

水泵压铸件水冷镶块水道数值模拟与优化设计

龚琛普¹ 龚海军¹ 卢红林² 宋 鹏¹ 刘晓龙¹

(1. 重庆交通大学机电与车辆工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆东科模具制造有限公司, 重庆 401320)

摘要 由于水泵压铸件镶块的深腔顶部有两个内浇口, 高温金属液的高速流入可能会导致铸件损伤, 进而缩短其使用寿命。为了避免问题发生, 在镶块内部增设两种冷却水道方案(传统冷却水道和随形冷却水道)来降低镶块深腔顶部温度, 减少疏松缩孔缺陷产生几率。用ProCAST软件模拟铸件充型凝固过程, 并对比结果参数(凝固过程表面平均温度、最终凝固时间、疏松缩孔体积及发生平均概率)。结果表明, 随形冷却水道能够加快铸件的凝固速度, 其贴合铸件形状的特性使温度更低且温度分布更均匀, 而且相对于传统冷却直道, 更能避免疏松缩孔缺陷的发生, 提高铸件质量。

关键词 压力铸造; 数值模拟; 随形冷却水道; 铸造缺陷

中图分类号 TG249.2; TP311

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.Y20240029

Numerical Simulation and Optimization Design of Water-cooled Insert Waterway of Water Pump Die Casting

GONG Chenpu¹, GONG Haijun¹, LU Honglin², SONG Peng¹, LIU Xiaolong¹

(1. School of Mechatromechanical and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074;
2. Chongqing Dongke Mould Manufacturing Co., Ltd., Chongqing 401320)

Abstract: Due to the fact that there exist two ingates at the top of the deep cavity of the water pump die casting insert, the high velocity inflow of hot molten metal can cause damage to the casting, thus shortening service life. In order to avoid the problems, different cooling water solutions (traditional cooling channel and conformal cooling channel) were added inside the insert to reduce temperature at the top of deep cavity of the insert and the possibility of shrinkage porosities and cavities. ProCAST software was utilized to simulate the filling and solidification process of castings, and the resulting parameters (average surface temperature, time to solidus, volume and average occurrence probability of shrinkage porosities and cavities) were compared. The results reveal that the conformal cooling channel can accelerate the solidification speed of casting, and the characteristics of fitting the casting shape lead to the lower temperature and uniform temperature distribution, while occurrence of porosities and cavities is reduced compared with the traditional cooling straight channel, improving the quality of the casting.

Key Words: Pressure Casting, Numerical Simulation, Conformal Cooling Channel, Casting Defects

压铸是获得高精度和低表面粗糙度铝合金铸件的一种高效成形方法,但在压铸件中常出现缩孔、疏松和夹杂等缺陷,极大降低了铸件的力学性能^[1-2]。常用于压铸的ADC12铝合金为Al-Si-Cu系铝合金,合金中Cu作为强化元素,能固溶于铝基体中或形成合金相(主要是Al₂Cu相和Al₅Cu₂Mg₈Si₆相)^[3]。材料凝固具有较宽的温度区间,在内部晶核形成的同时枝晶生长,形成孤立液相区,这些液相区最终易形成分散的疏松缩孔缺陷。在外部其凝固温度的不一致,易导致材料表面

的翘曲变形,进而影响其粗糙度。为此,国内外研究者展开了大量的研究。目前采用较多的方法是在模具内增设冷却水道,保证铸件顺序均匀凝固的同时,减少疏松缩孔缺陷发生的可能性。侯丽彬等^[4]针对上滑块无法设置冷却水道的问题,进行了结构优化,最终使冷却能力提高了近100%,并有效解决了因擦伤带来的铸件缺陷。梁秋华等^[5]针对电动汽车铝合金副车架结构壁厚不均造成的低压铸造缺陷,局部增加冷却镶块来消除孤立液相,最终能使得铝合金冷却顺序凝固,提高了

收稿日期:2024-07-14;修订日期:2024-08-15

基金项目:华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室开放基金资助项目(P2019-003);重庆市研究生教育教学改革研究重点资助项目(yjg212027);重庆市研究生联合培养基地资助项目(JDAHPYJD2020032);重庆交通大学研究生课程思政示范资助项目(KCSZ2022008)。

第一作者简介:龚琛普,男,1999年出生,硕士研究生, E-mail: 2633483636@qq.com

引用格式:龚琛普,龚海军,卢红林,等. 水泵压铸件水冷镶块水道数值模拟与优化设计[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(5): 704-710.

GONG C P, GONG H J, LU H L, et al. Numerical simulation and optimization design of water-cooled insert waterway of water pump die casting [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(5): 704-710.

