

# 基于无筒仓的实时优化配煤系统研究

郭钦星<sup>1</sup>, 孔卉茹<sup>2</sup>, 张媛媛<sup>3</sup>, 杨凤玲<sup>2,4</sup>, 程芳琴<sup>2,4</sup>

(1. 山西国际能源集团有限公司, 山西 太原 030002; 2. 山西大学 资源与环境工程研究所, 山西 太原 030006;  
3. 华北电力大学 可再生能源学院, 北京 102206; 4. 煤电污染物控制与资源化利用山西省重点实验室, 山西 平朔 036800)

**摘要:**针对煤质差造成火电厂燃煤与锅炉设计煤质严重偏离, 运行不稳等问题, 分析了燃料管理落后环节和不适应因素, 结合燃煤电厂燃料配煤和管理现状, 提出了火电厂燃料无筒仓的实时优化配煤、燃料智能化管理系统构建的总体设计, 给出燃料从计划、入厂、入炉、结算的精准计划管理的实时配煤解决方案。结果表明, 采用无筒仓的实时优化配煤系统经过前置预处理沟, 基于热值和硫含量的精确定位, 配合在线监测、控制系统, 对给煤进行调整混配, 可实现燃料均匀混配, 使燃煤粒度小于 10 mm, 硫含量、热值均满足锅炉设计煤要求, 保证锅炉稳定燃烧及污染物有效控制。多渠道分离输送装置及无筒仓封闭式储煤混配控制系统、燃料混配的智能化管理系统的构建在保证正常生产条件下, 最大限度地降低生产成本和煤耗, 提高了资金利用率, 实现电厂燃料智能化管理。

**关键词:**优化配煤; 电厂配煤; 筒仓; 实时配煤; 燃料管理; 智能化

**中图分类号:** TQ53      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-6772(2017)01-0007-06

## Optimization of real-time coal blending system based on non-silos

GUO Taixing<sup>1</sup>, KONG Huiru<sup>2</sup>, ZHANG Yuanyuan<sup>3</sup>, YANG Fengling<sup>2,4</sup>, CHENG Fangqin<sup>2,4</sup>

(1. Shanxi International Energy Group Co., Ltd., Taiyuan 030002, China; 2. Institute of Resources and Environment Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 3. School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 4. Coal Combustion Pollution Controlling and Utilization of Shanxi Province Key Laboratory, Pingshuo 036800, China)

**Abstract:** Combined with the status of coal blending and management in fire-power plant, the shortcomings and unfitable elements in fuel management were analyzed. A design of intelligent fuel management and real-time coal blending system based on non-silos in power plant was proposed. The results showed that the pretreatment ditch and precise location based on calorific value and sulfur were set. With online monitoring and control system, the coal blending could be adjusted evenly, the particle size was less than 10 mm, the sulfur and calorific value of coal boiler could meet the design requirements, and it ensured the effective control of pollutants and the stable combustion of the boiler. A real-time fuel management solution and multi-channel separating and conveying device and control system of closed type coal blending based on non-silos was proposed. The solution could maximally reduce production cost and coal consumption, improve fund utilization rate and realize intelligent management of fuel.

**Key words:** coal blending optimization; coal blending for coal-fired power plant; silo; real-time coal blending; fuel management; intelligence

## 0 引 言

燃料采购成本占电厂运行总成本的 70%。目

前, 火电厂通常拥有燃料存储场地, 直接购进混配动力煤使用, 在燃料入炉燃烧前的输送系统中对煤质指标较为随机的煤进行简单混配, 燃料热值在实际

收稿日期: 2016-03-15; 责任编辑: 白娅娜      DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2017.01.002

基金项目: 山西省科技重大专项资助项目(MD2014-03, MD2015-01); 国家科技惠民计划资助项目(2012GSI40202)

作者简介: 郭钦星(1957—), 男, 四川成都人, 高级工程师, 硕士, 从事低热值煤发电技术及管理方面的研究工作。E-mail: gmgjtx@126.com。通讯作者: 程芳琴, 教授, 从事固体废弃物资源化利用工作。E-mail: cfangqin@163.com

引用格式: 郭钦星, 孔卉茹, 张媛媛, 等. 基于无筒仓的实时优化配煤系统[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(1): 7-12, 18.

GUO Taixing, KONG Huiru, ZHANG Yuanyuan, et al. Optimization of real-time coal blending system based on non-silos[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(1): 7-12, 18.

