

铝合金连接支架压铸数值模拟及工艺优化

韩伟¹ 卢健能¹ 江丽珍¹ 杨安² 欧俊杰¹

(1. 广州城市理工学院机械工程学院, 广州 501800; 2. 贵州新蓝辉金属制品有限公司, 遵义 563000)

摘要 针对新能源汽车电动机铝合金连接支架壁厚不均匀造成的充型流量不均衡和气孔等压铸缺陷, 分析了支架零件的结构特点和成形品质要求。采用Magma®软件模拟研究支架的充型凝固过程, 根据零件结构特点和后续机加工要求划分零件工艺区域; 研究铝液充型时局部流量不均衡产生的原因并预测气孔、冷隔和缩松等缺陷的产生趋势, 从而优化设计连接支架压铸排溢系统。根据压铸过程的压力与流量关系 $P-Q^2$ 曲线, 改进内浇道的形状和大小, 调整均衡各区域的充型流量和充型压力, 提高铸件内部组织致密度及生产品质。

关键词 连接支架; 数值模拟; 铝合金; 工艺优化; 压铸

中图分类号 TG244; TG249.2; TG146.21

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240099

Numerical Simulation and Process Optimization of Die-casting Aluminum Alloy Connection Bracket

HAN Wei¹, LU Jianneng¹, JIANG Lizhen¹, YANG An², OU Junjie¹

(1. School of Mechanical Engineering, Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 501800; 2. Guizhou Xinlanhui Metal Products Co., Ltd., Zunyi 563000)

Abstract: Aiming at the problems of uneven filling flow and porosity caused by uneven wall thickness of aluminum alloy connecting bracket for new energy automobile motors, the structural characteristics and forming quality requirements of bracket were analyzed. The filling and solidification process was simulated by Magma software, and process area was divided according to the structural characteristics of parts and subsequent machining parts. The causes of local flow imbalance in liquid aluminum filling was investigated and occurrence trend of defects such as pores, cold shut and shrinkage porosity was predicted to optimize exhausting-overflow system of the connection bracket. According to the $P-Q^2$ curves of relationship between pressure and flow during die casting process, the shape and size of the ingate were modified to adjust the filling flow rate and filling pressure of each area, thus improving the internal density and production quality of casting.

Key Words: Connecting Brackets, Numerical Simulation, Aluminum Alloy, Processing Optimization, Die Casting

采用高压铸造工艺生产用于新能源汽车电动机与其他动力元件装配的铝合金连接支架零件。为实现电动机与多种不同形状动力元件连接的功能, 连接支架的内表面设计了许多不均匀的框架和薄壁连接筋条。这种不均匀框架及筋条结构使铝合金压铸时各个部位的充型速度和流量产生不均衡现象, 在零件局部尤其是需要机加工的位置发生气孔、冷隔和浇不足等缺陷, 影响尺寸精度和连接安装功能的实现。采用Magma®软件模拟分析压铸充型和凝固过程, 针对初始工艺设计模拟产生的缩松、气孔等缺陷, 结合铸件

各区域的功能质量要求, 划分零件不同工艺区域, 研究零件充型过程各区域金属液冷却凝固速度和流量差异, 分析压铸充型过程铸件壁厚不均匀造成的充型流量、速度分布不均衡情况, 以及铸件局部盲孔特征造成的气孔缺陷^[1]。通过模拟充型结果、 $P-Q^2$ 压力与流量关系曲线和气压模拟数值, 研究局部浇道的分浇口尺寸和形状设计, 调整优化分浇道的形状及浇口面积, 协调铸件局部的充型流量与充型压力关系, 使铝液充型时流量均衡进入型腔, 并经过模拟验证改善缩松和气孔等缺陷, 以提高铸件组织致密度及生产品质。

收稿日期: 2024-03-14; 修订日期: 2024-04-12

基金项目: 2022年度广东省普通高校特色创新类项目(2022KTSCX182); 广东省教育科学规划课题(高等教育专项)教育厅资助项目(2022GLK388)

第一作者简介: 韩伟, 男, 1963年出生, 正高级实验师, E-mail: 1786891960@qq.com

通信作者: 卢健能, 男, 1985年出生, 实验师, E-mail: 425249334@qq.com

引用格式: 韩伟, 卢健能, 江丽珍, 等. 铝合金连接支架压铸数值模拟及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(5): 718-722.

HAN W, LU J N, JIANG L Z, et al. Numerical simulation and process optimization of die-casting aluminum alloy connection bracket[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(5): 718-722.

