● 特种铸造 Special Casting ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.05.016

AlSi7Mg 轮毂半固态流变挤压铸造成形数值模拟

李道忠[1],丁武学[1],孙 宇[1],万水平[2],叶 柳[1]

(1.南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094;2.苏州三基铸造装备股份有限公司,江苏 苏州 215106)

摘 要:利用半固态流变挤压铸造技术代替传统铸造来生产汽车轮毂。基于有限元软件 AnyCasting 和 carreau 表观粘度模型,对铝合金轮毂的半固态流变挤压铸造成形过程进行了数值模拟,研究了压射速度、浇注温度和模具预热温度3个主要工艺参数对半固态浆料充型和凝固过程的影响规律,并采用正交试验设计获取了最佳的工艺参数。结果表明,最佳的工艺参数组合为压射速度 0.07 m/s、浇注温度 595 ℃和模具预热温度 225 ℃,同时得出半固态浆料的浇注温度对铸件缺陷的影响最大,压射速度其次,模具预热温度最小。

关键词:半固态;挤压铸造;数值模拟;正交试验;AlSi7Mg 轮毂

中图分类号:TG249.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)05-0474-06

Numerical Simulation of Semi-solid Rheological Extrusion Casting of AlSi7Mg Wheel Hub

LI Daozhong[1], DING Wuxue[1], SUN Yu[1], WAN Shuiping[2], YE Liu[1]

(1. School of Mechanical Engineering Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Suzhou Sanji Foundry Equipment Co., Ltd., Suzhou 215106, China)

Abstract: Semi-solid rheological extrusion casting technology was used instead of conventional casting to produce automobile wheel hubs. Based on the finite element software AnyCasting and carreau apparent viscosity model, the semi-solid rheological extrusion casting process of aluminum alloy hub was numerically simulated. The effects of three main technological parameters of injection velocity, pouring temperature and mould preheating temperature on the filling and solidification process of semi-solid slurry were studied, and the optimum process parameters were obtained by orthogonal design. The results show that the best combination of process parameters, injection speed, pouring temperature and mould preheating temperature are 0.07 m/s, 595 ℃ and 225 ℃ respectively, and the pouring temperature of semi-solid slurry has the greatest influence on casting defects, injection speed is the second, mould preheating temperature is the smallest.

Key words: semi-solid; extrusion casting; numerical simulation; orthogonal test; AlSi7Mg wheel hub

伴随着我国汽车工业的飞速发展,汽车轻量化已成为我国应对能源短缺和环境挑战的必然选择和重大举措。汽车轮毂作为汽车结构件的重要组成部分,承担着承载车辆,保证转向和驱动的作用,在结构、材料以及制造工艺上都有较大的轻量化空间[1,2]。近年来,铝合金轮毂以优越的性能正在逐步的取代钢制轮毂,成为了用户最佳的选择[3]。半固态金属成形工艺是一种先进的净成形工艺,与传统的铸造和锻造相比具有很大的优点,不仅能够大幅度地提升产品的质量,还能够很好的做到效率与成本的有效平衡。半固态流变挤压铸造是将挤压铸造和半固态成形技术有效结合的一种成形工艺,该工艺具有充型平稳,成形温度低,凝固收缩小,铸件组织致密,综合力学性能高等一系列优点而被广泛关注[4]。据相关研究:采用半固态挤压铸造生产的汽车轮毂可以在保证与低压铸造工艺生产同等性能的情况下,减重 15%以上[5]。

工艺参数是影响产品质量的核心因素,半固态挤压铸造工艺优势地发挥依赖于合理参数的选择[6]。数值仿真技术在解决多工艺参数问题时能够有效的减少试验过程中的成本和资源消耗[7]。本文采用商业化软件 AnyCasting 进行铝合金轮毂半固态挤压铸造成形过程的数值模拟,研究了压射速度、浇注温度和模具预热温度对浆料充填和凝固过程的影响规律,利用正交试验确定最佳的工艺参数,来指导实验和生产实践。

