

基于数值模拟的砂模铸造充型过程分析及工艺改进

罗育胜

广东省广裕集团梅州嘉宝实业有限公司，广东 梅州 514000

DOI:10.61369/ERA.2025060012

摘要： 砂模铸造在工业生产中应用广泛，但传统经验设计方法难以优化其工艺。数值模拟技术为砂模铸造充型过程研究提供有力支持。本文阐述了砂模铸造充型过程及数值模拟基础，包括充型特点、模拟技术原理和作用。基于数值模拟，对充型过程中金属液流动形态、温度场分布、气体情况进行分析，并提出工艺改进策略，如优化浇注系统、控制充型速度与温度、提升砂型型芯性能、控制凝固过程等。数值模拟技术有助于理解充型机制、预测缺陷，提升铸件质量、降低成本、缩短周期，未来在砂模铸造领域的应用将更广泛深入。

关键词： 砂模铸造；充型过程；数值模拟；工艺改进；缺陷预防

Analysis and Process Improvement of Sand Mold Casting Filling Process Based on Numerical Simulation

Luo Yusheng

Guangdong Guangyu Group Meizhou Jiabao Industrial Co., Ltd. Meizhou, Guangdong 514000

Abstract： Sand mold casting is widely used in industrial production, but traditional empirical design methods are difficult to optimize its process. Numerical simulation technology provides strong support for the study of the sand mold casting filling process. This article describes the sand mold casting filling process and the basics of numerical simulation, including filling characteristics, simulation technology principles, and functions. Based on numerical simulation, the flow pattern, temperature field distribution, and gas conditions of the molten metal during the filling process are analyzed, and process improvement strategies are proposed, such as optimizing the pouring system, controlling filling speed and temperature, improving sand mold core performance, and controlling the solidification process. Numerical simulation technology helps to understand the filling mechanism, predict defects, improve casting quality, reduce costs, and shorten the cycle. Its application in the field of sand mold casting will be more widespread and in-depth in the future.

Keywords： sand mold casting; filling process; numerical simulation; process improvement; defect prevention

引言

砂模铸造作为一种应用广泛的铸造工艺，在工业生产中占据重要地位。然而，铸造过程涉及复杂的物理现象，传统经验设计方法难以全面准确地分析和优化工艺。数值模拟技术的出现，为砂模铸造充型过程的研究提供了强有力的工具。通过数值模拟，能够深入了解充型过程中金属液的流动行为，预测可能出现的缺陷，进而针对性地改进工艺，提高铸件质量与生产效率。本文将围绕数值模拟在砂模铸造充型过程中的应用，对充型过程进行分析，并探讨相应的工艺改进策略。

一、砂模铸造充型过程与数值模拟基础

在砂模铸造工艺的研究与优化进程中，深入理解砂模铸造充型过程，掌握数值模拟技术的原理及其在该领域的应用，是实现工艺改进与质量提升的重要基础。以下将从砂模铸造充型过程的基本特征、数值模拟技术的底层原理，以及数值模拟在砂模铸造充型过程中的关键作用展开详细阐述。

（一）砂模铸造充型过程概述

在砂型铸造领域，浇注系统设计与铸件的质量存在密切联系。通过合理的浇道设计与布置，可以控制金属液的流速与充型效率，减少铸件出现缩孔、卷气、缩松等铸造缺陷的可能性。但在传统砂型铸造工艺中，浇道需依赖模具进行造型，因此在结构上受起模所限，不能自由地进行设计与优化^[1]。砂模铸造，是以砂子为主要造型材料制作铸模的铸造方法。在砂模铸造过程中，将液

态金属通过浇注系统引入铸型型腔，液态金属在重力或压力作用下填充型腔，随后冷却凝固形成铸件。在充型阶段，金属液的流动行为对铸件质量有着决定性影响。若充型速度过快，金属液可能卷入气体，导致铸件产生气孔缺陷，还可能引发金属液飞溅，造成冲砂等问题；若充型速度过慢，金属液在尚未完全填充型腔时就开始凝固，会产生冷隔、浇不足等缺陷。同时，砂型的透气性、紧实度以及浇注系统的设计等因素，都会显著影响充型过程的顺利进行。

