

• 今日铸造 Today Foundry •

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2025.4187

消失模铸造工艺研究现状及展望

李秀青^{1,2}, 杨晴霞³, 宁增业², 李锋军⁴, 常云朋⁵, 张杰琼⁴, 何帅伟⁴

(1. 龙门实验室, 河南 洛阳 471000; 2. 河南科技大学 金属材料磨损控制与成型技术国家地方联合研究中心, 河南 洛阳 471003; 3. 河南科技大学 车辆与交通工程学院, 河南 洛阳 471003; 4. 第一拖拉机股份有限公司制造工程中心, 河南 洛阳 471004; 5. 洛阳理工学院 智能制造学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 随着现代工业的快速发展, 传统铸造工艺已经无法完全满足铸件产品高精度、高性能等需求, 而消失模铸造工艺作为一种创新技术, 得到了广泛关注和应用。本文对目前国内外在真空低压消失模铸造、振动消失模铸造、消失模壳型铸造等消失模铸造工艺以及消失模铸造充型过程和凝固过程等模拟仿真技术的研究现状进行了总结, 并对消失模铸造工艺的未来发展进行了展望。

关键词: 消失模铸造; 模拟仿真; 现状; 展望

中图分类号: TG249.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)01-0073-08

Research Status and Prospect of Lost Foam Casting Technology

LI Xiuqing^{1,2}, YANG Qingxia³, NING Zengye², LI Fengjun⁴, CHANG Yunpeng⁵,
ZHANG Jieqiong⁴, HE Shuaiwei⁴

(1. Longmen Laboratory, Luoyang 471000, China; 2. National Joint Engineering Research Center for Abrasion Control and Molding of Metal Materials, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 3. College of Vehicles and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 4. Manufacturing Engineering Center, First Tractor Company Limited, Luoyang 471004, China; 5. School of Intelligent Manufacturing, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: With the rapid development of modern industry, the traditional casting process has been unable to fully meet the high precision, high performance and other requirements of casting products. The lost foam casting process, as an innovative technology, has been widely studied and applied. In this paper, the current research status of the lost foam casting process under vacuum and low pressure, vibration lost foam casting, expendable pattern shell casting, and simulation technology of the filling and solidification process of lost mold casting are summarized. Moreover, the future development of lost mold casting is proposed.

Key words: lost foam casting; simulation; current situation; prospect

随着现代工业的迅速发展, 航空、航天、军工等行业对于铸件产品的精度和性能要求越来越高^[1-3], 传统铸造工艺已无法完全满足需求。消失模铸造工艺是一种利用可发性泡沫塑料制成模型, 通过将其埋入砂型中, 金属液浇注时使模型气化并填充型腔的铸造方法^[4]。与传统的砂型铸造相比, 消失模铸造具有无模分、工艺流程简单、加工余量少、铸件尺寸精度高、表面质量高、自由度高、制造成本低廉等优点,

尤其适用于复杂结构和薄壁零件的铸造^[5-6], 受到学者和企业青睐。由于消失模铸造主要依靠高温熔融金属熔化泡沫模样进行充填成型, 在充型过程中易产生粘砂、冷隔、气孔等铸造缺陷^[7-8]。消失模铸造工艺的关键在于如何提高浇注过程中液态金属的充型能力, 避免缩孔、缩松缺陷, 保证尺寸精度和性能等。本文从消失模铸造工艺和铸造过程理论模拟两方面综述了目前国内外学者们对消失模铸造技术的

收稿日期: 2024-09-27

基金项目: 龙门实验室前沿探索课题(LMQYTSKT001); 河南省软科学研究计划重点项目(242400411010)

作者简介: 李秀青, 1983 年生, 博士, 副教授。研究方向为先进结构与功能材料。Email: li_xq@sina.cn

通信作者: 杨晴霞, 1988 年生, 博士, 副教授。研究方向为机械工程与成型技术。Email: qx_yang@sina.cn

引用格式: 李秀青, 杨晴霞, 宁增业, 李锋军, 常云朋, 张杰琼, 何帅伟. 消失模铸造工艺研究现状及展望[J]. 铸造技术, 2025, 46(1): 73-80.

LI X Q, YANG Q X, NING Z Y, LI F J, CHANG Y P, ZHANG J Q, HE S W. Research status and prospect of lost foam casting technology[J]. Foundry Technology, 2025, 46(1): 73-80.

研究现状,并对其未来发展进行了展望。

1 消失模铸造工艺研究现状

1.1 真空低压消失模铸造工艺

真空低压消失模技术是将真空消失模铸造与低压铸造进行有机结合,兼具两种加工技术的优势^[9],提高了金属液的充型能力,使微观组织得到改善,如图1所示^[10]。Jiang等^[11]综合消失模铸造、熔模铸造以及真空低压铸造技术,针对真空低压熔模壳型铸造工艺展开研究。旨在解决消失模铸造技术(lost foam casting technology, LFC)中气孔、渗碳以及夹杂物等缺陷问题,进而提升铸件表面质量。研究结果表明,该技术具备结构设计灵活、成本低廉、壳型精度高且成型性良好等优势,能够显著增强熔体的填充与补缩能力,有效消除浇不足和冷隔缺陷,使铸件更为致密。同时,可消除Al合金与Mg合金的氧化现象,且浇注温度低于普通LFC技术。通过对不同铸造技术所制备的进气歧管铸件进行对比,发现该技术所制铸件形状完整、轮廓清晰、内部质量优异,表面粗糙度较低(仅为3.2~6.3 μm ,而普通LFC工艺铸件表面粗糙度高达6.3~12.5 μm),并且能够消除低碳钢LFC的渗碳问题。此项研究为解决传统消失模铸造缺陷开辟了新思路,证实多种技术的融合是提升铸件质量的有效方法。

