

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.12.003

燃煤电厂造纸白泥替代石灰石脱硫案例研究

Case study on replacing limestone with white mud in desulfurization of coal-fired power plants

杜庆敏¹, 张晖¹, 樊帅军², 郭逍¹, 王红秀², 陈志刚¹, 马京香², 马双忱^{2*}
DU Qingmin¹, ZHANG Hui¹, FAN Shuaijun², GUO Xiao¹, WANG Hongxiu²,
CHEN Zhigang¹, MA Jingxiang², MA Shuangchen^{2*}

(1. 国电南宁发电有限责任公司, 南宁 530317; 2. 华北电力大学环境科学与工程系, 河北 保定 071003)
(1. Guodian Nanning Power Generation Company Limited, Nanning 530317, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China)

摘要: 在我国部分白泥富产区建立以白泥脱硫为核心的燃煤电厂循环经济体系, 能够有效推动我国电力环保产业和循环经济的发展。针对脱硫剂白泥应用过程中存在的脱硫浆液质量浓度控制困难、石膏含水率异常偏高等问题, 通过理论研究和试验分析给出了根据溶解性固体总量(TDS)调整浆液质量浓度控制范围以及去除脱硫塔内杂质的措施。研究结果可为白泥脱硫实际运行提供参考, 并为白泥脱硫的大规模应用提供实践依据。

关键词: 白泥; 脱硫; 循环经济; 浆液质量浓度; 溶解性固体总量; 杂质

中图分类号: X 705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2020)12-0014-08

Abstract: Establishing a circular economy system taking white mud as its core in coal-fired power plants located in mud-rich areas can effectively promote the environmental protection in electricity industry and circular economy in China. However, difficulty in desulfurization slurry mass concentration control and high water content in gypsum are the problems in using white mud as desulfurizer. After theoretical study and tests, the solution is regulating the slurry mass concentration range according to the total dissolved solids (TDS) and removing the impurities in the desulfurization slurry. The study can provide reference and practical basis for white mud desulfurization in engineering cases and its large-scale application.

Keywords: white mud; desulfurization; circular economy; slurry mass concentration; total dissolved solids (TDS); impurity

0 引言

环境污染、生态破坏、资源短缺是当今世界面临的共同难题^[1], 资源环境的压力迫使发展变得愈加合理, 这也为节能环保产业的发展提供了契机。由于环保产业的发展需要企业投入更多技术、设备及研发成本, 而且回报周期较长, 许多环保项目搁浅, 因此, 环保产业大力发展仍需有针对性政策的支持。白泥应用于电厂脱硫与国家倡导的节能环保理念相符, 但政策方面还存在不足, 因而要想促进白泥综合利用, 尚需进一步完善国家和地方的相关政策。

露天开采是应用较为广泛的石灰石开采形式, 炸药集中爆破导致炮烟无法得到有效扩散, 在空气中大量集聚, 开采期间矿山空气质量显著下降, 造

成严重的大气污染; 同时, 石灰石尾矿堆积难以彻底清理, 分散的砂石导致周边土壤沙化, 危及农林畜牧业的健康发展, 严重威胁矿区的生态安全^[2-3]; 因此, 大量开采石灰石会严重破坏生态环境, 导致土地流失、大气污染、水体污染等问题, 制约社会经济的可持续发展, 带来巨大的生态成本^[4]。为实现超低排放^[5], 严格控制SO₂的排放, 电厂必须增大石灰石用量, 给电厂增加了运行成本。

1 白泥脱硫循环经济模式

纸浆厂一般采用碱法造纸, 用氢氧化钠蒸煮原料产生黑褐色草木浆, 草木浆水洗后会产生黑液, 黑液中含有氢氧化钠等成分; 为了回收氢氧化钠, 将黑液蒸发浓缩, 然后燃烧, 燃烧产生的灰烬中含有硫酸钠和氢氧化钠等, 用水吸收后的液体呈绿色, 称绿液; 在绿液中加入生石灰, 生成钙盐沉淀, 沉淀经过真空过滤形成白泥, 主要成分为碳酸钙和

硫酸钙等^[6-7]。我国纸张的生产量和使用量都处于世界前列,据统计,我国每年生产上千万吨纸张,与此同时也产生了大量白泥。

由于缺乏成熟的应用技术,只有少量白泥被二次利用^[8-9],如用于造纸厂内锅炉脱硫,或送往就近的水泥厂成为水泥原料等。造纸企业普遍采取建造防漏白泥库存并定期排液的方式降低其对环境的污染。白泥固废利用不甚理想,大量白泥堆放造成土地占用、水环境污染等问题。

湿法脱硫过程中脱硫剂消耗与电耗占脱硫成本的 80% 以上,白泥属性为固废,因此购入成本低廉,仅为石灰石购入成本的 1/10 左右;石灰石湿磨机电耗占脱硫总电耗的 5% 左右,白泥不需要研磨,因此节省了湿磨机电耗成本。白泥脱硫新赋予了湿法脱硫新的优势,也为钢铁、冶金、化工、供热和垃圾焚烧炉等小型锅炉的污染治理提供了新的路线。

循环经济覆盖工业生产的全部流程,经过技术的不断革新,传统生产方式趋于成熟,工业革新需要一个新的着眼点,即废弃物的循环再利用。循环经济将资源潜能完全开发出来,无论是厂间合作还是厂内循环,都只有一个目的——彻底利用资源,在高效利用资源的同时达到减排的目的,这种健康的经营管理模式是当今企业成功转型的标志^[5,10]。循环经济促进了可持续商业模式的发展,对解决资源制约经济发展的问题具有迫切的现实意义^[11]。图 1 为基于白泥循环利用的电厂循环经济示意图。

