

特高压 GIS 电流互感器壳体砂型 低压铸造工艺改进

张冰冰^{1, 2}, 李红强², 朱 广²

(1. 西安西电开关电气有限公司, 陕西西安 710077; 2. 西安西开精密铸造有限责任公司, 陕西西安 712046)

摘要: 针对特高压GIS用砂型低压铸造电流互感器壳体漏气问题, 开展分析与工艺改进。结果表明, 原工艺铸件漏气主要由于内浇口附近底法兰较早凝固, 导致筒身出现一周孤立液相区, 进而产生凝固缺陷。工艺改进1: 直浇道垂直连接8个均布内浇道向底法兰内腔充型; 底法兰向圆盘边缘设置拉筋, 热处理后清理; 并调整冷铁。在凝固过程仿真结果中, 环形圆盘加强筋根部及内浇口附近出现孤立液相。工艺改进2: 铸件毛坯上法兰内侧台阶采取斜面, 加粗内浇道, 对内浇口增加补贴并调整冷铁。仿真结果显示, 铸件能够顺序凝固, 没有缩孔缩松缺陷。按照工艺改进2开始试制并批量生产超过30件, 工艺稳定。

关键词: 特高压; GIS; 凝固缺陷; 漏气; 铝合金壳体; 砂型低压铸造; 工艺改进

中图分类号: TG249.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 06-0684-06

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0088

Sand Mold Low-Pressure Casting Process Improvement of the Current Transformer Shell for Ultra High Voltage GIS

ZHANG Bing-bing^{1, 2}, LI Hong-qiang², ZHU Guang²

(11. Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, Shaanxi, China; 2. Xi'an XK Precision Founding Co., Ltd., Xi'an 712046, Shaanxi, China)

Abstract: To address the gas leakage problem of the current transformer shells manufactured by sand mold low-pressure casting process for ultra-high voltage GIS, analysis and process improvements were carried out. The results indicated that when the original process being used, the gas leakage mainly resulted from the premature solidification of the bottom flange of nearby the inner gates, leading to generate a circle of isolated liquid-phase zones in the barrel section, then resulting in solidification defects. Process improvement 1: a sprue was vertically connected with eight uniformly distributed inner gates to fill the inner cavity of the bottom flange; the reinforcement bars were added from the bottom flange to the edge of the disc, which were removed after heat treatment; and adjusted the chills. In the simulation result of solidification process, isolated liquid-phase zones occurred at the root positions of the reinforcement bars of the circular disc and near the ingates. Process improvement 2: the inner step of the casting blank upper flange was modified with a slope, the ingates were thickened, and additional subsidies were added to the ingates along with chill adjustments. Simulation results demonstrated that the casting achieved sequential solidification without shrinkage holes and porosity defects. Finally, according to the process improvement two, the trial production and the batch production more than 30 products were carried out, and the process was stable.

Key words: ultra high voltage; GIS; solidification defect; gas leakage; aluminum alloy shell; sand mold low pressure casting; process improvement

气体绝缘金属封闭高压开关 (Gas Insulated Switchgear, GIS) 是广泛应用于电力系统的一次设备, 其特征是将所有开关和母线等高压电器元件密封在圆形金属外壳内, 采用SF₆ 绝缘气体作为绝缘和灭弧介质, 构建完整的气体绝缘和开关动作系统^[1-4]。铸

造铝合金具有价格低廉, 组织各向同性, 可以获得特殊的组织, 易于生产形状复杂的零件, 可以小批量生产也可以大批量生产等诸多优点^[5], GIS复杂形状的金属壳体普遍采用铸造铝合金壳体。铸造Al-Si合金因具备优异的铸造流动性等成型特性而被大范围研究和

基金项目: 西安西开精密铸造有限责任公司工艺改进自研项目。

收稿日期: 2026-02-25 收到初稿, 2026-03-19 收到修订稿。

作者简介: 张冰冰 (1987-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为铝合金铸造工艺设计与铸造工艺仿真分析。E-mail: neuzbb@126.com