覃缓贵等^[12]将理论推导、实验研究及控制系统设计相结合,研究了铝合金消失模铸造型腔压力控制对铸件质量的影响,并设计包含主控系统在内的PLC控制系统对压力追踪误差。研究发现,PLC控制系统追踪误差更小,稳定时间更短,可减少气孔,提高铸件质量。该研究将PLC控制系统引入消失模铸造研究中,有利于提高消失模铸造的自动化水平。蒋文明等^[10,13]对A356铝合金不同消失模铸造工艺下的显微组织与性能进行对比研究,发现与普通消失模铸造相比,采用真空低压消失模壳型铸造时,显微组织更细小、致密,初生相晶粒及共晶硅尺

寸更小,孔隙率0.16%(普通消失模铸造为1.97%),密度2.684 g/cm^3 (普通为2.660 g/cm^3)。其拉伸断口孔洞少,呈韧性断裂;普通消失模铸造断口孔洞多,为脆性断裂,且有缩孔和夹杂缺陷。经热处理,真空低压消失模壳型铸造的铝合金抗拉强度达278.27 MPa(提高20.2%),伸长率8.10%(提高166.4%),布氏硬度93.1 HB(提高17.6%),铸件表面质量更优。该研究明确展示了真空低压消失模壳型铸造工艺对铝合金组织和性能的显著改善作用,为铝合金消失模铸造工艺的优化提供了有力的实验支撑和理论依据。许利军^[14]对消失模铸造技术进行优化创新,包括采用长枪退式加料法、改进配料、调整浇注方式等,研究了消失模铸造及其在石油机械行业的应用。该技术研究可为抽油机、钻井泵等石油机械用大中型铸件的高质量制备提供参考和借鉴。

总体来看,真空低压消失模铸造工艺具有很高的成品率和生产效率,该方法所得到的铸件精度高,表明粗糙度低且具有良好的力学性能^[15-16]。然而,该工艺在实际应用中可能还面临一些挑战,例如工艺参数的精确控制难度较大,需要进一步深入研究和优化,以确保不同铸件性能的稳定性。

1.2 振动消失模铸造工艺

消失模振动技术是在熔融金属液进入型腔过程中施加具有一定振幅和频率的外力,使铸件处于振动场中完成凝固,其工艺原理如图2所示^[17-19]。Qiu等^[20]探究了机械振动对消失模铸造灰铸铁的影响。研究表明,随着振幅增加,铸件伸长率和抗拉强度均呈现先增后减趋势。此研究揭示了振动参数与灰铸铁微观结构和力学性能之间的关系,为合理选择振动参数提供了参考,但也表明振动参数的选择需要精确控制,否则可能无法达到理想效果。Zou等^[21]研究了机械振动频率对铸态、淬火态和回火态HCCIs微观结构和性能的影响。结果显示,振动频率增加可以细化铸态HCCIs的微观结构,提高铸件硬度,但振动频率对淬火态HCCIs硬度影响较小。该研究全

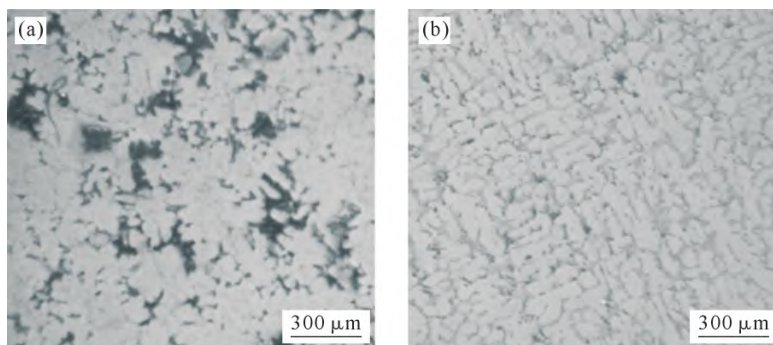
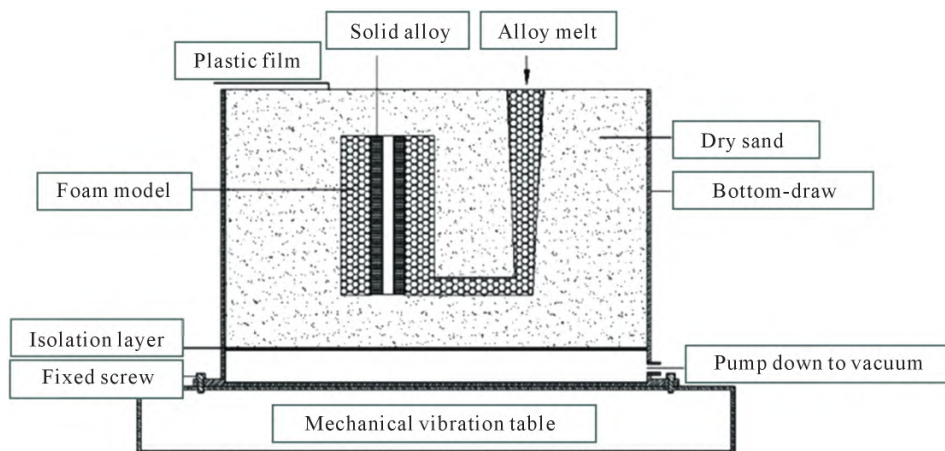