1 铝合金连接支架结构和初始压铸工艺

1.1 铝合金连接零件结构分析

图1为连接支架零件3D图及工艺区域划分。材质为A356.2铝合金,具有流动性好、密度小和耐蚀性良好等特点,且在压铸生产时具有热裂倾向低、线收缩小、气密性好等性能。产品质量为2.75 kg,体积为1 013.38 cm³,平均壁厚为3.5 mm,轮廓尺寸为319 mm×209 mm,压铸模具材质为SKA61模具钢。根据支架零件的几何结构,将其分成A、B、C 3个区域。A区域为薄壁的框架连接筋条,B区域为连接其他零件的连接紧固装配部分,压铸后还要进行机加工,因此也是零件尺寸精度和内部组织致密度要求较高的区域;C区域则为壁厚较为均匀的框架部分。A区域最外边的薄壁筋条位置,金属液流量偏少,容易产生喷射、卷气和冷隔缺陷,需要平衡充型压力并合理设置溢流槽。B区域中圆圈标示为后续机加工成型孔,要求铸件内部组织必须致密无气孔。C区域虽然属于相对简单并较快凝固的部分,但由于充型流量和速度的差异,3个区域金属交汇的局部位置容易产生气孔、冷隔和变形等

缺陷,因此需要对压铸充型和凝固过程进行数值模拟,以确定合理的工艺设计方案^[2]。

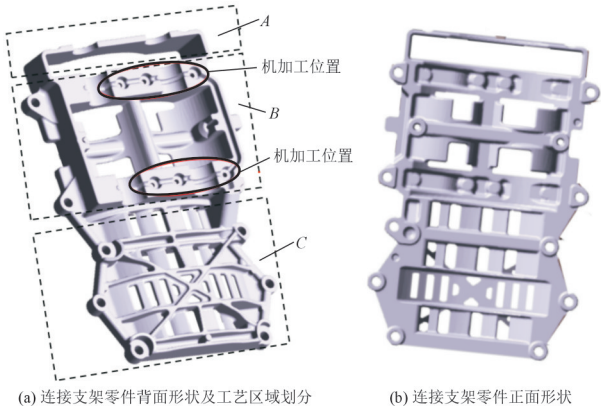


图1 连接支架零件工艺区域划分及3D图

Fig.1 Process area division and 3D diagram of connecting bracket parts

1.2 铝合金支架压铸工艺方案及参数设计

铝合金连接支架压铸初始工艺方案及参数设计首先要保证支架零件各部分的完整充型,以及机加工面的气孔、冷隔和变形等质量问题。根据生产企业的设备情况,选用的压铸机和初始工艺参数见表1。

表1 低压铸造支架数值模拟初始工艺参数

Tab.1 Process parameters of numerical simulation for low pressure casting of bracket

压铸机合模力/kN	压射压力/MPa	压射行程/mm	冲头低速速度/(m·s ⁻¹)	冲头高速速度/(m·s ⁻¹)	冲头直径/mm	型腔填充时间/s	浇口速度/(m·s ⁻¹)	模具初始温度/℃	内浇口截面积/cm ²	浇注温度/℃	最大充型压力/MPa
8 000	65	530	0.2	3.5	50	0.032	56	185	2.0~5.5	660	63.5

根据内浇口位置应使金属液充填型腔流程最短、防止金属液在充填过程中热量损失过多而产生冷隔或流痕等压铸缺陷的基本原则,初始浇注与排溢系统设计见图2。初始工艺中内浇口采用1~6号分浇道同时进料,每个浇道的截面形状尺寸大小接近,目的是使金属液充填均衡平稳,有利于排气和传递静压力。同时

针对连接支架的扁平分散的形状,设置了多个溢流槽。由于支架零件A、B、C 3个区域差异化的结构可能阻碍铝液的均衡充型,充型时几股金属液流交汇处也会因碰撞而产生涡流、卷气,同时壁厚不均匀造成的凝固时序差别也会引起冷隔和变形等缺陷^[2]。因此设计多个溢流槽(见图2b箭头处),期望能稳定金属液的流态,并起到容纳冷污金属液和提高排气效果的作用。其中在A区域的边框薄壁筋条位置增设了一个溢流槽,以避免此位置充填不畅造成的“死角困气”现象。

