

# 镁合金汽车轮毂低压铸造工艺进展

郭俊卿<sup>1, 2</sup>, 樊翠林<sup>1, 2</sup>, 陈拂晓<sup>1, 2</sup>

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南洛阳 471023; 2. 有色金属新材料与先进加工技术省部共建协同创新中心, 河南洛阳 471023)

**摘要:** 通过对国内外低压铸造技术发展历程、镁铝合金汽车轮毂低压铸造工艺现状的总结, 分析了汽车轮毂低压铸造生产中的缺陷产生的原因与计算机数值模拟现状, 并对镁合金汽车轮毂低压铸造工艺提出了展望。

**关键词:** 汽车轮毂; 低压铸造; 镁合金; 数值模拟

铸造是人类掌握较早的一种金属热加工工艺, 已有约6 000年的历史。在已有的金属成形方法中, 铸造工艺也是较为经济的一种, 尤其是用于成形一些形状复杂或者难以进行切削加工的零件。对于汽车轮毂材料, 生产中更多的选用铝合金。镁合金具有密度低(约为铝合金的2/3)、比强度和比刚度高、铸造和切削加工性能好、热稳定性高、阻尼降噪等优点, 也可作为轮毂材料<sup>[1]</sup>。目前用于镁合金的铸造工艺有重力铸造、压力铸造、挤压铸造以及低压铸造等。其中低压铸造作为镁合金的主要成形方法之一, 利用其平稳的充型和顺序凝固特点可以生产出优质的镁合金铸件。但镁合金汽车轮毂的低压铸造工艺仍有待深入研究和改进, 尚未普及应用。随着计算机技术的发展, 数值模拟技术被广泛地用于铸造工艺的开发和优化, 通过对铸件的铸造过程进行模拟, 可以有效预测铸件中产生的气孔、缩松、缩孔及夹渣等缺陷, 进而缩短产品工艺开发的周期, 降低生产成本<sup>[2]</sup>。目前, 国内外学者已开发了多种用于铸造工艺数值模拟的软件, 其中在我国较有影响的主要是ProCast、Magma、FtStar和华铸CAE<sup>[3]</sup>。

本文通过文献研究, 介绍几种用于镁合金汽车轮毂的铸造工艺与低压铸造工艺发展及数值模拟研究现状, 并对镁合金轮毂低压铸造技术提出了展望。

## 1 镁合金汽车轮毂铸造工艺

### 1.1 重力铸造

重力铸造, 是指熔融金属在自身重力的作用下注入型腔的工艺。采用该工艺生产镁合金汽车轮毂时, 由于材料的密度较小, 自身重力难以保证获得高强度, 因此, 在浇注时需使用更多的熔融镁合金, 进而造成相当大一部分金属浪费, 工艺成本较高。蔡锁岐等<sup>[4]</sup>采用金属型重力铸造方法试制成满足用户要求的AM60B镁合金车轮铸件, 但其工艺出品率仅为65%。

### 1.2 压力铸造

传统的压力铸造工艺, 简称压铸, 首先是将熔融金属注入压射缸内, 然后通过柱塞对其施加高压(一般为30~70 MPa), 使其在高压作用下充型和凝固, 并在保压一定时间后再开模, 顶出铸件。利用该工艺生产镁合金轮毂时, 由于高压充型, 型腔内气体以及由压铸涂料产生的气体将滞留在铸件内, 形成许多弥散分布的气孔, 所以不能对铸件进行热处理强化<sup>[5]</sup>, 且其伸长率低, 使用可靠性差。意大利的菲亚特

作者简介:

郭俊卿(1973-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为金属精密塑性成形理论与工艺。电话: 13838888610, E-mail: hkdqj@163.com

中图分类号: TG249.2  
文献标识码: A  
文章编号: 1001-4977(2021)06-0639-07

基金项目:

国家自然科学基金(51905156); 河南省高等学校重点科研资助项目(20A46001490)。

收稿日期:

2020-12-28 收到初稿,  
2021-03-29 收到修订稿。

汽车公司和美国的道屋 (DOW) 公司合作, 生产出了可满足使用要求AM60A镁合金压铸车轮; 美国通用汽车公司制备了压铸AM60B镁合金车轮, 其抗拉强度达到240~270 MPa, 屈服强度为120~150 MPa, 伸长率为4%~8%<sup>[6]</sup>。

