

# 低压铸造铝合金车轮模具水冷结构设计

张建良, 王胜辉

(保定市立中车轮制造有限公司, 河北省高强韧轻量化车轮技术创新中心, 河北保定 071000)

**摘要:** 低压铸造模具冷却结构由风/水雾冷改为水冷, 研究了冷却对模具铸造的影响。结果表明, 水冷结构不同, 作用位置不同, 冷却效果不同。根据模具结构特点, 合理布置水冷结构、分布, 有效提高了铸造效率和铸件产品力学性能。

**关键词:** 低压铸造; 铝合金车轮; 模具; 水冷结构; 冷却效率

我国汽车铝合金车轮的研究开发始于20世纪80年代末、90年代初期, 生产方式有重力铸造和低压铸造两种。重力铸造由于设备简单, 对工人的技术要求相对较低、投资小、生产转换方便而得到广泛应用。重力铸造是铝液依靠重力作用流动充填型腔, 由于没有外加压力, 为了获得致密的铸件, 往往需要利用冒口来补缩。与低压铸造相比, 重力铸造的浇冒口较重, 材料利用率很低, 内部组织不致密。进入21世纪后国内汽车铝合金车轮的生产, 低压铸造逐步发展为主流生产方式。低压铸造是在一个密封的容器内, 通入干燥的压缩空气, 铝液在气体压力的作用下沿升液管上升通过浇道进入型腔, 并在保持气体压力的条件下完成凝固, 然后卸除容器内的气体压力, 使升液管和浇道中未凝固的铝液回到容器中, 已凝固的金属在模具型腔中形成所需的铸件。见图1。

通过控制通入容器内的气体压力和加压速度, 可以控制铝液在升液管中的上升速度和充型速度, 因此低压铸造的铝液充型平稳、易于控制。另外铸件在一定的压力下结晶凝固, 铸件的补缩效果好, 铸件的组织致密。而且低压铸造一般不设置冒口, 浇注系统小, 材料利用率很高。

## 1 低压模具冷却方式

为了达到铝合金车轮铸件的顺序凝固和提高生产效率, 常常对铸造模具局部采取保温措施或冷却措施。模具的冷却从发展之初主要有三种形式: 风/水雾冷、水冷和冷铁。

(1) 冷铁。铸造工艺上有时在模具的局部位置使用冷铁对铸件进行激冷, 以消除铸件的疏松。常用的方法是在需要激冷的位置钻孔加铜棒, 因其冷却强度和效果较差, 在使用中存在一定局限性, 未能大规模应用。

(2) 风/水雾冷。先将金属管进行弯制, 装配在模具背腔, 使压缩空气通过风管直接喷射在需要冷却的模具表面进行冷却, 由于其结构简单、成本低、易于控制, 因此在前期被广泛使用。但风冷冷却强度较低, 后来对风冷进行升级, 通过增

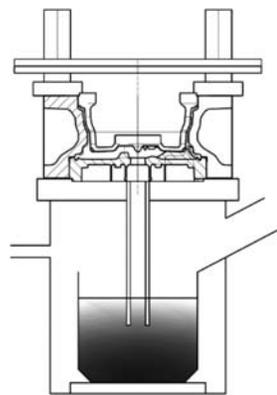


图1 低压铸造示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the low pressure casting

作者简介:

张建良(1965-), 男, 高级工程师, 主要从事汽车铝合金车轮的研发和制造工作。电话: 0312-5997695, E-mail: zhangjianliang@lzwheel.com

中图分类号: TG241.1

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2023)

08-1046-05

收稿日期:

2023-03-01 收到初稿,

2023-05-13 收到修订稿。

加设备将水雾化后在压缩空气作用下喷射在模具表面上。水雾的加入增加了风冷的强度,使得生产效率在原来风冷的基础上可提升最多10%左右。风/水雾冷仍是目前低压铸造生产的主要冷却形式,但是风/水雾冷的缺点是压缩空气消耗大,环境噪声大,且在生产效率提升上效果有限,所以其在发展上必然受到制约。

