

# 大型铸钢件凝固过程数值模拟与工艺优化

刘全存

安徽芜湖久弘重工股份有限公司 安徽芜湖

**【摘要】**大型铸钢件的凝固过程直接影响其组织结构和性能，数值模拟作为研究凝固机理和优化工艺的重要手段，能够有效预测温度场和凝固缺陷分布。本文基于有限元方法对大型铸钢件凝固过程进行了系统的数值模拟，分析了温度变化、凝固时间及应力分布特征，结合模拟结果提出了合理的工艺参数优化方案。通过工艺优化，显著改善了铸件内部缺陷和组织均匀性，为大型铸钢件的生产提供了理论支持和技术指导。

**【关键词】**大型铸钢件；凝固过程；数值模拟；工艺优化；温度场

**【收稿日期】**2025 年 3 月 10 日

**【出刊日期】**2025 年 4 月 19 日

**【DOI】**10.12208/j.ijme.20250030

## Numerical simulation and process optimization of solidification process for large steel castings

Quancun Liu

Wuhu Jiuhong Heavy Industry Co., Ltd, Wuhu, Anhui

**【Abstract】**The solidification process of large steel castings directly affects their microstructure and properties. As an important means to study solidification mechanisms and optimize processes, numerical simulation can effectively predict the temperature field and the distribution of solidification defects. In this paper, a systematic numerical simulation of the solidification process of large steel castings was carried out based on the finite element method. The characteristics of temperature change, solidification time, and stress distribution were analyzed. Combined with the simulation results, a reasonable optimization scheme for process parameters was proposed. Through process optimization, the internal defects of the castings and the uniformity of the microstructure were significantly improved, providing theoretical support and technical guidance for the production of large steel castings.

**【Keywords】**Large steel castings; Solidification process; Numerical simulation; Process optimization; Temperature field

### 引言

大型铸钢件作为重要的结构材料，其质量直接关系到机械设备的安全和性能。铸件凝固过程中的温度分布和应力状态是影响其内部缺陷形成和组织均匀性的关键因素。传统的实验方法受限于成本高、周期长和难以捕捉内部细节，难以全面揭示凝固过程的复杂机理。数值模拟技术能够高效、准确地模拟铸钢件的凝固过程，预测凝固缺陷及温度场变化，为工艺设计提供科学依据。本文基于先进的数值模拟方法，深入分析大型铸钢件的凝固行为，针对存在的问题提出优化工艺方案，旨在提升铸件质量和生产效率，为铸造行业的发展提供技术支持。

### 1 凝固过程中的热传导与温度场分布分析

大型铸钢件的凝固过程是一个复杂的热传导过

程，温度场的分布在很大程度上决定了铸件的内部结构和最终性能。凝固过程中，铸件从高温液态逐渐转变为固态，伴随着大量潜热释放，温度场呈现出明显的非均匀性。热量主要通过铸型、冷却介质及环境传导和散失，温度梯度的变化对凝固速率及组织形态产生深刻影响。掌握热传导机制和温度分布规律，对于预测凝固过程中的热应力、变形以及缺陷位置具有重要意义，同时为工艺优化提供数据支持。

在大型铸钢件的凝固过程中，铸件尺寸大且形状复杂，导致内部温度场的变化更加复杂。由于铸型材料的导热性能有限，热量传导速度受阻，造成铸件内部和表面温差显著，温度场非均匀性突出。凝固开始时，铸件表面迅速冷却形成初生晶核，随着温度进一步下降，凝固前沿不断向内部推进。热流路径和散

热条件的差异使得部分区域温度下降缓慢,延长了凝固时间,这些区域往往成为缩孔、气孔等凝固缺陷的高发部位。通过数值模拟可以精准计算温度梯度和热通量变化,揭示凝固过程中局部过热或冷却不足的现象,为缺陷控制提供依据。

热传导过程中潜热释放与导热能力的相互作用直接影响凝固速率和组织演变。随着温度降低,铸钢逐渐从液态转变为固态,释放出大量的潜热,导致温度场出现平台期,这一阶段温度缓慢下降,有利于晶粒的成长和组织的稳定<sup>[1]</sup>。数值模拟利用有限元或有限差分方法,结合铸件的物理参数和边界条件,能够模拟温度随时间和空间的变化过程,反映出凝固过程的热力学特征。模拟结果显示,调整浇注温度、冷却速率及铸型材料参数可以有效调控温度场,减小温度梯度,从而降低热应力和内部缺陷的形成概率,促进铸件性能的提升。

