

一体化前舱压铸项目开发及应用案例介绍

黄开城¹ 万里^{1,2} 黄志垣² 钟宇毅² 林韵¹ 张玉龙¹ 陈诗明² 余亮¹ 赵善庆¹ 夏鸿文¹

(1. 广东鸿图科技股份有限公司, 肇庆 526100; 2. 广东鸿图汽车零部件有限公司, 广州 510700)

摘要 一体化压铸车身是当前汽车制造发展中一个重大变革和技术跨越, 该技术工艺突破传统的汽车制造工艺, 能够有效降低汽车制造成本、提升汽车续航能力以及提高汽车安全性能等。针对一体化前舱压铸项目产品尺寸大且结构复杂, 有较高的力学性能和多种连接方式要求, 行业内缺少一体化压铸技术和开发应用经验, 压铸工艺和模具方案需要解决产品填充凝固和控制变形等难题。研究了一体化前舱项目开发及应用案例, 根据客户图纸、标准和技术要求, 识别压铸工艺难点和风险点, 通过仿真对比分析和工艺参数设计, 输出压铸模具方案和设备匹配方案。经过实际生产验证, 成功规避了仿真分析识别的风险问题, 产品本体的平均伸长率达8.9%, 内部质量和整体轮廓尺寸结果均能满足客户要求。

关键词 一体化前舱; 仿真分析; 工艺参数设计; 模具方案; 压铸

中图分类号 TG249.2

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.Z20240035

Development and Application Case of Integrated Front Cabin Die Casting Project

HUANG Kaicheng¹, WAN Li^{1,2}, HUANG Zhiyuan², ZHONG Yuyi², LIN Yun¹, ZHANG Yulong¹,

CHEN Shiming², YU Liang¹, ZHAO Shanqing¹, XIA Hongwen¹

(1. Guangdong Hongtu Technology Co., Ltd., Zhaoqing 526100; 2. Guangdong Hongtu Auto Parts Co., Ltd., Guangzhou 510700)

Abstract: Integrated die-casting body parts is a major change and technology leap in the current development of automobile manufacturing, which breaks through the traditional automobile manufacturing process, and effectively reduces the cost of automobile manufacturing, and improves the endurance capacity and safety performance of automobiles. In view of the large size and complex structure, high mechanical properties and a variety of connection requirements of integrated front cabin die-casting project products, as well as the lack of integrated die-casting technology and development and application experience in the industry, the problems of product filling and solidification and control deformation need to be solved for die-casting process and mold solutions. The development and application case of the integrated front cabin project were described. Based on the drawings of customer, standards and technical requirements, the difficulties and risk points of die-casting process were identified, and the die-casting mold scheme and equipment matching scheme were output through simulation comparison analysis and process parameter design. After actual production verification, the risk problems identified by simulation analysis were successfully avoided. The average elongation of the product body reaches up to 8.9%, and the internal quality and overall contour size results can all meet the requirements of customer.

Key Words: Integrated Front Cabin, Simulation Analysis, Process Parameter Design, Mold Scheme, Die Casting

一体化压铸是合并了原传统汽车制造的冲压和焊接流程, 使用大合模力压铸设备将多个铝合金零部件高度集成, 一次压铸成形单个或少数几个大型铝合金铸件^[1]。该技术具有多个优势: ①降低生产成本, 从而降低整车的价格; ②采用单一的铝合金材料可以有

效的汽车轻量化^[2], 提高汽车的续航能力^[3]; ③一体化压铸车身可以大量减少焊点数量, 提升整车的扭转刚度, 提高汽车的安全性。随着在汽车、航空航天和电子类等领域的发展, 市场对一体化压铸的需求不断增大, 同时在技术上的不断创新和环保要求不断提高等因

收稿日期: 2024-12-12; 修订日期: 2025-01-24

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFB2504602)

第一作者简介: 黄开城, 男, 1991年出生, 工程师, E-mail: kaicheng.huang@ght-china.com

通信作者: 万里, 男, 1970年出生, 教授级高工, E-mail: wanli@ght-china.com

引用格式: 黄开城, 万里, 黄志垣, 等. 一体化前舱压铸项目开发及应用案例介绍[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(5): 641-646.

