

# 工艺因素对铁矿粉流态化还原效果影响的模拟研究

黄金玉, 胡明伟, 窦安南, 朱国民, 徐其言

(安徽工业大学 冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

**摘要:**以高压循环流化床为原型, 建立流化床内管几何模型, 综合考虑颗粒间传热传质和化学反应特征, 以金属化率和反应平衡时间为评价指标, 采用 Barracuda 软件模拟分析还原温度、矿粉粒径、还原气氛等工艺因素对铁矿粉流态化还原的影响, 确定铁矿粉流态化还原的最佳方案; 采用扫描电镜表征铁矿粉的微观形貌, 探讨工艺因素对铁矿粉流态化还原和黏结的机理。结果表明: 铁矿粉粒径为 [0.150, 0.180) mm 时, 还原温度在 573~1173 K 范围, 升高温度有利于提高铁矿粉的金属化率和颗粒纵向速度、缩短反应平衡时间, 但温度过高颗粒纵向速度降低, 这是由于铁晶须相互勾连形成团聚, 抑制铁矿粉流化; 温度为 973 K 时, 铁矿粉粒径在 [0.080, 1.000) mm 范围, 减小粒径可增大铁矿粉的比表面积, 有利于提高铁矿粉的金属化率, 但铁矿粉粒径过小颗粒堆积不易流化; 还原气氛为 (H<sub>2</sub>+CO) 的条件下, 纯 H<sub>2</sub> 的还原效率优于 CO, 但增加 CO 的含量利于减少水蒸气的生成, 提高铁矿粉的流化性能。气体线速度为 0.6 m/s、压力为 0.2 MPa 条件下, 流态化还原铁矿粉的最佳工艺参数为还原温度 973 K、粒径 [0.150, 0.180) mm、还原气氛 70%H<sub>2</sub>+30%CO。

**关键词:**数值模拟; 流化床; 铁矿粉; 还原机理; 黏结机理

**中图分类号:** TF 552 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24009



## A Simulation Study of the influence of Process Factors on the Fluidized Reduction Effect of Iron Ore Powder

HUANG Jinyu, HU Mingwei, DOU Annan, ZHU Guomin, XU Qiyuan

(School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

**Abstract:** Taking the high-pressure circulating fluidized bed as a prototype, the geometric model of the tube inside the fluidized bed was established. Considering the characteristics of heat and mass transfer between particles and chemical reactions comprehensively, with metallization rate and reaction equilibrium time as evaluation indices, Barracuda software was used to simulate and analyze the effects of the process factors such as the reduction temperature, the particle size of the ore powder, and the reduction atmosphere on the fluidized reduction of iron ore powder, in order to determine the optimal scheme for the fluidized reduction of iron ore powder. Scanning electron microscope (SEM) was used to characterize the micro-morphology of the ore powder, and the influence of process factors on the fluidized reduction of iron ore powder and the bonding mechanism were explored. The results show that when the particle size of mineral powder is [0.150, 0.180) mm, the reduction temperature is in the range of 573–1173 K, increasing the temperature is beneficial for improving the metallization rate and the longitudinal velocity of

收稿日期: 2024-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51974001, 51704003); NSFC-新疆联合基金项目(U2003124); 安徽省高校优秀人才项目(gxyq2019016)

作者简介: 黄金玉(1999—), 女, 安徽六安人, 硕士生, 主要研究方向为炼铁新技术。

通信作者: 徐其言(1982—), 男, 江苏睢宁人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为炼铁新技术。

引文格式: 黄金玉, 胡明伟, 窦安南, 等. 工艺因素对铁矿粉流态化还原效果影响的模拟研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(3):233-241.

the particles and shortening the reaction equilibrium time. If the temperature is too high, the longitudinal velocity of the particles decreases. This is due to the interlocking of iron whiskers to form agglomerations, which inhibits the fluidization of the iron ore powder. When the temperature is 973 K, the particle size of the ore powder is in the range of [0.080,1.000) mm, decreasing the particle size can increase the surface area, which is beneficial for improving the metallization rate of iron ore powder. If the particle size is too small, it will make it difficult for the particles to accumulate and fluidize. Under the condition of reducing the atmosphere of  $H_2 + CO$ , the reduction efficiency of pure  $H_2$  is better than that of  $CO$ . However, increasing the content of  $CO$  can reduce the generation of water vapor, which is beneficial for improving the fluidization performance of mineral powder. Under conditions of gas linear velocity at 0.6 m/s and pressure at 0.2 MPa, the optimum process parameters for fluidized reduction of iron ore powder are identified as: reduction temperature of 973 K, particle size of [0.150,0.180) mm, and reduction atmosphere of 70% $H_2 + 30\%CO$ .

**Keywords:** numerical simulation; fluidized bed; iron ore powder; reduction mechanism; bonding mechanism

目前,我国炼铁工艺主要采用高炉炼铁技术,但工业生产中高炉炼铁不仅产生大量的污染性气体和有害气体<sup>[1]</sup>,而且面临铁矿石和焦炭供应匮乏的问题。为此,非高炉炼铁技术得到广泛关注,非高炉炼铁技术主要包括竖炉还原法和流态化还原法<sup>[2]</sup>。铁矿石按颗粒可分为块矿、原矿和粉矿,其中块矿资源有限,破碎困难,运输成本高,且存在粉尘污染、生产能耗高等问题;粉矿资源广泛、储量大、成本相对较低,且加工制备方便,同时可降低炉渣含量,提高冶炼效率。流化床是1种将固体颗粒通过气体流化达到混合、反应和传热的装置,流化床技术具有高传质传热效率、均匀性好、操作灵活等优点,被广泛用于化工、能源、环境保护等领域。其中流态化炼铁技术可对粉矿进行直接还原,工艺简单,且几乎不产生污染性气体和有害气体。当前,流态化炼铁技术在我国已取得显著的应用成果,然而与发达国家相比,我国流化床技术的研发和应用还存在一定距离。随着国家环境保护、高效能源的要求越来越高,持续开展流化床还原技术研究对于促进我国钢铁工业绿色低碳发展具有重要的现实意义。

