

薄壁转向电机壳体压铸件厚壁处缩孔缺陷控制

计鑫^{1,2}, 刘立君², 贾志欣², 李继强², 廖大华³, 方杰³

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 浙江宁波 315600; 2. 浙大宁波理工学院机电与能源动力学院, 浙江宁波 315600; 3. 宁波众鑫里美科技有限公司, 浙江宁波 315600)

摘要: 针对薄壁转向电机壳体压铸件在安装耳厚壁结构处出现的缩孔缺陷进行了控制研究。通过应用铸造模拟软件ProCAST对零件的铸造工艺进行了CAE模拟仿真, 发现了铸造过程中的孤立液相区和模具型腔热节问题, 并进行了深入分析, 设计了相应的浇注系统优化和冷却系统改进方案。结合模拟分析和实际生产结果, 最终采用了增加辅助浇道和合理分布冷却水道的优化方案, 显著提高了压铸过程的可控性和稳定性, 降低了产品缺陷率, 大幅提高了生产效益。通过改善液态金属的流动性并实现均匀冷却, 为解决类似制造过程中高质量压铸件的缩孔问题提供了可行且可持续的解决方案。

关键词: 压铸; 缩孔缺陷; 辅助浇道; 孤立液相区

电动助力转向系统凭借其机构简单、操作灵活、效率高和低成本等优点成为主流助力转向系统。新能源汽车EPS电机壳体铸件是整个电动助力转向系统的关键零部件, 电机壳体属于薄壁类壳体零件, 该类零件质量的好坏取决于压铸模具设计和浇注系统设计等是否合理^[1]。

压铸模拟技术已经开始广泛应用, 数值模拟为铝合金压铸件的前期改善提供了有力的保证, 在铝液的充型过程、气压、流态和交汇位置都有直观显示, 为改善浇注方式提供了有力的依据; 同时数值模拟为缺陷改善提供了良好的参考方向, 缩短了产品开发时间; 经过对电机壳压铸产品缺陷种类及位置的统计, 识别出主要的缺陷, 针对主要的缺陷进行专题改善, 可以集中力量改善工艺方面的问题^[2]。贾志欣等针对复杂的壳体零件, 分析其压铸件的特点, 基于应用铸造软件ProCAST对流动充型、压铸模具热平衡和温度场进行了模拟分析, 为该模具浇注系统和冷却系统设计合理性做了验证, 为压铸模具设计提供了支撑^[3]。

浇注系统是金属液充型的通道, 同时还要保证铸型中金属液凝固发生体积收缩后能进行有效的补缩, 浇注系统的设计决定了凝固过程中金属的流向, 直接影响铸件的成形与补缩, 因而良好的浇注系统设计是获得优质铸件的先决条件^[4-5]。辅助浇道的主要目的是为了优化金属液体的流动和补充, 以减少或防止缩孔缺陷的产生。辅助浇道在特定位置引导金属液体, 有助于提供足够的补充金属液体, 特别是对于那些容易形成孤立液相区的区域。

薄壁壳体零件的压铸工艺性较差, 壁厚不均, 导致了压铸模的温度控制问题愈发难以解决, 而压铸模的温度控制对金属液的充填、凝固过程以及压铸模使用寿命和产品质量的稳定性具有重大影响。模具温度的不平衡, 会导致铸件出现缩孔、缩松或变形等缺陷, 而且模具容易出现龟裂, 使用寿命大幅缩短^[6-7]。

本文旨在研究通过改进浇注系统的设计和优化水道分布, 实现高压铸造过程中温度均匀性的提高, 减少孤立液相区的形成。同时, 通过优化凝固过程, 控制收缩速度, 以降低缩孔缺陷的发生概率。通过这两方面的优化, 期望能够提高铸件质

作者简介:

计鑫(1998-), 男, 硕士生, 主要研究方向为铝合金压铸工艺CAE优化。E-mail: 862963183@qq.com

通信作者:

刘立君, 男, 博士, 教授, 硕士研究生导师。E-mail: 888liulijun@163.com

中图分类号: TG244

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2025)01-0098-10

基金项目: 宁波市北仑区关键核心技术攻关项目(2022BLG008); 宁波创新联合体项目(2022H001)。收稿日期:

2024-04-01 收到初稿, 2024-05-16 收到修订稿。

量,降低废品率。

1 薄壁转向电机壳体铸件缺陷的检测与分析

本文研究的铝合金薄壁转向电机壳体实际生产压铸件如图1所示,铸件主体为圆柱形,体积约为 $0.186 \times 10^{-3} \text{ m}^3$,质量为0.503 kg。壳体零件整体厚度

较薄,铸件的平均壁厚约为4 mm,最大壁厚处达到19 mm,其壁厚分布存在不均匀现象。

图1(a)和图1(b)中标注处为安装耳厚壁位置,后期机加工过程中需要进行螺纹加工,以实现装配中连接和承载的工作任务,为保证其强度和数量要求,该压铸件需要达到内部孔洞缺陷最大尺寸 $\Phi 0.4 \text{ mm}$ 、间距8 mm以上的标准。

采用初始压铸方案进行试生产,并对薄壁转向电



(a) 薄壁电机壳体铸件

(b) 安装耳结构处

图1 压铸生产壳体零件

Fig. 1 Die casting production of housing parts

机壳体铸件进行X射线局部探伤,观测结果如图2所示。图中高亮白色光点及丝状光斑为铸件缩孔和缩松缺陷,可以比较直观地看到A处、B处、C处、D处均存在不同程度的缩孔和缩松缺陷。A处和B处有数量较多且范围大但均为细小的缺陷存在。D处情况较为类似,也存在相同程度的缺陷,但缺陷间距小,整体范围小。C处表现出相连的缺陷状况,存在明显的缩孔缺陷。四处缩孔缺陷的产生直接导致零件的强度减弱,在装配及工作过程中,零件在受到额外应力的过程中,缩孔会成为裂纹的起点,产生失效,不满足零件的性能要求。

