

# 双边浇工艺铸造铝合金车轮的研究及优化

朱大智, 王胜辉

(保定市立中车轮制造有限公司, 河北保定 071000)

**摘要:** 低压双边浇是一种制作铝合金车轮的新兴铸造方法, 与低压中心浇进行了详细对比, 结果表明两者在铸件的凝固顺序上有着本质的区别, 并且双边浇工艺的特殊凝固顺序使其生产的汽车车轮的轮辐性能非常优良。作为一种新兴铸造工艺, 本身存在一些不足需要不断改善优化, 运用模拟分析对其中的铸造飞边问题进行重点攻关改善, 并取得了较为理想的效果。

**关键词:** 低压双边浇; 模拟分析; 铝合金车轮; 低压中心浇

中图分类号: TG244<sup>+</sup>.2 文献标识码: B 文章编号: 1001-4977 (2018) 02-0185-04

## Research and Optimization of Aluminum Alloy Wheel Casting by Bilateral Pouring Method

ZHU Da-zhi, WANG Sheng-hui

(Baoding Lizhong Wheel Manufacturing Co., Ltd., Baoding 071000, Hebei, China)

**Abstract:** Low pressure bilateral pouring is a newly developing casting method for making aluminum alloy wheel, and detailed compared with low pressure centre pouring. The results show that there is an essential difference between the solidification sequence of the casting and the special solidification sequence of the bilateral pouring method. Product performance of automobile wheel spokes made by latter method is very excellent. As a newly developing method of casting, there are some problems that need to be continuously improved and optimized. And the problem of casting joint flash is solved by using of simulation analysis, which achieves better results.

**Key words:** low pressure bilateral pouring; simulation analysis; aluminum alloy wheel; low pressure centre pouring

随着汽车工业高速发展, 各大汽车厂对汽车的要求越来越高, 安全、舒适、节能、美观、低噪音、低污染物排放成为今后汽车工业发展的趋势。汽车车轮作为汽车的重要组成部分, 是满足这些使用性能的重要零件, “高强度、轻量化”成为汽车车轮发展的大方向。铝合金车轮作为汽车车轮家族中的佼佼者, 人们对其制作工艺的探索从来没有停歇过, 铸造、铸旋、锻旋、液锻是目前铝合金车轮生产的主流工艺手段, 图1为铝合金车轮主要制作方法介绍<sup>[1-6]</sup>。

由于成本因素, 铝合金车轮仍以低压中心浇工艺制作为主, 锻旋工艺由于其高昂的成本目前只在一些高端汽车的车轮上应用。低压双边浇方式铸造的铝合金车轮其优良的轮辐性能得到了汽车行业的普遍认可, 尤其是低压双边浇+旋压工艺制作的车轮的整体性能足可以和锻旋车轮相媲美, 更是受到行业高度关注, 车轮制造厂纷纷加大了低压双边浇工艺铸造汽车车轮的研究。

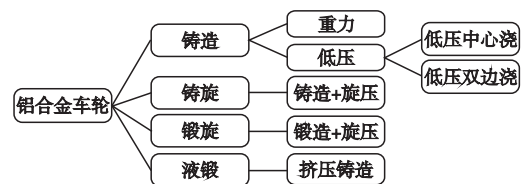


图1 铝合金车轮制作方法

Fig. 1 Making method of aluminum alloy wheel

本文以铸造+旋压工艺制作铝合金车轮为研究对象, 铝合金材料为AlSi7Mg, 模具材料为40CrMo, 使用ProCAST模拟分析软件对不同铸造方式下铸件的凝固特点进行分析研究; 采用561-03万能拉力试验机测试车轮成品的力学性能, 并进行对比分析; 采用573-04高倍金相显微镜对车轮成品的微观组织进行观测和分析。

## 1 低压双边浇和中心浇对比分析

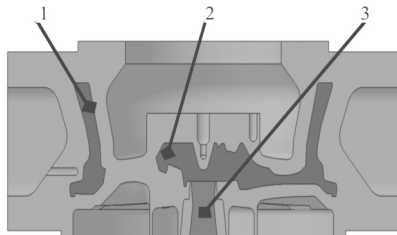
### 1.1 两种铸造工艺模具结构介绍

现阶段铝合金车轮铸造工艺还是以低压中心浇为

收稿日期: 2017-09-20收到初稿, 2017-11-02收到修订稿。

作者简介: 朱大智 (1983-), 男, 工程师, 工学学士, 主要从事汽车铝合金车轮模具的研发和铸造模拟分析研究工作。电话: 0312-3355251, E-mail: zhudazhi@lzwheel.com

