

烧结过程温度场模拟及矿相演变规律研究

朱全政

河南安钢周口钢铁有限责任公司 河南 周口 466001

摘要: 随着工业烧结生产对产品性能与工艺管控精度要求的持续提升, 烧结过程中热质传递与矿相转变的精准调控至关重要。围绕烧结传热传质与矿相转变核心理论, 构建全流程温度场数值模拟体系, 系统解析矿相演变的热力学基础与动力学特征, 深入揭示温度场与矿相演变的耦合作用规律, 明确温度梯度、升降温制度等关键参数对矿相结构的调控机制, 为烧结工艺优化与性能提升提供系统的理论支撑与技术路径。

关键词: 烧结过程; 温度场; 矿相演变; 数值模拟

引言: 烧结是矿物加工与材料制备领域的核心工序, 其产品宏观力学性能与化学稳定性, 高度依赖高温环境下热质传递过程与矿相结构演变的协同调控。当前工业烧结生产中, 仍普遍存在热过程管控精度不足、矿相演变规律不明、多参数耦合作用机制不清等痛点, 制约了产品质量一致性与生产能效的提升。亟须系统厘清烧结过程传热传质内在机理, 量化温度场对矿相转变的调控规律, 为烧结工艺的精细化管控奠定坚实的理论基础。

1 烧结过程传热传质与矿相转变核心理论基础

烧结过程传热传质与矿相转变核心理论基础聚焦于微观粒子间能量传递与物质迁移的物理化学机制。传热过程以热辐射、热传导及热对流为主导, 通过粒子间接触点热阻的降低实现热量高效传递, 温度梯度驱动下的热流分布直接影响烧结体致密化速率; 传质机制涉及表面扩散、晶界扩散及体积扩散等多路径质量迁移, 原子或离子在化学势梯度作用下从高能态向低能态转移, 促进孔隙闭合与晶粒生长。矿相转变则基于热力学相平衡与动力学相变速率理论, 高温条件下固相反应引发晶格重构, 新相成核与生长遵循相变动力学规律, 晶体结构演变与元素扩散协同作用, 最终实现矿物相组成与微观结构的优化调控, 该过程本质是热力学驱动力与动力学扩散过程共同作用的结果^[1]。

2 烧结过程温度场数值模拟体系构建

2.1 温度场模拟控制方程建立

烧结过程温度场数值模拟体系构建中, 温度场模拟控制方程建立需基于热传导基本原理与能量守恒定律, 通过微分方程描述温度分布随时间与空间的变化规律。该方程需综合考虑材料热物性参数的温度依赖性, 如热导率、比热容随温度的非线性变化特征, 以及内部热源项对温度场的影响机制。控制方程构建需明确边界条件类型, 如第一类边界(给定温度)、第二类边界(给定热流

密度)或第三类边界(对流换热), 并确保边界条件与实际烧结工艺参数相匹配。方程求解需采用数值方法, 如有限差分法、有限元法或有限体积法, 通过离散化处理将连续方程转化为代数方程组, 结合迭代算法实现温度场的动态模拟; 方程验证需通过实验数据与模拟结果的对比分析, 确保模型预测精度满足工程应用需求, 为烧结工艺优化提供理论支撑; 整个方程体系需保持数学严谨性, 同时兼顾计算效率与收敛性, 以适应复杂烧结过程的数值模拟需求。

2.2 温度场模拟边界条件设定

烧结过程温度场模拟边界条件设定需精准反映实际工艺环境中的热交换特性, 边界类型选择需结合烧结炉结构特征与工艺参数。第一类边界通过直接设定边界温度值模拟恒温环境, 如烧结炉内壁恒温控制; 第二类边界则通过热流密度输入反映局部热源作用, 如激光烧结时的能量输入分布; 第三类边界通过对流换热系数与流体温度描述气体环境散热, 如惰性气体保护下的冷却过程。边界参数需考虑材料表面状态对热交换的影响, 如氧化层厚度改变热阻特性, 表面粗糙度影响对流换热效率; 参数设定需通过实验标定与文献数据验证, 确保与实际烧结过程热行为一致。边界条件与控制方程耦合求解时, 需关注数值稳定性与收敛性, 通过网格敏感性分析与时间步长优化提升模拟精度, 为温度场动态演化提供可靠边界约束。

2.3 温度场模拟求解方法优化

烧结过程温度场模拟求解方法优化需聚焦数值算法效率与精度平衡, 针对非线性热物性参数及复杂边界条件特性展开。有限元法通过自适应网格加密技术捕捉局部高温梯度区域, 避免全局网格过密导致的计算资源浪费; 有限体积法结合高阶离散格式提升对流换热项的数值稳定性, 减少伪扩散现象。隐式差分格式配合牛顿-拉

