

高硫煤机组采用双塔串联脱硫系统的运行能耗分析与研究

白关锁

国家电投集团内蒙古白音华煤电有限公司坑口发电分公司，内蒙古 锡林郭勒 026200

DOI:10.61369/WCEST.2025080003

摘要：石灰石-石膏湿法脱硫工艺广泛应用于燃煤电厂，脱硫系统能耗增加导致厂用电率降低。对于燃烧高硫煤的燃煤电厂，这一影响更为显著。本文基于某 $2 \times 660\text{MW}$ 超超临界机组，对比分析了单塔与串联塔脱硫系统的运行能耗情况。结果表明：相比于单塔脱硫系统，串联塔脱硫系统在运行能耗方面优势明显，满负荷工况下每年可节约运行成本932.4万元；优化串联塔浆液循环泵配置也能够在一定程度上降低脱硫系统的运行能耗。

关键词：石灰石-石膏湿法脱硫；串联塔；能耗；烟气阻力

Energy Consumption Analysis and Research on Dual-tower Series Desulfurization System for High-sulfur Coal units

Bai Guansuo

Pithead Power Generation Branch of State Power Investment Corporation Limited Inner Mongolia Baiyinhua Coal Power Co., Ltd., Xilingol, Inner Mongolia 026200

Abstract : The energy consumption of limestone-gypsum wet desulfurization system, which is widely used in coal-fired power plants, reduces the power supply efficiency of the power plant, especially for the high-sulfur coal-fired power plants. Based on the $2 \times 660\text{MW}$ ultra-supercritical unit, this paper analyzed the energy consumption of the single absorption tower and series absorption towers desulfurization system. The results indicated that the series absorption towers desulfurization system has obvious advantages in terms of operating energy consumption compared with the single absorption tower desulfurization system, and at the full load condition, its annual operating cost could save about 9.324 million yuan. Meanwhile, optimizing the configuration of the slurry circulation pump could reduce the operating energy consumption of the desulfurization system.

Keywords : limestone-gypsum wet desulfurization; series absorption towers; energy consumption; flue gas pressure drop

引言

煤炭是我国主要能源之一^[1]，其燃烧过程产生的大量污染物对大气环境造成严重影响。尤其是近年来，随着优质煤炭开采殆尽，高硫煤在能源消费结构中占比不断提升^[2]，对大气环境的威胁不断加剧。为改善日益严重的大气环境污染问题，多个关于大气污染物排放的政策和标准相继出台^{[3][4]}，对燃煤电厂脱硫提出了更为严格的要求。

石灰石-石膏湿法脱硫是目前应用最为广泛的脱硫技术^{[1][2][5]}，具有脱硫效率高、系统运行稳定、经济性良好等优点。然而，湿法脱硫系统的运行需要持续耗能，其总耗能量在电厂总发电量中占比可达1~3%^{[2][6]}，导致电厂煤耗增大，加重了电厂运营压力^{[7][8][9]}，脱硫系统的节能降耗是一个亟需解决的问题。本文通过对某 $2 \times 660\text{MW}$ 超超临界机组脱硫系统进行研究，对比单塔和串联塔湿法脱硫系统的能耗情况，着重分析了关键设备能耗的影响因素，并探讨了湿法脱硫双塔串联系统以及关键设备配置对系统节能降耗的影响。

一、研究对象及方法

(一) 能耗计算方法

脱硫系统中主要耗能设备按照运行状态可分为连续运行设备和间断运行设备^[10]。连续运行设备在脱硫系统投运时始终维持工作状态，主要包括浆液循环泵、氧化风机、增压风机（与引风机合并）、工艺水泵等；而间断运行设备在系统投运期间根据系统运行情况开启或关闭，如石灰石浆液泵和石膏排出泵等。

浆液循环泵对石膏浆液做功，使得浆液具备足够的压力运送至各喷淋层喷洒。脱硫系统浆液循环泵能耗计算公式如下：

$$N_{cp} = \sum_{i=1}^n N_{cp,i} = \sum_{i=1}^n \frac{rgH_i Q_{cp,i} t_{cp,i}}{3.6 \times 10^6 \times 24 \times \eta_{cp,i}} \quad (2-1)$$

