

# 高炉喷吹煤优化配煤系统的开发与应用

何晓义<sup>1</sup>, 丁 坤<sup>2</sup>, 白晓光<sup>3</sup>, 杨 帆<sup>3</sup>, 付利俊<sup>1</sup>

1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司制造部, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司炼铁厂, 内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 针对高炉喷吹煤在优化配煤过程中出现的问题, 在考虑喷吹煤粉物化特性、安全性能、工艺性能的基础上, 自主开发了喷吹煤优化配煤系统。以 ACCESS 作为后台数据库, 应用 VB + EXCELVBA 混合编程技术调用规划求解、多元线性回归等算法, 测算出满足生产需求约束条件下成本最优的配煤方案。生产应用表明, 该系统模型在降低高炉喷吹煤成本、稳定喷吹煤质量等方面都发挥了重要作用。

**关键词:** 喷吹煤; 优化; 系统

中图分类号: TF54

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438 (2024) 03 - 0022 - 06

## Development and Applications of Optimized Coal Blending System for Coal Injection of Blast Furnace

He Xiao - yi<sup>1</sup>, Ding Kun<sup>2</sup>, Bai Xiao - guang<sup>3</sup>, Yang Fan<sup>3</sup>, Fu Li - jun<sup>1</sup>

1. Manufacturing Dept. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Iron - making Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
3. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** The optimized coal blending system for coal injection is independently developed based on considering the physicochemical characteristics, safety performance and processing property of coal injection aiming at the problems in process of optimizing coal blending for coal injection of blast furnace. The coal blending scheme with cost optimization satisfied the constraint conditions of production demands is calculated by adopting the hybrid programming technology of VB + EXCELVBA, invoking such algorithms as plan solution and multiple linear regression as well as taking ACCESS as background database. The production applications show that the system model plays an important role in reducing costs and stabilizing quality for coal injection of blast furnace.

**Key words:** coal injection; optimize; system

喷吹煤粉工艺是将研磨、混合后的煤粉通过高炉风口喷煤枪以固定压力和流速喷入炉内, 在进入

风口前端后瞬时燃烧并产生热量,进而起到置换和替代一定量焦炭的作用。随着焦炭资源的日渐匮乏和价格攀升,如何高效地利用好喷吹煤粉与焦炭价差,提高煤焦置换比,实现生铁成本的下降<sup>[1-2]</sup>,是当前业内高炉具备竞争力的必要手段之一。

如何提高喷吹煤粉的经济性,就要结合现有喷吹煤资源进行优化搭配,常规的煤粉检验指标包括发热量、着火点、燃烧性、反应性、流动性、可磨性和爆炸性等。因此,在配煤方案的设计过程中,需要充分考虑煤种的物化特性及其燃烧效果。目前绝大多数喷吹煤粉选用无烟煤+烟煤的搭配形式,烟煤配比越高,其着火温度越低,煤粉燃烧率越高,烟煤配比的增加可以提高高炉内的还原性气氛,为高炉还原铁提供更多的氢元素<sup>[3]</sup>,但是其易燃易爆的特性也带来了安全风险,为此工艺上会选择采用氮气惰化技术等方式进行安全保护,以确保系统的稳定运行。

总体来看,喷吹煤优化配煤技术是一个涵盖了煤种特性、高炉冶炼需求、设备适应性等多因素的系统工程,建立优化配煤系统确定喷吹煤配煤方案是一种有效而科学的方法<sup>[4]</sup>。技术人员可以根据配煤方案设计和实施结果,实现高炉冶炼的高效、稳定运行,为企业带来显著的经济效益<sup>[5-7]</sup>。

## 1 优化配煤系统的建立

优化配煤系统结构由单种煤性质及价格数据

库、配煤方案数据库、喷吹煤质量测算模块、配煤寻优设计模块、单种煤性价比评价模块构成。其具体过程可归纳为以下4个步骤:①对各单种煤进行工业分析、元素分析、喷吹性能指标检测分析,建立喷吹用煤数据库;②设定约束条件,即对配合煤工业分析指标、可磨性指数、发热值等关键指标设定上下限;③设定优化配煤目标函数,采用规划求解、线性回归算法建立优化配煤计算模型;④最后应用优化配煤模型进行求解,得出最优的配煤方案。