燃烧时不确定性较强,包括用煤煤源复杂、煤质波动大<sup>[1]</sup>。由于燃烧过程中的调控难以达到精确定量,造成燃料过量使用,增加了运行成本,增大了锅炉的运行负担。动力配煤燃烧技术是解决我国电力用煤供大于求的重要技术,其涉及煤质检测、锅炉用煤设计指标、计算机算法优化模型等一系列问题,考虑多个煤质参数,如硫分、灰分、挥发分、发热量、水分等具有线性可加性或大致具有可加权性<sup>[2]</sup>。将不同品质的单种煤均匀混合,改变其理化性质,以达到锅炉用煤的标准。火力企业厂内配煤的优势在于,采购单煤成本,远低于煤场混配后动力煤,混配燃料可由电厂根据负荷实时调控,在保证达到锅炉燃用指标的同时,减少动力煤煤场供煤煤质不达标造成的经济损失。配煤掺烧对增加电厂机组的煤种适应性、强化锅炉燃烧稳定性、控制污染物排放超标等问题提供有效的解决方案。低热值煤发电,由于原料不均匀,煤质不稳定,难以满足锅炉的设计要求,需对其燃料硫分、灰分及发热量等参数进行实时把控,在实现劣质燃料资源再利用的同时达到烟气达标、超低排放。将配煤技术及燃料管理应用于电厂,是提高火力发电厂核心竞争力,保证安全生产,降低成本的关键<sup>[3]</sup>。受诸多因素限制,电厂场地较小,燃料管理方式粗放,无法对生产用煤实现精确把控<sup>[4]</sup>。实现在线调度,实时优化配煤及全过程燃料管理成为研究热点。刘敏<sup>[5]</sup>尝试将煤炭从入厂到入炉全过程建立科学规范一体化的信息,实行业务流程数字化管理,提供了数字化管理解决方案。肖永庄<sup>[6]</sup>以节能降耗为目标,对燃煤预测、采购、运输、核算的流程进行设计,从源头出发,以反馈指导燃煤预测、采购等环节,引入实时管理。夏季<sup>[7]</sup>对火电机组配煤掺烧全过程进行优化,考虑混煤复杂性,采用高效的线性解决方案和精确的智能算法。苏刚等<sup>[8]</sup>针对入炉混煤的掺烧优化及评估也有研究。所有研究都是针对煤场特定煤种进行混配。燃料精准计划和精确配煤需建立在燃料全局精确管控的基础上,是解决上述运行问题及环保问题的基础。陈耀燊<sup>[9]</sup>提出在新的燃料管理思路,寻找一种适合不同地域煤质差异及电厂燃烧条件,易于实施、低成本的配煤及管理方案具有现实意义。因此,笔者针对目前CFB(循环流化床)锅炉燃用劣质煤,煤矸石细碎、制粒及混配煤方面存在的问题,提出了一种配煤效果好、安全、劳动强度低、供煤可靠的循环流化床锅炉劣质燃料制备系统,采用多渠道分离输送

装置及无筒仓的封闭式储煤的混配煤控制系统,考虑燃料全局管理,最终实现基于无筒仓的实时在线配煤,以满足在大规模储煤的情况下,实现高效、精确、自动化配煤。

## 1 无筒仓的实时优化配煤系统方案设计

配煤由最初的燃料场式存储,到具备一定配煤功能的仓式混配,重心正在随着燃煤电厂需求,由存到配进行转变<sup>[10-12]</sup>。燃料的实时在线调度,过去的做法是建设3个及以上的筒仓,解决存量和调度调节问题<sup>[13]</sup>,但存在过程投资大,施工周期长等问题。对于粗放式煤场管理,人工操作管理中的误差是影响配煤准确性的因素<sup>[14]</sup>。在以低热值煤为燃料的火力发电厂的运行中,用作燃烧控制的关键因素并不完全取决于煤的指标,还与锅炉运行工况及人为控制有关。

### 1.1 燃料来源及特性

针对山西境内某企业燃料资源,根据锅炉燃料设计参数(热值、灰分、挥发分、硫含量等),保证锅炉安全经济运行。在满足以上因素的同时,考虑运输距离、燃料入厂综合成本等建立供方燃料特性资料。如果周边资源不能很好地满足锅炉设计参数,将会困扰设备安全经济运行。电厂基于供方资源库的数据,根据配煤最佳设计进行单种煤的采购,配煤后使用。煤质分析见表1。

