燃煤电厂烟气脱硫石膏化学脱水调理工艺优化

明　强[1]，杨　健[2]，孙东奇[1]，李　飞[2]，王　坤[1]，赵晓云[2]，吴　琼[2]，
卢　卫[2]，赵晓丹[1]，周　振[1]
（1.上海电力大学环境与化学工程学院，上海　201306；
2.华能国际电力江苏能源开发有限公司南通电厂，江苏　南通　226003）

［摘　　要］在燃煤电厂脱硫石膏微观结构、组成成分与脱水性能分析的基础上，构建由污泥比阻（SRF）、毛细吸水时间（CST）、泥饼含水率和平均粒径构成的脱水性能表征体系，研究了初始污泥质量浓度、聚丙烯酰胺（PAM）种类和投加量对脱硫石膏脱水调理效果的影响。结果表明：脱硫石膏初始质量浓度越高，调理后脱水性能越好，但质量浓度过高会带来管道堵塞及设备寿命降低等问题；分子量和水解度最大的阴离子型 PAM 在投加量为 0.20 mg/g 时，石膏的 SRF 和 CST 分别降至 1.21×10^8 s^2/g 和 99.2 s，平均粒径升至 125.2 μm，泥饼含水率降至 25.6%。脱水后石膏品质可满足《烟气脱硫石膏》（GB/T 37785—2019）的要求。

［关　键　词］脱硫石膏；机械脱水；化学调理；聚丙烯酰胺；脱水性能
［中图分类号］X773　［文献标识码］B　［DOI 编号］10.19666/j.rlfd.202102028

［引用本文格式］明强，杨健，孙东奇，等．燃煤电厂烟气脱硫石膏化学脱水调理工艺优化[J]．热力发电，2021，50(9)：145-151.
MING Qiang, YANG Jian, SUN Dongqi, et al. Optimization of chemical dehydration and conditioning process of flue gas desulfurization gypsum in coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(9): 145-151.

Optimization of chemical dehydration and conditioning process of flue gas desulfurization gypsum in coal-fired power plants

MING Qiang[1], YANG Jian[2], SUN Dongqi[1], LI Fei[2], WANG Kun[1], ZHAO Xiaoyun[2], WU Qiong[2], LU Wei[2], ZHAO Xiaodan[1], ZHOU Zhen[1]
(1. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 201306, China;
2. Nantong Power Plant of Huaneng International Power Jiangsu Energy Development Co., Ltd., Nantong 226003, China)

Abstract: The characterization system for dewaterability of flue gas desulfurization (FGD) gypsum, including sludge specific resistance of filtration (SRF), capillary suction time (CST), cake moisture content and average particle size, was constructed based on the analysis of microstructure, composition and dewaterability of FGD gypsum from coal-fired power plants. The influences of initial FGD gypsum mass concentration, the type and the dosage of polyacrylamide (PAM) on the conditioning performance of FGD gypsum were investigated. The results indicate that, the higher initial mass concentration of FGD gypsum led to better dewaterability after conditioning, but too high mass concentration would cause blockage of the pipeline and reduce the service life of equipments. After being conditioned by the selected PAM at the dosage of 0.20 mg/g, the SRF, CST and the moisture content of the FGD gypsum decreased to 1.21×10^8 s^2/g, 99.2 s and 25.6%, respectively, and the average particle size of the FGD gypsum increased to 125.2 μm. The quality of the FGD gypsum after conditioning and dewatering could satisfy the requirements of *Flue Gas Desulfurization Gypsum* (GB/T 37785—2019).

Key words: flue gas desulfurization gypsum, mechanical dewatering, chemical conditioning, polyacrylamide, dehydration performance

收 稿 日 期：2021-02-11
基 金 项 目：中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ19-G02)；上海市教委曙光计划(19SG49)
Supported by：Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ19-G02); Shuguang Plan of Shanghai Education Commission (19SG49)
第一作者简介：明强(1996)，男，硕士研究生，主要研究方向为污水处理与电厂水处理技术，1172621503@qq.com。
通信作者简介：赵晓丹(1979)，女，博士，副教授，主要研究方向为污水处理与电厂水处理技术，zhaoxiaodan@shiep.edu.cn。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

石灰石-石膏法脱硫广泛应用于燃煤电厂烟气脱硫[1-2]。该法产生的工业副产物为脱硫石膏，通常用于建材、工业原料、水泥缓释剂及土壤改性剂等[3]。根据《烟气脱硫石膏》（GB/T 37785—2019）的规定，脱硫石膏资源化需将附着水量降至 15%以下。目前，燃煤电厂脱硫副产石膏首先经旋流器浓缩，再使用脱水机脱水。

