

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.06.030

# 1 000 MW 燃煤发电机组碱渣脱硫试验研究

董文伟

(江苏新海发电有限公司,江苏 连云港 222023)

**摘要:**碱渣是氨碱法生产纯碱过程中产生的工业固体废弃物和污染物,开发其高附加值利用具有显著的经济和环境效益。针对碱渣作为燃煤电厂湿法烟气脱硫系统脱硫剂进行应用开发,在某1 000 MW 燃煤发电机组、采用石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺的烟气脱硫装置系统中进行了碱渣完全替代石灰石脱硫的首次工业化试验;基于与石灰石脱硫的比较,研究并评价了碱渣脱硫的性能及其影响。试验验证了在大型燃煤机组湿法烟气脱硫系统中,碱渣能够完全替代石灰石脱硫;碱渣脱硫可提升烟气脱硫的脱硫效率,实现超低排放,对副产品石膏品质几乎没有影响;碱渣替代石灰石作为脱硫剂,可保证可靠供应,且具有廉价、节电和对高硫煤适应性好等优势,能够实现以废治废,具有显著的环保和经济效益。

**关键词:**燃煤发电机组;湿法烟气脱硫;脱硫剂;碱渣;固废利用

中图分类号:TM628

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)06-0207-06

## 0 引言

碱渣(俗称碱白泥)是氨碱法生产纯碱的副产品,主要含 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 和 $\text{NaCl}$ ,还含有少量的 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和其他盐、水不溶物等<sup>[1]</sup>。我国碱渣年产量近千万吨<sup>[1-2]</sup>,是一种工业固体废弃物。由于产量大,碱性强,环境危害大,其处理处置一直是纯碱行业的难题。近年来随着对环境保护和二次资源开发利用的日益重视,研究开发碱渣的综合利用得到了广泛关注,其利用主要是生产建材、土工、农用和作为烟气脱硫的脱硫剂等<sup>[1-2]</sup>。虽然在建材、土工、农业方面的利用途径很多,但是预处理和生产工艺要求高、应用量少、附加值低,实际利用仍很少<sup>[2]</sup>。而作为脱硫剂,对预处理要求低、利用量大,作为廉价材料既可替代石灰石,又可实现碱渣的清洁处置和高附加值利用<sup>[2-3]</sup>。为此,国内研究人员对其作为脱硫剂的可行性、脱硫活性、脱硫性能进行了大量研究<sup>[3-6]</sup>。碱渣脱硫剂已在我国一些纯碱厂自备燃煤锅炉机组的脱硫系统上得到了成功应用<sup>[6-9]</sup>,在小型燃煤电厂的脱硫系统上也有应用尝试<sup>[10-11]</sup>,是极具前景的碱渣利用途径。

目前,我国燃煤电厂已普遍执行大气污染物超低排放标准<sup>[12]</sup>,实现清洁生产,但排放的严格控制也显著增加了电厂的污染物控制成本。烟气脱硫作为超低排放控制的基础组成部分,普遍采用石灰石-石膏湿法脱硫技术<sup>[13]</sup>,其中石灰石脱硫剂费用是脱硫系统运行成本的重要组成部分之一。因此采用廉价脱硫剂可降低脱硫成本<sup>[3,10,14]</sup>,提高燃煤

机组的经济性和灵活性。

文中在某1 000 MW 燃煤机组的脱硫装置系统上应用碱渣浆液替代石灰石浆液,进行碱渣浆液工业化脱硫应用的系统试验,研究并评价了碱渣脱硫的性能及其影响,为后续碱渣作为脱硫剂应用于烟气脱硫系统提供了参考。