### 1.2 锅炉设计燃料要求

电厂设计锅炉设计煤和校核煤工业分析和元素分析见表2。

### 1.3 无筒仓的实时优化配煤燃料管理方案

为了保证煤源,根据文献调研和电厂煤源的调研,提出实时配煤电厂燃料管理方案,对燃料管理过程进行大循环,各管理部门实时管控,其主要职能如图1所示。

### 1.4 无筒仓的实时配煤燃料管理与能效控制

针对实时配煤电厂燃料管理系统的能效控制,设计了厂内外燃料及配煤管理控制流程,具体如图2所示。

## 2 无筒仓的实时配煤系统设计及优化

在以低热值煤为燃料的火力发电厂运行中,用作燃烧控制的关键因素并不完全取决于煤的指标,还与锅炉运行工况及人为控制有关。本文着重研究在线调度、智能混配均匀的技术问题。从燃料全范

表1 燃料煤工业分析和元素分析

Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis of raw material coals

样品	工业分析/%				元素分析/%				发热量/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	
	$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{daf}$	$FC_{ad}$	$C_{ad}$	$H_{ad}$	$N_{ad}$	$S_{ad}$	$Q_{net,ad}$	$Q_{gr,ad}$
鑫聚中煤	2.32	36.18	24.19	37.31	50.07	3.39	1.47	3.44	19.59	20.32
鑫辉中煤	0.97	31.37	20.69	46.96	57.45	3.51	1.44	0.97	21.87	22.60
鑫源中煤	1.28	35.76	22.26	40.70	52.38	3.32	1.41	1.01	19.66	20.38
压滤煤泥	1.49	55.09	19.70	23.72	32.08	2.53	1.14	3.65	13.22	13.92
7号杂煤	5.11	39.59	23.70	31.6	43.88	2.86	1.26	1.42	15.21	15.91
4号杂煤	8.66	41.24	32.56	17.54	37.84	3.16	1.34	2.87	13.16	13.86
风化煤	22.80	22.42	47.53	7.25	41.29	3.42	1.46	0.83	13.20	13.90
4号焦渣	3.90	63.18	19.15	13.77	22.44	2.29	0.99	1.06	7.61	8.28
矸石	1.19	77.50	14.07	7.24	9.77	1.32	0.76	5.39	3.44	4.10

表2 锅炉设计煤和校核煤工业分析和元素分析

Table 2 Proximate analysis and ultimate analysis of designed coal and testified coal

样品	工业分析/%				元素分析/%					发热量/(MJ·kg <sup>-1</sup> )		哈氏可磨性指数 HGI
	$M_t$	$M_{ad}$	$A_{ar}$	$V_{daf}$	$C_{ar}$	$H_{ar}$	$N_{ar}$	$S_{t,ar}$	$O_{ar}$	$Q_{net,ar}$	$Q_{gr,ar}$	
设计煤	8.00	4.66	48.62	40.08	30.60	2.39	0.62	2.65	7.12	11.66	12.34	92
校核煤	10.00	3.65	50.85	43.95	26.16	2.21	0.54	2.31	7.93	9.95	10.64	125

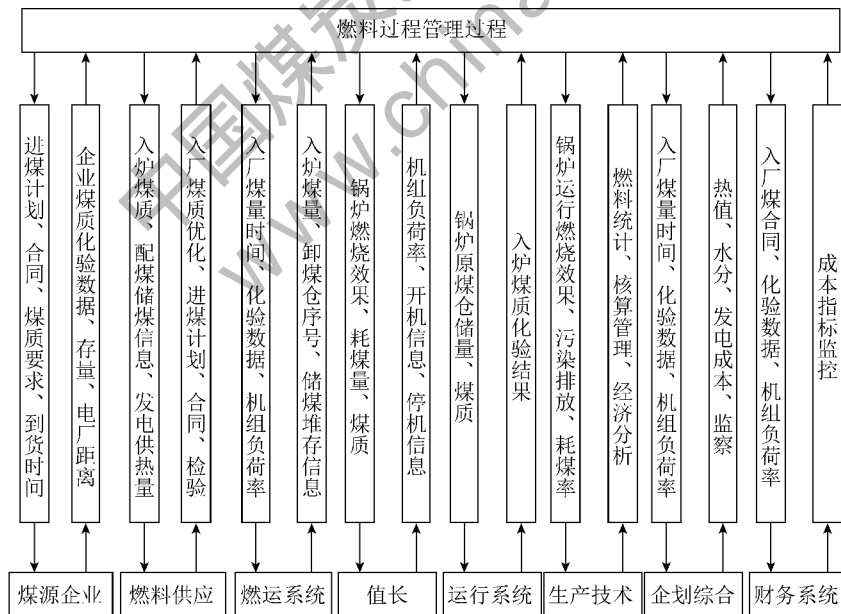


图1 发电企业燃料管理过程大循环

Fig. 1 Cycle of fuel management in fire power plant

围考虑,旨在降低电厂燃料成本,优化配煤方案。无筒仓的实时配煤系统由于厂内几乎不存煤,仅能满足约7 d使用的应急储量,煤源进厂后混配直接入炉,因此,燃料的精准计划和精确配煤就特别重要。

