

# COREX 预还原竖炉反应过程的物理模拟

应伟峰, 孙野, 罗志国, 邹宗树  
(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110819)

**摘要:** COREX 工艺主要由预还原竖炉和熔化气化炉两部分组成, 预还原竖炉作为气-固逆流式反应器, 炉内铁氧化物的还原情况至关重要, 关系到整个流程的生产效益. 本文通过建立 1:20 的半圆周冷态模型, 利用硅胶吸水逐渐变色的特性进行预还原竖炉内气-固反应进程的可视化模拟实验, 测定了不同气体流量下填充床内铁矿石的还原情况. 结果表明炉内径向铁矿石还原率相差较大, 随着气体流量增大而炉内气-固反应进程加快, 反应进程在轴向、径向上很不均匀.

**关键词:** 预还原竖炉; 气-固反应进程; 可视化实验; 物理模拟

**中图分类号:** TF 557 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-6620(2010)01-0001-06

## Physical simulation of reaction progress in COREX shaft furnace

YING Wei-feng, SUN Ye, LUO Zhi-guo, ZOU Zong-shu

(School of Materials Sciences and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** COREX process is composed of a reduction shaft furnace and a smelter-gasifier furnace. The shaft furnace is a typical gas-solid countercurrent reaction device, so the reduction condition of iron oxides in shaft furnace is of crucial importance, and it determines the efficiency of whole process. In order to discuss the reduction degree of the product at the different gas-flow rates, the process was studied through a 1:20 semi-circle cold model visual experiment, with allochromic silica gel. The result shows that the reduction degree of the ore is different in the radial direction position of the model. The reaction rate between solid and gas varies with the gas-flow rate. The reduction is nonuniform in both axial and radial directions.

**Key words:** pre-reduction shaft furnace; gas-solid reduction progress; visual experiment; physical simulation

COREX (原名 KR, 由 KORF 和 VOEST-ALPINE 在奥地利和德国政府的财政支持下联合开发) 是奥钢联开发的一种用煤和球团(块矿)生产铁水的新炼铁工艺<sup>[1-3]</sup>. COREX 熔融还原装置主体分为两部分: 上部的预还原竖炉和下部的熔融气化炉. 预还原竖炉是一个活塞式反应器, 采用高架式布置, 位于熔融气化炉上面. 通过装料设备和布料装置, 由预还原竖炉顶部按预定料批装入矿石、球团和熔剂等炉料, 在逐渐下降过程中, 与逆流还原气体作用, 完成预热和还原过程. 800~850℃ 海绵铁和焙烧的石灰石和白云石通过数台液压传动、转速可调的水冷螺旋给料机连续热送入下部的熔融气化炉<sup>[4-6]</sup>.

在 COREX 工艺方法中, 由于在竖炉预还原

阶段将铁氧化物还原至金属化率达 90% 以上, 因此该阶段内的炉内运行情况关系到 COREX 整个工艺流程的生产效益. 董雪峰等<sup>[7]</sup> 采用二维冷态模型实验和数值模拟方法对炉内反应过程进行研究和解析, 描述了竖炉内铁矿石的还原情况. 本文作者<sup>[8]</sup> 曾采用冷态模拟实验和数值模拟方法研究了不同操作条件下填充床内的气流分布和压力场分布. 为了更好地描述预还原竖炉内的铁矿石还原情况, 本文建立半圆周三维冷模型, 采用冷态模拟的方法对炉内的反应过程进行研究和解析.

## 1 参数确定

冷模型试验法的基本理论是建立在相似原理的基础上, 即建造与原型满足主要相似条件的实

收稿日期: 2009-12-26.

作者简介: 应伟峰 (1977—), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学博士研究生; E-mail: yingweifeng7748@126.com; 邹宗树 (1958—), 男, 山东章丘人, 东北大学教授, 博士生导师.

验模型来模拟原型中的物理和化学变化,进行一系列的测定,得到对原型相应变化规律的认识.

在进行模型实验研究时,为了保证模型中的流动与原型中的流动相似,必须满足以下条件<sup>[9,10]</sup>.

- (1) 模型与原型流体通道的几何相似;
- (2) 模型与原型中的流体的物性相似;
- (3) 模型与原型的边界条件相似;
- (4) 模型与原型的初始条件相似;
- (5) 模型与原型的定性相似准则相等.

