

基于 ProCAST 的摩托车架低压铸造方案分析与优化

单爱丽¹, 鲍培玮¹, 邢书明¹, 闫光远¹, 高文静¹, 欧黎明¹, 姜加兴²

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044;

2. 玉环凯凌机械集团股份有限公司, 浙江台州 317600)

摘要: 采用 ProCAST 软件对摩托车架低压铸造过程进行数值模拟。通过研究金属液充型过程中的汇流与卷气现象, 凝固过程可能出现的缩松、氧化渣以及整个过程铸件产生的变形量等, 以验证车架成形方案设计的合理性。初步仿真结果表明车架整体设计符合要求, 但存在氧化渣集中、部分缩松尺寸较大等问题, 并预报了变形量的大小, 为反变形措施提供了依据。为解决这些问题对模具结构、工艺参数等制定了优化方案并再次进行仿真, 改进方案模拟结果表明: 在砂芯附近增加2个渣包、将充型一、二阶段的压力降低3~4 kPa等, 能减小缩松概率、降低氧化渣含量。

关键词: 摩托车架; 低压铸造; 数值模拟; 充型; 凝固; 变形量; 优化方案

摩托车车架作为整车的骨架, 受力复杂, 固定着传动系统、电力设备、操作系统及其他相关原件^[1-3], 必须具备足够的强度, 确保安全性能^[4-6]。车架使用过程中, 应力过大则安全性低, 应力过小不仅车身笨重并且成本过高, 因此车架的结构与质量对于整车而言至关重要。

目前大型薄壁复杂铝镁合金铸件广泛采用低压铸造工艺^[7-9]。低压铸造可人为控制压力和速度等工艺参数, 能很好地控制充型速度, 保证金属液平稳充型^[10], 有利于减少缩松、夹渣的形成, 提高铸件质量, 减少铸件缺陷, 提高金属液利用率。基于以上情况, 低压铸造越来越多被用于摩托车架的成形工艺过程。由于传统车架设计需要现场试制与测试, 造成研发周期长、生产成本高等缺点, 计算机模拟软件的辅助融合成为了必然趋势。

为减少车架内部缺陷、缩短研发周期, 本文采用低压铸造一体成形工艺, 通过铸造模拟软件 ProCAST 对车架低压铸造整体过程进行模拟仿真, 根据模拟结果发现的问题进行方案修正, 并对修正方案做了进一步的模拟分析, 旨在消除铸件内部缺陷, 优化设计, 指导实际生产, 提高经济效益。

1 试验材料及方法

1.1 车架分析及铸造工艺设计

图1a为摩托车架的三维模型, 整体尺寸: 长1 190 mm、宽520 mm、高546 mm, 其中薄壁分布面积大、厚度小, 平均薄壁厚度小于8 mm。由于铸件存在大量薄壁结构, 在铸造过程中容易发生变形。摩托车架选用的合金材料为ZL101A铝合金, 该合金具有良好的比强度、导热性以及铸造性能, 广泛用于航空航天、交通运输、建筑、电力通信等领域零部件生产铸造^[11-12]。

完成零件结构分析, 因车架为对称结构, 故只需建立一半骨架模样, 可缩短模拟计算时间。在 ProE 软件中建立模具浇注系统如1b所示, 模具主要结构包含: 1

作者简介:

单爱丽(1996-), 女, 硕士生, 研究方向为金属液态模锻。E-mail: 21126059@bjtu.edu.cn

通讯作者:

鲍培玮, 男, 副教授。E-mail: pwbao@bjtu.edu.cn

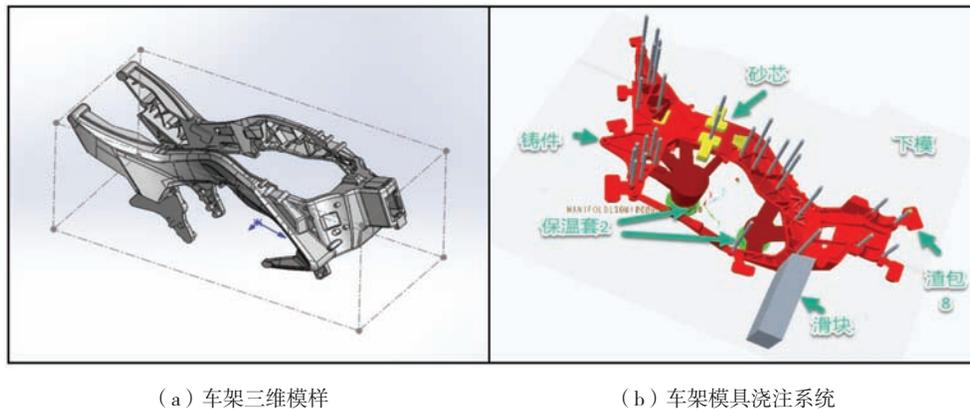
中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)10-1329-07