图1 消失模铸造镁合金的显微组织:(a)无压力消失模铸造;(b)消失模压力铸造^[11]

Fig.1 Microstructure of LFC Mg alloys: (a) pressure-free LFC; (b) LFCs under pressure^[11]

图2 振动消失模铸造技术原理^[10]Fig.2 Schematic diagram of vibration LFC technology^[10]

面展示了振动频率对不同状态 HCCIs 性能的影响,强调了振动消失模铸造在改善铸件性能方面的有效性,但也提示不同状态下振动频率的影响存在差异,需要进一步深入研究其作用机制。王俊龙等^[22]对消失模铸造固-液复合 Al/Mg 双金属复合材料制备过程施加不同振动频率,探究其对界面组织和力学性能的影响。研究表明,振动频率增加,界面金属间化合物层厚度减小,脆性相减少, Mg_2Si 相细化且分布由团聚变为分散。该研究揭示了振动频率对双金属复合材料界面组织和力学性能的重要影响,为这类材料的制备提供了新的思路和方法,但也凸显了振动参数与材料性能之间的复杂关系,需要进一步深入探索其内在规律。

振动消失模铸造工艺是借助电机或超声等所产生的振动力促使金属液形核,以达到细化晶粒的目的,操作简单,成本较低,制件性能较优^[23]。振动参数的设置对铸件质量影响较大,如果振动参数不合适,甚至可能对铸件质量产生负面影响。与真空低压消失模铸造工艺相比,振动消失模铸造工艺主要侧重于通过振动来改善铸件的微观结构和力学性能。与传统砂型铸造相比,振动消失模铸造工艺在细化晶粒和提高力学性能方面具有明显优势。

1.3 消失模壳型铸造工艺

消失模壳型铸造技术属于一种新型铸造加工方法,其巧妙且有机地融合了熔模铸造工艺与消失

模铸造技术。基本原理为:首先依据制件的结构和尺寸制作出与制件形状相同的发泡模样,然后在模样表面涂刷耐火涂料,当浇注熔融金属液与发泡模样接触时,发泡模样燃烧、气化,金属液在重力或者反重力作用下进行浇注,获得尺寸精度高且性能良好的制件^[24],其加工流程如图3所示。

Jiang 等^[25]考察了不同真空低压消失模壳型铸造工艺参数对铝合金液充型能力的影响。结果显示,气体流量对铝合金液充型能力的影响最大,其次是铸造温度、气体压力和真空度。填充的长度随工艺参数增加而增加,与参数呈线性关系。与普通消失模铸造工艺相比,真空低压消失模壳型铸造的填充能力更强,铸件密度更大,孔隙率更低,内部质量更好。此研究明确了工艺参数对铝合金液充型能力的影响程度,为优化工艺参数提供了参考,同时也证明了真空低压消失模壳型铸造在提高铸件质量方面的优势。刘立中等^[26]探究了索头铸件的消失模壳型铸造工艺。通过制作发泡模样、挂挂涂料、焙烧干燥、填砂埋型、负压浇注(0.02 MPa)等一系列工艺获得无缺陷高性能索头铸件。该工艺对于钢丝索头的大批量高质量生产具有重要的借鉴价值。王荣华等^[27]研究了机械振动频率对消失模壳型铸造 ZL101 合金组织和性能的影响。随着振动频率增加,合金抗拉强度、屈服强度、伸长率和硬度均先增后减,在 100 Hz 时组织细化效果最好,强度、硬度和伸长率达到最大值。

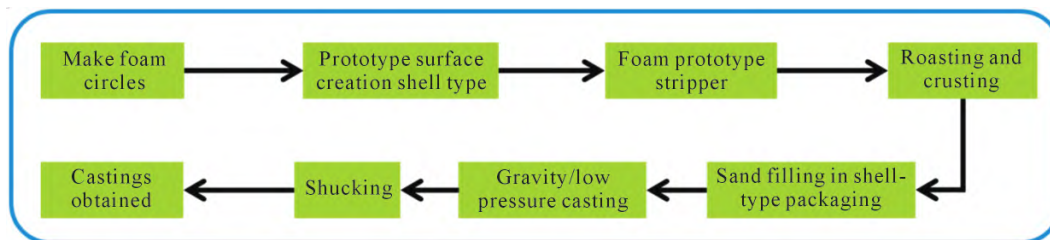


图3 消失模壳型铸造技术流程图

Fig.3 Flow chart of expendable pattern shell casting

消失模壳型铸造融合熔模与消失模铸造技术,制件尺寸精度高、性能好;铸件组织致密,孔隙度低,与真空低压消失模铸造工艺相比,在尺寸精度和性能方面可能有相似优势,但工艺复杂性和成本可能存在差异。与振动消失模铸造工艺相比,更注重制件尺寸精度和整体性能,而振动消失模铸造侧重于通过振动改善铸件微观结构和力学性能^[28]。

