

Optimization of Multiphase Flow Field and Analysis of Enhancement Mechanism in Metallurgical Reactor Based on Numerical Simulation

Guangze Wei

University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning, 114051, China

Abstract

Metallurgical reactors serve as core equipment in metallurgical production processes. The coupled behaviors of multiphase flow, heat and mass transfer, and chemical reactions within them directly impact product quality, energy consumption, and pollutant emissions. Traditional experimental research methods struggle to comprehensively capture the complex physicochemical phenomena occurring inside reactors. Numerical simulation technology, with its advantages of low cost, high efficiency, and strong reproducibility, has become a crucial tool for revealing multiphase flow field characteristics, optimizing process parameters, and elucidating enhancement mechanisms. This paper systematically expounds the fundamental theories and methodologies of metallurgical reactor numerical simulation, analyzes the distribution characteristics of multiphase flow fields in typical metallurgical reactors such as blast furnaces, converters, electric furnaces, and continuous casting tundishes, explores key strategies for flow field optimization and process enhancement, and demonstrates the practical value of numerical simulation in optimizing metallurgical reactor design.

Keywords

numerical simulation; metallurgical reactor; multiphase flow field; flow field optimization; process intensification

基于数值模拟的冶金反应器内多相流场优化与强化机理分析

魏光泽

辽宁科技大学, 中国·辽宁鞍山 114051

摘要

冶金反应器是冶金生产过程的核心装备,其内部多相流动、传热传质及化学反应等过程的耦合行为直接影响着产品质量、能源消耗和污染物排放。传统的实验研究方法难以全面捕捉反应器内部复杂的物理化学现象,而数值模拟技术凭借其低成本、高效率、可重复性强等优势,已成为揭示反应器内多相流场特征、优化工艺参数、阐明强化机理的重要工具。本文系统阐述了冶金反应器数值模拟的基本理论与方法,分析了高炉、转炉、电炉、连铸中间包等典型冶金反应器内多相流场的分布特征,探讨了流场优化与过程强化的主要策略,揭示了数值模拟在冶金反应器优化设计中的应用价值。

关键词

数值模拟; 冶金反应器; 多相流场; 流场优化; 过程强化

1 引言

随着计算机技术和数值计算方法的飞速发展,基于计算流体动力学的数值模拟技术为冶金反应器的研究开辟了新的途径。数值模拟能够以较低的成本获取反应器内部速度场、温度场、浓度场和相分布的详细信息,揭示流动与反应之间的内在联系,为工艺参数优化和反应器结构改进提供科学依据。近年来,多相流模型、湍流模型、辐射传热模型以及化学反应动力学模型的不断发展和完善,使数值模拟的准确性和适用性显著提升,在冶金反应器的设计、诊断和优化

中发挥着日益重要的作用。

2 冶金反应器数值模拟的基本理论与方法

2.1 多相流数学模型

冶金反应器内的流动通常涉及多个相态,准确描述多相流动行为是数值模拟的核心。根据研究对象的特征和模拟需求,常用的多相流模型包括欧拉-欧拉双流体模型、欧拉-拉格朗日模型和混合模型等。

欧拉-欧拉双流体模型将各相均视为连续介质,通过求解各相的质量、动量和能量守恒方程来描述流动行为。该模型适用于颗粒相或气泡相体积分数较高的体系,如高炉风口回旋区、流化床反应器等。模型需要引入相间动量交换项和湍流相互作用项,通过相间曳力系数、升力系数等本构关

【作者简介】魏光泽(2005—),男,中国山东潍坊人,本科在读,从事冶金工程研究。

系实现相间耦合。该模型的优点在于计算效率较高,适用于大规模工程问题,但相间本构关系的准确性对模拟结果影响较大。

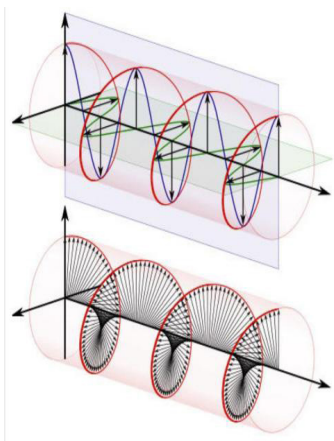


图1 欧拉-欧拉双流体模型示例

欧拉-拉格朗日模型将连续相(通常为气相或液相)作为连续介质处理,采用欧拉方法求解,而将离散相(颗粒或气泡)视为离散单元,采用拉格朗日方法追踪其运动轨迹。该模型能够详细描述离散相的运动行为、粒径分布以及相间相互作用,适用于颗粒浓度较低、颗粒尺寸分布较广的体系,如喷雾干燥器、气力输送等。该模型的计算精度较高,但计算量较大,对计算资源要求较高。

混合模型是一种简化的多相流模型,适用于各相之间相对速度较小、相间耦合较强的体系,如离心分离器、沉降池等。该模型通过求解混合物的连续性方程、动量方程以及各相的体积分数方程来描述流动,计算效率高,但无法准确描述相间的相对运动。

