



## A356.2 铝合金轮毂局部增压铸造过程 数值模拟

姜巨福<sup>1</sup>, 匡君<sup>1</sup>, 张颖<sup>1</sup>, 王迎<sup>2</sup>, 肖冠菲<sup>1</sup>, 刘英泽<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001;  
2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 采用 ProCAST 软件模拟了 A356.2 铝合金汽车轮毂在局部增压铸造技术下的充型和凝固过程, 探究了铸件的温度场、缺陷分布和应力场。结果表明: 铸件基本符合顺序凝固, 但是部分区域出现了热节; 缩松、缩孔缺陷主要分布在轮辐与轮辋交界处、轮辐与中间毂交界处以及轮辋某些区域; 合适的浇注温度、模具温度以及局部机械加压可以有效地减少缺陷; 等效应力大小由热应力与机械应力共同决定。正交试验优化后的压铸参数为: 浇注温度  $t_{pouring}$  710 °C, 上模温度  $t_{upper\ die}$  340 °C, 边模温度  $t_{side\ die}$  360 °C, 下模温度  $t_{lower\ die}$  400 °C, 风压 0 MPa, 机械压力 1.4 MPa。在此条件下由试验获得的轮毂缺陷最少, 力学性能最好。

**关键词:** A356.2 铝合金; 局部增压铸造; 数值模拟; 温度; 压力

文章编号: 1004-0609(2022)-02-0313-09

中图分类号: TG249.2

文献标志码: A

**引文格式:** 姜巨福, 匡君, 张颖, 等. A356.2 铝合金轮毂局部增压铸造过程数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(2): 313–321. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-36637

JIANG Ju-fu, KUANG Jun, ZHANG Ying, et al. Numerical simulation of local pressurization casting process of A356.2 aluminum alloy wheel hub[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(2): 313–321. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-36637

20 世纪 40 年代, 第一台电子计算机问世。哥伦比亚大学的“Heat and Mass Flow Analyzer”分析单元最早用于铸造模拟, 在此基础上, VICTOR PASCHKIS 于 1944 年将热传导分析应用于沙模<sup>[1]</sup>。之后, SARJANT 等<sup>[2]</sup>率先利用数值模拟的方法建立了二维热流模型。随着大量研究人员对数值模拟进行研究, 推动了数值模拟在铸造领域的发展, 为其在工程领域的应用做下了良好的铺垫。现在数值模拟仍然作为一个重要的研究方向, 被很多学者应用。赵鑫等<sup>[3]</sup>采用有限元和有限差分结合的方法, 发展了二维铸造凝固过程中温度场的数值模拟。AHUETT-GARZA 等<sup>[4]</sup>利用数值模拟研究了充型过程中放热对压铸模具挠度的影响。ZENG 等<sup>[5]</sup>采用计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)

模型来模拟镁合金带材双辊铸造工艺过程。ZHANG 等<sup>[6]</sup>在 ABAQUS 软件框架下, 建立了用于低压铸造 A356 铝合金轮毂工业生产的 3-D 热流模型。DUAN 等<sup>[7]</sup>利用两相 CFD 模型预测低压铸造 A356 铝合金轮毂铸件在充型中的流动情况。

对铸造过程数值模拟的研究也催生了一批优秀的商业化仿真分析软件。其中 ProCAST、MAGMA、FTstar 以及华铸 CAE 等数值模拟软件在我国工程化领域应用较为广泛<sup>[8–10]</sup>。其中, ProCAST 软件是少数以有限元算法(Finite element method, FEM)计算铸件在充型和凝固过程中温度场、流场、应力场和铸造缺陷分析的软件, 适用于多种铸造工艺, 由美国 UES 公司于 20 世纪 80 年代开发。ProCAST 软件主要包括 Mesh、Cast、Run 和

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2019YFB2006500); 国家自然科学基金资助项目(51875124)

**收稿日期:** 2020-10-23; **修订日期:** 2021-04-06

**通信作者:** 姜巨福, 教授, 博士; 电话: 18746013176; E-mail: jiangjufu@hit.edu.cn

Viewer 四大模块。与采用有限差分法等算法的模拟软件相比, ProCAST 软件可划分不规则的四面体网格, 因此, 模型曲面更接近于实际, 计算结果更为准确。

目前, 汽车铝轮毂的制造工艺主要有传统的铸造法、锻造法、旋压法等<sup>[11-13]</sup>。传统铸造法中的重力铸造和低压铸造在国内的应用最为广泛<sup>[14-16]</sup>, 主要是因为这两种生产工艺较为成熟。但是上述两种工艺也存在弊端, 如低压铸造的生产成本高, 而重力铸造的铸件质量差<sup>[17-18]</sup>, 并且二者补缩能力均有不足。在制备形状复杂、壁厚差较大的零件时, 厚壁处易产生缩松或缩孔等缺陷, 局部加压工艺可以有效地解决这个问题。通过相关研究表明, 这种方法可以明显提升铸件的内部质量<sup>[19-21]</sup>。基于此, 本研究提出一种液固局部增压铸造新工艺, 它是在原有重力铸造的基础上增加了机械压力和风压, 从而在凝固过程中起到强制补缩的作用。为了高效、直观地探究局部增压铸造成形的工艺参数对于轮毂质量的影响, 本文先通过 ProCAST 对其模拟结果的温度场、应力场、缺陷分布进行分析, 然后对数值模拟的结果进行实际工艺验证。

