

高温氢基还原铁矿的在线气体检测系统设计及试验验证

佟 帅, 洪陆阔, 艾立群, 陈建松, 周美洁, 孙伶俐

(华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063210)

摘要:“双碳”战略目标背景下,氢基还原铁矿是钢铁工业绿色转型的关键路径。本文联合应用维萨拉(Vaisal)温湿度计和红外煤气分析仪,设计并验证一套适用于高温氢基还原铁矿的气体在线检测系统,满足高 H_2O 含量检测要求。在还原温度为 $1\ 173\sim 1\ 373\ K$ 、还原气氛为 $60\% CO + 40\% H_2$ 和还原时间为 $40\ min$ 的条件下进行试验,结果表明:通过优化系统设计后,该系统在高温条件下具有较好的响应性和灵敏度;随着还原温度和时间的增加,气体在线检测系统的整体误差逐步减小,系统核算的失重与断点称重实测结果差值为 $0.01\sim 0.11\ g$,在测量误差范围之内,具有较高的准确性。基于所设计的气体在线检测系统,可为实验室高温下氢基还原的动力学研究提供一种新的检测手段。

关键词:高温; 氢基还原; 高 H_2O 含量; 气体在线检测; 动力学

中图分类号:TF55

文献标志码:A

文章编号:1000-8764(2025)04-0099-07

doi:10.13403/j.sjqt.2025.04.063

Design and test verification of online gas detection system for high-temperature hydrogen-based reduced iron ore

TONG Shuai, HONG Lukuo, AI Liqun, CHEN Jiansong, ZHOU Meijie, SUN Lingyan

(College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan, 063210, Hebei, China)

Abstract: Under the background of the "Dual Carbon" strategic goal, hydrogen-based reduced iron ore is the key path for the green transformation of the iron and steel industry. In this paper, a set of gas online detection system suitable for high-temperature hydrogen-based reduced iron ore is designed and verified by combining Vaisal thermohygrometer and infrared gas analyzer to meet the requirements of high H_2O content. The test is carried out under the conditions of reduction temperature of $1\ 173\sim 1\ 373\ K$, reduction atmosphere of $60\% CO + 40\% H_2$ and reduction time of $40\ min$. The results show that the system has good responsiveness and sensitivity under high temperature conditions after optimizing the system design. With the increase of reduction temperature and time, the overall error of the gas online detection system gradually is decreased, and the difference between the measured results of the weightless loss and breakpoint weighing calculated by the system is $0.01\sim 0.11\ g$, which is within the range of measurement error and has high accuracy. Based on the designed gas online detection system, it can provide a new detection method for the dynamics study of hydrogen reduction at high temperature in the laboratory.

Key words: high temperature; hydrogen-based reduction; high H_2O content; on-line gas detection; dynamics

铁矿的高温还原是炼铁过程的关键环节之一,但随着“双碳”战略目标的实施,钢铁工业正在致力于由传统的碳冶金向氢冶金转变^[1-2]。在高温

条件下,铁矿的还原反应通常需要较高的温度和特定的气氛条件,以确保反应的高效进行^[3-5]。其中,氢气是一种常用的还原性条件,其具有

收稿日期:2024-04-25; 修回日期:2024-06-12

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2024YFB3713900&2024YFB3713902)

作者简介:佟帅(1996—),男,博士研究生,从事氢冶金高效还原方面的研究。

通信作者:周美洁(1993—),女,讲师,从事钢铁冶金新方法、新技术方面的研究。

高效、环保等优点,因此备受广大冶金研究者关注^[5-6]。高温下进行氢基还原铁矿的过程中,气氛组成、气体反应的动态变化、反应过程中的限制性环节及其过程转化等对反应效率和产品质量至关重要^[7-8]。为了实现对高温下铁矿氢还原过程中气氛的实时监测和控制,在线气体检测系统成为一种关键技术,但目前尚无适用的铁矿氢还原过程中高 H₂O 含量在线检测手段。苟于单等^[9]利用红外波段进行燃烧生成 H₂O 的浓度在线检测,其在线检测方法仅适用于 1% 的含水量水平。李远等^[10]采用热重-质谱方法研究了铁矿粉氢还原动力学,发现质谱图出现 H₂O 的离子强度最大值与 DTG 曲线出现波谷的时间基本一致,但该高含水气相质谱法对于过程细节的敏感度不高。国外 Mettler Toledo 公司开发的 GPro 500 型可调谐二极管激光光谱仪的含水量测量上限也仅有 2%。

