DOI: 10.19666/j.rlfd.202512080

深度调峰对燃煤机组脱硫系统运行的影响

姜 龙，宋云畅，徐 扬，杨雪婷，李德成
（国网冀北电力有限公司电力科学研究院，北京 100045）

［摘 要］【目的】为应对燃煤机组深度调峰运行对脱硫系统安全稳定运行及污染物达标排放带来的挑战，开展脱硫系统运行影响研究。【方法】首先创新针对性开发了脱硫浆液液位控制难度、脱硫阻力系数、脱硫石膏利用途径适用性等二次评价参数，丰富现有脱硫系统运行的监测手段；其次以某 1 000 MW 燃煤机组为研究对象，借助上述监测手段开展了不同负荷工况运行尤其是深调工况下对脱硫系统运行状态、SO_2 排放特性、石膏品质及利用的系统性评估。【结果】研究结果表明低负荷（深调工况）下：脱硫出口、总排口 SO_2 质量浓度在线测点与试验检测值间相对偏差分别扩大至 11.1%、16.9%；叠加水平衡失衡与浆液起泡，液位控制难度均值较高负荷提升 75%，脱硫运行和溢流风险凸显；加剧除雾器堵塞，对脱硫系统及除雾器阻力系数增长贡献分别达 47.4%、59.4%；定频设备无法线性适配负荷变化，使脱硫单耗较其他负荷提升 18%~25%；投油稳燃会导致脱硫石膏中有效成分降低，不再适用于纸面石膏板、水泥缓凝剂等主要利用途径。【结论】研究揭示了深度调峰对脱硫系统运行的多维影响，为燃煤机组在深调工况下实现经济、高效、环保运行提供了理论依据与数据支撑。

［关 键 词］燃煤机组；深度调峰；烟气脱硫；性能评价；固废利用

［引用本文格式］姜龙，宋云畅，徐扬，等. 深度调峰对燃煤机组脱硫系统运行的影响[J]. 热力发电，2026, 55(10): 172.
Jiang L, Song Y C, Xu Y, et al. Impact of deep peak regulation operation on desulfurization system in coal-fired power unit[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(10): 172.

Impact of deep peak regulation operation on desulfurization system in coal-fired power unit

Jiang Long, Song Yunchang, Xu Yang, Yang Xueting, Li Decheng
(State Grid Jibei Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China)

Abstract: [Objective] Against the backdrop of the transformation toward the new power system, coal-fired power units have shifted from traditional main power suppliers to “ballast stones” for power supply security and “stabilizers” for system regulation. However, deep peak regulation operation, characterized by frequent and rapid load changes and prolonged low-load conditions, poses significant challenges to the safe and stable operation of desulfurization systems and the compliance with pollutant emission standards. [Methods] To address these issues, this study innovatively developed targeted secondary evaluation parameters at first, including the difficulty in desulfurization slurry level control, desulfurization resistance coefficient, and applicability of desulfurization gypsum utilization pathways, thereby significantly enriching the existing monitoring and evaluation methods for desulfurization system operation. Secondly, taking a 1000 MW coal-fired power unit equipped with a limestone wet flue gas desulfurization system as the research object, this study conducted comprehensive and systematic evaluations on the desulfurization system’s operating status, SO_2 emission characteristics, gypsum quality, and utilization under different load conditions using on-site test detection, online parameter monitoring, and the newly developed secondary evaluation parameters. [Results] The results indicate that under low-load (deep peak regulation) conditions: due to the sharp reduction in flue gas flow rate and notably poor flow field uniformity, the relative deviations between online monitoring values and experimental test values of SO_2 concentrations at the desulfurization outlet and total exhaust outlet expand to 11.1% and 16.9%, respectively; coupled with severe water balance imbalance and slurry foaming caused by unburned organics from oil-firing, the average difficulty in liquid level control increases by 75% compared with that at high load, with the maximum liquid level exceeding 9.8 m

收 稿 日 期：2025-12-26 修 回 日 期：2026-02-02 接 受 日 期：2026-02-05
基 金 项 目：国家电网冀北公司科技项目（52018K25000S）
Supported by: Science and Technology Projects of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. (52018K25000S)
第一作者简介：姜龙（1988），男，博士，正高级工程师，主要研究方向为电力环保、智慧电厂等，kaveykikiy@163.com。

and highlighting prominent overflow risks; the blockage of demisters is significantly aggravated, contributing 47.4% and 59.4% respectively to the noticeable increase in resistance coefficients of the desulfurization system and demisters; fixed-frequency equipment such as slurry circulation pumps and oxidation fans cannot linearly adapt to load changes, leading to notably insufficient gas-liquid mass transfer and an 18%~25% increase in desulfurization specific energy consumption compared to other loads; oil-firing for stable combustion reduces the key effective component of desulfurization gypsum to 79.2% and increases free water and organic matter content, making it no longer applicable to major and mainstream utilization pathways such as gypsum board and cement retarder. [Conclusion] These findings comprehensively reveal the multi-dimensional impacts of deep peak regulation on desulfurization systems, providing a solid theoretical basis and highly reliable data support for coal-fired power units to achieve economical, efficient, and environmentally friendly operation under deep peak regulation conditions.
Key words: coal-fired power unit; deep peak regulation operation; flue gas desulfurization; performance evaluation; solid waste utilization

在新型电力系统转型的大背景下，燃煤机组已从传统的电力供应主力，转变为电力保供“压舱石”和系统调节“稳定器”[1]。燃煤机组灵活性调节下负荷频繁快速变化、深度调峰低负荷运行对燃煤机组的环保设施安全运行产生了较大影响[2]。在当前以小时均值作为污染物排放考核标准、实际燃煤煤质下降以及低负荷工况下锅炉氧量偏高的多重因素影响下，机组短期内排放浓度超标的情况时有发生[3]。燃煤电厂环保设施能否在安全、稳定、经济、低碳的前提下实现达标运行，也已成为制约燃煤机组深度调峰能力的关键环节[4]。