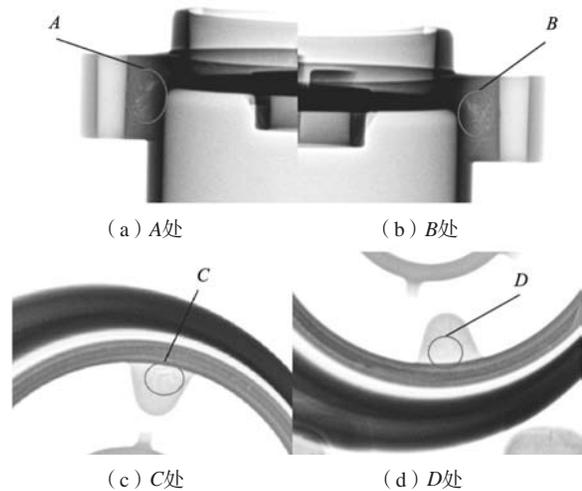


图2 铸件局部探伤图

Fig. 2 Partial flaw detection picture of casting

2 孤立液相区的问题分析

2.1 凝固过程分析

原始方案的浇注系统下铸件完全凝固时间为19.56 s,如图3(e)所示。图3(a)至图3(d)为铸件各个阶段凝固情况,在凝固度达到20%时,由于电机壳体部分为薄壁曲面散热快,凝固速度快,溢流槽、横浇道并没有凝固,可以进行有效的补缩作用;当凝固度达到40%时,远离浇道侧凝固,内浇口凝固,浇注系统起到的补缩作用结束;当凝固度达到60%时,壳体主体部分凝固,但安装耳区域由于壁厚原因仍未完全凝固,属于固液共存状态,此处极易出现孤立液相区;

当凝固度达到80%时,铸件完全凝固,其中剩余红色区域为合金液压室部分,在连续压铸模拟中默认不凝固。

在凝固率为70%时,采用切片功能查看安装耳厚壁处的凝固情况如图4所示。该区域的固相率低于30%,形成了孤立液相区,原因是浇注系统对于该区域的补缩不足,导致出现缩孔缺陷。

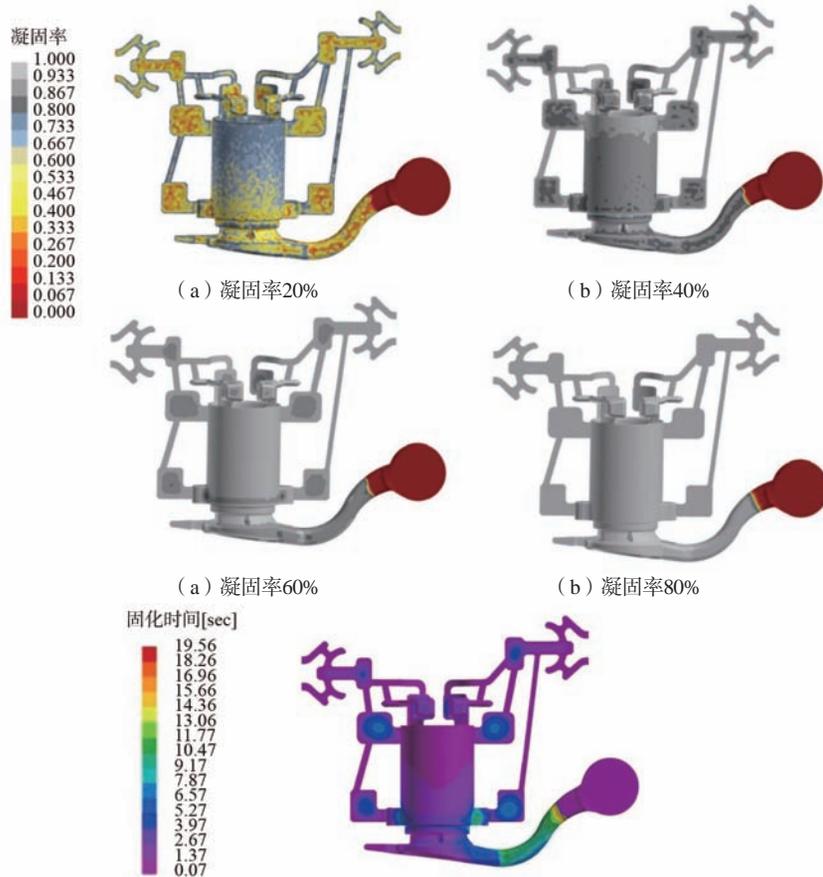


图3 原始方案凝固过程仿真结果

Fig. 3 Simulation results of the solidification process of the original solution

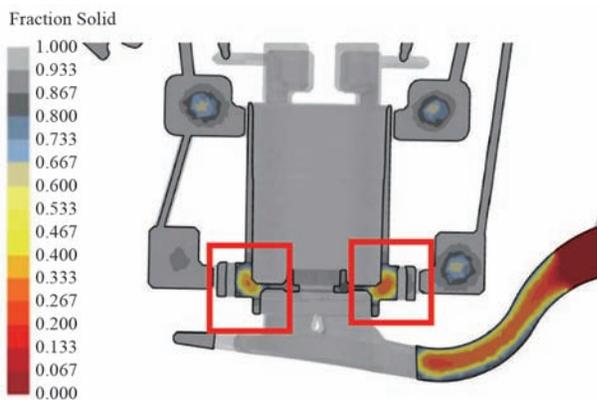


图4 凝固率为70%时铸件内部凝固

Fig. 4 The interior of the casting solidifies at a solidification rate of 70%

2.2 初始浇注系统分析

原浇注系统如图5所示, 浇注系统在金属液注入的整个过程中, 虽然内浇口被设置在距离厚壁结构较近的位置, 旨在向铸件的厚壁区域引导金属液, 但在实际浇注过程中, 这种设计常常面临一系列的结构限制, 如图5(b)位置安装耳和壳体主体存在阶梯结构, 会严重阻碍金属液的顺畅流动, 金属液大致流向