针对传统压铸工艺的气孔残留和铸件不能进行热处理强化的问题, 对该工艺改进后得到了真空压铸和充氧压铸工艺。真空压铸, 如Gibbs真空辅助垂直压铸工艺, 首先是提前将型腔以及进料管中的气体抽出, 并借助真空将熔融金属吸入注射筒, 当达到工件所需的熔融金属量时, 通过柱塞的第一次运动而切断注射筒和进料管之间的金属流, 然后通过柱塞的再次运动将熔融金属注入型腔, 然后对凝固中的金属施加高压, 同时保持真空, 适当停留后开模弹出工件<sup>[7]</sup>。该工艺的真空环境可以消除或显著减少铸件内的气孔, 并提高其力学性能和表面质量, 但抽真空设备的增加使设备投资比较大。而充氧压铸, 是在充型前用氧气或其他活性气体置换型腔内的空气, 使之在充型时与金属液反应生成金属氧化物, 并弥散分布在压铸件内, 从而消除压铸件内的气孔, 使压铸件可热处理强化。但需附加充氧控制装置, 这既增加了铸造工艺周期, 又增加了成本。

### 1.3 挤压铸造

挤压铸造, 又分为直接挤压铸造和间接挤压铸造。二者均是在相对较低的流速下将金属液注入型腔, 然后闭模并在高压下凝固。

直接挤压铸造也称液态模锻 (图1)<sup>[8]</sup>, 一般在立式机器上进行, 该工艺首先是将熔融镁合金注入型腔, 然后闭模, 并通过上模持续施加机械静压力, 使镁液在高压下凝固, 且已凝固的壳层会由于锻造作用而产生微小的塑性变形, 这将极大地减少铸件中的疏松和气孔缺陷, 提高铸件的致密度和力学性能。

间接挤压铸造类似于传统的高压压铸, 使用立式或卧式机器。该工艺中, 是先将熔融镁合金转移到压射缸内, 然后通过一个较大的浇口以相对较低的速度

将镁液注入型腔, 然后通过柱塞间接地对熔融镁合金施加压力, 使其在高压下凝固<sup>[6]</sup>。间接挤压铸造和传统压铸的金属流动情况对比如图2所示<sup>[8]</sup>, 间接挤压铸造较低的注射速度使熔融镁合金前沿在型腔中平面推进, 从而避免了卷气。

### 1.4 低压铸造

低压铸造是熔融金属在较低气体压力作用下自下而上充型, 然后在压力下凝固以获得铸件的一种成形方法, 如传统的置顶式气压低压铸造、真空低压消失模铸造以及电磁低压铸造等。

传统的置顶式气压低压铸造工艺原理如图3所示<sup>[9]</sup>。该工艺是通过向密封坩埚内通入0.009 8~0.049 MPa的压缩空气, 气体压力逐渐增加, 使金属液在较低压力下沿升液管自下而上缓慢充型, 待充型结束后停止加压, 并保压至铸件完全凝固, 然后卸压使多余的金属液流回坩埚, 接着开模顶出铸件。该工艺的低压低速充型使液面平稳, 可减少因金属液冲击飞溅而引起的氧化夹杂; 在压力下充型有利于提高铸件致密性, 并生产薄壁铸件; 另外, 浇冒口系统简单, 金属利用率可达80%以上<sup>[10]</sup>。

真空低压消失模铸造技术是一种将低压铸造和真空消失模铸造结合在一起的新型铸造方法, 该技术主要应用于比较复杂的镁合金零件的液态成形, 且获得的铸件精度较高, 尤其是它解决了重力消失模中铸件易出现的浇不足以及冷隔等问题。华中科技大学将反重力的低压铸造与真空消失模铸造有机地结合起来, 应用于Mg (Al) 合金的液态精密成形, 开发出了一种新的Mg (Al) 合金真空低压消失模铸造方法及其设备<sup>[11]</sup>。

电磁低压铸造技术是一种生产效率高、近无余量精确成形的方法。图4为电磁泵低压铸造工艺的示意图<sup>[12]</sup>。该工艺首先是将金属液注入保温炉, 当达到浇注温度时, 通过给金属液通以电流, 使之在磁场中受到洛伦兹力的作用而沿升液管向上定向移动, 同时可以根据铸件不同截面处体积的不同利用计算机精确控

