

铸旋铝合金车轮生产工艺研究进展

岳峰丽¹, 焉伟豪¹, 张孟泉^{2*}, 宋鸿武², 张士宏²

1. 沈阳理工大学汽车与交通学院, 沈阳 110159

2. 中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心, 沈阳 110016

摘要 综述了国内外铝合金车轮生产工艺研究现状, 阐述了铸旋铝合金车轮成形工艺的研究历程和最新进展。探索了旋压工艺在车轮成形方面的应用, 包括普通旋压和强力旋压, 冷旋和热旋。通过现阶段成形工艺发展趋势, 对铝合金车轮铸旋成形工艺的未来研究方向提出建议: 材料力学性能方面应提高合金的初始力学性能、保证可靠性等; 在毛坯设计方面, 应加大对有限元应用研究及对开口角度继续深入研究; 在工艺选择方面应在实际生产中对不同道次、不同数量旋轮的旋压进行研究等, 对模拟参数的设定应从热力耦合和模拟工艺更贴近实际工况等方面突破; 在对成品车轮的研究方面探索热处理的合理时间及分析损伤机理等。

关键词 铝合金车轮; 铸旋工艺; 有限元仿真; 成形工艺

汽车轻量化是在保证汽车整体性能不变甚至更佳的前提下尽可能地减少车身重量。减少车身重量是为了谋求一种低能耗、低噪音、高功率、操作性良好、可靠性较高的汽车产品。汽车轻量化的实现主要依靠2种方法: 一是改进汽车结构; 二是开发新型材料。在汽车的结构设计方面已经较为完善而在短期内难以取得较大突破的背景下, 采用新型材料以达到轻量化、环保化等要求势在必行^[1]。有研究表明, 通过对汽车各个模块进行结构优化可以降低汽车整体质量的7%左右, 而通过使用轻型

材料可以在保证实用性的前提下减低整车质量的30%^[2]。随着原料价格的降低、成型技术的提升、防腐工艺的进步, 通过使用轻型材料实现汽车轻量化已具有较高可行性。车轮约占整车重量的10%, 故轻合金车轮已是实现汽车轻量化的重要研究方向^[3]。同时, 在年轻人不断追求运动感的审美潮流下, 轻合金车轮的年轻感、时尚感也是企业效益的重要保障^[4]。铝合金密度小而质量轻, 强度可与优质钢相媲美, 且塑性好, 可加工各种型材^[5], 相比于传统钢铁材料, 采用铝合金材料可使车轮减重

收稿日期: 2022-06-21; 修回日期: 2022-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52201148)

作者简介: 岳峰丽, 副教授, 研究方向为汽车现代设计与制造技术, 电子信箱: flyue@163.com; 张孟泉(通信作者), 助理研究员, 电子信箱: mx-zhang@imr.ac.cn

引用格式: 岳峰丽, 焉伟豪, 张孟泉, 等. 铸旋铝合金车轮生产工艺研究进展[J]. 科技导报, 2024, 42(3): 123-136; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.03.011

30%~45%，进而使燃油利用率大幅度提高，所以铝合金车轮在对油耗有较高要求的家用汽车领域正逐步取代钢制车轮成为更优选择^[6]。目前，铝合金车轮主要使用铸造法、锻造法及时兴的旋压法加工成形。以下综述铝合金车轮成形工艺的研究历程和最新进展，重点介绍旋压法成形车轮的工艺，讨论旋压工艺在铝合金车轮成形方面应用的多种可能性。

1 铝合金车轮传统成形工艺概况

铸造和模锻(锻造)是铝合金车轮制造中广泛应用的传统加工方法。铸造法的原理是在氩气等稀有气体的压强下，把熔融的金属液体压入型腔使其凝固成型。模锻法是用压力机将坯料在模具中锻造成型，成本高但其生产的车轮机械性能优良，多用于高端车^[7]。

1.1 铸造法成形

铸造是铝合金车轮主要生产工艺之一，主要包括低压铸造、反压铸造、挤压铸造等^[8]。优势是成

本低、应用广泛、可加工形状复杂的零件(挤压铸造较差)。

1.1.1 低压铸造

低压铸造的工作原理(简易)如图1、图2所示^[7]，在密闭空间(保温炉)中，通过对铝合金液态表面的干燥气体施加压力以使容器与型腔产生压力差，在低压作用下，合金液沿着升液管上升，最后加压充满型腔后保持一段时间使其凝固结晶，待铸件冷却到固相线以下时，放掉气体，工作完成后模具升起，此为低压铸造成形^[9]。

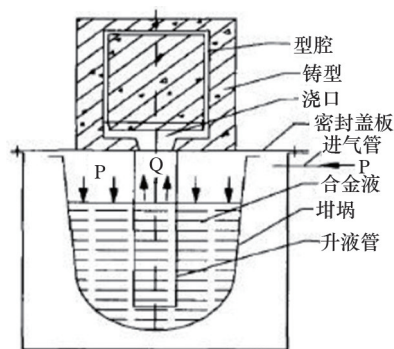


图1 低压铸造原理

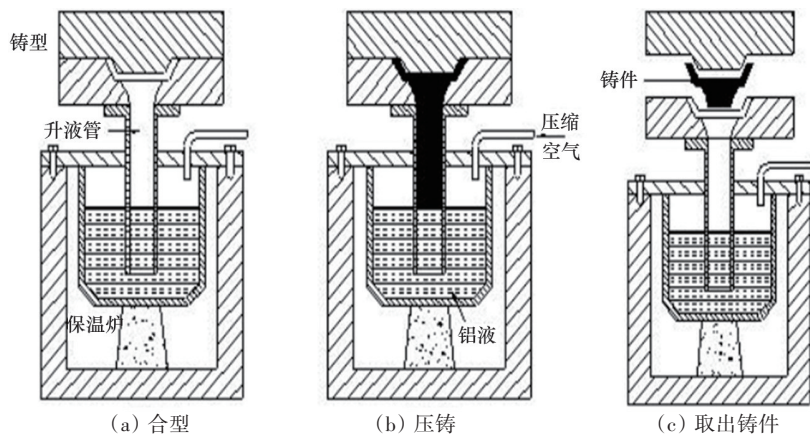


图2 低压铸造原理

文献[10]总结了当今低压铸造铝合金车轮的研究现状，提出自动化和智能化生产低压铸造车轮能降低成本、提高效率，并指出有限元模拟的深入研究和部分稀土元素对合金的强化开发都是未来低压铸造车轮的重点研究方向。

低压铸造的优势在于自动化程度高、操作简

便，对铸型的要求低且应用广泛，但其生产周期长且由于凝固速度慢，容易产生缩孔等缺陷。文献[11]研究了不同T6热处理工艺对合金性能的影响，通过疲劳实验发现车轮易疲劳断裂位置的断裂机理，并得出易疲劳位置的组织不均与金属间化合物为影响其疲劳性能的主要原因，故考虑通过改善冷

却系统或圆角的不良形状来解决。文献[12]针对低压铸造车轮在热节处产生的缩松、缩孔问题,采用ProCAST软件模拟了充型和凝固过程的温度场分布规律,发现凝固过程中由于轮辐和轮辋交接处壁厚较厚,车轮不能从上到下顺序凝固。其采用在上模对应热节处设置水冷管的优化方案,使交接处的冷却速度加快(图3)。该优化方案避免了缺陷的产生,且强制冷却也缩短了生产周期,提高了生产效率。