内部组织的致密度及铸件质量。张云峰等^[6]采用分级模温通水设计,在其内部设计冷却通道和点冷却装置,实现了铸件成形区域的温度平衡。贾志欣等^[7]根据壳体压铸件的结构特点,采用点冷和冷却水道相结合的措施,得到的铸件温度分布较均匀,温度梯度变化较小。HOPMANN C等^[8]为了避免零件凝固后的翘曲变形,基于塑料加工迭代优化冷却水道布局的程序运用到压铸工艺里面,最终优化好的水道设计能生产比传统模具翘曲更小的零件。GAPELA P等^[9]研究冷却水道与模具/嵌件界面之间距离的影响,以及水流速率与界面处接触压力的影响,进而通过数值模拟来帮助优化设计,得到合理的冷却水道。

压铸冷却过程涉及多种传热现象,主要是传导传热、对流传热及辐射传热,熔体冷却过程的大部分热量是通过冷却剂的对流传热散失,剩余少部分热量才是通过模具外壁自然对流或热辐射等方式散失^[10]。陈余秋等^[11]利用有限元模拟得到了模具热应力、热疲劳和铸件凝固分数随冷却排布间隔变化的规律,以为锥形

件压铸模具冷却水道设计提供依据。刘继英^[10]对比传统冷却技术与随形冷却技术在冷却过程的差异性,得出了冷却水道直径、冷却水道中心距模具壁面的距离、两相邻冷却水道距离这3个因素对于模具冷却起最主要影响。

本研究采用ProCAST软件对水泵压铸件的充型凝固过程进行数值建模与分析^[12-13],对比分析传统冷却直道与随形冷却水道的模拟结果,得出其对缺陷影响的程度。随后将随形冷却水道系统用于实际生产,X射线探伤观察铸件成形质量,旨在为相关生产提供参考。

1 有限元模型建立

1.1 压铸模具及铸件材料选择

水泵座压铸件材质为ADC12铝合金,其化学成分见表1。压铸模具材质为H13钢。图1为H13钢的热物性变化情况。

表1 ADC12合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of ADC12 alloy %

元素	w_B										
	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Ni	Sn	Ti	Pb	Fe	Al
标准	9.6~12	≤1.3	1.5~3.5	≤0.3	≤0.5	≤0.5	≤0.2	≤0.01	≤0.1	≤1.3	余量
实际含量	10.35	0.72	1.84	0.24	0.25	0.04	0.01	0.01	0.02	0.72	余量

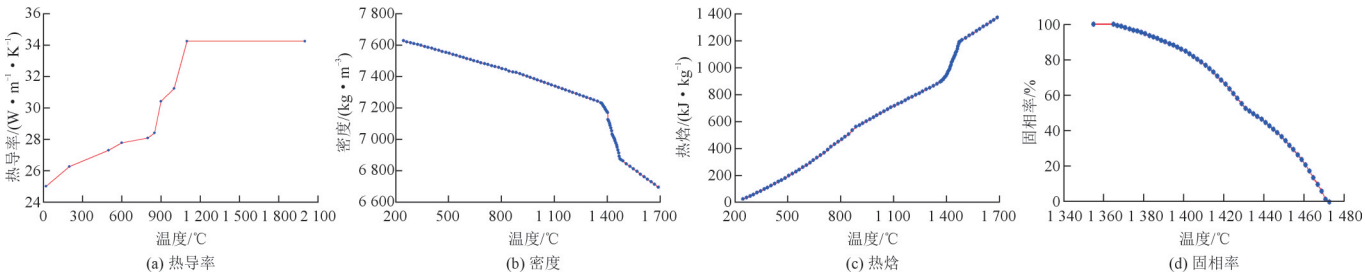


图1 H13钢特性与温度关系图
Fig.1 Relationship between characteristics of H13 steel and temperature

1.2 水泵压铸件结构分析

水泵座的轮廓尺寸为145.7 mm×135.1 mm×136.3 mm,体积为264 477.3 mm³,质量约为0.71 kg,水泵压铸件三维模型及压铸模具见图2。

用UG检查功能检测水泵压铸件壁厚(水泵座+流道+料饼+溢流槽),水泵压铸件正面、侧面、反面壁厚见图3。可知压铸件平均壁厚为4.78 mm,最大厚度为23 mm,最小厚度约为1.9 mm。除开流道、料饼和溢流槽,水泵座部分壁厚分布不均匀,有7处超过11.5 mm的大壁厚(见圆圈标注),主要集中于凹凸结构过渡区域、泵座底部和碗形深腔顶部。