## 2.1 电厂燃料的精准计划

该设计以多个煤种进行配煤,已知各煤种热值、挥发分、硫分、灰分、价格,并根据经验和设计理论指导得出最终配煤的指标参数,得到动力煤质量及成本的矩阵模型。

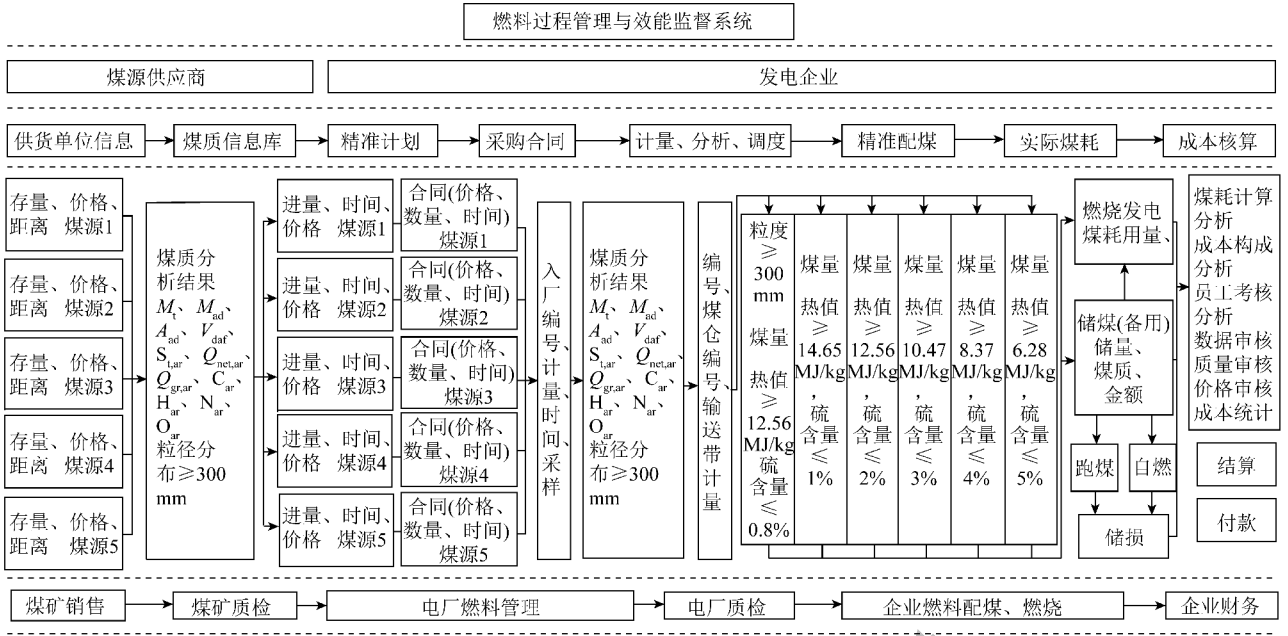


图2 燃料过程管理与效能监督系统

Fig. 2 Fuel management process and efficiency supervisory system

2.1.1 燃料精准计划线性模型的组成

1) 目标函数。在满足循环流化床锅炉安全运行的前提下使配煤成本最低为配煤优化模型的最终目标。

假设有  $n$  种煤源进行配煤,总燃料成本为原料煤的热值成本、硫含量差异调整成本和运输成本之和,公式为

$$C_N = \sum_{j=1}^n (C_{qj} + C_{sj} + C_{yj}) \quad (1)$$

式中,  $C_N$  为总燃料成本,元;  $C_{qj}$  为第  $j$  种煤的热值成本,元;  $C_{sj}$  为第  $j$  种煤的硫含量差异调整成本,元;  $C_{yj}$  为第  $j$  种煤的运输成本,元。

