

铝合金两通管件低压铸造工艺设计及数值模拟

毛东阳¹ 王德宇² 李欣然³ 陈豪¹ 古毅康¹ 李平¹

(1. 河南理工大学材料科学与工程学院, 焦作 454003; 2. 河南英利特科技有限公司, 焦作 454450; 3. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要 针对铝合金两通管件的结构特征与工艺要求, 设计了一组内浇道、两组内浇道和 three 组内浇道的工艺方案。采用华铸 CAE 软件对 3 种方案进行了充型及凝固过程的数值模拟, 对比分析了充型过程、温度场及缺陷分布。结果表明, 三组内浇道的方案充型与凝固过程更为合理, 没有产生孤立液相区, 且缩孔和缩松缺陷最少, 最终确定其为最优工艺方案。生产的铸件通过水压试验和气密试验检测, 满足客户技术要求。

关键词 铝合金; 两通管件; 低压铸造; 数值模拟; 工艺方案

中图分类号 TG249.2; TP311; TG146.21

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250242

Process Design and Numerical Simulation for Low-pressure Casting of Aluminum Alloy Double-pass pipe

MAO Dongyang¹, WANG Deyu², LI Xinran³, CHEN Hao¹, GU Yikang¹, LI Ping¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Jiaozuo 454003; 2. Hehan Elite Technology Co., Ltd., Jiaozuo 454450; 3. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: Based on the structural characteristics and process requirements of an aluminum alloy double-pass pipe, process schemes with one set of ingate, two sets of ingates, and three sets of ingates were designed. InteCAST software was employed to perform numerical simulations of filling and solidification processes on the schemes, and filling process, temperature field, as well as defect distribution were compared. The results indicate that the filling and solidification process in the scheme with three sets of ingate presents reasonable, and absence of isolated liquid phase zone is observed with least shrinkages and porosities, which is identified as the optimal process. The castings produced with the optimized scheme pass the hydrostatic and air-tightness testing, meeting technical requirements of customer.

Key Words: Aluminum Alloy, Double-pass Pipe, Low-pressure Casting, Numerical Simulation, Process Scheme

低压铸造工艺是将金属液在压力作用下, 由下而上沿着升液管填充铸件型腔, 并结晶凝固形成铸件的方法。该工艺通过对压力的精准控制, 使金属液充型平稳, 成形铸件内部质量高、组织致密, 能有效减少气孔、缩孔等缺陷, 可生产形状复杂、薄壁的铸件。同时, 金属液利用率较高, 降低了生产成本。此外, 低压铸造易于实现机械化和自动化生产, 被广泛应用于航空航天、汽车制造以及电子设备等对铸件质量要求严苛的领域, 可铸造的合金材质包括铝合金^[1-2]、铜合金^[3]、锌合金^[4-6]等, 在现代制造业中发挥着重要作用^[7-12]。

通过对铸造过程中充型、凝固过程进行数值模拟,

从而预测缩松、缩孔缺陷的部位和大小, 对工艺方案进行分析和优化。与传统“试错法”相比, 数值模拟分析能够缩短铸件新产品开发或生产改进周期, 降低铸造成本, 提高生产效率^[13-15]。本研究采用华铸 CAE 软件对铝合金两通管件低压铸造过程中的充型和凝固进行模拟, 分别对 3 种工艺方案进行模拟, 并对结果进行分析, 以选择合适的工艺方案用于实际生产。

1 零件结构分析及技术要求

1.1 结构分析

该零件为垂直转角两通管件, 转角处以 R45 圆滑

收稿日期: 2025-06-15; 修订日期: 2025-08-29

基金项目: 河南省重点研发专项资助项目(241111231300); 河南省高校基本科研业务费专项资金资助项目(NSFRF170502)

第一作者: 毛东阳, 男, 2003 年出生, 硕士研究生, E-mail: maodymax@163.com

通信作者: 李平, 男, 1968 年出生, 教授, E-mail: leeping68@163.com

引用格式: 毛东阳, 王德宇, 李欣然, 等. 铝合金两通管件低压铸造工艺设计及数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(6): 939-944.

MAO D Y, WANG D Y, LI X R, et al. Process design and numerical simulation for low-pressure casting of aluminum alloy double-pass pipe[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(6): 939-944.

