● 工艺技术 Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.3249

基于数值模拟的汽车后悬梁压铸成型工艺设计

曹智强,王火生,杨秦嘉
(福建理工大学 材料科学与工程学院,福建 福州 350118)

摘　要:铝合金压铸由于其轻量化和高效率生产等优点,在新能源汽车零部件开发中得到广泛应用。随着汽车领域对铸件高性能的要求,需要设计合理的压铸工艺,有效控制卷气、夹渣、缩孔等常见压铸缺陷,才能达到产品质量要求。本文以壁厚不均的汽车后悬梁压铸件为研究对象,通过数值模拟对比分析了2种浇注系统方案,并针对铸件生产中存在的缩孔问题进行分析,提出改进方案。结果表明,采用五浇口的方案可以缩短铝液充填距离,减少卷气和氧化夹杂等缺陷。针对远离内浇口的2处厚壁位置存在的缩孔问题,提出模具镶嵌铜合金块的方案,数值模拟结果表明高导热的CuCoBe嵌件可以加快厚壁处铝水冷却速度,有效消除热节和缩孔。

关键词:铝合金压铸;浇注系统;数值模拟;缩孔
中图分类号:TG146.2+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)06-0585-08

Design of Die-casting Moulding Process for an Automotive Rear Suspension Beam Based on Numerical Simulation

CAO Zhiqiang, WANG Huosheng, YANG Qinjia
(School of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Aluminium alloy die casting has been widely used in the development of new energy vehicle parts due to its advantages of lightweight and high-efficiency production. However, considering the high performance requirements of castings in the automotive field, it is necessary to design a reasonable die-casting scheme to effectively control common die-casting defects such as gas porosity, inclusions, and shrinkage holes to meet product quality requirements. In this paper, taking the die-casting parts of automobile rear suspension beams with uneven wall thickness as the research object, the two gating system schemes were compared by numerical simulation, the casting defects existing in production were analysed, and an improvement scheme was proposed. The results show that the five-gate scheme can shorten the filling distance of molten aluminium and reduce defects such as entrained air and oxidation inclusions. Aiming at the shrinkage hole problem of the two thick walls far away from the inner gate, a scheme of inserting copper alloy blocks in die was proposed. The numerical simulation results show that the cooling rate of aluminium melt at the thick walls can be accelerated by a high thermal conductivity CuCoBe mould insert, and the hot spot and shrinkage holes can be effectively eliminated.

Key words: aluminium alloy die casting; casting system; numerical simulation; shrinkage hole

随着环保意识的提高和能源问题的日益突出,汽车轻量化已成为汽车行业的热门议题。在这一背景下,铝合金结构件作为一种轻量化解决方案[1-2],正逐渐成为行业关注的焦点。其中,压铸由于其高生产效率和优良的铸件性能[3],被广泛应用于汽车结构件的开发。力学性能是保证汽车安全的重要指标,因此汽车压铸件开发过程中,需要严格控制气孔、夹杂、缩孔、缩松等缺陷,以保证压铸件最终的力学性能达到指标要求。但由于汽车压铸件存在结构复杂、壁厚不均等问题,铸造缺陷控制难度较大,需要制定合理的压铸工艺方案才能保证铸件的性能。压铸过程的数值模拟技术可以对各类缺陷进行分析预测[4-6],为压铸工艺优化改进提供重要依据,并缩短铸件开发周期[7-9],已被广泛应用于压铸模具设计中。

收稿日期:2023-10-20
基金项目:福建省科技计划项目(2020H0022)
作者简介:曹智强,1998年生,硕士研究生.研究方向为铝合金凝固技术.Email:1050028542@qq.com
通讯作者:王火生,1978年生,博士,副教授.研究方向为铝合金新材料开发和铝合金凝固技术研究.Email: hkyg@163.com
引用格式:曹智强,王火生,杨秦嘉.基于数值模拟的汽车后悬梁压铸成型工艺设计[J].铸造技术,2024,45(6): 585-592.
CAO Z Q, WANG H S, YANG Q J. Design of die-casting moulding process for an automotive rear suspension beam based on numerical simulation[J]. Foundry Technology, 2024, 45(6): 585-592.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

其中,Flow-3D 采用 Tru-VOF 技术，可以更精确地计算液体交界聚合时动态自由液面的流动和飞溅等,以及对复杂流动现象的良好适应性[10]。

赵旭等[11]通过数值模拟研究了 AlSi10MnMg 承重梁缺陷的产生原因,并使用延长保压时间来减少其缺陷的产生;潘威武等[12]采用数值模拟软件预测缺陷,通过对合金成分的调整,减少了发动机缸体的缺陷产生,但二者缺少针对特定较厚部位缺陷消除的方案。范李鹏等[13]在基于重力铸造的工艺中采用数值模拟软件预测,并通过调整浇注工艺并采取放置冷铁等措施,成功消除了基座铸件壁厚较厚位置的缺陷。然而,在压力铸造工艺中,尚未对冷铁是否能够有效消除较厚壁厚位置的缺陷进行验证。Huang 等[14]基于数值模拟的压铸工艺中采用高压点冷方式解决了壁厚较厚位置缺陷,然而高压点冷在实际生产中由于冷却水距离热节有一定距离,冷却响应速度较慢。本文针对某汽车品牌后悬梁压铸件,采用 Flow-3D 数值模拟软件辅助进行压铸工艺设计,对比了不同浇注系统方案,重点针对壁厚处的缩孔问题提出模具镶嵌铜合金块改进措施,通过改变凝固顺序消除铸造缺陷。

