

轻量化枝杈轮辐铝合金轮毂低压铸造成形有限元模拟及试验分析

张殿杰¹, 刘建芳¹, 王 星², 骆俊廷³

(1. 秦皇岛戴卡兴龙轮毂有限公司, 河北省轻合金车轮工程技术研究中心, 河北秦皇岛 066004; 2. 中信戴卡股份有限公司, 河北秦皇岛 066004; 3. 燕山大学机械工程学院, 河北秦皇岛 066004)

摘要: 运用3D造型技术设计了一款轻量化高结构强度的枝杈轮辐铝合金轮毂, 并对其低压铸造成形过程进行数值仿真, 对铝合金轮毂的充型顺序、残余熔体、晶粒尺寸、凝固及卷气等指标或过程进行分析, 确定了可实现轻量化枝杈轮辐铝合金轮毂低压铸造成形的工艺条件。根据仿真得到的工艺条件, 进行轮毂试验制造, 并进行性能测试分析, 测试结果表明该轮毂满足车辆使用的性能要求。

关键词: 枝杈轮辐; 铝合金; 轻量化轮毂; 低压铸造成形; 有限元

铝合金轮毂具有密度小、强度高、耐腐蚀性强和制造加工简单等特点, 既能满足汽车的日常运行需求, 又能对降低整车重量, 实现节能减排起到有效作用, 目前已在中高端家用轿车上得到广泛应用^[1-4]。铝合金轮毂一般通过低压铸造工艺制造, 在传统生产中由于涉及到温度、材料及多方面外界因素的影响, 低压铸造成形过程的工艺参数往往需要通过多次试验获得, 因此生产周期较长, 成本较高。如今数值仿真技术的快速发展使得实现低压铸造成形工艺的快速建立成为可能, 通过对低压铸造成形过程建模仿真, 预测成形结果, 研究成形规律, 确定出最佳的工艺参数, 大大缩短了工艺研发周期, 对提高低压铸造成形的铝合金轮毂质量有着非常重要的意义^[5-8]。

本研究对一型轻量化枝杈轮辐铝合金轮毂的低压铸造成形过程进行有限元仿真, 通过分析其充填及凝固的仿真过程确定合理的低压铸造成形工艺, 并基于轮毂尺寸及结构特点设计出成形模具, 进行样轮的试制与性能测试。

1 铝合金轮毂结构设计

基于铝合金轮毂的二维平面图, 利用造型软件构建出铝合金轮毂的三维实体模型, 如图1所示。该型轻量化铝合金轮毂的特点为采用分叉式的轮辐设计, 每个轮辐均由直叉和弯叉两部分组成, 在这两部分之间设置三角形孔洞, 该结构方案在保证轮辐强度的同时, 实现了最大程度的轻量化。

2 低压铸造成形过程有限元模拟

本研究利用有限元软件模拟枝杈轮辐铝合金轮毂的低压铸造工艺过程, 通过仿真得出低压铸造成形实时过程中的金属液温度场、流场以及应力场变化情况, 为实际生产提供参考。

2.1 有限元模型

铝合金轮毂低压铸造成形的有限元模型如图2所示。通过前处理将利用造型软件构建的轮毂划分四面体网格, 导入到有限元软件中进行仿真模拟。该型枝杈轮辐铝合金轮毂的材料为A356铝合金, 属于铝硅系合金, 具有良好的流动性和抗热裂能

作者简介:

张殿杰(1968-), 男, 研究生, 高级工程师, 研究方向为轮毂制造技术。
E-mail: 8300598@qq.com

中图分类号: TG 249.2
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2020)10-1098-06

收稿日期:

2020-04-13 收到初稿,
2020-05-12 收到修订稿。

力,适用于铸件的生产,同时作为一类高强度、高硬度的轻型合金,能够满足轻型轮毂的相关设计要求^[9]。合金的各项热物理性能参数如表1所示;成形模具材料为H13,该模具材料具有良好的高温性能,其各项参数如表2所示。