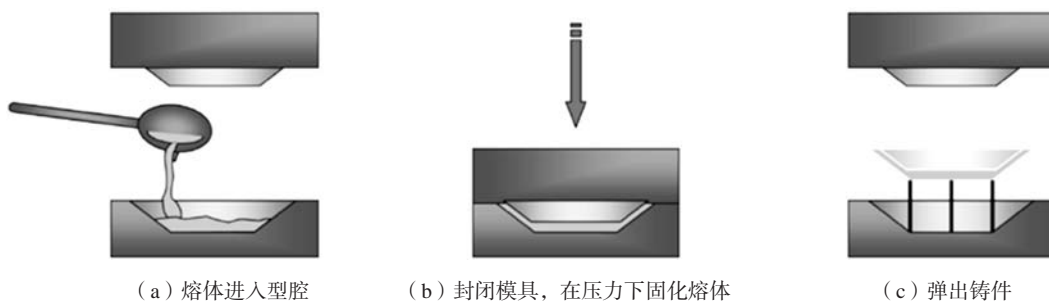
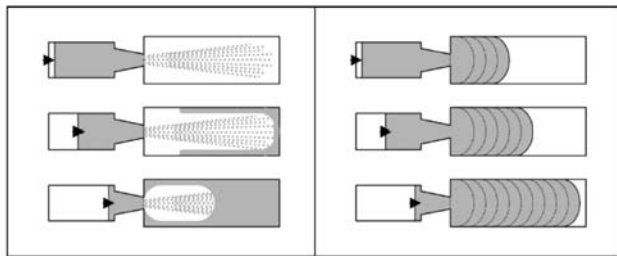


图1 直接挤压铸造工艺操作示意图

Fig. 1 Schematic illustrating direct squeeze casting process operations

制金属液的流量，从而实现平稳充型。当充型结束，经过一定的结壳时间，再进行升压保压，以确保铸件质量。



(a) 传统压铸 (b) 间接挤压铸造

图2 金属流动示意图

Fig. 2 Schematic illustrating metal flow

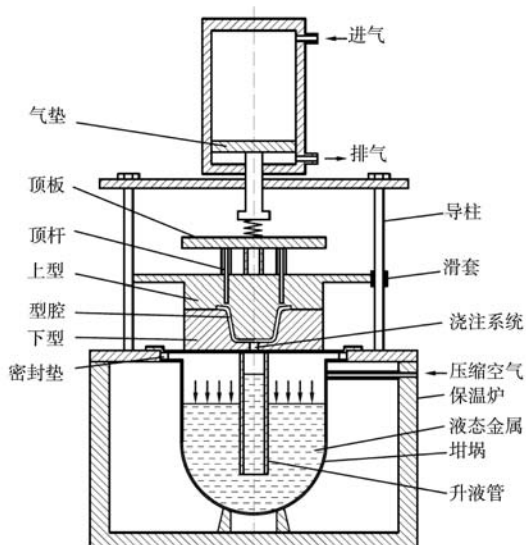


图3 传统置顶式气压低压铸造原理图

Fig. 3 Principle schematic diagram of traditional top-located low-pressure casting