然而，受限于设备运行[4]、脱硫剂品质[5-6]、亚硫酸盐氧化效果[7-8]等因素，脱硫石膏常常出现脱水困难，最终产品含水率高的问题。脱硫剂纯度不高或粒径不合要求，会导致石膏晶体生长困难，同时杂质分子会堵塞晶体孔隙，致使石膏难以脱水[5-6]。另外，氧化空气量不足或氧化效率低，也会导致脱硫石膏中亚硫酸盐含量高，影响石膏品质[9]，造成脱水困难[7-8]。

为了改善脱硫石膏的脱水性能，需要对脱硫石膏进行脱水调理。化学法是最为常用且相对成熟的调理技术[10-11]，能显著改善污泥脱水性能[12]。化学法脱水条理剂聚丙烯酰胺（PAM）具有投加量小、絮凝能力强等优点[13]，且加入适量 PAM 不会影响脱硫石膏的综合利用。吴其胜等[14]发现，脱硫建筑石膏中掺入适量 PAM，能够有效提高石膏的力学性能和防水性能。另外，采用 PAM 脱水调理还能够使脱硫石膏砌块减重[15]，提高硫酸钙晶须的抗水溶性能[16]、石膏土壤农用减少磷流失[17]等效果。

调理药剂优选与反应条件优化，将有助于进一步改善脱硫石膏脱水性能，提高最终产品品质，但在该领域尚缺乏系统性研究。本文将在某燃煤电厂脱硫石膏微观结构、组成成分与脱水性能分析的基础上，通过构建由污泥比阻（SRF）、毛细吸水时间（CST）、泥饼含水率和平均粒径构成的脱水性能表征体系，研究初始污泥质量浓度、PAM 种类和投加量对脱硫石膏脱水调理效果的影响，确定适宜的旋流器底流脱硫石膏质量浓度范围，筛选最佳 PAM 种类与投加量。

1 脱硫石膏脱水调理试验材料及内容

1.1 试验材料

图 1 为石灰石-石膏法烟气脱硫系统示意，试验所用脱硫石膏取自石膏旋流器底流污泥，初始质量浓度为 420 g/L。

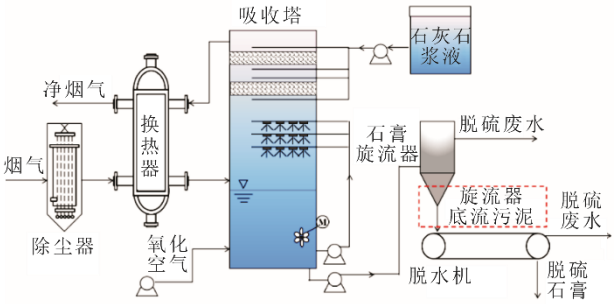


图 1 石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统示意
Fig.1 Schematic diagram of limestone-gypsum wet flue gas desulfurization system

试验选取了 6 种不同种类的阴离子型 PAM（APAM）和阳离子型 PAM（CPAM）（爱森絮凝剂有限公司（中国分公司）），PAM 投加量以 1 g 脱硫石膏干固体（DS）计，在投加量为 0.25 mg/g 时对脱硫石膏进行脱水调理，并分析其脱水性能变化。6 种 PAM 的性能指标见表 1。

表 1 用于脱硫石膏脱水调理的 6 种 PAM 性能指标
Tab.1 Parameters of PAM for desulfurization gypsum dehydration conditioning

编号	1	2	3	4	5	6
种类	阳离子型	阳离子型	阳离子型	阴离子型	阴离子型	阴离子型
结构	线性	线性	线性			
分子量/kDa	18 000~20 000	1 8000~20 000	18 000~20 000	18 000~20 000	12 000~14 000	12 000~14 000
离子度/%	55	39	9			
水解度/%				30	30	20

1.2 试验内容

1）*初始脱硫石膏质量浓度对脱水性能影响试验* 将脱硫石膏稀释至 400、350、300、250、200、150 g/L，投加 0.25 mg/g 的 PAM。转速与时间控制为六联搅拌器（ZR4-6，深圳中润）在 250 r/min 下搅拌 30 s，再以 100 r/min 搅拌 5 min，最后以 500 r/min 搅拌 10 min（下同）。最后测定调理后石膏的泥饼含水率、SRF、CST、平均粒径等脱水性能指标。

2）*PAM 种类对脱硫石膏脱水性能的影响试验* 取 500 mL 脱硫石膏置于 6 个 500 mL 烧杯中，按

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0.25 mg/g 分别投加不同类型 PAM，测定调理后石膏的脱水性能指标，优选脱水效果最好的调理药剂。

3）PAM 投加量优化实验　设置优选 PAM 的投加量梯度为 0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30 mg/g，测定调理后石膏的脱水性能指标，确定最佳投加量。

