

无源滤波技术仅能滤除固定次数谐波，难以适配锂电生产设备谐波波动大的特点，还易引发谐振，适配性较低；混合滤波技术兼顾治理效果与投入成本，但结构复杂，后续维护难度较大；有源滤波（APF）技术则凭借滤波范围广、响应速度快、抗谐振能力强的优势，可动态跟踪谐波变化，基于 SiC 器件的 APF 更有效抑制高频次谐波，是锂电正极生产场景谐波治理的最优适配技术。基于现场谐波测试数据，需明确 APF 设备五项关键参数：一是额定补偿电流，依据核心设备谐波电流含量选取 200A 模块；二是响应时间 $\leq 30 \mu s$ ，以应对负载波动引发的谐波快速变化；三是滤波次数覆盖 2-100 次，满足高次谐波治理需求；四是控制功能，集成谐波补偿、无功补偿、三相不平衡补偿等功能，采用模型预测控制（MPC）实现谐波电流快速跟踪；五是防护等级 $\geq IP54$ ，采用模块化设计，支持在线扩容与维护，适配车间恶劣环境。

针对锂电正极生产设备“多分散、高功率”的特性，提出“分散补偿+集中治理”的复合治理架构。分散补偿是在涂布机、高速搅拌机、辊压机等高谐波设备配电柜处安装壁挂式 APF，就近补偿谐波，减少配电线路传输损耗；集中治理则在配电室母线处安装柜式 APF，补偿系统整体谐波，保障电网侧电能质量达标。该架构实现了“精准治理+全局优化”的协同效应，APF 安装需遵循就近原则：分散补偿 APF 并联于负载配电柜输出端，缩短补偿电流传输路径；集中治理 APF 并联于配电室母线电容补偿柜，规避谐振风险。同时，基于现场谐波特征优化 APF 滤波算法，采用智能傅里叶算法适配配电系统阻抗特性，重点提升 5、7、11 次谐波补偿精度，并设置过载保护阈值，保障设备在负载冲击下稳定运行。此外，需从源头抑制谐波产生：优选 12 脉波整流电路变频器，替代传统 6 脉波产品；合理调整设备运行参数，避免变频器低负载率运行；增大配电网缆截面积，降低线路阻抗与谐波衰减损耗；关键设备采用 SiC 电力电子装置，减少开关损耗与谐波排放。

该方案技术可行性突出，依托成熟的有源滤波技术，结合分散与集中补偿优势，融入宽禁带器件与智能控制算法，可精准匹配锂电正极生产谐波特征；经济可行性显著，总投资约 380 万元，企业可享 10% 所得税抵免，年节约成本超 1200 万元，投资回收期仅 4 个月；安全可行性高，APF 模块化设计搭配完善保护功能，安装维护不影响生产线正常运行。

5 结语

本文研究仍存在两点不足：一是测试样本仅覆盖一家锂电正极生产企业，样本数量有限，需扩大测试范围，涵盖不同产能、不同产品类型的企业，完善谐波特征数据库；二是未考虑极端工况（如全厂设备同时启停、电网电压波动）下的谐波治理效果，需进一步开展相关测试与仿真分析。未来研究可从三个方向展开：一是智能化治理方向，结合数字孪生技术与人工智能算法，开发谐波预测与自适应补偿系统，实现治理参数的实时优化，提升治理的精准性与实时性；二是高效化设备方向，基于 SiC/GaN 宽禁带半导体技术，研发高功率密度、低损耗、小型化的 APF 设备，降低设备体积与能耗，进一步提升治理效率；三是系统化防控方向，构建锂电正极生产全流程谐波防控体系，从设备选型、工艺优化、配电设计、末端治理等环节实现谐波的全面管控，形成行业标准与规范。谐波治理是锂电正极材料产业高质量发展的关键环节，随着技术的不断进步，智能化、高效化的治理方案将成为行业主流，为新能源产业的绿色发展提供有力支撑。

参考文献

1. 吴晓燕, 李静. 乡村治理现代化中的数字赋能机制研究(J). 华中师范大学学报(人文社会科学版), 2024, 63(4): 78-86.
2. 程根伟. 极端气候下流域灾害防控策略(M)/许厚泽, 赵其国. 长江流域生态保护与灾害应对. 北京: 科学出版社, 2024: 45-53.
3. 李明远, 王浩. 人工智能在医疗诊断中的伦理风险与规制路径(J). 中国工程科学, 2023, 25(6): 98-105.

Research on Simulation Methods for Gas-Solid Two-Phase Flow in Polysilicon Fluidized Beds

Zhengyun Wang Wancun Li Keping Gao Dong Wang

Xinjiang Jingnuo New Energy Industry Development Co., Ltd., Huyanghe, Xinjiang, 834034, China

Abstract

This paper systematically reviews the fundamental theories of gas-solid two-phase flow simulation in polysilicon fluidized beds. It compares and analyzes the principles, advantages, disadvantages, and applicable scenarios of mainstream simulation methods, including the Euler-Euler Two-Phase Fluid Model (TFM), the Euler-Lagrange Discrete Element Method (CFD-DEM), and the Multiphase Particle-Particle Interaction (MP-PIC) model. Key technical challenges such as drag model modification, grid optimization, and particle agglomeration effects are discussed in detail. Practical application cases are presented to demonstrate the validation effectiveness of different simulation methods. Finally, the paper outlines future directions for polysilicon fluidized bed simulation technology, providing theoretical references for related engineering design and process optimization.

