

铝合金变速箱壳体低压铸造工艺优化

王亮¹, 刘中令²

(1. 洛阳市轨道交通集团有限责任公司, 河南洛阳 471023;

2. 郑机所(郑州)传动科技有限公司, 河南郑州 450000)

摘要: 对铸件某型号变速箱壳体原低压铸造工艺的充型、凝固过程进行数值模拟, 观察铸件易产生卷气、缩松等缺陷部位, 并分析原因。根据模拟分析结果提出提高浇注温度与浇注速度、增大顶部冒口尺寸、增加冷铁数量的优化措施。通过对优化后的铸造工艺进行数值模拟、生产试制和检验, 验证了优化措施的可行性, 有效避免缺陷的产生, 实现质量提升目标。

关键词: 变速箱壳体; 低压铸造; 数值模拟; 工艺优化

变速箱壳体是机械传动系统的核心零件之一, 结构复杂且不规则, 通过它将传动机构上的零部件联结为一个整体^[1]。随着我国轨道交通技术水平不断提升, 以铝代铁、代钢进程大大加快, 齿轮箱材料由传统的球墨铸铁或灰铸铁向铝合金转变, 可有效减小簧下质量, 提高运行品质^[2-3]。虽然变速箱壳体的低压铸造工艺已被广泛应用, 但在铸造过程中仍会不可避免地出现缩孔缩松等缺陷, 原因在于铸造过程中参数的选择和调整^[4]。现阶段计算机仿真技术已经十分成熟, 可直观有效地表现铸件的充型凝固过程以及预测缺陷分布。如彭玲玲使用FLOW-3D对变速箱壳体充型过程进行模拟, 预测了腔体的卷气情况, 并进行工艺改进^[5]。朴俊杰等人通过ProCAST模拟了汽车支架的充型和凝固过程, 基于结果采取局部加压优化措施, 解决了铸件缩孔缩松缺陷^[6]。马运安等人通过Anycasting得到箱体铸造过程的充型速度、充型温度、凝固液相区及收缩缺陷分布情况, 并进行相应工艺优化消除了内部缺陷^[7]。可见充分利用计算机仿真技术来开发铸件, 可有效发现铸件缺陷产生的部位及形成原因, 以便采取相应工艺改进措施^[8]。

本文以某型号铝合金齿轮变速箱壳体为研究对象, 运用仿真软件对原低压铸造工艺充型及凝固过程进行数值模拟, 观察卷气、缩松等缺陷易产生部位并分析原因, 从而进行相应工艺改进, 开发出高质量稳定生产的变速箱壳体工艺。

作者简介:

王亮(1982-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事城市轨道交通运维生产及技术管理与研究工作。电话: 18624855555, E-mail: 282652189@qq.com

中图分类号: TG146.2⁺1
文献标识码: B
文章编号: 1001-4977(2025)02-0203-08

收稿日期:

2024-07-09 收到初稿,
2024-08-28 收到修订稿。

1 变速箱壳体技术条件

壳体三维模型如图1所示, 其外观尺寸为1 457 mm × 601 mm × 411 mm, 单重66 kg。性能方面要求抗拉强度 ≥ 297 MPa, 屈服强度 ≥ 230 MPa, 伸长率 $\geq 11\%$; 射线探伤要求关键部位没有孔洞类缺陷; 铸件表面不允许有氧化皮、冷隔、裂纹等缺陷。

本型号铝合金齿轮变速箱壳体材料选用A356铝合金, 铝合金成分见表1。

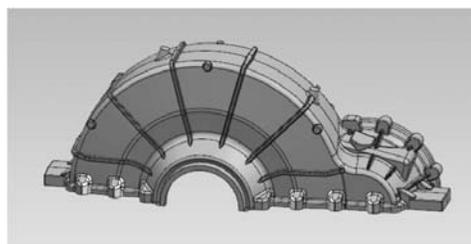


图1 铸件三维图

Fig. 1 Three-dimensional model of the casting

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

							$w_B/\%$
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

2 原始工艺数值模拟与分析

2.1 原始工艺方案

如图2所示,铸件结构复杂,壁厚分布不均,最小壁厚位置位于底部外沿,仅为4 mm,最大壁厚位置位于底部与侧面凸台以及表面筋条处,达到28 mm。由于铸件力学性能、内部质量(尤其指定区域)要求高,表面不允许有夹渣、氧化皮等缺陷,需要严格控