目前,针对高温氢基还原铁矿领域的在线气体检测系统的研究相对较少,尤其是高 H₂O 含量。因此,本文旨在设计并验证一种适用于高温下氢基还原铁矿的在线气体检测系统,通过对其结构设计、优化以及试验验证等方面的研究,探索高温环境下气氛的准确监测和控制,以期为氢还原铁矿提供一种可靠的在线气体检测技术方案,为相关领域的发展和應用提供参考和借鉴。

1 系统设计

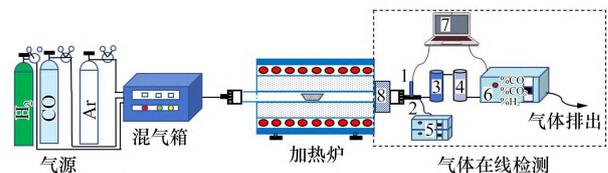
1.1 工作原理

试验搭建的在线连续气体检测系统由 Gasboard-3100P 红外煤气分析仪(武汉某公司提供)和 HMP7 维萨拉(Vaisal)温湿度计(武汉某公司提供)组成。其中,红外煤气分析仪采用 NDIR 非分光红外光谱测量方法,原理为当光波通过被测气体时,对应气体特征吸收波长的光波强度将明显减弱,其强度衰减程度与该气体浓度有关,两者之间的关系遵守朗伯-比尔吸收定律。维萨拉温湿度计配备电容型薄膜聚合物传感器,由上下两个电极板和附着在下极板上的聚合物薄膜组成。当环境空气的相对湿度上升或下降时,薄膜聚合物相应吸收或释放水蒸气。聚合物薄膜的介电特性取决于吸收的水量,当传感器周围的相对

湿度发生变化时,聚合物薄膜的介电特性也会变化,传感器的电容会随之变化。

1.2 试验装置

图 1 为试验测试的整体设备,主要由混气系统、加热系统和在线气体检测系统组成。混气系统采用质量流量计控制,加热系统的主体设备为 SK-G08123K 卧式管式炉(郑州某公司提供)。设计的在线气体检测系统由红外煤气分析仪和维萨拉温湿度计串联连接,在管路之间配备除杂、除水装置,防止水蒸气对红外煤气分析仪检测造成干扰。



1—湿度计; 2—管路(配加热带和保温棉); 3—除水干燥剂; 4—除污罐(油污及颗粒干燥剂); 5—管路加热带控制器; 6—红外煤气分析仪; 7—数据采集电脑; 8—耐火保温棉。

图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the test device

1.3 参数计算

根据温湿度计的主要参数计算 H₂O 的质量分数 $[w(\text{H}_2\text{O}), \%]$, 计算方法如式(1)所示。

$$w(\text{H}_2\text{O}) = \frac{P_w}{P^0} \times 10^4 \quad (1)$$

式中: P_w 为水蒸气压力, Pa; P^0 为标准大气压力, Pa。

H₂、CO 和 CO₂ 等的质量分数可以通过红外煤气分析仪直接测出,但在系统设计时,装置的中间环节加了除水装置,因此对于气体的质量分数($Y, \%$)需要根据 H₂O 的质量分数变化进行换算,其计算方法如(2)所示。