夫森迭代法可有效处理非线性热源项,提升时间步长上限值,加速动态过程模拟;并行计算架构利用GPU加速矩阵运算,显著缩短大规模三维模型的求解时间。收敛性诊断需结合残差监测与物理量守恒验证,确保迭代过程稳定可靠;方法优化需通过网格收敛性分析与时间步长敏感性测试验证,确保模拟结果对网格密度与时间步长不敏感,为复杂烧结工艺提供高置信度数值预测工具^[2]。

2.4 温度场模拟结果校验体系

烧结过程温度场模拟结果校验体系需构建多维度验证框架,确保数值模拟与实际工艺热行为高度一致。实验测量采用高精度热电偶与红外热像仪协同采集,获取烧结区域温度时空分布数据,与模拟结果进行点对点比对验证;误差分析需量化模型简化、参数不确定性及数值离散化引入的偏差,通过均方根误差与相关系数评估预测精度。统计方法结合残差分布诊断,识别系统误差与随机误差来源,指导模型修正方向;多工况验证覆盖不同升温速率、保温时间及气氛条件,验证模型在复杂工艺参数下的鲁棒性。校验过程强调物理机制一致性验证,如热传导路径、对流换热模式与实际热成像结果匹配度,确保模拟结果不仅数值准确,更能反映真实热物理过程本质特征,为工艺优化提供可信数值依据。

3 烧结过程矿相演变行为特征解析

3.1 烧结矿相生成热力学基础

烧结矿相生成热力学基础需聚焦相变过程中的自由能变化与相平衡稳定性。吉布斯自由能作为相变驱动力核心指标,其降低趋势主导固相反应、液相生成及晶体生长方向;烧结高温环境下,矿物组间化学反应的热力学条件需通过标准生成焓与熵变评估反应自发性,结合活度系数修正非理想溶液效应。相图理论揭示多组分体系在特定温度压力下的相区分布,指导液相量控制与矿物相选择;界面能最小化原理驱动晶粒形貌演化,如球状晶、针状晶的形成机制。热力学参数需通过高温X射线衍射、差热分析等实验手段精确测定,结合热力学模型预测相变路径;基础研究需兼顾热力学与动力学协同效应,确保矿相生成过程既符合热力学可行性,又满足动力学速率要求,为烧结矿相优化提供理论支撑。

3.2 烧结矿相转变动力学特征

烧结矿相转变动力学特征需关注相变速率与扩散机制协同作用,晶粒形核与生长过程受温度梯度与浓度场耦合控制。扩散控制机制中,原子迁移速率受晶界结构与缺陷密度影响,高密度位错促进短程扩散加速相变进程;界面反应控制则依赖表面能降低驱动,如液相烧结中毛细管力推动颗粒重排与晶粒融合。形核速率遵循阿

伦尼乌斯方程,激活能大小决定相变启动温度阈值,高温下非均匀形核占优,利用表面缺陷降低形核势垒;生长阶段遵循抛物线规律,晶粒尺寸分布受生长动力学参数与时间指数调控。动力学特征需通过高温原位观测与相变动力学模型验证,结合扩散系数测定与活化能计算,量化各阶段速率控制步骤,为烧结工艺参数优化提供精准动力学依据,确保矿相演变过程可控且高效^[3]。

3.3 烧结矿相组成演化路径

烧结矿相组成演化路径需揭示多矿物相在高温作用下的动态转化规律,其路径受温度梯度、气氛成分及原矿化学组成共同调控。初始矿物相如赤铁矿、磁铁矿在升温过程中发生分解与重构,固相反应促使硅酸盐、铁酸钙等新相生成,液相出现则加速晶粒融合与相界面迁移;演化路径呈现阶段性特征低温段以固相扩散为主,中温段液相量增加推动颗粒重排,高温段晶粒生长与相平衡调整主导最终矿相结构。路径分析需结合相图理论与原位观测技术,如高温X射线衍射追踪相变临界点,扫描电镜观察晶粒形貌演化;多因素耦合效应需通过正交实验量化各参数影响权重,确保演化路径预测既符合热力学相平衡规律,又反映动力学速率限制,为烧结矿性能优化提供精准相组成控制依据。

3.4 烧结矿相结构形成机制

烧结矿相结构形成机制聚焦于微观组织演化与力学性能关联性,晶粒形貌、晶界特征及相界面结合强度共同决定宏观性能。晶粒生长遵循最小界面能原理,高温下晶界迁移速率受位错密度与溶质拖曳效应调控,低角度晶界通过亚晶合并实现晶粒粗化,高角度晶界则通过原子扩散完成结构重组。液相烧结中,毛细管力驱动颗粒重排,液膜润湿促进晶粒融合,形成致密化结构;固相烧结依赖晶界扩散与体积扩散协同作用,晶界处溶质偏聚改变局部化学势,影响相变路径。结构缺陷如孔隙、裂纹在烧结后期通过物质迁移实现愈合,缺陷愈合效率与扩散激活能相关;机制研究需结合透射电镜观测与分子动力学模拟,量化晶界迁移速率与相界面结合能,为烧结矿力学性能优化提供微观结构控制依据。

