

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.11.009

基于主成分分析的高炉喷吹煤优化配煤模型

苏步新, 张建良, 国宏伟, 曹维超, 傅源荻, 白亚楠

(北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要:针对中国钢铁企业高炉喷煤的简单混煤现状,且传统的实验室优化配煤研究工作存在量大而繁琐、评价煤粉的性能指标众多等问题,提出了一种新的高炉喷吹煤粉优化配煤模型,即利用实验室测定高炉喷吹煤粉的主要性能指标,然后通过主成分分析对煤粉性能指标进行降维处理,得到的主成分指标 P_1 、 P_2 和 P_3 结合煤粉工业分析和元素分析指标建立高炉喷煤优化配煤模型。该模型通过实验室配煤检验及高炉实际生产验证,效果显示良好。

关键词:高炉;煤粉;主成分分析;优化;模型

中图分类号:TF02

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2013)11-051-07

A mathematical model on the pulverized coal blending optimization for blast furnace injection based on principal component analysis

SU Buxin, ZHANG Jianliang, GUO Hongwei, CAO Weichao, FU Yuandi, BAI Yanan

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: A mathematical model of coal blending optimization for blast furnace injection is proposed. Because Chinese current blast furnaces blend pulverized coal by simple mix and traditional lab blending optimization needs plenty of work for the larger number of characteristics of pulverized coal. The new model is based on the principal component analysis indexes P_1 , P_2 and P_3 combined with the proximate analysis and elementary analysis of pulverized coal. P_1 , P_2 and P_3 are obtained from principal component analysis of the injection characteristic of pulverized coal determined by lab experiment. This model is proved to be effective on both lab experiment coal blending and actual production of BF.

Key words: BF; coal; principal component analysis; optimization; model

目前,国内外高炉混煤喷吹并无统一标准,高炉生产现场主要依据煤化学成分进行简单混煤^[1-2],但这一原则的使用受各地煤资源差异的限制,对特定煤种组合仍须通过实验确定合适的配煤方案。从这个意义上来说,目前的混配煤方案只能称之为“混煤”。随着高炉喷煤比和高炉操作水平的不断提高,要求对混配煤方案进一步细化和优化。针对高炉喷

吹煤使用煤种较多,无法进行优化选择的问题。一般通过实验室对单种煤种发热量、着火点、燃烧性、反应性、流动性、可磨性和爆炸性等指标进行研究。对比分析单种煤的优缺点,然后按一定挥发分或其他指标来确定配煤方案,并对配煤再次进行燃烧性和反应性等实验,从而确定最佳配煤方案^[3-10]。传统的实验室配煤研究能够有效地指导高炉配煤生产,但

收稿日期:2013-07-24

基金项目:国家科技支撑计划项目资助项目(2011BAC01B02);国家自然科学基金资助项目(51174023)

作者简介:苏步新(1985-),男,博士研究生,主要从事铁矿石高效利用、烧结优化配矿、高炉富氧喷煤等方面研究。

张建良(联系人),男,北京科技大学教授,(E-mail)ji.zhang@ustb.edu.cn。

其存在煤粉评价指标众多,且多数指标之间存在重叠现象,而且配煤方案繁琐,工作量巨大等缺点。

建立优化数学模型指导配煤工作是一种有效而科学的方法,相关的研究在炼焦配煤和电厂动力配煤都有很好的应用^[11-16],但在高炉喷吹煤配煤方面,国内目前尚未报道。笔者从高炉喷吹煤单种煤粉的喷吹性能出发,首先对其喷吹性能指标进行主成分降维分析。得到的主成分指标结合煤粉的工业分析和元素分析建立配煤优化模型,并利用实验室和高

炉实际生产进行验证,为中国高炉喷煤技术进一步发展提供指导。

1 煤粉喷吹性能及主成分分析

1.1 单种煤粉性能

实验中研究的煤粉取自某钢铁公司 1 050 m³ 高炉现场,共 7 种煤粉。各种煤粉的工业分析和元素分析见表 1。

表 1 煤粉的工业分析和元素分析(质量分数)

