

铝合金缸体低压铸造数值模拟与工艺改进

邓伟¹ 王晨晖¹ 雷基林² 邓晰文¹ 付秋³ 陈洪³ 王飞龙¹

(1. 昆明理工大学云南省内燃机重点实验室, 昆明 650500; 2. 云南交通运输职业学院, 昆明 650500; 3. 成都桐林铸造实业有限公司, 成都 610500)

摘要 为提高低压铸造 ZL114A 铝合金缸体的成形质量, 使用 ProCAST 软件对该铸件的充型与凝固过程进行数值模拟, 系统分析了温度场分布、固相率变化以及缩松与缩孔缺陷的形成情况。基于仿真结果, 对铸件轴承座部位力学性能弱化的趋势进行预测与验证。通过优化浇注系统和调整工艺方案, 有效抑制了缺陷的产生, 并显著增强了轴承座区域的力学性能。优化后铸件的凝固速率提升了 9.37%, 缩松与缩孔缺陷体积减少了 71.5%。经实际生产验证, 铸件成形质量良好, 关键部位力学性能优异, 其抗拉强度达到 312 MPa, 超过国标要求。结果表明, 该优化工艺方案切实可行, 为同类复杂结构铸件的生产提供技术参考。

关键词 ZL114A 铝合金; 缸体; 低压铸造; ProCAST; 力学性能

中图分类号 TG146.21; TG249.2

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250336

Numerical Simulation and Process Optimization of Low-pressure Die Casting for Aluminum Alloy Cylinder Blocks

DENG Wei¹, WANG Chenhui¹, LEI Jilin², DENG Xiwen¹, FU Qiu³, CHEN Hong³, WANG Feilong¹

(1. Yunnan Key Laboratory of Internal Combustion Engines, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500; 2. Yunnan Vocational College of Transportation, Kunming 650500; 3. Chengdu Tonglin Foundry Industrial Co., Ltd., Chengdu 610500)

Abstract: To enhance the forming quality of low-pressure casting ZL114A aluminum alloy cylinder blocks, the filling and solidification processes were numerically simulated using ProCAST software to investigate the temperature field distribution, solid fraction variation, and formation of shrinkage porosities and cavities. Relying on simulation results, the tendency of mechanical property degradation in the bearing seat area was predicted and validated. After optimizing the gating system and adjusting process parameters, defect formation was effectively suppressed, and the mechanical performance of the bearing seat region was significantly improved. The solidification rate of optimized casting is increased by 9.37%, while shrinkage defects are reduced by 71.5%. Practical production confirms excellent forming quality and superior mechanical properties in critical areas, where tensile strength reaches 312 MPa, exceeding the standard requirement. The results indicate the feasibility of optimized scheme, providing valuable reference for production of similar complex structural castings.

Key Words: ZL114A Aluminum Alloy, Cylinder Block, Low-pressure Casting, ProCAST, Mechanical Properties

在全球化石能源储量骤减与“双碳”目标双重约束下, 开发高燃油效率、低排放的动力系统已成为汽车产业可持续发展的必然要求。发动机作为汽车动力系统的核心组件, 其轻量化是实现整车能耗优化的关键技术路径。铸造铝合金凭借其显著的低密度特性, 在实现发动机缸体轻量化方面具有明显优势, 因此, 采用铝合金替代传统铸铁材料已成为行业发展的趋势。同时

其优秀的综合力学性能, 包括高强度、高韧度、优异的抗疲劳特性, 以及突出的服役稳定性, 使其成为满足缸体极端工况需求的理想材料^[1-5]。近年来, 随着材料科学和制造技术的进步, 铝合金在发动机缸体中的应用已很普遍。然而, 如何进一步优化其铸造工艺以满足复杂工况下的性能需求仍是当前研究的重点。因此, 对铝合金缸体铸造工艺的研究不仅有助于推动发动机

收稿日期: 2025-08-28; 修订日期: 2025-11-19

基金项目: 云南省科技厅重大科技专项计划资助项目(202402AG050009, 202302AC080002)

第一作者: 邓伟, 男, 1976 年出生, 高级工程师, E-mail: 1323364897@qq.com

通信作者: 雷基林, 男, 1977 年出生, 教授, E-mail: lejilin@kmust.edu.cn

引用格式: 邓伟, 王晨晖, 雷基林, 等. 铝合金缸体低压铸造数值模拟与工艺改进[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(10): 1503-1510.

DENG W, WANG C H, LEI J L, et al. Numerical simulation and process optimization of low-pressure die casting for aluminum alloy cylinder blocks[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(10): 1503-1510.