Keywords

Polysilicon fluidized bed; Gas-solid two-phase flow; Numerical simulation; Two-fluid model; Discrete element method; Drag model

多晶硅流化床内气固两相流动的模拟方法研究

王正云 李万存 高科平 王东

新疆晶诺新能源产业发展有限公司, 中国·新疆 胡杨河 834034

摘要

本文系统梳理多晶硅流化床内气固两相流动的模拟基础理论, 对比分析欧拉-欧拉双流体模型(TFM)、欧拉-拉格朗日离散元模型(CFD-DEM)及多相质点网格模型(MP-PIC)等主流模拟方法的原理、优缺点及适用场景, 重点探讨曳力模型修正、网格划分优化、颗粒聚团效应处理等关键技术难点, 结合实践应用案例阐述不同模拟方法的验证效果, 最后对多晶硅流化床模拟技术的发展方向进行展望, 为相关工程设计与工艺优化提供理论参考。

关键词

多晶硅流化床; 气固两相流动; 数值模拟; 双流体模型; 离散元模型; 曳力模型

1 引言

全球新能源产业扩张所驱动的多晶硅需求的爆发性增长, 其主流生产工艺为硅烷流化床法, 该工艺中流化床内部气固两相的流动行为对最终产品的质量参数及生产系统的效率指标存在直接且决定性的影响。该流动过程的高度复杂性, 导致传统实验测量技术在对流场的微观细节进行全面捕获方面存在固有的局限性。数值模拟技术, 作为一种替代性的研究范式, 已成为破解这一难题的核心研究工具。本文将对该领域现有的模拟理论基础与主流方法体系进行系统性的梳理与整合。同时, 对当前技术应用中存在的难点问题及其潜在的解决方案进行深度剖析。并结合具体的工程案例对

所提出方法的实际效果进行验证。最终, 为该技术在实际工程场景中的应用提供具有参考价值的理论与实践指导。

2 多晶硅流化床气固两相流动模拟基础理论

2.1 气固两相流动控制方程

气固两相流动模拟所依赖的基础控制方程体系, 其构建逻辑植根于体积分数加权的守恒定律框架, 这一框架要求气相与固相各自对质量守恒(即连续性方程)和动量守恒(即动量方程)的约束条件予以满足。气相与固相的体积分数累加值恒定为1。多晶硅生长进程中, 硅的沉积现象会引致固相质量的增量变化。在动量交换的物理机制分析中, 压力梯度、粘性应力场、重力场、气固相间的曳力作用, 以及两相与壁面之间的相互作用力, 均属于必须纳入考量的关键影响因素。气固相间曳力是核心参数。该参数对两相之间动量传递过程的定量刻画具有不可替代的基础支撑作用。

2.2 关键封闭模型

控制方程内的粘性应力张量、气固相间曳力系数等参

【基金项目】新疆人才发展基金。

【作者简介】王正云(1987-), 男, 中国甘肃武威人, 硕士, 高级工程师, 从事多晶硅生产研究。

数,其直接求解路径存在不可逾越的障碍。通过封闭模型对这些参数进行形式化表征,构成了决定模拟精度的核心制约性要素。湍流模型,作为描述气相粘性应力流动特性的常规选择,其应用已被广泛记录。在欧拉-欧拉的理论框架下,固相粘性应力的量化必须依赖颗粒动力学理论。颗粒温度,这一反映颗粒随机运动动能的物理量,是计算固相粘性与颗粒压力的关键输入。相关参数的取值,与颗粒温度、颗粒直径以及颗粒间的碰撞特性存在内在关联。气固相间曳力模型的类型具有多样性。多晶硅流化床内的颗粒流动,呈现出高浓度与多分散的双重特征。针对这一特定场景,传统曳力模型的优化修正成为必要。

3 多晶硅流化床内气固两相流动主流模拟方法

3.1 欧拉-欧拉双流体模型(TFM-KTGF)