边界条件设定:模具预热温度为350℃,金属液浇注温度设定为700℃。换热条件设定:金属液与模具的传热系数为1500 W/m²·K,与空气的换热系数为20 W/m²·K。充型过程及加压设定:充型压力设定为2×10⁴ Pa,充型时间10 s;增压过程压力大小定为8.5×10⁴ Pa,增压8 s;保压压力设定为8.5×10⁴ Pa,时间为260 s。完成凝固后在50 s的时间内将模具内所加气压降至零。加压过程的压力变化曲线如图3所示。

2.2 有限元模拟结果

2.2.1 铝合金轮毂充型顺序

图4为铝合金轮毂充型过程的仿真结果。从图中可以看出,金属液首先充填中心孔及安装凸台,然后经由轮辐充填轮辋,轮缘为最后充填位置,经过5.45 s的时间完成铸件的整体充型。通过分析云图可以得知,充型时间为3.49 s时,轮毂的充填程度可以达到大约70%,这时的合金液面上有轻微不平稳现象出现,为降低此类现象,在实际生产时需合理调控铝合金液的充填速



图1 轮毂三维实体模型
Fig. 1 3D solid model of hub

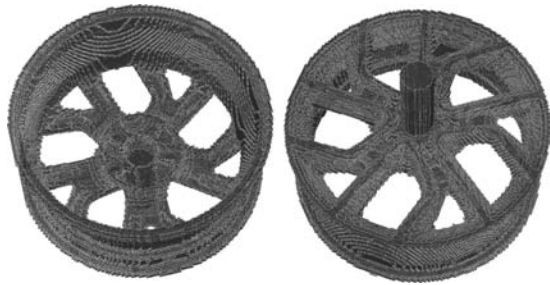


图2 有限元模型
Fig. 2 Finite element model

表1 A356铝合金的热物理性能参数
Table 1 Thermophysical properties of A356 aluminum alloy

密度/(g·mm ⁻³)	粘度 /(g·mm ⁻³ ·s ⁻¹)	比热容 /(J·g ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	热导率 /(W·mm ⁻³ ·℃ ⁻¹)	液相线 /℃	固相线 /℃	重力加速度 /(mm·s ⁻²)
2.485×10 ⁻³ (固体) 2.415×10 ⁻³ (液体)	2.96×10 ⁻³	0.963	0.515	610	555	9 800

度及加压过程的压力值,但要想完全消除较为困难。此外,还可以看到轮缘部分为最后充填位置,充填较为困难,在实际浇注时需特别注意。

2.2.2 残余熔体分析

图5为低压铸造过程中轮毂残余熔体模数的仿真结果。残余熔体模数是残余熔体体积与残余熔体表面积的比值,是预测铸造过程中可能出现缩孔缺陷位置的重要判据,模数越大的位置其熔体分布越密集,发生缩孔等缺陷的概率也更高。从图中可以看出,残余熔体模数峰值分布在轮辐与轮辋的连接处及轮毂中心与轮辐的连接处,因此这些区域属于缩孔缺陷的高发区,在生产中可通过适当增大压力的方式来降低这些重点区域产生缩孔等铸造缺陷的概率^[10-12]。除此,在设计模具时,还需考虑加强某些热应力集中位置的散热措施,如图5所示轮辐之间的过渡区域,以避免这些位置因热量不能及时排除而产生热裂。同时根据模拟结果,有必要在轮毂中心位置增设排气孔来快速排除浇注中产生的夹杂气体,以此降低缩孔的发生概率。

表2 模具材料H13的热物理性能参数
Table 2 Thermophysical performance parameters of H13

密度 /(g·mm ⁻³)	比热容 /(J·g ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	热导率 /(W·mm ⁻³ ·℃ ⁻¹)
7.8×10 ⁻³	0.442	0.287