环保系统中脱硫系统的运行波动敏感性、排放达标约束性最显著，且位于环保系统的最末端，上游各系统运行的好与坏都会直接影响脱硫系统运行的性能[5]。相较于脱硝系统可通过还原剂喷射量快速调节、除尘系统受负荷影响相对平缓的特点，脱硫系统对工况变化的响应存在滞后性和控制离散性[6]，且参数耦合（物理、化学）关系复杂[7]，其运行稳定性直接制约机组深度调峰的极限能力，因此成为深度调峰工况下环保系统研究的核心对象。

为应对深度调峰对脱硫系统安全稳定运行带来的上述挑战，现有研究已从监测预防、运行优化、技术改造等多个角度展开了研究探索。在设备状态监测方面，李玉阁等[8]针对脱硫系统关键材料腐蚀问题，提出了适宜的工艺控制措施和检验监测策略，指导识别低负荷酸性环境下吸收塔内壁的腐蚀风险；占贺春等[9]基于动态径向基函数（RBF）神经网络构建了湿法脱硫设备故障预警模型，实现对循环泵磨损、喷嘴堵塞等故障的提前预判。在优化运行方面，高伟等[10]以某 660 MW 机组为研究对象，建立了湿法脱硫系统动态模型，提出浆液循环泵定频运行优化策略，提高降负荷过程中的节能效果；罗启圭等[11]基于支持向量机（SVM）构建了脱硫效率与能耗协同预测模型，揭示了浆液密度、氧含量与 SO_2 排放质量浓度的耦合规律，提出实现减排与节能的最优运行方式。在灵活性改造方面，高沛荣等[12]通过为循环泵、氧化风机加装变频装置并优化喷淋层设计，使机组在 30%额定负荷下仍能维持稳定运行；吴志超等[13]开展了新型高效脱硫吸收剂的试验研究，通过优化吸收剂粒径分布与活性成分占比，使低负荷工况下脱硫效率提升至 98.5%以上，且提高石灰石利用率 15%。上述研究侧重于对脱硫系统某个特定方面或局部设备进行改进与评估，这种单一视角的研究难以全面揭示深度调峰工况下各参数间的相互作用与连锁反应，尚缺乏从多维度关联的角度、系统性地开展深度调峰工况下脱硫系统的试验、监测与综合评估。

针对上述存在问题，本研究以某 1 000 MW 燃煤机组为研究对象，分别借助现场试验检测及化验、在线测点参数监控及分析、二次评价参数开发及评价等手段，开展不同负荷工况下脱硫系统运行状态及 SO_2 排放特性评估。在丰富现有脱硫系统运行评估手段基础上，分别从脱硫系统在线测点监测代表性、脱硫液位控制难度、脱硫系统阻力变化、脱硫运行经济性、脱硫石膏品质及应用途径、总排口 SO_2 排放等方面，系统性地探究深度调峰工况对脱硫系统运行的影响规律，指导脱硫系统安全、稳定、经济运行。

1 实验及方法

1.1 研究对象

所选某 1 000 MW 煤电机组锅炉为高效超超临界参数变压运行直流炉，采用Π型布置方式，前后墙对冲燃烧方式。机组设计煤种选用平朔安太堡煤，燃煤煤质波动性较小，收到基硫分长期控制在 0.87%以内。机组脱硫系统采用石灰石湿法烟气脱硫工艺，布置双塔双循环系统，其中一级脱硫塔含有 A、B、C 3 台浆液循环泵，二级脱硫塔含有 D、

E、F 3 台浆液循环泵（图 1）。

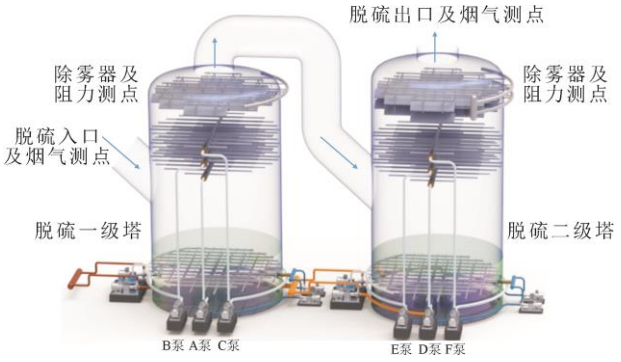


图 1 机组脱硫系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the unit desulfurization system

1.2 试验检测及数据采集方法

分别在高负荷（负荷率≥90%）、中负荷（负荷率介于 60%~70%）、低负荷（负荷率≤40%，深调工况）3 个负荷段开展现场试验监测及数据采集分析。脱硫系统出入口及烟囱出口处的 SO_2 质量浓度分布检测、SO_2 在线测点代表性评估等现场试验分别在 100%负荷率（1 000 MW）、65%负荷率（650 MW）、35%负荷率（350 MW）稳定工况下进行。投油燃烧前后分别进行脱硫排浆操作，并于石膏脱水皮带末端采集脱硫石膏样品进行成分及理化性质检测。上述试验具体使用方法和仪器见表 1。

表 1 试验项目与方法

Tab.1 Testing items and methods

项目	位置	试验标准
SO_2 质量浓度	脱硫入口、脱硫出口、烟囱出口	GB/T 16157、DL/T 260、DL/T 2502
O_2 质量浓度	脱硫入口、脱硫出口、烟囱出口	
石膏组分及理化性质	石膏脱水皮带末端	GB/T 5484、GB/T 37785、GB 6566、GB 21371、NY/T 3936

用于脱硫阻力分析、经济性分析、污染物超标频次统计分析、水平衡分析等的在线测点数据选自上述 3 个负荷工况段内稳定运行时数据（2025 年 1 月—6 月，高、中、低负荷运行时长占比分别为 40.0%、17.6%、28.2%）。除稳定工况外，在线监测参数总排口 SO_2 排放浓度还需采集变负荷工况数据：1）负荷变化速率不小于 1%Pe/min 的运行工况；2）每分钟内负荷最大值与最小值之间的差值不小于 10 MW 的运行工况。