如图中红色虚线所示。更重要的是, 由于厚壁部分的存在, 金属液在这一区域的凝固速度相对较慢, 这导致了一种特殊情况: 无法依赖通常的自补缩机制来弥补液态金属的收缩。所以需要改进浇注系统结构, 改善金属液在充型阶段的流态, 提高其增压阶段的补缩作用。

2.3 初始模具冷却系统分析

铝合金高压铸造中冷却系统不足或不合理设计也可能导致孤立液相区的出现。冷却系统的设计和性能对于铸造过程中的温度分布和固相化过程至关重要^[8], 直接影响着孤立液相区的形成。其实温度梯度不均匀和局部冷却不足都会导致孤立液相区形成。

原冷却系统如图6所示, 原水道在分布上呈现不均匀覆盖, 很明显从冷却线到模腔表面的距离是不同的, 且安装耳厚壁结构区域离冷却线的距离 L 过大, 这导致了成形零件的冷却不均匀。结合图7所示的在模具热平衡后原始冷却系统下的上下模具在铸件取出后、喷涂料前的温度分布图, 可以看出, 厚壁处的模具型腔局部过热, 如图7(b)中红圈区域所示, 最高至 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并且模具型腔内各部分之间温差过大, 跨度为



图5 原始方案的浇注系统结构

Fig. 5 The structure of the pouring system of the original plan

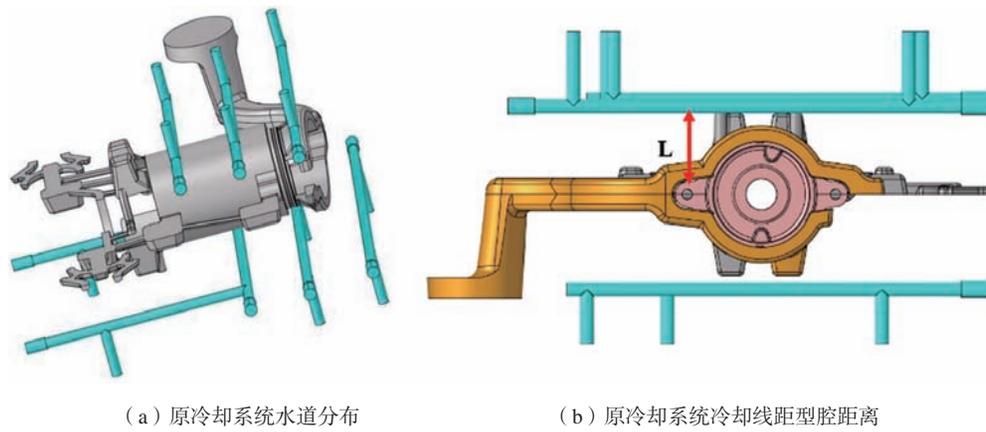
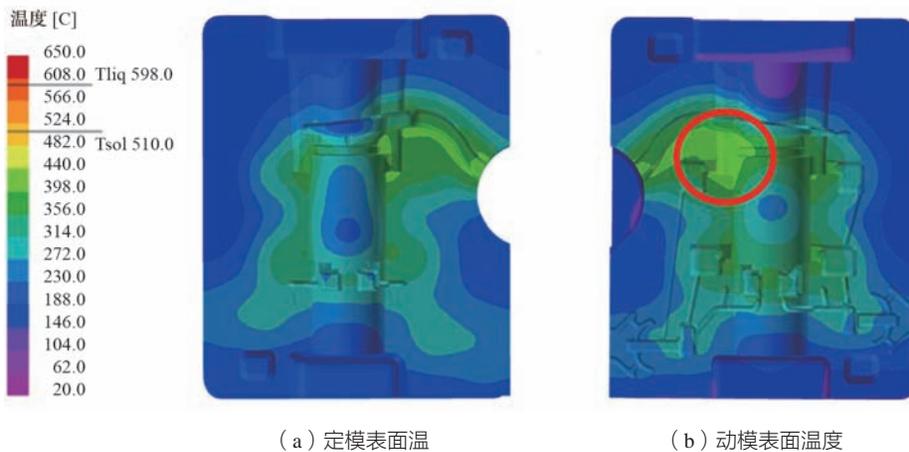


图6 原始冷却系统水道分布

Fig. 6 Original cooling system water channel distribution



(a) 定模表面温

(b) 动模表面温度

图7 原始冷却系统下模具温度分析

Fig. 7 Mold temperature analysis under original cooling system

265~450 °C，这通常表明冷却系统的设计存在不合理之处。这种现象反映了冷却系统未能有效地控制整个铸造过程中的温度分布，对铸件和模具都造成了潜在的问题。

3 优化方案

3.1 浇注系统的改进方案

杨曼利等通过移动内浇口的位置和调整其大小来

优化铸造工艺^[9]，起到了稳定铸件质量的效果。内浇口位置调整方法通常涉及将内浇口移动以改变液态金属的流动路径，来减少缩孔问题。然而，这种传统方法在本文电机壳体的结构限制而不适用，因为电机壳体外凸安装耳的结构，导致移动内浇口对于解决安装耳厚壁处的缺陷不够有效。