2.2 湍流模型与传热传质模型

冶金反应器内的流动大多处于湍流状态,湍流模型的选择对模拟结果的准确性至关重要。常用的湍流模型包括标准 $k-\epsilon$ 模型、雷诺应力模型和大涡模拟等。

标准 $k-\epsilon$ 模型是最广泛应用的湍流模型,通过求解湍动能 k 和湍动能耗散率 ϵ 的输运方程来描述湍流黏性。该模型计算稳定性好,收敛速度快,适用于高雷诺数下的充分发展湍流,但无法准确捕捉各向异性和强旋流动。雷诺应力模型通过直接求解雷诺应力的输运方程,能够更准确地描述各向异性湍流,适用于旋流、分离流等复杂流动,但计算量较大,收敛性较差。

在冶金反应器中,流动往往伴随着传热和传质过程,因此需要耦合求解能量方程和组分输运方程。传热模型包括导热、对流和辐射传热,其中辐射传热对于高温冶金反应器尤为重要,常用离散坐标法或离散传播法求解辐射传递方程。传质模型则涉及组分扩散、化学反应以及相间传质过程,需根据具体反应体系确定组分输运方程中的源项和边界条件。

2.3 化学反应与多场耦合

冶金反应器内的化学反应对流动和温度场具有重要影响,因此需要在数值模拟中合理描述化学反应动力学。根据反应体系的特点,可选用总包反应模型、详细反应机理或火焰面模型等。对于高炉炼铁、转炉炼钢等复杂反应体系,通常采用简化的总包反应模型结合经验动力学参数来描述;对于某些特定反应,如燃烧过程、脱硫反应等,可引入详细的反应机理以提高模拟精度。

多场耦合是冶金反应器数值模拟的显著特征。流动场、温度场、浓度场和电磁场等物理场之间存在复杂的相互作用,需要建立耦合求解方法。例如,电炉炼钢过程中,电磁场驱动钢液流动,而流动又影响温度分布和传质过程,因此需要采用磁流体动力学模型实现电磁场与流场的耦合^[1]。

2.4 计算网格与数值求解

数值模拟的前处理工作主要包括几何建模、网格划分和边界条件设定。网格质量直接影响计算的精度和收敛性,对于复杂的冶金反应器几何结构,通常采用非结构化网格或多面体网格以适应复杂的边界形状。对于边界层区域,需进行网格加密以准确捕捉近壁面流动特征。网格独立性验证是保证计算结果可靠性的重要环节,需通过加密网格验证计算结果不再随网格数量显著变化。

数值求解过程涉及控制方程的离散化和迭代求解。有限体积法因其守恒性好、适应性强,是冶金反应器数值模拟中最常用的离散方法。求解过程中需合理设置松弛因子、收敛准则等参数,以保证计算稳定收敛。对于瞬态问题,需选择合适的时间步长以捕捉流动的动态特征^[2]。

3 典型冶金反应器内多相流场特征

3.1 高炉内气-固-液流动

高炉是钢铁生产中最核心的反应器,其内部同时存在气相(煤气)、固相(炉料)和液相(渣铁)的相互作用,流动行为极为复杂。数值模拟研究表明,高炉上部块状带以气-固逆流流动为主,炉料在重力作用下向下运动,煤气在压力驱动下向上运动,气-固两相的相对速度决定了传热和还原反应的效率。模拟结果揭示了炉料分布的不均匀性对气流分布的影响,中心气流与边缘气流的合理匹配是保证高炉顺行的关键。

高炉下部软熔带和滴落带是气-液-固三相共存的复杂区域。软熔带的形状和位置直接影响高炉内的压力损失和煤气分布。数值模拟能够预测不同原燃料条件下软熔带的变化规律,为优化炉料结构和操作参数提供依据。滴落带内,铁水和熔渣穿过焦炭层向下滴落,煤气向上流动,相间相互作用强烈。采用欧拉-欧拉双流体模型结合颗粒动力学理论,可以模拟焦炭层的空隙率分布和液相的渗透行为,揭示影响滴落带透气性的关键因素。

高炉风口回旋区是高炉内温度最高、反应最剧烈的区

域,煤粉和热风在此发生燃烧反应,产生高温还原性煤气。数值模拟能够刻画回旋区的形状、大小以及温度分布,揭示喷煤量、富氧率等参数对回旋区流动和燃烧的影响。研究表明,增大富氧率可提高回旋区温度,增强煤粉的燃烧效率,但过高的富氧率可能导致回旋区扩大,影响气流分布的均匀性。

3.2 转炉内射流 - 熔池相互作用

转炉炼钢过程中,氧枪喷出的超音速射流冲击熔池,产生强烈的搅拌和混合作用,促进脱碳、脱磷等反应的进行。数值模拟是研究射流-熔池相互作用的重要工具。通过建立多相流模型,可以模拟氧枪射流冲击熔池的过程,揭示射流穿透深度、冲击坑形状以及熔池内部流场结构。