HUANG K C, WAN L, HUANG Z Y, et al. Development and application case of integrated front cabin die casting project[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(5): 641-646.

素,一体化压铸将在更多的领域应用,拥有较好的发展前景^[4]。有优势的同时必然存在制造的难度,产品尺寸超越了过往所有传统汽车零部件的尺寸,一体化压铸对压铸技术、设备精度和质量管控有着更高的要求。

1 产品的结构及开发技术要点

开发的汽车一体化前舱零件应用于某型汽车车架前舱总成,见图 1。该零件(图 2)轮廓尺寸为 1 600 mm×940 mm×700 mm,压铸件质量为 53 kg,平均壁厚为 4.6 mm,铸件材质采用 AlSi7 系免热处理合金;产品本体取样性能要求:抗拉强度 ≥ 215 MPa,屈服强度 ≥ 115 MPa,伸长率 $\geq 9\%$,折弯角 $\geq 20^\circ$;产品内部质量要求见表 1,连接面加工后在 25 mm×25 mm 区域内气泡直径 ≤ 1 mm,且该区域内所有气泡的直径之和 < 6 mm,高度 ≤ 0.5 mm。螺纹孔缺陷标准见表 2,其他区域符合 ASTM 冷隔等级 II 级;产品全尺寸要求合格率 $\geq 97\%$,产品非加工安装面面轮廓度要求精度最高为 1.6 mm,最低为 3.0 mm,对压铸变形控制要

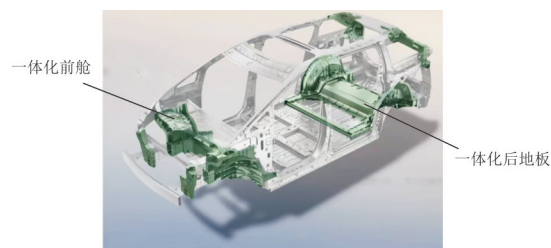


图 1 某型汽车车架展示图

Fig.1 Frame display of a certain type of automobile

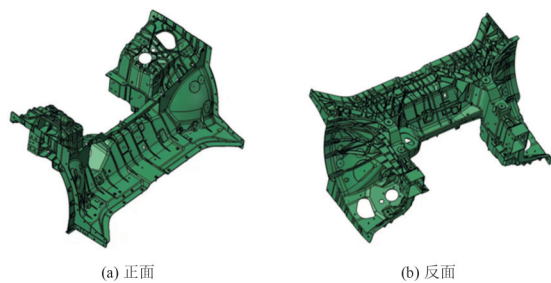


图 2 一体化前舱压铸零件

Fig.2 Integrated front cabin die-cast parts

求较高。

表 1 产品内部质量要求

Tab.1 Internal quality requirements for products

缺陷等级	壁厚/mm	气孔、缩孔、夹杂等				缩松		
		最大面积/ mm ²	最大直径/ mm	累积最大的瑕疵/ (%·mm ⁻²)	最大长度/ mm	最大面积/ mm ²	最大直径/ mm	累积最大的瑕疵/ (%·mm ⁻²)
1	(0,3]	0.8	1	2~10	2	25	6	5~25
2	(0,3]	3.14	2	4~20	5	50	8	10~50
3	(3,9.5]	7	4.5	6~30	8	100	12	20~100
4	(9.5,∞]	20	6	10~50	16	200	16	40~200

表 2 产品螺纹孔空穴缺陷标准

Tab.2 Standard for thread hole defect in products

螺距/mm	孔穴最大直径/mm	孔穴数量/个	深度/mm	两孔的边距/mm
≤ 1	≤ 1.0	≤ 2	≤ 1	≥ 2
> 1	< 1.5	< 4	< 1.5	> 5