但是在冷态实验中,原型与模型同时满足上述条件几乎不可能,必须采取近似模型研究的方法.模型与原型比例为1:20,满足的相似准数为弗鲁德准数( $Fr$ ),根据原型的入口气体流量标准态下为 $282\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ ,计算出模型实验所需的气体流量标准态下为 $157\ \text{m}^3/\text{h}$ .根据预还原竖炉原型的基本尺寸计算出模型的基本尺寸,如表1所示.

表1 预还原竖炉原型和模型的基本尺寸  
Table 1 Dimensions of reduction shaft furnace and model

|           | Height<br>/m | Average<br>diameter<br>/m | Tuyere<br>height<br>/m | Tuyere<br>diameter<br>/mm |
|-----------|--------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| Prototype | 25.818       | 7.857                     | 7.500                  | 300 × 170                 |
| Model     | 1.291        | 0.393                     | 0.375                  | 15 × 8.5                  |

## 2 实验装置及研究方法

冷模型实验装置如图1所示,包括模型主体部分和辅助部分.模型主体为半圆周的预还原竖炉,主要由炉身、竖炉围管构成,除竖炉围管区域外均由有机玻璃加工而成.图2为炉身示意图,在炉身正面为观察面板,侧面为半圆周结构.图3为竖炉围管装置图,整个竖炉围管装置由不锈钢加工制成,40个风口与水平线成 $66^\circ$ 夹角均匀布置.分流锥和螺旋排料器位于竖炉底部,由不锈钢加工而成.辅助部分主要由加料装置、加湿装置、送风系统、流量控制系统和拍照系统组成.

本实验采用固定床形式,利用硅胶吸水逐渐变色的特性进行预还原竖炉内气-固反应进程的可视化模拟实验.由于硅胶吸水速率、加湿空气含水量不易测得及化学反应活化能等因素不能由物理过程来体现,所以此实验不能作为定量分析的手段;但实际填充床内铁矿石的还原反应过程与硅胶吸水这一物理过程存在一定的类比性:第一,在可视化的模拟实验中,硅胶吸水达到饱和可模

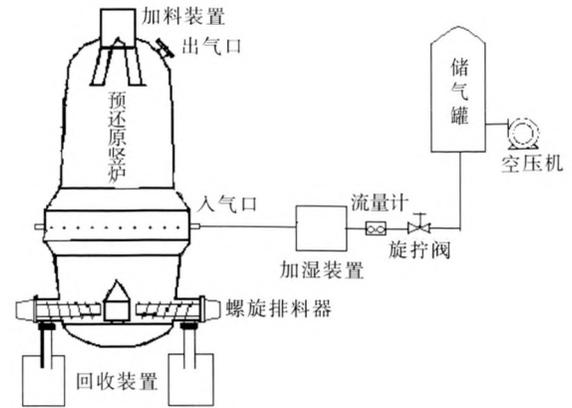


图1 实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

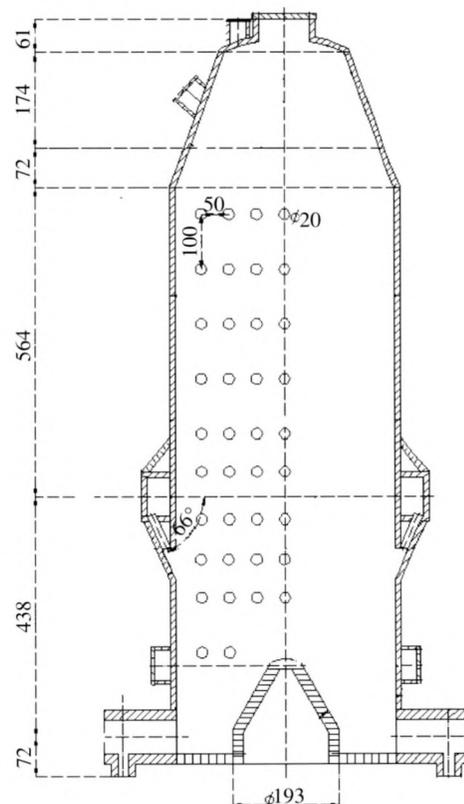


图2 炉身示意图

Fig. 2 Schematics of the furnace body

拟铁矿石的完全还原;第二,由于硅胶吸水程度的不同,显色深浅也不同,可代表铁矿石逐渐被还原的动态还原过程;第三,加湿空气中的水分逐渐减少过程可模拟气流中还原性气体浓度逐渐降低的过程.所以,利用硅胶吸水实验来分析竖炉内地气-固反应进程,得出反应进程的趋势及规律是可行的.

