

# 铸造铝合金车轮水冷模具的研究

朱大智

(保定市立中车轮制造有限公司, 河北保定 071000)

**摘要:** 为了增强铸造铝合金车轮模具的冷却强度, 通过调整模具冷却结构, 将冷却介质由压缩空气改为水, 并借助模拟分析软件对铸造工艺进行改善研究。结果表明: 水冷模具的冷却强度明显优于风冷模具, 可以加快车轮铸件的凝固速率; 使用水冷模具铸造车轮铸件可以提高生产效率, 增幅达25%; 生产的铝合金车轮微观组织更加致密, 性能强度更加卓越。

**关键词:** 铝合金车轮; 风冷模具; 水冷模具; 冷却介质

车轮作为汽车承载的重要零部件, 其安全性是车轮制造中首先要考虑的因素, 车轮在工作过程中承受着车辆的垂直负荷、横向力、启动和制动过程中的扭矩以及转弯时的复杂受力等, 时时刻刻考验着车轮的性能强度。随着时代进步, 整车厂对车轮强度性能越来越高, 制造厂对车轮生产节能环保要求日趋严格, 在获得高性能、高品质铸件的同时减少能源消耗, 成为车轮厂家技术升级和技术研究的主要目标。

目前, 铸造铝合金车轮广泛使用的制造方式为金属型低压铸造<sup>[1-2]</sup>, 模具冷却采用吹风冷却, 即通过风管向模具指定位置吹压缩空气。图1是典型的低压风冷模具示意图, 模具主体由1块上模、1块下模、4块边模组成, 在模具的不同位置布置冷却系统(由风孔和风管构成), 风管通入干燥的压缩空气, 吹在相应的风孔中, 来控制模具温度场保证铸件的顺序凝固。

## 1 风冷模具的主要问题点

在铸件凝固过程中, 增大过冷度加快铸件的凝固速率可以使铸件在结晶过程中产生更多的晶核, 同时可以限制晶粒的长大, 这样可以得到组织更致密、性能强度更高的铸件<sup>[3-4]</sup>。增加模具的冷却强度是提高铸件凝固速率最直接有效的方法, 对于这些使用强制冷却的模具来说, 增加冷却介质的使用量可以提高冷却强度。实践证明, 低压风冷模具在增加压缩空气使用量来提高铸件凝固速率方面效果并不明显, 往往达不到预期效果。通过分析研究发现冷却效果不佳主要受以下两个方面的影响: 一是冷却强度和流量并不是正比关系, 而是图2所示的曲线关系, 随着压缩空气流量的增加, 而冷却强度的增幅越来越小; 二是由于风道管径限制, 压缩空气的流量并不能无限增加, 通常情况下最高只能达到120 m<sup>3</sup>/h。

风冷模具不但限制模具冷却强度的提高, 而且压缩空气使用属于高能耗、高噪声工况。现阶段每生产一个铝合金车轮铸件大约需要消耗3~5 m<sup>3</sup>的压缩空气, 压缩空气的产生过程本身就属于高耗能过程, 而且用量非常大。压缩空气的压缩比为6, 压缩空气通过风管吹在模具上时, 体积急剧膨胀击打模具壁会产生较大的噪声, 模具周边的噪声可达90分贝, 非常刺耳。

## 2 水冷模具结构和其工艺

在提高模具冷却强度的研究中发现, 水介质的冷却强度是压缩空气的几十倍甚至

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: 15720176853, E-mail: zhudazhi@lzwheel.com

中图分类号: TG76

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)08-0878-05

收稿日期:

2020-02-27 收到初稿,  
2020-05-07 收到修订稿。

上百倍,完全能够满足铝合金车轮模具提高冷却强度的要求。水介质可以在冷却管道中循环使用,而且不会产生噪音,在节能环保方面也比压缩空气更具优势。

## 2.1 模具水冷结构

铝合金车轮结构相对固定,主要包括轮辋、轮辐、轮心三部分,其模具的冷却位置设计也相对固定,为了实现铸件的顺序凝固冷却主要设置在以下3个地方:①最先凝固的轮辋上耳位置;②轮辋和轮辐交接的热节位置;③比较厚大的轮心位置。低压风冷模具的冷却位置就是按上述原则进行布置的,所以在设计水冷模具时冷却水道的位置也应按上述原则进行布置。

图3是按上面介绍的冷却分布原则设计的铝合金车轮水冷模具示意图,其中,水道1冷却最先凝固的轮辋上耳位置;水道2、水道3冷却轮辋和轮辐交接的热节位置;水道4、水道5、水道6冷却比较厚大的轮心位置。