为探讨合适的流态化还原炼铁工艺,谷张涵等<sup>[3]</sup>、徐其言等<sup>[4]</sup>、朱国民等<sup>[5]</sup>实验研究还原气体种类、还原温度、还原气体流速、压力以及矿粉组成等因素对铁矿粉还原效率的影响。但是,流化床还原炼铁实验在高温高压下进行,对于流化床内部颗粒的流动状态和颗粒黏结状况无法直接观测,存在实验成本高、能耗大等不足。随着计算机技术的飞速发展,数值模拟被用于流态化还原炼铁的研究中。Kinaci等<sup>[6]</sup>结合计算流体力学与离散单元法(computational fluid dynamics and discrete element method, CFD-DEM),模拟流化床中铁矿粉的直接还原,研究动力学参数对还原度的影响,发现 $H_2$ 作为

反应气体可增加还原速率,但该方法计算量大,计算时间长,模拟粒子数量有限。计算粒子流体动力学(computational particle fluid dynamics, CFPD)通过将多个粒子集中到单个包裹中,采用固体应力模型简化颗粒相互碰撞,可降低计算成本<sup>[7]</sup>。此外,CFPD方法能对任意尺度的设备进行模拟计算,可直观观测气固流动行为<sup>[8-10]</sup>,已广泛用于模拟流化床颗粒气固流动<sup>[11-12]</sup>、燃烧<sup>[13-15]</sup>等研究。Mcintyre等<sup>[16]</sup>采用该方法探讨鼓泡流化床轴向位置、流化速度和操作压力对铁矿粉气泡尺寸分布的影响,发现随着轴向高度和流化速度的增加,平均气泡直径和分布广度均有增加;Tang等<sup>[17]</sup>发现调整流化床反应器中铁矿粉悬浮焙烧的运行参数,可提高铁矿粉颗粒的流动性能和气固接触效果;Wan等<sup>[18]</sup>发现改变温度、压力、气体线速度等工艺参数可改善矿粉的还原效率。目前,学者们采用CFPD方法多集中于研究不同因素对铁矿粉流态化还原效果的影响,但对其流化性能机理的研究较少。鉴于此,采用数值模拟的方法,以高压循环流化床为基础,建立流化床内管几何模型,模拟分析温度、粒径、还原气氛对铁矿粉流态化还原效果的影响,且对不同工艺参数下铁矿粉流化性能的影响机理进行探讨,以期进一步明确流态化工业生产中铁矿粉流化性能的机理。

## 1 模拟过程

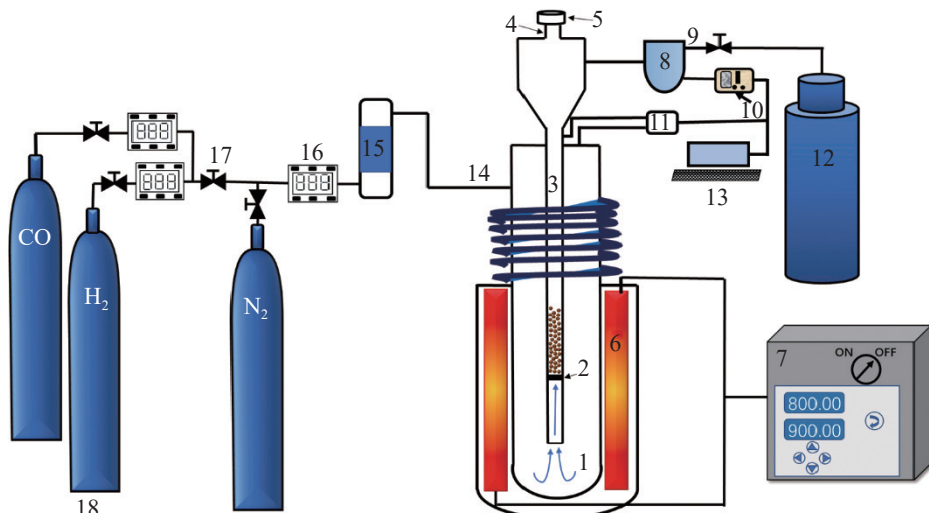
采用CFPD方法模拟分析流态化还原炼铁过程,流态化还原实验原料为巴西铁矿粉<sup>[19]</sup>,化学成分如表1。实验装置如图1,流化床为高压循环流化床,采用流化床内管出口处气体质量分数判断铁矿粉还原反应达到平衡的时间,采用反应平衡时间和金属化率评价流态化炼铁还原效果。模拟过程中,用欧拉-拉格朗日法双向隐式耦合求解气固两相流运动,

气相运动由 Navier–Stokes 方程描述; 用大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 湍流模型直接计算大涡, 模拟亚网格尺度结构。在拉格朗日框架下追踪固相每个颗粒的运动, 通过用 1 个计算颗粒代表大量具有相同属性的真实颗粒来减少颗粒数量, 其中颗粒的曳力模型选用 Wenyu–Ergun 模型。

表 1 巴西铁矿粉的化学成分 w/%

Tab. 1 Chemical composition of Brazilian iron ore fines w/%

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
96.80	0.72	1.98	0.10	0.10	0.30



1—气体预热室; 2—气体分布板; 3—流化床; 4—进料口; 5—观察窗; 6—热电偶; 7—温度控制箱; 8—重力除尘装置; 9—气体出口; 10—气体分析仪; 11—压力阀; 12—气体收集装置; 13—计算机; 14—气体进口; 15—气体干燥器; 16—气体流量计; 17—气体控制开关; 18—气瓶。

