

耐压铝合金套筒低压铸造数值模拟分析与工艺设计

吴明琦¹, 杨慕尧², 杨军³, 王晓宇³, 艾秀兰³

(1. 中铁山桥集团有限公司, 河北秦皇岛 066200;

2. 东北大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110004;

3. 大连交通大学材料科学与工程学院, 辽宁大连 116028)

摘要: 运用Flow-3D 软件对低压铸造压力容器A356铝合金套筒铸件进行了充型凝固过程分析, 设计了铸造工艺方案。通过优化浇注温度、模具温度和压力等生产工艺参数, 得到内浇口6个均布于法兰底部、冷铁厚度为40%铸件壁厚的工艺设计方案和压力增速376 Pa/s、模具温度为100 °C、浇注温度为700 °C的生产工艺方案。生产的铝合金套筒铸件外观良好, 热处理后的单铸试棒力学性能、化学成分及铸件气密性检测结果均符合铝合金压力容器验收标准, 表明所采用的低压铸造工艺合理可靠。

关键词: 耐压铝合金套筒; Flow-3D软件; 低压铸造; 工艺设计; 生产验证

作者简介:

吴明琦(1996-), 男, 工程师, 主要从事铸造工艺设计及数值模拟优化。
E-mail: 1204247872@qq.com

通信作者:

杨军, 男, 博士, 教授。
E-mail: yangjun@djtu.edu.cn

中图分类号: TG146.21;
TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)
12-1597-09

基金项目:

大型铝合金铸件成品率影响因素研究(联合开放基金: 2021-KF-15-02)。

收稿日期:

2025-07-09 收到初稿,
2025-08-25 收到修订稿。

金属压力容器铸件的质量要求比普通铸件更为严格, 需满足承压、耐腐蚀、可靠性高、气密性和力学性能优良等要求。铝合金材料因为具有密度低、强度高、韧性好和耐蚀性强等优点^[1-2], 被广泛应用在压力容器制造领域。铸造是生产铝合金容器的主要方法之一, 然而在铝合金铸件生产过程中, 尤其是在带有孔结构(或法兰)的铝合金铸件制造过程中, 孔结构附近会产生大量的孔洞缺陷, 造成铝合金铸件力学性能、密封性能与耐压性能的大幅下降, 甚至报废, 导致成品率低, 能源大量浪费, 给生产带来损失, 并且在使用过程中存在安全隐患^[3]。低压铸造技术因获得的铸件整体结构性好、可靠度高、质量轻且加工成本较低等优点, 常用作压力容器等零件的生产。但低压铸造工艺涉及影响铸件质量的因素较多且复杂, 铸件易出现缺陷。低压铸造一般使用金属型模具, 工艺更改难度很大, 迫切需要通过计算机模拟来优化技术方案, 以达到节约开发成本、缩短产品开发周期等目的^[4-7]。

本研究以压力容器A356铝合金套筒为研究对象, 利用Flow-3D软件分析低压铸造铸件充型凝固过程速度场、压力场、温度场、氧化渣分布情况, 依据数值模拟结果设计铸造工艺方案及生产工艺方案, 获得可保障铸件产品质量的最优工艺。

1 A356铝合金套筒产品及铸造工艺分析

A356铝合金的化学成分如表1所示, 密度为2.7 g/cm³, 液态流动性好、收缩率和热裂倾向小, 铸造性能优异^[8]。A356铝合金经过变质和热处理后, 力学、物理、耐腐蚀及机械加工性能均能获得较大提升。

表1 A356合金化学成分
Tab. 1 Chemical composition of A356 alloy

							w _B /%
Si	Mg	Fe	Mn	Ti	Zn	Cu	Al
6.50~7.50	0.25~0.45	≤0.20	≤0.10	≤0.20	≤0.20	≤0.20	余量

如图1所示为铸件三维形状，其法兰直径为 $\Phi 650$ mm，筒体外径为 $\Phi 478$ mm，内径为 $\Phi 446$ mm，整体高347 mm。铸件体积为 0.0184 m^3 ，表面积为 1.43 m^2 ，质量为49.2 kg。筒体最小壁厚12 mm，最大壁厚16 mm，法兰厚38 mm。要求不得有气孔、夹砂、缩松等铸造缺陷。

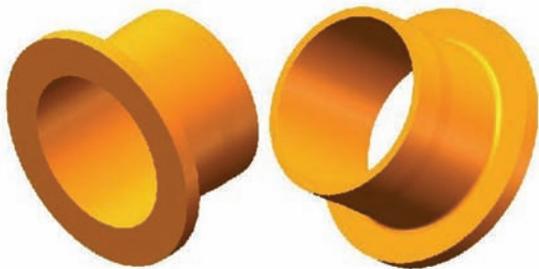


图1 铝合金套筒铸件

Fig. 1 The aluminum alloy sleeve casting

铝合金套筒属于大型薄壁铸件，浇注系统各组元横截面积比为：

$$A_{\text{直}} : A_{\text{横}} : A_{\text{内}} = 1 : (2\sim 5) : (2\sim 6)$$

根据铸件实际情况，取各截面面积为：

$$A_{\text{直}} : A_{\text{横}} : A_{\text{内}} = 78 : 188.4 : 198.8 \approx 1 : (2\sim 5) : (2\sim 6)$$