$$Y = X \cdot [100 - w(\text{H}_2\text{O})] / 100 \quad (2)$$

式中: X 为红外煤气分析仪检测的 H₂、CO、CO₂ 质量分数, %。

2 试验原料与方法

2.1 试验原料

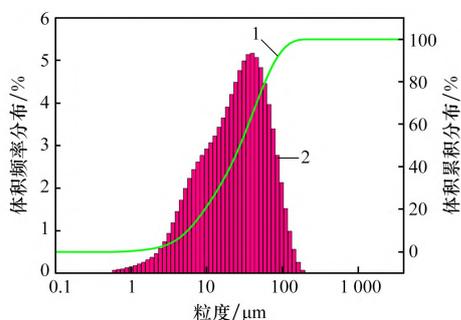
试验所用原料为工业用磁铁矿精矿粉,其化

学成分组成如表1所示。称取500 g原料经378 K烘干2 h排除水分,将原料冷却后密封保存备用。采用激光粒度仪对精矿进行粒度分析。粒度分布如图2所示。其中: d_{10} (颗粒累积分布为10%的粒度,即小于此粒度的颗粒占全部颗粒的10%, d_{50} 、 d_{90} 以此类推)为5.57 μm ; d_{50} 为27.44 μm ; d_{90} 为80.98 μm 。由图2可见,该精矿的粒度较小。

表1 原料的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of raw materials %

TFe	Fe ₃ O ₄	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	P	S
69.81	96.99	1.29	0.40	0.56	0.17	0.012	0.20



1—体积频率分布; 2—体积累积分布。

图2 精矿的粒度分布

Fig. 2 Particle size distribution of concentrate

2.2 试验方法

每炉次试验称取(15 ± 0.002) g原料进行等温还原,还原温度为1 173 ~ 1 373 K,还原时间为40 min,还原气氛为60% CO + 40% H₂。试验前,对炉管进行抽真空处理,避免其他气体造成干扰。升温过程中,持续通入氩气保护气(流量为0.2 L/min);达到预设还原温度后通入总流量为1.66 L/min的还原气体,同时打开气体检测系统记录数据;还原结束后,立即关闭还原气体阀门,继续通入流量为0.2 L/min的氩气;待样品冷却到室温后,称取重量。

2.3 试验校核

试验的校对方法:采用断点试验称量失重并计算5、10、20、30 min和40 min的失氧率,将其与在线气体检测系统记录还原气体还原磁铁矿产生的H₂O和CO₂质量分数计算失氧率(x_1)进行比较。根据系统检测的H₂O和CO₂质量分数计算失氧率,方法如式(3)所示。对于计算失氧率而

言,一方面从热力学角度分析,CO/H₂不会与原料中的其它氧化物发生反应;另一方面考虑到气体可能会吹走矿粉,所以在试验前进行多次重复试验,以验证试验结果的稳定性和可靠性。

多炉次试验结果表明,气流对矿粉质量损失的影响不显著,数据波动不明显。因此在试验条件下,忽略其他影响因素对试验结果造成的随机误差,认为失重质量仅取决于Fe₃O₄还原过程中的氧损失累积量。Fe₃O₄转化为Fe过程中的失氧率(x_2)由氧损失质量与磁铁矿Fe₃O₄中初始总氧质量的比值决定,计算方法如式(4)所示。

$$x_1 = \frac{\sum_{i=1}^t m_i(\text{H}_2\text{O}) + \sum_{i=1}^t m_i(\text{CO}_2)}{V(\text{O})} \quad (3)$$

式中: $m_i(\text{H}_2\text{O})$ 为*i*(*i*为1、2、…、*t*)时刻H₂O的累积质量, g; $m_i(\text{CO}_2)$ 为*i*时刻CO₂的累积质量, g; $V(\text{O})$ 为试验过程所用原料Fe₃O₄中氧的总体积, L。

$$x_2 = \frac{\Delta W(\text{O})}{W(\text{O})} \quad (4)$$

式中: $\Delta W(\text{O})$ 为*t*时刻氧损失的累积质量, g; $W(\text{O})$ 为磁铁矿粉原料Fe₃O₄中初始含氧的总质量, g。