轻量化技术的升级,还对实现汽车行业的碳中和目标具有积极意义。

ZL114A 合金是在 ZL101A 合金基础上进行镁含量的优化设计(Mg 质量分数提升至 0.45%~0.60%)而研发的 Al-Si-Mg 系铸造铝合金,具有高比强度与低密度特性,已成为实现高承载-轻量化协同优化的关键材料。本研究以 ZL114A 铸造铝合金缸体为对象,基于其结构特征与服役工况需求,采用 ProCAST 软件对铝合金缸体低压铸造过程中的充型、凝固行为进行分析,并预测可能产生的缩孔、缩松缺陷位置及其成因,重点揭示缸体轴承座关键部位力学性能弱化的根本诱因。随后,根据仿真结果提出改变浇道和增设冷铁的优化方案,旨在为同类型复杂结构铸件的实际生产提供参考。

1 初始工艺分析

1.1 几何模型概况

ZL114A 铝合金发动机缸体的三维模型见图 1。

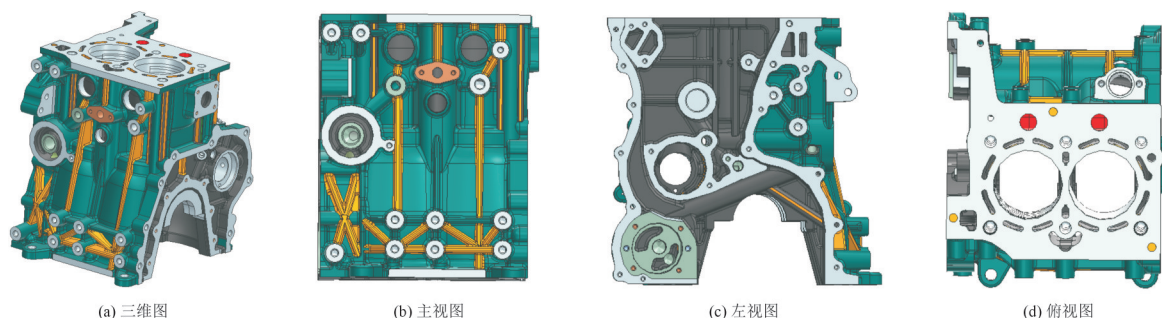


图 1 铝合金缸体三维结构模型

Fig.1 Three-dimensional structure model of aluminum alloy engine block

1.2 合金成分优化

ZL114A 合金具有良好的铸造性能、较高的强度和硬度,以及较好的气密性和耐蚀性。ZL114A 铝合金的化学成分遵照 GB/T 1173-2013,见表 1。

表 1 ZL114A 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZL114A aluminum alloy %

w_B						
Si	Mg	Ti	Be	Fe	Cu	Al
6.5~7.5	0.45~0.75	0.10~0.20	0~0.07	≤ 0.2	≤ 0.1	余量

Si 的质量分数一般控制在 6.5%~7.5%,能降低合金熔点,提高合金的流动性,使合金在铸造过程中更易填充复杂的缸体模具型腔,利于铸造出形状复杂、薄壁的缸体铸件。但 Si 含量较高时,铸件的抗拉强度和屈服强度虽获得显著提升,伸长率却会降低,使铸件韧性变差^[6-7]。

Mg 的质量分数一般控制在 0.45%~0.60%,能与

ZL114A 铝合金发动机缸体轮廓尺寸为 252 mm×317 mm×304 mm,质量约为 12.15 kg。该铸件属于大型复杂结构件,几何形状复杂,壁厚分布不均,最大壁厚达 39 mm,最小壁厚则不足 4 mm,铸件上部设计有两个圆孔作为气缸筒,为活塞运动提供空间,实现发动机的动力输出。缸体上还分布着各种安装孔和油道、水道孔,安装孔用于固定缸盖等零部件,确保发动机结构的稳固;油道负责将润滑油输送到各运动部件,起到润滑、减摩和散热作用;水道则是冷却液的通道,通过冷却液循环实现发动机的有效散热。下部结构用于安装曲轴等部件,保证曲轴的稳定运转。整体设计需兼顾强度、轻量化与散热及润滑等功能需求。根据 GB/T 9438-2013 对铸件表面质量的要求,铸件表面不允许有冷隔、裂纹、缩孔、穿透性缺陷及严重的残缺类缺陷(如浇不足、机械损伤等)。由于柴油机铝合金缸体需在复杂工况下承受高负荷运行且结构完整性直接影响整机安全性能,故该类铸件被归为 I 类铸件。

Si 形成 Mg_2Si 相,在合金热处理过程中产生时效强化,有效提高合金的强度和硬度。适量添加 Mg 元素可在不明显改变铸件抗拉强度的前提下,显著提升其屈服强度,但会降低伸长率^[8-11]。

Fe 的质量分数一般控制在 0.10%~0.20%,在可控范围内能提升合金强度,但其含量过高易形成脆性相,损害合金的韧性和塑性,导致铸件在使用中易发生脆断等问题^[12-13]。综上,优化后的 ZL114A 合金的化学成分见表 2。

表 2 优化 ZL114A 铝合金的化学成分

Tab.2 Chemical composition of optimized ZL114A aluminum alloy %

w_B						
Si	Mg	Ti	Be	Fe	Cu	Al
7	0.5	0.15	0.05	0.1	0.1	余量

1.3 合金热物性参数与模拟参数设置

通过 ProCAST 软件自带的合金系统的热力学数

数据库输入 ZALSi7Mg1A (ZL114A) 材料体系, 利用 JMatPro 多物理场耦合计算引擎生成该材料的合金热物性参数, 见表 3。

表 3 ZL114A 合金的热物性参数

Tab.3 Thermophysical properties of ZL114A aluminum alloy

液相线 温度/℃	固相线 温度/℃	密度 (612.5℃)/ (kg·m ⁻³)	导热系数 (612.5℃)/ (W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	热焓 (612.5℃)/ (kJ·kg ⁻¹)
612.5	554.4	2 531.5	91.2	1 123.4

