

# 差速器壳体高压压铸工艺模拟及优化

邵熠羽<sup>1, 2</sup>, 彭文飞<sup>1, 2</sup>, 崔杰<sup>3</sup>, 旷鑫文<sup>3</sup>, 邹杰<sup>1, 2</sup>, Moliar Oleksandr<sup>1, 2</sup>

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江宁波 315211; 2. 宁波大学 浙江省零件轧制成形技术重点实验室, 浙江宁波 315211; 3. 浙江华朔科技股份有限公司, 浙江宁波 315806)

**摘要:** 为解决高压压铸铝合金差速器压铸过程中出现气孔、缩孔等问题, 运用有限元软件ProCAST对差速器壳体高压压铸过程进行数值模拟, 利用求解流场、温度场、速度场预测压铸缺陷, 并通过正交试验优化了压铸工艺。结果表明, 充型过程中底部圆筒及两侧支架区域存在卷气问题; 凝固过程中金属液温度梯度较大, 铸件会发生凝固不均、浇道提前凝固现象, 完全凝固时会形成缩孔缺陷。综合压铸参数对凝固时间、卷气量及缩孔体积的影响, 浇注温度650 ℃、模具温度220 ℃、压射速度为5 m/s为最优压铸参数, 压铸试验验证了压铸参数的可靠性。

**关键词:** 差速器壳体; 高压压铸; 数值模拟; 缺陷; 正交试验

差速器壳体属于大型复杂壳体件, 尺寸大、壁厚不均、整体结构复杂, 主要用于四驱SUV动力传递<sup>[1-2]</sup>。车辆运行过程输出功率高、启动扭矩大, 差速器壳体需要适应重载、高冲击、高应力等恶劣的服役环境, 而传统差速器壳体普遍采用球墨铸铁制造或重力铸造, 存在整体质量大、尺寸精度低、生产周期长, 浇冒口较大等问题<sup>[3-4]</sup>。

目前差速器壳体经过“以肋代实”的轻量化结构设计, 在保证结构强度的前提下, 能有效降低差速器壳体质量<sup>[5]</sup>。相关零部件材料采用了高强度铝合金代替了传统的球铁, 轻量化材料与结构的双重减重使差速器壳体轻量化设计的需求得以满足<sup>[6-8]</sup>。但轻量化设计带来了差速器壳体形性协同调控难的问题, 因此寻求高效率、高质量生产差速器壳体先进工艺成为目前研究的重点。

本文采用轻量化材料A380铝合金和先进制造技术高压压铸成形, 提出了一种铝合金差速器壳体高压压铸成形工艺。但差速器壳体结构复杂, 在压铸过程中会出现涡流裹气、金属液难以均匀补缩现象, 导致铸件内部存在气孔、缩孔等缺陷<sup>[9-10]</sup>。因此, 本文建立了高压压铸差速器壳体有限元模型, 对差速器壳体压铸过程进行数值模拟, 利用求解流场、温度场、速度场实现铸件缺陷预测, 通过正交试验和数据分析, 研究了浇注温度、模具温度、压射速度对铸件充型质量的影响, 并通过压铸试验验证了最优工艺参数的可靠性, 为差速器壳体轻量化生产提供一定的指导意义。

## 1 有限元模型的建立

将设计的差速器壳体三维模型(图1a)以igs格式文件导入ProCAST模拟软件中, 在ProCAST的mesh模块对差速器进行网格划分。考虑到铸件与浇注系统、排溢系统的壁厚不同, 对铸件、浇注系统、排溢系统、模具采用不同的网格尺寸划分。设置铸件网格尺寸为1.5 mm, 浇注系统与排溢系统网格尺寸为3 mm, 模具网格尺寸为10 mm。网格划分后网格数量约为1 750万个, 有限元模型如图1b所示。

差速器壳体材料选用A380铝合金, 化学成分如表1所示。A380铝合金的热物性

### 作者简介:

邵熠羽(1995-), 男, 助理实验师, 硕士, 主要从事金属轻量化、复合材料的成形与制件的抗冲击性能研究。E-mail: shaoyiyu@nbu.edu.cn