2 压铸工艺和模具设计

压铸难点和风险点:一体化压铸前舱作为车体前部的结构件需要兼顾碰撞、疲劳、连接性能的要求,要求其在铸态下能达到较高的强度和韧性^[5];同时需要满足多种连接方式的要求,不同部位有不同的连接方式,

如焊接、SPR、胶接等;一体化压铸零件整体尺寸大、填充流程长、凝固差异大,需要压铸时能保证较好的充型以及热平衡能力^[6];一体化前舱压铸零件采用免热处理合金,可以避免热处理变形,但需要对材料成分进行过程管控,包括来料检查、炉内检查和产品本体检查等。

2.1 工艺参数设计

一体化前舱零件材料选用 AlSi7 系免热处理材料^[7],包含浇道和排气道质量约为 65.5 kg,投影面积为 15 978 cm²,平均壁厚为 4.6 mm;通过产品的模具充满度 45%、压室投影面积、铝液密度、产品质量和壁厚等计算出压射工艺参数(见表 3 和表 4)和压射速度曲线^[8](见图 3)。

表 3 压射工艺参数表

Tab.3 Injection process parameters

压室直径/mm	压室长度/mm	内浇口面积/ mm ²	内浇口速度/ (m·s ⁻¹)	系统压力/ MPa	压射速度/(m·s ⁻¹)	合模力/kN	充型时间/ms	铸造压力/ MPa
260	1 500	5 940	55.0	17.5	6.15~7.10	55 920	82.9	35

表 4 工艺参数表

Tab.4 Process parameter table

浇注量/kg	压室有效长度/mm	压室直径/mm	铝液密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	压室总体积/ m^3	重力加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	内浇口截面积/ mm^2	浇道质量(含料饼)/kg
86	1 500	260	2 420	0.08	9.800	5 940	20.5
型腔内空气压力/MPa	料饼厚度/mm	渣包质量/kg	投影面积/ cm^2	快压速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	浇注总体积/ cm^3	空气体积/L	压铸机最大加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
0.01	35.00	8.5	22 368.56 113	6.15	35 537	71.17	200
压室充满度/%	慢压临界速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	慢压结束位置/mm	快压起始位置/mm	内浇口速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	增压起始点/mm	慢压射加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	慢压射临界加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
44.6	1.00	831	955	55	1 056	1.34	0.88
慢压射加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	慢压射速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	填充时间(产品估计)/s	最小内浇口速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1 kg 铝合金液对应冲头行程/mm	开始填充渣包冲头位置/mm	铸件填充距离/mm	慢压射加速时间/s
1.13	0.25	0.083	0.2	7.78	1 399	444	1.13

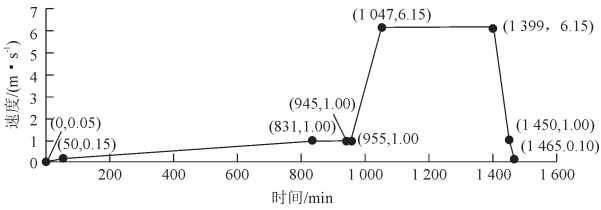


图 3 压射曲线

Fig.3 Injection curve

2.2 仿真对比分析

(1)初步浇注系统方案 根据产品结构设计初步的浇注系统方案,见图4。

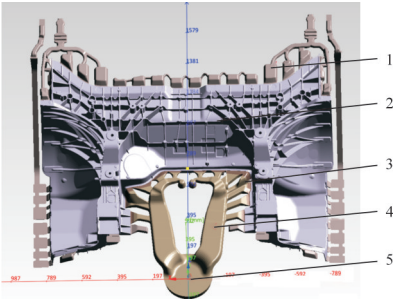


图 4 初步浇注方案

Fig.4 Preliminary pouring scheme

1.排气系统 2.铸件 3.浇口 4.进浇系统 5.料柄

(2)填充速度分析 根据以往经验,内浇口速度在40~70 m/s区间比较合理。模流的填充速度分析结果见图5。可以看出,内浇口取点分析填充速度范围为45~85 m/s,平均速度约为67.4 m/s,浇注系统设计合理^[9-11]。