1.3 脱硫石膏脱水性能指标测定

1）SRF 测定　采用布氏漏斗抽滤法测定脱硫石膏的 SRF（m/kg）[18]。计算公式如下

$$\mathrm{SRF}=\frac{2bPA}{\mu c} \tag{1}$$

式中：b 为过滤方程 $t/V=bV+a$ 中的直线斜率；t 为过滤时间，s；V 为滤液体积，m^3；P 为过滤压差，Pa；A 为过滤面积，m^2；μ为滤液动力黏度，mPa·s；c 为单位体积滤液所对应的滤饼干固体质量，kg/m^3。

2）CST 测定　CST 采用 Model 304 M 毛细吸水时间测定仪（Triton，英国）测定。取一定体积混合均匀的脱硫石膏快速注入加液管中，水分于特定滤纸中扩散，当水分流至电极 a 时开始计时，流至电极 b 时计时结束，所用时间即为脱硫石膏 CST 值。

3）粒径测定　脱硫石膏粒径采用 SALD-2201 激光衍射式粒度分布测量仪（Shimadzu，日本）测定。测定时不考虑石膏浓度，用胶头滴管取 2~3 滴样品滴入石英样品容器中，放入样品室并合上遮光盖，以 0.1~1 000 μm 的粒径范围进行衍射扫描，通过软件计算得到脱硫石膏平均粒径和粒径中位数值。

4）泥饼含水率测定　采用 MMP-3 迷你板框压滤机（AFmitech，荷兰）对脱硫石膏进行压滤脱水。利用 2 块圆形多孔铁片和 2 片滤布将 100 mL 脱硫石膏密封于样品容器中。设置表盘压力为 0.5 MPa，压滤时间为 12 min，启动装置。压滤完成后，泥饼含水率采用 HC103 水分分析仪（Mettler Toledo，瑞士）测定。

5）脱硫石膏性质测定及计算　脱硫石膏中悬浮固体质量浓度（SS）按照《水质悬浮物的测定重量法》（GB/T 11901—1989）测定。脱水后泥饼中附着水、结晶水、MgO 含量和 pH 值按照《石膏化学分析方法》（GB/T 5484—2012）测定。Cl^-含量按照《水泥化学分析方法》（GB/T 176—2017）测定。$CaSO_4·2H_2O$ 含量按照 GB/T 37785—2019 的方法计算。

1.4 石膏固体形态及成分分析

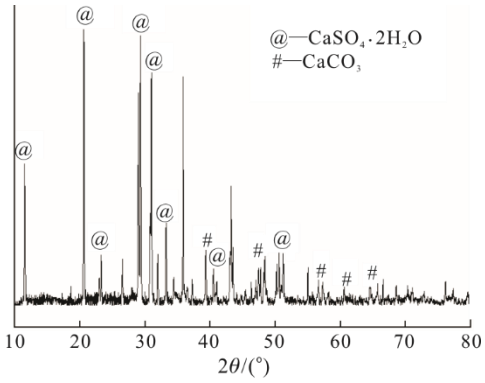
1）扫描电子显微镜（SEM）和能谱仪分析　将脱硫石膏样品在 60 ℃烘箱烘干后研磨成粉末，喷金 30 s 改善样品导电性，使用 JSM-7800F 场发射电镜（Hitachi，日本），分析脱硫石膏固体表面形貌特征，结合能谱仪（EDS）分析样品组成元素。

2）X 射线衍射仪（XRD）分析　采用 D8 X 射线衍射仪（Brooke Co.，德国）对脱硫石膏粉末进行 XRD 表征。测试电压 40 kV、电流 40 mA、步长 0.1°，使用 Jade 6.5 软件分析其固体成分。

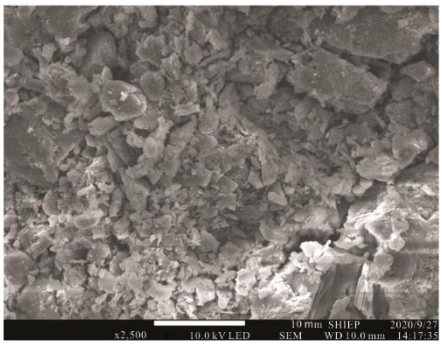
2 结果分析

2.1 脱硫石膏固体性质分析

经旋流器浓缩后的电厂烟气脱硫石膏固体 XRD 分析及 SEM 图像如图 2 所示。由图 2a)可见，脱硫石膏成分主要为 $CaSO_4·2H_2O$，由于在脱硫塔运行过程中部分 $CaCO_3$ 未完全溶解，导致脱硫石膏中还含有少量 $CaCO_3$。由图 2b)可见，脱硫石膏晶体形状不规则，大小不均，而粒径是石膏脱水性能重要影响因素[18]。