图2 铸件壁厚

Fig. 2 Wall thickness diagram of the casting

制充型过程的速度、排气以及充型完成后各部位的凝固时间,达到平稳充型、顺序凝固的目的,以此消除卷气、夹渣、缩孔缩松等缺陷。

铝合金齿轮变速箱壳体采用低压铸造工艺方案(图3),浇注系统为开放式,具有金属液流动平稳、对砂型冲刷力小的优点,能够有效减少氧化物产生。其中直浇道截面积为7 850 mm²,横浇道截面积为12 448 mm²,内浇道截面积为60 660 mm²。设计随形冒口,其中顶部冒口为明冒口,其余为暗冒口,在冒口无法补缩到的厚壁部位放置冷铁,冒口及铸件型腔拐角处布置排气通道,直浇道内置高硅氧玻璃纤维过滤网。

2.2 模拟参数设置

铸件本体与冷铁材料选用A356铝合金,砂型材料选用40~70目水洗海砂,基于仿真软件对充型过程及凝固过程进行数值模拟。其中A356铝合金热物性参数见表2,水洗海砂热物性参数见表3。

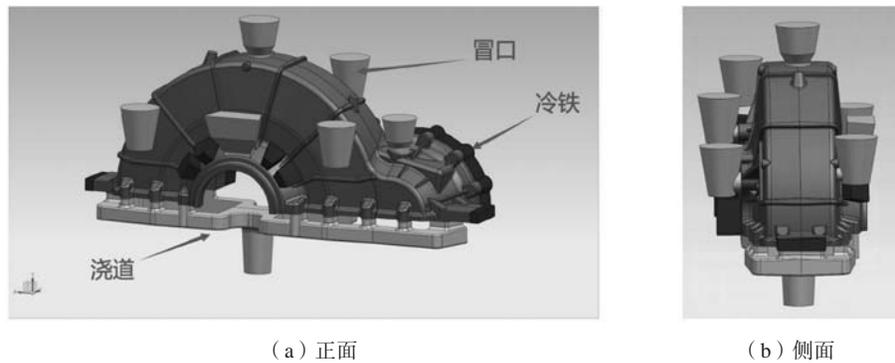


图3 铸造模型

Fig. 3 Model of casting

表2 A356铝合金热物性参数
Tab. 2 Thermal parameters of A356 aluminum alloy

密度/(g·cm ⁻³)	固相线/℃	液相线/℃	临界固相率/%	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	潜热/(J·kg ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	动态粘度/(Pa·s)
2.69	555	615	0.67	178	432	963	0.000 950 3

表3 水洗海砂热物性参数
Tab. 3 Thermal parameters of sea sand

密度/(g·cm ⁻³)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)		
		200~500 ℃	500~1 000 ℃	1 000~1 500 ℃
1.5	920	0.7	0.6	0.5

采用总体平均网格划分法，总网格数5 802 060，网格划分如图4所示。

铸件与砂型间的界面热交换系数及铸件与冷铁之间的界面热交换系数设置如图5所示，冷铁与砂型之间的界面热交换系数为500 W/(m²·K)；砂型与冷铁初始温度30 ℃；充型工艺参数如表4所示，铸件冷却方式为空冷。

2.3 数值模拟结果分析

2.3.1 充型模拟分析

充型过程数值模拟结果如图6所示，铸件型腔充满时间为31.56 s。由图6 (a) 可以看出，当充型时间为7.96 s时，金属液在气体压力作用下充满内浇道，随后开始充型铸件型腔。如图6 (b)、6 (c)，金属液通过内浇道后以层流形态缓慢向上填充，过程平稳有序、无明显卷气现象产生。如图6 (d)，当充型时间为30.26 s时，金属液前端已有部分区域温度低于液相线，为保证金属液在充型时具有较好的流动性，需适当提高浇注温度与浇注速度。

2.3.2 凝固模拟分析

铸件在不同凝固时间的温度场如图7所示，主体凝固完成整体用时2 242.42 s，凝固进程较慢。如图7 (a)，首先凝固位置为冷铁接触部位及铸件侧面扇形区。如图7 (b)，当凝固进程行进至277.77 s时，顶部冒口周围金属液已处于固相线，阻断浇口对顶部的补缩作用，结合图8残余熔体体积可知，在铸件筋条部位产生体积较大的孤立液相区，该部位凝固后容易出现缩孔缩松，直接影响到铸件的最终成形质量与力学性能。如图7 (d)，当凝固时间为2 242.42 s时，顶部冒口因补缩所剩余量过小，易使铸件内部产生缩孔类缺陷。