2) 约束条件。循环流化床锅炉设计时对煤质有特殊要求,如热值、挥发分、硫分、灰分为配煤的基本约束条件。

影响循环流化床燃烧配煤原料对煤质要求的因素集可归纳为:  $R_n = \{ \text{热量, 挥发分, 硫分, 灰分, 水分} \} = \{ Q, V, S, A, M \}$ , 对于第  $j$  种煤  $R_j = \{ Q_j, V_j, S_j, A_j, M_j \}$ , 则影响因素和公式为

$$R_n = \sum_{j=1}^n R_j X_j \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中,  $X_j$  为每天调用  $j$  种煤的质量, kg。

根据锅炉炉型的特点,则各因素约束条件为

$$R_{\min} < R_n < R_{\max} \quad (3)$$

式中,  $R_{\min}$  为某因素的下限,根据锅炉设计确定;

$R_{\max}$  为某因素的上限,根据锅炉设计确定。

2.1.2 燃料精准计划线性模型的建立

1) 目标函数。假设从煤源供方到电厂的距离分别用  $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$  表示,每天调用  $j$  种煤的质量分别用  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  表示,其热值分别用  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$  表示,其对应的硫含量用  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$  表示。则当  $n$  种煤源进行配煤,精准计划目标为燃料综合成本的总和最低,表示为

$$C_{N\min} = \sum_{j=1}^n (C_{qj} + C_{sj} + C_{yj}) \quad (4)$$

式中,  $C_{N\min}$  为总成本的最小值,元。

燃料热值成本表达式为

$$C_q = \bar{C}_q \sum_{j=1}^n Q_j X_j \quad (5)$$

式中,  $C_q$  为燃料热值成本,元;  $\bar{C}_q$  为单位热值的平均单价,元/(kJ · kg);  $Q_j$  为每天调用  $j$  种煤的热值, kJ/kg。

硫含量偏差调整成本表达式为

$$C_s = \begin{cases} 0, & |S_s - S_y| \leq e \\ (S_s - S_y)f, & |S_s - S_y| > e \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $C_s$  为煤硫含量偏差调整成本,元;  $S_y$  为煤硫含量的约定值,%;  $S_s$  为煤实际硫含量,%;  $S_s - S_y$  为煤硫含量考核差值,%;  $e$  为硫含量调整范围值,%;  $f$  为调整系数。

将硫含量超标值作为在热值中的调整值。考核

值超出或低于某个范围则相应扣减或奖励。通常调整系数 $f$ 根据硫含量的约定值与实际硫含量差值选取,含硫偏差为1%扣减20元,则有吨煤硫变化扣减 $(S_s - S_y)f = (1.5 - 1.2) \times 20$ ,即硫含量比约定值高0.3%,其煤价扣6元/t。

燃料运费成本表达式为

$$C_N = \begin{bmatrix} Q_1 \bar{C}_q + C_{s1} + L_1 \bar{C}_y \\ Q_2 \bar{C}_q + C_{s2} + L_2 \bar{C}_y \\ \vdots \\ Q_n \bar{C}_q + C_{sn} + L_n \bar{C}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, $C_{sn}$ 为第 $n$ 场的煤硫含量偏差调整成本,元。

2) 约束条件。要使日调煤用量平均热值接近设计热值,每天调用量应满足设计所需,则有4个限制条件

$$X = \sum_{j=1}^n X_j, \quad X_{\min} \leq X \leq X_{\max} \quad (9)$$

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{j=1}^n Q_j X_j}{\sum_{j=1}^n X_j}, \quad Q_{\min} \leq \bar{Q} \leq Q_{\max} \quad (10)$$

$$\bar{S} = \frac{\sum_{j=1}^n S_j X_j}{\sum_{j=1}^n X_j}, \quad S_{\min} \leq \bar{S} \leq S_{\max} \quad (11)$$

$$\bar{C}_N = C_N / X \quad (12)$$

式中, $X$ 为总入厂煤量,t; $X_{\min}$ 为锅炉需煤量下限,t; $X_{\max}$ 为锅炉需煤量上限,t; $\bar{Q}$ 为入炉平均热值,kJ/kg; $Q_{\min}$ 为设计煤热值下限;kJ/kg; $Q_{\max}$ 为设计煤热值上限,kJ/kg; $\bar{S}$ 为入炉平均硫含量,%; $S_{\min}$ 为设计煤含硫下限,%; $S_{\max}$ 为设计煤含硫上限,%; $\bar{C}_N$ 混合燃料平均单价,元。

在满足入炉平均热值 $\bar{Q}$ 和入炉平均硫含量 $\bar{S}$ 等锅炉设计要求的情况下,再满足 $X$ 总进煤量,即供应满足大于每天使用总量, $C_N$ 混合燃料综合成本最低,或混合燃料平均单价最小,是实现进厂燃料的最优选择。