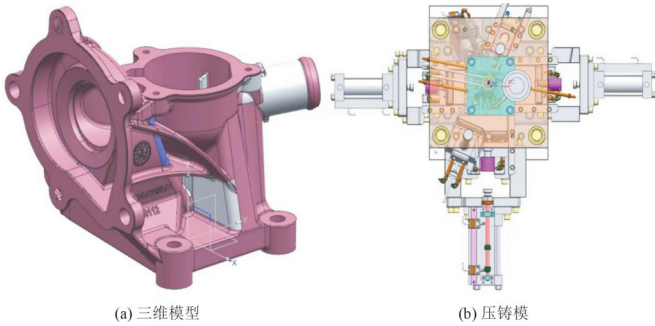


图2 水泵压铸件三维模型及压铸模
Fig.2 3D model of water pump die casting and die-casting mold

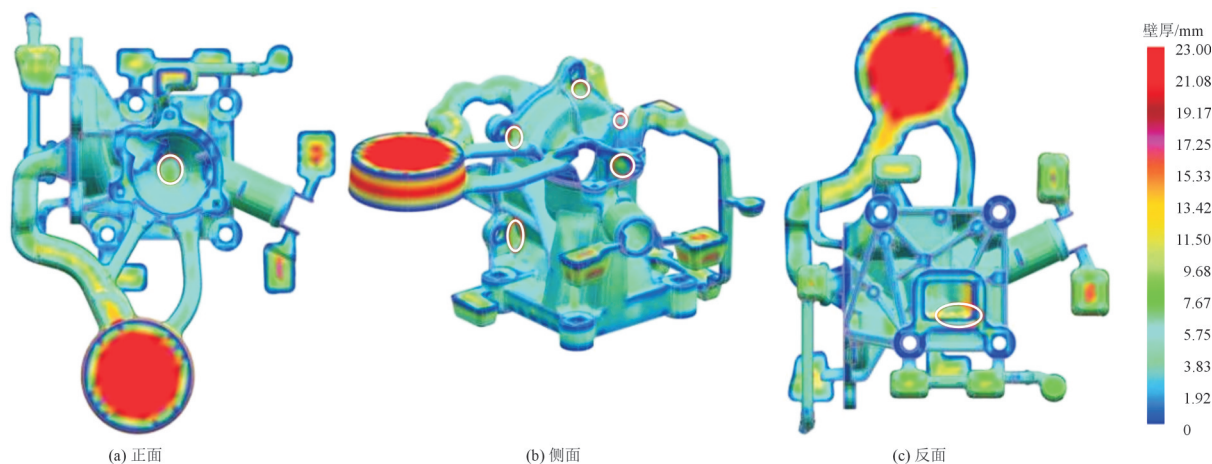


图3 水泵压铸件三面壁厚

Fig.3 Wall thicknesses on three sides of the water pump die casting

1.3 碗形深腔顶部冷却水道设计

针对于碗形深腔顶部增加水道设计,见图4。该处连接着两个内浇口,是除了料饼之外,最早受到金属液充型的地方。其顶部壁厚也是整个水泵座最厚的部位之一,需要在此处设计冷却水道,避免铸件表面的翘曲变形和内部疏松缩孔缺陷的发生。设计水道直径过大会使流速变慢,雷诺数降低,传热系数降低。过小会导致流速变快、冷却水道间隔太小,导致散热不好,进而导致产品局部产生缺陷。

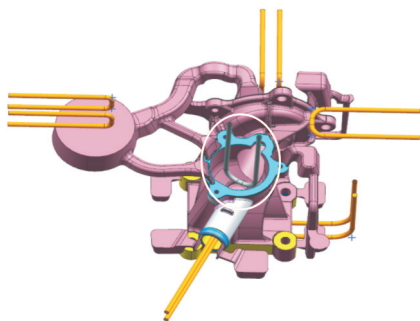


图4 增设传统冷却水道方案

Fig.4 Scheme for adding conventional cooling channels

(1)传统冷却水道方案 采用直线型,通常是直接在模板和模芯中钻孔得到,具有结构简单、加工成本低等特点。原有的冷却系统就是针对水泵压铸件大壁厚部位布置的冷却水道,共有6条直通水道。在原有传统冷却系统基础上,根据深腔顶部中空的结构特征,增设传统冷却直道(图4中圆圈标注)。

(2)随形冷却水道方案 由于深腔顶部的结构复杂,传统冷却直道无法在内腔进行有效布局,进而无法获得均匀的温度梯度,影响了铸件品质。为了解决这个问题,在模具水冷镶块内腔增设随形冷却水道。冷却水道的建模大致分为:确定冷却水道的尺寸和传热系数、确定水道中心线和生成冷却水道。

计算水道直径为:

$$D \leq \frac{1.274q}{Re\nu} \quad (1)$$

$$q = \frac{m}{\rho} \quad (2)$$

式中, D 为冷却水道直径,mm; Re 为临界雷诺数,在 $10^4 \sim 1.2 \times 10^5$ 之间; q 为冷却水流量; ν 为水的运动黏度; m 为每次压铸所需冷却水量。设置水温为 20°C ,运动黏度为 $1.006 \text{ mm}^2/\text{s}$,根据压铸实际生产所反馈来的单次压铸冷却水量为 $3\,553.37 \text{ g}$,从制造的角度来看水道直径不低于 3.5 mm ,代入式(1)得到水道直径区间为 $3.5 \text{ mm} \leq D \leq 4.5 \text{ mm}$ 。

图5为水道离型腔间距与模具热变形量关系图^[14]。可以看出,控制水道离型腔间距在 $11 \sim 13 \text{ mm}$ 之间,模具热变形量趋于极小值,能够有效平衡热梯度以及提高模具使用次数。