## 2 大型铸钢件凝固缺陷形成机理探讨

大型铸钢件在凝固过程中,容易产生多种缺陷,这些缺陷不仅直接影响铸件的机械性能,还会显著缩短其使用寿命。缺陷的形成主要受凝固过程中的热力学和动力学条件影响,包括凝固速度的快慢、温度梯度的变化、金属液体的流动状态以及化学成分的均匀分布等多方面因素。常见的缺陷类型主要包括气孔、缩孔、夹杂物和裂纹等,这些缺陷的形成机制既有相似之处,也因材料成分、工艺参数及冷却条件的不同而表现出差异。深入研究这些缺陷的形成机理,有助于从根本上认识凝固过程中存在的问题,进而制定科学合理的控制和优化策略,有效提升铸件的质量稳定性和整体性能,满足高端应用的需求。

在凝固过程中,温度场的不均匀分布是导致缺陷形成的重要原因。由于大型铸钢件体积较大,内部热量散失缓慢,导致凝固前沿推进速度不一致,部分区域易出现局部过热或凝固迟滞现象。这种不均匀冷却使得金属液体不能及时补充固相收缩形成的空隙,从而形成缩孔缺陷。气体的溶解度随着温度降低而减少,过量气体在凝固过程中析出,形成气孔。局部温度高且凝固缓慢的区域尤其容易积聚气体,促使气孔缺陷发生。数值模拟揭示了温度场变化对缺陷位置的影响,结合铸造工艺参数调整可有效减小这些缺陷的风险。

铸钢件在凝固过程中还可能发生夹杂物和裂纹。夹杂物通常来源于熔炼过程中的杂质或铸型材料剥

落,固态收缩及热应力集中使得夹杂物易被捕获于晶界和孔隙中,影响组织连续性和强度。裂纹的产生则多由于热应力超过材料的屈服强度,尤其在温度梯度剧烈变化的区域,热应力集中引发热裂纹和冷裂纹<sup>[2-6]</sup>。金属液流动不畅和结晶结构的粗大化也加剧了裂纹的倾向。通过数值模拟分析凝固过程中的应力分布和热历史变化,能够揭示裂纹产生的关键因素,为优化工艺参数提供科学依据。对凝固缺陷形成机理的系统研究,为大型铸钢件的质量控制和工艺改进奠定了坚实的理论基础。

## 3 基于数值模拟的工艺参数优化策略

基于数值模拟的工艺参数优化策略在大型铸钢件生产过程中发挥着重要作用。数值模拟技术通过对凝固过程中的温度场、应力场以及相变行为进行精确计算,为工艺设计提供了科学依据。通过模拟分析,可以准确预测不同工艺参数对铸件内部结构和缺陷形成的影响,进而指导合理调整浇注温度、冷却速率、浇注系统设计及保温措施等关键工艺参数。优化工艺参数不仅能够有效缩短凝固时间,减少内应力集中,还能显著降低缩孔、气孔等凝固缺陷的产生概率,从而提升铸件整体质量。

浇注温度作为影响铸钢件凝固质量的重要参数,在数值模拟中得到广泛研究。较高的浇注温度有助于改善金属液流动性和填充性能,但过高温度会延长凝固时间,增加内部缺陷形成的风险。相反,较低的浇注温度虽可缩短凝固时间,但可能导致金属液未完全填充型腔,产生冷隔等缺陷。通过数值模拟可以对不同浇注温度条件下温度场和凝固路径进行对比分析,确定合理浇注温度范围,实现质量与效率的平衡。冷却速率的调控也至关重要。适当控制冷却介质的温度和流速,通过模拟预测热流分布,能够有效调节温度梯度,减少热应力及变形,降低热裂纹风险。

浇注系统的设计优化是改善大型铸钢件凝固质量的重要环节。数值模拟帮助分析浇注口位置、浇注速度及浇注路径对温度场和金属流动的影响,避免湍流和气体卷入,提高熔体填充的均匀性。合理的浇注系统设计能减少局部过热区域,降低缩孔和夹杂缺陷发生概率<sup>[7]</sup>。保温措施的科学安排也是工艺优化的关键,通过数值模拟能够预测保温材料 and 保温时间对凝固过程的调节效果,确保铸件在关键阶段保持适宜温度,促进组织的均匀化。整体来看,数值