初始冷却方式为室温 (20℃) 自然冷却, 采用呋喃树脂砂低压铸造。在 ProCAST 软件中, 考虑到浇注系统和铸件与模具为不同材料且温度会发生非线性变化, 所以浇注系统和铸件与模具之间的界面传热类型为 COINC, 浇注系统与铸件为同一材料, 所以浇注系统与铸件之间的界面传热类型为 EQUIV^[14]。铸件与模具存在两类热交换界面^[15]: 铸件-模具接触界面[传热系数为 1 000 W/(m²·℃)]与模具-环境暴露界面[传热系数为 20 W/(m²·℃)], 前者主导凝固过程热传导, 后者影响模具温场稳定性。此外, 结合相关研究^[16-19]和生产经验, 得出金属液与铸型之间传热系数为 2 000 W/(m²·℃), 金属液与砂芯之间的传热系数为 1 500 W/(m²·℃), 铸型与砂芯之间的传热系数为 1 000 W/(m²·℃)。

1.4 浇注系统设计

浇注系统设计基于铝合金缸体铸件的结构特征与低压铸造工艺参数要求, 采用从铸件底部充型的结构方案, 运用 Catia 三维建模软件构建封闭底注式浇注系统。由表 3 可知铸件材料的液相线温度为 612.5℃。由相关生产经验可知, 浇注温度通常要高于液相线温度 100~150℃, 所以合金浇注温度设为 725℃, 低压铸造下铝合金液的浇注时间计算公式为^[20]:

$$t = \frac{H}{v} = \frac{H}{(2.0 \sim 4.2)/b} \quad (1)$$

式中, t 为浇注时间, s; v 为铸件型腔液面上升速度, cm/s; H 为铸件的高度, cm; b 为铸件平均壁厚, cm; 2.0~4.2 为低压铸造铝合金经验系数, 薄壁件选取偏大值, 厚壁件选取偏小值, 本研究取 3.0。

通过式 (1) 计算可得浇注时间约为 14 s。低压铸造浇注系统的关键设计要素是内浇道布局及其截面积, 铸件的内浇道截面积的计算如下^[21]:

$$F_{\text{内}} = \frac{m}{\rho v_0 t} \quad (2)$$

式中, $F_{\text{内}}$ 为内浇口的截面积, cm²; m 为铸件质量, g; ρ 为合金液密度, g/cm³; v_0 为内浇口出口处合金液线速度, cm/s。铸件的质量为 12 150 g, v 取 13 cm/s, 密度 ρ 为 2.7 g/cm³, 浇注时间 t 为 14 s, 计算得到内浇道截面积为

24.7 cm²。采取封闭式浇注系统, 其浇注系统横截面积比为 $F_{\text{内}}:F_{\text{横}}:F_{\text{直}}=1:1.5:2$, 由此得到横浇道截面积为 37.1 cm², 直浇道截面积为 49.4 cm²。根据计算得到的浇注系统示意图见图 2, 内浇道设置在缸体和油底壳的相交处, 在铸件的壁厚处也设置了内浇道, 在形状复杂的壁厚处相应地设置冷铁, 顶部设计了溢流槽和排气通道。金属液通过底部中央主浇道的大截面设计向上平稳填充, 避免了传统顶注式充型时的湍流和喷溅, 这种底注封闭式浇注系统能使金属液平稳上升, 建立自下而上的定向凝固策略, 减少湍流和卷气, 连接多个分支进入型腔, 确保充型速度均匀^[22-23]。顶部冒口设计既收集杂质, 又能在凝固后期持续补缩。冒口体积约占铸件的 12%, 符合铝合金的补缩需求。

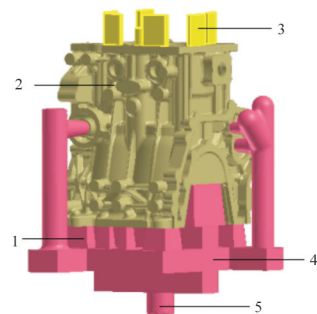


图 2 铝合金缸体浇注系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of gating system for aluminum alloy engine block

1. 内浇道 2. 铸件 3. 冒口 4. 横浇道 5. 直浇道

2 初始方案模拟分析

2.1 充型凝固过程模拟结果分析

图 3 为铝合金缸体充型过程温度场模拟, 基于 Pro-CAST 的 Viewcast 模块分析铸件三维温度场的分布特征。可以看出, 初始浇注温度为 725℃, 液相线温度为 612.5℃。从图 3a 可知, 在 5.72 s 时, 金属液沿着直浇道流经侧浇道, 金属液在型腔内缓慢上升确保气体有效排出, 此阶段, 缸体外壳温度已经超过液相线温度, 金属液仍保持液态, 无凝固风险。从图 3b 可知, 在 9.31 s 时出现了紊流现象, 此时铸件侧壁处温度接近液相线温度, 金属液流动性下降, 易导致卷气、冷隔等缺陷。从图 3c 可知, 当充型时间达到 13.97 s 时, 铸件已经充满, 模拟时间符合设置的充型时间, 但充型尚未结束, 至 14.47 s 时完成铸件顶部冒口的充型, 见图 3d。通过模拟过程可以看出铸件全过程充型较为平稳, 无局部提前凝固现象, 验证了金属液可完整填充复杂型腔。充型结束后, 金属液开始冷却凝固, 凝固初期, 型腔内金属液与周围材料温度差异大, 热传递速度快, 随着铸