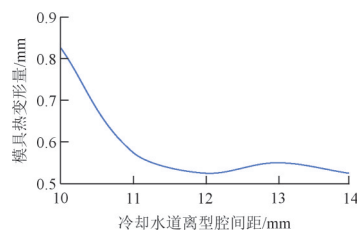


图5 水道离型腔间距与模具热变形量关系图

Fig.5 Variation of distance between waterway and cavity with thermal deformation of mold

冷却水道与模具之间的传热现象属于对流传导,水流的形式为紊流,紊流计算和传热系数公式^[11]为:

$$Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^n \quad (3)$$

$$h_c = \frac{Nu_f \lambda}{d} \quad (4)$$

式中, Nu 为努塞尔数; Pr 为普朗特数, $0.7 \sim 160$ 之间; f 为管内摩擦因数;指数 n 为 0.4 ; λ 为水的热导率; d 为水

道直径,计算可得水道与模具之间的传热系数 h_c 为3 500~4 500 W/(m²·K),水流速度为1.5~2.5 L/min。

为了统一冷却水道相关工艺参数,采用正交试验得到影响铸件冷却均匀性的参数(水道直径、水道离型腔间距、水流速度和传热系数)范围优化值。模拟采用传统水道方案里的模型,因变量取最终凝固时深腔顶部两点总冷却时间差值,选择望小特性,4因素3水平试验表见表2。

表2 $L_9(3^4)$ 正交试验表

Tab.2 $L_9(3^4)$ orthogonal test table

试验号	水道直径/mm	水道离型腔间距/mm	水流速度/(L·min ⁻¹)	传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	冷却时间差值/s
1	3.5	11	1.5	3 500	2.67
2	4.0	12	2.0	4 000	1.58
3	4.5	13	2.5	4 500	1.17
4	3.5	12	2.5	3 500	0.76
5	4.0	13	1.5	4 000	2.34
6	4.5	11	2.0	4 500	1.89
7	3.5	13	2.0	4 500	1.73
8	4.0	11	2.5	3 500	1.24
9	4.5	12	1.5	4 000	2.05

得到的冷却水道范围优化工艺参数:水道直径为3.5 mm、水道离型腔间距为12 mm、水流速度为2.5 L/min、传热系数为3 500 W/(m²·K)。

提取铸件深腔凹模的边缘线一定距离($h=8$ mm),充分考虑模具深腔顶部圆角处的应力分布及传热效应,以凹模顶部圆角位置作为基点,用离型腔距离确定其布置水道的中心点;然后同确定好的水道直径4.5 mm画圆,在类球壳界面上做螺旋式引导,并与沿着顶部正中心及重力方向的轮廓线相连接,使其覆盖深腔顶部型腔,见图6。采用圆形的水道截面和紧贴内腔形状的多层螺旋型结构,可以达到接触面均匀冷却的效果。

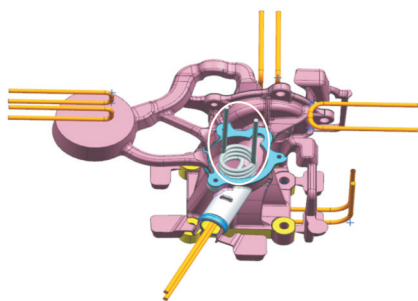


图6 增设随形冷却水道方案

Fig.6 Scheme for adding conformal cooling channels

1.4 有限元模型和工艺参数

首先用UG建立简易的活塞、压室和模具,将其连同冷却水道(传统冷却直道和随形冷却水道)和水泵压铸件(水泵座+流道+料饼+溢流槽)一块装配,然后在Pro-

CAST软件界面进行面网格和体网格划分。设置铸件面网格尺寸为1 mm,冷却水道面网格尺寸为1.5 mm,活塞、压室和模具面网格尺寸为4 mm。带有传统冷却直道的有限元模型面网格数量为127 076,体网格数量约为245万,带有随形冷却水道的有限元模型面网格数量为129 052,体网格数量约为233万。有限元模型见图7。

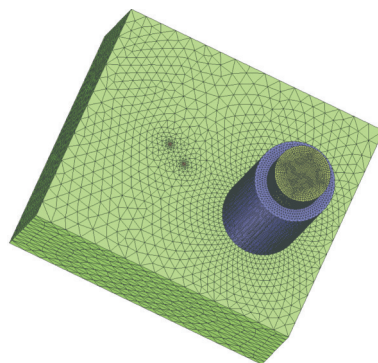


图7 有限元模型

Fig.7 Finite element model

模拟的工艺参数包括浇注温度为640 ℃,模具预热温度为240 ℃,活塞快压射速度为3 m/s,慢压射速度为0.3 m/s,压室高度为300 mm,可以得到快压射时间为0.018 s,慢压射时间为0.818 s。其活塞运动速度与时间曲线见图8。模具、浇注系统和活塞的材质均为H13钢,边界条件设置水泵压铸件与模具、活塞之间的传热系数为2 000 W/(m²·K),与浇注系统之间的传热系数为1 000 W/(m²·K)。活塞与浇注系统内壁之间的传热系数设置为1 000 W/(m²·K)。模具与外界环境之间的传热条件设置为空冷,环境温度为20 ℃,传热系数为10 W/(m²·K)。