通信作者: 李红强, 男, 高级工程师。电话: 19991920509, E-mail: 631265516@qq.com。

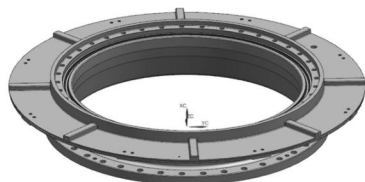
引用格式: 张冰冰, 李红强, 朱广. 特高压 GIS 电流互感器壳体砂型低压铸造工艺改进 [J]. 铸造, 2026, 75 (6): 684-689.

ZANG Bingbing, LI Hongqiang, ZHU Guang. Sand mold low-pressure casting process improvement of the current transformer shell for ultra high voltage GIS [J]. Foundry, 2026, 75 (6): 684-689.

应用^[6-7]，其中ZL101A材料因其良好的铸造性与优异的力学性能在GIS铸件中应用最为广泛。对于不适合采用金属型低压铸造工艺生产的形状复杂的中大型壳体铸件，常采用砂型低压铸造工艺生产。GIS铸件壳体，通常力学性能和气密性要求高^[8]。而实际生产中，由于壳体铸件出现裂纹^[9]、法兰针孔^[10]，或铸造型腔内的金属液凝固速率不同，凝固过程中容易产生孤立液相区，每个孤立的液相区在凝固完成后最终产生一个或者多个缩孔^[11]，导致壳体铸件气密性下降，在使用过程中易出现泄漏，使产品报废率明显上升^[12]。随着铸造工艺仿真技术的发展，采用计算机仿真辅助铸造壳体缺陷问题分析与工艺改进^[13-17]及直接辅助工艺设计^[18-21]越来越普遍。本研究针对一种砂型低压铸造特高压GIS用外壳漏气问题开展仿真分析与工艺改进。

1 铸件结构与性能要求

电流互感器外壳质量约95 kg，基本尺寸 $\Phi 1\ 350\text{ mm}$



(a) 外观



(b) 剖面

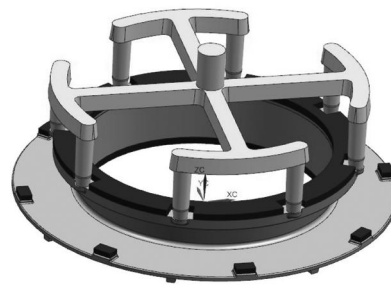
图1 零件
Fig. 1 The part

2 原工艺铸件问题

原砂型低压铸造工艺如图2所示。直浇道上面连接十字横浇道，十字横浇道末端连接一字横浇道，“一”字横浇道上面两端分别连接1个内浇道，共8个内浇道连接底法兰端面外径位置（该位置采用补贴）。底法兰内浇口周围20 mm范围无冷铁，其余位置放置厚度25 mm冷铁。上法兰内圈冷铁厚25 mm，台阶上的冷铁厚15 mm。对接地块位置放置厚20 mm冷铁。采用浇注工艺参数见表2，浇注压力参数见表3。



(a) 正放



(b) 倒放

图2 原工艺
Fig. 2 The original process

$\times 207\text{ mm}$ ，铸件技术要求见表1。该壳体（图1）主体为两端带有法兰的筒体结构，筒体下方法兰厚度为35 mm，筒体上方法兰厚度为40 mm，带有U型槽的密封面位置薄，厚度为23 mm。在上法兰端面有一周厚度15 mm、高18mm的围墙结构。上法兰围墙结构外，有宽度为157.5 mm、厚度15 mm的环形圆盘结构，其上方均布8条宽度30 mm、高度17mm加强筋。环形圆盘下方，两筋之间贴着外圆周均布高为5 mm的75 mm \times 42 mm接地块。环形圆盘的外圆周中间位置有宽5.5 mm、深5 mm的矩形密封槽。

