

DOI: 10.19666/j.rlfed.202302008

# 硫酸氢铵对灰垢板结与疏松的影响研究

赵雪成<sup>1</sup>, 何川<sup>1</sup>, 马云龙<sup>1</sup>, 卜俊峰<sup>2</sup>, 孔凡海<sup>1</sup>, 许波连<sup>2</sup>, 宋玉宝<sup>1</sup>

(1.西安热工研究院有限公司苏州分公司, 江苏 苏州 215153;

2.南京大学化学化工学院, 江苏 南京 210093)

**[摘要]** 燃煤机组选择性催化还原 (SCR) 烟气脱硝系统运行过程中, 烟气中的硫酸氢铵 (ABS) 易造成空气预热器 (空预器) 冷端灰垢板结, 增加了吹扫清灰难度。为此, 实验制备 ABS 预混灰样压片并在不同温度下加热, 设计新型检测方法比较样品抗压强度的变化, 探索 ABS 对灰垢机械强度的影响规律。结果显示: 1) ABS 预混灰样在 147~220 °C 加热板结过程中发生了物理团聚和化学反应, 抗压强度最大提高了约 95.50%, 其中物理团聚起主导作用, 影响程度约占 88%~89%, 化学反应的影响约占 10%~12%; 2) ABS 板结灰样在 220~300 °C 加热下, 气化析出率最高达到 96.43%, 灰样由板结状态转为疏松, 抗压强度由空白样品的 195.50% 降低到 110.17%。证明通过高温加热降低堵塞物中 ABS 含量是可行的, 为改进吹扫清灰创造了条件。

**[关键词]** 空预器堵塞; 硫酸氢铵; 抗压强度; 物理团聚; 加热气化

**[引用本文格式]** 赵雪成, 何川, 马云龙, 等. 硫酸氢铵对灰垢板结与疏松的影响研究[J]. 热力发电, 2023, 52(11): 159-164. ZHAO Xuecheng, HE Chuan, MA Yunlong, et al. Experimental study on the hardening and loosening of ammonium bisulfate ash scale[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(11): 159-164.

## Experimental study on the hardening and loosening of ammonium bisulfate ash scale

ZHAO Xuecheng<sup>1</sup>, HE Chuan<sup>1</sup>, MA Yunlong<sup>1</sup>, BU Junfeng<sup>2</sup>, KONG Fanhai<sup>1</sup>,  
XU Bolian<sup>2</sup>, SONG Yubao<sup>1</sup>

(1.Suzhou Branch, Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215153, China;  
2.School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** During the operation of SCR flue gas denitrification system in coal-fired units, ammonium bisulfate (ABS) in flue gas causes ash scale slabbing at the cold end of the air preheater and increases the difficulty of purging and cleaning ash. To this end, ABS premixed ash samples were prepared and pressed and heated at different temperatures, and a new test method was designed to compare the changes in compressive strength of the samples and explore the influence law of ABS on the mechanical strength of ash scale. The experimental results showed that: 1) ABS premixed ash samples underwent physical agglomeration and chemical reaction during the heating of slabbing at 147-220 °C, and the compressive strength was increased by about 95.50% at maximum, among which physical agglomeration played a dominant role with about 88%-89% influence and the influence of chemical reaction accounted for about 10%-12%; 2) ABS slabbed ash samples under heating at 220-300 °C, ABS vaporization precipitation rate reached up to 96.43%, the ash sample from the slab state to loose, compressive strength from 195.50% of the blank sample to 110.17%. It is proved that the means of high temperature heating is feasible to reduce the ABS content in the blockage and create conditions for improving blowing and cleaning from the perspective of ash scale.