过渡,其结构见图1。轮廓尺寸为471 mm×462 mm×372 mm,壁厚差异大,壳体中部凸台处的壁厚为45 mm(最大壁厚),壳体部分壁厚为8 mm(最小壁厚),质量约为21.2 kg;两个法兰盘的内径均为 $\phi 372$ mm,外径为 $\phi 398$ mm,而且两个法兰盘上均匀分布有12个直径为 $\phi 14$ mm的直孔,凸台上有5个直径为 $\phi 16$ mm的螺孔,经过分析,这些孔都不铸出,后期通过机加工完成。



图1 壳体结构三维图
Fig.1 3D model of the shell

1.2 技术要求

零件所用材料为ZL101A,其成分见表1,力学性能要求(T6):抗拉强度 ≥ 295 MPa,屈服强度 ≥ 246 MPa,伸长率 $\delta_5 \geq 3\%$,布氏硬度(HB) ≥ 75 。

铸件尺寸公差要求为CT6,两法兰装配面和内腔表面粗糙度 R_a 为 $6.3 \mu\text{m}$,其余部位粗糙度 R_a 为 $12.5 \mu\text{m}$,两法兰盘装配面加工余量均为3 mm,铸造收缩率为1%。铸件需进行100%水压试验(在1.44 MPa压力下保持5 min)不得出现泄漏,采用 SF_6 包扎法抽

检气密试验(在0.62 MPa压力下保持24 h,压力升高速度不大于400 kPa/min),要求无泄漏、可见变形及异响。

表1 ZL101A合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZL101A alloy				%
w_B				
Mg	Si	Mn	Al	
0.27~0.43	6.6~7.3	≤ 0.35	余量	

2 工艺方案设计及数值模拟

2.1 工艺方案设计

采用低压铸造生产方式。相对于重力铸造,低压铸造在压力状态下充型和凝固,金属液的充型平稳、有利于补缩和排气,防止铸件出现缩孔缩松、气孔等缺陷^[16-18]。在低压铸造工艺中,内浇道的主要作用是引导金属液填充型腔以及对铸件进行补缩,结合铸件壁厚分析和浇口位置的选择,两个法兰面处面积较大且较为平坦,以及壳体的中部区域需要布置内浇道进行补缩,确保铸件在凝固过程中能够填补由于金属收缩而产生的缩孔缩松,提高铸件的质量和完整性。共设计出了3种工艺方案,第1种方案在底部法兰面布置一组内浇道;第2种方案在底部和左侧法兰面布置了两组内浇道;第3种方案在第2种方案的基础上,在中部区域增设了一组内浇道,共三组内浇道。3种方案的示意图分别见图2~图4。

