DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5066

AM60B 镁合金方向盘骨架半固态射压凝固过程数值模拟研究

徐春杰[1,2,3],赵思琪[1,2],段宗昊[1,2],顾峻齐[1,2],谢婉婷[1,2],屠　涛[2,3],田　军[2,3],
曾凡宏[1,2,3],张忠明[1,2],SHECHTMAN Dan[1,2]

(1. 西安理工大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710048;2. 西安谢赫特曼诺奖新材料研究院,陕西 西安 710048;3. 镁高镁诺奖(铜川)新材料有限公司,陕西 铜川 727031)

摘　要:以 AM60B 镁合金重卡方向盘骨架半固态射压凝固过程为研究对象,针对铸件厚大部位在凝固过程孤立液相区难以补缩的问题,利用 ProCAST 软件,优化了模具冷却排溢系统,并确定了最优生产工艺参数。在铸件厚大部位的模具内局部设计冷却管路,以改变局部冷却条件,并结合工艺参数调整,针对模具改进后的凝固过程进行了模拟分析。结果表明,最佳工艺参数为射压半固态浆料温度 598 ℃,射压速度 2 m/s,模具预热温度为 160 ℃。该参数下,收缩类缺陷含量由 2.27 cm^3 降低至 0.23 cm^3,减少了 89.8%,满足实际生产要求。

关键词:半固态射压成形;AM60B 镁合金;方向盘骨架;缩松缩孔;数值模拟

中图分类号:TG146.22; TG249.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)06-0550-08

Numerical Simulation of the Thixomolding Solidification Process for AM60B Magnesium Alloy Steering Wheel Frames

XU Chunjie[1,2,3], ZHAO Siqi[1,2], DUAN Zonghao[1,2], GU junqi[1,2], XIE Wanting[1,2], TU Tao[2,3], TIAN Jun[2,3], ZENG Fanhong[1,2,3], ZHANG Zhongming[1,2], SHECHTMAN Dan[1,2]

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Shechtman Nobel Prize New Materials Institute, Xi'an 710048, China; 3. Meigaomei Nobel Prize (Tongchuan) New Materials Co., Ltd., Tongchuan 727031, China)

Abstract: The thixomolding solidification process of an AM60B magnesium alloy heavy truck steering wheel frame was taken as the research object. Given that the bulk of the casting material is difficult to fill in the isolated liquid phase during the solidification process, the mold cooling and overflow system was optimized via ProCAST software, and the optimal production process parameters were determined. To change the local cooling conditions, a local cooling pipe was designed in the mold with the greatest part of the casting thickness, and the solidification process after the mold improvement was simulated and analysed according to the adjustment of process parameters. The optimum process parameters are the injection temperature of the semisolid slurry at 598 ℃, the injection velocity at 2 m/s, and the preheating temperature of the mold at 160 ℃. Under these parameter, the shrinkage defect content is reduced from 2.27 cm^3 to 0.23 cm^3, which is a reduction of 89.8% and can meet the actual production requirements.

Key words: thixomolding; AM60B magnesium alloy; steering wheel frame; shrinkage and porosity defects; numerical simulation

镁合金结构材料密度低,比强度和比刚度高,并具有良好的阻尼减震特性。AM 系镁合金中 Al 含量较低,合金中含 Al 硬质相较少,具有较高的塑韧性与适中的力学性能,常应用于受冲击载荷、安全性高

收稿日期:2025-04-14

基金项目:陕西省国际科技合作计划项目-重点项目(2023-GHZD-50);陕西省外国专家服务计划-重点项目(S2025-ZC-WGZJ-ZD-0011);陕西省重点研发计划,秦创原"科学家+工程师"队伍建设项目(2023KXJ-237)

作者简介:徐春杰,1971 年生,博士,教授.研究方向为镁合金强韧化及半固态射压成形.Email: xuchunjie@xaut.edu.cn

引用格式:徐春杰,赵思琪,段宗昊,顾峻齐,谢婉婷,屠涛,田军,曾凡宏,张忠明,SHECHTMAN Dan. AM60B 镁合金方向盘骨架半固态射压凝固过程数值模拟研究[J]. 铸造技术,2025, 46(6): 550-557.

XU C J, ZHAO S Q, DUAN Z H, GU J Q, XIE W T, TU T, TIAN J, ZENG F H, ZHANG Z M, SHECHTMAN D. Numerical simulation of the thixomolding solidification process for AM60B magnesium alloy steering wheel frames[J]. Foundry Technology, 2025, 46(6): 550-557.

中国知网 https://www.cnki.net

的场合。在绿色减重轻量化大背景下，镁合金被广泛应用于汽车、航空航天、3C 等领域。以 AM60B 为例，其主要被应用于汽车轻量化领域，如设备仪表板、座架和发动机罩盖，有望实现降低 10%~15%的油耗，在一定程度上缓解对资源及环境的压力[1-2]。

半固态射压成形(thixomolding)结合了压铸与注塑成形工艺特点，可以实现一体化成形[3-4]，是一种新兴成形工艺，对镁合金结构材料在不同工业领域的轻量化应用发挥了促进作用[5-9]。2024 年，伯乐智能和伊之密分别开发了 4 000T 和 3 000T 镁合金半固态射压机，用于生产汽车高精度零部件。目前，伊之密正在联合研发 5000T 半固态射压装备。镁合金半固态工艺及装备研发受到了行业广泛关注，近 3 年来半固态射压成形在镁合金传统优势领域取得关键技术突破，将助力镁合金在汽车轻量化领域的规模化应用，在汽车、3C、消费品等领域的生产中取得显著成效，对镁产业规模提升发挥了重要作用[10-15]。Okayasu 等[16]研究发现，半固态射压成形工艺制备的 AZ91 镁合金相较于热室压铸和冷室压铸，具有更少的缩松缺陷，抗拉强度和屈服强度高出约 10%。Yuichiro 等[17]利用该技术制备了 AZ91D 镁合金板材，发现喷嘴处金属液凝固过快导致卷气缺陷增加，影响板材性能。Gu 等[18]通过 XCT(X 射线计算机断层扫描)技术发现，材料内部缺陷与注射温度密切相关。

