

基于数值模拟的铸造工艺设计与优化策略研究

陈 夫

浙江港航重工机械有限公司 浙江 舟山 316000

摘 要：本文探讨了基于数值模拟的铸造工艺设计与优化策略，介绍了铸造工艺的基本流程与数值模拟技术的原理，详细阐述铸造工艺设计流程，包括铸件模型建立、网格划分、数值模拟参数设置及结果分析。进一步提出浇注系统优化、凝固过程控制、材料与工艺参数匹配及多场耦合模拟与优化等策略。通过球墨铸铁（QT450和QT500）与灰铁件（HT250和HT300）的铸造案例研究，验证了数值模拟技术在提升铸件质量与生产效率方面的有效性。

关键词：数值模拟；铸造工艺设计；优化策略

1 铸造工艺与数值模拟理论基础

1.1 铸造工艺概述

铸造工艺作为一种古老且重要的金属成型方法，在现代制造业中占据核心地位。其基本流程涵盖熔炼、造型、浇注、凝固及后续处理等关键环节。熔炼过程中，对于球墨铸铁（QT450和QT500），需精确控制碳、硅、锰等元素含量，同时添加适量球化剂与孕育剂，以确保石墨球化良好，获得预期力学性能；对于灰铁件（HT250和HT300），则着重控制碳当量与孕育效果，保证石墨形态与基体组织符合要求。造型环节，依据铸件形状与生产批量选择合适方法，砂型铸造成本低、适用性广，常用于各类中小型球墨铸铁与灰铁件生产；对于一些精度要求较高的灰铁件，可采用金属型铸造，提高铸件尺寸精度与表面质量。浇注时，针对不同材质铸件控制浇注速度与温度，球墨铸铁浇注温度一般在1350-1450℃，灰铁件在1300-1400℃，确保金属液平稳、快速充型，避免浇不足、冷隔等缺陷。凝固过程中，球墨铸铁因石墨化膨胀特性，合理控制凝固顺序可有效利用膨胀补缩，减少缩孔、缩松；灰铁件则需关注石墨形态对凝固收缩的影响。后续处理包括清理、热处理、表面处理等，球墨铸铁通过适当热处理可进一步改善力学性能，如正火提高强度与硬度，退火消除内应力；灰铁件经表面处理可增强耐腐蚀性与美观度，满足不同应用场景需求。

1.2 数值模拟技术原理

数值模拟技术在铸造工艺领域的应用基于一系列复杂但严谨的原理。常用的有限元法是将铸造过程的物理模型离散为有限个单元，通过对每个单元进行数学分析，构建方程组求解，从而近似模拟整个铸造过程。以模拟球墨铸铁凝固过程为例，先将铸件划分成众多微小单元，针对每个单元建立热传导方程，考虑球墨铸铁材料热物性参数随温度变化，结合初始条件与边界条件，

如铸件初始温度、铸型与外界环境的热交换情况等，利用数值算法求解方程，得到各单元在不同时刻的温度分布，进而分析凝固顺序与热应力分布。在模拟灰铁件金属液充型过程中，将型腔空间划分成网格，根据流体力学基本方程，如连续性方程、动量方程，对每个网格节点上的流速、压力等物理量进行计算，描述金属液在型腔内的流动状态，为优化浇注系统设计提供依据^[1]。

2 基于数值模拟的铸造工艺设计

2.1 铸造工艺设计流程

铸造工艺设计是一个系统且严谨的过程，其流程紧密关联，每个环节都对最终铸件质量起着决定性作用。在设计伊始，需全面考量铸件的结构特点、材料特性以及预期性能要求。对于球墨铸铁与灰铁件，不同的石墨形态与基体组织决定了其性能差异，如球墨铸铁具有较高强度与韧性，而灰铁件则在减震、耐磨方面表现突出。同时，明确铸件的应用场景，如球墨铸铁常用于制造承受较大载荷的机械零件，像汽车曲轴、齿轮等；灰铁件多用于制造机床床身、发动机缸体等对减震性能要求高的部件。以此为基础规划整个工艺设计路径，确保后续设计环节有的放矢，满足铸件生产的质量、成本与效率要求。

2.2 铸件模型建立与网格划分

铸件模型建立是数值模拟的基础。利用专业的三维建模软件，如SolidWorks、UG等，依据铸件的设计图纸精确构建三维模型。在建模过程中，需严格遵循尺寸精度要求，对于具有复杂结构的球墨铸铁或灰铁件，如发动机缸体，要确保模型的几何形状准确无误，尤其是内部的水道、油道等结构。完成模型构建后，进行网格划分。网格划分的质量直接影响数值模拟结果的准确性与计算效率。常用的网格划分方法包括结构化网格与非结构化网格。对于形状规则的铸件部分，如平板类结构，