实验选取蓝色变色硅胶粒子(直径 $2.8\ \text{mm}$ 、密度 $3\ 872\ \text{kg}/\text{m}^3$ 、空隙度为 $0.35$ )做填充料.填充

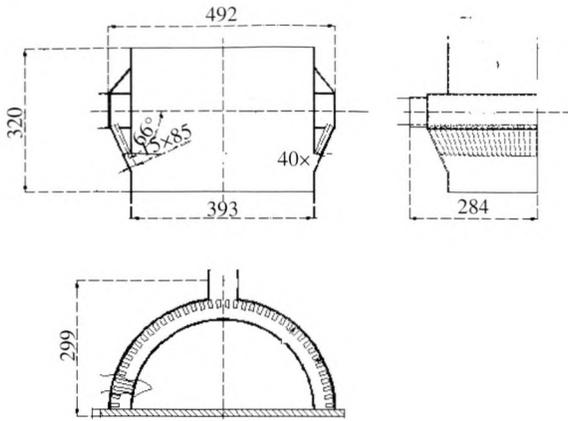


图 3 竖炉围管区域图

Fig. 3 Schematics of bustle

高度为 0.9 m, 在进行气 - 固反应进程的可视化模拟实验时, 由竖炉围管处通入加压空气作为主气流, 同时将加湿空气通入主气流并由竖炉围管连续通入料层, 蓝色硅胶粒子吸收加湿空气中的水分后逐渐变为粉红色, 空气中的水分减少, 用此过程来模拟竖炉内地气 - 固反应进程并使之可视化. 实验中分别针对 48 m<sup>3</sup>/h, 78 m<sup>3</sup>/h, 108 m<sup>3</sup>/h 三种入口气体流量, 采取每间隔 0.5 h 进行摄影的方法来记录不同阶段床层内硅胶变色情况. 实验方案如表 2 所示.

表 2 实验方案

Fig. 2 Experimental scheme

| Gas flow rate/(m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> ) | 48  | 78 | 108 |
|---------------------------------------------------|-----|----|-----|
| Packed bed height /m                              | 0.9 |    |     |

### 3 结果与讨论

将蓝色变色硅胶粒子装入炉内, 填充高度为 0.9 m, 调节到指定加湿气流流量, 保持加湿气流稳定持续的吹入填充床, 开始计时进行实验, 在各流量条件下分别就不同时刻拍摄(时间间隔 0.5 h)以跟踪反映进程. 如图 4B 所示, 入口气流量为 78 m<sup>3</sup>/h 条件下, 吹气时间 12 h 以后炉内情况, 硅胶变色情况基本稳定, 此时硅胶粒子吸水达到饱和, 继续吹气不再有明显变色. 图 4A 为前人<sup>[7]</sup>对竖炉内还原率的数学模拟结果. 两图相对比, 可以看出通过实验得到的反应进程边界与通过数学模拟得到的竖炉内还原率分布情况十分相似. 将图 4B 中变色区域与图 4A 中还原率分布曲线相对照, 可以看到, 竖炉内变色硅胶的边界曲线要略高于数学模拟得到的曲线, 这是因为物理实验为固定床, 而前人的数学模拟考虑了炉料的排出为移

动床, 从而出现了物理实验得到的变色边界要略高于数学模拟所得结果这一现象, 但二者具有相似性. 由此确定硅胶变色达到或超过此特定颜色即反映出炉内矿石的还原率达到或者超过 0.4. 用比色卡记录下这一颜色, 以此颜色作为判定标准对实验获得图片进行处理.

根据该标准对拍得照片进行后续处理, 使反应进程边界更加明显, 可视效果更好. 最终得到不同时刻炉内硅胶吸水程度的进展情况, 确定变色边界, 从而反应出不同气量条件下竖炉内各区域的铁矿石还原度的差别, 进而得出反应进程的趋势以及规律.