1 零件分析及压铸工艺设计

1.1 汽车后悬梁零件分析

该零部件材料为 AlSi10MnMg,其成分见表 1,形状如图 1a 所示。主体轮廓尺寸为 479.27 mm×304 mm×125 mm(图 1b),主体壁厚为 4 mm,壁厚最大部位为图 1c 中所示的 A、B 螺栓孔，该处为零件主要受力区域,故采用大壁厚设计,厚度达到 19 mm,为保证承载能力要求,不能有缩孔等铸造缺陷。

1.2 内浇口截面计算

按照压铸手册可得[15]:

$$A_g=\frac{G}{\rho V_g t} \tag{1}$$

式中,A_g 为内浇口横截面积,mm^2;G 为通过内浇口金属液的总质量,g;ρ 为液态金属的密度,g/mm^3;V_g 为内浇口处的流速,mm/s;t 为铸件型腔的充填时间,s。

铸件总质量约为 2 440 g,液态 AlSi10MnMg 合金密度为 2 450 g/mm^3,内浇口速度按照一般压铸速度取 20 000~60 000 mm/s，本铸件对组织致密度要求较高,为便于排气,采用较慢的充填速度,初步取值 20 000 mm/s,;铸件平均壁厚为 4 mm,铸件充填时间初步确定为 0.03 s[15]。通过式(1)计算得到内浇口总面积为 1 420 mm^2。

1.3 浇注系统设计

综合零件自身特点，初步设计出如图 2 所示的2种浇注系统。图 2a 所示的方案 I 采用 3 个内浇口,内浇口面积设置为 1 300 mm^2,较少的浇道控制金属液流动,可以减少熔接痕的产生。图 2b 所示的方案 II

表1 AlSi10MnMg合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of the AlSi10MnMg alloy

(mass fraction/%)

	Si	Mg	Mn	Fe	Ti	Sr	Zn	Cu	Al
Standard value	9.5~11.5	<0.45	0.4~0.8	<0.25	<0.12	0.01~0.027	<0.07	<0.05	Bal.
Test value	10.96	0.137	0.560	0.137	0.089	0.005	0.014	0.020	Bal.

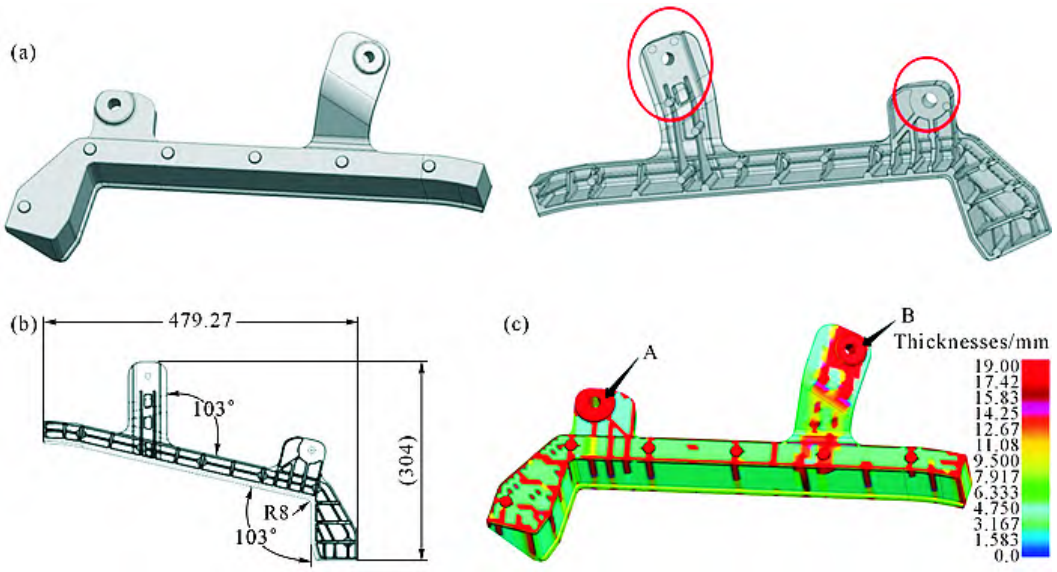

图 1 后悬梁:(a) UG 三维图;(b) 二维尺寸;(c) 壁厚分析
Fig.1 Rear suspension beam: (a) UG 3D drawing; (b) 2D size; (c) wall thickness analysis