主，其模具结构如图2所示，浇道位置在铸件中间（即轮心位置），铝液通过中心浇道首先流入铸件的轮心位置，然后填充铸件的轮辐位置，最后充型铸件的轮辋位置。



1. 模具 2. 铸件 3. 中心浇道

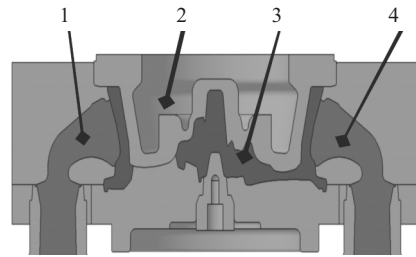
图2 中心浇工艺模具结构图

Fig. 2 Die structure diagram of centre pouring

铝合金车轮的低压双边浇铸造工艺是从低压中浇铸造工艺衍生出来的，其铸造原理和模具结构也很相似，最大的不同在于浇道的布置，其模具结构如图3所示，有两个浇道成对称分布位于铸件两侧（即轮辋位置），铝液通过边浇道首先流入铸件的轮辋位置，然后填充铸件的轮辐位置，最后充型铸件的轮心位置。

1.2 模拟分析两种铸造工艺的凝固过程

“高压看充型，低压看凝固”，铸造工艺不同，分



1. 边浇道 2. 模具 3. 铸件 4. 边浇道

图3 双边浇工艺模具结构图

Fig. 3 Die structure diagram of bilateral pouring

析问题的侧重点也不同，低压铸造的充型速度一般在1.2 m/s以下，充型过程比较平稳简单，凝固过程才是决定铸件品质关键因素。凝固过程是在封闭型腔内完成的，观测不到，只能根据模具结构和冷却工艺假想铸件的凝固过程。而运用模拟分析软件，可以让铸件的凝固过程形象地展现在计算机上，为判定凝固过程是否合理提供了理论依据。

利用模拟分析软件分别对双边浇和中心浇两种铸造工艺进行铸造模拟分析，重点对两种铸造工艺的凝固过程进行模拟对比。图4为采用双边浇工艺铸造铝合金车轮的凝固过程的模拟结果，图5为采用中心浇工艺铸造铝合金车轮的凝固过程的模拟结果<sup>[7]</sup>。