设计6个内浇口，均布于法兰底部，具体形状及位置如2所示。

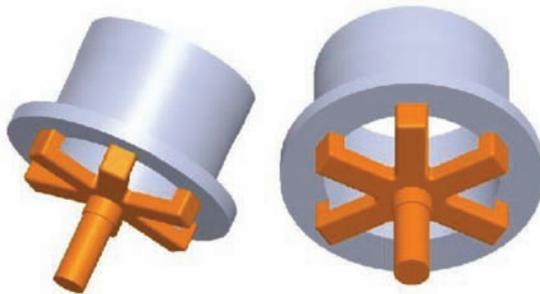


图2 浇注系统设计图

Fig. 2 The design drawing of gating system

2 A356铝合金套筒低压铸造工艺方案设计

2.1 浇注系统设计

遵循顺序凝固，采用开放式、底注式浇注系统^[9]。

内浇道截面积以补缩铸件和调节凝固顺序为基本原则^[10-11]，由公式(1)进行计算。

$$A_{\text{内}} = \frac{G}{\rho v t} \quad (1)$$

式中： $A_{\text{内}}$ 为内浇道横截面积(cm^2)； G 为铸件质量(g)； ρ 为铝合金密度(g/cm^3)； v 为内浇口处线速度(为保证充填过程中不出现紊流为限度，一般取 $v \leq 15\text{ cm/s}$)； t 为充满铸型所需时间(s)。

2.2 充型过程数值模拟分析

将工艺设计的实体三维模型转化为stl格式文件导入Flow-3D软件，并对工艺参数进行设置及网格划分。铸件材质为A356铝合金，模具为H13钢，传热系数：液态金属-模具之间为 $1750\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，固态金属-模具之间 $1000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，边界条件设定为固壁边界。升液及充型压力 21.5 kPa ，充型时间 21 s ，凝固成型压力 39.2 kPa ，保压时间 1300 s 。浇注温度为 $700\text{ }^\circ\text{C}$ ，模具温度为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 。

为探究铸件关键位置充型情况，在铸件法兰和筒体顶部分别设置监测点(红色标注)，如图3所示。

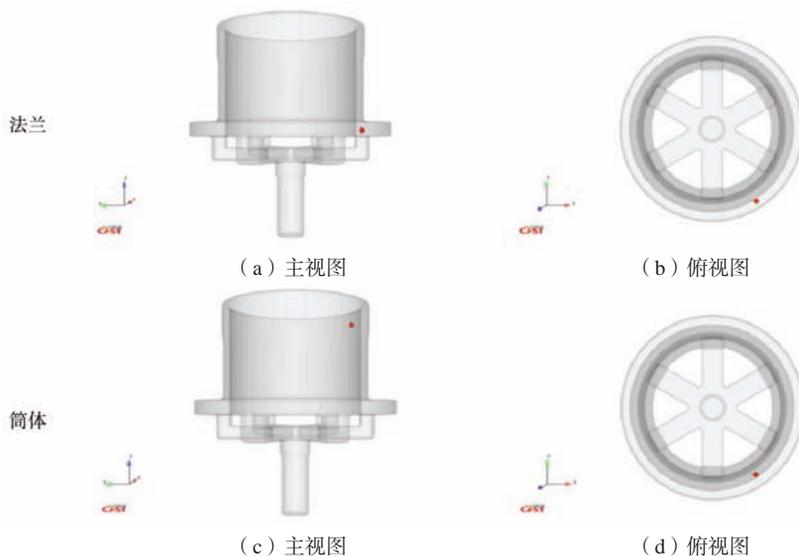


图3 监测点位置图

Fig. 3 The location maps of monitoring points

从充型压力场模拟（图4）看到：充型45%之前，各内浇道压力分布都较均匀，液面总体平稳上升，充型到55%时，法兰与内浇道压力差为1 000 Pa；充型

65%时，铝液由法兰进入筒身时发生波动，呈现了不稳状态，法兰与内浇道压力差大于1 000 Pa。随着充型继续进行，各部位压力差稳定在1 000 Pa，如图4（d）所示。