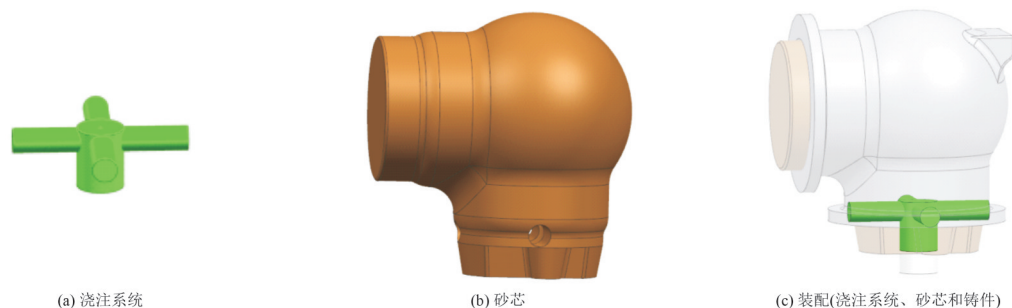


图2 方案1
Fig.2 Scheme 1

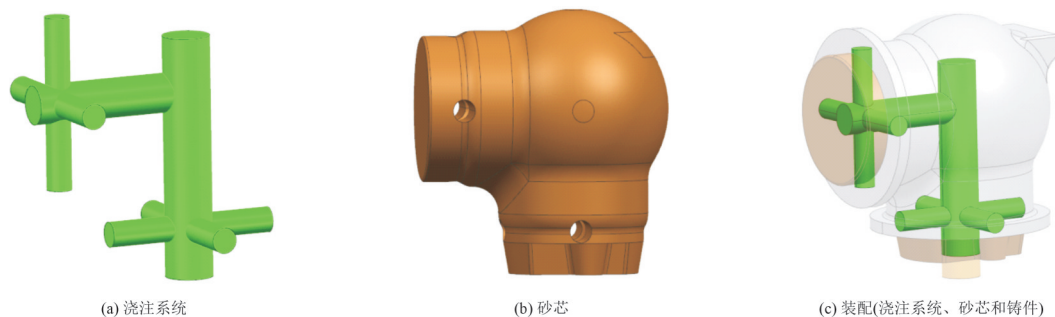


图3 方案2
Fig.3 Scheme 2

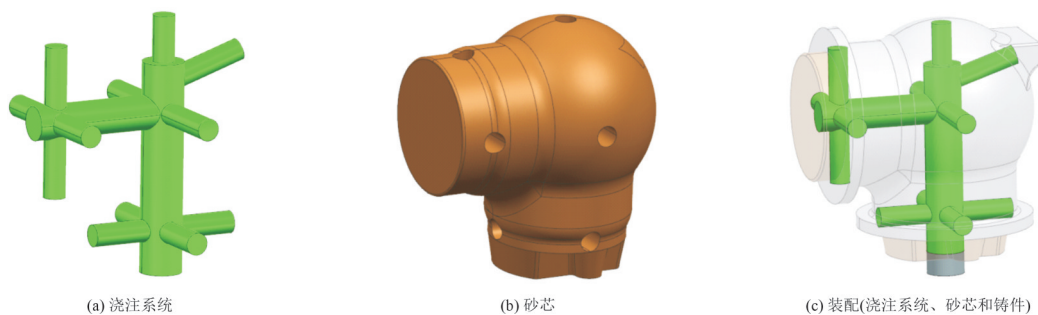


图4 方案3
Fig.4 Scheme 3

2.2 数值模拟参数设置

基于低压铸造工艺的逆向填充特性,确定重力矢量方向与铸件浇注入口呈 180° 逆向布置^[19],材料热物性参数见表2。低压铸造流动包括升液阶段和充型阶段,因升液阶段对凝固的影响很小,华铸CAE只计算充型过程。充型参数设置:初始线速度为 50 cm/s ,充型压力为 20 kPa ,充型加压速率为 2 kPa/s ,其余参数采用华铸CAE软件材料数据库默认值。浇注温度为 700°C ,金属型模具预热温度为 300°C ,砂芯初始温度为 25°C ,铸件与砂芯之间的传热系数为 $750\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,铸件与金属型之间的传热系数为 $2\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,金属型与砂芯之间的传热系数为 $500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,铸件与模具之间的传热系数为 $1\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,划分体网格数为 $5\,734\,800$ 。

表2 ZL101A 合金的热物性参数

Tab.2 Thermophysical parameters of ZL101 castings

密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	潜热/ ($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$)	液相线 温度/ $^\circ\text{C}$	固相线 温度/ $^\circ\text{C}$	辐射 系数
2.45	1.1	106	620	566	0.12

3 数值模拟结果及分析

3.1 第1种方案

3.1.1 充型过程模拟结果与分析

第1种方案的充型过程流动场分布情况见图5。可以看出,在 1.55 s 时合金液平稳进入浇道,底部法兰面填充完成,未出现飞溅和卷气现象,见图5a;在 3.63 s 时合金液进入型腔内部,充型至型腔高度的一半,开始填充上部法兰面,见图5b;在 15.40 s 时随着型腔横截面积