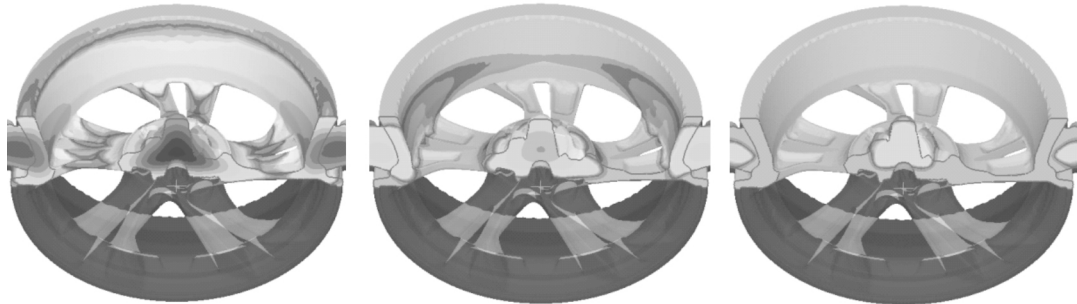


图4 双边浇工艺凝固过程

Fig. 4 Solidification process of bilateral pouring

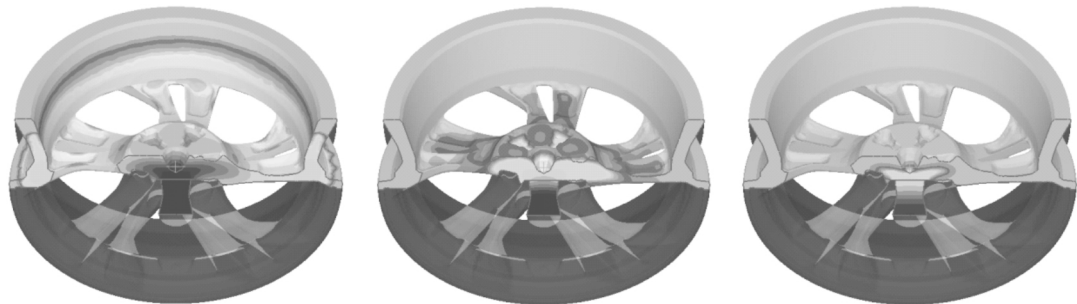


图5 中心浇工艺凝固过程

Fig. 5 Solidification process of centre pouring

1.2 两种铸造工艺的凝固过程分析

图6和图7是根据模拟分析结果绘制的双边浇和中心浇凝固路线示意图，从图6可以看出，铝合金车轮采用双边浇工艺铸造时，凝固开始的位置是轮辐中间位置（①点位置），然后凝固逐渐向两边蔓延，轮辋位置和轮心位置基本上是同时完成凝固；从图7可以看出，铝合金车轮采用中心浇工艺铸造时，凝固开始的位置

是轮辋顶部位置（①点位置），然后凝固逐渐向下蔓延至轮辐位置，最后是轮心位置凝固。通过分析可以发现，双边浇工艺的凝固顺序为：轮辐→轮辋+轮心，中心浇工艺的凝固顺序为：轮辋→轮辐→轮心。从凝固距离上进行对比，双边浇要比中心浇短很多，凝固距离短对应的凝固过程用时也就少，从而采用双边浇工艺铸造铝合金车轮的效率要高很多。

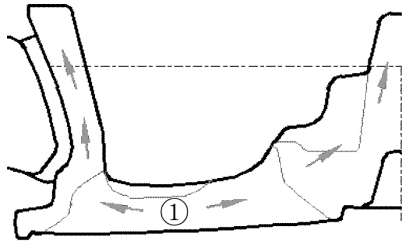


图6 双边浇凝固路线示意图

Fig. 6 Solidification route of bilateral pouring

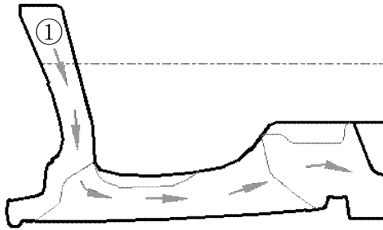


图7 中心浇凝固路线示意图

Fig. 7 Solidification route of centre pouring

### 1.3 两种铸造工艺轮辐组织及性能的对比分析

从前面的分析发现，双边浇工艺铸造汽车车轮的凝固过程与中心浇工艺的凝固过程差别很大，双边浇工艺的凝固过程主要有以下两个特点：凝固的开始位置是轮辐，轮辐的冷却速率快；凝固距离短，所需的凝固时间少，整个铸造周期用时少。

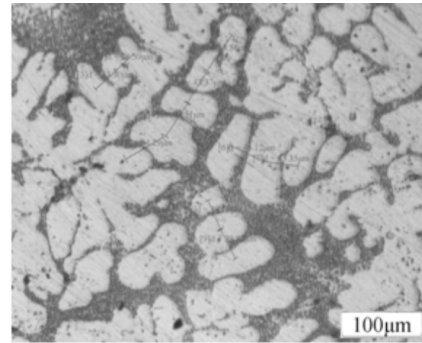
从这两点分析，双边浇工艺铸造的汽车车轮的轮辐部位的品质要比中心浇工艺的好很多，为此我们分别对两种铸造方式生产的车轮成品测试其轮辐性能，得到了屈服强度、抗拉强度、断后伸长率和二次枝晶间距的对比数据，结果见表1。图8是用高倍金相显微镜观察到的轮辐位置金相组织情况。通过数据对比可以发现，用双边浇工艺生产的车轮成品的轮辐部位的力学性能要高很多，屈服强度、抗拉强度分别提升了12%、10%，尤其是断后伸长率提高了66%；用双边浇工艺生产的车轮成品的轮辐部位的微观组织更加致密，二次枝晶间距下降了13%。