风冷模具和水冷模具的冷却位置虽然一致,但冷却系统的结构是完全不同的。风冷模具的冷却系统是开放式的,只需要用风管将压缩空气引到模具的冷却位置即可,结构非常简单。水冷模具由于涉及水介质回收利用,其冷却系统和外部管道连接后要能形成闭合回路。

铝合金车轮结构为“L”型回转体,其结构区域也是按节圆圆周进行划分的,对某一位置设置冷却也是按此位置的节圆圆周进行分布的。风冷模具一般是在冷却位置的节圆圆周上均布一定数量的风孔来进行冷却。水冷模具要在冷却节圆位置制作圆弧型水道,由于圆弧型水道是不能通过在模具本体上钻孔实现的,我们采用封闭式水槽结构,首先在模具本体的冷却节圆上铣出敞开式的水槽,然后制作相对应的盖板,最后将盖板与模具本体焊接在一起,形成封闭的水冷通道,具体结构见图4的水槽结构图。

图5为水冷模具水冷通道设计方案示意图,其中圆弧形区域为封闭的冷却水槽,直线形区域为冷却水道的入水口和出水口,和外部管道连接形成封闭的冷却回路。车轮模具的上模和下模属于回转结构,按照冷却节圆位置布置冷却水槽,再在垂直盖板位置设计入水管道和出水管道。由于车轮模具的边模为四开模结构,边模上的冷却水道只能采用分段式,每块边模上布置弧形冷却水槽,再在其外侧面钻孔连接入水管道和出水管道。

## 2.2 水冷铸造工艺

模具和工艺作为铸造过程相辅相成的两部分,模具结构发生变化其相应的铸造工艺也会随之改变。低压风冷模具作为铝合金车轮铸造行业应用最广泛的铸造手段,其对应的铸造工艺已经非常成熟,由于风、

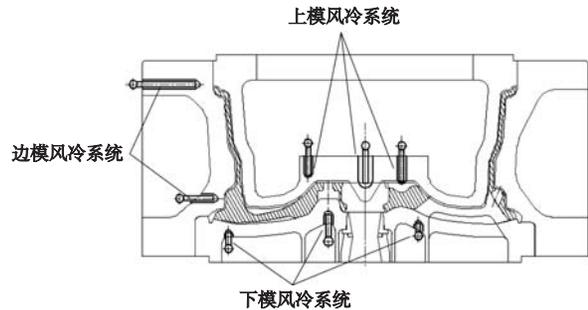


图1 低压风冷模具示意图

Fig. 1 Schematic diagram of low pressure air-cooling die

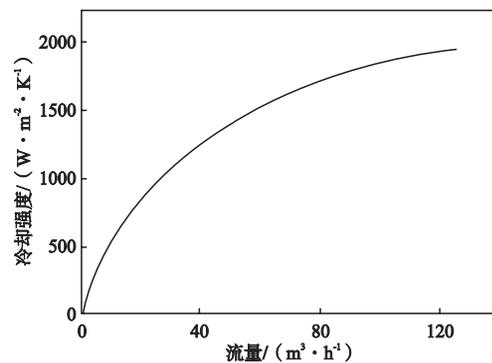


图2 冷却强度与流量关系

Fig. 2 Relationship between cooling strength and flow rate

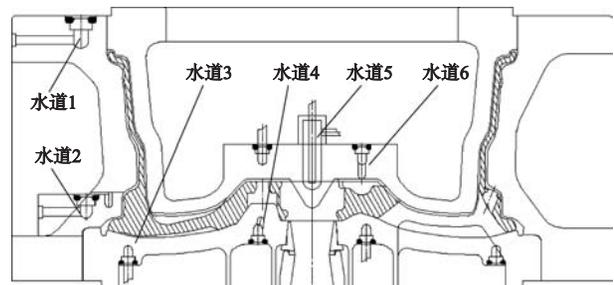


图3 低压水冷模具示意图

Fig. 3 Schematic diagram of low pressure water-cooling die

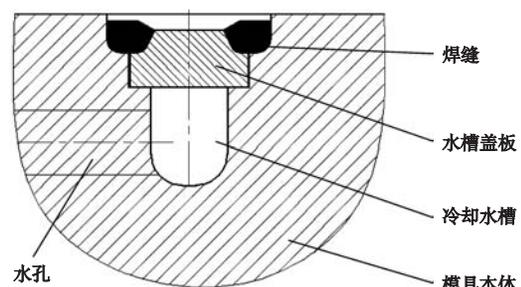


图4 水槽结构图

Fig. 4 Tank structure drawing

水两种介质的冷却强度差异很大,风冷模具铸造工艺对于水冷模具工艺的研究可借鉴参考价值不大,水冷工艺研究成为低压水冷模具应用的重要工作。

研究水冷模具的主要目的是加快铸件凝固速率,提高铸件微观品质和强度性能,加快铸件凝固速率意味着铸件凝固时间减少了,相应的铸造周期也会随之缩短。冷却介质强度和铸造周期都发生了较大变化,其对应的铸造工艺参数差别也会很大。