## 1 数值模拟前处理过程及试验验证方法

### 1.1 材料选择和液固增压铸造模具

铝合金轮毂尺寸为  $d\ 418\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ , 材料选用 A356.2 铝合金, 其成分如表 1 所示<sup>[22]</sup>。固相线温度为  $542\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 液相线温度为  $613\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[23]</sup>。

液固增压铸造模具二维图如图 1 所示, 其中模具材料选用 H13 钢。此次液固增压铸造模具主要是对传统重力模具进行改进, 增加了机械加压杆等装置, 并以上模的通气塞作为风压入口, 冷却水管布置在下模。

### 1.2 网格划分

由于增压铸造模具部件较多, 结构复杂, 为方便模拟, 提高模拟效率, 特将模具进行简化, 仅保留上模、下模、边模、机械加压结构、风压等效加压杆部分。依次将其导入 ProCAST 中进行面网格和体网格划分。基于模拟效率和精度两个方面考虑, 上模和下模结构相对复杂, 因此将其取点的最

表 1 A356.2 合金化学成分

Table 1 Chemical compositions of A356.2 aluminum alloy (mass fraction, %)

Si	Mg	Fe	Ti	Sr	Others	Al
6.5-7.5	0.2-0.4	$\leq 0.12$	$< 0.2$	$< 0.005$	$< 0.05$	Bal.

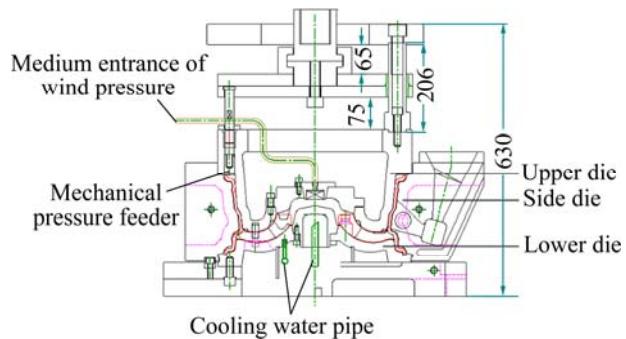


图 1 局部增压铸造模具二维图

Fig. 1 Two-dimensional diagram of local pressurization casting mould (Unit: mm)

大间隔设置为 5 mm; 边模结构相对简单, 其取点的最大间隔取值 6 mm; 由于轮毂铸件需要分析其温度场、缺陷场、应力场, 精度要求高, 因此其面网格划分取点最大间隔值为 3 mm; 而机械加压和风压结构由于在模拟过程中涉及运动, 且其部件较小, 同样对其面网格进行细化, 其面网格划分最大间隔值也取 3 mm。此次模具的面网格划分和体网格划分如图 2 所示, 二维面网格总数量为 229741, 三维体网格总数量为 1785596。

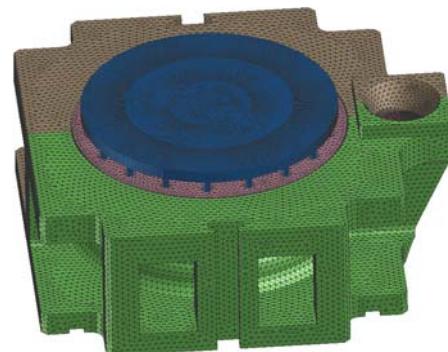


图 2 网格划分

Fig. 2 Generation of mesh

### 1.3 模拟参数设置

为了高效地探究多种工艺参数对液固增压铸造成形轮毂质量的影响, 本次模拟试验用正交试验替代全面试验, 其正交试验参数如表 2 所示, 共计 16 组试验。其中, 浇注温度  $t_{\text{pouring}}$  选取 695、

700、705 和 710 °C 四个水平; 模具温度  $t_{mould}$  选取 A ( $t_{upper\ die}=360\ ^\circ\text{C}$ 、 $t_{side\ die}=380\ ^\circ\text{C}$ 、 $t_{lower\ die}=420\ ^\circ\text{C}$ )、B ( $t_{upper\ die}=340\ ^\circ\text{C}$ 、 $t_{side\ die}=360\ ^\circ\text{C}$ 、 $t_{lower\ die}=400\ ^\circ\text{C}$ )、C ( $t_{upper\ die}=330\ ^\circ\text{C}$ 、 $t_{side\ die}=350\ ^\circ\text{C}$ 、 $t_{lower\ die}=390\ ^\circ\text{C}$ )、D ( $t_{upper\ die}=320\ ^\circ\text{C}$ 、 $t_{side\ die}=340\ ^\circ\text{C}$ 、 $t_{lower\ die}=380\ ^\circ\text{C}$ ) 四个水平; 机械压力  $p_1$  设置 0 MPa 和 1.4 MPa 两个水平, 介入时间  $t_m$  设置 6 s、8 s、10 s 和 12 s 四个水平; 风压  $p_2$  设置 0 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa 和 0.4 MPa 四个水平, 风压介入时间设置为 15 s, 持续时间 30 s。