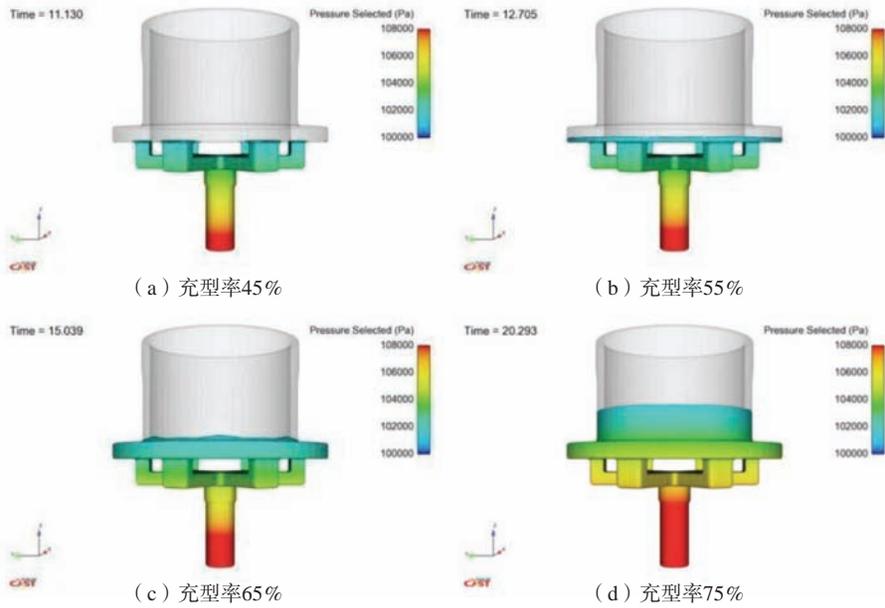


图4 充型过程压力场

Fig. 4 The pressure fields during mold filling processes

再由充型过程速度场模拟（图5）看到：充型45%时，横浇道与内浇道内液体充填的速度差基本为0，液面平稳；充型55%时，法兰内液体充填速度差为0.05 m/s，此差值较小对金属液流动的平稳性影响可以忽略；充型到65%时，相邻内浇道之间、内浇道处金属液速度差

增大为0.1 m/s，液面出现波动；充型超过65%后，铸型内金属液速度差基本为0，液面上升平稳。从整个充型过程的速度差变化可以发现，0.1 m/s的速度差是液面产生波动的最大值。

综上，从充型过程的压力场和速度场模拟分析可

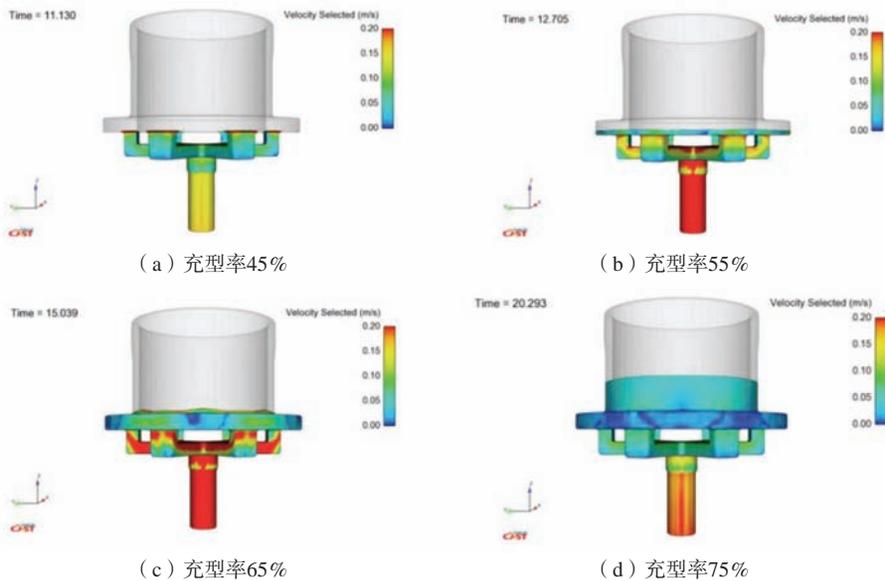


图5 充型过程速度场

Fig. 5 The velocity fields during mold filling processes

知, 只有在金属液由浇道进入法兰型腔时产生了微小压力和速度的变化, 变化值不大, 故可得出此浇注系统方案是合理的。

3 补缩系统设计及数值模拟分析

从铸件凝固过程的温度分布图6和图7可看出, 在整个凝固过程中, 铸件顶部外表面和法兰外表面冷却速率分别为 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 和 $0.07\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 。由于法兰厚度过大, 铸件法兰面内部温度变化和浇注系统基本相同, 冷却速率皆为 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, 浇注系统温度和法兰温度大致为 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图6(f)), 从凝固过程温度分布的底视图 (图7) 也可看出此现象。由于法兰面的凝固速度与浇注系统相同, 浇注系统无法完成其补缩作用, 法兰面的凝固过慢, 也会形成热节, 且得不到浇注系统的补缩易导致缩孔和缩松等缺陷出现。基于凝固过程的分析, 有必要设计补缩系统来进行补缩和调整凝固顺序。

由于在低压铸造充型完毕后金属液在压力下凝固, 有较好的补缩能力。同时, 内浇道中金属液也可对铸件进行补缩, 可不设冒口。因此只需设计冷铁来

改变凝固顺序。结合本铝合金套筒的结构特点, 在其法兰处及筒体顶端厚度较大处设置冷铁, 冷铁材质为A356铝合金。冷铁形状及位置与如图8所示。法兰处冷铁厚度为 15.2 mm , 筒体处冷铁厚度为 6.4 mm , 高度为 18 mm 。

从凝固过程温度分布图9可以看到: 圆筒顶部外表面和法兰外表面冷却速率分别为 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 和 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, 法兰外表面温度下降最快, 最先凝固。凝固70%时, 法兰外表面已完全凝固, 初步判断有可能会阻碍浇注系统对铸件薄壁部位的补缩。分析铸件底部的凝固过程温度分布 (图10) 又看到: 法兰和内浇口冷却速率均为 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, 法兰面在冷铁作用下从外圈远离内浇口的位置开始凝固, 并逐渐靠向内浇口, 并未阻碍内浇口对铸件的补缩。故得出补缩系统的设计也是合理的。