a) XRD分析



b) SEM图像

图 2 脱硫石膏固体 XRD 分析及 SEM 图像

Fig.2 XRD analysis result and SEM image of the desulfurization gypsum

表 2 为脱硫石膏组分分析。由表 2 可见，脱硫石膏 Ca 质量分数高于 S，说明除了 $CaSO_4·2H_2O$ 之外还存在 $CaCO_3$。由于脱硫石膏中含有的 $CaCO_3$ 晶体粒径远小于二水石膏，难以絮凝，同时会堵塞石膏晶体之间的空隙，会导致脱水困难[5]。当溶液中

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Cl^-含量较高时，$CaSO_4$ 生成过程中会将一部分 Cl^- 包裹在内生成 $CaCl_2$，堵塞石膏内部通道[19]，导致脱硫石膏的脱水性能变差。脱硫石膏中含有的 Fe^{3+}及 F^- 会促进细晶体生成，不利于石膏脱水[20]。综上，烟气脱硫系统实际产生的石膏直接脱水存在较大困难，需要进行化学调理以改善其脱水性能。

表 2 脱硫石膏组分分析 单位：w/%

Tab.2 EDS analysis of the desulfurization gypsum

C	O	F	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
17.08	48.44	2.78	1.42	3.72	4.72	7.23	0.48	0.65	11.98	1.49

2.2 脱硫石膏初始质量浓度对脱水性能的影响

在实际运行时，受到停留时间、脱硫塔运行控制等因素的影响，旋流器底流石膏质量浓度会存在差异，不同的底流石膏质量浓度对石膏调理脱水可能存在影响。图 3 显示了不同旋流器底流污泥质量浓度对脱硫石膏脱水性能的影响。

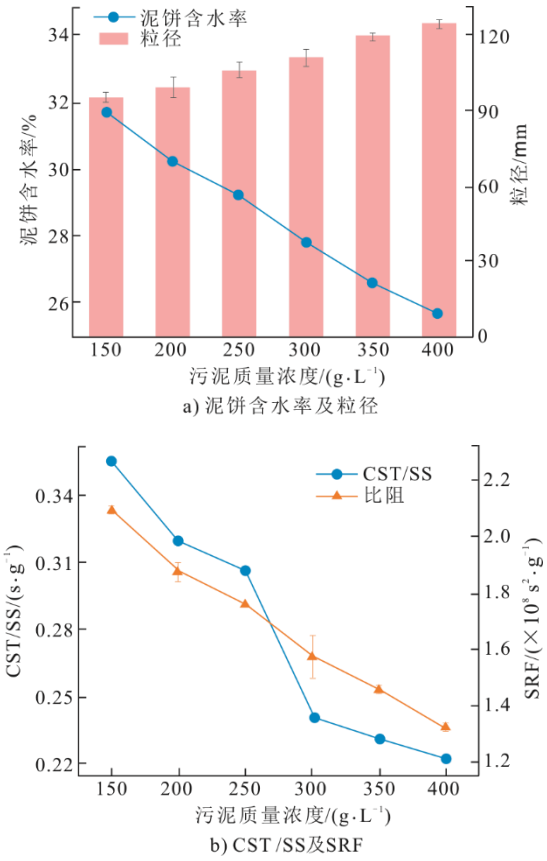


图 3 石膏旋流器底流污泥质量浓度对脱水性能的影响

Fig.3 Effect of sludge mass concentration at bottom of the gypsum cyclone on dehydration performance of the gypsum

由图 3a)可见：在同种 PAM 相同投加量下，泥饼含水率随污泥质量浓度的升高而降低，脱硫石膏平均粒径变化规律正好相反；当污泥质量浓度为 150 g/L 时，脱水后泥饼含水率为 31.65%，而污泥质量浓度达到 400 g/L 时，泥饼含水率降低至 25.63%，此时平均粒径升至最大，为 125.2 μm。

由图 3b)可见，随着污泥质量浓度升高，脱硫石膏单位悬浮固体质量的毛细吸水时间（CST/SS）从 0.33 s/g 降至 0.23 s/g，比阻呈现出与 CST/SS 相同的变化趋势。在 PAM 单位投加量不变的情况下，固体质量浓度升高会使 PAM 投加总量增多，这增加了 PAM 与石膏颗粒之间的碰撞概率，更有可能形成大絮体颗粒，从而使脱水性能得到显著改善[21-22]。

