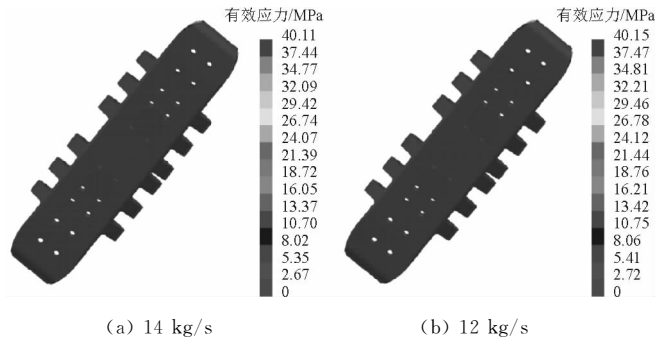
## 2.2 应力场分析

金属液的凝固过程经过液态、固/液两相共存和固

态 3 个阶段,材料的热物性能和力学性能均变化较大,而且同一时刻可能存在 3 个区域共存的现象,因此凝固模拟设计的应力-应变本构关系非常复杂<sup>[10]</sup>。金属液在相变过程中,其最大应力如果大于此时材料的抗拉强度,就会产生裂纹。热裂是铸造过程中常见的缺陷,是影响铸件品质和性能的重要因素,因此合理的铸造工艺设计对减小铸造应力、预防热裂具有重要作用<sup>[11]</sup>。

### 2.2.1 浇注速度对有效应力的影响

砂型初始温度为 25 °C(室温)、浇注温度为 1 610 °C,分别计算浇注速度为 14 kg/s 和 12 kg/s 时铸件的有效应力分布情况,见图 6。



(a) 14 kg/s (b) 12 kg/s

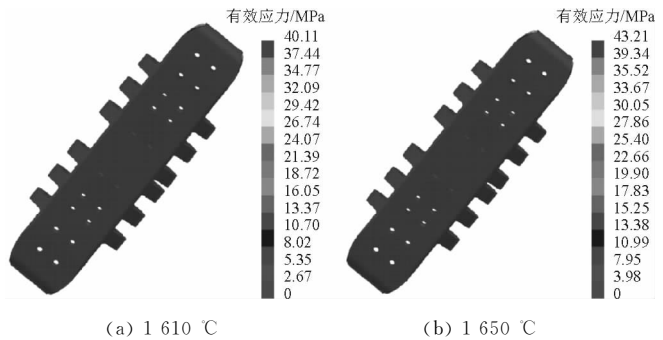
图 6 不同浇注速度下的有效应力分布

Fig.6 The valid stress distribution of the castings at different pouring rate

可以看出,当浇注速度为 14 kg/s 和 12 kg/s 时,铸件的最大有效应力分别为 40.11 和 40.15 MPa,可见浇注速度对铸件的最大有效应力的影响并不明显。

### 2.2.2 浇注温度对有效应力的影响

砂型初始温度为 25 °C(室温)、浇注速度为 14 kg/s,分别计算浇注温度为 1 610 °C 和 1 650 °C 时铸件的有效应力分布情况,见图 7。



(a) 1 610 °C (b) 1 650 °C

图 7 不同浇注温度下的有效应力分布

Fig.7 The valid stress distribution of the castings at different pouring temperatures

铸件在冷却过程中,各部分冷却速度不同,造成同一时间各部分的收缩量不一样,同时由于散热和冷却条件的不同,各部分到达固态相变的时间也会有所差异,相变的程度也不同。在自由膨胀时,长度和宽度方

向的伸长量分别为  $\Delta l = \alpha(T_p - T_s)l$  及  $\Delta d = \alpha(T_p - T_s)d$ , 在长度和宽度方向的应变为:

$$\epsilon_l = \frac{\Delta l}{l} = \alpha(T_p - T_s) \quad (3)$$

$$\epsilon_d = \frac{\Delta d}{d} = \alpha(T_p - T_s) \quad (4)$$

即铸件温度由浇注温度( $T_p$ )降低至固相线温度( $T_s$ )时,各方向的应变均为

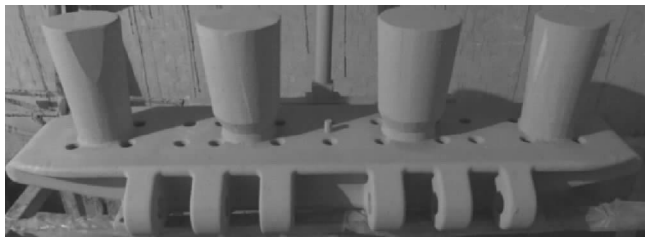
$$\epsilon = \alpha(T_p - T_s) \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  为材料的线膨胀系数,其值随温度变化而变化<sup>[12]</sup>。