4 烧结温度场与矿相演变耦合作用规律

4.1 温度梯度对矿相生成的影响

温度梯度通过热流定向传导影响烧结区域内矿相生成的时空分布特征,高温区与低温区形成热驱动势差,促使原子扩散方向性增强。在梯度作用下,形核位点呈现非均匀分布特征,高温端形核速率加快,低温端则因过冷度增大促进非均匀形核;晶粒生长方向与温度梯度方向相关联,高温侧晶粒沿热流方向优先生长,形成柱

状晶或带状晶结构；低温侧晶粒生长受限，易形成等轴晶。温度梯度还影响液相迁移路径，高温区液相量增多推动物质传输，低温区液相凝固加速相界面固定；梯度效应需通过热传导模型与相变动力学模型耦合分析，结合原位温度测量与相组成表征，量化梯度大小对矿相形貌、晶界特征及相分布均匀性的影响规律，为烧结工艺温度场优化提供精准调控依据^[4]。

4.2 升温速率对矿相转变的作用

升温速率通过调控热输入速率影响烧结体系热历史与矿相转变动力学响应。快速升温加速热传导，缩短相变启动时间，促使高温相如铁酸钙在更短时间内形成，但可能因温度梯度骤增导致局部过烧或晶粒异常生长；慢速升温则延长热渗透时间，促进固相扩散均匀化，有利于均质矿相结构形成，但过慢速率可能延长工艺周期，增加能耗成本。升温速率还影响液相生成动力学，高升温速率下液相量快速增加推动颗粒重排，但液相黏度变化可能影响润湿行为；低升温速率下液相量渐进增加，有利于晶界迁移与孔隙闭合。速率效应需结合相变动力学模型与热传导模型分析，通过原位热分析仪监测温度-时间曲线，结合相组成定量表征，量化升温速率对形核速率、晶粒尺寸分布及相界面结合强度的影响规律，为烧结工艺升温制度优化提供科学依据。

4.3 恒温区间对矿相稳定的调控

恒温区间通过维持稳定温度环境调控矿相结构稳定性，促进晶粒充分生长与相界面平衡。在恒温阶段，原子扩散持续进行，晶界迁移速率趋于稳定，有利于晶粒尺寸均匀化及相界面结合强度提升；恒温时间影响液相黏度变化，适度延长恒温时间可促进液相润湿与孔隙闭合，增强矿相致密性；过短则可能导致晶界未充分迁移，存在残留应力；过长则可能引发晶粒异常生长，降低力学性能。恒温效应需结合相变动力学模型分析，通过原位观测追踪晶粒形貌演化，结合力学性能测试验证矿相稳定性调控效果，为烧结工艺恒温制度优化提供精准指导，确保矿相结构在后续冷却过程中保持稳定，提升烧结体综合性能。

4.4 降温过程对矿相结构的塑造

降温过程通过热收缩与相变动力学协同塑造矿相最终结构，其速率与路径直接影响晶粒形貌及残余应力分布。快速降温抑制晶粒过度生长，促进细晶结构形成，但可能因热应力骤增导致微裂纹萌生或相界面分离；慢速降温允许晶粒充分调整取向，减少内应力积累，有利于相界面结合强度提升。降温阶段还可能触发二次相变，如高温相在冷却时析出次生相，改变矿相组成与分布均匀性；热应力释放与晶格畸变修复在降温后期持续进行，影响宏观力学性能稳定性。降温效应需结合热弹性理论与相变动力学模型分析，通过残余应力测试与晶粒形貌观测验证结构塑造效果，为烧结工艺降温制度优化提供精准调控依据，确保矿相结构在冷却后达到理想力学性能与化学稳定性^[5]。

结束语：烧结过程中温度场演化与矿相转变存在强耦合关联，温度梯度、升降温速率与恒温保温制度，通过调控热质传递路径与相变热力学、动力学过程，直接决定矿相组成、微观结构与产品最终性能。通过构建高精度温度场数值模拟体系，厘清矿相演变全周期内在机制，量化多工艺参数的耦合作用规律，可为烧结工艺参数优化、矿相结构精准调控提供系统理论依据，对提升烧结产品质量与生产能效具有重要的工程应用价值。

参考文献

- [1]杨双平,张益玮,刘起航,等.烧结过程温度场数值模拟及烧结终点参数影响[J].钢铁研究学报,2024,36(9):1174-1182.
- [2]廖宇轩,申文龙,吴学志,等.陶瓷型复合燃料烧结过程的相场模拟研究[J].物理学报,2024,73(21):59-69.
- [3]侯宪荣,尚鹏鹏,王建梅,等.烧结矿竖冷窑内气固换热过程的数值模拟研究[J].重型机械,2024(4):13-20.
- [4]郭松源,柳文波,杨庆成,等.黏性烧结过程的相场模拟[J].金属学报,2024,60(12):1691-1700.
- [5]曾平生,黄正宗,江新辉,等.铅锌冶炼烧结点火炉点火过程数值模拟[J].中国有色金属学报,2024,34(1):254-267.