3 工艺优化方案及分析

3.1 工艺优化

针对缺陷位置及特点，进行工艺改进及优化，方案如下。

(1) 原工艺充型完成时温度偏低，提高浇注温度至700 ℃，提高充型压力至42 kPa、结壳压力至44 kPa。

(2) 铸件主体凝固速度相差较大，结合图2发现，铸型中冷铁数量较少、布局分散、导致铸件热传递不均匀，存在局部过快或局部过慢凝固的问题，且

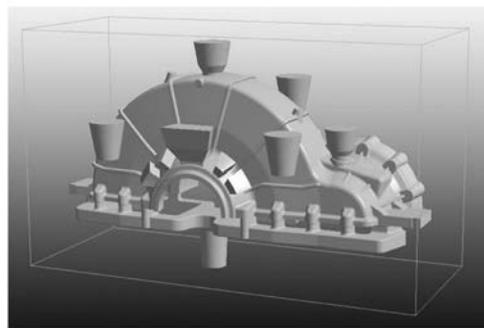
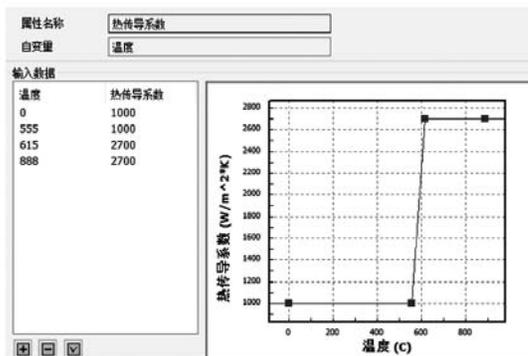


图4 网格划分

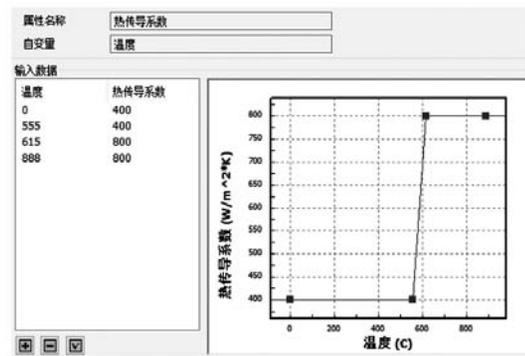
Fig. 4 Grid division

表4 充型工艺参数
Tab. 4 Filling process parameters

项目	参数
浇注温度	680 ℃
升液压力	26 kPa
充型压力	35 kPa
结壳压力	40 kPa
结晶压力	56 kPa
升压速度	1 kPa/s
保压时间	720 s



