影响八钢烧结矿还原性能的因素分析

李 建[1],毛晓明[1],朱德庆[2]

(1. 宝山钢铁股份有限公司 研究院,上海 201900;2. 中南大学 资源加工与生物工程学院,湖南 长沙 410083)

摘 要: 影响烧结矿还原性和低温还原粉化的原因众多,单一的影响因素已由众多研究者得出了定量的结论,但多因素交互后的综合影响研究开展较少。本文通过配矿及工艺参数的调整,得到碱度、MgO含量、FeO含量差异较大的烧结矿,并对其进行还原性和低温还原粉化检测。在此基础上,采用MINITAB分析软件对所得数据进行处理,得到了影响八钢烧结矿还原性和低温还原粉化指标的回归方程。该回归方程的提出对八钢烧结生产有重要的指导意义,烧结厂可以根据炼铁的需要,通过调整配矿结构和工艺参数,得到还原性能合理的烧结矿,供高炉和欧冶炉使用。

关键词: 烧结; 八钢; 烧结矿; 还原性; 还原粉化; MINITAB

中图分类号: TF046.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8764(2018)02-0020-05

doi: 10.13403/j.sjqt.2018.02.020

Analysis of influencing factors of Bayi Steel sinter reduction performance

Li Jian[1], Mao Xiaoming[1], Zhu Deqing[2]

(1. *Research Institute (R&D Center), Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai* 201900;
2. *School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan*)

Abstract There are many factors influencing the sinter reduction and low temperature reduction degradation index, the quantitative conclusions for single influence factors have been obtained by many researchers, but few researches on comprehensive influence after interaction of multiple factors have been carried out. Through adjustment of ore proportioning and process parameters, the sinter with great difference in basicity, MgO content and FeO content is obtained, and its reducibility and low temperature reduction degradation index (RDI) are tested. On this basis, the obtained data are processed by MINITAB analysis software, and the regression equation influencing the sinter reducibility and RDI is also obtained. The regression equation proposed is of great guiding significance for Bayi Steel sinter production. According the needs of iron making, by adjusting ore proportioning structure and process parameters in sinter plants, the sinter with reasonable reducibility can be obtained for use in BF and COREX furnace.

Key words sintering; Bayi Steel; sinter; reducibility; reduction degradation index; MINITAB

1 前 言

烧结矿作为高炉最主要的含铁炉料,其还原性能对高炉操作和消耗均有重要影响。烧结矿的还原性能通常包括还原性和低温还原粉化。影响矿石还原性的主要因素包括:粒度、气孔率、矿物组成及结构、脉石成分等。影响铁矿石低温还原粉化性能的因素有矿石的种类、粒度、气孔率、Fe_2O_3的结晶形态、碱度、脉石成分及矿石中杂质元素的含量。

由于烧结矿的还原性能对高炉操作具有重要影响,因此众多研究者[1~12]对烧结矿还原性能的影响因素进行了研究和分析。

攀钢蒋大军[2,3]研究表明,烧结矿中MgO含量由2.5%提高至2.7%,矿相结构与矿物组成改善,转鼓强度提高0.10%左右,低温还原粉化率

收稿日期: 2017-10-17

基金项目: 国家重点研发计划专项资助(2017YFB0304300&2017YFB0304301)

作者简介: 李 建(1979-),男,博士研究生,主要从事烧结、球团及非高炉炼铁技术方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$RDI_{-3.15\ mm}$由 66.03% 降低到 64.33%，但还原度由 84.46% 下降到 84.3%。烧结矿碱度 2.5 时，转鼓强度、利用系数、成品率随 FeO 的上升而提高，FeO 达一定值后指标亦达最大值，具有典型的二次曲线特性；随 FeO 的上升，还原性变差，低温还原粉化率改善。w(FeO) 控制在 7.24% ~8.44%，可兼顾质量、能耗、冶金性能等各种指标在最佳范围。马钢钢研所陈道栋[4]等针对马钢凹精烧结矿开展碱度(0.8 ~3.4)影响研究。其结果表明，随着碱度升高，FeO 降低，还原性提高，低温还原粉化指标出现峰值，碱度 2.0 左右指标最佳。河北理工大学韩秀丽[5]等研究表明，司家营烧结矿碱度从 1.7 增加到 1.9 时，烧结矿显微结构由斑状—粒状结构过渡到交织熔蚀结构，相应的烧结矿转鼓指数和还原性升高，低温还原粉化性能得到改善。河北联合大学高艳甲[6]等研究了不同碱度烧结矿冶金性能。其结果表明，酸性烧结矿的转鼓强度高于高碱度烧结矿约 3%，但其还原性指数低于高碱度烧结矿约 20%。