2 消失模铸造模拟仿真技术研究现状

传统消失模铸造工艺的加工制备,在工艺、浇注、缺陷减少和成品率提高等方面,长期依赖经验进行判断,需经反复试制、多次修改才能确定完整工艺流程,导致新产品研制难度大、周期长、成本高。计算机模拟仿真技术进行铸造工艺设计可按照特定要求和条件,有效预测铸件充型、凝固、冷却过程中可能出现缺陷的大小、部位、产生时间等,通过工艺优化设计,能有效缩短产品研发周期、降低成本^[29-30]。

2.1 充型过程模拟

消失模充型过程模拟凭借计算机技术并依托相关物理数学模型,对金属液流动、泡沫模样气化以及气体排出等错综复杂的动态过程予以数值模拟重现,其在诸多方面展现出显著且极具价值的优点,就缺陷预测与防控层面而言,消失模充型过程模拟具备卓越的前瞻性与精准性,能够预先精准识别诸如卷气、夹渣、冷隔等多种潜在缺陷。

李欣然等^[31]运用实验研究和数值模拟相结合的方法,对铸钢凸圈消失模铸造工艺进行研究。通过分析凸圈结构,设计出2种阶梯式浇注方案:方案I,浇口杯与小端面连接;方案II,浇口杯与大端面连接。浇注和模拟结果显示,采用方案II生产的凸圈铸件无明显缩孔、缩松缺陷,渐开线表面质量好,性能满足要求。此研究体现了数值模拟在优化铸造工艺设计中的重要作用,通过模拟不同方案提前发现问题,减少试错成本,为实际生产提供了有效的指导。谢元媛等^[32]通过数值模拟研究了减速器箱体的充型过程,可有效预测夹渣、气孔等铸造缺陷,为铸

造工艺的设计提供了依据。Li等^[33]基于主要假设建立物理模型,开发数值算法,对消失模铸造的充型过程进行研究,计算流体流动和温度分布,发现计算结果与实验相符,偏差可接受。该方法可用于优化消失模铸造设计和预防铸造缺陷。

充型过程模拟对于优化铸造工艺设计至关重要。通过模拟不同浇注方案,可以提前发现潜在问题,减少实际生产中的试错成本。未来可进一步提高模拟的精度和效率,结合更多实际因素,如不同金属液的流动性差异等,使模拟结果更贴近实际生产情况。

2.2 凝固过程模拟

消失模凝固过程模拟借助计算机技术针对金属凝固以及温度冷却等复杂动态过程予以数值模拟重现,通过对消失模凝固过程的精确模拟确定浇注温度、冷却速度等关键参数的最优取值范围,同时,对于冷却速度,模拟可清晰呈现其与金属凝固过程中热传导、热对流以及热辐射等热交换机制的相互关系,进而确定既能满足铸件性能要求又能避免产生诸如缩孔、缩松等缺陷的合理冷却速度,实现工艺参数的精准调配,为优化凝固工艺奠定基础^[34-36]。

Ma等^[37]利用模拟研究了消失模悬浮铸造高铬铸铁凝固收缩过程,并根据模拟得到的参数进行实际制备,结果表明,负压0.06 MPa时收缩孔隙小于0.04 MPa,1 540 ℃时收缩孔隙最低,悬浮剂添加量1%时收缩孔隙几乎消除。此研究揭示了工艺参数对消失模悬浮铸造高铬铸铁凝固过程中收缩孔隙的影响规律,为优化工艺参数提供了依据,强调了实验和数值模拟相结合在研究凝固过程中的有效性。Sun等^[38]利用数值模拟研究耐火骨料形状对A356合金消失模铸件孔隙率的影响,通过模拟EPS液体分解产物流动状态,模拟流动状态如图4所示。研究结果显示,圆柱形膨胀石墨和铝矾土熟料组合使液体聚苯乙烯流速最高,铸件质量较好。Chekmyshev等^[39]建立了灰铸铁-奥氏体不锈钢双金属铸件在消失模铸造条件下的耦合传热数学模型,并采用有限差分法求解,研究其冷却凝固过程。研究表明,调整元件厚度增加会使“液态-奥氏体”相变时间和总冷却时

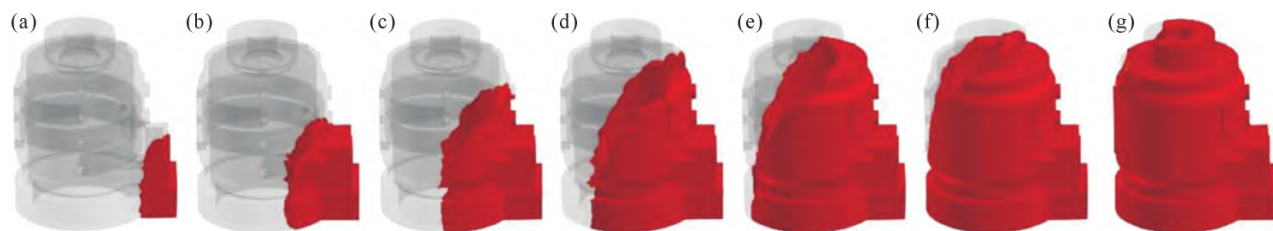


图4 消失模铸造不同时刻充型过程示意图:(a) 0.7 s;(b) 1.8 s;(c) 2.9 s;(d) 4.0 s;(e) 5.1 s;(f) 6.2 s;(g) 7.3 s^[41]
Fig.4 Schematic diagram the filling process of the LFC at different time: (a) 0.7 s; (b) 1.8 s; (c) 2.9 s; (d) 4.0 s; (e) 5.1 s; (f) 6.2 s; (g) 7.3 s^[41]