(3) 水冷。用水代替压缩空气作为冷却介质,特点是冷却速度快,激冷效果强,水可循环使用,无噪声污染,冷却效果显著,水的冷却强度是风的几十倍甚至上百倍。但是开放式的风管不适用于水冷,通常的做法有两种:一是制作水冷盘/环,贴紧需要冷却的模具部位;二是在模具部件上直接开槽后再焊接。水冷在提升铸件性能和提高生产效率上较风/水雾冷发挥作用的空间更大。

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。经行业内研究发现,在合适部位增加水冷冷却后,与普通风/水雾冷工艺相比,生产效率可提升20%左右,并且铸件的力学性能有显著提升。

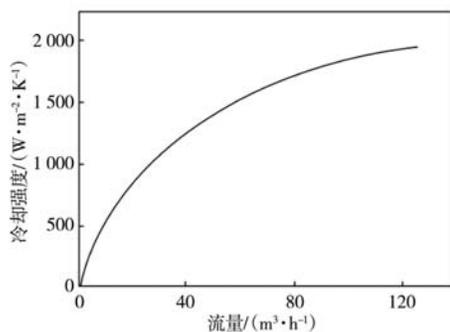


图2 冷却强度与流量关系

Fig. 2 Relationship between cooling strength and flow rate

由于水冷结构复杂,模具加工成本高,工艺不易控制,各公司都对其投入大量人力物力进行研究开发,目前虽还不能完全取代风/水雾冷,但取得了一些进展,在实际铸造生产中得到一定的推广使用。

## 2 水冷的方式及结构

### 2.1 水冷的方式

由于水冷无法像风/水雾冷那样直接将冷却空气喷射在模具表面后散射到环境中,必须有回收管路,所

以水冷的结构较风冷复杂。通常的结构有两种,即直接冷却和间接冷却。直接冷却是直接在模具主件(上模、下模、边模、中心)上加工水冷槽,开槽部位要保留安全壁厚避免开裂漏水(图3);间接冷却是制作水冷部件,贴紧在冷却部位,并需要紧固,需要更大的空间;而且为达到更好地冷却效果,需增加导热介质(图4)。

直接冷却强度大,模具温度变化快;但增加了模具制作难度,一旦工艺调整或发生漏水维修困难,需更换整个模具部件;间接冷却贴合部位对导热性影响很大,甚至需要增加介质层来增加导热性。间接冷却可通过改变贴合部位或介质位置,灵活调节冷却方位。

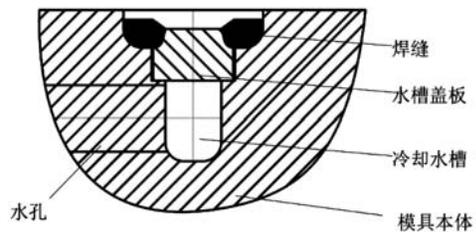


图3 直接冷却结构

Fig. 3 Direct cooling structure

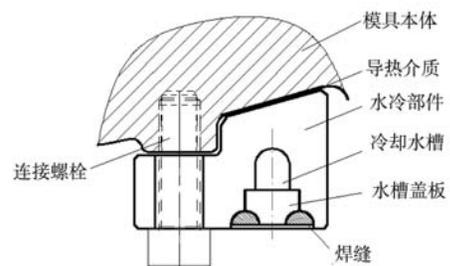


图4 间接冷却结构

Fig. 4 Indirect cooling structure

### 2.2 水冷的范围

水冷的范围有面冷和点冷两种,面冷的冷却区域较大,对模具温度影响大;目前直接冷却大多为面冷,适用于需大面积冷却部位。面冷结合隔热槽使用,也可控制冷却区域;点冷冷却区域小,冷却位置更精准,工艺更容易控制;点冷的水冷结构部件数量增多,需要更大的空间,模具加工精度要求更严格,模具在制作和装配上要求更高。