利用MAGMA铸造模拟分析软件对同一款产品风、水两种冷却状态下的铸件凝固过程进行理论分析,对于风冷模具我们有成熟的铸造工艺参数很容易模拟出铸件的凝固过程,如图6所示,铸件是按轮辋-轮辐-轮心的顺序进行凝固的,而且没有出现孤立的液相区域,符合顺序凝固原则。在进行水冷模具的模拟分析时,通过反复调整铸造周期、水道水流量和水道冷

却时间,得到了和风冷模具铸件凝固顺序基本一致的顺序凝固过程,如图7所示。

将以上模拟结果进行对比分析可以发现,两种冷却状态下的铸件凝固顺序基本一致,都是按轮辋-轮辐-轮心的顺序进行凝固的,说明水冷模具和风冷模具一样,都不会产生由于凝固顺序问题而导致的缩松、缩孔等缺陷<sup>[5]</sup>。风冷模具的铸件凝固用时280 s,水冷模具铸件凝固用时220 s,说明水冷模具能提高铸件的凝固速率,使其铸造组织更加致密,性能强度更高。

### 3 两种冷却方式实际对比情况

为了验证水冷模具结构可行性和优越性,以模拟分析项目为案例开发水冷模具一套,同风冷模具在生产效率和铸件品质方面进行实际对比研究。



图5 水冷通道设计方案示意图

Fig. 5 Schematic diagram of water-cooling channel design

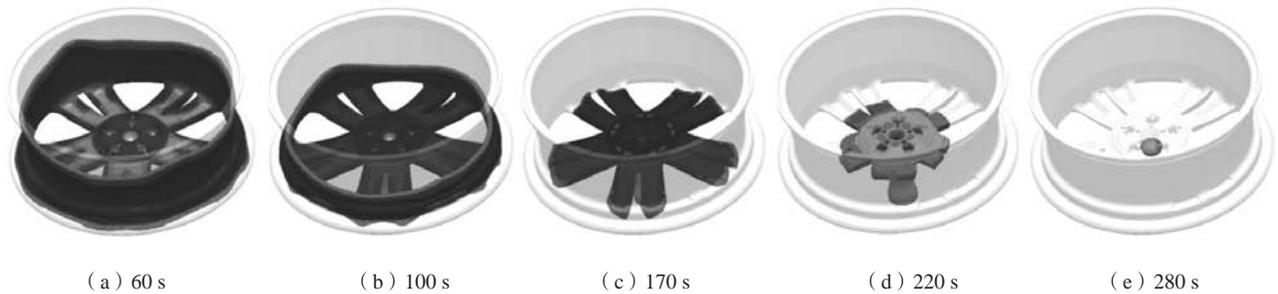


图6 风冷模具铸件凝固过程

Fig. 6 Solidification process of air-cooling wheel casting

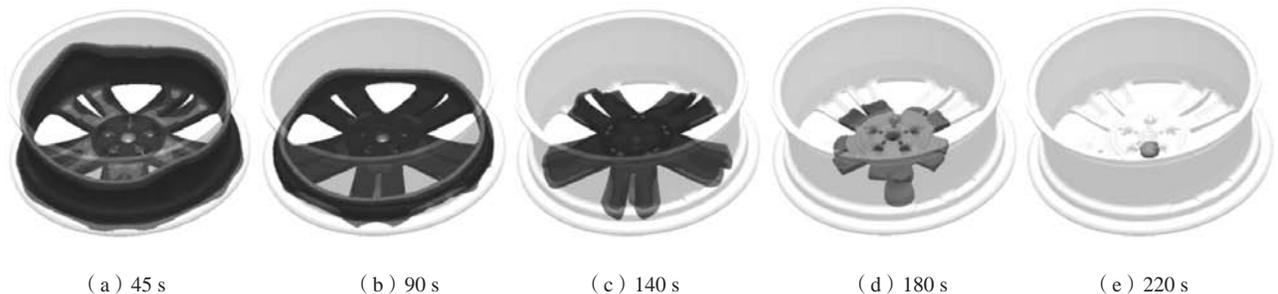


图7 水冷模具铸件凝固过程

Fig. 7 Solidification process of water-cooling wheel casting

### 3.1 生产效率对比

在对风、水冷却状态下的模具进行验证过程中,基本还原了使用MAGMA模拟分析软件研究的铸造工艺参数,具体工艺参数见表1。

通过工艺对比可以发现,风冷模具的单件铸造周期是300 s,水冷模具的单件铸造周期是240 s,进而可以统计出风冷模具的生产效率是96件/8 h,水冷模具的生产效率是120件/8h,即水冷模具比风冷模具生产效率提高了25%,采用水冷模具生产可以实现较高的生产效率。