%

编号	工业分析				$S_{t,ad}$	元素分析			
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}		C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}	N_{ad}
C-1	0.79	16.23	9.32	73.66	0.32	74.24	2.54	4.92	0.98
C-2	0.62	10.28	8.52	80.58	0.36	81.81	3.22	2.52	1.19
C-3	0.72	12.50	12.48	74.3	0.21	79.64	1.60	4.71	0.62
C-4	1.44	11.12	11.53	75.91	0.48	77.50	2.33	6.17	0.96
C-5	0.85	11.01	10.05	78.09	0.34	80.40	3.22	2.86	1.32
C-6	1.84	14.83	9.10	74.23	0.45	75.86	2.86	2.84	1.32
C-7	0.87	11.84	8.78	78.51	0.42	79.91	3.26	2.54	1.16

从表 1 中可以看出 7 种煤粉的挥发分不高,硫分较低;从灰分、全水角度分析 7 种煤粉中除 C-1、C-3 和 C-6 喷吹煤粉的灰分较高外(大于 12%),剩余 4 种煤粉用于高炉喷吹均没问题;从固定碳角度来说,7 种煤粉固定碳含量均在 70%~80%之间,热值较高,适合高炉喷吹。

煤粉除了以上工业分析和元素分析外,还要对

其重要的喷吹特性进行研究。诸如煤的可磨性、着火点、灰熔点和燃烧性等,由于各厂资源条件不同、煤质特性不同,以及生产条件不同,合理选择高炉喷吹用煤必须结合上述因素,对煤的喷吹特性进行研究。参考文献[5]中方法对单煤进行喷吹特性实验研究。各煤粉的喷吹特性值见表 2。

表 2 煤粉的喷吹特性指标

编号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}
C-1	391.1	28 496	1 290	1 480	72	40	3.53	28.2	64.8	4.42	8.24	17.1	33.7	54.3
C-2	397.9	32 676	1 275	1 500	61	63	3.57	35	70.7	11.7	17.7	31.4	51.6	73.3
C-3	363.4	28 217	1 105	1 350	62.5	91	13.1	22.4	48.9	8.07	12.8	23.2	39	55.9
C-4	364.3	29 997	1 285	1 330	74	120	7.74	20.4	56.2	4.04	14.7	35.5	55.6	62.2
C-5	390.8	31 751	1 320	1 470	65	74	6.2	35.9	70.6	6.05	11.1	22.4	41.6	64.1
C-6	394.6	30 038	1 145	1 500	60.5	89	6.23	36.7	70.4	2.17	5.96	15.3	32.5	52.1
C-7	391.2	31 572	1 315	1 485	63.5	61	5.99	35.3	68.6	10.1	18.5	30.1	51.9	71.2

其中: X_1 为着火点(°C), X_2 为发热值(J/g), X_3 为变形温度(°C), X_4 为软化温度(°C), X_5 为流动性指数, X_6 为可磨性指数 HGI, X_7 为 500 °C 燃烧性, X_8 为 600 °C 燃烧性, X_9 为 700 °C 燃烧性, X_{10} 为 1 000 °C 反应性, X_{11} 为 1 050 °C 反应性, X_{12} 为 1 100 °C 反应性, X_{13} 为 1 150 °C 反应性, X_{14} 为 1 200 °C 反应性。

从表 2 中可以看出:7 种煤粉的喷吹特性差别较大,且特性指标较多,给煤粉的综合评价带来困难。而且如果用这些指标直接进行配煤模型建立,将大大增加模型的复杂度,降低了模型的实用性。为此,优化配煤建立前对煤粉的喷吹特性进行主成分分析。

1.2 主成分分析

利用主成分分析的方法对煤粉 14 个主要喷吹性能指标进行降维处理。主成分分析是利用降维的思想,在损失很少信息的前提下把多个指标转化为几个综合指标的多元统计方法^[17-18]。通常把转化生

成的综合指标称之为主成分,其中每个主成分都是原始变量的线性组合,且各个主成分之间互不相关,这就使得主成分比原始变量具有某些更优越的性能。这样在研究复杂问题时就可以只考虑少数几个主成分而不至于损失太多信息,从而更容易抓住主要矛盾,揭示事物内部变量之间的规律性,同时使问题得到简化,提高分析效率^[19]。