本文基于电机壳体阶梯安装耳的结构通过在厚壁区域添加内浇口如图8所示，增加图8中A和B两个辅

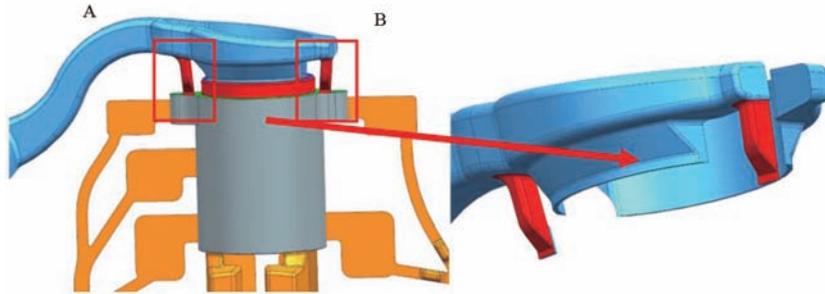


图8 改进方案的浇注系统结构
Fig. 8 Improved scheme of pouring system structure

助浇道，来优化铝合金高压铸造过程。以实现改善温度均匀性，减少温度梯度，从而降低缩孔风险，促进液态金属的均匀充填，减少液态金属在厚壁区域的滞留，降低缩孔发生的可能性，改善凝固速度，调整凝固行为。

3.2 水道优化方案的制定与实施

根据周涛等关于冷却水道的设计思路结合电机壳体生产及仿真结果^[10]，得到适用于电机壳体铸件的设计原则：

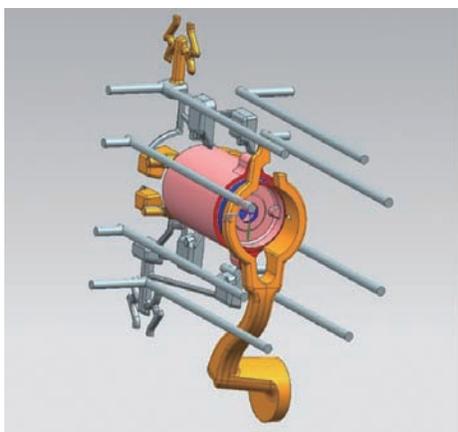
- (1) 在温度最高和热量集中的部位设置冷却水道，使模具达到热平衡。
- (2) 冷却水道应该从温度高的部位流向温度低的部位，以保持模具热平衡。
- (3) 冷却水道与型腔表面的距离要适中，冷却水

道与型腔的距离一般大于19 mm，冷却水道与其他结构的距离也要兼顾模具结构强度。

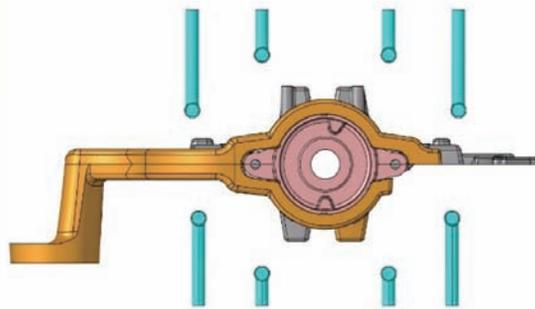
(4) 冷却水道的直径推荐值为7.9~14.7 mm。直径小和内壁粗糙的水道更容易形成紊流以带走更多热量。

(5) 冷却水道设置疏密程度需根据各部位的热量来灵活调整，同时要注意动和定模具的温度差异防止因温度不均、冷却收缩不一致导致的模具变形。

水道优化方案如图9所示，改进后的冷却系统中水道中心距离铸件型腔50 mm，具有10 mm的直径，并且均匀分布在铸件的圆筒结构外形上。水道位置设定在距离铸件型腔较近的位置，以确保液态金属能够快速且有效地填充到铸件的关键部位。这有助于避免空洞和缩孔等缺陷的形成，提高铸件的密度和均匀性。选择了较小直径的水道，以控制流速和温度梯度。



(a) 优化冷却系统水道分布



(b) 优化冷却系统冷却线距型腔距离

图9 改进方案冷却系统水道分布
Fig. 9 Improvement plan cooling system water channel distribution

如图10仿真结果所示，改进后的设计使得上下模具在在铸件取出后和喷涂料前的模具型腔面温度控制更加合理，温差控制到80℃上下，温差明显减小，原本热节问题区域得到有效控制，有助于减小铸件内部

