



铝合金挤压铸造技术研究进展

姜巨福¹, 李明星¹, 王 迎²

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 挤压铸造技术是在压力作用下完成金属液的充型、凝固结晶和补缩过程, 利用高压实现细化晶粒尺寸、改善组织形貌和调控铸造缺陷, 这是一种集铸造和锻造技术优势为一身的精密、近净、绿色成形技术。目前, 铝合金是挤压铸造技术应用的主要材料之一。从铝合金挤压铸造过程中的传热传质理论、数值模拟技术、铝合金挤压铸造装备发展、铝合金挤压铸造工艺及铝合金挤压铸造发展方向展望 5 个方面, 对国内外铝合金挤压铸造技术的发展现状进行了综合论述和分析, 为铝合金挤压铸造技术的发展和进一步推广应用提供一定的参考。

关键词: 铝合金; 挤压铸造; 数值模拟; 挤压铸造装备

文章编号: 1004-0609(2021)-09-2313-17

中图分类号: TG249.9

文献标志码: A

引文格式: 姜巨福, 李明星, 王 迎. 铝合金挤压铸造技术研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(9): 2313–2329. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39788

JIANG Ju-fu, LI Ming-xing, WANG Ying, et al. Research development of squeeze casting technology of aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(9): 2313–2329. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39788

挤压铸造又称液态模锻, 在压力作用下完成充型、凝固结晶和补缩过程, 从而实现细化晶粒尺寸、改善组织形貌、调控铸造缺陷的目的, 其工艺流程如图 1 所示^[1]。它结合了铸造液态充型和锻造塑性变形的特点, 是一种绿色、近净成形的成形工艺。挤压铸造技术最早是由苏联发明的^[2–3], 其早期称为液态模锻, 后来发展至美国将其称为挤压铸造^[4]。其主要分为直接挤压铸造和间接挤压铸造, 随着科学技术的发展, 又出现了双重挤压铸造等新工艺。直接挤压、间接挤压、双重挤压是当前生产实践中常采用的三种加压方式, 其中双重挤压又存在多种形式。

挤压铸造相较于其他固液成形最突出的工艺特点是高压凝固结晶, 其工艺适用性强, 适用于生产多合金(既适用于铸造铝合金又适用于锻造铝合

金)材料体系且复杂形状、厚壁差大铸件, 工艺过程简单, 易于实现生产自动化。挤压铸造铸件组织质量好, 晶粒细小, 组织密实, 孔隙度很低, 力学性能优良, 可以进行固溶及时效处理, 表面质量好, 尺寸精度高^[5]。基于上述特点, 挤压铸造取代其他成形工艺生产的精密、优质铸件以及满足其他特殊使用要求的高强韧、高耐磨、高气密性零件在汽车、通讯、高铁、电力领域有着不小的占比。

合金材料是最重要的要素, 不仅决定工艺参数还会直接影响模具的使用寿命。当前挤压铸造合金材料关注重点是铝合金及铝基复合材料, Al-Si 系、Al-Cu 系、Al-Zn 系铝合金使用广泛, 研究也较为系统, 其中对铸造性能良好的 Al-Si 系合金研究最为成熟^[6–9]。充型能力、热裂敏感性和补缩能力是铸造使用合金工艺性能重要指标, 分析发现挤

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFB2006500); 国家自然科学基金资助项目(51875124)

收稿日期: 2020-09-25; **修订日期:** 2020-12-26

通信作者: 姜巨福, 教授, 博士; 电话: 18746013176; E-mail: jiangjufu@hit.edu.cn

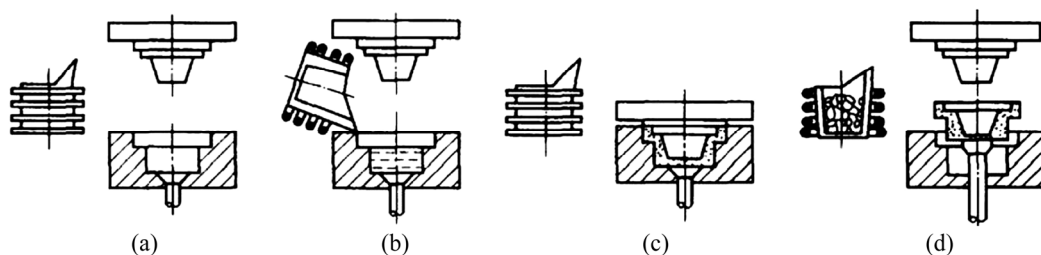


图1 挤压铸造工艺流程^[1]

Fig. 1 Squeeze casting process^[1]: (a) Melting; (b) Pouring; (c) Pressurization; (d) Ejection

压铸对铝合金材料工艺性能适应能力很强,即挤压铸造对铝合金材料工艺性要求不高,只需要重点关注铝合金的使用性能^[10-11]。为满足产品高强、高韧、耐磨损、耐腐蚀、耐疲劳、抗蠕变等特殊使用性能,设计挤压铸造专用合金非常有必要,国内外学者已经做了很多研究^[2]。

扩大铝合金挤压铸造技术的应用范围,提高铸件质量是挤压铸造永恒的发展主题。国内外在挤压铸造专用设备及工装、工艺控制水平以及数值模拟技术等方面取得了长足的进步,因而挤压铸造产品在向着大型、复杂化的方向发展,对温度场、应力场的控制更加困难,铸造缺陷更易产生,在设备、工艺方面还需要有所突破。

本文将从铝合金挤压铸造过程中的传热传质理论、数值模拟技术、挤压铸造装备发展、挤压铸造工艺及挤压铸造发展方向展望5个方面,对铝合金挤压铸造研究进展进行阐述,为铝合金挤压铸造的发展提供技术参考。

1 传热传质现象

1.1 偏析

偏析是一种合金元素在结晶时分布不均匀的现象,它是溶质元素再分配的必然结果,偏析是一种铸造缺陷,影响铸件力学性能和固溶强化能力。偏析相集中分布在晶界,断裂形式呈沿晶界脆性断裂,致使铸件塑性较差,影响其抗拉强度和伸长率^[12],偏析相的过烧温度低于基体过烧温度,在制定热处理制度时,需要适当降低固溶温度,牺牲一部分固溶强化能力^[13]。根据偏析尺度,可以将偏析分为宏观偏析和微观偏析,上述偏析对性能的影响多为宏观偏析所造成,小范围的微观偏析影响不大。

挤压铸造偏析程度小于常规铸造偏析程度,但由于压力致使偏析机理更加复杂,突出表现在挤压铸造异常偏析。GALLERNEAULT等^[14]认为挤压铸造过程中压力是产生宏观偏析的原因,是压力将糊状凝固变成逐层凝固,导致了溶质正常的分布浓度梯度。KIM等^[15]通过对重力铸造和直接挤压铸造冷却速度的比较发现,正偏析的出现是由于压力提高了制件和模具的传热系数,模具有较高的径向温度梯度和较短的半固态时间。SCHWERDTFEGER等^[16]提出了“挤压偏析”的概念,当凝固合金发生变形,迫使糊状凝固区的固液相发生分离,低熔点溶质富集,出现宏观偏析。当前普遍接受挤压流动的观点,即挤压铸造异常偏析的形成是在较高的机械压力下液相流动加快,当枝晶间液相流动速度大于凝固速度时,低熔点富溶质液相沿着枝晶通道被强行挤向铸造热节处。

凝固与流变的耦合是挤压铸造偏析的根本机制^[17],偏析影响因素有合金材料、挤压方式、模具结构和工艺参数等,其他条件既定情况下,工艺参数的研究是重点。HONG等^[7, 18]提出描述最佳工艺实验图,定义了3个和其他工艺参数相关的临界压力,无收缩缺陷的最小压力(p_{sc})、产生宏观偏析的最小压力(p_m)、产生微观偏析的压力(p_{ms}),发现只有压力 p 满足 $p_{sc} < p < p_m(p_{ms})$,才可以获得无偏析和无收缩缺陷的完好铸件。适当的降低浇铸温度和模具温度可以减少偏析程度^[19]而对于小体积零件偏析可以忽略不计^[20]。大型、复杂零件溶质元素的偏析有区域效应,即在不同区域溶质的偏聚情况不同,不同元素对工艺参数的敏感程度有所差别;挤压方式的不同,元素对工艺参数的敏感也有区别^[21]。

大型、复杂零件溶质元素的偏析有区域效应,即在不同区域溶质的偏聚情况不同,不同元素对工

艺参数的敏感程度有所差别;挤压方式的不同,元素对工艺参数的敏感也有区别^[21]。

消除偏析的一般方法是使偏析相扩散溶解,通过固溶和均匀化退火能在一定程度减弱偏析,提高退火温度和延长保温时间都有利于偏析消除,但偏析相周围合金组织对溶质原子的溶解能力有限,很难通过热处理完全消除^[22]。添加微量元素可以有效消除偏析^[13]。偏析限制了高品质铸件发展,针对于特定材料体系、结构形式的大型复杂铸件,工艺参数对偏析的调控以及热处理对偏析的消除作用将会是重点研究的方向。

1.2 传热行为

凝固过程中的传热行为是由各个自由表面微观尺度的表面粗糙度,铸件表皮因热应力引起的中尺度变形以及铸件和模具由于其相对的热膨胀和收缩而产生的宏观运动所共同控制^[23]。传热行为直接影响凝固速度和冷却速率,进而影响铸件的组织性能,界面传热系数(IHTC)作为衡量传热能力的参数被广泛关注,其受自由界面间气隙和界面接触压力、合金特性、表面粗糙度、湿润性和涂层等众多影响因素影响。界面传热系数作为凝固模型求解的重要边界条件,对求解结果的准确性至关重要^[24]。学者通过实验研究和数值验证的方法对传热系数定性分析和参数化定量表达做了许多研究。