表1 铸件技术要求
Tab. 1 The technical requirements of the casting

材质	热处理	外观要求	水压试验	气密性试验
ZL101A	T6	不允许有裂纹、气孔、夹渣、缩孔、缩松、变形等铸造缺陷	破坏水压 2.4 MPa 例行水压 0.96 MPa	SF6 0.48 MPa 保持4 h

采用原工艺制备2件铸件，加强筋根部均出现缩孔缩松（缺陷已返修），如图3所示。对铸件检漏，筒身多处出现漏气，进行着色探伤检查，结果如图4所示。筒身内腔出现片状的红色区域，说明这些位置存在大面积缩孔、缩松缺陷。最终，两铸件均报废。

3 原工艺仿真分析

采用AnyCasting仿真软件开展铸造工艺分析。原工艺三维模型网格划分网格数约570万，参数设置见

表2 浇注工艺参数
Tab. 2 The pouring process parameters

铸件材料	铝液温度/℃	QT500-7冷铁温度/℃	树脂砂型、芯温度/℃
ZL101A	690	25	25

表3 浇注压力参数
Tab. 3 The pouring pressure parameters

项目	压力/ $\times 10\text{Pa}$	时间/s
升液阶段	2 300	25
充型阶段	5 300	55
结壳阶段	5 300	56
增压阶段	9 300	59
保压阶段	9 300	859

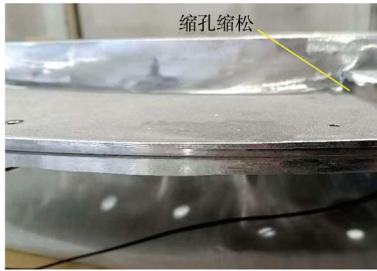


图3 缩孔缩松缺陷

Fig. 3 The shrinkage cavity and porosity defects

表2和表3。铸件与冷铁接触接触部分设定换热系数为 $1\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，铸件、冷铁与砂型的接触部分换热系数都设为 $500\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，其余参数均采用 AnsCasting 软件数据库中自带参数。

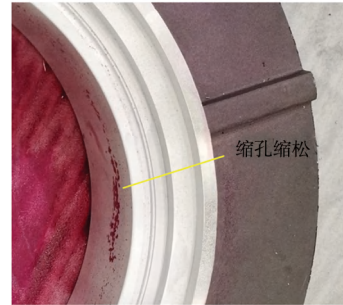


图4 着色探伤情况

Fig. 4 The dye penetrant inspection situation

原工艺仿真结果如图5所示。由图5(a)可知，铸件充型至98%时，顶部环形圆盘刚完成充型，环形圆盘顶面最低温度约为 $620\ \text{℃}$ ，高于铝液液相线温度，因此，不会出现因充型铝温偏低产生的渣孔等问题。由图5(b)、图5(c)知，铸件凝固约96 s时，顶部环形圆盘加强筋根部出现一周孤立液相，进一步凝固会产生缩孔缩松缺陷；凝固约131 s时，铸件只有筒身未凝固，出现一周孤立液相（内浇道与筒身已断开），进一步凝固会产生缩孔缩松缺陷。

图5(d)显示，铸件顶部环形圆盘8个加强筋根部以及筒身出现缩孔缩松缺陷的概率较大。由于铸件检漏对上下法兰进行密封，8个加强筋根部缺陷在密封区域之外，因此，原工艺出现的铸件漏气主要由于筒身缩孔缩松缺陷造成。