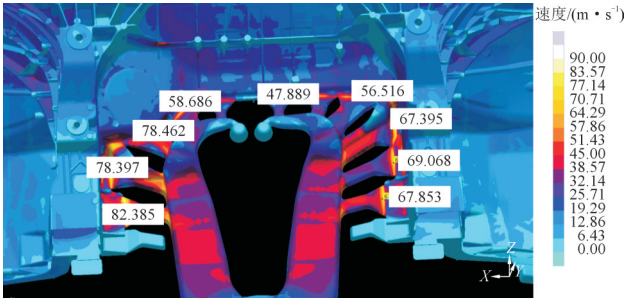


图 5 填充速度分析

Fig.5 Filling velocity analysis

(3)填充温度分析 整体填充温度需要高于液相线温度620℃,根据模流的填充温度分析(见图6),型腔填充100%后,铸件两侧及中间局部位置温度相对较低,该区域有冷隔风险存在。

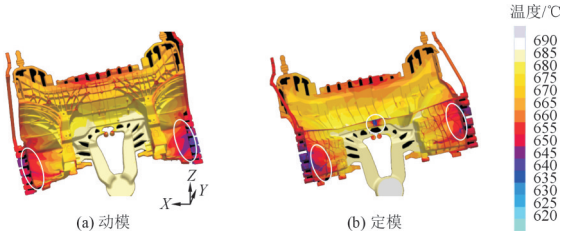


图 6 填充温度分析

Fig.6 Filling temperature analysis

(4)材料追踪分析 模流的材料追踪分析见图7。结果显示,铸件整体填充符合预期效果,减震塔和铆接区域没有多股铝料汇聚交叉,浇注系统设计合理。

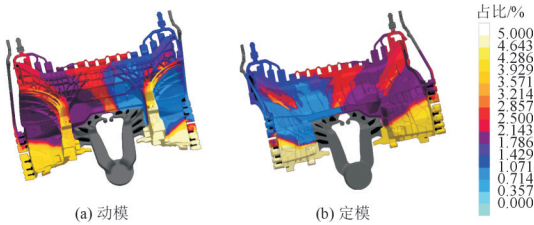


图 7 材料追踪分析

Fig.7 Material tracking analysis

(5)凝固分析 通过观察模流分析结果趋势判断,最后凝固位置为缩孔风险相对较高位置,模流的凝固分析(见图8)。可以看出,铸件最晚凝固区域均在产品厚壁区域。

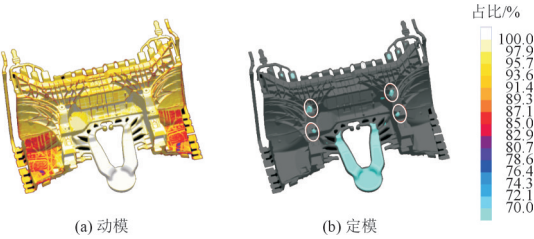


图 8 凝固分析

Fig.8 Solidification analysis

(6)气压分析 通过观察模流分析结果气体的流动情况,对存在裹气位置优化排气系统方案,加强排气可改善裹气,见图9。结果显示,当填充到91%时,圆圈位置出现裹气,需要加强排气设计^[12]。