欧拉-欧拉双流体模型(TFM)对气相与固相均施加相互渗透连续介质的假设框架,其通过对两组耦合控制方程的联立求解以刻画气固两相的流动行为,此方法构成当前多晶硅流化床工业尺度模拟的主导范式。固相控制方程的封闭性实现,通常依赖于颗粒动力学理论(KTGF)的耦合引入,即形成TFM-KTGF复合模型;该模型借助颗粒温度这一参量对颗粒间随机碰撞的力学效应进行量化表征,从而得以对颗粒相的粘性、压力等宏观本构特性实施有效预测。TFM-KTGF模型在多晶硅流化床模拟场景中的核心优势,体现为其具备的高计算效率——能够对直径0.5m以上的工业级反应器进行数值模拟,且可快速获取床内气含率空间分布、气泡尺寸概率分布、颗粒速度场等关键宏观流动特征。^[1]陆时杰研究团队依托Ansys Fluent数值平台,采用TFM-KTGF模型架构,针对直径0.5m的圆柱形多晶硅流化床内的等温流场开展模拟实验;他们通过Matlab图像处理工具对模拟输出数据进行后处理分析,提取得到气泡尺寸分布特征,以此验证了该模型在多晶硅流化床宏观流场预测维度的有效性。局限性存在。TFM-KTGF模型的显著局限性体现为两方面:其一,由于其将颗粒相处理为连续介质,故无法对单个颗粒的运动轨迹及颗粒间的微观相互作用(如接触、碰撞的瞬时动力学)进行直接捕捉;其二,该模型对曳力模型等封闭性子模型存在强依赖性,而传统曳力模型在多分散颗粒流动及颗粒聚团现象的预测中往往存在较大误差,难以满足高精度模拟的工程需求。因此,TFM-KTGF模型的适用场景更聚焦于反应器结构优化设计、工艺操作参数初步筛选等宏观尺度的研究范畴。

3.2 欧拉-拉格朗日离散元模型(CFD-DEM)

欧拉-拉格朗日离散元耦合模型(CFD-DEM)对气相连续相流动的刻画,采用的是欧拉法这一框架;该框架下,气相速度场与压力场的获取,依赖于Navier-Stokes方程的数值求解过程。对颗粒离散相的运动轨迹展开逐颗粒追踪,同时对颗粒间碰撞、摩擦等相互作用力以及气固相间动量交

换进行精细化计算,这一任务由拉格朗日法下的离散元法(DEM)来完成。该模型的核心优势,在于其具备精准捕捉单个颗粒运动状态与颗粒间微观相互作用的能力。这种能力,可有效揭示多晶硅流化床内颗粒聚团、气泡与颗粒的相互作用等微观流动机制。CFD-DEM在模拟设置层面,要求对颗粒直径、密度、碰撞恢复系数、摩擦系数等微观参数进行明确定义。NETL Multiphase Flow Science的研究案例中,存在针对2D流化床的CFD-DEM模拟工作。该模拟工作明确了颗粒直径4000 μm 、密度2700 kg/m^3 等关键参数的设置方法。这些方法,为多晶硅颗粒流动模拟提供了可参考的依据。^[2]

CFD-DEM模型,因其对每一个独立颗粒运动轨迹实施追踪的强制性要求,展现出计算资源的极度消耗性,这种消耗性使得其可处理的颗粒数量上限被严格限定在 10^6 个量级以内,这一数量级的限制,在面对工业尺度下大规模多晶硅流化床系统的模拟需求时,构成了无法逾越的技术障碍。其应用场景因此被收缩。该模型在实验室环境下,针对小型化实验装置内部的微观流动机制展开探究的适配性,在诸如多晶硅颗粒初始生长阶段的聚团行为表征、流化床内气泡的破碎与聚合的微观动态过程解析等特定研究方向上,得以凸显。此类探究所产出的数据集,可作为宏观尺度模拟模型进行参数校准与结构修正的基础性支撑材料。

3.3 多相质点网格模型(MP-PIC)

多相质点网格模型(MP-PIC),作为一种混合型模拟方法,其本质特征在于对TFM模型的高效性与CFD-DEM模型的微观描述能力的整合。该模型针对气相控制方程,采用欧拉法进行求解;针对颗粒相,则引入“数值粒子(Parcel)”这一概念,每个数值粒子均代表一组具有相同物理属性(如直径、密度、速度)的真实颗粒。通过拉格朗日法追踪数值粒子的运动轨迹,同时将颗粒相特性插值到欧拉网格上以计算连续颗粒应力场,MP-PIC模型实现了颗粒相的离散描述与连续求解的结合。其核心优势在于能够模拟大规模颗粒系统,同时可在一定程度上捕捉颗粒尺度的流动特性。它克服了TFM模型无法描述微观颗粒行为和CFD-DEM模型计算成本过高的缺陷。

在多晶硅流化床的模拟操作域内,MP-PIC模型——其对多分散颗粒流动的有效处置能力,是通过将差异化数值粒子属性赋予以差异化尺寸颗粒的方式达成的——能够对多晶硅颗粒生长进程中的粒径分布变动实施精准模拟。该模型对连续颗粒应力模型的引入,可实现对颗粒过度堆积现象的有效规避。这一特质使得其更贴合多晶硅流化床内部高浓度颗粒流动的实际工况。然而,MP-PIC模型的模拟精度存在双重依赖:一是数值粒子的代表性程度,二是插值算法的合理性水平。其在颗粒间微观碰撞作用预测方面的精度,因引入了较多简化假设而低于CFD-DEM模型。该模型存在特定的适用场景。即需要在计算效率与微观流动特性刻画之间达