虽然半固态射压成形可以显著降低工件气孔缺陷，但残余气孔会大幅削弱铸件性能。可见半固态射压成形过程中流场、温度场以及热节、收缩类缺陷的演化规律与传统压铸存在较大差距，半固态射压成形关键技术、工艺和模具设计不能完全照搬压铸设计，而半固态射压成形过程中型腔内部的流场、温度场以及热节、缩松、缩孔等缺陷的演化规律均无法用肉眼观察，可见对其进行模拟计算优化非常重要。

本文利用数值模拟，结合 AM60B 镁合金重卡方向盘骨架半固态射压成形实际生产和模具结构设计优化，提出模具内部冷却管路–溢流槽协同优化，并通过工艺参数优化，以期指导模具设计，改善生产过程的充型、凝固状态，从而降低工件内收缩类缺陷体积，提高产品质量，为复杂镁合金射压件缺陷控制提供可量化复用参考。

1　方向盘骨架限元模型

1.1　结构分析

重卡方向盘骨架模型如图 1 所示，材料为 AM60B 镁合金，其合金成分见表 1。骨架轮廓外侧尺寸约为 ϕ402 mm×120 mm，铸件壁厚分布示意如图 2 所示，最大壁厚为 15 mm，平均壁厚 6.5 mm，壁厚不均匀。其结构特点在于产品底部平面部位分布较多尺寸小而密集的凹槽、轮缘内侧均匀分布厚度尺寸不一的加强筋，这些部位的厚度变化较大。在凝固过程中，厚度变化造成散热条件不均匀，增加了铸件产生收缩类缺陷的风险。

表1 AM60B镁合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of AM60B magnesium alloy

(mass fraction/%)

Al	Mn	Zn	Si	Fe	Ca	Mg
5.43	0.258	0.101	0.039	0.019	0.005 3	Bal.

1.2　有限元模型和边界条件

根据金属铸型结构简化结果、铸件及浇注系统形貌，按照不同部位的关注程度划分差异化网格尺寸。重卡方向盘骨架模型及其浇注系统面网格尺寸为 3 mm、模具面网格尺寸为 10 mm，并在面网格基础上划分体网格，网格总计 7 738 312 个。模型的有限元网格如图 3 所示。

重卡方向盘骨架与金属型模具的换热系数为 1 500 W/(m^2·K)，模具与外界换热系数为10 W/(m^2·K)，换热条件为空冷，工作环境为 28 ℃，铸件凝固时间步长为 0.5 s。

图 1　重卡方向盘骨架结构

Fig.1　Structure of the heavy truck steering wheel frame

中国知网　https://www.cnki.net

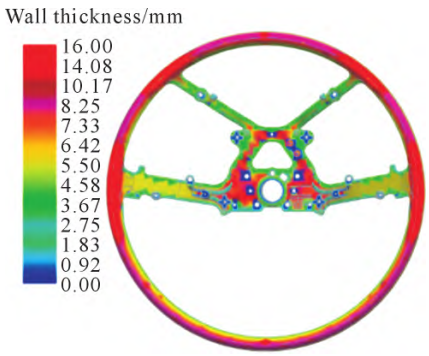

图 2 重卡方向盘骨架壁厚分布示意图
Fig.2 Schematic diagram of the wall thickness distribution of the heavy truck steering wheel frame

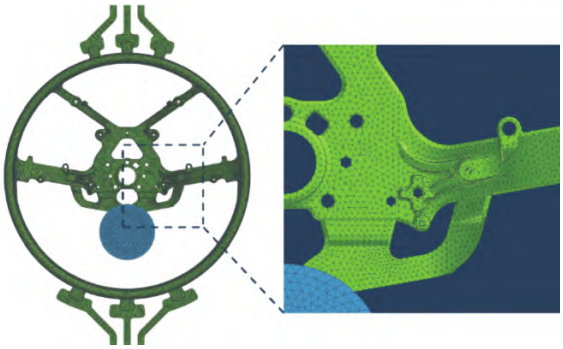

图 3 重卡方向盘骨架有限元面网格
Fig.3 Finite element surface mesh of the heavy truck steering wheel frame

2 初始工艺模拟

2.1 初始系统及射压参数

为保证金属液在型腔内充型平稳，模具设计时采用底注式浇注系统，并将内浇口设置在铸件侧平面，可减小高速高温金属液对型腔的热冲击，从而延长模具使用寿命。内浇口设置为矩形梳状排列，该简单形状便于加工、表面粗糙度低、易于脱模。此外，初始模具在铸件最后充型部位设置溢流槽，有效地将半固态金属液填充型腔时可能带入的夹杂物、涂料残渣以及混有的气体和被污染金属液推挤至铸件外部，从而显著提升产品质量[19]。

在半固态射压成形生产中，主要工艺参数为螺杆的射压速度、浆料温度、模具预热温度。适合半固态浆料成形的固相分数为 30%~70%，低固相率下进行数值模拟时，铸件凝固顺序清晰，易提前预警热节产生部位及体积大小，又考虑到铸件结构影响，选取浆料固相分数为 40%。图 4 为 AM60B 镁合金热物性参数，由图 4c 可知，其对应的浆料温度为 608 ℃。模具预热温度为 160 ℃。