**Key words:** air preheater blockage; ammonium bisulfate; compressive strength; physical agglomeration; heating gasification

收稿日期: 2023-02-15

基金项目: 苏州市重点产业技术创新项目 (SGC2021121)

Supported by: Technological Innovation of Key Industries in Suzhou (SGC2021121)

第一作者简介: 赵雪成 (1997), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为空气预热器堵塞清理技术, 365560745@qq.com。

火电厂  $\text{NO}_x$  排放一直备受人们关注<sup>[1-2]</sup>, 选择性催化还原 (SCR) 烟气脱硝技术是现有燃煤机组控制  $\text{NO}_x$  排放的主流技术<sup>[3-5]</sup>。燃煤机组采用 SCR 烟气脱硝系统控制  $\text{NO}_x$  排放时, 因催化剂活性降低或喷氨量大造成出口  $\text{NH}_3$  逃逸, 逃逸的  $\text{NH}_3$  会随着烟气进入下游设备。造成氨逃逸超标的主要原因: 1) 脱硝烟气流场不均匀, 造成局部喷氨量过大引起逃逸; 2) 脱硝喷嘴存在堵塞现象, 也引起局部喷氨量过大导致逃逸; 3) 对氨逃逸率监视手段有限; 4) 机组负荷波动频繁,  $\text{NO}_x$  生成随负荷变化而变化, 喷氨调节存在一定的滞后性, 造成过喷现象; 5) 运行调整、监控手段还不完善, 需要进一步总结经验。

而烟气中  $\text{SO}_3$  的增加和逃逸氨导致生成硫酸氢铵 (ABS) 和硫酸铵 (AS)<sup>[6]</sup>。在催化剂的作用下, SCR 脱硝系统烟气中 0.5%~1.5% 的  $\text{SO}_2$  被催化氧化为  $\text{SO}_3$ <sup>[7]</sup>, 所生成的 ABS 在低温下导致空气预热器 (空预器) 灰垢板结堵塞, 增加风机电耗和排烟温度<sup>[8]</sup>。空预器堵塞后, 烟气量减少, 排烟温度降低, 扩大了 ABS 的沉积区域; 另外, 机组一直低负荷运行排烟温度偏低, 也扩大了 ABS 的沉积区域, 造成堵塞情况加重。

国内外对 ABS 的物性及其对灰垢的影响开展了众多研究。Hitachi-Zosen 公司的 Saleem 等人<sup>[9]</sup>在 1979 年提出了 ABS 的结露温度与  $\text{NH}_3$  和  $\text{SO}_3$  浓度的对应关系。Burke 等人<sup>[10]</sup>采用沉积系数表征 ABS 对空预器堵塞的影响程度。Menasha 等人<sup>[11]</sup>发现, 烟气中的 ABS 以气溶胶的形式存在而不是液珠。国内针对空预器 ABS 堵塞也开展了研究<sup>[12]</sup>。马双忱等<sup>[13]</sup>认为 ABS 与碱性物质发生反应产生硫酸盐 (硫酸铁、钠), 这些反应物吸附在大比表面积的小颗粒上并长大形成团聚。王云刚等<sup>[14]</sup>在低温省煤器试验中证实, ABS 和各种可溶性硫酸盐的形成促进了细微颗粒的团聚。雷健康等<sup>[15]</sup>发现空预器元件上的 ABS 积灰强度是松散灰沉积强度的 5 倍以上, 增大了吹扫清灰难度。刘宏卫等<sup>[16]</sup>发现提高排烟温度会使空预器的烟气侧压差有所下降。

为探索 ABS 对灰垢的内在影响, 王诚雨<sup>[17]</sup>利用热台显微镜观察合成灰样升温过程的形态变化。颜鲁<sup>[18]</sup>研究了预混和未混 ABS 灰粉样品的黏附率变化规律。张佳凯<sup>[19]</sup>利用竖式炉模拟研究了 ABS 积灰在油冷探针上的生长过程, 以及探针壁面温度、ABS 浓度的影响规律。上述研究探索了 ABS 灰垢沉积过程, 从降低 ABS 灰垢强度角度提出了堵塞

治理新途径<sup>[20]</sup>, 但还需开展 ABS 对灰垢板结影响规律的量化研究。

结合烟气升温清除空预器 ABS 堵塞的运行经验<sup>[21]</sup>, 本文制备了 ABS 预混灰样压片并进行加热处理, 对其抗压强度的变化规律开展了定量分析实验研究, 揭示 ABS 致灰垢板结的主导作用机理是物理团聚, 而高温加热析出 ABS 可使板结灰垢疏松而降低机械强度。