收稿日期:

2023-02-22 收到初稿,
2023-04-27 收到修订稿。



(a) 车架三维模样

(b) 车架模具浇注系统

图1 车架的三维模样与模具浇注系统

Fig. 1 Three-dimensional model of the frame and its mold gating system

个车架模型、8个渣包、1个砂芯、1根拉筋、2个保温套、1个滑块、2个浇道、30根顶杆，以及上下模各1个。由于车架较大，为了浇注平稳、充型完整和顺序凝固，本文以固定间距设置2个浇道；8个渣包用于去除熔液前端携带的杂质，获得质量良好的铸件；设置砂芯用于形成铸件的内腔；由于车架长度尺寸大，为控制过大变形，在铸件长度方向增加1根拉筋；为保证充型完整，防止浇道金属液提前凝固，在2个浇道设置保温套；设置顶杆方便取件。

1.2 网格划分与前处理

将车架模具浇注系统模样导入ProCAST软件，进行网格划分与条件设置。首先在Visual-Mesh模块中对模样进行质量检查并修复，完成网格划分，划分后的网格质量良好，包含752万个四面体单元。随后进入Visual Cast模块进行初始参数设置，主要包括：几何体管理器、界面传热系数设置、边界条件设置、铸造工艺参数设置等。具体低压铸造时间压力设置如图2所示；砂芯、保温套、模具与铸件分别设置不同的材料，上下模与滑块均选择45钢，并对温度进行设置，在Visual Cast 模块Volume Manager界面进行操作。具体参数详情如表1。

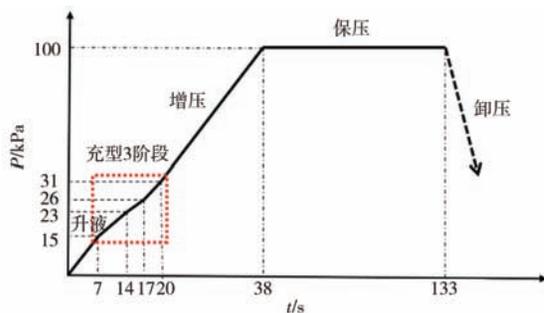


图2 压力-时间工艺曲线

Fig. 2 Pressure-time process curve

表1 材料及初始温度

Table 1 Materials and initial temperatures

零件	上模	下模	滑块	砂芯	保温套	铸件
材料	45钢	45钢	45钢	覆膜砂	硅酸铝	ZL101A
温度/℃	250~350	280~380	300	室温	420	720

2 模拟结果分析

2.1 充型过程分析

首先进行充型过程温度场、速度场分析。如图3a、b、c为充型过程温度场。合金液从两个浇道流出，初始阶段右侧浇道金属液流动速度快，右侧浇道处的金属液往左上方流动，与左侧浇道金属液在图3c所标注位置汇流，再流向最远端，最后充满的部位为右上方的渣包，整体充型完整，充型时间10 s左右。充型完成时，温度离浇道呈近高远低分布，铸件整体温度在固液两相区之间，部分薄壁位置（如加强筋位置和一些早期充满的集渣细颈位置）已经接近完成凝固（图3d），需注意率先凝固的部位是否会出现氧化渣集中现象。部分位置和时段充型速度较快，现将速度在0.5 m/s以上的部位突出显示（图3e），由主浇道进入分浇道，尤其是左侧浇道，速度超过1 m/s的部位位于4个分浇道末端，可考虑适当降低充型1阶段压力，从而降低此位置的速度，使充型过程更加平稳。

图4为卷气现象分析。在初始充型阶段的2个浇道处，出现较重的卷气如图4a，由于该位置管道断面突然变化引起的涡流造成的，充型的时间未出现卷气现象。由于汇流处易出现氧化渣集中，因此对汇流部位进行了观察，如图4c。两侧熔体在接近砂芯位置汇流，汇流后一起向左侧流动，汇流开始与结束均在砂芯附近，汇流后这一区域速度趋缓（图中白色箭头越密越长代表流速越大），此后由左侧浇道提供充型主流量。