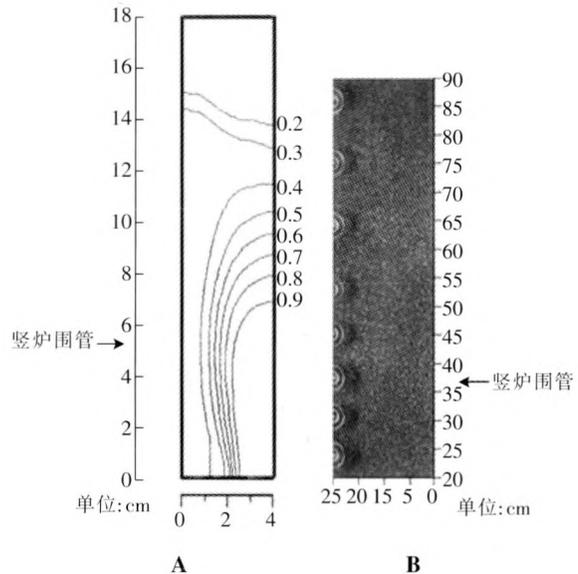


图 4 硅胶变色区域和数学模拟结果对比

Fig. 4 Comparison between silica discoloration area and mathematical simulation result

图 5 所示为入口气流量 78 m<sup>3</sup>/h, 吹气 12 h 后所拍得的竖炉径向剖面图. 从竖炉上部分层取出所填充的硅胶粒子, 每隔 5 cm 对横剖面的实验结果进行拍照, 由此得到竖炉不同高度的径向剖面图, 选出其中部分图片进行分析. 可以看出, 在炉身 75 cm 高度以上区域, 硅胶粒子的颜色相对较深, 但是颜色较为均匀, 这说明在炉身的上部区域气流分布较均匀, 矿石还原率较低并且在径向上没有明显差异; 在炉身 75 cm 高度以下即炉身中下部区域, 可以看到边壁区域和中心区域的硅胶粒子变色情况呈现明显差别, 边壁区域的硅胶明显变色而中心位置的硅胶变色较不显著, 这说明在炉身中下部, 中心区域气流较弱而在边壁区域气流较强, 气流在径向的分布规律是从中心到边壁逐渐增强. 从图中还可以看出, 在竖炉围管

(35~40 cm)区域,中心变色不显著的区域较小,而在竖炉围管上部和下部区域,中心变色不显著的区域较大.这是由于加湿气流从竖炉围管通入竖炉内部,在此区域内的加湿气流浓度较高,硅胶颗粒吸水速度快.

同时从侧面图和剖面图的对照可以看出,竖炉侧面图与剖面图所反应的规律是完全一致的,因此在实验中采用对侧拍照处理即可反应出炉内硅胶颗粒的吸水变色进度情况.