## 1 实验方法

### 1.1 ABS 预混灰样压片

在空预器设计温度区间, AS 为固态粉末状, 对催化剂性能和下游空预器的影响较小, 但存在 AS 分解成 ABS 的现象。空预器常规设计烟气阻力为 1.0 kPa<sup>[22]</sup>, 在 SCR 脱硝系统氨逃逸产生的 ABS 作用下, 烟气阻力会增加到 1.5~2.5 kPa, 甚至高达 2.5~4.2 kPa, 严重增加机组能耗<sup>[23]</sup>。ABS 的沸点温度为 350 °C, 熔点为 147 °C。空预器运行中进口烟温 320~400 °C, 出口烟温 120~140 °C。ABS 在 146~207 °C 内为液态, 该区域被称为 ABS 区域, 烟气中的飞灰吸附在部分 ABS 上, 形成黏性很大的黏结物沉积在空预器换热元件的表面造成空预器换热元件堵塞。图 1 为空预器换热元件堵塞照片, 其中换热元件上的灰白色部分为沉积的黏结物<sup>[24]</sup>。



图 1 空预器换热元件堵塞

Fig.1 Air preheater heat exchanger element blockage diagram

通过实验得出, ABS 在固态下与飞灰的结合性并不高, ABS 在常温常压下为固态, 并不具有较高的黏附性, 而与灰粉混合后形态更是无法满足后续进行的机械强度检测。所以, 借鉴其他实验方法, 在制作抗压强度测试样品时加入一定比例的  $\text{H}_3\text{BO}_3$  后, 再将样品置于冲压机下加压, 使其成为具有固定形态和截面积的统一样品。而加入  $\text{H}_3\text{BO}_3$  导致了灰粉的初始机械强度变高, 因此还需要设计前置实验, 以尽可能排除  $\text{H}_3\text{BO}_3$  所带来的机械强

度的改变影响。

制作成型样品需经过电热烘箱高温加热。因加热时间、温度等因素的不同,产生不同的实验样品。

实验用煤灰取自电厂锅炉尾部飞灰,筛分后的平均粒径为 75  $\mu\text{m}$ 。ABS 粉末与  $\text{H}_3\text{BO}_3$  为 A-R 级别试剂,来自上海阿拉丁试剂有限公司。在 ABS 粉体与飞灰的混合物中,添加约 30% 质量分数的  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,在 10.7 t 压力下冲压制备如图 2 所示的圆柱体样品压片。

### 1.2 压片加热处理

在电热烘箱内,样品压片在 220  $^{\circ}\text{C}$  以下进行低温加热 ABS 熔融处理,在 220  $^{\circ}\text{C}$  以上进行高温加热 ABS 气化处理,加热时间为 2 h。

### 1.3 抗压强度测试与理化分析方法

ABS 预混灰样压片采用抗压测试仪进行抗压破坏实验,当样品出现破坏时,停止机器压力施加,记录样品所能承受的抗压强度,以此来表征 ABS 灰垢样品的机械强度。

样品的理化特性采用 XPS (PHI5000 VersaProbe)、TG (耐驰 STA449F3) 及 SEM 电镜 (S-3400N) 等分析仪测试。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 前置实验

前置实验通过加入  $\text{H}_3\text{BO}_3$  增加样品初始状态(混合未加热)的机械强度,冲压后成型。前置实验数据统计见表 1。每份样品均在室温 18.7  $^{\circ}\text{C}$ ,空气湿度 30% 的环境条件下进行压片机冲压制作。样品的冲压压力最大均为 10.7 t,样品是直径为 4 cm 的圆柱体(受压面积为 12.57  $\text{cm}^2$ ),承受压强为 8.55 MPa。

当样品中  $\text{H}_3\text{BO}_3$  质量分数降到 30% 左右时,样品边缘出现灰粉脱落现象,当样品中  $\text{H}_3\text{BO}_3$  质量分数继续降低时,样品开始出现断裂及大面积破损。图 2 为样品冲压制备实物。而最佳的  $\text{H}_3\text{BO}_3$  质