(a) 铸件与冷铁



(b) 铸件与砂型

图5 传热系数

Fig. 5 Heat transfer coefficient

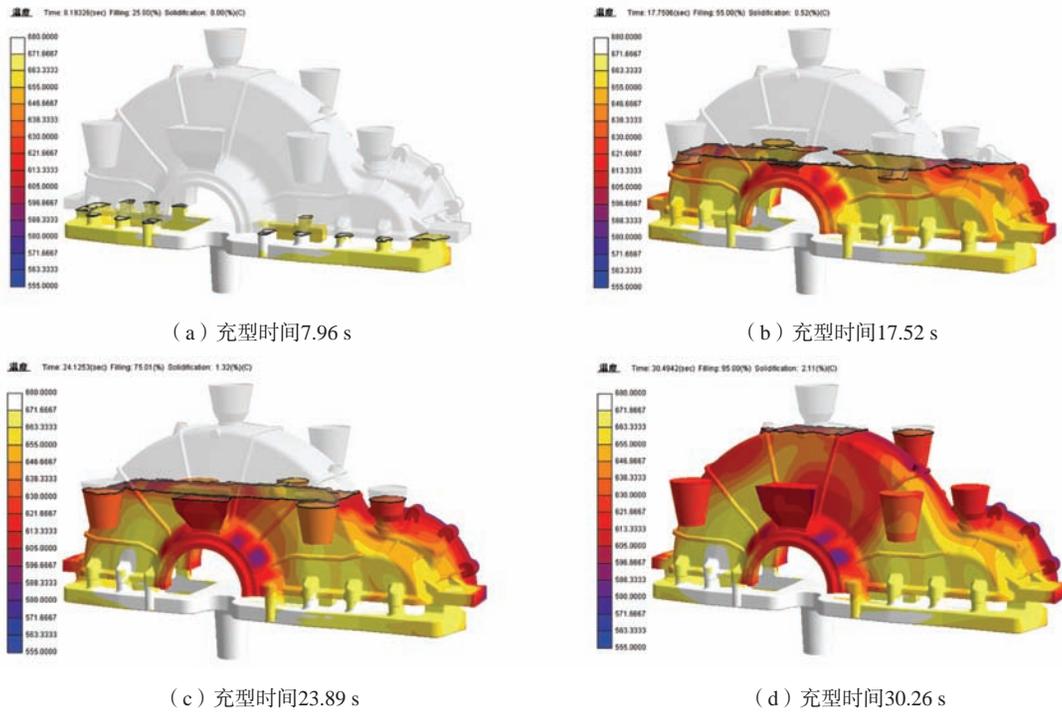


图6 充型过程数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results during filling process

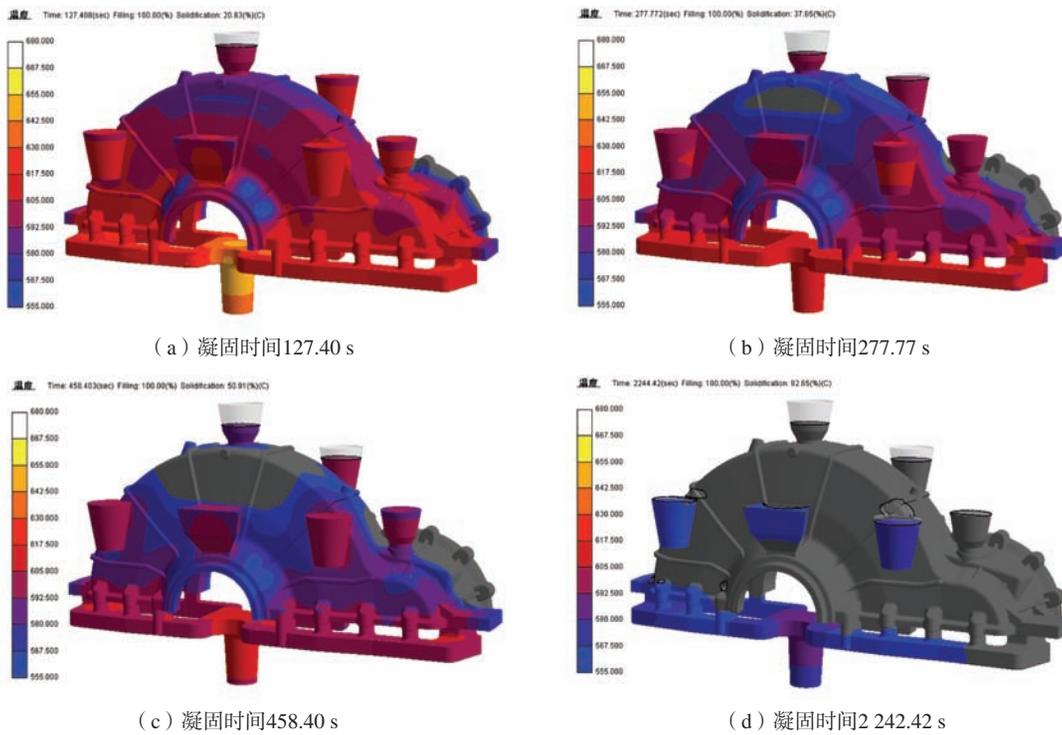


图7 凝固过程数值模拟结果

Fig. 7 Numerical simulation results during solidification process

顶部冒口余量过小，在壁厚差较大的拐角及厚壁位置易产生缩孔类缺陷。优化工艺采取加大顶部冒口尺寸与高度措施，同时在各冒口远端及铸件底部的厚壁位置增加随形冷铁，冷铁厚度为接触部位壁厚的2倍，加快主体凝固速度、缩短冒口补缩距离，减少或消除缺陷产生。优化后铸件铸造模型如图9所示。