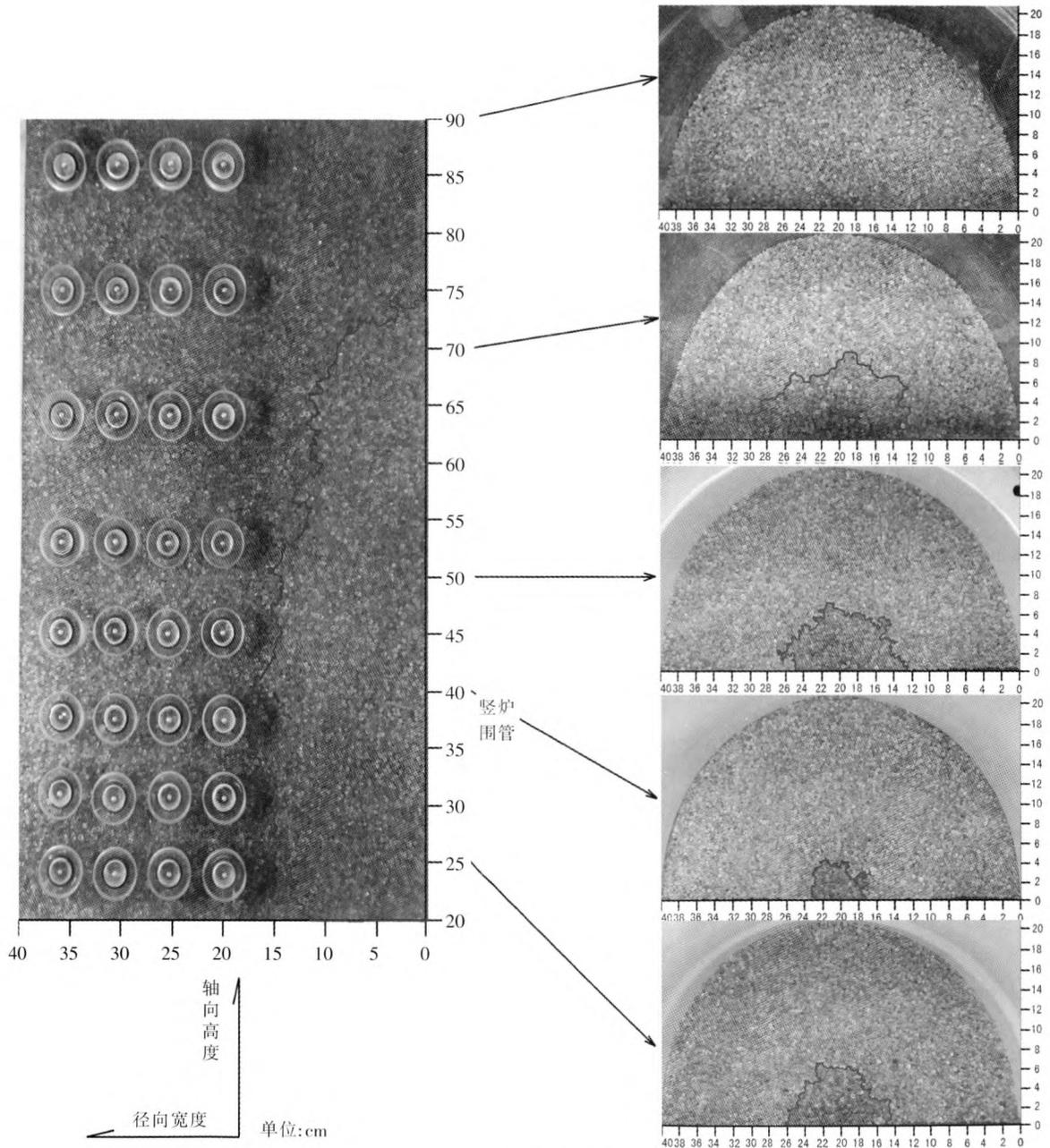


图5 竖炉内部剖面图

Fig. 5 Horizontal cross sections of bed in shaft furnace

图6所示为入口气流量  $78 \text{ m}^3/\text{h}$ , 填充高度  $0.9 \text{ m}$  条件下, 吹气时间分别选取  $1 \text{ h}$ ,  $3 \text{ h}$ ,  $6 \text{ h}$ ,  $12 \text{ h}$  时的实验结果. 图中的白色区域为硅胶吸水变色达到变色标准的区域. 从图中可以看到同一入口气体流量下, 不同时刻的硅胶吸水程度的进展情况. 在通气  $1 \text{ h}$  后, 呈现图6(a)所示情况, 此时

硅胶变色区域是一竖炉围管为中心的近半球形区域, 轴向与径向变化差异不大;  $3 \text{ h}$  后如图6(b), 硅胶变色区呈现半椭圆形区域, 沿轴向上变色比径向上较快;  $6 \text{ h}$  后如图6(c), 沿径向和轴向上的硅胶吸水变色程度明显不同, 中心附近硅胶变色较慢而边缘附近的硅胶变色面积急剧扩大;  $12 \text{ h}$

后如图 6(d), 径向上硅胶变色更加明显, 且在竖炉上部区域可见硅胶变色较为平均, 而在竖炉轴线上的硅胶变色情况则较为轻微. 这是由于入口气体在边缘附近的流量高于轴线附近的流量从而携带的水蒸气量大, 致使边缘附近硅胶变色快, 而轴线附近变色较慢.