中图分类号: TH249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)12-1624-07

### 基金项目:

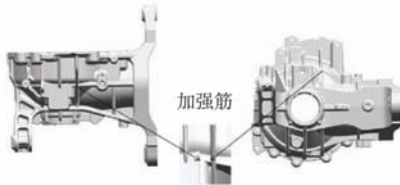
宁波市科技计划(No. 2021Z099, No. 2019B10100); 国家自然科学基金(No. 52075272, No. 52205386); 省属高校基本科研战略引导项目(SJLZ2021002)。

### 收稿日期:

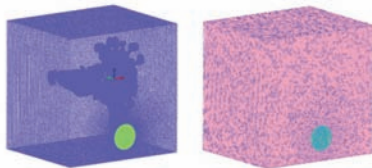
2023-02-24 收到初稿,  
2023-06-28 收到修订稿。

表1 A380铝合金的化学成分  
Table 1 Chemical component of the A380 Al alloy  $w_B/\%$

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Al
8.54	0.76	3.41	0.35	0.23	0.55	1.2	0.25	余量



(a) 差速器三维图



(b) 有限元模型

图1 高压压铸有限元模型

Fig. 1 FEM of the high pressure die casting

参数由软件提供，其中固相线温度为508 °C，液相线温度为589 °C。模具材料选用H13合金钢，在压铸数值模拟过程中，压铸模仅起到热交换的作用，并不参与流场计算。压铸过程中涉及多种热传递现象，主要包括铸件与模具、模具与模具的热传导，空气与模具外表面的热对流。设置模具与模具的传热系数为1 000 W/(m<sup>2</sup>·K)，模具与空气的传热系数为10 W/(m<sup>2</sup>·K)，铸件与模具的传热系数采用曲线形式的换热系数(图2)<sup>[11]</sup>。高压压铸初始工艺参数：浇注温度660 °C、模具温度220 °C、压射速度4 m/s。

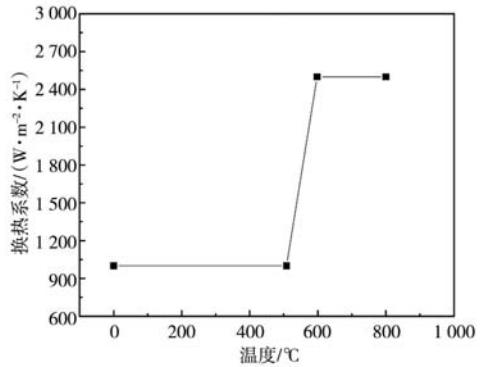


图2 A380-H13的换热系数

Fig. 2 Heat transfer coefficient of the A380-H13

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 铸件充型过程分析

铸件充型过程如图3所示。从图中可以看出，当充型率为30%时，中部浇道内的金属液通过内浇道开始充填型腔，而两侧浇道距离冲头较远，金属液尚未到达内浇道。当充填率为50%时，由于中部浇道内的金属液充型较快，在到达远浇道后与右侧浇道内的金属液在型腔右端圆筒区域发生回流现象，因此右端圆筒区域可能出现较多缺陷。当充型率为70%时，中部浇道的金属液完成对型腔中部的充型，两侧浇道的金属液充填至两侧支架。当充型率完成80%至90%时，右侧上端支架充型较为紊乱，该处为金属液在型腔中最后达到的地方，需要较长的填充距离，此时的金属液损失了较多的热量导致其流动性降低。同时由于铸件壁厚处存在局部区域未及时填充的情况，金属液到达型腔末端后发生回流，并在壁厚处发生卷气，而回流和卷气会导致在铸件凝固后期形成气孔缺陷。