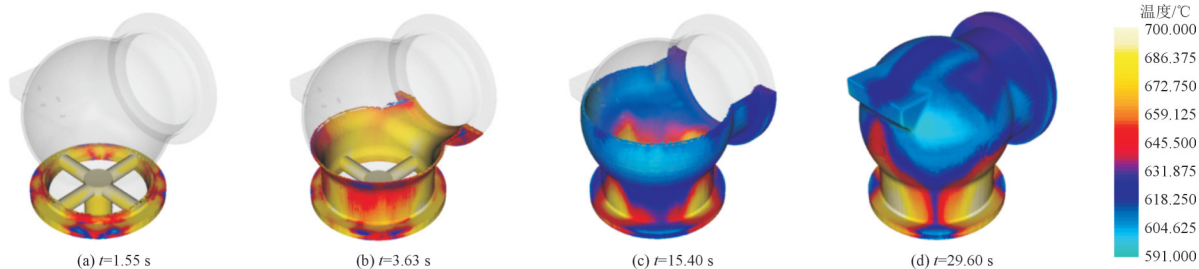


图5 方案1充型过程流动场分布
Fig.5 Flow field distribution of scheme 1 during filling process

增大,流动前沿温度降低,合金液填充至上部法兰面一半位置,见图5c;在 29.60 s 时合金液充满整个型腔,充型结束,见图5d。

3.1.2 凝固过程模拟结果与分析

第1种方案的凝固过程温度场分布情况见图6。可以看出,在 90.35 s 时中部壳体区域、壳体与上部法兰面连接处(颈部)已凝固,上部法兰面除顶部凝固外大部分还未凝固,中部凸台还未凝固,底部法兰面及颈部温度较高,见图6a;在 140.08 s 时上部法兰面除底部未凝固外大部分已凝固,中部凸台与底端颈部大部分已凝固,底部法兰面还未凝固,见图6b;在 336.01 s 时底部法

兰面还有少量未凝固的金属液,其余部位已完成凝固,见图6c;在 505.00 s 时铸件已完成凝固,除浇道处有极少量残余液体,见图6d。

第1种方案铸件的缺陷情况见图7。可以看出,中部凸台凝固阶段因壁厚导致冷却速率低,与壳体薄壁区域形成显著差异,无法进行有效补缩,形成了孤立液相区,见图7a。因凝固阶段补缩效果差,铸件的缩松缺陷主要集中在中部凸台及壳体区域与上部法兰面,上部法兰面厚大部位在凝固后期金属液补缩路径被切断,体积收缩导致集中造成缩孔缺陷,见图7b。金属凝固时,液态收缩和液-固相之间的体积收缩即凝固收缩是形成缩孔及缩松的主要原因。

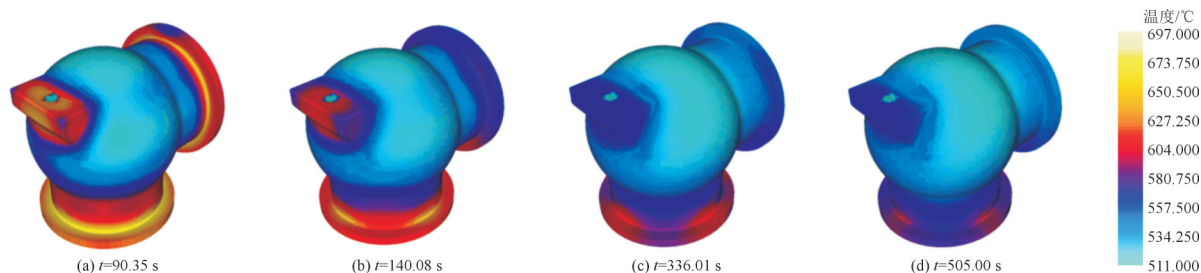


图 6 方案 1 凝固过程温度场分布

Fig.6 Temperature field distribution of scheme 1 during solidification process

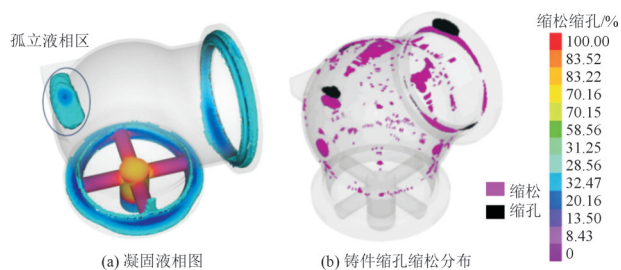


图 7 定量缩孔缺陷分析

Fig.7 Quantitative analysis of shrinkage defects

3.2 第 2 种方案

3.2.1 充型过程模拟结果与分析

第 2 种方案的充型过程流动场分布情况见图 8。可以看出,相较于方案 1,充型时间有所缩短。在 1.86 s 时合金液平稳进入浇道,底部法兰面填充完成,见图 8a;在 4.39 s 时合金液填充至型腔高度的一半,并开始进入上部法兰面的浇道及型腔内部浇道进行填充,见图 8b;