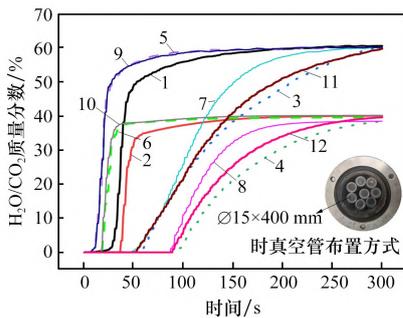
3 试验结果与讨论

3.1 气体检测系统管路优化及系统响应性

在进行*w*(H₂O)测量时需要注意的问题是H₂O冷凝。为解决H₂O的冷凝问题,应尽可能地减少热量损失和保证湿度计前后温度相同,因此在湿度计附近的管道和卧式炉炉管的尾端裸露区域缠绕加热带和保温棉。试验条件下,水蒸气质量分数为15%左右,经计算露点温度约为323 K。为了保证试验过程中产物水在不冷凝的低温度区间,选取加热带温度为343 K,略高于露点温度。

由于温湿度计与红外煤气分析仪的连接处存在相关装置,为尽可能提高红外煤气分析仪的响应性,采取以下三种措施:①尽可能缩短温湿度计与红外煤气分析仪之间软管的连接距离;②采用真空石英管填充卧式炉炉管内部,达到有效减小空间目的;③设定还原温度达到预设温度后进行抽真空,再通入还原气体。在保证措施1的基

基础上,开展措施 2、3 的冷态试验研究。模拟还原气氛为 60% CO + 40% H₂, 试验结果如图 3 所示。由图 3 可知,未采取抽真空和填充真空管措施的 CO 和 H₂ 质量分数示数显示滞后,50 s 左右开始出现示数,并且在 300 s 以后达到稳定值,在上升过程中示数曲线表现得更加平缓;相比较于同时采取抽真空和填充真空管措施后,CO 和 H₂ 质量分数在 7 s 左右开始出现示数,提前约 40 s,并且在 100 s 左右达到稳定,上升过程中示数曲线表现得更快,这也说明了采取抽真空和填充真空管有利于提高红外煤气分析仪的响应性。此外,在同时采取抽真空和填充真空管措施基础上,在炉管两端添加真空管与仅在进气端添加真空管相比,CO 和 H₂ 质量分数曲线的走势表现基本一致,具有较好的吻合性。因此后续试验验证均采用抽真空、在进气端加真空石英管等措施,其布置方式如图 3 所示。



不加管: 1—抽真空后通 CO; 2—抽真空后通 H₂;
3—直接通 CO; 4—直接通 H₂。

两端加管: 5—抽真空后通 CO; 6—抽真空后通 H₂;
7—直接通 CO; 8—直接通 H₂。

进气端加管: 9—抽真空后通 CO; 10—抽真空后通 H₂;
11—直接通 CO; 12—直接通 H₂。

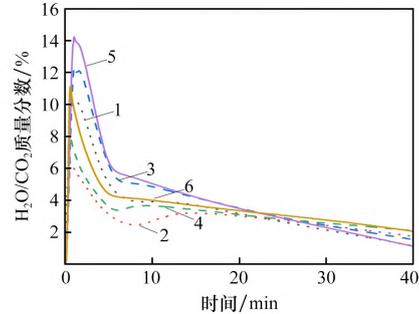
图 3 冷态试验验证系统响应性结果分析

Fig. 3 Analysis of responsiveness of cold experimental verification system

3.2 气体检测系统的灵敏度

为了考查所设计的在线检测系统的灵敏度,分别在 1 173、1 273 K 和 1 373 K 下进行 40 min 还原试验验证。系统记录的 CO₂ 和 H₂O 质量分数曲线结果如图 4 所示。由图 4 可知,在线检测系统对 H₂O 和 CO₂ 质量分数的瞬态变化反应敏感,表现为 CO₂ 和 H₂O 质量分数示数分别在 25 s 和 50 s 左右达到峰值,且上升过程中示数曲线更陡,峰