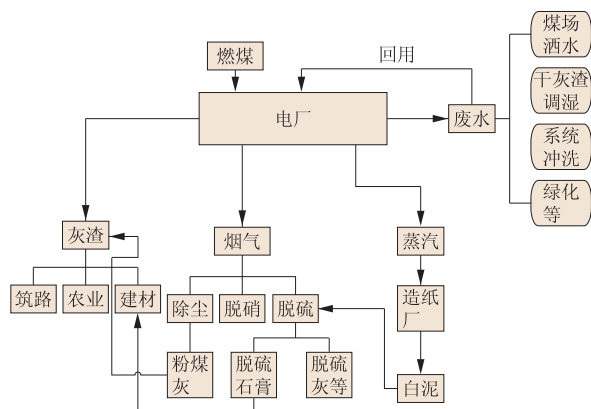


图 1 以电厂为核心的循环经济示意

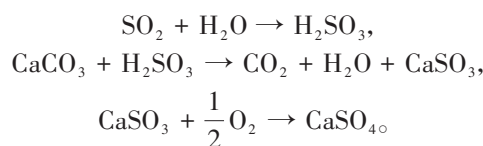
Fig. 1 Circular economy with power plants as the core

白泥的主要成分是 CaCO_3 , 在我国局部地区存量巨大。绿液苛化过程中残留的 NaOH 使得白泥碱性较强(白泥 pH 值为 11~12, 石灰石 pH 值为 9~10)。白泥的残余碱度是影响脱硫系统 pH 值控制的主要因素:残余碱度与 H^+ 反应会使浆液 pH 值迅速下降,并且白泥的持续通入也会使脱硫浆液 pH 值迅速增

加;但由于 H^+ 与 OH^- 反应迅速,残余碱度对 pH 值的影响通常可以迅速恢复,持续时间不长,对脱硫系统 pH 值控制影响不大。

白泥粒径小(白泥中位径 D_{50} 为 $25\ \mu\text{m}$, 石灰石中位径 D_{50} 为 $80\ \mu\text{m}$), 总体扩散面积大,加速了颗粒的解离,从而促进了 SO_2 的吸收^[12];同时,在 pH 值相同的情况下,白泥在高 SO_2 负荷条件下维持 pH 值稳定的能力比石灰石强。

白泥的产生过程决定了其特性,如造纸所用草木纤维中含有金属离子 Mn^{2+} ^[13], SO_2 可与其反应生成络合物,提高亚硫酸盐的氧化速率^[14],使得白泥脱硫活性高于石灰石^[15-16]。白泥脱硫原理如下



白泥作为脱硫剂已有大量基础研究,涵盖其物理化学性质,研究表明,白泥有着与石灰石类似的理化性质,个别特性甚至优于石灰石,因此白泥脱硫具备理论可行性。

目前,我国多家电厂已实现白泥脱硫,并且运行过程中脱硫系统较稳定,脱硫效果较好,如国电南宁发电有限责任公司(以下简称南宁发电公司)、四川泸州川南发电有限责任公司等依据白泥特性,优化影响脱硫性能的相关参数,运行过程中系统稳定,与石灰石脱硫效果相近, SO_2 排放质量浓度达标,亚硫酸盐氧化效果良好。白泥脱硫技术实现了工业园区生态工业的闭合循环,可为其他地区的白泥应用提供借鉴。

2 白泥脱硫案例分析

南宁发电公司现有 2 台 660 MW 燃煤机组,该公司结合大量现场试验,总结出了一套具备白泥脱硫特色的技术路线,2019—2020 年度使用 10 万余 t 白泥,完成了对石灰石原料的全面替代,实现了从资源消耗型污染治理方式向以废治废的跨越。

图 2 为南宁发电公司 2019 年 7 月的脱硫效率统计,期间使用全白泥脱硫,脱硫效率基本保持在 94% 以上;除此以外,使用白泥脱硫期间,净烟气中 SO_2 的质量浓度均保持在 $35\ \text{mg}/\text{m}^3$ 以内,负荷波动较为频繁时仍能满足燃煤电厂环保需求。但是,通过监测石膏品质以及相关脱硫参数,发现白泥脱硫仍存在一些参数控制以及运行问题,其中最突出的是石膏含水率问题,限制了白泥脱硫的应用与推广。

通过分析取样数据,发现存在溶解性固体总量(TDS)影响浆液质量浓度控制的情况。1A 塔浆液

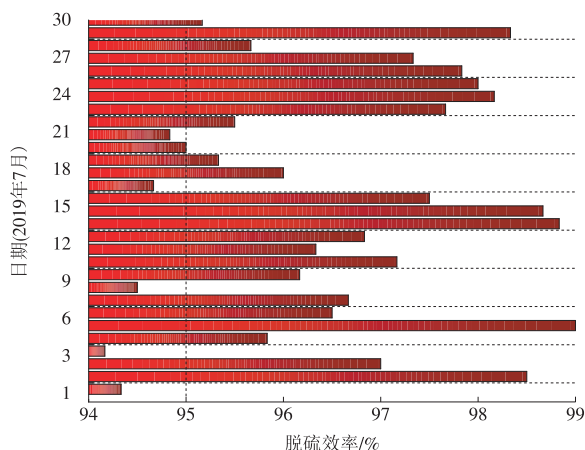


图2 南宁发电公司2019年7月脱硫效率

Fig. 2 Desulfurization efficiency of Nanning Power Plant in July 2019

质量浓度控制在 $1\ 080\ \text{kg}/\text{m}^3$ 以内, 2A 塔浆液质量浓度控制在 $1\ 150\sim 1\ 180\ \text{kg}/\text{m}^3$, 排浆前 1A 塔浆液 TDS 测量值最高为 $33\ 000\ \text{mg}/\text{L}$, 2A 塔浆液 TDS 测量值最高为 $72\ 000\ \text{mg}/\text{L}$, 1A 塔浆液氯根质量浓度为 $6\ 600\ \text{mg}/\text{L}$, 2A 塔浆液氯根质量浓度为 $14\ 000\ \text{mg}/\text{L}$ 。

