

Study on Dynamics of Metallurgical Reaction and Material Structure Evolution under Microwave Field Enhancement

Guangze Wei

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

Abstract

Microwave heating, as an innovative green metallurgical technology, demonstrates extensive application prospects in the metallurgical field with unique advantages such as selective heating, volumetric heating, and rapid heating. Compared to traditional heating methods, microwave fields can significantly alter the kinetic behavior of metallurgical reactions and influence the evolution of material microstructures, thereby providing novel technical pathways for enhancing reaction efficiency, reducing energy consumption, and improving resource utilization. This paper systematically elucidates the fundamental principles of microwave heating and its application characteristics in metallurgy, conducts in-depth analysis of the impact mechanisms of microwave fields on reaction kinetics, explores the evolution patterns of material microstructures, phase compositions, and microstructures under microwave irradiation, and reveals the physicochemical mechanisms underlying microwave-induced reaction enhancement.

Keywords

microwave heating; metallurgical reaction kinetics; material structure evolution; non-thermal effects

微波场强化冶金反应动力学及物料结构演变规律研究

魏光泽

辽宁科技大学, 中国·辽宁鞍山 114051

摘要

微波加热作为一种新型的绿色冶金技术,以其独特的选择性加热、体加热和快速加热等优势,在冶金领域展现出广阔的应用前景。与传统加热方式相比,微波场能够显著改变冶金反应的动力学行为,影响物料微观结构的演变过程,从而为强化冶金反应、降低能耗、提高资源利用率提供新的技术路径。本文系统阐述了微波加热的基本原理及其在冶金领域的应用特性,深入分析了微波场对冶金反应动力学的影响机制,探讨了微波作用下物料微观结构、物相组成及微观形貌的演变规律,揭示了微波场强化冶金反应的物理化学本质。

关键词

微波加热; 冶金反应动力学; 物料结构演变; 非热效应

1 引言

随着全球能源与环境压力的日益加剧,开发高效、节能、清洁的新型冶金技术已成为行业发展的迫切需求。微波加热作为一种独特的体加热方式,近年来在冶金领域的应用研究日益活跃,涉及矿石预处理、矿物还原、冶金废渣处理、材料制备等多个方面。本文旨在系统梳理微波场强化冶金反应动力学及物料结构演变规律的研究进展,探讨微波场对冶金反应的作用机制,以期对微波冶金技术的理论发展与工程应用提供参考。

2 微波场强化冶金反应动力学

反应动力学研究是揭示微波场强化冶金反应机制的核

心内容。微波场对反应动力学的影响主要体现在反应速率常数、反应活化能和传质过程等方面。

2.1 微波场对反应速率常数的影响

大量研究表明,微波场能够显著提高冶金反应的速率常数。以铁矿碳热还原为例,传统加热条件下,赤铁矿还原为磁铁矿的过程需要较长的反应时间和较高的反应温度,而在微波场中,反应速率可提高数倍甚至一个数量级。这种速率提升效应在多种冶金体系中得到验证,包括氧化矿还原、硫化物氧化、矿物浸出等。

微波场提高反应速率常数的原因可从能量角度分析。微波能直接作用于反应物分子或离子,提高其能量水平,增加有效碰撞频率。同时,微波场中物料内部温度场的快速建立,使反应体系迅速达到所需温度,缩短了反应诱导期。此外,微波场可能在局部区域形成“热点”,这些热点温度远高于宏观测量温度,为反应提供了局部高温条件,显著加速了反应进程。

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

2.2 微波场对反应活化能的影响

反应活化能是衡量反应难易程度的关键参数，微波场对活化能的影响是学术界关注的热点。部分研究表明，微波场能够降低冶金反应的表现活化能，使反应更易于进行。例如，在锌焙砂的微波还原过程中，研究者发现表现活化能由传统加热条件下的约 80 千焦每摩尔降至微波场中的约 50 千焦每摩尔，降幅显著。