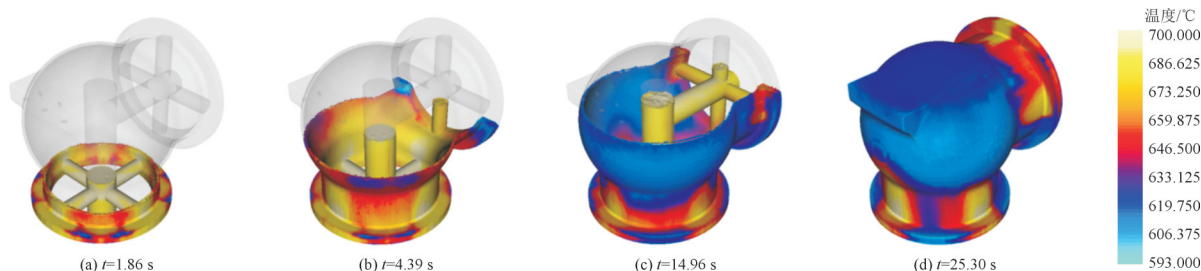


图 8 方案 2 充型过程流动场分布

Fig.8 Flow field distribution of scheme 2 during filling process

在 14.96 s 时合金液继续向上填充,上部法兰面已充型一半,见图 8c;25.30 s 时合金液充满整个型腔,整个充型过程结束,见图 8d。

3.2.2 凝固过程模拟结果与分析

第 2 种方案的凝固过程温度场分布情况见图 9。在 60.02 s 时中部壳体区域大部分已凝固,底部和上部法兰面、中部凸台和壳体与法兰面连接处(颈部)未凝固,且温度较高,见图 9a;在 95.00 s 时,中部壳体区域和颈部已凝固,底部和上部法兰面及中部凸台还未凝固,见

图 9b;在 340.00 s 时,底部法兰面还存在少量的金属液,其余部位已完成凝固,见图 9c;在 795.00 s 时,铸件已完成凝固,见图 9d。可以看出,方案 2 凝固时间相较于方案 1 要长,凝固顺序有所不同。

第 2 种方案铸件的缺陷情况见图 10。相较于方案 1,在上部法兰面增加了一组浇道后,对法兰面的补缩效果更好,上部法兰面的缩孔缩松缺陷得以消除,见图 10b;中部凸台的孤立液相区仍然存在,容易形成缩孔缺陷,见图 10a。

