

仿真分析辅助 GIS 铝合金支持缸铸造工艺设计

李红强, 朱 广, 李沛根, 李文静

(西安西开精密铸造有限责任公司, 陕西西安 712046)

摘要: GIS铝合金支持缸铸件设计采用直浇道充型的站立式金属型低压铸造工艺, 无横浇道, 工艺出品率高, 并采用AnyCasting铸造模拟软件仿真分析辅助工艺优化。仿真结果表明, 初步设计工艺法兰附近凸起及法兰与加强筋相交位置存在铸造缺陷, 筒口端没有缺陷。对一半凸起采取风冷铜镶块, 不影响补缩的情况下, 抑制热节, 消除了该处缺陷。将暗冒口变更为环形暗冒口, 补缩距离变小, 法兰缺陷明显减小; 进一步对环形暗冒口增加砂套, 冒口凝固时间延长23 s, 缺陷消除。

关键词: GIS; 铝合金; 支持缸铸件; 工艺设计; 仿真分析

在轻金属材料中, 铝合金具有比强度和比刚度高、塑性好、易于成形和成本较低等优点, 是轻合金中应用最广、用量最多的金属^[1]。铝合金支持缸铸件是气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)的支撑零件, 属于铝合金II类铸件(承受中等载荷, 用于重要部位, 铸件损坏将影响部件的正常工作, 造成事故的铸件^[2]), 用量较大, 适合采用金属型铸造工艺生产。ZL101A是铝合金铸件的常用材料, 其合金相主要有 α -Al基体、共晶Si、强化相 Mg_2Si 、铁基化合物, 易出现缩孔、缩松和夹杂等缺陷^[3]。

技术人员以往凭借试制结果与经验进行工艺优化, 这样导致产品的开发周期往往较长、开发成本较高^[4]。铸造CAE技术是利用计算机技术来优化和改善传统的铸造技术, 对新产品方案的成本管理优化和工艺设计改善、缩短试制周期、提高铸件质量有着重要的作用^[5]。本文采用AnyCasting铸造模拟软件辅助铝合金支持缸金属型低压铸造工艺设计。

1 铸件基本要求与结构

本文研究的支持缸零件, 筒体外径92 mm, 壁厚10 mm, 铸件基本要求见表1。零件总体结构为筒体连接法兰中间剖开结构, 三维图见图1。铸件剖开宽度16 mm, 剖开位置两边表面沿轴线各有一条拉筋(未剖开前, 拉筋宽度28 mm), 两条拉筋上下位置都有一对带对穿孔的凸起, 凸起尺寸约为24 mm×16 mm×26 mm。筒口端20 mm范围内, 外径约为105 mm, 筒口端7 mm范围内, 内径约为70 mm, 端面有4个螺纹孔, 外径开始变大位置垂直剖开缺口 $\pm 90^\circ$ 各有一处加强筋(尺寸约30 mm×

作者简介:

李红强(1986-), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向铝合金铸造工艺设计与仿真分析。E-mail: 631265516@qq.com

中图分类号: TG146.2;
TG292

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2025)
02-0263-06

收稿日期:

2024-03-25 收到初稿,
2024-05-29 收到修订稿。

表1 铸件基本要求

Tab. 1 The basic demands of the castings

材质	热处理	基本尺寸/mm	质量/kg	外观要求	力学性能
ZL101A	T6	$\Phi 175 \times 264$	3	不允许有裂纹、气孔、夹渣、冷隔、缩孔缩松等铸造缺陷	硬度 $HB \geq 80$ 随炉试棒: $\sigma_b \geq 295$ MPa, $\delta \geq 3\%$



图1 支持缸三维图

Fig. 1 The three-dimensional drawing of the support vat

15 mm × 20 mm)；法兰外径175 mm，厚度约20 mm，有4个直孔，法兰背面垂直剖开缺口 ± 90° 各有一处加强筋（尺寸约60 mm × 15 mm × 20 mm）。

2 铸造工艺与模具

2.1 铸造工艺

对支持缸铸件的直孔、螺纹孔、中间剖开结构，毛坯采取铸实，后续通过机加工形成。为保证铸件筒口与法兰端热节充分补缩，零件水平放置金属型工艺需要设置相应内浇道与厚大横浇道，工艺出品率较低。采用站立式工艺，直浇道尺寸 $\Phi 90$ mm × 100 mm，起模斜度3°，设置在筒口端（法兰朝上铸件内腔加工量少），由直浇道来充型。同时直浇道对筒口附近凸起及与两个加强筋补缩，法兰附近凸起、法兰、法兰与加强筋相交处的铸造热节，在凸起上方法兰面设置暗冒口加石棉保温套（隔绝冒口与模具接触，延缓冒口的凝固速度，增加冒口补缩时间）来补缩，初步设计工艺如图2。采用直浇道+冒口站立式工艺，没有横浇道，工艺出品率明显提高，工艺出品率约61%。