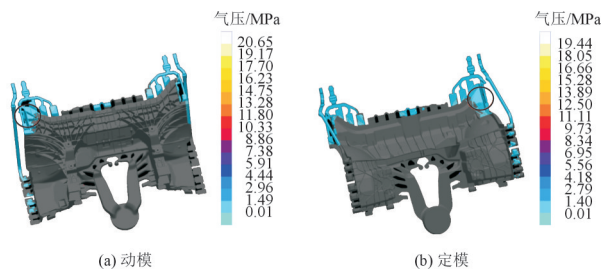


图9 气压分析

Fig.9 Gas pressure analysis

(7)热节分析 模流的热节分析见图10。可以看出,铸件壁厚较厚区域是主要热节区域,分布在柱台附近位置热节较高。

(8)缩孔分析 模流的缩孔分析见图11。可以看出,使用Magma软件进行计算过滤15%后,显示红圈区域缩孔风险比较大(基于原图为彩色表述,下同)。

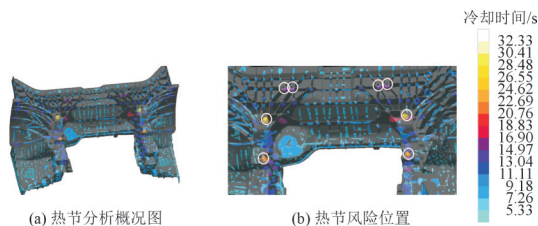


图10 热节分析

Fig.10 Thermal node analysis

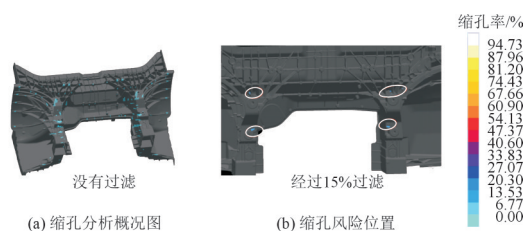


图11 缩孔分析

Fig.11 Analysis of shrinkage and porosities

(9)粘模风险分析 模流的粘模分析见图12。可以看出,根据从材料年龄Fraction_Liquid分析,着色位置为产品最晚冷却区域,红圈处铝液凝固时粘附在模具上时间最长,粘模烧伤风险较高。

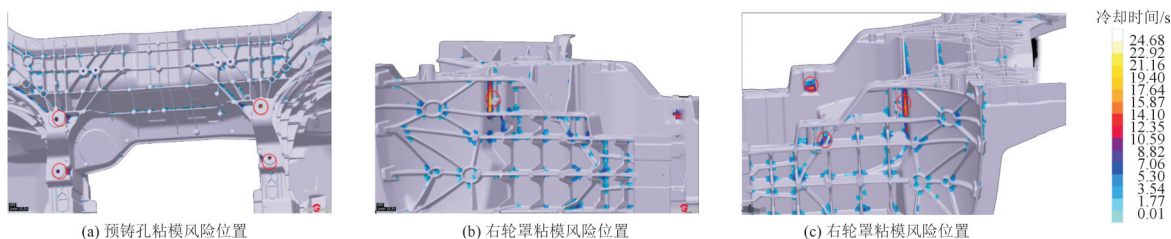


图12 粘模风险位置分析

Fig.12 Risk location analysis of mold sticking

2.3 模具方案设计

根据仿真分析结果输出优化对策:①冷隔风险区域增加浇道对冲该位置,提高该区域的填充温度;②对缩孔风险位置模具留出预铸针孔并增加高压冷却,降低缩孔风险;③针对局部裹气位置,优化排气系统,加强排气效果;④热节风险位置模具留出预铸针孔并增加高压冷却;⑤粘模高风险位置对模具型芯针进行氮化处理^[13]和模具表面披覆处理。修改后的模具设计方案见图13。

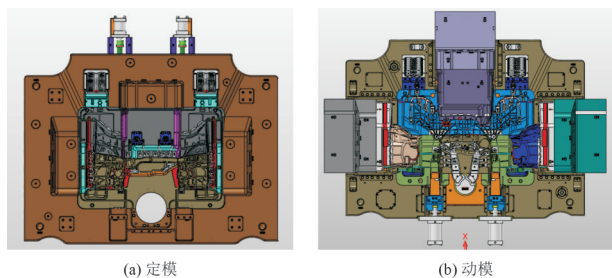


图13 模具方案图

Fig.13 Diagram of mold scheme

2.4 压铸设备匹配分析

根据仿真分析结果和模具方案,压铸机最大锁模力为70 000 kN,压射力为1 078 kN,系统压力为17.5 MPa,匹配设备P-Q曲线(见图14),确定设备选型方案。