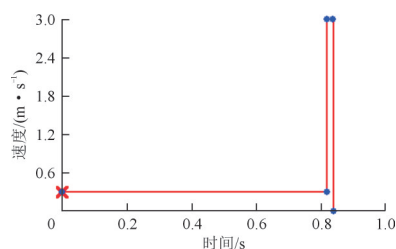


图8 活塞运动速度与时间关系图

Fig.8 Relationship between piston velocity and time

2 数值模拟分析

2.1 充型凝固过程模拟

用ProCAST中的void预测模型充型过程中易出现裹气的部位,见图9。可以看出,当铸件充型70%时最开始填充离内浇口最近的碗形深腔顶部,而在充型80%的时候,深腔顶部和3个圆孔基本充满,说明充满深腔顶部的金属液流速很快,这不利于内部收缩甚至

产生缩孔。铸件充型 90% 时,除溢流槽和一侧边圆孔外,铸件内部已经充填完毕,而在充型 95% 时,只有溢

流槽部分未充满,表明侧边单一圆孔金属液填充速度过快,容易出现缩孔缺陷。

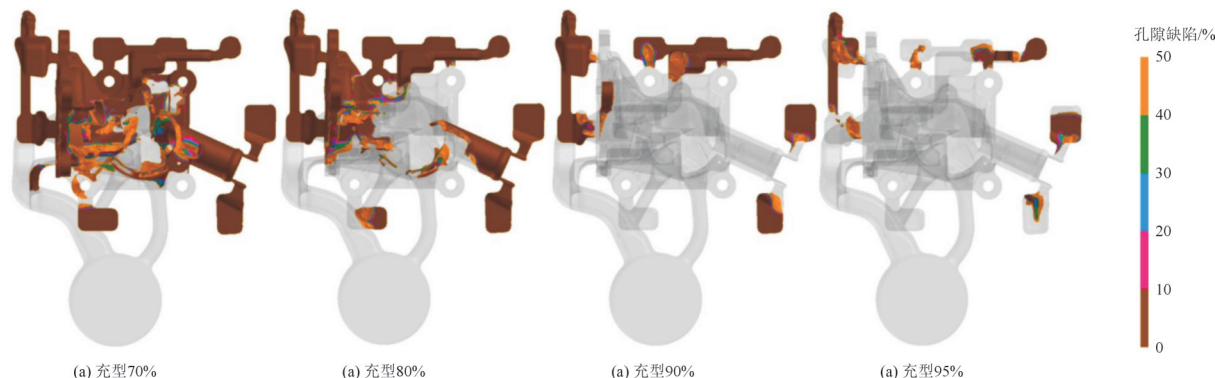


图9 充型过程裹气预测

Fig.9 Air entrainment prediction during filling process

图 10 为两种冷却水道的铸件凝固 30% 时温度场及温度趋势。可见传统冷却水道的碗状深腔温度约为 570 °C,而带有随形冷却水道效果更优,深腔边缘温度约为 540 °C,顶部为 557 °C,在型腔内部能够避免热节处出现孤立液相区导致无法补缩的问题,进而避免疏松缩孔缺陷的发生。从图 10c 可以看出,在凝固 30%~60% 的过程中,增设随形冷却水道的深腔温度下降更快,并且相对于增设传统水道的方案,在最终凝固的型

腔顶部平均温度下降了约 7.38 °C。

图 11 为带有传统冷却水道和随形冷却水道模具充型凝固完成后的温度场,将其沿着 XY、XZ 方向切片,对比模具温度变化。从沿着 XZ 切片图可以看出,在深腔顶部左外表面上和深腔内部温度随形水道的冷却效果优于传统水道。随形冷却水道左表面温度梯度由少部分温度区间 226.7~268 °C 转变为大部分,且深腔内部 268.0~309.3 °C 的温度呈降低趋势。