式中， N_{cp} 为脱硫系统浆液循环泵单日每小时平均电耗，单位 kWh/h； n 为系统中运行浆液循环泵的数量； $N_{cp,i}$ 为第*i*台浆液循环泵的单日每小时平均电耗，单位 kWh/h； ρ 为循环浆液密度，单位 kg/m³； g 为重力加速度，单位 N/kg； H_i 为第*i*台浆液循环泵的扬程，单位 m； $Q_{cp,i}$ 为第*i*台浆液循环泵的流量，单位 m³/h； $t_{cp,i}$ 为第*i*台浆液循环泵单日运行小时数，单位 h； $\eta_{cp,i}$ 为第*i*台浆液循环泵的效率。

脱硫系统新增的烟气阻力由引风机提供克服的动力。

$$N_{idf} = \sum_{i=1}^n N_{idf,i} = \sum_{i=1}^n \frac{V\Delta P_{idf,i} Q_{idf,i}}{3.6 \times 10^6 \times \eta_{idf,i}} \quad (2-2)$$

式中， N_{idf} 为脱硫系统引风机单日每小时平均电耗，单位 kWh/h； i 为脱硫系统中运行引风机的数量； $N_{idf,i}$ 为第*i*台引风机的单日每小时平均电耗，单位 kWh/h； $\Delta P_{idf,i}$ 为第*i*台引风机的全压升，单位 Pa； $Q_{idf,i}$ 为第*i*台引风机的流量，单位 m³/h； $\eta_{idf,i}$ 为第*i*台引风机的效率。

脱硫系统总能耗可按下式进行计算：

$$N_{system} = N_{cp} + N_{idf} + N_{other} \quad (2-3)$$

式中， N_{system} 为脱硫系统单日每小时平均电耗，单位 kWh/h； N_{other} 为脱硫系统中其他设备单日每小时平均电耗，包括氧化风机、工艺水泵、除雾器冲洗水泵、石膏排出泵、石灰石浆液泵、集水坑泵以及各箱罐搅拌器等，单位 kWh/h。

(二) 研究对象

本文以某 $2 \times 660\text{MW}$ 超超临界机组脱硫系统为研究对象，对比如分析单塔和串联塔湿法脱硫工艺运行能耗。设计工况下，单台超超临界机组脱硫系统入口烟气流量为 $2311200\text{Nm}^3/\text{h}$ （湿基、实际氧），烟气温度 98.8°C ， SO_2 浓度为 5172mg/Nm^3 ，脱硫系统出口烟气 SO_2 浓度不超过 20mg/Nm^3 ，脱硫效率99.6%。

烟气在前塔与喷淋层浆液接触过程中会产生细小的浆液滴，如果不进行除雾，烟气夹带的浆液会带到前后塔之间的联络烟道，对其造成结垢、堵塞、腐蚀等问题，因此前塔设置了一级除雾器，除去烟气中的浆液滴。串联塔湿法脱硫系统对前塔、后塔的pH值进行了分级，前塔pH值较后塔低，利于石膏结晶，因此石膏排出系统设置在前塔；后塔无石膏排出系统，为保证后

塔浆液池正常液位，后塔设置溢流管，浆液可通过溢流管溢流至前塔，后塔浆液池液位较前塔高0.5m左右。

二、运行能耗结果及分析

(一) 关键设备能耗分析

湿法脱硫系统总能耗中，浆液循环泵能耗占比最大，其次为克服系统阻力所需引风机新增能耗，两者之和明显大于其他设备能耗^[8]。

1. 浆液循环泵能耗

石灰石-石膏湿法脱硫反应过程中主要包括石灰石溶解、 SO_2 吸收、亚硫酸根氧化和石膏结晶等。这些过程的最佳反应pH值并不相同。其中，石灰石溶解、亚硫酸根氧化过程以及石膏结晶过程在pH值较低时更容易发生。经验表明石灰石的溶解速率与pH值呈指数增加关系，例如，pH值为4的溶解速率比pH值为6时快5倍[14]。pH值在3.5~5.5的范围内亚硫酸根的氧化速率较高，且变化不大，pH>5.5时，氧化速率急剧下降，显然低pH值对亚硫酸根的氧化是有利的[14]。