量为 30%,此时样品完好,而其中  $\text{H}_3\text{BO}_3$  的质量分数也较低。

表 1 前置实验数据统计  
Tab.1 Experimental data statistics

序号	$\text{H}_3\text{BO}_3$ 与灰质量比	灰样质量/g	$\text{H}_3\text{BO}_3$ 质量/g	$\text{H}_3\text{BO}_3$ 质量分数/%
1	0.80:1	5	4.0	44.44
2	0.70:1	5	3.50	41.18
3	0.60:1	5	3.00	37.50
4	0.50:1	5	2.50	33.33
5	0.45:1	5	2.25	31.03
6	0.40:1	5	2.00	28.57
7	0.35:1	5	1.75	25.93
8	0.30:1	5	1.50	23.08
9	0.25:1	5	1.25	20.00
10	0.20:1	5	1.00	16.67
11	0.25:1	5	0.75	13.04
12	0.10:1	5	0.50	9.09

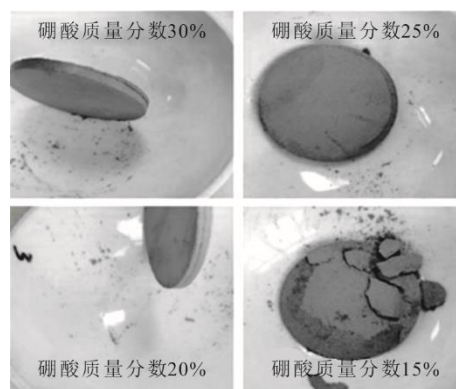


图 2 样品冲压制备  
Fig.2 Sample press preparation diagram

### 2.2 多因素正交实验

在人工添加 ABS 试剂与灰粉预混制样抗压实验中,除 ABS 质量分数外,其板结程度还受多方面因素如筛网细度、加热方式、加热时间及压片质量的影响。为了确定各影响因素的最佳水平,本文进行了多因素正交实验(L9(3<sup>4</sup>)型),制备了 9 个实验样品,以确定后续实验的初始实验参数,最终通过抗压强度来衡量。表 2 为正交实验项目。

表 2 正交实验项目  
Tab.2 Orthogonal experiment project

因素	孔径 A/ $\mu\text{m}$	加热方式 B	加热时间 C/min	压片质量 D/g	各组分质量 (ABS、 $\text{H}_3\text{BO}_3$ 、灰) /g
水平 1	75	直接加热冷却	20	5.00	0.10、1.50、3.40
水平 2	150	加热冷却重复 2 次	40	6.00	0.12、1.80、4.08
水平 3	不筛	加热冷却重复 3 次	60	7.00	0.14、2.10、4.76

在实验范围内,分析各影响因素极差对实验指标的影响。某影响因素的极差最大,表示该影响因

素的数值在实验范围内变化时,使实验指标数值的变化最大。各影响因素极差 R 如图 3 所示。由图 3

可见：灰样孔径及样品的质量对于实验有较大影响；加热时间和加热方式对于实验的影响较小。

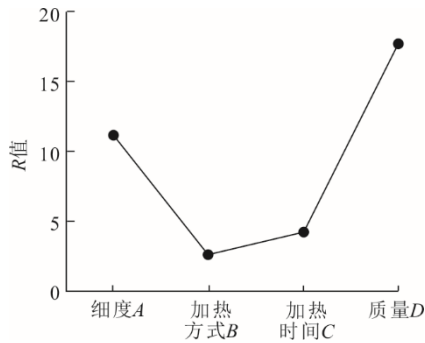


图3 各影响因素极差 R 值  
Fig.3 R-value of extreme difference of each influencing factor

### 2.3 ABS 与灰垢的物理化学作用分析

ABS 预混样品压片的 SEM 电镜实验结果如图 4 所示。由图 4 可见，ABS 预混灰样加热后的颗粒形态发生了变化。空白样品中灰样由松散小颗粒组成；加入 ABS 粉体后，在室温下 ABS 为固态，其与灰样颗粒没有发生团聚行为，少量灰粒因 ABS 吸湿而吸附在 ABS 颗粒周围；在 160 °C 加热 2 h 并冷却至室温后，ABS 与灰样形成大颗粒团聚物；在 300 °C 加热 2 h 并冷却至室温后，大颗粒团聚物消失，少部分 ABS 残留在样品中，灰粒恢复松散状态。电镜图像显示，固态 ABS 在 160 °C 下液化后，与灰样颗粒发生了粘结团聚行为，而进一步加热到 300 °C 后，液态 ABS 气化析出导致团聚状态的颗粒群恢复到松散状态。