关于活化能降低的机理，存在两种主要观点。一种观点认为，微波场通过选择性加热在反应界面形成局部高温，改变了反应物所处的能量状态，从而降低了反应所需的能量阈值。另一种观点认为，微波场具有非热效应，即微波能除产生热效应外，还能直接作用于化学键，降低键能，促进化学反应的进行。非热效应的存在虽然尚未得到普遍公认，但越来越多的实验证据表明，在特定条件下，微波场确实能够产生超出热效应范畴的化学促进效应。

2.3 微波场对传质过程的强化

冶金反应通常涉及气相、液相和固相间的传质过程，传质速率往往是反应的控制步骤。微波场能够从多个方面强化传质过程。首先，微波加热产生的温度梯度可引发热扩散效应，加速物质迁移。其次，微波场中物料的快速升温导致内部气体和挥发分的快速逸出，产生微裂纹和孔隙，增加了物料的比表面积和渗透性，为反应气体和浸出剂的扩散提供了有利通道。再次，微波场可能影响液相中离子的迁移行为，通过电泳效应或电致收缩效应加速离子扩散。

在矿物浸出过程中，微波预处理可显著提高浸出速率。研究表明，经微波处理后的矿物，其浸出反应的表现速率常数可提高 2 至 3 倍，浸出时间缩短一半以上。这种强化效应主要归因于微波处理导致矿物晶格畸变、微裂纹增加，使浸出剂更容易渗透进入矿物内部，同时增大了反应界面面积。

2.4 微波场强化反应动力学的机理分析

综合现有研究，微波场强化冶金反应动力学的机理可归纳为热效应与非热效应的协同作用。热效应是微波场强化的基础，微波体加热特性使反应体系快速达到所需温度，温度场的快速建立和均匀分布为反应创造了良好的热力学条件。非热效应则是微波场强化的核心，包括微波场对分子间相互作用的直接扰动、对电荷分布的影响、对离子迁移的促进作用等。

在反应动力学层面，微波场的作用体现在：降低反应的表现活化能，使反应在较低温度下即可进行；提高反应物分子的平均能量，增加有效碰撞频率；改善反应体系的传质条件，消除或缓解扩散限制；在反应界面形成微观高温区域，为反应提供额外驱动力。这些因素的共同作用，使微波场中冶金反应的动力学特性发生显著改变，表现为反应速率的提高、反应温度的降低和反应选择性的改善^[1]。

3 微波场中物料结构演变规律

物料在微波场中的结构演变是理解微波强化冶金反应

机制的另一重要方面。微波场通过热效应和非热效应，影响物料的微观结构、物相组成和微观形貌，进而改变其物理化学性质。

3.1 物料的升温特性与热响应

不同物料在微波场中的升温行为存在显著差异，这与其介电特性密切相关。金属氧化物如 Fe_2O_3 、 CuO 、 ZnO 等在常温下介电损耗较小，升温缓慢，但当温度升至一定阈值后，介电损耗急剧增大，出现“热失控”现象，升温速率骤然加快。硫化物如黄铜矿、闪锌矿等通常具有较好的微波吸收能力，升温较为迅速。碳素材料如煤粉、焦粉、石墨等是良好的微波吸收剂，常被用作辅助加热介质。

物料的升温特性还受其粒度、堆积密度、含水率等因素影响。粒度越小，比表面积越大，微波穿透深度与粒度的匹配关系影响加热均匀性。适当的水分可提高物料的介电损耗，加速升温，但水分过高会因介电常数增大而产生反射损失。这些升温特性的差异，为微波场中物料结构的选择性调控提供了基础。

3.2 微波场中矿物相变规律

微波场对矿物相变过程具有显著影响。研究表明，微波场可以降低矿物的相变温度，加速相变过程。以高岭石向莫来石的相变为例，传统加热条件下相变温度约 1000 摄氏度，而微波场中可在 900 摄氏度左右发生，相变温度降低约 100 摄氏度。这种相变温度的降低可能与微波场对晶体缺陷形成和迁移的促进作用有关。

