

DOI: 10.19666/j.rlfed.202506104

工业园区循环流化床锅炉低热值煤掺烧优化

邓拓宇^{1,2}, 董智鑫¹

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 河北 保定 071003;
2. 新能源电力系统国家重点实验室 (华北电力大学), 北京 102206)

[摘 要] 在“双碳”目标的推动下, 工业园区综合能源系统的建立, 以及大规模可再生能源并网对火电机组配煤灵活性要求更高。工业园区循环流化床锅炉的配煤过程分为炉外与炉内两个阶段。在炉外配煤阶段, 针对低热值煤掺烧, 建立了最小煤质偏差模型, 采用基于混沌搜索的自适应变异粒子群算法将低热值煤掺配为符合锅炉煤质要求的入炉煤。在炉内配煤阶段, 为保证负荷稳定的同时降低燃料成本, 需动态调整不同负荷下入炉煤的掺烧比例。针对循环流化床锅炉炉内配煤问题, 建立两阶段配煤优化模型: 第一阶段根据化工厂周最大日负荷需求及典型光伏场景下机组出力需求, 选择给煤机组合方式; 第二阶段根据负荷需求以及给煤机优化结果建立负荷平衡约束, 考虑炉内脱硫过程建立混煤含硫量约束, 进行给煤量优化。对比春季典型辐照条件下不同配煤策略下的锅炉燃料成本, 结果显示火电机组通过双煤种炉内掺烧可以使日燃烧成本降低 43.6 万元; 对比煤仓改造前后掺烧三煤种燃料成本, 结果显示改造后机组日燃料成本进一步降低。

[关 键 词] 工业园区; 低热值煤; 粒子群优化算法; 混沌搜索; 煤仓改造

[引用本文格式] 邓拓宇, 董智鑫. 工业园区循环流化床锅炉低热值煤掺烧优化[J]. 热力发电, 2026, 55(3): 19-27. DENG Tuoyu, DONG Zhixin. Optimization of low-calorific-value coal co-firing for CFB boilers in industrial parks[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(3): 19-27.

Optimization of low-calorific-value coal co-firing for CFB boilers in industrial parks

DENG Tuoyu^{1,2}, DONG Zhixin¹

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, Beijing 102206, China)

Abstract: Driven by the “dual-carbon” goals, the establishment of integrated energy systems in industrial parks, and the large-scale renewable integration have imposed heightened flexibility requirements on coal blending for thermal power units. The coal blending process comprises two stages: pre-furnace and in-furnace operations. During pre-furnace blending, a minimum coal quality deviation model addresses low-calorific-value coal utilization. Chaos search-based adaptive mutation particle swarm optimization blends such coal into furnace-compliant mixtures meeting boiler specifications. For in-furnace blending, dynamic adjustment of coal ratios across load ranges ensures load stability while minimizing fuel costs. A two-stage optimization model resolves circulating fluidized bed (CFB) boiler blending: Stage 1 selects coal feeder combinations according to weekly peak chemical plant loads and PV generation scenarios; Stage 2 optimizes coal feed rates under load-balance constraints, incorporating desulfurization-driven sulfur content limits. Comparative analysis under spring irradiance conditions reveals that in-furnace blending of two coals reduces daily combustion costs by 4.36×10^5 yuan. Post-retrofit evaluation of blending of three coals demonstrates a further reduction in daily fuel costs.

Key words: industrial park; low-calorific-value coal; particle swarm optimization algorithm; chaotic search; renovation of coal bunker

收稿日期: 2025-06-12 修回日期: 2025-07-03 接受日期: 2025-07-10

基金项目: 煤炭重大专项 (2025ZD1701002)

Supported by: The Coal-Major Project (2025ZD1701002)

第一作者简介: 邓拓宇 (1987), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为供热机组灵活性提升技术、大型火电机组智能优化控制, ooodty@163.com。

通信作者简介: 董智鑫 (2001), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为锅炉燃烧优化及动力配煤技术, 2810326499@qq.com。

受煤炭价格波动的影响,工业园区采用掺烧低热值煤以实现降本增效。由于低热值煤煤质常偏离锅炉设计煤种要求,配煤成为保障机组安全稳定运行、提升电厂经济性与运行适应性的关键技术措施^[1]。在“双碳”目标驱动下,工业园区作为产业与能源消费的核心载体,构建以可再生能源为主体的新型电力系统已成为必然趋势^[2]。然而可再生能源并网引发的电源侧波动对火电机组配煤灵活性提出了更高要求^[3]。

循环流化床锅炉因其独特的物料循环流化燃烧机制,结合炉内脱硫与低温燃烧技术,具有多元燃料强适应性、宽负荷调节性能及污染物协同控制优势,已成为工业园区能源基础设施的重要技术选择^[4]。该特性尤其适配低热值煤资源化需求,通过炉外预混配煤或炉内多仓配煤技术,可实现低热值煤的高效掺混燃烧^[5]。循环流化床锅炉配煤方式分为炉外与炉内 2 种:前者在煤场预混,将不同来煤按比例掺配为达标入炉煤;后者采用多煤种分仓给煤技术,通过给煤机输配量调节实现炉内动态掺烧比例调整^[6-7]。伍家炜^[6]采用了 2 种配煤方式,通过采用炉内配煤方式免去了大量在煤场配煤的操作,在节约成本的同时避免了煤场混合不均的问题。吴英等^[7]采用“炉前掺混”方式,制定了 8 种配煤方案并测试不同工况下的锅炉热效率与供电煤耗,最终确定了最佳掺配方案。

近年来,进化算法特别是粒子群算法在配煤优化过程中得到了广泛应用^[8-9]。夏季等^[9]通过构建模糊理论目标函数并运用遗传算法优化,显著提升了配煤效果。李前胜等^[8]提出基于权重改进的自适应约束粒子群优化算法,通过量化约束违反程度,实现了不同煤质指标的均衡优化。配煤优化算法的研究在静态场景下显著提升了配煤方案经济性,然而,大规模可再生能源的并网对工业园区火电机组配煤灵活性提出了更高的要求,亟待建立计及新能源系统出力波动的火电机组动态掺烧机制,从而提升工业园区综合能源系统的整体能效。