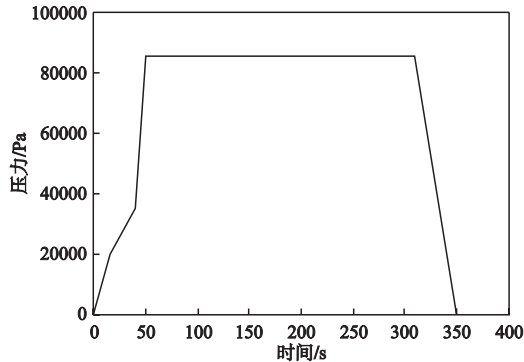


图3 加压过程曲线
Fig. 3 Curve of pressurization process

2.2.3 晶粒尺寸分析

图6为低压铸造成形过程轮毂晶粒尺寸分布的仿真结果。通过观察云图可以发现,位于A356铝合金铸件冒口与轮辐连接处的晶粒尺寸明显大于其他部分,这可能是因为在成形过程中这一区域为金属液填充的初始位置,温度梯度较小,合金形核密度较低,在较慢的铝合金金属液冷却速度下,晶粒的生长时间十分充足,从而使这一区域的晶粒尺寸大于其他位置。根据仿真结果,需要严格把控冒口与轮辐连接位置的品质,以保证产品的最终力学性能。

2.2.4 凝固分析

图7为低压铸造成形过程轮毂的温度梯度仿真结

果。由图可知,轮毂按照设定的压力及时长进行保压凝固,表现出了较高的冷却率,在这样的条件下铸件实现了顺序凝固,温度梯度在整体上分布均匀,冷却过程中铝合金液体可以展现良好的补缩能力,有效地降低重要结构部位出现浇不足或缩孔和缩松等铸造缺陷的概率,从而获得均匀致密的铸件^[13-14]。

2.2.5 卷气分析

在低压铸造成形过程中,可能会由于铝合金液面出现高度差异而使金属液卷入气体,致使所生产的轮毂内部出现缩孔或气穴,在实际使用中容易产生裂纹,造成严重的安全隐患。图8展示了铝合金轮毂在低压铸造成形过程中卷气顺序的仿真结果。根据云图,