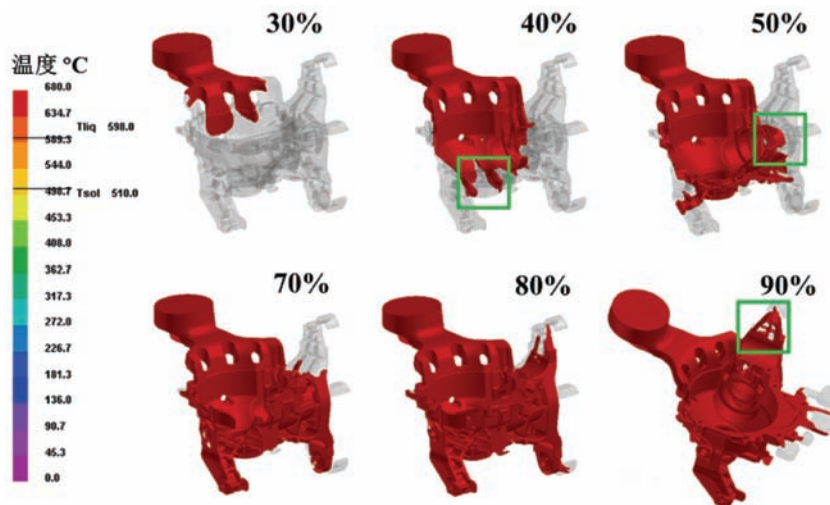


图3 金属液充型过程

Fig. 3 Filling process of the liquid metal

金属液充填时间和温度分布如图4所示。根据图4a充型过程时间分布可将差速器壳体充填过程从先往后顺序依次划分成蓝色、绿色、黄色和红色四个部分。蓝色区域主要包括浇道以及铸件近浇道处；绿色区域主要包括两侧支架的底部；黄色区域主要包括铸件的平台处以及距离内浇道较远的右侧上端支架；红色区域大部分位于铸件的溢流槽中，小部分位于金属液在到达型腔末端后在壁厚处发生回流的区域。整体而言，差速器壳体充填顺序主要遵循由近及远的规律，但铸件右侧上端支架充填较晚，导致该处充型质量较差。图4b为铸件充型过程温度分布。在充型过程中，型腔中的金属液始终保持较高的温度，其中铸件底部圆筒处以及两侧支架处为型腔温度最低区域，温度约为625 °C。充型末期，型腔内的金属液温度均在A380液相线（598 °C）以上，没有发生提前凝固的现象。在整个充型过程中，型腔内金属液温度较高，远浇道处的金属液温度较近浇道处略有降低，但温度梯度小，整体分布合理，金属液流动性良好。

## 2.2 铸件凝固过程分析

图5为铸件凝固过程的温度分布和固相分数变化。从图5a可以看出，当凝固状态达到60%时，铸件壁厚处温度下降速度较快，此时处于固液相共存状态，而铸件壁厚处温度下降速度慢，仍处于液相状态。当凝固状态达到80%，型腔内大部分区域的金属液温度均已到达固相线之下，但壁厚区域的金属液温度水平较高，与其周围区域保持一个较大的温度梯度（90 °C），易发生热应力集中现象，会导致铸件壁厚处形成热裂、缩孔缺陷。

铸件凝固过程的固相分数变化如图5b所示，铸件固相分数分布遵循壁薄区固相分数高，壁厚区固相分数低的规律。铸件右侧上端支架以及壁厚处的固相分数低于周围区域，当周围区域的固相分数达到了0.8时，壁厚区域的固相分数仅为0.5，甚至低于内浇道的固相分数。根据金属凝固理论<sup>[12]</sup>，当固相分数达到一定时，枝晶生长形成封闭骨架，切断了压力传递和液相补缩通道，这种凝固不均匀现象导致在凝固过程产

