

电动汽车铝合金副车架低压铸造凝固质量优化研究

韩伟¹, 李冬冬¹, 杨安², 陈晓斌¹

(1. 广州城市理工学院机械工程学院, 广东广州 501800; 2. 贵州蓝辉新材料有限公司, 贵州遵义 563000)

摘要: 针对电动汽车副车架低压铸造零件结构紧凑、壁厚不均匀和螺旋砂芯形状复杂、砂芯体积占比大等原因造成的低压铸造内部孤立液相、热节和疏松等缺陷, 运用AnyCasting软件模拟分析副车架低压铸造的温度、压力和模具结构等因素对凝固结晶质量的影响; 通过组合缺陷和概率缺陷预测功能进行综合性的数值模拟, 预测铸件孤立液相、热节和疏松发生情况。研究AnyCasting在低压铸造模具冷却的智能控制方法, 探究如何运用冷却水管开闭时序调整铝合金冷却凝固顺序, 提高副车架铸件内部组织成形致密度及低压铸造生产质量。

关键词: 低压铸造; 铸造工艺; 质量控制; 凝固顺序

作者简介:

韩伟(1963-), 男, 工学学士, 正高级实验师, 主要研究方向材料成形技术及装备自动化。电话: 13632201698, E-mail: 1786891960@qq.com

通信作者:

李冬冬, 男, 工学硕士, 讲师。电话: 15914395049, E-mail: 574686441@qq.com

中图分类号: TG244

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)06-0731-06

基金项目:

2020年度广东省高等教育教学教改项目(52SC200301); 2021年度广州城市理工学院一流专业建设项目(52JY214501)。

收稿日期:

2022-09-07 收到初稿,
2022-10-23 收到修订稿。

为了适应电动汽车轻量化和铸件一体化发展趋势, 许多车企的新能源电动汽车副车架采用铝合金整体低压铸造。一体化低压铸造成形的副车架结构更简单, 副车架自身质量的减轻还能够增强整车的承载性能, 在提高汽车的操纵稳定性方面具有重要的意义。图1所示为某电动汽车后副车架零件和低压铸造模具图, 采用A356铝合金材料低压铸造一体化成形, 在保证副车架铝合金内部结晶组织致密度要求的同时, 还能满足小型电动汽车载重指标和耐高温性能要求, 提高了整车的轻量化水平。但与此同时, 副车架一体化的紧凑结构使低压铸造的砂芯形状、浇注系统和模具结构更加复杂, 为铝合金液体的充型过程和顺序凝固结晶增加了许多干扰因素, 使预设的自上而下的结晶凝固顺序发生变化, 铸件容易发生局部孤立液相、疏松和缩孔等缺陷^[1]。为了确保副车架铸件内部结晶组织成形的致密度, 达到其高强度和耐高温的工作性能要求, 实践中运用AnyCasting模拟软件的组合缺陷预测功能进行综合性的数值模拟, 预测铸件孤立液相、疏松和缩孔发生情况, 调整规划模具冷却水管分布和开闭时序控制铝合金冷却凝固顺序等, 提升低压铸造质量水平和生产能力, 具体从以下几方面进行研究^[2]。

1 模具结构设计方案和缺陷分析

电动汽车副车架形状结构复杂, 在汽车行驶过程中承受长时间负载工作, 因此对内部组织致密度要求更高, 需要在确定工艺方案之前进行精细的模拟比较分析, 保证预设的低压铸造凝固顺序正常实现。随着计算机软硬件技术的快速发展及在制造业的广泛应用, AnyCasting软件的智能化低压铸造模拟的功能不断丰富强大^[3]。运用AnyCasting等智能数值模拟手段能够进行合理的模具设计和准确的工艺方案设计, 从而达到更高的产品合格率。

1.1 模具结构和浇注系统设计方案

图1所示的副车架外形尺寸为1 050 mm × 762 mm × 365 mm, 壁厚为4~8 mm, 质量为25.6 kg, 采用A356高强度铝合金低压铸造工艺成形。副车架铝合金铸件结构