4 A356铝合金套筒的生产工艺确定

在低压铸造过程中, 压力曲线控制着铝液升液、充型、结壳、增压和保压, 直至卸压的全过程, 因此合理的压力曲线是生产合格铸件的保证^[12]。升液压力可根据式(2)进行计算; 升液增压速度可根据式

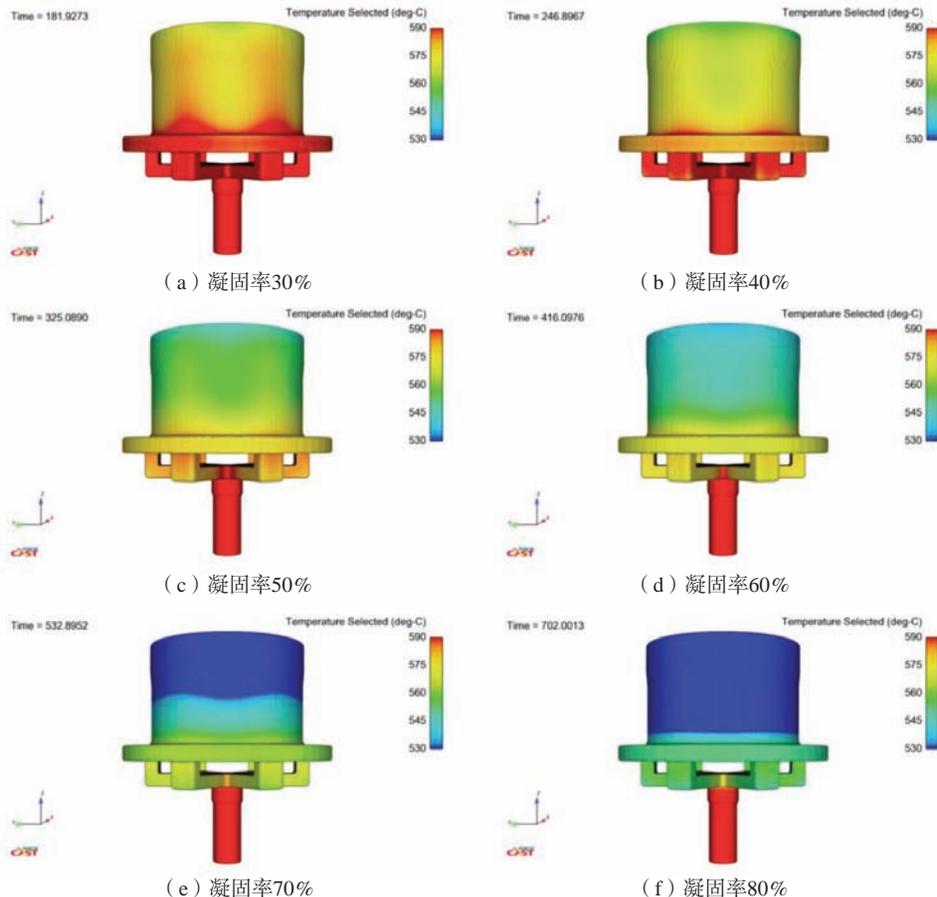


图6 凝固过程温度分布主视图

Fig. 6 The main views of temperature distributions during solidification processes

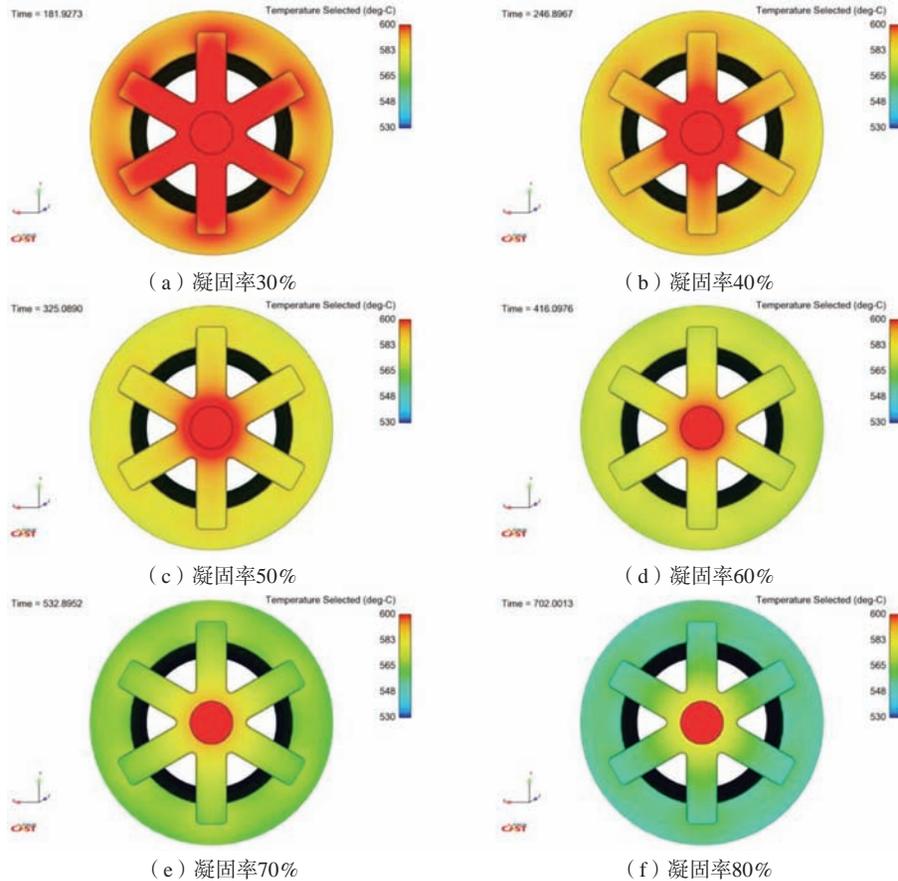


图7 凝固过程温度分布底视图

Fig. 7 The bottom views of temperature distributions during solidification processes