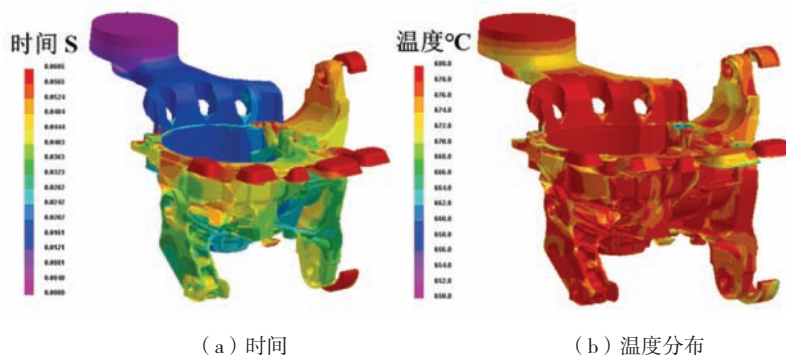


图4 充型过程时间和温度分布

Fig. 4 Distributions of the time and temperature during mold filling

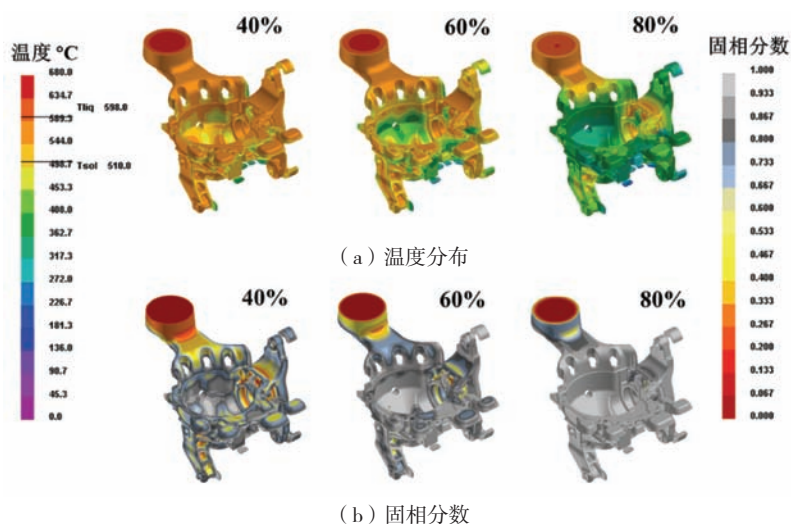


图5 铸件凝固过程温度分布和固相分数

Fig. 5 Temperature distribution and solid fraction during casting solidification

生孤立液相区，最终在铸件壁厚处形成缩松、缩孔缺陷。

铸件凝固时间如图6所示。由图可知，铸件凝固顺序遵循由远及近的规律。铸件壁薄区以及远浇道处优先凝固，溢流槽与铸件两侧支架次之凝固，铸件壁厚区域最后凝固。这是由于壁薄区域因温度较低且与模具热交换充分，因此会优先凝固，而壁厚区域因壁厚大且传热较慢导致其最后凝固。

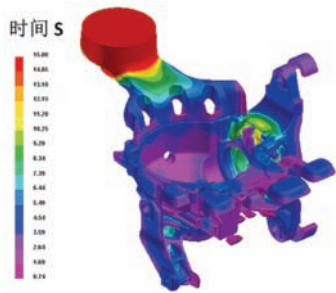
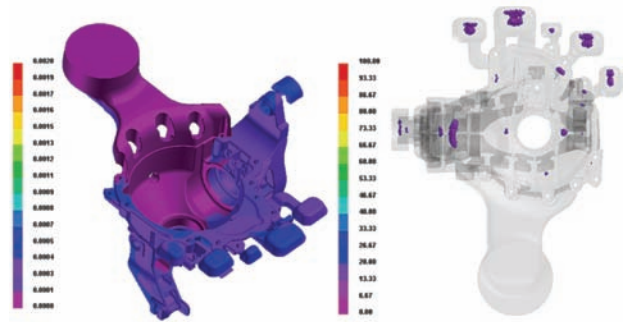


图6 铸件凝固时间  
Fig. 6 Solidification time of the casting

### 2.3 缺陷分析

铸件内部卷气的分布如图7a所示。由图可知，铸件的溢流槽内存在较多气体，有效地发挥了排除气体的作用，证明了溢流系统设计的合理性。铸件内平均卷气量约为 $0.000\ 3\ \text{g}/\text{cm}^3$ ，但铸件右侧支架上端与左侧支架区域卷气量约为 $0.000\ 6\ \text{g}/\text{cm}^3$ ，这是由于金属液在此区域发生了卷气和回流现象，导致该区域充型不良。