表 2 局部增压铸造正交试验参数

Table 2 Orthogonal test parameters of local pressurization casting

Number	$t_{pouring}/^\circ\text{C}$	$t_{mould}/^\circ\text{C}$	$p_1/\text{MPa}$	$p_2/\text{MPa}$	$t_m/\text{s}$
1	695	A	0	0	6
2	695	B	0	0.2	8
3	695	C	1.4	0.3	10
4	695	D	1.4	0.4	12
5	700	A	0	0.3	12
6	700	B	0	0.4	10
7	700	C	1.4	0	8
8	700	D	1.4	0.2	6
9	705	A	1.4	0.4	8
10	705	B	1.4	0.3	6
11	705	C	0	0.2	12
12	705	D	0	0	10
13	710	A	1.4	0.2	10
14	710	B	1.4	0	12
15	710	C	0	0.4	6
16	710	D	0	0.3	8

另外, 在 ProCAST 模拟中, 施加压力值  $p$  越大, 金属液与模具接触更为紧密, 其等效换热系数  $h$  越高。当压力值介于 0.1~190 MPa 时, 其等效界面换热系数与压力值呈线性关系, 本次模拟等效界面换热系数设置采取关系式(1)<sup>[24]</sup>。

$$h=1990.5+94.8p \quad (1)$$

#### 1.4 验证试验设置

本研究按照上述设计的正交试验表进行成形试验, 主要从轮毂外观和力学性能进行验证。

轮毂分为轮辐、轮辋、外轮缘、内轮缘和中间

毂 5 个区域。在探究充型、凝固过程中温度及应力变化趋势时, 分别在这 5 个区域各选 1 个位置作为特征点, 如图 3(a)黄点所示。由于轮毂铸件不同部位力学性能差异较大, 因此为更好地衡量一个轮毂的综合性能, 本研究用线切割分别从轮辐处取 2 个拉伸试样, 轮辋处取 1 个拉伸试样, 内轮缘处取 3 个拉伸试样, 外轮缘处取 1 个拉伸试样, 中间毂取 1 个拉伸试样, 共计 8 个拉伸试样取平均值, 取样位置如图 3(a)黑色圆点所示。拉伸试样如图 3(b)所示, 用 Instron5569 电子万能试验机进行测试。

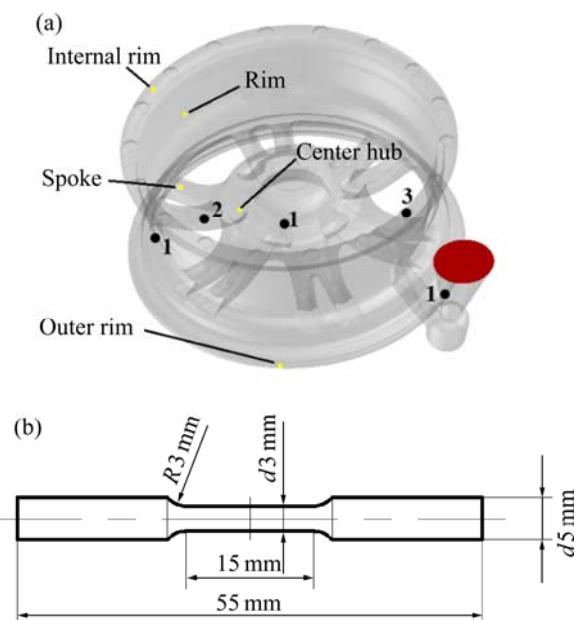


图 3 轮毂特征点和拉伸取样位置及拉伸试样尺寸

Fig. 3 Figure points of hub and sampling locations of tensile samples(a) and size of tensile samples(b)

## 2 模拟结果与试验验证

### 2.1 铸件温度场分析

以 14 号模拟铸件为例, 液固增压铸造过程中的充型过程如图 4 所示。由图 4 可知, 铝液在充型过程中较为平稳, 没有因速度较快而产生紊流现象, 从而避免了卷气引起的铸造缺陷。当  $t=1.1\text{ s}$  时, 如图 4(a)所示, 铝液充满浇注系统, 并开始进入型腔进行充型, 此时固相分数为 4.7%, 铝液的充填速度较快; 当  $t=8.5\text{ s}$  时, 如图 4(b)所示, 铝液充满外轮缘和轮辐部分, 此时固相分数为 12.3%; 当  $t=13.6\text{ s}$ , 如图 4(c)所示, 型腔部分已充填 88.5%, 此时固相率为 26.1%; 当  $t=16.8\text{ s}$ , 如图 4(d)所示, 远离浇

口端的轮辋和内轮缘部分最后充填完成,充型过程结束,此时固相分数为33.2%,低于KRÉZIAK等<sup>[25]</sup>提到的临界固相分数0.7,这说明铝液在充满型腔后仍能保持一定的流动性。