收稿日期:2020-01-10

基金项目:"高档数控机床与基础制造装备"国家科技重大专项项目(2019ZX04029-001)

作者简介:李道忠(1996-),山东济宁人,硕士生.研究方向:先进加工工艺与装备.电话:18851040627,E-mail:2581824085@qq.com

通讯作者:丁武学(1966-),江苏靖江人,硕士,副教授.研究方向:先进加工工艺与装备.电话:13851929741,E-mail:wuxuexie@mail.njust.edu.cn

1　半固态流变挤压铸造数学模型的建立

半固态流变挤压铸造过程属于热流体流动过程，高温熔融的半固态金属浆料在模具型腔中流动，并向周围传递热量[8]。在较低固相率的半固态流变挤压铸造成形过程中，半固态浆料的流动以及热传导都必须遵循质量守恒定律(连续性方程)、动量守恒定律(N-S 方程)和能量守恒定律，体积函数方程和热传导 Fourier 方程[9]：

$$\frac{\partial F}{\partial t}+u\frac{\partial F}{\partial x}+v\frac{\partial F}{\partial y}+w\frac{\partial F}{\partial z}=0 \tag{1}$$

式中，F 为液相体积分数。

$$\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\rho L\frac{\partial f_s}{\partial t} \tag{2}$$

式中，ρ 为密度；c_p 为比热；T 为温度；t 为时间；x、y、z 为空间坐标；λ 为导热系数，L 为潜热，f_s 为固相率。

半固态金属浆料在挤压铸造过程中，既有液相的流动又有固相颗粒的转移，其流动性和充填能力受表观粘度的影响。为了研究半固态浆料填充过程中的流动特性，假设半固态浆料是连续的，忽略液相和固相之间的隔离与相互作用，将其看作均匀的单相介质，采用 AnyCasting 软件中的 carreau 粘度模型进行半固态挤压铸造充型过程的数值模拟，其表达式如下[10,11]：

$$u=(u_0-u_\infty)\left[1+\left(r\lambda e^{T_0/T}\right)\right]^{(n-1)/2}+u_\infty \tag{3}$$

式中，u 为流体计算表观粘度值；u_0 为初始表观粘度值；u_∞ 为无限剪切粘度值；r 为剪切速率；λ 为时间常数；T_0 为参考温度值；n 为剪切变稀指数。

该模型考察了固相率、剪切速率和温度对流体表观粘度的影响，很好地体现了半固体浆料在挤压铸造充填过程中“剪切变稀”的非牛顿流体流动特性。

模拟的铸件 AlSi7Mg 轮毂及浇注系统三维模型如图 1(a)所示，其铸件二维剖面图如图 1(b)所示，该铸件由浇道、轮毂和溢流槽组成，最小厚度为 2 mm。从图中可以看出，该铸件模型较大且复杂，直浇道结构采用倒锥形状，铸件上方的分流锥同时具有 2 次补压和内切浇道功能。

轮毂的材料为 AlSi7Mg 铝合金，模具材料为 4Cr5MoSiV1，模拟用 AlSi7Mg 试验材料的化学成分见表 1，其热物理性质由软件自动计算而得，材料固相线温度为 554 ℃，液相线温度为 615 ℃，具有较宽的半固态温度区间，固相率温度曲线如图 2，式(3)中相关参数由材料数据库和相关文献获得[6,10]。空气与模具、铸件的热传导系数为 41.87 W/(m²·K)，模具与铸件的热传导系数为 1 600 W/(m²·K)，为了减少模拟时间，采用整体的虚拟模具[3,11]。

表1 试验用AlSi7Mg铝合金的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of AlSi7Mg aluminum alloy for test