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

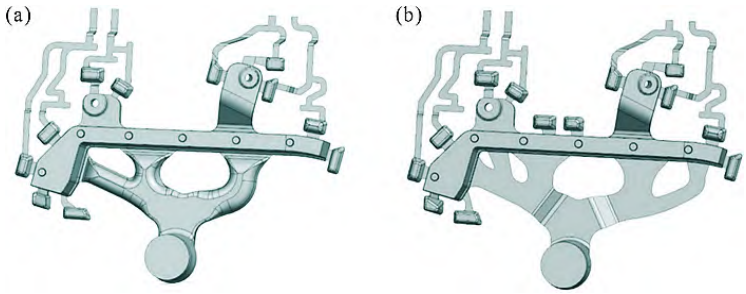

图 2 浇注系统：(a) 方案 I；(b) 方案 II
Fig.2 Pouring systems: (a) scheme I; (b) scheme II

采用 5 个内浇口，内浇口面积设置为 1 600 mm²，以提高铸件单位时间的充填率，缩短铝液流动距离。在铸件的末端分别设备溢流槽和排气道，收集压铸过程中产生的氧化夹渣，排除型腔中的气体。采用 Flow-3D 软件分析 2 种方案铸件的充填和凝固过程，通过缺陷预测分析，比较 2 种方案的优缺点。

1.4 数值模拟参数设置

压铸速度设置为 3 个阶段，第 1 阶段低速段为 0.03~0.08 m/s，通过慢速将液态金属充满料筒和流道[16]；第 2 阶段高速段为 1.5 m/s，通过高速压铸可以有效减少流痕、冷隔等缺陷；第 3 阶段待铸件填充为 90%，即改用压力填充直至凝固，使铝水在高压下凝固，提高铸件的组织致密性。金属材料选用 AlSi10MnMg，材料热物性参数见表 2[17]，浇注温度设定为 670 ℃，模具材料选用 H13 钢，热物性参数见表 3[18]，模具温度设定为 200 ℃。

表2 AlSi10MnMg材料参数[17]
Tab.2 Parameters of the AlSi10MnMg alloy[17]

Density /(g·cm^{-3})	Solidus temperature /℃	Liquidus temperature /℃	Specific heat /(J·kg^{-1}·K^{-1})	Thermal conductivity /(W·m^{-1}·K^{-1})
2.68	555.8	595.33	878	140

表 3 H13 钢材料参数[18]
Tab.3 Parameters of H13 steel[18]

Density /(g·cm^{-3})	Specific heat /(J·kg^{-1}·K^{-1})	Thermal conductivity /(W·m^{-1}·K^{-1})
7.9	633	23.4

充型过程流体采用具有更具通用性的 Renormalized group (RNG) 模型[19]，凝固模型启用树枝晶补缩。网格划分采用其自主的 FAVOR技术[10]，由于单个网格块无法精细描述零件，增加网格数又将加大运算时间，故采用网格嵌套方式[19]，具体划分如图 3 所示，A、B 网格块单个网格尺寸为 0.25 mm，C、D 为 0.1 mm，在各网格块的边界添加了网格面，强制将不同网格块的边界面对齐。

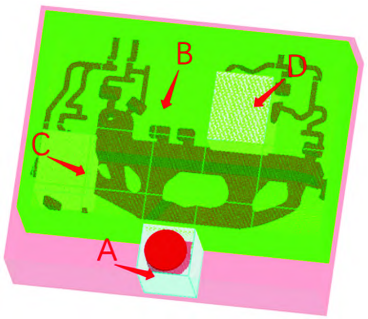

图 3 网格划分
Fig.3 Mesh division

2 数值模拟结果分析

2.1 卷气模拟结果

根据图 4 液体填充图可知，由于铸件螺栓孔附近壁面都是由小变大，可观察到在方案 II 中 A 位置填充时间为 3.099 s 时出现液面翻卷，B 位置在填充时间为 3.111 s 时也出现液面翻卷。这些液面翻卷现象导致了卷气的产生，最终与铝液融合形成卷气。2 种方案产生的最终卷气云图如图 5~6 所示。从图中可以看出 2 种方案在铸件的螺栓孔位置及铸件两端存在卷气(如箭头所示)，相比之下，方案 II 的卷气区域和质量密度都小于方案 I，质量密度约 0.3 kg/m³，小于空气的标准大气压质量密度 1.29 kg/m³，可以认为卷气情况不严重。

2.2 氧化夹渣模拟结果

氧化夹渣仿真结果如图 7~8 所示。可以发现两种方案中的氧化夹渣都汇集在零件末端的渣包中，靠近这两渣包处的零件也会存留一部分氧化夹渣物(如箭头所示)。由于零件末端是铝水行程最远部分，氧化夹渣有更多的时间沉积、汇集，最终导致氧化夹渣物主要聚集在充填末端。通过对比可以看出方案 II 相较于方案 I 会在零件内留存更少的氧化夹渣物，且夹渣物主要集中在渣包附近，在实际生产中可以通过加大渣包进一步排除。