## 1 脱硫碱渣浆液的生产及其品质

碱厂氨碱法纯碱生产工艺经蒸氨塔工序处理后排放的废渣废液化学组成如下: $\text{CaCl}_2$ 为95~115 g/L, $\text{NaCl}$ 为50~51 g/L, $\text{NH}_3$ 为0.006~0.03 g/L, $\text{CaCO}_3$ 为6~15 g/L, $\text{CaO}$ 为2~5 g/L, $\text{CaSO}_4$ 为3~5 g/L, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 为3~10 g/L, $\text{SiO}_2$ 为1~5 g/L, $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为1~3 g/L。通过板框压滤或离心机分离,得到含固率约50%的湿碱渣滤泥,其中脱硫有效成分为 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{CaO}$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,但 $\text{Cl}^-$ 含量约6%~8%。为了适应电厂脱硫系统工艺对脱硫剂的要求<sup>[15]</sup>,依托碱厂现有设备设施,通过工艺和管线改造,对湿碱渣滤泥进行处理和制浆,生产碱渣浆液,使含固率降至近10%, $\text{Cl}^-$ 含量降至10 g/L以下,可直接用于烟气脱硫。碱渣浆液所能达到的含固率约为7.37%~10.5%, $\text{Cl}^-$ 含量约为4.5~8.7 g/L,设计产量约为40 t/h或1 000 t/d。目前的制浆能力能够满足短期试验使用,但长期供应仍需进行技术改造。

碱渣浆液组分与石灰石浆液组分的比较见表1。可以看出,碱渣中 $\text{CaCO}_3$ 含量比石灰石中低得多,且含有相当量的石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ),但碱渣中 $\text{MgO}$ 以 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 形式存在,相比于石灰石中的

MgCO<sub>3</sub>,其更有利于脱硫,是脱硫的有效成分。尽管如此,碱渣中有效脱硫成分即 CaCO<sub>3</sub>+Mg(OH)<sub>2</sub>的含量仍较石灰石低得多,这意味着碱渣浆液用量大,且其含有少量的 Cl<sup>-</sup>。碱渣颗粒尺寸略粗于石灰石,但其酸不溶物含量水平与石灰石浆液相当,二者的 pH 值接近。

表 1 碱渣浆液与石灰石浆液特性比较

Table 1 Comparison of the properties between slurries of alkaline residue and limestone

参数	石灰石浆液	碱渣浆液
CaCO <sub>3</sub> 含量/%	89.0~89.4	24~65.7
MgCO <sub>3</sub> 含量/%	6.4~6.6	4.3~6.2*
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O含量/%		25.9~65.9
Cl <sup>-</sup> 含量/%		0.049~0.067
pH 值	12.80~12.87	12.80~12.83
粒径分布 d <sub>50</sub> /μm	7.46~8.23	8.01~8.44

注: \* 表示碱渣浆液中为 Mg(OH)<sub>2</sub> 含量。

## 2 试验过程及结果

电厂 1 000 MW 超超临界燃煤机组烟气脱硫装置的设计参数为:石灰石为脱硫剂,燃料为设计煤种(收到基, S<sub>ar</sub> = 1.2%)时脱硫效率不低于 95.6%,入口烟气的 SO<sub>2</sub> 含量在标准情况下为 3 099 mg/m<sup>3</sup> (干基,6%O<sub>2</sub>),经脱硫提效改造后以 SO<sub>2</sub> 排放浓度不大于 35 mg/m<sup>3</sup> (标准情况下)的燃机排放标准值为目标。提效改造后采用单塔双循环布局,共 5 层喷淋层,其中大塔 3 层,吸收塔外浆液池( absorber feed tank, AFT)塔 2 层。

碱厂通过对碱渣进行深加工,去除其中的氯盐成分(即 CaCl<sub>2</sub>和 NaCl)和沙粒后得到适合电厂湿法脱硫的脱硫剂产品——碱渣浆液。其具有较高含量和品质的 CaCO<sub>3</sub>、CaO、Mg(OH)<sub>2</sub> 等有效脱硫成分,可作为廉价的潜在脱硫剂,输送至电厂,储存在电厂 2 台 1 000 MW 燃煤机组脱硫装置共用的事故浆液箱中,然后直接进入脱硫系统。

试验中,碱渣浆液通过事故浆液输送泵注入试验机组脱硫系统的石灰石浆液箱,同时停止原石灰石粉制浆,再通过系统已有的浆液管道系统,以调节流量控制吸收塔 pH 值的方式,注入吸收塔(包括大塔和 AFT 塔)进行烟气脱硫。

吸收塔在 4 月 16 日 9:00 至 17 日 9:00 全部采用碱渣脱硫,机组负荷为 535~872 MW,脱硫装置入口烟气 SO<sub>2</sub> 体积浓度为 1 100~1 860 mg/m<sup>3</sup>,具体见图 1。运行过程中吸收塔浆液的 pH 值控制为:大塔 4.6~5.8,AFT 塔 5.8~6.4。监测结果表明,脱硫效率为 97.93%~99.48%,见图 2,远超过石灰石脱硫效率