铸件内部缩孔的分布如图7b所示。由图可知，缺陷分布与对铸件凝固过程分析一致，铸件内的缩孔大部分集中在壁厚最厚处，少部分在右侧上端支架与底部圆筒处。使用VE软件对铸件缩孔体积进行测量，缺陷体积约为 $3.146\ \text{cm}^3$ ，由于铸件右侧上端支架与底部圆筒处为零件质量要求较高处，不允许内部存在缩孔缺陷，因此需要通过优化压铸工艺来消除缩孔缺陷。



(a) 卷气 (b) 缩孔

图7 缺陷预测结果

Fig. 7 Prediction results of the defect

## 3 压铸工艺参数优化

### 3.1 正交试验方案设计

本研究选取浇注温度、模具温度、压射速度作为正交试验中的主要影响因素，设计了正交试验的因素-水平表，如表2所示。

正交试验设计为三因素三水平，根据正交表的使用规则，选用 $L_9(3^3)$ 正交表，共进行9组正交试验。依次对各组试验方案进行数值模拟分析，将模拟结果中的凝固时间、缩孔体积、卷气量三种质量指标作为试验结果，得到各组试验结果如表3所示。

表2 正交试验因素水平表  
Table 2 Orthogonal test factor level table

水平	因素		
	A	B	C
	浇注温度/ $^{\circ}\text{C}$	模具温度/ $^{\circ}\text{C}$	压射速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	630	180	3
2	650	200	4
3	670	220	5

表3 正交试验方案  
Table 3 Orthogonal test plan

试验号	A/ $^{\circ}\text{C}$	B/ $^{\circ}\text{C}$	C/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	凝固时间/s	卷气量/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	缩孔体积/ $\text{cm}^3$
1	630	180	3	49.633 2	0.000 211	2.736 2
2	630	200	4	51.344 5	0.000 195	2.518 0
3	630	220	5	51.763 5	0.000 193	2.394 6
4	650	180	4	50.244 2	0.000 190	2.709 5
5	650	200	5	54.487 7	0.000 202	2.519 2
6	650	220	3	55.418 3	0.000 194	2.273 9
7	670	180	5	52.645 8	0.000 182	3.056 8
8	670	200	3	56.756 1	0.000 196	2.887 8
9	670	220	4	57.732 1	0.000 193	2.661 9

3.2 正交试验结果分析

为确定3个因素对凝固时间影响的主次顺序和变化规律，对模拟结果进行极差分析，表4为凝固时间极差分析表，图8所示为压铸工艺参数对凝固时间均值的主效应图。根据表4可知，压铸工艺参数对凝固时间的影响程度大小为：浇注温度（A）>模具温度（B）>压射速度（C）。对于凝固时间而言，浇注温度和模具温度对其影响显著，而压射速度对其作用有限，这是因为温度参数过高，导致金属液到达固相线的时间变长，而压射速度对金属液的温度变化影响较小。因此在合理的工艺参数范围内，温度参数可选择较低水平，以提高压铸生产效率。由图8可知，当浇注温度选择A1，模具温度选择B1，压射速度选择C3，使得铸件的凝固时间达到最短。因此在将凝固时间作为铸件质量的单一评定标准时，铸件的最佳压铸工艺参数为A1B1C3。

表4 凝固时间极差分析表  
Table 4 Solidification time range analysis table

因素	凝固时间/s			
	均值1	均值2	均值3	极差
A	50.913 7	53.383 4	55.711 3	4.797 6
B	50.841 0	54.196 1	54.971 3	4.130 3
C	53.935 8	53.106 9	52.965 6	0.970 2

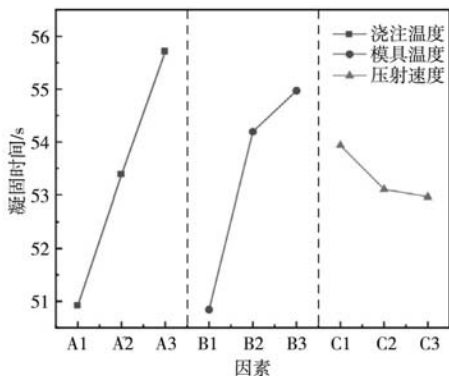


图8 压铸工艺参数对凝固时间均值的主效应图

Fig. 8 Main effect diagram of the die-casting process parameters on the mean value of the solidification time