为了探究铝合金轮毂的凝固过程,本研究以14号铸件在45 s时整体温度场和某一轮辐截面区域的温度场为例进行分析。由图5(a)可以得知,靠近浇

注系统的部分温度较高,某些区域仍处在液相线温度以上,而远离浇注系统的地方温度较低;铸件下部的温度总体上要高于上部的温度。因此,在此工艺条件下,轮毂铸件基本符合由远而近,由上而下的凝固顺序。对于轮毂的大部分区域而言,不会因凝固而产生缺陷,但是不排除小范围内存在定向凝固被打破的现象。

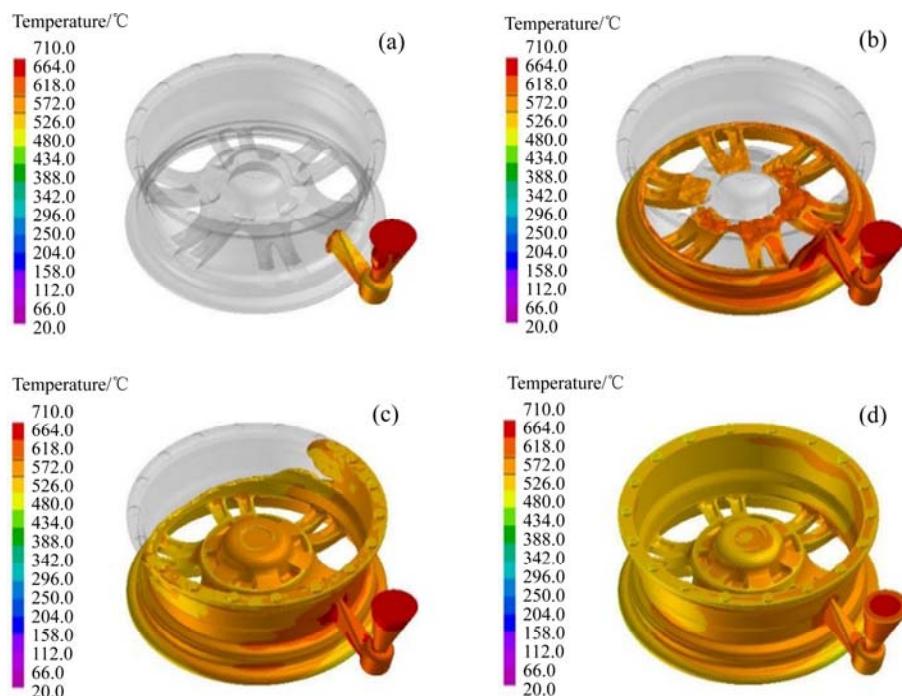


图4 14号铸件充型过程温度场模拟

Fig. 4 Thermal field simulation of No.14 casting during filling process: (a) 1.1 s; (b) 8.5 s; (c) 13.6 s; (d) 16.8 s

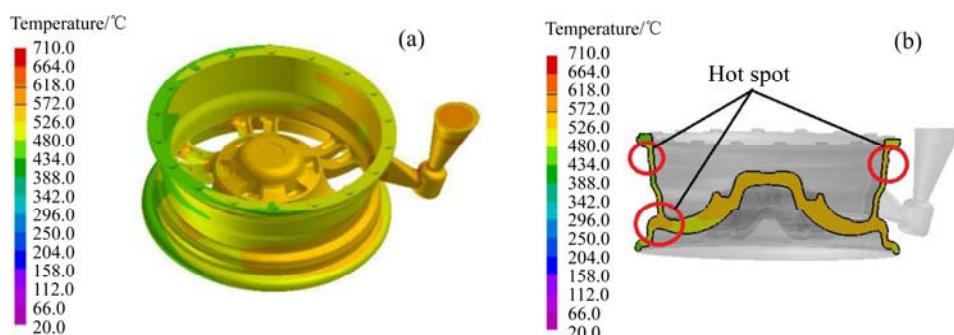


图5 14号铸件凝固45 s时的温度分布和轮辐截面

Fig. 5 Temperature distribution(a) and cross section(b) of No.14 casting solidifying at 45 s

由图5(b)可知,在轮辐、轮辋和外轮缘三处的交界地带出现了热节。这是因为交界处壁厚较大,且只有空气冷却,因此散热速度较慢,温度较高,而周围区域先冷却,所以此处容易产生缩孔缩松缺陷。轮辋的上部也出现了热节,这是由于轮辋区域

存在壁厚差使得温度不呈梯度分布。

图6所示为14号铸件中轮辐、轮辋、外轮缘、内轮缘和中间毂5个区域的特征点在充型和凝固过程中的温度变化曲线。在充型过程中,当铝液与模具接触时,由于热交换作用温度就会下降。如图6

所示,  $t=2.5$  s 时, 轮辐特征点的温度开始急剧下降, 图 4 显示轮辐充型较早, 在与低温模具的热传递作用下最早降温。在 5~7 s 时, 中间毂、外轮缘特征点的温度依次开始下降。轮辋和内轮缘处温度变化大体一致, 在  $t=16$  s 左右开始下降, 此时已基本充型完毕。在铝液充满型腔之后, 由于轮辋壁厚较薄, 内轮缘距浇口最远, 所以散热较快, 最先凝固。轮辐和中间毂部位虽然壁厚较大, 但是由于在这两处设置了水冷, 加快了热量损失, 凝固顺序次之。外轮缘虽然较薄, 但是接近高温铝液的浇口处,