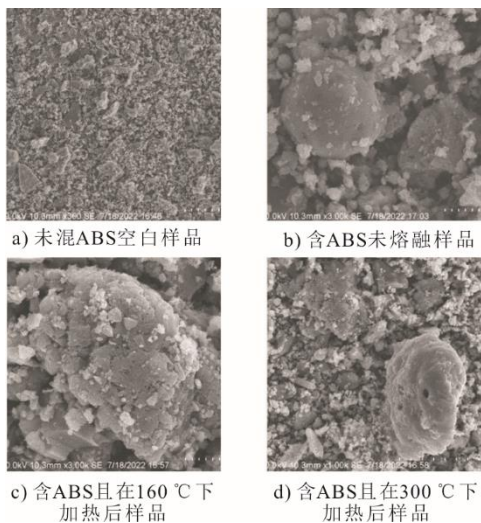


图4 样品 SEM 电镜图片  
Fig.4 SEM electron microscope image of the sample

ABS 预混样品在 30~800 °C 内的 TG 加热失重曲线如图 5 所示，加热速率为 10 °C/min。由图 5 可

见，在 150 °C 以上水分蒸发失重后，样品从 227.36 °C 时开始第 2 次失重，到 450 °C 质量趋于稳定，期间样品质量降低 2.18%，这些析出物质是气态 ABS。XPS 检测加热后样品中的 ABS 质量分数为 0.28%，样品残留的 ABS 约为原样品 ABS 的 11.38%。残留在样品中的 ABS 与灰样中的碱性氧化物发生了化学反应，生成了  $NH_4Al(SO_4)_2$ 、 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  等新物质，这与文献[18]在 ABS 灰垢中检测到了  $NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ 、 $NH_4Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$  等新物质相吻合。

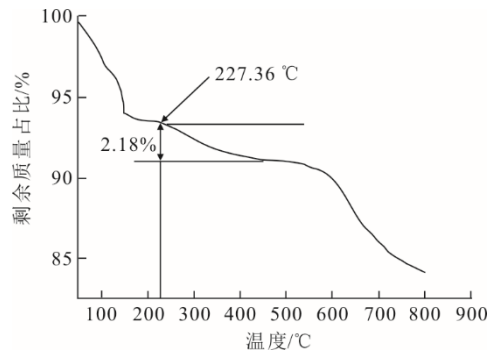


图5 样品热重质量变化  
Fig.5 Sample thermogravimetric mass change graph

### 2.4 ABS 对灰垢抗压强度的影响分析

制备压片样品直径为 40 mm，厚度为 8 mm，受压表面积为 12.56 cm<sup>2</sup>。其中，A1、A2、A3 及 A4 样品的 ABS 质量分数分别为 0、2.0%、3.5% 及 7.0%。

图 6 为 160 °C 下不同 ABS 质量分数样品抗压强度对比。在图 6 中，纵坐标表示样品对应抗压强度变化，横坐标表示样品名称。由图 6 可见：在 160 °C 低温加热下，样品压片中的 ABS 质量分数从 0 逐渐增加到 2.0%、3.5%、7.0%；样品的抗压强度从空白样品的 147.48 kPa 增加到 288.33 kPa，增加了约 95.50%。

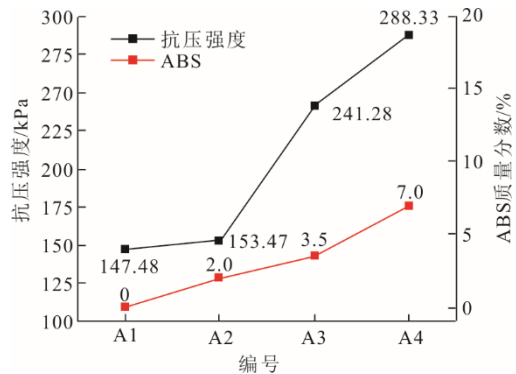


图6 160 °C 下不同 ABS 质量分数样品抗压强度对比  
Fig.6 Comparison of strength limit of samples with different ABS content at 160 °C