型尖锐(H₂O 质量分数曲线在达到峰值处的波动是图 1 中管路处气体阀门打开所致);同时示数曲线在波谷前、后近似呈一次线性关系。以上分析均说明在线气体检测系统整体具有较好的灵敏度。

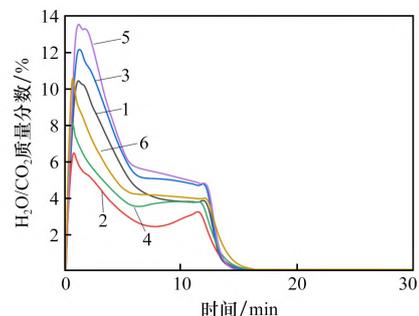


1—H₂O(1 173 K); 2—CO₂(1 173 K); 3—H₂O(1 273 K);
4—CO₂(1 273 K); 5—H₂O(1 373 K); 6—CO₂(1 373 K)。

图 4 还原 40 min 气体检测系统曲线

Fig. 4 Curve of gas detection system for 40 min reduction

在此基础上还原 10 min 后立即停止通入还原性气体,并转换为大流量 1.66 L/min 氩气,并记录数据。停止通入还原性气体后,H₂O 和 CO₂ 质量分数曲线快速下降为 0,说明检测系统的响应性和灵敏度较好。如图 5 所示,在还原 10 min 后立即转换为氩气时,在线检测系统对 H₂O 和 CO₂ 质量分数的变化反应同样敏感,峰型尖锐,与还原 40 min 的 H₂O 和 CO₂ 质量分数曲线基本表现一致。结束通入还原气体后,H₂O 和 CO₂ 质量分数示数均在 5 min 内下降为 0(包含混气罐和炉管内还原气体排出时间和中间管路传输时间),并且 H₂O 质量分数示数下降更快,曲线表现更陡。在 12 min 处气体质量分数有明显的小幅度增大,这是由于气路关闭后,炉管内还原性气体全部排出。



1—H₂O(1 173 K); 2—CO₂(1 173 K); 3—H₂O(1 273 K);
4—CO₂(1 273 K); 5—H₂O(1 373 K); 6—CO₂(1 373 K)。

图 5 还原 10 min 气体检测系统曲线

Fig. 5 Curve of gas detection system for 10 min reduction

此外,对比图4、5可知,在相同试验条件下还原40 min和10 min的 H_2O 或 CO_2 质量分数曲线走势一致,能够较好地吻合,这进一步说明设计的在线气体检测系统具有可靠性和稳定性。

3.3 气体检测系统的精确性

为了更准确地描述在线检测系统的精确性,在测试中选取温度为1 173、1 273 K和1 373 K以及还原时间为5、10、20、30 min和40 min进行断点试验,对比称量失重与在线检测系统动态记录的 H_2O 和 CO_2 质量分数计算的失氧率,如表2、图6所示。由表2可知,随着还原温度的增加,试验结果的相对误差减小,断点称重失重和系统检测核算的失重差值在0.01~0.11 g范围内。由图6可知,系统检测与断点称重计算的失氧率呈现相同的趋势,并且在还原后期几乎重合。

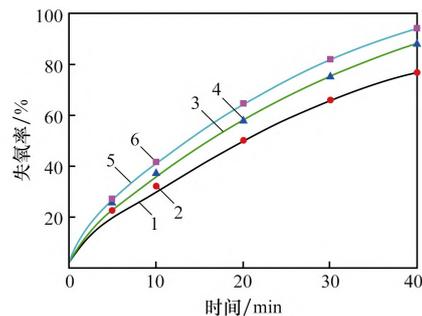
表2 不同试验条件下还原断点失重与系统分析失重对比

Table 2 Comparison between weight loss of reduction breakpoint and weight loss of system analysis under different experimental conditions