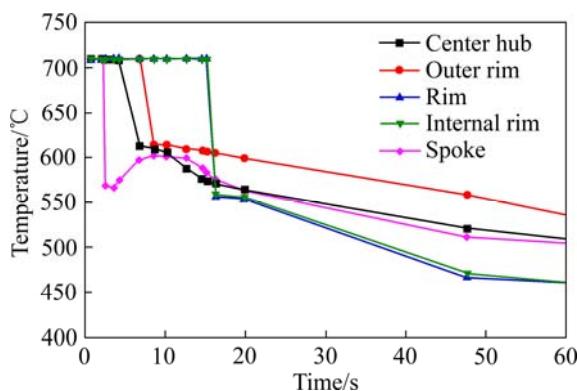


图 6 14 号铸件充型和凝固过程不同区域温度变化

Fig. 6 Temperature variation of No.14 casting in different regions during filling and solidification process

因而其温度下降最慢。轮毂 5 个位置的凝固顺序基本符合由远而近, 由上而下的顺序凝固, 与上文所述结论一致。

## 2.2 铸件的缺陷分析

根据固相分数的不同, 铸件在凝固过程中可大致分为 3 个区域: 液相区(固相分数小于 0.7)、临界区(固相分数介于 0.7~1)和已凝固区<sup>[26]</sup>。其中临界区和已凝固区均无流动性。当铝液不是顺序凝固, 使得这 3 个区域随机分布, 孤立的液相区域由于得不到有效补缩就会产生缺陷。

图 7 所示为 1、4、14、16 号轮毂铸件缩松缩孔分布图。由图 7 可知, 1 号模拟铸件在轮辐与轮辋、轮辐与中间毂、轮辋与内轮缘交界处有较大的缩松缩孔缺陷。这主要是因为在交界处壁厚大, 温度高, 从而导致“孤立熔池”的存在, 产生缩松缩孔类缺陷。4 号铸件是机械压力 1.4 MPa、风压 0.4 MPa 时的模拟结果, 与无风压以及机械压力的 1 号铸件相比, 缺陷体积变小。14 号铸件是只有机械压力 1.4 MPa 且没有风压的条件下的模拟结果, 其缩松缩孔缺陷最少, 轮辋处缺陷基本消失, 同时轮辐与轮辋、轮辐与中间毂交界处的缺陷也减少了。与 4 号铸件的模拟结果对比可知, 即使没有风压, 合适

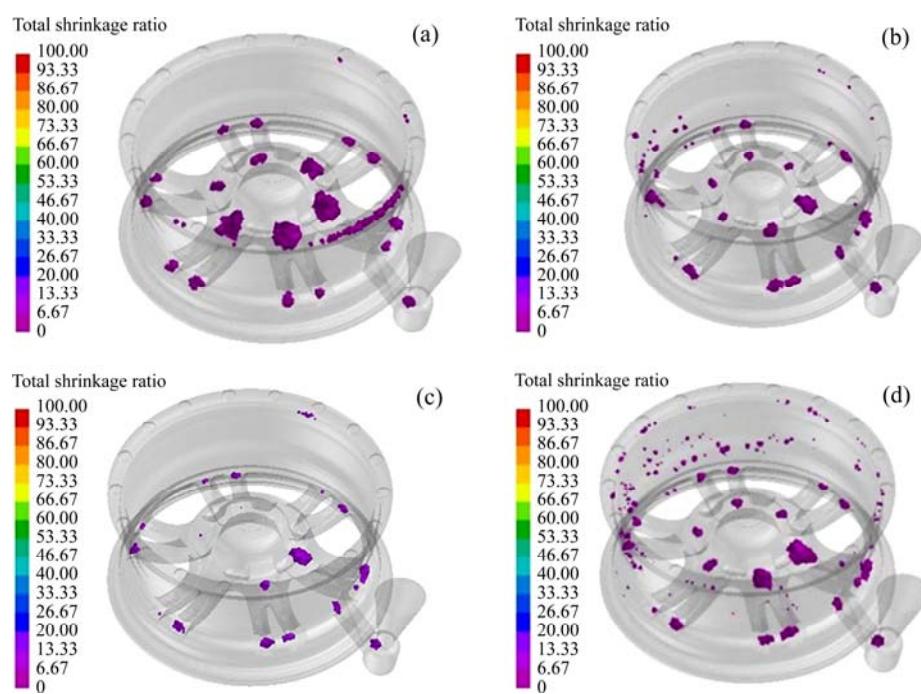


图 7 部分轮毂铸件缺陷图

Fig. 7 Defects figures of partial hub castings: (a) No.1; (b) No.4; (c) No.14; (d) No.16

的浇注温度、模具温度以及冒口装置也能有效减少缺陷。16号铸件压铸时只加了风压,没有机械压力,轮辋处缺陷特别多,这可能是因为没有施加机械压力,靠近机械加压杆的轮辋区域得不到有效补缩。