主成分分析采用 SPSS17.0 软件,通过软件分析可以得到煤粉 14 个性能指标之间的相关系数矩阵,见表 3、总方差解释表 4 和主成分初始载荷矩阵表 5。

表 3 煤粉喷吹性能指标相关系数矩阵

相关性	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}
X_1	1.00	0.631	0.611	0.857	-0.082	-0.516	-0.939	0.786	0.958	-0.010	-0.064	-0.120	0.013	0.328
X_2	0.631	1.00	0.564	0.507	-0.381	-0.143	-0.514	0.678	0.715	0.533	0.551	0.461	0.565	0.846
X_3	0.611	0.564	1.00	0.295	-0.446	-0.362	-0.675	0.247	0.499	0.221	0.406	0.420	0.510	0.618
X_4	0.857	0.507	0.295	1.00	-0.461	-0.745	-0.763	0.920	0.917	0.163	-0.150	-0.409	-0.287	0.217
X_5	-0.082	-0.381	0.446	-0.461	1.00	0.150	-0.124	-0.633	-0.328	-0.431	-0.077	0.221	0.183	-0.192
X_6	-0.516	-0.143	-0.362	-0.745	0.150	1.00	0.598	-0.512	-0.517	-0.353	0.024	0.357	0.308	-0.174
X_7	-0.939	-0.514	-0.675	-0.763	-0.124	0.598	1.00	-0.584	-0.828	-0.039	0.021	0.045	-0.058	-0.328
X_8	0.786	0.678	0.247	0.920	-0.633	-0.512	-0.584	1.00	0.925	0.202	-0.056	-0.298	-0.165	0.325
X_9	0.958	0.715	0.499	0.917	-0.328	-0.517	-0.828	0.925	1.00	0.083	-0.060	-0.188	-0.049	0.361
X_{10}	-0.010	0.533	0.221	0.163	-0.431	-0.353	-0.039	0.202	0.083	1.00	0.839	0.528	0.541	0.817
X_{11}	-0.064	0.551	0.406	-0.150	-0.077	0.024	0.012	-0.056	-0.060	0.839	1.00	0.887	0.898	0.895
X_{12}	-0.120	0.461	0.420	-0.409	0.221	0.375	0.045	-0.298	-0.188	0.528	0.887	1.00	0.988	0.755
X_{13}	0.013	0.565	0.510	-0.287	0.183	0.308	-0.058	-0.165	-0.049	0.541	0.898	0.988	1.00	0.818
X_{14}	0.328	0.846	0.615	0.217	-0.192	-0.174	-0.328	0.325	0.361	0.817	0.895	0.755	0.818	1.00

从表 3 煤粉喷吹性能指标相关系数矩阵中可以看出,煤粉喷吹性能指标之间重叠较为严重。例如 X_1 着火点和 $X_2, X_3, X_4, X_7, X_8, X_9$ 指标之间相关性都大于 60%。主成分个数提取原则为主成分对应的特征值大于 1 的前 m 个主成分。特征值可以被看成是表示主成分影响力度大小的指标,特征值小于 1,说明该主成分的解释力度不如原变量的平解释力度大,因此将特征值大于 1 作为保留标准。

从表 4 的煤粉喷吹性能指标提取主成分总方差解释中可以看出,主成分 1 的特征值为 6.136,代表整个数据信息的 43.828%,按照累计贡献率大于 85%的原则提取主成分。本研究前 3 个主成分累计贡献率已经达到 90.755%,故提取 3 个主成分即可满足要求。按照以上原则提取的 3 个煤粉喷吹性能的主成分初始载荷矩阵如表 5 所示。

表 4 煤粉喷吹性能指标提取主成分总方差解释

组分	初始特征值			提取载荷值		
	特征值	解释量/%	累积量/%	特征值	解释量/%	累积量/%
1	6.136	43.828	43.828	6.136	43.828	43.828
2	4.588	32.774	76.601	4.588	32.774	76.601
3	1.981	14.153	90.755	1.981	14.153	90.755
4	1.023	7.307	98.062	1.023	7.307	98.062
5	0.209	1.494	99.556			
6	0.062	0.444	100.000			
7	6.855E-16	4.896E-15	100.000			
8	4.145E-16	2.961E-15	100.000			
9	1.598E-16	1.141E-15	100.000			
10	6.187E-17	4.420E-16	100.000			
11	-7.742E-17	-5.530E-16	100.000			
12	-1.584E-16	-1.131E-15	100.000			
13	-2.517E-16	-1.798E-15	100.000			
14	-6.519E-16	-4.656E-15	100.000			

