

钢铁冶金与材料

巴西铁矿粉流态化还原条件优化研究

徐其言 李志平 谷张涵 殷志宏

(安徽工业大学冶金材料学院,安徽 马鞍山 243002)

摘 要: 采用加压可视流化床装置,对巴西铁矿粉流态化还原行为进行研究,发现适当地增加压力可以提高金属化率,添加碳粉可以改善流化状态。为进一步优化还原时间、还原压力、还原气体线速度、还原温度、碳粉含量和碳粉粒径等因素对巴西铁矿粉还原的影响,采用六因素三水平正交试验方法,对还原后巴西铁矿粉样品进行金属化率和粘结比检测,发现不同还原条件对巴西铁矿粉的影响规律。研究发现纯氢气流态化还原巴西铁矿粉的最佳条件为:还原温度为 923~1 023 K,还原气体线速度 0.6 m/s,还原时间 30~50 min,还原压力 0.25 MPa,碳粉质量分数 2%~6% (占矿粉质量),碳粉粒径 4~7 μm 。

关键词: 巴西铁矿粉;流态化还原;压力;正交试验

中图分类号: TF55 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2020)03-0099-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.03.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on the Optimization of Fluidization Reduction Conditions of Brazilian Iron Ore Powder

Xu Qiyang, Li Zhiping, Gu Zhanghan, Yin Zhihong

(School of Metallurgy, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, Anhui, China)

Abstract: The reduction behavior of Brazilian iron ore powder was studied in a pressurized visible fluidized bed. It was found out that the metallization rate was increased by increasing the pressure properly and the fluidization state improved by adding carbon powder. In order to further optimize the effects of reduction time, reduction pressure, linear velocity of reduction gas, reduction temperature, carbon content and particle size on the reduction of Brazilian mineral powder, six factors and three levels orthogonal experiment method were used to test the bond ratio and metallization rate of Brazilian mineral powder samples after reduction. Experiments results indicated that different reduction conditions had different effects on the reduction of Brazilian mineral powder. Optimum reduction temperature of Brazilian ore powder by pure hydrogen was 923~1 023 K, the linear velocity of reduction gas was 0.6 m/s, the reduction time was 30~50 min, the reduction pressure was 0.25 MPa, the content of carbon powder was 2%~6% (accounting for the quality of ore powder) and the particle size of carbon powder was 4~7 μm .

Key words: Brazilian mineral powder, fluidized reduction, pressure, orthogonal experiment

0 引言

高炉炼铁目前依然占据着钢铁冶炼的主体地位,

但它对冶金焦的强烈依赖以及烧结、造球污染物排放制约了其发展^[1-3]。为改变炼铁依赖冶金焦的现状,广大的冶金工作者通过长时间的研究,逐渐探索出不

收稿日期: 2019-11-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(No.51704003);国家自然科学基金面上项目(No.51974001);安徽省高校优秀青年人才项目(No.gxyq2019016)。

作者简介: 徐其言(1982—)男,江苏睢宁人,博士,主要研究方向为直接还原与熔融还原。E-mail: qiyang.xu@ahut.edu.cn。

同类型的非高炉炼铁方法^[4]。不同的非高炉还原工艺优缺点也比较明显。流态化直接还原工艺具有气固相接触面积大、温度、浓度均匀、传热传质条件好、运行效率高等优点。但是,铁矿粉在高温流态化还原过程中容易出现粘结/失流,降低还原效率,阻碍流程连续化操作,这些问题严重制约了流态化炼铁的工业化应用^[5-8]。有学者研究认为还原矿粉表面铁晶须的析出、相互勾连和还原生成的高活性金属铁是导致铁矿粉粘结的主要原因^[9-11]。为了改善流化效果,国内外学者主要采用了如下抑制粘结技术:降低还原温度、提高气流速度、铁矿粉中添加惰性成分、矿粉颗粒析碳和加压流化床设备的改进等^[12]。适当地降低还原温度可以明显抑制铁矿粉粘结,但降低温度的同时会降低还原反应的速度,进而降低流化床的还原气体利用率和增加还原时间,提高工作压力可以弥补温度降低造成的还原反应速率的降低,工业化应用的高压操作意味着建设和生产成本的提高。多因素变化制约着一个结果的变化,那么为了弄清楚各因素对试验结果的重要性,必须通过做试验验证,正交试验法就是一种能够大幅度减少试验次数而且并不会降低试验可信度的方法。笔者选取了影响矿粉粘结的六个因素,设计了六因素三水平的正交试验,分析各因素影响矿粉粘结的主次关系,确定最优条件,为流态化还原的工业化应用提供指导。