## 2.2 电厂入厂原料检测和配煤程序组合的设计

燃料入厂后,按入厂的燃料顺序进行编号,车车过磅、采样、化验,然后进行入煤仓编排顺序。当日统计第 $i$ 煤站平均热值是加权平均热值,即

$$C_y = \bar{C}_y \sum_{j=1}^n L_j X_j \quad (7)$$

式中, $\bar{C}_y$ 为运费成本单价的平均值,元/(t·km); $L_j$ 为第 $j$ 种煤的运输距离,km。

发电总燃料费用成本为燃料热值成本和运费成本扣减硫含量偏差调整值,其行列式为

$$Q_i = \sum_{j=1}^n Q_{ij} = \sum_{j=1}^n Q_{ij} X_{ij} / \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (13)$$

式中, $Q_{ij}$ 为 $i$ 煤站 $j$ 车燃料的总热量,kJ; $Q_{ij}$ 为 $i$ 煤站 $j$ 车燃料单位热值,kJ/kg; $X_{ij}$ 为 $i$ 煤站 $j$ 车燃料的质量,kg。

同样,可以计算第 $i$ 煤站来煤硫含量 $S_i$ 和水分 $M_i$ ,如果能够实时自动检测,则使用检测数据。不能实时检测可根据承诺数和抽查数进行统计,并按此进行结算。

## 2.3 燃料均匀混配系统的设计实施

根据以上精准计划实时检测热值、硫分、挥发分、水分、灰分,根据热值价格、运输价格、运输距离,质量和数量等指标进行煤混配,实现实时配煤。实时均匀混配方案需要3个地煤沟和1个前置预处理沟,分15个卸车位( $G_{z1} \sim G_{z15}$ );过磅检测后按热值从高到低,分别排在 $G_{z1}$ 到 $G_{z15}$ ;过磅检测后按硫含量从高到低,分别排在 $G_{z15}$ 到 $G_{z1}$ ;如果出现热值和硫含量均相等的情况,第一车按热值排,第二车按硫含量排,有规律地存储在地煤沟内。启动输送带上煤时,均配在4个煤仓的给煤机根据信号同时将煤料落在输送带上( $G_1 \sim G_4$ 为4条给料输送带计量装置),输送带出口端安装在线检测,对给煤量做调整使出口混配均匀。车辆顺序、卸车位、煤仓、带式输送机之间的排序如图3所示。

## 2.4 多渠道分离输送装置及无筒仓的封闭式储煤的混配煤控制系统

根据精准计划、实时配煤方案,设计了多渠道分离输送装置及无筒仓的封闭式储煤的混配煤控制系统,其工艺流程如图4所示。该工艺实现均匀混配,需要3个地煤沟和1个前置预处理沟,装有颚式破碎机,解决部分大块煤难以入地沟的问题。当系统

车辆顺序	大粒径															煤热值从大到小排列,硫从小到大排列,相当间隔排														
卸车位	G <sub>Z1</sub>	G <sub>Z2</sub>	G <sub>Z3</sub>	G <sub>Z4</sub>	G <sub>Z5</sub>	G <sub>Z6</sub>	G <sub>Z7</sub>	G <sub>Z8</sub>	G <sub>Z9</sub>	G <sub>Z10</sub>	G <sub>Z11</sub>	G <sub>Z12</sub>	G <sub>Z13</sub>	G <sub>Z14</sub>	G <sub>Z15</sub>	G <sub>Z1</sub>	G <sub>Z2</sub>	G <sub>Z3</sub>	G <sub>Z4</sub>	G <sub>Z5</sub>	G <sub>Z6</sub>	G <sub>Z7</sub>	G <sub>Z8</sub>	G <sub>Z9</sub>	G <sub>Z10</sub>	G <sub>Z11</sub>	G <sub>Z12</sub>	G <sub>Z13</sub>	G <sub>Z14</sub>	G <sub>Z15</sub>
地下煤仓	粒径≥300 mm 鄂式破碎机破碎					高热值、低硫仓					中热值、中硫仓					低热值、高硫仓														
输送带计量	G <sub>1</sub>			G <sub>2</sub>			G <sub>3</sub>			G <sub>4</sub>			在线监测																	