### 1.1 单种喷吹煤数据库

对各种煤粉的基础特性、安全特性、工艺特性进行实验室检测分析,由市场及采购部门提供各单种煤的采购价格、资源量,并以之为依据对各单种煤进行评价,为优化配煤方案的制定提供依据。

喷吹煤的基础特性分析包括煤粉的工业分析、元素分析。煤粉的工业分析包括固定碳( $F_{cd}$ )、水分( $M_t$ )、灰分( $A_d$ )、挥发分( $V_{daf}$ )以及硫分( $S_{t,d}$ ),是选择高炉喷吹煤煤种的主要控制指标。元素分析主要包括碳、氢、氧、氮,通过元素分析结果可以对喷吹煤的化学成分进行最直观的了解。根据上述分析指标可以清晰地了解煤质特性,对所用喷吹煤进行评价。同时通过这些分析可确定每个煤种能够提供的热量、有害元素含量。包钢目前在用高炉喷吹煤粉工业分析数据如表1所示,喷吹煤粉元素分析如表2所示。

表1 喷吹煤粉工业分析

煤种	品名	$M_t/\%$	$A_d/\%$	$V_{daf}/\%$	$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	$F_{cd}/\%$
无烟煤	SJYT	9.10	8.97	10.68	30.94	80.35
无烟煤	SXLY	7.42	10.37	7.39	30.02	79.17
无烟煤	NXMY	8.70	8.19	11.24	25.74	80.57
无烟煤	YQMY	8.50	10.90	15.33	27.70	73.77
无烟煤	NXMY4	8.10	9.06	13.86	32.40	77.08
无烟煤	JNKG	8.70	9.94	12.47	31.59	77.59
无烟煤	JZNY	9.00	13.40	10.41	30.97	76.19
无烟煤	BGKY	9.32	11.21	9.62	27.71	80.23
烟煤	YKNY	16.60	6.72	33.70	23.80	58.07
烟煤	HHJM	21.60	6.53	37.40	21.90	56.42
烟煤	NXYM	18.30	6.21	27.70	23.10	63.17
烟煤	LAXJ	12.10	10.24	30.80	24.40	60.11

表 2 喷吹煤粉元素分析(质量分数)

煤种	品名	C	H	O	N	S	K	Na	P
无烟煤	SJYT	76.94	5.30	6.70	0.95	1.14	0.019	0.017	0.016
无烟煤	SXLY	79.89	3.11	3.29	1.20	0.81	0.021	0.025	0.050
无烟煤	NXMY	66.44	3.25	1.27	0.79	0.06	0.016	0.029	0.003
无烟煤	YQMY	76.60	2.47	8.20	1.09	0.75	0.010	0.076	0.020
无烟煤	NXMY4	86.57	2.95	0.22	0.87	0.33	0.022	0.120	0.034
无烟煤	JNKG	83.17	3.45	1.73	1.42	0.29	0.013	0.140	0.030
无烟煤	JZNY	79.01	3.29	2.48	1.14	0.69			
无烟煤	BGKY	78.54	5.24	0.97	0.90	0.99	0.020	0.030	0.007
烟煤	YKNY	68.75	3.76	17.56	0.69	0.42	0.015	0.042	0.033
烟煤	HHJM	66.40	3.69	19.35	0.60	0.37			
烟煤	NXYM	66.90	9.16	19.37	0.63	0.40	0.018	0.06	0.007
烟煤	LAXJ	66.70	4.68	18.32	0.70	0.35			

根据表 1、表 2 分析结果,包钢现用煤种基本满足生产要求,无烟煤固定碳含量在 73% ~ 81% 之间,烟煤固定碳含量在 56% ~ 64% 之间;烟煤水分普遍高于无烟煤,挥发分高于无烟煤 20 个百分点左右。由于烟煤水分、挥发分偏高,导致烟煤的元素分析中 H、O 含量均值高于无烟煤,而有害元素 K、Na 含量烟煤与无烟煤均不高。

煤粉安全性能分析包括煤粉着火点、爆炸性检测分析,保证在磨煤、输粉过程中运行安全,不发生着火、爆炸事故。煤粉着火点变化趋势为随着挥发

分的升高,着火点逐步降低。在优化配煤时要注意烟煤、无烟煤的合理搭配,在保证安全的前提下降低煤粉着火点,有利于煤粉快速燃烧。煤粉的工艺性能主要包括可磨性、灰成分、灰熔点、燃烧性。优化配煤过程中尽量控制混合煤粉的灰熔点高于 1 250 ℃,避免出现煤枪挂渣现象。高炉喷吹用煤的可磨性指数应在 60 ~ 90 之间,包钢使用的煤粉可磨性指数大部分位于 50 ~ 67 之间,属于可磨性较差的煤。各单种煤安全及工艺性能检测结果如表 3 所示。