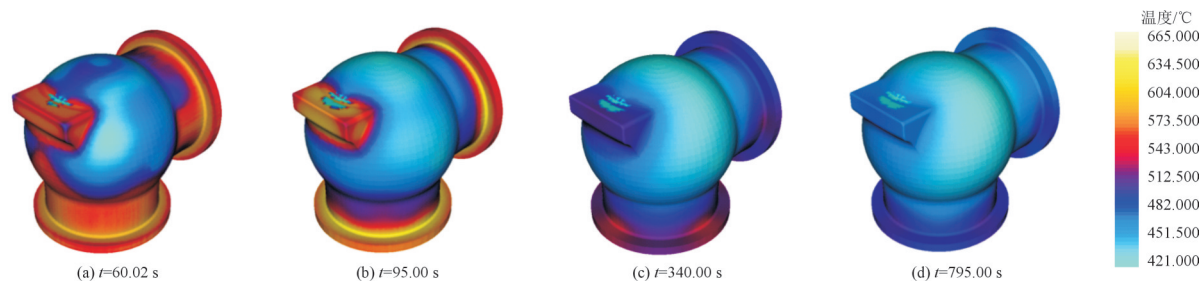


图 9 方案 2 凝固过程温度场分布

Fig.9 Temperature field distribution of scheme 2 during solidification process

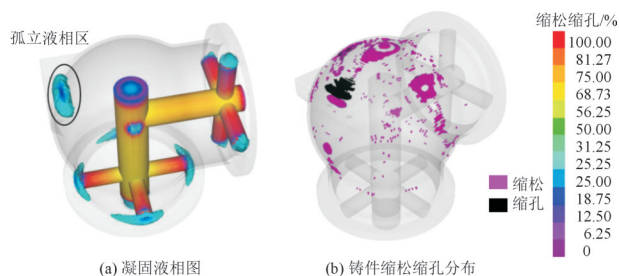


图 10 定量缩孔缺陷分析

Fig.10 Quantitative analysis of shrinkage defects

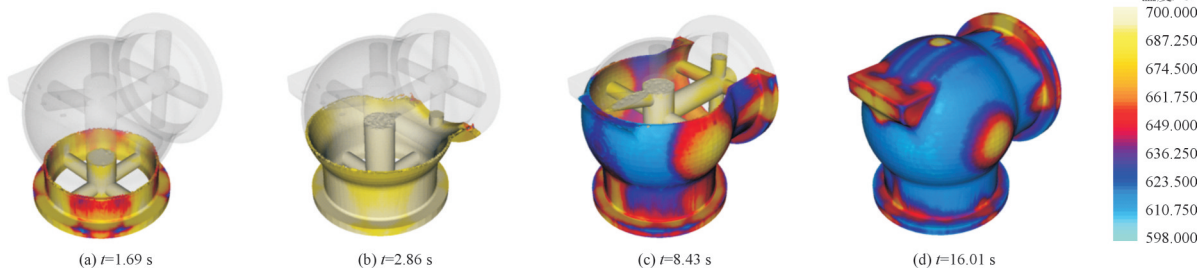


图 11 方案 3 充型过程流动场分布

Fig.11 Flow field distribution of scheme 3 during filling process

完成填充,见图 11c;当 16.01 s 时合金液充满整个型腔,充型过程结束,见图 11d。

3.3.2 凝固过程模拟结果与分析

第 3 种方案的凝固过程温度场分布情况见图 12。可以看出,在 35.04 s 时中部壳体区域除浇道处已凝固,底部和上部法兰面、中部凸台和壳体与法兰面连接处

3.3 第 3 种方案

3.3.1 充型过程模拟结果与分析

第 3 种方案的充型过程流动场分布情况见图 11。相较于前两种方案,充型时间显著缩短,可以看出,在 1.69 s 时合金液平稳进入浇道,底部法兰面填充完成,见图 11a;在 2.86 s 时合金液填充至型腔高度的一半,并开始进入中部区域和上部法兰面浇道,见图 11b;在 8.43 s,合金液继续向上填充,上部法兰面大部分区域

(颈部)未凝固,且温度较高,见图 12a;在 135.01 s 时上部法兰面、中部壳体区域和颈部除浇道处有少量残余液体已完成凝固,中部凸台和底部法兰面还未凝固,见图 12b;在 360.02 s 时,除中部凸台未凝固,其他部位均已凝固,见图 12c;在 $t=790.03$ s 时铸件已完成凝固,见图 12d。可以看出,凝固时间与方案 2 相差不大,凝固顺序有所不同。

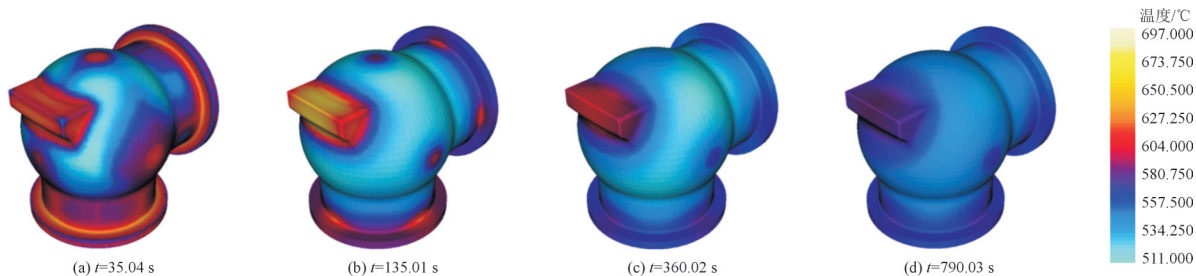


图 12 方案 3 凝固过程温度场分布

Fig.12 Temperature field distribution of scheme 3 during solidification process

第 3 种方案铸件的缺陷情况见图 13。可以看出,方案 3 在上部法兰面和中部的区域分别增加一组浇道后,对铸件的补缩效果更好,前两种方案存在的孤立液相区

消失,见图 13a。通过定量缩孔缺陷分析结果可以认为在壳体区域的缩孔缺陷得以消除,缩松缺陷得到大幅度改善,见图 13b。

通过对比 3 种方案的模拟结果可以看出,方案 3 的充型和凝固过程更为合理,对两个法兰面和凸台区域的补缩效果更好,不存在孤立液相区,缩孔和缩松缺陷最少。因此,选取第 3 种方案用于铸件的实际生产。