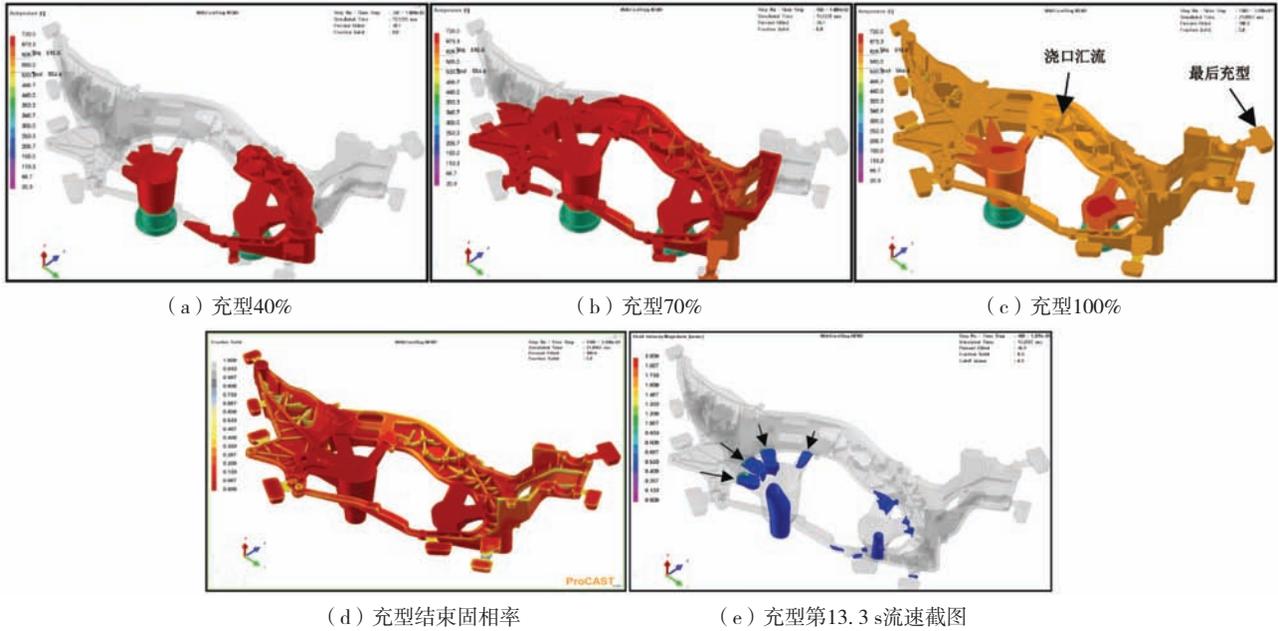


图3 充型过程模拟结果
Fig. 3 Simulation results of the filling process

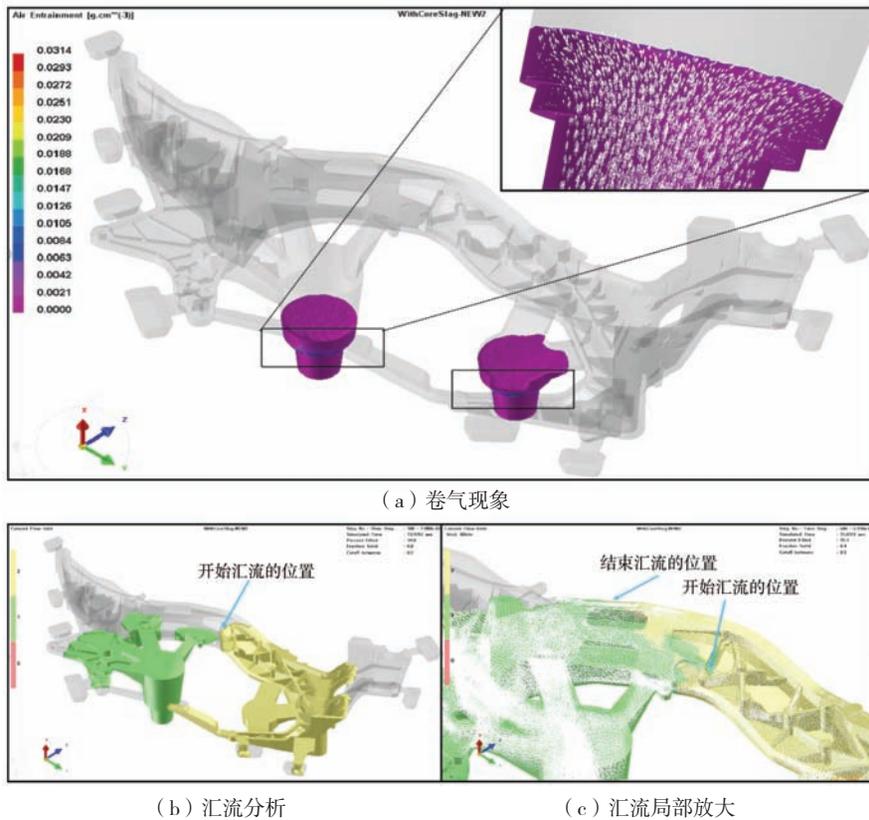


图4 卷气与汇流现象
Fig. 4 The phenomenon of the air entrapment and confluence

2.2 凝固过程分析

凝固时间为133.1 s时，凝固基本遵循顺序凝固原则，凝固结束时，除了浇口与内浇道的一部分处于固相温度以上，其他部位均处于固相线温度以下，铸

件边缘以及薄壁部位温度更低。对凝固后的铸件内部缺陷进行探究，氧化渣主要集中于渣包内，左侧越远氧化渣越富集，渣包收容能力不足。图5b是在提高砂芯所在位置冷却速度条件下得到的结果，拉筋处的渣

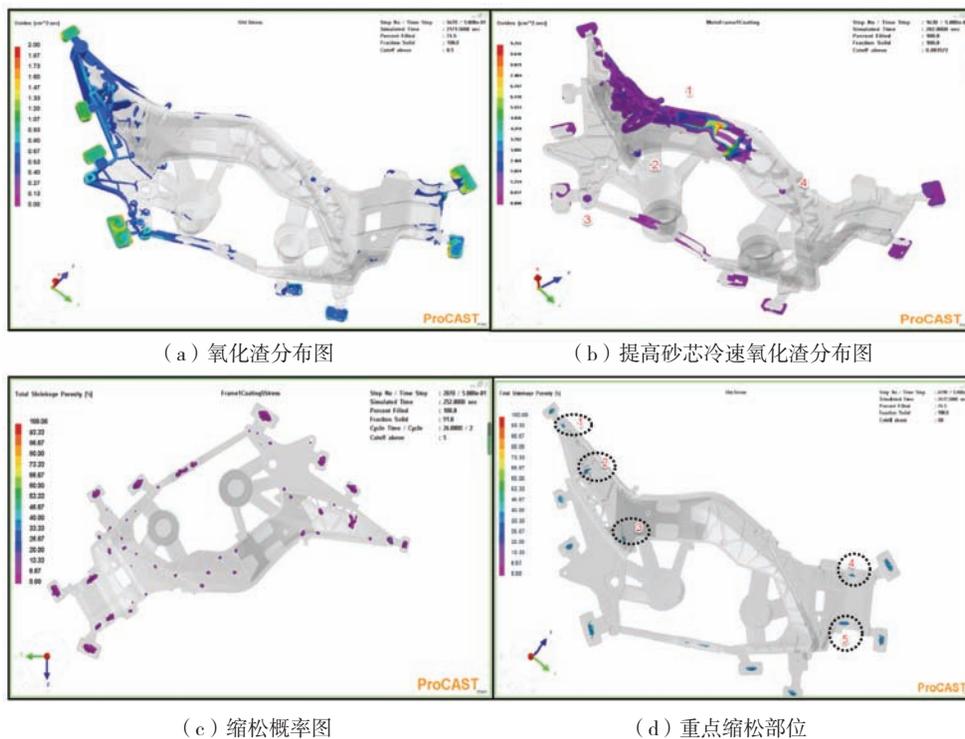


图5 氧化渣与缩松分布

Fig. 5 Distributions of the oxidizing slag and shrinkage porosity

子不作分析。可能产生氧化渣集中的位置如图5b, 主要有4处。其中1处的夹渣分布面积大, 数值高, 不容忽视, 所以必须重点解决。分析其原因主要有几点: 砂芯附近为汇流位置, 此处易产生较多氧化物; 砂芯一侧没有设置集渣包, 产生的氧化物不能及时引出; 砂芯上方位置高, 液流过此位置向远端流动时, 为向下流动, 此时该位置已经充满, 产生的氧化渣易吸附于模具表面, 因流速缓慢, 氧化物不易被带走。针对此问题, 计划在砂芯旁边增加渣包, 同时考虑通过优化压力参数, 改善流场来解决问题。图5c为缩松可能产生的部位, 有些部位如加强筋位置不用考虑缩松问题, 需要重点关注的5个部位如图5d, 产生缩松的可能性大, 而且尺寸也较大, 必须采取必要的措施解决, 比如在这些部位设置点冷。