1.3 脱硫液位控制难度评价

脱硫塔内液位同时受供浆、排浆、供水、排水等多种运行操作影响，缺少可综合评价控制难度的定性及定量评价指标指导脱硫液位平衡运行。读取脱硫塔内浆液液位 n 个连续相同时间间隔的运行数据 h_1、h_2、…、h_n，其中 h_n 为当前时刻的浆液液位值。衡量水平衡控制难易程度，需综合考虑液位的波动性、液位与控制限值的接近程度。数值波动性越大、液位越接近于控制上限值，越不利于运行人员进行液位的控制。

计算所采集液位数据的波动性评价指标。

$$M_{\mathrm{MR},i}=\left|h_{i+1}-h_i\right| \tag{1}$$

$$M_{\mathrm{AMR},i}=\frac{1}{n-1}\times\sum_{1}^{n-1}M_{\mathrm{MR},i} \tag{2}$$

$$M_{\mathrm{VC}}=\min\left(\frac{M_{\mathrm{AMR}}}{M_{\mathrm{MR,max}}},1.0\right) \tag{3}$$

式中：h_i 为各时刻的液位值，m，i=1, 2, …, n；$M_{\mathrm{MR},i}$ 为各时刻的液位波动值，m；$M_{\mathrm{AMR},i}$ 为所有时刻的液位波动均值，m；$M_{\mathrm{MR,max}}$ 为最大波动阈值，m，根据历史运行数据极值或机组情况设定常数；M_{VC} 为液位波动性评价指标，无量纲；min 为取最小值函数。

计算所采集液位数据控制限值接近度评价指标。

$$L=\max\left(\frac{\frac{1}{n}\times\sum_{1}^{n}h_i-h_{\mathrm{target}}}{h_{\mathrm{up}}-\mathrm{h}_{\mathrm{target}}},0\right) \tag{4}$$

式中：h_{target} 为最佳运行液位，m，根据机组运行条件自行设定；h_{up} 为最高运行液位，m，参考设备运行规程设定；L 为控制限值接近度评价指标，无量纲；max 为取最大值函数。

计算脱硫浆液液位控制难度系数。

$$K=M_{\mathrm{vc}}\times(1+\alpha\times L) \tag{5}$$

$$K_{\mathrm{s}}=\min[\max(0,\ A\times\lg(B\times K+1)),\ 100] \tag{6}$$

式中：α为放大权重系数，无量纲，默认值为 2；A、B 为缩放系数，用于调整函数的敏感度和范围，根据机组实际运行情况进行合理设定；K 为控制难度系数，无量纲；K_{s} 为归一化控制难度系数，无量纲，介于 1~100。

根据机组运行自身特性及运行人员液位调整控制实践经验，合理制定液位控制难度分数评价等级，具体见表 2。

表 2 液位控制难度评价等级

Tab.2 Difficulty evaluation level of liquid level control

K_s	难度等级	定性评价
1~40	低	控制良好
41~70	中	需引起注意
71~90	高	难以控制
91~100	紧急	极难控制

1.4 脱硫系统阻力系数

建立一个去除负荷、烟气量等变量因素外，可用于评估脱硫系统本身阻力变化的系数，定量评估脱硫系统内的堵塞情况。

$$v=\frac{Q_{\text{in}}}{S\times 3\ 600} \tag{7}$$

$$N=\frac{2\times\Delta p}{\rho_{\text{gas}}\times v^2} \tag{8}$$

式中：S 为脱硫塔内部截面积，m^2；v 为脱硫塔内部在该截面烟气流速，m/s；Q_{in} 为脱硫入口烟气流量，m^3/h；Δp 为脱硫塔出入口间的压差，Pa；ρ_{gas} 为脱硫塔内烟气密度，kg/m^3；N 为脱硫阻力系数，无量纲。

1.5 脱硫经济性评价

脱硫单耗即脱硫系统脱除单位 SO_2 所需成本，可反映脱硫系统经济性的高低及运行的经济性。脱硫运行成本主要由电费 C_e、水费 C_w、吸收剂费用 C_s、SO_2 排放环保税 C_t 组成。

1）脱硫运行 SO_2 排放环保税

$$C_{\text{t}}=\frac{C_{\text{out}}\times Q_{\text{out}}\times\theta\times 10^{-6}}{0.95} \tag{9}$$

式中：C_t 为脱硫运行 SO_2 排放环保税，元/h；C_{out} 为总排口 SO_2 排放质量浓度，mg/m^3；Q_{out} 为总排口烟气流量，m^3/h；θ为排放税额，根据《中华人民共和国环境保护税法》及所在地区具体规则选定。

2）脱硫运行水费

$$C_{\text{w}}=F_{\text{FGD}}\times D_{\text{w}} \tag{10}$$

式中：C_w 为脱硫运行水费，元/h；F_{FGD} 为工艺水耗量，t/h；D_w 为工艺水单价，元/t。

3）脱硫运行电费

脱硫系统电费的成本即脱硫系统运行中各设备的电费总和，分为高压设备及低压设备。对于低压设备而言直接读取低压变的功率数据，对于高压设备（浆液循环泵、氧化风机、脉冲悬浮泵等），功率计算公式为：

$$W_i=I_i\times U_i\times\eta\times 1.732 \tag{11}$$

式中：W_i 为各脱硫设备的运行功率，kW；I_i 为各脱硫设备的运行电流，A；U_i 为各脱硫设备的运行电压，V；η为高压电机的功率因数，取 0.85。

4）脱硫石灰石成本

$$C_{\text{s}}=m_{\text{s}}\times D_{\text{s}} \tag{12}$$

式中：C_s 为脱硫运行吸收剂费用，元/h；m_s 为石灰石耗量，t/h；D_s 为石灰石单价，元/t。

5）脱硫运行成本和单耗

$$C_{\text{FGD}}=C_{\text{e}}+C_{\text{w}}+C_{\text{s}}+C_{\text{t}} \tag{13}$$

$$E_{\text{FGD}}=\frac{C_{\text{FGD}}}{(C_{\text{in}}-C_{\text{out}})\times Q_{\text{in}}\times 10^{-9}} \tag{14}$$