在不考虑金属液进入内浇口产生的涡流、损耗，螺杆压射速度与浆料充型内浇口速度满足下式：

$$V_{plunger}=\frac{V_{gate}}{A_{plunger}}\cdot A_{gate} \tag{1}$$

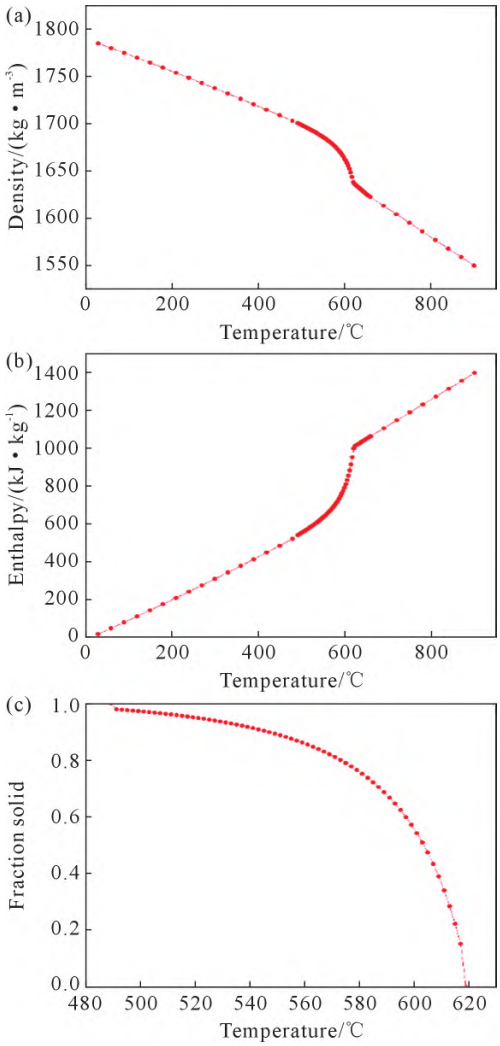

图 4 AM60B 镁合金热物性参数：(a) 密度；(b) 焓；(c) 固相率
Fig.4 Thermophysical properties of AM60B magnesium alloy: (a) density; (b) enthalpy; (c) solid fraction

式中，$V_{plunger}$ 为射压速度；$A_{plunger}$ 为螺杆与金属液接触面积；V_{gate} 为内浇口速度；A_{gate} 为内浇口截面积。

根据螺杆直径计算出其与金属液接触面积 $A_{plunger}$ 为 5 024 mm²，测量浇注系统实际内浇口截面积 A_{gate} 为 200 mm²。镁合金射压合理内浇口充型速度 V_{gate} 为 40~90 m/s[20]，故该铸件的理论射压速度为 1.59~3.58 m/s。再结合生产初期多次射压试模，确定射压速度为 3 m/s。

2.2 充型过程模拟分析

图 5 为优化前铸件充型过程温度场分布，由图可知，浇注系统设计较合理，铸件温度场梯度均匀，无局部过热或过冷。金属液充型平稳，自内浇口进入，呈放射状逐步充满型腔，在与水平轮缘处铸型碰撞后最终流向方向盘轮缘上下侧。基于此，在金属液最后充型部位设置溢流槽，便于将充型前端冷污金属液推挤至射压件外部，有效提高产品质量。

2.3 凝固过程模拟分析

在铸造模拟中，固相率表示金属液已凝固部分

中国知网 https://www.cnki.net

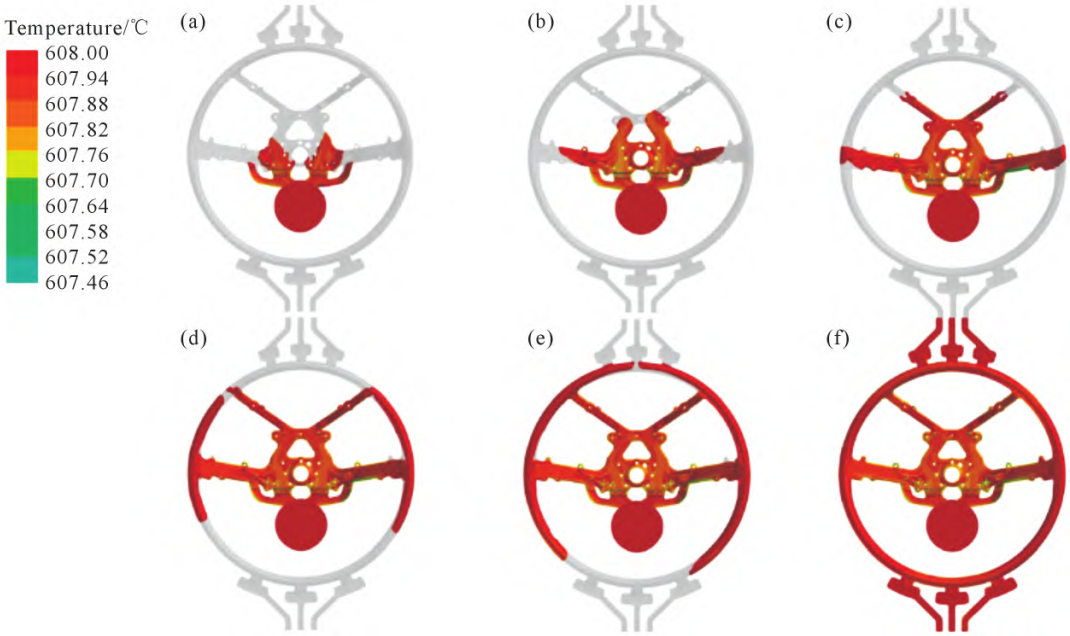

图 5 重卡方向盘骨架充型过程温度场分布：(a) 充型 10%；(b) 充型 30%；(c) 充型 50%；(d) 充型 60%；(e) 充型 80%；(f) 充型 100%