以上结果表明，旋流器运行时的浓缩倍数越高，浓缩后脱硫石膏的脱水性能越好。但在实际工程运行时应注意，脱硫石膏质量浓度越高越接近固态，容易造成管道结垢和堵塞。另外，在使用带式压滤机时，过高的脱硫石膏质量浓度会增加压滤机负荷，存在脱水机皮带崩断的风险；使用板框式压滤机则会使滤布负荷过高，缩短滤布寿命的同时降低脱水效果。因此，实际工程运行中，旋流器底流石膏质量浓度不宜高于 500 g/L，但旋流器底流石膏质量浓度过低会增加脱水机处理量。因此，旋流器底流石膏质量浓度宜保持在相对较高的范围内，以提升脱水效率同时降低运行成本。

2.3 脱硫石膏脱水调理 PAM 筛选

图 4 为 PAM 类型对脱硫 SRF、CST、粒径、泥饼含水率的影响。由图 4a)可知，试验所用脱硫石膏的 SRF 为 4.15×10^8 s^2/g，远低于市政污泥。主要原因是底流污泥成分主要为 $CaSO_4\cdot2H_2O$，自由水含量高，且不含胞外聚合物等黏性物质，虽然原始脱硫石膏 SRF 较低，但实际脱水效果并不好。由图 4b)可知，脱硫石膏未经调理时的平均粒径仅为 3.44±0.19 μm，小于板框式压滤机滤布孔径。在压滤过程中，在压力作用下粒径较小的污泥会穿透滤布，出现“跑泥”现象，影响脱水效果。因此，为获得良好的脱水效果，脱硫石膏脱水前必须经过调理。

在分别投加 3 种 CPAM 后，脱硫石膏的 SRF 分别降至 1.60×10^8、1.68×10^8、1.88×10^8 s^2/g，降幅均超过 50%，污泥的 CST 也从 155.2 s 降至 132.8、

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

137.2、138.4 s。同时，颗粒平均粒径分别增至 47.1、20.2、13.6 μm。比较 3 种 CPAM 的调理效果，PAM1 的性能最佳，经其调理脱水后的泥饼含水率最低，仅为 27.68%。3 种 CPAM 分子量和结构均相同，只有离子度不同，分别为 55%、39%及 9%，这是造成调理效果差异的主要原因。PAM1 分子上的荷电基团密度高，吸附电中和作用力度大，更利于固体颗粒凝聚，改善脱硫石膏脱水性能[23]。

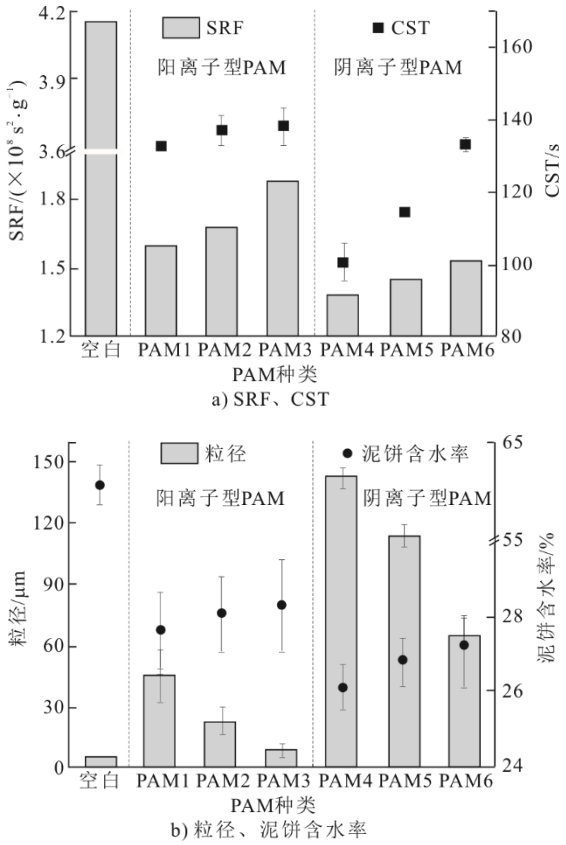


图 4 PAM 类型对脱硫石膏 SRF、CST、粒径、泥饼含水率的影响

Fig.4 Effect of PAM type on SRF, CST, particle size and sludge cake moisture content

投加 3 种 APAM 后，脱硫石膏 SRF 显著降至 1.38×10^8~1.53×10^8 s^2/g，CST 分别降低至 100.6、114.6、133.0 s，脱水后泥饼含水率降至 26.17%~27.11%。APAM 调理效果明显好于投加 CPAM，经 PAM4 调理后平均粒径最高能够达到 142.6 μm，是 PAM1 的 3.14 倍，能够有效改善脱硫石膏脱水性能。在相同分子量下，PAM5 絮凝效果优于 PAM6。这是因为 PAM5 的水解度达到 30%，PAM 在水溶液中会部分水解变为 RCOO—，在 RCOO—基团离子间静电斥力的作用下，PAM 的分子链伸展打开并拉长，增加了吸附面积与和石膏颗粒接触的概率，提高了 PAM 的吸附架桥和卷扫网捕的能力[24]。对于水解度相同的 PAM4 和 PAM5，分子量越大则分子链越长，活性官能团越多，絮凝效果也越好[25]。