WANG 等^[25]利用模具内置热电偶的方法实测了 A356 铝合金在 H13 模具钢型腔中直接挤压铸造时的温度分布,并且利用获得的温度值预测了 A356 铝合金与 H13 模具钢之间的界面传热系数。研究发现,压力的实施使得界面传热系数大幅度增加,其峰值达到 $62.8 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,是不施加压力时数倍。SUN 等^[26]利用一个五步挤压铸造方法及反演算法研究了 A443 铝合金挤压铸造过程的界面换热系数,研究发现界面换热系数首先达到一个峰值,然后逐渐降低至较低水平,当施压压力为 60 MPa 时,其峰值为 $9419 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。李俊文等^[27-28]提出了“等效间隙”概念,分析讨论挤压力对界面传热系数和界面气隙变化的影响规律,凝固收缩增加等效界面气隙,挤压力可以有效减小等效界面气隙,二者此消彼长之下界面传热系数经历自由凝固上升、急剧上升、缓慢下降、稳定 4 个阶段。图 2 所示为挤压铸造过程中界面传热的示意图^[27]。

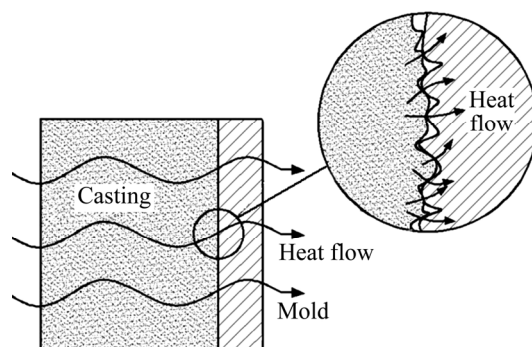


图2 挤压铸造过程中界面传热示意图^[27]

Fig. 2 Schematic diagram of interfacial heat transfer during squeeze casting^[27]

提升界面换热系数数值的准确性是传热研究的热点,主流方式是通过经验公式和数值模拟求解。AWEDA 等^[29]认为传热系数和温度、压力相关,在 3 个不同的温度范围间隔内分别提出了经验公式。ZHANG 等^[30]给出了传热系数和压力线性经验公式,但由经验公式计算和实测的传热系数存在误差,拟合准确性差;FARDI-ICKHCHY 等^[31]给出了三阶经验公式,经验证有良好的准确性。WANG 等^[32]构建了微观接触模型,即平均表面平面间距与界面压力和界面温度之间的关系,通过实验数据将传热系数与平均表面平面间距相关联,这为界面传热系数定量表达提供了新思路。赵信毅等^[33]实测了凝固过程温度曲线,利用商用软件 ProCAST 反算求解 AC4B 和 H13 界面传热系数,结果显示其为温度的函数,能够满足工程需要。

涂层是控制传热最重要的单因素之一,它对凝固速率和显微组织的发展影响显著。利用界面传热系数表征涂层传热能力,研究发现界面传热系数随着涂层厚度的增加而降低;石墨比陶瓷涂层界面传热系数稍大,但与两种涂层的固有热导率的显著差异相比,这种差异是微弱的,故涂层材料对热流的影响很小,热阻更多地取决于涂层的孔隙率和厚度^[34]。涂层特性对传热系数和微观组织发展的影响规律的研究都具有实际意义,还需要深入研究。

铸造涂料除控制传热行为外,还可以降低模具热冲击,改善模具表面耐磨性、化学稳定性以及铸件表面质量和脱模能力,是延长模具的使用寿命和控制铸件缺陷的关键因素,对产品质量和生产效率有重要意义^[35-36]。铝合金挤压铸造目前多采用水基

石墨涂料或水基压铸涂料,尚无专用涂料,开发满足工艺性能和工作性能需求的铝合金挤压铸造专用涂料、功能涂料还需加强。

2 数值模拟技术

数值模拟技术(铸造CAE技术)是将理论运用到数字模型运算求解,并将结果直观表示的一种多学科交叉的先进技术,具有广阔的商业前景和利用价值。铸造领域产品的开发应用越来越注重高质量、短周期、低成本,传统的、经验性的开发流程逐渐不能满足实际要求。数值模拟技术的发展为产品的开发提供了新的思路,即用数值模拟作为理论基础指导工艺和模具结构优化以代替经验性设计,数值模拟技术的深度发展是行业未来的发展方向。

数值模拟的重要性体现在模拟和预测两个方面。数值模拟可以将铸造充型、凝固过程可视化再现,并对流场、温度场、应力场模拟结果直观、多样化表达,对微观组织、晶粒组织结构的模拟在发展之中,尚处于较为初始的阶段。基于数值模拟结果,利用缩孔、缩松判据对缩孔类缺陷出现的位置和体积大小可以做出准确的预测,采用流变学模型可以对热裂形成部位准确预测,随着充型过程模拟算法的完善,对冷隔、卷气等可以进行定性预测^[37]。TANG等^[38]对三维复杂形状挤压铸造件凝固过程进行了热力耦合数值模拟,在其研究中零件的体收缩率、压力对结晶潜热的影响以及界面换热系数与铸件变形的相互作用都被考虑进模拟过程。韩志强等^[39]和朱维等^[40]开发了新的有限元模型对挤压铸造凝固过程热-力耦合模拟,模拟凝固过程中铸件温度、应力及形状变化,经验证该模型对热力分析正确。HIMADRI^[41]利用一种网格焓方程对圆柱体挤压铸造的凝固过程进行了模拟,模拟发现随着界面传热系数的增加,凝固时间明显缩短。

铸造专用商用软件发展的比较繁荣,国外比较著名的有ProCAST、Magma、AnyCasting等,国内的有华铸CAE、FT-Star等。数值模拟基于有限元法(FEM)和有限差分法(FDM)进行数值计算,网格划分、计算精度有所差别^[42]。叶明松等^[43]针对挤压铸造数值模拟过程开发了一种前处理程序,成功应用于壳体挤压铸造数值模拟前处理网格的划分。BABAEI等^[44]利用ProCAST和Ansys软件模拟了

Al/Al-4.5%Cu(质量分数)双金属挤压铸造过程,模拟表明在双金属的界面处具有较大的应力出现。LI等^[45]利用Magma软件对汽车控制臂挤压铸造过程进行了数值模拟分析,通过数值模拟精确预测了凝固缺陷产生的位置。在这些挤压铸造数值模拟使用的软件中,ProCAST软件是使用较多的一种。陈玖新等^[46]利用ProCAST软件分析了A356铝合金轮毂挤压铸造的充型、凝固过程及温度场,该研究结果给挤压铸造工艺方案的确定提供了技术支持。郝刚等^[47]利用ProCAST模拟了汽车制动器壳体挤压铸造过程的温度场分布特征,研究发现冷速最慢的地方是最容易产生缺陷的地方。李俊萍^[48]同样利用ProCAST软件模拟了负重轮挤压铸造过程的温度场和缺陷分布,给挤压铸造的工艺方案优化提供了参考。李春龙等^[49]对汽车发动机支架挤压铸造过程进行了数值模拟分析,预测了充型及凝固过程中的缺陷,对工艺方案的改进和优化提供了理论依据。许若震等^[50]利用ProCAST软件对汽车副车架挤压铸造过程进行了数值模拟分析,在挤压铸造工艺方案确定方面提供了理论依据。综上所述,数值模拟软件模拟结果作为理论基础指导工艺、服务工艺,其在产品开发过程中有举足轻重作用,能够有效缩短产品开发周期,降低开发成本,提高产品竞争力。

基于文献计量学对国内铸造CAE文献进行了调研,结果显示近些年数值模拟软件的研发相较于应用力度有所不足,相关论文局限于高校,工程实践创新能力没有得到发挥^[51]。欧美日等发达国家铸造企业广泛的使用了数值模拟技术,尤其是汽车铸件生产商,我国中小型铸造企业技术实力薄弱,难以提供数值模拟技术严格的外部工艺条件,数值模拟技术实际应用水平比较低,在企业的推广普及任重道远。提升模拟的精确程度,需要准确的初值条件、边界条件和材料物性参数;发展完善多场耦合理论基础、算法以及对缺陷定量化预测;提升数据后处理能力将会是数值模拟商用软件的持续性优化的重要方向^[52]。

3 挤压铸造设备及工装

3.1 挤压铸造设备概述

在我国承担生产任务的挤压铸造设备一部分是由通用液压机简单改装而来,设备专业化程度

低, 这已经成为限制限制我国挤压铸造产业发展的重要因素。

通用液压机毕竟不是挤压铸造专用液压机, 在工艺应用范围、产品质量、生产效率方面存在先天不足。通用液压机基本全为立式框架, 改造的挤压铸造设备对成形零件结构有选择性。通用液压机的性能参数如加压速度和生产工艺参数不匹配, 会造成缩孔缩松、裂纹等缺陷; 生产过程缺少对工艺参数的监测和有效调控, 工艺参数稳定性差, 生产过程可重复性差, 产品质量、良品率得不到保证。另一方面, 改造的挤压铸造设备自动化程度低, 需要人工操作, 生产效率低^[53-54]。挤压铸造设备服务成形工艺, 系列化专用设备的研发, 极大地提高了工艺水平和工艺应用范围, 产品质量和生产效率可以在一定程度得到保证。