Fig.5 Temperature field distributions during the filling process of the heavy truck steering wheel frame: (a) 10% filling; (b) 30% filling; (c) 50% filling; (d) 60% filling; (e) 80% filling; (f) 100% filling

所占比例。当金属液开始凝固时，固相率逐渐上升，直到凝固结束。在 ProCAST 中用不同颜色深度表征固相率大小，颜色越深部位固相率越高，其凝固速率更快，反之金属液则凝固更慢更接近于液态。通过观察模拟结果中的固相率分布，可以佐证那些固相率较低、凝固速度较慢的区域，正是热节所在的位置。图 6 为优化前重卡方向盘骨架凝固过程中的固相率分布，可以看出，射压件未实现理想的顺序凝固。凝固过程是从轮辐开始，因其壁厚均匀且相对孤立，热量散失快。随后凝固的是轮缘薄壁与平面薄壁区域，最后凝固的是轮缘与轮辐连接处与底平面凹槽附近，这些部位壁面厚度较大，冷却较慢，凝固后期产生的热节部位体积更大，若缺乏后续有效补缩，必然产生收缩类缺陷。

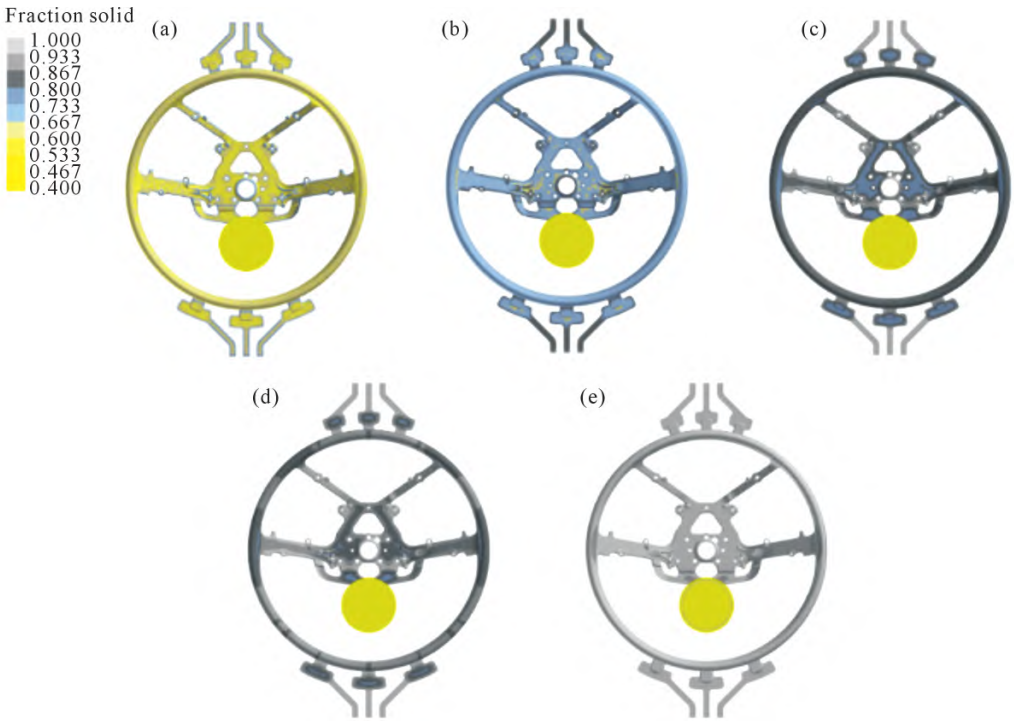

图 6 优化前重卡方向盘骨架凝固过程固相率分布：(a) 0.5 s; (b) 1 s; (c) 1.5 s; (d) 2 s; (e) 3 s

Fig.6 Solid fraction distributions of the heavy truck steering wheel frame before optimization during the solidification process: (a) 0.5 s; (b) 1 s; (c) 1.5 s; (d) 2 s; (e) 3 s

中国知网 https://www.cnki.net

2.4 缩孔缺陷分析

优化前骨架缩松缩孔缺陷如图 7a 所示，主要集中在轮缘处、凹槽聚集的平面附近，这与凝固过程模拟中孤立液相区分布基本吻合(图 7b)，表明缺陷分布与热节位置密切相关。

据统计，优化前骨架缩松缩孔体积大小为2.27 cm^3，半固态射压件各部位缩孔缺陷产生原因各异，具体如下：①位置 1 处于金属液交汇处，充型到该处时，来自水平轮辐和顶部轮辐的两股金属液在此处形成汇聚。由于两股金属液具有不同的流动速度，其交汇时会产生强烈的相互作用，包括熔体飞溅、形成涡流甚至流通不畅，直接导致了金属液在拐角处的充填不当，进而产生孔隙。②位置 2 位于方向盘轮辐轮缘交汇处，由图 2 可知，其平均壁厚为 13 mm，相较于相邻轮辐的平均壁厚 5 mm，因壁厚差异大，这里的金属液凝固速度相对较慢。轮辐处的金属液会率先凝固，这可能导致补缩通道提前关闭，使得位置 2 处的金属液无法得到有效的补缩。因此，在凝固过程中，位置 2 的中心部位容易形成缩松缩孔缺陷。③金属液首先进入并汇聚与此，导致该区域初始温度较高。相比于射压件其它部位散热相对较慢；此外，该部位聚集许多凹槽，进一步加剧了热量的积累，使得位置 3 的金属液散热更加困难。