（二）数值模拟技术原理

数值模拟技术基于计算机科学与计算流体力学，对砂模铸造充型过程进行数学建模与仿真分析。在模拟过程中，通常将充型过程视为粘性不可压缩流体的流动，通过建立控制方程来描述金属液的流动行为。这些控制方程包括连续性方程、动量方程和能量方程。连续性方程保证了质量守恒，动量方程反映了力与运动的关系，能量方程则描述了热量的传递和转化^[2]。为求解这些复杂的偏微分方程，常用的数值方法有有限元法（FEM）、有限差分法（FDM）和光滑粒子流体动力学法（SPH）等。有限元法将求解区域离散为有限个单元，通过在单元上近似求解方程来获得整体解；有限差分法直接对控制方程进行差分近似，求解节点上的数值解；光滑粒子流体动力学法则是一种无网格方法，能够较好地处理大变形和自由表面问题。

（三）数值模拟在砂模铸造充型过程中的作用

数值模拟在砂模铸造充型过程中发挥着重要作用。首先，在工艺设计阶段，通过模拟不同工艺参数下的充型过程，能够提前预测铸件可能出现的缺陷，如气孔、冷隔、缩孔等，从而避免盲目试错，缩短新产品的研发周期，降低生产成本。其次，数值模拟能够直观展示金属液在型腔内的流动形态和温度分布，为工艺优化提供依据^[3]。工程师可以根据模拟结果，调整浇注系统的结构、充型速度、浇注温度等参数，优化工艺方案，提高铸件质量。此外，数值模拟还可以作为一种教学工具，帮助学生和初学者更好地理解砂模铸造充型过程的物理原理和复杂现象。

二、基于数值模拟的砂模铸造充型过程分析

当借助数值模拟技术对砂模铸造充型过程展开研究时，全方位剖析充型过程的多个关键层面，对于精准把控铸造质量，规避各类缺陷具有重要意义。下面将从金属液流动形态、温度场分布，以及气体卷入与排出情况这三个维度，借助数值模拟技术展开深入分析。

（一）金属液流动形态分析

在砂模铸造充型进程中，金属液流动形态对铸件品质影响重大。借助数值模拟技术，研究人员可精确观测金属液在型腔内的流动轨迹和速度分布。充型初始，高温金属液从浇口涌入，凭借惯性以高速射流推进，其动能产生的冲击力影响充型初始状态。随着型腔填充，金属液与型腔壁相互作用增强，因型腔形状和阻力差异，其流动速度和方向改变，出现分流、汇流现象。

若浇注系统设计不合理，型腔内易产生紊流，致使大量气体

卷入。这些气体在铸件凝固时无法排出，会在内部形成气孔缺陷，降低铸件的强度、韧性等机械性能，使铸件在承受压力或负载时易破裂，严重影响产品质量和使用寿命^[4]。同时，型腔壁面附近因摩擦阻力，金属液流速降低，形成边界层，阻碍热量传递，影响铸件表面凝固，导致表面粗糙度增加、出现局部冷隔，降低外观质量和尺寸精度。

通过对金属液流动形态的模拟分析，工程师能全面掌握其流动状态，进而优化浇注系统设计。调整浇口形状、尺寸、位置，改变金属液进入型腔的初始角度和速度，可使金属液平稳有序填充型腔，减少紊流和气体卷入风险，提高铸件质量。

（二）温度场分布分析

充型过程中，温度场的分布情况犹如一个“隐形的指挥家”，对铸件的凝固过程和最终质量起着至关重要的调控作用。数值模拟技术凭借其强大的计算能力，能够实时、精确地计算金属液和铸型在充型过程中的温度变化，并以直观的温度场云图形式呈现出来。

在充型开始的瞬间，金属液处于高温液态，携带大量的热量。随着充型的进行，金属液与铸型之间发生强烈的热交换，热量不断从金属液传递到铸型中，金属液的温度逐渐降低^[5]。然而，如果型腔内的温度分布不均匀，就如同在凝固的道路上设置了不同的“障碍”，会导致铸件各部位的凝固速度出现差异。