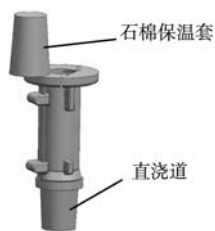
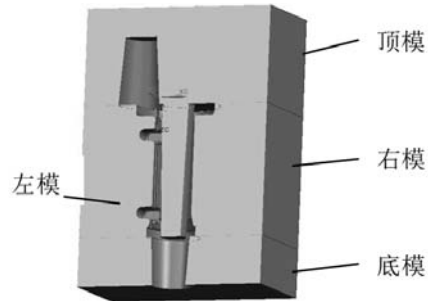


图2 初步设计工艺

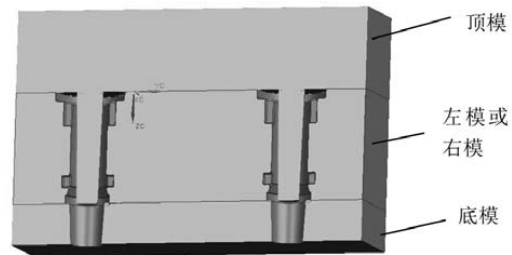
Fig. 2 The preliminary design process

2.2 模具

为提高生产效率，初步设计工艺模具采用一模两件形式，如图3。由图3（a）知，由法兰面及筒口端面作为垂直方向分型面，型腔都在模具中间部分，以筒体的轴线垂直于凸起的面为模具中间部分左右分型面，型腔中两个凸起都在左模，冒口在顶模，型腔内



(a) 剖面图一



(b) 剖面图二

图3 初步设计工艺模具结构

Fig. 3 The mold structure of the preliminary design process

部伸入的铁芯与顶模为一个整体。型腔中凸起都放置在左模，便于进一步工艺改进。由图3（b）知，模具具有两个型腔。

3 仿真分析与工艺优化

对初步设计工艺模型划分均匀网格数约500万。模拟采用ZL101A铝合金材料、QT500-7模具材料、模具铜镶块CuCr1材料的热物理性能参数均为AnyCasting软件材料数据库参数，主要模拟参数见表2。低压铸造压力参数见表3。

3.1 初步设计工艺仿真分析

初步设计工艺仿真结果见图4。由图4（a）可知，法兰充满时，法兰温度627 °C以上，高于液相线温度，不会出现因铝温低造成的冷隔等缺陷。由图4（b）、4（c）可知，铸件凝固49 s时，法兰与加强筋相交位置以及法兰附近的凸起即将出现孤立液相区；凝固78 s时，筒口附近的凸起与加强筋已凝固，直浇道附近液相通道良好。图4（d）显示铸造缺陷分布在法兰附近凸起、法兰与加强筋相交位置。

法兰附近凸起出现孤立液相，说明冒口通过拉筋不足以补缩凸起位置热节；法兰与加强筋相交位置出现孤立液相，说明冒口通过法兰不足以补缩相交位置热节；直浇道附近无孤立液相，说明直浇道能够充分补缩筒口附近热节。因此，法兰附件凸起及法兰与加

表2 主要模拟参数
Tab. 2 The main simulation parameters

铸件材料	模具材料	铜镶块	浇注温度 /°C	初始温度/°C		
				模具	铁芯	铜镶块
ZL101A	QT500-7	CuCr1	700	300	330	200