3 缩松缩孔缺陷优化

针对重卡 AM60B 镁合金方向盘骨架，缩松缩孔缺陷是亟待解决的问题。常用改进方法主要有工艺参数优化(浆料温度控制、合理射压速度)、模具结构优化(浇注系统、冷却排溢系统)、设备改进与自动化等。由于铸件在该浇注系统下充型平稳，并无明显卷气、裹气现象，在综合考虑生产成本和工艺效果后，决定重点优化冷却排溢系统及生产工艺参数。

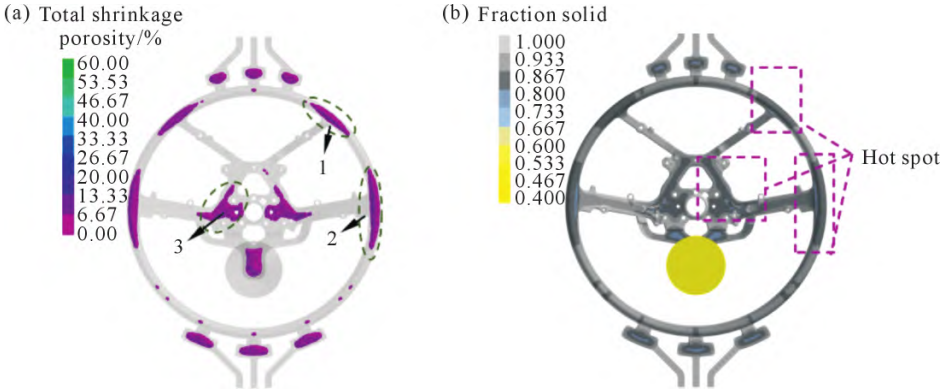

图 7 优化前缩孔缺陷分布与热节部位示意图：(a) 缩松缩孔缺陷分布；(b) 热节部位分布

Fig.7 Distribution of shrinkage defects and hot spot before optimization: (a) distribution of shrinkage defects; (b) distribution of hot spot

3.1 冷却排溢系统优化

缩孔的产生与热节有关，而热节部位是在凝固时由壁厚差异产生的局部高温区域。因此，可通过冷却管路和溢流槽的设计，实现缺陷的降低。冷却管路可以加速热节部位的冷却过程，溢流槽对充型前端气体、冷金属液、氧化及杂质有着引导聚集作用，从而实现缺陷的有效转移和减少。

加快冷却速率，采用在重卡方向盘骨架缩松缩孔部位设置冷却管路(轮缘、平台)，在动、静模均设置冷却管路。动静模管路采用对称分布，其中静模冷却管路如图 8 所示，冷却管路尺寸为 ϕ7.9 mm×15 mm，距离分型面 19 mm。同样在缩孔位置设置溢流槽，如图 9 所示。不同缩松缩孔缺陷部位溢流槽尺寸见表 2，其中 b 为溢流槽长度中心距、l 为溢流口长度、s 为溢流口宽度、r 为溢流槽半径、h 为溢流口厚度。

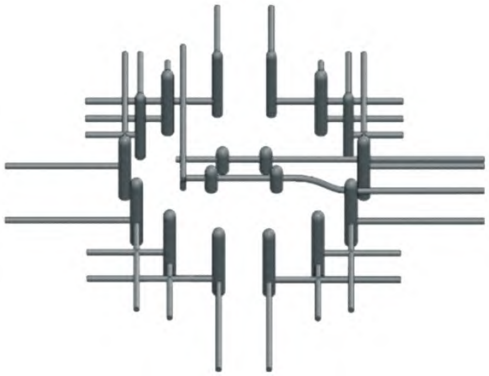

图 8 静模冷却管路示意简图

Fig.8 Structure of the cooling pipeline with a rear mold

采用初始条件对射压件进行凝固过程模拟分析，图 10 为初始条件下优化后重卡方向盘骨架模型固相率变化示意图。通过对比优化前后重卡方向盘骨架固相率模拟结果，尤其是图 10d 与图 6d，可清晰看出，优化后方案有效降低了热节部位的体积大小，热节部位体积变小可在一定程度上反映凝固过程的改善。由于优化后的冷却排溢系统有效减少了轮缘和轮辐之间的温度梯度，使铸件在凝固过程中能更均匀地散热，避免了局部过热或过冷现象的发生，热节部位体积减小减少了缩松缩孔等缺陷的形

中国知网 https://www.cnki.net

表2 不同缩松缩孔缺陷部位溢流槽尺寸

Tab.2 Overflow groove size at different locations with shrinkage defects

Location	b/mm	r/mm	s/mm	l/mm	h/mm
1	100	12.5	20	6	1.6
2	150	13.0	15	6	1.6
3	15	10.0	12	3	0.8

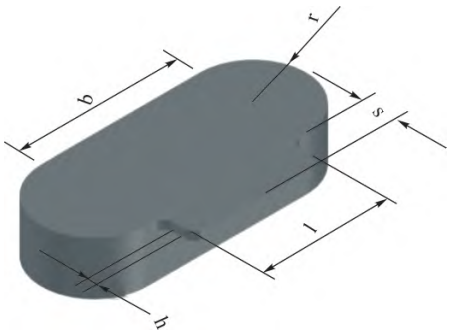

图 9 溢流槽形状示意图

Fig.9 Shape of the overflow groove

成风险。为进一步验证优化效果，对缩松缩孔缺陷进行了模拟(图 11)，结果表明优化后的冷却排溢系统可以很大程度抑制缩松缩孔缺陷，铸件缩孔体积分数由 2.27 cm³ 降低至 1.65 cm³，减少了 27.3%。