2 模拟和缺陷预测分析

2.1 支架零件压铸模拟结果及分析

针对连接支架零件的结构特点和质量要求,采用Magma[®]软件对支架压铸充型过程的温度变化、充型速度、气压变化和缩松缺陷预测等进行模拟^[3]。图3为铝液充型的各阶段模拟。通过模拟对比可以看出,支架铸件在凝固过程中各个工艺区域的充型速度和冷却凝固顺序存在着不均衡现象。从图3a可以看出,铝液初

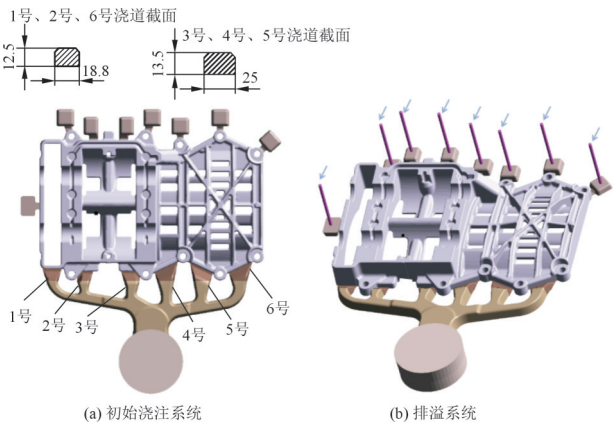


图2 连接支架压铸浇注系统和排溢系统初始设计

Fig.2 Initial design of gating system and overflow system of connecting bracket parts

始填充阶段,采用多个垂直式内浇口同时充型,使铝液与模具间的热传导速度呈现不同步,温度变化速度出现一定差异现象^[4]。

其次,由于零件各区域的壁厚和形状差异造成了填充型腔的金属液体积及充型速度差别较大,充型完成时间不同步,C区域基本充满时,A、B区域部分位置还有接近20%的型腔未充满。从图3c和图3d可以看出,由

于A、B区域的充型进程慢于其他位置,充型速度不均衡会造成铝液交汇形成憋气。同时充型过程各部分区域温度梯度分布十分不均匀,容易产生缩松、缩孔和冷隔缺陷。因此,为了实现铝液充型时保持流量、速度均衡进入型腔,需要针对性增大相应位置的内浇口面积,加大充型流量并加快充型速度,尤其对于零件A、B区域的重点位置,从而降低冷隔缺陷的可能。

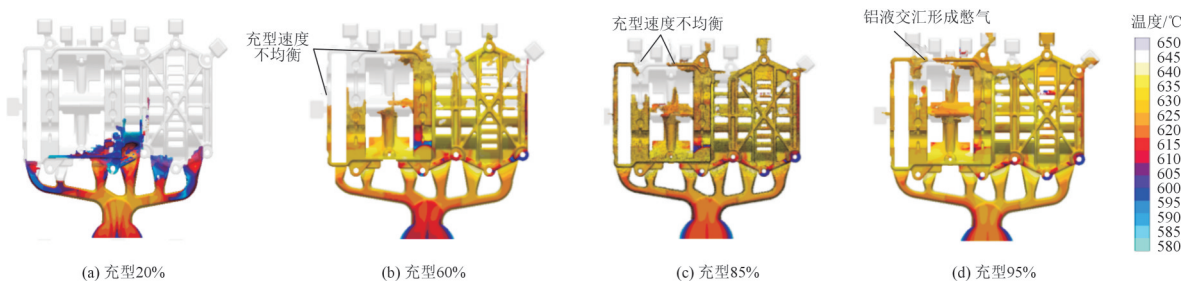


图3 连接支架压铸充型过程温度模拟

Fig.3 Temperature simulation of connecting bracket parts during die-casting filling process

2.2 气压变化模拟和缺陷预测分析

针对零件框架分散结构和后续机加工对铸件凝固致密度要求较高的特点,还进行了充型过程的气压变化模拟和内部缩孔、缩松缺陷预测,见图4。从图4a可以看出,在图1a的A、B区域的相交接处,黑色线框标出气压值较高,铝液流态显示出机加面有裹气,机加工后会有内部气孔出现的可能。同时内浇口位置也有少量铝液裹气,其原因应该是6个内浇口的进料流量和速度不均衡,来自不同内浇口的铝液以不同的速度和温度在铸件的最后填充位置进行交汇时,容易在金属液交汇处形成裹气、层流和流痕等缺陷^[5]。其次在靠近内浇口局部位置的少量铝液裹气还会产生冷料积聚,机加工后也会有发生浇不足和分层缺陷的趋势。