还原温度/K	还原时间/min	系统计算失重/g	断点称量失重/g	差值/g
1 173	5	0.81	0.92	0.11
	10	1.21	1.29	0.08
	20	2.00	2.01	0.01
	30	2.64	2.62	0.02
	40	3.09	3.08	0.01
1 273	5	0.93	1.03	0.10
	10	1.44	1.50	0.06
	20	2.34	2.36	0.02
	30	3.02	3.03	0.01
	40	3.53	3.58	0.05
1 373	5	1.08	1.17	0.09
	10	1.65	1.69	0.04
	20	2.58	2.60	0.02
	30	3.28	3.30	0.02
	40	3.77	3.78	0.01

4 气体检测系统的应用展望

通常情况下,热重分析是气-固反应动力学研究的常用方法,具有响应时间短、控温准确、操作简便、可量化等优点。热重分析通过实时监测



1—系统检测(1 173 K); 2—断点称重(1 173 K); 3—系统检测(1 273 K); 4—断点称重(1 273 K); 5—系统检测(1 373 K); 6—断点称重(1 373 K)。

图6 系统检测和断点称重计算的失氧率对比

Fig. 6 Comparison of oxygen loss rate calculated by system detection and breakpoint weighing

还原过程中样品质量的变化,得到不同条件下还原过程的动力学曲线,计算动力学参数,揭示还原过程的限制性环节。目前研究人员在常规热场下使用热重分析研究铁氧化物的还原行为,而采用微波热重法进行在线检测的误差较大。微波发射的电磁波会产生电磁振荡,从而影响电子天平的测量精度。

AMINI等^[11]采用热重分析方法研究FeS-CaO混合物氢还原过程的微波加热与常规加热动力学,结果如图7所示。试验至少进行两次以减少误差,误差计算采用标准偏差。由图7可见,在975、1 125、1 275 W微波功率下,不同温度下热重的误差范围比较大。在1 023 K,常规加热方式比微波加热方式的失氧率更高,常规加热方式热重法检测的失氧率基本可靠。采用热重-质谱方法研究铁矿粉氢还原动力学,在线质谱方法获得的质谱图的 H_2O 离子强度最大值与DTG曲线出现波谷的时间基本一致,但其对于高含水气相还原过程的细节敏感度不高。

基于上述设计的气体检测系统,本文将 $\ln[-\ln(1-x)]$ 法与JMA(Johnson-Mehl-Avrami)模型相结合分别开展微波场和常规场下磁铁矿粉还原的微观过程动力学研究,并提出采用 $m-x$ 关系基图法分析过程动力学^[12-14]。其中, m 为Avrami指数, x 为某时刻的失氧率。单一环节全程完全控制下的 $m-x$ 关系基图如图8所示。由图8可见,当速率常数分别取0.007、0.015时,同一机制下 $m-x$ 关系曲线完全重合。研究表明:在单

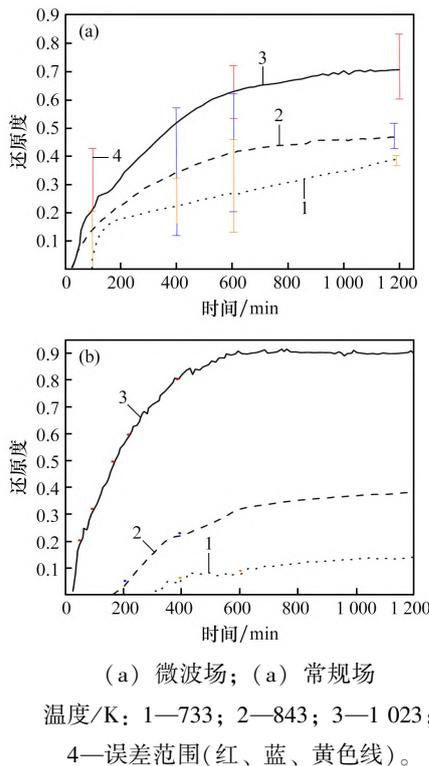
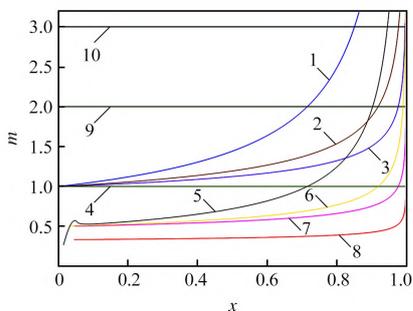