1A 塔与 2A 塔共用 2 台石膏浆液旋流器, 进料含固量接近, 对比 2A 塔与 1A 塔浆液质量浓度控制界限可以发现, 在含固量均接近 15% 的情况下, 2A 塔浆液质量浓度为 $1\ 186.66\ \text{kg}/\text{m}^3$, 1A 塔为 $1\ 076.99\ \text{kg}/\text{m}^3$, 如图 3 所示。2 倍的盐分导致脱硫浆液质量浓度出现虚高的情况, 根据经验, 此时不能准确判断石膏浆液的排出时间, 应根据 TDS 调整脱硫浆液质量浓度控制范围。

2.1 高硫分高负荷下 2A 塔石膏含水率异常

2019-08-03 T 10:00 关闭 2A 塔石膏排出泵, 切换为 1A 塔进行排浆, 切换后 1 h 内排出大量黑液, 旋流器底流含固量大幅度下降, 期间石膏含水率为 23%~25%。

从图 4 可以看出: 正常石膏与故障石膏均有明显的分层, 下层为石膏层且占比较大, 上层为黑色固体层, 占比较小; 同时, 故障石膏整体偏黑, 杂质含量偏高。当 1A 塔石膏含水率保持在正常范围内时, 旋流器能够分离出质量浓度较小的黑液, 仅有少部分黑液进入真空皮带机脱水; 旋流器故障期间, 黑液与石膏同时被大量排出, 产生黑液层较厚的石膏。经过测量, 正常石膏黑色固体层厚度为 $0.3\ \text{mm}$, 故障石膏黑色固体层厚度为 $2.0\ \text{mm}$ 。经过分层测量发现, 故障石膏上部黑色固体层含水率为 52%, 远高于下层石膏含水率。

2.1.1 石膏分层分析

07-29 T 12:00 机组接近满负荷运行, 在高硫分高负荷工况下, 脱硫塔持续脱硫大概 12 h 后开始排

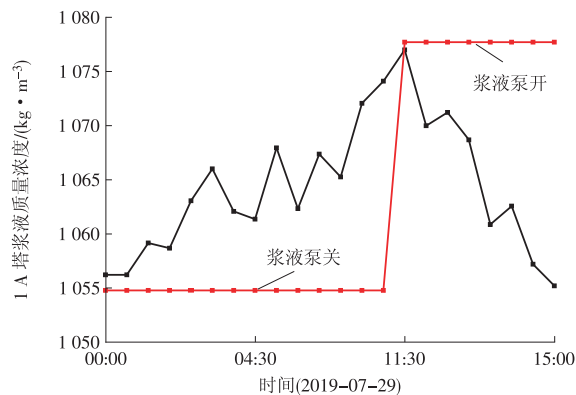
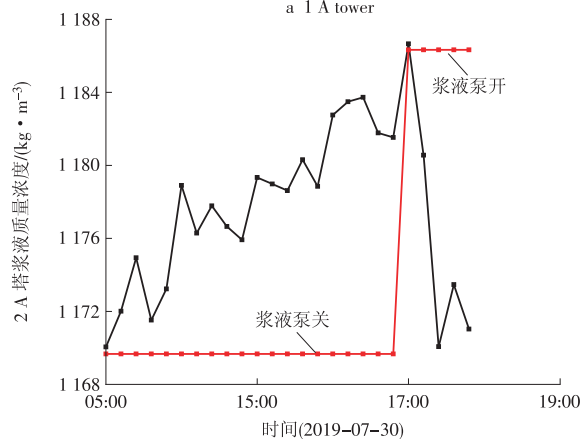
a 1A 塔
a 1A towerb 2A 塔
b 2A tower

图3 1个石膏排出周期内浆液质量浓度变化

Fig. 3 Mass concentration variation of gypsum discharged in one cycle

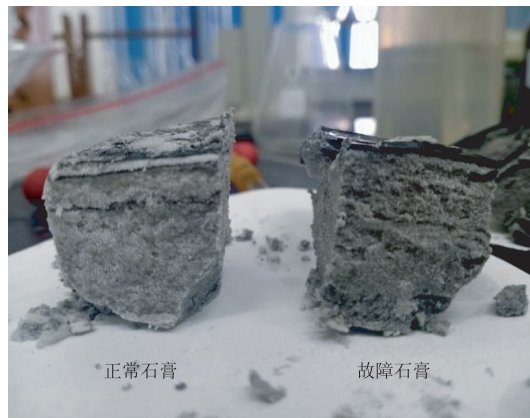


图4 1A 塔石膏截面

Fig. 4 Sections of the gypsum from Tower 1A

浆产出石膏, 石膏含水率基本维持在 15% 以上。通过对石膏的分层分析发现: 上层无机杂质的质量分数为 4.55%, 下层为 2.05%, 上层是下层的 2.2 倍; 上层含水率为 17%, 下层含水率为 14%, 总含水率为 16%。由此得出结论: 石膏上层过多的杂质阻碍了水分排出, 是导致石膏含水率过高的原因之一。