4 工艺改进

由原工艺仿真结果可知，上法兰作为铝液向加

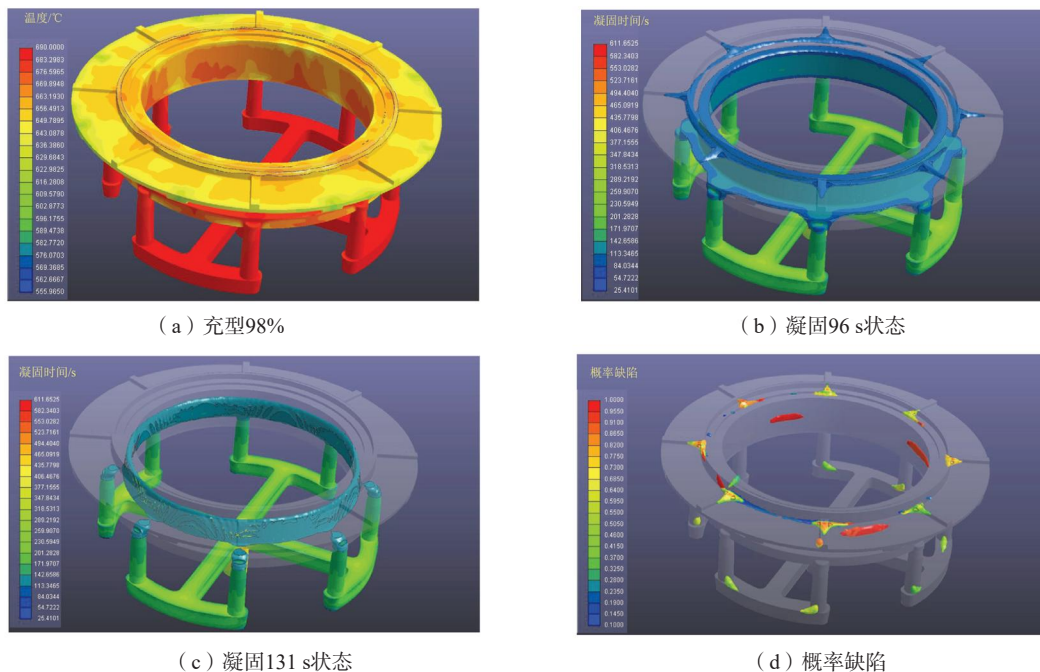


图5 原工艺仿真结果

Fig. 5 The simulation results of the original process

强筋根部的补缩通道以及底法兰作为内浇道向筒身补缩的通道，较早凝固，导致环形圆盘加强筋根部以及筒身出现孤立液相区，进而产生缩孔缩松缺陷。为避免这一问题，改进方案1如图6所示。浇注系统采取直浇道垂直连接8个均布的 $\Phi 60$ mm内浇道，内浇道与底法兰面内径相切，与铸件内腔相连，保证对法兰补缩的同时，对内腔补缩距离更近，能更好补缩筒身。为防止热处理变形，由铸件底法兰向圆盘边缘设置斜拉筋，热处理后清除。为减小底法兰面冷铁激冷对内浇道向筒身补缩的影响，底法兰面冷铁做出缺口，让开内浇口位置。为保证上法兰作为铝液向加强筋根部的补缩通道，后于环形圆盘凝固，对环形圆盘背面外缘附近一周增加厚度20 mm冷铁，对拉筋增加厚度25 mm冷铁（促进环形圆盘较早凝固），同时，上法兰内圈冷铁减薄为20 mm（使内圈更晚凝固），外圈冷铁加厚为30 mm（抑制环形圆盘加强筋根部热节）。其余参数同原工艺。

改进工艺仿真结果如图7所示。由图7（a）可知，

铸件充型至98%时，顶部环形圆盘刚完成充型，环形圆盘顶面最低温度约为630 ℃，高于铝液液相线温度，因此，不会出现因充型铝温偏低产生的渣孔等问题。由图7（b）-（d）知，铸件凝固约73 s时，上法兰端面围墙结构下方未凝固区域较宽，内法兰台阶下方未凝固区域较窄，形成筒壁向较宽未凝固区域补缩瓶颈；铸件凝固约84 s时，上法兰已基本凝固，环形圆盘根部未完全凝固，出现一周孤立液相，进一步凝固会产生缩孔缩松缺陷；铸件凝固约196 s时，铸件8个内浇口根部未凝固，内浇道中间即将完全凝固，不能对浇口位置补缩，进一步凝固浇口根部会产生缩孔缩松缺陷。