综上所述，APAM 的投加更有利于改善脱硫石膏的脱水性能，投加 APAM4 后石膏颗粒平均粒径最高，CST 和 SRF 最低，脱水后泥饼含水率可降低至 26.17%，在 6 种 PAM 中调理效果最好。

2.4 PAM4 投加量优化

PAM4 投加量对脱硫石膏脱水性能的影响如图 5 所示。

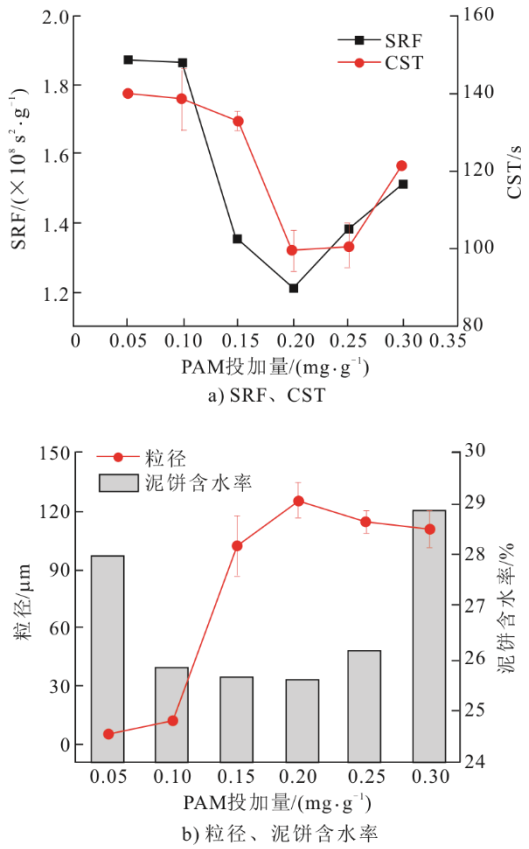


图 5 PAM4 投加量对脱硫石膏脱水性能的影响

Fig.5 Effect of PAM4 dosage on dehydration performance of the desulfurization gypsum

由图 5a)可见：在 PAM4 投加量为 0.05~0.30 mg/g 时，SRF 与 CST 随着投加量的增加均先减小后增大；在投加量为 0.20 mg/g 时 SRF 降至最低，为 1.21×10^8 s^2/g，远小于初始脱硫石膏的 SRF，CST 也降低至最短的 99.2 s。

由图 5b)可见：石膏颗粒平均粒径随着投加量的增加先从 0.05 mg/g 的 5.13 μm 增长到 0.20 mg/g 的 125.2 μm，泥饼含水率也从 60.62%降至 25.63%，此时石膏脱水性能达到最佳；随着投加量进一步增

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

加，污泥的平均粒径反而降低至 108.2 μm，泥饼含水率也重新变大。这可能是由于过多的 PAM 分子在石膏固体颗粒表面形成覆盖层，在静电斥力的作用下胶体重新脱稳而分散，从而使石膏脱水性能下降[26]。综上所述，使用 PAM4 作为脱硫石膏脱水调理剂时，其最佳投加量为 0.20 mg/g。

表 3 显示了经 PAM4 调理后脱水的脱硫石膏各项技术指标。由表 3 可见：脱硫石膏脱水后泥饼附着水质量分数降至 6.53%，已优于一级标准；二水硫酸钙质量分数（91.27%）和氯离子质量分数（126 mg/kg）均达到了二级标准；而水溶性氧化镁质量分数与 pH 值也满足国标相关要求。

表 3 经 PAM4 调理后脱硫石膏各项技术指标
Tab.3 Technical requirements for the desulfurization gypsum after PAM conditioning

项目	GB/T 37785—2019			脱水后泥饼
	一级	二级	三级	
泥饼附着水质量分数/%	≤10.00	≤12.00	≤15.00	≤6.53
二水硫酸钙质量分数/%	≥95.00	≥90.00	≥85.00	≥91.27
氯离子质量分数/(mg·kg^{-1})	≤100	≤300	≤600	≤126
水溶性氧化镁质量分数/%		≤0.10		≤0.06
pH 值		5.0~9.0		7.2