图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental installation

1.1 几何模型

以图 1 所示流化床为原型, 流化床高度为 730 mm, 在高度为 202 mm 处设置 1 个厚度为 4 mm 的分布板。采用 Barracuda 软件对流化床内管建模, 其几何模型如图 2(a)。笛卡尔网格属于 1 种非贴体的网格结构, 采用先空间后表面的网格生成方式, 网格单元

基本按笛卡尔坐标方向 (x, y, z) 排列, 具有常规结构网格与非结构网格中不常见的悬挂点结构, 同时存在结构网格中的结构特性。因此, 文中选用笛卡尔网格生成方式对模型进行网格划分, 划分结果与边界设置如图 2(b) 和 (c)。

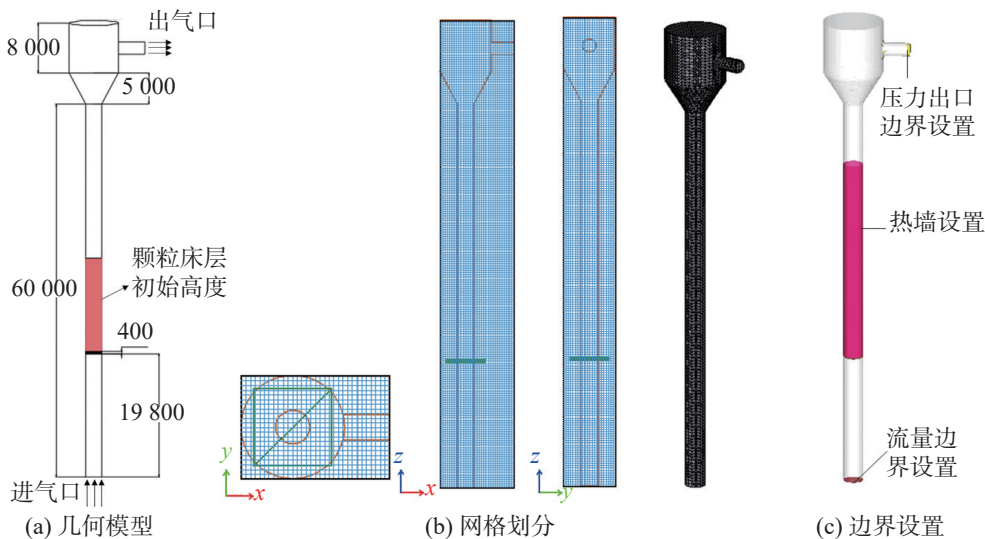


图 2 基础模型、网格划分和边界条件

Fig. 2 Basic model, mesh division, and boundary conditions

单位:mm

Unit:mm

## 1.2 化学反应模型

增大铁矿粉流态化还原压力和气体线速度可提高高铁矿粉的还原效率,根据文献[19],压力为0.2 MPa、气体线速度为0.6 m/s为最佳还原工艺条件,本次模拟在该条件下进行,其他模拟参数如表2。

表2 模型模拟参数

Tab. 2 Simulation parameters of the model

参数	数值
铁矿粉颗粒密度/(kg/m <sup>3</sup> )	5 086
初始床层高度/m	0.15
还原性气体H <sub>2</sub> 与CO的体积比	7:3
重力/(m/s <sup>2</sup> )	9.81
压力/MPa	0.15
初始气体线速度/(m/s)	0.6
密堆积体积/m <sup>3</sup>	0.6
碰撞中的最大动量重定向/%	40
法向壁动量保持	0.3
切向壁动量保持	0.85
漫反射反弹	2
时间/s	12 000
时间步长	0.001

使用体积平均法对铁矿粉流态化还原过程进行化学计算。将离散计算的粒子特性插值到网格,获得化学速率粒子相的平均特性,在每个网格中计算反应速率 $K$ ,根据阿伦尼乌斯方程<sup>[20]</sup>,其表示如下:

$$K = A_0 m^{c_1} T^{c_2} \exp\left(-\frac{E}{RT} + E_0\right) \quad (1)$$

其中: $A_0$ 为指前因子; $m$ 为颗粒的质量; $E$ 为活化能; $E_0$ 为活化能常数; $R$ 为通用气体常数; $c_1$ ,  $c_2$ 为常数; $T$ 为温度。模拟过程中涉及的化学反应和反应速率方程如表3。