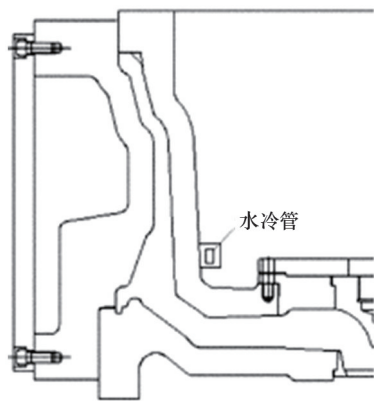


图3 热节处优化方案

故通过工艺的改进减少铸造缺陷,实现缺陷控制是目前提高低压铸造车轮性能的重要方向。此外,铸造车轮缺少一个精度良好的疲劳寿命预测模型,开展车轮用铝合金疲劳性能研究,尤其结合铸造缺陷,建立其与疲劳之间的定量关系具有极高的理论与实用价值,并对指导工艺的优化,提高产品质量,缩短生产周期具有重要意义。

1.1.2 反压铸造

反压铸造是在低压铸造基础上发展起来的较为先进的铸造方法,它的标准定义为^[13]:在反压铸造铸型的外罩上外加密封罩,在向坩埚内通入压缩空气的同时也向密封罩内不间断地通入压缩空气,使得坩埚内压强大小高于罩内压强,这时坩埚内的熔融金属液体在压力差的作用下,经过升液管从铸型的底部逐渐注入到铸型的型腔中来,这种利用气体的压强使金属熔融液体达到凝固结晶的铸造过程即为反压铸造技术。反压铸造可分为低反压铸造、中反压铸造和高反压铸造。其中高反压模铸

(HCM)可达到接近锻造的效果,德国BBS公司的RX/RV系列的铝合金车轮就是用高反压模铸法制造的^[14]。该技术得到的铸件相较低压铸造组织更为致密。但成本高昂,企业利润低,故难以普及。

文献[15]通过对A356.2铝合金的反压铸造试验,验证了反压铸造技术在特定压力下,能提高氢离子在铝液中的溶解度,以减少其析出形成的针孔缺陷。且压力场提高铸件和型腔的密着效果,使铸件的结晶组织更细,提高了材料的力学性能。得出该工艺应用于载重汽车铝合金车轮成形的可能性。文献[16]通过对反压工艺制造的车轮用高强轻合金的金相显微镜(OM)及扫描电镜(SEM)观察、X射线衍射(XRD)分析、力学性能测试,发现与常规铸造相比,反压铸造制备的合金组织较细小,无明显的缩松、缩孔、裂纹等铸造缺陷。

可见,反压铸造的优势在于金属有更好的致密性和力学性能,其原因在于反压铸造虽然像低压铸造一样是依靠压力差使金属液沿升液管自下而上实现充型的,但其充型和凝固结晶过程自始至终都是在高压场包围下实现的(低压铸造一般为0.06~0.15 MPa,差压铸造一般为0.2~0.5 MPa),压力场的作用不仅有效提高了枝晶间的补缩效果,且明显提高了氢离子在铝液中的溶解度^[13]。文献[17]通过对不同超声功率和凝固压力下拉伸强度和伸长率的测试发现,在600 W超声波功率和350 kPa凝固压力的协同作用下,能获得铝合金最高的拉伸强度和延伸率,且凝固压力低于300 kPa时,超声功率对两项数据影响更明显,高于300 kPa时,凝固压力的影响更明显。为工艺的改进提供了方案。但其设备庞大,操作复杂^[15]是其难以普及的重要原因。目前主要突破方向是设备的简化和探索不同功率、压强下材料性能的优化。

1.1.3 挤压铸造

挤压铸造是一种介于铸造和锻造之间的加工工艺,又称液态模锻。其工艺流程为铝合金液在高压下结晶,并在结晶过程中产生一定变形,可消除缩孔、缩松等铸造缺陷^[18],其成形产品性能可与锻造媲美而成本又与铸造相仿。其铸造模具如图4^[19]所示。

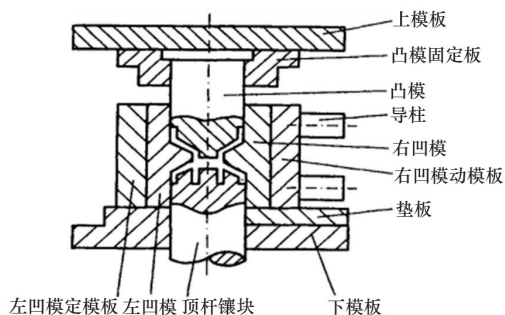


图4 车轮挤压铸造模具

其工作过程是定量合金液浇入型槽后,固定在活动横梁上的凹模以一定速度向下挤入型腔,压力达一定数值后保压,铝合金凝固后卸压。凸模通过工作缸的回程向上移动,顶杆镶块通过下顶缸从铸件内向下退出,直到全部脱离铸件之后,再用侧缸开启右凹模取出铸件。

文献[20]通过数值模拟预测了铝合金车轮挤压铸造时可能存在的缺陷(出现缩松、缩孔等),而后在此基础上对工艺进行改进,浇注系统改进并增加集渣槽,浇注方式改为从车轮中心外部开始浇注,同时冷却系统的开始延迟了10 s,且在轮辋均匀设置6个集渣槽,从而使铝液充型平稳,缺陷转移到了集渣槽,消除了原有缺陷,为挤压铸造车轮的工艺改进提供了参考。

挤压铸造虽融合了铸造和锻造工艺的优点,但对于结构复杂的产品,挤压铸造难以良好成形生产。目前,该工艺在国内主要用于生产摩托车车轮。故设法突破其在复杂形状产品成形方面的局限性,有利于该工艺的广泛应用。

综上,低压铸造成形车轮缺陷较多且缺乏精度良好的疲劳寿命预测模型,反压铸造的成本过高和挤压铸造的难以成形复杂形状产品的问题在短期内难以突破。

1.2 锻造法成形

锻造是利用锻压机械对铝合金坯料施加压力使其变形,以获得理想的尺寸、外形以及机械性能。锻造法主要包括铸造锻造法、半固态模锻法及常规锻造法3种方法^[21]。锻造车轮的力学性能、尺寸精度及性能再现性皆优于铸造车轮。只是工序复杂,成本高且国内发展迟缓,短时间内难以普及^[22]。

铸造锻造是依赖铸件作为坯料进行锻造,由于最终工艺是锻造,故产品组织致密,力学性能好,且由于使用铸件加工,省去了繁琐的成形部分,成本较纯锻造低。

半固态模锻是介于固态和液态成形的一种方法,是将具有非枝晶组织的半固态金属坯料经二次加热后,在预热的模具型腔内锻压成形,获得接近成品尺寸零件的工艺,其可改善材料微观组织,提高力学性能。文献[23]对半固态模锻的浇注温度进行了研究,经实验得出低过热度浇注法的合理浇注温度为635~655℃,其试样合适的二次加热工艺为600℃等温加热60~80 min。车轮经过T6热处理后,轮辋的屈服强度、抗拉强度和伸长率略小于轮辐,为半固态模锻成形车轮的性能改善提供了参考。

常规锻造法是指以挤压锭坯或铸造圆锭坯为坯料的一种工艺方法。常规锻造法分为热处理、热锻、机械加工及表面处理几个步骤,在检验合格后才能成为成品的车轮,运用常规锻造法生产的铝合金车轮具有强度高、韧性好、抗疲劳强度高特点。与铸造工艺相比较,常规锻造法还有抗腐蚀性强、尺寸精确、加工方便等优点,常规锻造法的缺点则是制造工艺复杂、生产成本较高,目前多用于高端车辆,不适于大批量生产,且其最大缺点是成品率低,且该工艺的应用与轮型有很大关系,部分轮型设计不适合锻造。