表 5 煤粉喷吹性能指标提取主成分初始载荷矩阵

煤粉喷吹特性	主成分		
	1	2	3
X_1	0.852	-0.379	0.299
X_2	0.873	0.288	-0.135
X_3	0.676	0.261	0.618
X_4	0.796	-0.577	-0.132
X_5	-0.299	0.193	0.920
X_6	-0.566	0.414	0.021
X_7	-0.794	0.297	-0.452
X_8	0.803	-0.450	-0.303
X_9	0.882	-0.415	0.054
X_{10}	0.496	0.567	-0.500
X_{11}	0.396	0.881	-0.167
X_{12}	0.201	0.957	0.131
X_{13}	0.328	0.915	0.145
X_{14}	0.737	0.662	-0.117

从表 5 的初始载荷矩阵中看出, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_7 、 X_8 、 X_9 和 X_{14} 在第一主成分上有较高载荷,说明第一主成分基本反映了这些指标的信息;

第二主成分基本反映了 X_{10} 、 X_{11} 、 X_{12} 、 X_{13} 和 X_{14} 指标的信息;第三主成分主要集中代表了 X_5 和 X_3 指标。

得到的主成分初始载荷矩阵结合特征解即可求解得到主成分特征向量,与标准化后的煤粉喷吹特性指标数据相乘,从而就可以得出主成分表达式:

$$P_1 = 0.34ZX_1 + 0.35ZX_2 + 0.27ZX_3 + 0.32ZX_4 - 0.12ZX_5 - 0.23ZX_6 - 0.32ZX_7 + 0.32ZX_8 + 0.36ZX_9 + 0.20ZX_{10} + 0.16ZX_{11} + 0.08ZX_{12} + 0.13ZX_{13} + 0.30ZX_{14}, \quad (1)$$

$$P_2 = -0.18ZX_1 + 0.13ZX_2 + 0.12ZX_3 - 0.27ZX_4 + 0.09ZX_5 + 0.19ZX_6 + 0.14ZX_7 - 0.21ZX_8 - 0.19ZX_9 + 0.26ZX_{10} + 0.41ZX_{11} + 0.45ZX_{12} + 0.43ZX_{13} + 0.31ZX_{14}, \quad (2)$$

$$P_3 = 0.21ZX_1 - 0.10ZX_2 + 0.44ZX_3 - 0.09ZX_4 + 0.65ZX_5 + 0.01ZX_6 - 0.32ZX_7 - 0.22ZX_8 - 0.04ZX_9 - 0.36ZX_{10} - 0.12ZX_{11} + 0.09ZX_{12} + 0.10ZX_{13} - 0.08ZX_{14}. \quad (3)$$

以上得到的 3 个煤粉喷吹特性的主成分 P_1 、 P_2 和 P_3 可以代表原先 14 个指标的全部信息,且之间是线性无关的。

2 模型建立

本研究提出建立数学模型来指导高炉喷吹煤的优化配煤。具体做法可以归结为以下 4 个步骤:①选择配煤指标;②确定约束条件;③确定目标函数;④模型求解。

2.1 选择配煤指标

高炉喷吹煤优化配煤指标选择工业分析指标、元素分析指标以及 3 个主成分指标。元素分析和工业分析是煤质基本分析指标。煤粉的工业分析包括固定碳 FC_{ad} ,水分 M_{ad} ,灰分 A_{ad} ,挥发分 V_{ad} 以及硫分 S_{ad} 是目前中国钢铁厂选择高炉喷吹煤种的主要考量指标。元素分析主要包括碳 C_{ad} ,氢 H_{ad} ,氧 O_{ad} ,氮 N_{ad} ,通过元素分析可以测定高炉喷吹煤有机组成部分中碳、氢、氧、氮、硫等元素的含量,从而对喷吹煤的化学成分进行最直观的了解。通过工业分析(实用分析或技术分析)可以对喷吹煤中的挥发分、水分、灰分的测定及固定碳的计算,可以了解煤质特性的主要指标,以及对所用喷吹煤进行煤质评价,有助于初步判断煤的性质、种类和加工利用效果。通过主成分分析得到的 3 个新指标 P_1, P_2 和 P_3 。这些新指标之间线性无关,并且代表了原先煤粉 14 个性能指标的 90% 以上信息。利用新的指标建立优化配煤模型更加简洁、高效。

