

· 碱回收炉 ·

碱回收炉烟气消白研究及工程实践



作者简介：张 星先生，工程师；主要从事电力、造纸、钢铁等行业的烟气消白治理、余热回收、低氮燃烧改造等工作。

张 星 林 科 季元良 蒋海涛
(山东博然电力科技有限公司, 山东烟台, 264006)

摘 要：针对碱回收炉烟气的特殊性进行研究，通过分析烟气消白的技术原理、对比烟气消白的常用技术路线，得出碱回收炉烟气消白的合理解决方案；并结合工程实践，对碱回收炉烟气消白的实际效果进行验证分析。

关键词：碱回收炉；烟气消白；余热回收；工程实践

中图分类号：TS733+.9 **文献标识码：**A **DOI：**10.11980/j.issn.0254-508X.2019.10.013

Research and Engineering Practice of Flue Gas Eliminating of Alkali Recovery Furnace

ZHANG Xing* LIN Ke JI Yuanliang JIANG Haitao

(Shandong Boran Power Technology Co., Ltd., Yantai, Shandong Province, 264006)

(*E-mail: yzzhangxing@126.com)

Abstract: Aiming at the particularity of flue gas of alkali recovery furnace, the technical principle of flue gas eliminating was studied, comparing the common technical routes of flue gas eliminating, a reasonable solution for flue gas eliminating of alkali recovery furnace was suggested. Combining with engineering practice, the actual effect of flue gas eliminating of alkali recovery furnace was verified and analyzed.

Key words: alkali recovery furnace; flue gas eliminating; waste heat recovery; engineering practice

碱回收炉是造纸厂制浆生产线的核心设备，其燃料造纸黑液由蒸煮车间产生。造纸黑液由于含有大量的碱金属和水分，燃烧生成的烟气在排入大气的过程中因温度降低，烟气中部分汽态水和污染物发生凝结，在烟囱出口形成雾状水汽。雾状水汽因天空背景色和天空光照、观察角度等原因发生颜色的细微变化，形成“有色烟羽”（俗称“大白烟”）。

湿烟气机械携带的液滴中含有大量盐类，排放烟气中的水液滴蒸发后产生数量庞大且粒径微小的盐类颗粒物，对环境产生负面影响。

目前，上海市、浙江省、天津市、邯郸市等地区相继出台了消除有色烟羽、湿烟羽的地方标准，表明各地对湿烟羽问题的重视。本文分析了烟气消白技术原理和技术路线，并结合工程实践，对碱回收炉烟气消白的实际效果进行验证。

1 消白烟原理

饱和湿烟气湿度随温度变化的曲线如图 1 所示。

曲线上的部分为过饱和区域，此区域有水分凝结析出，产生白烟；曲线下方为未饱和区域，此区域烟气冷却过程中无白烟产生。图 1 中 *B* 点为湿烟气在烟囱出口的状态点，*E* 点为环境空气状态点。当湿烟气从烟囱排出与环境空气混合时，温度和含湿量下降，烟气状态沿饱和和曲线 *BCD* 变化，烟气处于过饱和状态时，气态水凝结形成小液滴，出现湿烟羽。*D* 点到 *E* 点表示烟气与空气进一步混合，湿烟羽消散。因此烟气消白的主要原理就是通过改变烟气温度、湿度，使烟气在排放过程始终处于未饱和的状态^[1]。

烟气消白不仅要消除“冒白烟”的视觉污染，更重要的是要消除烟气中的污染物。烟气中含有大量水蒸气，水蒸气中含有较多的溶解性盐、SO₂、凝胶粉尘、微尘等细颗粒物，这些细颗粒物粒径很小、难以被传统的除尘设备有效脱除，因此，通过物理或化学作用使细颗粒物团聚形成较大颗粒是提高其脱除效率

收稿日期：2019-04-27(修改稿)

的有效途径^[2]。烟气在冷凝过程中，水蒸气以细颗粒物为凝结核在其表面发生核化凝结，使细颗粒物成为粒径较大的含尘液滴，然后经除尘、除雾设备高效捕集，从而消除烟气中的污染物。