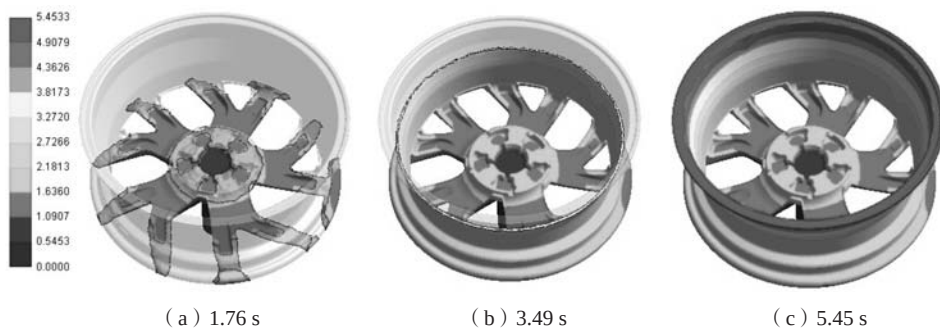


图4 铝合金轮毂充型过程仿真结果

Fig. 4 Simulation results of filling process of aluminum alloy hub

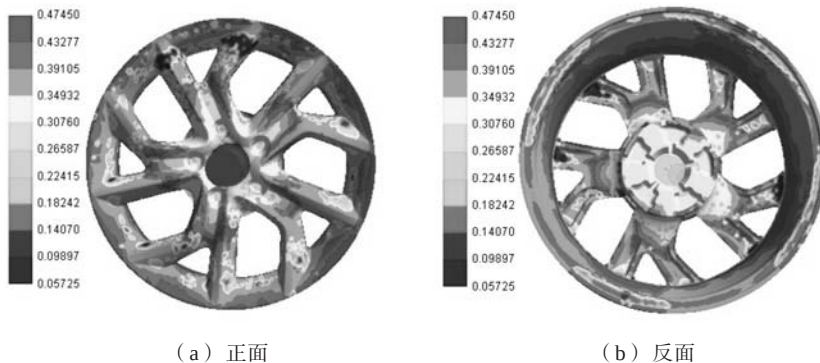


图5 轮毂残余熔体模数仿真结果

Fig. 5 Simulation results of residual melt modulus of hub

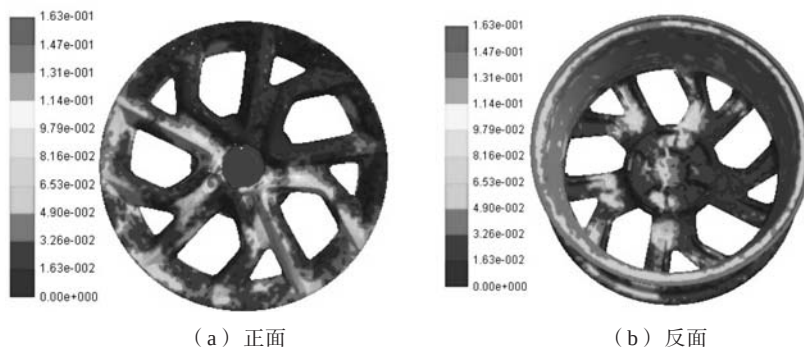


图6 晶粒尺寸分布仿真结果

Fig. 6 Simulation results of grain size distribution

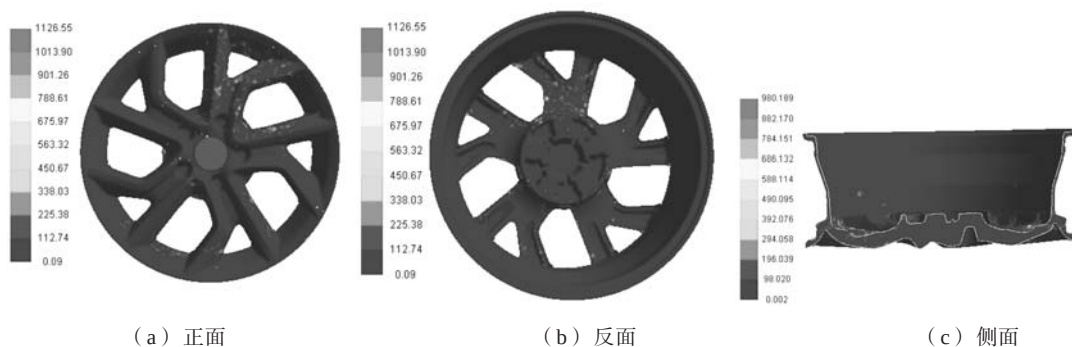


图7 轮毂温度梯度仿真结果

Fig. 7 Temperature gradient simulation results of hub

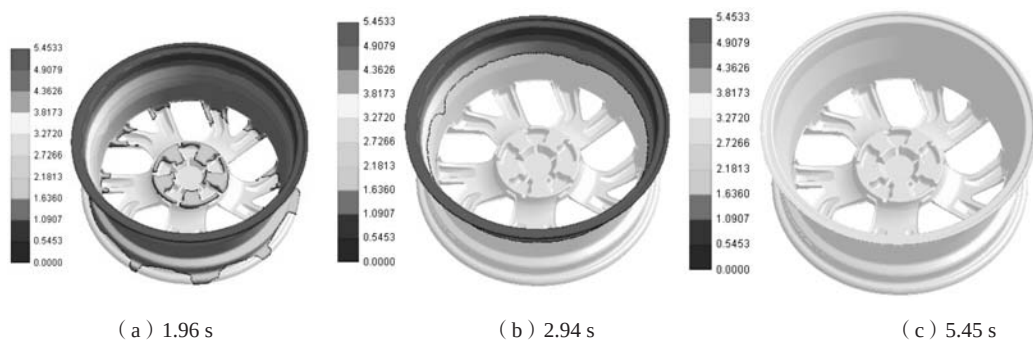


图8 轮毂卷气顺序仿真结果

Fig. 8 Simulation results of air entrainment sequence of hub

卷气过程在5.45 s后基本完成，轮毂的卷气顺序合理且均匀。另一方面，由于轮缘为金属液的最后到达位置，部分夹杂气体可能随金属液流入，在实际生产时可在此位置设置孔洞以排出气体。