2.2 约束条件

1) 煤粉工业分析约束。

优化配煤首先必须满足对高炉喷吹煤粉的固定碳 C ,水分 M ,灰分 A ,挥发分 V 工业分析指标要求。即如下:

$$A_j \leq \sum_{i=1}^n p_i \times I_j^i \leq B_j, \quad (4)$$

式中: P_i 为煤粉 i 在混合煤中所占比例值; n 为单煤种数; I_j^i 为煤粉 i 中工业分析指标 j 的值; A_j 和 B_j 分别对应为混合煤中对各工业分析约束的下限和上限。

2) 煤粉元素分析约束。

高炉喷吹煤有机组成部分中碳、氢、氧、氮、硫等元素的含量,从而对喷吹煤的化学成分进行最直观的了解。因此,混合煤需要满足对元素指标要求,即

$$C_i \leq \sum_{j=1}^n p_j \times E_j^i \leq D_j, \quad (5)$$

式中: E_j^i 为煤粉 i 中元素指标 j 的值; C_j 和 D_j 分别对应为混合煤中对各元素分析约束的下限和上限。

3) 煤粉性能主成分约束。

研究表明混合煤粉的燃烧性、灰熔融性和单种煤粉并不具有加和性,这就限制无法利用简单的线性规划方法来建立高炉喷吹煤优化配煤模型。但此次利用通过主成分分析得到的 3 个新的煤粉喷吹特性指标 P_1, P_2 和 P_3 ,每个主成分指标中燃烧性和灰熔融性所占载荷并不大,故不影响新的主成分指标的加和性。煤粉性能主成分约束具体表示如下:

$$\min P_j \leq \sum_{i=1}^n P_j^i \times p_i \leq \max P_j, \quad (6)$$

式中: P_j^i 为高炉喷吹煤粉 i 性能特性指标 j 的值; $\min P_j$ 和 $\max P_j$ 分别为喷吹特性指标下限和上限约束; j 取值为 1, 2 和 3。

4) 供应量等约束。

除上述约束外,高炉喷吹煤粉还要满足供应量约束,以及各种原料量总和为 100% 的等式条件。

$$0 \leq p_i \leq Q_i, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1. \quad (8)$$

式中: Q_i 为原料 i 的最大供应量。

2.3 目标函数

高炉优化配煤的主要目的是通过调整各种无烟煤、烟煤等原料之间的配比,进行混匀得到满足高炉喷吹质量要求的混合煤,同时要求配加的实现原料成本最低。即

$$\min Z = \sum_{i=1}^n c_i \times p_i, \quad (9)$$

式中: c_i 为各煤粉单价; p_i 为生成单位喷吹煤时各原煤粉配加量; Z 为单位喷吹煤的成本。

2.4 模型求解

单纯形法是求解线性规划问题的迭代算法。所谓迭代算法的基本思路是从一个可行解开始,求得下一个较前一个可行解更好的可行解(目标函数较前一个可行解大),直至得到最优解。一般情况下,线性规划的可行域是一个凸多边形,该凸多边形的顶点称为线性规划问题的基本可行解。理论上可以证明,若一个线性规划问题存在最优解,则其最优值必定在某个基本可行解上达到,即必然在某个顶点上达到最优值。

线性规划的单纯形法就是从某个基本可行解(可行域的某个顶点)开始,迭代得到另外一个相邻的、具有更大目标函数值的基本可行解,最后得到最优的基本可行解的迭代过程。

由上述思路,利用单纯形法求解高炉优化配煤问题需要 2 个步骤:

1) 求得一个基本可行解,作为迭代的初始基本

可行解,该步骤称为单纯形法的第一阶段问题。

2)从初始基本可行解出发,通过迭代逐步得到最优的基本可行解。

3 模型应用

高炉喷吹煤优化配煤模型实际应用于某钢铁公司 1 050 m³ 高炉,该高炉使用的喷吹煤主要由 C-1 等 7 种煤粉组成。在保证低成本的前提下,以目前的 7 种煤粉进行优化配煤方案研究。得出的优化配煤方案和高炉优化前最佳配煤方案对比,如表 6 所示。