图 7 所示为入口气流量为  $48 \text{ m}^3/\text{h}$ , 填充高度  $0.9 \text{ m}$  条件下, 吹气时间分别选取  $1 \text{ h}$ ,  $3 \text{ h}$ ,  $6 \text{ h}$ ,

$12 \text{ h}$  时的实验结果. 从图中可以看出, 炉内硅胶变色规律与入口气流量  $78 \text{ m}^3/\text{h}$  时的规律近似, 呈现随时间增加变色区域扩大, 并且轴线变色要快于径向变色的趋势. 图 6 与图 7 相对比可以看出气流量为  $48 \text{ m}^3/\text{h}$  时硅胶变色速率要慢于  $78 \text{ m}^3/\text{h}$  时的变色速率, 在吹气时间相同时, 气流量越小所得变色区域亦较小, 且径向、轴向上的硅胶变色差异也存在.

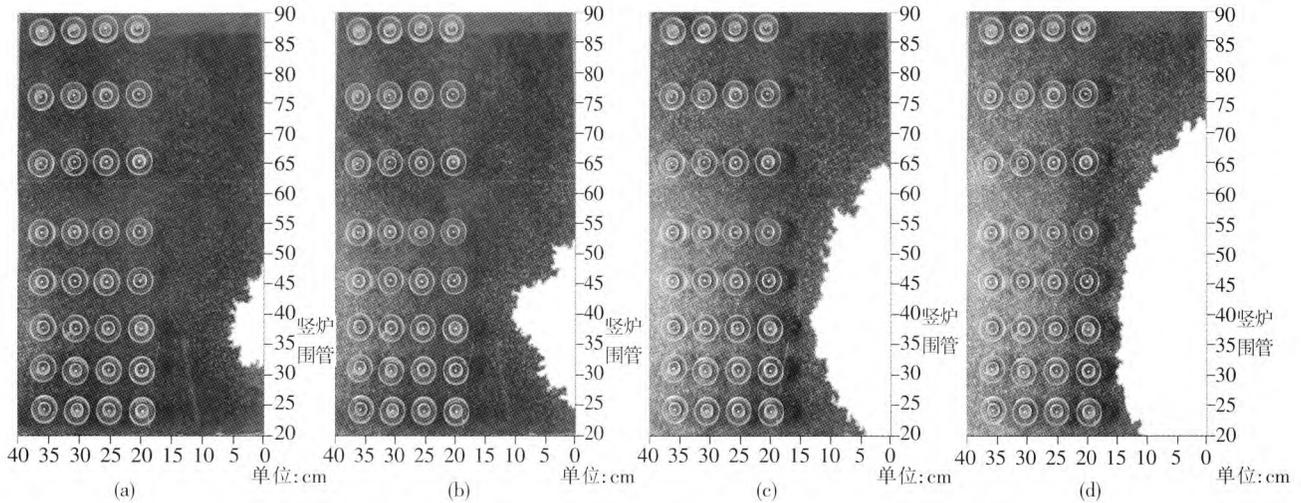


图 6 入口气流量为  $78 \text{ m}^3/\text{h}$  时反应进程照片

Fig. 6 Reaction progress picture with  $78 \text{ m}^3/\text{h}$  gas flowrate

(a) —吹气时间  $1 \text{ h}$ ; (b) —吹气时间  $3 \text{ h}$ ; (c) —吹气时间  $6 \text{ h}$ ; (d) —吹气时间  $12 \text{ h}$