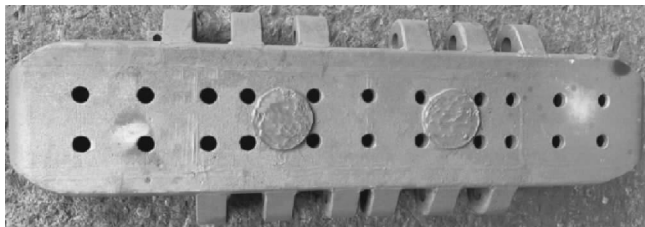
当浇注温度由 1 610 ℃ 提高至 1 650 ℃ 时,由式(5)计算得出,其各方向的应变增加了 7.5%~7.75%,同时又延长了铸件的冷却时间。收缩过程中受到砂型、浇注系统和冒口的阻碍时间也相应增加,产生的铸造应力也随之增加。可以看出,当浇注温度为 1 610 ℃ 和 1 650 ℃ 时,铸件的最大有效应力分别为 40.11 和 43.21 MPa。由此可知,铸件的最大有效应力受到浇注温度的影响较大。

### 3 生产验证

通过对履带板铸件的凝固过程进行模拟,预测了缺陷产生的位置和大小,通过优化工艺参数和生产试验验证,确定了最佳的铸造工艺方案。图 8 为实际生产中涂挂涂料后的泡沫模样和铸件。



(a) 涂挂涂料后的泡沫模样



(b) 铸件

图 8 批量生产中涂挂涂料后的泡沫模样和实际铸件

Fig.8 Foam pattern and actual castings coated with paint in batch production

图 9 为实际生产出的铸件经磁粉探伤检测后的图片。可以看出,履带板铸件表面无明显缺陷,合格率大幅提高,经客户使用后反馈,履带板的使用寿命提高了

20%左右。



图 9 磁粉探伤后的铸件

Fig.9 Casting after magnetic powder detection

### 4 结论

(1)消失模铸造浇注温度越低,铸件的缩孔、缩松缺陷越少,但是温度过低会降低钢水的流动性,致使铸型内的泡沫模样燃烧不充分,铸件易产生浇不足、冷隔、夹渣等缺陷。履带板铸件浇注温度为 1 610 ℃ 时,内部的缩孔(缩松)缺陷明显减少。

(2)铸件的有效应力受到浇注速度的影响不明显,考虑到钢水流动性差、易氧化,履带板铸件选择浇注速度为 14 kg/s。

(3)浇注温度对铸件的有效应力的影响很大。适当的降低浇注温度,铸件的有效应力明显降低。

#### 参考文献

- [1] 李平,刘松涛,李锋军. CAE 分析在煤矿掘进机用履带板开发中的应用[J]. 铸造, 2016, 65(3): 248-252.
- [2] 杨玉敏. 浅谈履带板链节的铸造工艺设计及模拟优化设计[J]. 科技视界, 2014(6): 67.
- [3] 黄朋朋, 芦刚, 严青松, 等. 基于 ProCAST 的汽车制动鼓消失模铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(8): 889-892.
- [4] 王贵, 杨莉, 周铁涛. 熔模精铸件凝固过程温度场的数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(3): 249-251.
- [5] 秦鹏程, 张希俊. ProCAST 在压力铸造数值模拟的应用现状[J]. 热加工工艺, 2010, 39(23): 75-77.
- [6] 邱彬, 张金山, 姬国强, 等. 基于 ProCAST 的拉伸试棒的金属型铸造工艺分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(9): 807-809.
- [7] 梁作俭, 许庆彦, 李俊涛, 等.  $\gamma$ -TiAl 增压涡轮熔模铸造过程数值模拟研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(3): 164-169.
- [8] 李晨希. 铸造工艺设计及铸件缺陷控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [9] 肖海波, 王开, 刘昌明, 等. 铝合金盘状零件离心铸造成形过程数值模拟及试验研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(19): 54-57.
- [10] 苏大为, 赵玉涛. 基于 ProCAST 和 ANSYS 软件分析径向加载的铝合金轮毂应力分布[J]. 铸造, 2007, 56(12): 1 288-1 291.
- [11] 王朝涛, 邓攀科, 杨智勇, 等. 基于 BP\_GA 算法的铸造有效应力预测与优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(4): 383-386.
- [12] 刘成柱. ANSYS Workbench 17.0 热力学分析实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.

(编辑: 栗万仲)