关于锻造,诸多研究人员从材料创新、工艺改善及缺陷分析等多个方面开展了相关研究。文献[24]通过研究不同回火温度和晶粒成分的添加对铝锂2195合金疲劳性能的影响,发现添加锂对疲劳寿命有所改善,为材料疲劳寿命的改善提供了参考。文献[25]利用DEFORM-3D对车轮锻件的工艺过程进行了模拟分析,提出并完成了半闭式预锻——开式终锻的模锻新工艺成形铝合金车轮,减少了飞边,节约了材料,为厂家生产提供了可操作性强的工艺改进措施。文献[26]对锻造铝合金的工艺过程进行了描述,指出锻造车轮有折叠、裂纹、锻件中心疏松等7大缺陷,并对缺陷检测方法做了分析总结,指出在质量缺陷的形成初期加以质量控制更有利于问题的解决。

综上,锻造铝合金车轮相比铸造车轮,其机械性能更为卓越,抗拉强度、屈服强度、韧性等力学性能均优于铸造车轮,且尺寸精准、缺陷少,但其成本较高,后期维护费用高,且国内锻造技术发展迟缓,在研究上未完全脱离国外技术,在探索优秀锻造技术路线方面任重道远。

目前,国内采用低压铸造技术生产的车轮缺陷较多,难以满足中高端市场的需要。反压和挤压铸造的技术难点短时间难以突破。锻造成形技术生产的车轮成本过高,工序复杂,难以满足中国人口基数大的需要。而通过旋压技术生产的铝合金车轮有性能良好、节约材料、美观大方等诸多优点,是时兴的生产工艺,有着广阔的发展前景和良好的发展势头。

2 铝合金车轮旋压成形工艺概况

2.1 旋压技术的介绍及分类

旋压技术起源于我国古代的制陶工艺^[27],是一种近净成形工艺,成形后少(无)切削^[28]。经过旋压后,合金的晶粒会被拉长,以 A356 铝合金为例,旋压后 α -Al 被明显拉长,共晶硅呈纤维状分布,再经过固溶处理等,合金的力学性能得到大幅提升。通过此方法成形的车轮质量可与锻造车轮相媲美而成本与铸造相仿,故旋压技术应用于车轮成形有广阔发展前景^[29]。

旋压技术由加工中毛坯厚度的不同可分为普通旋压和强力旋压^[30]。由旋压温度的不同又分为冷旋和热旋。

2.1.1 普通旋压和强力旋压

传统观点认为,普通旋压过程是依靠坯料沿圆周的收缩和沿半径方向的伸长来实现变形的,并不涉及毛坯厚度的变化^[31],主要分为拉深旋压、缩径旋压和扩径旋压 3 种^[32]。而强力旋压主要依靠坯料厚度减薄来成形,外径基本不变,主要分为流动旋压和剪切旋压 2 种。强力旋压和普通旋压的状态是相反的,前者是厚度变化而直径不变,后者是直径变化而厚度不变。

强力旋压大约是在 1950 年由普通旋压发展而

来,影响巨大。强力旋压相比普通旋压主要有 2 大优点:一是普通旋压难以控制,保证尺寸准确困难,强旋的尺寸控制较为方便;二是强旋时坯料不易变形,起皱现象少。车轮的强旋技术因此成为学者重点研究方向。轮辋经过旋压,力学性能大幅提高的同时节省了材料,且款式轻盈,深受大众喜爱。

2.1.2 冷旋和热旋

冷旋,即坯料本身不需要加热,在室温下进行旋压。热旋则是将坯料加热到一定温度后,在室温下进行旋压。热旋与冷旋相比有很大优势,以 A356 铝合金为例,在铸件常温受力时,其 α 相和共晶硅相界面的应力应变,易产生应力集中而导致微裂纹的产生,难以符合高强度高韧性的需求。为了提高合金的强韧性,文献[33]~[35]从铝合金熔体的细化、变质处理、复合材料增强、铸件热处理出发来改善合金的组织与性能,这些方向虽行之有效,但或耗费财力物力较大,或存在环保问题。

于是研究者考虑用高温塑性变形来解决强韧性问题,车轮的热旋压工艺应运而生。文献[36]通过铸造铝合金的等温热压缩试验,发现随着温度的升高,流动应力以接近线性的趋势降低,进而应力不易集中,强韧性变好。研究指出 A356 合金在温度范围为 300~450℃、应变速率为 0.1~50 s⁻¹ 时的热压缩变形的软化机制主要是动态回复,且建立了描述 A356 合金高速热变形行为的本构方程,为合金强韧化的研究提供参考,如图 5 为 A356 合金热压缩前后的典型显微组织。可以看到 α -Al 被拉长,共晶硅沿着变形方向呈流线形分布。

文献[37]通过水冷压铸制备 A356 铝合金,利用热压缩试验对合金进行热变形行为研究,分析了该合金的应力-应变曲线(图 6),建立了本构方程并绘制了热加工图(图 7)。结果表明,该合金的流变应力随着应变速率的增大和变形温度的降低而增加,合金热变形过程中的软化机制主要为动态回复,计算得到其平均热变形激活能为 238.6 kJ·mol⁻¹。通过热加工图和热压缩后合金的微观组织分析,发现在温度为 330~380℃和应变速率为 5~10 s⁻¹ 时该合金具有良好的热加工性能。文献[38]发现 2219 铝合金的流变应力随温度升高而降低,且验证了双曲