不低于 95.6%的设计要求;脱硫后净烟气的 SO<sub>2</sub> 体积浓度为 6.15~26.64 mg/m<sup>3</sup>,满足超低排放控制要求。试验期间的取样分析结果表明,吸收塔内浆液的 pH 值为 6.12,Cl<sup>-</sup> 含量为 13 000 mg/L,实现了稳定运行的目标。因此碱渣浆液脱硫完全满足烟气脱硫系统运行性能、脱硫效率、排放浓度的要求。

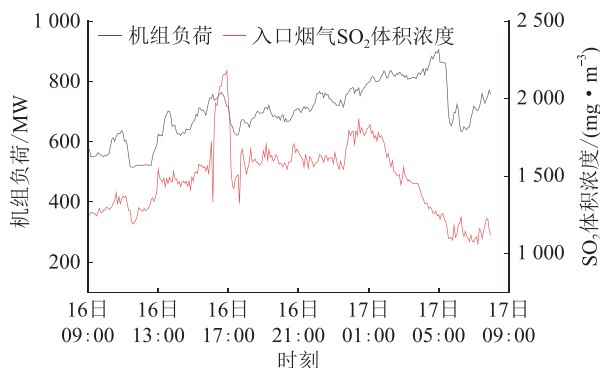


图 1 机组负荷与入口烟气 SO<sub>2</sub> 浓度

Fig.1 Variations of unit load and SO<sub>2</sub> concentration in the inlet flue gas

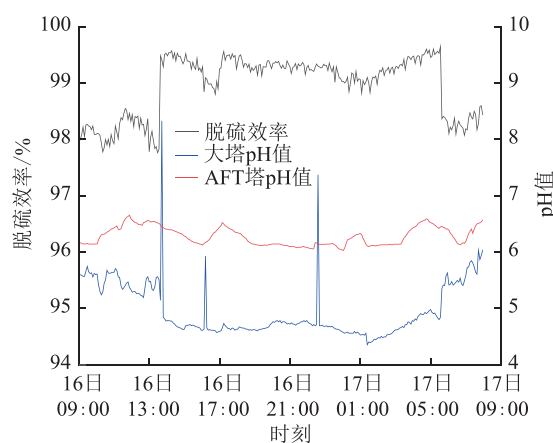


图 2 脱硫效率和吸收塔浆液 pH 值的变化

Fig.2 Variations of desulphurization efficiency and absorber slurry pH value

## 3 试验过程中样品的化学分析

为进一步评价碱渣脱硫性能,在试验过程中取样,对石灰石浆液、碱渣浆液、塔内浆液、石灰石石膏、碱渣石膏等进行分析。在此基础上,与石灰石脱硫相应特性比较,深入研究和评价碱渣应用对脱硫系统运行性能的影响。

### 3.1 碱渣与石灰石的差异

表 2 为碱渣及其浆液的主要特性,作为比较,表中列出了机组脱硫系统常用的石灰石粉及其浆液的主要特性。可以看出,碱渣与石灰石的差异主要表现在以下方面:

(1) 脱硫剂的粒径稍有不同。较小的粒径有利

于脱硫剂的溶解和化学反应。碱渣平均粒径略大于石灰石平均粒径,但二者均小于 45  $\mu\text{m}$ ,满足脱硫系统对脱硫剂粒径的一般要求。

(2) 浆液的碱性不同。通常情况下,碱渣中存在  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  及  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  等化学活性物质,其浆液碱性要强于石灰石浆液<sup>[11,16]</sup>。表 1 的 pH 值表明碱渣的碱性很强,有利于脱硫中和反应,而值得指出的是电厂日常使用的石灰石浆液的 pH 值也较高。

(3) 浆液密度不同。石灰石粉较易搅拌,可调制出较高的浆液密度,浆液含固率一般可达 30%。试验中碱渣浆液的含固量为 25%,因此碱渣浆液密度与石灰石浆液密度接近。

(4) 脱硫剂组分不同。碱渣的  $\text{CaCO}_3$  含量显著低于石灰石,并含有一定量的石膏和  $\text{Cl}^-$ ,自带石膏品种。碱渣中  $\text{MgO}$  的存在形态为  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,对脱硫反应有利,石灰石中为  $\text{MgCO}_3$ ,对脱硫反应有害。