件逐渐凝固,温度变化变缓。然而,由于轴承座型壁比其他部分更厚,金属液在部分区域的流动速度减慢,使得

其他部分的金属液无法及时补入,最终降低了整个充型的效率。

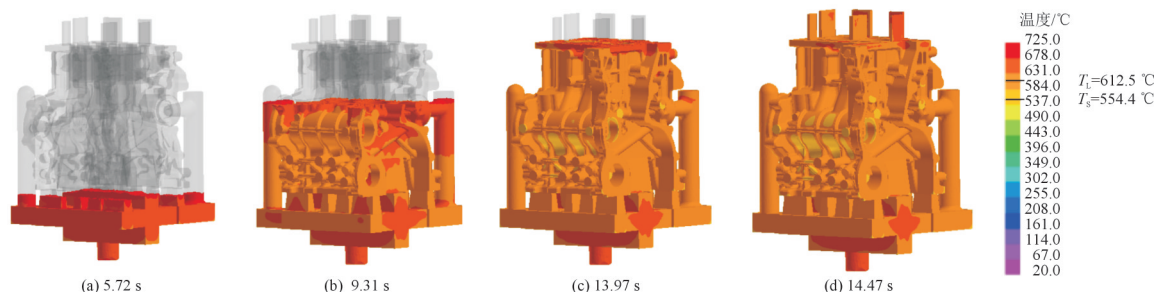


图3 铝合金缸体充型过程温度场模拟图

Fig.3 Temperature field distribution of aluminum alloy engine block during filling process

2.2 凝固过程固相率模拟结果分析

浇注系统的凝固过程固相率见图4。从图4a可知,当凝固时间为22.76 s时,铸件表层区域已经凝固,随着凝固进行,铸件表面温度逐渐降低。从图4b可知,在35.50 s时由于铸件的侧壁处传热面积较大,冷却速率快,会先于铸件其他部位凝固。从图4c可知,在57.47 s时铸件的大部分区域已完成凝固,缸体的轴承座处最后凝固。轴承座是缸体中承担载荷的关键部位,其几何结构往往复杂多变,且通常属于壁厚相对较大的区

域。这种结构在铸件凝固时散热慢,易形成局部热节,会使该区域的液态金属最后冷却凝固。从图4d可知,当96.52 s时,铸件已经完全凝固。在铸造过程中,缩松和缩孔缺陷主要产生于最后完成凝固的区域,特别是在凝固路径上产生的孤立熔池或存在显著温度差的区域,所以铸件轴承座部位极易出现缩松缩孔缺陷。考虑到轴承座部位(几何厚度为40~50 mm)与相邻薄壁区(几何厚度为6~8 mm)形成显著的热传递差异,这会导致轴承座部位的二次枝晶臂间距较大,降低铸件的力学性能。

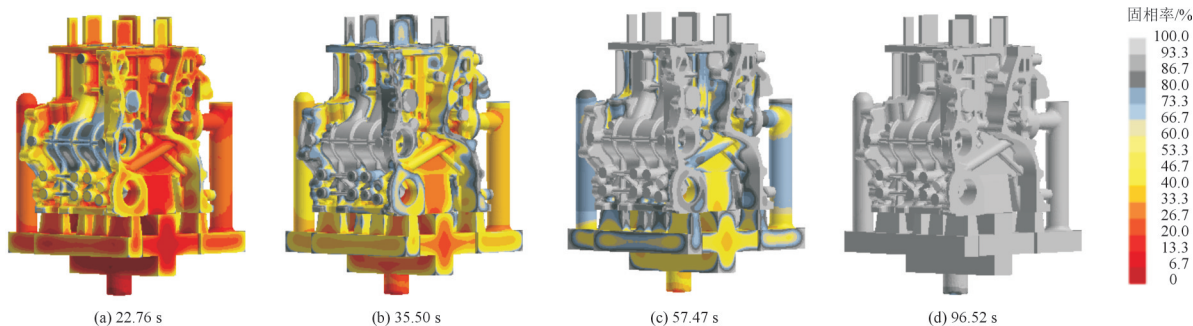


图4 铝合金缸体凝固过程固相率模拟图

Fig.4 Solid fraction simulation for aluminum alloy engine block during solidification process

2.3 铸件缩松、缩孔缺陷分析

铸件产生缩松缩孔缺陷主要是缩机构设计缺陷导致补缩延迟所致。ProCAST软件有多种方法可以计算铸件的缩松和缩孔缺陷,通常采用Niyama判据进行判断^[24-27]:

$$G = \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$R = \left| \frac{T_L - T_S}{t_L - t_S} \right| \quad (4)$$

式中, G 为判断区域局部温度梯度; R 为冷却速率; T_L 为液相线温度; T_S 为固相线温度; t_L 为达到液相线温度时间; t_S 为达固相线温度时间。