1 试验材料及设备

1.1 试验材料

试验以粒径为 0.15~0.18 mm 的巴西铁矿粉为原料,其主要化学成分见表 1。由表 1 可以看出,该矿的铁含量和二氧化硅含量较高,并有少量的钙、镁、锰、铝等成分存在。试验选取碳粉为包覆剂,其成分见表 2,粒径水平分为 4~7、48~75、150~180 μm 三个范围进行试验。

1.2 试验设备

试验选用的是加压可视流化床,其结构如图 1 所示。反应器由两层不锈钢管组成,里层管为流化床区域,下半部用气体分布板载铁矿粉颗粒,还原性气体从两层钢管夹层流入并对其进行预热,然后流入里层管内。通过多组流量计分别调控 H_2 和 N_2 流量,使流入流化床内部的气体达到试验要求的含量组成和线速度,通过内管对铁矿粉进行还原,流化床进气端的线速度通过调节气体质量流量控制器进行控制,通过

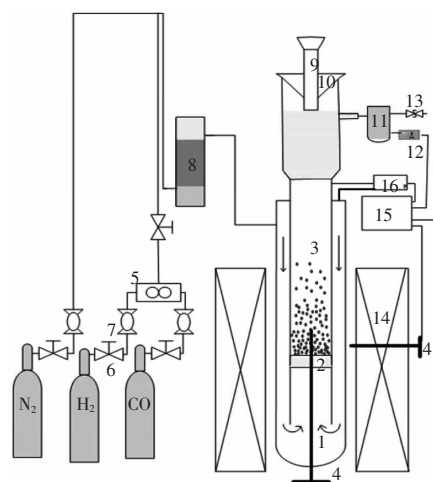
热电偶可测得流化床内的还原温度,在试验开始前铁矿粉在流化床中预热及结束后的冷却,都需要通入高纯氮气进行排气和保护,通过压力计测量床层压差 ΔP 和通过观察窗来判断流态化还原粘结失流状况。

表 1 巴西矿粉的主要化学成分
Table 1 Main chemical compositions of Brazilian mineral powder %

TFe	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	P	MnO	Al ₂ O ₃
52.31	0.88	0.16	<0.05	22.15	0.043	0.195	0.88

表 2 碳粉的化学成分
Table 2 Chemical compositions of coke powder %

固定碳	灰分	挥发分	硫含量	磷含量	水分
>82	<15	<3	<0.8	<0.015	<5



1-气体混合和预热室; 2-气体分布板; 3-流化床; 4-K 型热电偶; 5-气体流量阀; 6-旋转螺旋阀; 7-气体质量流量计; 8-气体干燥器; 9-加料口; 10-封圈; 11-重力除尘; 12-气体分析仪; 13-扩散气体出口; 14-加热炉; 15-计算机; 16-减压阀

图 1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

2 预试验分析

在还原温度 1 023 K, 气体线速度 0.6 m/s, 矿粉粒径 0.15~0.18 mm, 还原时间 50 min 的条件下, 每次试验称取矿粉的量为 20 g, 加入管内。分别在常压和高压条件下, 采取铁矿粉添加碳粉和不添加碳粉, 进行对照试验, 试验条件及试验结果如表 3 所示。