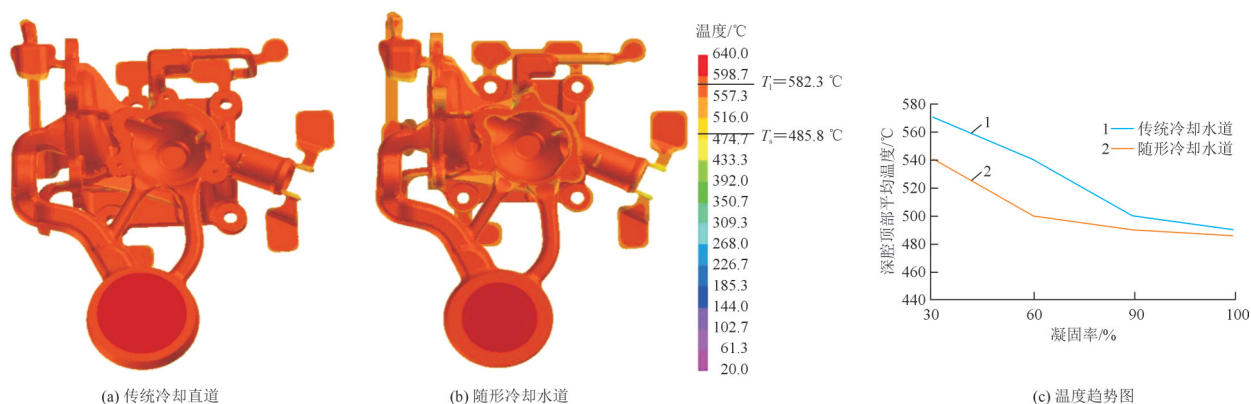


图 10 铸件凝固 30% 过程温度场以及凝固过程温度趋势图

Fig.10 Temperature field of casting at 30% solidification process and temperature trend during solidification process

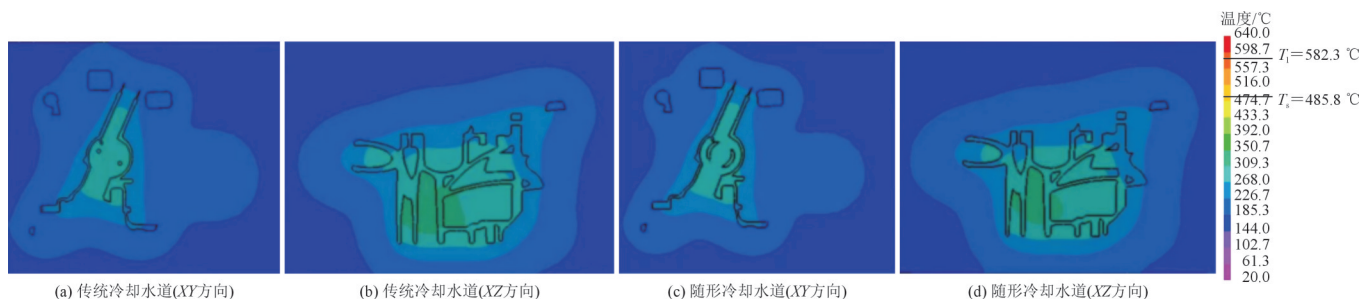


图 11 模具沿(XY、XZ)方向切片温度图

Fig.11 Slice temperature images of mold along XY and XZ direction

图 12 为深腔最终凝固时间分布图。从图 12a 可见,带有传统冷却水道的铸件深腔最先凝固的是边缘区域,大部分区域凝固时间区间为 4.47~6.87 s,少部分

为 2.90~4.47 s,最晚凝固的地方是在深腔顶部,大部分凝固时间区间为 6.87~9.28 s。从图 11b 可以看出,带有随形冷却水道的铸件深腔最先、最后凝固部位和传

统冷却水道一致,不同的是边缘最先凝固时间区间都是在 2.86~4.87 s,顶部少部分最先凝固时间区间为 6.87~9.28 s,大部分凝固区间为 4.47~6.87 s,凝固时间明显缩短。

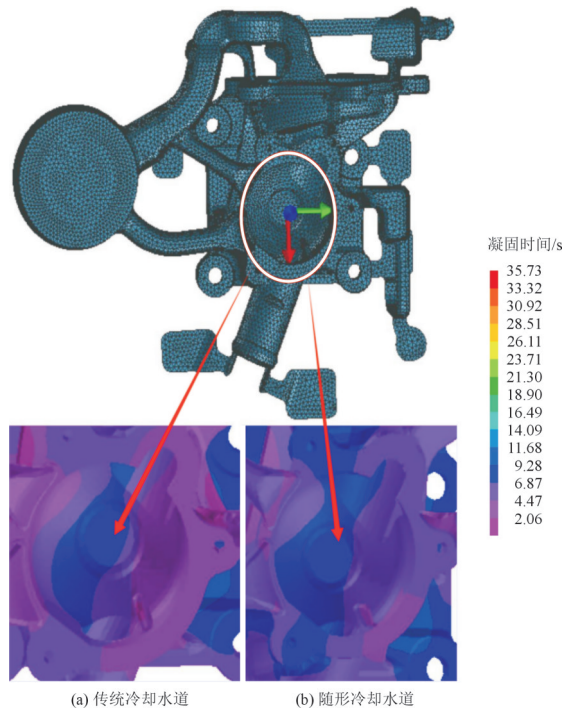


图 12 深腔最终凝固时间分布图
Fig.12 Distribution of time to solidus of deep cavity

2.2 缩松缩孔缺陷模拟

图 13 为传统冷却水道和随形冷却水道下铸件缩松缩孔预测图。可以看出,随形冷却水道下铸件内部质量更好,在调整缺陷概率发生 20% 的情况下,溢流槽和底部矩形通孔端面都有缩孔缺陷发生,但在铸件深腔内的最后充型位置 A、B 处的局部缩松率存在着较大差异。传统冷却水道下的铸件 A 处出现了缩松,体积为 0.174 6 cm³,而随形冷却水道下的缩松体积下降到 0.135 6 cm³;传统冷却下 B 处产生的 0.019 4 cm³缩松体