可采用结构化网格，其网格单元排列整齐，计算精度高；对于复杂形状区域，如球墨铸铁曲轴的曲拐部位、灰铁件缸体的异形孔等，非结构化网格能更好地贴合模型边界，提高网格划分的灵活性与适应性。通过合理设置网格尺寸，在关键部位如可能出现缩孔、缩松的热节处，采用较小网格尺寸以提高模拟精度；在对模拟结果影响较小的区域，适当增大网格尺寸，平衡计算精度与计算时间^[2]。

2.3 数值模拟参数设置

数值模拟参数设置决定了模拟结果的可靠性与有效性。在材料参数方面，输入球墨铸铁（QT450和QT500）与灰铁件（HT250和HT300）的热物理性能参数，如密度、比热容、热导率等。这些参数随温度变化而改变，精确测量与输入至关重要。例如，球墨铸铁在凝固过程中，由于石墨化膨胀，其热物性参数变化较为复杂，准确设置可更真实模拟温度场分布。边界条件设置同样关键，在浇注过程中，设定金属液的初始温度、浇注速度以及铸型与外界环境的热交换系数。对于铸型与金属液接触界面，考虑其热阻影响，合理设置界面传热系数。在凝固过程模拟中，设置铸件与铸型之间的热传导边界条件，以及铸件表面与空气的对流换热边界条件。另外，针对不同模拟模块，如充型过程模拟的流体力学参数，凝固过程模拟的凝固潜热释放参数等，均需依据实际铸造工艺与物理原理精准设定，为数值模拟提供准确的初始条件与运行规则。

2.4 数值模拟结果分析与工艺设计调整

数值模拟完成后，深入分析模拟结果是优化工艺设计的关键。在充型过程模拟结果分析中，观察球墨铸铁或灰铁件金属液的流速矢量图，判断金属液是否平稳充型，有无紊流、卷气现象。若发现金属液在型腔内流动不均匀，如在某区域流速过快或过慢，可能导致浇不足或冷隔缺陷，需调整浇注系统设计，如改变浇口位置、尺寸或数量。对于凝固过程模拟结果，分析温度场分布与凝固时间云图，确定热节位置与凝固顺序。若热节处出现较大缩孔、缩松风险，可通过优化冒口与冷铁设计，调整凝固顺序，实现补缩。通过对模拟结果的反复分析与工艺设计调整，直至模拟结果满足铸件质量要求，为实际铸造生产提供可靠的工艺方案。

3 基于数值模拟的铸造工艺优化策略

3.1 浇注系统优化

借助数值模拟优化浇注系统，对保障球墨铸铁与灰铁件金属液优质充型至关重要。通过模拟金属液在不同浇注系统方案下的充型过程，分析流速、压力及流态分

布。若模拟显示球墨铸铁或灰铁件金属液充型时存在流速不均，部分区域流速过慢易致浇不足，或流速过快引发紊流、卷气等问题，可针对性调整浇口位置。例如，对于形状复杂的球墨铸铁件，将浇口设置在壁厚较厚、远离薄壁与复杂结构处，能使金属液平稳流向各部位；对于灰铁件，考虑其石墨形态对充型的影响，合理选择浇口位置以促进金属液均匀充型。利用数值模拟多组浇口尺寸，对比充型效果，确定最优尺寸^[3]。同时，合理规划浇口数量，对于大型或结构特殊的球墨铸铁与灰铁件，增设浇口可改善金属液流动均匀性，减少充型缺陷，提升铸件成型质量。

3.2 凝固过程控制

凝固过程控制是提高球墨铸铁与灰铁件质量的核心环节，数值模拟为此提供了有力支持。通过模拟铸件凝固过程中的温度场变化，精确定位热节位置。热节处因散热慢，易产生缩孔、缩松缺陷。基于模拟结果，优化冒口设计，调整冒口尺寸、形状与位置，使其能有效为热节处补缩。例如，对于球墨铸铁热节较大的部位，采用尺寸合适的暗冒口，利用其石墨化膨胀进行补缩；对于灰铁件，根据其凝固特性，合理设置冒口与冷铁。冷铁的运用同样依据模拟结果，在需加快凝固的区域放置冷铁，调整凝固顺序。如在球墨铸铁薄壁与厚壁过渡处的薄壁侧放置冷铁，加快薄壁凝固，让厚壁金属液有足够时间补缩；对于灰铁件，在关键部位放置冷铁，改善石墨形态，使铸件各部位凝固均匀，减少内部缺陷，提升铸件内部组织致密性与力学性能。

3.3 材料与工艺参数匹配

实现球墨铸铁（QT450和QT500）、灰铁件（HT250和HT300）材料与工艺参数的精准匹配，能充分发挥材料性能，保障铸件质量。数值模拟可模拟不同材料在特定工艺参数下的铸造过程。在材料选择方面，依据铸件性能要求，如承受较大载荷的零件选用球墨铸铁，对减震要求高的选用灰铁件。对于工艺参数，模拟浇注温度、充型速度、冷却速率等参数对铸件质量的影响。球墨铸铁浇注温度过高可能导致石墨漂浮，过低则影响充型；灰铁件充型速度过快易产生紊流，过慢则导致充型不足。通过模拟多组参数组合，建立参数与铸件质量的关系模型，找到与所选材料适配的最佳工艺参数组合，提高铸件成品率与性能。