表1 轮辐各项性能指标对比

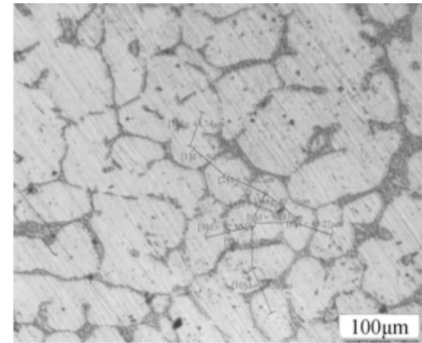
Table 1 Performance index of spoke

铸造工艺	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	断后伸长率 $A/\%$	二次枝晶间距 $SDAS/\mu\text{m}$
双边浇	216.45	266.96	5.63	42.97
中心浇	192.72	242.55	3.4	49.50
对比结论	12%↑	10%↑	66%↑	13%↓

双边浇工艺生产汽车车轮轮辐各项性能指标提升很大，性能品质的提升为“高强度、轻量化”汽车车轮设计和制造提供了可靠保障。所以，利用低压双边浇工艺制作汽车车轮成为车轮行业一个新的发展方向，各大车轮制造厂家纷纷加入了在这方面的研究与应用。作为一项新的制作工艺，技术上还不是很成熟，还处于探索优化阶段，一些技术难关还需要行业技术人员不断摸索攻关。



(a) 双边浇



(b) 中心浇

图8 轮辐金相组织对比

Fig. 8 Metallographic structure of spoke

## 2 低压双边浇技术问题及改善

### 2.1 工艺不成熟，良品率偏低

低压中心浇铸造汽车车轮之所以在车轮行业得到广泛应用就是因为它技术成熟、良品率高，而低压双边浇铸造汽车车轮在这方面还有不小的差距。从前面的介绍知道，在凝固顺序方面双边浇工艺与中心浇工艺有着本质的区别，中心浇铸件的凝固顺序是：轮辋→轮辐→轮心，是从远离浇道的位置向浇道位置顺序凝固，这样的顺序便于布置冷却及设置工艺参数；而双边浇铸件的凝固顺序是：轮辐→轮辋+轮心，轮辐优先凝固比较容易实现，轮辋是离浇道最近的位置，轮心是离浇道最远的位置，要保证这两个位置几乎同时完成凝固，这不符合传统的凝固理论，实现起来有一定的难度。良品率是衡量铸造水平和铸造稳定性关键参数，由于双边浇铸造工艺的复杂性和不成熟性，导致双边浇铸造铝合金车轮的良品率远远低于中心浇工艺铸造铝合金车轮的良品率。

如何优化工艺，保证铸件凝固过程的合理性，成为低压双边浇技术亟待解决一大课题。利用模拟分析软件有助于优化铸造工艺，从中发现铸件哪些部位的凝固过程不合适，从而可以有针对性地优化工艺，使工艺更加合理有效。

### 2.2 铸件毛坯材料利用率偏低

提升毛坯材料利用率一直是铸造行业节约制造成本的重要手段，汽车车轮的重力铸造逐渐被行业淘汰，

材料利用率低是一个重要因素。现阶段低压中心浇铸造汽车车轮的材料利用率根据产品不同一般在65%~70%，有些产品甚至更高；而低压双边浇铸造汽车车轮由于双浇道的存在，材料利用率一般都<60%。低压双边浇的结构特点决定了在材料利用率方面很难和低压中心浇媲美，现阶段也没有什么有效的途径提升其材料利用率。

### 2.3 铸造飞边问题

铸造飞边一直是困扰铸造行业的一大难题，模具在受热状态下的热变形量不一致导致封水面产生间隙是产生铸造飞边的根本原因。在低压双边浇模具验证使用过程中，铸造飞边问题带来不少麻烦，图9是低压双边浇模具在使用过程中产生的铸造飞边照片，铸件的两个浇道位置产生了大量的飞边，随着铸造次数的增加会导致模具上粘铝越来越多，从而使毛边越来越大，最终可能导致此部位“跑铝”。