(5) 化学活性不同。由于在碱性、脱硫剂组分反应活性等方面的优势<sup>[11]</sup>,碱渣脱硫的化学活性优于石灰石。

表 2 碱渣与石灰石及其浆液主要特性比较

Table 2 Comparison of the main properties between alkaline residue and limestone and their slurries

项目	碱渣	石灰石	备注
平均粒径/ $\mu\text{m}$	15.70	11.58	取数据平均值
浆液 pH 值	12.82	12.84	取数据平均值
浆液密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 120.0	1 066.1	取数据平均值
$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 含量/%	45.9	略	取数据平均值
$\text{CaCO}_3$ 含量/%	44.85	89.20	取数据平均值
$\text{MgO}$ 含量/%	5.25	6.50	碱渣中 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ; 石灰石中 $\text{MgCO}_3$
滤液 $\text{Cl}^-$ 体积浓度/ $(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	5.25	略	取数据平均值
盐酸不溶物含量	4.77	5.17	取数据平均值
反应性	较高	较低	

### 3.2 吸收塔(大塔)内浆液特性

使用碱渣脱硫,塔内浆液固相中  $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  含量高,相对于石灰石脱硫时的约 70% 提高至约 90%,相应地,塔内浆液固相中  $\text{CaCO}_3$  含量显著减少,由石灰石脱硫时的约 11% 减少至约 2%。因此碱渣中的  $\text{CaCO}_3$  具有高的反应活性,在脱硫塔内更易反应转化而过剩量很小,即碱渣脱硫更容易氧化成石膏。同时,碱渣脱硫时塔内浆液固相中  $\text{MgCO}_3$  含量也显著减少,由石灰石脱硫时的约 13.9% 减少至约 6.5%,这是由于碱渣中  $\text{Mg}$  主要以  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  形式存在,可参与脱硫反应,反应产物  $\text{MgSO}_4$  可溶于脱硫浆液中而随脱硫废水排出,而石灰石中的  $\text{Mg}$  以

$\text{MgCO}_3$  存在,不参与脱硫反应,也不溶于脱硫浆液。

碱渣脱硫时塔内浆液固相中盐酸不溶物含量较高,由石灰石脱硫时的约 8.5% 增至约 10.5%,这是因为碱渣中杂质成分含量相对较高。由于酸不溶物不能形成结晶随石膏排出,而需要随脱硫废水外排以避免在塔内积累,一定程度上可能会影响脱硫效率和石膏脱水干度。

### 3.3 脱硫石膏特性

碱渣脱硫生成的石膏较石灰石脱硫生成的石膏含水量高 3%~4%,但  $\text{Cl}^-$  含量相当,且对石膏滤饼进行水洗可将  $\text{Cl}^-$  含量进一步降低,因此碱渣中较高的  $\text{Cl}^-$  含量不影响石膏的品质。

## 4 碱渣对脱硫系统运行的影响

上述比较表明,碱渣与石灰石及其浆液特性有较明显的差异,必然会对脱硫系统的运行产生影响。下文根据机组脱硫系统试验中的表现和表 2 中的碱渣数据对影响进行分析。

### 4.1 对脱硫能力的影响

由于在碱性和组分方面的优势<sup>[16]</sup>,碱渣化学活性好,作为脱硫剂,其最突出优点是脱硫能力好于石灰石。主要原因是其能快速提高系统的 pH 值,从而提高脱硫效率,在相同条件下,脱硫效率较高。

部分相近工况下脱硫系统的运行数据见表 3,碱渣脱硫 2 层喷淋运行数据见表 4。可以看出,相近工况下,碱渣脱硫效率高于石灰石脱硫。即使投用 2 层喷淋,在广泛的负荷和入口烟气  $\text{SO}_2$  浓度范围内,碱渣脱硫仍能取得较高的效率。因此碱渣脱硫效果十分理想,不仅可提高脱硫系统的燃煤适应性,也可提高系统运行的灵活性和经济性。

表 3 碱渣和石灰石脱硫运行数据的对比

Table 3 Comparison of operation data from alkaline residue and limestone desulfurization