式中：C_e 为脱硫运行电费，元/h；C_{in} 为脱硫入口 SO_2 排放质量浓度，mg/m^3；C_{FGD} 为脱硫运行总成本，元/h；E_{FGD} 为脱硫运行单耗，元/t SO_2。

1.6 石膏利用适用性分析

为填补现有燃煤电厂脱硫石膏综合利用途径缺少定性及定量评价的技术空白，开发石膏利用适用性定量评价指标。脱硫石膏各综合利用途径对其各项指标都有限制值要求，如标准规定值或产品设计值，可分为最低含量控制值、最高含量控制值、区间含量控制值。首先对脱硫石膏的理化性质或成分含量指标实际值进行归一化处理[14]；再计算各指标数值的权重系数及任意综合利用途径适用性指标 Y。适用性指标 Y 均已进行归一化处理，使取值范围介于[–1,1]：$Y>0$ 时，表明脱硫石膏适合此综合利用途径，且越大越适用；$Y<0$ 时，表明脱硫石膏不适合此综合利用途径，且越小越不适用。

$$\omega_i=\frac{1}{Z_i}\Big/\sum_1^t\frac{1}{Z_i} \tag{15}$$

$$Y=\frac{2\times\sum_1^t(Z_i\times\omega_i)-2+\text{Roundup}[\min(Z_i)-0.5]}{2^{\text{Roundup}[\min(Z_i)-0.5]}} \tag{16}$$

式中：Z_i 为石膏第 i 个指标的归一化数值，无量纲；ω_i 为石膏第 i 个成分含量的权重系数；t 为石膏理化性质及组分指标个数；Roundup 为向上取整函数，即不考虑四舍五入取比该值大的最小整数，比如 2.4 取 3；Y 为石膏在该综合利用途径中的适用性指标。

2 结果与讨论

2.1 在线测点监测代表性评估

不同负荷工况下，该燃煤机组脱硫入口、脱硫出口、烟囱总排口处 SO_2 质量浓度在线监测值（单点测量）与所在烟道截面 SO_2 质量浓度平均试验测试值的对比如图 2 所示。不同负荷工况下，脱硫入口在线测点代表性无显著差异性，试验与在线测点间的偏差值介于 28.7~39.5 mg/m^3（相对偏差 1.1%~1.6%）。低负荷（深度调峰工况）下，脱硫出口及烟囱总排口 SO_2 质量浓度在线测点的代表性均下降，与各自测点所在截面试验平均值间的偏差值较高负荷的 1.5、2.1 mg/m^3（相对偏差分别为 6.6%、

10.0%）分别扩大到 2.9、4.1 mg/m³（相对偏差分别为 11.1%、16.9%）。低负荷时烟气量锐减导致脱硫出口烟道内烟气流速降低，流场均匀性变差且 SO_2 质量浓度呈局部梯度分布，单点在线监测难以覆盖全截面质量浓度差异，进而增大测量相对偏差。总排口偏差更大的原因在于此处在线测点安装位置距离上游烟道的弯头处距离较近，低负荷下流场分布均匀性较差且存在涡流现象。

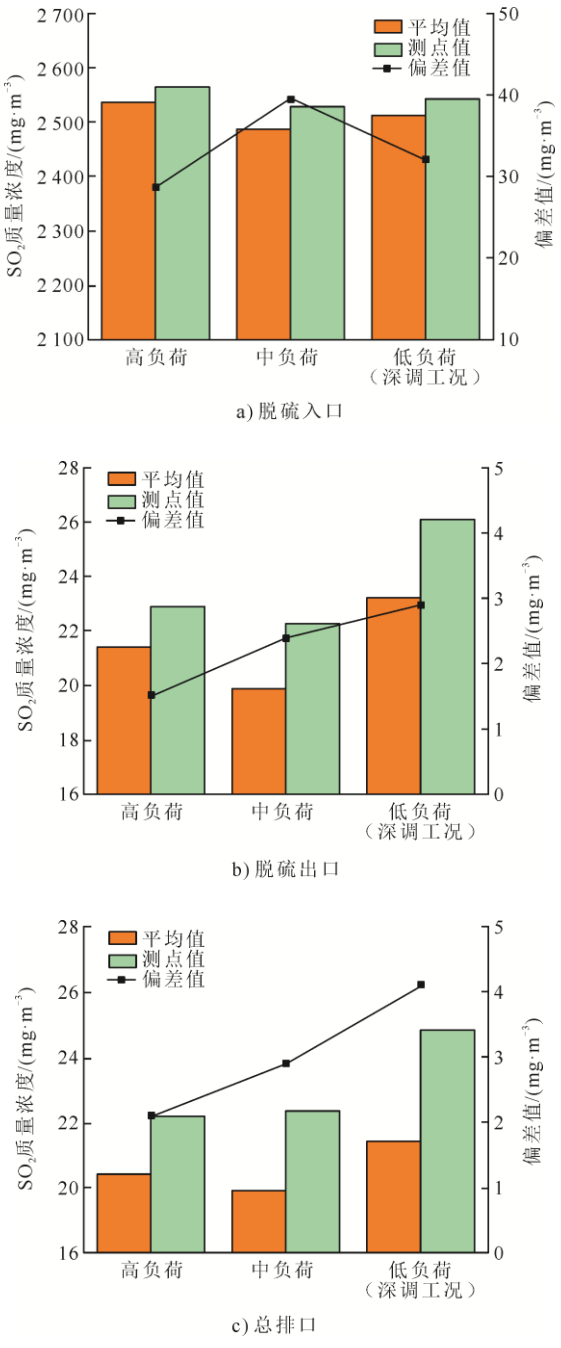
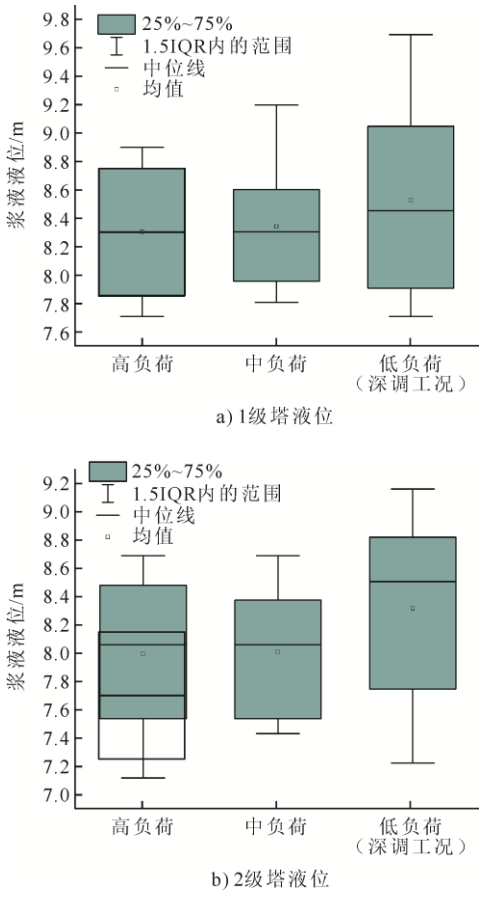