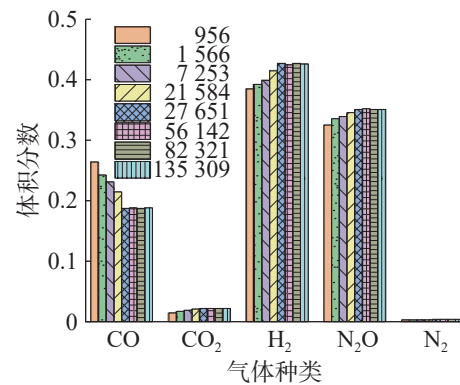
表3 化学反应与反应速率方程<sup>[21-23]</sup>

Tab. 3 Chemical reactions and reaction rate equations<sup>[21-23]</sup>

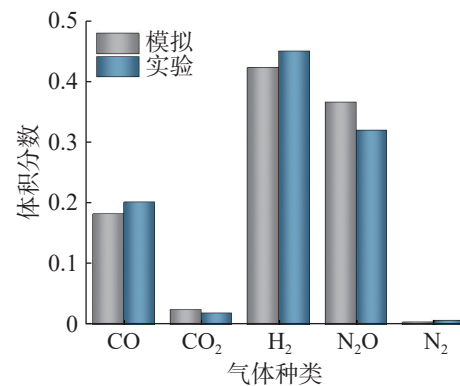
化学反应	编号	反应速率表达式
$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}$	(1)	$K_1 = 29.17 \exp(-66\,989/(RT))$
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2 \rightarrow 3\text{FeO} + \text{H}_2\text{O}$	(2)	$K_2 = 15.56 \exp(-75\,362.4/(RT))$
$\text{FeO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$	(3)	$K_3 = 2\,858.34 \exp(-117\,230/(RT))$
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O}$	(4)	$K_4 = 19.5 \exp(-62\,700/RT)$
$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$	(5)	$K_5 = 2\,700 \exp(-113\,859/(RT))$
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} \rightarrow 3\text{FeO} + \text{CO}_2$	(6)	$K_6 = 25 \exp(-73\,674/(RT))$
$\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$	(7)	$K_7 = 17 \exp(-69\,488/(RT))$
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$	(8)	$K_8 = 27.9 \exp(-62\,700/(RT))$

## 1.3 模拟的数据验证

为确保模拟结果的准确性,对模型进行网格分析。通过逐渐增加网格数并观察反应器出口气体含量变化来确定合适的网格分辨率,不同网格数下反应器出口气体含量的模拟结果如图3(a)。图3(a)表明:网格数分别为27 651, 56 142, 82 321, 135 309个时反应器出口处CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>等气体含量基本相同。为减轻计算消耗和提高效率,选取网格数为27 651进行模拟计算。网格数为27 651个时,反应器出口处气体含量的模拟与实验结果如图3(b)。图3(b)表明:模拟与实验得到的出口处气体含量基本一致,即模拟的数据可靠。



(a) 不同网格下出口处气体含量



(b) 相同网格条件下出口处气体含量

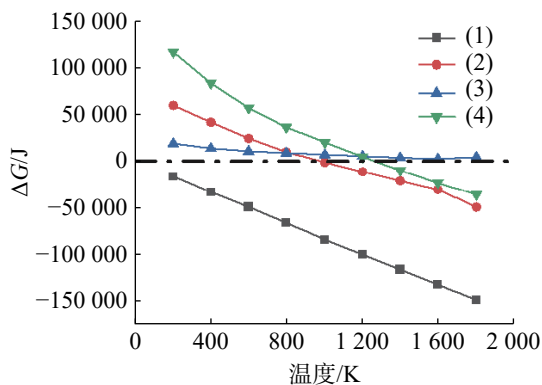
图3 模拟数据的结果验证

Fig. 3 Validation of the simulation data results

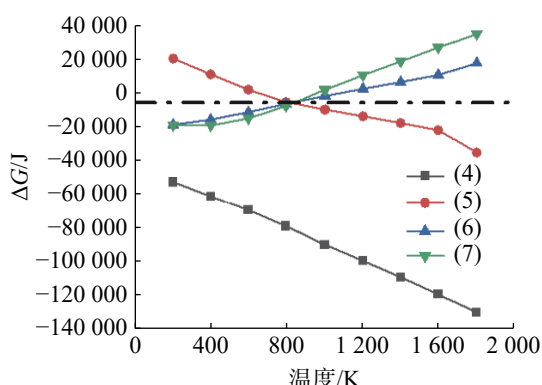
## 2 模拟结果分析

通过 Factsage 热力学软件计算铁矿粉在压力为0.2 MPa、不同还原气氛与温度下铁矿粉被H<sub>2</sub>和CO还原的吉布斯自由能,由此判断反应进行的难易程度。研究<sup>[24]</sup>发现以H<sub>2</sub>作为还原剂,铁矿粉在流态化还原过程中发生表3所示的反应(1)~(3),低于843 K发生反应(4);以CO作为还原剂,铁矿粉发生表3所示的反应(5)~(7),低于843 K发生反应(8)。

具体反应的吉布斯自由能如图4。



(a) 纯CO条件



(b) 纯H<sub>2</sub>条件

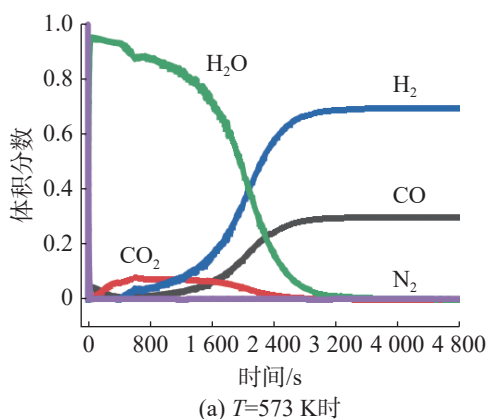
图4 不同还原气氛下铁矿粉反应的吉布斯自由能

Fig. 4 Gibbs free energy of iron ore powder reaction in different reducing atmospheres

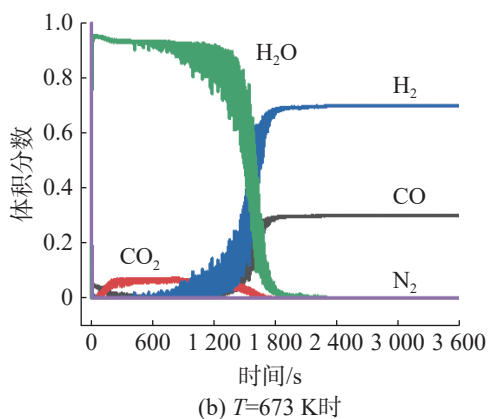
从图4可看出:在纯H<sub>2</sub>条件下,反应(1)最易发生,反应(4)不易发生,反应(2)在973 K左右发生;在纯CO条件下,反应(5)最易发生,而反应(8)在高温下不易反应,反应(6)在800 K左右发生。说明模拟温度范围在573~1 173 K之间可覆盖所有反应的关键温度区间。因此,设置模拟温度范围在573~1 173 K之间。