表3 压力参数
Tab. 3 The pressure parameters

阶段	充型阶段	增压阶段	保压阶段	泄压阶段
压力/Pa	12 000	52 000	52 000	0
时间/s	10	13	313	314

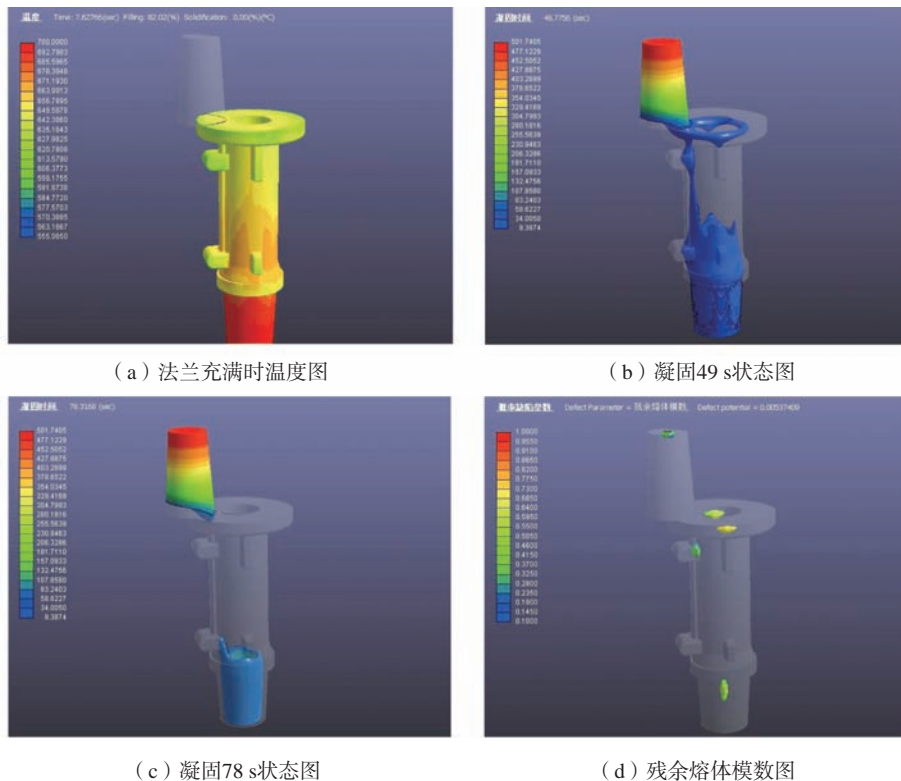


图4 初步设计工艺 仿真结果

Fig. 4 The simulation results of the preliminary design process

强筋相交位置出现铸造缺陷，筒口附近无缺陷。

形暗冒口，减小补缩距离，消除热节。

3.2 优化工艺与仿真分析

初步设计工艺仿真分析出现的问题，分两步开展工艺优化：第一步，由于不便进一步加大对法兰附近凸起补缩，则采取减小该处热节，对法兰附近凸起采用风冷铜镶块抑制热节；第二步，在第一步改进的基础上，保持对法兰附近凸起补缩情况下，同时较好补缩 $\pm 90^\circ$ 法兰与加强筋相交位置，这样对法兰面采用环

3.2.1 采用风冷铜镶块

铜镶块采取包裹凸起一半的形式镶入模具，优化工艺1见图5。镶块背面与大气接触，背面盲孔插入风管，风冷控制镶块初始温度。此种方式无明显影响拉筋补缩通道的情况下，抑制该处热节。仿真结果见图6。由图6 (a) 可知，法兰充满时，法兰温度 627°C 以上，高于液相线温度，不会出现因铝温低造成的冷隔等缺

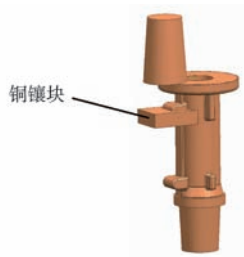


图5 优化工艺1

Fig. 5 The optimizing process 1

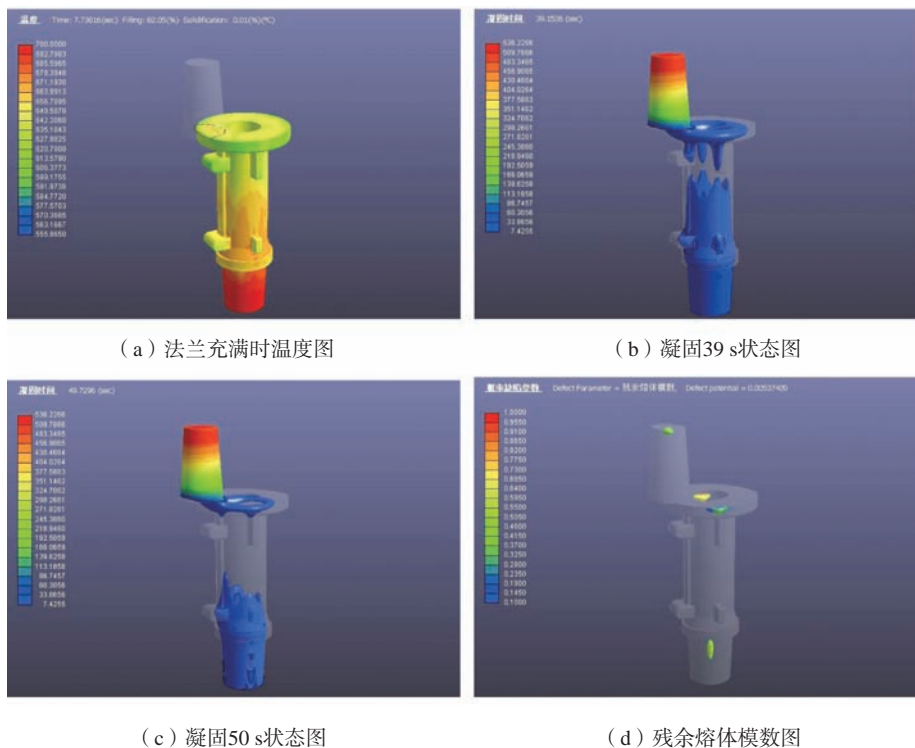
陷。由图6 (b)、图6 (c) 知, 铸件凝固39 s时, 法兰附近凸起底部开始凝固, 凝固50 s时, 法兰附近凸起完全凝固, 没有出现孤立液相。图6 (d) 显示法兰附近凸