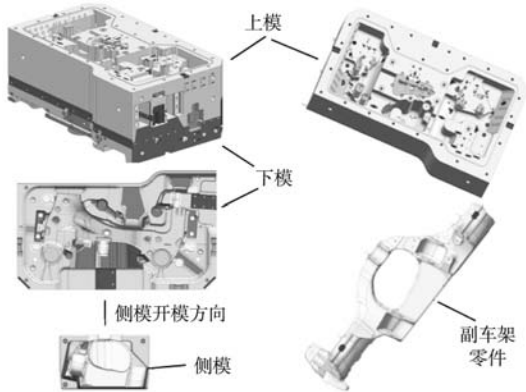


图1 铝合金副车架零件和模具结构图

Fig. 1 Structural diagram of the aluminum alloy subframe parts and dies

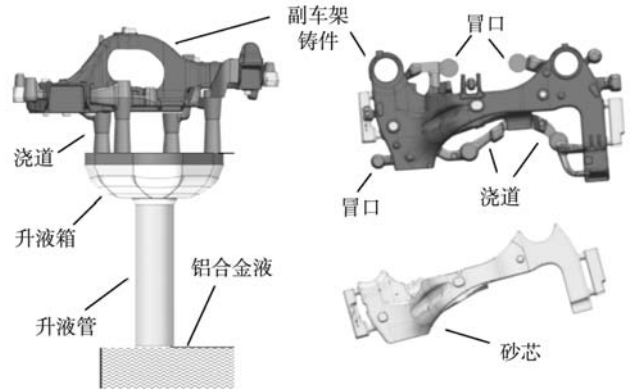


图2 副车架低压铸造浇注系统设计

Fig. 2 Pouring system design of low pressure casting of the sub frame

紧凑复杂，内部由体积较大的整体砂芯形成，模具分成上模、下模和侧模三个开模方向，模具各部分组件均使用SKD61耐热模具钢材料制成，如图2所示。其主要的外形部分设计在上模形成，下模主要分布着浇注系统并用于放置砂芯定位，合模前整体砂芯须按照固定的方向和位置要求在型腔内安装好。副车架低压铸造金属液充型是典型的底注式，通过外加压力和自上而下的凝固顺序使铸件内部形成较为致密的结晶组织^[5]。铝合金液体在低压铸造气压作用下经升液管进入浇注系统后再进入型腔^[4]，预设的低压铸造顺序凝固方案为远离浇道的位置和上部先凝固，接近浇道的位置以及下部最后凝固。

由于副车架零件结构特点是下部重量占比较大，而且向多个方向发散延伸，通过外加压力补缩对零件顶部的补缩效果不明显，因此需要在副车架低压

铸造浇注系统设置多个分散的冒口加强补缩和同时排气。同时树脂砂芯厚度形状变化多，体积较大，砂芯发气量较大，因此在多处增加冒口加强补缩和排气。

1.2 副车架低压铸造缺陷情况分析

由于电动汽车副车架零件结构特点是顶部质量比重较少，底部向多个方向发散延伸，因此通过低压铸造外部施加的液面压力补缩对零件顶部的补缩效果难以奏效。加上整体砂芯参与充型过程中与铝液的热传导及气体生成情况复杂，因此容易在铸件内部产生多处散布的孤立液相和热节，使预设的自上而下的凝固顺序难以实现^[6]。同时金属液必须全面包裹砂芯在其中才能完成充填凝固，这又使得反应生成的气体难以排除，增加了卷气和夹渣的缺陷发生趋势^[7]。具体的缺陷情况如表1所示。

表1 副车架低压铸造缺陷情况表

Table 1 Prediction of defects of the low pressure casting of the subframe

序号	缺陷问题	缺陷模拟图片	产生时间/s	实际零件局部缺陷相片
1	壁厚较大区域处集中缩孔		充型43	
2	上模多处分散热节		充型47	
3	安装孔位置缩孔		充型68	
4	充型卷气造成气孔		充型全过程	

1.3 充型过程工艺设置和孤立液相的模拟

电动汽车副车架低压铸造的生产使用HDTD-800型数字化液面压力控制的低压铸造机,按照充型、增压、保压和减压四个工艺阶段设置了如表2所示的工艺参数。

表2 副车架低压铸造工艺参数设置表
Table 2 Process parameters setting of the low pressure casting of the subframe