在 ABS 与灰样预混加热板结过程中发生了物

理团聚和化学反应，为分析 2 种作用机制对灰样机械强度的影响，开展灰样抗压实验研究。在不同温度下，对 A4 样品进行了加热处理<sup>[25]</sup>，样品的抗压强度和 ABS 质量分数变化如图 7 所示。在图 7 中，纵坐标表示样品对应抗压强度变化及对应加热温度下 ABS 剩余含量，横坐标表示加热温度。由图 7 可见：在 147~220 °C 低温加热过程中，灰样中的 ABS 熔融致样品抗压强度增加，样品的抗压强度由约 150 kPa 增加到约 300 kPa；在 220~300 °C 强高温加热过程中，样品中的 ABS 气化析出，样品中的 ABS 质量分数由 7.00% 降至 0.18%~0.25%，最大降幅为 97.42%，抗压强度也降低到约 155 kPa，接近于加热前的基准抗压强度。

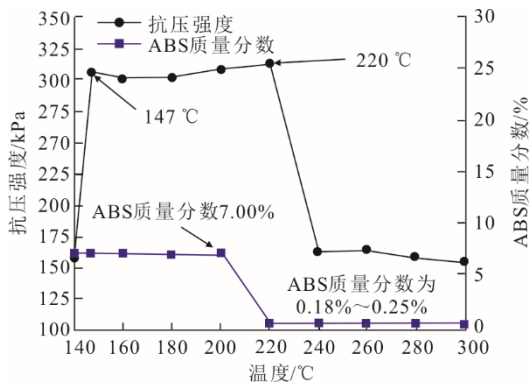


图 7 ABS 质量分数 7% 样品温度对抗压强度影响  
Fig.7 Effect of ABS content 7% sample temperature on strength

图 8 为 300 °C 下不同 ABS 质量分数样品抗压强度对比。由图 8 可见，在 300 °C 高温加热下，ABS 空白样品压片的抗压强度基本没有改变，而其他 3 个

样品的抗压强度降低幅度较大，其中 A4 样品的抗压强度由 160 °C 的 288.33 kPa 降低到 162.48 kPa，降低到约为空白样品抗压强度的 110.17%。图 8 还显示，经过高温加热后，样品压片中的 ABS 质量分数降低到约 0.19%，A4 样品的 ABS 气化析出率达到 97.28%。

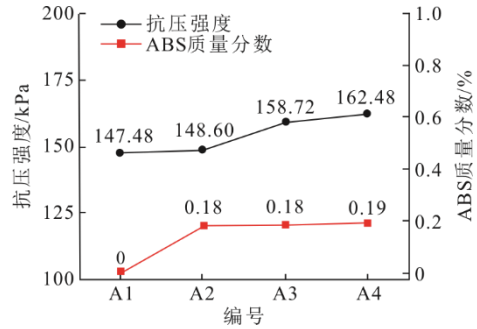


图 8 300 °C 下不同 ABS 质量分数样品抗压强度对比  
Fig.8 Comparison of strength limit of samples with different ABS content at 300 °C

为了区分物理团聚和化学反应对灰样抗压强度的影响幅度，将 160 °C 低温加热熔融 ABS 和在 300 °C 加热析出 ABS 后的灰样抗压强度汇总于表 3。由表 3 可见：在 ABS 物理团聚和化学反应的综合作用下，A3 和 A4 灰样板结后抗压强度分别提高了 63.6% 和 95.50%；而在高温加热后残留 ABS 的化学作用下，A3 和 A4 灰样板结后抗压强度分别只提高了 7.62% 和 10.17%。由此可见，物理团聚对灰样板结的增强影响约占 88%~89%，而化学反应的影响约占 10%~12%。

表 3 不同 ABS 含量样品抗压强度分析  
Tab.3 Analysis of compressive strength of samples with different ABS content

项目	160 °C/300 °C 抗压强度/kPa	160 °C 加热抗压 强度提高/%	300°C 加热后 残余强度提高/%	物理团聚的 影响占比/%	化学反应的 影响占比/%
A1 (空白基准样品)	36.87				
A3 (3.5%ABS 质量分数)	60.32/39.68	63.60	7.62	88.02	11.98
A4 (7.0%ABS 质量分数)	72.08/40.62	95.50	10.17	89.35	10.65

### 3 结 论

1) ABS 预混灰样压片在 147~220 °C 低温加热下，ABS 致灰样板结而抗压强度最高增加了 95.50%，其中物理团聚作用约占 88%~89%，而化学反应的影响约占 10%~12%。