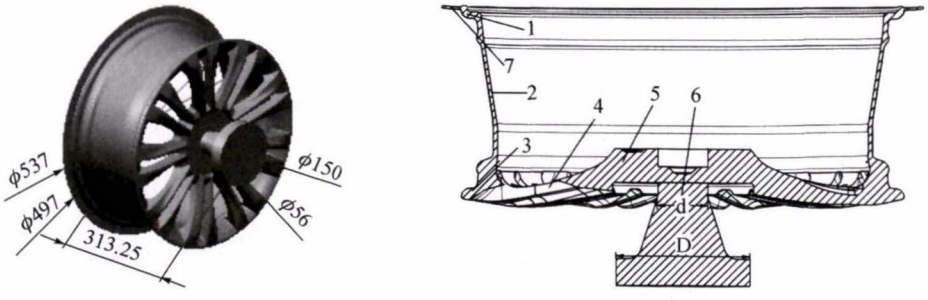
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
7.0	0.15	0.03	0.07	0.30	0.07	0.10	Bal

压射速度(V_r)，浇注温度(T_b)和模具预热温度(T_d)是半固态流变挤压铸造成形过程中的主要的工艺参数。由于铸件直浇道的特殊结构，初步确定工艺参数的研究范围为：V_r=0.01~0.15 m/s，T_b=573~605 ℃(固相率范围为 60%~20%)，T_d=200~300 ℃。

2　充型过程的模拟分析

图 3 是半固态浆料在压射速度 0.05 m/s、浇注温度 595 ℃和模具预热温度 250 ℃的情况下模具型腔充型的过程。从图中看出，半固态浆料在型腔中充型平稳，无紊流卷气现象，实现顺序填充。顺序填充的优点就是在铸件内部不会出现气孔和氧化物等影响铸件品质的缺陷。图 4 是在上述情况下半固态浆料在模具型腔中速度场的分布。可以看出，浆料的充型速度较小，流动平稳呈层流运动状态。

充型速度和浇注温度是影响半固态浆料在型腔中速度场分布的主要因素，充型速度影响最为严重。



(a)轮毂铸件浇注系统图　　(b)铸件截面图

1- 内轮缘；2.轮辋；3- 外轮缘；4- 轮辐；5- 安装盘；6- 浇道；7- 环形溢流槽

图 1 铝合金轮毂的浇注系统和铸件截面图
Fig.1 Pouring system and casting section of aluminum alloy wheel

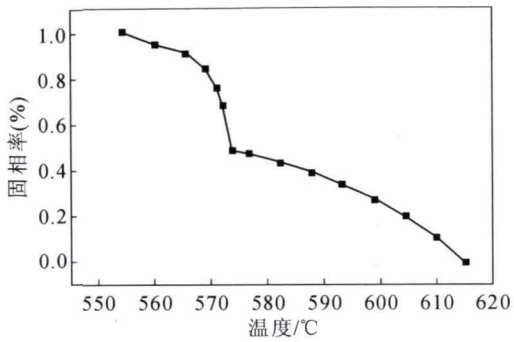
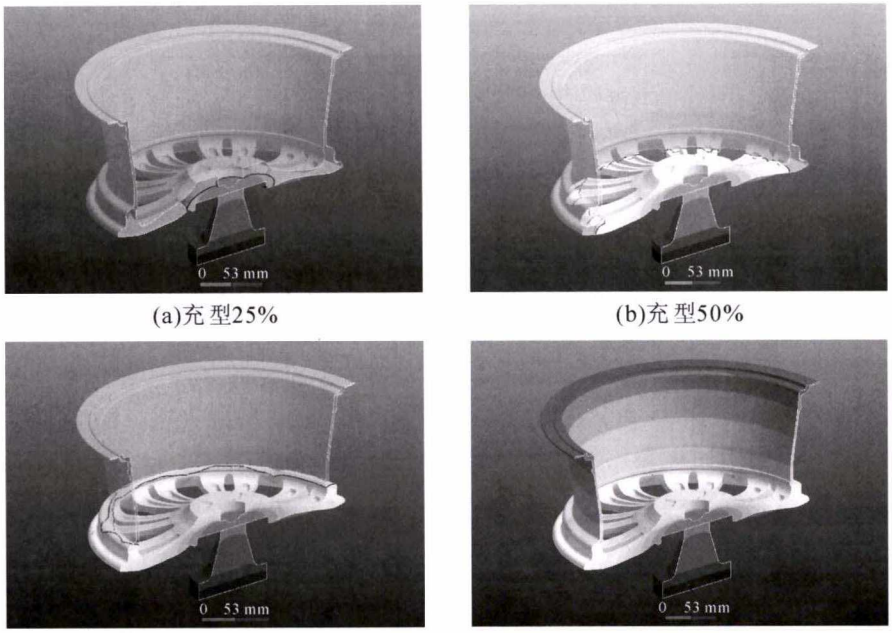