间减少。该模拟可预测缺陷出现的位置,可为铸造缺陷预防提供理论支持。

凝固过程模拟能够为优化消失模铸造工艺参数提供依据。通过研究不同因素对凝固过程的影响,有利于针对性调整工艺参数,预防缺陷的产生。未来可进一步加强对复杂合金体系和特殊铸件结构的凝固过程模拟研究,以更好地应对实际生产中的多样化需求。

2.3 模拟及制备的协同应用

消失模铸造模拟与实际制备协同应用具有多方面优点:能精准优化工艺,通过模拟确定最佳参数用于实际生产,保障过程精细调控;可精准预判并剖析铸造缺陷根源,有效防控缺陷,提升铸件质量;大幅降低试错成本,提高生产效率,优化资源利用,提升经济效益;还能加速新工艺探索,明确现有工艺改进方向,有力推动消失模铸造行业发展^[40]。

Sun 等^[41]运用数值模拟和实验验证相结合的方法研究新能源汽车用 A356 铝合金电机壳体的消失模铸造。通过构建数学模型,建立三维模型并划分网格,并设置冒口、浇注温度、速度等参数。经过反复模拟预测缺陷位置,最终模拟出最优工艺参数,通过实际铸造进行验证,铸件质量良好,模拟与实际结果相符。Ablyaz 等^[42]使用快速成型技术制造晶格结构图案(lattice structured patterns, LSPs),通过测量尺寸精度、分析热应力制造镍合金铸件并与 CAD 模型进行比较,研究其对铸造过程中陶瓷壳模(ceramic shell mold, CSM)的影响。发现 LSPs 精度高,能使 CSM 应力最小化且无缺陷;CSM 中的热应力取决于 LSP 的孔隙率系数,所制镍合金铸件与 CAD 模型具有良好的一致性,LSP-CSM 系统对镍合金铸件制造分步过程如图 5 所示。该研究为铸造

过程中陶瓷壳模的优化提供了新的方法和思路,即通过合理选择晶格结构图案来控制热应力和缺陷,同时也展示了不同技术融合在铸造研究中的应用潜力。Jiang 等^[43]将测量铸件密度和截面孔隙率与模拟计算孔隙缺陷相结合,研究 A356 铝合金在真空低压消失模壳型铸造(expendable pattern shell casting process with vacuum and low pressure, EPSC-VL)过程中气体流量、真空度和气体压力等工艺参数对铸件内部质量的影响,模拟情况与实验结果相符。相比重力铸造(expendable pattern shell casting process under gravity casting, EPSC-G)和消失模铸造,采用 EPSC-VL 工艺时,铸件内部质量、微观结构和力学性能上有一定优势。张杰琼等^[44]对某拖拉机传动箱壳体结构及消失模铸造工艺进行分析,用华铸 CAE 铸造模拟系统进行模拟仿真,研究各铸造工艺方案的优劣性。经综合分析筛选出了最佳的消失模铸造工艺,并经实验验证,铸件表面质量良好,毛坏变形量在工艺控制范围内,相比传统铸造工艺减少 2 次工艺试验。该研究表明,将模拟用于指导实际制备,可节约成本,提高生产效率。邓超等^[45]模拟了 ZG30SiMnMoV 钢履带板的铸造凝固过程,并研究了浇注温度和浇注速度的影响。根据模拟结果并进行了实际制备,浇注温度为 1 610 ℃时,履带板内部缩孔、缩松缺陷明显减少;浇注速度对铸件有效应力影响不大,适当降低浇注温度可显著降低有效应力。

铸造消失模模拟与实际结合的研究具有优化工艺设计、降低成本、提高生产效率、增强对铸造过程理解等优点^[46],对推动铸造行业技术进步、提高产品质量和可靠性、促进可持续发展以及培养高素质人才具有深远意义。