在铁矿还原过程中，微波场影响铁氧化物的还原路径和还原产物的物相组成。传统加热条件下，赤铁矿还原通常遵循 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ 的逐级还原路径，而在微波场中，可能出现还原路径的简化和中间产物的减少，直接生成金属铁。这种变化可能源于微波场对中间相形成的抑制作用，或对还原反应动力学的改变。

对于复杂矿物体系，微波场能够促进有价矿物与脉石矿物的选择性反应，改善矿物间的界面结合状态。例如，在微波处理含钛铁矿时，微波场可促进钛铁矿与脉石矿物的界面反应，使钛、铁元素发生选择性富集，为后续分离创造有利条件^[2]。

3.3 微波场对微观结构的影响

微波场对物料微观结构的影响主要体现在晶体结构、晶格缺陷、表面状态和孔隙结构等方面。

在晶体结构层面，微波场可能引起晶格畸变和晶格常数变化。研究表明，经微波处理的矿物，其 X 射线衍射峰位发生偏移，衍射峰强度降低，表明晶体有序度下降，晶格畸变程度增加。这种晶格畸变降低了矿物结构的稳定性，提高了反应活性。

在晶格缺陷方面，微波场可促进缺陷的形成和迁移。微波作用下，离子或原子的振动加剧，空位、位错等缺陷浓度增加，这些缺陷为反应提供了优先位点，加速了扩散和反应过程。

在孔隙结构方面，微波加热导致的快速升温和内部气体释放，会在物料内部形成微裂纹和孔隙网络。研究表明，经微波处理的矿物，其比表面积可增加 20% 至 50%，孔隙率显著提高。这种孔隙结构的改变不仅增大了反应界面面积，还改善了传质通道，对后续的浸出、还原等过程具有重要影响。

在表面状态方面，微波场可能改变矿物表面的化学性质，包括表面官能团的分布、表面电荷状态等。表面性质的改变会影响矿物与反应介质的相互作用，进而影响界面反应过程。

3.4 结构演变与反应行为的关联

微波场中物料结构的演变与其反应行为密切相关。晶格畸变和缺陷增加降低了反应所需的能量阈值，使反应更易进行。孔隙结构的改善增大了反应界面面积，缩短了传质路径。表面性质的改变影响反应物在界面上的吸附和反应。这些结构变化共同作用，决定了物料在微波场中的宏观反应行为。

值得注意的是，物料结构的演变与反应进程是相互影响、相互促进的动态过程。结构变化为反应创造条件，反应又进一步改变物料结构，这种耦合关系贯穿于微波冶金的全过程。因此，研究微波场中物料结构演变的规律，对于深入理解微波强化冶金反应的机制具有重要意义^[1]。

4 典型冶金体系的微波强化研究

4.1 铁矿微波还原

铁矿碳热还原是微波冶金研究的热点领域。研究表明，微波场可显著提高铁矿还原速率，降低还原温度。在微波功率 800 瓦、反应时间 20 分钟条件下，赤铁矿的还原率可达 90% 以上，而传统加热达到相同还原率需 60 分钟以上。微波场中还原产物以金属铁为主，中间产物磁铁矿、浮氏体含量显著降低。

微波强化铁矿还原的机理在于：碳素材料对微波的良好吸收特性使其优先升温，形成局部高温区，促进了碳的气化反应；微波场加速了还原气体在料层中的扩散；铁氧化物在高温下成为良好的微波吸收体，形成正反馈效应，使反应持续快速进行。此外，微波场中形成的微裂纹和孔隙结构，为还原气体的渗透提供了通道，进一步强化了还原过程。