3 轮毂试制及性能试验

3.1 轮毂低压铸造模具设计

依据轮毂所要求的各项尺寸，设计出各个低压铸造模具部件，在三维软件中完成模具各部分的装配，铝合金轮毂低压铸造成形模具主要部件的装配示意图如图9所示。基于装配图，采用投影法所制得的低压铸造模具2D总装图如图10所示。

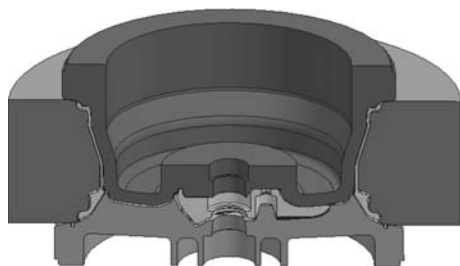
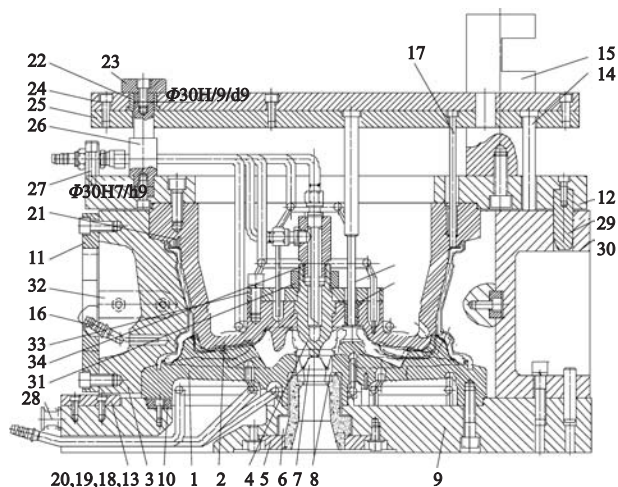


图9 铝合金轮毂低压铸造成形模具主要部件装配示意图

Fig. 9 3D assembly diagram of main components of low pressure casting forming die for aluminum alloy hub



1. 底模 2. 顶模 3. 边模 4. 分流锥 5. 支承板 6. 浇口杯
7. 过滤网 8. 浇口套 9. 底板 10. 定位平键 11. 背板
12. 上模顶板 13, 18, 19, 20, 32导向平键 14. 复位杆
15. 支柱 16. 边模风孔风管 17. 顶杆 21. 排气塞
22. 导向柱套 23. 锁紧块 24. 顶杆上板 25. 顶杆下板
26. 导向柱 27. 管接头压条 28. 吊耳 29. 定位块 30. 边模滑块
31. 锁紧螺母 33. 冷却盖板 34. 分歧管 35. 顶杆 36. 顶杆套

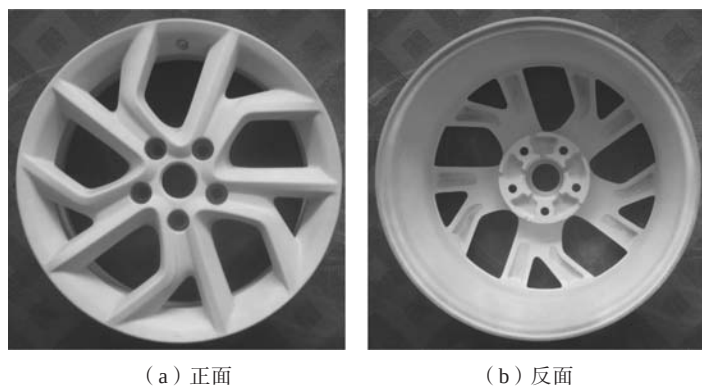
图10 低压铸造模具2D总装图

Fig. 10 2D general assembly drawing of low pressure wheel hub casting die

3.2 轮毂及性能测试

图11为试验车轮制造的实物照片。图12为原始材料和低压铸造成形后轮辐处的金相组织照片，轮毂所用材料为A356铝合金。图12a为合金熔炼前的金相组织，此时组织中基本为较粗大的长径比晶粒，尺寸大小在50~200 μm 左右；按照设定的低压铸造工艺及模具设计方案进行了样轮的试制，铸造完成后，利用光学显微镜观察到的轮毂金相组织如图12b所示，可以看到此时组织中的晶粒尺寸明显减小，圆球状或较