本文针对工业园区循环流化床锅炉低热值煤掺烧问题构建配煤优化模型,在炉外配煤过程中构建最小煤质偏差模型,采用基于混沌搜索的自适应变异粒子群算法将低热值来煤掺配成入炉煤;在炉内配煤过程中,通过优化给煤机组合方式及各给煤机给煤量,在燃煤机组变负荷工况下动态调整掺烧

比例,在满足环保要求的同时降低燃料成本,实现配煤掺烧与可再生能源出力的协同优化。

1 工业园区循环流化床锅炉配煤过程

某工业园区响应国家号召,建设低热值煤项目,燃用低热值煤。工业园区内,光伏电站与火电机组构成综合能源系统协同为园区化工厂供电。当系统出力低于负荷需求时,需高价购电补充差额;出力超出负荷需求时,富余电力无偿返送电网。为提升系统煤耗经济性并响应动态负荷需求,火电机组采用配煤策略如图 1 所示。

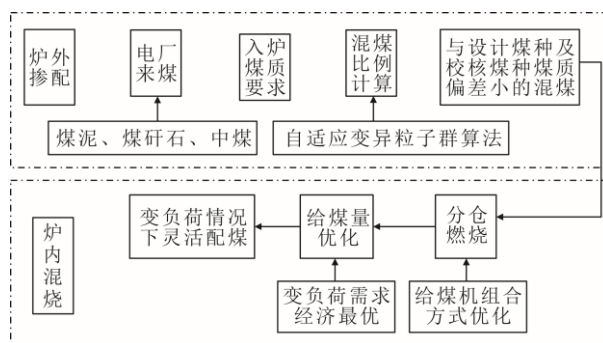


图 1 配煤过程

Fig.1 The coal blending process

电厂接收的煤泥、煤矸石和中煤因热值、含硫量等煤质指标与原设计煤种存在差异,首先在煤场进行炉外配煤。炉外配煤过程以设计煤种和校核煤种的参数为标准,确保掺配后的混煤达到循环流化床锅炉设计煤种要求。在储煤场完成掺配后,按设计煤种与校核煤种为目标掺配的符合入炉煤质要求的混煤在炉内混烧。由于炉前混煤热值不同价格差异较大,为了充分利用价格更低的低热值混煤,炉内配煤过程以经济最优为目标,在满足变负荷需求和给煤量限制的前提下,动态调节较低热值混煤的比例。

2 炉外配煤优化建模与求解

2.1 炉外配煤优化模型建立

2.1.1 炉外配煤目标

为规避安全风险、延长锅炉使用寿命并严格管控二氧化硫污染,入炉煤质参数应趋近锅炉设计煤质参数。构建以最小煤质偏差为目标的掺配优化模型,选取全水分、收到基灰分、干燥无灰基挥发分、收到基全硫分及收到基低位发热量作为混煤指标,将各成分相对偏差平方和确立为优化目标。

$$\min \sum_{k=1}^{M_Z} [((M_{t,O} - M_{t,k}) \cdot \sigma_M^{-1})^2 + ((A_{ar,O} - A_{ar,k}) \cdot \sigma_A^{-1})^2 + ((V_{daf,O} - V_{daf,k}) \cdot \sigma_V^{-1})^2 + ((S_{t,ar,O} - S_{t,ar,k}) \cdot \sigma_S^{-1})^2 + ((Q_{net,ar,O} - Q_{net,ar,k}) \cdot \sigma_Q^{-1})^2] \quad (1)$$

式中: σ_Q 、 $Q_{net,ar,O}$ 分别为混煤收到基低位发热量的期望误差与目标值, MJ/kg; σ_A 、 σ_S 、 σ_M 、 σ_V 分别为各煤质指标的期望误差, %; $A_{ar,O}$ 、 $V_{daf,O}$ 、 $S_{t,ar,O}$ 、 $M_{t,O}$ 分别为各煤质指标目标值, %; M_Z 为混煤种数; $Q_{net,ar,k}$ 、 $A_{ar,k}$ 、 $V_{daf,k}$ 、 $S_{t,ar,k}$ 、 $M_{t,k}$ 分别为煤场来煤的各煤种煤质指标实测值。

通过最小煤质偏差模型, 得到与设计煤种及校核煤种煤质、相近符合入炉煤煤质的混煤方案。煤质各成分期望误差见表 1。

表 1 煤质各成分期望误差
Tab.1 Expected error of each component of the coal

$\sigma_M/\%$	$\sigma_A/\%$	$\sigma_S/\%$	$\sigma_V/\%$	$\sigma_Q/(MJ \cdot kg^{-1})$
1.5	2.5	1.0	0.2	1.3

2.1.2 炉外配煤约束

1) 燃料粒径

大型 CFB 锅炉入炉煤粒径要求(以下均为质量分数)为^[10]: 粒径 0.1 mm 的煤小于 10%、粒径小于 1.0 mm 的煤小于 60%、粒径小于 4.0 mm 的煤小于 95%、入炉煤粒径不允许大于 10 mm。

2) 煤种

煤泥干燥后仍为粉末状, 不结团燃烧, 掺烧比例不高于 10%^[11]。煤矸石热值低, 灰分大, 掺烧量增加后, 炉膛热负荷下降, 且灰量大增, 飞灰未燃尽燃料颗粒增多, 掺烧比例一般不大于 70%^[12]。

3) 入炉燃料热值

用于发电的低热值煤资源主要包括煤泥、洗中煤和收到基热值不低于 5.02 MJ/kg 的煤矸石。入炉燃料收到基热值不高于 14.65 MJ/kg^[13]。

4) 供电煤耗

300 MW 及以上循环流化床低热值煤发电机组原则上采用超临界参数。对循环流化床低热值煤发电机组, 300 MW 级湿冷、空冷机组设计供电煤耗分别不高于 310、327 g/(kW h)^[14]。工业园区循环流化床锅炉为空冷机组, 要求入炉煤均热值为:

$$Q_{net,ar,h} \geq 3600/F_B(1-\beta) \quad (2)$$

式中: $Q_{net,ar,h}$ 为混煤均收到基低位发热量, MJ/kg; F_B 为发电煤耗系数, kJ/kg/MJ; β 为厂用电率。

5) 煤工业分析指标

文献[15]经过电厂煤质实验结果分析, 混煤各成分掺配公式。其中, 水分和发热量属于线性参数, 挥发分与灰分属于非线性参数。

混煤挥发分和灰分与按比例线性相加得到的混煤挥发分和灰分可以近似拟合为以下关系:

$$V_{ad} = 0.970 \, 2V'_{ad} + 2.222 \, 4(r=0.830 \, 7) \quad (3)$$

$$A_{ad} = 0.978 \, 78A'_{ad} - 0.323 \, 6(r=0.950 \, 4) \quad (4)$$

式中: V_{ad} 为混煤收到基挥发分, %; V'_{ad} 为单煤挥发分按比例线性相加得到的混煤收到基挥发分, %; A_{ad} 为混煤空气干燥基灰分, %; A'_{ad} 为单煤灰分按比例线性相加得到的混煤空气干燥基灰分, %; r 为相关系数。