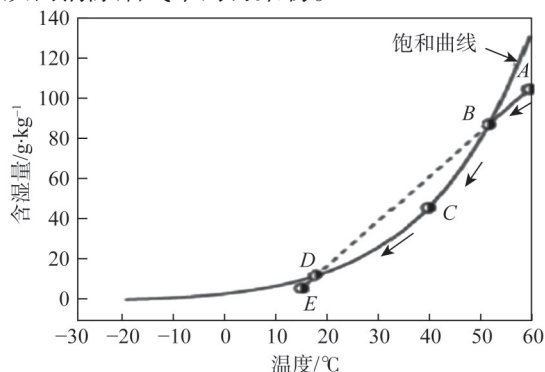


图1 饱和湿烟气湿度随温度变化的曲线

2 技术路线

目前烟气消白常用的技术路线有3大类型：烟气加热、烟气冷凝、烟气冷凝再加热。各技术路线实现方式及消白效果对比见表1^[1]。

常规火电锅炉由于多采用湿法脱硫，烟气温度已经降低至较低水平。碱回收炉有超低SO₂排放的特性^[3]，现代碱回收炉SO₂排放浓度可以低于2.9 mg/m³^[4]，一般碱回收炉烟气中SO₂的排放浓度低于143 mg/m³，且经常性的维持在28.6 mg/m³以下^[5]。因而碱回收炉不配置脱硫装置，烟气含湿量大、排烟温度高，与常规火电锅炉烟气消白相比，碱回收炉的烟气消白难度很大。因此合理选择技术路线对碱回收炉烟气消白尤为关键。

3 技术改造方案

烟气消白技术路线应用于四川某造纸厂12万t/a生活用纸技术改造项目，该项目采用武汉锅炉厂制造的碱回收炉，碱回收炉固形物处理量为800 t/d。碱回收炉设计烟气量500000 m³/h（工况），排烟温度165℃。烟气中水蒸气含量高达26.6%，其水露点高达67℃。

根据碱回收炉运行状况，结合当地年平均环境温度10℃，大气相对湿度83%的情况，烟气消白对应的理论参数见表2。

从表2可以看出，碱回收炉的烟气含水量很高，如果不对烟气进行除湿，烟气消白所需的烟气再热温度就会非常高。如果先对烟气除湿脱水，烟气消白所需的再热温度则要小得多，从而降低烟气再热所需的能量消耗，且随着烟气再热前降温幅度的增加，烟气消白所需的再热温度大幅减小。如果不对烟气进行冷凝而直接再加热，需将烟气再加热至230℃左右；采用冷凝换热器间接换热降温，可将烟气温度降低5~10℃，即烟气温度从67℃降低至62~57℃，此时需将烟气再加热至165℃左右；采用喷淋降温可以将烟气温度降低25~30℃，即烟气温度从67℃降低至42~37℃，此时仅需将烟气再加热至60℃左右。

鉴于以上分析，采用烟气冷凝再加热的技术路线，通过喷淋降温塔，对烟气进行大幅除湿脱水，通过MGGH方式将净烟气再热升温；同时考虑经MGGH降温后的烟气温度仍然较高，可对此部分烟气热量进行余热回收，回收的烟气余热可为造纸洗筛等工艺提供热水，提高了企业的经济效益。系统流程图如图2所示，主要设备见表3。

表1 烟气消白技术路线及消白效果对比

技术路线	实现方式	消白效果	
烟气加热	GGH或MGGH	冬季或气温低时不能消除白烟，能耗较高，烟气中的污染物无法消除	
	间接换热加热		热管换热器 蒸汽加热器
	烟气混合加热		热二次风混合加热 燃气直接加热 热空气掺混加热
烟气冷凝	直接换热降温	喷淋降温	烟气降温幅度可达25~30℃，能除去污染物，但烟气抬升扩散能力差，无法消除白烟
	间接换热降温	冷凝换热器	烟气降温幅度5~10℃，能除去污染物，但烟气抬升扩散能力差，无法消除白烟
烟气冷凝再加热	喷淋降温+烟气再热	能去除污染物，同时在能耗较低的情况下消除白烟	
	浆液冷却+烟气再热		
	冷凝换热器+烟气再热		

注 GGH为气-气换热器，脱硫及消白上用于利用原烟气将硫或冷凝后的净烟气进行加热；MGGH为管式热媒体加热器，原烟气加热水后，用加热后的水对脱硫或冷凝后的净烟气进行加热。

表2 烟气消白参数

烟气再热前温度/℃	烟气再热后温度/℃	烟气湿度/%	除湿量/%
67	230.2	26.6	-
60	164.7	19.4	27.0
55	128.8	15.4	42.1
45	77.6	9.4	64.7
40	59.7	7.4	72.2
30	34.9	4.2	84.4