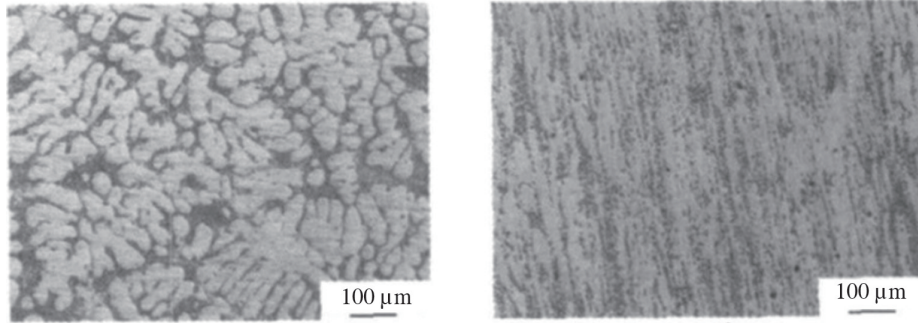


图5 A356合金热压缩前后的典型显微组织

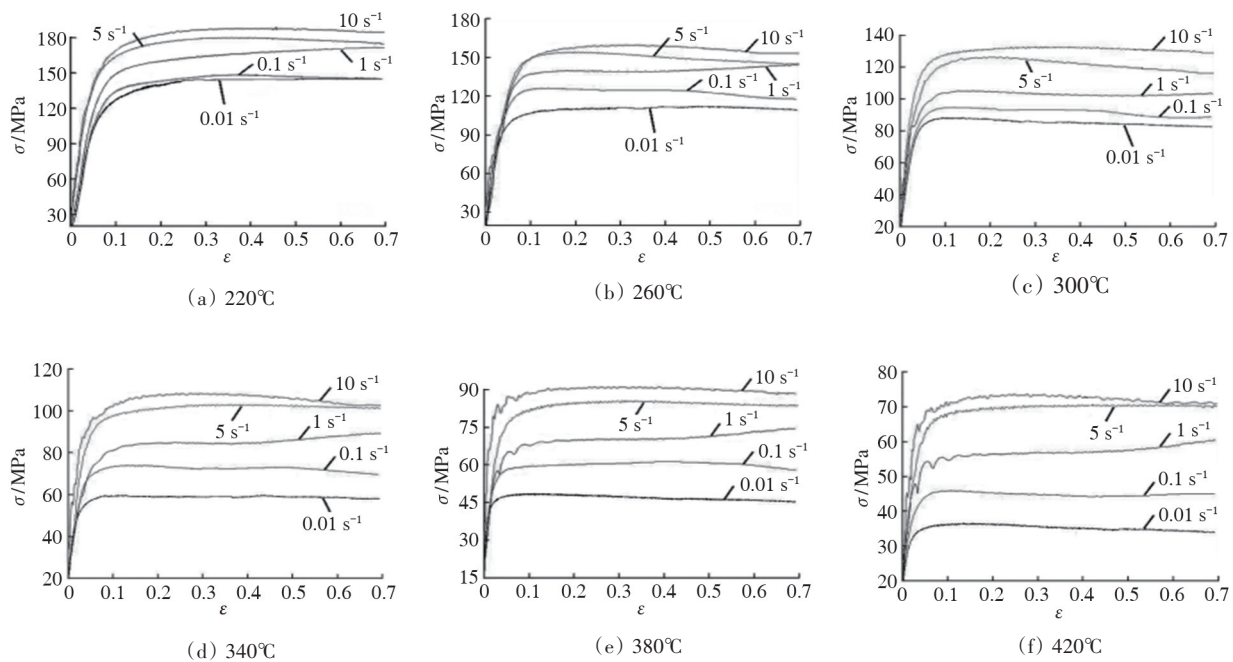


图6 不同温度下A356铝合金热变形的应力应变曲线

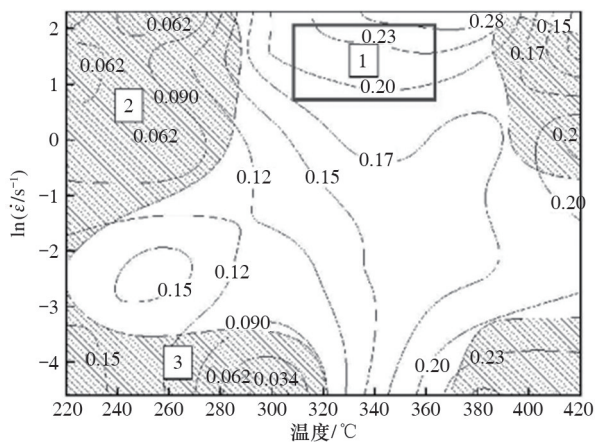


图7 A356铝合金在应变为0.7时的热加工图

正弦本构方程的准确度。热旋的可行性与优越性已得到广泛验证。

2.2 车轮铸旋工艺的研究现状

2.2.1 车轮铸旋工艺的由来

1997年,加藤和乔士的研究显示,其将过去研究的旋压加工法用于铸造车轮坯料的成形加工,已经达到了用于高强度四驱车的商品化阶段,由此拉开铸旋铝合金工艺应用于车轮成形的序幕。其工艺流程如图8^[39]所示。

该旋压加工法工艺的核心是将形状合理、性能良好的铸造坯料的轮辋部分进一步进行热旋压,以成形铝合金车轮,如图9所示为坯料旋压前后对比。

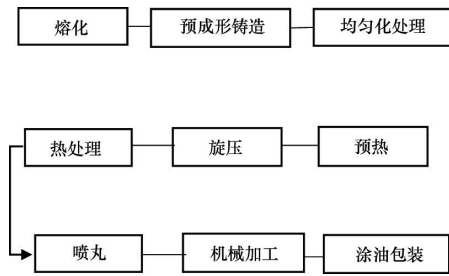


图8 铸旋车轮工艺流程



图9 旋压前后对比

与低压铸造相比,铸旋工艺生产车轮的优势体现在其进一步实现车轮的轻量化的同时,保证甚至提高了车轮轮辋部分的力学性能(表1^[40])。在满足车轮使用强度的情况下,轮辋的壁厚得到大幅度减薄(如图10^[40]为铸旋车轮和低压铸造车轮厚度对比)。相同规格的车轮,采用铸旋工艺生产可减重5%~15%,实现了高强度、轻量化,提高了产品竞争力^[40]。

表1 铸旋车轮与低压铸造车轮力学性能对比

车轮类型	抗拉强度/	屈服强度/	延伸率/%
	MPa	MPa	
铸旋车轮	290	200	10~12
低压铸造车轮	220	180	4~7

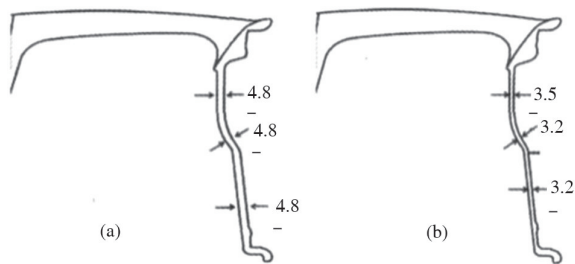


图10 铸旋车轮与低压铸造车轮厚度对比

关于中国旋压机械的研究,燕山大学一直处于国内领先地位。20世纪80年代燕山大学研制了我国第一台无胎冷旋旋压机,2006年,燕山大学开发车轮热旋旋压机并成功应用。2007年5月,国内第一条车轮铸旋生产线在戴卡投产。旋压设备主要有单旋轮成形、双旋轮成形、三旋轮成形等多种类型。旋压道次有三道次、四道次等多种工艺。图11所示是三旋轮成形车轮的旋压机械。

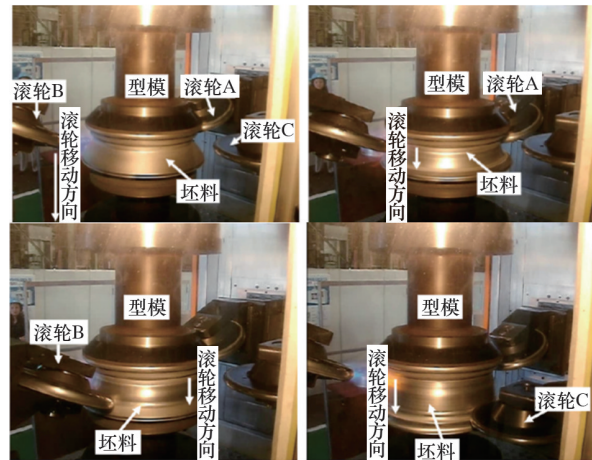


图11 三旋轮成形铝合金车轮

2.2.2 车轮铸旋工艺的试验研究进展

在实验研究方面,研究人员从提高合金初始性能、探究高温变形对合金塑性的影响、创新工艺以改善原有缺陷和对热旋压成形后的组织进行研究等多个方面不断探索和改进铸旋工艺在车轮成形方面应用的可行性和实用性。

在提高合金初始性能方面,文献[41]研究了不同含量混合稀土元素(RE)对A356合金组织及力学性能的影响。结果发现,混合RE变质A356合金后,合金组织中共晶硅由粗大的板片状变为细小颗粒状,且均匀分布于合金基体中,共晶硅得到很好细化。最佳变质含量为0.5%,此时铸态合金的抗拉强度和布氏硬度比未变质合金分别提高了12.5%和32.6%。图12为不同RE含量变质的A356铝合金凝固组织。文献[42]采用计算热力学和机器学习方法的组合确定A356合金中Sr的最佳添加量设计为0.005 wt.%,此外这种研究方法有助于了解Sr改性A356合金的强韧化机制,为实现该合金的强韧化提供了方法。