参数名称	数值	参数名称	数值
铝合金材质	A356	侧模预热温度	400 ~ 450 ℃
升液管材料	碳化硅	铝液充型速率	65 mm/s
铝液充型温度	(705±10) ℃	增压速率	0.02 × 10 ⁵ Pa/s
上模预热温度	400~450 ℃	保压时间	(180±10) s
下模预热温度	400~450 ℃	冷却凝固时间	(150±10) s

AnyCasting数值模拟过程按照上述参数进行,通过模拟传感器检查特定位置的速度、压力、温度值。提前预判副车架充型、热传导和凝固过程情况,并由传感器的反馈生成缺陷预测云图和数值变化图表,如图3所示。将副车架零件、砂芯和模具各组件的材料种类及物理参数输入AnyCasting,对充型结晶过程的温度传导、充型速度、充型压力和凝固顺序等进行模拟分析^[7]。其中产品凝固完成时间150 s,浇注系统凝固完成时间412 s。

低压铸造金属液充型中砂芯在型腔中所占的体积

越大,则金属液与砂芯之间的热传导作用也越强烈,砂芯吸收削弱的铝液热量和压力也越多。通过模具设计软件可以直接得到砂芯在型腔中所占的体积比为36%,即在副车架上模型腔空间中砂芯就占了36%;这使得充型时金属液必须将大量的热能分配传递给砂芯,温度梯度由此而迅速扩大。造成热节位置增多,凝固过程中产生孤立液相区,引起缩孔、疏松的倾向也随之增大^[8]。充型过程的不同时间段,孤立液相区的预测分析如图4所示。

此外,树脂砂芯与铝液反应生成的气体,与金属液激荡混合形成紊流,由此产生卷气和夹渣等,凝固后则容易产生气孔和冷隔等缺陷。由于形成缺陷的原因较多,所以需要通过如图5所示的AnyCasting组合缺陷和概率缺陷预测功能进行综合性的数值模拟,预测铸件孤立液相、热节和疏松发生情况。并使用反向云图观察充型时金属液封闭区域,以便于规划采取质量改进措施实现预设的凝固顺序。

2 基于数值模拟的副车架凝固质量优化措施

针对电动汽车副车架形状低压铸造的孤立液相、疏松和缩孔等缺陷问题,运用AnyCasting软件进行副车架低压铸造充型数值模拟分析时,重点分析充型过程凝固顺序偏差形成的孤立液相分布区域,铸件壁厚不均匀产生的热节,以及砂芯发气量较大位置产生的卷气等。

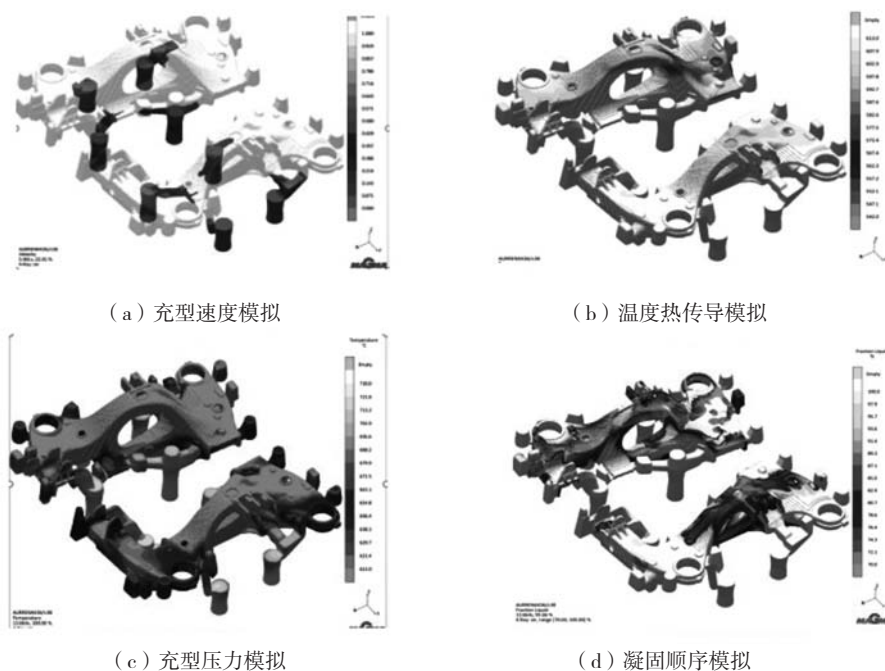


图3 温度传导、充型速度、充型压力和凝固顺序模拟

Fig. 3 Numerical simulation of temperature conduction, filling velocity, filling pressure and solidification sequence for the low pressure casting of the subframe