以铸件的厚壁部位为例，由于其体积较大，热容量高，热量散失相对较慢，在充型过程中温度下降的速度较为平缓。这使得该部位在凝固过程中成为一个“热节”区域，即热量相对集中、凝固时间较长的区域。在热节处，金属液凝固时产生的收缩无法得到及时、有效地补充，从而极易形成缩孔、缩松等缺陷。这些缺陷会严重削弱铸件的结构强度和致密性，降低铸件的整体质量，甚至可能导致铸件在后续的加工或使用过程中发生失效。

通过对温度场分布的模拟分析，能够提前准确地识别热节位置。基于此，工艺人员可以采取一系列有效的工艺措施来调整铸件的凝固顺序。例如，在热节附近设置冷铁，利用冷铁良好的导热性能，加快热节部位的冷却速度，使其与周围区域的凝固速度趋于一致；合理设计冒口的位置和尺寸，让冒口在铸件凝固过程中作为“补给站”，为热节处提供足够的补缩金属液，确保铸件实现顺序凝固，从而显著减少缩孔、缩松缺陷的产生，提高铸件的质量和性能^[6]。

（三）气体卷入与排出分析

在砂模铸造的充型环节中，气体卷入是导致铸件出现气孔缺陷的主要“元凶”之一。型腔内的气体来源较为复杂，主要包括砂型中原本存在的空气、水分蒸发产生的水蒸气以及涂料等添加剂在高温下分解产生的气体。

数值模拟技术能够如同“追踪器”一般，精确地追踪气体在型腔内的运动轨迹，详细分析气体的卷入和排出情况。当气体不能及时从型腔内排出时，就会在型腔内逐渐积聚。随着气体的不断积累，其在型腔内形成高压区域，如同筑起一道“屏障”，阻碍金属液的正常流动^[7]。在这种情况下，金属液在填充型腔的过程中，会被迫裹挟这些气体，当铸件凝固后，这些气体就被困在铸

件内部,形成气孔缺陷。

为了有效解决这一问题,通过模拟分析可以对铸型的排气系统进行优化设计。一方面,可以增加排气通道的数量,使气体有更多地排出路径;另一方面,合理增大排气通道的尺寸,确保气体能够顺畅地排出,避免因通道狭窄而导致排气不畅。此外,精确设置排气位置也至关重要,需要根据气体在型腔内的运动规律,将排气口设置在气体容易积聚的区域,确保气体能够及时、有效地排出型腔,从而最大限度地减少气孔缺陷的产生,提高铸件的内部质量和可靠性。

三、基于数值模拟的砂模铸造工艺改进策略

在前文对砂模铸造充型过程深入分析的基础上,依托数值模拟技术,针对性地制定工艺改进策略,对提升砂模铸造工艺水平、保障铸件质量而言至关重要。下面将从浇注系统设计、充型关键参数调控、砂型与型芯性能优化,以及凝固过程控制等多个方面,详细阐述基于数值模拟的砂模铸造工艺改进策略。

(一) 浇筑系统优化设计

浇注系统是引导金属液进入铸型型腔的通道,其设计的合理性直接影响充型过程和铸件质量。基于数值模拟结果,可以对浇注系统的结构和尺寸进行优化。首先,确定合适的浇口类型和位置^[8]。浇口的类型有顶注式、底注式、侧注式等,不同的浇口类型会导致金属液在型腔内的流动性态不同。通过模拟不同浇口位置和类型下的充型过程,选择能够使金属液平稳填充型腔、减少紊流和气体卷入的浇口方案。其次,优化浇道的尺寸和形状。浇道的截面积和长度会影响金属液的流速和流量,通过模拟分析,确定合理的浇道尺寸,保证金属液在充型过程中具有合适的流速,避免流速过快或过慢。此外,还可以在浇道中设置过滤器,去除金属液中的夹杂物,提高铸件质量。

(二) 充型速度与浇注温度控制

充型速度和浇注温度是砂模铸造工艺中的重要参数,对充型过程和铸件质量有着显著影响^[9]。通过数值模拟,可以确定不同铸件结构和材质下的最佳充型速度和浇注温度。对于薄壁铸件,为防止金属液在填充过程中过早凝固,需要较高的充型速度和浇注温度;而对于厚壁铸件,为避免金属液卷入过多气体和产生过大的热应力,充型速度和浇注温度应适当降低。在实际生产中,可以采用先进的浇注设备,如定量浇注机、自动浇注系统等,精确