收到基灰分与空气干燥基灰分、干燥无灰基挥发分与收到基挥发分可以通过式(5)折算:

$$V_{ad} = (100 - M_{ad} - A_{ad}) \cdot V_{daf} / 100 \quad (5)$$

$$A_{ad} = \frac{(100 - M_{ad}) \cdot A_{ar}}{100 - M_t} \quad (6)$$

式中: V_{daf} 为干燥无灰基挥发分, %; A_{ar} 为收到基灰分, %; M_{ad} 为空气干燥基水分, %; M_t 为全水分, %。

循环流化床入炉煤煤质要求干燥无灰基挥发分为 20%~35%, 收到基灰分不超过 45%, 收到基全硫分不超过 1.2%。

$$\begin{cases} M_{t,h} \leq M_{t,max} \\ A_{ar,h} \leq A_{ar,max} \\ S_{t,ar,h} \leq S_{t,ar,max} \\ V_{daf,min} \leq V_{daf,h} \leq V_{daf,max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $M_{t,h}$ 为混煤全水分, %; $A_{ar,h}$ 为混煤收到基灰分, %; $S_{t,ar,h}$ 为混煤收到基全硫分, %; $V_{daf,h}$ 为混煤干燥无灰基挥发分, %; $M_{t,max}$ 为混煤最大全水分, %; $A_{ar,max}$ 为混煤最大收到基灰分, %; $S_{t,ar,max}$ 为混煤最大收到基全硫分, %; $V_{daf,min}$ 为混煤最小干燥无灰基挥发分, %; $V_{daf,max}$ 为混煤最大干燥无灰基挥发分, %。

2.2 基于混沌搜索的自适应变异粒子群算法求解

2.2.1 自适应变异粒子群算法

粒子群算法是基于群体智能的优化算法, 初始化随机粒子群, 利用适应度函数评估解的优劣, 在迭代中通过位置公式与速度公式更新粒子位置。

$$\begin{cases} v_{id,t+1} = \omega \times v_{id,t} + c_1 \times r_1 \times (p_{id,t} - x_{id,t}) + c_2 \times r_2 \times (p_{gd,t} - x_{id,t}) \\ x_{id,t+1} = x_{id,t} + v_{id,t+1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $x_{id,t}$ 为时刻 t 粒子 i 的位置; $v_{id,t}$ 为时刻 t 粒子 i 速度; ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 为学习因子; $p_{id,t}$ 为个体最佳位置; $p_{gd,t}$ 为种群最佳位置。

惯性权重 ω 的取值决定了算法的全局搜索能力与局部搜索能力: 初期较大可以确保算法拥有较强的全局搜索能力, 避免陷入局部; 后期逐步减小以增强算法的局部搜索能力, 实现更精细的搜索。

$$\omega = \omega_{ed} + (\omega_{st} - \omega_{ed}) e^{-2\left(\frac{t}{T}\right)^2} \cos\left(\frac{\pi}{2}\left(\frac{t}{T}\right)^3\right) \quad (9)$$

式中: ω_{st} 为起始惯性权重; ω_{ed} 为终止惯性权重; T 为迭代次数。

学习因子 c_1 、 c_2 分别决定粒子的自学习能力与群体学习能力: 初期较大 c_1 使粒子具备较强的自学习能力, 鼓励粒子探索新的搜索空间; 后期较大 c_2 让粒子具备较强的群体学习能力, 提高收敛速度。

$$\begin{cases} c_1 = c_{1st} - (c_{1st} - c_{1ed}) \sqrt{t/T} \\ c_2 = c_{2st} + (c_{2ed} - c_{2st}) \sqrt{t/T} \end{cases} \quad (10)$$

式中: c_{1st} 、 c_{2st} 为起始学习因子; c_{1ed} 、 c_{2ed} 为终止学习因子。

在粒子群优化迭代过程中, 当种群经验最优解与真实全局最优解存在显著偏差时, 粒子会聚集当前最优解进而陷入局部极值。引入变异操作通过随机扰动维持种群多样性, 从而增强全局寻优能力。

$$x_{id}^t = \begin{cases} x_{id,min} + r \times (x_{id,max} - x_{id,min}), & \delta \geq \rho \\ x_{id}^t, & \delta < \rho \end{cases} \quad (11)$$

式中: $x_{id,min}$ 、 $x_{id,max}$ 为粒子 i 的位置边界; ρ 为变异率。

2.2.2 混沌搜索策略

混沌优化算法是兼具随机性、规律性与遍历性的优化算法, 凭借混沌变量的遍历性, 避免搜索陷入局部极值, 实现解空间全局探索。在粒子群算法迭代时, 定期引入混沌优化机制, 以全局最优解为中心, 混沌搜索生成候选解集; 建立动态择优机制, 当候选解集出现适应度优于当前全局最优时, 触发种群的迭代更新。混沌搜索原理如式(12)所示。

$$x_n = \begin{cases} g_{id,t} + y_n(x_{id,max} - x_{id,min})/20 \\ g_{id,t} - y_n(x_{id,max} - x_{id,min})/20 \end{cases} \quad (12)$$

式中: x_n 为混沌搜索生成新个体; y_n 为混沌变量。

在产生混沌序列时, 选用 Logistic 映射。

$$y_{n+1} = \mu y_n (1 - y_n) \quad (13)$$

式中: μ 为控制参数。

2.2.3 基于混沌搜索的 AMPSO 算法用于配煤优化

工业园区炉外配煤过程需要在入炉煤质指标的约束下, 改变不同煤种比例以实现与设计煤种和校核煤种的煤质偏差最小化。基于混沌搜索的自适应变异粒子群算法在配煤优化中的应用流程为: 初始化粒子速度与位置, 计算每个粒子对应的煤质参数, 根据式(1)计算混煤煤质偏差值作为优化目标, 最终确定最优混煤比例, 算法流程如图2所示。