温度梯度，还可以防止过早凝固和冷却不足的问题，从而提高铸件的温度均匀性。

在基于冷却系统改进方案下进行薄壁转向电机壳体零件压铸的数值模拟，并利用缩孔缺陷预测功能对

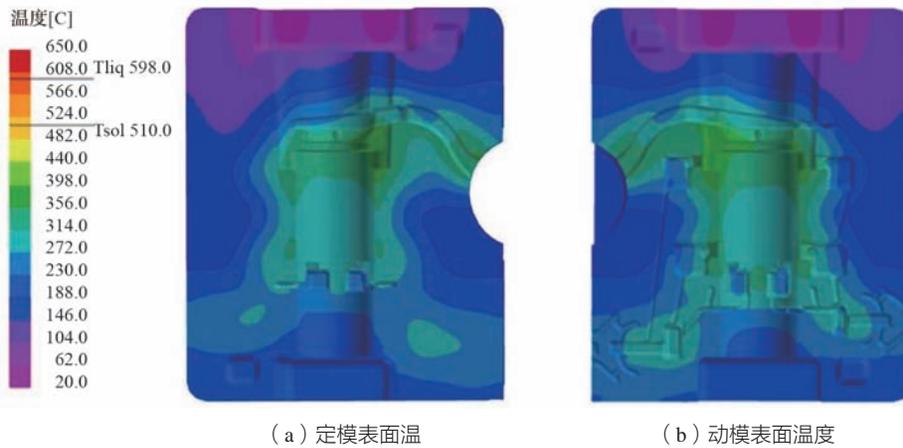


图10 改进方案模具温度分析

Fig. 10 Improvement plan mold temperature analysis

改进方案下压铸件内部缺陷进行预测，如图11（b）所示；对比原压铸工艺下缩孔缺陷预测，如图11（a）所示；可以发现，冷却系统解决了壳体厚壁处热节问题

所造成的缩孔缺陷，使铸件内部大部分缩孔缺陷得到控制。

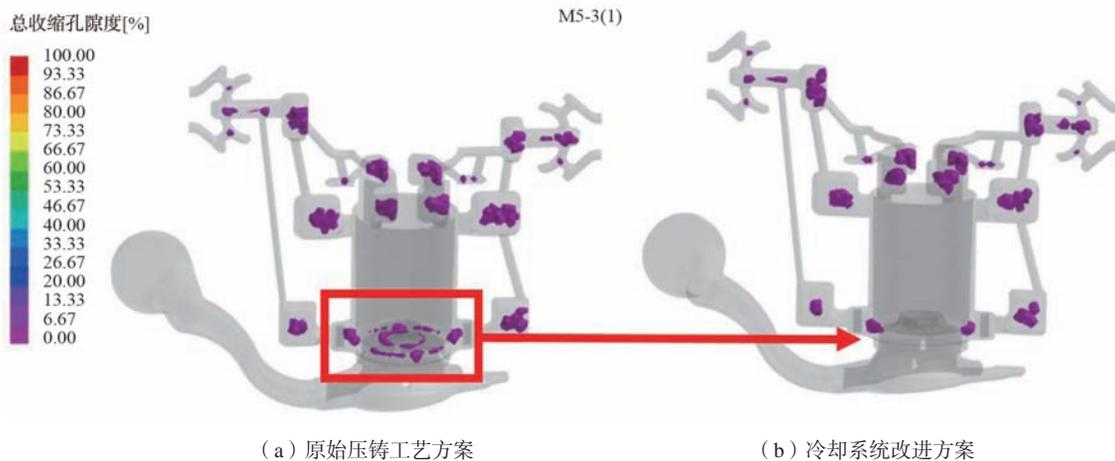


图11 冷却系统改进前后铸件缩孔缺陷预测对比

Fig. 11 Casting shrinkage defect prediction comparison before and after Cooling system improvement

4 优化结果与效果评估

4.1 优化后仿真软件 PROCAST 的结果分析

模具优化后，在各个凝固阶段铸件内部温度表现的仿真结果如图12所示，改进后的浇注系统优化了液态金属的流动、充填和凝固行为。其中，最显著的效果之一是实现凝固控制和温度梯度的精确控制。不论是在铸件凝固20%、40%、60%还是80%，铸件内部不同部位的温度差异大大减小。

分别在凝固率为40%和70%时，采用切片功能查看缺陷出现区域的凝固情况，如图13和图14所示。凝固率为40%时可以看到，相比于原浇注系统，增加的两个辅助浇道，如图13（b）所示。辅助浇道增加了液态金属的供应量，延迟了内浇道区域的凝固开始时间，使

铸件厚壁处得到了充分的补缩，解决了内浇道远早于铸件厚壁处凝固导致补缩不足问题。凝固率为70%时，该区域的固相率高于临界补缩固相率30%，且表现出了出色的凝固状态，如图14（b）所示，解决了孤立液相区问题，降低了缩孔缺陷的产生可能性。

高压铸造过程中，切沃里诺夫热模量描述了金属液在温度变化下的热应变能力。而热应力是由于温度变化而引起的材料内部或表面的应力。在温度变化时，切沃里诺夫热模量较高的金属液能够更好地适应温度变化，减少形变，相应地，金属液内部受到的热应力也会相对较小。而热应力的降低可以减少缩孔的形成，改善铸件的密实性和质量。

利用数值模拟仿真软件对于压铸过程中各部分

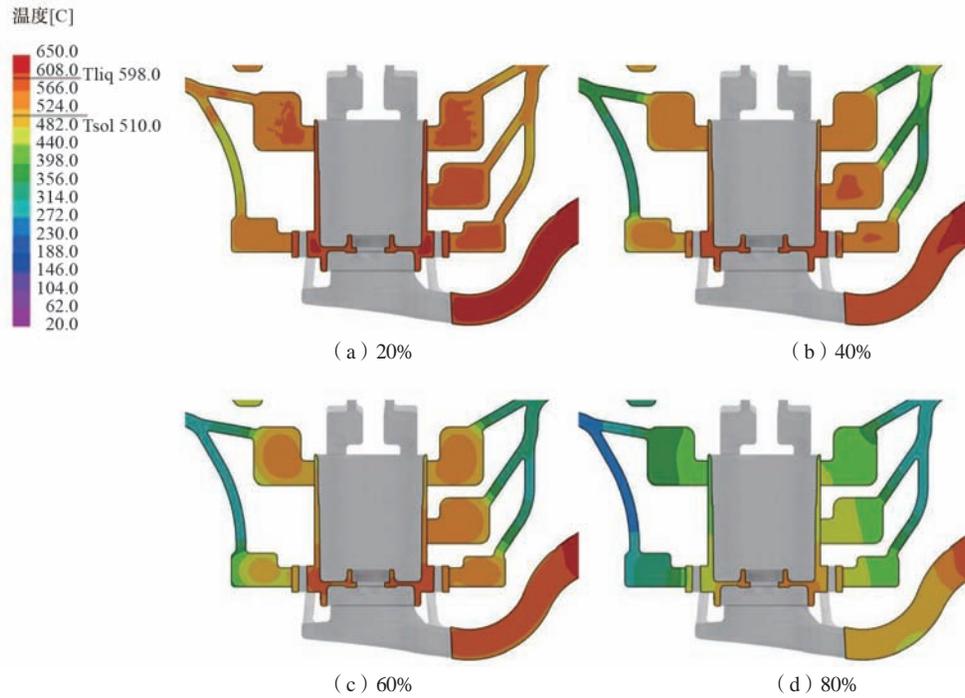
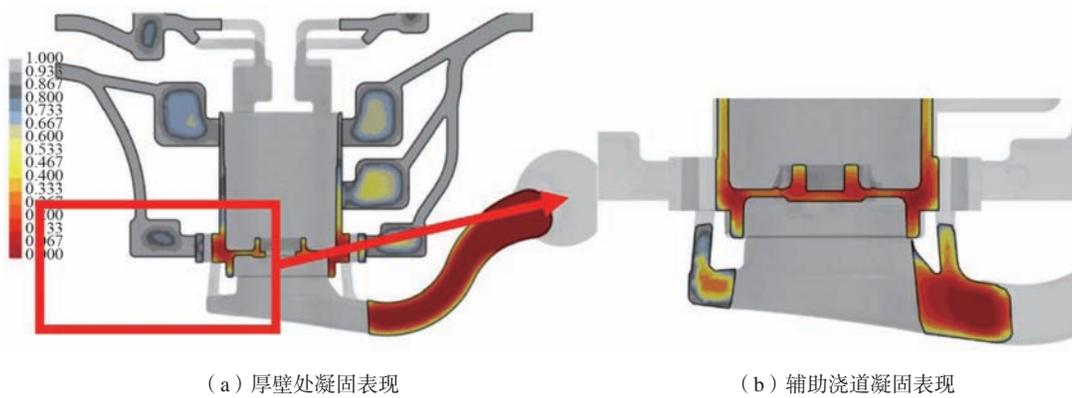