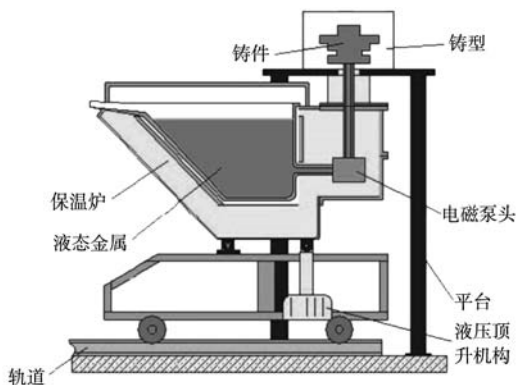


图4 电磁泵低压铸造工艺示意图

Fig. 4 Schematic diagram of electromagnetic pump low pressure casting process

## 2 低压铸造的发展历程

早在1910年，英国人E.F.Lake和A.L.J.Queneau便提出了低压铸造技术，且Lake于1911年发明了巴氏合金铸造用设备的专利<sup>[13]</sup>。国际上低压铸造的发展大致历经三个阶段。①试验阶段（1910-1945年），法国于1920年首先将低压铸造用于铝合金生产，英国于1937年通过采用惰性气体将该技术应用于镁合金，此阶段由于生产率低，设备存在较多问题，且铝合金应用较少，所以低压铸造技术并未得到实际应用。②应用于实际阶段（第二次世界大战结束至20世纪50年代末），低压铸造技术虽逐渐应用于实际生产，但并未得到普遍应用。1950年以后，由于汽车工业的发展，汽车轮毂等零部件需求量较大，且适于低压铸造，因此极大地促进了低压铸造技术的发展。20世纪50年代中期，美国采用低压铸造技术先后制备了采煤车轮芯、卡车轮毂等零部件<sup>[14]</sup>。至1960年，全世界使用低压铸造法进行生产的企业只有七八家，且主要集中在美国、英国和西德。而低压铸造机也仅有大约30台，且其中多数结构简单。③大发展阶段（20世纪60年代以后），此阶段世界各国深入研究了低压铸造技术的基本原理，并改进了低压铸造设备，同时也不断完善低压铸造工艺，进一步扩大了该技术的应用范围，现已广泛应用于各种机械产业及汽车、航空、航天领域。20世纪80年代中期，美、英、法等欧美国家加快发展低压铸造技术。20世纪80年代末期，日本开发出了一种用于镁合金铸造的先进金属型低压铸造设备，其包括熔炼炉、铸造炉和压铸机三个部分。丰田汽车公司采用压铸工艺制造了镁合金汽车轮毂等零部件<sup>[15]</sup>。国外汽车轮毂行业在20世纪70年代开始快速发展，铸铝轮毂的市场占有率在1981年仅有4%，但到2000年便扩大到60%，至此，低压铸造法成为国际上铸铝轮毂的主要生产方法<sup>[16-17]</sup>。目前，国际上轮毂行业正致力于镁合金轮毂新材料、新工艺的开发研究。

## 3 汽车轮毂低压铸造工艺的研究现状

我国对低压铸造工艺的研究始于20世纪50年代，其后发展一直较缓慢。但随着航空航天和汽车工业的发展以及大量新技术的应用，在2000年前后，低压铸造得到了快速发展，国产低压铸造机的功能和性能已逐步追上国际先进水平，并大量用于生产汽车轮毂以及发动机缸盖等铸件。

目前，铝合金由于其优异的铸造性、耐腐蚀性以及高的比强度而广泛应用于工业生产中。针对大尺寸低压铸造A356铝合金轮毂轮辋缩松、漏气，以及90°冲击试验不合格等问题，代颖辉<sup>[18]</sup>通过改进轮辋型腔



结构实现了顺序凝固，并通过在侧模增设冷却风盒提高了轮辋力学性能。针对A356.2低压铸造铝合金车轮表面的针孔缺陷，薛喜伟等<sup>[19]</sup>通过对样品进行化学成分及力学性能检测、OM和SEM表征，发现铸件表面的针孔是凝固时未及时逸出的氢气所形成的缩松；另外，通过合理调整冷却风孔对针孔位置进行强冷，明显改善了针孔缺陷。刘洋等<sup>[20]</sup>采用多种表征手段对低压铸造铝合金轮毂轮辋上缘处的缺陷进行了分析，发现缺陷主要是包含夹杂的圆整孔洞以及由针状 $\beta$ -Fe相引起的狭长状缩孔缩松，并提出选用高质量铝液、合理设置浇冒口等改善措施。

在汽车轻量化及节能减排的大趋势下，现代材料更要求其轻质、高强度的特性。相比于铝合金，镁合金质量更轻，更有利于汽车的减重，改善汽车的加速性能。另外，在其他条件相同时，使镁合金轮毂壁厚增至铝合金轮毂的1.17倍，即可获得与铝轮毂相同的刚度，而其质量也仅为铝轮毂的78%<sup>[21]</sup>，因此可以在对轮毂重量影响较小的情况下，通过适当增加壁厚来提高镁合金轮毂的刚度，使其即使在遇到障碍物冲击时也能较好地保持原形，从而提高轮胎的使用寿命。另外，新能源汽车已成为当前汽车工业的发展方向，路况实验表明，用同尺寸的镁合金轮毂替换新能源汽车的铝合金轮毂，将使其续航能力提高8%以上<sup>[22]</sup>。基于这些特点，镁合金材料便凸显出其在工业领域的优势。镁合金的低压铸造工艺也被广大学者争相研究。