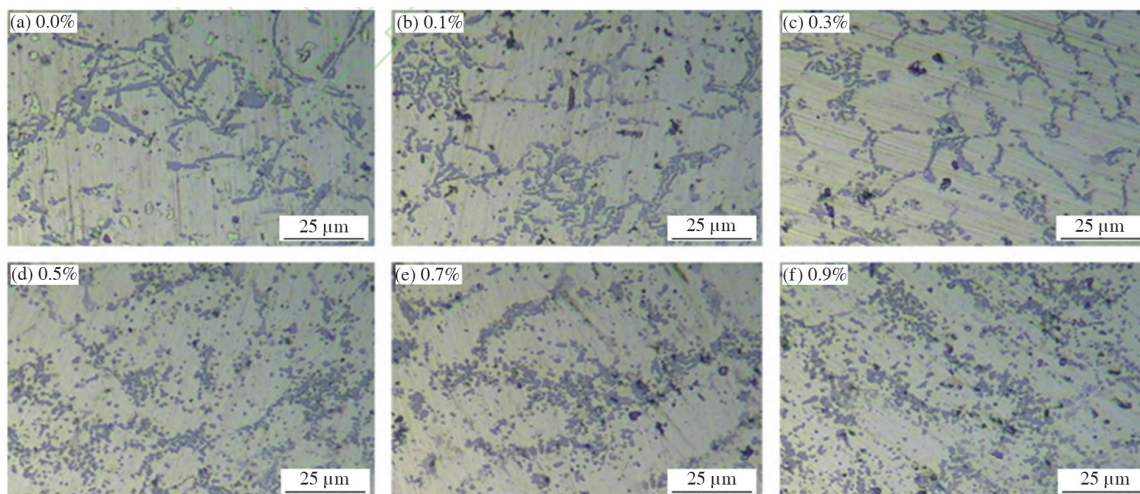


图12 不同RE含量变质的A356铝合金凝固组织

在探究高温变形对合金塑性的影响方面:文献[43]研究了变形、热处理温度和保温时间对Al-7Si-0.4Mg合金含Si共晶相形貌和尺寸分布的影响。结果表明,在适当的条件下,可以获得整个组织中共晶Si纤维破碎和球化的超细晶组织。且球化粒子发生团聚,并受奥斯特瓦尔德成熟机制控制。得出高温塑性应变可有效改善A356合金的力学性能,提高合金的韧性。文献[44]从A356铝合金车轮铸造坯料上制取拉伸试样,利用Instron 3369型实验机进行等温拉伸实验,实验温度为300~375℃,应变速率为0.001~0.1 s⁻¹。由此得到的真应力-真应变曲线表明,温度和应变速率等热力学条件对材料的流变应力的影响显著。基于真应力-真应变曲线,建立了基于位错密度理论的物理模型来表征不同热力学条件下的流变应力。将模型预测值与实验值进行对比,并进行误差分析。结果表明,所建立的物理模型能够较准确地预测A356铝合金的高温拉伸流变行为。有利于预测A356铝合金在高温变形后的流变行为。文献[45]通过A356铝合金的热压缩实验,发现随着变形温度的升高和应变速率的增加,α-Al的变形程度先增加后减弱,且利用修正Johnson-Cook本构模型和再结晶模型建立了可以准确描述A356铝合金高温流变行为的分段模型,并引入相关系数R和分段模型的平均相对误差(AARE)对模型的准确性进行了分析,验证了模型的可行性。

从上述研究可得加入变质元素阻碍α-Al枝晶生长;控制晶粒尺寸,同时细化针片状共晶硅相,消除针片状共晶硅对合金基体的割裂作用,是提高合金初始性能的重要途径。通过研究高温塑性变形是提高合金性能的重要方法,通过提高合金性能来提高成品车轮的性能大有可为。

在工艺创新方面,文献[46]通过试验得出铸旋A356铝合金车轮轮辋旋压后体积减小2%左右,故设计毛坯时,前后体积比最佳值为(1.03±0.1):1。研究表明旋压过程中开口角度为18°时,截面应变大,坯料可获得大变形,可减少铸造缺陷,提高力学性能,但在实际设计毛坯时受毛坯体积、厚度的影响,不能一味地保证18°的开口角度,并举例部分造型的车轮如果一味按照18°开口角设计,最后轮辋部分会变得厚而短,故提出设计毛坯时,应在开口角为18°的基础上,根据实际工艺过程灵活变通,为旋压毛坯的设计作了参考。

文献[47]对铸旋铝合金车轮毛坯感应加热工艺进行试验,从感应加热理论、室温和200℃毛坯加热后的温度变化、旋压后的毛坯组织和机械性能方面进行分析,发现室温毛坯和高温毛坯所需的加热时间皆满足要求,且原始高温毛坯更适合短流程制造工艺。对非旋压部位的温度进行测量发现,轮芯为150℃,轮辐为206℃,工艺轮唇温度为320℃,皆能满足旋压工艺条件,且旋压后车轮的屈服强度能达到180 MPa,抗拉强度在280 MPa以上,为缩短

加工时间提供了方向,指出了感应加热设备的不足,也提出了新的优化方向在于感应加热装备的适配性。

文献[48]对铸旋车轮旋压模具进行设计,改进后的旋压模具将下模退料器分为定位滑块、导向块和垫板3部分。经试验新模具与旧模具生产的车轮力学性能几乎没有变化,所以该设计对取消预加工进而实现短流程制造有重要意义。文献[49]开发了一种新型的无芯轴热旋压成形技术。由于无芯轴,热旋压有很高的灵活性。其研究了900℃下壁角为30°的无芯轴热旋压Ti-6Al-4V合金圆锥产品的材料性能和尺寸精度。结果表明,变形过程大致遵循正弦规律。通过调节辊径可以实现板形控制。该研究为成形多种样式的车轮提供了参考,并为提高热旋压的灵活性提出了方案。文献[50]为解决一次旋压的加工时长过长和铸造缩孔不良率增加等问题,制订了2种二次旋压成形方案,总结了2种方案存在的问题以及创新意义,为缩减成本、提高质量提供了参考。文献[51]通过旋压成形数值模拟及实验分析在两旋轮旋压工艺下首道次压下率对轮辋壁厚均匀性、坯料隆起高度、旋轮所受压力以及轮辋显微组织与力学性能的影响,得出在铝合金车轮两旋轮旋压成形时首道次压下率为40%较为合适的理论。

因此在工艺创新方面,毛坯体积及开口角大小的创新设计是创新旋压工艺的基础;对旋压前毛坯的预加工创新(如感应加热)及对旋压模具的创新设计是缩短工艺流程的重要途径;对旋压成形方法及技术的创新是提高旋压工艺的灵活性、缩减成本、成形多种样式车轮的重要方向。

在对旋压后组织研究方面:文献[52]研究了A356铝合金热旋压后组织和力学性能的变化规律。结果表明,变形过程均匀化A356铝合金的组织,提高了合金的力学性能。热旋压过程中,共晶Si颗粒和富铁相破碎,气孔消失。Al基体再结晶,Al-Si-Ti相析出。力学性能测试结果表明,由于较细的球形共晶Si颗粒分布均匀、铸造缺陷的消除和再结晶,与压铸合金相比,变形合金的塑性显著提高,平均显微硬度降低。该研究在微观角度解释了