此外，北京科技大学许满兴[7]研究了烧结矿冶金性能对其质量和高炉主要操作指标的影响。认为高碱度烧结矿还原性值应高于 80%。某厂生产数据表明，烧结矿的 $RDI_{-3.15\ mm}$增加 10%，将影响高炉产量 3% 以上，使燃料比上升 1.5%；宝钢股份中央研究院李建[8]、北京科技大学吴胜利[9]对比了球团、烧结矿和块矿在含氢煤气下的低温还原粉化行为，认为不同铁矿石种类对低温还原粉化指标影响显著，进而造成炉内压差等不同。

可见，对配矿结构相对稳定的烧结厂而言，影响烧结矿还原性的主要因素包括碱度、MgO 含量、FeO 含量。

宝钢 COREX 迁建八钢后，更名为欧冶炉，因球团资源紧缺，烧结产能富余，公司提出使用烧结矿的要求。根据以往的生产经验，因熔融还原炉煤气还原气浓度高、且含有一定量的粉尘，故对炉料的低温还原粉化和还原性指标非常敏感，粉化严重将导致竖炉压差高、顺行困难，严重影响生产顺行。八钢常规烧结矿在高浓度富氢煤气气氛下，低温还原粉化严重，按 COREX 用矿标准，配入比例≤15%，故根据八钢的原料条件，开展了影响八钢烧结矿还原性的多因素实验，并进行了量化的回归分析。

2　烧结矿冶金性能影响实验

为解决烧结矿在含氢煤气中低温还原粉化指标差的难题，笔者开展了烧结矿碱度、MgO、FeO 含量对烧结矿还原性能影响研究。烧结所用的原料全部取自八钢，采用直径 150 mm 烧结杯全精矿烧结后，成品烧结矿进行还原性和低温还原粉化试验。还原性采用 GB/T13241 -91，低温还原粉化采用如下条件，还原温度 550 ℃，还原时间 30 min，还原气成分 $CO/H_2/CO_2$ 为 35/15/50。

碱度、MgO、FeO 含量对烧结矿还原性的影响如表 1 所示。

表 1　碱度和氧化镁对烧结矿还原性的影响

碱度	MgO	FeO	RI/%	RDI/%		
				+6.3 mm	+3.15 mm	-0.5 mm
0.80	2.18	23.11	67.26	70.12	82.63	5.78
1.00	2.21	21.75	75.15	67.12	82.17	6.20
1.20	2.30	21.37	80.22	66.47	81.15	6.94
1.40	2.26	18.26	79.10	64.00	80.64	7.28
1.60	2.25	19.24	86.53	58.16	76.10	7.94
1.80	2.18	17.23	92.29	64.26	80.89	7.61
2.00	2.34	14.89	89.21	69.76	89.66	4.07
2.20	2.18	15.25	93.21	78.72	88.24	4.98
2.40	2.26	15.98	92.27	82.08	91.43	3.92

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

续表1

碱度	MgO	FeO	RI/%	RDI/%		
				+6.3 mm	+3.15 mm	−0.5 mm
2.60	2.32	15.19	94.58	90.98	95.31	2.06
1.60	1.60	19.33	88.60	42.47	69.77	9.93
1.62	1.80	20.20	86.24	57.35	78.14	7.75
1.62	2.00	20.29	84.76	58.04	78.63	7.14
1.62	2.20	19.24	86.53	58.16	76.10	7.94
1.64	2.40	22.91	85.25	70.17	85.74	5.02
1.61	2.60	22.79	81.69	71.39	86.87	4.23
1.64	2.80	24.69	76.90	72.25	87.78	3.90
1.65	3.00	25.17	73.69	79.13	91.15	3.75