试验开始前, 首先向流化床内通入恒定流量的 N_2 , 排出内部空气, 关闭出气阀将设备通氮气下降至 500~600 kPa, 检查装置气密性。同时开始升温。

当还原温度达到设计温度时,停止升温并保温一段时间。然后关闭 N_2 切换 H_2 试验开始。可通过床身上部的观察孔、出气口与进气口的压差观察炉内物料的流化状态。当压差始终保持较低值,说明床内流化效果较好,未发生粘结失流,则达到设定还原时间后即可停止试验,并冷却。待炉温降到室温后,取出管内的还原产物,密封保存。

冷却结束后,取出流化床内粘结与未粘结的矿粉,并计算出粘结比。粘结比为还原后矿粉粘结质量与还原后矿粉总质量的比值。粘结比越小,则流化状态越好。采用重铬酸钾容量法和氯化铁滴定法对还原后试样进行化验分析,得到金属铁(MFe)和全铁(TFe),并计算出金属化率 $\eta(\eta = MFe/TFe)$ 。因此选取金属化率和粘结比作为判断流态化还原效果的考察指标。

表 3 预试验方案及结果
Table 3 Pre experiment schemes and results

方案	还原压力/MPa	碳粉粒径/ μm	碳粉质量分数/%	金属化率/%	粘结比/%
1	0.4	0	0	85.00	18.35
2	0.4	48~75	4	81.13	9.43
3	0.1	0	0	82.56	19.21
4	0.1	48~75	4	78.63	10.30

在温度 1 023 K、线速度 0.6 m/s 条件下进行添加和未添加碳粉对照试验研究,方案 1 和方案 2 相比,还原压力在 0.4 MPa 条件下,添加质量分数 4%、粒径范围 48~75 μm 的碳粉,粘结比降低了 8.92 个百分点,流化效果有所改善,金属化率降低了 3.87 个百分点;方案 3 和方案 4 相比,在常压下,添加质量分数 4%、粒径范围 48~75 μm 的碳粉,粘结比降低 8.91 个百分点,流化效果改善,金属化率降低了 3.93 个百分点。综上所述,分别在常压和高压条件下,铁矿粉添加一定粒径和配比的碳粉可以明显降低粘结比,改善流化效果。

在温度 1 023 K、线速度 0.6 m/s 条件下进行高压和常压对照试验研究,方案 1 方案和方案 3 相比,不添加碳粉,还原压力由 0.4 MPa 降到 0.1 MPa,粘结比升高 0.86 个百分点,金属化率降低了 2.44 个百分点;方案 2

和方案 4 相比,添加质量分数 4%、粒径范围 48~75 μm 的碳粉,还原压力由 0.4 MPa 降低到 0.1 MPa,金属化率降低了 2.5 个百分点,粘结比提高 0.87 个百分点。综上所述,分别在添加碳粉和未添加碳粉条件下,适当增大还原压力有助于提高金属化率。

3 正交试验及结果分析

根据预试验的结果,适当提高还原压力,并在铁矿粉中添加一定粒径和配比的碳粉有助于提高金属化率,改善流化效果。

综合考虑到影响巴西铁矿粉颗粒粘结的六个因素:还原温度、还原气体线速度、还原时间、还原压力、碳粉粒径大小和碳粉质量分数,依次用 A、B、C、D、E、F 表示,每个因素下取三个水平(见表 4),正交试验方案及结果见表 5。

表 4 各因素及水平
Table 4 Level of each factor

还原温度/K			气体线速度/($m \cdot s^{-1}$)			还原时间/min			还原压力/MPa			碳粉粒径/ μm			碳粉质量分数/%		
A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	C ₃	D ₁	D ₂	D ₃	E ₁	E ₂	E ₃	F ₁	F ₂	F ₃
923	1 023	1 123	0.4	0.6	0.8	30	50	70	0.1	0.25	0.4	4~7	48~75	150~180	2	4	6

每次试验称取 20 g 左右铁矿粉和一定粒度、配比的碳粉进行搅匀,试验前先把流化床预热到 873 K,按照气体线速度 0.3~0.5 m/s 通入 N_2 还原 10 min,排除床内空气,然后将流化床温度设定至还原温度,通入纯 H_2 的混合气对铁矿粉进行还原,还原时间按照设定安排。还原结束后,用上述滴定法测出金属化率和粘结比。可以通过压差表判断流化床内铁矿粉流