2.1.2 杂质来源分析

使用 Netzsch 热分析仪对石膏表面黑色固体进

行烧失量分析,估算得出石膏上层各组分质量分数,见表 1。

表 1 石膏表面黑色杂质热重分析结果
Tab. 1 TG results of the black impurity on the surface of gypsum

组分	质量分数/%
附着水	55.73
CaSO ₄ ·2H ₂ O	38.56
无机盐杂质(硫酸盐)	3.71
有机物	0.94
SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , CaO	30.77

从表 1 可见,黑色固体含水率(55.73%)远大于石膏含水率(17.00%);无机盐杂质质量分数为 7.42%,有机物质量分数仅为 0.94%。从烧失结果看:尽管石膏上层呈黑色,但未燃尽产物并不是其主要成分,脱硫浆液中的粉煤灰经过复杂的物理化学变化,生成了类似“白炭黑”“分子筛”的物质^[17-18],具备类似悬浮剂的特性;颗粒物粒径小于石膏,浆液分层后,石膏层在下部,石膏饼出现明显分层,上层黑色固体脱水困难,导致石膏总体含水率升高。

使用配有 X 射线能谱分析(EDS)测量附件的 S-4800 扫描式电子显微镜对石膏表面的黑色杂质进行半定量分析,分析结果见表 2。

表 2 石膏表面黑色杂质层 EDS 选点元素分析结果
Tab. 2 Analysis results of EDS selection points on the black impurity layer of gypsum

项目	NaK	MgK	AlK	SiK	PK	SK	ClK	CaK	FeK
质量分数/%	7.06	2.69	4.58	23.14	1.15	24.96	4.17	30.99	1.09
原子百分数/%	9.79	3.53	5.41	26.24	1.19	24.79	3.75	24.62	0.62

EDS 分析结果显示,Na,Al,Si 含量均异常偏高,而白泥中的 Na,Al,Si 含量远没有杂质中的含量高,因此可判断黑色杂质来自烟尘中未被捕集的颗粒物。推测烟气中的 SiO₂, Al₂O₃,白泥中的 SiO₃²⁻经过了复杂的变化形成了“白炭黑”类的悬浮剂(脱硫浆液存在分层特性,中部黑液层沉降困难且呈深黑色,吸附了大量未燃尽炭黑)，“白炭黑”吸附能力非常强,但由于其粒径小,吸附物质有限,因此黑液层密度小于石膏层,最终在皮带上出现分层石膏。

使用 Spectrum 100 红外光谱测量仪进行傅立叶转换红外线光谱(FTIR)测试,对石膏中的杂质进行溯源分析,光谱测量结果如图 5 所示(图中 *T* 为透光度)。

对比红外谱图中官能团的振动波数(见表 3)可以发现:石膏中含有不饱和 C=C,即煤炭未完全燃

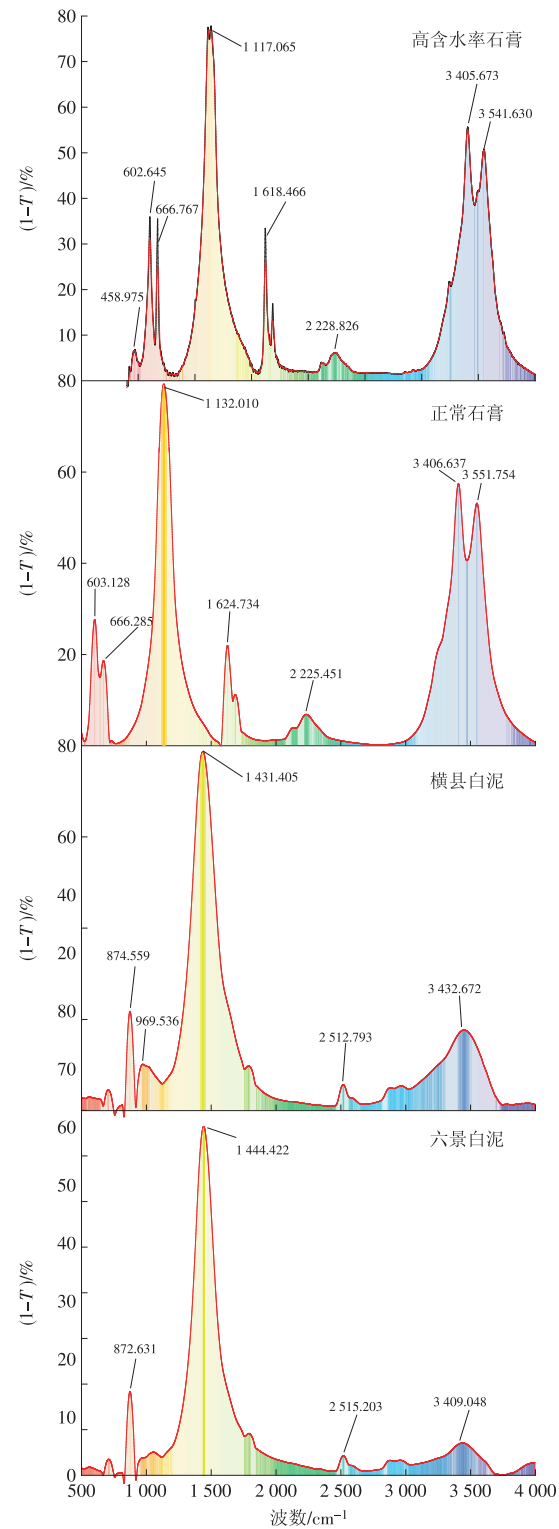


图 5 光谱测量结果
Fig. 5 Spectral measurement results

尽产物;同时还含有酰胺的 N—H 与 C=O 官能团,推测是泄漏的氨与煤炭不完全燃烧后产物共同生成的;脂肪醚可由煤炭不完全产生^[19-20],也可能来自电厂水处理过程中投加的絮凝剂聚丙烯酰胺^[21-23]。