热旋压后材料的变化,为合金力学性能的提高提供了参考。

文献[53]研究了热旋压和热处理对A356车轮组织、织构和力学性能的影响。显微组织研究结果表明,铸态组织在旋压后发生断裂和伸长,但内层组织没有明显的流线型。对共晶Si粒子的实验结果表明,在旋压力作用下,共晶Si粒子发生了部分开裂,尺寸略有减小。热处理对共晶Si颗粒的球化作用显著。研究结果表明,旋压后原有铸态织构消失,后续热处理对织构转变有影响。经热旋压和热处理后,取向角的分布发生了变化。试验结果表明,旋压后合金的硬度略有下降,但随着热处理的进行,硬度逐渐升高。旋压和热处理均能提高抗拉强度,但内层(不与旋轮接触层)的抗拉强度低于外层(与旋轮接触层)。由此可见热旋压可以提高力学性能,但内层的力学性能提高不明显,力学性能较差,设法提高内层的力学性能是现阶段提高车轮疲劳寿命的一个重要方向。文献[54]通过OM、SEM和拉伸试验分析了基于低压压铸-热流成形工艺的A356-T6车轮的力学性能和显微组织。结果表明,共晶区尺寸和Si相形貌是影响车轮力学性能和断裂形貌的主要因素。上轮缘和下轮缘组织中共晶区分布均匀,Si相形貌细小,上轮缘的极限抗拉强度和屈服强度分别达到282.4和185.1 MPa。裂缝主要由精细的准解理台地和韧窝组成。轮辋的显微组织沿变形方向呈长条状,共晶组织和Si颗粒分布均匀。不规则的多边形共晶区和粗大的棒状硅颗粒在辐条中堆积,导致机械性能严重下降,特别是在辐条中心和辐条R角处。

实验研究为推动铸旋工艺在车轮成形方面的应用做出了重大贡献,然而实验成果在保证真实性的前提下,耗费了大量能源和材料,难以兼顾环保性。有限元模拟研究可节约大量资源,符合绿色化的理念,所以有关铸旋车轮成形的模拟研究尤为重要,特别是将模拟与试验相结合的研究方法,既保证了准确性又实现了绿色化、节能化。文献[40]指出铸旋工艺的广泛应用发展,需要在热旋工艺的数值模拟和参数优化方面进行大量深入的研究。

2.2.3 车轮铸旋工艺的模拟研究进展

在模拟研究方面,研究者在毛坯设计到最终成形的多个阶段进行研究。

文献[55]通过不同旋压温度的选择、对比不同毛坯开口角、对模具设计改进并用ABAQUS进行模拟验证,设置温度为350℃,旋压下模用H13钢,温度为200℃,旋压上模用45钢,温度为60℃,分析旋压毛坯在上模和旋轮作用下的各部件相对位移情况,经模拟验证合理,以此指出旋压温度、毛坯开口角度、模具结构是影响车轮成形品质的关键。

文献[56]通过ABAQUS建立铝合金车轮热旋压三维有限元模型,模拟了旋轮结构和铸坯开口角对轮辋壁厚变形的影响,优化了旋轮和铸坯开口角,并用实验验证了其确能提高轮辋纵截面的变形均匀性,为实际工艺的优化提供了参考。文献[57]通过UG和MSC.SuperForm/ SuperForge软件,得出旋压时应力应变的分布规律及最优的工艺参数:旋压变形温度为400℃,主轴转速为400 r/min,进给量为1.2 mm/r,减薄率为30%,并配合试验得出在30%的减薄率时车轮的表面质量最佳,为旋压工艺参数的选择提供了参考。如图13为不同旋压温度的成形情况对比。

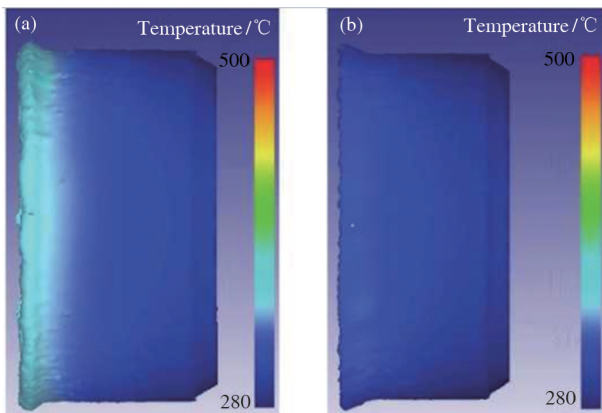


图13 350℃(a)和400℃(b)时的旋压成形情况

文献[58]在通过MSC.Marc软件对三旋轮和双旋轮旋压效果的对比中,发现了最优的高径比为3.6,且双旋轮的成形要优于三旋轮。文献[59]利用CAE软件对车轮的轮辋结构进行重新设计,经过模拟及试验验证,提高了车轮的抗冲击能力,并提高了旋压部位的伸长率,为轮辋设计提供了新思路。

文献[60]通过有限元及实验验证发现,在铝合金车轮两旋轮旋压成形时首道次压下率为40%时轮辋壁厚最均匀,压下量越大,材料强度越高,但超出限度后对材料影响不大。文献[61]利用ANSYS得出旋压过程中旋压力的3个分量大小,且发现工艺参数设置的合理性对旋压缺陷消除的重要性,为工艺参数的设定提供了参考。

文献[62]通过UG和ABAQUS的结合使用,得出了各工艺参数对壁厚偏差和内径偏差的影响程度,对壁厚偏差的影响程度:旋轮进给率>坯料转速>减薄率>摩擦系数>错距值,对内径偏差的影响程度:旋轮进给率>减薄率>摩擦系数>皮料转速>错距值,但也指出工艺参数设置未能考虑所有情况而导致结果会有误差,指出了工艺参数设定的重点。文献[63]采用多道次铝合金薄板热旋工艺,研究旋压过程中多种因素的关联问题,采用有限元模拟,研究成型温度、进给比等工艺参数,发现最佳成型温度为350℃,3道次的进给比分别为0.8、1.2、1.0 mm/r,该研究虽不是对车轮旋压工艺的研究,但其研究了多种因素的关联问题,为车轮旋压工艺参数的设定提供了参考。

文献[64]研究了6061铝合金车轮旋压过程中工艺参数对成形质量的影响,选取了旋压温度、主轴转速、进给量和减薄率4个参数进行研究。在旋压温度上,通过Simufact有限元仿真选择了300~500℃的旋压温度,当温度在300~350℃时,由于热塑性不足,旋压力会增加进而导致旋压中工件振动,而在500℃时,内径偏差和壁厚偏差比400℃时高出32%,在400℃时,车轮成形最好,在主轴转速方面,当转速为400 r/min时车轮的壁厚偏差值低,精度和表面质量最好。在进给量方面,在实际生产中为保证生产效率应在进料速度尽可能大的条件下保证产品质量,在进料速度逐渐增大时,直径偏差先减小后增大,转折点在1.5 mm/r,过大会导致较严重的金属堆积,太小会导致不均匀起皱,故进给量在1~2 mm/r较为合理。在减薄率上,减薄率大于45%时内径和壁厚偏差迅速增大,金属表面会出现断裂,变形严重。减薄率小时,虽然不影响加工质量,但却浪费大量时间,故45%减薄率最

好。该模拟为旋压工艺参数的选择提供了参考。

大量模拟提出并验证了旋压温度、转速、进给量和减薄率等4个参数的合理选择,合理区间大体确定,但在实际生产中,旋压过程受多种环境因素影响,这是模拟研究难以全部耦合的。故模拟研究应在摒弃次要元素以保证计算速度的前提下,尽可能与实际工况相对应,方能保证模拟的合理性与实用性。

文献[65]为了预测和控制塑性变形的不均匀性,在ABAQUS/Explicit环境下建立三维热力耦合模型,以铸铝合金管为例系统分析了工艺中的不均匀变形行为。发现:(1)旋压过程中,应力、应变和温度的变化首先发生在旋压区,而后随着旋压器具向下移动;(2)旋压区内外表面温度相近,但在接触区,内表面(内表面与旋压器具接触)到外表面温度逐渐降低;(3)旋压区中,轴向应力、切向应力远大于法向应力,轴向、法向应变远大于周向应变,旋压区存在三轴应力应变状态。该文献指出了旋压过程中温度和应变变化的一定规律,为下一步的模拟研究和工艺设计提供了参考。