图12 改进方案后, 各个凝固阶段铸件内部温度分布

Fig. 12 Improvement plan internal temperature distribution of castings at each solidification stage

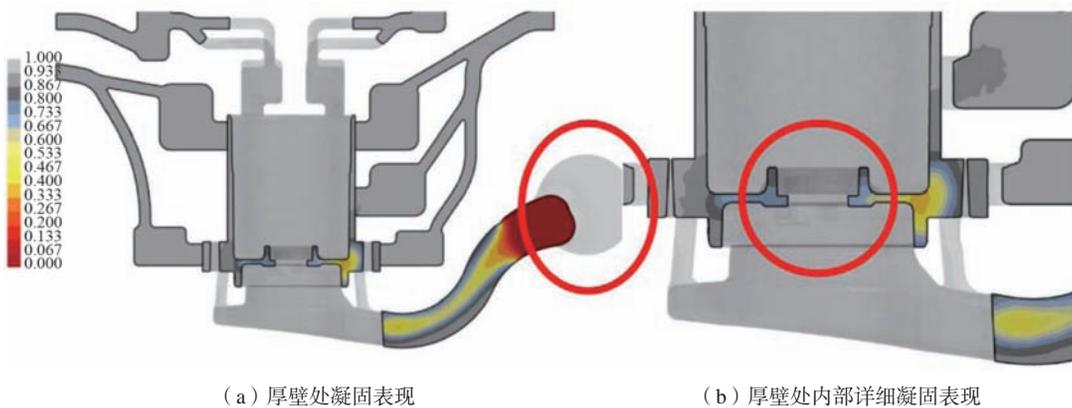


(a) 厚壁处凝固表现

(b) 辅助浇道凝固表现

图13 总体凝固率40%时铸件凝固表现

Fig. 13 Solidification performance of castings when the overall solidification rate is 40%



(a) 厚壁处凝固表现

(b) 厚壁处内部详细凝固表现

图14 总体凝固率70%时厚壁处凝固表现

Fig. 14 Solidification performance at thick wall when overall solidification rate is 70%

的切沃里诺夫热模量数值进行模拟，优化方案前后热模量表现如图15所示。对比图15 (a) 和15 (b) 中金属液整体热模量表现，可以发现优化方案下壳体铸件的热模量得到大幅提升，尤其是挂耳厚壁处热模量值提升到2.417 cm。对壳体挂耳厚壁处进行切片截面进行内部分析，优化方案前后厚壁处热模量表现如图16和图17所示，发现铸件缩孔缺陷区域的热模量得到了提高，减少了在冷却过程中产生的热应力，降低了铸

件内部的应力集中程度，减少了缩孔缺陷的形成可能性。

同样，利用ProCAST软件的缩孔预测功能Total Shrinkage Porosity对凝固完成的压铸件进行预测。设置Procast软件宏观缩孔判据，缩孔率在1.0%以下的部位将被视为微观缩孔，在缩孔缩松预测图中不予显示。改进方案铸件的缩孔预测如图18 (b) 所示，对比图18 (a) 原始方案下的缩孔预测图，可以看到铸件主要缩