2.3 缩孔模拟结果

图 9~10 为凝固过程孤立液相形成图，可以发现，

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

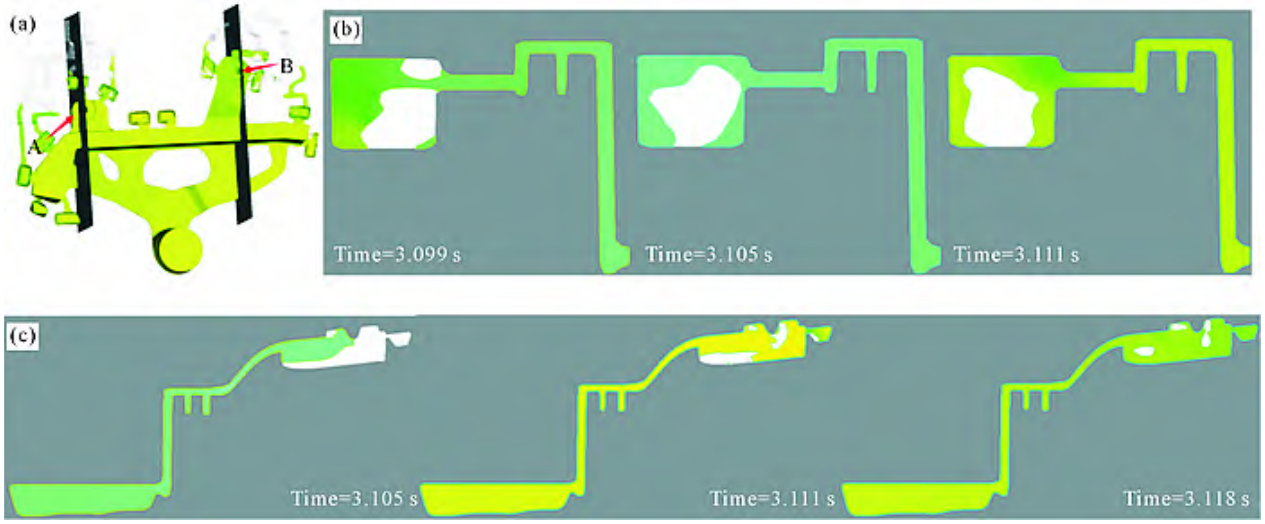

图 4 方案 II 液体填充:(a) 截面示意图;(b) A 处截面;(c) B 处截面

Fig.4 Liquid-filled diagram of scheme II: (a) schematic diagram of the cross-section; (b) cross-section at A; (c) cross-section at B

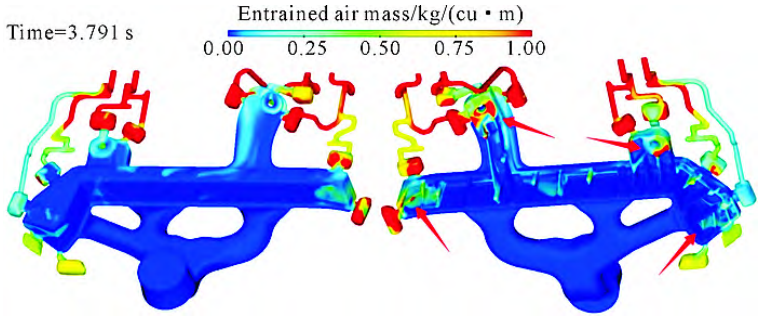

图 5 方案 I 卷气云图

Fig.5 Cloud map of air entrapment of scheme I

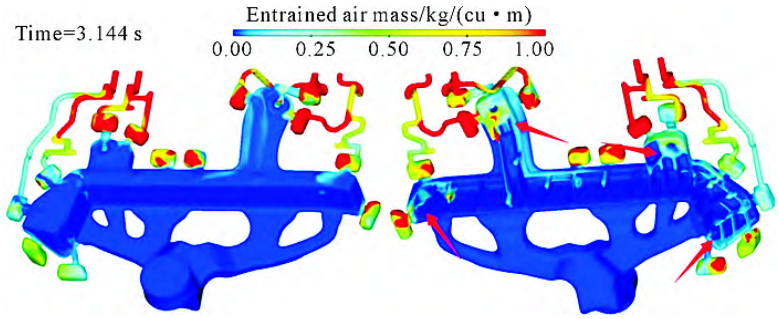

图 6 方案 II 卷气云图

Fig.6 Cloud map of air entrapment of scheme II

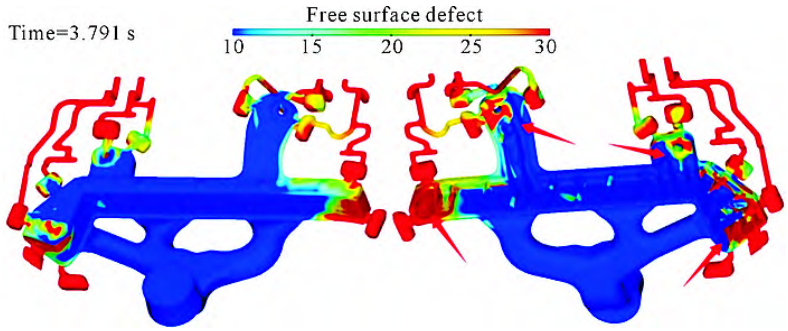

图 7 方案 I 氧化夹渣物分布云图

Fig.7 Cloud map of the distribution of oxide inclusions for scheme I

2 个方案中，筋条和上端螺栓孔厚壁处均会存在孤立液相,进而形成热节,最终导致缩孔缺陷(图 11),最终缩孔位置出现在图 11 中的 A~C处。

3 缩孔缺陷改进措施

采用 BRUKER Q2 ION 型火花光谱仪进行试样

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

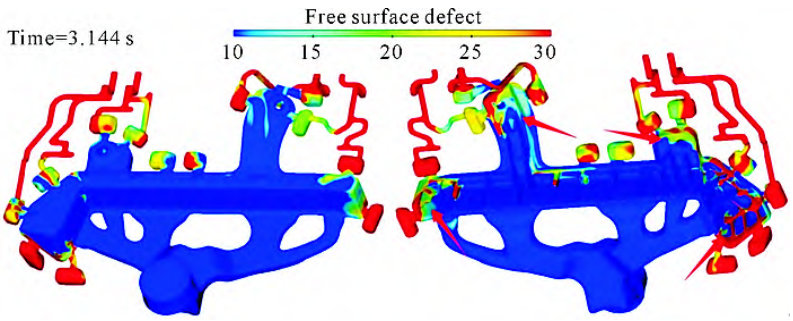

图 8 方案 II 氧化夹渣物分布云图
Fig.8 Cloud map of the distribution of oxide inclusions for scheme II