为满足大型、复杂零部件成形需求, 提高挤压铸造专业化程度, 开发标准化、系列化新型挤压铸造设备同时兼顾对现有设备深度改造是当前国内外挤压铸造设备发展趋势。

日本宇部兴产株式会社(UBE)在 1978 年 5 月世界上首次申请了垂直压铸机的专利^[55], 后续成功开发 VSC 和 HVSC 系列挤压铸造专用设备极大的提高工艺水平, 经过多年的发展设备机型齐全, 世界范围内设备厂商如日本东芝机械(Toshiba)、瑞士布勒(Buhler)等同样有雄厚的技术积淀, 其中 VV 型(垂直合模垂直压射)、HV 型(水平合模垂直压射)设备技术最为成熟, HH 型(水平合模水平挤压式)设备发展差强人意。日本东芝机械公司在压铸设备中开发了局部挤压铸造的装备, 力图对压铸充填完成后的材料实施塑性变形^[56]。韩国科学与技术研究院开发了一种垂直挤压铸造装备, 该该装备具备局部加压的装置, 能够成形高品质铸件^[57]。

新型专用挤压铸造设备开发采用既定结构形式, 设备开发重点关注合模力、压射系统、控制系统、熔体输送这四个方面^[58]。出于对生产效率和工艺水平的考量, 自动喷涂、自动取料装置、模具快速更换装置等辅助装置的研发也很重要, 本文不再详细叙述。

1) 合模力

合模力是选择挤压铸造设备的重要参数, 合模力规格系列化可以满足不同产品的使用需求, 大吨位设备地位更加重要。尽管国外设备制造厂商停止了对大吨位挤压铸造设备出口管制, 但是进口设备价格昂贵, 折合设备吨位计算, 一吨合模力折合人民币价格近万元。

合模力一般是由合模机构和锁模机构提供, 常见的合模机构有液压缸直顶式、曲肘式以及其二者结合, 宇部公司 VSC 系列设备采用液压缸直接提供合模力, HVSC 系列设备采用曲肘机构^[59](曲肘机构相当于力的放大器)。锁模机构形式较为多样, 东芝机械在其最新研发的压铸机中, 使用了电气控制的锁模装置。表 1 所示为宇部兴产、东芝和布勒这 3 家企业和合模力规格。

2) 压射系统

压射系统的排气、压射速度、瞬时增压等性能参数对挤压铸造设备性能至关重要, 这也对液压系统提出较高要求。宇部公司采用了一种反馈电路控制液压回路(专利), 维持压射速度稳定, 使用比例电磁阀, 多级调速, 具备较宽的适用范围^[60]。为减少卷气, 挤压铸造设备多采用垂直压射的方式, 气体优先熔体进入模具型腔, 如宇部公司专利倾斜对接注射机构。针对 HH 型挤压铸造设备水平压射方式易卷气的问题, 压铸行业做了许多探索非常具有参考价值, 如满料筒(Full-Sleeve)挤铸技术、对压射

表 1 三家典型企业合模力规格^[58]

Table 1 Clamping force specification of three typical enterprises^[58]

Manufacturer	Series	Type	Clamping force/kN
UBE	VSC	Vertical	3150, 5000, 6300, 8000, 15000, 18000, 25000, 35000
	HVSC	Mixed	1400, 2500, 3500, 5000, 6300, 8000
Toshiba	DXH	Horizontal	3430, 34300
	DXV	Vertical	1323, 2450, 4900, 9800, 14700
	DXHV	Mixed	3430
Buhler	Vision Evolution Classic	Horizontal	2600-42000

速度实时控制、慢压射技术^[61]等。

3) 控制系统

日本东芝机械开发的系列挤压铸造设备配套先进数控系统 TOSCAST, 可通过系统界面调整过程参数, 可视化再现工艺参数情况, 具备良好的人机交互作用。德国布勒公司开发了实时控制系统对挤压速度和压力曲线实时控制^[58]。挤压铸造生产过程变量众多, 控制系统显得尤为重要, 通过对变量的主动控制, 可以保证工艺水平和工艺稳定性, 提高整机实时控制能力和智能集成控制水平将会是控制系统发展的重要方向^[62]。

4) 熔体输送

熔体质量是影响铸件质量最为重要的因素之一, 对熔体质量的控制体现在熔体净化和熔体输送两个方面。关于熔体净化, 复合精炼处理是铝合金熔体净化新方向, 其中采用联合净化技术, 即把除气净化和过滤除渣相结合, 可以有效提升净化效果^[63]。目前熔体输送方式主要有流槽输送、浇勺机械手输送、气压输送、电磁输送, 熔体输送过程时间过长和氧化行为都会给铸件带来不利影响。时间过长, 在转移过程会发生部分凝固, 产生提前凝固效应; 转移过程发生氧化, 可能带来夹渣冷隔缺陷。宇部公司系列挤压铸造设备配备了自动浇注机械手, 东芝公司配置 LEOMACS 封闭浇注系统, 使用电磁泵装置输送金属液, 有效缩短熔体转移时间, 减缓氧化过程, 熔体质量较好^[58]。熔体输送既要保“质”也要保“量”, 熔体的定量输送也是发展的

重点。图3所示为东芝 DXHV350 挤压铸造专用液压机动作过程。

我国挤压铸造设备发展起步较晚, 经过多年的发展在专用挤压铸造机系列开发取得较大进步。苏州三基铸造装备股份有限公司作为国内轻合金装备领军者, 先后成功研发了多合模力规格、机型齐全的系列化挤压铸造液压机, 填补了国内多项技术空白, 其研制的 3500 t 高效智能化立式挤压铸造生产线已经在一汽集团安装使用。广州和德轻量化成型技术有限公司也在专用挤压铸造装备研制方面进行了一定量的研发和制造工作。国内挤铸造装备的技术水平同日本、欧美先进装备性能还存在一定差距, 有待提高。

3.2 挤压铸造模具

模具结构参数和模具材料体系是模具设计重点关注内容, 其关乎模具寿命、产品质量以及生产效率, 而模具寿命又是限制挤压铸造技术推广和应用的重要因素。模具严苛的服役环境对模具材料性能提出了高要求, 3Cr2W8V 和 H13 热作模具钢是轻合金挤压铸造模具常规材料体系。

3.2.1 模具结构设计

当前模具结构设计较多停留在经验设计层面, 缺少科学性依据, 结构的合理性和产品质量的稳定性难以保证。随着挤压铸造成形工艺的深度发展和广泛应用, 传统模具设计方法不能满足短周期、低成本的发展需求。研究人员针对挤压铸造模具结构

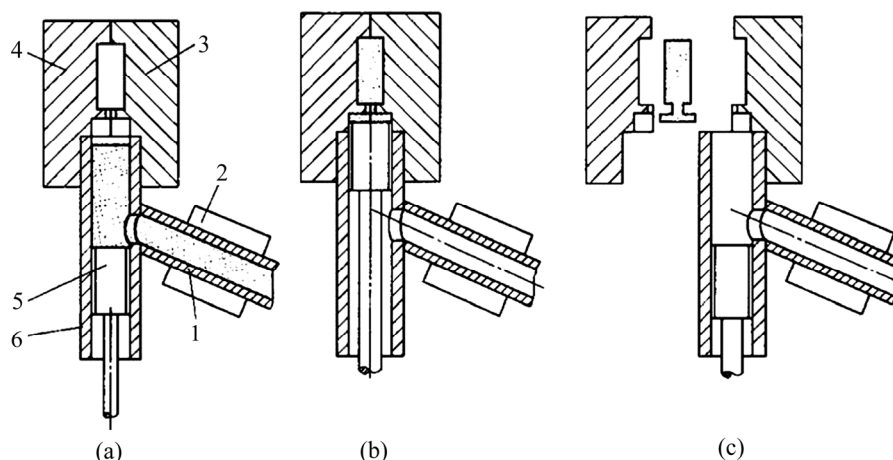


图3 东芝 DXHV350 挤压铸造专用液压机动作过程^[59]

Fig. 3 Toshiba DXHV350 squeeze casting special hydraulic press process^[59]: (a) Quantitative liquid feeding of clamping and electromagnetic pump; (b) Squeezing; (c) Opening mold and pushing out castings (1—Delivery pipe; 2—Electromagnetic pump; 3—Cover die; 4—Moving die; 5—Injection piston; 6—Injection sleeve)

所必备的浇注系统、冷却系统、排溢系统以及配合间隙提出了系列设计准则^[64],发展模具虚拟现实设计,有效的提高设计效率,降低设计成本^[65]。

3.2.2 模具使用寿命

对模具失效有针对性的防控,提升模具使用寿命对挤压铸造推广应用非常重要。挤压铸造模具在高温、高压条件下服役,热力循环作用致使模具容易发生疲劳失效,疲劳失效是模具主要的失效形式,对热疲劳失效的防控主要依靠模具材料性能的提升、整体或局部热处理、模具结构优化设计、型腔表面处理^[66]。模具热冲击开裂较难防控,张密兰^[67]对合金熔体对模具的热冲击行为深入研究,结果表明热冲击影响强度随着界面热阻的增大、浇注温度的升高、热冲击前模具温度的升高而增大,这为异常失效的防控提供了思路。除此之外,模具失效形式还有塑性流变、熔焊、磨损等形式。

数值模拟对模具失效区域预测和模具结构优化具有指导性作用。模具的最大等效应力是引起模具产生裂纹的主要原因之一,而等效应力值与模具的主要结构参数值密切相关^[68]。SRIVASTAVA等^[69]基于温度场和应力场分析结果,结合修正后的热疲劳方程,对压铸件中的裂纹进行建模,并预测了容易产生裂纹区域以及循环周期数量。倪正顺^[68]利用热力耦合弹塑性有限元模型对模具温度场和应力场进行数值计算,辅助模具结构优化设计。KLOBČAR等^[70]基于有限元模型对特定边缘几何形状热应力分析,采集模拟实际工况的温度数据,对有限元模型校准。结果显示避免尖角、缺口和韧性的快速变化,取最大过渡圆角半径,预热模具至最佳温度,控制模具型腔温度的均匀,可以减小温度和热梯度,延长模具的使用寿命。