参数	4月14日 (13:00)	4月15日 (20:00)	4月16日 (05:00)
机组负荷/MW	752	756	766
原烟气 $\text{SO}_2$ 体积浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 378	1 238	1 319
净烟气 $\text{SO}_2$ 体积浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	24.88	12.75	5.49
脱硫效率/%	98.14	98.94	99.40
塔喷淋层数	3	3	3
大塔 pH 值	5.6	5.5	5.2
AFT 塔 pH 值	6.15	6.40	6.12
循环泵编号	1号、2号、5号	1号、2号、5号	1号、3号、5号
脱硫剂	石灰石	碱渣	碱渣

表4 碱渣脱硫2层喷淋运行数据  
Table 4 Operation data of alkaline residue desulfurization with two-layer spraying

参数	4月16日 (08:40~13:35)	4月17日 (06:18~16:24)
锅炉负荷/MW	545~658	562~845
原烟气 SO <sub>2</sub> 体积浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	1 264~1 477	886~1 395
净烟气 SO <sub>2</sub> 体积浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	20.91~26.64	10.93~19.52
脱硫效率/%	97.93~98.38	98.21~98.78
塔喷淋层数	2	2
大塔 pH 值	5.33~5.62	5.00~5.95
AFT 塔 pH 值	6.12~6.65	6.13~6.78
循环泵编号	3号、5号	3号、5号

#### 4.2 对脱硫副产品石膏品质的影响

由于电厂3套石膏脱水皮带机为2台机组的脱硫系统共用,加之试验时间仅持续2天多,势必造成石灰石石膏和碱渣石膏的混合共存。但化验数据显示,含有碱渣石膏滤饼的含水率明显高于纯石灰石石膏,这可能是石膏晶体结构导致的。电镜观察石膏形态发现,石灰石石膏呈现较多柱状晶体,而碱渣石膏呈现较多层片状晶体,层片状晶体吸附水能力强可能造成石膏含水率偏高。此外,碱渣中含量偏高的 MgO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等物质的过度积聚也可能影响石膏脱水干度。为此,需要采取措施控制石膏含水率。

(1) 进行石膏滤饼的冲洗。通过冲洗可以大幅降低石膏中 Cl<sup>-</sup> 含量,避免碱渣及其浆液中 Cl<sup>-</sup> 对石膏品质的影响。

(2) 加大系统的废水排放量。增加废水排量可将吸收塔浆液中的 Cl<sup>-</sup> 控制在合理的范围,通常为小于 20 g/L。

(3) 控制碱渣中 Cl<sup>-</sup> 含量。若脱硫系统的废水排量无法大量增加,则必须控制碱渣浆液中 Cl<sup>-</sup> 的含量,具体控制指标需根据实际脱硫系统的废水排量确定。

#### 4.3 对石膏脱水系统的影响

碱渣中含有石膏,会增加脱硫系统的石膏产量<sup>[16]</sup>。同时碱渣中含有 Mg(OH)<sub>2</sub>,脱硫反应生成的 MgSO<sub>4</sub> 为可溶盐,随废水排出,因此脱硫固体副产物的产量减少。试验发现,碱渣脱硫的石膏产量与石灰石脱硫几乎相同。但是,如果废水排出不能平衡,溶于水中的 MgSO<sub>4</sub> 将逐步增多,溶液密度升高,吸湿性强的 MgSO<sub>4</sub> 会影响石膏脱水的干度。

此外,碱渣中 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等无定形固体

杂质较石灰石多约 1 倍。这部分杂质粘性高,不利于石膏脱水,需要多排废水以带出,防止其在循环浆液中过度积聚,否则也会影响石膏脱水干度。

#### 4.4 对供浆系统的影响

试验用碱渣浆液是在碱厂制备的。运输浆液相对于运输碱渣的成本高得多,电厂若要长期应用,可能要就近进行碱渣浆液的制备,这需在电厂内建设碱渣储存场地、输送设备、破碎制浆设备、浆液储存和输送设备等。同时,由于碱渣纯度和浆液密度没有石灰石高,供浆量约为石灰石脱硫的 2 倍,因此,可能需要对原有石灰石浆液供浆泵和管道等进行容量评估或改造。