小长径比的晶粒数目有所增多，尺寸大小基本分布在50~150 μm ，共晶Si呈球状或椭球状分布在共晶组织内部，组织的细化有利于材料强度和塑性的提高，并在对样轮所进行的力学性能测试中得到体现，样轮各部位的基本力学性能如表3所示。按照国家标准，汽车轮毂的性能检测主要包括弯曲疲劳试验、径向疲劳试验以及13°冲击试验和90°冲击+弯曲疲劳试验^[15-16]，测试结果性能均符合使用要求。

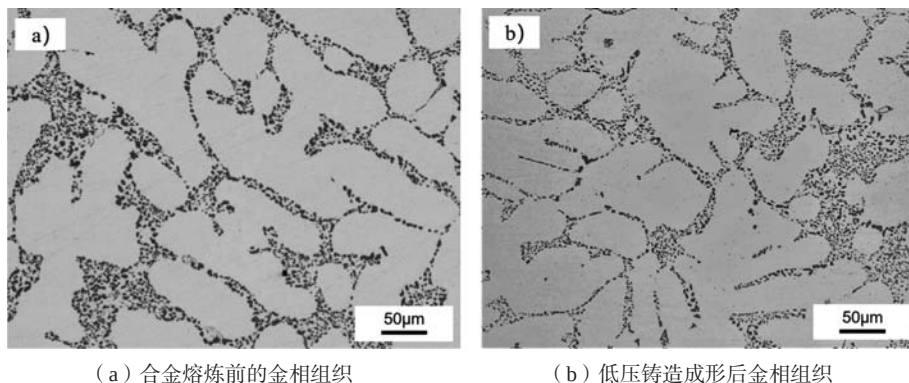


(a) 正面

(b) 反面

图11 试验样轮

Fig. 11 Low pressure wheel hub casting



(a) 合金熔炼前的金相组织

(b) 低压铸造成形后金相组织

图12 低压铸造轮毂成形前后材料的金属组织

Fig. 12 Microstructure of hub material A356 before and after low pressure casting

表3 样轮各部位基本力学性能

Table 3 Basic mechanical properties of each part of hub casting

部位	性能	规定值	实测值						判定
			1	2	3	4	5	6	
轮辐	抗拉强度/MPa	≥ 240	263	258	261	259	260	260	合格
	伸长率/%	≥ 3.3	5.9	5.3	4.9	5.2	5.6	5.4	合格
	硬度HB	85左右	89	86	91	88	90	89	合格
外轮缘	抗拉强度/MPa	≥ 240	291	292	289	290	292	291	合格
	伸长率/%	≥ 5	14.2	12.9	13.5	12.6	13.3	13.3	合格
	硬度HB	85左右	92	90	89	91	90	90	合格
内轮缘	抗拉强度/MPa	≥ 240	290	293	292	289	292	291	合格
	伸长率/%	≥ 3.3	13.8	14.1	12.9	13.3	13.5	13.5	合格
	硬度HB	85左右	93	91	90	92	93	92	合格

4 结论

(1) 设计了一款轻量化高结构强度的枝杈轮辐铝合金轮毂, 利用有限元软件模拟枝杈轮辐铝合金轮毂的低压铸造工艺过程, 对铝合金轮毂的充型顺序、残余熔体、晶粒尺寸、凝固及卷气等指标或过程进行分析, 确定了可实现轻量化枝杈轮辐铝合金轮毂低压铸造成形的工艺条件, 为实际生产提供参考。

(2) 根据仿真得到的工艺条件, 进行轮毂试验制造, 并进行基本力学能测试分析, 以及弯曲疲劳试验、径向疲劳试验以及13°冲击试验和90°冲击+弯曲疲劳试验, 测试结果性能均符合使用要求。