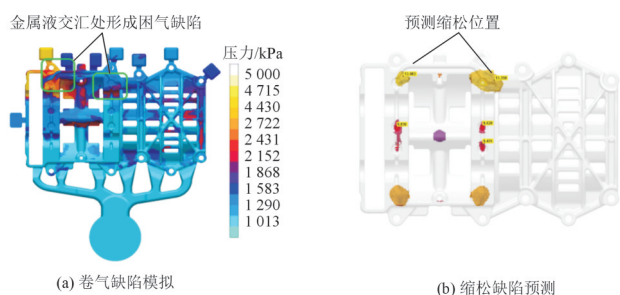


图4 压铸充型时裹气及缩松缺陷预测模拟

Fig.4 Prediction and simulation of air entrapment and shrinkage defects during die-casting filling process

从图4b可以看出,在图1a的B区域的4个边角处有液相孤岛形成热节,凝固后将不会出现缩孔缺陷。这是由于B区域的壁厚偏厚,使得在B区域壁厚不均位置局部容易产生热节区,同时不能有效地从浇注系统得到补缩,容易导致局部凝固组织致密度降低,凝固时发生收缩缺陷和缩孔^[6]。

3 工艺优化方案及模拟验证

3.1 工艺优化改进方案

在连接支架铸件初始的工艺设计中,6个内浇口为截面积相等的均衡结构设计,而支架铸件的A、B和C3个区域的壁厚和结构相差较大,造成3个区域的铝液充型凝固结果产生较大的差异。针对A、B和C3个区域的壁厚差别和凝固质量,设计合理的内浇口,改变各工艺区域充型流量及充型压力不平衡的问题^[6]。图5为优化设计图。为了使1~3号内浇口与另一侧的4~6号内浇口在充型时实现流量、速度的平衡,避免进料较快的内浇口低温铝液进入型腔,形成冷料积聚,将2号内浇口与主浇道相交的直角位置改成圆弧过渡,降低2号内浇口金属液进入型腔时喷流趋势,并加长行程、改大内浇口面积,改成倾斜状进料,以防止负压吸气或裹气。同时,为了降低气孔缺陷产生,在2号和3号内浇口之间增加一个专门的溢流槽进行排气。

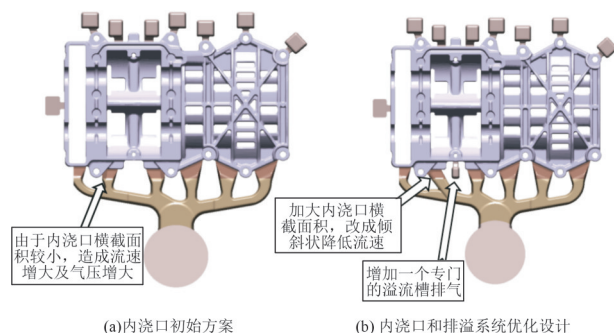


图5 改变内浇口形状后的优化方案图

Fig.5 Diagram of optimized scheme after shape modification of ingate

3.2 充型速度和流量均衡的优化

对于不均匀壁厚的框架结构铝合金支架零件压铸生产,为了在压铸充型的末端维持一定的压力能量,尤其需要浇注系统保持较高的充型压力和充型速度,使进入每个区域铝液具备足够且均衡的充型压力和流量,才能实现支架零件的每个局部都同步充型凝固^[7]。使用下式进行模拟运算充型流量和充型速度:

$$P = \frac{\rho}{2g} \left[\frac{Q}{C_d A_g} \right]^2 \quad (1)$$

式中, Q 为金属液体充型流量; A_g 为内浇口面积; P 为金属液的充型压力值; C_d 为铝合金液体的流量系数; ρ 为金属液密度; g 为重力加速度。

根据设备和内浇口设计方案,生成 $P-Q^2$ 关系曲线^[8],帮助设计者验证充型压力与模具能量关系较为理想的工艺区域,从而检验和判断内浇口的面积大小设计合理性,见图6。