3.2 数值模拟结果分析

3.2.1 优化后充型模拟分析

从图10中看出优化后铸件充型过程和优化前基本

保持一致，充型完成时间为16.26 s，过程平稳，无明显卷气现象产生。充型完成时金属液温度处于液相线以上，说明具有流动性良好。

3.2.2 优化后凝固模拟分析

如图11所示，优化后铸件主体凝固时长缩短为1 058.22 s。结合图12观察铸件凝固过程中金属液的残留情况，可以看出铸件各部位凝固速度加快，过程中未产生与冒口或浇口断开连接的孤立液相，凝固完成时各冒口余量正常，利于补缩，减小缩孔、缩松缺陷产生的概率。



图8 残余熔体体积
Fig. 8 Residual melt volume

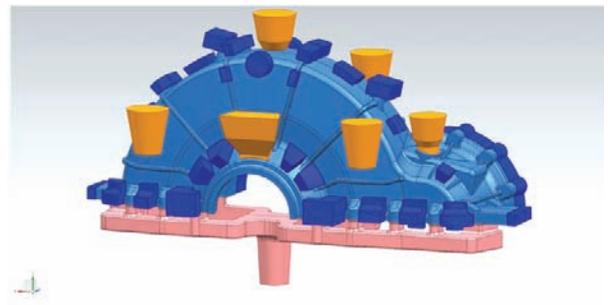
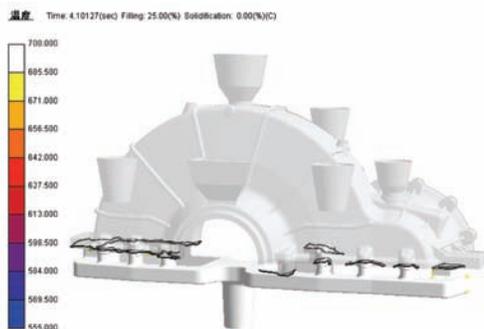
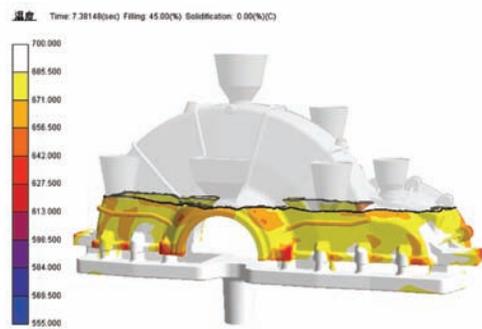


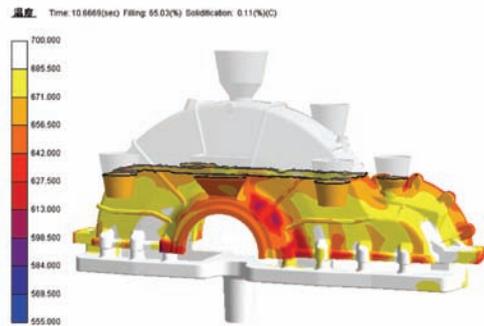
图9 优化后铸造模型
Fig. 9 Model of casting after optimization