参考文献:

- [1] 李伟, 何顺荣, 李丹. 浅谈铝合金轮毂生产技术的发展现状 [J]. 中国铸造装备与技术, 2015 (3): 1-5.
- [2] 郭耀文, 陈启超, 李磊. 铝合金汽车轮毂及其生产方式分析 [J]. 科技创新导报, 2018, 15 (12): 95-96.
- [3] 戚文军, 王顺成, 蔡畅, 等. 半固态锻造A356铝合金轮毂的组织与性能 [J]. 材料研究与应用, 2012, 6 (3): 153-158.
- [4] 田涛. 浅谈汽车铝合金轮毂的应用 [J]. 科技创新与应用, 2012 (17): 54.
- [5] 李宁, 朱培浩, 胡亚辉, 等. 铝合金轮毂低压铸造的模具设计及工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (5): 494-497.
- [6] 赵岩, 李秀荣, 臧勇, 等. 低压铸造大型铝合金轮毂数值模拟及工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (10): 1063-1066.
- [7] 程万里, 熊守美, 柳百成. 低压铸造过程充型模拟简化模型的研究 [J]. 铸造, 2003 (8): 609-612.
- [8] 孔令超. 铝合金低压铸造过程的模拟 [J]. 铸造技术, 2015, 36 (6): 1513-1517.
- [9] 陆冰沪, 李大双, 盛晓菲, 等. 铸造A356.0铝合金铸锭组织分析 [J]. 科技创新与应用, 2020 (1): 114-115.
- [10] 张响, 闫胜咎, 董水光, 等. 基于CAE的铝合金车轮低压铸造模具结构优化 [J]. 汽车技术, 2007 (2): 39-42.
- [11] 贾晓飞, 王志峰, 赵维民, 等. 低压铸造铝合金轮毂内部缺陷分析及改进措施研究 [J]. 铸造, 2010, 59 (12): 1298-1302.
- [12] 刘洋, 侯佳新, 张志壮. A356铝合金低压铸造轮毂轮缘缺陷分析及改进 [J]. 铸造, 2017, 66 (10): 1112-1114, 1118.
- [13] 石岩, 董聪. 铸造工艺中合金液的充型与铸件的凝固 [J]. 中国科技投资, 2013 (26): 200-200.
- [14] 曹文灵, 周照耀, 李元元, 等. 船用柴油机活塞铸造顺序凝固工艺设计及数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30 (1): 36-38, 123.
- [15] 王霄锋, 王波, 赵震伟, 等. 汽车车轮结构强度分析 [J]. 机械强度, 2002 (1): 66-69.
- [16] 敦勃文, 张响, 韩沧, 等. 铝合金轮毂冲击试验瞬态有限元分析 [J]. 制造技术与机床, 2018 (2): 17-20.

Finite Element Simulation and Experimental Analysis of Low Pressure Casting of Lightweight Spoke Aluminum Alloy Hub with Branched Spoke

ZHANG Dian-jie¹, LIU Jian-fang¹, WANG Xing², LUO Jun-ting³

(1. Dicastal Xinglong Wheel Co., Ltd., Research Center of Light Alloy Wheel Engineering of Hebei Province, Qinhuangdao 066004, Hebei, China; 2. CITIC Dicastal Co., Ltd., Qinhuangdao 066011, Hebei, China; 3. School of Mechanical of Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract:

3D modeling technology was used to design a lightweight and high structural strength aluminum alloy wheel hub with branched spoke, and the numerical simulation of its low pressure casting process was carried out. The filling sequence, residual melt, grain size, solidification process and air entrainment of the aluminum alloy wheel hub were analyzed, and the process conditions of low pressure casting of light weight aluminum alloy wheel hub with branched spoke were determined. Based on the simulation process conditions, the wheel hub was manufactured and tested. The testing results show that the wheel hub meets the performance requirements of the vehicle.

Key words:

branched spoke; aluminum alloy; lightweight hub; low pressure casting; finite element