图3 基于无筒仓的混配系统

Fig. 3 Coal blending system based on non-silos

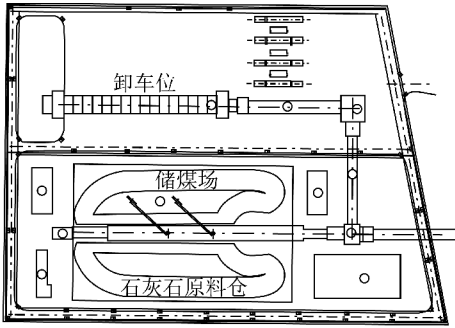


图4 无筒仓封闭式储煤混配控制系统

Fig. 4 Control system of closed type coal blending based on non-silos

来煤粒度小于 10 mm 或煤泥量大、煤泥水分较高时,可通过筛煤机旁路系统进入下一级。地煤沟存储量在 5 000 t 以上,分 15 个车位。输煤系统的控制方式采用程序控制,LED 显示。控制系统根据在线监测结果,调整给煤量,对给煤机发出控制信号,参加程序控制的设备可设就地按钮,并实现起、停操作,在输送带上混配。输送带转载点上装设圆盘混配器,使出口煤混配均匀,满足锅炉设计煤要求,配煤结果基本符合混煤要求指标,保证锅炉的稳定燃烧。该工艺中设计了 7 d 原料的储煤场和石灰石原料仓,主要是为了预防极端天气对生产的不利影响,实现实时配煤,平时不频繁使用。该工艺可节约运行成本,减少原料存放的热值损失,同时稳定运行,降低 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 的生成,减少污染物超标排放。

### 3 结 语

多渠道分离输送装置及无筒仓封闭式储煤的混配煤控制系统便于管理人员从降成本和保质量为出发点,及时控制采购,合理分配资金,以最低成本满足企业需求;减少重复劳动,降低劳动强度;燃料质量情况可及时反馈,为生产决策提供依据。该工艺优点在于充分应用实时调度资源,预先评价混后效果,为优化调度提出了可行方案。该工艺设计了 7 d 原料的储煤场和石灰石原料仓是为了预防极端气象

条件对生产带来的不利影响,实现实时配煤。使用该工艺后,燃料粒度小于 10 mm,硫含量、热值稳定,满足设计要求,保证稳定运行,可节约成本,降低煤耗,有效控制 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 的生成,减少超标排放。

### 参考文献 (References) :

[1] 郝丽芬,李东雄,靳智平,等. 燃煤电厂动力配煤技术的应用[J]. 发电设备,2005,19(2):88-90.  
Hao Lifen, Li Dongxiong, Jin Zhiping, et al. Coal collocation technique for coal fired boilers[J]. Power Equipment, 2005, 19(2): 88-90.

[2] 孙 庶. 动力配煤几个主要煤质指标可加性的论证[J]. 煤炭技术,2009,28(5):164-166.  
Sun Shu. Some of the main driving force for coal blending coal quality indicators additive demonstration[J]. Coal Technology, 2009, 28(5): 164-166.

[3] 杜艳菊. 关于火电厂燃料成本管理的探讨[J]. 经济视野,2014(16):153.  
Du Yanju. The discussion of cost of fuel management in fired-power plant[J]. Economic Vision, 2014(16): 153.

[4] 卢庭文. 燃煤电厂混煤配煤方案研究[J]. 广东电力,2007,20(6):21-23.  
Lu Tingwen. Research on coal blending scheme of coal-fired power plant[J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20(6): 21-23.

[5] 刘 敏. 燃煤管理系统在电厂的应用[J]. 炼油与化工,2015(1):47-49.  
Liu Min. Application of coal management system in power plant[J]. Refining and Chemical Industry, 2015(1): 47-49.

[6] 肖永庄. 节约型燃煤管理系统的开发与设计[J]. 科技、经济、市场,2006(6):48.  
Xiao Yongzhuang. Development and design of energy-saving coal management system[J]. Science, Economy, Market, 2006(6): 48.

[7] 夏 季. 火电机组配煤掺烧全过程优化技术研究与应用[D]. 武汉:华中科技大学,2013.  
Xia Ji. Research and application of the whole process optimization technology of coal blending in power plant[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[8] 苏 刚,王 滨. 入炉煤混配掺烧优化及评估考核:全国火电 600 MW 级机组能效对标及竞赛年会[C]. 潍坊:全国发电机组技术协作会,2012.  
Su Gang, Wang Bin. Optimization and evaluation of coal blending in power plant: National 600 MW level unit energy efficiency benchmarking and competition annual meeting[C]. Weifang: National Power Generation Unit Technical Cooperation Association, 2012.