### 2.3 水冷的位置

水冷的位置一般在型腔末端、厚大热节部位和需提升性能的部位,与风冷的布置原则基本一致,即保证铸件的顺序凝固。图5水道1为型腔末端,普通低压

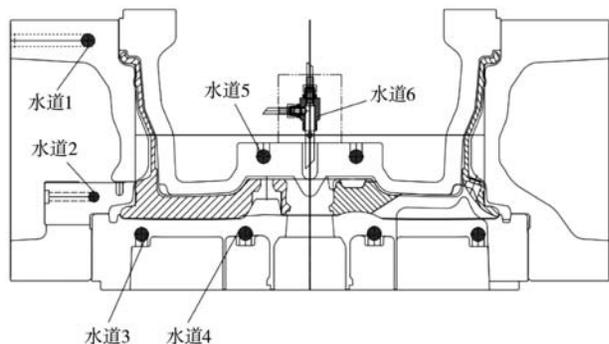


图5 模具水冷位置示意

Fig. 5 Schematic diagram of the low pressure water-cooling die

铸件此位置较薄，不需额外增加冷却可以保证最先凝固；铸旋铸件此位置较为厚大，一般设置直接水冷。水道2、水道3为轮辐与轮辋交接的热节部位，较为厚大，易出现铸造缺陷的位置，需设置直接水冷结合隔热槽使用。水道4为下模对应铸件轮心厚大部位，可根据产品结构采取直接或间接冷却，由于铸件螺栓孔的结构宜采用点冷。水道5为上模对应轮心厚大部位，由于背面减重窝结构宜采用间接点冷结构。水道6中心部位采用点冷。

## 2.4 水冷的维护

要保证水冷的效果一是要有足够的压力来保证流量，二是要根据环境温度调节水温。水冷管道在使用一定时间后会产生水垢，使管道内管径变小，水流量变小，降低冷却效果，严重的会堵塞管道。经过验证，定期使用酸液可以清除水垢，现在相应的设备和工艺已经很成熟。

## 3 水冷的问题

### 3.1 开裂漏水

由于水冷激冷效果强，水冷管道温差变化大，在生产中极易发生开裂，尤其是在壁厚较薄和焊接部位，见图6。目前水冷部件的寿命大概在20 000件，还不能达到模具本身的30 000件。



图6 模具开裂

Fig. 6 Cracking of the Die

漏水的原因和对应措施主要有：①材料内部有缺陷，水道位置有渣孔、砂眼；措施：控制模具部件质量和检验，防止原材料缺陷导致漏水；②壁厚太薄，在水的激冷作用下开裂；措施：水道在设计时一定要保证安全壁厚；③水槽盖板和焊缝结构不合理，达不到封闭效果；措施：设计时一定要保证足够的封闭面和焊接面积，且焊缝不能高于工件表面以免碰伤；④焊接应力导致工件过早开裂；措施：工件在焊接后要去除焊接应力。开发新的水道加工方法，目前开始应用放电打孔工艺，避免在模具上开槽，极大程度上解决了漏水问题，但只能用于非整圈结构。

### 3.2 调节冷却强度和范围

直接冷却强度速度快，激冷效果强，影响范围大，必须对冷却范围进行调节，否则工艺很难控制。一般调节措施为增加隔热槽，将不希望受冷部位隔离开，部分隔热见图7、整圈隔热见图8。