起位置缺陷消除。

与初步设计工艺仿真结果相比, 优化工艺1充型温度与其相近, 表明铜镶块对充型温度影响很小; 法兰附近凸起凝固明显加快, 孤立液相消除, 说明对凸起一半采用风冷铜镶块, 明显加快凸起位置局部冷却, 不影响拉筋补缩的情况下, 较好地抑制了该处热节, 缺陷消除。

3.2.2 采用环形暗冒口

在优化工艺1基础上, 以及在工艺出品率61%不变的情况下, 优化工艺2将带石棉保温套暗冒口变更为环形暗冒口, 见图7。此时, 为使铸件顺利脱模, 上模与左右模分型面则调整为冒口顶部。



(a) 法兰充满时温度图

(b) 凝固39 s状态图

(c) 凝固50 s状态图

(d) 残余熔体模数图

图6 优化工艺1仿真结果

Fig. 6 The simulation results of the optimizing process 1

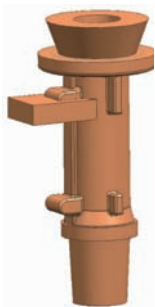


图7 优化工艺2

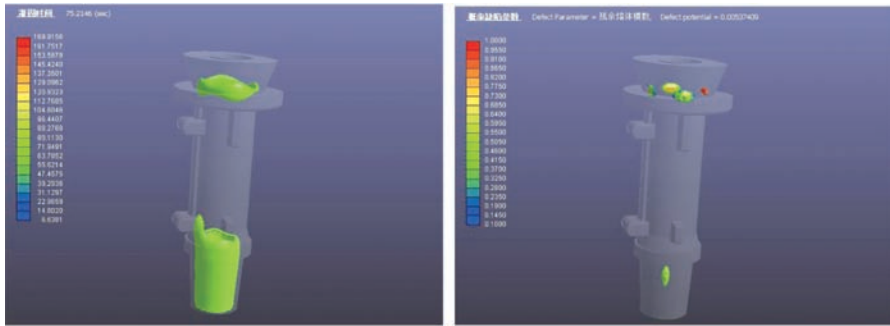
Fig. 7 The optimizing process 2

优化工艺2仿真结果见图8。由图8 (a) 可知, 铸件凝固75 s时, 环形冒口与法兰相交位置孤立液相小部分在铸件法兰, 大部分在冒口内。图8 (b) 显示4处缩孔、缩松缺陷小部分属于法兰, 大部分在冒口内。