判据条件为:

$$G/\sqrt{R} \leq C_{Niyama} \quad (5)$$

式中, C_{Niyama} 为临界值,不同的合金成分具有不同的判据临界值,与铸件尺寸形状无关,ZL114A合金的临界值一般为0.8~1.0。ProCAST基于合金固液相线界定凝固温度区间,根据温度场数据计算凝固判断区域局部温度梯度(G)和冷却速率(R),最后计算出凝固区域各节点的临界值,即Niyama判据值。通过与预设临界值对比,可判断缩松、缩孔生成风险区域。

图5为铸件凝固后收缩率>5%的缺陷空间分布情况。可以看出,铸件的缩松、缩孔缺陷主要集中在厚薄壁交界处(几何过渡位置<3 mm)和轴承座部位(几何厚度为40~50 mm)。厚薄壁交界处因为冷却速度快,

补缩通道提前凝固,易形成孤立液相区,从而产生缩松缩孔缺陷。轴承座部位因其结构决定的厚大热节特性,易在凝固后期形成孤立熔池。由图4c可知,当铸件凝固时间为57.47 s时,铸件其他位置已经凝固,但轴承座位置仍未开始凝固,金属液得不到有效补充,孤立熔池内的金属液在凝固时必然发生体积收缩。然而,由于与浇冒系统的连接通道已被凝固金属阻隔,外部的液态金属无法流入来填补收缩留下的空隙。这些内部空洞缺陷直接形成应力集中点,大幅恶化金属的连续性,使该部位成为缸体的强度薄弱点,降低了缸体的整体质量和服役寿命。

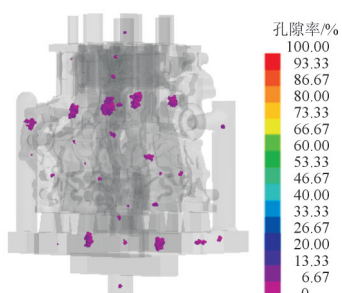
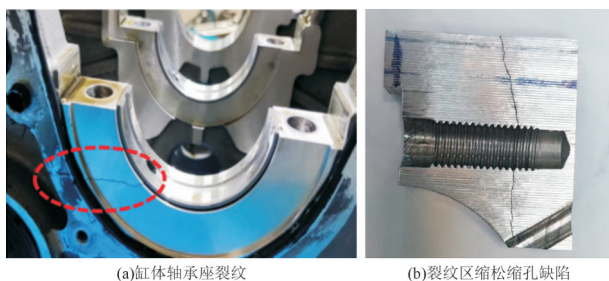


图5 铸件缩松缩孔缺陷分布情况

Fig.5 Distribution of shrinkage porosities and cavities in castings

2.4 凝固后期缺陷分析

图6为铝合金缸体实物的缺陷图。可以看出,缸体轴承座处出现裂纹,轴承座区域因热节效应成为凝固末端,其孤立液相区补缩中断导致缩松缩孔形成,此现象与模拟结果高度一致,充分体现了冷速差异对特定区域的影响显著。为了提升铸件的质量和可靠性,优化该高风险区域的冷却及补缩系统设计至关重要。



(a)缸体轴承座裂纹 (b)裂纹区缩松缩孔缺陷

图6 铝合金缸体实物缺陷图

Fig.6 Defect distribution in aluminum alloy engine block

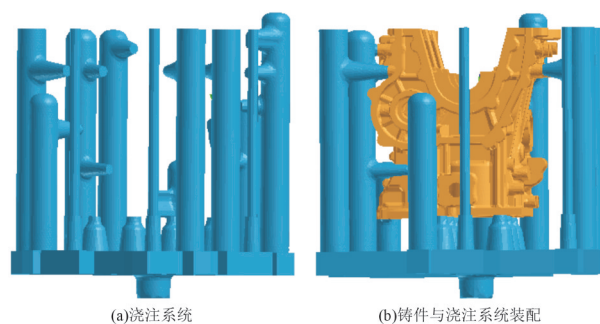
3 铸造工艺改进

模拟分析表明,初始方案存在以下问题:①铸件薄壁交界处及轴承座部位因凝固补缩受阻,成为缩松、缩孔缺陷的高发区域。②轴承座与相邻薄壁区间显著的热传递差异,导致其二次枝晶臂间距较大,降低了铸件的力学性能。为改善上述缺陷,将从浇注系统和工

艺方案等方面进行优化。

3.1 浇注系统优化

模拟可知,缸体铸件在轴承座处的缺陷比较明显,因此在原有工艺路线上改为浇道与缸体轴承座直接连接,将铸件倒置进行浇注,将厚大区域的缸体轴承座置于顶部,便于通过冒口进行补缩,形成轴向散热通道。内浇道除设置在缸体与气缸盖结合处,还设置在铸件壁厚处,并在铸件顶部设计相应的溢流槽和排气通道。进水处由轴承座位置改为缸盖螺栓孔。铸件凝固过程中,可能会存在较大的液体和气体收缩,需依托合理的溢流-排气系统协同补偿。图7为优化后的浇注系统示意图。