铸旋车轮铸坯经旋压成形的工艺,改善了低压铸造工艺成形产品力学性能差的问题,相较锻造车轮成本也较低,有着良好的应用前景。

3 结论

相比于铸造和锻造工艺,铸旋工艺生产车轮既有良好的力学性能,又能满足大批量生产的需要,有着更广阔的发展前景和应用范围。研究者已经从源头的毛坯设计,到工艺的温度、减薄率等多个方面进行了大量研究。但有关毛坯设计给出的合理范围过大难以准确选择;模拟给出的大量结果难以和实际工况结合;旋压区内部成形较差;热旋压前后材料属性对比的相关研究较少;生产周期过长等问题还亟需解决。

未来铸旋工艺的研究与发展应从以下方面着手:

1) 在材料力学性能的研究方面:(1)从变质处理、熔体细化等方面入手提高合金的初始力学性

能。(2)对不同温度、不同应变速率下的铝合金变形软化机制应继续研究,且考虑温度对流动应力的影响以保证产品的可靠性。(3)对热应力和旋压作用后的晶粒变化继续研究,测试多组不同温度、不同旋压工况的晶粒变化,通过对比,设法最优合金的力学性能。

2) 在毛坯设计方面:(1)应加大对有限元研究的投入,通过软件模拟得到相对可靠的数据后通过试验验证,可节约大量资源并保证准确性;(2)对开口角度继续深入研究,开口角度的大小直接影响了轮辋和内轮缘部分的应力应变情况,进而影响成形和材料的微观组织,在此方向研究有利于提升合金力学性能。应提出毛坯开口角的设计规范以供参考和使用。

3) 在工艺选择方面:(1)在实际生产中:①对不同道次、不同数量旋轮的旋压进行研究,道次过少影响成形质量,而道次过多会影响生产效率,探索出最优解对实现大批量、高质量生产至关重要;②感应加热的研究应该继续推进,优化感应加热设备并且改进感应线圈的通用性、适配性,可提升生产效率。③旋压模具的创新设计有利于取消预加工以节省时间,应将模具设计的合理范围进一步缩小,以减少企业试错的次数,有利于实现大批量、高速化生产。④对旋压成形方法及技术的创新是提高旋压工艺的灵活性、缩减成本、成形多种样式车轮的重要方向。⑤旋压仅提高了轮辋部分的力学性能,外轮缘仍是铸态结构,内轮缘虽参与旋压但变形量很小,力学性能与铸态无异。故应设法提高旋压区内部(未与旋轮接触区)及内轮缘处的力学性能,以解决易因疲劳而产生断裂等问题,考虑通过改进芯模或加工工艺使内部力学性能提升。另外在工艺参数设置方面,应大力开发有限元仿真的应用,以节省大量试错所消耗的资源。(2)模拟参数的设定应从以下方面突破:①现阶段的模拟往往只是设定固定温度的材料性能,这并不符合实际生产中存在传热、热对流、热辐射等的实际工况。若能在热力耦合且是完全耦合的情况下完成模拟,那么将对行业有很大推动。②许多模拟为了收敛,将模型简化,如实际工况应是芯模自转,简化成

旋轮绕着芯模公转,或者旋轮运动轨迹本是半抛物线形或者螺旋形,但简化成了轨迹平直的折线或用模糊的幅值曲线代替,若能将模拟工艺更贴近实际工况,模拟的结果将更有意义。③有关旋压温度、主轴转速、减薄率等的选取研究过于割裂和分散,往往是设定其余条件的不变而选择当前参数的最优解,但实际生产中一个参数的改变往往会导致其余参数的更改,所以应考虑将各参数综合考量。④在模拟结果相对稳定后,应将结果与试验相结合,以保证准确性。

4) 在对成品车轮的研究方面:(1) 对不同热处理时间的车轮进行力学试验、金相分析、疲劳试验等,探索热处理的合理时间,以确保在服役性能达标的情况下,尽可能缩减生产周期、节省物料。(2) 对频繁报告问题的车轮,应分析其损伤部分的机理,与对应工艺情况相结合,以减少问题的产生,满足大众需求,提升企业形象,提高效益。

在保证产品安全、可靠、美观的前提下,尽可能地做到经验和节省时间成本,减少污染和浪费,是研究铝合金车轮铸旋工艺的长远目标。

参考文献(References)

- [1] 唐靖林, 曾大本. 面向汽车轻量化材料加工技术的现状及发展[J]. 金属热加工, 2009(11): 11-16.
- [2] Li Y X, Lin Z Q, Jiang A Q. Experimental study of glass-fiber mat thermoplastic material impact properties and lightweight automobile body analysis[J]. Materials & Design, 2004, 25(7): 579-585.
- [3] 郑祥健, 金龙兵, 王国军, 等. 铝合金轮毂的生产和市场现状[J]. 轻合金加工技术, 2004, 32(7): 8-11.
- [4] 贾文东. 运动型家用轿车轮毂设计研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- [5] 牛多, 黄勇, 孟昭昕. 铝合金端架压铸充型凝固数值模拟与工艺研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2016, 35(5): 82-86.
- [6] 张海渠, 马桂艳, 宋鸿武, 等. 铝合金轮毂成形工艺的应用与研究进展[J]. 沈阳大学学报, 2011, 23(4): 1-4.
- [7] 聂伟钢. 低压铸造铝合金轮毂的数值模拟与工艺优化[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- [8] 易磊, 陈海峰, 李秀兵. 内压胀型铸造技术[J]. 热加工工艺, 2011, 40(7): 37-39.
- [9] 张毅. 铸造工艺CAD及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994(8): 18-25.
- [10] 任凯, 冯立超, 孙立, 等. 低压铸造铝合金轮毂的研究现状[J]. 热加工工艺, 2020, 50(9): 10-14.
- [11] 毛建辉, 张玉贤, 姜路文, 等. A356铸造铝合金轮毂组织与性能分析[J]. 中国冶金, 2021, 31(5): 66-71.
- [12] 王志坚, 赵岩, 宋鸿武, 等. 大型铝合金轮毂低压铸造过程数值模拟及工艺优化[J]. 特色铸造及有色合金, 2014, 34(3): 256-259.
- [13] 张新颖, 潘增源, 杜士良, 等. 大偏距载重汽车铝车轮的反压铸造[J]. 特种铸造及有色合金, 2002: 167-169.
- [14] 李婷. 解读汽车车轮的制造工艺技术[J]. 模具工程, 2012(9): 75-79.
- [15] 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.
- [16] 戴星. 汽车轮毂用高强轻合金的差压铸造工艺研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(15): 98-100.
- [17] Yan Q S, Lu G, Gui M, et al. Effect of synergistic action of ultrasonic vibration and solidification pressure on tensile properties of vacuum counter-pressure casting aluminum alloy[J]. China Foundry, 2018, 15(6): 411-417.
- [18] 严青松. 智能控制的薄壁铝合金铸件真空差压铸造工艺与理论[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [19] 马春江, 陈玖新, 葛素静, 等. 挤压铸造重载汽车用铝合金车轮的组织及性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(10): 1063-1065.
- [20] 洪涛, 王东方, 华逢志. 铝合金轮毂挤压铸造工艺参数优化[J]. 铸造技术, 2020, 41(12): 1160-1164.
- [21] 王丹晨. 铝合金车轮锻造工艺及质量控制技术研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2018.
- [22] 高军, 赵国群. 整体式锻造铝合金车轮及其发展[J]. 汽车工艺与材料, 2001(5): 14-16.
- [23] 王顺成, 戚文军, 郑开宏, 等. 半固态模锻ZL101铝合金车轮的组织与力学性能[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(5): 116-120.
- [24] Shen K, Timko M, Li Y J, et al. The effect of temper, grain orientation, and composition on the fatigue properties of forged aluminum-lithium 2195 Alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28: 5625-5638.
- [25] 董金卫. 轿车铝合金轮毂锻造成形新工艺技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2007.
- [26] 张振. 锻造铝合金轮毂的工艺特点及检测方法研究[J]. 中国高新技术企业, 2015, 21: 47-48.
- [27] 陈炜, 林忠钦, 徐伟力, 等. 覆盖件拉伸模型面的特征组装配建模技术[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(2):