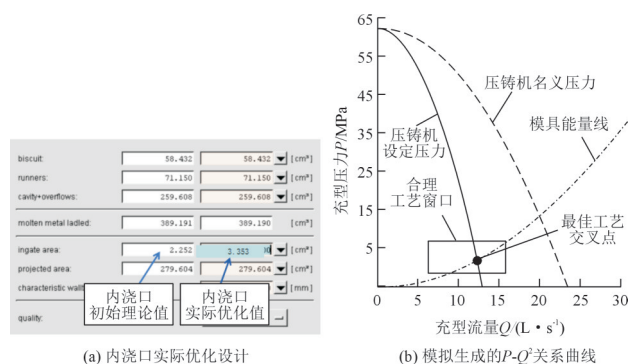


图6 通过 $P-Q^2$ 关系曲线检查内浇口设计的合理性

Fig.6 Rationality inspection of inner gate design by $P-Q^2$ relation curves

从改变2号内浇口的面积之后产生的 $P-Q^2$ 关系曲线图中看出,当2号内浇口面积从初始理论值设计的 2.35 cm^2 增大为 3.35 cm^2 时,模拟产生的 $P-Q^2$ 关系工艺曲线在最佳区域内,证明改变2号内浇口面积的优化方案可行。同时,根据 $P-Q^2$ 关系曲线图,对初始工艺的最大充型压力、型腔填充时间和模具初始温度等参数进行相应的调整和优化,见表2。

表2 初始工艺与优化方案参数对比表

Tab.2 Parameter comparison of primary and optimized scheme

方案	模具初始温度/℃	型腔填充时间/s	内浇口截面积/cm ²	最大充型压力/MPa
初始方案	180	0.031	2.35	62.5
优化方案	190	0.035	3.35	64.6

为了验证铸件的每个区域是否获得均衡的充型压力和流量,再次运用软件模拟进行优化后的模拟验证。

3.3 优化方案的缺陷改进模拟对比

对优化后的方案进行充型过程压力和凝固温度模

拟分析,得出了优化后零件压铸过程液相到固相的压力、温度对比仿真变化曲线,见图7。从优化前后的金属液充型末端交汇处的气压模拟对比看出,初始的设计气压值高,达到 $3\,557.979 \text{ kPa}$,而优化后的气压值降低为 $2\,302.127 \text{ kPa}$,这说明在此金属液交汇位置的包气趋势风险大幅降低。

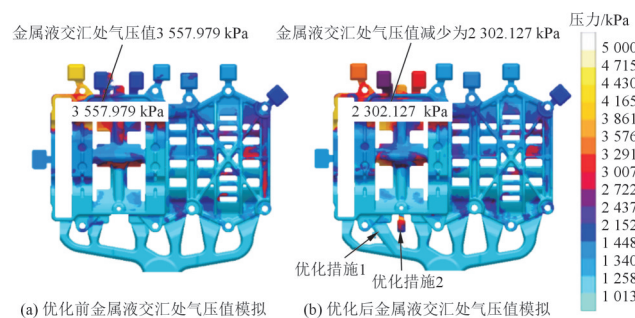


图7 充型过程气压优化对比模拟图

Fig.7 Simulation comparison of pressure optimization during filling process

通过选择安置在预测时可能产生缩松位置的模拟传感器,Magma[®]软件还能生成重点位置的金属液与模具热交换及温度变化曲线,以检查凝固过程的温度曲线是否顺滑^[9],见图8。可以看出,优化后的铸件局部模具与金属液之间的热传导温度曲线呈平缓下降,证明铸件从液相到固相的过程中得到了合理的冷却凝固速度,避免了铸件和模具之间温度梯度过大而形成缩松等缺陷^[10]。

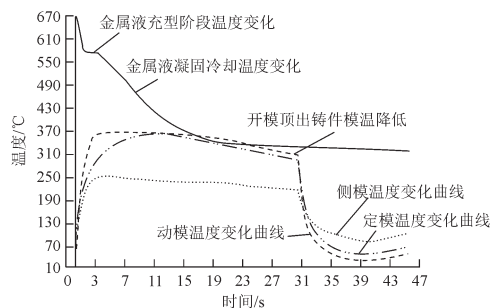


图8 充型过程金属液和模具温度变化模拟图

Fig.8 Temperature variation simulation of molten metal and mold during filling process

4 结 论

(1)铝合金连接支架零件区域差异化的壁厚形状阻碍了铝液充型时的速度和流量均衡,因此初始设计6个相等的内浇口容易造成各部位凝固速度差别较大,铝液交汇处有裹气和冷隔缺陷。

(2)针对支架铸件各区域的不同的壁厚和结构,设计差异化的内浇口,改变铸件局部的充型流量与充型压力关系,同时在内浇口增加溢流槽,能够提高排气效果及改善填充凝固质量。