### 2.1 温度对铁矿粉还原效率的影响

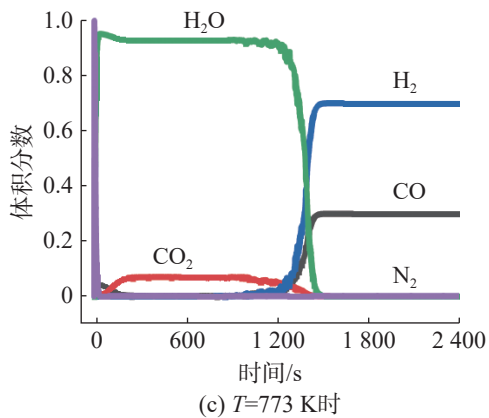
气体线速度为0.6 m/s、压力为0.2 MPa,铁矿粉粒径为[0.150,0.180) mm,还原温度为573, 673, 773, 873, 973, 1 173 K的条件下,通入体积分数为70%的H<sub>2</sub>和30%的CO对反应器中的铁矿粉颗粒进行流化还原,模拟温度对铁矿粉还原效率的影响。不同温度下铁矿粉还原后气体出口含量如图5,金属化率如图6。由图5,6可看出:温度为573~973 K时,随温度的升高,反应达到平衡的时间逐渐缩短,金属化率不断升高;温度达973 K时继续升高温度对反应平衡时间和金属化率的影响并不明显。综上认为973 K为最佳还原温度。



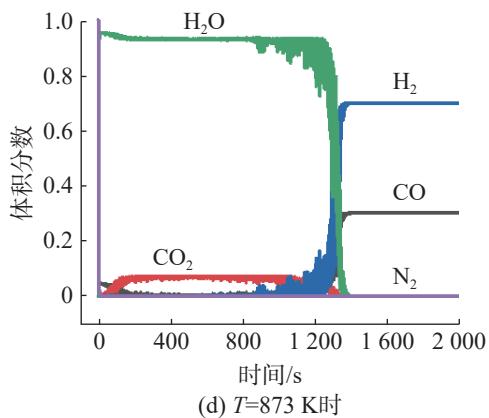
(a) T=573 K时



(b) T=673 K时



(c) T=773 K时



(d) T=873 K时

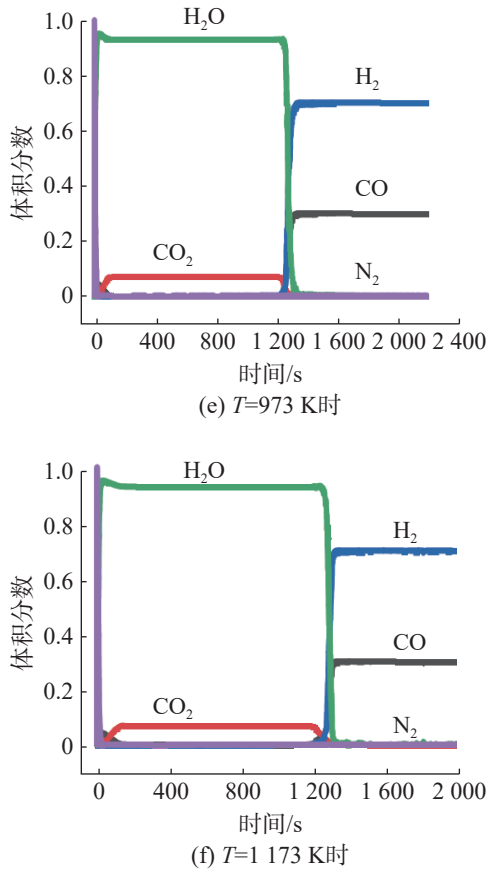


图5 不同温度时的出口气体含量曲线

Fig. 5 Outlet gas content curves at different temperatures

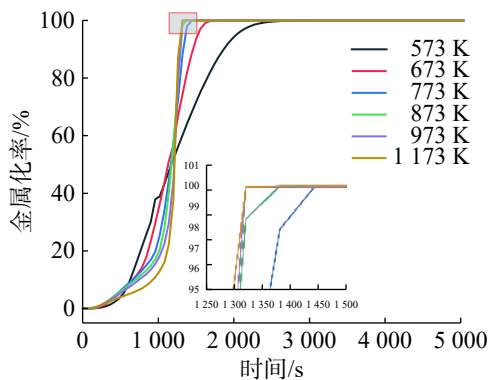


图6 不同温度时的金属化率曲线

Fig. 6 Metallization rate curves at different temperatures

为进一步探究温度对铁矿粉还原效果的影响,设置流化床床层 0.075 m 处为瞬态点,测量不同温度下此点颗粒的纵向速度变化,结果如图 7。由图 7 可看出:在 573~1173 K 范围,同一温度下随时间的延长,颗粒纵向速度先升后降,相对于 973, 1173 K,温度为 573, 773 K 时颗粒纵向速度随时间延长,先升高后趋于稳定;还原过程中,973 K 时颗粒运动纵向速度最大,1173 K 时颗粒运动速度明显减弱。主要原因为还原性气体进入流化床内部时,颗粒气体的曳力大于重力,颗粒被气体夹带向上运

动,致使颗粒的速度不断增加;同时随还原性气体的通入,铁矿粉中的氧被 CO 和  $H_2$  还原,颗粒的质量不断下降但所受的曳力不变,致使颗粒的纵向速度不断增加。随还原时间的延长,还原生成的铁相互黏结产生团聚导致颗粒粒径和质量增大,颗粒的纵向速度开始减小;当温度较低时,由于还原率较低,此时不易产生黏结,纵向速度变化不明显,但金属率较低、还原效果较差。