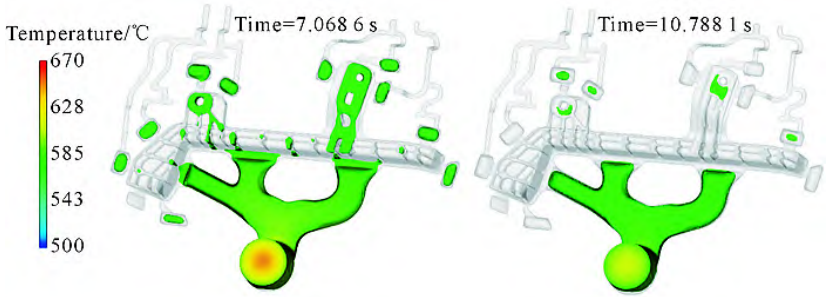

图 9 方案 I 孤立液相形成
Fig.9 Formation of the isolated liquid phase in scheme I

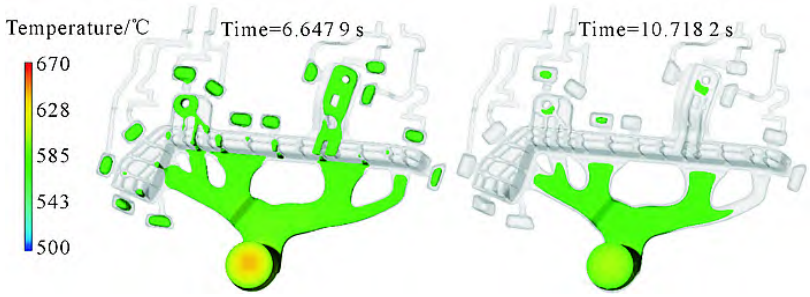

图 10 方案 II 孤立液相形成
Fig.10 Formation of the isolated liquid phase in scheme II

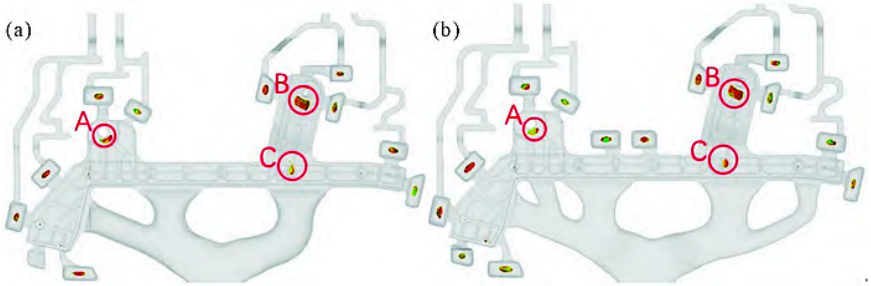

图 11 缩孔结果:(a) 方案 I;(b) 方案 II
Fig.11 Simulation results of shrinkage hole: (a) scheme I; (b) scheme II

化学成分分析，对实际生产后的样品采用日联科技 UNS-150 X 光工业检测仪器进行孔洞检测。制备金相试样后，采用浓度 0.5%的 HF 腐蚀剂进行腐蚀，使用 MV5000(R/TR)金相显微镜观察微观组织。

生产实践表明,通过加设点冷[20],提高壁厚位置的冷却速度，增加热节与浇口连接区域的厚度,延长浇口补缩时间[21],或增大补缩压力等措施可以消除热节。铸件在试模生产中采用了这 3 种方案,结果如图 12a 所示。由图 12b 和 c 所示的试模样件的 X 光检测图,可以看出 C 处靠近内浇口,通过增大补缩压力基本可以消除缩孔,而 A、B 2 处距离内浇口较远，铝液难以补缩,A、B 2 处出现的缺陷与 Flow-3D 仿真中基本一致。对 A、B 处进一步剖切进行金相分析,发现 2 处均存在明显的缩孔和缩松(图 12d~e)。其中 A 处的最大缩孔达到 200 um,B 处的缩孔达到 400 um，会严重影响该区域的承载能力,需进一步改进工艺,消除缩孔。