从图 5 可以看出,白泥中有机物的特征官能团没有出现在脱硫石膏中,并且 2 种白泥和石膏的官能团存在形式类似,可以排除由白泥中的有机物带

入脱硫系统,进而影响石膏脱水性能的可能。

为分析脱硫塔内黑液对脱硫系统的影响,取高负荷期间脱硫废水进水进行检验,水质全分析结果见表4。由表4可以看出,废水中溶解固形物质量浓度较高,同时测量处理后的脱硫废水,其中悬浮物质量浓度较高,说明简单的絮凝和澄清工艺无法去除悬浮物,需要增加额外的过滤工艺或增加澄清时间,使悬浊物充分沉淀。

表3 相关官能团及其振动波数	
Tab. 3 Related functional groups and their vibration	
官能团类型	振动波数
wavenumber	cm ⁻¹
N—H 弯曲振动	1 655~1 590
C=C 伸缩振动	1 675~1 640
脂肪醚伸缩振动	1 150~1 060
酰胺(N—H 伸缩振动)	3 500~3 100
C=O 伸缩振动	1 680~1 630

2.2 参数控制分析

低负荷阶段,1台氧化风机运行,开度为60%,氧化能力足够;高硫高负荷阶段,2台氧化风机运行,开度均为60%,氧化还原电位(ORP)大于170 mV,氧化能力足够;同时,浆液中亚硫酸盐的质量浓度基本维持在0.7 g/L以内(正常),可排除氧化能力不足的因素。

图6为脱硫石膏含水率异常期间,2A塔浆液质量浓度变化情况,由于石膏浆液排出泵没有及时打开,导致浆液质量浓度快速增加,同期浆液盐分超过72 000 kg/m³,氯根质量浓度达到了13 000 kg/m³,溶解固形物的增加也会导致浆液质量浓度快速增加,运行人员难以把握排浆时机。

图7为石膏脱水困难期间#1,#2机组负荷变化情况,2019年7月29日12:00至7月30日00:00负荷率均达到80%以上,长期的高负荷运行导致脱硫塔内浆液质量浓度持续快速升高。由于1A塔与2A塔共用2台石膏浆液旋流器和1台石膏脱水真空皮带机,1A塔浆液质量浓度首先达到排浆质量浓度1 077.72 kg/m³,1 h后2A塔也达到排浆界限,无法及时开启脱水装置降低2A塔浆液质量浓度,排浆滞后,严重影响了石膏晶体的质量,出现石膏脱水困难,如图8所示。

3 推荐运行方案

3.1 质量浓度控制

脱硫浆液含固量应控制在13%~18%,在此范围内浆液饱和度适中,进入旋流器的浆液能达到最佳

表 4 脱硫废水水质全分析		
Tab. 4 Water quality analysis on the desulfurized wastewater		
	项目	参数
阳离子	$\rho(\text{K}^+\text{+Na}^+)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	801.31
	$\rho(\text{Ca}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	466.63
	$\rho(\text{Mg}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	5 772.21
	$\rho(\text{Fe}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.10
	$\rho(\text{Fe}^{3+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.35
	$\rho(\text{Al}^{3+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	300.20
	$\rho(\text{NH}_4^+)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	360.00
	$\rho(\text{Ba}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.32
	$\rho(\text{Sr}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.19
	质量浓度合计/(mg·L ⁻¹)	7 701.31
阴离子	$\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1.41×10 ⁴
	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	3.92×10 ⁴
	$\rho(\text{HCO}_3^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	42.21
	$\rho(\text{NO}_3^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	321.15
	$\rho(\text{NO}_2^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.08
	$\rho(\text{OH}^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1.12×10 ⁻⁷
	质量浓度合计/(mg·L ⁻¹)	53 663.44
其他	总硬度/(mg·L ⁻¹)	1.10×10 ⁴
	甲基橙碱度/(mg·L ⁻¹)	42.21
	溶解固形物质量浓度/(mg·L ⁻¹)	4.7×10 ⁴
	非碳酸盐硬度/(mg·L ⁻¹)	6 238.74
	高锰酸盐指数(COD _{Mn})/(mg·L ⁻¹)	53.68
	氨氮质量浓度/(mg·L ⁻¹)	280.00
	全固形物质量浓度/(mg·L ⁻¹)	6.97×10 ⁴
	悬浮物质量浓度/(mg·L ⁻¹)	2.27×10 ⁴
	灼烧减量/(mg·L ⁻¹)	82.10
	全硅(SiO ₂)质量浓度/(mg·L ⁻¹)	102.11
	非活性硅(SiO ₂)质量浓度/(mg·L ⁻¹)	2.46
	pH 值(25 ℃)	5.85
	浊度(NTU)/(mg·L ⁻¹)	>400
	电导率/(μS·cm ⁻¹)	6.75×10 ⁴
	误差	离子分析误差/%
溶解固体误差/%		±2.0
pH 值分析误差/%		±0.5