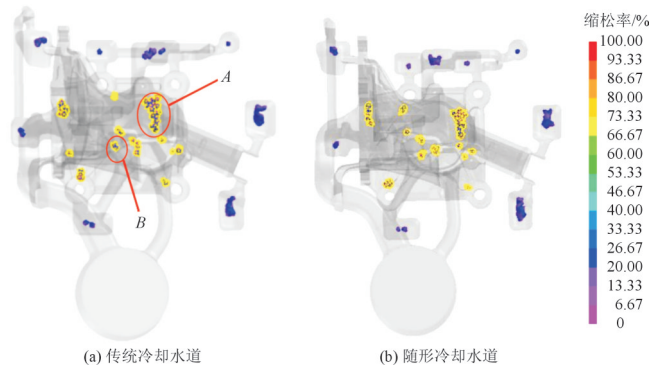


图 13 铸件缩松缩孔预测图
Fig.13 Prediction diagram of shrinkage porosities and cavities in castings

积在使用了随形冷却镶块后直接消除。
传统冷却水道下的铸件缩松缩孔体积约为 0.843 6 cm³,缩松缩孔发生平均概率约为 25.57%。带有随形冷却水道镶块的铸件缩松缩孔体积约为 0.760 5 cm³,减少了 9.8%,缩松缩孔平均发生概率降低到 24.92%。这是由于采用了随形冷却的铸件能够有效降低深腔顶部壁厚区域的温度,使得铸件与模具间温差小,保证了金属液流动畅通,针对孤立液相区的补缩能力提高,进而降低了缩松缩孔发生的可能性。

3 水泵座生产与验证

将模拟验证最优冷却方案的随形冷却镶块安装到模具上,采用海天 HDC400 压铸机进行实际生产,后处理去除溢流槽后的铸件见图 14。从外观能够初步判断该铸件具有较好的表面粗糙度,无明显翘曲变形。
对图 14 水泵压铸件分成 4 个区域进行 X 射线探伤,观察铸件内部是否产生缩松缩孔缺陷,结果见图 15,可

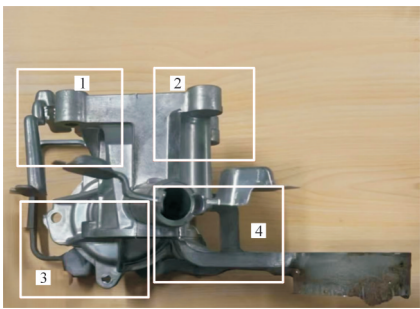


图 14 水泵座铸件
Fig.14 Casting of water pump seat

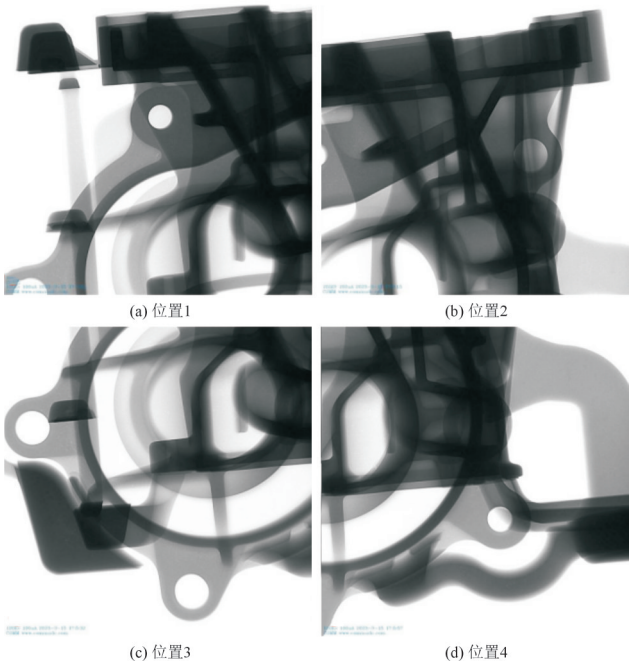


图 15 分区 X 射线探伤
Fig.15 Partitioned X-ray detection

以看出铸件内部无缺陷。

在水泵座深腔顶部取样,见图3a圆圈所示。线切割机切割并用XQ-1镶嵌试样,用300~1000目砂纸打磨后用抛光布和W1及W2.5金刚石研磨剂在金相试样磨抛机上抛光,用体积分数为0.5%的HF腐蚀,静置3~5 s后用无水乙醇清洗干净并用吹风机吹干。使用蔡司AxioVertA1光学显微镜观察显微组织。使用蔡司EVO18型扫描电镜进行SEM观察。组织分析见图16。从图16a可见,试样晶粒细小且致密度高,无明显缺陷。背散射衍射结果显示,晶粒尺寸大多在0.25~0.50 mm之间,为4级晶粒度。