4 成形工艺

挤压铸造技术经历了工艺理论探索、应用基础研究、小规模实验研究,目前已经进入到针对具体产品推广应用的新阶段。成分及工艺(充型及凝固条件、比压控制等)决定组织,组织决定性能,而性能又是产品开发、应用的焦点,故成形工艺对组织性能的影响及成形工艺的优化被广泛关注。

产品既定材料体系、结构特点情况下,成形工艺重点关注对象是挤压方式和工艺参数。直接挤压

较间接挤压对设备要求和工艺难度低,因而目前对直接挤压铸造研究比较广泛。工艺参数的研究是热点内容,工艺参数在4个维度上对产品组织性能产生影响,即压力、温度、时间、速度。在众多工艺参数之中,挤压力、模具温度、浇铸温度、保压时间是影响制件组织性能最为显著的影响因子^[71]。

4.1 组织性能分析

4.1.1 力学性能分析

国内外针对工艺参数对组织性能影响规律进行了诸多研究。高压是挤压铸造区别于其他铸造工艺的最本质特点,压力的影响最为显著,因压力而产生的变化得到了深入的研究,压力的影响主要表现在如下几个方面。

1) 晶粒细化

压力和熔点的变化满足克拉伯龙方程,熔点升高会产生较大的过冷度,增加形核率,细化晶粒。压力条件下动态凝固,迫使熔体发生相对流动,相对流动加速了晶粒的游离、熔断和增殖,这些均使形核率大大增加,细化晶粒^[72]。晶粒尺寸和屈服强度满足 Hall-petch 经验公式:

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \quad (1)$$

式中: d 为晶粒直径; K 为常数; σ_0 为阻止位错滑移摩擦力; σ_s 为屈服强度

由式(1)可知,晶粒越小,铸件屈服强度越高。细化晶粒不但可提高铸件的强度,同时还可以改善铸件的塑性和韧性。

2) 凝固速率增加

压力迫使金属和模具紧密接触,有效接触面积和界面传热系数增加,凝固速率增大。凝固速率和枝晶间距满足定量关系:

$$\lambda D_{gr} = Av_c^{-n} \quad (2)$$

式中: v_c 为冷却速率; A 为和溶质浓度相关系数; n 为铝合金参数; λ 为平均枝晶臂间距; D_{gr} 为晶粒尺寸。

由式(2)可知,随着凝固速率的增加,晶粒尺寸和枝晶臂间距都会减小^[73]。而二次枝晶臂间距与抗拉强度满足如下线性关系^[74]:

$$\sigma_b = 329.3 - 0.16d \quad (3)$$

式中: d 为二次枝晶臂间距; σ_b 为抗拉强度。

二次枝晶臂间距也可以表示为密度或硬度的三阶非线性函数^[75],二次枝晶间距对产品的抗拉强度、硬度和密度等力学性能影响显著,故增大凝固速率可以改善产品力学性能。这也可以解释为什么制件的力学性能随着压力的增加会出现峰值。

3) 孔隙率会有明显的减小

压力可以增加气体的溶解度,产品密度随着压力增加稳定上升,当施加的压力超过 100 MPa 时,产品密度接近理论值,并维持恒定,故压力超过 100 MPa 能够完全消除气孔、缩孔缩松^[76]。

浇铸温度和模具温度对力学性能的影响和压力相似,影响凝固过程中的凝固速率,直观表面在铸件冷却曲线上,冷却曲线梯度不仅随着压力的增加而增加,而且随着模具温度和熔体过热度的变化,冷却曲线轮廓会发生变化,凝固速率会发生变化,进而影响产品的性能^[77-78]。分析凝固时间对力学性能影响的规律发现,合金的密度、断裂能、冲击能、屈服强度和最终抗拉强度均与凝固时间有关,凝固时间越短,其性能值越高^[76]。

4.1.2 组织分析

产品组织决定其力学性能,相比于其他成形工艺,挤压铸造产品组织致密、晶粒细小。晶粒度、组织形貌、组织分布情况是组织分析的重要内容,是提高产品力学性能和优化成形工艺的基础。

组织均匀是高品质产品的要求,尤其是安全构

件,然而在成形过程中不可避免的出现组织非均质现象(或组织偏聚)。对比研究低压铸造、铸旋、挤压铸造成形轮形件组织不均均现象发现非均匀程度随着压力的增加而减轻,但是非均质的分布随着压力作用方式和压力的高低而变得更加复杂^[79]。挤压铸造成形异形结构件,内部存在压力梯度,压力差异使得界面传热系数、凝固速率以及塑性变形出现差异,这就会导致铸造件凝固组织形貌不一致、致密度不均匀等缺陷^[17],区域效应明显。不同区域组织性能差异过大,可能导致失效提前发生,对组织不均质规律的研究和不均匀程度的控制研究是非常有必要的。

MALEKI 等^[80]研究了工艺参数对 LM13 合金微观结构的影响,结果显示压力使晶粒尺寸减小,初生 α 相二次枝晶间距,共晶硅的长宽比降低,形状更加均匀,但加压 100 MPa 以上,变微观结构的化不再明显。模具温度和浇铸温度对微观结构影响相似,前者更加显著,如图 4 所示。

卢磊等^[81]研究了浇注温度对挤压铸造 Al-6.8Zn-2.5Mg-2.0Cu 合金微观结构的影响。浇注温度一定,挤压铸造相对金属型重力铸造微观组织得到显著细化;挤压力一定时,初生 $\alpha(\text{Al})$ 相二次枝晶间距随着浇注温度的增加有减小后增大的变化趋势,在浇注温度达到 720 °C 时,初生 α 相二次枝晶间距最小。

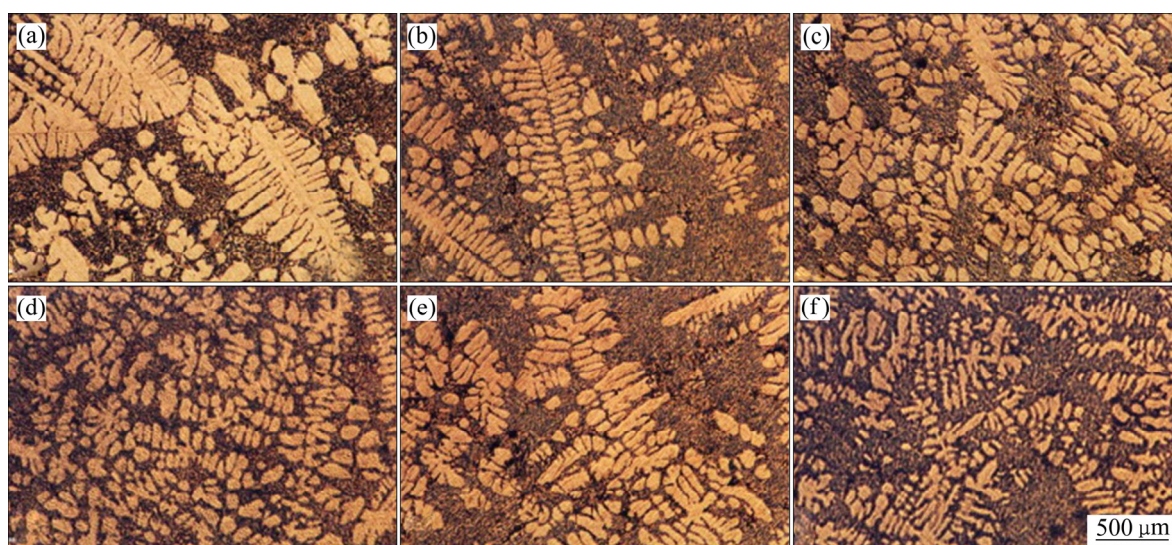


图 4 比压对挤压铸造 LM13 合金微观组织影响^[80]

Fig. 4 Effect of external pressure on microstructure of squeeze cast LM13 alloy^[80]: (a) 0 MPa; (b) 20 MPa; (c) 53 MPa; (d) 106 MPa; (e) 171 MPa; (f) 211 MPa

总的来说,压力是影响微观结构最显著因子,主要体现在晶粒度、二次枝晶间距、共晶相和第二相形貌、组织均质化、组织致密度(孔隙率)等方面;热参数如模具温度、浇注温度等对微观组织结构的影响主要体现在对晶粒度的影响。

4.2 工艺优化

工艺优化是基于实验验证,利用现代技术手段,用尽可能少的实验时间和成本实现消除铸造缺陷,提升产品性能。其中基于数值模拟的工艺优化多用来消除铸造缺陷,基于优化技术的工艺参数优化用来提升产品性能。

对某特定工艺参数,可以直接通过实验探究,而对工艺参数组的优化是基于优化技术,该技术有正交实验法、田口法以及现代优化算法优化的方法,现代优化算法有神经网络(ANN)、遗传算法(GA)、响应面法(RSM)等。

田口法结合了实验设计理论和质量损失函数,是一种有效的离线质量控制方法,可以提高产品设计和系统的性能,并显著减少实验时间和成本。面向工艺参数优化,田口法采用正交阵列的特殊设计来研究整个工艺参数空间,只需要少量实验即能解决实验的复杂性;信噪比具有望大特性,最优工艺参数可以提高系统的信噪比。还可以进行方差统计分析(ANOVA),工艺参数的贡献率大小可以通过百分率形式直接表达出来。建立性能随着挤压铸造工艺参数变化的数学模型是运用现代优化算法前提,该数学模型作为目标函数,通过优化算法可以找到更优的工艺参数解^[82-83]。SENTHIL 等^[84]分别运用田口法和遗传算法优化了工艺参数,并对优化后的工艺参数进行实验验证,通过宏观、微观结构和屈服强度三个方面的比较发现遗传算法对参数的优化效果较田口法要好。