2.3 应力应变分析

当铸件达到一定的固相分数, 部分位置开始出现应力应变。把应变分为三个阶段: 开模前的应变、开模瞬时应变、开模后冷却过程产生的应变。第一阶段: 开模前, 由于模具的约束和温度的下降, 整体处于应力增长状态。由于塑性应变的作用, 局部应力集中的位置应力得到释放。第二阶段: 开模时因约束消失应力有一巨大下降, 为开模效应。第三阶段: 开模后应力随温度下降逐渐增加, 部分应力较大位置将产生塑性变形而使过大应力得到缓释。由于砂芯未拆

卸, 故只有砂芯部位因约束存在, 应力场仍然较大, 且随温度下降而继续增加。图6a为开模瞬时的温度场, 由图可知, 开模时铸件温度大多在 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。结合图6b温度应力曲线, $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 此时的材料屈服强度为 80 MPa , 即此时铸件整体屈服强度低于 80 MPa 。开模后, 等效应力状态如图6c所示。渣包颈位置多为应力集中位置, 此处的应力集中影响不大。位置3由于砂芯对收缩的阻碍, 应力较大。位置1、2为拉筋两端, 应力较大, 达到 100 MPa 以上, 右端应力值更高。结合温度分布可知, 拉筋两端将产生较大塑性变形, 尤其右端, 应力集中和塑性变形较为严重。可考虑增大该位置圆角过渡(黑色虚线), 减小应力集中。由模具结构来看, 是允许的, 同时适当增加左侧拉筋宽度。

塑性变形发生在收缩受限位置, 适当的塑性变形可使残余应力得到缓释。开模时的最大变形量发生在拉筋与车架远端的位置。随着冷却过程的进行, 变形继续扩大。冷却至室温时, 铸件获得最终总变形。最终高度 X 方向总变形如图7a所示, 结合表2得: 开模后左侧变化不大, 右侧变形由原来的 -1.8 mm 增加到 -2.8 mm 。 X 方向变形总量 $=-2.8\text{ mm}+0.5\text{ mm}=-3.3\text{ mm}$ 。最终宽度 Z 方向总变形如图7b所示, 与开模时相比, 略有发展, 右侧变化较大。最终 Z 方向变形总量 $=1.2\text{ mm}+1.5\text{ mm}=2.7\text{ mm}$ 。最终长度 Y 方向总变形如图7c所示, 变形方向与热收缩方向一致。右侧基本与开模时相等, 没有太大变化, 而左侧增长了 0.4 mm 。左侧的增