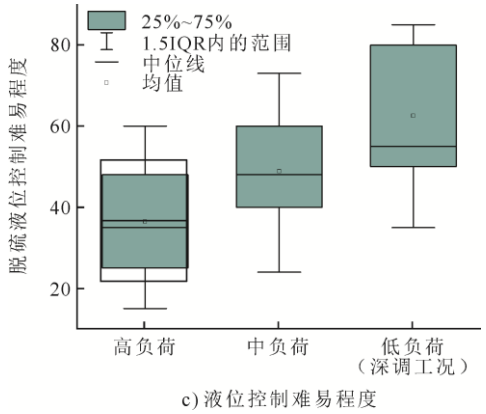
图 2 脱硫 SO_2 在线测点与所在烟道平均值对比

Fig.2 Comparison of desulfurization SO_2 online measurement point values and flue gas average values

2.2 脱硫液位控制难度

通过采集机组脱硫系统 2025 年 1 月—6 月运行期间的液位在线监测参数数据，并按照 1.3 节的计算方法，分别得到 2 个吸收塔内浆液液位的历史波动分布及脱硫系统整体液位控制难易程度分布（图 3），运行数据均分布在 1.5 倍四分位距 IQR 内，表明无异常值。高、中负荷时脱硫系统液位分布区间分别稳定在 7.6~8.8 m、7.8~8.7 m，液位控制难度均值分别为 36 与 49，控制稳定性良好；低负荷时受动态水平衡失衡与测量偏差叠加影响，液位波动幅度扩大（±0.8 m），图 3a)与图 3b)中厢式图波动范围分别是高、中负荷的 1.5 倍与 1.7 倍，液位控制难度均值升至 63，且最高液位值突破 9.8 m，液位控制难度较高负荷、中负荷分别提升 75%、29%。低负荷时烟气量锐减导致吸收塔内蒸发量较额定负荷下降 60%以上，而除雾器冲洗水、滤液水等补水量难以实现线性匹配，易形成“补水过剩-液位骤升”的失衡循环；低负荷投油稳燃使烟气携带的未燃尽有机物与重金属离子进入浆液，引发浆液起泡与表面张力增加，更易形成“虚假液位”，导致 DCS 显示值与实际液位存在偏差。





c) 液位控制难易程度

图 3　不同负荷工况下脱硫液位及控制难易程度分布
Fig.3 Distribution of desulfurization liquid level and control difficulty under different load conditions

2.3 脱硫系统阻力系数

图 4 为机组连续运行期间（2025 年 1 月—6 月），不同负荷对脱硫系统整体阻力系数及除雾器阻力系数增长贡献的占比，其中烟气流速计算截面为脱硫除雾器所处烟道。由图 4 可知：随着机组的持续运行，脱硫系统整体及除雾器的阻力系数，分别由 14.5、18.2 增长到 18.9、24.8；虽然低负荷累计运行时长（占比 28.2%）远小于高负荷（占比 40%），但对脱硫系统整体及除雾器在半年内的阻力系数增长贡献占比均最大，分别为 47.4%与 59.4%。

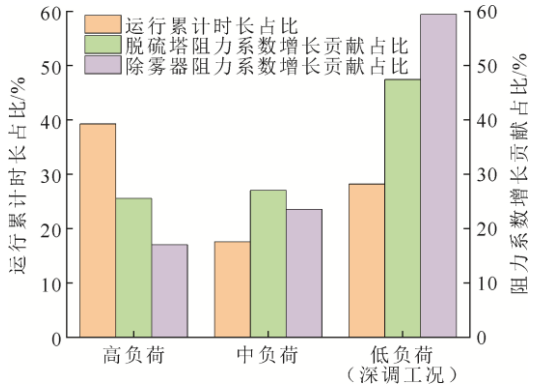


图 4　不同负荷对脱硫塔阻力系数增长贡献占比
Fig.4 Proportion of contribution ratios of different loads to the increase of resistance coefficient of desulfurization tower

除雾效率与烟气流速呈显著正相关[15]，深调工况时的低烟气流速流经脱硫除雾器时，气流弯曲流动产生的离心力不足以使携带的细小液滴从烟气中分离出来，增加除雾器叶片上滞留的液滴量。水平衡调控进一步减少除雾器冲洗水量致使冲洗水效果变差，使得除雾器表面液滴沉积加剧，局部通道逐渐堵塞。

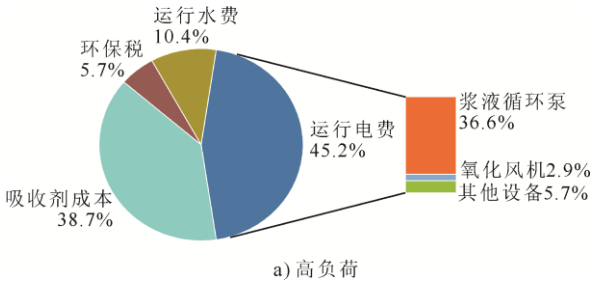
2.4 脱硫经济性分析

表 3 为机组运行期间（2025 年 1 月—6 月）不同负荷下脱硫系统的脱硫效率、脱硫运行成本及脱硫单耗对比。因同时受脱硫入口 SO_2 质量浓度（煤质变化）、出口 SO_2 质量浓度、供浆量、浆液循环泵运行方式等因素的共同影响，故脱硫效率随负荷变化未呈现显著趋势性规律。