4.3 典型结构件研究

挤压铸造产品具有优良的力学性能和组织质量,是重要承力构件的优选工艺,当前典型类零件有轴套类、轮盘盖类、叉架座类、箱体类零件^[85]。为满足轻量化需求,当前对汽车铝合金挤压铸造件的开发应用较为集中,如铝合金轮毂、转向节、副车架、控制臂、变速箱箱体等。宇部兴产株式会社

对汽车轮毂、转向节、副车架、刹车卡钳、阀体等典型铝合金零件进行了挤压铸造工艺研究,其部分产品如图5所示^[60]。

4.3.1 轮毂

轮毂是车辆的主要的承重结构件,在运行过程中会受到在不同路况下不同程度的冲击,故对轮毂的力学性能及其内部组织质量有较高的要求,其中铝合金轮毂以其轻质高强、尺寸精度高、结构形状美观的特点深受消费者和厂家青睐。铝合金轮毂成形工艺比较丰富,其中挤压铸造成形轮毂力学性能优于其他成形工艺(锻造轮毂除外),因此,挤压铸造有着广阔的应用前景。目前,由于在工艺稳定性、成熟度方面的差距,国内挤压铸造轮毂力学性能同国外有较大差距^[86]。

近些年来,科研人员对铝合金挤压铸造轮毂成形工艺、组织性能以及组织缺陷预测和控制做了许多研究。铝合金轮毂的材料体系主要为铝硅系合金、铝铜系合金,其中高强韧铝铜系合金轮毂多用来装备特种装备。根据车辆不同负载和用途,铝合金轮毂结构形式有所差别,比如民用汽车轮毂和特种车辆轮毂(负重轮)。

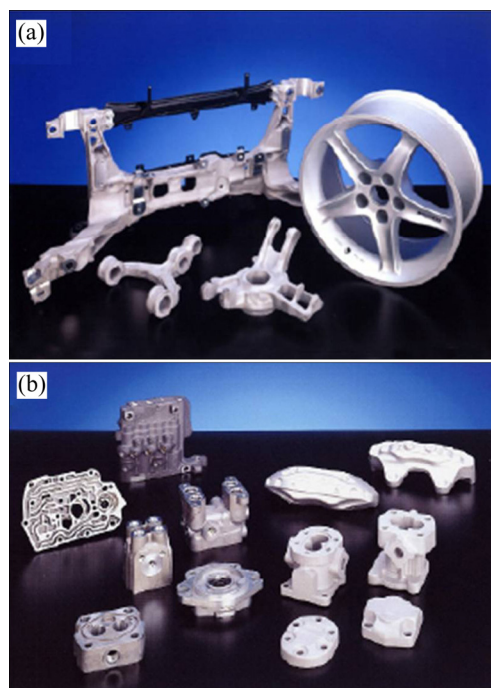


图5 部分铝合金挤压铸造产品^[60]

Fig. 5 Part of aluminum squeeze casting products^[60]. (a) Special-shaped structural parts; (b) Regular-shaped structural parts

成形工艺结合轮毂的结构特点对凝固方式、凝固顺序、凝固速度的研究对组织演变规律分析有指导性作用。轮毂结构较为复杂、壁厚不均、熔体流程长,压力、温度、流动性等方面存在区域效应,组织性能不均匀性明显。挤压铸造轮毂组织特点是铸态组织和变形组织共存,以铸造组织为主。变形组织在热处理过程中会发生回复和再结晶,抗拉强度和伸长率均优于铸态组织性能^[87]。对负重轮不同部位的显微组织、力学性能进行对比分析发现,组织特征和轮毂的力学性能有良好的对应关系。底部压力结晶区晶粒细小、少枝晶,直壁处晶粒尺寸差异明显,质量较差,压力结晶区抗拉强度和伸长率较高,直壁处力学性能最差^[88]。

在实际生产过程中轮毂容易出现缩孔、缩松、裂纹缺陷。数值模拟发现轮辋热节处存在孤立的液相区,补缩通道凝固缺少补缩流,压力也不足以使其发生塑性变形完成补缩,容易产生缩孔、缩松,模拟预测的结果在实验中也得到了验证^[46]。应力场数值模拟发现热节处应力值最大,凝固后期轮毂表面受压应力,而热节处由于孤立液相区凝固收缩受到阻碍而受拉应力,容易出现裂纹^[89]。热节处容易产生铸造缺陷是需要重点关注的危险区域。

成分偏析和组织偏聚可能会造成车轮不同部位组织性能差别过大,导致产品报废,需要对偏析和组织偏聚加以控制。通过对工艺参数调整以及对模具温度场的控制,尽可能实现同时凝固,不均质现象可以得到较好的控制^[16,90]。

工艺参数优化对产品质量的调控是有限度的,产品质量的进一步提升,需要在加压方式上做文章。对负重轮性能较差直壁部分局部加压(或局部加载),直壁部分的密度接近于底部压力结晶区密度,力学性能得到了有效提高;缩孔缩松、裂纹等铸造缺陷随着补缩量增大逐渐消失;制件组织不均质情况得到改善,组织趋向于均匀,力学性能也接近均匀化^[91]。局部加载对改善制件局部力学性能、组织和性能的均匀性以及缺陷消除具有重要的意义,非常具有实用价值,应用前景广阔。

4.3.2 转向节

转向节是汽车底盘重要的安全构件,形状较为复杂,具有连接、承载、转向功能,服役条件复杂,对性能、内部质量要求较为严格。为满足汽车轻量化发展的要求,近几年铝合金替代球墨铸铁已成为

发展趋势。

运用数值模拟对铝合金转向节不同工况应力、应变及疲劳磨损分析,以确定满足使用条件,目标强度 ≥ 230 MPa,疲劳最大损伤值和球墨铸铁相当。运用数值模拟对工艺过程模拟分析确定最佳的工艺参数,对在模拟、生产实践过程中出现的缩孔缩松缺陷,采取局部加载和水冷的手段可以彻底解决。挤压铸造铝合金转向节屈服强度大于 230 MPa、伸长率大于 10%,力学性能完全满足使用要求。经探伤检测、静力破坏性试验、整车试验等一系列相关试验,铝合金转向节完全满足其使用要求^[92-93]。

铝合金转向节铸件性能级别大部分停留在 300 MPa 左右,尚且无法满足高端车型对转向节的性能要求,其多采用精密锻件。李宇飞等对提高铸件性能做出了尝试,对 Al-Si-Cu-Mg 合金成分优化,采用间接挤压+局部补压的方式进行挤压铸造,当挤压力为 120 MPa 时,晶粒细化,内部组织良好,平均屈服强度高达 409 MPa^[94]。对高性能的铸件的研究未来是挤压铸造的研究趋势。

4.3.3 副车架

副车架是汽车底盘的重要构件,欧系、美系和日系等高端车型上已成熟的使用铝合金代替钢铁生产副车架,我国铝合金副车架还处于推广应用阶段^[95]。副车架尺寸大,结构复杂,且壁厚差较大,对成形工艺提出了较高的要求。数值模拟预测结合生产实践验证,优化工艺,进而实现对组织和力学性能控制。经实验验证副车架较为理想的工艺参数为:浇铸温度 700 °C,模具温度 200 °C,冲头比压 95~100 MPa。经 T6 热处理抗拉强度可以达到 290 MPa 左右,伸长率在 9%左右。对存在的缩孔缩松的铸造缺陷可以通过局部加压得到一定程度消除,但是不能得到彻底的解决^[96]。

4.3.4 其他铝合金零件

其他典型铝合金零件有连杆、控制臂、螺旋座、空调器摇盘等。挤压铸造连杆经 T6 热处理平均屈服强度可以达到 358 MPa,平均伸长率可以达到 5.1%,远高于压铸连杆的 243 MPa、3.1%,微观组织致密,几乎不产生偏析和缩孔缩松的铸造缺陷^[97]。挤压铸造控制臂抗拉强度大于 310 MPa,屈服强度大于 240 MPa,晶粒细小,二次枝晶间距平均 16 μm ,完全满足生产技术要求。随着挤压力提高,控制臂充型末端、厚壁处缩孔缩松缺陷得到消

除,力学性能得到提升^[98-99]。铝合金挤压铸造控制臂性能提升可以用来替代球墨铸铁控制臂和控制臂的锻造工艺。挤压铸造空调器摇盘在浇注温度740℃、模具温度280℃、比压140 MPa最佳工艺条件下成形,抗拉强度可以达到310~330 MPa,铸件组织质量良好,不存在铸造缺陷,断口韧窝较多,有一定塑性能力^[100]。挤压铸造螺旋座抗拉强度可以达到320 MPa,屈服强度达到260 MPa,伸长率达到6.02%。压射速度过大可能产生涡流,卷入气体和夹杂物,同时熔体快速冲刷模腔,形成大量“游离晶体”,作为核心形核,有效细化晶粒提高产品性能,采用分段加速的工艺手段,可以“扬长避短”^[101]。

总的来说,挤压铸造产品力学性能和组织质量很有竞争力,经过热处理抗拉强度大于300 MPa,屈服强度在250 MPa左右,组织质量良好。针对上述中小型零件可以通过优化工艺参数,消除铸造缺陷,具有生产效率的优势。

5 发展方向展望

挤压铸造已经进入到针对具体产品推广应用阶段,更多关注的是生产效率、成本、产品质量和性能以提高竞争力,发展方向主要体现在如下几个方面。

1) 深度发展数值模拟技术。数值模拟结合实验验证的思路被普遍认可,被广泛用于工艺优化、模具和产品结构优化设计,数值模拟指导性作用变的尤为重要。

2) 依据产品的特殊需要为导向,开发专用挤压铸造设备,同时兼顾专用设备成本。根据具体产品特殊需求有针对性开发系列化专用设备,性能参数更能符合实际成形需求,当前专用设备存在价格较高的问题,限制了设备专业化程度的提升,开发低成本、高效率挤压铸造设备,更能满足实际生产需求。