表 3 喷吹煤粉安全及工艺性能分析

煤种	品名	着火点/℃	火焰返回长度	灰熔点	可磨性指数	700 ℃ 燃烧率	喷流性指数
无烟煤	SJYT	468.3	0	1 399	51	100	74.5
无烟煤	SXLY	422.1	0	1 401	61	100	68.0
无烟煤	NXMY	424.8	0	1 418		99.50	69.0
无烟煤	YQMY	451.0	0	1 395	56	99.82	74.5
无烟煤	NXMY4	451.8	0	1 389	65	99.33	75.0
无烟煤	JNKG	462.9	0	1 375	54	100	70.0
无烟煤	JZNY		0		67		
无烟煤	BGKY	453.3	0	1 375	55	100	63.2
烟煤	YKNY	380.0	780	1 179	82	100	
烟煤	HHJM				73		
烟煤	NXYM	366.4	788	1 169	64	100	73.0
烟煤	LAXJ				60		84.5

## 1.2 配合煤约束条件设定

(1) 煤粉工业分析、元素分析约束。优化配煤首先必须满足对高炉喷吹煤粉的固定碳、水分、灰

分、挥发分、热值指标要求。同时高炉喷吹煤粉应对主要元素及有害元素含量进行约束。

$$A_j \leq \sum_{i=1}^n P_i \times I_{ij} \leq B_j \quad (1)$$



## 2 系统应用

2024 年 3 月高炉喷吹煤优化配煤系统应用于包钢高炉喷煤系统,首先将市场及采购部门提供的资源量及价格录入喷吹煤数据库中,具体资源量如表 4 所示。以目前采购中心提供的喷吹煤资源情况,应用喷吹煤优化配煤系统进行了配煤优化设计。

表 4 喷吹煤可采购资源表

煤种	单种煤	最新价格/(元·t <sup>-1</sup> )	可供量/万 t
无烟煤	BGKY	1 260	1.5
	JZNY	1 273	0.6
	SJTT	1 285	1.5
	SXLY	1 290	2.0
	SXLA	1 200	2.0
	SXHY	1 290	1.0
	YQMY	1 290	3.0
	JNKG	1 307	2.5~3.0
	NXMY	1 310	3.5~4.0
	YKNY	805.9	5.0
烟煤	HHJM	718.5	4.0
	NXYM	876.4	3.0
	LAXJ	858.0	2.0

在保证喷吹煤质量满足高炉生产要求、混合煤指标满足磨煤要求的前提下,设定配合煤约束条件如图 2 所示。

性能目标		
	下限	上限
高位发热值	6500 J/g	8500 J/g
可磨性指数	55	90
灰熔点(ST)	1250.0 °C	1500.0 °C
混煤成分目标		
	下限	上限
灰分Aad	0.00%	12.00%
挥发分Vad	18.00%	21.00%
固定碳Fcad	70.00%	75.00%
含硫量S	0.00%	1.00%

图 2 设定配合煤约束条件

应用系统测算成本最低的配煤方案得出的优化配煤方案制定煤粉采购计划,具体数据如表 5 所示。配煤优化前后对应的喷吹煤质量保持稳定,具体数据如表 6 所示。

表 5 优化配煤前后方案对比

煤种	单种煤	采购价格 /(元·t <sup>-1</sup> )	优化前		优化后	
			配比/%	成本/(元·t <sup>-1</sup> )	配比/%	成本/(元·t <sup>-1</sup> )
烟煤	招标烟煤	959	18.9	181.25	0	0
	HHJM	706	3.2	22.59	5.8	40.95
	LAXJ	858	5.1	43.76	11.4	97.81
	NXYM	876	11.5	100.74	10.5	91.98
	YKNY	786	8.4	66.02	20.5	161.13
	JNKG	1 335	10.4	138.84	7.9	105.47
	NXMY	1 310	18.3	239.73	12.2	159.82
	YQMY	1 282	3.0	38.46	8.2	105.12
	SJTT	1 331	2.5	33.26	4.9	65.22
	无烟煤	SXLA	1 200	2.8	33.60	1.2
SXLY		1 312	10.9	143.01	7.6	99.71
BGKY		1 246	3.6	44.86	7.2	89.71
JZNY		1 263	1.4	17.68	1.2	15.16
SXHY		1 340			1.4	18.76
混合煤				1 103.80		1 065.24