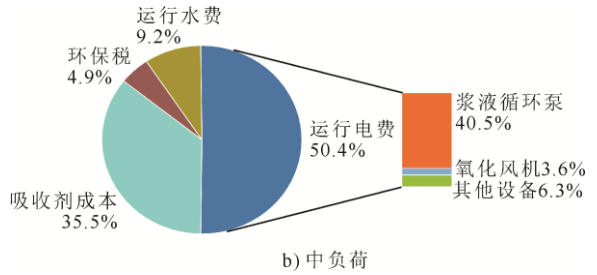
表 3　不同负荷工况脱硫运行经济性
Tab.3 Economic efficiency of desulfurization operation under different load conditions

参数	高负荷	中负荷	低负荷
脱硫效率/%	94.2~99.8	93.9~99.5	94.4~99.6
脱硫总成本/(元 h^{-1})	4 645~8 362	3 806~6 852	2 687~4 837
脱硫单耗/(元 t^{-1})	554~732	604~797	683~902

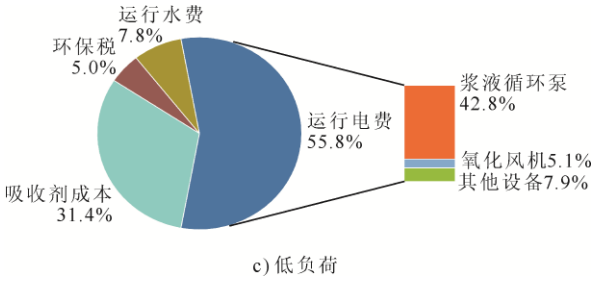
由表 3 可见，随着负荷的降低，由于需脱除的 SO_2 总量减少故脱硫运行总成本呈下降趋势，但脱硫（脱除的 SO_2）单耗呈上升趋势（较高负荷提升 18%~25%），即低负荷降低脱硫系统运行经济性。这是因为深度调峰时烟气量下降，偏离设计烟气流速区间，吸收塔内气液流态由湍流转为层流，气液接触不充分，两相间传质阻力增大、传质效率降低，传质单元高度（HTU）可增加 20%~30%[10]，为保障脱除效率需提高浆液循环倍率即增加浆液循环泵出力；高功率的浆液循环泵、氧化风机等为定频运行设备，无法有效随负荷工况变化进行线性调节，为保证 SO_2 排放达标并减少浆液循环泵的启停操作，低负荷时长期相对高功率运行；随着负荷降低，SO_2 脱除总量和排放总量的下降直接使物耗、环保税的成本按比例缩减，共同使得以浆液循环泵为主的运行电费占比由 45.2%提升至 55.8%（图 5）。



a) 高负荷



b) 中负荷



c) 低负荷

图 5 不同负荷工况下脱硫运行成本组成

Fig.5 Cost composition of desulfurization operation under different load conditions

2.5 机组总排口 SO_2 排放分析

图 6 为机组运行期间（2025 年 1 月—6 月）内不同工况下总排口 SO_2 排放质量浓度超标频次（SO_2 排放质量浓度持续超过排放限值 1 min 计为 1 次）的占比分析。

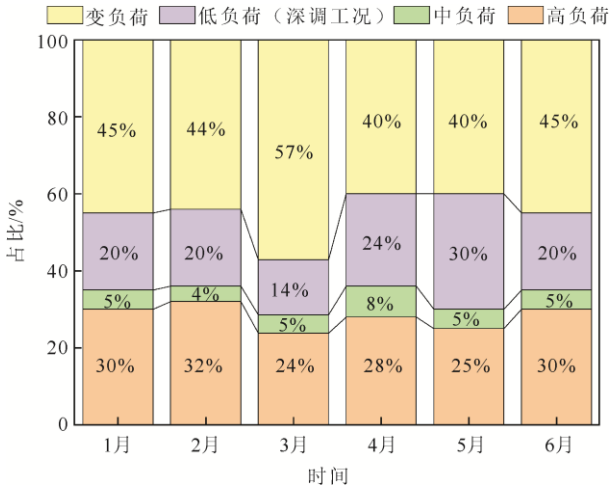


图 6 不同负荷工况下 SO_2 排放超标次数占比

Fig.6 Proportion of SO_2 emissions exceeding the standard under different load conditions

由图 6 可知，变负荷工况是最易引起总排口 SO_2 排放质量浓度超标的运行工况，半年内超标频次占比为 44.6%，这主要是由于工况变化中（尤其是升负荷时）运行人员调整不及时造成 SO_2 的短时内超标。在稳定运行工况中，高负荷超标占比稳定在 24%~32%，源于锅炉燃用高硫煤及脱硫浆液中毒时，超出脱硫系统所能脱除 SO_2 量上限。低负荷超标占比波动为 14%~30%，仅次于高负荷，原因在于：烟气量锐减、烟气流速下降时削弱了脱硫吸收塔内气液传质效率；低负荷投油稳燃产生的未燃尽油污包裹石灰石颗粒，抑制其溶解与 SO_2 吸收反应的活性位点；含氧量高折算 SO_2 质量浓度值偏高、脱硫出口 SO_2 在线测点准确性下降，进一步增加了 SO_2 排放控制的难度。

2.6 投油燃烧对脱硫石膏的影响

对象电厂投油前后脱水石膏的主要成分对比如表 4 所示。由表 4 可见，由于“石灰石致盲”及浆液恶化等影响，石膏中的有效成分 $CaSO_4\cdot 2H_2O$ 显著下降至 79.2%，不满足 GB/T 37785 中烟气脱硫石膏的品质要求；石灰石的溶解及晶体的氧化过程均受到显著影响，即 $CaCO_3$ 和 $CaSO_3\cdot 1/2H_2O$ 的含量分别增加到原来的约 6.8 和 4.7 倍；由于油污以及未完全氧化的亚硫酸产物等的存在，更易造成真空皮带机滤布空隙的堵塞，旋流器和真空皮带机的效率下降，导致石膏浆液脱水困难，游离水含量由 9.7%提升至 14.5%，仅满足 GB/T 37785 中三级烟气脱硫石膏的品质要求；上述变化均直接影响脱硫石膏的综合利用。