模拟提供了一个虚拟实验平台,使得复杂工艺参数的优化变得系统化和高效化,有效提升了大型铸钢件的生产工艺水平和铸造质量。

#### 4 工艺优化效果评价与应用实例

工艺优化效果的评价是大型铸钢件生产中验证数值模拟成果和工艺改进成效的关键环节。通过系统的评价方法,可以全面了解优化措施对铸件质量提升的实际贡献。评价内容主要涵盖铸件内部缺陷的减少情况、组织结构的均匀性改善、机械性能的提升以及生产效率的变化。采用无损检测技术如 X 射线、超声波检测能够直观反映缺陷数量和分布情况,而金相分析则用于观察组织细化和缺陷修复情况。结合数值模拟预测结果与实际检测数据的对比,能够有效评估工艺参数调整对铸件凝固行为的影响,从而为后续工艺调整提供反馈和依据。

实际应用中,经过工艺优化的大型铸钢件在多方面表现出显著改进。通过调整浇注温度和冷却条件,缩孔和气孔缺陷数量明显减少,铸件内部致密性增强。温度场均匀分布促进了晶粒细化,减少了粗大晶粒区的形成,提高了材料的韧性和强度。在机械性能测试中,优化后的铸件表现出更高的拉伸强度和断后伸长率,疲劳寿命也得到延长,表明优化工艺对提高铸件使用可靠性具有积极作用。合理设计的浇注系统改善了金属液的流动状态,减少了夹杂物的产生,进一步提升了铸件的冶金质量。生产效率方面,工艺优化缩短了凝固周期和冷却时间,降低了能耗和材料浪费,体现出显著的经济效益。

具体应用实例充分展示了基于数值模拟的工艺优化策略在大型铸钢件工业生产中的重要价值。一家大型铸钢件制造企业通过引入先进的数值模拟技术,结合实际生产工艺,系统分析了铸件凝固过程中的温度分布和应力变化,针对性地调整了工艺参数。这一优化措施有效缓解了铸件在凝固过程中的热应力集中问题,显著改善了长期困扰的缩孔和热裂纹缺陷。经过工艺改进,铸件内部结构更加均匀,晶粒细化,材料力学性能显著提升<sup>[8]</sup>。企业通过这项技术不仅实现了产品质量的稳定提升,还大幅降低了返工和报废率,节约了生产成本和资源投入。这一实例表明,结合数值模拟的工艺优化不仅有助于提高铸钢件的性能和可靠性,更为铸造行业的智能化、精细化发展提供了切实可行的技术路径,具有广泛的推

广和应用前景。

#### 5 结语

大型铸钢件的凝固过程复杂多变,数值模拟为深入理解其热传导和缺陷形成机理提供了有力工具。通过精准的模拟分析,实现了工艺参数的科学优化,显著提升了铸件质量和生产效率。优化后的工艺有效减少了缩孔、气孔等缺陷,提高了组织均匀性和机械性能,满足了高性能铸件的需求。未来,结合先进的模拟技术与智能制造手段,将进一步推动大型铸钢件铸造工艺的创新与发展,促进产业升级和技术进步。

#### 参考文献

- [1] 曾凌.水电用大型蝶阀铸钢件的超声检测工艺[J].物理测试,2024,42(04):42-47.
- [2] 袁永宏,刘幼平,廖仲宾,等.铁路货车大型铸钢件清理智能化解决方案[J].轨道交通材料,2024,3(02):41-45.
- [3] 罗永扬,许占良,申波,等.大型 1/4 圆端盖铸钢件的研制[C]//中国铸造协会(China Foundry Association),《铸造工程》杂志社.第十九届中国铸造协会年会论文集.新乡市长城铸钢有限公司,;2023:143-144.
- [4] 仵方果,王胜明,南豪,等.水泥窑磨设备大型低合金铸钢件缺陷分析及修补工艺[J].江西建材,2023,(04):169-171.
- [5] 大型水电机组核心铸钢件实现自主化研制[J].铸造工程,2022,46(04):38.
- [6] 徐荣法,吉祖明.大型铸钢件及耐磨铸件用复合型砂工艺的开发与实践[C]//中国机械工程学会,铸造行业生产力促进中心.2021 中国铸造活动周论文集.苏州兴业材料科技股份有限公司,;2021:267-271.
- [7] 苏志东,冯周荣,李彩虹,等.大型铸钢件 3D 砂型打印用原砂研究及应用[J].铸造,2021,70(10):1178-1182.
- [8] 李燕飞.无模化数控加工技术在大型铸钢件生产中的体现[J].内燃机与配件,2021,(18):105-106.

**版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**