2) ABS 预混灰样压片在 220~300 °C 高温加热下，板结灰样气化析出 ABS 而疏松，A4 质量分数为 7.0% 样品的抗压强度由空白样品的 195.50% 降低到 110.17%。

### [参 考 文 献]

[1] 庞兴龙, 史晓宏, 付振来. 火力发电厂氮氧化物减排[J]. 北方环境, 2012, 24(4): 69-71.  
PANG Xinglong, SHI Xiaohong, FU Zhenlai. The NO<sub>x</sub> emission reduction of thermal power plants[J]. Northern Environment, 2012, 24(4): 69-71.

[2] 顾卫荣, 周明吉. 火电厂烟气脱硝国内市场分析[J]. 化工进展, 2012, 31(11): 2581-2585.  
GU Weirong, ZHOU Mingji. Denitrification industry of power plant[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(11): 2581-2585.

[3] 张丽, 窦有权, 柯文明. “双碳”目标下火电厂燃料标准化管理研究[J]. 大众标准化, 2022(23): 162-164.  
ZHANG Li, DOU Youquan, KE Wenming. Research on

- standardized fuel management in thermal power plants under the goal of "double carbon"[J]. Popular Standardization, 2022(23): 162-164.
- [4] 于奔. 电厂NO<sub>x</sub>控制技术综述[J]. 企业导报, 2012(12): 289. YU Ben. A review of NO<sub>x</sub> control technologies in power plants[J]. Enterprise Herald, 2012(12): 289.
- [5] 李莉. 燃煤电厂烟气 NO<sub>x</sub> 减排控制技术综述[J]. 太原市职业技术学院学报, 2008(5): 156-157. LI Li. A review of flue gas NO<sub>x</sub> reduction control technologies for coal-fired power plants[J]. Journal of Taiyuan City Vocational and Technical College, 2008(5): 156-157.
- [6] 朱崇兵, 金保升, 李锋, 等. SO<sub>2</sub> 氧化对 SCR 法烟气脱硝的影响[J]. 锅炉技术, 2008(3): 68-72. ZHU Chongbing, JIN Baosheng, LI Feng, et al. Effect of SO<sub>2</sub> oxidation on flue gas denitrification by SCR method[J]. Boiler Technology, 2008(3): 68-72.
- [7] 葛浩, 吕剑虹. 扰动抑制广义预测控制及其在 SCR 脱硝系统中的应用[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(5): 127-130. GE Hao, LYU Jianhong. Perturbation suppression generalized predictive control and its application in SCR denitrification system[J]. Industrial Control Computer, 2020, 33(5): 127-130.
- [8] 李云东. 基于硫酸氢氨造成的空预器堵塞治理对策[J]. 产业与科技论坛, 2015, 14(18): 59-60. LI Yundong. Countermeasures for air preheater blockage management based on ammonia bisulfate[J]. Industry and Technology Forum, 2015, 14(18): 59-60.
- [9] SALEEM A, GALGANO M, INABA S. Hitachi-zosen deNO<sub>x</sub> process for fossil fuel-fired boilers[C]// Proceedings of the Second NO<sub>x</sub> Control Technology Seminar Denver: EPRI, 1978.
- [10] BURKE J M, JOHNSON K L. Ammonium sulfate and bisulfate formation in air preheaters[R]. Austin: Radian Corporation, 1982: 10-35.
- [11] MENASHA J, DUNN D R, MUZIO L, et al. Ammonium bisulfate formation temperature in a bench-scale single-channel air preheater[J]. Fuel, 2011, 90: 2445-2453.
- [12] 马凤娜, 程伟琴. 国内火电厂氮氧化物排放现状及控制技术探讨[J]. 广州化工, 2011, 39(15): 57-59. MA Fengna, CHENG Weiqin. The current situation and control technology of nitrogen oxide emission from domestic thermal power plants[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2011, 39(15): 57-59.
- [13] 马双忱, 邓悦, 吴文龙, 等. SCR 脱硝副产物硫酸氢铵与空预器中飞灰反应特性[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11): 6563-6570. MA Shuangchen, DENG Yue, WU Wenlong, et al. Reaction characteristics of SCR denitrification by-product ammonium bisulfate with fly ash in air preheater[J]. Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(11): 6563-6570.