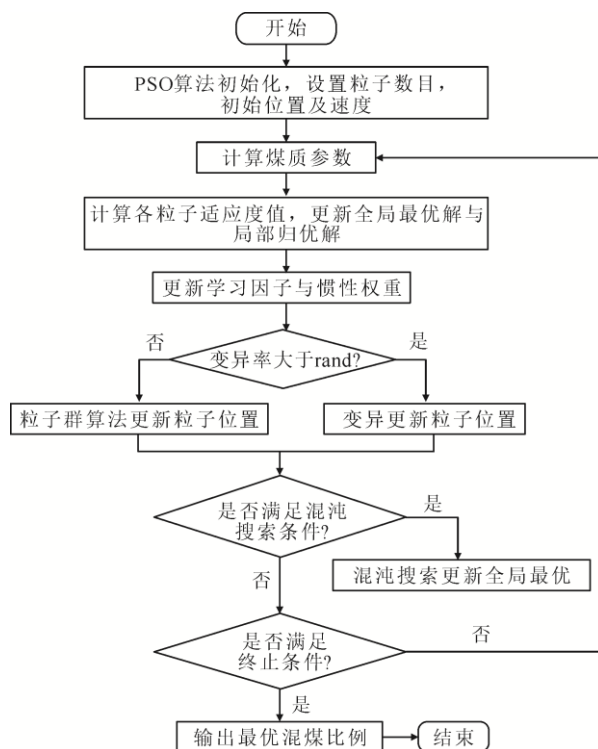


图2 粒子群优化算法流程

Fig.2 Process of the particle swarm optimization algorithm

在粒子群寻优过程中, 根据粒子当前适应度值更新个体历史最优值 (Pbest) 和全局最优值 (Gbest); 根据式(9)更新惯性权重参数; 根据式(10)更新学习因子; 基于式(11)判断是否触发变异条件, 若满足则对当前粒子速度与位置施加随机扰动; 每隔 k 代以全局最优为中心进行混沌搜索; 每次参数更新后重新计算混煤煤质参数, 通过迭代对比适应度值更新全局最优解。满足终止条件时, 输出最优混煤比例, 否则重复执行迭代过程。

3 炉内配煤优化模型

在煤场完成来煤掺配后, 以设计煤种与校核煤

种为目标掺配出符合入炉要求的混煤进行炉内混烧。由于各混煤价格相差较大,为充分利用低价低热值混煤,炉内配煤以经济最优为目标,在满足负荷需求和给煤限制的前提下,动态调节混煤比例。

工业园区内光伏电站与火电机组构成综合能源系统同时给化工厂供电,出力不足以满足园区内化工厂负荷需求时,需要向电网购电,价格昂贵;出力大于化工厂负荷需求时,超出的电免费供给电网。可再生能源的并网对火电机组灵活配煤提出了更高的要求。为了减少机组燃煤成本,工业园区火电机组进行煤仓改造提高机组炉内配煤的灵活性。

3.1 给煤机组合

循环流化床锅炉配备4个原煤斗,炉前10台给煤机给工业园区循环流化床锅炉给煤,煤仓改造前,每个煤斗下接2套或3套称重式给煤机。在煤场一次掺配出的混煤A、B通过不同给煤机同时为循环流化床锅炉给煤。煤仓改造前循环流化床给煤示意如图3所示。

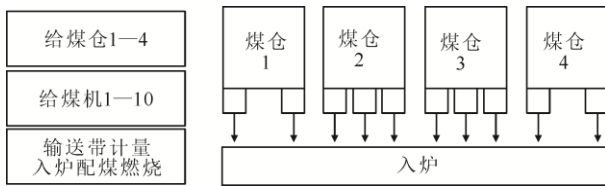


图3 煤仓改造前循环流化床给煤示意

Fig.3 Schematic diagram of coal feeding in the circulating fluidized bed before the coal bunker transformation

文中工业园区内综合能源系统主要给化工厂供电,由于化工厂负荷需求较为稳定,给煤机组合以周最大日负荷需求为约束。以11.72 MJ/kg基准热值煤拟合周典型光伏场景下给煤量负荷关系,得到不同负荷所需给煤量。

1) 优化目标

给煤机组合的目标函数在周典型出力场景下,满足化工厂周最大日负荷需求的配煤成本最优。

$$\min \sum_{j=1}^{N_z} D_{d,j} T_{D,j} (C_A N_A + C_B N_B) \quad (14)$$

式中: C_A 、 C_B 为炉外掺配混煤A、混煤B的价格,元/t; N_A 、 N_B 为混煤A、混煤B给煤机台数; N_z 为典型场景数; D_{Dj} 为典型场景下给煤机给煤量, t/h; T_{Dj} 为场景运行小时数。

2) 负荷需求约束

当光伏出力未处在工作状态时,要求火电机组

应当具有独立满足负荷需求的能力。

$$Q_{A,Z} + Q_{B,Z} \geq Q_{p,zd} \quad (15)$$

$$Q_A = \alpha Q_A N_A D_{A,max} \quad (16)$$

$$Q_B = \alpha Q_B N_B D_{B,max} \quad (17)$$

$$Q_{p,zd} = P_m / c \quad (18)$$

$$c = \eta_B \eta_{Tube} \eta_E \eta_T \quad (19)$$

式中: $Q_{A,Z}$ 、 $Q_{B,Z}$ 为混煤A、混煤B发热量, kW; $Q_{p,zd}$ 为发热量需求, kW; P_m 为负荷需求, kJ; α 为热量平衡系数, 取 1.163×10^{-3} ; c 为机组热效率, %; η_B 为锅炉效率, %; η_{Tube} 为管道效率, %; η_E 为发电机效率, %; η_T 为汽轮机效率, %。

3) 给煤机约束

煤仓改造前,各煤仓下接2套或3套给煤机,为防止偏烧,给煤机对称分布。

$$\begin{cases} N_A + N_B = 10 \\ N_A, N_B = \{4, 6\} \end{cases} \quad (20)$$

3.2 给煤量优化

1) 优化目标

给煤量优化以成本最优为目标。

$$\min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_A} C_A D_{A,i,t} + \sum_{i=1}^{N_B} C_B D_{B,i,t} \right) \quad (21)$$