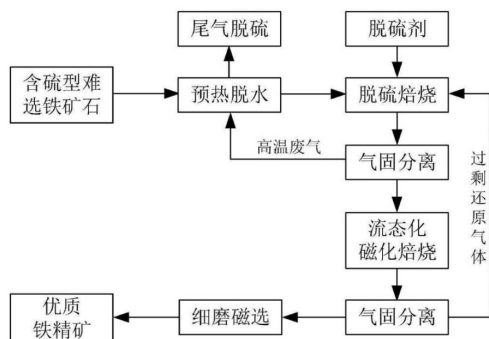


图 1：铁矿微波还原

4.2 有色金属矿物微波处理

在铜矿物处理方面，微波预处理可显著改善黄铜矿的浸

出性能。经微波处理的黄铜矿，其晶体结构发生畸变，晶格常数变化，表面生成微裂纹，使浸出剂更容易渗透，铜浸出率由传统加热的约 50% 提高至 85% 以上，浸出时间大幅缩短。

在锌矿物处理方面，微波场可强化闪锌矿的氧化焙烧过程，降低焙烧温度，减少二氧化硫排放。微波作用下，闪锌矿的氧化速率显著提高，反应活化能降低，焙烧产物中可溶性锌的比例增加，有利于后续浸出。

在铝土矿处理方面，微波场可促进铝土矿中一水硬铝石与三水铝石的选择性加热，使含铝矿物与含硅矿物的热膨胀差异增大，导致矿物界面产生微裂纹，有利于后续拜耳法溶出过程中铝的提取。

4.3 冶金废渣微波处理

微波场在处理冶金废渣方面展现出独特优势。在钢铁尘泥处理方面，微波还原可实现锌的选择性挥发回收。微波场中，含锌尘泥快速升温，锌被还原挥发后在收尘系统中富集，铁则留在尾渣中可作为炼铁原料。与传统的回转窑工艺相比，微波处理时间短，能耗低，锌回收率高。

在赤泥处理方面，微波场可促进赤泥中铁氧化物的还原，通过添加碳质还原剂，在微波场中实现赤泥的快速还原，铁还原率可达 85% 以上，还原产物经磁选可得到高品位铁精矿。同时，微波场对赤泥中铝、钛等有价值元素的回收也具有一定的促进作用。

在电子废弃物处理方面，微波场可用于废旧电路板中金属与非金属的分离。利用微波选择性加热特性，使金属部分快速升温，而非金属部分升温较慢，通过热应力实现金属与基板的分离，提高金属回收效率^[4]。

5 结论

微波场作为一种独特的能量形式，在强化冶金反应动力学和调控物料结构方面具有显著优势。微波加热的选择性加热、体加热和快速加热特性，使其能够改变冶金反应的动力学行为，提高反应速率，降低反应活化能，强化传质过程。微波场对物料结构的影响表现为晶格畸变、缺陷增加、孔隙结构改善和表面性质改变，这些结构变化与反应行为相互耦合，共同决定了微波冶金的强化效果。未来应加强微波反应器放大设计、多场耦合技术开发、微波非热效应机理研究等工作，推动微波冶金技术向工业化方向发展，为冶金行业的节能降耗和绿色转型提供新的技术路径。

参考文献

- [1] 刘润琪. 高温冶金反应动力学的多尺度模拟与实验验证[J]. 模具制造, 2025, 25(07): 151-153.
- [2] 折媛, 湛文龙, 邹冲, 等. 改进分段尝试法研究焦炭气化反应动力学[J]. 钢铁, 2022, 57(04): 12-24.
- [3] 吴铿, 王宁, 湛文龙, 等. 冶金反应过程动力学的分段尝试法[J]. 辽宁科技大学学报, 2016, 39(01): 7-11.
- [4] 吴铿, 张家志, 赵勇, 等. 冶金反应工程学中反应过程动力学的研究方法探究[J]. 有色金属科学与工程, 2014, 5(04): 1-6.