3) 提高模具寿命。模具使用寿命越长可以摊薄相应的设备成本,减少模具修配的时间成本,能够有效的节约成本,提升挤压铸造竞争力。

4) 加强对大壁厚差复杂铝合金结构件的局部加载强制补缩研究。大壁厚差复杂结构件容易在厚壁热节处存在铸造缺陷,对成形工艺提出较高要

求,局部加载定域补缩技术的应用对提升产品性能,消除铸造缺陷有广阔的实用价值,也具备研究价值。

5) 扩大挤压铸造适用范围。基于传统挤压铸造融合其他先进理论技术衍生出的新技术以及新的应用方向,将为挤压铸造行业的发展注入新动力。

6 结语

挤压铸造产品质量优良表现在表面质量好,尺寸精度高,组织致密,晶粒细小,偏析程度低,力学性能提高等方面。就具体产品而言,成形工艺对组织性能的影响规律以及最优工艺参数的探究最为集中,而服务工艺的设备、模具、合金三要素也被广泛关注。系列化的专用挤铸设备工艺适用性更加广泛,生产过程实时可控,性能稳定。模具使用寿命是限制挤压铸造行业发展的重要环节,模具结构优化设计和模具寿命的提升尤为重要。挤压铸造对合金材料的使用具有独特优势既可适应铸造铝合金,又可适应与锻造铝合金。数值模拟技术的应用具有指导性作用,数值模拟与行业融合度越来越高。深度发展数值模拟技术、开发低成本高效率挤压铸造装备、提高模具寿命、加大对大壁厚差类构件的局部加载强制补缩技术研究以及扩宽材料应用体系是挤压铸造发展的重要方向。挤压铸造技术在成形制造组织致密、气密性、表面质量和力学性能要求高、大壁厚差类铝合金结构件方面具有广阔的市场前景。

REFERENCES

- [1] 罗守靖,陈炳光,齐丕骧. 液态模锻与挤压铸造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 1-3.
LUO Shou-jing, CHEN Bing-guang, QI Pi-xiang. Liquid forging and squeeze casting[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 1-3.
- [2] GHOMASHCHI M R, VIKHROV A. Squeeze casting: An overview[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 101(4): 1-9.
- [3] RAJAGOPAL S. Squeeze casting: A review and update[J]. J Applied Met Working, 1981, 1(4): 3-14.
- [4] LYNCH R F, OHIO T. Squeeze apparatus and method: United States Patent. Granted No.4049040[P]. 1977-09-20.

- [5] 齐丕骧. 挤压铸造优质铸件的发展[J]. 铸造纵横, 2013(8): 39–46.
QI Pi-xiang. The development of high-quality squeeze castings[J]. Foundry Panorama, 2013(8): 39–46.
- [6] ROSSO M, PETER I, BIVOL C, et al. Development of industrial components by advanced squeeze casting[J]. International Journal of Material Forming, 2010, 3(S1): 787–790.
- [7] HONG C P, SHEN H F, LEE S M. Prevention of macrodefects in squeeze casting of an Al-7 Wt Pct Si alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2000, 31(2): 297–305.
- [8] KIMURA R, YOUSHIDA M, SASAKI G, et al. Influence of abnormal structure on the reliability of squeeze castings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130/131: 299–303.
- [9] 张卫文, 齐丕骧, 朱德智, 等. 铸造技术路线图: 挤压铸造[J]. 铸造, 2017, 66(6): 535–540.
ZHANG Wei-wen, QI Pi-xiang, ZHU De-zhi, et al. Casting technology roadmap: Squeeze casting[J]. Foundry, 2017, 66(6): 535–540.
- [10] 邢书明. 挤压铸造合金材料及其工艺性能[J]. 铸造, 2015, 64(7): 628–631.
XING Shu-ming. Alloys for squeeze casting and their processing properties[J]. Foundry, 2015, 64(7): 628–631.
- [11] 邢书明, 李春奎. 金属挤压铸造工艺性能表征与试验方法[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(6): 601–605.
XING Shu-ming, LI Chun-kui. The characteristic parameters and experimental methods of processing properties of metal squeeze casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 36(6): 601–605.
- [12] 陈邦峰, 贾泮江, 刘国利, 等. ZL205A 铝合金铸件偏析缺陷分析和等级研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(11): 994–997, 974.
CHEN Bang-feng, JIA Pan-jiang, LIU Guo-li, et al. Analysis and grade research of segregation defects in ZL205A aluminum alloy castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2009, 29(11): 994–997, 974.
- [13] 侯立群, 乔小蒙, 李素梅, 等. 挤压铸造 2A50 合金不同固溶处理状态的显微组织和偏析缺陷[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(6): 46–50.
HOU Li-qun, QIAO Xiao-meng, LI Su-mei, et al. Microstructure and segregation of squeeze cast 2A50 aluminum alloy after different solution treatment[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37(6): 46–50.
- [14] GALLERNEAULT M, DURRANT G, CANTOR B. The squeeze casting of hypoeutectic binary Al-Cu[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27(12): 4121–4132.
- [15] KIM S, DURRANT G, LEE J, et al. The microstructure of direct squeeze cast and gravity die cast 7050 (Al-6.2Zn-2.3Cu-2.3Mg) wrought Al alloy[J]. Journal of Materials Synthesis and Processing, 1998, 6(2): 75–87.
- [16] SCHWERDTFEGGER K, HEILEMANN J. Squeezing segregation-investigation with laboratory experiments[J]. ISIJ International, 2006, 46(1): 70–74.
- [17] 刘文鑫. 液态模锻 A356 轮毂不均质性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
LIU Wen-xin. Research on the inhomogeneity of the A356 wheel by squeeze casting technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [18] HONG C P, SHEN H F, CHO I S. Prevention of macrosegregation in squeeze casting of an Al-4.5 wt pct Cu alloy[J]. Metall Mater Trans A, 1998, 29(1): 339–349.
- [19] 甘耀强, 张大童, 张卫文, 等. 挤压铸造对 Al-Cu 合金显微组织及溶质分布的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(6): 532–537.
GAN Yao-qiang, ZHANG Da-tong, ZHANG Wei-wen, et al. Effects of squeeze casting on microstructure and solute distribution in Al-Cu alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2012, 32(6): 532–537.
- [20] CHATTOPADHYAY H. Simulation of transport processes in squeeze casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186(1/3): 174–178.
- [21] 郭莉军. 铝合金液态模锻件偏析行为的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
GUO Li-jun. Research on the segregation behavior of liquid forging workpiece of aluminium alloy[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [22] 钟 勇, 阎德胜, 苏国跃, 等. LY12 合金的挤压铸造微观偏析及改善方法[J]. 金属学报, 2001, 37(1): 42–46.
ZHONG Yong, YAN De-sheng, SU Guo-yue, et al. Microsegregation and improving method of a squeeze cast LY12 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(1): 42–46.
- [23] GRIFFITHS W D. The heat-transfer coefficient during the unidirectional solidification of an Al-Si alloy casting[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1999, 30(3): 473–482.
- [24] NAYAK R K, SUNDARRAJ S. Selection of initial mold-metal interface heat transfer coefficient values in casting simulations—A sensitivity analysis[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2010, 41(1): 151–160.

- [25] WANG F, WU K Y, WANG X Y, et al. Measurement of temperature inside die and estimation of interfacial heat transfer coefficient in squeeze casting[J]. China Foundry, 2017, 14(5): 327–332.
- [26] SUN Z, HU H, NIU X. Experimental study and numerical verification of heat transfer in squeeze casting of aluminum alloy A443[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2012, 43(6): 1676–1683.
- [27] 李俊文, 赵海东, 吴朝忠, 等. 铝合金挤压铸造过程界面的传热行为[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(11): 2727–2734.
- LI Jun-wen, ZHAO Hai-dong, WU Chao-zhong, et al. Interfacial heat transfer behavior of aluminum alloy during squeeze casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(11): 2727–2734.
- [28] 李俊文, 赵海东, 吴朝忠. A356 铝合金挤压铸造界面传热系数的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(3): 269–272.
- LI Jun-wen, ZHAO Hai-dong, WU Chao-zhong. Interfacial heat transfer coefficient of squeeze casting A356 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(3): 269–272.
- [29] AWEDA J O, ADEYEMI M B. Experimental determination of heat transfer coefficients during squeeze casting of aluminium[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(3): 1477–1483.
- [30] ZHANG D L, CANTOR B. A numerical heat flow model for squeeze casting Al alloys and Al alloy/SiC_p composites[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 1995, 3(1): 121–1330.
- [31] FARDI-ILKHCHY A, JABBARI M, DAVAMI P. Effect of pressure on heat transfer coefficient at the metal/mold interface of A356 aluminum alloy[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, 39(5): 705–712.
- [32] WANG F F, ZHAO X T, LIU J H, et al. Study on the relationship between interfacial heat transfer coefficient and interface pressure in squeeze casting by using microscopic contact model[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 152: 106–300.
- [33] 赵信毅, 王国庆, 范作祥, 等. AC4B 铝合金与 H13 金属型的传热系数计算[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(7): 690–692.
- ZHAO Xin-yi, WANG Guo-qing, FAN Zuo-xiang, et al. Calculation of interface heat transfer coefficient between casting aluminum and H13 permanent mould[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(7): 690–692.
- [34] HAMASAIID A, DARGUSCH M S, DAVIDSON C J, et al. Effect of mold coating materials and thickness on heat transfer in permanent mold casting of aluminum alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2007, 38(6): 1303–1316.
- [35] 闫盛青, 林有希, 郑开魁, 等. 金属型铸造模具涂料研究进展[J]. 热加工工艺, 2019, 48(3): 11–14.
- YAN Sheng-qing, LIN You-xi, ZHENG Kai-kui, et al. Research progress of mould coatings for metal mould casting[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(3): 11–14.
- [36] 刘占凯. 镁合金挤压铸造涂料的制备及其工艺研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- LIU Zhan-kai. The preparation and technologic study for Mg-alloys squeeze casting coating[D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [37] 杨 屹, 蒋玉明, 刘力菱, 等. 铸件凝固过程中热应力场及热裂的数值模拟研究分析[J]. 铸造技术, 2000(2): 36–39.
- YANG Yi, JIANG Yu-ming, LIU Li-ling, et al. Numerical simulation of thermal stress fields and crack in casting solidification process[J]. Found Technol, 2000(2): 36–39.
- [38] TANG J, HAN Z Q, WANG F F, et al. A coupled thermo-mechanical simulation on squeeze casting solidification process of three-dimensional geometrically complex components[C]// Advances in the Science and Engineering of Casting Solidification. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2015: 113–120.
- [39] 韩志强, 朱 维, 柳百成. 挤压铸造凝固过程热-力耦合模拟 I 数学模型及求解方法[J]. 金属学报, 2009, 45(3): 356–362.
- HAN Zhi-qiang, ZHU Wei, LIU Bai-cheng. Thermo-mechanical modeling of solidification process of squeeze casting I Mathematic model and solution methodology[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(3): 356–362.
- [40] 朱 维, 韩志强, 柳百成. 挤压铸造凝固过程热-力耦合模拟 II 模拟计算及实验验证[J]. 金属学报, 2009, 45(3): 363–368.
- ZHU Wei, HAN Zhi-qiang, LIU Bai-cheng. Thermo-mechanical modeling of solidification process of squeeze casting II Numerical simulation and experimental validation[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(3): 363–368.
- [41] HIMADRI C. Simulation of tranport processes in squeeze casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186: 174–178.
- [42] 吉晓霞, 郭建政, 李绍敏, 等. 三种铸造模拟软件对铸钢件铸造模拟之比较[J]. 铸造, 2013, 62(11): 1084–1088.
- JI Xiao-xia, GUO Jian-zheng, LI Shao-min, et al. Evaluation of three casting simulation packages on a steel casting[J].