表6 优化配煤前后喷吹煤质量及高炉经济技术指标对比

项目	喷吹煤工业分析(质量分数)/%				高炉经济技术指标				
	$M_t$	$A_d$	$V_{daf}$	$F_{cd}$	焦比 /( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )	煤比 /( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )	利用系数 /( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ )	灰铁比 /( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )	瓦斯灰 C 含量 /%
优化前	1.52	9.33	18.10	74.25	381.1	173	2.167	10.61	51.1
优化后	1.70	9.87	19.53	72.52	376.8	177	2.187	9.21	47.28
差值	0.18	0.54	1.43	-1.73	-4.3	4	0.020	-1.40	-3.82

对优化前后的方案对比分析发现,性价比最差的招标烟煤配比由优化前的 18.9% 降低至 0,而对于性价比较优的烟煤 YKNY 则由 8.4% 提高至 20.5%,总烟煤配比提高了 1.1 个百分点。在无烟煤方面,方案优化后,性价比较高的 BGKY 配入量提高了 3.6 个百分点。整体来看,配合煤成本较优化前降低了 38.56 元/t,月降低高炉喷吹煤成本 800 万元。

从高炉经济技术指标来看,喷吹煤配煤结构优化后,高炉焦比降低 4.3 kg/t,煤比升高 4 kg/t。按当期焦炭价格 2 639 元/t、混煤成本 1 065.2 元/t 测算,煤焦置换后,高炉燃料成本降低 7.05 元/t,同时高炉灰铁比降低 1.40 kg/t,瓦斯灰 C 含量降低 3.82 个百分点。由此可知,随烟煤配比提高,灰铁比及瓦斯灰 C 含量均呈下降趋势,表明提高烟煤配比后高炉除尘灰中未燃煤粉降低,喷吹煤燃烧率提高。

### 3 结论

(1)针对目前包钢高炉喷吹煤优化配煤研究的不足,提出一种考虑煤粉基础特性、安全性能、工艺性能的高炉喷吹煤优化配煤方法,建立相应优化配煤系统。

(2)优化配煤系统以煤粉的工业分析、安全性能、工艺性能分析数据作为基础煤种数据库,依据高炉对喷吹煤质量要求及混合煤粉安全性能、工艺性能设定约束条件,以喷吹煤成本最优为目标,通过线性规划求解算法确定最优配煤方案。

(3)优化配煤系统的开发与包钢生产实际情况

紧密结合,使其更具实用性及可操作性,同时提高了喷吹煤配煤信息化水平。

(4)优化配煤系统的开发并应用于包钢高炉,在稳定喷吹煤质量和降低喷吹煤成本方面取得了较大进步,2024 年 3 月份通过优化配合煤结构,高炉喷吹煤成本降低了 38.56 元/t,月降低高炉喷吹煤成本 800 万元。

### 参 考 文 献

- [1] 刘国颖,何宝,赵丽,等.提高高炉喷煤比的经济效益及措施分析[J].冶金经济与管理,2009(4):26.
- [2] 祝和利,黄金堂,雷发荣,等.柳钢高炉喷煤系统相关技术的改进[J].冶金能源,2019,38(5):16-17.
- [3] 乔军强,张少宁,李燕江,等.神东烟煤用于高炉喷吹的可行性分析[J].煤炭科学技术,2020,48(S1):219-225.
- [4] 苏步新,张建良,国宏伟,等.基于主成分分析的高炉喷吹煤优化配煤模型[J].重庆大学学报,2013,36(11):53-55.
- [5] 李进华,张建良,宋波,等.NLMK 高炉喷吹煤粉优化搭配[J].中国冶金,2021,31(12):73-77.
- [6] 黎均红.重钢高炉喷煤优化与实践研究[D].重庆:重庆大学,2007.
- [7] 杨永坤.煤的工业分析过程及意义研究[J].价值工程,2014,33(1):73-77.