图 2 固相率随温度变化的曲线

Fig.2 Curve of solid phase fraction with temperature

充型速度越大，浆料在型腔中的速度分布越不均匀，越容易发生紊流从而产生卷气现象影响铸件品质。图 4 反映出在内浇道附近速度最大，因此内浇道附近容易产生卷气现象。图 5 是在浇注温度 605 ℃、模具预热温度 300 ℃、压射速度 0.04 m/s 和 0.10 m/s 的充型顺序图，可以看出，当压射速度较小时，浆料在内浇道处流动平稳，可以顺序填充。但是当压射速度较大时，由于内浇道较为狭窄，充型速度急剧变大开始出现局部的紊流现象产生卷气。

流体粘度影响半固态浆料的流动性和填充能

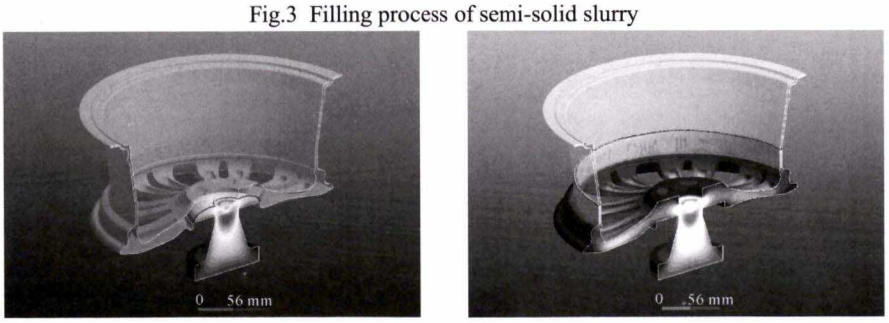


(a)充型25%　(b)充型50%

(c)充型75%　(d)充型100%

图 3 半固态浆料的充型过程

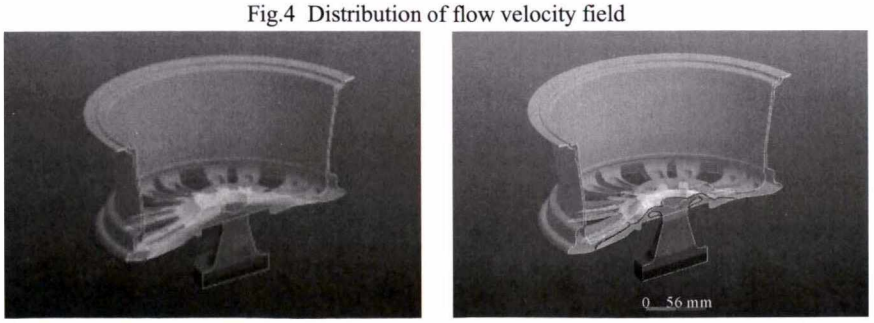
Fig.3 Filling process of semi-solid slurry