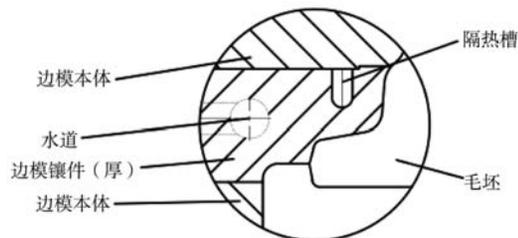


图7 非整圈隔热槽结构示意图

Fig. 7 Non integral insulation groove structure

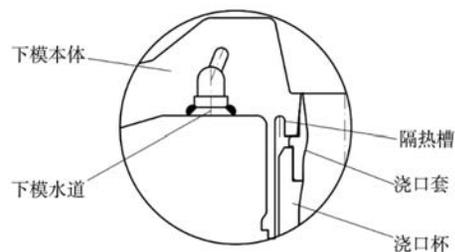


图8 整圈隔热槽结构示意图

Fig. 8 Whole circle insulation groove structure

间接冷却对贴合面的要求非常高，如贴合效果不好会影响冷却强度，现在都采用在贴合面上增加导热性更好的介质层来增强冷却效果。

### 3.3 结构和空间

因为需要回水管路，水冷部件的结构较风冷部件要复杂的多，也更占用空间，现有模具空间无法满足过多水冷部件的装配。如果要想更大范围应用，需要更加简单、占用空间小的水冷部件结构，见图9点冷水冷部件。

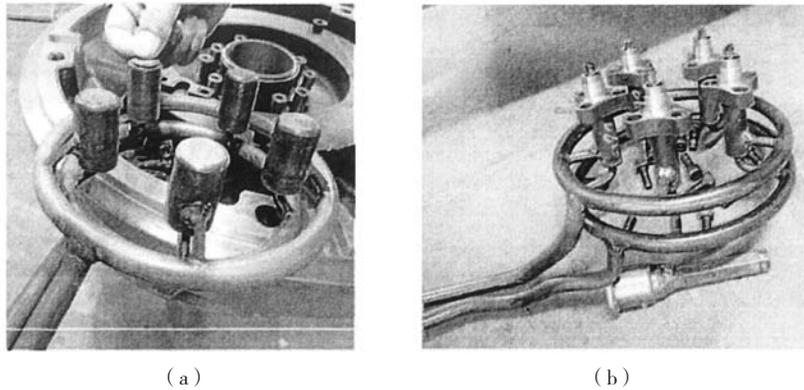


图9 点冷水冷部件  
Fig. 9 Point cold water cooling components

### 3.4 铸件飞边

在使用水冷后模具的温度变化范围加大，模具的收缩量也会发生变化，铸件产生飞边的几率也会比普通风/水雾冷模具要大。在设计时必须重新计算各部位配合间隙，并不断在生产中调整，以免产生较大飞边。

## 4 应用案例

### 4.1 模具设计

模具设计方案见图10，整套模具共设计9道水冷，无任何风冷。

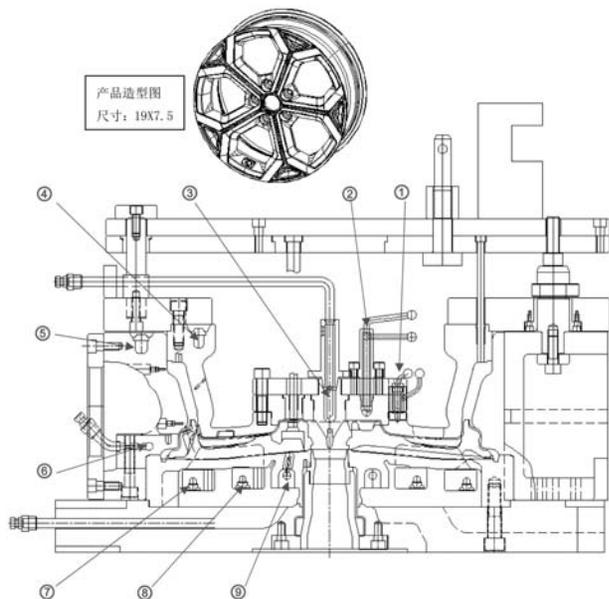


图10 模具结构方案  
Fig. 10 Die structure

上模共设计4道水冷：①点冷间接冷却，与模具配合部位有导热介质；②点冷直接冷却；③中心点冷直接冷却；④面冷直接冷却。

边模共设计2道水冷：⑤面冷直接冷却；⑥面冷直

接冷却，采用电打孔工艺，杜绝漏水，且右侧设有隔热槽。

下模共设计3道水冷：⑦环形冷却部件，与模具配合部位有导热介质；⑧环形冷却部件，与模具配合部位有导热介质；⑨点冷直接冷却，且内外两侧都设有隔热槽。

### 4.2 生产效率及性能

现场工艺调整稳定后数据见表1。

表1 风冷和水冷生产工艺对比  
Table 1 Actual process parameters of the 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
充型	36	300	36	300
保压	200	800	155	800
自然冷却	50	800	40	800
开合模	30	0	30	0
生产周期	316	—	261	—