### 2.3 铸件应力场分析

本研究通过等效应力场来研究铸件不同位置的应力分布。图8(a)和(b)所示分别为1号和14号铸件的等效应力图。铸件表面和内部、铸件表面与模具均存在温度差,铝液表面收缩量大,而且模具对表面的收缩有机械阻碍作用,使得表面存在拉应力。由图8(a)可知,1号铸件的轮辋、中间毂部分区域以及轮辐存在较大的等效应力,因而这些位置有产生热裂纹或者冷裂纹的可能性<sup>[27]</sup>。轮辐与轮辋或中间毂之间存在温度差,两侧线收缩率不一致,相互制约,产生热应力大;而且在充型时,轮辐、轮毂部位面积突然减小或者增大,使得这些位置变形较大,因而机械应力也大。在大的轮辋区域,壁厚梯度使其存在温度差,因而部分区域等效应力大。与1号铸件相比,14号铸件在轮辐、中间毂处的应力较小,说明此条件下选取的浇注温度、模具温度可以有效减少这两处区域的等效应力。另外,14号铸件轮辋上部区域的等效应力相对其他部位

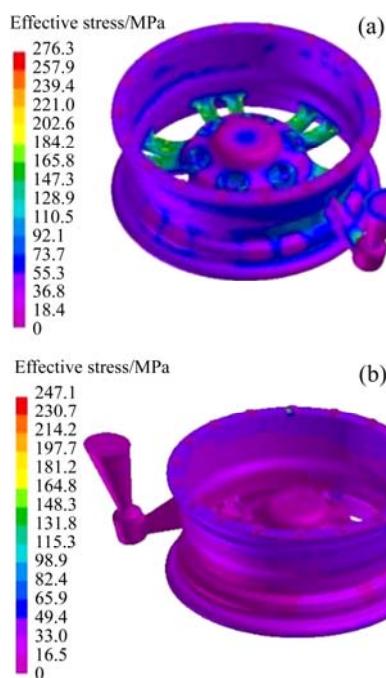


图8 1号和14号铸件的等效应力分布

Fig. 8 Effective stress distributions of No.1(a) and No.14(b) castings

较高,这是除了温差影响外,机械加压也会使接触轮辋部位产生机械残余应力。最终应力大小是热应力和机械应力叠加的效果。

图9所示为14号铸件内轮缘、轮辋、外轮缘、轮辐、中间毂5个特征点的等效应力变化图。由图9可知,  $t=11$  s左右时,中间毂和外轮缘开始出现比较明显的等效应力;  $t=16$  s时,轮辐和轮辋特征点也开始出现等效应力;  $t=20$  s时,内轮缘最后出现等效应力。在出现比较明显的等效应力后,等效应力随着时间延长而增大。

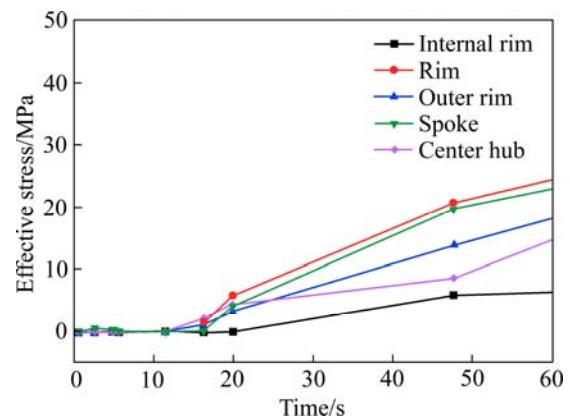


图9 14号铸件不同区域等效应力变化曲线

Fig. 9 Effective stress variation curves of No.14 casting in different regions

### 2.4 试验验证

对上述正交试验进行实际验证,得到的16组铝合金轮毂均外形完整,没有出现充填不足、表面裂纹等铸造缺陷。图10所示为7号局部增压铸造铝合金轮毂试验件的宏观形貌图。

表3所示为1号和14号成形试验件的平均力学性能。与1号试验件相比,14号试验件的屈服强度(Yield strength)提高了16.5 MPa,提升率为17.2%;抗拉强度(Maximum tensile strength)提高了



图10 7号轮毂试验件形貌

Fig. 10 Morphology of No.7 hub test sample

表3 1号和14号试验件力学性能平均值对比

Table 3 Comparison of mechanical properties between No.1 and No.14 test samples

Sample No.	Yield strength/ MPa	Maximum tensile strength/ MPa	Elongation/ %
1	96.1	173.2	6.7
14	112.6	215.5	12.9

42.3 MPa, 提升率为 24.4%; 伸长率(Elongation)提高了 6.2%, 提升率高达 92.5%。这说明正交试验中缺陷最少的 14 号试验件的性能要优于传统重力铸造的 1 号试验件。

### 3 结论

1) 铝液在充型过程中较为平稳, 没有因速度较快而产生紊流现象, 避免产生较多的氧化膜, 充满型腔时铝液依旧可以流动。另外, 轮毂铸件大致符合由上而下, 由远而近的顺序凝固, 但是在局部区域出现了热节。缺陷分析表明缩松缩孔主要集中在轮辋与轮辐交界处、轮辐与中间毂交界处以及轮辋的部分区域。合适的模具温度、浇注温度以及施加局部机械压力能够有效减少缺陷。正交试验 14 号铸件缩松缩孔较少, 其试验条件为:  $t_{\text{pouring}}=710\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{mould}}=B$  ( $t_{\text{upper die}}=340\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $t_{\text{side die}}=360\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $t_{\text{lower die}}=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 风压 0 MPa, 机械压力 1.4 MPa。