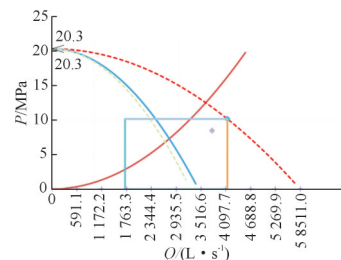


图14 设备匹配曲线

Fig.14 Equipment matching curves

3 压铸试验结果

3.1 压铸内部质量结果

通过压铸试验,产品内部整体质量符合要求,X光探伤结果见图15。

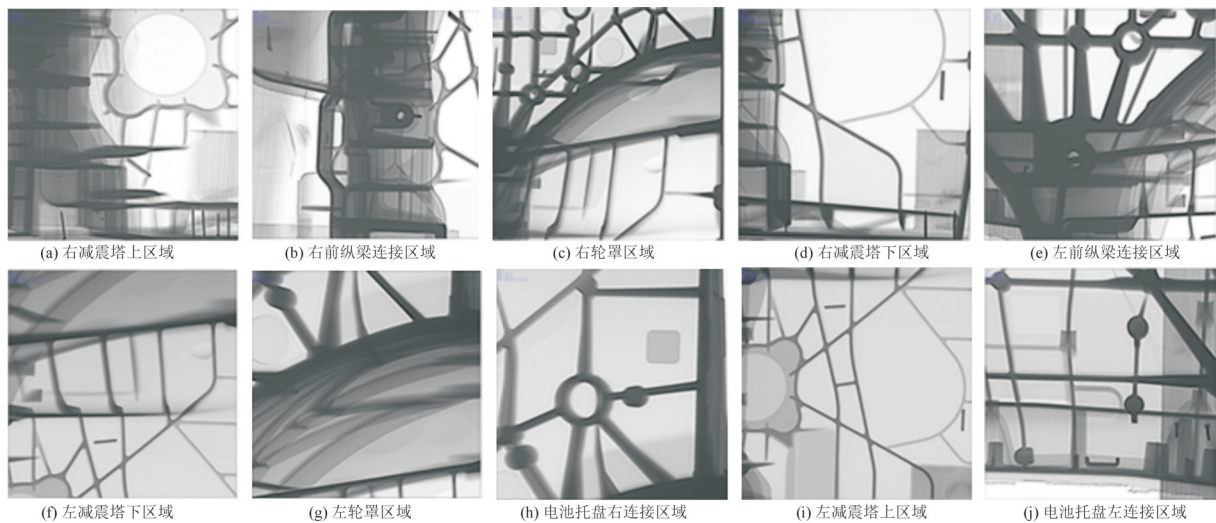


图 15 X光探伤结果

Fig.15 X-ray inspection results

3.2 力学性能检测结果

通过验证本体取样试片(取样位置见图 16)测量力学性能(见图 17),结果可以满足要求。

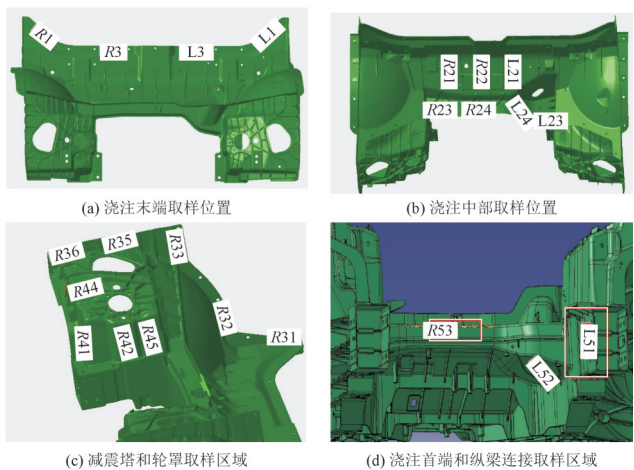


图 16 一体化前舱本体性能取样位置

Fig.16 Sampling positions of integrated front cabin body

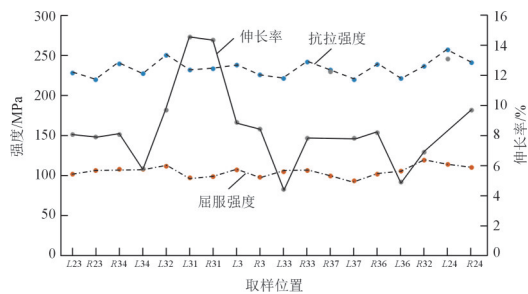


图 17 力学性能结果

Fig.17 Mechanical properties of the front cabin

3.3 蓝光扫描结果

蓝光扫描结果(见图 18)显示,产品整体变形量控制在 1.5 mm 以内,满足要求。