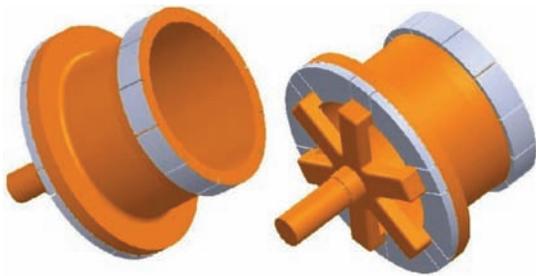


图8 铝合金套筒冷铁形状及布置

Fig. 8 The shapes and layout of chills for the aluminum alloy sleeve casting

(3) 进行计算。

$$p = \frac{H\rho K}{10\ 200} \quad (2)$$

式中, p 为升液和充型阶段压力 (MPa); H 为金属液上升高度 (cm); ρ 为金属液密度 (g/cm^3); 10 200 为单位换算系数 (g/N); K 为充型阻力系数 ($K = 1\sim 1.5$), K 的取值与合金粘度、铸型型腔复杂程度等有关, 阻力小时取下限, 阻力大时取上限。

$$t = \frac{H}{v} \quad (3)$$

式中: t 为充型时间 (s); v 为充型速度 (cm/s); H 为金属液上升高度 (cm)。

在低压铸造中, 浇注温度及模具温度的确定原则与普通浇注的情况一致, 即在保持铸件成形的先决条件下, 以较低浇注温度为宜, 原因是可以减小液态金属吸气和收缩, 使铸件产生气孔、缩孔、缩松、内应力和裂纹等缺陷机会减少, 同时使铸件组织致密^[13]。低压铸造中, 液态金属是在压力作用下充型, 金属热量散失较慢, 所以浇注温度比一般铸造方法低10~20℃。

依此设计原则, 铝合金套筒的生产参数选取如图11的压力曲线, 升液时间为4 s, 升液增压速度为1 325 Pa/s; 充型时间为29 s, 充型增压速度为376 Pa/s, 浇注温度为700℃, 模具温度为100℃。在此生产参数(图11)下对充型的压力场、速度场、温度场及氧化渣的分布情况进行模拟分析, 以确定选取的生产参数是否合理。

从充型过程压力场数值模拟结果(图12)可看出: 浇注系统中压力分布均匀, 充型过程平稳, 压力差在1 000 Pa以内(图12(a)-(b)); 充型时间为15.04 s时, 压力增速为376 Pa/s, 铸型上下压力差为