式中: $D_{A,i,t}$ 为时刻 t 第 i 台混煤A给煤机给煤量, t/h; $D_{B,i,t}$ 为时刻 t 第 i 台混煤B给煤机给煤量, t/h。

2) 负荷平衡约束

为协调光伏电站与火电机组出力,避免出力不足从电网购电,给煤量优化需约束负荷需求。

$$Q_{A,t} + Q_{B,t} = Q_{p,t} \quad (22)$$

$$Q_{A,t} = \alpha Q_A \sum_{i=1}^{N_A} D_{A,i,t} \quad (23)$$

$$Q_{B,t} = \alpha Q_B \sum_{i=1}^{N_B} D_{B,i,t} \quad (24)$$

$$\begin{cases} Q_{p,t} = P_{xu,t} / c \\ P_{xu,t} = P_m - P_{g,t} \\ c = R_1 P_{xu,t}^2 + R_2 P_{xu,t} + R_3 \end{cases} \quad (25)$$

式中: R_1 、 R_2 、 R_3 为负荷-热效率拟合系数, 其中 $R_1 = -9.156 \times 10^{-7}$, $R_2 = 6.15 \times 10^{-4}$, $R_3 = 0.277$; $Q_{p,t}$ 为 t 时刻发热量需求, kW; $P_{xu,t}$ 为 t 时刻负荷需求, kJ; $P_{g,t}$ 为 t 时刻光伏电站出力, kJ; c 为热效率, %。

根据机组热力特性书拟合得到负荷-机组热效率曲线如图4所示。

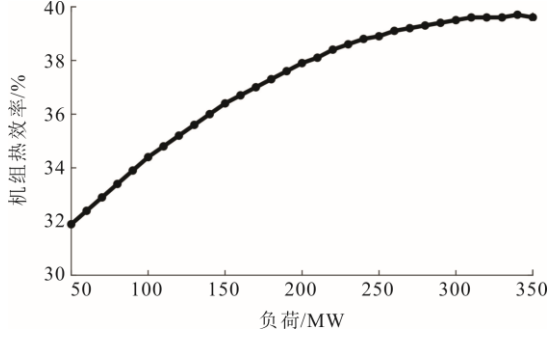


图4 不同负荷下的机组热效率

Fig.4 The unit thermal efficiency at different loads

3) 给煤机给煤量约束

$$D_{\min} \leq D_{A,i,t}, D_{B,i,t} \leq D_{\max} \quad (26)$$

4) 给煤量爬坡约束

$$\begin{cases} -v_{A,dw} \leq D_{A,i,t+1} - D_{A,i,t} \leq v_{A,up} \\ -v_{B,dw} \leq D_{B,i,t+1} - D_{B,i,t} \leq v_{B,up} \end{cases} \quad (27)$$

5) 含硫量约束

循环流化床锅炉炉内脱硫主要是利用石灰石脱硫。在石灰石投入量不变, 负荷较高时, 床温增加, 有利于石灰石与 SO_2 充分反应, 脱硫效率高^[5], 放宽对煤含硫量的限制; 负荷过低时, 由于煤无法均匀地与石灰石接触, 导致脱硫不均, 烟气含硫量波动较大, 反而要求煤中含硫量更低。不同负荷含硫量要求如图5所示。

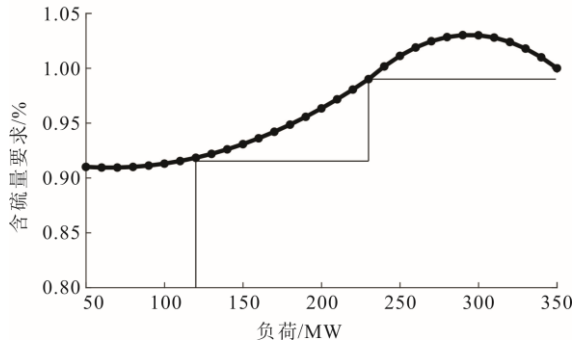


图5 不同负荷含硫量要求

Fig.5 Requirements for sulfur content in coal at different loads

$$S_{PJ,t} \leq \begin{cases} S_{H,t}, & P_{xu,t} > P_{XA} \\ S_{L,t}, & P_{xu,t} \leq P_{XA} \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} S_{H,t} = S_{h1} P_{xu,t}^2 + S_{h2} P_{xu,t} + S_{h3} \\ S_{L,t} = S_{l1} P_{xu,t}^2 + S_{l2} P_{xu,t} + S_{l3} \end{cases} \quad (29)$$

$$S_{PJ,t} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} D_{A,i,t} S_A + \sum_{i=1}^{N_B} D_{B,i,t} S_B}{\sum_{i=1}^{N_A} D_{A,i,t} + \sum_{i=1}^{N_B} D_{B,i,t}} \quad (30)$$

式中: $S_{PJ,t}$ 为混合煤含硫量, %; $S_{H,t}$ 为高负荷时含硫量要求, %; $S_{L,t}$ 为低负荷时含硫量要求, %; P_{XA} 为负荷界限, MW; S_{h1} 、 S_{h2} 、 S_{h3} 为高负荷时含硫量-负荷拟合系数, 其中 $S_{h1} = -3.3 \times 10^{-5}$, $S_{h2} = 1.5 \times 10^{-2}$, $S_{h3} = 2.83$; S_{l1} 、 S_{l2} 、 S_{l3} 为低负荷时含硫量-负荷拟合系数, 其中 $S_{l1} = -1.6 \times 10^{-4}$, $S_{l2} = 6.8 \times 10^{-2}$, $S_{l3} = -2.2$ 。

3.3 煤仓改造后机组配煤优化

为实现灵活配煤, 工业园区循环流化床锅炉进行煤仓改造, 在煤仓加装分隔板。分隔板的加装使得 10 台给煤机可以自由灵活地输送不同热值的煤, 从而实现每台给煤机掺烧不同煤种。煤仓改造后循环流化床给煤示意如图6所示。

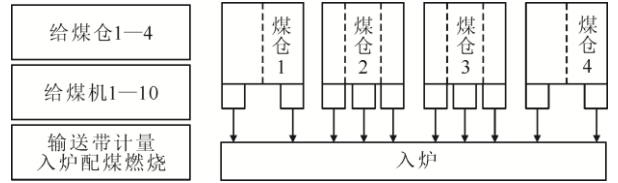


图6 煤仓改造后循环流化床给煤示意

Fig.6 Schematic diagram of coal feeding in the circulating fluidized bed after the coal bunker transformation