表 6 某钢铁公司 1 050 m³ 高炉喷吹煤优化配煤方案(%)

方案	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	价格/ (元·t ⁻¹)
优化前 最佳方案	16	20	15	10	22	7	10	1 315
优化配 煤方案	18	25	12	10	18	4	13	1 301
对比	+2	+5	-3	0	-4	-3	+3	-24

从表 6 可以看出,优化配煤方案从价格优势方面明显优于优化前的最佳生产方案,成本节约 14 元/t。这主要是由于减少了价格较贵的 C-3 和 C-5。增加了 C-2 和 C-7 的配比,这 2 种煤的喷吹性能和 C-3、C-5 基本相差不大,但价格更为便宜。将优化配煤方案实验室进行着火点、燃烧性等系统研究。测定结果表明优化配煤后的混合煤粉发热值较高,着火点适中无爆炸性,灰熔融性高,流动性好,具有良好的燃烧性和反应性,完全适合高炉喷吹。

2 种配煤方案下 1 050 m³ 高炉的生产指标情况对比如表 7 所示。

表 7 优化前、后高炉生产指标对比

项目	煤比/ (kg·t ⁻¹)	焦比/ (kg·t ⁻¹)	利用系数 (t·m ⁻³ ·d ⁻¹)
最佳生产	135	460	2.5
优化配煤	145	452	2.6
对比	+10	-8	+0.1

注:以上数据均为 1 个月的平均值。

从表 7 中,某钢铁公司 1 050 m³ 高炉使用优化配煤方案后煤比从 135 kg/t 增加到 145 kg/t,煤比增加 10 kg,说明优化后的混合煤在高炉中更加易于燃烧和反应。对应的焦比也相比之前的最佳生产方案下降了 8 kg,节焦效果明显。此外,优化后配煤方案应用高炉生产后,高炉的利用系数也有所上升,从之前的 2.5 t/(m³·d)增加到 2.6 t/(m³·d),有一定的增产效果。

综上所述,该优化配煤数学模型应用到某钢铁公司 1 050 m³ 高炉,实际结果显示出很好的生产效果,不仅降低了吨煤的采购成本,而且起到有效地提煤降焦的作用。证明了该优化配煤模型的有效性。

4 结 论

针对目前中国高炉喷吹煤优化配煤研究的严重不足,笔者提出一种考虑煤粉喷吹特性的高炉喷吹煤优化配煤方法,建立相应优化配煤模型。通过生产验证得到如下结论:

1)通过煤粉喷吹特性主成分分析,能够从煤粉 14 个喷吹特性指标得到 3 个主成分,这 3 个主成分代表全部指标信息的 90.755%,可以代表原来复杂的数据来进行下一步建模,达到简化系统结构、抓住问题实质的目的。

2)基于主成分分析得到的煤粉喷吹特性指标 P_1 、 P_2 和 P_3 ,很好地解决了灰熔融性和燃烧性能指标不具有线性加和性,无法进行线性规划建模的问题。利用煤粉主成分指标结合煤粉工业分析约束等建立了高炉喷吹煤优化配煤模型,并利用单纯形法求解。该模型应用于实际高炉生产进行配煤优化,结果显示能很好地指导高炉生产。

参考文献:

- [1] 李善斌. 天铁高炉混喷生产实践[J]. 炼铁, 2011, 30(4):48-51.
LI Shanbin. Production practice mixed coal injection on BF at Tian steel[J]. Ironmaking, 2011,30(4) :48-51.
- [2] 韦武强,杨双平,张朝晖. 提高高炉喷煤量的实践[J]. 铸造技术, 2011, 32(8) :1152-1154.
WEI Wuqiang, YANG Shuangping, ZHANG Zhaohui. Research on increasing pulverized coal injection into blast furnace[J]. Foundry Technology, 2011, 32(8) : 1152-1154.
- [3] WU K, DING R, HAN Q, et al. Research on unconsumed fine coke and pulverized coal of BF dust under different PCI rates in BF at capital steel Co[J]. The Iron and Steel Institute of Japan, 2010,5(3) :390-395.