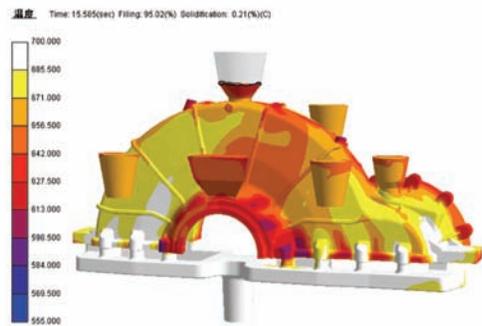
(a) 充型时间4.10 s



(b) 充型时间7.38 s



(c) 充型时间10.66 s



(d) 充型时间15.58 s

图10 优化后充型过程数值模拟结果

Fig. 10 Numerical simulation results during filling process after optimization

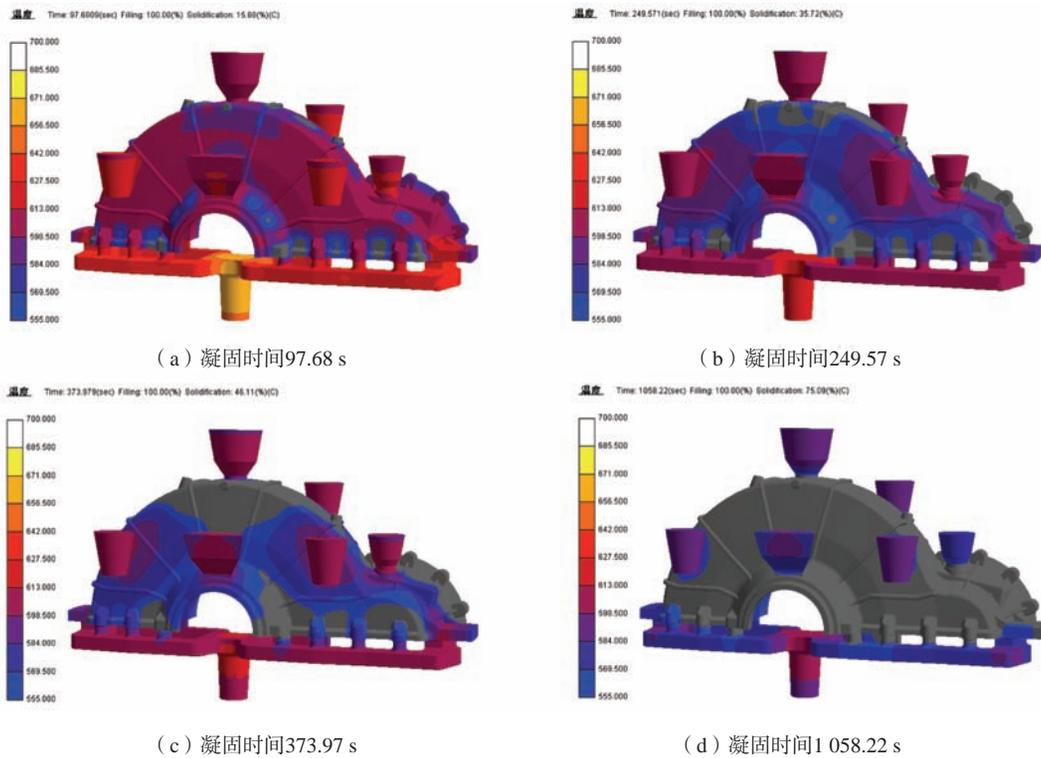


图11 优化后凝固过程数值模拟结果

Fig. 11 Numerical simulation results during solidification process after optimization

图12 优化后残余熔体体积
Fig. 12 Residual melt volume after optimization

4 试制验证

为进一步验证优化工艺的可行性，使用优化后的工艺进行试制。将A356合金锭放入石墨粘土坩埚中，利用井式电阻炉加热熔化并升温至740℃；采用HGJ-3精炼剂进行精炼处理，撇去浮渣；随后，将熔体降温至720℃，以Al-10Sr中间合金的形式向熔体中加入Sr元素（0.02%）进行变质处理，搅拌并降温至700℃保温10 min后，除去表面浮渣；使用表5所示参数进行浇注。

铸件充型凝固后自然空冷，如图13所示，外观检查无明显铸造缺陷；力学性能满足抗拉强度 ≥ 297



图13 铸件外观

Fig. 13 Appearance of casting

表5 试制工艺参数
Tab. 5 Process parameters of trial production

项目	参数
浇注温度	700 ℃
升液压力	26 kPa
充型压力	42 kPa
结壳压力	44 kPa
结晶压力	56 kPa
升压速度	1 kPa/s
保压时间	720 s

MPa，屈服强度 ≥ 230 MPa，伸长率 $\geq 11\%$ ；通过X射线探伤GB/T 5677—2018检验标准，如图14所示，内部良好，未发现明显缩松和缩孔现象。满足规定技术要求。

5 结束语

通过CAE仿真软件对变速箱壳体铸件充型及凝固过程进行数值模拟，分析铸件充型过程的流态以及凝固趋势；预测卷气夹杂、热节以及孤立液相可能出现的部位，进行相应的工艺优化，减少缩孔缩松等缺陷产生的概率，实现了预期效果。

适当提高浇注温度至700~710 ℃，提高充型压力至42 kPa、结壳压力至44 kPa，保证金属液充型过程的流动性，提高充型质量。通过加大冒口尺寸与增加冷铁数量，有利于加快铸件热节处的冷却速度，增强冒口的补缩作用，实现铸件顺序凝固，降低缩孔缩松及气孔等缺陷产生的概率。通过实际试制生产，验证了上述工艺改进的有效性及其可行性。