何庆彪<sup>[23]</sup>等分析了航天器复杂薄壁镁合金低压铸造的成形特点，并在此基础上提出综合重力铸造和低压浇注的优点，通过适当降低充型速度及压力来改善铸型的排气能力，进而提高航天器复杂薄壁镁合金铸件的内部质量。为提高中型镁合金铸件的尺寸精度，陈广森等<sup>[24]</sup>提出采用陶瓷型低压铸造工艺进行生产。对于镁合金汽车轮毂，上海交通大学基于前期的低压

铸造技术，开发出铸造+旋压复合成形技术。与单纯的低压铸造成形技术相比，该技术能显著提高铸坯成品率。图5为使用该技术制备的镁合金汽车轮毂，其轮辋部分旋压前屈服强度、抗拉强度、伸长率分别为85 MPa、138 MPa、4.8%，旋压后屈服强度、抗拉强度、伸长率分别为278 MPa、317 MPa、8.4%，在经旋压变形后组织明显细化，室温力学性能明显提升<sup>[22]</sup>。

#### 4 汽车轮毂低压铸造数值模拟现状

随着计算机技术的飞速发展，多种铸造模拟软件相继出现，并被用于分析构件在铸造过程中可能出现的各种缺陷，进而采取相应措施加以改进。对于汽车轮毂来说，常见的铸造缺陷主要是缩孔、缩松，且往往出现于轮辐与轮辋相连接的肋、轮辐与轮辋连接处、轮辋壁厚尺寸梯度较大处、轮毂中心等处。这些部位要么是热集中区，容易形成热节，要么是因壁厚突变而无法保证顺序凝固，从而使对应部位的凝固落后于周边区域，无法充分得到液态金属的补缩，并最终形成缩松、缩孔等缺陷。此外，如果轮辐上带有凹槽，则在其中部可能由于无法保证金属液的平稳填充而发生卷气，并最终形成气孔。这些缺陷的产生严重影响着轮毂的质量，且与工艺参数及轮毂本身结构密切相关，如果通过实际试验来优化轮毂结构和工艺参数，将浪费大量的人力、物力以及时间，而通过铸造模拟软件来模拟轮毂的铸造过程，可以准确地预测出缺陷可能产生的部位，并在分析其产生原因后，可以便捷地对工艺参数或者轮毂结构进行相应修改，而后再次模拟，直到得出最佳工艺。基于数值模拟的优势，目前，广大材料工作者已利用铸造模拟软件对其低压铸造充型和凝固过程进行了大量的模拟，这为轮毂低压铸造工艺的优化提供了一定的工艺指导。

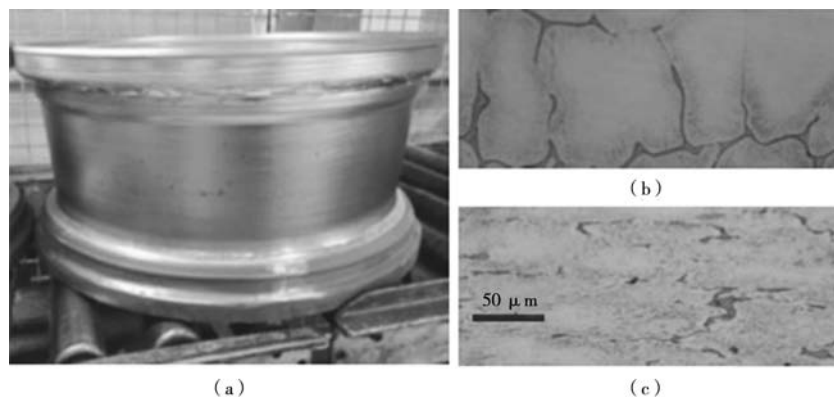


图5 JDM1镁合金铸旋成形汽车轮毂(a)、旋压前显微组织(b)和旋压后显微组织(c)

Fig. 5 JDM1 magnesium alloy automobile wheel formed by casting and spinning (a), microstructure before spinning (b) and microstructure after spinning (c)