煤仓改造为提高炉内配煤灵活性提供了硬件支持, 为进一步提高混煤掺烧的经济效益, 炉内掺烧过程中增加混煤 C, 按式(14)一式(30)分别计算煤仓改造前后混煤 A+B、混煤 A+C、混煤 B+C 组合以及 3 种煤混掺的给煤机组合与给煤量优化结果。

4 算例分析

为探究工业园区并网光伏电站后, 火电机组配煤优化对燃料成本的影响, 本文选取春季典型日照条件火电机组运行数据如图7。通过构建配煤优化模型, 定量对比不同混煤策略下的机组燃料成本。

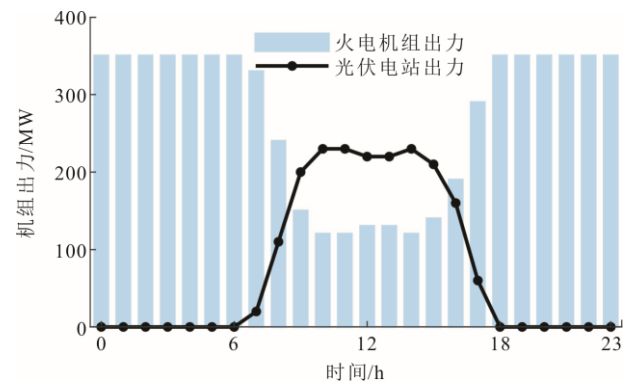


图7 春季典型日照条件下火电机组的运行数据

Fig.7 Operation data of thermal power units under typical irradiation conditions in spring

4.1 炉外配煤优化

工业园区煤场来煤煤质见表2。

表2 煤场来煤煤质

Tab.2 Coal quality of incoming coal from the coal yard

工业分析	中煤	煤泥	煤矸石
收到基全硫分 $w_{t,ar}(S)/\%$	0.76	1.98	0.57
收到基灰分 $w_{ar}(A)/\%$	37.00	46.81	44.40
全水分 $w_t(M)/\%$	4.80	12.30	6.57
空气干燥基水分 $w_{ad}(M)/\%$	1.56	3.73	1.69
干燥无灰基挥发分 $w_{daf}(V)/\%$	24.46	46.81	47.73
收到基低位发热量 $Q_{net,ar}/(MJ\ kg^{-1})$	20.91	10.11	5.52

粒子群收敛过程如图8所示,经粒子群优化后入炉煤煤质参数见表3。

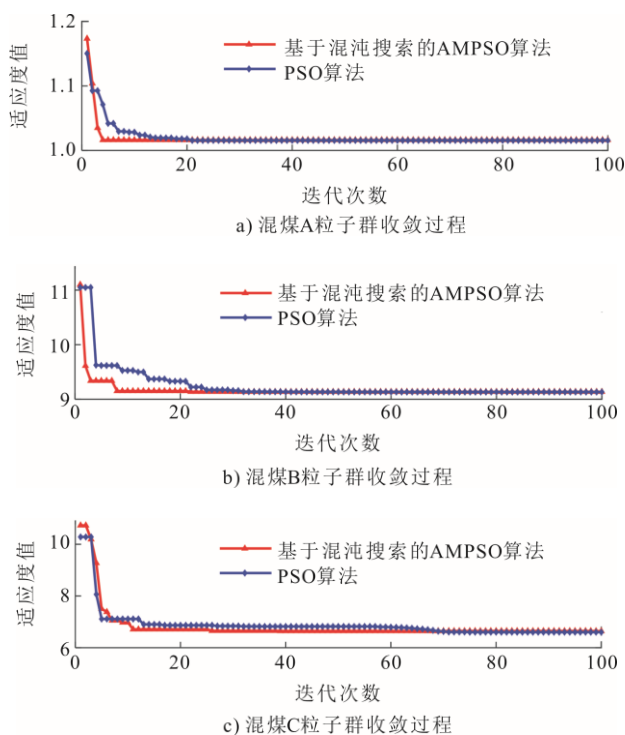


图8 粒子群收敛过程

Fig.8 Convergence processes of the particle swarms

表3 入炉煤质

Tab.3 Quality analysis of the furnace coal

工业分析	混煤 A	混煤 B	混煤 C
收到基全硫分 $w_{t,ar}(S)/\%$	0.82	0.94	0.88
收到基灰分 $w_{ar}(A)/\%$	39.79	41.27	40.56
全水分 $w_t(M)/\%$	6.25	6.61	6.44
干燥无灰基挥发分 $w_{daf}(V)/\%$	32.63	35.8	34.24
收到基低位发热量 $Q_{net,ar}/(MJ\ kg^{-1})$	13.77	10.6	12.14

经过炉外掺配形成的3种混煤的煤质参数彼此较为相近,符合循环流化床入炉要求,可有效避免文献[16]中所提煤种之间的“抢风”现象。其掺烧比

例对于锅炉燃烧效率以及安全运行方面所产生的影响相对较小,主要由经济效益决定。

4.2 炉内掺烧优化

煤场掺混出的混煤由给煤机进入炉膛掺烧,循环流化床锅炉炉内掺烧过程主要考虑混煤的热值与含硫量,具体煤质参数详见表3。

在未实施灵活配煤策略时,循环流化床锅炉入炉燃料为采用基于设计煤种掺配的混煤A。该燃烧方案虽可维持锅炉稳态运行,但因混煤A的单位热值采购成本高,且机组缺乏负荷响应型燃料动态掺烧机制,导致燃料总成本持续处于高位。在典型负荷工况下,机组日燃料成本达到327.4万元。

4.2.1 配煤优化结果

1) 给煤机组合

要求火电机组最大出力为350 MW,给煤机组合优化结果见表4。

表4 给煤机组合优化结果

Tab.4 Optimization results of the coal feeder combination

煤种	混煤 A	混煤 B
给煤机台数	4	6

2) 给煤量优化

经配煤优化后,相较于燃烧单一的设计煤种,掺烧较为劣质的煤可明显提高经济效益。给煤量优化结果如图9所示,在典型出力场景下,日燃料成本为283.8万元,与采用单一煤种相比日燃料成本减少了43.6万元。