改进工艺1环形圆盘根部出现孤立液相，主要由于环形圆盘根部凝固晚于上法兰凝固，与环形圆盘凝固慢、上法兰台阶结构根部较早凝固阻断补缩通道有关。为加快环形圆盘更早凝固，同时，减缓上法兰台阶结构根部凝固，工艺改进2如图8所示。将铸件毛坯上法兰内侧台阶采取斜面形式（增加该位置补缩通道截面积），对上法兰斜面与平面冷铁减薄为



图6 工艺改进1
Fig. 6 The process improvement one

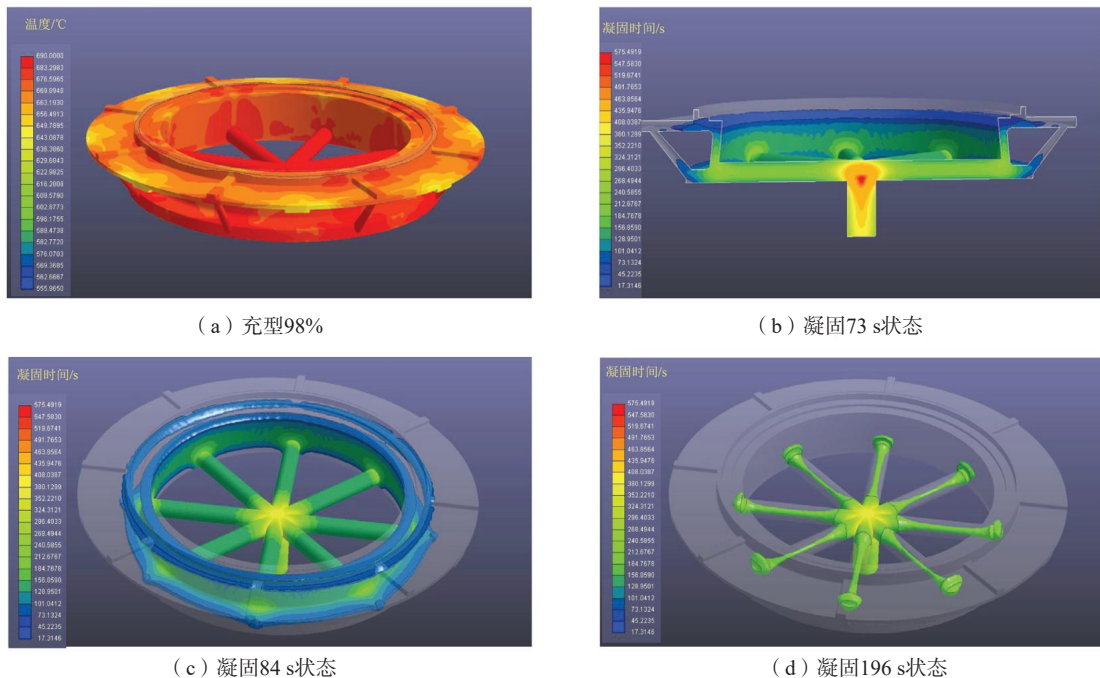


图7 改进工艺1仿真结果
Fig. 7 The simulation results of the process improvement one

15 mm (使上法兰进一步晚凝固), 对法兰外一周围墙结构放置厚20 mm冷铁 (用于减小环形圆盘根部热节)。同时, 将环形圆盘背面外径附近一周冷铁厚度加厚至25 mm, 宽度加宽一倍至92 mm (进一步促进环形圆盘最先凝固)。针对内浇口根部出现孤立液相, 将内浇道更换为直径70 mm (进一步使内浇道中间凝固更迟, 更好补缩内浇口位置), 取消底法兰冷铁缺口 (减小该处热节), 同时, 在内浇口位置增加补