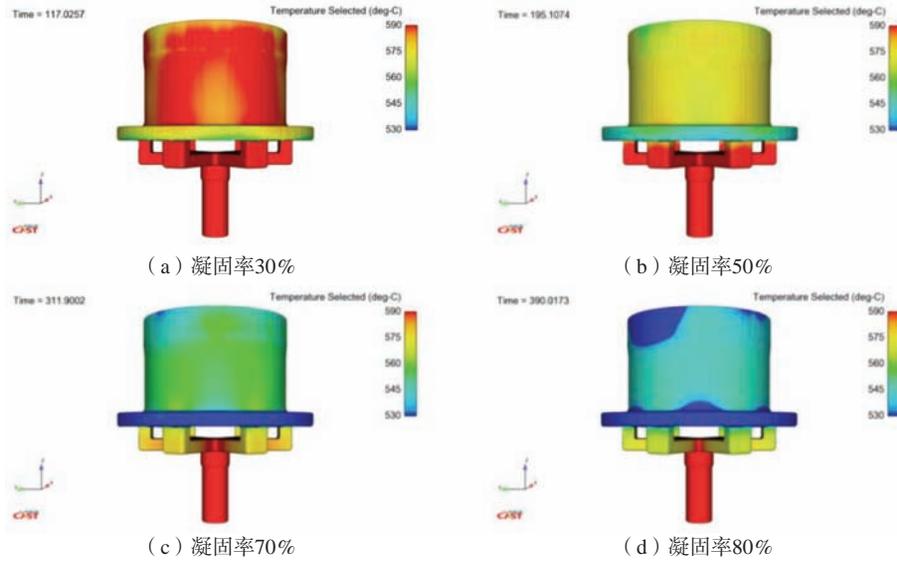


图9 温度分布主视图

Fig. 9 The main views of temperature distributions

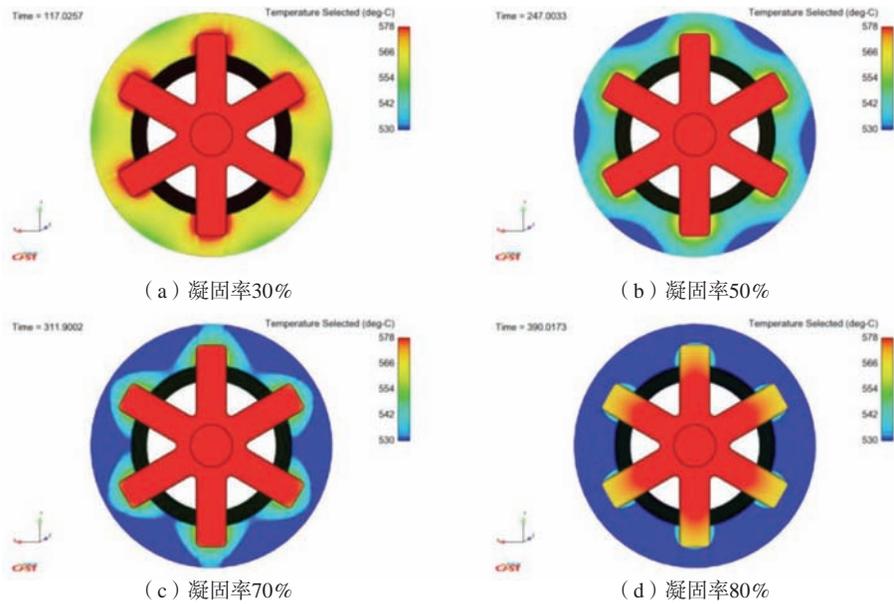


图10 温度分布底视图

Fig. 10 The bottom views of temperature distributions

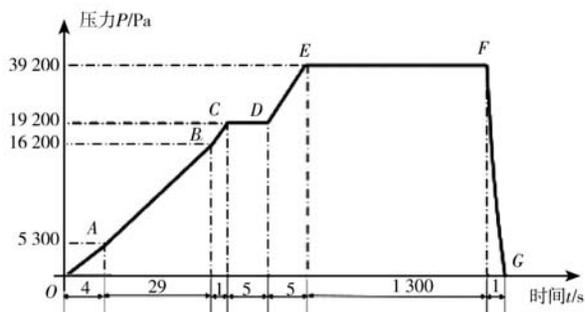


图11 压力曲线

Fig. 11 Pressure curve

2 000 Pa, 液面出现小幅波动。充型25 s时, 液面上升平稳, 此时铸型上下压力差为6 000 Pa。

速度场数值模拟结果(图13)分析: 浇注系统及铸型内铝液最高速度为0.15 m/s, 速度差普遍在0.1 m/s以下, 液面上升平稳。图13(c)中, 铸型法兰内速度差为0.125 m/s, 液面由法兰进入筒身时产生波动。图13(d)中, 铸型内速度差为0.05 m/s, 铝液流动状态平稳。

氧化渣分布如图14所示。图14(a)-(b)中, 铝液由升液管进入横浇道时氧化渣浓度为350 kg/m³, 由横浇道进入铸型后浓度升高为400 kg/m³, 氧化渣集中