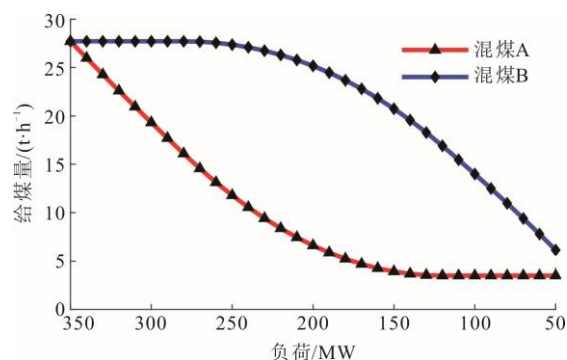


图9 给煤量优化结果

Fig.9 Optimization results of coal feed quantity

针对SO₂排放问题,考虑炉内脱硫过程,建立混煤含硫量约束,日燃料成本增加至284.7万元,实现锅炉在低负荷运行时混煤含硫量的严格限制。

混煤A、混煤B的含硫量分别为0.82%、0.94%。

考虑硫排放的给煤量优化结果如图 10 所示。

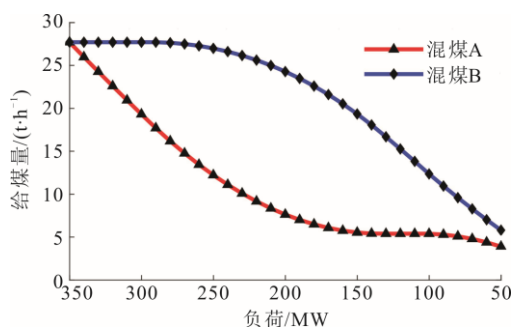
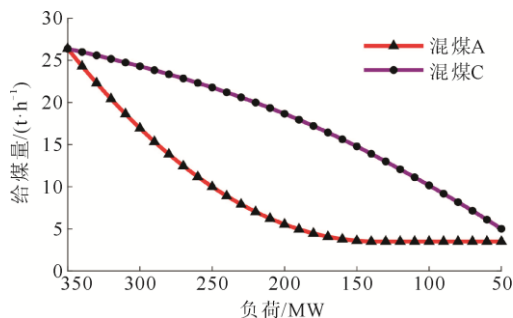


图 10 考虑硫排放的给煤量优化结果
Fig.10 Optimization results of coal feed quantity considering sulfur emissions

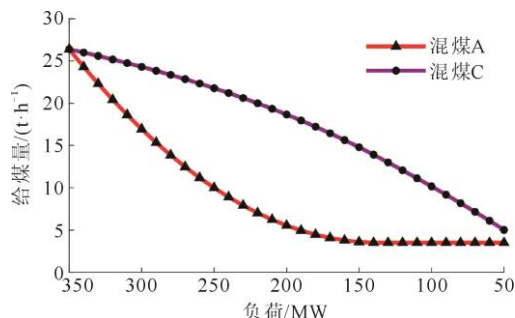
4.2.2 煤仓改造前后配煤优化结果

1) 给煤机组合

在炉内掺烧过程中增加混煤 C，改变混煤组合对比煤仓改造前后不同混煤方案给煤机组合优化结果，具体见表 5。



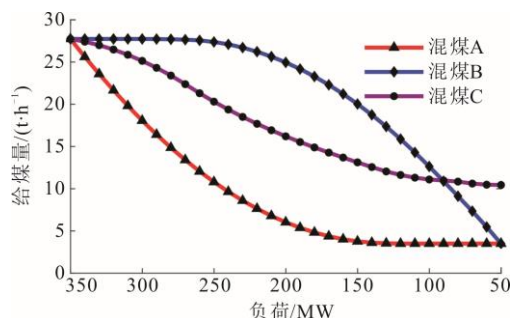
a) 煤仓改造前给煤量优化结果



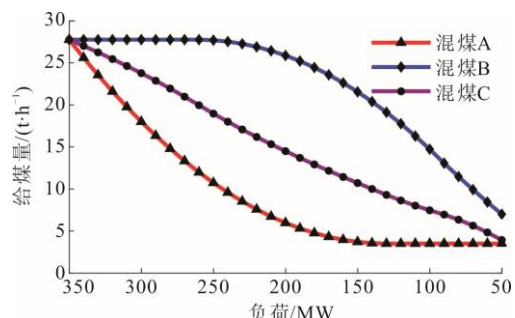
b) 煤仓改造后给煤量优化结果

图 11 混煤 A+C 掺烧给煤量优化结果

Fig.11 Optimization results of feed quantity of the blending coal A+C



a) 煤仓改造前给煤量优化结果



b) 煤仓改造后给煤量优化结果

图 12 三煤种掺烧给煤量优化结果

Fig.12 Optimization results of feed quantity of the three-coal-mixture

5 结 论

本研究以工业园区光伏电站并网运行为背景，针对循环流化床锅炉低热值煤掺烧问题建立优化模型，得出如下结论。

表 5 给煤机组合优化结果
Tab.5 Optimization results of the coal feeder combination

煤种	混煤 A: 混煤 B	混煤 A: 混煤 C	混煤 B: 混煤 C	三煤种 掺混
煤仓改造前 给煤机台数	4:6	2:8	不满足负荷与 含硫量要求	3:5:2
煤仓改造后 给煤机台数	4:6	1:9	不满足负荷与 含硫量要求	2:4:4

2) 给煤量优化

混煤 A+C 掺烧给煤量优化结果如图 11 所示。三煤种掺烧给煤量优化结果如图 12 所示。工业园区经过煤仓分隔板改造后，配煤灵活性的提高为多煤种掺烧创造了更优条件。炉内掺烧过程新增混煤 C，对比改造前后不同混煤组合的优化结果，混煤 B+C 无法满足负荷与含硫量要求；改造后混煤 A+C 典型日下燃料成本约为 291.1 万元，与改造前相比减少了约 3.7 万元。煤仓改造后三煤种掺烧日燃料成本约为 282.1 万元，与改造前相比减少了约 2.6 万元。优化结果表明，煤仓改造提高配煤灵活性可以提高经济效益。

2) 构建循环流化床炉内配煤优化模型,以机组燃料成本为目标,以不同负荷的热量需求和 SO_2 排放限值为约束,通过优化给煤机的组合以及各给煤机给煤量,得到10台给煤机的负荷-给煤量曲线,实现随负荷变化动态调整混煤比例。