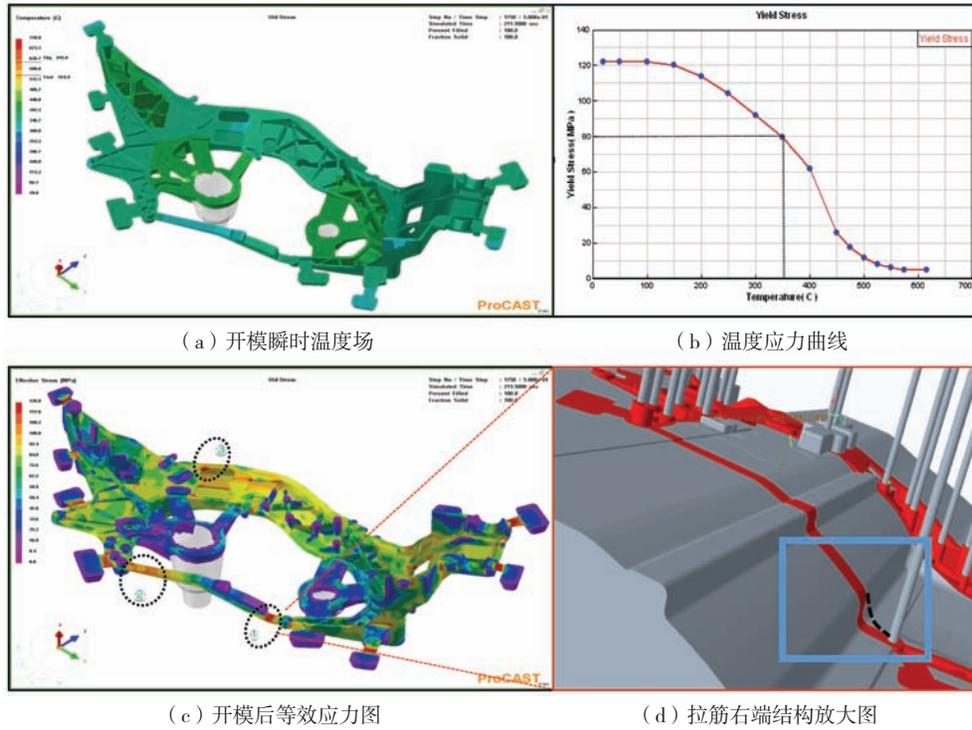


图6 温度场与应力图

Fig. 6 Temperature and stress diagrams

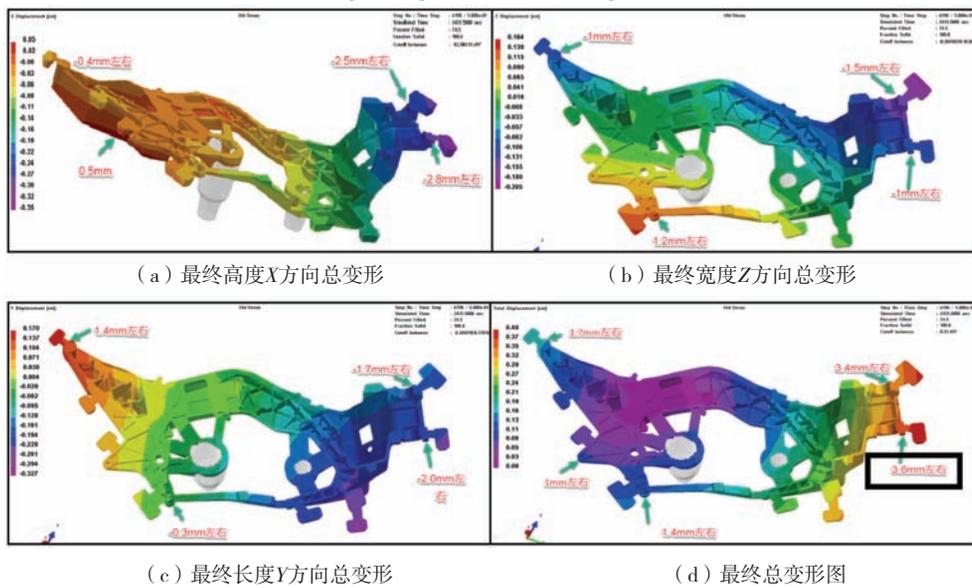


图7 变形分量与总变形

Fig. 7 Deformation component and total deformation

表2 开模时与冷却后的变形情况
Table 2 Deformation during mold opening and after cooling

	$X_{左}$	$X_{右}$	$Z_{左}$	$Z_{右}$	$Y_{左}$	$Y_{右}$	总变形 _左	总变形 _右
开模瞬时	-0.4	-1.8	0.7	-1	1	-2	1.4	2.5
冷却最终	0.5	-2.8	1.2	-1.5	1.4	-2	1.7	3.6

加是热收缩导致，而右侧基本不变，跟零件的Z形结构相关，由零件X方向的弯折与位置Y方向变形的对冲使

得变形没有大的变化。Y方向最终总变形量=1.4 mm+2.0 mm=3.4 mm。如图7d为最终总变形，最终件内最大

总变形在3.6 mm左右,位于右下角位置。左侧相比开模时增加0.3 mm,右侧则相比开模时增加了1.1 mm,表明大部分变形发生在开模冷却过程之前。

2.4 结果分析与方案优化

对流场分析,汇流位置位于砂芯附近,汇流后一起向左侧前进,流速趋缓,此后主流量由左侧浇道提供。且在砂芯这一侧没有渣包分布,因而在砂芯附近氧化渣分布较多。10~11 s完成充型,充型速度略快,充型第1阶段左侧充型过快,先后充型的目标实现不太良好,可考虑减小第1阶段压力,减缓第1阶段左侧充型速度。最大变形量在3.6 mm左右,为右下角的顶部位置。