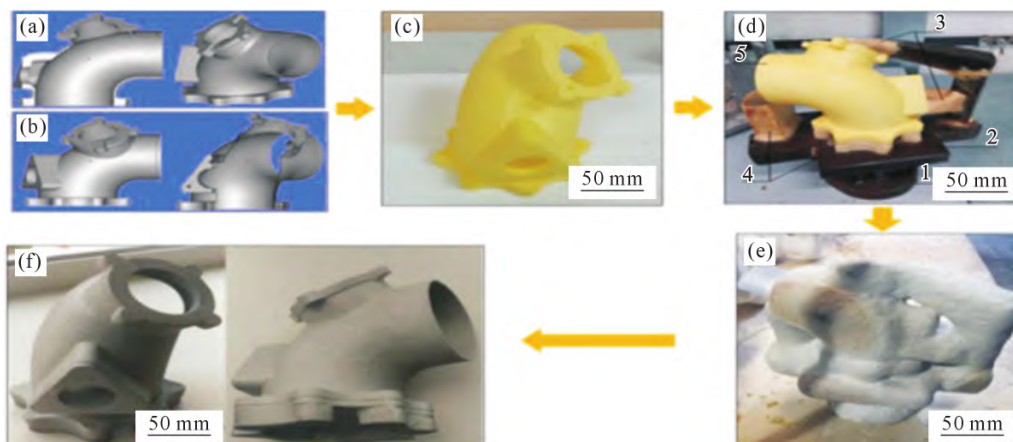


图 5 LSP-CSM 系统制造镍合金铸件的分步过程图:(a) 铸件 CAD 模型;(b) 铸件低压铸造 CAD 模型;(c) 制造的 LSP;(d) 浇注系统;(e, f) 陶瓷壳模及镍合金最终铸件^[42]

Fig.5 Step-by-step procedure for the fabrication of Ni-alloy casting in the LSP-CSM system: (a) CAD model of the casting; (b) CAD model of the LSP of the casting; (c) fabricated LSP; (d) gating system; (e, f) CSM and final casting of the Ni-alloy^[42]

3 结论与展望

近年来,消失模铸造技术取得了长足的进步和发展,消失模铸件质量不断提高,生产效率不断提高。将试验探索和模拟仿真有机结合,可推动消失模铸造技术进一步快速发展。本文总结了真空低压消失模铸造、振动消失模铸造和消失模壳型铸造等消失模铸造工艺以及消失模铸造的充型过程及凝固过程等模拟仿真技术的研究现状。

(1)不同的消失模铸造工艺具有不同特点,且各自具有不同的优势。

(2)振动消失模铸造可细化晶粒,操作简单,成本低;而真空低压消失模铸造能提高合金液充型能力,铸件精度高、力学性能好。消失模壳型铸造融合了多种技术,能获得高精度、高性能的铸件。

(3)数值模拟仿真对于消失模铸造工艺具有重要作用,能辅助进行铸造工艺设计,预测充型、凝固、冷却过程中的铸造缺陷,从而缩短产品研发周期,提高成品率和生产效率,降低成本,降低研制费用,进一步推动消失模铸造产品的开发与应用。

参考文献:

- [1] 郭良怡,于君,林鑫,闫乔单,王林增,牛毅豪. 基于固溶强化的激光定向能量沉积 TiZr 基高熵合金成分设计与强塑性优化[J]. 铸造技术, 2024, 45(8): 783-792.
- [2] WU L Y, YU J, LIN X, YAN Q D, WANG L Z, NIU Y H. Composition and strength-plasticity optimization of TiZr-based high-entropy alloy through solid solution strengthening by laser directed energy deposition[J]. Foundry Technology, 2024, 45(8): 783-792.
- [3] 李洪超,王军,赵萌萌,王毅,李金山. 非等原子比 AlCoCrFeNi 高熵合金组织及力学性能研究[J]. 铸造技术, 2022, 43(1): 1-5.
- [4] LI H C, WANG J, ZHAO M M, WANG Y, LI J S. Research on microstructure and mechanical properties of non-equiatomic AlCoCrFeNi high-entropy alloys [J]. Foundry Technology, 2022, 43(1): 1-5.
- [3] 刘艳茹,张玉松. 重型变速器壳体消失模铸件的质量控制[J]. 铸造设备与工艺, 2024(3): 69-72.
- [4] LIU Y R, ZHANG Y S. Quality control of heavy transmission housing by lost foam casting process [J]. Foundry Equipment & Technology, 2024(3): 69-72.
- [4] 杨芬芬,李振彦,颜文羽,陈君逸,潘源. 轮芯铸件消失模铸造工艺研究[J]. 铸造技术, 2022, 43(10): 906-911.
- [5] YANG F F, LI ZY, YAN W Y, CHEN J Y, PAN Y. Study on lost foam casting process of wheel core parts [J]. Foundry Technology, 2022, 43(10): 906-911.
- [5] JEZIERSKI J, JURECZKO M, DOJKA R. The impact of process factors on creating defects, mainly lustrous carbon, during the production of ductile iron using the lost-foam casting (LFC) method[J]. Metals, 2020, 10(8): 1022.
- [6] YU L H, MA Y X, LI Q Q, XU Y C, YU X P, PENG Z W, JIANG W M. Effect of electromagnetic stirring on interfacial microstructure and mechanical properties of Al/Mg bimetal produced by lost foam compound casting [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 2101-2111.
- [7] CHAKHERLOU T, MAHDINIA Y, AKBARI A. Influence of lustrous carbon defects on the fatigue life of ductile iron castings using lost foam process[J]. Materials & Design, 2011, 32(1): 162-169.
- [8] 梁守友. 铸件消失模铸造缺陷工艺研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(6): 600-604.
- [9] LIANG S Y. Process research on lost foam casting defects of flywheel housing and other castings[J]. Foundry Technology, 2024, 45(6): 600-604.
- [9] HODGIR R, MITTAL Y G, KAMBLE P, GOTE G, PATIL Y, PATEL A K, KARUNAKARAN K P. Comparative study of rapid ice investment casting vs rapid casting processes of aluminium alloy [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2023, 24(5): 853-866.
- [10] 蒋文明,樊自田. 镁合金消失模铸造新技术研究[J]. 铸造, 2021, 70(1): 28-37.
- [11] JIANG W M, FAN Z T. Study on new technologies of lost foam casting process for Mg alloys[J]. Foundry, 2021, 70(1): 28-37.
- [11] JIANG W M, FAN Z T. Novel technologies for the lost foam casting process[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2018, 13(1): 37-47.
- [12] 覃缓贵,王洪欣. 铝合金消失模铸造中型腔压力 PLC 控制研究[J]. 铸造技术, 2016, 37(8): 1743-1746.
- [13] TAN H G, WANG H X. Research on PLC control system of cavity pressure in EPC casting process of aluminum alloy [J]. Foundry Technology, 2016, 37(8): 1743-1746.
- [13] 蒋文明,樊自田,刘德均. 真空低压消失模壳型铸造和消失模铸造铝合金组织和性能对比[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(1): 22-28.
- [14] JIANG W M, FAN Z T, LIU D J. Comparison of microstructure and properties of aluminum alloy between expendable pattern shell casting with vacuum and low-pressure and lost foam casting [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(1): 22-28.
- [14] 许利军. 消失模铸造及其在石油机械行业的创新应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, 33(24): 246.
- [15] XU L J. Lost foam casting and its innovative application in the petroleum machinery industry[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013, 33(24): 246.
- [15] LI J Q, ZHAO Z, FAN Z T, DONG X P, SHI H L. Study on typical hole defects in AZ91D magnesium alloy prepared by low pressure lost foam casting[J]. China Foundry, 2013, 10(4): 232-236.
- [16] 王建国,任朋立,王清川. 高性能镁合金铸造技术的研究现状[J]. 热加工工艺, 2014, 43(17): 21-23.
- [17] WANG J G, REN P L, WANG Q C. Research status of high performance magnesium alloy casting technology[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(17): 21-23.
- [17] 梁福祥,周天飞,武炳煊. 消失模铸造新型振实台的研究与应用[J]. 现代铸铁, 2021, 41(4): 42-48.
- [18] LIANG F X, ZHOU T F, WU B H. Research and application of new vibration table used for lost mold casting[J]. Modern Cast Iron,