为确定3个因素对铸件内部卷气量影响的主次顺序和变化规律，对模拟结果进行极差分析。表5所示为卷气量极差分析表，图9所示为压铸工艺参数对卷气量均值的主效应图。根据表5可知，压铸工艺参数对于卷气量的影响程度大小为：浇注温度（A）>压射速度（C）>模具温度（B）。对于卷气量而言，浇注温度与压射速度对其影响较为显著，而模具温度对其作用有限，这与合理的浇注温度与压射速度能够提供良好的金属液流动性有关。在一定范围内，金属液浇注温度

表5 卷气量极差分析表  
Table 5 Air entrainment range analysis table

因素	卷气量 $\times 10^{-4} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$			
	均值1	均值2	均值3	极差
A	1.996 67	1.953 33	1.903 33	0.093 34
B	1.943 33	1.976 67	1.933 33	0.043 34
C	2.003 33	1.926 67	1.923 33	0.080 00

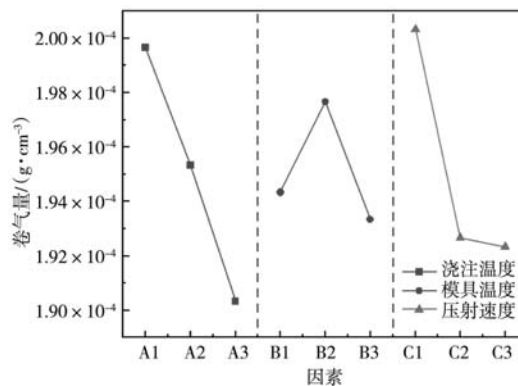


图9 压铸工艺参数对卷气量均值的主效应图

Fig. 9 Main effect diagram of the die-casting process parameters on the mean value of the air entrainment

越高，压射速度越快，其流动性越好。由图9可知，当浇注温度选择A3，模具温度选择B3，当压射速度选择C3，使得铸件的卷气量达到最小。因此在将卷气量作为铸件质量的单一评定标准时，铸件的最佳压铸工艺参数为A3B3C3。

为确定3个因素对铸件内部缩孔体积影响的主次顺序和变化规律，对模拟结果进行极差分析，表6所示为缩孔体积极差分析表。图10所示为压铸工艺参数对缩孔体积均值的主效应图。根据表6可知，压铸工艺参数对于缩孔体积的影响程度大小为：模具温度（B）>浇注温度（A）>压射速度（C）。浇注温度和模具温度

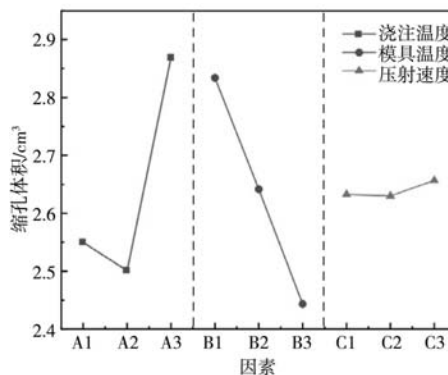


图10 压铸工艺参数对缩孔体积均值的主效应图

Fig. 10 Main effect diagram of the die-casting process parameters on the mean value of the shrinkage pore volume

表6 缩孔体积极差分析表  
Table 6 Total shrinkage volume range analysis table

因素	缩孔体积/cm <sup>3</sup>			
	均值1	均值2	均值3	极差
A	2.549 6	2.500 8	2.868 8	0.368 0
B	2.834 1	2.641 6	2.443 4	0.390 7
C	2.632 6	2.629 8	2.656 8	0.027 0

对缩孔率的影响非常显著，而压射速度对缩孔率的影响有限，这是因为铸件内部的缩孔缺陷是由于凝固过程金属液补缩不及时导致，而良好的温度参数可以改善铸件凝固过程，而压射速度对改善铸件凝固过程的作用较小。由图10可知，当浇注温度选择A2，模具温度选择B3，当压射速度选择C2，使得铸件的缩孔体积达到最小。因此在将缩孔体积作为铸件质量的单一评定标准时，铸件的最佳压铸工艺参数为A2B3C2。