化状况。为了减小试验误差,测两次取均值。

表 6、7 是对正交试验数据分析结果,比较六个因素的极差。对于金属化率而言,选取的最佳工艺参数为 $A_2B_2C_3D_2F_1E_1$,即还原温度 1 023 K、气体线速度 0.6 m/s、还原时间 70 min、还原压力 0.25 MPa、添加碳粉质量分数 2%、添加碳粉粒径 4~7 mm,影响金属化率的主要因素为温度;对于粘结比而言,选取的最佳

工艺参数水平为 $F_3A_1E_1B_2D_2C_1$, 即添加碳粉质量分数 6%、还原温度 973 K、添加碳粉粒径 $4\sim 7\ \mu\text{m}$ 、气体

线速度 0.6 m/s、还原压力 0.25 MPa、还原时间 30 min 影响粘结比的主要因素为添加的碳粉量。

表 5 正交试验方案及结果

Table 5 Orthogonal test scheme and results

序号	还原温度/ K	气体线速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	还原时间/ min	还原压力/ MPa	碳粉粒径/ μm	碳粉质量 分数/%	金属化率/ %	粘结比/ %
1	A_1	B_1	C_1	D_1	E_1	F_1	65.13	13.48
2	A_1	B_1	C_1	D_1	E_2	F_2	59.72	10.70
3	A_1	B_1	C_1	D_1	E_3	F_3	57.96	6.54
4	A_1	B_2	C_2	D_2	E_1	F_1	70.42	7.86
5	A_1	B_2	C_2	D_2	E_2	F_2	72.88	8.78
6	A_1	B_2	C_2	D_2	E_3	F_3	76.94	11.78
7	A_1	B_3	C_3	D_3	E_1	F_1	67.69	15.65
8	A_1	B_3	C_3	D_3	E_2	F_2	65.11	10.90
9	A_1	B_3	C_3	D_3	E_3	F_3	69.47	11.47
10	A_2	B_1	C_2	D_3	E_1	F_2	83.96	8.03
11	A_2	B_1	C_2	D_3	E_2	F_3	75.78	6.41
12	A_2	B_1	C_2	D_3	E_3	F_1	81.06	22.32
13	A_2	B_2	C_3	D_1	E_1	F_2	84.35	12.06
14	A_2	B_2	C_3	D_1	E_2	F_3	88.54	10.70
15	A_2	B_2	C_3	D_1	E_3	F_1	84.19	11.26
16	A_2	B_3	C_1	D_2	E_1	F_2	79.56	7.03
17	A_2	B_3	C_1	D_2	E_2	F_3	82.09	11.08
18	A_2	B_3	C_1	D_2	E_3	F_1	87.61	17.57
19	A_3	B_1	C_3	D_2	E_1	F_3	84.72	13.38
20	A_3	B_1	C_3	D_2	E_2	F_1	83.75	18.83
21	A_3	B_1	C_3	D_2	E_3	F_2	84.46	16.14
22	A_3	B_2	C_1	D_3	E_1	F_3	82.68	13.45
23	A_3	B_2	C_1	D_3	E_2	F_1	81.38	15.33
24	A_3	B_2	C_1	D_3	E_3	F_2	79.58	20.49
25	A_3	B_3	C_2	D_1	E_1	F_3	84.08	5.13
26	A_3	B_3	C_2	D_1	E_2	F_1	85.74	29.72
27	A_3	B_3	C_2	D_1	E_3	F_2	80.41	18.44

表 6 金属化率分析结果

Table 6 Analysis results of metallization rate

指标	A	B	C	D	E	F
K_1	605.32	676.54	675.71	690.12	702.59	706.97
K_2	747.14	720.96	711.27	722.43	694.99	690.03
K_3	746.80	701.76	712.28	686.71	701.68	702.26
k_1	67.26	75.17	75.08	76.68	78.07	78.55
k_2	83.02	80.11	79.03	80.27	77.22	76.67
k_3	82.98	77.97	79.14	76.30	77.96	78.03
R	15.72	4.94	3.95	3.59	0.84	1.88
主次	ABCD FE					
优化方案	$A_2B_2C_3D_2F_1E_1$					