3.2 工艺参数优化

为确定能够最大程度减少缩松缩孔缺陷的工艺参数，采用经过优化后的冷却排溢系统，针对重卡方向盘骨架缺陷进行数值模拟分析。构建了一个三因素三水平的试验方案，实验表格如表 3 所示。

以缩松缩孔缺陷体积为评估指标，得出了如表 4 所示的综合评估结果。表中 K_1、K_2、K_3 分别表示各参数在其对应水平下的数据总和，R 表示极值。

射压件凝固后缩松缩孔缺陷示意图如图 12，九组缺陷按由大到小排列为：$L_7>L_9>L_8>L_6>L_5>L_2>L_4>L_3>L_1$，从模拟结果可以看出，浆料的温度及射压速度对产生缩松缩孔缺陷影响较大，模具预热温度影响较小。

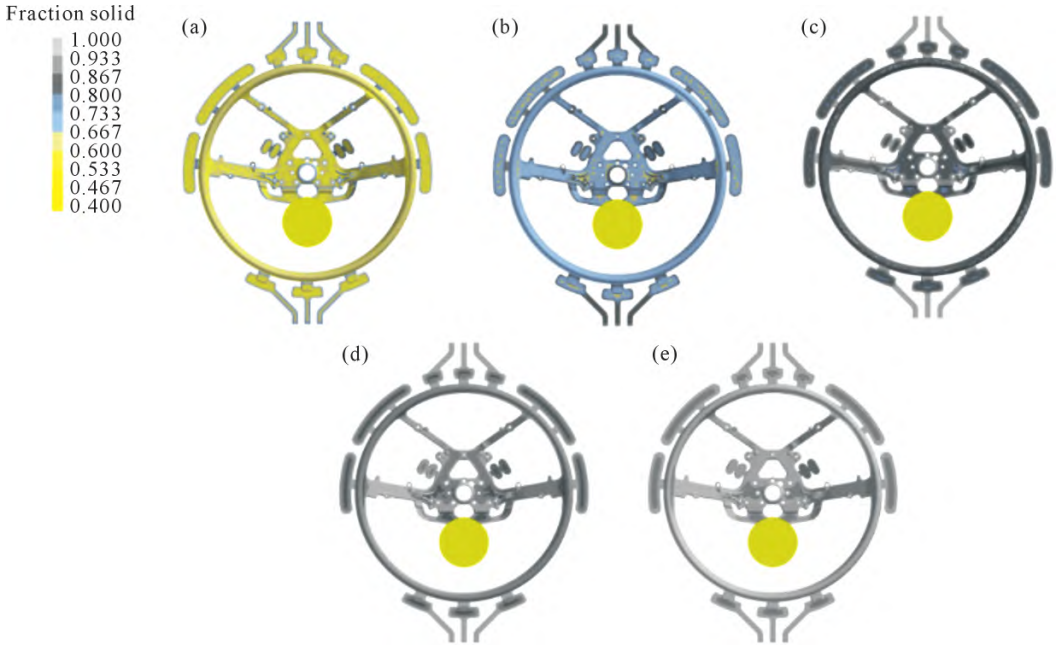

图 10 优化后重卡方向盘骨架凝固过程的固相率分布：(a) 0.5 s; (b) 1 s; (c) 1.5 s; (d) 2 s; (e) 3 s

Fig.10 Solid phase rate distributions of the heavy truck steering wheel frame after optimization during the solidification process: (a) 0.5 s; (b) 1 s; (c) 1.5 s; (d) 2 s; (e) 3 s

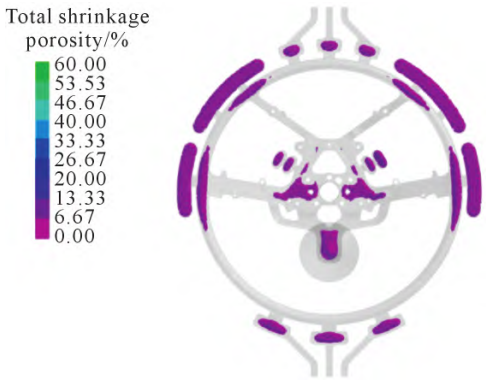

图 11 优化后缩孔缺陷分布

Fig.11 Distribution of shrinkage defects after optimization

表3 因素–水平实验表

Tab.3 Table of factor–level experiments

Level	Factor		
	A-Pouring temperature/℃	B-Mold Preheat temperature/℃	C-Injection Velocity/(m·s⁻¹)
1	598	160	2
2	603	170	3
3	608	180	4

从图 12 模拟结果可见，浆料温度对缺陷大小的影响最为显著。由图 4c 可以看出，598、603 和 608 ℃所对应的固相率分别为 60%、50%及 40%，随着浆料