Dashan Sui等<sup>[25]</sup>利用Magma铸造模拟软件模拟了铝合金轮毂的低压铸造过程,通过分析轮辐连接处等易产生缺陷位置的凝固时间,确定了合理的冷却和保温措施,在铸件壁厚较薄位置进行适当保温以延长该处冷却时间,从而优化工艺,减少缩孔、缩松。针对大型铝合金轮毂低压铸造的热节问题,赵岩等<sup>[26]</sup>通过模拟其凝固过程,发现降低模具初始温度和减小模具壁厚并不能明显消除“孤立熔池”,而通过在相应位置增设水冷管则效果显著。田晓生等<sup>[27]</sup>使用ProCast模拟了A356铝合金轮毂的低压铸造充型及凝固过程,并采用该软件自带的Niyama判据<sup>[28]</sup>对铸件中可能出现缩孔缩松缺陷进行预测,最后通过合理设计水冷管道加以优化。

相比铝合金轮毂,目前镁合金轮毂的低压铸造工艺仍不成熟,铸件存在各种铸造缺陷,而且由于镁合金和铝合金的性能差异,生产铝合金轮毂的铸型并不适用于镁合金,因此,对于低压铸造镁合金轮毂,通过对其工艺过程进行数值模拟来优化工艺参数和模具结构仍是不可或缺的。

金鑫焱等<sup>[29]</sup>利用清华大学自行开发的FDM/FEM集成应力分析系统,研究了AM60B镁合金轮毂低压铸造过程中的温度场和应力场,发现应力集中部位与实际轮毂裂纹位置基本符合,经分析后提出针对轮辐与轮辋或轮辋连接处等应力集中部位,应改变铸件结构或加强模具冷却,另外,还可以通过提升镁合金本身的抗热裂性能来改善铸件质量。

张华<sup>[30]</sup>等基于AnyCasting铸造模拟软件分析了AZ91D镁合金汽车轮毂的充型和凝固过程,得出轮芯上处于流道中间位置的沉孔或凹坑易导致充填不平稳而发生卷气。另外,轮辋上边缘由于壁厚尺寸梯度过大而无法得到镁液的充分补缩,形成缩孔、缩松。针对这些缺陷,通过对轮毂的工艺结构进行优化,提高了铸件质量。

为预测镁合金轮毂低压铸造过程中可能产生的缺陷,邱克强等<sup>[31]</sup>利用ProCast模拟软件对镁合金轮毂的充型和凝固过程进行模拟分析,发现适当降低加压速度可以有效减少因镁液充型不平稳而产生的缩孔、缩松及氧化夹杂缺陷;另外,对于轮辐与轮辋连接处外沿的热节,可以通过在轮芯上部放置冷铁,使热节因激冷作用而消除,进而改善铸件质量。

朱阳<sup>[32]</sup>利用专业铸造模拟分析软件,模拟了AZ91D镁合金汽车轮毂的充型和凝固过程,通过研究其温度场分布,发现轮毂中心部位可能产生的缩松并不能仅靠调节充型速度而消除;此外,通过在上模轮芯处增加局部冷却水道(图6)来改善凝固顺序后,铸件质量明显优化。

崔乐等<sup>[33]</sup>利用ProCast软件,模拟了汽车轮毂铸件的充型和凝固过程,并经多次优化,确定了最终AZ91D镁合金轮毂的工艺方案为:浇注系统为底注式的雨淋式浇注、补缩系统冒口为5个,可获得无缺陷和少缺陷的汽车轮毂铸件。

张晨等<sup>[34]</sup>用ProCast软件模拟了AZ91D镁合金轮毂低压铸造成形的充型和凝固过程,并以浇注温度和填充压力为设计变量,收缩孔隙率和二次枝晶臂间距为目标变量,开发了基于SiPESC的自动多目标优化程序,以获得最小收缩孔隙率和二次枝晶臂间距,从而确定AZ91D镁合金轮毂低压铸造过程的最佳工艺参数组合为:浇注温度689℃,填充压力6.5 kPa。在该最优参数组合下,收缩孔隙率的预测值从4.1%降低到2.1%,二次枝晶臂间距从88.5 μm减至81.2 μm。