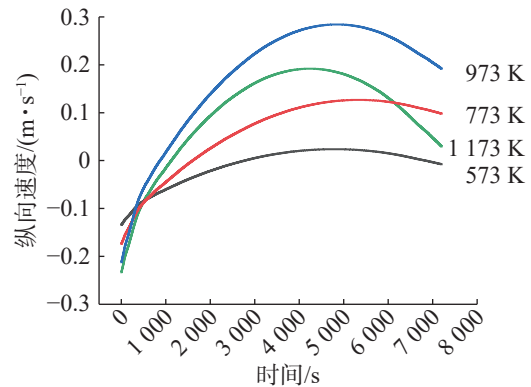
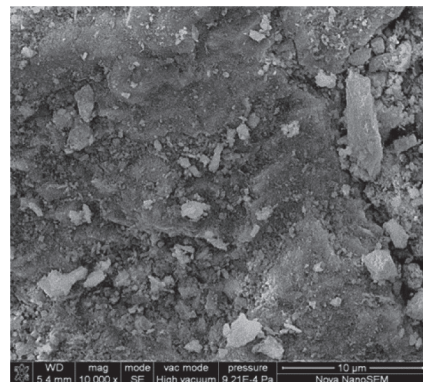
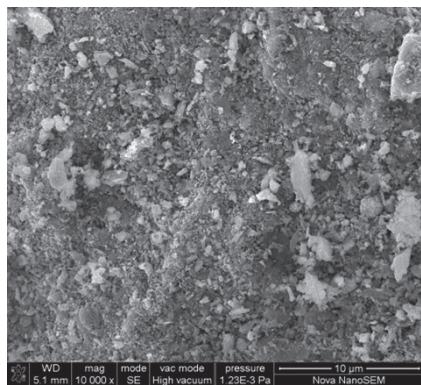


图7 不同温度下颗粒的纵向速度分布

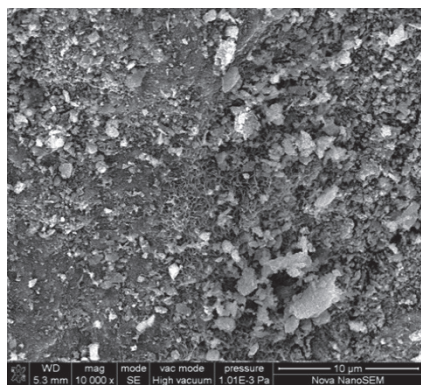
Fig. 7 Longitudinal velocity distribution of particles at different temperatures

为探究铁矿粉颗粒运动机理,采用与模拟对应的条件对铁矿粉进行流态化还原实验,通过扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观测铁矿粉在不同温度下还原后的微观形貌,如图 8。由图 8 可见:温度为 573, 773 K 时,颗粒表面未有明显变化;温度为 973 K 时,铁矿粉主体和黏附的各种细小颗粒相互熔融并勾连,表面部分位置有明显的铁晶须交错勾连;温度为 1173 K 时,颗粒呈现各种雪花状的复杂络合物相互交融,颗粒聚团和黏结现象明显,这是由于铁原子在高温下生长扩散形成,即当温度为 1173 K 时铁矿粉相互黏结形成团聚,导致铁矿粉在流化床内的流化性能差。

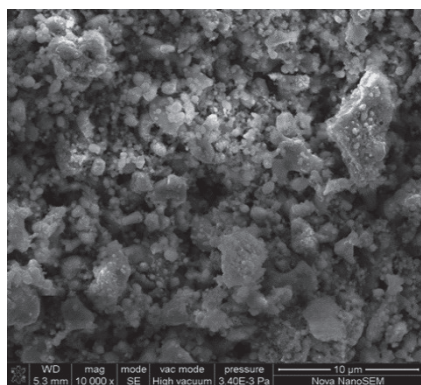
(a)  $T=573$  K时



(b)  $T=773\text{ K}$ 时



(c)  $T=973\text{ K}$ 时



(d)  $T=1\ 173\text{ K}$ 时

图 8 不同温度下铁矿粉还原后的微观形貌

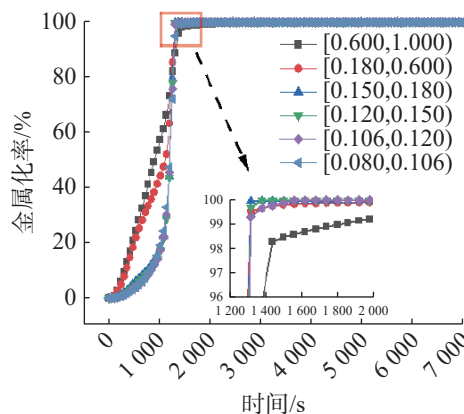
Fig. 8 Microscopic morphology of iron ore powder after reduction at different temperatures

综上所述进一步表明, 流态化还原铁矿粉的最佳温度为 973 K, 该温度下铁矿粉的金属化率较高, 反应达到平衡的时间较短, 颗粒纵向平均速度最高。

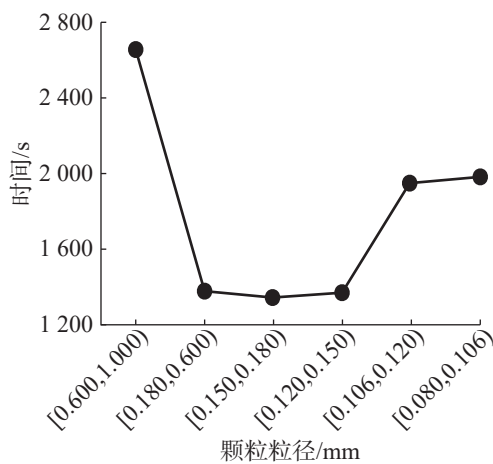
### 2.2 粒径对铁矿粉还原效率的影响

气体线速度为 0.6 m/s、压力为 0.2 MPa、温度为 973 K 时, 通入体积分数为 70% 的  $\text{H}_2$  和体积分数为 30% 的  $\text{CO}$  对反应器中不同粒径的铁矿粉进行流态化还原, 结果如图 9。由图 9 可看出: 铁矿粉粒径在 [0.080,1.000) mm 的范围, 随粒径的减小, 铁矿粉金属化率先增后减, 粒径达 [0.150,0.180) mm 时金属化率最先达最大, 超过该粒径范围铁矿粉金属化率