[9] 陈耀桑. 数字化煤场与配煤掺烧技术的实施要点初论[J]. 科技与创新,2014(21):48,52.  
Chen Yaoshan. Digital coal and technology at the beginning of the implementation of the key points about combustion theory[J]. Science and Technology & Innovation, 2014(21): 48, 52.

(下转第 18 页)

- properties of different rank coking coals[J]. Journal of Anhui University of Technology and Science ( Natural Science ), 2016, 33(1):38-42.
- [3] 郝卫鸣. 炼焦煤的煤岩特征对焦炭质量的影响[J]. 煤化工, 2015, 43(2):53-55.  
Hao Weiming. The influence of coal maceral on coke quality[J]. Coal Chemical Industry, 2015, 43(2):53-55.
- [4] Li Wu, Zhu Yanming, Chen Shanbin, et al. Research on the structure characteristics of vitrinite in different coal ranks[J]. Fuel, 2013, 107(9):647-652.
- [5] Xin Haihui, Wang Deming, Qi Xuyao, et al. Structural characteristics of coal functional groups using quantum chemistry for quantification of infrared spectra[J]. Fuel Processing Technology, 2014, 118(2):287-295.
- [6] 赵伟, 张晓欠, 周安宁, 等. 神府煤煤岩显微组分的浮选分离及富集物的低温热解产物特性研究[J]. 燃料化学学报, 2015, 42(5):527-532.  
Zhao Wei, Zhang Xiaoqian, Zhou Anning, et al. Flotation separation of Shenfu coal macerals and low temperature pyrolysis characteristics of different maceral concentrate[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2015, 42(5):527-532.
- [7] 李德平, 姚伯元, 张代林, 等. 不同变质程度煤镜质组活性质量研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10):1862-1866.  
Li Deping, Yao Boyuan, Zhang Dailin, et al. Study on vitrinite ac-
- tivity quality in different metamorphic grade coals[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10):1862-1866.
- [8] Yao Boyuan, Li Deping. Features and correct application of coal vitrinite reflectance index[J]. Journal of Coal Science & Engineering( China ), 2012, 18(4):400-406.
- [9] 周师庸, 赵俊国. 炼焦煤性质与高炉焦炭质量[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [10] 倪志强, 孙章, 谢全安, 等. 炼焦煤中镜质组活性质量的研究[J]. 煤炭转化, 2015, 38(4):58-61.  
Ni Zhiqiang, Sun Zhang, Xie Quanan, et al. Study on activity quality of vitrinite in coking coal[J]. Coal Conversion, 2015, 38(4):58-61.
- [11] 赵悦, 王杰平, 季斌, 等. 煤岩配煤技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(6):22-25.  
Zhao Yue, Wang Jieping, Ji Bin, et al. Progress of blending based on coal petrography[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(6):22-25.
- [12] Slawomira Pusz, Roman Buszko. Reflectance parameters of cokes in relation to their reactivity index (CRI) and the strength after reaction (CSR), from coals of the Upper Silesian coal basin, Poland[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 90(90/91):43-49.
- [13] 韩德馨, 任德贻, 王延斌. 中国煤岩学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996.

(上接第12页)

- [10] 李蓉生. 落煤塔式圆形封闭煤场应用于火力发电厂的探讨[J]. 中国电力, 2013, 46(12):79-82.  
Li Rongsheng. Discussion on tower type of enclosed circular coal yard applied in coal-fired power plants[J]. Electric Power, 2013, 46(12):79-82.
- [11] 谭振云. 大型燃煤电厂封闭式贮煤场技术性能比较[J]. 电力建设, 2012, 33(5):67-70.  
Tan Zhenyun. Performance comparison of enclosed coal yards in large-scale coal-fired power plant[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(5):67-70.
- [12] 罗宇东. 方形煤仓并列群仓贮煤技术在大型燃煤电厂的应用[J]. 华电技术, 2010, 32(12):64-67.  
Luo Yudong. Application of coal storing technology using paralleling multi-square bunkers in large coal-fired power plant[J]. Huadian Technology, 2010, 32(12):64-67.
- [13] 李春晖, 赵鹏年. 混煤仓在电厂的应用[J]. 电力建设, 1981(3):16-21.
- [14] 姚斯亮, 杨涛, 张燕平, 等. 多煤种掺烧智能配煤系统的设计与开发[J]. 发电设备, 2010, 24(3):157-160.  
Yao Siliang, Yang Tao, Zhang Yanping, et al. Research and development of intelligent automatic coal blending system[J]. Power Equipment, 2010, 24(3):157-160.