采用局部挤压工艺也是消除缩孔的有效措

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

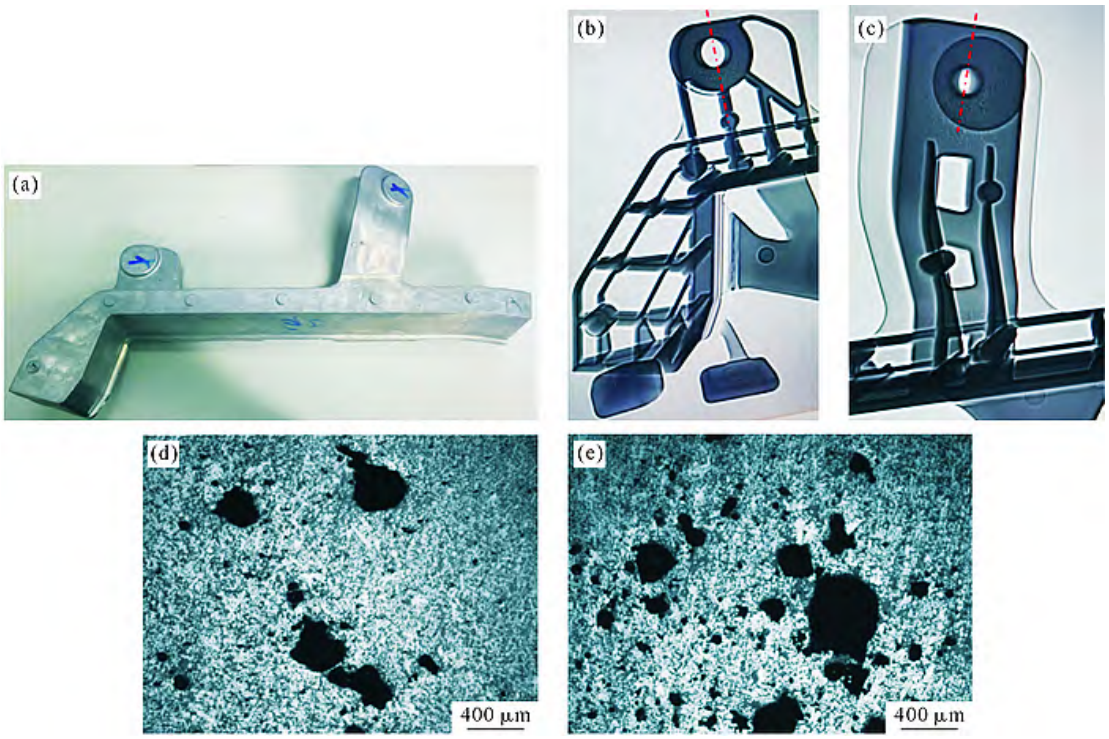

图 12 方案 II 实际生产铸件检测情况：(a) 产品实物图；(b) A 处 X 光检测；(c) B 处 X 光检测；(d) A 处截面金相；(e) B 处截面金相

Fig.12 Inspection of actual production castings for scheme II: (a) physical drawings of products; (b) X-ray inspection at point A; (c) X-ray inspection at point B; (d) OM image of the section at point A; (e) OM image of the section at point B

施[22-25]，但本铸件的 A、B 处螺栓孔轴线垂直分型面，且距缩孔位置较近，不适合独立布置局部挤压机构，且在实际生产中模具温度存在波动，挤压鞘触发时间不易控制。因此本铸件采用在模具中镶嵌高导热的模具材料，调节模具传热能力，消除热节。

采用 CuCoBe 材料制作镶块嵌于模具中，镶嵌位置如图 13 所示。嵌件材料的热物性参数见表 4。利用铜合金的高导热性，加快铸件厚壁位置的冷却速度，从而控制铸件的温度分布[13,26]，避免铸件厚壁处因冷却过慢形成热节，达到消除缩孔，提高铝合金铸件质量的目的。

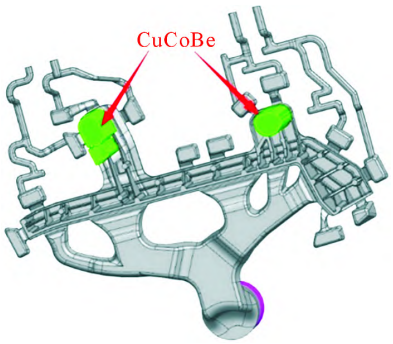

图 13 CuCoBe 镶嵌分布

Fig.13 Distribution of CuCoBe mosaics

表4 CuCoBe材料参数

Tab.4 Parameters of the CuCoBe alloy

Density/(g·cm^{-3})	Specific heat /(J·kg^{-1}·K^{-1})	Thermal conductivity /(W·m^{-1}·K^{-1})
8.75	420	300

图 14 为模具中镶嵌铜合金块后铸件凝固过程的孤立液相形成图。从图中可以看出，铸件的凝固顺序较未加嵌块时发生了改变，壁厚部位的热节基本消除。图 15 为铸件厚壁处 A、B 点在模具镶嵌铜合金前后的冷却速度曲线。可以看出，镶嵌铜合金前 A 点完全凝固用时 13.4 s，B 点完全凝固用时