#### 4.5 对废水系统的影响

由于碱渣中含有一定量的 Cl<sup>-</sup>,而脱硫系统运行需将 Cl<sup>-</sup> 控制在一定范围内,因此需增加系统的废水排量,表 5 为基于分析<sup>[17]</sup> 计算得到的参考数据。此外,由于碱渣中含有一定量的 Mg(OH)<sub>2</sub>,脱硫反应生成 MgSO<sub>4</sub> 随废水排出,废水中 Mg<sup>2+</sup> 含量比石灰石脱硫废水高。由于废水排放量及其 Mg<sup>2+</sup> 含量的增加,需要对脱硫废水处理能力进行评估。

表5 增加的废水排量与碱渣浆液中 Cl<sup>-</sup> 含量的关系  
Table 5 Relationship between increased discharge of waste water and Cl<sup>-</sup> content in alkaline residue slurry

序号	设计进塔 20% 碱渣浆液量/ (t·h <sup>-1</sup> )	碱渣浆液 Cl <sup>-</sup> 含量/ (g·L <sup>-1</sup> )	吸收塔内废水 Cl <sup>-</sup> 含量/ (g·L <sup>-1</sup> )	增加废水 排量/ (t·h <sup>-1</sup> )
1	115	3	20	13.80
2	115	6	20	27.56
3	115	10	20	46.00
4	115	15	20	69.00

#### 4.6 对系统腐蚀、磨损、结垢等的影响

由试验的条件无法得到以碱渣为脱硫剂对脱硫装置的腐蚀、磨损、结垢等影响,因此仅从理论上进行简要分析。应用碱渣后吸收塔浆液的成分基本不会发生变化,因此对吸收塔设备的腐蚀、磨损和结垢等应没有影响。具体如下:

(1) 浆液中 Cl<sup>-</sup> 可能会增加,但仍然可控制在设计要求范围内,因此不会增加系统的腐蚀。

(2) 浆液的碱性有所增加。应用碱渣后脱硫剂浆液的 pH 值一般由 7.6 上升到 12.8,属于中强碱性。但碱渣浆液制备系统本身均已采用防腐设计,因此不会增加对系统的腐蚀。

(3) 浆液的组成有所不同。碱渣中含有较多石膏,其硬度比 CaCO<sub>3</sub> 低,不会加重磨损。

(4) 浆液密度降低、浆液量增加。碱渣浆液量增加后,只要管道设计流速合理,对磨损没有影响。



而浆液密度降低,对系统的磨损有改善作用。

#### 4.7 对脱硫经济性的影响

碱渣替代石灰石粉对脱硫经济性的影响主要体现在以下方面:

(1) 增加一次性投资费用。应用碱渣需增加相应的碱渣储存和浆液制备系统,供浆、脱水、废水系统等也需要进行改造。

(2) 减少脱硫剂的费用。碱渣作为一般工业固体废弃物,用作脱硫剂,相对于石灰石粉在价格方面具有明显优势,每年可节约脱硫剂费用约 25%。

(3) 减少脱硫系统的电耗。碱渣脱硫效率更高,可以实现在一定负荷和一定煤种含硫条件下长时间减少 1 台循环泵运行,从而减少系统电耗。以本次试验为例,停运 1 号循环泵可减少运行电流 126 A,对应运行功率约 1 100 kW;同时,系统阻力减少约 150 Pa,减少风机功率约 1700 kW。按年停运累计 1 000 h 计算,可减少电耗约 280 万 kW·h。

(4) 增加系统的水耗。若含固率 20% 的碱渣浆液中  $\text{Cl}^-$  含量控制在 6 g/L 以下,则系统增加水耗即使用碱渣后系统增加的脱硫废水排放量,约为原石灰石脱硫废水的 2 倍。因此,一般要求碱渣供应单位对碱渣通过洗盐降氯预处理后再供应电厂进行脱硫使用。

## 5 结论

针对工业制碱过程中产生的废弃物——碱渣,将其作为燃煤电厂烟气脱硫系统脱硫剂进行开发应用,在 1 000 MW 超超临界燃煤机组达到超低排放标准的脱硫系统上进行了应用碱渣完全替代石灰石的首次工业化试验,基于与原石灰石脱硫的比较,对碱渣脱硫的性能及其影响进行了研究和评价,主要结论如下:

(1) 碱渣的脱硫性能优于石灰石。在执行超低排放条件下(即  $\text{SO}_2 < 35 \text{ mg/m}^3$ ),脱硫效率提高约 1%。机组负荷相近、原烟气  $\text{SO}_2$  含量在  $1\ 300 \text{ mg/m}^3$  时,脱硫率可达 99% 以上。能快速提升吸收塔浆液 pH 值和实现更宽范围的 pH 值调整。在机组负荷 886 MW,原烟气  $\text{SO}_2$  含量  $2\ 000 \text{ mg/m}^3$ ,而吸收塔浆液 pH 值只有 5.16 时,脱硫率仍能保持在 99% 以上,因此燃用高硫煤的潜力较大。

(2) 碱渣的应用可提高吸收塔运行的灵活性和经济性。机组负荷为 664~737 MW,原烟气中  $\text{SO}_2$  含量为  $1\ 147 \sim 1\ 395 \text{ mg/m}^3$ ,吸收塔(大塔)pH 值为 5.0~5.9,AFT 塔为 6.1~6.8,脱硫效率为 98.20~98.96%,只需 2 台循环泵运行。

(3) 碱渣脱硫石膏的  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaCO}_3$  含量等指标优于石灰石石膏。通过石膏滤饼的冲洗、加大系统的废水排放、控制碱渣的  $\text{Cl}^-$  含量等措施,可以将石膏中的  $\text{Cl}^-$  含量控制在合格的水平,但是碱渣石膏含水率较高。

(4) 应用碱渣替代石灰石粉作为脱硫剂,由于其具有廉价、节电和对高硫煤适应等优势,可取得较明显的经济效益。与石灰石相比,碱渣供应更可靠,可以实现以废治废,具有良好的环保效益。

#### 参考文献:

- [1] 赵礼兵,许博,李国峰,等. 碱渣综合利用发展现状[J]. 化工矿物与加工,2017(6):73-76.  
ZHAO Libing, XU Bo, LI Guofeng, et al. Development status in comprehensive utilization of alkaline residues [J]. Chemical Minerals and Processing, 2017(6):73-76.
- [2] 邵勇,刘小丽,朱进军. 碱渣在工程建设中的应用现状分析[J]. 化工矿物与加工,2019(6):52-56.  
SHAO Yong, LIU Xiaoli, ZHU Jinjun. Analysis on application status of alkaline residue in engineering construction [J]. Chemical Minerals and Processing, 2019(6):52-56.
- [3] 廖永进,王雨嘉,方健. 白泥作为湿法脱硫系统脱硫剂的可行性研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(S1):161-163.  
LIAO Yongjin, WANG Yujia, FANG Jian. Feasibility research of white mud in wet flue gas desulfurization system [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S1):161-163.
- [4] 宋晓旭,王桂春,胡山鹰. 以白泥作脱硫剂的脱硫石膏资源化利用[J]. 现代盐化工,2015(1):10-16.  
SONG Xiaoxu, WANG Guichun, HU Shanying. Resource utilization of desulfurization gypsum from white mud as sorbent [J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2015(1):10-16.
- [5] 王炫,孟东栋,杨涛,等. 制碱白泥应用于燃煤电厂湿法烟气脱硫过程的反应特性[J]. 广东电力,2018,31(5):21-27.  
WANG Xuan, MENG Dongdong, YANG Tao, et al. Reaction characteristic of Soda residue used in WFGD in coal-fired power plants [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(5):21-27.
- [6] 韩锋,崔耀星,陈留平,等. 盐泥用于湿法脱硫的研究与应用[J]. 现代盐化工,2015(2):6-9.  
HAN Feng, CUI Yaoxing, CHEN Liuping, et al. Study and application of salt mud for wet desulphurization [J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2015(2):6-9.
- [7] 张玉娟,张绍训,罗跃. 碱厂废渣在湿法烟气脱硫中的应用实例[J]. 广东化工,2011,39(10):168-170.  
ZHANG Yujuan, ZHANG Shaoxun, LUO Yue. Example of Alkali residue of soda plants applied in wet-flue gas desulfurization [J]. Guangdong Chemical Engineering, 2011, 39(10):168-170.
- [8] 罗联村. 氨碱废渣用于我厂锅炉烟气脱硫[J]. 纯碱工业,2015(2):20-22.  
LUO Liancun. Ammonia alkaline residue applied for flue gas desulfurization of the boiler of our plant [J]. Soda Industry, 2015(2):20-22.