2) 等效应力数值与两侧温差有关, 温差越大, 相互制约收缩现象越严重。除了温差产生的热应力以外, 模具阻碍、铸件变形以及局部增压装置产生的机械应力也会影响应力大小。调整模具温度和浇注温度后, 可以使轮辋、轮辐、中间毂的等效应力降低, 减少裂纹产生。

3) 经试验验证, 所有成形件充型完整, 表面质量高。与无机械压力的传统重力铸造的 1 号铸件相比, 局部机械增压的 14 号铸件的屈服强度提高了 16.5 MPa, 提升率为 17.2%; 抗拉强度提高了 42.3 MPa, 提升率为 24.4%; 伸长率提高了 6.2%, 提升率高达 92.5%。

### 致谢:

感谢江苏苏美达车轮有限公司对本研究提供实验装备和数值模拟软件的支持。

### REFERENCES

- [1] BASTIAN K M. A look back at the 20th century: Part II Casting process simulation [J]. Modern Casting, 2000, 90(12): 43–45.
- [2] SARJANT R J, SLACK M R. Heat transfer[M]. Iron and Steel Institute, 1954, 177: 428.
- [3] 赵鑫, 温泽峰, 金学松. 铸件凝固过程中温度场的数值模拟[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(1): 15–19.  
ZHAO Xin, WEN Ze-feng, JIN Xue-song. Numerical simulation of temperature field in process of casting solidification[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 41(1): 15–19.
- [4] AHUETT-GARZA H, MILLER R A. The effects of heat released during fill on the deflections of die casting dies[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142(3): 648–658.
- [5] ZENG J, KOITZSCH R, PFEIFER H, et al. Numerical simulation of the twin-roll casting process of magnesium alloy strip[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(5): 2321–2328.
- [6] ZHANG B, MAIJER D M, COCKCROFT S L. Development of a 3-D thermal model of the low-pressure die-cast (LPDC) process of A356 aluminum alloy wheels[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 464(1/2): 295–305.
- [7] DUAN J L, MAIJER D, COCKCROFT S, et al. Development of a 3D filling model of low-pressure die-cast aluminum alloy wheels[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(12): 5304–5315.
- [8] 肖良红, 艾自祯, 陆东, 等. 基于 ProCAST 的 ZL107 合金进气管倾转铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(10): 1306–1312.  
XIAO Liang-hong, AI Zi-zhen, LU Dong, et al. Optimization of tilting casting process for ZL107 alloy intake pipe based on ProCAST[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(10): 1306–1312.
- [9] 张梦琪. 基于 MAGMA 的汽车轮毂支架铸造工艺研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2021.  
ZHANG Meng-qi. Research on the casting process of automobile wheel bracket based on MAGMA[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2021.
- [10] 赵见知, 韩旭, 顾登禹. 基于 CAE 技术的铝合金变速箱体铸造工艺设计[J]. 热加工工艺, 2017, 46(3): 97–100.