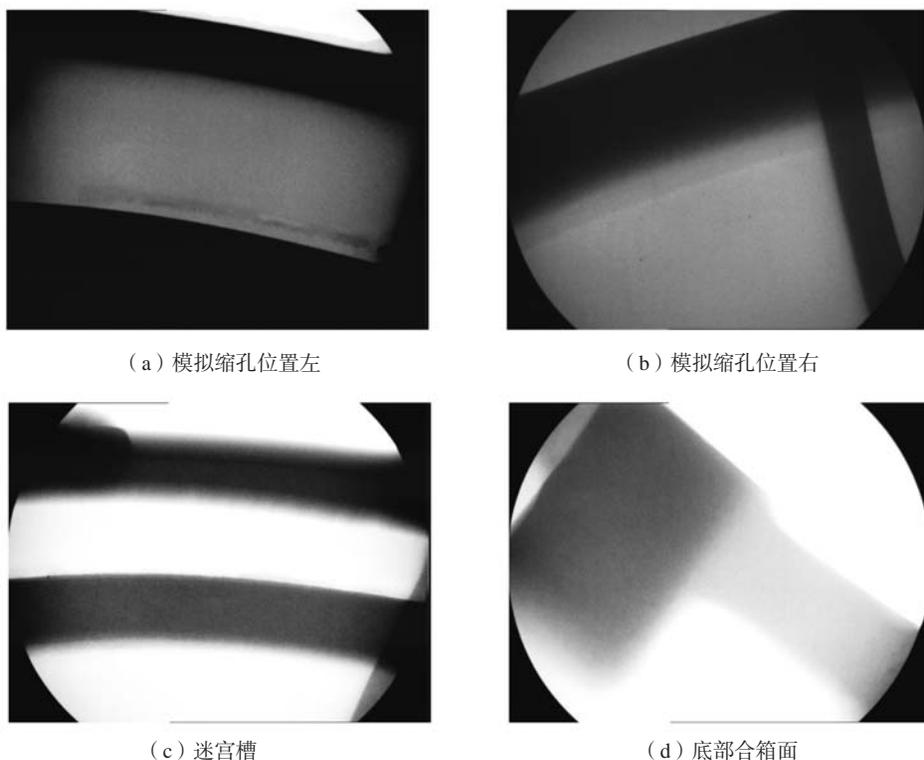


图14 X射线检测

Fig. 14 X-ray inspection of the casting

参考文献:

- [1] 刘伟, 孙成涛, 胡平. 变速箱壳体铸造工艺模拟及优化 [J]. 铸造工程, 2023, 47 (6): 58-62.
- [2] 王祝堂. 2025年全球铝铸件市场可达973.6亿美元 [J]. 轻金属, 2019 (8): 50.
- [3] 王作超, 李守江, 王成. 箱体类零件加工工艺 [J]. 金属加工 (冷加工), 2022 (7): 36-39.
- [4] 张东生. A356低压铸造铝合金车轮工艺优化及组织性能研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
- [5] 彭玲玲. 基于Flow-3D软件的变速箱壳体压铸工艺数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (3): 68-70.
- [6] 朴俊杰, 姜博, 胡茂良, 等. 复杂结构ADC12铝合金汽车支架挤压铸造工艺参数优化 [J]. 精密成形工程, 2023, 15 (11): 132-139.
- [7] 马运安, 曹霞. 高铁制动单元箱体铸造数值模拟及工艺优化 [J]. 铸造工程, 2024, 48 (1): 73-77.
- [8] 王晓宇, 杨军. 铝合金套筒低压铸造工艺优化研究 [J]. 铸造工程, 2023, 47 (5): 1-6.

Optimization of Low-Pressure Casting Process for Aluminum Alloy Gearbox Case

WANG Liang¹, LIU Zhong-ling²

(1. Luoyang Rail Transit Group Co., Ltd., Luoyang 471023, Henan, China; 2. ZRIME Gearing Technology Co., Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract:

The filling and solidification process of a certain type of gearbox housing in the original low pressure casting process was numerically simulated, and the defects such as gas trapping and dispersed shrinkage were observed and the reasons were analyzed. According to the results of simulation analysis, the optimization measures of increasing pouring temperature and pouring speed, increasing the size of top riser and increasing the number of chill are put forward. Through the numerical simulation, trial production and inspection of the optimized casting process, the feasibility of the optimization measures was verified, the defects were effectively avoided, and the quality improvement goal was achieved.

Key words:

gearbox housing; low-pressure casting; numerical simulation; process optimization