- 123-127.
- [28] 何维均, 宋鸿武, 常海平, 等. 铸旋轮毂热旋压过程的数值模拟及工艺优化[J]. 精密成形工程, 2011, 3(2): 6-10.
- [29] 吴伯杰, 赵殊. 基于UGII覆盖件工艺补充面的参数化设计[J]. 现代制造工程, 2003(4): 18-20.
- [30] 张庆玲. 先进的铝合金轮毂旋压成形技术[J]. 金属世界, 2008(5): 52-54.
- [31] 程应潮, 刘罡, 范国辉. 国内外轿车覆盖件冲压模具设计概览[J]. 上海汽车, 2004(5): 26-28.
- [32] Tash M, Samuel F H, Mucciardi F, et al. Effect of metallurgical parameters on the hardness and microstructural characterization of as-cast and heat-treated 356 and 319 aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2007, 443(1/2): 185-201.
- [33] 范宋杰, 何国球, 刘晓山, 等. A356铝合金力学性能与微观结构[J]. 有色金属, 2008, 60(4): 5-8.
- [34] Niu G D, Wang J, Li J P, et al. Characterization of in-situ reinforced (Al, Si)₃(Ti, Ce) precipitates in T6 treated A356-0.3 wt.%Ce-1.5 vol.% TiCN composite and its effects on mechanical properties[J]. Materials Characterization, 2022, 185: 1-10.
- [35] 刘宏磊, 梁勇, 郑宝全, 等. 多次人工时效对低压铸造A356.2铝合金轮毂力学性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2008(11): 50-52.
- [36] 何维均, 宋鸿武, 张丽娟, 等. 铸造A356铝合金的高速热变形行为[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(2): 71-75.
- [37] 胡强, 闫亮明, 杜青春, 等. 压铸A356铝合金的热变形行为[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(10): 1099-1102.
- [38] 王清松, 徐戊娇, 吴道祥, 等. 变形态2219铝合金高温塑性变形的本构模型[J]. 铝加工, 2021(3): 27-31.
- [39] 加藤, 乔士. 用旋压法加工铝轮毂技术的开发[J]. 有色金属加工, 1997(5): 36-39.
- [40] 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, 36(4): 630-634.
- [41] 姜峰, 张慧, 李云峰, 等. 混合稀土变质对A356合金组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2023, 56(3): 68-71.
- [42] Yi W, Liu G C, Lu Z, et al. Efficient alloy design of Sr-modified A356 alloys driven by computational thermodynamics and machine learning[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 112: 277-290.
- [43] Haghshenas M, Zarei-Hanzaki A, Jahazi M. An investigation to the effect of deformation-heat treatment cycle on the eutectic morphology and mechanical properties of a Thixocast A356 alloy[J]. Materials Characterization, 2009, 60(8): 817-823.
- [44] 曾胜, 常海平, 张金, 等. A356铝合金的高温流变行为及本构模型研究[J]. 锻压技术, 2022(4): 242-248.
- [45] Huang X S, Hu Z J, Zhu B W, et al. High temperature flow behavior of A356 aluminum alloy based on modified Johnson-Cook model and recrystallization model[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(12): 115-124.
- [46] 姬广欣, 周起涛, 薛艳菲. A356铝合金轮毂铸旋新工艺的应用与毛坯设计[J]. 模具技术, 2019(2): 12-15.
- [47] 常海平, 李昌海, 万奇亮. 感应加热在铸旋铝合金车轮中的应用[J]. 精密成形工程, 2016, 8(2): 72-74.
- [48] 徐世文, 张立娟, 常海平, 等. 铸旋铝合金车轮旋压模具的优化设计[J]. 精密成形工程, 2018, 10(2): 122-125.
- [49] Imamura Y, Ikawa K, Sakane Y, et al. Investigation of forming accuracy in mandrel-free hot-spinning[J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 1701-1706.
- [50] 黄渊. 铝合金轮毂二次旋压成型工艺研究[J]. 企业技术开发, 2019, 38(2): 76-78.
- [51] Hu Q, Yan L M, Du Q C, et al. Effect of the first pass reduction rate on spinning forming of hub during two wheels spinning[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(2): 134-142.
- [52] Wu X Y, Zhang H R, Chen H L, et al. Evolution of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy processed by hot spinning process[J]. China Foundry, 2017, 14(2): 138-144.
- [53] Huang C Q, Liu J X. Effects of hot spinning and heat treatment on the microstructure, texture, and mechanical properties of A356 wheel hubs[J]. Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 2020, 51(1): 289-298.
- [54] Wang Z F, Ou C X, Wang M, et al. Mechanical properties and microstructure of A356-T6 aluminum alloy wheel hub based on casting-spinning process[J]. Materials Science Forum, 2021, 1036: 3-10.
- [55] 刘智冲, 常海平, 张立娟. 影响A356铝合金车轮旋压成形品质的因素分析[J]. 精密成形工程, 2012, 4(3): 30-33.
- [56] 马桂艳. A356铝合金热变形机理和旋压工艺研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2012.
- [57] 谭学菊. A356铝合金轮毂的旋压成形工艺研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- [58] 胡强. 水冷压铸A356铝合金轮毂两旋轮旋压成形的研

- 究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021.
- [59] 张丽娟. 铸旋轮毂结构优化设计[J]. 锻压技术, 2017, 45(5): 123-127.
- [60] 胡强, 闫亮明, 杜青春, 等. 两旋轮旋压首道次压下率对轮毂旋压成形的影响[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(2): 134-142.
- [61] 孟瑶. 基于ANSYS的铝合金车轮旋压成形的模拟仿真与参数优化[D]. 长春: 长春工业大学, 2017: 6-8.
- [62] 王永亮. 铝合金轮毂旋压成形数值模拟技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- [63] Guo Y M, Li M Z, Xu H Q, et al. Research on multi-pass hot spinning based on finite element simulation and experiment for aluminum alloy component[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5/6/7/8): 1995-2008.
- [64] Chen S Y, Shu X D, Lu Y J. Effect of 6061 aluminum alloy wheel forging and spinning process parameters on forming quality[J]. Metalurgija, 2022, 61(2): 317-320.
- [65] Zhao G Y, Lu C J, Zhang R Y, et al. Uneven plastic deformation behavior of high-strength cast aluminum alloy tube in multi-pass hot power backward spinning[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume, 2017, 88: 907-921.

The research status of production technology of casting and spinning aluminum alloy wheels

YUE Fengli¹, YAN Weihao¹, ZHANG Mengxiao^{2*}, SONG Hongwu², ZHANG Shihong²

1. School of Automobile and Transportation, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China

2. Shi-changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract In this paper, the research status of aluminum alloy wheel production technology at home and abroad are summarized, and the research history and latest progress of cast spinning aluminum alloy wheel forming technology are described. The application of spinning technology in wheel forming is explored and clarified by analyzing the present situation of finite element numerical simulation. The current development trend and deficiency of the forming process are summarized and the further research direction of aluminum alloy wheel casting and spinning forming process is suggested.

Keywords aluminum alloy wheel; cast spinning process; finite element numerical simulation; forming process ●



(责任编辑 王志敏)