由表1的研究结果表明，碱度、MgO和FeO对烧结矿还原性均有影响，有必要进一步对其进行数值量化，得出具有规律性的结果。

3 数据分析

回归分析：还原性与碱度，MgO，FeO

回归分析：

RI = 89.0 + 12.6 B2 − 8.27 MgO − 0.366 FeO

自变量	系数	系数标准误	T	P
常量	89.048	8.680	10.26	0.000
B2	12.648	2.541	4.98	0.000
MgO	−8.271	2.908	−2.84	0.013
FeO	−0.3662	0.3841	−0.95	0.357

S = 2.90525 R−Sq = 87.7% R−Sq（调整） = 85.1%

方差分析

来源	自由度	SS	MS	F	P
回归	3	842.74	280.91	33.28	0.000
残差误差	14	118.17	8.44		
合计	17	960.91			

来源	自由度	Seq SS
B2	1	661.06
MgO	1	174.01
FeO	1	7.67

图1 还原性多元回归初步分析结果

S—标准差；R−Sq—相关系数；R−Sq—(调整)修正相关系数；SS—偏差平方和；MS—均方和；F—归均方和与残差均方和的比值；P—犯错概率

由于涉及多因素分析，因此采用MINITAB软件对数据进行分析。该软件1972年诞生于美国宾夕法尼亚大学统计系，至今已发展到MINITAB16，是一个全方位的统计软件包，被誉为“非统计学者的统计软件”。

以表1中数据为基础，还原性为响应量，碱度、MgO、FeO为变量进行多元回归分析，初步分析结果如图1所示。

由图1分析可得出以下几点：

(1) 回归方程总的显著性检验结果，由于P值=0<α=0.05，说明在显著性水平α=0.05下，线性回归方程总效果显著。

(2) 回归模型显著性的度量指标，R−Sq=87.7%，R−Sq(调整)=85.1%来看，二者很接近，模型还可以。S=2.90525，比较小，可接受。

(3) 各个回归系数进行显著性检验，碱度、MgO的P值都小于α=0.05，故这两个因子均为显著性因子；自变量FeO的P值=0.357>α=0.05，效应不显著，同时在平方和来源中也说明了自变量“FeO”的平方和是7.67，在整个平方和中所占比例非常小。所以，提示修正模型时，应删除自变量“FeO”。

(4) 进行残差分析。四合一残差图中(见图2)，残差与数据顺序图(图2右下角)正常，残差对于观测值顺序随机分布着；残差与拟合值(图2右上角)图，未看见喇叭口形状分布，图正常，表明线性模型可以接受。残差的正态概率图(图2左上角)正常，数据点基本在一条直线上，可认为残差服从正态分布；同时，残差的直方图也显示了残差的正态性。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