- Foundry, 2013, 62(11): 1084–1088.
- [43] 叶明松, 罗继相, 江玉华, 等. 挤压铸造数值模拟前处理技术研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(7): 635–637, 585–585.
- YE Ming-song, LUO Ji-xiang, JIANG Yu-hua, et al. Pre-processing technologies for numerical simulation of squeezing casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2009, 29(7): 635–637, 584–585.
- [44] BABAE M H, MALEKI A, NIROUMAND B. A novel method to improve interfacial bonding of compound squeeze cast Al/Al-Cu macrocomposite bimetals: Simulation and experimental studies[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(6): 1184.
- [45] LI Y Z, YANG H B, XING Z W. Numerical simulation and process optimization of squeeze casting process of an automobile control arm[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88: 941–947.
- [46] 陈玖新, 代颖辉, 张川吉, 等. 基于 Pro CAST 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.
- CHEN Jiu-xin, DAI Ying-hui, ZHANG Chuan-ji, et al. Numerical simulation of casting forming for squeeze casting heavy load wheel on Pro CAST[J]. Foundry, 2015, 64(7): 639–642.
- [47] 郝刚, 刘艳春. 基于 ProCast 的汽车制动器壳体挤压铸造工艺数值模拟[J]. 热加工工艺, 2019, 48(9): 87–89.
- HAO Gang, LIU Yan-chun. Numerical simulation of squeeze casting process for automobile brake shell based on Pro Cast[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(9): 87–89.
- [48] 李俊萍. 基于数值模拟的负重轮挤压铸造工艺研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- LI Jun-ping. Research on squeeze casting process of the loading wheel based on numerical simulation[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- [49] 李春龙, 郑伟刚, 阳鑫, 等. 汽车发动机附件支架挤压铸造数值模拟研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(1): 63–65, 68.
- LI Chun-long, ZHENG Wei-gang, YANG Xin, et al. Numerical simulation research of squeeze casting for automotive engine accessories stent[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(1): 63–65, 68.
- [50] 许若震, 姜银方, 孟祥豹, 等. 汽车前副车架挤压铸造数值模拟研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(21): 94–96.
- XU Ruo-zhen, JIANG Yin-fang, MENG Xiang-bao, et al. Numerical simulation research of squeeze casting for vehicle sub-frame[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(21): 94–96.
- [51] 傅骏, 蒯虹宾, 吴代建, 等. 基于文献计量学的国内铸造 CAE 文献综述[J]. 四川工程职业技术学院学报, 2015, 29(2): 70–74.
- FU Jun, LIN Hong-bin, WU Dai-jian, et al. The summarize about domestic casting CAE papers based on bibliometric[J]. Journal of Sichuan Engineering Vocational and Technical College, 2015, 29(2): 70–74.
- [52] 杨力伟. 铸造 CAE 技术的现状与未来发展趋势[J]. 一重技术, 2015(3): 62–66.
- YANG Li-wei. Present status and future development trend of casting CAE technology[J]. CFHI Technology, 2015(3): 62–66.
- [53] 齐丕骧. 我国挤压铸造机的现状与发展[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(4): 305–308.
- QI Pi-xiang. The current situation and development of squeeze casting machine in China[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30(4): 305–308.
- [54] 唐多光, 徐张翼, 沈友良. 铝合金挤压铸造若干技术问题的讨论[J]. 特种铸造及有色合金, 2002, 22(6): 28–29.
- TANG Duo-guang, XU Zhang-yi, SHEN You-liang. Discussion on several technical problems of aluminum alloy squeeze casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2002, 22(6): 28–29.
- [55] YAMAGUCHI T U, UCHIDA M. Vertical die casting machines: United States Patent, Granted No.4088178[P]. 1978–05–09.
- [56] IWAMOTO N, TSUBOI H, KANEKO T. Method of and system for operating squeeze die cast machine: USP 4932458[P]. 1990–06–12.
- [57] LEE H I, KIM K B, HAN Y S. Vertical squeeze casting apparatus: USP 5595236[P]. 1997–01–21.
- [58] 邓建新, 邵明, 游东东. 挤压铸造设备现状及发展分析[J]. 铸造, 2008(7): 643–646.
- DENG Jian-xing, SHAO Ming, YOU Dong-dong. Current status and development of squeeze casting machines[J]. Foundry, 2008(7): 643–646.
- [59] 齐丕骧. 挤压铸造技术的最新发展[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(9): 688–694.
- QI Pi-xiang. The latest development of squeeze casting technology[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2007, 27(9): 688–694.
- [60] 宇部兴产机械株式会社. 挤压铸造机详细信息[EB/OL]. <https://www.ubemachinery.co.jp/product/diecast-squeeze.html>.
- UBE. Squeeze casting machine details[EB/OL]. <https://www.ubemachinery.co.jp/product/diecast-squeeze.html>.
- [61] 宋雷, 邵明, 游东东. 挤压铸造设备的研究进展与发展趋势[J]. 铸造, 2010, 59(10): 1039–1043.

- SONG Lei, SHAO Ming, YOU Dong-dong. Research and development of squeezing casting equipment[J]. Foundry, 2010, 59(10): 1039-1043.
- [62] 张卫文, 赵海东, 张大童, 等. 金属材料挤压铸造成形技术的研究进展[J]. 中国材料进展, 2011, 30(7): 24-32.
- ZHANG Wei-wen, ZHAO Hai-dong, ZHANG Da-tong, et al. Progress in technology of squeeze casting for metal materials[J]. Materials China, 2011, 30(7): 24-32.
- [63] 李杰华, 郝启堂. 铝合金熔体净化技术的现状及其发展趋势[J]. 中国铸造装备与技术, 2005(6): 1-4.
- LI Jie-hua, HAO Qi-tang. The current situation and the tendency of the purification technology of molten aluminum alloy[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2005 (6): 1-4.
- [64] 郭洪钢. 液态模锻模具关键参数的设计准则研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- GUO Hong-gang. Study on design criterion of the critical squeeze casting die parameters[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [65] 叶明松, 罗继相, 王建良, 等. 基于 Cult 3D 的挤压铸造模具虚拟现实设计[J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28(12): 923-924.
- YE Ming-song, LUO Ji-xiang, WANG Jian-liang, et al. Virtual reality design of squeeze casting die based on Cult 3D[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2008, 28(12): 923-924.
- [66] 胡宁波. 基于 CAE 分析的压铸模具失效区域预测及仿生强化技术研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2014.
- HU Ning-bo. Research on die casting die failure area prediction and bionic strengthening technology based on CAE analysis[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2014.
- [67] 张密兰. 合金熔体对金属模具的热-力作用行为研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- ZHANG Mi-lan. Thermal-force action of permanent die caused by alloy melt[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [68] 倪正顺. 铝热挤压模具热力耦合数值分析与结构优化设计研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- NI Zheng-shun. The research on the coupled thermal-mechanical numerical analysis and the structure optimal design to aluminum hot extrusion dies[D]. Changsha: Central South University, 2006.
- [69] SRIVASTAVA A, JOSHI V, SHIVPURI R. Computer modeling and prediction of thermal fatigue cracking in die-casting tooling[J]. Wear, 2004, 256(1/2): 38-43.
- [70] KLOBČAR D, TUŠEK J. Thermal stresses in aluminium alloy die casting dies[J]. Computational Materials Science, 2008, 43(4): 1147-1154.
- [71] 刘剑峰. 液态模锻涡旋盘工艺优化及偏析行为的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- LIU Jian-feng. Research on process optimization and segregation behavior of liquid forging scroll plate[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [72] 高文林, 孙进宝, 王海龙, 等. 挤压铸造 Al-6.4Cu-0.4Mn 合金轮毂的组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(10): 1069-1074.
- GAO Wen-lin, SUN Jin-bao, WANG Hai-long, et al. Microstructure and properties of squeeze casting Al-6.4Zn-0.4Mn alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 36(10): 1069-1074.
- [73] ESKIN D, DU Q, RUVALCABA D, et al. Experimental study of structure formation in binary Al-Cu alloys at different cooling rates[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 405(1/2): 1-10.
- [74] 李庆春, 周彼德, 曾松岩. 铸造铝铜合金在固液态时的热脆弱区[J]. 机械工程材料, 1983(1): 60-63.
- LI Qingchun, ZHOU Bi-de, ZENG Song-yan. Thermal fragile zone of cast aluminum-copper alloy in solid and liquid state[J]. Materials for Mechanical Engineering, 1983(1): 60-63.
- [75] PATEL G C M, KRISHNA P, PARAPPAGODAR M B. Squeeze casting process modeling by a conventional statistical regression analysis approach[J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(15/16): 6869-6888.
- [76] YANG L J. The effect of solidification time in squeeze casting of aluminium and zinc alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192/193: 114-120.
- [77] MALEKI A, NIROUMAND B, SHAFYEI A. Effects of squeeze casting parameters on density, macrostructure and hardness of LM13 alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 428(1/2): 135-140.
- [78] AMIN K M, MUFTI N A. Investigating cooling curve profile and microstructure of a squeeze cast Al-4%Cu alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(8): 1631-1639.
- [79] 邢书明, 郭莉军, 刘文鑫, 等. 压力成形轮形件的非均质现象[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(4): 1-6.
- XING Shu-ming, GUO Li-jun, LIU Wen-xin, et al. Inhomogeneous of wheel under pressure forming process[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(4): 1-6.
- [80] MALEKI A, SHAFYEI A, NIROUMAND B. Effects of squeeze casting parameters on the microstructure of LM13 alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009,