图 7 微波场和常规加热条件下对比试验

Fig. 7 Comparative experiments were conducted under microwave field and conventional heating conditions



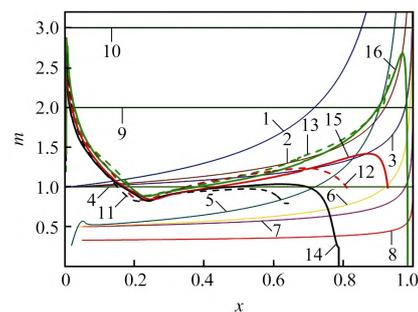
1——维界面; 2——二维界面; 3——三维界面; 4——表观一级; 5——一维扩散; 6——二维扩散; 7——三维扩散; 8——三维扩散 G-M; 9——二维形核长大; 10——三维形核长大。

图 8 单一机制完全控制下的 m 指数随 x 演变特征Fig. 8 Evolution characteristics of m index with x under complete control of single mechanism

一限制性环节完全控制下, 还原过程的 $m-x$ 关系曲线与该环节速率方程中的速率常数无关, 从而表明 m 能够反映动力学的限制性环节。

将 60% H_2 -Ar 气氛下的气体检测系统数据代入图 8, 可得图 9。由 $m-x$ 关系可以看出, 在相同温度下, 微波与常规加热 m 的变化趋势相近。这进一步说明, 微波场和常规场的限制环节没有明

显差异。相同条件下微波场的 m 线比常规场靠上, 这说明微波辐照可以延长非扩散机制的作用时间。此外, 还可以看出, 在还原的第一阶段($Fe_3O_4 \rightarrow Fe_1O$)中, 限制环节由三维形核迅速向相界面反应转化, 并且扩散作用逐渐加大, 并由 $x=0.2$ 左右进入扩散控制区, 第一阶段结束; 第二阶段为 $Fe_1O \rightarrow Fe$, 这一阶段相对较为复杂。在 1 173 K 时, 由初始扩散控制提升为表观一级反应控制, 而微波加热与常规加热相比, 表观一级反应控制这一阶段时间延长, 而后再次转化为 m 小于 1 的区域, 意味着扩散再次成为限制性环节。在 1 273 K 温度下, 第二阶段由扩散转向三维界面反应控制, 并在后期落入扩散限制。同样, 微波扩大了在界面反应控制的阶段。在 1 373 K 温度下, 第二阶段由扩散向二维界面反应发展, 微波比常规加热延长了二维界面的反应时间, 在还原的最后时段, 反应有向一维扩散转化的趋势。



1——维界面; 2——二维界面; 3——三维界面; 4——表观一级; 5——一维扩散; 6——二维扩散; 7——三维扩散; 8——三维扩散 G-M; 9——二维形核长大; 10——三维形核长大; 11——常规场(1 173 K); 12——常规场(1 273 K); 13——常规场(1 373 K); 14——微波场(1 173 K); 15——微波场(1 273 K); 16——微波场(1 373 K)。

图 9 还原过程限制性环节分析

Fig. 9 Analysis of restrictive links in reduction process

根据典型气固反应过程的动力学限制环节的 $m-x$ 基图和本文对 m 值演变的特征规律分析, 并将实际过程的 m 指数变化绘于基图之中, 就可以根据 m 指数过程演变的走向确定还原过程的限制性环节、转化过程、转化时机以及限制性环节的空间维度。根据所提出的动力学模型绘制 $m-x$ 基图, 分析、判断限制性环节的方法具有可行性。但该方法的普遍适用性和可靠性还需要更多的实例研究论证。