综上所述,对于镁合金汽车轮毂的低压铸造来说,其铸造过程中可能出现的各种缺陷,可以从工艺参数、轮毂结构、模具结构以及镁合金材料本身的性能等多方面进行解决。如针对轮辐与轮辋或轮辋连接处等应力集中部位易产生裂纹的问题,可以通过优化轮毂结构、加强模具冷却或者提高轮毂材料的抗热裂性能来改善。对于轮辋、轮辐及轮芯处的热节,可以对模具相应位置采取放置冷铁或增设局部冷却水道、风冷管道等局部激冷措施或者对轮毂本身结构进行优化;另外,对于轮辋上的热节,还可以通过对轮辋壁厚较薄处进行适当的保温,从而保证轮辋整体上顺序凝固。针对轮辐及轮芯上的凹坑易发生卷气的问题,可以对凹坑尺寸进行合理的调整。最后,充型过程中的氧化夹杂缺陷可以通过降低充型速度而得到改善。此外,数值模拟软件的使用可以准确地预测可能出现的铸造缺陷,节省实际试验的成本和时间,这将极大地加快铸造工艺开发进程,进而促进镁合金汽车轮毂低压铸造工艺的发展。

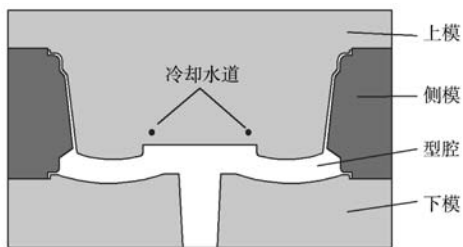


图6 增加冷却水道后的模具

Fig. 6 Casting mould after cooling pipe added

## 5 展望

近年来,世界各国均提倡节能减排,在此趋势下,随着市场需求的不断提升和技术的发展,镁合金

材料将在更多领域替代铝合金。相比锻造成形，铸造可以极大地降低生产成本。但对于铸造镁合金来说，其成形较困难，铸造缺陷多，强度难以保证且易腐蚀，因此，今后低压铸造镁合金轮毂的发展仍需从多方面考虑：

(1) 镁合金汽车轮毂的低压铸造技术仍不成熟，铸件往往存在严重的铸造缺陷，且防氧化保护致使工艺繁杂。后续应进一步开发适用于镁合金轮毂的低压铸造新工艺。

(2) 真空低压消失模铸造虽然可以有效消除氧化，但镁合金充型能力较差，易出现缩孔、缩松、夹渣等缺陷，且铸件组织一般较粗大，性能难以满足要

求。另外，设备结构复杂且投资大。应继续优化真空低压消失模铸造工艺，简化设备结构，以便获得高性能铸件并充分发挥低压铸造的低成本优势。

(3) 目前，对于镁合金汽车轮毂低压铸造工艺的优化已普遍与计算机数值模拟相结合，但对于低压铸造充型规律、充型性能与工艺参数之间的关系，以及充型临界壁厚等尚未进行系统的研究，后续应加大重视。