结合以上分析可得，当凝固时间作为评价指标时，最佳工艺参数为浇注温度630℃、模具温度180℃、压射速度5 m/s；当卷气量作为评价指标时，最佳工艺参数为浇注温度670℃、模具温度220℃、压射速度5 m/s；当缩孔体积作为评价指标时，最佳工艺参数为浇注温度650℃、模具温度220℃、压射速度4 m/s。根据实际生产工艺的选取原则，需在保证产品质量的前提下，提高生产效率<sup>[13]</sup>，故正交试验中质量指标的重要性顺序为：缩孔体积、卷气量、凝固时间，经过综合分析最终确定差速器壳体的最佳压铸工艺参数为浇注温度650℃、模具温度220℃、压射速度5 m/s。

## 4 试验验证

采用布勒1 300 t压铸机进行高压压铸差速器试验验证，选择最佳压铸工艺参数：浇注温度650℃、模具温度220℃，压射速度为5 m/s。得到2件高压压铸差速器铸件如图11所示，经过切边工艺，去除溢流槽、排气槽和流道，零件净重4.4 kg，差速器壳体表面光滑，轮廓清晰，无裂纹、飞边、冷隔等缺陷，质量良好。对质量要求较高的差速器上端支架、下端支架以及底部圆筒进行X射线探伤，从X射线图中可知，铸件内部无明显的气孔、缩孔缺陷，验证了压铸工艺优化方案满足生产要求。

对差速器壳体铸件支架上端、支架下端以及底部圆筒处进行力学性能测试，如表7所示。从表中可以得出，不同位置的力学性能存在差异，但是遵循近浇道试样力学性能优于远浇道试样力学性能、壁厚处试样力学性能优于壁厚处试样力学性能的规律。在铸件成形过程中，随着挤压力逐渐增大，会导致初生晶粒尺寸减小，从而使铸件的力学性能显著提高，由上文

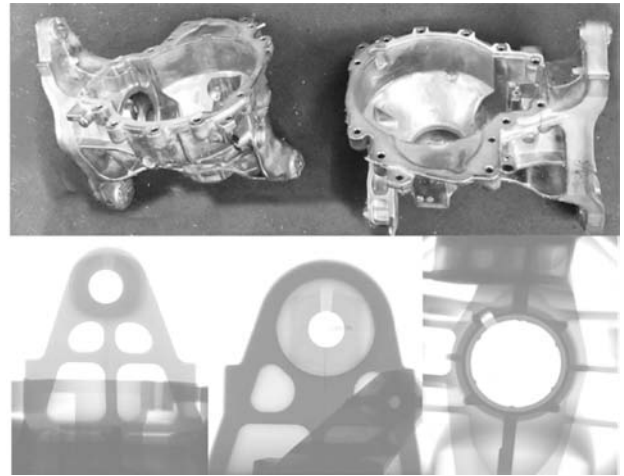


图11 差速器壳体压铸实物图和X射线探伤  
Fig. 11 Differential housing die-casting physical map and X-ray results

表7 差速器壳体铸件的力学性能  
Table 7 Mechanical properties of the differential housing castings

编号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa
上端支架	248.95	132.17
下端支架	219.21	118.37
底部圆筒	249.64	130.22

的流场分析可知，试样上端支架与底部圆筒处于近浇道处，压力处于较高水平，力学性能较好，而下端支架位于远浇道处，压力在传递过程中会有损耗，处于较低水平，力学性能较差，但差速器壳体铸件的整体力学性能较好，符合生产要求。

## 5 结论

(1) 基于ProCast软件中建立高压压铸差速器壳体铸件有限元模型，实现了对高压压铸充型凝固过程的模拟，通过求解流场、温度场、速度场，预测了铸件内部缺陷产生位置和原因。