(a)充型20%　(b)充型80%

图 4 流动速度场分布

Fig.4 Distribution of flow velocity field



(a)压射速度0.04 m/s　(b)压射速度0.1 m/s

图 5 不同压射速度的充型顺序图

Fig.5 Filling sequence diagram of different injection velocities

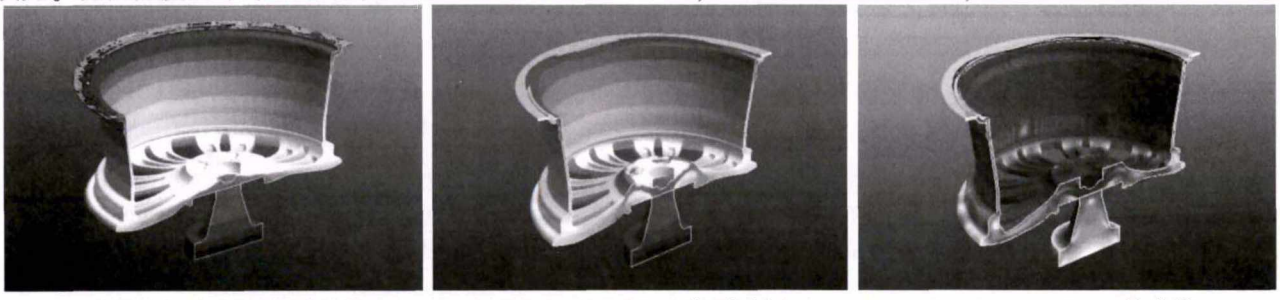
力，而流体粘度主要取决于浇注温度和压射速度，浇注温度体现在初始表观粘度上，在合适的压射速度下，浇注温度越高，合金液的流动性就越好，越有利于充型。然而过高的压射速度或者过高的浇注温度都可能会改变浆料的流动状态从而对铸件的品质产生不良的影响，相反，过低的压射速度或者过低的浇注温度使得浆料的充填能力下降造成浇不足、冷隔等缺陷[11]。模拟结果表明，在压射速度小于 0.03 m/s 或者浇注温度低于 573 ℃（对应固相率在 60%）以下，都会产生充不满的缺陷。如图 6，当压射速度为 0.03 m/s，浇注温度为 610 ℃时，由于充型速度过慢和铸型较大，在浆料充型过程中，热交换时间过长，开始出现浇不足缺陷。同样当压射速度为 0.2 m/s，浇注温度为 573 ℃，在浆料充型过程中，由于浇注温度过低，流体粘度（见图 6c）过高，在溢流槽处也开始出现充不满的现象。

从以上模拟结果及后续研究发现，当压射速度 0.04~0.09 m/s，半固态浆料充型平稳，可以实现顺序填充。浇注温度处于半固态温度区间的 574 ℃以上就可以实现填充，但是通常来说，半固态流变挤压铸造是针对低固相率（20%~40%）的半固态浆料，所以取浇注温度为 585~605 ℃。

3　冷却凝固过程的模拟分析

图 7 所示为压射速度 0.05 m/s，浇注温度 595 和模具预热温度 250 ℃情况下浆料的温度场分布和凝固过程。可以发现，浆料在开始凝固时的温度场分布并不均匀，这就会导致浆料不能够顺序凝固从而产生缩孔缩松等铸件缺陷。进一步发现，浆料在凝固过程中，在轮辐与轮辋的连接处明显有热节的存在，连接处部位较为厚大，容易形成局部的高温区，凝固从周围地方先凝固，轮辐凝固后无法实现补缩，最终导致出现缩孔缩松的缺陷。