模拟结果表明,氧枪喷头结构对射流行为有显著影响。拉瓦尔喷管可产生超音速射流,其马赫数和流量密度分布取决于喷管几何尺寸。采用多喷嘴氧枪可改善射流的空间分布,减少对炉衬的冲刷,同时增强熔池的搅拌效果。通过数值模拟优化喷头参数,可以在保证脱碳效率的同时降低喷溅损失,提高金属收得率。

3.3 电炉内电磁 - 流动耦合

电炉炼钢以电能为热源,电磁场对熔池流动具有决定性影响。数值模拟需要耦合求解电磁场方程和流动方程,以准确描述电炉内的多物理场行为。交流电炉和直流电炉的电磁特性存在显著差异,交流电炉的电磁力呈现周期性变化,导致熔池流动的脉动特征;直流电炉的电磁场相对稳定,熔池流动较为平稳。数值模拟揭示了电炉内电磁力的分布特征及其对熔池流动的驱动作用。

3.4 连铸中间包内钢液流动

连铸中间包是连铸工艺中的重要设备,其内部钢液流动状态直接影响铸坯质量和生产效率。数值模拟是研究中间包流场的主要手段,通过建立三维流动模型,可以模拟钢液在中间包内的停留时间分布、速度场和温度场。

模拟结果表明,中间包的流动结构主要由入口射流、出流抽吸以及挡墙、挡坝等控流装置共同决定。未经优化的中间包容易出现短路流和死区,导致夹杂物无法充分上浮去除,影响铸坯洁净度。通过设置合适的挡墙和挡坝,可以改善钢液的流动路径,延长停留时间,促进夹杂物上浮^[1]。

4 流场优化与过程强化策略

4.1 反应器结构优化

反应器结构是决定流场分布的根本因素,通过数值模拟优化反应器结构是改善流动状态、强化反应过程的重要途径。对于高炉而言,炉喉布料器的设计、炉身角度的选取、风口布置方式等均影响炉内气-固流动的均匀性。数值模拟能够定量评估不同结构参数对气流分布、炉料下降和压差损失的影响,为高炉设计提供理论依据。

对于转炉而言,氧枪喷头的几何形状、喷孔数量和角度、

底吹喷嘴的布置方式等对流场影响显著。通过数值模拟优化氧枪参数,可在保证脱碳效率的前提下降低喷溅损失和炉衬侵蚀。对于中间包而言,挡墙和挡坝的位置、湍流控制器的尺寸、浸入式水口的形状等均影响钢液流动模式,数值模拟能够筛选最优的控流装置组合。

4.2 操作参数优化

操作参数的调整是实现流场优化和过程强化的另一重要手段。数值模拟能够揭示关键操作参数对流场的影响规律,为工艺优化提供定量指导。对于高炉,风量、风温、富氧率、喷煤量等参数直接影响风口回旋区的状态和气流分布,通过模拟可以确定不同条件下的最优操作区间。

对于转炉,氧枪枪位、供氧强度、底吹流量等参数决定了熔池搅拌强度和反应速率。数值模拟能够建立操作参数与熔池混合时间、喷溅损失之间的定量关系,为转炉吹炼过程控制提供依据。对于电炉,供电曲线、电极调节方式、泡沫渣控制等参数影响熔池流动和热效率,通过模拟可优化供电制度和加料工艺。

4.3 外加物理场强化

在传统冶金反应器基础上引入外加物理场,是实现过程强化的新途径。数值模拟为外加物理场的设计和 optimization 提供了有力工具。例如,在中间包内施加电磁搅拌,可改变钢液的流动模式,促进夹杂物碰撞和上浮。电磁场作用下,钢液中产生洛伦兹力,驱动钢液形成强制对流,改变原有的流动结构。通过数值模拟可以优化电磁搅拌器的布置位置、电流频率和强度,获得最佳的流场调控效果。

在钢包精炼过程中,底吹氩气搅拌是强化传质的主要手段。数值模拟能够研究气泡尺寸分布、气体流量、喷嘴布置等因素对熔池搅拌效果的影响,优化精炼工艺参数^[4]。

5 结语

基于计算流体动力学的数值模拟技术已成为研究冶金反应器内多相流场、优化工艺参数和揭示强化机理的重要工具。通过建立合理的多相流模型、湍流模型和传热传质模型,并结合化学反应动力学和电磁场等物理场,可以准确捕捉高炉、转炉、电炉、连铸中间包等典型冶金反应器内部的速度场、温度场和浓度场分布特征,揭示流动与反应之间的内在联系。随着计算能力的提升和物理模型的完善,数值模拟将在冶金过程绿色化、智能化发展中发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] 陶鑫.典型冶金反应器钢渣界面下速度分布及夹杂物去除原理[D].太原理工大学,2025.
- [2] 米涛.基于机器学习的冶金反应器内气泡行为检测与预测[D].辽宁科技大学,2024.
- [3] 尚小标,李广超,白永珍,等.微波冶金反应器加热效率与均匀性优化[J].微波学报,2023,39(03):89-96.
- [4] 沈蔡龙,贾炎,陈彦臻,等.化工技术在生物冶金过程强化中的研究进展[J].过程工程学报,2022,22(10):1349-1359.