- [4] 徐万仁, 吴铿, 张龙来, 等. 高炉大喷煤时煤粉利用率的研究[J]. 钢铁, 2006, 41(4):10-14.
XU Wanren, WU Keng, ZHANG Longlai, et al. Research on utilization factor of injected into BF pulverized coal at large PCI rate[J]. Iron and Steel, 2006, 41(4):10-14.
- [5] 张海滨, 吴铿, 周翔, 等. 煤粉特性及配煤的研究[J]. 中国冶金, 2008, 18(8):1-4.
ZHANG Haibin, WU Keng, ZHOU Xiang, et al. Research of coal properties and blending[J]. China Metallurgy, 2008, 18(8):1-4.
- [6] 吴铿, 于博洵, 朱锦明, 等. 宝钢高炉喷吹常村贫煤的工业试验[J]. 钢铁, 2006, 41(7):21-24.
WU Keng, YU Boxun, ZHU Jinming, et al. Industrial trial of PCI with lean coal on BF at Baosteel[J]. Iron and Steel, 2006, 41(7):21-24.
- [7] MAJUMDERA K, SHAHH, CHOUBEY S, et al. Applicability of a dense-medium cyclone and vorsyl separator for upgrading non-coking coal fines for use as a blast furnace injection fuel[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2009, 29(1):23-33.
- [8] DU S W, CHEN W H, LUCAS J A. Pulverized coal burnout in blast furnace simulated by a drop tube furnace[J]. Energy, 2010, 35(2):576-581.
- [9] PRACHETHAN K P, BARMAN S C, SINGH S, et al. Influence of coal fluidity on coal blend and coke quality [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2008, 35(6):238-241.
- [10] 马超, 张建良, 祁成林, 等. 湘钢 2 500 m³ 高炉煤种的选择[J]. 过程工程学报, 2012, 12(1):81-85.
MA Chao, ZHANG Jianliang, QI Chenglin, et al. Coal selection in 2 500 m³ blast furnace of Xiangsteel[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2012, 12(1):81-85.
- [11] 祁成林, 张建良, 贺鑫杰, 等. 太钢 4 350 m³ 高炉喷吹清徐煤特性[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(1):80-86.
QI Chenglin, ZHANG Jianliang, HE Xinjie, et al. Characteristics of Qingxu coal applied in the 4 350 m³ blast furnace of Taigang[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(1):80-86.
- [12] GUPTA A, DAS A K, CHAUHAN G I S. A coal-blending model: a tool for better coal blend preparation [J]. Coal Preparation, 2007, 27(1/3):28-38.
- [13] SHARMA M K, CHAUDHURI A J, PRASAD S, et al. Development of new coal blend preparation methodologies for improvement in coke quality [J]. Coal Preparation, 2007, 27(1/3):57-77.
- [14] 许俊, 韩志伟, 邹德余. 蒙特卡洛优化法在炼焦配煤中的应用[J]. 燃料与化工, 2001, 32(1):13-15.
XU Jun, HAN Zhiwei, ZOU Deyu. Application of monte carlo optimization method in coal blending for cokemaking[J]. Fuel & Chemical Processes, 2001, 32(1):13-15.
- [15] 郭一楠, 王凌, 谭德健. 基于遗传算法和神经网络混合优化的配煤控制[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(5):404-406.
GUO Yinan, WANG Ling, TAN Dejian, et al. Coal blending control based on mixed optimization of genetic algorithm and neural network [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(5):404-406.
- [16] 夏季, 华志刚, 彭鹏, 等. 基于非支配排序遗传算法的无约束多目标优化配煤模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(2):85-90.
XIA Ji, HUA Zhigang, PENG Peng, et al. A model of unconstrained multi-objective optimization of coal blending based on the non-dominated sorting genetic algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(2):85-90.
- [17] KIRY M, SIROVICH L. Application of the Karhunen-Loève procedure for the characterization of human faces [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(1):103-108.
- [18] TuURK M, PENTLAND A. Eigenfaces for recognition [J]. Journal of Cognitive Neuroscience, 1991, 3(1):71-75.
- [19] 刘炳胜, 王雪青, 李冰, 等. 基于主成分分析与 DEA-DA 组合的中国区域建筑产业竞争优势系统评价[J]. 土木工程学报, 2011, 44(2):143-150.
LIU Bingsheng, WANG Xueqing, LI Bing, et al. Systematic evaluation of the competitive advantage of Chinese regional construction industry based on principal component and DEA-DA [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(2):143-150.

(编辑 王维朗)