(4) 镁合金本身的性能严重影响着最终铸件的质量，因此，开发适合低压铸造的低成本、高性能镁合金材料也是发展方向之一。

#### 参考文献：

- [1] 侯立群, 范云波, 乔小蒙, 等. 镁合金轮毂铸造工艺分析及低压铸造模具设计 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (12): 1274-1276.
- [2] 荆涛. 凝固过程数值模拟 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [3] 李日. 铸造工艺仿真ProCast从入门到精通 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [4] 蔡锁岐, 崔尔信. 镁合金汽车车轮重力铸造研究 [J]. 铸造技术, 2001 (5): 8-10.
- [5] 刘正. 镁合金铸造成型最新研究进展 [J]. 中国材料进展, 2011, 30 (2): 10-15.
- [6] 郑顺奇. 镁合金轮毂模态分析与铸-挤复合成形技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [7] LUO A A. Magnesium casting technology for structural applications [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2013 (1): 2-22.
- [8] VINARCIK E J. High integrity die casting processes [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [9] 许豪劲. 连续式低压铸造技术的研究与开发 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [10] 宫克强. 特种铸造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [11] 樊自田, 吴和保, 张大付, 等. 镁合金真空低压消失模铸造新技术 [J]. 中国机械工程, 2004, 15 (16): 1493-1496.
- [12] 王忠. 镁合金低压铸造缩孔缩松预测技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2010.
- [13] 三岛德七. 近代铸造 [M]. 日本: 金属加工出版社, 1970.
- [14] DAHLE A K, LEE Y, NAVE M, et al. Development of the as-cast microstructure in magnesium-aluminium alloys [J]. Journal of Light Metals, 2001 (1): 61-72.
- [15] 李双寿, 金鑫炎, 唐靖林, 等. 铸造镁合金轮毂研究应用现状 [J]. 特种铸造及有色合金, 2005 (z1): 60-63.
- [16] 康敬乐, 丁苏沛, 孙剑飞, 等. 中国低压铸造装备技术的发展与展望 [J]. 中国铸造装备与技术, 2016 (4): 1-11.
- [17] 郑小秋, 谢世坤, 易荣喜, 等. 低压铸造技术: 发展历程、研究现状和未来趋势 [J]. 材料导报, 2016, 30 (7): 74-80, 85.
- [18] 代颖辉. 大直径宽轮辋低压铸造A356铝合金车轮轮辋缺陷及性能的改进 [J]. 铸造, 2016, 65 (9): 920-923.
- [19] 薛喜伟, 王贵. A356. 2低压铸造铝合金车轮表面针孔原因分析 [J]. 铝加工, 2016 (4): 31-35.
- [20] 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.
- [21] LUO A A. Materials comparison and potential application of magnesium in automobiles [C]//KAPLAN H I, HRYN J, CLOW B (eds). Magnesium technology 2000, USA.: The Minerals, Metals and Materials Society, 2000: 88-98.
- [22] 付彭怀, 彭立明, 丁文江. 汽车轻量化技术: 铝/镁合金及其成型技术发展动态 [J]. 中国工程科学, 2018, 20 (1): 84-90.
- [23] 何庆彪, 杜庆安, 李焱, 等. 航天器复杂薄壁镁合金铸件低压铸造工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30 (11): 977, 1033-1034.
- [24] 陈广森, 吴国华, 王迎新, 等. 镁合金陶瓷型低压铸造工艺及组织和性能 [J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29 (4): 346-348.
- [25] SUI D, CUI Z, WANG R, et al. Effect of cooling process on porosity in the aluminum alloy automotive wheel during low-pressure die casting [J]. International Journal of Metalcasting, 2016, 10 (1): 32-42.
- [26] 赵岩, 王玲娟, 李秀荣, 等. 低压铸造大尺寸铝合金轮毂的数值模拟及模具优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (6): 612-616.
- [27] 田晓生, 邓梦洁, 于慧, 等. 汽车轮毂用Al-Si合金低压铸造数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (7): 89-91, 97.
- [28] NIYAMA E, UCHIDA T, MORIKAWA M, et al. A Method of shrinkage prediction and its application to steel casting practice [J]. Journal of Japanese Foundry Engineering Society, 1982, 54 (8): 507-517.

- [29] 金鑫焱, 李双寿, 刘小刚, 等. 低压铸造镁合金轮毂温度场及应力场模拟 [J]. 兵器材料科学与工程, 2005 (2): 30-34.
- [30] 张华, 陈丰. 基于AnyCasting的镁合金轮毂低压铸造工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (19): 41-43.
- [31] 邱克强, 王磊, 刘彬, 等. 镁合金汽车轮毂低压铸造数值模拟 [J]. 铸造, 2011, 60 (12): 1214-1217, 1221.
- [32] 朱阳. 镁合金轮毂低压铸造数值模拟及缺陷预测 [J]. 铸造技术, 2011, 32 (5): 669-672.
- [33] 崔乐, 王黎晶, 李春, 等. 镁合金汽车轮毂的铸造工艺设计及模拟成形 [J]. 内燃机与配件, 2018 (19): 128-130.
- [34] ZHANG C, FU Y, WANG H, et al. Multi-objective optimization of process parameters during low-pressure die casting of AZ91D magnesium alloy wheel castings [J]. China Foundry, 2018, 15 (5): 327-332.

---

## Progress of Low-Pressure Casting Process for Magnesium Alloy Automobile Hubs

GUO Jun-qing<sup>1,2</sup>, FAN Cui-lin<sup>1,2</sup>, CHEN Fu-xiao<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials Science & Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China;  
2. Provincial and Ministerial Co-construction of Collaborative Innovation Center for Non-ferrous Metal new Materials and Advanced Processing Technology, Luoyang 471023, Henan, China)

### Abstract:

This paper conducts a literature study on the development history of low-pressure casting technologies at home and abroad, the current status of low-pressure casting process of magnesium and aluminum alloy automobile hubs, the cause and solution of defects in the production of low-pressure casting of automobile hubs and the current status of computer numerical simulation. Finally, the prospects for the low pressure casting process of magnesium alloy automobile hubs are put forward.

### Key words:

automobile hub; low pressure casting; magnesium alloy; numerical simulation

---