4 生产验证

按照工艺方案 3 进行设计和批量生产,实际生产出的铸件经机加工处理和外观检验,存在的缩松缺陷并

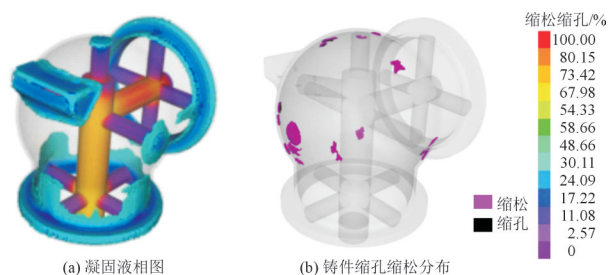


图 13 定量缩孔缺陷分析

Fig.13 Quantitative analysis of shrinkage defects

未露出表面,不影响铸件的气密性。后续经过等离子激光切割机去除内腔的浇道,再由人工打磨进行表面处理,满足客户技术要求,并进行了批量生产。图14为实际试生产的铸件。



图14 试生产铸件

Fig.14 Trial produced castings

5 结 论

(1)利用华铸CAE软件对3种方案进行了充型及凝固过程的数值模拟分析。模拟结果表明,方案1两通管件中右侧法兰面及中部凸台区域存在孤立液相区,容易出现缩孔缩松缺陷;方案2两通管件中右侧法兰面没有出现孤立液相区,但中部凸台区域仍存在孤立液相区,容易出现缩孔缺陷;方案3两通管件中没有出现孤立液相区,缩孔缩松缺陷得到有效控制。

(2)依据方案3进行实际生产的铸件经水压试验和气密试验检测,无泄漏、可见变形及异响,内部质量好,满足客户技术要求,成功实现了批量生产。

参 考 文 献

- [1] 宋春丽,裴小龙,陈利文,等.大型薄壁复杂铝合金舱体件低压铸造模拟对比分析[J].特种铸造及有色合金,2023,43(6):794-799.
- [2] DONG G J, LI S D, MA S Z, et al. Process optimization of A356 aluminum alloy wheel hub fabricated by low-pressure die casting with simulation and experimental coupling methods [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 3 118-3 132.
- [3] 刘孝福,姜延春,齐笑冰,等.低压铸造技术在铜合金和黑色金属领域的发展和应用[J].铸造,2006,55(6):585-588.
- [4] 陈胜娜,余欢,徐志峰,等.镁合金低压铸造的研究进展[J].铸造,2012,61(12):1 405-1 409.
- [5] 潘龙,余国康,邹文兵,等.镁合金筒形件低压铸造工艺研究[J].特种铸造及有色合金,2021,41(4):512-517.
- [6] 姜大光.大型薄壁镁合金支架铸件的低压铸造工艺研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [7] 熊艳才,刘伯操.铸造铝合金现状及未来发展趋势[J].特种铸造及有色合金,1998(4):1-5.
- [8] 刘兵,彭超群,王日初,等.大飞机用铝合金的研究现状及展望[J].中国有色金属学报,2010,20(9):1 705-1 715.
- [9] 钱东伶,芦富敏,余忠土,等.汽车底盘用铸造铝合金的研究进展[J].特种铸造及有色合金,2020,40(10):1 077-1 082.
- [10] 曹春晓.一代材料技术,一代大型飞机[J].航空学报,2008,29(3):

701-706.

- [11] 彭晋民,钱翰城.铸态铸造铝硅合金的现状和发展[J].铸造技术,2000,21(6):32-34.
- [12] 王立新,包学春,王胜良.复杂型腔产品精密铸造工艺设计及改进实例[J].特种铸造及有色合金,2023,43(5):701-703.
- [13] 凌云飞,杨军,刘胜田.数值模拟技术在摇枕铸造工艺设计中的应用[J].铸造,2011,60(6):565-570.
- [14] 赵杰,陈荣发,黄志刚,等.数值模拟在镁合金钉枪枪体压铸工艺优化中的应用[J].铸造,2015,64(8):758-761.
- [15] 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.
- [16] 吕志刚.铸造手册(第6卷):特种铸造第4版[M].北京:机械工业出版社,2021.
- [17] 吴忠斌,夏小江,胡鸿斌,等.低压铸造铝合金电机端盖的研制[J].铸造,2024,73(5):693-698.
- [18] 廖海洪,梁敏洁,程军.铝合金低压铸造浇注系统的CAD设计[J].稀有金属,2006(S1):43-48.
- [19] 肖飞.汽车铝合金变速箱低压铸造数值模拟及工艺优化[D].南昌:南昌大学,2014.

(编辑:张正贺)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦11楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