当pH值较高时，整个反应则以 SO_2 吸收过程为主。循环浆液的pH值越高吸收速率越高。理论分析表明，低pH值条件下烟气优先吸收HCl而非 SO_2 ，浆液pH值低于2.2时基本上无脱硫作用。对于喷淋吸收塔，在pH值为5.1~5.8时，脱硫效率可从51%~93%，近似于75°的直线增长，当pH值大于5.8时，脱硫效率增加不明显，相反 CaCO_3 的溶解度降低，从而析出，会造成脱硫产物中过剩的 CaCO_3 比例急剧增加。提高循环浆液的pH值，一方面可提高循环浆液中溶解的碱性物质的浓度，另一方面也可提高未溶解的碱性物质的浓度，当其中已溶解的碱性物质耗尽时，未溶解的碱性物质及时溶解，从而保持循环浆液具有足够的碱度。当然，过高的pH值导致过高的过剩率也是不经济的，而且也会影响到投资、能耗等因素，因此脱硫系统pH不宜高于5.8。

对于单塔脱硫系统，上述反应过程均在一个塔内进行，故塔内pH值的设置需综合考虑脱硫效率、亚硫酸根的氧化反应、石灰石溶解、石膏结晶等因素，pH值一般控制在5.2~5.6[14]，系统脱硫效率无法达到最优。而串联塔湿法脱硫系统，对前塔、后塔的pH值进行了分级。前塔的pH值偏低，控制在5~5.4，侧重于石灰石溶解、亚硫酸根氧化过程以及石膏结晶，提高石灰石利用率；后塔的pH值偏高，控制在5.4~5.8，侧重于 SO_2 吸收反应，降低了系统液气比。因此，单塔脱硫的循环浆液量明显高于串联塔脱硫系统。同时，单塔改为串联塔后部分喷淋层的高度降低，浆液循环泵所需的扬程也降低。综合上述两个因素，串联塔的浆液循环泵能耗明显低于单塔。

对比串联塔方案一和方案二的浆液循环泵能耗情况还可以发现，串联塔浆液循环泵的数量增加1台后，其系统浆液循环泵总能耗降低了约6.7%。方案二的浆液循环总量略小于方案一，导致前者的浆液循环泵能耗略低于后者。这一结果表明，充分优化串联塔浆液循环的配置，有利于脱硫系统进一步节能降耗。

2. 引风机能耗

在烟气流量一定的情况下，引风机新增能耗与脱硫系统阻力密切相关。计算公式如下：

$$\Delta P = K \frac{q_v p}{1000 \eta \eta_{tm} \eta_g} - K \frac{q_v (p - \Delta p)}{1000 \eta \eta_{tm} \eta_g} = K \frac{q_v \Delta p}{1000 \eta \eta_{tm} \eta_g} = P \frac{\Delta p}{p}$$

式中， ΔP 为串联塔脱硫系统引风机相比单塔脱硫系统所降低的能耗，单位 kWh/h ； K 为引风机电机的容量富裕系数； q_v 为引风机体积流量，单位 m^3/s ； p 为单塔脱硫系统对应的引风机全压，单位 Pa ； η 为风机总效率； η_{tm} 为引风机传动效率； η_g 为引风机电机效率； ΔP 为串联塔脱硫系统总阻力与单塔脱硫系统总阻力之差，单位 Pa ； P 为单塔脱硫系统对应的引风机能耗，单位 kWh/h 。

单塔方案脱硫系统的总阻力为 3650Pa ，串联塔方案一总阻力为 2850Pa ，串联塔方案二总阻力为 2845Pa ，单塔明显高于串联塔脱硫系统。其中，单塔和串联塔系统的烟道阻力基本一致，其总阻力差异主要体现在吸收塔（含联络烟道）部分。吸收塔内的阻力与喷淋情况密切相关，在烟气流速一定时，浆液循环量越大，吸收塔内阻力越大 [13]。由前述分析已知，单塔脱硫系统的浆液循环量高于串联塔，导致单塔阻力相比于串联塔双塔总阻力（含联络烟道）高出了约 33%。

对比不同浆液循环泵配置的串联塔方案可知，方案一前塔阻力比方案二前塔阻力小 135Pa ，后塔阻力则高出 140Pa 。方案一前塔浆液循环量比方案二小 13%，同时其后塔浆液循环量高出 32%，这一趋势与两种方案的塔内阻力情况一致。而同时，由于方案一的前塔喷淋层数量小于方案二，导致喷淋密度也小，进一步扩大了两者前塔阻力差异。最终导致两种串联塔方案的系统总阻力相差无几。