(a)浇注系统 (b)铸件与浇注系统装配

图7 优化后的浇注系统示意图

Fig.7 Schematic diagram of optimized gating system

3.2 工艺方案优化

模拟结果表明,初始浇注工艺方案难以实现符合顺序凝固原则的温度场分布,进而引发缩松、缩孔缺陷。为改善凝固过程中的补缩条件,对工艺方案进行针对性优化。首先在轴承座部位顶部设置50 mm×65 mm的定向补缩冒口,确保厚大部位金属液连续补缩,消除孤立熔池,避免热节产生并收集熔体前沿的氧化物和夹杂。其次,在轴承座侧面及侧壁处布置冷铁激冷,冷铁的核心作用是快速移走热量,消除热节,建立理想的凝固顺序。冒口冷却布置见图8。本次设计目标是将厚大热节(轴承座)的冷却速率提升到与

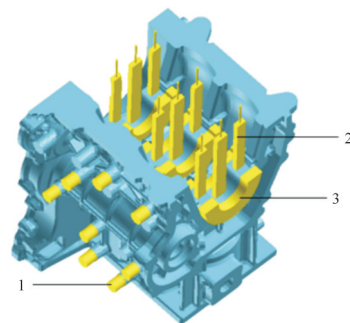


图8 冒口、冷铁布置

Fig.8 Arrangement of risers and chills

1.侧壁部位冷铁 2.冒口 3.轴座部位冷铁

薄壁区域相当的水平,从而实现定向凝固,通过提升局部冷却速率实现二次枝晶臂间距细化,进而强化该部位的力学性能^[28]。为实现铸件的顺序凝固并消除热节,本方案采用复合激冷措施,即在轴承座侧面模具型腔内壁布设矩形外冷铁(50 mm×80 mm×70 mm),以主动调控热场,建立自下而上的定向凝固条件。在侧壁处预埋圆柱形低碳钢内冷铁($\phi 16$ mm×50 mm),利用其高导热特性形成局部微冷区,显著提升厚大部位的凝固速率。

3.3 优化方案模拟结果分析

图9为优化后铸件充型过程及温度场变化。从图

9a可见,6.67 s时底注式内浇道区域已完成充型,其余部位处于初始充型阶段,金属液流动平稳且无飞溅。图9b证实充型过程呈层流推进状态,无紊流现象。当14.01 s时金属液完全充型,模拟时间与预设的充型时间基本一致,见图9c。

优化后的铸件凝固过程固相率见图10。从图10b可以看出,由于浇道与缸体轴承座直接连接且在轴承座处增设冷铁,所以轴承座处最先凝固,实现二次枝晶臂间距细化,显著提升了该部位的力学性能。从图10c可以看出,优化后的铸件凝固速率较之前有所提高,87.48 s时铸件固相率已经达到100%,速率提高了9.37%。