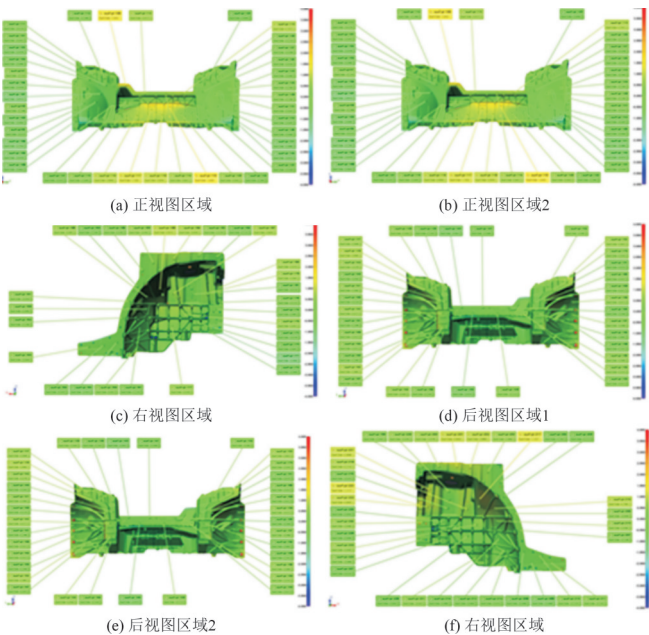


图 18 蓝光扫描结果

Fig.18 Blue light scan result

4 其他产品试制过程缺陷的原因分析及对策

4.1 减震器加强筋冷隔和根部 R 角裂纹成因分析与对策

从产品的结构看,产品壁厚和筋条壁厚不均匀且差异较大,壁厚局部过厚变化剧烈,根部 R 角过小,使局部填充率低,导致温度降低后再填充造成冷隔^[14](见图 19 和图 20)。修改筋条结构,定模模芯减厚优化壁厚,加大根部 R 角(见图 21)。采取上述措施后,金属液填充情况明显改善,基本解决了冷隔和 R 角裂纹问题。



图19 加强筋冷隔
Fig.19 Cold shut in the reinforcing rib



图20 R角裂纹
Fig.20 R-angle crack

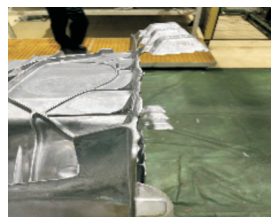


图23 轮罩连接面变形
Fig.23 Deformation of connecting surface of wheel cover

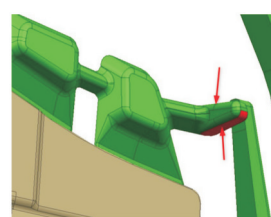
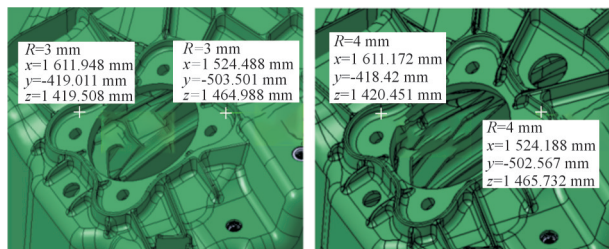