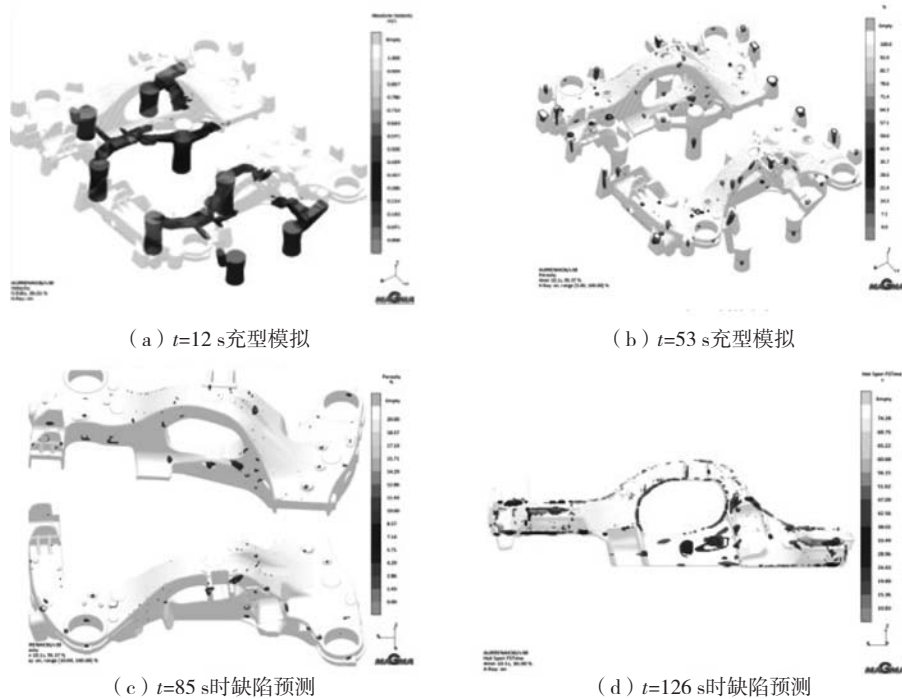


图4 不同充型阶段孤立液相缺陷预测

Fig. 4 Prediction of isolated liquid phase position at different filling stages



(a) 缺陷概率预测参数设置 (b) 组合缺陷预测参数设置

图5 AnyCasting组合缺陷和概率缺陷预测功能

Fig. 5 Combined defects and probabilistic defects prediction function based on AnyCasting

为后续通过规划设计模具冷却水道分布和局部镶件位置选择等优化措施提供依据,并运用AnyCasting在低压铸造模具冷却中的流量智能控制方法,精确计算冷却水管的流量,合理规划铸件各部位的冷却时序控制方法,实现副车架低压铸造预设的凝固顺序。

2.1 模具冷却回路设计及开闭时序控制

由于电动汽车副车架零件形状结构特点,造成了外加压力对零件顶部的补缩效果难以有效,且内部成形的树脂砂芯厚度形状变化多,容易在铸件内部产生

多处散布的孤立液相和热节,使预设的自上而下的凝固顺序难以实现。AnyCasting的智能冷却方案可以调整低压铸造模具局部的冷却先后次序,控制铸件不同部位的凝固顺序。由于副车架大部分成形位置集中于上模型腔内,因此上模的冷却方案对于实现副车架预设的冷却结晶凝固顺序尤为重要^[9]。AnyCasting数值模拟设计中采用了式(1)进行精确的计算:

$$Q=[H/(SL)]^{1/2} \quad (1)$$

式中: H 为水头差(m),压力1 kg相当于水头差10 m; L 为水管长度(m); S 为管道比阻(可根据管道材料种类查表获取)。

经过AnyCasting冷却水路、通水量和水路开关时间等模拟辅助设计,并综合考虑管道沿程压头损失,上、下模冷却回路设计如图6所示。

针对上型腔中13处容易产生分散局部孤立液相的位置,上、下模共设计了3组冷却回路,共6个水冷回路进行循环冷却。同时运用AnyCasting的管道辅助设计功能,对冷却回路的介质选择、开关时序、温度和流量控制等进行了精细化的设计,具体内容如表3所示。