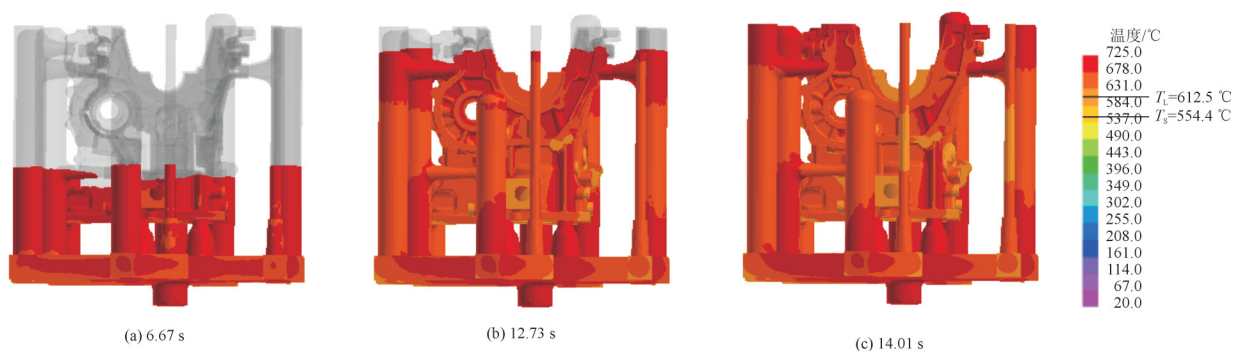


图9 优化后充型过程及温度场变化

Fig.9 Filling process and temperature field evolution after optimization

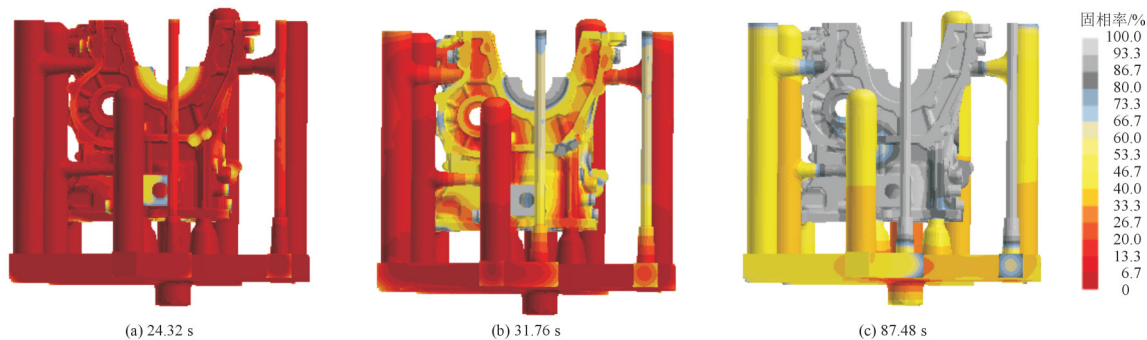


图10 优化后凝固过程固相率

Fig.10 Solid fraction during solidification after optimization

优化后铸件缩松缩孔分布见图11。由Niyama判

据可知,此时铸件缩松、缩孔问题显著改善,缩松缩孔

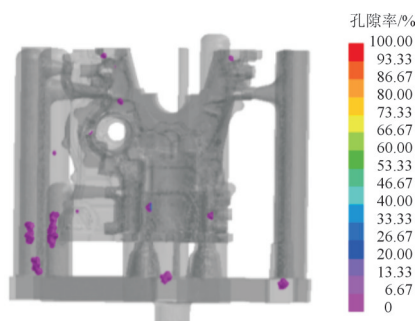


图11 优化后铸件缩松缩孔分布

Fig.11 Distribution of shrinkages and cavities in castings after optimization

4 生产验证

图12为采用优化后的发动机缸体铸件实物图。可以看出,铸件外观完整且棱角清晰,其外围、缸孔与轴承座等部位均无表面冷隔、裂纹、缩孔、穿透性缺陷或显著残缺,满足GB/T 9438-2013对铸件表面质量的规范。图13为拉伸试棒取样位置示意图。对铸件进行T6热处理,T6热处理工艺参数见表4。试验过程中使用GNT-300Y拉伸试验机,拉伸速率为0.015 mm/min。

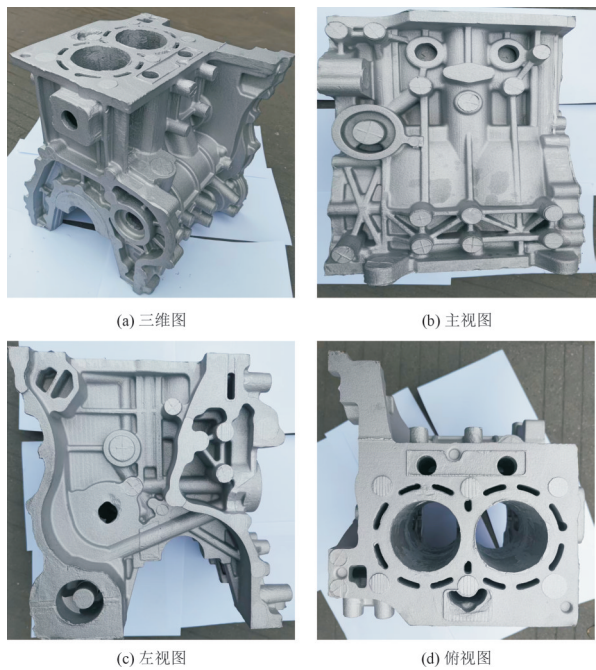


图 12 发动机缸体铸件实物
Fig.12 Products of engine block casting

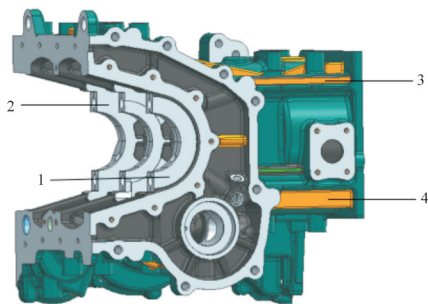


图 13 铸件拉伸试样取样位置图
Fig.13 Sampling position of tensile specimen for castings

表 4 热处理工艺参数

Tab.4 Heat treatment process parameters

热处理工艺	温度/℃	时间/h	冷却介质及温度
固溶	520	2	60℃水
固溶	540	10	60℃水
时效	170	8	空气

在 180℃分别对取样的 4 个试棒(3 和 4 在盖螺栓孔部位取样,1 和 2 在缸轴承座部位取样)进行拉伸试验,结果见表 5。可以看出,抗拉强度均值为 312 MPa、屈服强度均值为 285 MPa,伸长率均值为 3.6%。符合 GB/T 1173-2013 标准(要求抗拉强度 ≥ 290 MPa,伸长

表 5 力学性能测试结果

Tab.5 Mechanical property test results

试样	抗拉强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
1	306	283	2.1
2	287	266	2.8
3	330	328	5.0
4	324	261	4.5
平均值	312	285	3.6

率 $\geq 2\%$),满足发动机缸体服役工况要求。

5 结 论

(1)根据铝合金缸体的结构特点,基于 ProCAST 软件模拟铝合金缸体低压铸造过程中的充型、凝固过程。模拟结果显示,该铝合金缸体铸件的缩松、缩孔缺陷主要集中在厚薄壁交界处和轴承座部位。厚薄壁交界处因为冷却速度快,补缩通道提前凝固,易形成孤立液相区,从而产生缩松缩孔缺陷。轴承座部位因壁厚较大,凝固时散热缓慢而形成热节,导致该区域最后凝固,极易产生缩松与缩孔缺陷,尤其出现在孤立液相区或温度梯度显著部位。

(2)通过对初始方案的分析,针对其缺陷进行工艺优化,将浇道与缸体轴承座直接相连,采用铸件倒置浇注方式,并在轴承座顶部设置定向补缩冒口,同时在轴承座侧面与侧壁布置冷铁以增强激冷效果。数值模拟结果表明,优化后的铸件凝固速率提高了 9.37%,缩松、缩孔缺陷体积显著减少了 71.5%。

(3)经生产验证,铸件成形外观完整且棱角清晰,其外围、缸孔与轴承座等部位均无表面冷隔、裂纹、缩孔、穿透性缺陷或显著残缺,抗拉强度均值为 312 MPa、屈服强度均值为 285 MPa,伸长率均值为 3.6%,满足发动机缸体服役工况要求。

参 考 文 献

[1] AROWOSOLA A, GAUSTAD G. Estimating increasing diversity and dissipative loss of critical metals in the aluminum automotive sector[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 150: 104-382.