注: K_i 表示任一列上水平号为 i 时所对应的试验结果之和; $k_i = K_i/s$ 其中 s 为任一列上水平出现的次数, 本表中 $s=9$; 极差 R 表示影响巴西矿粉还原的主次, 为各因素水平 k 的最大值减去最小值, $R = k_{\max} - k_{\min}$, R 值越大, 表示该因素对巴西矿的还原效果越明显。下同。

上述最优方案是在给定的因素和水平条件下得到的。如果给定的水平不受限制, 有可能获得更好的试验方案。为得到更加准确参数, 适当调整选定

的因素和水平范围, 以找到新的更好的方案。以因素水平为横坐标, 试验指标平均值 k_i 为纵坐标, 绘制了因素与指标的关系, 见图 2。

通过综合平衡法可以得到综合的优化方案。具体平衡过程如下:

因素 A(还原温度): 在混合物料加入后的还原过程中, 金属化率随还原反应进行逐渐增加, 当还原温度达到一定程度后, 金属化率达到最大值, 随着还原温度的升高, 金属化率略有减小趋势。因此, 对于金属化率而言, 选取水平 2。低温还原时, 粘结比维持在很低的水平, 流化效果好, 随着温度的增大, 粘结比逐渐增大, 流化效果逐渐恶化, 对于粘结比而言, 还原温度选取较低水平 1。综合考虑温度选取介于水平 1 和水平 2 之间, 即温度选取范围为 923~1 023 K。

因素 B(线速度): 提高气体线速度对预防粘结失流的发生, 生产更高金属化率的铁矿粉具有促进作用。但是, 在柱形流化床内, 还原性气体流速存在

上限。当流化床中的气体流速超过临界流化速度时,床层内出现大量气泡,气泡不断上升,待到达床层表面时,会发生破裂逸出床面。在此过程中,会有大量未被还原的细颗粒因为杨析作用被吹出流化床外,造成大量的夹带损失。根据图 2 试验结果可知,对于金属化率和粘结比,选取水平 2,即还原气体线速度为 0.6 m/s。

因素 C(还原时间):由图 2 可知,随着还原时间的增加,金属化率先快速增加,还原 50 min 后趋于平缓,表明反应进行到 50 min 时已经基本平衡,所以对于金属化率而言,选取水平 2;即还原时间为 50 min。由于添加碳粉抑制了铁矿粉粘结,导致铁矿粉在还原过程中长时间保持流化状态,由

图 2 可知,粘结比随时间的增加而缓慢增加,对于粘结比,选取水平 1;即还原 30 min。综合考虑,还原时间选取 30~50 min。

表 7 粘结比分析结果
Table 7 Analysis results of bond ratio

指标	A	B	C	D	E	F
K1	97.16	115.67	115.67	118.03	96.07	152.02
K ₂	106.46	111.71	118.47	112.45	122.45	112.57
K ₃	150.91	126.99	120.39	124.05	136.01	89.94
k ₁	10.80	12.85	12.85	13.11	10.67	16.89
k ₂	11.83	12.41	13.16	12.49	13.61	12.51
k ₃	16.77	14.11	13.38	13.78	15.11	9.99
R	5.97	1.70	0.52	1.29	4.44	6.90
主次	FAEBDC					
优化方案	F ₃ A ₁ E ₁ B ₂ D ₂ C ₁					