为了实现理想的副车架低压铸造由远至近和自上而下的凝固顺序,上、下模的冷却回路在铝液进入型腔后逐步开启,并依照预定的顺序依次进行冷却至铸件凝固结束。其中冷却系统补缩能力最强的区域应设置在下模,为了更好地发挥连接下模的升液管和浇注系统的后续热量补缩作用,实现预设的凝固顺序,

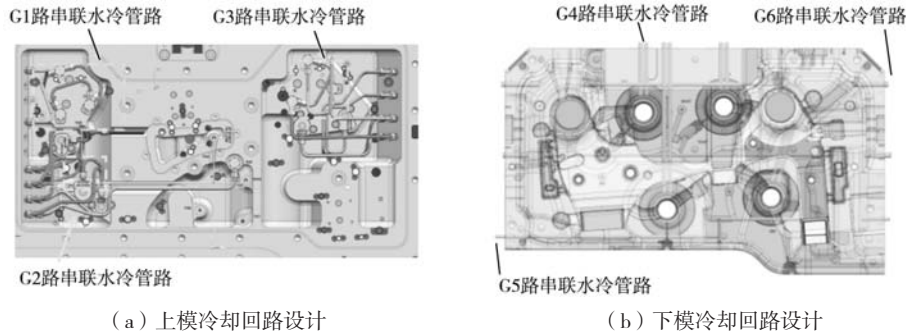


图6 上模、下模冷却回路设计

Fig. 6 Cooling circuit designs of the upper and lower dies

表3 上模、下模冷却时序控制表
Table 3 Cooling sequence control of the upper mold and lower mold

区域	回路编号	流量/(L·s ⁻¹)	开启时间/s	关闭时间/s
上模	G1	1.2	12	62
上模	G1	1.2	12	62
上模	G2	1.3	12	62
上模	G2	1.3	12	62
上模	G3	1.5	30	152
上模	G3	1.5	30	152
下模	G4	2.1	105	152
下模	G4	2.1	105	152
下模	G5	2.1	112	165
下模	G5	2.1	112	165
下模	G6	1.2	142	182
下模	G6	1.2	142	182

下模的冷却循环水路启动时间应适当延迟，同时通过模温机对冷却水的时间和流量进行时序控制，等待上模铝合金基本完成凝固结晶后，再对浇注系统进行冷却，从而实现预设的低压铸造自上而下的凝固顺序^[10]。

2.2 副车架低压铸造冷却时序控制的应用

在低压铸造机控制面板上通过选择输入框用来选择各冷却通道的冷却控制方式，有时间控制和温度控制方式两种可选，时间控制方式按照输入的等待时间和打开时间来控制各冷却通道的开闭。温度控制方式是通过检测模具的实际温度与设定的温度对比，当模具温度高于设定温度时，打开冷却通道，当模具温度低于设定温度时，关闭冷却通道。图7所示为HDTD-800低压铸造机模具压力和冷却温度控制监控操作面板图。

根据副车架的结构特点，左右侧模各选择4个传感器的测点用来进行模具温度检测控制，测点实际温度

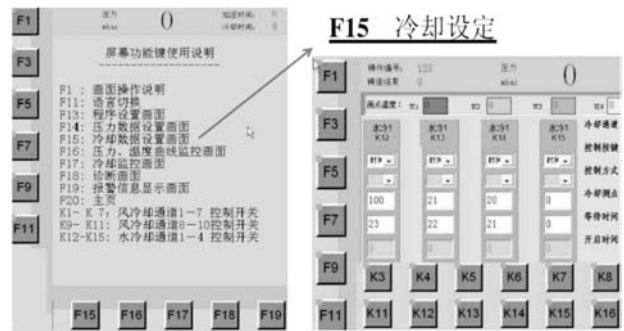


图7 低压铸造机冷却控制设置及监控

Fig. 7 Cooling control setting and monitoring of the low pressure casting machine