3 结　论

1）脱硫石膏的脱水性能随初始质量浓度升高而改善，建议将其控制在 400~500 g/L。

2）一定范围内，分子量及离子度（或水解度）越大，PAM 调理效果越好，APAM 调理效果优于 CPAM。6 种 PAM 中，PAM4 调理效果最好，其分子量为 18 000~20 000 kDa，水解度为 30%，最佳投加量为 0.20 mg/g。

3）经 PAM4 调理脱水后的脱硫石膏含水量为 6.53%，二水硫酸钙质量分数为 91.27%，氯离子质量分数为 126 mg/kg，水溶性氧化镁质量分数为 0.06%，各项技术指标均满足国家标准。

[参 考 文 献]

[1] 马双忱, 于伟静, 贾绍广, 等. 燃煤电厂脱硫废水处理技术研究与应用进展[J]. 化工进展, 2016, 35(1): 255-262.
MA Shuangzhen, YU Weijing, JIA Shaoguang, et al. Research and application progresses of flue gas desulfurization(FGD) wastewater treatment technologies in coal-fired plants[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(1): 255-262.

[2] XIN Y, ZHOU Z, MING Q, et al. A two-stage desalination process for zero liquid discharge of flue gas desulfurization wastewater by chloride precipitation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 397: 122744.

[3] 王凯, 张庆国, 田富中. 湿法脱硫石膏特性研究进展[J]. 环境工程, 2016, 34(增刊 1): 448-451.
WANG Kai, ZHANG Qingguo, TIAN Fuzhong. Research progress on characteristics of wet desulfurization gypsum[J]. Environmental Engineering, 2016, 34 (Suppl.1): 448-451.

[4] 王富兴. 影响脱硫石膏品质的因素及改善措施[J]. 精细石油化工, 2019, 36(1): 56-58.
WANG Fuxing. Factors affecting the quality of desulfurized gypsum and improvement measures[J]. Speciality Petrochemicals, 2019, 36(1): 56-58.

[5] 沈建军, 武丽英, 祁利明, 等. 火电厂湿法烟气脱硫石膏脱水问题分析及处理措施[J]. 工业安全与环保, 2010, 36(11): 26-28.
SHEN Jianjun, WU Liying, QI Liming, et al. Analysis on gypsum dehydration in wet flue gas desulfurization of power plant[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2010, 36(11): 26-28.

[6] 徐铮, 胡明华, 孙建峰. 电厂脱硫石膏含水率超标原因分析及控制措施建议[J]. 工业安全与环保, 2012, 38(9): 28-30.
XU Zheng, HU Minghua, SUN Jianfeng. Analysis on the reasons of high moisture content of gypsum and some suggestions of control measures[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2012, 38(9): 28-30.

[7] 李东梅, 董雪峰, 郭阳, 等. 电厂湿法脱硫系统石膏脱水困难的影响因素[J]. 热力发电, 2011, 40(10): 4-7.
LI Dongmei, DONG Xuefeng, GUO Yang, et al. Analysis of affecting factors on difficult dehydration of gypsum used for wet desulphurization in power plants[J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(10): 4-7.

[8] 许拥军, 王天博, 崔一尘, 等. 湿法脱硫中真空皮带机脱水效果影响因素[J]. 环境工程, 2013, 31(增刊 1): 453-456.
XU Yongjun, WANG Tianbo, CUI Yichen, et al. Influencing factors of vacuum belt conveyor dehydration effect in wet FGD[J]. Environmental Engineering, 2013, 31(Suppl.1): 453-456.

[9] 蒋路漫, 周振, 俞杰, 等. 烟气脱硫中亚硫酸钙铁锰复合催化氧化优化[J]. 环境工程学报, 2017, 11(12): 6332-6338.
JIANG Luman, ZHOU Zhen, YU Jie, et al. Optimization for Fe-Mn catalyzed sulfite oxidation in flue gas desulfurization[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(12): 6332-6338.

[10] 刘睿, 周启星, 张兰英, 等. 水处理絮凝剂研究与应用进展[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1558-1562.
LIU Rui, ZHOU Qixing, ZHANG Lanying, et al. Advances in research and application of water-treatment flocculants[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(8): 1558-1562.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[11] 唐建国, 吴炜, 周振, 等. 污泥脱水性能测定对污泥调理与脱水的重要性分析[J]. 给水排水, 2017, 53(12): 11-16.
TANG Jianguo, WU Wei, ZHOU Zhen, et al. Analysis on the significance of sludge dewatering property determination to sludge conditioning and dewatering[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(12): 11-16.

[12] WU W, ZHOU Z, YANG J Z, et al. Insights into conditioning of landfill sludge by $FeCl_3$ and lime[J]. Water Research, 2019, 160: 167-177.