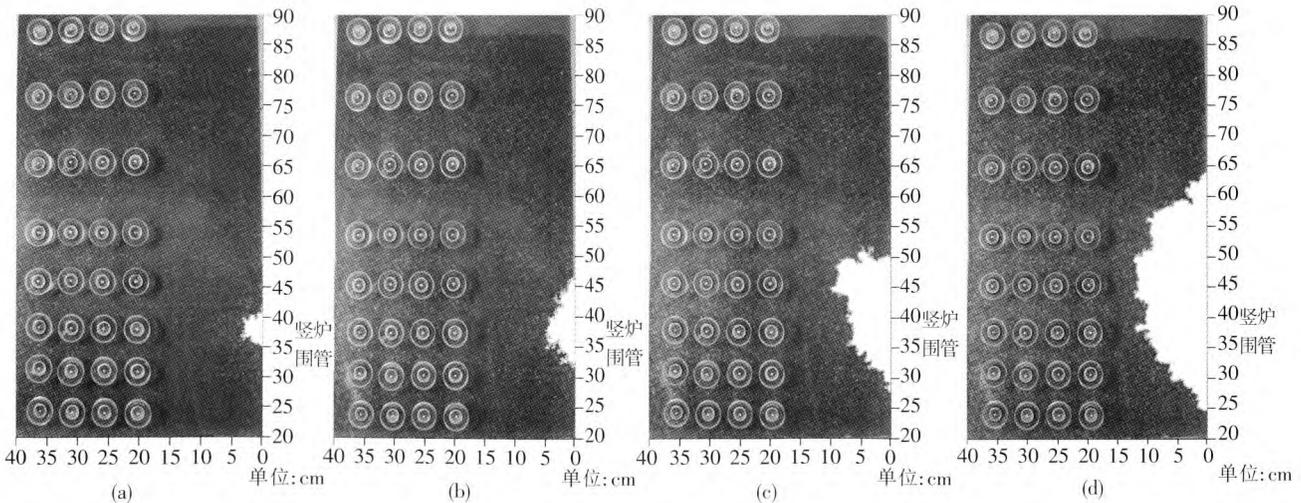


图 7 入口气流量为  $48 \text{ m}^3/\text{h}$  时反应进程照片

Fig. 7 Reaction progress picture with  $48 \text{ m}^3/\text{h}$  gas flowrate

(a) —吹气时间  $1 \text{ h}$ ; (b) —吹气时间  $3 \text{ h}$ ; (c) —吹气时间  $6 \text{ h}$ ; (d) —吹气时间  $12 \text{ h}$

图 8 为入口气流量为  $108 \text{ m}^3/\text{h}$  时, 填充高度  $0.9 \text{ m}$  条件下, 吹气时间分别选取  $1 \text{ h}$ ,  $3 \text{ h}$ ,  $6 \text{ h}$ ,  $12 \text{ h}$  时的实验结果. 通过图 8 与图 6 相对比可得出

气流量为  $108 \text{ m}^3/\text{h}$  时硅胶变色速率要明显快于  $78 \text{ m}^3/\text{h}$  时的变色速率, 同时径向、轴向上的硅胶变色情况差异表现也更加明显.