贴 (防止底法兰冷铁激冷影响内浇口对筒身的补缩)。

改进工艺2仿真结果见图9。由图9 (a) 和 (b) 可知, 铸件凝固约159 s时, 环形圆盘即将完全凝固, 上法兰补缩通道连通较好, 进一步凝固不会产生缩孔缩松缺陷; 铸件凝固约400 s时, 铸件筒身即将完全凝固, 铸件8个内浇口连通较好, 进一步凝固筒身不会产生缩孔缩松缺陷。图9 (c) 显示, 概率缺陷分布在浇道与斜拉筋上, 铸件没有缩孔缩松缺陷。

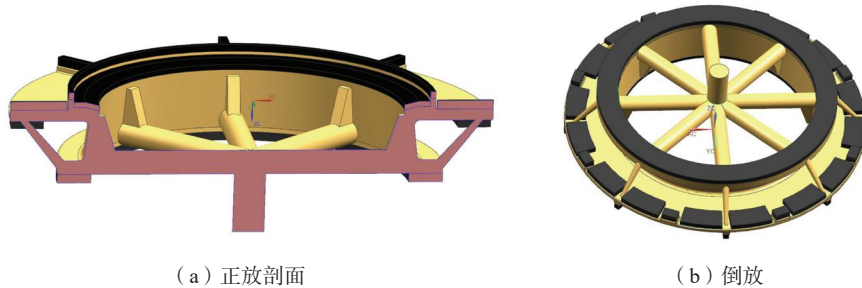


图8 改进工艺2

Fig. 8 The process improvement two

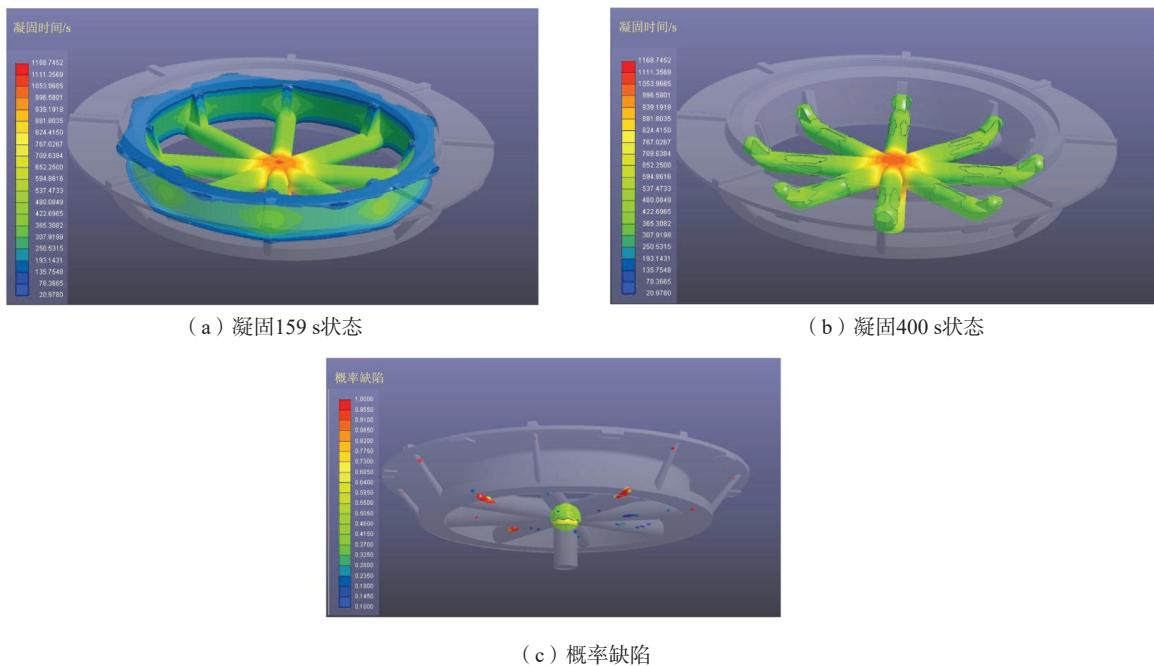


图9 改进工艺2仿真结果

Fig. 9 The simulation results of the process improvement two

5 生产验证

对原工艺模具, 按照工艺改进2进行返修。原工艺模具浇注系统保留直浇道部分, 去掉横浇道与内浇道, 制作了8个拉筋, 这样砂型造型相比原工艺少造200 mm高度砂型一层。对原工艺模具芯盒制作了8个带补贴的内浇道。模具返修后, 铸件浇注系统相比原工艺减重约12 kg, 铸件工艺出品率由原来的约66%提高至约71%, 开展1件铸件试制。成品情况如图10所示, 外观良好 (拉筋根部没有缩孔缩松), 着色结果显示

铸件内腔无明显点状和块状红色, 加工、着色探伤和检漏均合格。已生产超过30件, 工艺稳定。

6 结论