- 2021, 41(4): 42-48.
- [18] 王俊龙,蒋文明,管峰,李广宇,张政,樊自田. 振动对消失模铸造 Al-18Si/AZ91D 双合金界面组织和力学性能的影响[J]. 中国铸造装备与技术, 2022, 57(4): 5-16.
- WANG J L, JIANG W M, GUAN F, LI G Y, ZHANG Z, FAN Z T. Effect of vibration on the interface micro-structure and mechanical properties of lost foam casting Al-18Si/AZ91D double-alloy [J]. China Foundry Machinery & Technology, 2022, 57(4): 5-16.
- [19] GUAN F, JIANG W M, WANG J L, LI G Y, ZHANG Z, FAN Z T. Development of high strength Mg/Al bimetal by a novel ultrasonic vibration aided compound casting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 300: 117441.
- [20] QIU K, XIAO B T. Effect of mechanical vibration on microstructure and mechanical properties of gray cast iron in lost foam casting[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 1: 4936147.
- [21] ZOU W Q, ZHANG Z G, YANG H, LI W. Effect of vibration frequency on microstructure and performance of high chromium cast iron prepared by lost foam casting[J]. China Foundry, 2016, 13(4): 248-255.
- [22] 王俊龙,蒋文明,管峰,李广宇,张政,樊自田. 振动频率对消失模铸造 Al/Mg 复合材料界面组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(6): 672-677.
- WANG J L, JIANG W M, GUAN F, LI G Y, ZHANG Z, FAN Z T. Effect of vibration frequency on interface microstructure and mechanical properties of Al/Mg composites by lost foam casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6): 672-677.
- [23] 蒋文明, 樊自田. 铝/镁合金特种精密铸造技术的研究进展及发展趋势[J]. 金属加工(热加工), 2023(2): 1-9.
- JIANG W M, FAN Z T. Research progress and development trend of aluminum/magnesium alloy special precision casting technology[J]. MW Metal Forming, 2023(2): 1-9.
- [24] 赖春明,谭海林,张麦秋. 消失模-壳型复合铸造 EPS 泡沫模样表面的光整工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2016(17): 72-74.
- LAI C M, TAN H L, ZHANG M Q. Study on finishing technology of EPS foam surface by composite casting with vanishing mold and shell mold[J]. MW Metal Working, 2016(17): 72-74.
- [25] JIANG W M, FAN Z T, LIU D J, LIAO D F, ZHAO Z, DONG X P, WU H B. Influence of process parameters on filling ability of A356 aluminium alloy in expendable pattern shell casting with vacuum and low pressure[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2012, 25(1): 47-52.
- [26] 刘立中,贾建英,戴申梅. 消失模铸造空壳浇注工艺[J]. 铸造技术, 2020, 41(9): 846-851.
- LIU L Z, JIA J Y, DAI S M. New casting process pouring into shell mold made from lost foam pattern and under negative pressure[J]. Foundry Technology, 2020, 41(9): 846-851.
- [27] 王荣华, 冷超群. 机械振动对消失模壳型铸造 ZL101 合金组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(5): 107-110, 118.
- WANG R H, LENG C Q. Effects of mechanical vibration on microstructure and mechanical properties of ZL101 alloy in lost foam shell casting[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(5): 107-110, 118.
- [28] 武浩达. 铸造工艺对铝合金组织及性能的作用探究[J]. 世界有色金属, 2020(9): 9-10.
- WU H D. Effect of casting process on the structure and properties of aluminum alloy[J]. World Nonferrous Metals, 2020(9): 9-10.
- [29] 阎夏南. 消失模铸造技术现状及发展趋势[J]. 中国高新区, 2017(10): 120.
- YAN X N. Present situation and development trend of lost die casting technology[J]. Science & Technology Industry Parks, 2017(10): 120.
- [30] 淡瑶. 一种球墨铸铁件消失模铸造工艺设计及缺陷预防[J]. 热处理技术与装备, 2023, 44(5): 18-21.
- DAN Y. Process design and defect prevention of a evaporative pattern casting of ductile iron castings[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2023, 44(5): 18-21.
- [31] 李欣然, 苏彦庆, 王亮, 李平, 赵俊岩. 基于数值模拟的铸钢凸圈消失模铸造工艺方案设计[J]. 铸造, 2023, 72(3): 305-309.
- LI X R, SU Y Q, WANG L, LI P, ZHAO J. Design of lost foam casting process for cast steel convex ring based on numerical simulation[J]. Foundry, 2023, 72(3): 305-309.
- [32] 谢元媛, 王洪欣. 减速器箱体消失模铸造工艺数值模拟[J]. 铸造技术, 2017, 38(2): 453-455, 462.
- XIE Y, WANG H. Numerical simulation of filling process in lost foam casting for reducer box [J]. Foundry Technology, 2017, 38(2): 453-455, 462.
- [33] LI F J, ZHAO H, REN F Z, SONG S B, SHAO X H, VOLINSKY A A. Simulations and experiments of mould filling in lost foam casting[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2020, 33(4-5), 194-200.
- [34] DOS SANTOS A, HOSDEZ J, LIMODIN N, EL BARTALI A, TANDJAOUI A, WITZ J F, NICLAEYS C, QUAEGBEUR P, NAJJAR D. 2D and 3D characterization of damage mechanisms in A319 alloy[J]. Experiment Mechanics, 2023, 63(2): 377-382.
- [35] ÖZEN I, ÇAVA K, IPEK H, SEZER R, ASLAN M. Crushing response of triply periodic minimal surface structures fabricated by investment casting and powder bed fusion method[J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107638.
- [36] FEDOROV K, STOYANOV G, SYDORENKO N, RAVINDRAN C R, FAYAZBAKHSH K. Evaluation of 3D printed foam patterns for hybrid lost foam casting of A356 alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 126: 429-442.
- [37] MA H L, FU H G. Study on simulation of mold filling and solidification characteristics of hypereutectic high-chromium cast iron by lost foam suspension casting[J]. Metals, 2023, 13(10): 1761.
- [38] SUN C, CAO Z Y, LIU G J. Effect of refractory aggregate shape on the porosity of A356 alloy castings in lost foam casting[J]. International Journal of Metalcasting, 2024, 18(3): 2499-2507.
- [39] CHEKMYSHEV K E, OVCHARENKO P G. Numerical simulation of bimetallic casting cooling during the process of lost foam casting[J]. Journal of Crystal Growth, 2019, 527: 125243.
- [40] KALIUZHNYI P, SHALEVSKA I, SLIUSAREV V. Microstructure of reinforced cast iron produced by lost foam casting [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2023, 68(4): 1369-1375.
- [41] SUN C, CAO Z Y, JIN Y Z, CUI H Y, WANG C G, QIU F, SHU S L. Numerical simulation of lost-foam casting for key components of A356 aluminum alloy in new energy vehicles[J]. Materials, 2024, 17(10): 2363.