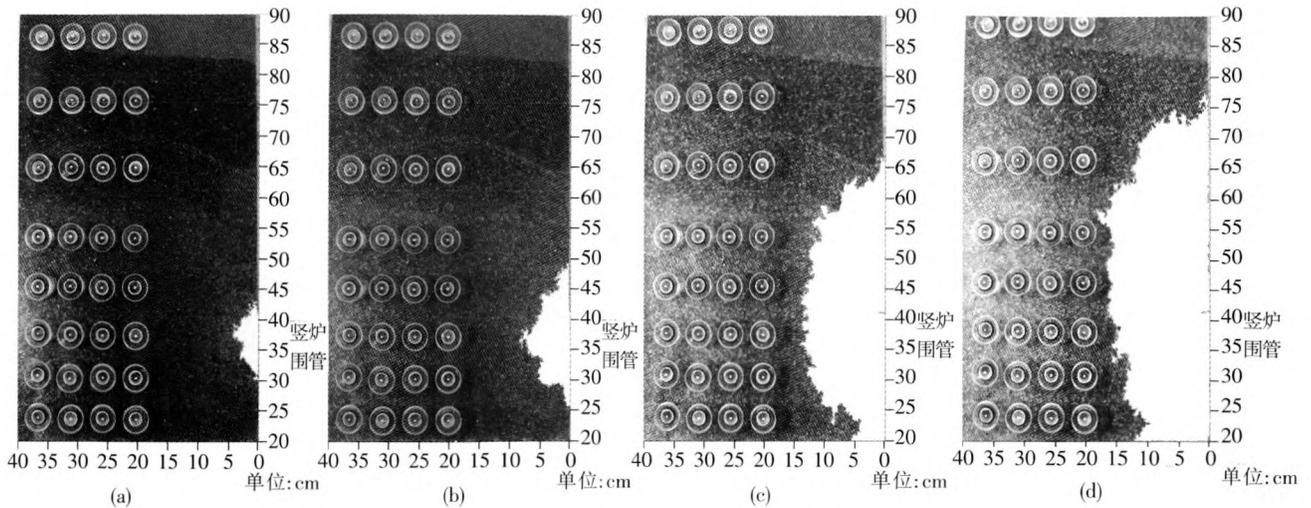


图8 入口气流量为  $108 \text{ m}^3/\text{h}$  时反应进程照片

Fig. 8 Reaction progress picture with  $108 \text{ m}^3/\text{h}$  gas flowrate

(a)一吹气时间 1 h; (b)一吹气时间 3 h; (c)一吹气时间 6 h; (d)一吹气时间 12 h

## 4 结论

本实验采用固定床形式,利用硅胶吸水逐渐变色的特性来模拟铁矿石逐渐被还原的动态反应过程,完成了预还原竖炉内气-固反应进程的可视化模拟实验.通过实验结果的分析可以得出如下结论:

(1)炉身上区域气流分布较均匀,矿石还原率较低并且在径向上没有明显差异;炉身中部区域气流较弱而在边壁区域气流较强,气流在径向上的分布规律是从中心到边壁逐渐增强,从中心到边壁矿石还原程度加强;竖炉围管区域气流较激烈,矿石还原速度快.

(2)随着时间的推移,竖炉内铁矿石的还原出现轴向、径向两个方向上的不同变化趋势,由于床层中下部边缘气流大于通过床层中心的气流,最终导致在中心附近的还原程度较小,而边缘附近还原较为显著,说明径向上铁矿石还原率相差较大.

(3)炉内气-固反应进度随着气体流量增大而加快,且由于气流的边缘效应使得反应进程在轴向、径向的不均匀程度更为显著.

## 参考文献:

[1] 周渝生. 煤基熔融还原炼铁新工艺发展现状评述[C]// 沈阳, 东北大学, 2006年中国非高炉炼铁会议论文集. 沈阳: 中国金属学会非高炉炼铁学术委员会, 2006: 42-57.  
(ZHOU Yu-sheng. The review of current development of coal-based smelting reduction iron-making process[C]// Shenyang: Northeastern University, The Symposium of Chinese Non Blast Furnace Iron-making Congress in 2006. Shenyang: The Academic Committee of Non Blast Furnace Iron-making in the Chinese Society for Metals, 2006:42-57.)

[2] 杨天均, 刘述临. 熔融还原技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991: 8-9.  
(YANG Tian-jun, LIU Shu-lin. Technology of smelting reduction [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991: 8-9.)

[3] 方觉. 非高炉炼铁工艺与理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 8-15.  
(FANG Jue. Technology and fundament of non blast furnace iron-making[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003: 8-15.)

[4] Andrzej Ziebig, Krzysztof Lampert, Marcin Szega. Energy analysis of a blast-furnace system operating with the Corex process and  $\text{CO}_2$  removal[J]. Energy, 2008, 33(2): 199-205.

[5] Sahoo R, Roach D. Degradation behaviour of weathered coal during handling for the COREX process of iron making[J]. Powder Technology, 2005, 4(152): 1-8.

[6] 周渝生. 煤基熔融还原炼铁新工艺开发现状评述[J]. 钢铁, 2005, 40(11): 1-8.  
(ZHOU Yu-sheng. The review of current development of coal-based smelting reduction iron-making process[J]. Iron & Steel, 2005, 40(11): 1-8.)

[7] 董雪峰, 肖兴国, 邹宗树, 等. COREX 预还原反应过程的数学物理仿真[J]. 包头钢铁学院学报, 1999, 18(2): 117-120.  
(DONG Xue-feng, XIAO Xing-guo, ZOU Zong-shu, et al. Mathematical and physical modelling of pre-reduction reaction process of COREX technology[J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 1999, 18(2) 117-120.

[8] 应伟峰, 孙野, 罗志国, 等. COREX 竖炉的数值物理模拟[J]. 过程工程学报, 2009, 9(S1): 292-295.  
(YING Wei-feng, SUN Ye, LUO Zhi-guo, et al. Numerical and physical simulation of COREX shaft furnace[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(S1): 292-295)

[9] Kmaspm S P. Cold model study of metal droplet descent through fluids including a treatment of the non-newtonian behaviour as exhibited by molten slag system [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2005, 32(6): 494-503.

[10] Jizhong C. Modeling of solid flow in moving beds[J]. ISIJ Int, 1993, 33(6): 664-671.