中国知网 https://www.cnki.net

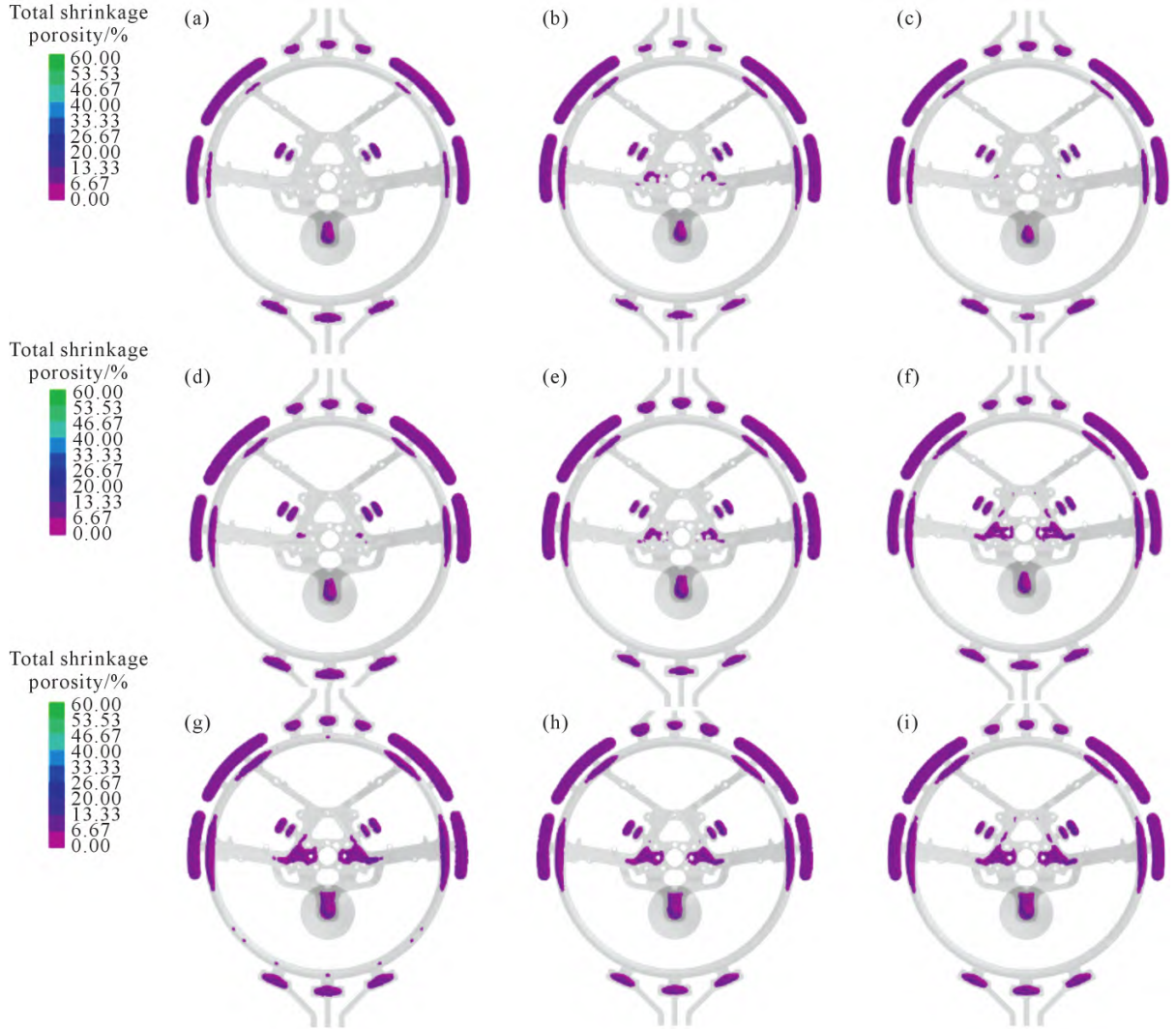

图 12 九组实验缩孔缺陷模拟结果：(a) L_1; (b) L_2; (c) L_3; (d) L_4; (e) L_5; (f) L_6; (g) L_7; (h) L_8; (i) L_9

Fig.12 Simulation results of shrinkage defects for nine experiments: (a) L_1; (b) L_2; (c) L_3; (d) L_4; (e) L_5; (f) L_6; (g) L_7; (h) L_8; (i) L_9

表 4 正交实验结果表

Tab.4 Table of orthogonal experimental results

Experiment	A	B	C	Shrinkage Volume/cm^3
L_1	1	1	1	0.23
L_2	1	2	2	0.76
L_3	1	3	3	0.45
L_4	2	1	2	0.70
L_5	2	2	3	0.92
L_6	2	3	1	1.40
L_7	3	1	3	1.77
L_8	3	2	1	1.50
L_9	3	3	2	1.69
K_1	1.44	2.7	3.13	Optimal level:
K_2	3.02	3.18	3.15	$A_1B_1C_1$
K_3	4.96	3.54	3.14	Factor:
R	3.41	1.07	0.22	A>B>C

温度上升，凝固后缺陷体积增大。在 598 ℃时，固相率为 60%，浆料中固相分数较高，含有更多 α-Mg 球状颗粒，凝固收缩量更小，对补缩依赖更低，故缺陷体积最小。而温度升高导致固相率降低，凝固过程趋近液态，收缩量增大，最终缺陷体积也随之增大。随射压速度增加，缩松缩孔体积上升。这是因为射压速度增大使金属液快速充填型腔并凝固，内部补缩能力减弱，导致缩松缩孔形成。模具温度在 160~180 ℃范围，温度上升时，缺陷体积略有增加。模具温度低一些可加快热节凝固，减少缩松缩孔，但效果有限，故缺陷变化幅度小。因此，欲使缩松缩孔尺寸最小，最佳的工艺参数选择为浇注温度 598 ℃，射压速度 2 m/s，预热温度为 160 ℃，此时缺陷含量降低至 0.23 cm^3，减少了 89.8%。