控制充型速度和浇注温度,确保工艺参数的稳定性,提高铸件质量的一致性。

(三) 砂型与型芯性能优化

砂型和型芯的性能对充型过程和铸件质量也有着重要影响。通过数值模拟,可以分析砂型的透气性、紧实度和热物理性能对充型过程的影响,进而优化砂型和型芯的制备工艺。在保证砂型强度的前提下,提高砂型的透气性,有利于气体的排出,减少气孔缺陷的产生。可以通过选择合适的型砂粒度、添加透气剂等方法来提高砂型的透气性^[10]。此外,合理控制砂型的紧实度,避免因紧实度过高导致透气性下降,或因紧实度过低导致砂型强度不足,引发冲砂等问题。对于型芯,还需要考虑其溃散性,以便在铸件凝固后能够顺利取出,减少清理工作量。

(四) 凝固控制与缺陷预防

凝固过程是铸件形成的关键阶段,合理控制凝固过程可以有效预防缩孔、缩松等缺陷的产生。基于数值模拟的温度场分析结果,可以通过设置冷铁、冒口等工艺措施,调整铸件的凝固顺序,实现顺序凝固。冷铁能够加快铸件局部区域的冷却速度,使铸件按照预定的顺序凝固,从而将缩孔转移到冒口部位,最后通过切除冒口去除缩孔缺陷。冒口的尺寸和位置应根据铸件的结构和凝固特性进行合理设计,确保其能够在铸件凝固过程中提供足够的补缩金属液。此外,还可以采用热节圆法、模数法等方法,对铸件的凝固过程进行理论分析,结合数值模拟结果,优化凝固控制工艺,提高铸件的致密性。

四、结束语

数值模拟技术为砂模铸造充型过程的分析和工艺改进提供了科学、高效的手段。通过对充型过程中金属液的流动形态、温度场分布和气体行为的模拟分析,能够深入了解充型过程的物理机制,准确预测可能出现的缺陷。基于模拟结果,采取针对性的工艺改进策略,如优化浇注系统设计、控制充型速度和浇注温度、提高砂型和型芯性能以及合理控制凝固过程等,可以有效提高铸件质量,降低生产成本,缩短生产周期。随着计算机技术和数值模拟算法的不断发展,数值模拟技术在砂模铸造领域的应用将更加广泛和深入,为铸造行业的技术进步和可持续发展提供强大的支持。

参考文献

- [1] 杨铁毅,郭为忠.3D打印砂模浇道曲线化设计与性能仿真[J].机械设计,2018,35(09):1-7.DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2018.09.001.
- [2] 杨铭,廖敦明,陈宇豪,等.基于Projection VOF方法的熔模铸造蜡模充型过程数值模拟[J].铸造,2023,72(02):107-114.
- [3] 时俊克.钛合金复杂薄壁构件离心熔模铸造充型与凝固过程数值模拟[D].华中科技大学,2022.DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2022.000978.
- [4] 彭静,郭玲宏.消失模铸造充型过程的数值模拟分析[J].成都纺织高等专科学校学报,2012,29(03):5-7+16.
- [5] 方圆,周吉祥,于赞,等.排气歧管熔模铸造充型和凝固过程数值模拟与优化[J].常州大学学报(自然科学版),2013,25(03):45-49.
- [6] 杨智鹏.双相钢闭式循环泵后导叶数值模拟研究及铸造工艺优化[D].哈尔滨理工大学,2016.
- [7] 杜晓明,张倩,黄勇,等.消失模铸造充型过程中的气膜压力及其厚度的数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2011,31(12):1136-1139.
- [8] 宿文龙.镁合金消失模铸造充型性能数值模拟[D].太原科技大学,2011.
- [9] 刘太权,朱权利,白砚飞,等.炉排片熔模铸造充型与凝固过程的数值模拟及验证[J].热加工工艺,2009,38(15):46-49.
- [10] 王延露.基于MAGMASoft的铸造充型凝固过程分析与研究[D].兰州理工大学,2006.