### 3.2 组织性能对比

选取风冷模具和水冷模具生产的铝合金车轮成品,分别在轮辋、轮辐、轮心3个典型部位取样,进行相应的组织观察及力学性能测试<sup>[6]</sup>。

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,得到了3个取样部位的微观晶粒情况和二次枝晶间距,见图8、图9。可以发现,相同取样部位的二次枝晶间距水冷铸件要小于风冷铸件,即采用水冷方式生产的铝合金车轮晶粒更小、组织更致密。根据霍尔佩奇定律可知,晶粒大小与性能呈反比关系,晶粒越小,共晶Si 越小,越容易产生高性能的产品。

采用561-03万能拉力试验机测试车轮成品的力学

表1 风冷和水冷实际工艺参数  
Table 1 Actual process parameters of air cooling and water cooling

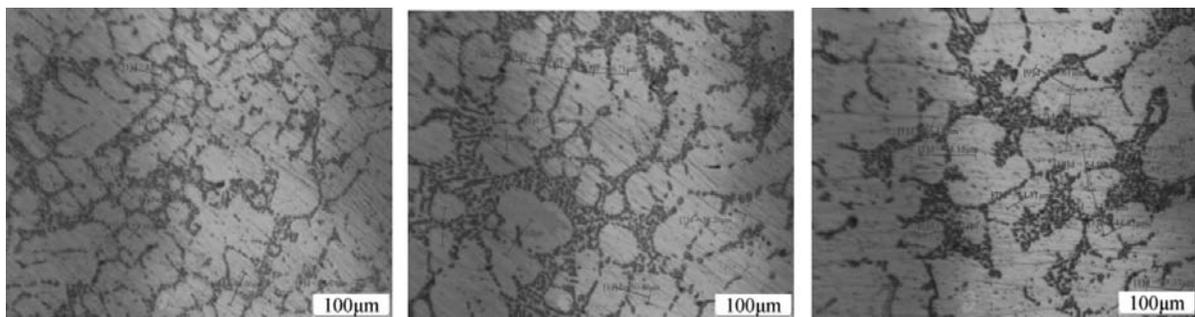
阶段	风冷工艺		水冷工艺	
	时间/s	压力/mbar	时间/s	压力/mbar
升液	10	200	10	200
充型	30	300	30	300
增压	40	800	40	800
保压	260	800	200	800
卸压	300	0	240	0

性能并进行对比分析,得到了3个取样部位的力学性能,具体数据见表2。可以发现,相同取样部位的屈服强度、抗拉强度和断后伸长率的力学性能指标水冷铸件要优于风冷铸件,即使用水冷工艺生产的铝合金车轮产品性能强度更加优越,产品安全性更高。