表 4 脱硫石膏利用途径品质要求及适用性评价

Tab.4 Quality requirements and applicability evaluation of utilization pathways for desulfurization gypsum

组分及理化性质	脱硫石膏常见利用途径的品质要求					脱硫石膏样品化验结果	
	纸面石膏板[16]	土壤调理剂[17]	水泥组分[18]	水泥缓凝剂[16]	筑路及回填[16]	投油前	投油后
游离水质量分数/%	≤10.0	≤5.0		≤12.0	≤15.0	9.7	14.5*
$CaSO_4\cdot 2H_2O$ 质量分数/%	≥90.0		≥75.0	≥90.0		91.4	79.2*
$CaSO_3\cdot 1/2H_2O$ 质量分数/%				≤2.00		0.34	2.30*
CaO 质量分数/%		≥30.0				31.0	31.8
MgO 质量分数/%	≤0.10					0.08	0.09
Na2O 质量分数/%	≤0.060					0.056	0.06
Na 质量分数/%		≤0.200				0.042	0.045
Cl^-质量分数/%	≤0.010		≤0.500		≤0.040	0.007	0.009
F^-质量分数/%		≤0.200			≤0.200	0.013	0.015
S 质量分数/%		14.0~20.0				17.1	15.3
pH 值	5.0~9.0	5.5~8.5	≥5.0			5.8	5.6
有机物质量分数/%	≤0.100					0.035	0.870
汞/($\times 10^{-6}$)		≤2.00				0.58	0.49

续表 4

组分及理化性质	脱硫石膏常见利用途径的品质要求					脱硫石膏样品化验结果	
	纸面石膏板[16]	土壤调理剂[17]	水泥组分[18]	水泥缓凝剂[16]	筑路及回填[16]	投油前	投油后
砷/(×10^{-6})		≤5.00				0.53	0.54
镉/(×10^{-6})		≤2.000				0.027	0.029
铅/(×10^{-6})		≤25.00				2.47	2.23
铬/(×10^{-6})		≤25.00				32.34*	31.78*
内照射指数			≤1.0			0	0
外照射指数			≤1.000			0.025	0.025
投油前适用性	0.263	–0.312	0.187	0.215	0.714		
投油后适用性	–0.987	–0.685	0.092	–0.528	0.489		

注：*为投油后超标参数。

表 4 同时列举了脱硫石膏在 5 种常用利用途径中的品质要求，按照 1.6 节的计算评价方法，得到如图 7 所示的投油燃烧前后脱硫石膏样品的利用途径分析。由图 7 可知，投油后脱硫石膏在占全国脱硫石膏利用总量超 90%的两大主流途径（纸面石膏板、水泥缓凝剂）中完全丧失适用性（适用性指标 Y 值分别为–0.987、–0.528），仅筑路及回填途径保留一定适用性（Y 值为 0.489），但附加值较低。这主要是由于，投油后脱硫石膏中 $CaSO_4\cdot 2H_2O$ 不足、有机物超标及游离水超限导致纸面石膏板强度降低与成型性受损；$CaSO_3\cdot 1/2H_2O$ 超标及 $CaSO_4\cdot 2H_2O$ 活性不足影响水泥缓凝剂水化凝结稳定性；投油后脱硫石膏中游离水与铬含量双重超标不适用于土壤调理剂途径（Y 值为–0.685）；脱硫石膏的有效成分不足仅能限量作为辅助掺合料应用于水泥组分途径（Y 值为 0.092）。

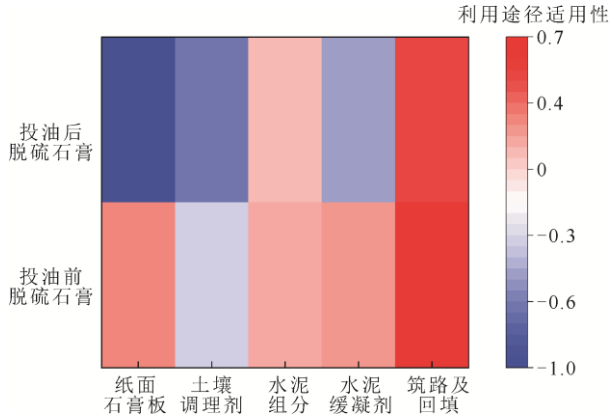


图 7 投油燃烧前后脱硫石膏样品的利用途径分析
Fig.7 Analysis of utilization pathways of desulfurization gypsum samples before and after oil combustion

3 结　论

深度调峰运行给燃煤电厂机组脱硫系统的安全稳定经济运行、SO_2 的达标排放带来新的挑战。

1）低负荷下烟气流速锐减，导致脱硫出口、总排口 SO_2 质量浓度在线测点相对偏差分别扩大至 11.1%、16.9%；叠加水平衡失衡与浆液起泡，液位控制难度均值较高负荷提升 75%，溢流风险凸显；加剧除雾器堵塞，对脱硫系统及除雾器阻力系数增长贡献达 47.4%、59.4%；定频设备无法线性适配负荷变化，脱硫单耗较其他负荷提升 18%~25%。

2）变负荷工况是最易引起总排口 SO_2 排放质量浓度超标的运行工况，频次平均占比为 44.6%；在稳定运行工况中，高负荷工况因脱硫量超限及浆液中毒造成超标占比 24%~32%，低负荷工况（深度调峰工况）因传质效率降低及投油稳燃带入杂质等造成超标占比 14%~30%。

3）低负荷工况投油稳燃显著影响脱硫石膏的品质，降低有效成分 $CaSO_4\cdot 2H_2O$ 质量分数至 79.2%，提高游离水和有机物等含量，导致产品不再适用于纸面石膏板、水泥缓凝剂等脱硫石膏的主要消纳途径。

针对上述现象，建议为浆液循环泵等关键设备加装变频装置，优化在线测点布置方案与除雾器冲洗策略，投油稳燃时控制油量并强化浆液净化，以适配深度调峰工况，提升脱硫系统运行经济性与石膏利用率。

[参 考 文 献]

[1] 杨勇平, 陈衡, 郝俊红, 等. “双碳”目标下我国燃煤发电转型升级发展路径[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6900.
Yang Y P, Chen H, Hao J H, et al. Development pathways for the transformation and upgrading of China’s coal-fired power generation under the goals of carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6900.