(1) 仿真结果表明, 原工艺上法兰作为铝液向加强筋根部的补缩通道以及底法兰作为内浇道向筒身补缩的通道, 较早凝固, 导致环形圆盘加强筋根部以及筒身出现孤立液相区, 进而产生缩孔缩松缺陷。筒身缩孔缩松缺陷导致铸件漏气。

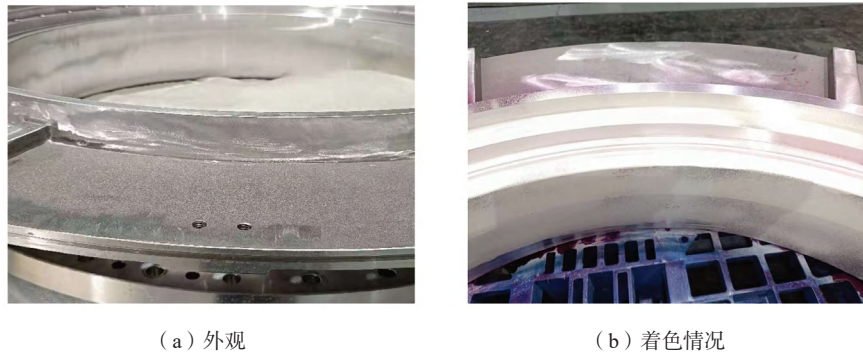


图10 成品情况
Fig. 10 The finished product

(2) 改进工艺1: 直浇道垂直连接8个均布的 $\Phi 60$ mm内浇道, 内浇道与底法兰面内径相切, 与铸件内腔相连; 对铸件底法兰向圆盘边缘通斜拉筋, T6热处理后进行清理; 底法兰面冷铁做出缺口, 让开内浇口位置; 对环形圆盘背面外径附近一周增加厚度20 mm冷铁, 对加强筋增加厚度25 mm冷铁, 上法兰内圈冷铁减薄为20 mm, 外圈冷铁加厚为30 mm。仿真结果表明, 铸件凝固过程中, 顶部环形圆盘加强筋根部出现一周孤立液相, 与环形圆盘凝固慢, 以及上法兰台阶结构根部较早凝固, 补缩通道阻断有关; 铸件8个内浇口根部出现孤立液相区, 与内浇口根部缺少冷却, 热

节增大以及内浇道较细有关。

(3) 改进工艺2: 将铸件毛坯上法兰内侧台阶采取斜面形式; 对上法兰斜面与平面冷铁减薄为15 mm, 对法兰外一周围墙结构放置厚20 mm冷铁, 同时, 将环形圆盘背面外径附近一周冷铁厚度加厚至25 mm, 宽度加宽一倍; 将8个内浇道直径加粗至70 mm, 取消底法兰冷铁缺口, 在内浇口位置增加补贴。仿真结果表明, 上法兰与内浇口附近补缩通道良好, 能够实现顺序凝固, 铸件没有缩孔缩松缺陷。