分离效果。表5为不同含固量下TDS与排浆质量浓度对照。推荐含固量为15%~18%时进行排浆。按照TDS与脱硫浆液质量浓度进行协同控制时,首先测量脱硫浆液TDS值,对照表5,根据所选含固量与TDS值找到排浆质量浓度控制界限。例如1A塔TDS值为35 kg/m³,对含固量为17%的石膏浆液进行脱水,此时需要将脱硫浆液质量浓度控制在

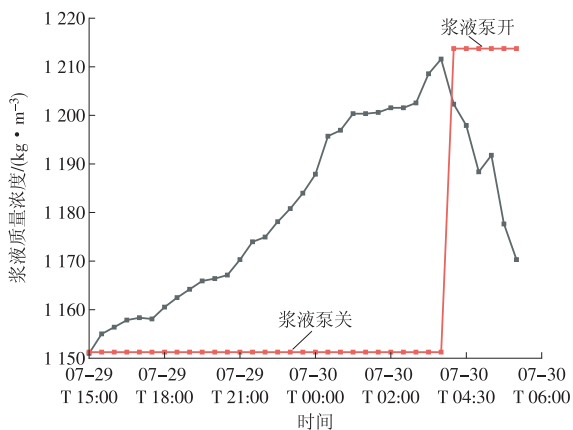


图 6 2A 塔石膏含水率异常期间浆液质量浓度变化

Fig. 6 Slurry mass concentrations with abnormal moisture contents in gypsum from Tower 2A

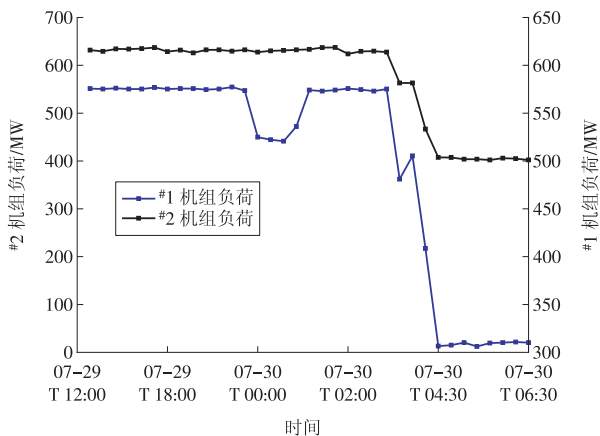


图 7 2A 塔石膏含水率异常期间机组负荷

Fig. 7 Loads of the unit with abnormal moisture contents in gypsum from Tower 2A

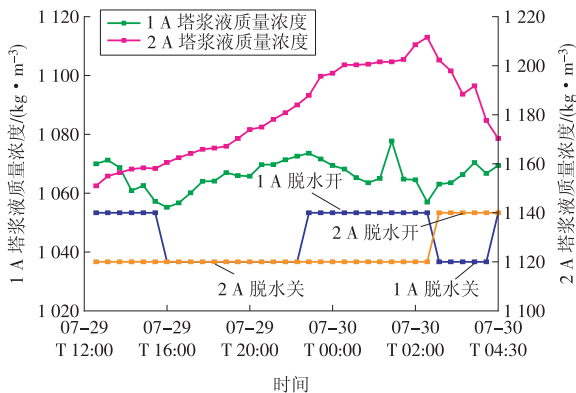


图 8 2A 塔石膏含水率异常期间脱水投运情况

Fig. 8 Dehydration parameters with abnormal moisture contents in gypsum from Tower 2A

1 097 kg/m³时进行排浆。

3.2 杂质质量浓度控制

取 1A 塔脱硫浆液黑液层进行测量,其质量浓度为 1 090~1 100 kg/m³,含固量为 13.21%,与废水旋流器底流质量浓度接近;同时,废水旋流器底流中含有高质量浓度的絮凝体,可通过改变旋流压力参数来控制。脱硫浆液开始排浆后,黑液于石膏旋流

表 5 不同含固量下 TDS 与排浆质量浓度对照
Tab. 5 Comparison of TDS and slurry mass concentration under different solid contents

TDS/ (kg·m ⁻³)	不同含固量下的排浆质量浓度/(kg·m ⁻³)					
	15%	16%	17%	18%	19%	20%
30	1 080	1 086	1 092	1 099	1 106	1 113
35	1 085	1 091	1 097	1 104	1 111	1 118
40	1 090	1 096	1 102	1 109	1 116	1 123
45	1 095	1 101	1 107	1 114	1 121	1 128
50	1 100	1 106	1 112	1 119	1 126	1 133
55	1 105	1 111	1 117	1 124	1 131	1 138
60	1 110	1 116	1 122	1 129	1 136	1 143
65	1 115	1 121	1 127	1 134	1 141	1 148
70	1 120	1 126	1 132	1 139	1 146	1 153
75	1 125	1 131	1 137	1 144	1 151	1 158
80	1 130	1 136	1 142	1 149	1 156	1 163

器产生的溢流中第 1 次富集,溢流进入废水旋流器中被第 2 次富集,主要分布在旋流器的底流中。建议采取下列 2 种措施去除脱硫塔内杂质。

(1)将废水旋流器底流排至污泥输送管道中,或安装黑液储存箱暂时储存黑液。澄清池污泥一同进入污泥输送泵,经过板框压滤机压滤,形成泥饼外运,压滤液与脱硫废水一同处理。