4 结论

(1)采用 ProCAST 软件模拟半固态射压镁合金方向盘骨架凝固过程，发现缺陷集中于轮缘及凹槽密集平面区。分析表明，当固相率 60%时，轮缘、平台形成孤立液相区，补缩通道关闭导致补缩困难，凝固后产生明显缩松缩孔。

中国知网 https://www.cnki.net

(2)通过优化冷却排溢系统可改善铸件凝固过程,模拟结果表明,优化冷却方案和添加溢流槽显著加快壁厚区域凝固,有效抑制缩松缩孔缺陷,缩孔体积由 2.27 cm^3 下降至 1.65 cm^3，缩松缩孔体积降低了 27.3%。

(3)工艺参数调整,可以实现缩松缩孔尺寸减小。浆料温度对缺陷大小的影响最为显著，在最佳工艺参数下，缩孔体积降低至 0.23 cm^3，减少了 89.8%。

参考文献:

[1] CZERWINSKI F. Semi solid processing of magnesium alloys: Progress and limitations[J]. Solid State Phenomena, 2019, 285: 489-494.

[2] MO N, TAN Q Y, BERMINGHAM M, HUANG Y D, DIERINGA H, HORT N, ZHANG M X. Current development of creep-resistant magnesium cast alloys: A review[J]. Materials & Design, 2018, 155: 422-442.

[3] LI G, QU W Y , LUO M, CHENG L, GUO C, LI X G, XU Z, HU X G, LI D Q, LU H X, ZHU Q. Semi-solid processing of aluminum and magnesium alloys: Status, opportunity, and challenge in China [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31 (11): 3255-3280.

[4] 宇文江涛, 赵雄, 董璐, 牛立斌, 胡宇阳. 注射成形增强半固态 AZ91D 镁合金的组织及性能[J]. 热加工工艺, 2024, 53(6): 122-127.
YUWEN J T, ZHAO X, DONG L, NIU L B, HU Y Y. Influence of semi-solid injection molding on microstructure and properties of AZ91D Mg alloy[J]. Hot Working Technology, 2024, 53(6): 122-127.

[5] HAO Z Y, JU Y, CHEN L X. The use of aluminium and magnesium alloys in automotive lightweight technologies[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37: 4615-4622.

[6] EMADI P, ANDILAB B, RAVINDRAN C. Engineering lightweight aluminum and magnesium alloys for a sustainable future [J]. Journal of the Indian Institute of Science, 2022, 102: 405-420.

[7] 卢灿雄,罗维,李继强,贾志欣,刘立君,吴士荣,杨斌,孙丽丽,郭涛. 某汽车后舱一体化压铸件工艺分析及缺陷改善[J]. 特种铸造及有色合金,2025, 45(1): 145-148.
LU C X, LUO W, LI J Q, JIA Z X, LIU L J, WU S R, YANG B, SUN L L, GUO T. Process analysis and defect mitigation of an integrated die-cast rear underbody component in automotive applications[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(1): 145-148.

[8] CHANG Z Y, SU N, WU Y J, LAN Q, PENG L M, DING W J. Semisolid rheoforming of magnesium alloys: A review[J]. Materials & Design, 2020, 195: 108990.

[9] ARCALENI R, MANTELLI A, GIRELLI L, TONELLI L, MORRI A, POLA A, CESCHINI L. Microstructural characterization of primary and recycled aluminum AlSi7Mg alloy processed by the semi-solid thixocasting method[J]. Materials Characterization, 2025, 220: 114657.

[10] ZHU Y B, MIDSON S P. The status of magnesium injection molding in China[J]. Solid State Phenomena, 2019, 285: 436-440.

[11] 陈振华. 镁合金[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
CHEN Z H. Magnesium alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.

[12] YANG J R, ZHU Z Q, HAN S J, GU Y T, ZHU Z Q, ZHANG H D. Evolution, limitations, advantages, and future challenges of magnesium alloys as materials for aerospace applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1008: 176707.

[13] JIANG W M, LI Q Q. Development of advanced aluminum and magnesium alloys: Microstructure, mechanical properties and processing[J]. Materials, 2024, 17(19): 4811.

[14] SONG X, HU Y, TIAN J S,WANG Y P, YAN Z J. Development of Mg-Zn-Mn-Y magnesium alloy with high thermal conductivity and compression properties via injection molding[J]. International Journal of Metalcasting, 2024, 18: 789-798.

[15] YANAGIYA T, KISHI Y, KAJIKAWA K, YAMAGUCHI T, SAITO K, TANAKA S. Dynamic recrystallization behavior in alpha phase of Semi-Solid injection-molded AM60B magnesium alloy[J]. Solid State Phenomena, 2016, 256: 39-44.

[16] OKAYASU M, FUKUI T. A study of the mechanical properties of a Mg-Al-Zn (AZ91) produced via Thixomolding[J]. International Journal of Material Forming, 2020, 14: 271-280.

[17] MURAKAMI Y, MIWA K, OMURA N, TADA S. Development of new type semi-solid injection process for magnesium alloy[J]. Solid State Phenomena, 2015, 217-218: 361-365.

[18] GU L D, SHANG X Q, WANG J, DENG J J, ZHAO Z, ZENG X Q. Effect of hierarchical cell structure and internal pores on mechanical properties of thixomolded AZ91D magnesium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2025, 35(3): 749-764.

[19] SCHILLING A, SCHMIDT D, GLÜCK J, SCHWENKE N, SHARABI H, FEHLBIER M. About the impact on gravity cast salt cores in high pressure die casting and rheocasting[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2022, 119: 102585.

[20] 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 die design handbook[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

(责任编辑:杨浩雪)

中国知网 https://www.cnki.net