根据阻力计算结果，以单塔脱硫系统引风机能耗为基准（对应引风机全压 11000Pa ，单台引风机能耗为 6000kWh/h ），折算可知，2 台机组方案一的引风机能耗相比单塔减少 1745kWh/h ，而方案二则减少了 1756kWh/h 。由此可知，串联塔的引风机能耗优于单塔，而调整浆液循环泵配置对引风机能耗的影响甚微。

（二）脱硫系统能耗分析

单塔脱硫系统总能耗比串联塔方案一和方案二总能耗分别高出 35% 和 39% 左右。从图中可以看到，浆液循环泵能耗占系统总能耗比例最大，其次为引风机克服脱硫系统阻力新增能耗，两者之和总能耗占比超过 70%。由前述分析可知，单塔脱硫系统的浆液循环泵能耗和引风机能耗均明显高于串联塔系统，同时单塔和串联塔系统氧化风机、真空泵及其他设备的能耗几乎没有差别，故单塔脱硫系统总能耗高于串联塔。对比不同浆液循环泵配置方案的串联塔系统总能耗可以看到，增加 1 台浆液循环泵后，串联塔系统的总能耗略有降低。

若按上网电价 $0.30\text{元}/\text{kWh}$ 、年运行小时数 5000h 进行核算，与单塔脱硫系统相比，方案一系统可节约运行成本 $932.4\text{万元}/\text{年}$ ，而方案二系统则可以减少 $1011.5\text{万元}/\text{年的运行成本}$ 。

三、结论

本文基于某 $2 \times 660\text{MW}$ 超超临界机组脱硫系统，对串联塔湿法脱硫工艺的运行能耗进行分析研究，得出结论如下：

1. 单塔脱硫系统的浆液循环泵能耗比串联塔方案一和方案二分别高出 4471kWh/h 和 4987kWh/h 。这是因为在相同烟气流量、组份以及排放标准下，串联塔脱硫系统所需浆液循环量小于单塔，从而导致前者的浆液循环泵能耗较小。对于串联塔脱硫系统，增加 1 台前塔浆液循环泵后，其系统浆液循环泵总能耗下降 6.7%。

2. 串联塔方案一和方案二的引风机能耗相比单塔分别减少了 1745kWh/h 以及 1756kWh/h ，这是因为串联塔方案塔内系统阻力明显小于单塔。优化浆液循环泵配置后，串联塔系统引风机能耗略微降低，但影响极小。

3. 综合分析脱硫系统总能耗可知，针对高硫分机组，串联塔脱硫系统在能耗方面明显优于单塔，每年可节约相当可观的运行成本。因此，采用串联塔脱硫工艺，同时优化浆液循环泵配置，有利于脱硫系统节能降耗，提高系统经济性。

参考文献

- [1] 邓建国, 马子衿, 李振, 等. 不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂 PM2.5 排放的影响 [J]. 环境科学, 2019, 40 (8) : 3457-3462.
- [2] 戎淑群, 徐承亮. 燃煤电厂烟气净化中双塔串联脱硫技术应用研究与经济分析 [J]. 能源研究与管理, 2017, 4: 98-101.
- [3] 夏刚, 吴其荣, 周川雄等. 燃煤电厂超低排放要求下的技术经济性分析 [J]. 能源环境保护, 2020, 34 (4) : 68-75.
- [4] 田浩臣, 蔡琳, 蒋婷, 张杰, 陆继东. 电厂 SCR 脱硝系统与石灰石-石膏湿法脱硫系统故障分析 [J]. 广东电力, 2017, 30 (1) : 11-16, 21.
- [5] Wu X C, Zhao H F, Zhang Y X, et al. Measurement of slurry droplets in coal-fired flue gas after WFGD [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2015, 37(5) : 915-929.
- [6] 史梦洁. 石灰石-石膏湿法脱硫系统综合能效评估方法研究 [D]. 华北电力大学, 2014.
- [7] 徐钢, 袁星, 杨勇平等. 火电机组烟气脱硫系统的节能优化运行 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (32) : 22-29.
- [8] 邱国华, 魏宏鸽, 梁秀进等. 火电机组脱硫超低排放运行能耗分析与节能运行展望 [J]. 发电技术, 2020, 41 (5) : 510-516.
- [9] 杜振, 朱跃, 何胜等. 石灰石-石膏法烟气脱硫系统厂用电率的分析与优化 [J]. 华电技术, 2012, 34 (5) : 63-66, 70.
- [10] 王岳宸. 超低排放条件下湿法脱硫塔能效分析研究 [D]. 山东大学, 2018.