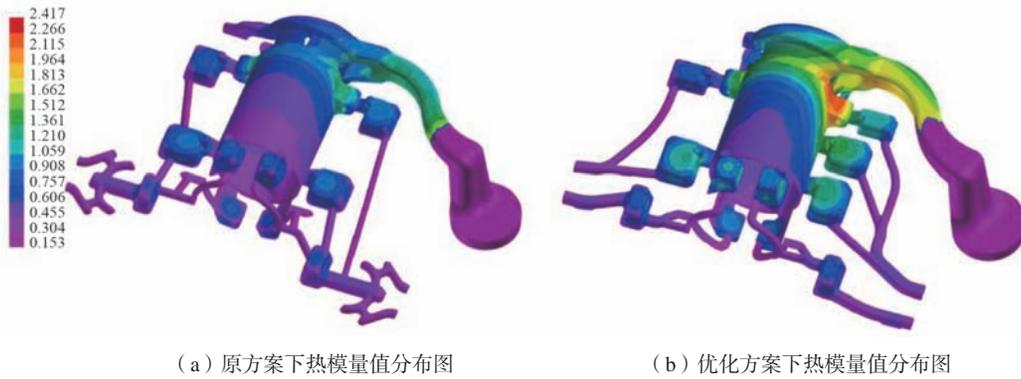


图15 金属液整体热模量值分布

Fig. 15 Distribution of overall thermal modulus values of molten metal

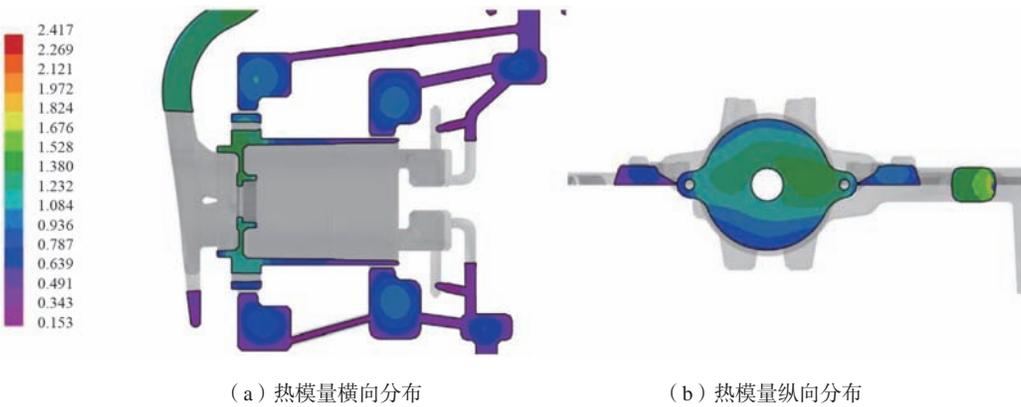


图16 原方案下挂耳处切片热模量分布

Fig. 16 Thermal modulus distribution of slices at the hanging ears under the original plan

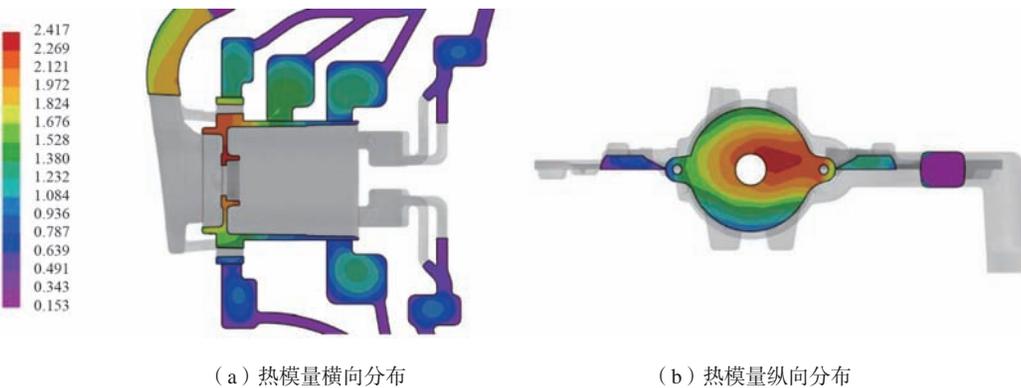


图17 优化方案下挂耳处切片热模量分布

Fig. 17 Thermal modulus distribution of slices at the mounting ears under the optimized scheme

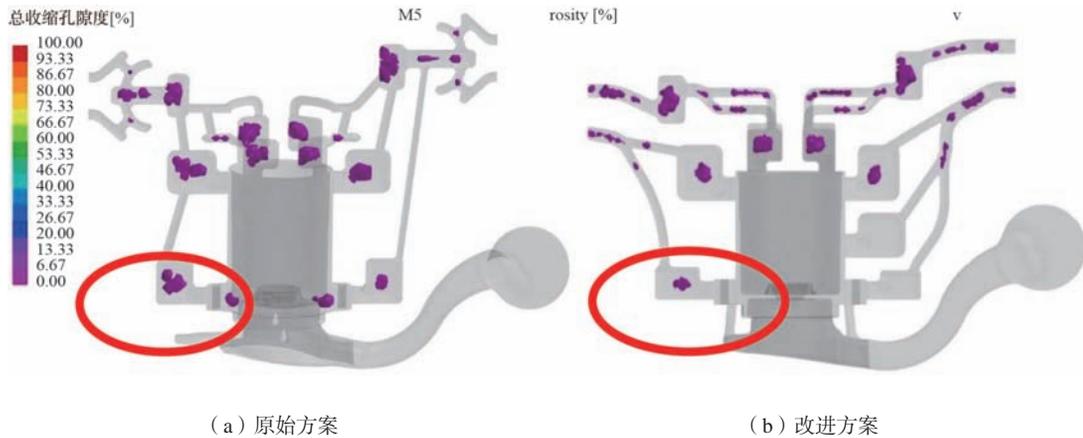


图18 铸件缩孔缺陷对比

Fig. 18 Comparison of shrinkage cavity defects in castings

孔分布在薄壁圆筒侧的厚壁孔洞结构处以及厚壁处的缩孔得以消除, 改进方案下所有的缩孔缺陷都被定位在渣包中, 而铸件内部没有出现缩松、缩孔等缺陷, 说明优化方案效果显著。

4.2 优化后电机壳体压铸生产试验及分析

通过实际批量生产, 实际生产铸件如图19 (a) 所示, 增加的辅助浇道在实际压铸中如图19 (b) 所示。

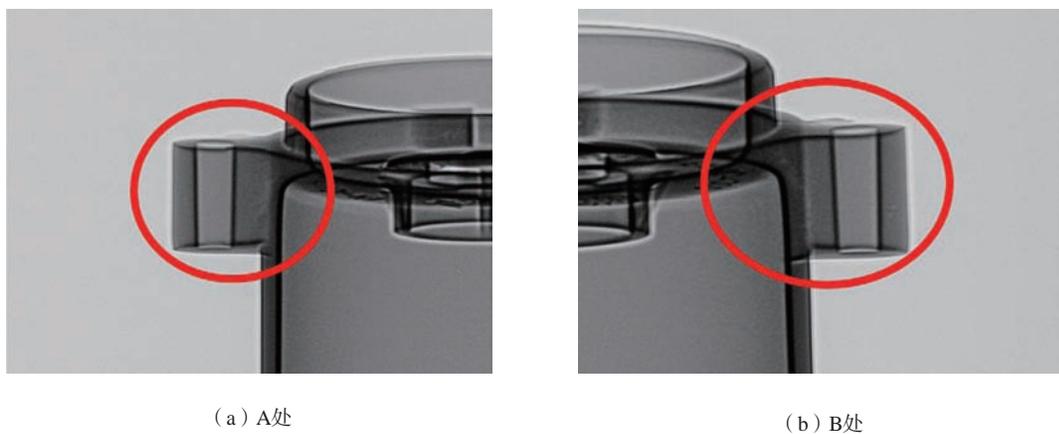
压铸件X探伤结果如图20所示, 对比图2可以看出, 优化方案铸件探伤图中不存在白色高亮信号区