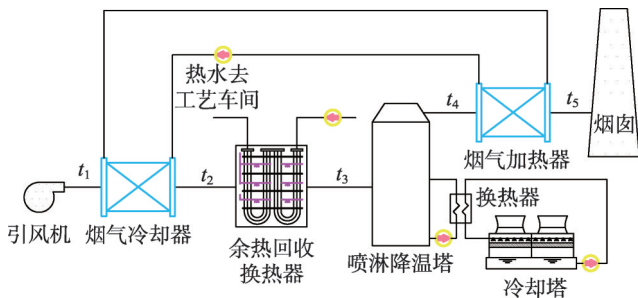


图2 烟气消白及余热回收系统流程图

表3 烟气消白系统主要设备

设备名称	规格、材质
烟气冷却器	ND钢, H型翅片管
烟气加热器	2205光管+316L螺旋翅片管
余热回收换热器	PTFE光管
喷淋降温塔	碳钢内衬2205
冷却塔	2600 m ³ /h

烟气冷却器处的烟气温度较高, 烟气腐蚀性相对较低, 采用ND钢材可充分防止烟气腐蚀, 从而降低设备造价。H型翅片管不仅有效地增加了换热面积, 同时也有利于烟气的流动和对积灰的冲刷。

余热回收换热器处的烟气温度较低, 在碱回收炉负荷较低时, 烟气会降至酸露点甚至到水露点以下, 因此烟气的腐蚀性极强。余热回收换热器采用氟塑料光管换热器, 具有优异的耐腐蚀、低阻力、不粘灰、耐老化等特性。

喷淋降温塔壳体采用碳钢内衬2205的形式, 沿烟气流动方向依次设置了均流板、喷淋层、除雾器。

烟气加热器布置在喷淋降温塔出口的竖直烟道上, 采用2205光管与316L螺旋翅片管组合的结构形式, 耐烟气腐蚀, 且布置方便。

系统设置了冷却塔、换热器对喷淋水进行降温, 从而保证了喷淋水的循环使用。

4 工程应用效果

机组投运后, 对碱回收炉的实际运行数据进行采集。部分代表性数据见表4。

表4 碱回收炉运行数据

工况	温度/℃					环境 温度/℃	环境 湿度/%	白烟 现象
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5			
一	132	101	68	26	55	8	80	无
二	135	102	67	27	52	5	91	轻微
三	150	118	72	32	63	6	96	明显
四	152	119	73	33	64	7	85	无
五	152	118	72	32	63	10	83	无

从实际的运行实践中, 可总结以下规律及经验。

(1) 环境温度越低、湿度越大, 白烟越不容易消除。在碱回收炉运行基本稳定的时间段, 各部分烟气温度基本维持不变, 随着温度降低或湿度加大, 烟囱会出现轻微白烟现象。而当湿度超过96%时, 白烟会非常明显。

(2) 喷淋降温效果非常好。喷淋降温塔中冷却水与烟气直接接触换热, 可以将烟气温度降至较低水平, 烟气中大部分水分冷凝析出。以烟气温度降至30℃为例, 此时烟气湿度4.2%; 与饱和湿烟气温度67℃、湿度26.6%相比, 烟气湿度降低了22.4个百分点, 除湿量达84.4%, 脱除了烟气中的大部分水分, 同时, 水蒸气中的溶解性盐、SO₂、凝胶粉尘、微尘等细颗粒物也随之脱除。

(3) 喷淋降温塔前设置的烟气冷却器和余热回收两级换热器, 根据环境温度、湿度、白烟情况, 可灵活调节每级换热器的降温幅度, 合理分配原烟气的热量, 分别用于消除白烟和余热回收。从而在满足环保要求的条件下, 尽可能多地进行余热回收, 增加经济效益。

(4) 喷淋降温塔喷淋水与烟气的端差应合理。循环喷淋水量由变频泵调节, 随着水量的增加, 烟气温度逐渐降低; 但冷却水与烟气的端差为1~3℃时, 烟气温度趋于稳定, 再继续增加循环水量, 不仅收效甚微, 还增大了运行电耗, 提高了运行成本。