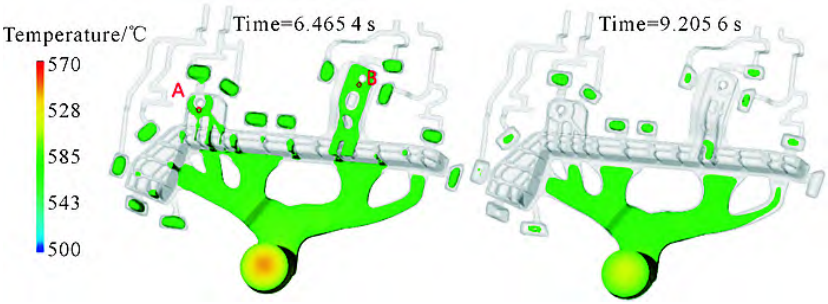

图 14 镶嵌 CuCoBe 后孤立液相形成

Fig.14 Isolated liquid phase formation after inlaying CuCoBe

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

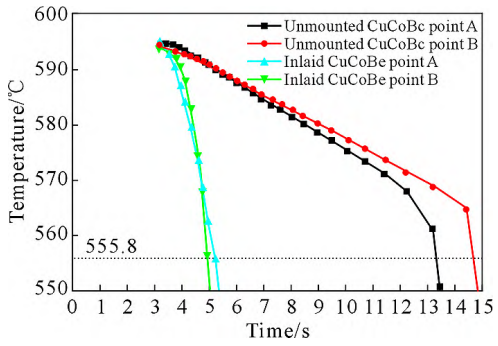

图 15 铸件温度变化图

Fig.15 Variation in the temperature of the casting

14.6 s。镶嵌铜合金后，A 点凝固时间缩短到 5.2 s，B 点缩短到 4.9 s。壁厚处的冷却速度显著提高。图 16 为模具镶嵌铜合金后的缩孔分布。可以看出，A、B 处的缩孔均已基本消除，表明采用高导热模具材料调节壁厚处模具导热能力的方案是可行的。

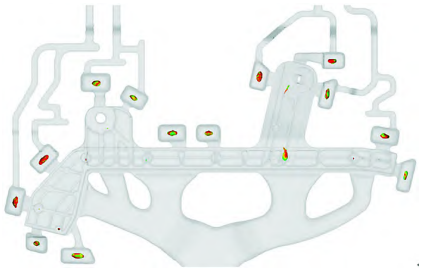

图 16 镶嵌 CuCoBe 后铸件缩孔

Fig.16 Shrinkage hole of casting after inlaying CuCoBe

4 结论

(1)在压铸过程中，压铸参数相同的情况下，采用 5 个浇口的浇注系统方案比 3 个浇口的方案更有利于控制卷气和氧化夹渣缺陷，可以保证铸件的质量。

(2)铸件厚壁处易产生较大缩孔，通过模具镶嵌铜合金块可以加快厚壁处铝水的冷却速度，避免产生热节，数值模拟结果表明，可以有效地消除缩孔缺陷，保障铸件承载区域组织的致密度。

参考文献：

[1] 刘贞山，李英东，赵经纬，傅垒，李利，余康才，毛晓东，赵丕植. 汽车轻量化用铝合金材料及应用技术的研究[J]. 中国材料进展，2022, 41(10): 786-795.
LIU Z S, LI Y D, ZHAO J W, FU L, LI L, YU K C, MAO X D, ZHAO P Z. Research on aluminum alloy materials and application technology for automobile lightweight[J]. Materials China, 2022, 41(10): 786-795.

[2] LONG R S, BOETTCHER E, CRAWFORD D. Current and future uses of aluminum in the automotive industry[J]. JOM, 2017, 69: 2635-2639.

[3] 童帮华，明玥，游国强. 铝合金摩托车发动机左箱体压铸工艺数值模拟与优化[J]. 铸造技术，2019, 40(3): 263-268.
TONG B H, MING Y, YOU G Q. Numerical simulation and optimization of die casting process for left motorcycle engine box casting of aluminum alloy[J]. Foundry Technology, 2019, 40(3): 263-268.

[4] CHEN S, ZHOU F. Design of gating system for radiator die castings based on FLOW-3D software[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2044: 012144.

[5] MAHMOUD M G, ABDELGHANY A, SALEM S. Numerical simulation of door lock plates castings produced by high pressure die casting process[J]. International Journal of Metalcasting, 2023, 17: 847-859.

[6] 廖建强，管胜敏，管维健，黄志垣，安肇勇. 铝合金差速器壳体压铸缺陷分析及改善[J]. 特种铸造及有色合金，2021, 41(5): 648-652.
LIAO J Q, GUAN S M, GUAN W J, HUANG Z H, AN Z Y. Forming defect analysis and improvement of a die-casting aluminum alloy differential case[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(5): 648-652.

[7] 陈先先，屈盛官，李彬. 大型薄壁复杂铝合金油底壳低压铸造过程数值模拟研究[J]. 铸造技术，2015, 36(6): 1545-1549.
CHEN X X, QU S G, LI B. Numerical simulation research of casting process for large-scale complex thin-wall aluminum alloy case [J]. Foundry Technology, 2015, 36(6): 1545-1549.

[8] 王龙生. 压铸工艺设计与实践[J]. 铸造技术，2019, 40(3): 269-275.
WANG L S. Die casting process design and practice[J]. Foundry Technology, 2019, 40(3): 269-275.

[9] BOYDAK Ö, SAVA M, EKICI B. A numerical and an experimental investigation of a high-pressure die-casting aluminum alloy[J]. International Journal of Metalcasting, 2016, 10: 56-69.

[10] 张帆. 铝合金轮毂半固态模锻成形研究[D]. 北京：北京有色金属研究总院，2012.
ZHANG F. Research of semi-solid forging forming for aluminum alloy wheel[D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2012.