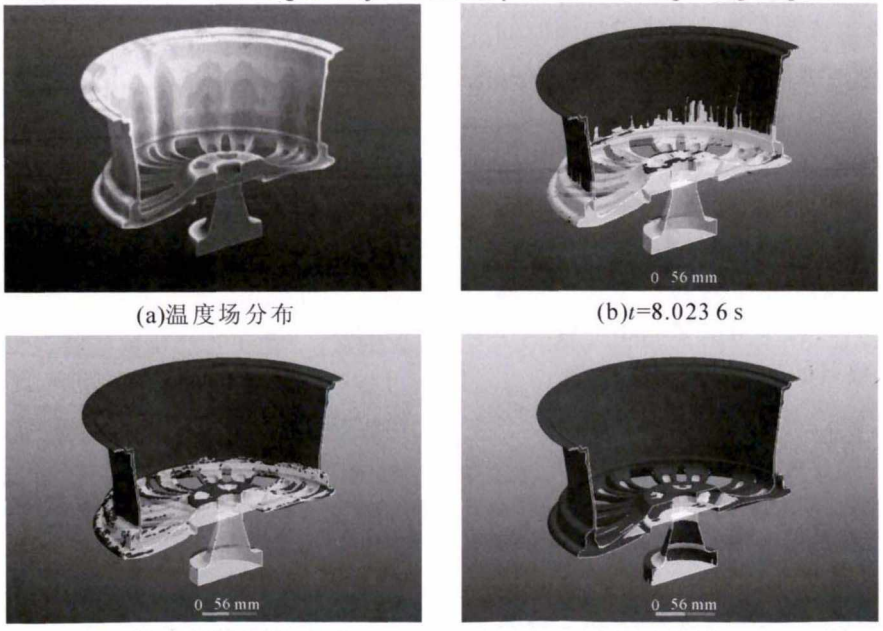
浇注温度和模具预热温度是影响合金冷却凝固过程中的主要因素[10]。在合适的压射速度 0.05 m/s，模具预热温度为 250 ℃下，分别选取浇注温度 585、595、605 ℃，如图 8 凝固时间及热节分布图。从中发现，随着浇注温度的提高，铸件所需要的凝固时间越



(a)0.03 m/s,610 ℃,充型时间　(b)0.2 m/s, 573 ℃,充型时间　(c)0.2 m/s,573 ℃,粘度值

图 6 压射速度为 0.03 m/s 和浇注温度为 573 ℃充不足的情况

Fig.6 A condition of insufficient filling with injection velocity of 0.03 m/s and pouring temperature of 573 ℃

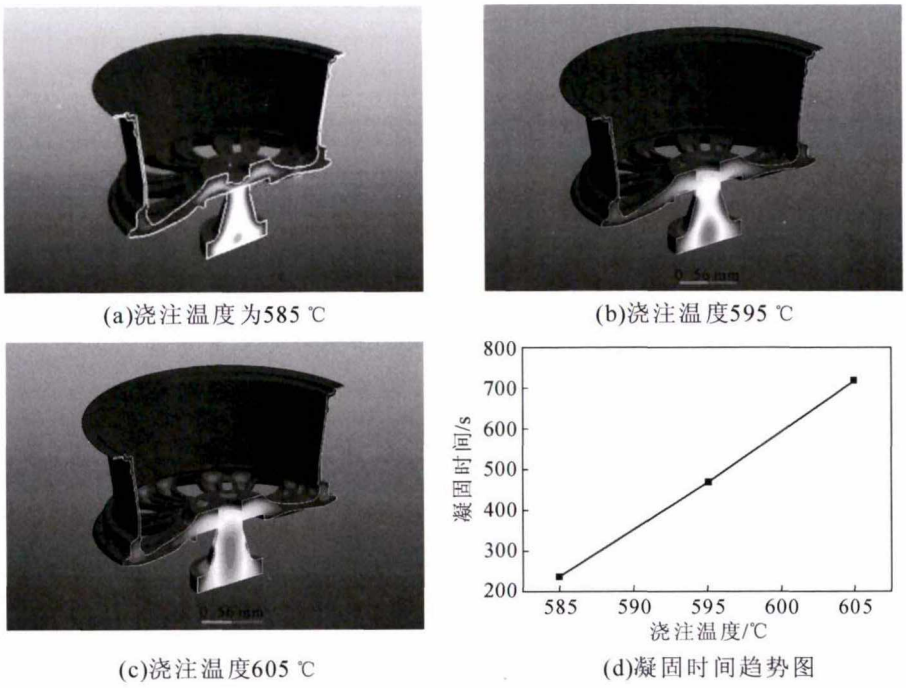


(a)温度场分布　(b)t=8.023 6 s

(c)t=10.370 6 s　(d)t=15.064 7 s

图 7 半固态浆料的温度场分布和凝固过程

Fig.7 Temperature field distribution and solidification process of semi-solid slurry