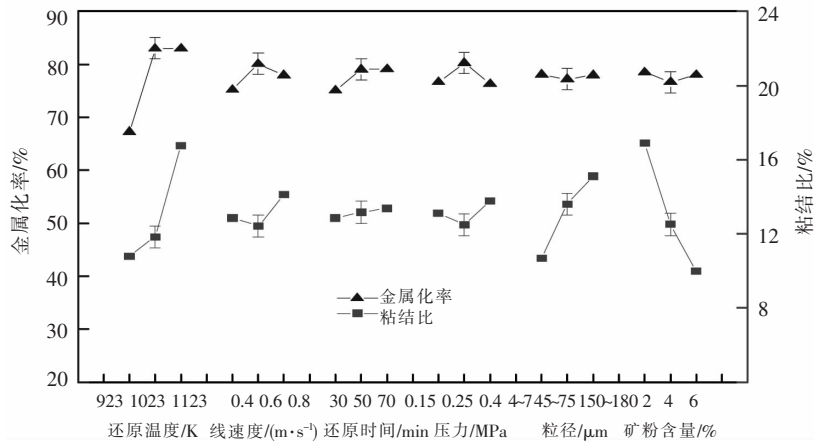


图 2 不同因素水平下金属化率和粘结比的关系

Fig.2 Relationship between metallization rate and adhesion ratio at different factor levels

因素 D(还原压力):还原压力升高,气相密度增加,气固接触面积增大,加快气固反应速率,提高金属化率。随着还原压力的增大,金属化率先随还原反应进行逐渐增加,金属化率达到最大值。随着还原压力增大,还原气速随之增大,导致还原气体来不及升到设定温度就排出流化床容器,有效气固还原温度降低,还原效果下降,金属化率出现降低趋势,气体有效利用率下降,导致金属化率下降。因此,对于金属化率和气体有效利用而言,选取水平 2。随着反应的进行,析出的铁晶须或铁原子相互勾连团聚,导致颗粒粒径增大,自身重力变大,当重力和粘结力大于气体对颗粒的曳力时,颗粒出现粘结现象,粘结比增大。因此,对于粘结比而言,选取水平 2。综合考虑,还原压力选取 0.25 MPa。

因素 E(碳粉粒径):通过在矿粉颗粒外表面构建碳包覆层,隔绝颗粒表面易粘结金属铁的直接接触,

从而达到抑制颗粒相互粘接的目的。但是碳粉颗粒粒径对粘结/失流的具体影响和相关机理还与矿粉颗粒粒径、气体线速度以及碳粉颗粒质量含量有关,从试验结果看出,包覆碳粉粒径在较细的情况下,金属化率达到最大值 78.07%。就金属化率而言,选取水平 1;即添加碳粉粒径 4~7 μm。碳粉颗粒越细,越容易吸附在粗糙得巴西矿粉表面,改变了析出的金属铁形貌,抑制了粘结。就粘结比而言,选取水平 1。综合考虑,碳粉颗粒粒径选取在 4~7 μm。

因素 F(碳粉质量含量):从试验结果可以看出,随着碳粉颗粒质量含量增大,金属化率保持在较高水平,粘结比显著降低。这是因为碳粉包覆阻隔了铁晶须的勾连或铁原子团聚,能有效提高金属化率,但是随着碳粉颗粒的含量增大,析出的石墨量也随之增多,新析出的铁晶须或铁原子得到有效的包覆,同时对还未反应的矿粉颗粒也有一定程度的包覆,减

小了还原气体与矿粉颗粒的有效接触面积,降低反应效率,这也是金属化率出现最大值后又呈下降趋势的原因所在。因此,对于金属化率和气体有效利用而言,选取水平1就粘结比而言,选取水平3。综合考虑,碳粉质量含量取2%~6%。

综合分析,最佳操作参数范围:温度选取923~1023 K,还原气线速度选取0.6 m/s,还原时间选取30~50 min,还原压力选取0.25 MPa,碳粉颗粒粒径选取在4~7 μm ,碳粉质量分数取2%~6%。

4 结论

1) 通过预试验分析:在常压和高压条件下,巴西铁矿粉还原过程中添加一定粒径和配比的碳粉明显降低粘结比,改善流化效果;在添加碳粉和未添加碳粉条件下,适当增大还原压力有助于提高

金属化率。

2) 经正交试验分析:对于金属化率而言,选取的最佳工艺参数为:还原温度1023 K、气体线速度0.6 m/s、还原时间70 min、还原压力0.25 MPa、添加碳粉质量分数2%、添加碳粉粒径4~7 mm,影响金属化率的主要因素为还原温度;对于粘结比而言,选取的最佳工艺参数为:添加碳粉的质量分数6%、还原温度973 K、添加碳粉粒径4~7 μm 、气体线速度0.6 m/s、还原压力0.25 MPa、还原时间30 min,影响粘结比的主要因素为添加的碳粉量。