[13] ZHAO X D, JIANG J, ZHOU Z, et al. Applying organic polymer flocculants in conditioning and advanced dewatering of landfill sludge as a substitution of ferric trichloride and lime: mechanism, optimization and pilot-scale study[J]. Chemosphere, 2020, 260: 127617.

[14] 吴其胜, 黎水平, 刘学军, 等. 聚丙烯酰胺乳液对脱硫建筑石膏性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2012, 30(4): 571-575.
WU Qisheng, LI Shuiping, LIU Xuejun, et al. Effects of polyacrylamide emulsion on properties of desulfurized building gypsum[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2012, 30(4): 571-575.

[15] 姜伟, 范立瑛, 刘健飞, 等. 脱硫石膏砌块的减重研究[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2009(1): 43-44.
JIANG Wei, FAN Liying, LIU Jianfei, et al. Study on weight reduction of desulfurization gypsum block[J]. Structures Units and Units Architecture, 2009(1): 43-44.

[16] 石钰, 郑水林, 贾金升. 聚丙烯酰胺/硫酸钙晶须复合材料的制备与表征[J]. 非金属矿, 2018, 41(1): 5-7.
SHI Yu, ZHENG Shuilin, JIA Jinsheng. Study on preparation and characterization of PAM/calcium sulfate whisker composite materials[J]. Non-metallic Mines, 2018, 41(1): 5-7.

[17] NIYUNGEKO C, LIANG X Q, SHAN S D, et al. Synergistic effects of anionic polyacrylamide and gypsum to control phosphorus losses from biogas slurry applied soils[J]. Chemosphere, 2019, 234: 953-961.

[18] 闫维明. 湿法脱硫中吸收塔浆液固体成分与石膏脱水的关系探讨[J]. 热力发电, 2009, 38(1): 99-100.
YAN Weiming. An approach to the relationship between solid components in slurry of absorbtive tower and dehydration of gypsum in the desulphurization system[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(1): 99-100.

[19] 罗小红, 王栋民, 段鹏选, 等. 脱硫石膏附着水影响因素研究[J]. 新型建筑材料, 2009, 36(11): 35-38.
LUO Xiaohong, WANG Dongmin, DUAN Pengxuan, et al. nfluencing factors on free moisture of flue gas desulfurization gypsum[J]. New Building Materials, 2009, 36(11): 35-38.

[20] PAN D P, WU H, YANG L J. Investigation on the relationship between the fine particle emission and crystallization characteristics of gypsum during wet flue gas desulfurization process[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 55: 303-310.

[21] 黄廷林, 聂小保, 张刚. 水厂生产废水污泥比阻测定的影响因素分析及方法改进[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2005, 37(3): 297-300.
HUANG Tinglin, NIE Xiaobao, ZHANG Gang. Method improvement of sludge specific resistance measurements in the water plant[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2005, 37(3): 297-300.

[22] HWANG G, LEE C H, AHN I S, et al. Analysis of the adhesion of Pseudomonas putida NCIB 9816-4 to a silica gel as a model soil using extended DLVO theory[J]. Journal of Hazardous materials, 2010, 179(1/2/3): 983-988.

[23] 吴敦虎, 熊琼, 林辉, 等. 有机高分子絮凝剂在污泥脱水中的应用研究[J]. 水处理技术, 2004, 30(2): 116-118.
WU Dunhu, XIONG Qiong, LIN Hui, et al. The application and study of the high molecular flocculant in dewatering of sludge[J]. Technology of Water Treatment, 2004, 30(2): 116-118.

[24] 徐初阳, 罗慧, 聂容春, 等. 聚丙烯酰胺的性质对煤泥水絮凝效果的影响[J]. 煤炭技术, 2004, 23(1): 63-66.
XU Chuyang, LUO Hui, NIE Rongchun, et al. The effect of the property of polyacrylamide on flocculation effici- ency of coal slurry[J]. Coal Technology, 2004, 23(1): 63-66.

[25] 王树芹, 罗松涛, 李国忠, 等. 阴离子型聚丙烯酰胺相对分子质量和水解度对污泥脱水性能影响的研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(8): 1706-1713.
WANG Shuqin, LUO Songtao, LI Guozhong, et al. Effect of anionic polyacrylamide on settleability and dewaterability of sewage sludge[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(8): 1706-1713.

[26] 郑立庆, 崔红帅, 黄瑞娟, 等. 新型改性聚丙烯酰胺的合成及对污泥调理效果的研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(5): 1166-1170.
ZHENG Liqing, CUI Hongshuai, HUANG Ruijuan, et al. Synthesis of novel modified polyacrylamide and its effect on dewatering performance of sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(5): 1166-1170.

（责任编辑　杨嘉蕾）

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net