开始下降; 铁矿粉粒径在 [0.080,1.000) mm 的范围, 随粒径的减小, 铁矿粉还原达到平衡状态所用的时间先减后增, 粒径在 [0.150,0.180) mm 范围内, 铁矿粉达到反应平衡的时间最短。这是因为铁矿粉颗粒粒径越小, 颗粒的比表面积越大, 越有利于分子的吸附和扩散, 颗粒间的传质和气体的扩散越易发生; 颗粒粒径过小, 流化床内相同质量的铁矿粉密度大, 颗粒更易聚集和堆积, 颗粒间的空隙率减小, 导致气体从床层通过的气体量减少, 颗粒的流化性能减弱, 进而减小金属化率并延长反应达到平衡的时间。即粒径为 [0.150,0.180) mm 为该条件下的最佳粒径范围。



(a) 金属化率



(b) 反应平衡时间

图 9 不同粒径下铁矿粉的金属化率和反应平衡时间

Fig. 9 Metallization rate and reaction equilibrium time of iron ore powder at different particle sizes

### 2.3 还原气氛对铁矿粉还原效率的影响

气体线速度为 0.6 m/s、压力为 0.2 MPa、温度为 973 K、粒径为 [0.150,0.180) mm 时, 不同还原气氛 ( $\text{H}_2+\text{CO}$ ) 下反应器中铁矿粉颗粒还原的结果如图 10(a)。由图 10(a) 可看出: 随  $\text{H}_2$  含量的增加, 铁矿粉的金属化率不断升高, 当  $\text{H}_2$  体积分数达 100% 时金属化率最大, 即增加  $\text{H}_2$  可提高铁矿粉的还原效率。然而, 纯  $\text{H}_2$  还原气氛下铁矿粉会出现堆积和流

化困难等<sup>[24]</sup>。为探究CO对铁矿粉流化性能的影响,以铁矿粉颗粒在流化床纵向高度的堆积体积为评价指标,模拟分析不同还原气氛下铁矿粉颗粒在流化床纵向高度的堆积体积,结果如图10(b)。图10(b)可看出:流化床内管0.2 m处,随CO含量的增加,同一纵向高度下颗粒的堆积体积不断减小,CO体积分数小于30%时,颗粒堆积体积较高,为 $8 \times 10^{-10} \text{ m}^3$ 左右;CO体积分数为30%时,金属化率较高,颗粒堆积体积较低;CO体积分数大于30%时颗粒堆积体积明显减小;CO体积分数为100%时颗粒堆积体积最小,说明增加CO含量有利于促进铁矿粉的流化,促使铁矿粉均匀分布在流化床中。 $\text{H}_2$ 还原铁矿粉时, $\text{H}_2$ 与氧化铁反应生成的水蒸气( $\text{H}_2\text{O}$ )在高温下易扩散到颗粒表面形成水膜,从而促使颗粒接触黏结;在CO还原气氛下,水蒸气的含量较低,颗粒不易黏结。综上70% $\text{H}_2$ 和30%CO为最佳还原气氛。

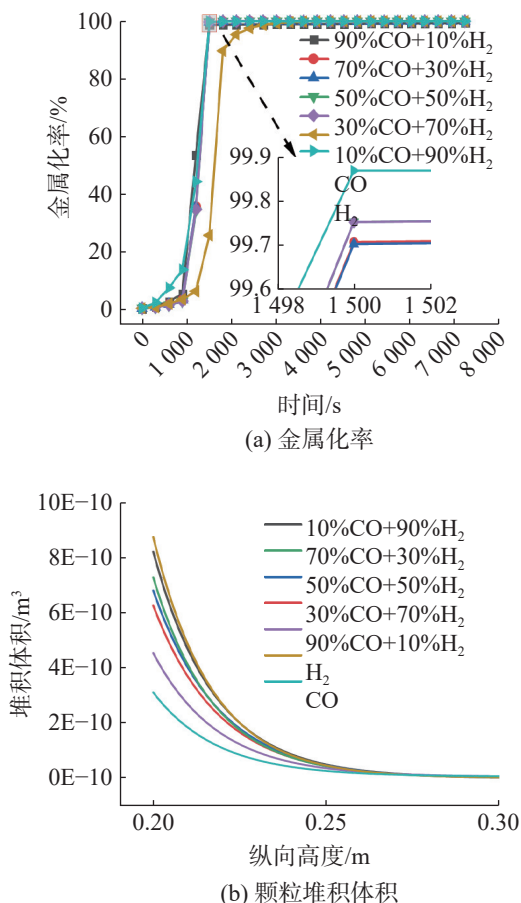


图10 不同还原气氛下铁矿粉的金属化率和颗粒体积

Fig. 10 Metallization rate and particle volume of iron ore powder for different reducing atmospheres

### 3 结论

以金属化率和反应平衡时间为评价指标,采用

CPFD方法模拟分析压力为0.2 MPa、气体线速度为0.6 m/s的条件下还原温度、矿粉粒径、还原气氛等工艺因素对铁矿粉流态化还原的影响,探讨铁矿粉还原的最佳方案和黏结机理,所得主要结论如下:

1) 还原温度在573~1173 K范围,随温度的增加,铁矿粉的金属化率增加、反应平衡时间缩短,但温度过高铁晶须相互勾连形成团聚,颗粒纵向速度降低,铁矿粉流化性能变差。

2) 铁矿粉粒径在[0.080,1.000) mm范围,随粒径减小,比表面积增大,铁矿粉的金属化率升高、反应平衡时间缩短,但铁矿粉粒径过小,颗粒易堆积聚集,降低铁矿粉流化性能。

3) 在还原气氛为( $\text{H}_2+\text{CO}$ )的条件下,纯 $\text{H}_2$ 的还原效率优于CO,但增加CO含量可减少水蒸气的生成,有利于提高铁矿粉的流化性能。

4) 在压力为0.2 MPa、气体线速度为0.6 m/s的条件下,铁矿粉流态化还原的最佳工艺参数为还原温度973 K、铁矿粉粒径[0.150,0.180) mm、还原气氛70% $\text{H}_2+30\%$ CO。

#### 参考文献:

- [1] 赵岫. 气体技术在钢铁企业生产中的应用[J]. 山西冶金, 2023(10):94-96.
- [2] DUARTE P E, BECERRA J, LIZCANO C, et al. Energiron direct reduction technology-economical, flexible, environmentally friendly[J]. Acero Latino Americano, 2008, 6:52-58.
- [3] 谷张涵, 柴先义, 李新, 等. 常压下工艺因素对巴西铁矿粉流态化还原的影响[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2021, 38(1):1-10.
- [4] 徐其言, 李志平, 谷张涵, 等. 巴西铁矿粉流态化还原条件优化研究[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(3):99-104.
- [5] 朱国民, 丁敬, 黄金玉, 等. 基于交互正交试验的铁矿粉流态化还原影响因素研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(6):119-122,127.
- [6] KINACI M E, LICHTENEGGER T, SCHNEIDERBAUER S. A CFD-DEM model for the simulation of direct reduction of iron ore in fluidized beds[J]. Chemical Engineering Science, 2020, 227:115858.
- [7] SNIDER D M, CLARK S M, O'ROURKE P J. Eulerian-Lagrangian method for three-dimensional thermal reacting flow with application to coal gasifiers[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(6):1285-1295.
- [8] BIDWE A R, DUELLI (VARARELA) G, DIETER H, et al. Experimental study of the effect of friction phenomena on actual and calculated inventory in a small-scale CFB

- riser[J]. *Particuology*, 2015, 21:41–47.
- [9] REHLING B, HOFBAUER H, RAUCH R, et al. Biosng-process simulation and comparison with first results from a 1 MW demonstration plant[J]. *Biomass Conv Bioref*, 2011(1):111–119.
- [10] BARATA J. Modelling of biofuel droplets dispersion and evaporation[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33:769–779.
- [11] SHAO Y, GU J, ZHONG W, et al. Determination of minimum fluidization velocity in a fluidized bed at elevated pressures and temperatures using CFD simulations[J]. *Powder Technology*, 2019, 350:81–90.
- [12] SUNG W C, KIM J Y, CHUNG S W, et al. Effect of particle size distribution on hydrodynamics of pneumatic conveying system based on CPFD simulation[J]. *Advanced Powder Technology*, 2021, 32(7):2336–2344.
- [13] KONG D, ZHOU M, WANG S, et al. Eulerian–Lagrangian simulation of chemical looping combustion with wide particle size distributions[J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, 245:116849.
- [14] YANG S, DONG R, DU Y, et al. Numerical study of the biomass pyrolysis process in a spouted bed reactor through computational fluid dynamics[J]. *Energy*, 2021, 214: 118839.
- [15] KONG D, WANG S, YU J, et al. Investigation of non-uniform characteristics in a 300 MW circulating fluidized bed with different coal feeding modes[J]. *Advanced Powder Technology*, 2023, 34(7):104036.
- [16] MCINTYRE C J, HUGHES R W, MACCHI A, et al. Computational modeling of high pressure bubbling fluidized bed hydrodynamics using ilmenite particles[J]. *Powder Technology*, 2022, 402:117332.
- [17] TANG Z, GAO P, SUN Y, et al. Studies on the fluidization performance of a novel fluidized bed reactor for iron ore suspension roasting[J]. *Powder Technology*, 2020, 360:649–657.
- [18] WAN Z, HUANG J, ZHU G, et al. Numerical simulation of the operating conditions for the reduction of iron ore powder in a fluidized bed based on the CPFD method[J]. *Processes*, 2022, 10(9):1870.
- [19] ZHANG B, GONG X, WANG Z, et al. Relation between sticking and metallic iron precipitation on the surface of  $Fe_2O_3$  particles reduced by CO in the fluidized bed[J]. *ISIJ International*, 2011, 51(9):1403–1409.
- [20] PARKER J M. CFD model for the simulation of chemical looping combustion[J]. *Powder Technology*, 2014, 265:47–53.
- [21] KU X, LI T, LOVAS T. Influence of drag force correlations on periodic fluidization behavior in Eulerian–Lagrangian simulation of a bubbling fluidized bed[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 95:94–106.
- [22] DU Z, GE Y, LIU F. Effect of different modification methods on fluidized bed hydrogen reduction of cohesive iron ore fines[J]. *Powder Technology*, 2022, 400:117226.
- [23] KEE R J, COLTRIN M E, GLARBORG P. *Chemically Reacting Flow: Theory, Modeling, and Simulation*[M]. Hoboken, New Jersey, USA:John Wiley & Sons, 2017.
- [24] 徐其言. 高压和添加塑料颗粒抑制铁矿粉流态化黏结/失流机理研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学, 2018.

责任编辑:何莉