(2)增加脱硫废水三联箱的澄清时间,使絮凝体沉降更为充分。

4 优化运行效果

由图 9 可以看出,调整运行方式后,5 d 内的石膏含水率能够维持在 15% 以内(在石膏浆液产出期间测定石膏含水率,取样时间跨度为 20 min)。

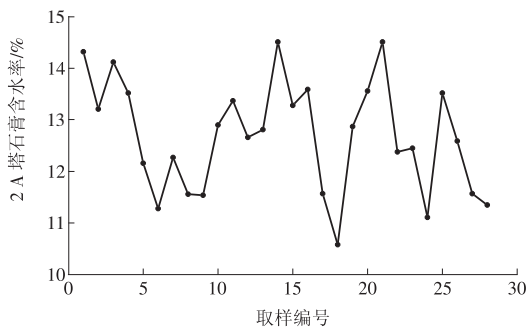


图 9 石膏含水率测定结果

Fig. 9 Measurement results of the moisture content of gypsum

5 结束语

造纸废弃物白泥具备替代石灰石成为脱硫剂的理论与实践的可行性,某电厂石膏含水率过高的原因主要有 2 个:首先是脱硫浆液质量浓度控制不合理,白泥中的杂质、电厂频繁的负荷调整均会导致脱硫浆液质量浓度出现异常;其次是烟尘中的飞

灰大量进入脱硫塔内,导致浆液中黑色固体杂质(SiO_2 , Al_2O_3)含量过高,附着在石膏表面导致石膏脱水性能下降。通过调整浆液质量浓度控制方式并定期去除杂质可以保证白泥脱硫系统长期稳定运行。

参考文献:

- [1] WANG Xuan, LI Jia, ZHANG Yongze. The environmental problems of the world and their characteristics[J]. Sichuan Environment, 1996, 15(1):25-29.
- [2] 崔立昌. 矿山生态环境影响评价及恢复对策研究——以石灰石矿山开采为例[D]. 石家庄:河北师范大学, 2003.
- [3] 杨华. 我国矿山开采的生态环境效应及土地复垦典型技术[J]. 北方环境, 2011, 37(8):61-62.
YANG Hua. Ecological environment effect of mining and typical land reclamation technology in China [J]. Northern Environment, 2011, 37(8):61-62.
- [4] 徐东升, 樊帅军, 李德峰, 等. 从石灰石的生态属性论白泥脱硫的环境意义[J]. 华电技术, 2020, 42(3):78-84.
XU Dongsheng, FAN Shuaijun, LI Defeng, et al. On the environmental significance of white mud desulfurization from the ecological properties of limestone [J]. Huadian Technology, 2020, 42(3):78-84.
- [5] 朱法华, 王临清. 煤电超低排放的技术经济与环境效益分析[J]. 环境保护, 2014, 42(21):28-33.
ZHU Fahua, WANG Linqing. Techno-economic and environmental benefit analysis of ultra-low coal power emission [J]. Environmental Protection, 2014, 42 (21) : 28-33.
- [6] 解振华. 走循环经济之路实现可持续生产与消费[J]. 环境保护, 2003(2):12-13.
XIE Zhenhua. Sustainable production and consumption through circular economy [J]. Environmental Protection, 2003(2):12-13.
- [7] 邓志斌, 李友明. 白泥综合利用现状与发展[J]. 湖北造纸, 2006(3):33-36.
DENG Zhibin, LI Youming. Current situation and development of comprehensive utilization of white clay [J]. Hubei Paper Making, 2006(3):33-36.
- [8] 樊瑞雪. 白泥的综合利用[D]. 济南:山东大学, 2008
- [9] 唐艳军, 刘秉钺. 国内造纸白泥的综合利用[J]. 国际造纸, 2003, 22(6):53-55.
TANG Yanjun, LIU Bingyue. Comprehensive utilization of white clay for papermaking in China [J]. International Papermaking, 2003, 22(6):53-55.
- [10] MURRAY A, SKENE K, HAYNES K. The circular economy: An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context[J]. Journal of Business Ethics, 2017, 140(3):369-380.
- [11] 孙佑海. 推动循环经济, 促进科学发展——《中华人民共和国循环经济促进法》解读[J]. 求是, 2009(6):53-55.
SUN Youhai. Promoting circular economy and promoting scientific development: Interpretation of the circular economy promotion law of the People's Republic of China [J]. Realistic, 2009 (6) : 53 - 55.
- [12] 文晓春, 陈凡, 闫天元, 等. 白泥脱硫浆液氧化性能对石膏品质的影响[J]. 热力发电, 2016, 45(7):32-36.
WEN Xiaochun, CHEN Fan, YAN Tianyuan, et al. Effect of oxidation on performance of white mud slurry on FGD gypsum quality [J]. Thermal Power Generation, 2016, 45 (7):32-36.
- [13] 马双忱, 陈凡, 文晓春, 等. 白泥脱硫性能和副产品石膏脱水特性分析[J]. 环境工程学报, 2017, 11(3):1737-1745.
MA Shuangchen, CEHN Fan, WEN Xiaochun, et al. Analysis of desulphurization performance of white mud and dehydration characteristics of by-product gypsum [J]. Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(3):1737-1745.
- [14] ZHANG J S, ZHENG P W, WANG Q Q. Lime mud from papermaking process as a potential ameliorant for pollutants at ambient conditions: A review [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103:828-836.
- [15] 赵庆庆, 金晶, 高新勇, 等. 湿法烟气脱硫装置中铁锰离子对 SO_2 催化氧化作用的试验研究[J]. 热能动力工程, 2015, 30(2):248-252.
ZHAO Qingqing, JIN Jing, GAO Xinyong, et al. Experimental study on catalytic oxidation of Fe and Mn ions on SO_2 in wet flue gas desulfurization unit [J]. Thermal Energy and Power Engineering, 2015, 30 (2) : 248-252
- [16] 张天柱. 循环经济的概念内涵[J]. 中国科技成果, 2005(14):22-23.
ZHANG Tianzhu. Concept and connotation of circular economy [J]. Chinese Scientific and Technological Achievements, 2005(14):22-23.
- [17] 李文迪. 粉煤灰基分子筛的制备及用于燃煤电厂的催化脱硝研究[D]. 北京:北京化工大学, 2013.
- [18] 张小东, 赵飞燕. 白泥综合利用产品设计[J]. 化工管理, 2020(29):25-26.
ZHANG Xiaodong, ZHAO Feiyan. Design of comprehensive utilization product for white mud [J]. Chemical Industry Management, 2020(29):25-26.
- [19] CHENG Jie, ZHANG Yongsheng, WANG Tao, et al. Emission of volatile organic compounds (VOCs) during coal combustion at different heating rates [J]. Fuel, 2018, 225:554-562.
- [20] LIU Zihong, QIU Jianrong, LIU Hao, et al. Effects of SO_2 and NO on removal of VOCs from simulated flue gas by