(2) 差速器壳体充型过程中底部圆筒及两侧支架区域存在卷气问题，尤其是铸件右侧支架上端与左侧支架区域，其卷气量高于平均卷气量0.000 3 g/cm<sup>3</sup>；凝固过程中铸件内部温度最大梯度为90℃，导致金属液凝固不均，使得铸件局部区域存在多处孤立液相区，因此缩孔缺陷出现在铸件壁厚较大处以及右侧上端支架与底部圆筒处，缺陷体积约为3.146 cm<sup>3</sup>，需要通过优化压铸工艺来消除卷气和缩孔缺陷。

(3) 结合有限元正交试验和高压压铸试验，最佳压铸工艺为：浇注温度650℃、模具温度220℃，压射速度5 m/s。

**参考文献:**

- [1] 徐寅, 陈东. 电动汽车差速系统研究综述 [J]. 中国机械工程, 2011, 22 (4): 498-503.
- [2] 寇杰, 张济民, 周和超, 等. 机械差速器耦合轮对轨道车辆导向性能分析 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (8): 128-135.
- [3] 吴跃翔, 苏小平. 铝合金变速器壳体压铸工艺设计及优化 [J]. 铸造, 2021, 70 (3): 311-315.
- [4] 张国强, 赵占西, 勾健, 等. 壳体压铸工艺设计及优化 [J]. 铸造, 2020, 69 (5): 501-505.
- [5] 李玉丽. 汽车差速器的参数化建模及轻量化分析 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.
- [6] 杨依珉, 赵君文, 巫国强, 等. 半固态流变压铸铝合金件疲劳性能研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (1): 83-87.
- [7] WANG Q. Latest advances and developments in aluminum shape casting [J]. China Foundry, 2013, 10 (1): 43-49.
- [8] 樊智涛, 刘洋. 基于WorkBench的差速器壳体有限元分析及轻量化设计 [J]. 军事交通学院学报, 2020, 22 (2): 91-95.
- [9] 廖建强, 管胜敏, 管维健, 等. 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.
- [10] 向东, 陈晋. 铝合金压铸件的气孔缺陷及压铸技术新发展 [J]. 轻金属, 2012 (11): 59-62.
- [11] 张芳. 阀体压铸工艺设计及优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (12): 1353-1356.
- [12] 张志斌, 高子威, 柴国钟, 等. 局部挤压降低压铸发动机支架的气孔缺陷 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (10): 1088-1092.
- [13] HUANG H, FU P H, WANG Y X, et al. Effect of pouring and mold temperatures on hot tearing susceptibility of AZ91D and Mg-3Nd-0.2Zn-Zr Mg alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24 (4): 922-929.

---

## Numerical Simulation and Optimization of High Pressure Casting for Differential Housing

SHAO Yi-yu<sup>1,2</sup>, PENG Wen-fei<sup>1,2</sup>, CUI Jie<sup>3</sup>, KUANG Wen-xin<sup>3</sup>, ZOU Jie<sup>1,2</sup>, MOLLIAR Oleksandr<sup>1,2</sup>.

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo, 315211, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part rolling Technology, Ningbo University, Ningbo, 315211, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Huashuo Technology Co., Ltd., Ningbo, 315806, Zhejiang, China)

**Abstract:**

The study aims to address the prevalent challenges of blowhole and shrinkage during the high-pressure casting of aluminum alloy differential housing. A comprehensive numerical simulation was carried out utilizing the finite element software ProCAST. The simulation comprised of a solution of the flow field, temperature field, and velocity field to predict potential casting defects. To optimize the casting process, an orthogonal experimental design was employed. The simulation results indicated the existence of spiraling issues at the bottom cylinder and both sides of the support during the filling stage. Additionally, the high metal temperature gradient during solidification led to uneven solidification, premature solidification at the gate, and shrinkage defects upon complete solidification. By considering the impact of casting parameters on solidification time, spiraling volume, and shrinkage volume, the optimal casting parameters were determined to be a pouring temperature of 650 °C, a mold temperature of 220 °C, and a shot speed of 5 m/s. Finally, a casting experiment was conducted to verify the reliability of the determined casting parameters.

**Key words:**

differential housing; high pressure die casting; numerical simulation; defect; orthogonal experiment

---