[2] SAKENDRA K, SATYA P T, UPENDRA R, et al. Properties evaluation of A356 and A319 aluminum alloys under different casting conditions [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 49 (2) : 523-528.

[3] 杨伟,隋育栋,蒋业华,等. 高强韧铸造铝合金的研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(7): 15-21.

[4] 包宇专,雷基林,李维贤,等. 缸盖螺栓连接副结构对柴油机铝合金缸体缸孔变形的影响[J]. 内燃机工程, 2023, 44(3): 114-124.

[5] 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.

[6] YANG K V, ROMETSCH P, DAVIES C H J, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and anisotropy in mechanical properties of A357 alloy produced by selective laser melting[J]. Materials & Design, 2018, 154: 275-290.

[7] MAO G L, YAN H, ZHU C C, et al. The varied mechanisms of yttrium (Y) modifying a hypoeutectic Al-Si alloy under conditions of different cooling rates[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2019, 806: 909-916.

[8] 田晓莹,魏健雄,闫宏,等. 热等静压对低压铸造 WE43 镁合金组织和室温及高温力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2023, 44 (10): 87-95.

- [9] 吴良玉,陈大辉,付玉,等. Cu-Mg-Ag元素对Al-Cu-Mn合金铸造性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(4): 532-535.
- [10] CHIRKOV E F. Laws of fluidity variation for aluminium alloys of Al-Cu-Mg-system [J]. Materials Science Forum, 1996, 217-222: 265-270.
- [11] 张晗,郝启堂,薛彦庆,等. Mg元素含量对Al-Cu-Mn合金时效析出相组成及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(6): 1489-1499.
- [12] 吴桢,陆政,刘闪光,等. 微量Ag对ZL114A铝合金组织和力学性能的影响[J]. 材料工程, 2021, 49(1): 82-88.
- [13] RAGAB K A, BOUAZARA M, CHEN X G. Influence of thermal aging parameters on the characteristics of aluminum semi-solid alloys [J]. Metals, 2018, 8(10): 746.
- [14] 余勃,张学宾,杨冉,等. 基于ProCAST的铜合金舷侧阀体铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(4): 471-476.
- [15] 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.
- [16] 张弓,苏小平. 低压铸造铝合金后副车架工艺设计及优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(4): 621-627.
- [17] 马岚波,税国彦,关洋,等. K4169合金-陶瓷型壳间界面传热系数研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(8): 1048-1052.
- [18] SU X R, SONG Z K, ZHANG Z Q. Interfacial heat transfer coefficient of aluminum alloy in contact solid solution treatment process [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(2): 453-464.
- [19] KONRAD C H, BRUNNER M, KYRGYZBAEV K, et al. Determination of heat transfer coefficient and ceramic mold material parameters for alloy IN738LC investment castings [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(2): 181-186.
- [20] 杨仁康. 减震器筒体金属型铸造过程模拟及工艺优化[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [21] 符继麟,苏小平. 制动器安装底板低压铸造浇注系统设计及工艺参数优化[J]. 热加工工艺, 2020, 49(17): 68-71.
- [22] 党云鹏,曹岩. 基于ProCAST的ZL205A合金弹体传动件铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(2): 162-166.
- [23] 余瑞平,赵拴勃,千斌,等. 铝合金砂型低压铸造浇注系统的选择与设计[J]. 热加工工艺, 2013, 42(5): 41-43.
- [24] 吕云霞. 基于ProCAST软件的大型铸钢件缩孔缩松预测判据及铸造工艺优化[J]. 铸造技术, 2015, 36(11): 2725-2727.
- [25] DIVYA B, VISHESH D, AMIT S. Application of Niyama criterion to predict shrinkage porosity in vertical centrifugal casting of ASTM A356 alloy [J]. International Journal of Process Management and Benchmarking, 2022, 12(3): 395-406.
- [26] ABOOTORABI A, KOROJY B, JABBAREH M A. Effect of mould design on the Niyama criteria during solidification of CH3C80 t ingot [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2020, 47(7): 722-730.
- [27] IGNASZAK Z. Discussion on usability of the Niyama Criterion for porosity predicting in cast iron castings [J]. Archives of Foundry Engineering, 2017, 17(3): 196-204.
- [28] 车家宝,廖敦明,孙飞,等. 铝合金铸件凝固过程二次枝晶臂间距模拟计算[J]. 铸造, 2020, 69(4): 382-387.

(编辑:张正贺)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《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学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、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,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊接、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16开,邮发代号38-109。邮发订价每期20元,全年240元。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

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