针对以上仿真结果,做出以下调整。首先在砂芯一侧增加两个渣包,用于减少此处聚集的氧化渣。第二,降低第一阶段的充型速度与压力,实现汇流位置的改变、优化充型顺序。第三,增加拉筋左侧宽度与右侧转弯处过渡圆角,增大拉筋强度,防止拉筋强度不足造成的拉筋作用失效。第四,采取措施应对变形,对于高度X方向,尤其是右侧采用反变形措施,矫正量为3.3 mm;对于其他两个方向,主要核算其热收缩量进行补偿,宽度Z方向补偿量为2.7 mm,长度Y方向补偿量为3.4 mm。由于应对变形做出的补偿,需要对模具型腔做很大的修改,因此第四条先不做更改,对前三条改进后的方案进行模拟,调整后的工艺参数如图8。

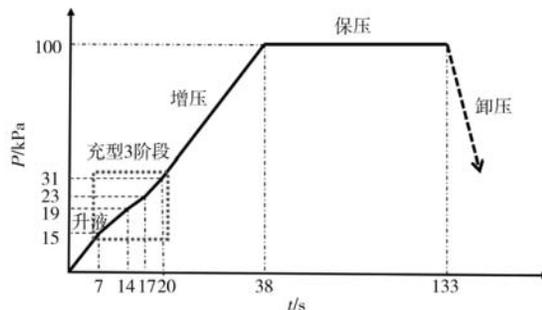
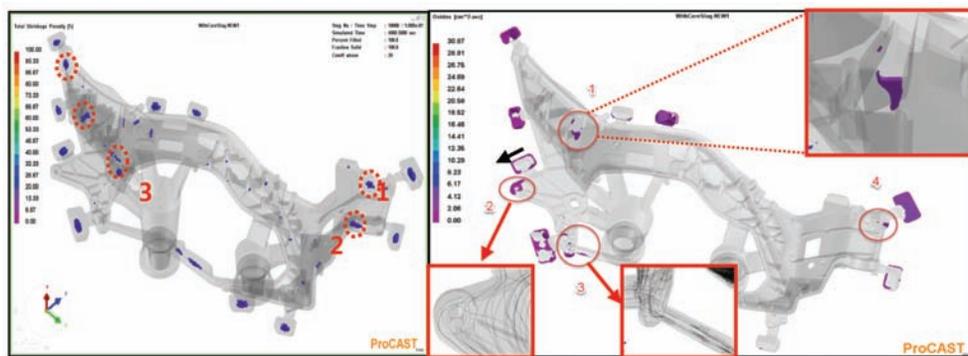


图8 调整后的压力时间工艺曲线

Fig. 8 Adjusted pressure-time process curve

2.5 改进方案模拟结果

优化方案的流场分布改善较为明显,浇道及进入型腔的流速得到降低,铸件内部及远端异常高的速度点均有所减少,数值降低,且符合顺序凝固的预期。充型过程中,汇流位置左移,汇流后右侧浇道流量占比增加,流速更加平稳,卷气问题明显改善。与改进前相比,缩松情况有所改善,如图9a所示5个位置,产生5 mm以上大尺寸缩松可能性较大,必须考虑在这些位置增加点冷。氧化渣集中分布的部位主要有以下4个,如图9b所示。放大后发现,位置1处为加强筋板位置,故氧化渣可能是由于结构原因,流动不畅,困于此位置。对位置2进行了粒子跟踪,确定该处处于流动死区,附近的集渣包作用不明显,可考虑将渣包适当外移,如图中黑色箭头所示。对于位置3同样进行粒子跟踪分析,此处离拉筋中的汇流位置不远,汇流后流



(a) 缩松分布图

(b) 氧化渣分布图

图9 缩松与氧化渣分布图

Fig. 9 Distributions of the shrinkage porosity and oxidizing slag

动趋势减缓,产生的渣子不能随流进入渣包。位置4,由于该位置是最后充型位置,该位置渣包作用明显,故可能是渣包容纳能力不足,造成渣包外存在氧化渣,可考虑增大该位置渣包。由于未对模具型腔做反向补偿修改,其最终变形与修改前基本保持一致。