- [14] CHEN H, JIAO J, PAN P, et al. Deposit formation of the low-pressure economizer in a coal-fired thermal power plant[J]. Energy & Fuels, 2017;31(5): 4791-4798.
- [15] 雷健康, 王浩楠, 周伶玲. 空气预热器蓄热板硫酸氢铵动态积灰模型[J]. 热力发电, 2020, 49(9): 52-57. LEI Jiankang, WANG Haonan, ZHOU Lingling. Dynamic ash accumulation model of air preheater heat storage plate with ammonium hydrogen sulfate[J]. Thermoelectric Power Generation, 2020, 49(9): 52-57.
- [16] 刘宏卫, 吴红波, 李迎春, 等. 烟气升温法在回转式空气预热器堵灰治理中的应用[J]. 发电设备, 2021, 35(4): 285-288. LIU Hongwei, WU Hongbo, LI Yingchun, et al. Application of flue gas warming method in rotary air preheater ash plugging control[J]. Power Generation Equipment, 2021, 35(4): 285-288.
- [17] 王诚雨. 硫酸氢铵对回转式空预器积灰特性的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 10-15. WANG Chengyu. Effect of ammonium bisulfate on the ash accumulation characteristics of rotary air preheater [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019: 10-15.
- [18] 颜鲁. 脱硝伴生硫酸氢铵与飞灰相互作用机制及对空预器堵塞影响的研究[D]. 济南: 山东大学, 2020: 10-20. YAN Lu. Study on the interaction mechanism between denitrification associated ammonium bisulfate and fly ash and its effect on air preheater blockage[D]. Jinan: Shandong University, 2020: 10-20.
- [19] 张佳凯. 煤与生物质积灰结渣防沾污特性研究与低温硫酸氢铵积灰特性及其消除机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 25-36. ZHANG Jiakai. Research on the anti-staining characteristics of coal and biomass ash caking and low temperature ammonium bisulfate ash accumulation characteristics and its elimination mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 25-36.
- [20] 刘建民, 陈国庆, 黄启龙. 燃煤脱硝机组空气预热器蓄热片表面飞灰沉积板结机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(增刊 1): 132-139. LIU Jianmin, CHEN Guoqing, HUANG Qilong. Study on the mechanism of fly ash deposition slabbing on the surface of air preheater accumulator sheet of coal-fired denitration unit[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2016, 36(Suppl.1): 132-139.
- [21] 刘海啸. 硫酸氢氨造成的空预器堵塞治理对策研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 26-27. LIU Haixiao. Research on the management countermeasures of air preheater blockage caused by ammonia hydrogen sulfate[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 26-27.
- [22] 李衍平. 330 MW SCR 脱硝机组空气预热器堵塞原因分析与对策[J]. 东北电力技术, 2017, 38(2): 44-46. LI Yanping. Analysis of causes and countermeasures for clogging of air preheater in 330 MW SCR denitration unit[J]. Northeast Power Technology, 2017, 38(2): 44-46.
- [23] 刘海鹏, 范允峰. 1 000 MW 机组空预器堵塞的原因及运行措施[J]. 山东工业技术, 2015(24): 34. LIU Haipeng, FAN Yunfeng. Causes and operational measures of air preheater blockage in 1 000 MW units[J]. Shandong Industrial Technology, 2015(24): 34.
- [24] 马大卫, 黄齐顺, 查智明, 等. 燃煤电厂空预器结垢成因分析及处理措施[J]. 电力科技与环保, 2017, 33(2): 56-59. MA Dawei, HUANG Qishun, ZHA Zhiming, et al. Analysis of the causes of air preheater fouling in coal-fired power plants and treatment measures[J]. Power Technology and Environmental Protection, 2017, 33(2): 56-59.
- [25] 李靖华, 张桂恩. 硫酸氢铵分解动力学及其分解机理的研究[J]. 物理化学学报, 1992(1): 125-129. LI Jinghua, ZHANG Guien. Study on the decomposition kinetics of ammonium bisulfate and its decomposition mechanism[J]. Journal of Physical Chemistry, 1992(1): 125-129.

(责任编辑 杨嘉蕾)