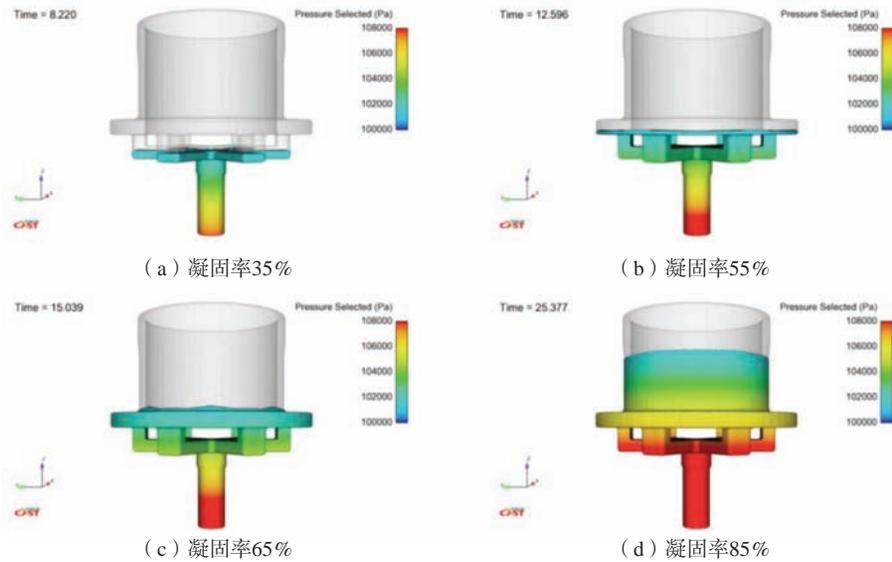


图12 充型过程压力场

Fig. 12 The pressure fields during mold filling processes

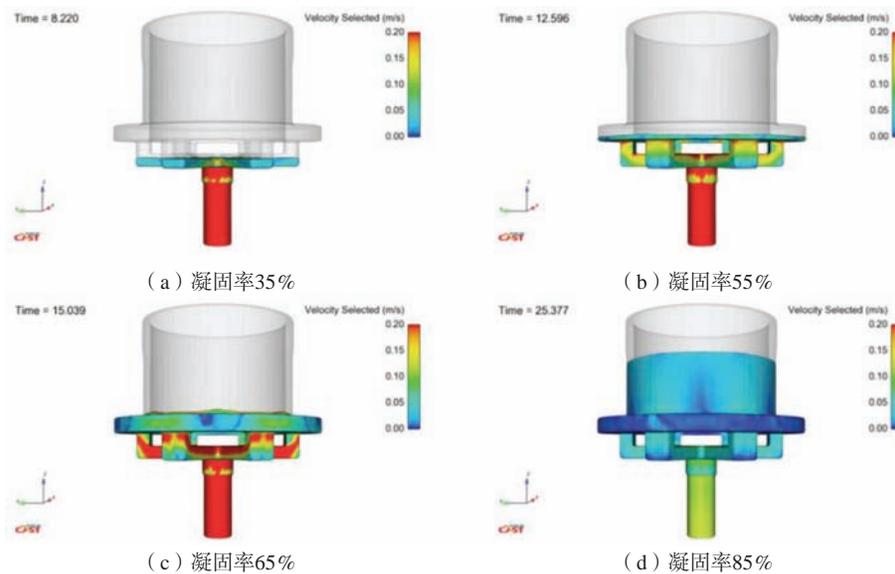


图13 充型过程速度场

Fig. 13 The velocity fields of mold filling processes

于内浇口之间，浓度基本不变。由于铝液流速不大，氧化渣没有被大量卷入法兰底部，随着充型过程的进行逐渐上浮至液面，法兰内氧化渣基本被排除。

充型时浇注系统及型腔内的温度分布数值模拟结果如图15所示，充型45%时浇注系统中的铝液温度在670~680℃之间。充型65%时，内浇口间铝液温度下降至660℃，内浇口处铝液温度为685℃，法兰温度差为25℃。充型大于75%后法兰与筒壁处温度基本持平。

从上述的数值模拟结果看，该生产参数的选择合理。

5 A356铝合金套筒铸件生产验证

采用以下生产工艺方案进行生产验证：内浇口数量为6个，冷铁厚度为壁厚40%，压力增速为376 Pa/s，模具温度为100℃，浇注温度为700℃。用此生产工艺方案获得的铸件外观良好，经T6热处理，三根试棒布氏硬度分别为HB104.4、HB103.2和HB104.9，布氏硬度、抗拉强度及伸长率均符合力学性能标准。主要化学成分验证，其Si、Mg和Ti含量均满足验收要求。通过0.4 MPa和1.08 MPa水压进行密封测试，结果均合格，加工后的零件如图16所示。