- using activated carbon fibers at low temperatures [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(1): 93-99.
- [21]刘海洋,徐小生.火电厂脱硫废水有机物去除及软化处理[J].工业设计,2017(6):154-155.
- LIU Haiyang, XU Xiaosheng. Organic removal and softening treatment of desulfurized wastewater from thermal power plants [J]. Industrial Design, 2017(6): 154-155.
- [22]刘晶晶. 济南北郊热电厂脱硫废水处理工艺研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [23]谈智玲,彭歌亮,陈全喜,等.燃煤电厂烟尘超低排放协同脱硫废水零排放改造实践探索[J]. 华电技术, 2019, 41(5): 52-55.

TAN Zhiling, PENG Geliang, CHEN Quanxi, et al. Exploration on gas flue ultra low emission and desulfurization wastewater zero discharge transformation in coal fired power plants[J]. Huadian Technology, 2019, 41(5): 52-55.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

杜庆敏(1965—),男,山东济南人,高级工程师,从事火电厂全面管理工作(E-mail:12053627@chnenergy.com.cn)。

马双忱*(1968—),男(满族),辽宁大连人,教授,博士生导师,工学博士,从事燃煤电厂烟气脱硫、脱硝与水污染控制等方面的研究(E-mail:msc1225@163.com)。

“边缘计算在能源互联网中的应用”专刊征稿启事

2020年,国家正式组织实施新型基础设施建设工程,重点发展新兴产业。能源互联网作为未来可能接入设备最多的物联网生态圈,产业发展空间巨大。在能源领域,新型电气信息技术的发展起到了重要的支撑作用,同时也带来了诸如安全性、网络负载及异构设备融合等问题,边缘计算具有靠近数据源、实时性好、低时延、响应快等特征,可以在一定程度上缓解这些问题。《华电技术》作为行业科技创新、技术交流平台,特推出“边缘计算在能源互联网中的应用”专刊,并邀请华北电力大学李彬教授担任特约主编,欢迎业内同仁踊跃投稿。

一、征文范围(包括但不限于)

拟围绕边缘计算在能源领域的国内外发展现状与趋势综述、边缘计算在能源互联网中的应用场景、典型应用案例分析、产品化及实践案例、边缘计算+能源互联网架构模型、新技术融合等内容,主要征集以下方向论文。

- (1)边缘计算在能源互联网中的技术发展前景和趋势分析。
- (2)边缘计算相关标准化工作。
- (3)边缘计算在能源领域 5G 网络中的应用。
- (4)边缘计算与能源区块链、人工智能等交叉领域研究。
- (5)边缘计算在能源互联网中的智能数据分析服务。
- (6)边缘计算在能源互联网中的信息安全问题。
- (7)边缘计算在能源互联网中所衍生的商业模式。
- (8)区域边缘计算中心建设及部署方案。
- (9)能源互联网中边缘计算与云计算的协同优化技术及相关架构。
- (10)边缘计算的落地应用场景以及解决方案和产品。
- (11)能源互联网中的边缘计算的项目实践案例。
- (12)基于边缘计算的能源行业中的业务应用,如:智能巡检、安防监控、智能配用电、电动汽车车联网、光伏云网等。
- (13)其他相关研究。

二、时间进度

专刊拟于 2021 年 2 月 28 日截稿,2021 年第 3 期(2021 年 3 月 25 日)后择期出版。

三、征文要求

- (1)专刊只收录未公开发表的论文,拒绝一稿多投。作者对论文内容真实性和客观性负责。
- (2)按照《华电技术》论文格式要求使用 Word 软件排版,请登录《华电技术》在线采编系统(<http://www.hdpower.net>)下载论文模板。
- (3)请保留论文中图片、曲线和表格的原始格式文件,并在投稿时按规定提交。
- (4)论文作者应遵守相关学术不端规定。

四、投稿方式

- (1)在线投稿(推荐):登录《华电技术》在线采编系统(<http://www.hdpower.net>),完成在线全文投稿。
- (2)邮箱投稿:direfish@163.com(李教授);hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)
- (3)咨询联系:刘芳 0371-58501060 13838002988;杨满成 010-63918755 13801175292