(a) 薄壁转向电机壳体铸件 (b) 辅助浇道

图19 优化方案下压铸生产铸件

Fig. 19 Die casting production of castings under optimized scheme



(a) A处

(b) B处

图20 改进方案下生产铸件X射线探伤图

Fig. 20 X-ray flaw detection chart of castings produced under the improved plan

域, 直径极小的光点之间距离远, 无成片光点信号存在, 说明薄壁转向电机壳体两侧安装耳厚壁区域内缩孔缺陷有明显改善。铸件内部无缩孔缺陷, 实际生产铸件的探伤结果合格, 该部位的缩孔缺陷已基本消除, 提高了产品的质量和性能, 确保其功能和可靠性。

5 结论

根据凝固过程仿真, 分析出缩孔缺陷产生原因, 改进浇注系统。根据仿真结果中模温的表现分析, 找出热节区域, 优化冷却水道, 结合X射线探伤结果, 完成问题区域缩孔缺陷的控制。得到以下结论:

(1) 基于ProCAST仿真软件对凝固场和温度场的

模拟,能准确预测缩孔缺陷产生原因。分析到铸件凝固顺序不合理,内浇口过早凝固,安装耳厚壁区域得不到内浇口补缩,形成孤立液相区。

(2)在原浇注系统基础上,通过增加辅助浇道,有效改善金属液的流态,保持凝固过程中内浇口畅通,解决了厚壁处孤立液相区形成以及补缩不足问题。

(3)根据电机壳体腔圆筒结构,沿型腔进行水道位置分布,优化冷却线,模具热节区域得到控制,

温度梯度减小。

(4)通过增加辅助浇道和优化冷却系统,可以间接提高金属液内部的热模量。这样的改进能够改善铸件的填充性能、减少热应力、增加材料的稳定性,进而提高铸件的质量和性能。

(5)通过对比增加了辅助浇道和调整了冷却系统两个方案缩孔缺陷预测结果,发现调整冷却系统对于铸件厚壁周围微小及小缩孔控制作用显著,而辅助浇道的添加则对厚壁内部中大直径缩孔起到消除作用。

参考文献:

- [1] HUANG M, ZHOU Q, WANG J, et al. Die casting die design and process optimization of aluminum alloy gearbox shell [J]. *Materials*, 2021, 14 (14): 103390
- [2] 安肇勇, 黄志垣, 闫锋, 等. 精密铸造铝合金电机壳体的开发 [J]. *铸造设备与工艺*, 2020 (2): 25-28.
- [3] 贾志欣, 王子平, 李继强, 等. 基于CAE分析的复杂壳体压铸模具设计 [J]. *铸造*, 2020, 69 (8): 873-877.
- [4] 郭潇群. 铝合金浇注系统及补缩系统设计与软件开发 [D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [5] 兰天池. 铝合金压铸成型缺陷控制的研究 [D]. 成都: 西华大学, 2020.
- [6] 陈国恩, 汪学阳, 黄志垣, 等. 压铸模具温度场的CAE模拟分析 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2018, 38 (3): 271-273.
- [7] 张孝元, 王孝国, 杨光印. 基于ProCAST的压铸壳制造工艺设计及优化 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2022, 42: 823-826.
- [8] PANCHOLI J K, PADHIYAR B, SUTARIYA V, et al. Design and analysis of die casting die with conformal cooling channel [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2019, 9 (3): 20168-20170.
- [9] 杨曼利, 姚雷, 刘浩然, 等. 内浇道引入位置对铸件内在质量的影响 [J]. *铸造技术*, 2014, 35 (10): 2425-2427.
- [10] 周涛. 基于ProCAST的铝合金凸轮轴盖压铸模具结构及工艺优化 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.

Control of Shrinkages in Thick Walls of Thin-Wall Steering Motor Housing Die-Casting Parts

Ji Xin^{1,2}, Liu Li-jun², Jia Zhi-xin², Li Ji-qiang², Liao Da-hua³, Fang Jie³

(1.School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Ningbo 315600, Zhejiang, China;

2.School of Mechatronics and Energy Power, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315600, Zhejiang, China;

3.Ningbo Zhong Xin Lean Technology Co., Ltd., Ningbo 315600, Zhejiang, China)

Abstract:

This paper conducted a study on the control of shrinkage defects that occur in the mounting lug structure of thin-walled steering motor housing die-casting parts. The casting simulation software ProCAST was used to perform CAE simulation on the casting process of the parts. Based on the simulation results, the problems of isolated liquid phase areas and hot spots in the mold cavity during the casting process were discovered and analyzed in depth. In order to solve these problems, corresponding gating system optimization and cooling system improvement plans were designed. Combining simulation analysis and actual production results, an optimization plan was finally adopted to add auxiliary sprues and reasonably distribute cooling water channels. This solution significantly improves the controllability and stability of the die-casting process, reduces the product defect rate, and thus significantly improved production efficiency. By improving the fluidity of liquid metal and achieving uniform cooling, it provided a feasible and sustainable solution to the shrinkage problem of high-quality die castings in similar manufacturing processes.

Key words:

die casting; shrinkage defect; auxiliary runner; isolated liquid phase region