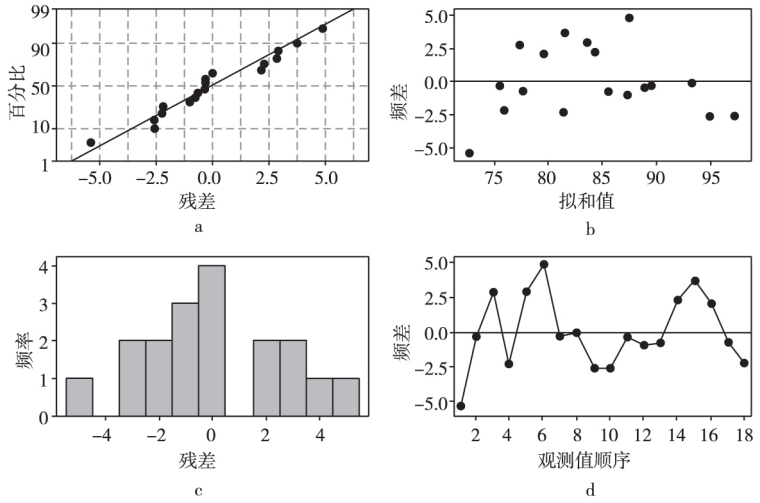


图 2　RI 四合一残差图

a—正态概率图; b—与拟合值图; c—残差直方图; d—与顺序图

基于初步分析结果，对模型进行优化，删除影响不是很显著的 FeO，得到的结果如图 3 所示。

回归分析：RI 与 B2，MgO

回归方程为

RI = 82.7 + 14.5 B2 − 10.1 MgO

自变量	系数	准误	T	P
常量	82.718	5.575	14.84	0.000
B2	14.534	1591	9.14	0.000
MgO	−10.065	2.210	−4.55	0.000

S = 2.89642　R−Sq = 86.9%　R−Sq（调整） = 85.2%

方差分析

来源	自由度	SS	MS	F	P
回归	2	835.07	417.54	49.77	0.000
残差误差	15	125.84	8.39		
合计	17	960.91			

来源	自由度	Seq SS
B2	1	661.06
MgO	1	174.01

图 3　还原性多元回归优化分析结果

S—标准差; R − Sq—相关系数; R − Sq—(调整) 修正相关系数; SS—偏差平方和; MS—均方和; F—归均方和与残差均方和的比值; P—犯错概率

通过多元回归分析表明，影响八钢烧结矿还原性最主要的因素为烧结矿碱度和 MgO 含量，得到的回归方程为:

$$RI = 82.7 + 14.5\ B2 - 10.1\ MgO$$

采用同样的方法对影响八钢烧结矿低温还原粉化的因素进行分析，其结果如图 4 与图 5 所示。发现，碱度、MgO 含量对烧结矿低温还原粉化有显著影响，回归方程为:

$$RDI_{+3.15} = 41.3 + 7.33\ B2 + 13.2\ MgO$$

回归分析：RDI+3.15 与 B2，MgO

回归方程为

$RDI_{+3.15}$ = 41.3 + 7.33 B2 + 13.2 MgO

自变量	系数	准误	T	P
常量	41.257	7.405	5.57	0.000
B2	7.334	2.113	3.47	0.003
MgO	13.203	2.935	4.50	0.000

S = 3.84698　R−Sq = 69.6%　R−Sq（调整） = 65.5%

方差分析

来源	自由度	SS	MS	F	P
回归	2	507.50	253.75	17.15	0.000
残差误差	15	221.99	14.80		
合计	17	729.49			

来源	自由度	Seq SS
B2	1	208.07
MgO	1	299.43

图 4　低温还原粉化多元回归分析结果

S—标准差; R − Sq—相关系数; R − Sq—(调整) 修正相关系数; SS—偏差平方和; MS—均方和; F—归均方和与残差均方和的比值; P—犯错概率