- 209(8): 3790–3797.
- [81] 卢磊, 张大童, 张卫文, 等. 浇注温度和固溶温度对挤压铸造 Al-6.8Zn-2.5Mg-2.0Cu 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(5): 492–495.
- LU Lei, ZHANG Da-tong, ZHANG Wei-wen, et al. Effects of pouring temperature and solid solution temperature on microstructure and mechanical properties of squeeze casting Al-6.8Zn-2.5Mg-2.0Cu alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(5): 492–495.
- [82] SENTHIL P, AMIRTHAGADESWARAN K S. Optimization of squeeze casting parameters for non symmetrical AC2A aluminium alloy castings through Taguchi method[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(4): 1141–1147.
- [83] VIJIAN P, ARUNACHALAM V P. Modelling and multi objective optimization of LM24 aluminium alloy squeeze cast process parameters using genetic algorithm[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186(1): 82–86.
- [84] SENTHIL P, AMIRTHAGADESWARAN K S. Experimental study and squeeze casting process optimization for high quality AC2A aluminium alloy castings[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(3): 2215–2225.
- [85] 邢书明, 鲍培玮. 金属液态模锻[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 5.
- XING Shu-ming, BAO Pei-wei. Metal liquid forging[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 5.
- [86] 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.
- WANG Zhan-ku, LÜ Shuo. Forming technology and mechanical properties of aluminium alloy wheels[J]. Foundry Technology, 2016, 37(12): 2738–2743.
- [87] 王长顺, 李宏伟, 陈利华, 等. 特种车辆新型高强韧铝合金负重轮液态模锻工艺成型研究[J]. 新技术新工艺, 2013(7): 88–90.
- WANG Chang-shun, LI Hong-wei, CHEN Li-hua, et al. Research on liquid-state forging of new and high strength-toughness aluminium alloy wheel of special vehicle[J]. New Technology & New Process, 2013(7): 88–90.
- [88] 姜峰, 何波, 刘文琪. 铝铜合金汽车轮毂的液态模锻成形与组织性能研究[J]. 铸造技术, 2018, 39(12): 2798–2801.
- JIANG Feng, HE Bo, LIU Wen-qi. Microstructure & properties of aluminum copper alloy for automotive wheel hubby liquid die forging forming[J]. Foundry Technology, 2018, 39(12): 2798–2801.
- [89] 陈席国. 液态模锻铝合金轮毂温度场与应力场数值模拟[J]. 铸造, 2012, 61(11): 1331–1335.
- CHEN Xi-guo. Numerical simulation on temperature field and stress field of liquid forging aluminum alloy wheel hub[J]. Foundry, 2012, 61(11): 1331–1335.
- [90] 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.
- MA Chun-jiang, CHEN Jiu-xin, GE Su-jing, et al. Microstructure and mechanical properties of squeezing casting aluminum alloy wheel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(10): 1063–1065.
- [91] 曹广祥. 铝合金负重轮液态模锻成形的组织性能均匀化控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- CAO Guang-xiang. Research on homogeneity control of microstructure and mechanical properties for aluminum alloy wheel prepared by liquid forging[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [92] 裴金顺, 刘晓卉, 张健, 等. 某车型挤压铸造铝合金转向节设计与验证[C]// 中国汽车工程学会. 2018 中国汽车工程学会年会论文集. 北京: 机械工业出版社, 2018: 547–550.
- PEI Jin-shun, LIU Xiao-hui, ZHANG Jian, et al. Design and verification of the service life of a vehicle extrusion casting Steering knuckle[C]// China Society of Automotive Engineers. Proceedings of the 2018 Annual Meeting of China Society of Automotive Engineering. Beijing: China Machine Press, 2018: 547–550.
- [93] 任俊成, 衡俐琼, 王泽忠, 等. 挤压铸造铝合金转向节开发[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(7): 735–738.
- REN Jun-cheng, HENG Li-qiong, WANG Ze-zhong, et al. Development of squeeze casting aluminium alloy automobile steering knuckles[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(7): 735–738.
- [94] 李宇飞, 冯志军, 李泽华, 等. 挤压铸造高强度铝合金汽车转向节铸件[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(12): 1308–1311.
- LI Yu-fei, FENG Zhi-jun, LI Ze-hua, et al. Squeeze casting high strength aluminum alloy automobile steering knuckle[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(12): 1308–1311.
- [95] 史东杰, 张宇, 王连波, 等. 汽车铝合金副车架应用现状[J]. 轻合金加工技术, 2015, 43(8): 16–19.
- SHI Dong-jie, ZHANG Yu, WANG Lian-bo, et al. Application status of the automotive subframe of aluminum alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2015, 43(8): 16–19.
- [96] 孙珏, 许善新, 汤杰, 等. 汽车铝合金副车架挤压铸造工艺设计和产品开发[J]. 铸造, 2015, 64(1): 17–21.

- SUN Yu, XU Shan-xin, TANG Jie, et al. Development of squeeze casting technology for manufacturing aluminum alloy subframe for automobile[J]. Foundry, 2015, 64(1): 17–21.
- [97] 唐全波, 杜力. 铝合金连杆的液态模锻成形工艺[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(3): 12–15.
- TANG Quan-bo, DU Li. Liquid forging process of aluminum alloy connecting rod[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(3): 12–15.
- [98] 李宇飞, 余振龙, 石飞, 等. 挤压铸造工艺对汽车控制臂铸件组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(8): 864–866.
- LI Yu-fei, YU Zhen-long, SHI Fei, et al. Effects of squeeze casting process on microstructure and properties of automobile control arm[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38(8): 864–866.
- [99] 单柯日, 黄长明, 刘建平. 铝合金控制臂的轻量化设计及挤压铸造工艺[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(5): 484–487.
- SHAN Ke-ri, HUANG Chang-ming, LIU Jian-ping. Lightweight design of aluminum control arm and its squeeze casting process[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 36(5): 484–487.
- [100] 胡茂良, 赵密, 吉泽升, 等. 挤压铸造工艺对汽车空调器摇盘组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(3): 400–405.
- HU Mao-liang, ZHAO Mi, JI Ze-sheng, et al. Effect of squeezing casting technology on structures and properties of air-conditioner swaying tray of automobile[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(3): 400–405.
- [101] 张鹏, 罗继相, 沈艾迪, 等. A356.2 铝合金螺旋座挤压铸造工艺的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(5): 504–508.
- ZHANG Peng, LUO Ji-xiang, SHENG Ai-di, et al. Microstructure and mechanical properties of squeeze casting A356.2 spring seat[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35(5): 504–508.

Research development of squeeze casting technology of aluminum alloy

JIANG Ju-fu¹, LI Ming-xing¹, WANG Ying²

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Squeeze casting is refined as a process in which liquid metal fills a die cavity and solidifies under pressure. High pressure leads to a refinement of grain size, change of microstructure morphology and adjustment and control of cast defects. Therefore, it is a precise, near-net and green forming technology integrating the advantages of casting and forging technology. At present, aluminum alloy is one of the main materials used in squeeze casting. This paper review and analyze the development status about aluminum alloy squeeze casting technology at home and abroad from five aspects, such as heat and mass transfer theory, numerical simulation technology, the development of aluminum alloy squeeze casting equipment, aluminum alloy squeeze casting technology and outlook of the development direction of aluminum alloy squeeze casting. It aims to provide some reference to the development of aluminum alloy squeeze casting technology and further popularization and application.

Key words: aluminum alloy; squeeze casting; numerical simulation; squeeze casting equipment

Foundation item: Project(2019YFB2006500) supported by the National Key Research Development Program of China; Project(51875124) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2020-09-25; **Accepted date:** 2020-12-26

Corresponding author: JIANG Ju-fu; Tel: +86-18746013176; E-mail: jiangjuFu@hit.edu.cn

(编辑 龙怀中)