## 4 水冷模具在使用过程中出现的问题

水冷模具的能提高生产效率、提升产品性能强度的同时,本身也存在一些问题,在水冷模具的推广过程中有两个问题逐渐凸显出来。

模具在使用一段时间后很容易出现漏水现象,导



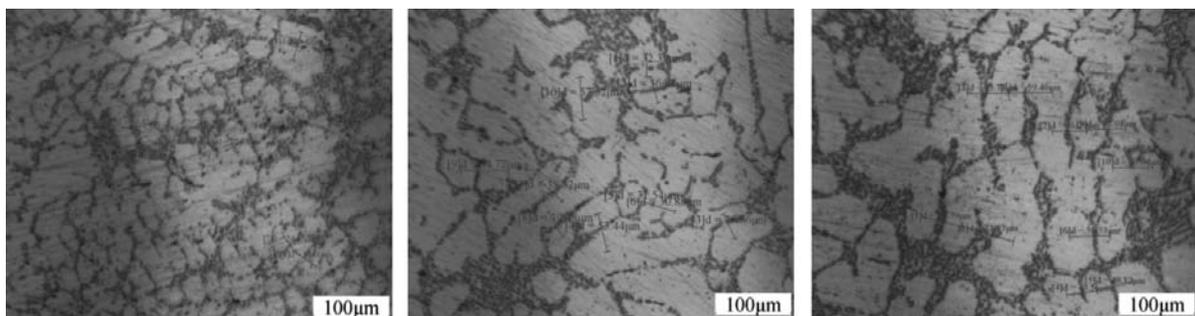
(a) 轮辋SDAS=34 μm

(b) 轮辐SDAS=47 μm

(c) 轮心SDAS=58 μm

图8 风冷轮铸件的金相组织

Fig. 8 Microstructure of air-cooling wheel casting



(a) 轮辋SDAS=30 μm

(b) 轮辐SDAS=42 μm

(c) 轮心SDAS=53 μm

图9 水冷轮铸件的金相组织

Fig. 9 Microstructure of water-cooling wheel casting

表2 力学性能对比  
Table 2 Comparison of mechanical properties

取样部位	风冷轮铸件			水冷轮铸件		
	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 $R_m$ /MPa	断后伸长率 $A$ /%	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 $R_m$ /MPa	断后伸长率 $A$ /%
轮辋	211.17	273.76	3.2	222.93	286.01	3.6
轮辐	208.35	261.91	2.9	213.42	274.39	3.8
轮心	192.69	247.40	2.1	208.81	269.52	2.9

致模具异常下线。通过分析发现漏水位置都发生在水槽盖板的焊缝上, 由于冷却水道频繁的热胀冷缩容易导致焊缝位置出现裂缝, 才导致了漏水现象的产生, 这是模具使用工况本身导致的, 不能完全避免, 只能采取其他措施尽量减小其发生概率。一是在模具制作时提高焊接工艺, 保证焊缝质量, 同时焊后进行热处理消除焊接应力; 二是在模具上线前对冷却水道进行通水检验, 避免线上漏水。

在对水冷模具的温度监控中发现, 随着模具使用频次的增加, 在工艺不发生变化时模具温度呈缓慢上升趋势, 说明水道冷却强度在逐渐降低。经过研究分析发现是水道内壁逐渐凝结水垢导致的, 使水介质和模具本体之间形成一层保温层, 水垢随使用频次增加而越来越厚导致冷却强度降低。对于这个问题公司现行的解决办法是使用草酸定期除垢。

#### 参考文献:

- [1] 赵玉涛. 铝合金轮毂制造技术(第1版) [M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [2] 王占库, 吕朔. 铝合金轮毂的不同成形工艺及其力学性能 [J]. 铸造技术, 2016, 37(12): 2738-2743.
- [3] 康永飞, 李浩, 白朴存, 等. 冷却速度对复杂铝合金铸件组织的影响 [J]. 铸造, 2020, 69(1): 40-45.
- [4] 刘艳辉, 毛红奎, 刘佩叶, 等. 冷却速度对ZM5镁合金凝固组织与性能的影响 [J]. 铸造, 2017, 66(3): 286-289.
- [5] 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.
- [6] 易佑福, 龙思远, 徐绍勇, 等. 低压铸造A356铝合金轮毂的微观组织和力学性能 [J]. 特种铸造及有色合金, 2008(5): 373-375.

## 5 结论

(1) 由于车轮结构特点, 风冷模具和水冷模具的冷却分布位置基本一致, 主要集中在轮辋上耳、轮辋和轮辐交接处、轮心三个位置, 只是冷却结构差异较大。

(2) 由于水介质的冷却强度比压缩空气大的多, 使用水冷模具制作车轮铸件时, 生产效率可以大幅提升, 增幅可达25%。

(3) 水冷模具可以提高车轮铸件的凝固速率, 使车轮成品的微观组织更加致密、性能强度更加卓越。

(4) 水冷模具在推广应用反馈出两个问题需要进行优化改善: 一是水槽与盖板的焊缝容易开裂漏水; 二是水道容易凝结水垢影响冷却强度。

## Study on Water-Cooling Die for Aluminum Alloy Wheel Casting

ZHU Da-zhi

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

#### Abstract:

In order to enhance the cooling strength of the cast aluminum alloy wheel die, the cooling medium was changed from compressed air to water by adjusting the die cooling structure, and the casting process was improved by means of simulation analysis software. The results show that the cooling strength of water-cooling die is better than that of air-cooling die, and the solidification rate of wheel castings can be enhanced; the use of water-cooling die can improve the production efficiency of wheel castings by 25%; the aluminum alloy wheel produced by the water-cooling die has more compact microstructure and excellent strength.

#### Key words:

aluminum alloy wheel; air-cooling die; water-cooling die; cooling medium