(4) 采用改进工艺2试制1件铸件, 加工、着色探伤和检漏全部合格。已生产超过30件, 工艺稳定。

参考文献:

- [1] 杨勇, 叶瑞, 王洪川. 气体绝缘封闭金属开关设备与气体绝缘输电线路应力分类及其校核标准比较 [J]. 电气技术, 2020, 21(12): 96-100.
- [2] 段辉, 颜廷利, 王伟, 等. 一起110kV GIS电流互感器气室内部分发热故障分析 [J]. 山东电力技术, 2019, 46(7): 78-80.
- [3] 刘振亚. 全球能源互联网 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [4] 史春玲, 刘刚, 苏戈, 等. 基于有限元分析共箱隔离开关壳体设计 [J]. 铸造技术, 2020, 41(12): 1153-1155.
- [5] 黄晓艳, 刘波. 轻合金是武器装备轻量化的首选金属材料 [J]. 轻合金加工技术, 2007, 35(1): 12-15.
- [6] 张华炜, 刘悦, 范同祥. 铸造耐热铝合金的研究进展及展望 [J]. 材料导报, 2022, 36(2): 153-161.
- [7] 陈瑞, 许庆彦, 郭会廷, 等. Al-7Si-Mg铸造铝合金凝固和热处理过程微观组织模拟和屈服强度预测 [J]. 稀有金属, 2017, 41(8): 837-849.
- [8] 郭朝纶, 张垒, 马志强, 等. GIS用铸造隔离开关壳体强度分析研究 [J]. 机械设计与制造工程, 2023, 52(4): 77-80.
- [9] 谢宗喜, 叶建锋, 史亚琨, 等. 气体绝缘封闭组合开关壳体泄漏原因 [J]. 理化检验-物理分册, 2025, 61(12): 77-81.
- [10] 赵丽娟. 铝合金高压开关壳体铸造针孔形成原因及解决措施 [J]. 铸造, 2019, 68(5): 516-518.
- [11] 游寿松, 张吉祥, 张科峰, 等. 铸造CAE模拟分析低压铸造泵轮缩松缺陷 [J]. 铸造, 2020, 69(2): 183-186.
- [12] 李红强, 朱广, 李沛根, 等. 仿真分析辅助GIS用低压铸造盖板铸件工艺设计 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(1): 136-140.
- [13] 李红强. 特高压GIS用壳体砂型浇注及冷却系统的改进 [J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(2): 313-316.
- [14] 张洪仁, 吴华峰. 高压开关用耐压铝合金壳体低压铸造工艺改进 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 24(2): 180-182.
- [15] 王亮, 刘中令. 铝合金变速箱壳体低压铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2025, 74(2): 203-210.
- [16] 冯超唐, 栢纪旭, 辉铝. 合金柱塞油泵壳体铸造缺陷分析及优化改进 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(10): 1428-1430.
- [17] 李红强. 低压铸造GIS用壳体凝固仿真分析与工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(6): 591-593.
- [18] 计鑫, 刘立君, 贾志欣, 等. 电机壳体压铸工艺数值模拟及厚壁缺陷预测 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(5): 708-712.
- [19] 张双槽, 许广涛, 周志杰, 等. 某铝合金铸件树脂砂型铸造工艺设计及优化 [J]. 热加工工艺, 2020, 49(11): 60-63.
- [20] 马聪, 杨梦馨, 程强, 等. 某箱体的铸造工艺缺陷分析与优化设计 [J]. 铸造, 2023, 72(5): 582-587.
- [21] 李红强, 石红利, 尹珍珍. 充型凝固仿真辅助GIS连接壳体工艺设计 [J]. 铸造设备与工艺, 2018(6): 28-32.