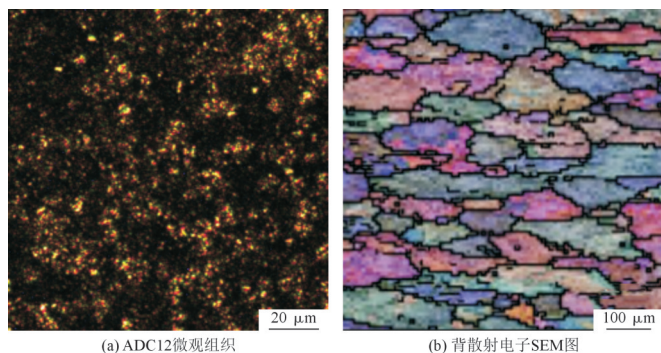


图16 水泵座铸件微观分析
Fig.16 Micro analysis of water pump seat castings

4 结 论

(1)针对水泵压铸件深腔顶部位置可能会出现表面翘曲变形、内部缩松缩孔缺陷的问题,在分析其结构特点的基础上,发现因为壁厚过大、金属液流速过快、温度过高导致的深腔易发生缺陷。

(2)提出了在模具内增设传统冷却水道和随形冷却水道以达到提高铸件质量的方案。结果显示,随形冷却水道比传统冷却水道有更好的冷却效果,更能加快铸件深腔凝固速度和抑制缩松缩孔缺陷的发生。与传统冷却水道相比,镶块内部的缩松缩孔体积由0.843 6 cm³减小到0.760 5 cm³,缩松缩孔发生的平均概率只有24.92%,最终凝固时间大部分区间由6.87~9.28 s缩短为4.47~6.87 s。

(3)装有随形冷却镶块的模具制造生产的铸件通过X射线探伤技术、金相组织观察和SEM观察,发现铸件表面无翘曲变形,内部组织晶粒细小且致密度高。

参 考 文 献

[1] 何建刚,郭睿,曾大新,等. Zn含量对Al-12Si-2Cu-1Mg-xZn合金铸造性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(11): 1 545-1 549.

[2] 薄兵,潘治,陆韬,等. 工艺参数对ADC12铝合金压铸件微孔缺陷与力学性能的影响[J]. 铸造, 2017, 66(2): 127-130.

[3] 肖将楚,冉红锋,朱毅. 压铸ADC12铝合金基座的开裂机制分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(3): 278-282.

[4] 侯丽彬,董少峰,周默. 利用分水盘结构解决油底壳压铸件粘料擦伤的缺陷[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(3): 425-427.

[5] 梁秋华,韩伟,杨安,等. 电动汽车副车架低压铸造数值模拟及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(12): 1 573-1 576.

[6] 张云峰,宋学伟,吴贺,等. 一体化压铸工艺在车身减震塔上的开发与应用[J]. 铸造, 2023, 72(4): 437-442.

[7] 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.

[8] HOPMANN C, SCHNEPPE T, THEUNISSEN M, et al. Untersuchung der übertragbarkeit von algorithmen zur numerischen optimierung der kühlkanalauslegung im kunststoffspritzguss auf den metall-dauerformguss [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2017, 48(12): 1 220-1 225.

[9] CAPELA P, GOMES I V, LOPES V, et al. Experimental analysis of heat transfer at the interface between die casting molds and additively manufactured cooling inserts [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32: 10 934-10 942.

[10] 刘继英. 基于3D打印的随形冷却注塑模具传热因素研究[J]. 塑料工业, 2017, 45(2): 78-81.

[11] 陈余秋,张帅,张琦等. 锥形件压铸模冷却流道排布研究[J]. 金属加工(热加工), 2013(3): 66-69.

[12] IPEK O, BOLATTURK A, KAN M, et al. Investigation of transient numerical simulation of solidification and thermal behavior of metal molds with conformal cooling channels [J]. Scientia Iranica, 2019, 26(6): 3 325-3 333.

[13] KITAYAMA S, MIYAKAWA H, TAKANO M, et al. Multi-objective optimization of injection molding process parameters for short cycle time and warpage reduction using conformal cooling channel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88: 1 735-1 744.

[14] WU S H. Feature-based parametric design of a gating system for a die-casting die[J]. The International Journal of Manufacturing Technology, 2002, 19: 821-829.

(编辑:张正贺)

欢迎登陆期刊官网

投稿、查稿、审稿

2024年起,《特种铸造及有色合金》杂志新版网站正式上线,期刊论文彩色版本均可在网站免费在线阅读或下载pdf文件,并可体验AI导读功能,网址:www.special-cast.com,欢迎访问!