- [42] ABLYAZ T R, MURATOV K R, SUMKOV A A, SHLYKOV E S, DHIMAN S, SIDHU S S. Computational and experimental study of lattice structured patterns for casting process[J]. Rapid Prototyping Journal, 2021, 27(1): 197-206.
- [43] JIANG W M, FAN Z T, LIU D J, DONG X P, WU H B, WANG H S. Effects of process parameters on internal quality of castings during novel casting[J]. Materials and Manufacturing, 2012, 28(1): 48-55.
- [44] 张杰琼,吕乐华,许海铎. 铸造模拟技术在消失模铸造工艺开发中的应用[J]. 中国铸造装备与技术, 2021, 56(3): 82-86.
- ZHANG J, LYU L, XU H. Application of casting simulation technology in the development of lost foam casting process[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2021, 56(3): 82-86.
- [45] 邓超,龙骏,郑志斌,黄勇,郑开宏,王娟. 基于 ProCAST 的履带板消失模铸造凝固过程数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(3): 368-371.
- DENG C, LONG J, ZHENG Z B, HUANG Y, ZHANG K H, WANG J. Numerical simulation of solidification process in lost foam casting of caterpillar board based on ProCast software[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(3): 368-371.
- [46] 赵少雄,李立新,张彩霞. 消失模铸造振动台国内外研究现状及展望[J]. 内燃机与配件, 2016(10): 39-41.
- ZHAO S X, LI L X, ZHANG C X. Research status and prospect of EPC vibrating table in China and abroad[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2016(10): 39-41.