- [9] 牟灏文. 白泥湿法烟气脱硫在井神公司的应用[J]. 纯碱工业, 2015(5):3-8.  
MOU Haowen. Application of white mud wet flue gas desulfurization in Jingshen company[J]. Soda Industry, 2015(5):3-8.
- [10] 杨青山, 廖永进. 碱厂钙基废弃物在烟气脱硫系统的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(S1):235-238.  
YANG Qingshan, LIAO Yongjin. Application research of calcium-based waste of soda ash production in flue gas desulfurization system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(S1):235-238.
- [11] HONG Rongkun, GAO Wei, HU Pingfan, et al. Experimental study on wet desulphurization system of large-scale thermal power plant with ammonia soda solid waste (white mud)[J]. Advanced Material Research, 2012(343-344):227-234.
- [12] 李博, 王卫良, 姚宣, 等. 煤电减排对中国大气污染物排放控制的影响研究[J]. 中国电力, 2019, 52(1):110-117.  
LI Bo, WANG Weiliang, YAO Xuan, et al. Study on the effects of emission reduction in coal-fired power industry on China's air pollutant emission control[J]. Electric Power, 2019, 52(1):110-117.
- [13] 李刚, 姜艳华. 适应燃煤电厂 SO<sub>2</sub> 排放新标准的湿法脱硫技术[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(1):92-94.  
LI Gang, JIANG Yanhua. Wet desulphurization technology suitable for new SO<sub>2</sub> emission standard in coal-fired power plants[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(1):92-94.
- [14] 林耿锋. 浅析白泥在烟气脱硫系统中的综合利用[J]. 广西电力, 2016, 39(2):72-74.  
LIN Gengfeng. Brief analysis of integrated utilization of white mud in flue gas desulfurization system[J]. Guangxi Electric Power, 2016, 39(2):72-74.
- [15] 武纪原. 浆液品质及性能对湿法脱硫系统脱硫率影响[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(1):92-94.  
WU Jiyuan. Influence of slurry quality and performance on desulfurization efficiency of wet FGD system[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(1):92-94.
- [16] 马双忱, 华继洲, 苟发全, 等. 白泥脱硫浆液与石膏理化特性[J]. 化工进展, 2016, 35(S2):381-388.  
MA Shuangchen, HUA Jizhou, GOU Faquan, et al. Physical and chemical properties white mud desulphurization slurry and gypsum[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(S2):381-388.
- [17] 贾西部. 石灰石-石膏湿法脱硫废水排放量深度解析[J]. 中国电力, 2020, 53(8):139-144.  
JIA Xibu. In-depth analysis on wastewater discharge of wet limestone-gypsum FGD[J]. Electric Power, 2020, 53(8):139-144.

作者简介:



董文伟

董文伟(1967),男,学士,高级工程师,从事火电机组生产运行管理、技术改造研究相关工作(E-mail:xhsj@xhepc.xina.net)。

## Experimental investigation on alkaline residue desulfurization of a 1 000 MW coal-fired electricity generation unit

DONG Wenwei

(Jiangsu Xinhai Power Generation Co., Ltd., Lianyungang 222023, China)

**Abstract:** Alkaline residue is an industrial solid waste and pollutant from the process of soda production by ammonia alkali method. Developing its high-value utilizations is of significant economic and environmental benefits. Aimed at developing the application of alkaline residue as the sorbent for wet flue gas desulfurization in coal-fired power plants, the first ever industrial experiment of using the alkaline residue to substitute limestone was carried out on the flue gas desulfurization system of a 1 000 MW coal-fired electricity generation unit designed with a limestone-gypsum wet flue gas desulfurization process. Based on systematical comparison with limestone desulfurization, the performance as well as influences of the alkaline residue for desulfurization was investigated and evaluated. The experiment proves that the alkaline residue is capable to completely replace limestone in the wet flue gas desulfurization system of large-scale coal-fired power unit. Desulfurization of alkaline residue can improve efficiency of flue gas desulfurization and achieve ultra low emission, and has little influence on the quality of by-product gypsum. Alkaline residue replacing limestone as the sorbent can ensure the reliable supply of the sorbent and has the advantages of lower price and electricity consumption and higher flexibility for higher sulfur coals and can achieve good economic benefits. It also achieves using a waste to control pollution and therefore provides significant environmental benefits.

**Keywords:** coal-fired power generation unit; wet flue gas desulfurization; desulfurization sorbent; alkaline residue; solid waste utilization

(编辑 方晶)