(a)浇注温度为585 ℃　(b)浇注温度595 ℃

(c)浇注温度605 ℃　(d)凝固时间趋势图

图 8 不同浇注温度的凝固时间及热节分布图

Fig.8 Solidification time and hot spot distribution at different pouring temperature

长,但不论浇注温度为多少,其轮辐与轮辋的连接处都有热节的存在,都不能够实现顺序凝固,而且不同浇注温度对铸件的凝固时间影响很大,这主要是因为浇注温度越高,半固态金属中具有的潜热也就越多,热平衡需要的时间越长。从模拟结果显示,半固态浆料的浇注温度在 585 595 ℃时, 铸件的凝固时间较短,热节相对较少,有利于铸件的微观组织和力学性能。

模具预热温度主要通过影响浆料和金属模具的传热来影响合金冷却凝固过程[6]。模拟过程中发现,随着模具预热温度的提高,铸件的凝固时间变长, 其轮辐与轮辋连接处的热节的分布同样明显,对铸件的顺序凝固影响不大。从凝固时间考虑,模具预热温度在 200~250 ℃比较合适,铸件凝固时间较短,收缩性缺陷出现的较少。

从冷却凝固过程模拟结果显示,由于铸件的结构原因,在轮辐与轮辋连接处容易产生热节进而影响铸件的品质。所以,为了解决浆料不能够顺序凝固的问题,应该从模具的冷却方案进行实施。

4 正交试验设计及结果分析

通过对轮毂半固态挤压铸造充型和凝固过程的模拟分析,初步得到压射速度,浇注温度和模具预热温度的合理范围。但工艺参数对铸件性能的影响是各参数的综合效应,也是工艺参数相互统一的过程,各种不同数值的参数组合决定是否能够达到良好的充型和凝固效果[12]。为了缩短试验次数并获得最佳的工艺参数组合,本文针对压射速度、合金的浇注温度和模具预热温度 3 个不同的工艺参数进行正交试验设计,正交试验水平与因素如表 2,正交试验方案($L_9(3^3)$)和结果见表 3。

表2 正交试验因素和水平表

Tab.2 Orthogonal test factors and horizontal table

水平	因素 A	因素 B	因素 C
	压射速度 /(m/s)	模具温度 /℃	浇筑温度 /℃
1	0.05	200	585
2	0.07	225	590
3	0.09	250	595

本模拟采用残余熔体模数来作为正交试验因素水平的指标, 残余熔体模数是来预测铸件缩松缩孔的位置以及大小, 残余熔体模数越大表示该地方的缩松度越大, 轮毂在挤压铸造模拟中出现的缺陷主要是缩松,位置发生在轮辐与轮辋的连接处[11,12]。通过正交试验模拟结果显示, 第 5 组的残余熔体模数最小仅为 0.964 7。因此, 最佳工艺参数组合为 A2B2C3。由于正交试验的特点具有均匀可比性,所以每一列的因素数值的大小仅仅和本列因素相关,可以看出, 每列因素的最小值为 0.999 9、1.009 6 和 0.995 1, 因此把各因素最好的水平结合起来恰好也为 A2B2C3, 表明这 9 组试验具有代表性的说明 3 个因素水平对铸件缺陷的影响。由极差 R 可以看出,因素 C 最大为 0.045 1,因素 B 最小为 0.021 7,因此在铸件成形过程中, 对铸件缺陷影响程度的主次顺序为:浇注温度—压射速度—模具预热温度。