[2] 姜龙, 宋云畅, 徐扬, 等. 深度调峰对燃煤机组脱硝系统运行的影响[J]. 热能动力工程, 2026, 41(5): 57.
Jiang L, Song Y C, Xu Y, et al. Impact of deep peak regulation operation on denitrification system in coal-fired

power unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2026, 41(5): 57.
[3] 曲立涛, 于洪海, 李超, 等. 超低排放煤电机组主要大气污染物排放分析[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 196.
Qu L T, Yu H H, Li C, et al. Emission analysis of main air pollutants from ultra-low emission coal-fired power units[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 196.
[4] 丁湧. 1 000 MW 超超临界燃煤锅炉深度调峰研究[J]. 发电技术, 2024, 45(3): 382.
Ding Y. Research on deep peak shaving performance of 1 000 MW ultra-supercritical coal-fired boiler[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(3): 382.
[5] 柴有国, 何晓燕, 苏永健, 等. 考虑安全环保及补偿的火电机组调峰经济性研究[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 199.
Chai Y G, He X Y, Su Y J, et al. Economic research on peak shaving of thermal power units considering safety-environmental protection and compensation[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 199.
[6] 金秀章, 仲轩正. 基于逐次变分模态分解-深度学习的燃煤电厂脱硫塔出口 SO_2 浓度预测[J]. 计量学报, 2026, 47(2): 297.
Jin X Z, Zhong X Z. SO_2 prediction at the desulfurization tower outlet of coal-fired power plants using successive VMD and deep learning[J]. Acta Metrologica Sinica, 2026, 47(2): 297.
[7] 黄晓媛, 莫建松, 吴忠标. 石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统的数值模拟[J]. 化学反应工程与工艺, 2017, 33(1): 55.
Huang X Y, Mo J S, Wu Z B. Numerical simulation of wet limestone-gypsum flue gas desulfurization system[J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2017, 33(1): 55.
[8] 李玉阁, 潘贤魁, 陈晓林, 等. 不锈钢在脱硫装置高含硫环境下防腐蚀研究[J]. 石油化工设备技术, 2021, 42(1): 45.
Li Y G, Pan X K, Chen X L, et al. Study on corrosion resistance of stainless steel in high sulfur content environment of desulfurization device[J]. Petrochemical Equipment Technology, 2021, 42(1): 45.
[9] 占贺春, 黄福珠. 基于智能监控的环保设施脱硫设备故障预警方法研究[J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(5): 241.
Zhan H C, Huang F Z. Study on fault warning method for desulfurization equipment of environmental protection facilities based on intelligent monitoring[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2025, 43(5): 241.
[10] 高伟, 刘明, 赵永亮, 等. 燃煤机组脱硫浆液循环泵定频运行控制策略优化及节能分析[J]. 热力发电, 2024, 53(10): 134.
Gao W, Liu M, Zhao Y L, et al. Control strategy optimization and energy saving analysis for slurry circulation pumps in fixed-frequency mode of desulfurization system in coal-fired power units[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(10): 134.
[11] 罗启圭, 李鸣, 周国发. 基于支持向量机的湿法脱硫塔污染治理优化与能效评价[J]. 环境工程学报, 2020, 14(6): 1629.
Luo Q G, Li M, Zhou G F. Synergetic mechanism and evaluation of pollution and energy consumption of wet desulfurization tower based on support vector machine regression[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(6): 1629.
[12] 高沛荣, 何未雨, 王晓乾, 等. 脱硫浆液循环系统灵活性改造及其调节性能试验[J]. 热力发电, 2019, 48(12): 98.
Gao P R, He W Y, Wang X Q, et al. Flexibility transformation of desulfurization slurry circulating system and its adjustment performance test[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(12): 98.
[13] 吴志超, 曾庭华, 姚勇, 等. 新型高效脱硫吸收剂提高火电厂 FGD 系统灵活性的试验研究[J]. 广东电力, 2022, 35(7): 48.
Wu Z C, Zeng T H, Yao Y, et al. Test Research of improving flexibility of FGD system in thermal power plant by using new high-efficient desulfurization absorbent[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(7): 48.
[14] 姜龙, 赵振宁, 杜磊, 等. 一种粉煤灰适用性评价方法、系统、装置及存储介质: CN202210010274.3[P]. 2022-04-29.
Jiang L, Zhao Z N, Du L, et al. Method, system, device and storage medium for fly ash applicability evaluation: CN202210010274.3[P]. 2022-04-29.
[15] 孙志春, 郭永红, 肖海平, 等. 鼓泡脱硫塔除雾器除雾特性数值研究及实验验证[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(8): 68.
Sun Z C, Guo Y H, Xiao H P, et al. Numerical simulation and experimental validation on demisting characteristic of the mist eliminator for jet bubble reactor desulfurization system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(8): 68.
[16] 王志轩, 潘荔, 杨帆. 火电厂脱硫石膏资源综合利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018: 47.
Wang Z X, Pan L, Yang F. Comprehensive utilization of desulfurization gypsum resources in thermal power plants[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018: 47.
[17] NY/T 3936—2021 土壤调理剂及使用规程烟气脱硫石膏原料[S].
NY/T 3936—2021 Soil amendment and code of agricultural practice—by using flue gas desulfurization gypsum[S].
[18] GB/T 21371—2019 用于水泥中的工业副产石膏[S].
GB/T 21371—2019 By-product gypsum used in cement[S].

（责任编辑 邓玲惠）