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

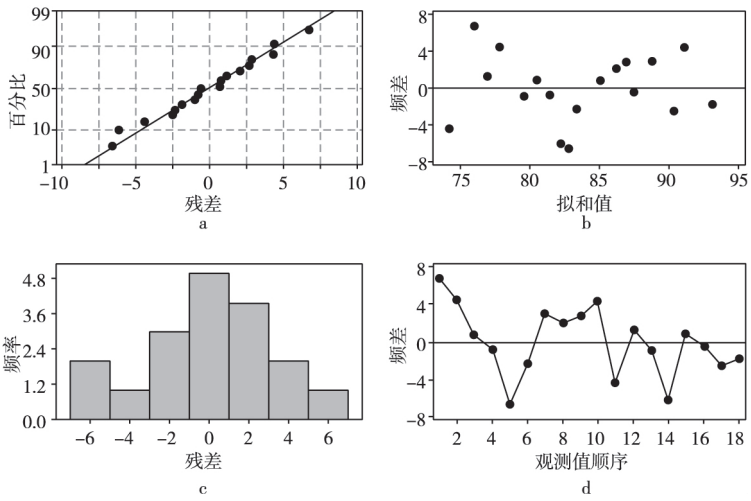


图5 $RDI_{+3.15\ mm}$四合一残差图

a—正态概率图; b—与拟合值图; c—残差直方图; d—与顺序图

4 实际应用

根据欧冶炉已有的生产实践,当炉料的$RDI_{+3.15\ mm}>90\%$时,竖炉压差平稳,可大比例使用。根据回归方程可知,当烧结矿碱度和MgO均大于2.38时,$RDI_{+3.15\ mm}$为90.16%。八钢烧结厂生产高碱度高镁烧结矿供欧冶炉使用,最高使用比例达到50%,竖炉压差平稳,生产顺利。由于烧结加工费用仅为球团的一半左右,此举不仅解决了球团资源不足的难题,拓宽了熔融还原炉用矿范围,也大大降低了欧冶炉的配矿成本。

5 结 论

在实验室研究的基础上,使用分析统计软件,分析了八钢烧结矿还原性能的主要影响因素,其结果如下:

(1) 影响八钢烧结矿还原性最主要的因素为碱度和MgO含量,其回归方程为:

$$RI = 82.7 + 14.5\ B2 - 10.1\ MgO$$

即烧结矿二元碱度提高0.1,烧结矿还原性提高1.45%;烧结矿氧化镁提高0.1,烧结矿还原性降低1.01%。

(2) 影响八钢烧结矿低温还原粉化最主要的因素为碱度和MgO含量,其回归方程为:

$$RDI_{+3.15} = 41.3 + 7.33\ B2 + 13.2\ MgO$$

即烧结矿二元碱度每提高0.1,$RDI_{+3.15}$提高0.73%;烧结矿氧化镁提高0.1,烧结矿$RDI_{+3.15}$提高1.32%。

八钢依据实验结果和回归方程,生产欧冶炉专用烧结矿,配比达到50%,大幅度降低了其配矿成本,对增加熔融还原炉的经济竞争力具有重要意义。

参考文献

[1] 全钰嘉. 中国冶金百科全书,钢铁冶金卷. 北京: 冶金工业出版社, 2001, 57, 559.

[2] 蒋大军,林千谷,何木光,等. MgO对烧结矿与高炉渣冶炼性能及工艺参数影响的试验[J]. 中国冶金, 2010, 20(1):35-41.

[3] 蒋大军,何木光,甘勤,等. 高碱度条件下FeO对烧结矿性能的影响[J]. 中国冶金, 2008, 18(11):14-21.

[4] 陈道栋,洪灶熬. 碱度对烧结矿冶金性能的影响[J]. 烧结球团,1984,19(5):28-34.

[5] 韩秀丽,吕水,杨光. 不同碱度司家营烧结矿矿相结构特征及其对冶金性能的影响[J]. 河北理工大学学报(自然科学版),2011,33(1):22-26,36.

[6] 高艳甲,方觉,时国松,等. 高低碱度烧结矿搭配的冶金性能研究[J]. 钢铁研究,2012,40(3):4-6.

[7] 许满兴. 烧结矿冶金性能对其质量和高炉主要操作指标的影响[J]. 烧结球团,2014,39(3):1-6.

[8] LI Jian, ZHU Jinming, XIONG Lin, et al. Reduction behaviors of iron ore lump and pellets with H_2-CO gas[J]. Baosteel Technical Research 2012, 6(2):13-17.

[9] WU Sheng-li, LIU Xiao-qin, ZHOU Qi, et al. Low Temperature Reduction Degradation Characteristics of Sinter, Pellet and Lump Ore[J]. Journal of Iron and Steel Research (International),2011,18(8):20-24.

[10] 贺淑珍,高玲玲. 降低烧结矿低温还原粉化率的试验研究[J]. 钢铁研究,2007,35(5):1-4.

[11] 李咸伟. 氯化物对烧结矿RDI影响的试验研究[J]. 宝钢技术,1998,(1):19-28.

[12] 杨华明,邱冠周,唐爱东. $CaCl_2$对烧结矿RDI的影响[J]. 中南工业大学学报,1998,29(3):229-232.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net