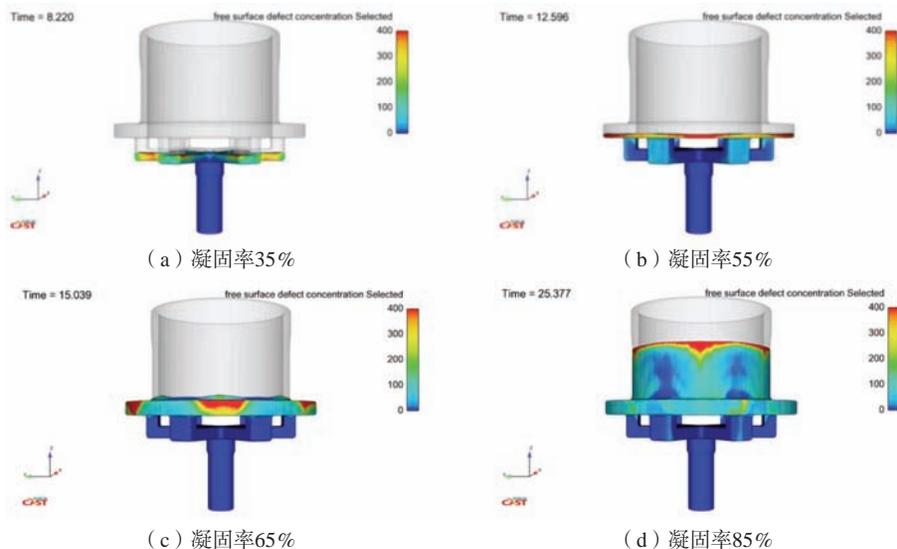


图14 氧化渣分布

Fig. 14 The distribution of oxidized slag

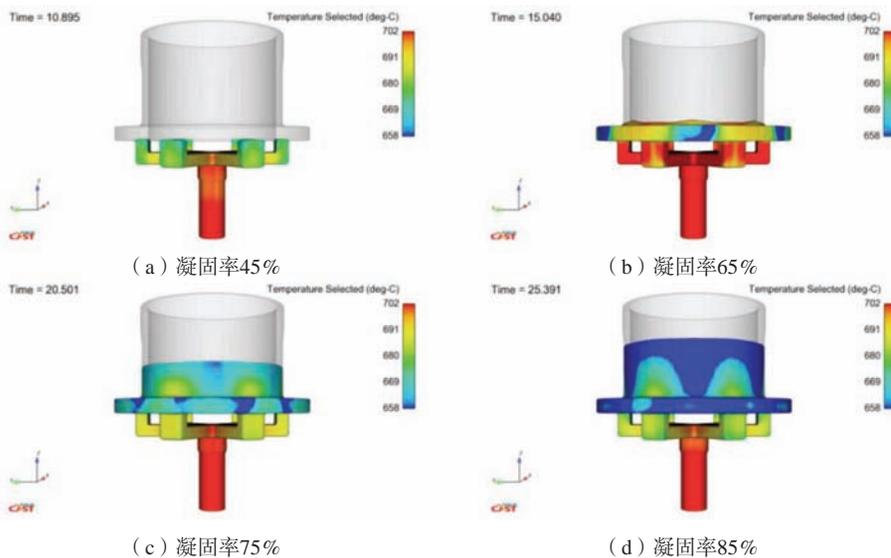


图15 温度场数值模拟结果

Fig. 15 The numerical simulation results of temperature fields



图16 铸件生产验证图

Fig. 16 Casting production verification diagram

6 结论

对压力容器A356铝合金低压铸造套筒进行了铸造工艺方案设计和生产工艺方案选择, 利用Flow-3D数值模拟软件分析铸造过程并结合生产验证, 得出如下结论。

(1) 在套筒法兰处设置6个均布的内浇口, 套筒法兰底部和筒体上部放置冷铁厚度为铸件壁厚40%的铸造工艺方案合理。

(2) 充型模拟分析显示0.1 m/s的速度差是液面产生波动的最大值。

(3) 压力增速为376 Pa/s, 充型中期铸型上下压

力差为2 000 Pa, 铸型内铝液速度差普遍在0.1 m/s以下, 液面上升平稳, 氧化渣浓度低, 法兰内残留氧化渣少。

(4) 升液时间为4 s, 升液增压速度为1 325 Pa/s, 充型时间为29 s, 充型增压速度为376 Pa/s, 浇注温度

为700 ℃, 模具温度为100 ℃, 为较合理的生产工艺参数。

(5) 按照优化完成的铸造工艺方案和生产工艺参数对零件进行试制, 铸件的力学性能、化学成分和气密性均符合铝合金压力容器验收标准。

参考文献:

- [1] 李恒, 张建宇, 胥福顺, 等. 铝合金压力容器研究进展 [J]. 云南冶金, 2021, 50 (3): 97-101.
- [2] 戴威然, 胥福顺, 李恒, 等. 铸造铝合金气孔产生的原因与预防措施 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (10): 2273-2274.
- [3] 曹培新. 铸造铝合金压力容器孔洞缺陷与控制措施 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (1): 254-255.
- [4] 白清. 低压铸造大型壁厚不均铸件缩松的解决 [J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29 (5): 434-435.
- [5] ZHANG D X, ZHANG Y B, YANG X F, et al. Quality management and control of low pressure cast aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2018, 301 (1): 40-49.
- [6] 孙冬恩, 程和法, 周宏伟, 等. 低压铸造铝合金轮毂的数值模拟及工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (7): 763-767.
- [7] 袁颖, 高凡, 刘云, 等. 基于AnyCasting的开普单缸缸盖铸造工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (12): 1316-1319.
- [8] 林顺岩, 林林, 温庆红, 等. 先进民用铝合金材料加工技术的研究与发展 [J]. 铝加工, 2020 (6): 4-7.
- [9] 马泉林, 周麟升, 刘云. 铝合金铸造工艺设计之重点 [C]// 重庆市铸造行业协会. 2012 (第22届) 重庆市铸造年会论文集, 2012.
- [10] 刘乃仑, 渠晓东, 宋仁梅. 低压铸造内浇口截面积的确定 [J]. 特种铸造及有色合金, 1994 (4): 39-43.
- [11] 化宜文. 压铸内浇道截面积的计算 [J]. 铸造技术, 2008 (6): 752-753.
- [12] 王文清, 李魁盛等. 铸造工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [13] 易杰. 基于仿真的A356铝合金金属型低压铸造工艺的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009.

Numerical Simulation Analysis and Process Design of Low Pressure Casting of Pressure-Resistant Aluminum Alloy Sleeve

WU Ming-qi¹, YANG Mu-yao², YANG Jun³, WANG Xiao-yu³, AI Xiu-lan³

(1. China Rail Way Shanhaiguan Bridge Group, Qinhuangdao 066200, Heibei, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China)

Abstract:

The mold filling and solidification processes of A356 aluminum alloy sleeve castings of pressure vessels by using of low pressure casting method had been analyzed by Flow-3D software, and the casting process scheme was subsequently designed. Through optimizing the production process parameters such as pouring temperature, mold temperature, pressure and so on, a optimized production process scheme was obtained as follows: six ingates evenly distributed at the bottom of the flange; the chill thicknesses accounting for 40% of the casting wall thicknesses; a pressure rise rate of 376 Pa/s; a mold temperature of 100 ℃; and a pouring temperature of 700 ℃. The aluminum alloy sleeve castings produced exhibit good appearance. The mechanical properties, chemical compositions of the separately cast test bars after heat treatment and the air tightness of the sleeve castings are in line with the acceptance standard of aluminum alloy pressure vessel, showing that the low pressure casting process is reasonable and reliable.

Key words:

pressure-resistant aluminum alloy sleeve; Flow-3D; low pressure casting; process design; production verification