3) 配煤优化仿真结果显示,在典型辐照条件下,双煤种炉内掺烧策略下,机组日燃料成本为284.7万元,较单一煤种燃烧减少了43.6万元,表明动态调节低热值混煤的掺烧比例具有显著的经济价值;增加入炉煤种数,三煤种掺烧的日燃料成本为283.1万元,较双煤种掺烧策略再降1.6万元;经工业园区煤仓改造后,三煤种掺烧成本进一步降低,表明加装分隔板增加配煤灵活性可以提高锅炉经济效益。

【参考文献】

- [1] 刘正强, 员盼峰, 吕宏彪, 等. 超超临界机组锅炉燃用煤种经济性分析[J]. 热力发电, 2017, 46(1): 93-99.
LIU Zhengqiang, YUN Panfeng, LYU Hongbiao, et al. Economic analysis for coals used in ultra supercritical boilers[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(1): 93-99.
- [2] MAO Y D, LI X W, LIU J Y, et al. Multi-objective optimization of integrated energy systems in natural gas industrial zones: enhancing performance through variable hydrogen blending ratios[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 268: 125942.
- [3] 张海林, 杨博, 董玉亮, 等. 面向燃煤机组高效灵活运行的智能化配煤掺烧优化决策方法[J]. 热力发电, 2022, 51(4): 30-37.
ZHANG Hailin, YANG Bo, DONG Yuliang, et al. Intelligent coal blending optimization decision method for efficient and flexible operation of coal-fired units[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(4): 30-37.
- [4] HUANG Y S, SHI M S. What are the environmental advantages of circulating fluidized bed technology? A case study in China[J]. Energy, 2021, 220: 119711.
- [5] 郭万竹, 王虎, 顾从阳. 煤泥及矸石等低热值煤循环流化床清洁高效利用关键技术研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(增刊1): 41-45.
WU Wanzhu, WANG Hu, GU Congyang. Research on key CFB technologies for clean and efficient utilization of low calorific value coal[J]. Coal Engineering, 2017, 49(Suppl.1): 41-45.
- [6] 伍家炜. 350 MW 超临界循环流化床锅炉炉内配煤掺烧应用实践[J]. 中国高新科技, 2018(20): 78-80.
WU Jiawei. Practical application of coal blending and combustion in the furnace of a 350 MW supercritical CFB boiler[J]. China High and New Technology, 2018(20): 78-80.
- [7] 吴英, 陈林国, 李海山, 等. 700 MW 超临界锅炉配煤掺烧试验研究[J]. 电站系统工程, 2014, 30(3): 24-26.
WU Ying, CHEN Linguo, LI Haishan, et al. Study on test of coal co-firing for 700 MW supercritical once-through boiler[J]. Power System Engineering, 2014, 30(3): 24-26.
- [8] 李前胜, 解继刚, 关怀, 等. 基于收敛性提升的粒子群算法及其在火电厂配煤优化研究[J]. 控制工程, 2024, 31(10): 1849-1855.
LI Qiansheng, XIE Jigang, GUAN Huai, et al. Particle

- swarm optimization algorithm based on convergence improvement and its application in coal blending optimization of thermal power plant[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(10): 1849-1855.
- [9] 夏季, 陆攀, 华志刚, 等. 电站锅炉全局优化智能配煤模型的建立及系统开发[J]. 动力工程学报, 2010, 30(7): 512-517.
XIA Ji, LU Pan, HUA Zhigang, et al. Model set-up and system development for intelligent coal blending based on integral optimization of utility boilers[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(7): 512-517.
- [10] 吕俊复, 杨海瑞, 杨方亮, 等. 低热值煤资源现状与循环流化床发电应用分析[J]. 中国煤炭, 2021, 47(3): 101-108.
LYU Junfu, YANG Hairui, YANG Fangliang, et al. Analysis on current situation of low calorific value coal resources and application of circulating fluidized bed power generation[J]. China Coal, 2021, 47(3): 101-108.
- [11] 韩全文, 杨洪亮, 蒋昇. 循环流化床锅炉煤泥掺烧方式与应用[J]. 东北电力技术, 2023, 44(4): 43-45.
HAN Quanwen, YANG Hongliang, JIANG Sheng. Mode and application of coal mud mixed burning in boiler of circulating fluidized bed[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(4): 43-45.
- [12] 刘强, 刘小敏. 循环流化床锅炉掺烧煤泥和煤矸石运行优化建议[J]. 工业锅炉, 2023(6): 33-35.
LIU Qiang, LIU Xiaomin. The operation optimization suggestions of burning mixed with coal slime and coal gangue on CFB boiler[J]. Industrial Boilers, 2023(6): 33-35.
- [13] 国家能源局. 国家能源局关于促进低热值煤发电产业健康发展的通知(国能电力〔2011〕396号)[A/OL]. (2011-11-25) [2025-06-12]. https://www.nea.gov.cn/2011-12/30/c_131335980.htm.
National Energy Administration. Notice on Promoting the Healthy Development of Low-calorific Coal Power Generation Industry[A/OL]. NEA-Energy〔2011〕No.396, (2011-11-25) [2025-06-12]. https://www.nea.gov.cn/2011-12/30/c_131335980.htm.
- [14] 国家发展改革委, 环境保护部, 国家能源局. 煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年): 发改能源〔2014〕2093号[A/OL]. (2014-09-12) [2025-06-12]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content_2818468.htm.
National Development and Reform Commission, Ministry of Environmental Protection, National Energy Administration. Notice on the Issuance of the Action Plan for Upgrading and Transformation of Coal-fired Power Generation Energy Conservation and Emission Reduction (2014—2020): FGNV〔2014〕No.2093[A/OL]. (2014-09-12) [2025-06-12]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content_2818468.htm.
- [15] 李培杰. 基于火电厂生产数据的配煤方案研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2023: 1.
LI Peijie. Study on coal blending scheme based on production data of thermal power plant[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2023: 1.
- [16] 李元昊, 武宝会, 吕晨峰, 等. 火电厂配煤技术在气膜封闭式煤场中的应用[J]. 热力发电, 2020, 49(11): 153-158.
LI Yuanhao, WU Baohui, LYU Chenfeng, et al. Application of coal blending technology in gas film closed coal yard of thermal power plant[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(11): 153-158.

(责任编辑 邓玲惠)