3.4 多场耦合模拟与优化

多场耦合模拟考虑铸造过程中多种物理场相互作用，能更真实反映实际情况，为工艺优化提供更全面依据。在热-流-固耦合模拟中，同时考虑传热、流体流动与

凝固过程。模拟球墨铸铁或灰铁件金属液充型时,其流动带动热量传递,影响凝固进程;凝固过程中体积收缩又改变流体流动状态。通过耦合模拟,分析这些相互作用对铸件质量的影响,优化工艺。热-力耦合模拟则关注铸件凝固过程中热应力产生与分布。模拟结果显示,球墨铸铁与灰铁件不同部位因冷却速率差异产生热应力,过大热应力会导致变形、裂纹。依据模拟优化工艺,如控制冷却速率、改进模具结构,降低热应力,提高铸件尺寸精度与质量稳定性。

4 数值模拟技术在铸造工艺中的实践应用

4.1 案例研究一:球墨铸铁(QT450)铸造数值模拟与优化

在某球墨铸铁(QT450)机械零件的铸造过程中,数值模拟技术发挥了关键作用。首先,利用专业数值模拟软件构建球墨铸铁铸件及铸造模具的三维模型,并进行精细网格划分,确保模拟精度。在模拟参数设置阶段,精确输入球墨铸铁(QT450)材料的热物理性能参数,包括密度、比热容、热导率以及球化率、孕育效果等关键参数。通过数值模拟充型过程,发现球墨铸铁液在型腔内存在流速不均匀的情况,部分薄壁区域充型缓慢,存在浇不足风险。基于此模拟结果,优化浇口位置与尺寸,将浇口设置在靠近薄壁区域且利于金属液流动的部位,并适当增大浇口尺寸以提高充型速度。在凝固过程模拟中,准确捕捉到铸件内部热节位置,热节处可能产生缩孔、缩松缺陷^[4]。因此,调整冒口设计,采用合适尺寸与形状的暗冒口,并合理布置在热节上方,确保补缩通道顺畅。经过多轮模拟优化后,进行实际生产验证。结果表明,优化后的铸造工艺使球墨铸铁(QT450)铸件的废品率从原来的15%大幅降至3%,铸件内部组织更加致密,力学性能显著提升,有效提高了生产效率与产品质量。

4.2 案例研究二:灰铁件(HT250)铸造数值模拟与优化

针对某灰铁件(HT250)机床床身的铸造难题,数值模拟技术成为工艺优化的有力工具。由于机床床身结构

复杂,对减震性能要求高,铸造过程极易出现缺陷。在数值模拟前,对灰铁件(HT250)材料特性进行深入研究,准确获取其热物理参数以及石墨化特性。在构建三维模型与网格划分时,充分考虑床身的复杂结构特点,对关键部位采用精细化网格划分,以提高模拟精度。在模拟过程中,重点关注充型与凝固过程。充型模拟显示,灰铁件金属液在填充复杂型腔时,因流动阻力大,易产生紊流与卷气现象。通过模拟调整浇注系统,增设导流槽与排气通道,改善金属液流动路径,减少紊流与卷气。利用模拟结果,在薄壁区域合理布置冷铁,加快其凝固速度,同时优化模具结构,采用具有良好隔热性能的材料,控制厚壁区域冷却速率,使铸件各部位凝固均匀。经实际生产验证,采用优化后的铸造工艺,灰铁件(HT250)机床床身的合格率从40%提升至80%,有效解决了铸造缺陷问题,满足机床行业对该床身的高质量要求,彰显了数值模拟技术在复杂灰铁件铸造工艺优化中的巨大优势。

结束语

综上所述,数值模拟技术为球墨铸铁(QT450和QT500)与灰铁件(HT250和HT300)铸造工艺的设计与优化提供了强有力的支持。通过精确模拟铸造过程中的传热、流体流动与凝固等现象,为工艺改进提供了科学依据。未来,随着数值模拟技术的不断发展与完善,其在铸造领域的应用将更加广泛深入,为铸造行业的高质量发展注入新的活力。

参考文献

- [1]张军.高强韧基座铸件凝固工艺设计数值模拟优化研究[J].航空精密制造技术,2021,57(04):7-11.
- [2]李明.铝合金材料设计与铸造工艺一体化优化方法研究[J].材料工程,2020,48(5):38-45.
- [3]李鹏明,刘源,王铸,等.数控车床床身铸件的铸造T艺改进现代铸铁,2020,(01):74-78
- [4]李暖富,柳艳,李贵茂,等.铝合金三通管铸造工艺设计及优化[J].铸造工程,2024,48(1):69-72.DOI:10.3969/j.issn.1673-3320.2024.01.020.