[11] 赵旭，王平，孙晶莹，常东旭. 压铸 AlSi10MnMg 铝合金中铸态缺陷分析[J]. 特种铸造及有色合金，2019, 39(12): 1291-1293.
ZHAO X, WANG P, SUN J Y, CHANG D X. Analysis of as-cast defects in the die casting AlSi10MnMg alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(12): 1291-1293.

[12] 潘威武，张松利，刘明杰，李建鹏，张冬梅，杨生建. 发动机缸体压铸工艺数值模拟及合金成分优化 [J].特种铸造及有色合金，2022, 42(12): 1502-1505.
PAN W W, ZHANG S L, LIU M J, LI J P, ZHANG D M, YANG S J. Numerical simulation of die casting process of engine cylinder block and alloy composition optimization[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(12): 1502-1505.

[13] 范李鹏，姬艳硕，余国康，冯港雯，徐信锋，王宝兵，杨剑，肖三楚. 大型铝合金基座铸件数值模拟研究[J]. 铸造技术，2021, 42(10): 856-860.
FAN L P, JI Y S, YU G K, FENG G W, XU X F, WANG B B, YANG J, XIAO S C. Research on numerical simulation of large a-

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

luminum alloy base casting[J]. Foundry Technology, 2021, 42(10): 856-860.

[14] HUANG M Y, ZHOU Q, WANG J Y, LI S H. Die casting die design and process optimization of aluminum alloy gearbox shell[J]. Materials, 2021, 14(14): 3999.

[15] 潘宪曾. 压铸模设计手册[M]. 北京：机械工业出版社，2006.
PAN X Z. Die casting mould design manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

[16] 洪炜，江晓红. FLOW-3D 在薄壁圆筒类铸件压铸模拟中的应用[J]. 模具制造，2013, 13(10): 65-67.
HONG W, JIANG X H. The application of FLOW-3D in thin wall cylinder die-casting parts die-casting simulation[J]. Die & Mould Manufacture, 2013, 13(10): 65-67.

[17] 刘文憬，李元东，宋赵熙，毕广利，杨昊坤，曹杨婧. Sr+Er 复合变质对 AlSi10MnMg 合金微观组织、导热及力学性能的影响[J]. 材料导报，2023, 37(6): 131-137.
LIU W J, LI Y D, SONG Z X, BI G L, YANG H K, CAO Y J. Effect of Sr+Er composite modification on microstructure, thermal conductivity and mechanical properties of AiSi10MnMg alloy[J]. Materials Reports, 2023, 37(6): 131-137.

[18] 王火生，林纪宗. 基于 Flow-3D 摩托车轮毂压铸成型浇注系统优化设计[J]. 模具制造，2014, 14(5): 74-76.
WANG H S, LIN J Z. Optimization design of die-casting gating system for motorcycle wheel hub based on Flow-3D software[J]. Die & Mould Manufacture, 2014, 14(5): 74-76.

[19] 杨宇平. 基于 FLOW-3D 的浊流数值模拟研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.
YANG Y P. Numaericl simulation of turbidity currents based on FLOW-3D[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[20] HUANG M Y, ZHOU Q, WANG J Y, LI S H. Die casting die design and process optimization of aluminum alloy gearbox shell [J]. Materials, 2021, 14(14): 3999.

[21] 韩恒恒，李晓棠，曹殿涛，吴海波. 铝合金压铸件缺陷分析及对策和压铸技术新发展[J]. 机电技术，2014(6): 95-97.
HAN H H, LI X T, CAO D T, WU H B. Aluminium alloy die casting defect analysis and countermeasures and die casting technology new development[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2014 (6): 95-97.

[22] 朱洪军，侯丽彬. 局部挤压技术在 MQ200 变速器壳体上的应用[J]. 铸造，2020, 69(6): 602-605.
ZHU H J, HOU L B. Application of local extrusion technology to MQ200 transmission case[J]. Foundry, 2020, 69(6): 602-605.

[23] 杨新强，万晓萌，郝鹏磊，白丹，樊小龙. 局部挤压工艺在铝合金重型变速箱后盖压铸上的应用[J]. 铸造技术，2021, 42(9): 797-800.
YANG X Q, WAN X M, HAO P L, BAI D, FAN X L. Application of local squeezing process on the die casting of aluminum heavy duty gearbox back cover[J]. Foundry Technology, 2021, 42(9): 797-800.

[24] 黄潇苹，朱洪军，魏巍. 铝合金下缸体铸件的局部挤压技术研究[J]. 特种铸造及有色合金，2022, 42(4): 517-520.
HUANG X P, ZHU H J, WEI W. Application of local extrusion technology in lower cylinder block castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4): 517-520.

[25] HUANG J, ZHAO H, CHEN Z. Microstructure and properties of A356 alloy wheels fabricated by low-pressure die casting with local squeeze[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28: 2137-2146.

[26] 王海啸，丛建臣，王进玲，朱玉麒，李浩，袁伟，郭前建. 基于 AnyCasting 大型薄壁鞍座铸造工艺优化[J]. 铸造技术，2023, 44 (3): 293-297.
WANG H X, CONG J C, WANG J L, ZHU Y L, LI H, YUAN W, GUO Q J. Casting process optimization of large thin-walled saddle based on AnyCasting[J]. Foundry Technology, 2023, 44 (3): 293-297.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net