高于此值时冷却通道才打开，低于此值时关闭。同时需要配合合理的循环水压力和流量值，取得最佳模具冷却效果，控制副车架铸件凝固结晶的顺序。

3 结论

通过运用AnyCasting软件对副车架低压铸造浇注系统和工艺参数的设计优化实践过程，以及运用数字化控制的低压铸造机冷却温度监控操作功能，调整冷却水管开闭时序，实现充型凝固顺序的质量改进，证明可采用模温机的时序控制冷却回路开闭方法以保证铸件凝固结晶顺序，以及配合冒口、冷却镶件和浇注系统的辅助补缩作用，实现预设的由远至近和自上而下的凝固顺序。除上述工艺优化措施外，还需注意强化树脂砂芯的烘干工艺质量控制，尽量减少充型时树脂砂芯与高温铝合金液体接触所产生的气体量。具体生产中还需要通过CAE智能模拟和生产实践的不断应用总结，才能产生更成熟和系列化的工艺技术，并覆盖副车架的不同种类，满足新能源电动汽车副车架的大批量生产需要。

参考文献:

- [1] 梁秋华, 韩伟, 黄凌森, 等. 水冷机壳低压铸造凝固过程数值模拟及工艺优化 [J]. 铸造, 2019, 68 (4): 353-358.
- [2] 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.
- [3] 朱洪军. 基于AnyCasting缸盖罩盖压铸工艺研究 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 248-252.
- [4] 张明珠, 程云, 胡光山, 等. 低压铸造铝合金后副车架的组织与性能 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (3): 283-286.
- [5] 蒲生, 邢世雄. 基于AnyCasting的叶轮铸造模拟及工艺设计优化 [J]. 制造技术与机床, 2021 (11): 27-31.
- [6] 舒樱, 杜航, 张吉祥, 等. 基于AnyCasting的挤压铸造铝合金机座工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (1): 46-49.
- [7] 杨闯, 苏小平, 周大双, 等. 铝合金悬架摆臂低压铸造数值模拟与工艺优化 [J]. 铸造技术, 2021, 42 (05): 371-374+382.
- [8] 陈川川, 苏小平, 符继麟. 铝合金转向节低压铸造数值模拟与工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (1): 61-64+67.
- [9] 刘楚生, 韩伟, 陈晓斌, 等. 电动机机壳低压铸造模温系统设计 [J]. 现代制造工程, 2019 (6): 103-106.
- [10] 侯丽彬, 刘海影. 发动机下缸体CAE收缩缺陷分析及模具型腔冷却设计 [J]. 铸造, 2022, 71 (3): 287-290.

Research on Solidification Quality Optimization of Low Pressure Casting of Electric Vehicles Aluminum Alloy Subframe

HAN Wei¹, LI Dong-dong¹, YANG An², CHEN Xiao-bin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 510800, Guangdong, China; 2. Guizhou Lanhui New Material Co., Ltd., Zunyi 563000, Guizhou, China)

Abstract:

To deal with the defects such as isolated liquid phase, hot spot and dispersed shrinkage in low-pressure casting of electric vehicle subframe caused by compact structure, non-uniform wall thickness, complex shape of spiral sand core and large volume proportion of sand core, AnyCasting software was used to simulate and analyze the influences of temperature, pressure and mold structure on solidification and crystallization quality of the low-pressure casting of sub frame. The occurrence of isolated liquid phase, hot spot and dispersed shrinkage of castings can be predicted by comprehensive numerical simulation with combined defect and probabilistic defect prediction function. Study the intelligent control method of AnyCasting in low-pressure casting mold cooling, and explore how to adjust the cooling solidification sequence of aluminum alloy by using the opening and closing sequence of cooling water pipes, so as to improve the internal structure and molding density of the subframe castings and the production quality of the low-pressure casting.

Key words:

low pressure casting; casting process; quality control; solidification sequence