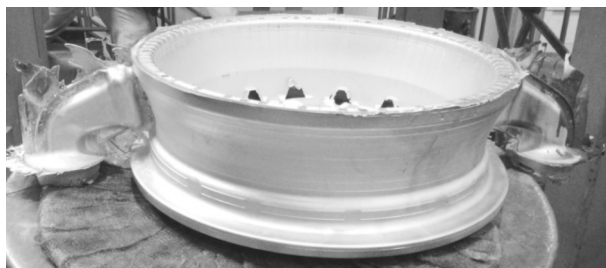


图9 双边浇毛坯的铸造飞边

Fig. 9 Casting joint flash of semifinished product

由于双边浇模具的浇道型腔是由两块边模组成的，所以此部位产生飞边的原因是边模不规则的热变形造成的。图10是用模拟分析软件分析的边模热变形量，组成浇道型腔的边模端面变形量是不均匀的，当两块边模合模贴合时会产生间隙，从而导致此部位产生铸造飞边。

通过模拟分析找到铸造飞边的产生原因，从而为解决飞边缺陷找到方法。从图10发现，边模端面的变形量是不均匀的，差值约为0.6 mm，利用加工中心将边模端面铣出0.6 mm的反向高度差，来补偿边模端面热变形的不均匀量。图11是边模修改后再次上线试做

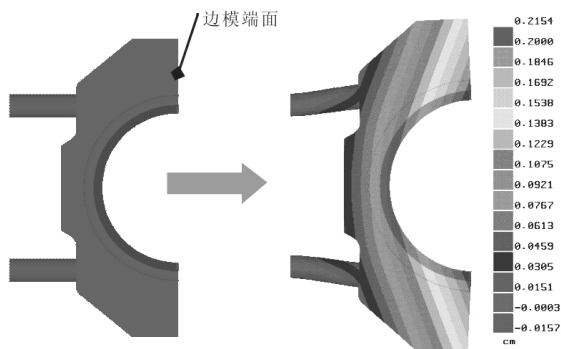


图10 边模热变形量

Fig. 10 Thermal deformation of side mode

时的铸造毛坯飞边状态，浇道位置飞边基本消失，改善效果良好。



图11 双边浇毛坯的铸造飞边 (改善后)

Fig. 11 Casting joint flash of semifinished product (improved)

## 3 结论

(1) 对比分析了低压双边浇模具和低压中心浇模具的结构特点，并运用铸造模拟分析软件对两种铸造工艺的凝固过程进行研究，双边浇工艺的凝固顺序为：轮辐→轮辋+轮心，中心浇工艺的凝固顺序为：轮辋→轮辐→轮心。

(2) 通过对比双边浇工艺和中心浇工艺生产车轮的轮辐组织及性能，确定了用双边浇工艺生产车轮的轮辐力学性能更卓越，屈服强度、抗拉强度和断后伸长率分别提升了12%、10%和66%；用双边浇工艺生产的车轮轮辐微观组织更致密，二次枝晶间距下降了13%。

(3) 作为一种较新的制作工艺，使用双边浇工艺生产车轮还存在一些不足之处，如良品率不理想、材料利用率偏低，铸造飞边等问题，并重点介绍了借助模拟分析软件分析模具热变形来改善铸造飞边问题，达到了比较理想的效果。

### 参考文献：

- [1] 庞午骥, 曹振伟, 万金华. 铝合金车轮制造技术及发展趋势 [J]. 铝加工, 2017, (2): 4-7.
- [2] 陈玖新, 代颖辉, 张川吉, 等. 基于ProCAST的挤压铸造重载车轮铸件成形过程数值模拟 [J]. 铸造, 2015, 64 (7): 639-642.
- [3] Reilly C, Duan J, Yao L, et al. Process modeling of low-pressure die casting of aluminum alloy automotive wheels [J]. JOM, 2013, 65 (9): 1111-1121.
- [4] 常海平. 一种铝合金轮毂铸旋成形工艺 [J]. 锻压装备与制造技术, 2012 (4): 67-69.
- [5] 宋鸿武, 李昌海, 常海平, 等. 高强韧铝合金轮毂的轻量化铸旋新工艺 [J]. 稀有金属, 2012 (4): 630-635.
- [6] 赵树国, 曹阳, 黄宏军, 等. 半固态挤压过共晶铝硅铁合金组织与性能的研究 [J]. 铸造, 2013, 62 (12): 1172-1175.
- [7] 陈玖新, 代颖辉, 叶珍, 等. 低压双边浇铸造铝合金车轮铸件成形过程数值模拟及优化 [J]. 铸造, 2016, 65 (4): 10-15.

(编辑：张允华, zyh@foundryworld.com)