5 结论

本文设计并验证了一种适用于高温氢基还原铁矿的在线气体检测系统。通过实践证实,在线气体检测系统优化后达到良好的响应性和较高的灵敏度,并随着还原温度和时间的增加,系统的整体误差逐步减小。气体检测系统核算的失重与断点称重实测结果的差值为0.01~0.11 g,在允许误差范围之内,具有较高的准确性。该系统能够准确地监测气氛的变化,可实现长时间自动连续测试任务,适用于高含水量或电磁波场等复杂环境。该气体检测系统不仅为钢铁工业高温氢基还原提供了一种可行的检测方法,同时也为氢基还原动力学研究提供了一种检测手段。

参考文献:

- [1] 佟帅,艾立群,洪陆阔,等. 30·60 目标下中国氢冶金发展现状及应用前景[J]. 材料导报,2023,37(23): 117-124.
TONG Shuai, AI Liqun, HONG Lukuo, et al. Development status and application prospects of China's hydrogen metallurgy under the 30·60 target[J]. Materials Reports, 2023, 37(23): 117-124.
- [2] ZHANG F C, HONG L K, XU Y. Prospects for green steelmaking technology with low carbon emissions in China[J]. Carbon Energy, 2024, 6(2): e456.
- [3] 郑少波. 氢冶金基础研究及新工艺探索[J]. 中国冶金, 2012, 22(7): 1-6.
ZHENG Shaobo. Basic research on hydrogen metallurgy and new ironmaking idea-process[J]. China Metallurgy, 2012, 22(7): 1-6.
- [4] TONG S, AI L Q, HONG L K, et al. Microwave-hydrogen synergistic reduction of vanadium titano-magnetite[J]. ISIJ International, 2023, 63(8): 1328-1333.
- [5] 方飞,胡晓军,杨晓波,等. 氢还原块状 Fe₂O₃ 的动力学及分层现象[J]. 过程工程学报, 2014, 14(5): 829-834.
FANG Fei, HU Xiaojun, YANG Xiaobo, et al. Kinetics and stratification of hydrogen reduction of block hematite[J]. 过程工程学报, 2014, 14(5): 829-834.
- [6] FRUEHAN R J, LI Y, BRABIE L, et al. Final stage of reduction of iron ores by hydrogen[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2005, 34(3): 205-212.
- [7] KAN T, STREZOV V, EVANS T, et al. Volatilisation of trace elements during reduction of iron ore by hydrogen: Statistical analysis, kinetic study and environmental assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 271: 122524.
- [8] YAMAGUCHI A, HARADA M, MORIYAMA J. Kinetic studies of the reduction of ilmenite ore by hydrogen[J]. Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan, 1965, 81(927): 621-626.
- [9] 苟于单,卢鹏飞,何九宁,等. 1.39 μm 附近 H₂O 谱线参数测量及其在燃烧动力学中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(1): 176-180.
GOU Yudan, LU Pengfei, HE Jiuning, et al. Measurement of H₂O spectroscopic parameters near 1.39 μm and application in combustion kinetics[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(1): 176-180.
- [10] 李远,胡晓军, GARG P, 等. 热重-质谱联用研究铁矿粉氢还原的动力学研究[J]. 江西冶金, 2020, 40(2): 1-5.
LI Yuan, HU Xiaojun, GARG P, et al. A study on the hydrogen reduction kinetics of iron ores by TG-MS method[J]. Jiangxi Metallurgy, 2020, 40(2): 1-5.
- [11] AMINI A, OHNO K, MAEDA T, et al. A kinetic comparison between microwave heating and conventional heating of FeS-CaO mixture during hydrogen-reduction[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 374: 648-657.
- [12] ZHOU M J, AI L Q, HONG L K, et al. Comparison between microwave heating and conventional heating of magnetite during hydrogen reduction[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2024, 55(1): 114-127.
- [13] 周美洁. 微波场中氢还原磁铁矿基础研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2024: 61-105.
ZHOU Meijie. Basic research on hydrogen reduction of magnetite in microwave field[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2024: 61-105.
- [14] ZHOU M J, AI L Q, HONG L K, et al. Promoting effect of microwave field on gas phase diffusion limited magnetite reduction in carbon monoxide[J]. Processes, 2023, 11(9): 2-16.