3) 通过综合平衡法分析最佳操作参数范围:温度选取923~1023 K,还原气体线速度选取0.6 m/s,还原时间选取30~50 min,还原压力选取0.25 MPa,碳粉颗粒粒径选取在4~7 μm ,碳粉质量分数取2%~6%。

参考文献

- [1] Wang Weixing. Progress of blast furnace ironmaking technology in China [J]. Iron & Steel, 2005, 40(10): 8-12.
(王维兴. 中国高炉炼铁技术进展 [J]. 钢铁, 2005, 40(10): 8-12.)
- [2] Yang Tianjun. Development of blast furnace ironmaking technology in China [J]. China Metallurgy, 2004(6): 1-7.
(杨天钧. 中国高炉炼铁技术的进展 [J]. 中国冶金, 2004(6): 1-7.)
- [3] Che Yuman, Guo Tianyong, Sun Peng *et al.* Application and development of big data cloud platform technology in blast furnace process [J]. Angang Technology, 2019(4): 5-10.
(车玉满, 郭天永, 孙鹏, 等. 大数据云平台技术在高炉工艺应用与发展 [J]. 鞍钢技术, 2019(4): 5-10.)
- [4] Ying Ziwei, Chu Mansheng, Tang Jue *et al.* Analysis of current situation and future adaptability of non blast furnace ironmaking process [J]. Hebei Metallurgy, 2019(6): 1-7.
(应自伟, 储满生, 唐珏, 等. 非高炉炼铁工艺现状及未来适应性分析 [J]. 河北冶金, 2019(6): 1-7.)
- [5] Gong Xianfeng. Comparative analysis of blast furnace ironmaking and non blast furnace ironmaking technology [J]. Shanxi Metallurgy, 2017, 40(2): 86-88.
(贡献锋. 比较分析高炉炼铁与非高炉炼铁技术 [J]. 山西冶金, 2017, 40(2): 86-88.)
- [6] Li Shengkai. Comparison of energy consumption based on blast furnace ironmaking and non blast furnace ironmaking [J]. Industrial Design, 2015(12): 185-187.
(栗圣凯. 基于高炉炼铁和非高炉炼铁的能耗比较 [J]. 工业设计, 2015(12): 185-187.)
- [7] Xu Q, Liu Z, Li Z *et al.* The effect of carbon dissection of waste plastics on inhibiting the adhesion of fine iron ore particles during hydrogen reduction [J]. Metals, 2018, 8(7): 523.
- [8] Xu Qian, Wang Jianjun, Guo Lei. Analysis of the bonding mechanism in the fluidization reduction process of iron ore fines [J]. Metal Mine, 2016, 45(2): 108-111.
(徐其言, 王建军, 郭磊. 铁矿粉流态化还原过程黏结机理分析 [J]. 金属矿山, 2016, 45(2): 108-111.)
- [9] Wagner Carl. Mechanism of the reduction of oxides and sulphides to metals [J]. JOM, 1952, 4(2): 214-216.
- [10] Matthew S P, Cho T R, Hayes P C. Mechanisms of porous iron growth on wustite and magnetite during gaseous reduction [J]. Metallurgical Transactions B, 1990, 21(4): 733-741.
- [11] Shao Jianhua. Basic research on the bonding mechanism and key technologies to inhibit bonding of fluidized iron making particles [D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2012.
(邵剑华. 流态化炼铁颗粒黏结机理与抑制黏结关键技术基础研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2012.)
- [12] Xu Qian, Ren Xin, Ma Hengbao *et al.* The effect of reduction temperature on the bond loss of reduced iron ore powder [J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 34(2): 107-110.
(徐其言, 任鑫, 马恒保, 等. 还原温度对流态化还原铁矿粉黏结失流的影响 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2017, 34(2): 107-110.)

编辑 杨冬梅