3 结论

(1) 在砂芯一侧增加2个渣包后很大程度上减少了砂芯附近的氧化渣分布,汇流后前行金属液边部的氧化渣也在一定程度上得到减轻。

(2) 调低充型第一、二阶段压力3~4 kPa,降低

开始阶段左侧浇道的充型速度,使汇流位置向左侧移动,使充型过程更加平稳,实现对充型顺序的优化。

(3)改进后的方案,充型完成时温度远端略有降低,约降低20℃左右,总体变形量基本没有变化。对改进的方案模拟后提出新的要求:在形成的5处较大缩松的模具相应位置设置点冷,提高该位置的冷却速度,以消除或减小缩松。增大右上角最后充型位置的

渣包大小,增大其容纳氧化渣的能力。调整死区位置2附近集渣包的位置,将其左移约30 mm,增大此渣包对死角位置氧化物的收集能力。对于高度 x 方向采用反变形3.3 mm(重点是右侧的 Z 形结构),其他方向按热收缩量对型腔尺寸进行适当增大,其中长度方向3.4 mm,宽度方向2.7 mm。增加拉筋左侧宽度为原来的1.5倍,并增大右侧转弯处圆角,以增大拉筋强度和刚度。

参考文献:

- [1] 肖雄. 电动摩托车车架结构优化设计分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [2] 杨润泽, 文少波, 许屹洲, 等. 电动摩托车车架刚度与模态分析 [J]. 小型内燃机与车辆技术, 2022, 51(2): 31-34.
- [3] 杨润泽, 文少波, 许屹洲. 基于CATIA和ANSYS的电动摩托车车架强度仿真分析 [J]. 小型内燃机与车辆技术, 2022, 51(1): 35-39.
- [4] 郑静, 林诗杰, 刘建军. 摩托车车架设计的研究与实践 [J]. 小型内燃机与车辆技术, 2017, 46(1): 55-57, 63.
- [5] 王江, 周积, 李晓灵, 等. 摩托车车架的结构分析和优化设计 [J]. 现代制造工程, 2013(11): 47-50, 84.
- [6] 张伟敏. 摩托车车架系统强度分析及结构优化 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [7] 吴士平, 王汝佳, 张建兵, 等. 大型薄壁筒形壳体铝合金近净成形铸件低压铸造变形控制方法: CN103934433B [P]. 2015-11-18.
- [8] 余瑾, 杨天云, 杨兵. 低压铸造铝合金薄壁件成型压力因素模拟 [J]. 中国铸造装备与技术, 2011(6): 36-38.
- [9] 廖可, 舒惠明, 万慧, 等. 低压铸造在大型复杂薄壁结构铝合金铸件的工艺研究 [J]. 科技创新与应用, 2017(30): 78-79, 81.
- [10] 唐多光. 铝合金摩托车车圈低压铸造生产技术 [J]. 摩托车技术, 1997(1): 13-15, 28.
- [11] 王志辉, 樊新波, 简忠武, 等. 压铸ZL101A铝合金摩擦磨损性能及机理的研究 [J]. 湖南工业职业技术学院学报, 2021, 21(4): 7-12.
- [12] 李秀坤, 李兴康, 全列宁, 等. 铸铝ZL101与 $5 \times \times \times$ 系铝合金可焊性分析 [J]. 焊接技术, 2020, 49(S1): 152-155.

Analysis and Optimization of Low Pressure Casting Scheme for Motorcycle Frame Based on ProCAST

SHAN Ai-li¹, BAO Pei-wei¹, XING Shu-ming¹, YAN Guang-yuan¹, GAO Wen-jing¹, OU Li-ming¹, JIANG Jia-xing²
(1. School of Mechanical and Electronic Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Yuhuan Kaling Machinery Group Co., Ltd., Taizhou 317600, Zhejiang, China)

Abstract:

In this study, ProCAST software was used to simulate the low-pressure casting process of a motorcycle frame. The rationality of the frame forming scheme design was verified by studying the phenomenon of confluence and air entrapment during the filling process of molten metal, the possible shrinkage porosity, oxidizing slag, and the deformation of the casting during the solidification process. The preliminary simulation results showed that the overall design of the frame meets the requirements, but there were problems such as the concentration of the oxidizing slag and large partial shrinkage, and the size of the deformation was predicted, which provided a basis for anti-deformation measures. For the purpose of solving these problems, an optimization scheme was made about the die structure and process parameters, and the improved plan was simulated again. The simulation results of the improved scheme showed that adding two dross traps near the sand core and reducing the pressure of the first and second filling stages by 3-4 kPa can reduce the shrinkage porosity probability, and lower the oxidizing slag content.

Key words:

motorcycle frame; low pressure casting; numerical simulation; mold filling; solidification; deformation; optimal scheme