- ZHAO Jian-zhi, HAN Xu, GU Deng-yu. Casting process design of aluminum alloy gearbox housing based on CAE technology[J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(3): 97–100.
- [11] 杨磊, 康泰, 聂晓朋. 轻合金汽车轮毂的生产方法[J]. *科技资讯*, 2017, 15(26): 95, 97.
- YANG Lei, KANG Tai, NIE Xiao-peng. Production methods of the automobile disc wheel of light metal alloy[J]. *Science & Technology Information*, 2017, 15(26): 95, 97.
- [12] 李彦. 高性能铝合金轮毂模锻新技术[J]. *冶金与材料*, 2021, 41(3): 122–123.
- LI Yan. New liquid forging technology of high-performance aluminum alloy wheel[J]. *Metallurgy and Materials*, 2021, 41(3): 122–123.
- [13] 周正, 杨莎, 王天琪. 铝合金轮毂锻压成形工艺及组织仿真[J]. *机械设计*, 2021, 38(S2): 205–208.
- ZHOU Zheng, YANG Sha, WANG Tian-qi. Numerical simulation and microstructure simulation of aluminum alloy wheel forging process[J]. *Journal of Machine Design*, 2021, 38(S2): 205–208.
- [14] 李玉升. 低压铸造铝合金轮毂模具设计优化[J]. *汽车零部件*, 2018(12): 72–74.
- LI Yu-sheng. Design optimization of low-pressure casting aluminum alloy rim mould[J]. *Automobile Parts*, 2018(12): 72–74.
- [15] 陈鹤. 铝合金轮毂成形工艺分析[J]. *世界有色金属*, 2018(5): 282–283.
- CHEN He. Analysis on the forming process of aluminum alloy wheel hub[J]. *World Nonferrous Metals*, 2018(5): 282–283.
- [16] 王伟, 崔晓明, 石博, 等. 铝合金轮毂重力铸造过程数值模拟[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39(12): 1298–1301.
- WANG Wei, CUI Xiao-ming, SHI Bo, et al. Numerical simulation of gravity casting process of aluminum alloy wheel hub[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2019, 39(12): 1298–1301.
- [17] 任凯, 冯立超, 孙立, 等. 低压铸造铝合金轮毂的研究现状[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(9): 10–15.
- REN Kai, FENG Li-chao, SUN Li, et al. Research status of low pressure casting aluminum alloy wheels[J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50(9): 10–15.
- [18] 刘宏磊, 赵志强, 谭学菊, 等. 汽车铝合金轮毂重力加压铸造的探讨[J]. *铸造设备与工艺*, 2013(2): 39–41, 49.
- LIU Hong-lei, ZHAO Zhi-qiang, TAN Xue-ju, et al. Discussion about gravity and pressure casting for the production of auto aluminum wheels[J]. *Foundry Equipment and Technology*, 2013(2): 39–41, 49.
- [19] 黄志垣, 张玉龙, 赵卫红, 等. 局部加压技术在解决压铸件漏气问题上的应用[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39(7): 742–744.
- HUANG Zhi-heng, ZHANG Yu-long, ZHAO Wei-hong, et al. Application of new local pressurization in solving the problem of gas leakage in die castings[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2019, 39(7): 742–744.
- [20] 邢书明, 闫光远, 鲍培玮, 等. 挤压铸造高品质大型结构件[J]. *特种铸造及有色合金*, 2021, 41(2): 133–138.
- XING Shu-ming, YAN Guang-yuan, BAO Pei-wei, et al. High quality large scale structural parts by squeeze casting[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2021, 41(2): 133–138.
- [21] 杜航, 张吉祥, 游寿松, 等. 局部加压对压铸件收缩缺陷的数值模拟[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39(8): 866–869.
- DU Hang, ZHANG Ji-xiang, YOU Shou-song, et al. Influence of local squeeze process on shrinkage defect control for high pressure die casting products[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2019, 39(8): 866–869.
- [22] 孙冬恩, 程和法, 周宏伟, 等. 低压铸造铝合金轮毂的数值模拟及工艺优化[J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40(7): 763–767.
- SUN Dong-en, CHENG He-fa, ZHOU Hong-wei, et al. Numerical simulation of low pressure casting aluminum alloy wheel and its process optimization[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2020, 40(7): 763–767.
- [23] 欧翅翔, 汪樟锋, 刘锋睿, 等. A356铝合金轮毂Si偏析现象及力学性能[J]. *有色金属科学与工程*, 2020, 11(1): 60–66.
- OU Chi-xiang, WANG Zhang-feng, LIU Feng-rui, et al. Study on the Si segregation and mechanical properties of A356 aluminum alloy wheel hub[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2020, 11(1): 60–66.
- [24] ZHANG D L, CANTOR B. A numerical heat flow model for squeeze casting Al alloys and Al alloy/SiC<sub>p</sub> composites[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 1995, 3(1): 121–130.
- [25] KRÉZIAK G, RIGAUT C, SANTARINI M. Low pressure permanent mould process simulation of a thin wall aluminium casting[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1993, 173(1/2): 255–259.
- [26] 苏大为. 铝合金汽车轮毂低压铸造过程的数值模拟及工

- 艺优化[D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
- SU Da-wei. Numerical simulation and technique optimization of the low pressure die casting process of aluminum alloys automotive wheel[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008.
- [27] 朱利利. 低压铸造铝合金车轮主要缺陷分析与控制[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- ZHU Li-li. Analysis and control of the main LPDC defects of aluminum alloy wheels[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.

## Numerical simulation of local pressurization casting process of A356.2 aluminum alloy wheel hub

JIANG Ju-fu<sup>1</sup>, KUANG Jun<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>2</sup>, XIAO Guan-fei<sup>1</sup>, LIU Ying-ze<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;  
2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** ProCAST software was used to simulate the filling and solidification process of A356.2 aluminum alloy automobile hub through local pressurization casting technology, and temperature field, defects distribution and stress field were investigated. The results show that the solidification is basically in sequence, but thermal centers appear at some regions. Shrinkage porosities defects are mainly distributed in the spoke/rim junction, spoke/center hub junction, and the partial region of rim. Proper pouring temperature, moulding temperature and local mechanical pressurization can eliminate the defects effectively. The effective stress is codetermined by the thermal stress and mechanical stress. The die-casting parameters optimized after the orthogonal test are as follows: pouring temperature of 710 °C, upper die temperature of 340 °C, side die temperature of 360 °C, lower die temperature of 400 °C, wind pressure of 0 MPa, and mechanical pressure of 1.4 MPa. Under the optimized conditions, the hub obtained from the test has the least defects and the best mechanical properties.

**Key words:** A356.2 aluminum alloy; local pressurization casting; numerical simulation; temperature; pressure

---

**Foundation item:** Project(2019YFB2006500) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(51875124) supported by the National Natural Science Foundation of China

**Received date:** 2020-10-23; **Accepted date:** 2021-04-06

**Corresponding author:** JIANG Ju-fu; Tel: +86-18746013176; E-mail: jiangjufu@hit.edu.cn

(编辑 何学锋)