图24 加大排气道斜度
Fig.24 Increasing the exhaust slope



(a) 改善前 (b) 改善后

图21 改善结构

Fig.21 Improved structure

4.2 进浇口位置拉伤成因分析与对策

图22为进浇口位置拉伤。该位置起模斜度小,进料量较大,模具局部温度高,浇口位置填充速度较快。该位置需要螺柱焊接,产品的表面粗糙度不能过大,所以不能通过模具表面粗糙处理改善,需要模具开镶件加大该面的起模斜度,调整喷涂,将模具温度从80℃降到50℃,同时降低高速速度。按照上述措施,有效改善了拉伤问题。



图22 进浇口位置拉伤

Fig.22 Entrance gate position strain

4.3 轮罩连接面变形成因分析与对策

模具滑块打开时渣包排气道断裂,铸件拉变形(见图23)。通过加大渣包起模斜度(见图24),改善渣包排气道的脱模效果;冲浇口模具增加矫形功能,改善了排气道的脱模效果,解决了拉变形问题,同时导入了冲模压矫功能,提升了产品矫形的效率并保证了产品两侧轮罩变形量和开档距离。

5 结 论

(1)使用仿真分析软件,对一体化前舱压铸模具的浇注系统方案进行优化,对冷隔、缩孔、裹气、热节和粘模高风险位置制定针对性的解决方案,提前规避风险减少后期对模具的改动,有效延长模具的寿命和缩短项目开发周期,降低成本。

(2)对关键部位的本体取样性能结果分析,抗拉强度 ≥ 233.4 MPa,屈服强度 ≥ 104.6 MPa,伸长率 $\geq 8.92\%$,可以满足零件设计性能要求,有效保证整车的安全性能。

参 考 文 献

- [1] 王艳,洪海玻,张宇,等.一体化压铸在白车身中的应用浅析[J].汽车工艺师,2023(7):58-60.
- [2] 方志凌,宋燕利,康洁,等.一体化压铸铝合金前机舱轻量化设计与优化[J].汽车工程,2024,46(7):1314-1322,1333.
- [3] 何廷余,于德水,李东洋,等.一体化压铸技术之全产业链[J].汽车工艺师,2024(5):6-13.
- [4] 许天宇,于江,魏健,等.车身真空高压压铸技术研究[J].汽车工艺与材料,2024(6):64-72.
- [5] 高玉刚,王晓迪,张壮,等.一体化压铸技术之发展博弈[J].汽车工艺师,2024(Z1):65-70.
- [6] 常博文,黄景福,刘志中,等.免热处理铸造铝合金国内外发展现状分析[A]//第十九届中国铸造协会年会论文集[C].天津,2023.
- [7] 段慧珍.铝合金压铸工艺及虚拟工艺优化研究与应用[D].福建厦门:集美大学,2013.
- [8] 龚远华.压力铸造填充过程中的“速度场”分析[A].2012(第22届)重庆市铸造年会论文集[C].重庆,2012.
- [9] 彭敏.压铸工艺中模温监控应用探究[J].辽宁工业大学学报(自然科学版),2022,42(2):98-101.
- [10] 熊明辉.铝合金压铸件充型凝固过程及其压铸工艺CAE分析[J].热加工工艺,2013,42(15):63-65,67.
- [11] 王东升,李华,吴艳生,等.铝合金压铸件排气道减速结构的分析[J].特种铸造及有色合金,2019,39(5):518-519.
- [12] 陈思源,赵国平.铸造金属型模具水冷快速设计方法[J].特种铸造及有色合金,2022,42(4):424-427.
- [13] 冯凯,曹贵水.简析氮化工艺参数对模具氮化质量的影响[A]//2018年中国铝加工产业年度大会论文集[C].广东佛山,2018.
- [14] 王宏霞,费妹霞.压铸件常见缺陷及防止措施[J].内燃机与配件,2020(5):100-101.

(编辑:彭瑾)