表3 正交试验方案及结果
Tab.3 Orthogonal test scheme and results

试验编号	因素 A 压射速度 /(m/s)	因素 B 模具温度 /℃	因素 C 浇注温度 /℃	残余熔体模数
1	0.05	200	585	1.065 2
2	0.05	225	590	1.032 6
3	0.05	250	595	1.022 7
4	0.07	200	590	1.010 9
5	0.07	225	595	0.964 9
6	0.07	250	585	1.024 0
7	0.09	200	595	1.017 8
8	0.09	225	585	1.031 4
9	0.09	250	590	1.023 9
I	3.120 5	3.093 9	3.120 6	
II	2.999 8	3.028 9	3.067 4	—
III	3.127 1	3.070 6	2.985 4	
I/3	1.040 2	1.031 3	1.040 2	
II/3	0.999 9	1.009 6	1.022 5	—
III/3	1.042 4	1.023 5	0.995 1	
R	0.042 5	0.021 7	0.045 1	

5 结论

(1)半固态浆料的压射速度和浇注温度以及模具预热温度对轮毂的半固态挤压铸造充型和凝固过程有显著的影响。当压射速度和浇注温度越大时，浆料的表观粘度会越小，流动性和填充能力就会越好，但也越容易发生紊流而产生卷气现象影响铸件的品质；相反，浆料的粘度越大，流动性和充型能力降低导致铸件发生浇不足的缺陷。浇注温度和模具预热温度越大，铸件的凝固时间越长，收缩性也越小，越容易产生缩松等缺陷；模具预热温度越小，越容易产生冷隔现象。

(2)根据正交试验模拟结果显示，轮毂的半固态流变挤压铸造成形的最合理的工艺参数为：压射速度 0.07 m/s、浇注温度 595 ℃、模具预热温度 225 ℃。也表明了在铸件成形过程中，对其缺陷影响程度的主次顺序为：浇注温度—压射速度—模具预热温度。

参考文献：

[1] 康淑贤，郝艳华，黄致建. 汽车轮毂造型设计与结构分析[J]. 机械设计, 2013, 30(12):32-36.

[2] 钟奇，施毅，刘博. 铝合金在汽车轻量化中的应用[J]. 新材料产业, 2015(2)36-38.

[3] Hirt G. Thixoforming: Semi-solid Metal Processing [M]// Thixoforming:semi-solid metal processing. 2009.

[4] 肖黎明. 低合金钢半固态挤压铸造工艺及组织性能研究 [D]. 北京：北京交通大学, 2006.

[5] 朱晓红，张卫东，卢艳宏. AlSi7Mg 连杆半固态挤压铸造成形数值模拟[J]. 热加工工艺, 2012(21):90-93.

[6] WU Shusen，ZHAO Junwen，WAN Li，et al. Numerical simulation of mould filling in rheo diecasting process of semi-olid magnesium alloys[J]. Solid State Phenomena，2006，116 / 117:554-557.

[7] 罗磊，郭洪民，杨湘杰，等. 电机鼠笼转子半固态挤压铸造数值模拟[J]. 热加工工艺，2013(11):89-92，96.

[8] 陈刚，郑顺奇，王斌锋. 金属半固态成形的数值模拟技术研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2019(2).

[9] 陶文琉，赵升吨，林文捷. 工艺参数对汽车用盒形件半固态压铸过程的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2011(8):4-7.

[10] 林文捷，赵升吨，陶文琉，等. A356 合金连杆半固态挤压铸造工艺参数的优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2012(5):51-55.

[11] 任杰，张治民，王明哲，等. 轮毂挤压铸造数值模拟与参数优化[J]. 热加工工艺, 2013(5):57-59.

[12] 汤红强. 镁合金汽车轮毂的研究与开发 [D]. 杭州：浙江工业大学, 2009.

技术资料邮购

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

本书由西安理工大学魏兵教授编著。共8章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页。

特快专递邮购价：226元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071　　技术咨询：13609155628