优化工艺3对优化工艺2环形冒口外侧增加了砂套, 见图9, 仿真结果见图10。

由图10 (a) 可知, 铸件凝固至98 s时, 法兰已完全凝固, 环形冒口未完全凝固, 孤立液相区在环形冒口内。图10 (b) 显示铸件缩孔、缩松缺陷消除。

与优化工艺1仿真结果相比, 优化工艺2采用环形暗冒口, 法兰缺陷明显减小; 与优化工艺2相比, 优化工



(a) 凝固75 s状态图

(b) 残余熔体模数图

图8 优化设计工艺2仿真结果

Fig. 8 The simulation results of the optimizing design process 2

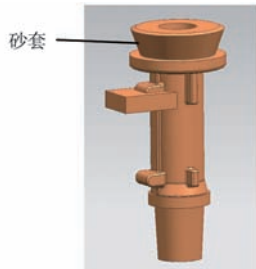


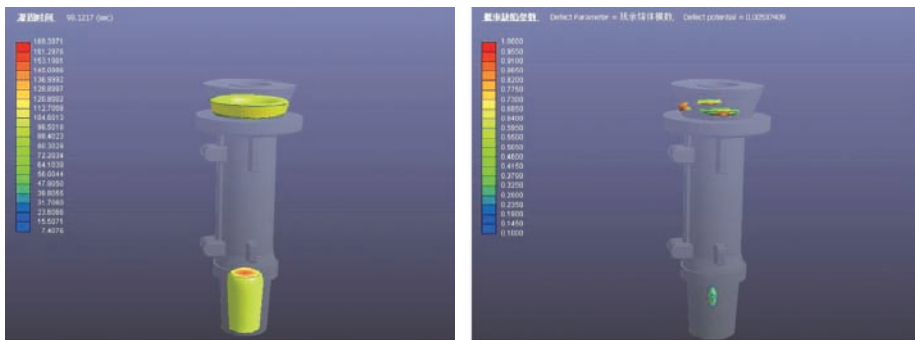
图9 优化工艺3

Fig. 9 The optimizing design 3

艺3环形暗冒口采用砂套，冒口的凝固时间延长了23 s，凝固更慢，补缩效果更好，从而消除了缺陷。

4 生产验证

按照最终工艺制作金属模具，开展试制与批量投产。首批试制20件，全部合格。已生产数量大于200件。支持缸零件实物见图11。铸件合格率大于97%。



(a) 凝固98 s状态图

(b) 残余熔体模数图

图10 优化设计工艺3仿真结果

Fig. 10 The simulation results of the optimizing design 3



图11 支持缸零件实物

Fig. 11 The physical parts of the support vat

5 结论

(1) 支持缸铸件初步设计站式工艺，由直浇道充型及对筒口附近热节补缩，由暗冒口对远离筒口位置热节补缩，无横浇道，工艺出品率高。为提高生产效率，模具设计为一模两件，凸起放置在半模，便于工艺改进。仿真结果表明：法兰附近凸起位置及法兰与加强筋相交位置出现孤立液相并产生铸造缺陷，筒口附近无缺陷。

(2) 优化工艺1对一半凸起采用风冷铜镶块减小热节，仿真结果表明：铜镶块对充型温度影响很小，

加快凸起位置局部冷却,不影响拉筋补缩的情况下,较好地抑制热节,该处缺陷消除。

(3) 优化工艺2在优化工艺1基础上,采用环形暗冒口,保持对法兰附近凸起补缩,同时减小 $\pm 90^\circ$ 法兰与加强筋相交位置补缩距离,仿真结果表明法兰缺陷

明显减小;优化工艺3对环形暗冒口采用砂套,冒口的凝固时间延长了23 s,孤立液相全部引入暗冒口,缺陷消除。

(4) 按照最终工艺,已生产支持缸超过200件。合格率大于97%。

参考文献:

- [1] 陈延伟,刘佳琳,赵亚鹏.铸造铝合金在舰船装备应用中存在的问题及发展趋势[J].铸造,2020,69(4):329-334.
- [2] 全国铸造标准化技术委员会.GB/T 9438—2013铝合金铸件[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [3] 马广辉,李润霞,段林.铸造缺陷对ZL101合金断裂行为的影响[J].铸造,2018,67(2):162-166.
- [4] 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.
- [5] 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.

Simulation Analysis Assist the Casting Process Design of the GIS Aluminum Alloy Support Vat

LI Hong-qiang, ZHU Guang, LI Pei-gen, LI Wen-jing
(Xi'an XIKAI Precision Foundry Co., Ltd., Xian 712046, Shaanxi, China)

Abstract:

The vertical metal mold low pressure casting process with sprue filling was designed for GIS aluminum alloy support vat castings, and the yield rate was high without runner. AnyCasting casting simulation software was used to simulate and analyze the auxiliary process optimization. The simulation results indicated that there were casting defects at the protrusion near the flange and the intersections of the flange and reinforcing ribs, and there was no defect at the end of the sleeve. Wind cooling the copper inlay block was applied to half of the protrusion to suppress hot spot without affecting filling and eliminate defect in that area. The blind riser was changed to the annular blind riser, the feeding distance became smaller, and the flange defect was obviously reduced. Furthermore, a sand sleeve was added to the annular blind riser, and the riser solidification time was extended by 23 s, and the defects were eliminated.

Key words:

GIS; aluminum alloy; support vat casting; process design; simulation analysis