经对比发现该产品班产由原风冷的91件（8 h）提升至110件（8 h），效率提升20.8%。且其力学性能也有大幅提升，见表2。

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

取样部位	风冷铸件			水冷铸件		
	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
轮辋	211.17	273.76	10.7	222.93	276.01	12.2
轮辐	208.35	261.91	2.9	213.42	274.39	3.8
轮心	192.69	247.40	4.5	208.81	279.52	5.1

#### 4.3 效益分析

预计采用水冷模具结构后平均生产效率可提升15%，每100万产能可提升15万件，按提升产能收益30元/件，可提升收益 $30 \times 150\,000=450$ 万元。

采用水冷模具结构后，此产品单只压缩空气可节约 $25\text{ m}^3$ ，按每立方米1.5元，每100万产能可降低压缩空气采购成本 $1.5 \times 25 \times 1\,000\,000=3750$ 万元。

并且采用水冷结构后，生产现场周围噪音明显下降，可大幅降低噪音污染，改善工作环境。

#### 4.4 存在问题

水道要定期清理，以免被水垢堵塞，降低流量影响冷却效果；导热介质要经常检查，根据接触面效果判定是否更换；水冷部件结构复杂，在拆卸、组装上

较为困难且出现了漏水现象。

此水冷结构对产品造型有一定要求，并非所有轮型都能采用全水冷，在生产中确实发现有一些轮型不适用全水冷，工艺无法稳定。

## 5 结论

(1) 风/水雾冷在提升铸件的生产和效率上已遇到瓶颈，铝合金车轮铸造技术的进一步发展必然依靠水冷技术。

(2) 通过增加一些结构和介质可以调节水冷的强度和范围，使水冷工艺便于控制和稳定生产。

(3) 全水冷模具目前还无法全面推广，需要更适合在铝合金车轮铸造模具上应用的焊接技术和占用空间更小水冷部件。

#### 参考文献:

- [1] 赵玉涛, 张文灿, 陈平. 铝合金车轮制造技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 94-99.
- [2] 朱大智. 铸造铝合金车轮水冷模具的研究 [J]. 铸造, 2004, 69(8): 878-882.
- [3] 许素娟. 风水混合冷却在车轮模具的设计及应用技术 [J]. 内燃机与配件, 2020(2): 102-104.
- [4] MI Guofa, LIU Xiangyu, WANG Kuangfei, et al. Numerical simulation of low pressure die-casting aluminum wheel [J]. China Foundry, 2009, 6(1): 48-51.
- [5] SUN Haibo, JIANG Shuhua. Research on the numerical simulation of the low-pressure construction of automotive aluminum alloy parts [J]. China Foundry, 2018: 95-99.

---

## Water-Cooled Design of Low Pressure Casting Die for Aluminum Alloy Wheel

ZHANG Jian-liang, WANG Sheng-hui

(Baoding Lizhong Wheel Manufacturing Co., Ltd., Hebei High Strength and Toughness Lightweight Wheel Technology Innovation Center, Baoding 071000, Hebei, China)

#### Abstract:

The cooling junction of the low pressure casting die was changed from air cooling and water mist cooling to water-cooled structure. The influence of cooling on the casting die was studied. The structure was different due to water cooling, the direction of production and use was different, and the cooling effect was different. According to the detailed construction characteristics of the die, the water-cooled structure was reasonably arranged and distributed, which effectively improved casting efficiency and the performance of the casting utensils machinery.

#### Key words:

low pressure casting; aluminum alloy wheel; die; water-cooled structure; cooling efficiency