(5) 低负荷工况。在碱回收炉启动或低负荷时, 烟气冷却器出口烟温较低, 此时应注意控制烟气冷却器的吸热幅度, 防止受热管金属腐蚀、积灰。

5 结论

通过分析烟气消白的技术原理、对比烟气消白的常用技术路线, 针对碱回收炉烟气消白的特殊性进行

研究,并结合工程实践,可以得出以下结论。

(1) 烟气冷凝再加热是较合理的烟气消白技术路线,方案设计时应进行技术经济比较,尽可能对烟气进行深度冷凝。

(2) 喷淋降温有较强的降温除湿效果,适用于含湿量较大的烟气处理。

(3) 烟气降温除湿的同时,烟气中的溶解性盐、SO₂、凝胶粉尘、微尘等细颗粒物也随之脱除。不仅消除了“冒白烟”的视觉污染,也大幅减少了污染物的排放。

(4) 烟气消白过程中可以适当考虑烟气余热回收利用,提高经济性。

(5) 环境湿度大于90%时,烟气消白难度大,建议理性对待。

参 考 文 献

[1] DENG Zeng-fu. Application of MGGH Composite Technology for Wet Plume Treatment[J]. Coal and Chemical Industry, 2018, 41

(11): 153.

邓增幅. MGGH 复合技术应用于湿烟羽治理[J]. 煤炭与化工, 2018, 41(11): 153.

[2] BAO Jing-jing. Study on the Nucleation and Growth of Fine Particles in Flue Gas Promoted by Heterogeneous Condensation of Water Vapor [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(5): 171.

鲍静静. 水汽相变促进烟气中细颗粒物成核长大特性研究 [J]. 工程科学与技术, 2017, 49(5): 171.

[3] JIN Fuming. Technical Analysis on Emission Control Method of Recovery Boiler[J]. China Pulp & Paper, 2018, 37(3): 64.

靳福明. 碱回收炉烟气排放及控制措施可行性技术分析[J]. 中国造纸, 2018, 37(3): 64.

[4] Tran H, Frederick W J, Iisa K, et al. Relationship between SO₂ emission and precipitator dust composition in recovery boilers [C]// TAPPI Engineering Conference. Atlanta, GA, 2000.

[5] QI Yongyi. The Standard Issue of NO_x Emission of Chemical Recovery Boiler[J]. China Pulp & Paper, 2016, 35(10): 53.

戚永宜. 碱回收炉烟气 NO_x 排放面临的问题[J]. 中国造纸, 2016, 35(10): 53. CPP

(责任编辑:董凤霞)

· 消息 ·

《Paper and Biomaterials》第二届编委会在上海召开

2019年10月9日,由中国造纸学会、中国制浆造纸研究院有限公司主办,中国造纸杂志社编辑出版的《Paper and Biomaterials》(简称PBM)第二届编委会在上海召开。PBM第二届编委人数62人,分别来自10个国家的40家科研院所。参加本次编委会的人员有中国造纸学会理事长、PBM编辑会主任曹振雷教授级高工,中国造纸学会秘书长、中国制浆造纸研究院有限公司董事长、PBM主编曹春昱教授级高工,PBM副主编华南理工大学付时雨教授及国家纳米科学中心查瑞涛博士、中国造纸杂志社社长梁川教授级高工、PBM执行主编刘振华高工、华南理工大学武书彬教授、齐鲁工业大学杨桂花教授和张凯博士、南京林业大学金永灿教授、东北林业大学钱学仁教授和沈静教授、北京林业大学许凤教授和樊永明教授、江南大学龙柱教授、中国林科院林产化学工业研究所房桂干研究员、中国制浆造纸研究院有限公司田超博士、湖北工业大学谢益民教授、中科院青岛生物能源与过程研究所李滨研究员、浙江理工大学唐艳军教授、中国科学院理化技术研究所吴敏研究员、福建农林大学欧阳新华教授、陕西科技大学林涛教授、PBM编辑部编辑,共计25人。会议由梁川社长主持。

曹振雷主任首先致开幕辞,他首先对各位编委的到来

表示欢迎和感谢,并指出,目前,我国造纸行业没有一本在国际上有影响力的期刊,这导致科研院所很多的优秀科研成果通过国外的SCI类期刊刊发出去;因此,我国造纸行业需要一本专、精的英文期刊给行业同仁提供一个国际学术交流平台,这是PBM的办刊初衷。经过3年多的努力,PBM现已进入发展关键阶段,希望各位编委心系PBM,为期刊建设出谋划策,共同推动PBM更好发展,并尽快进入国际化期刊行列。

PBM主编曹春昱发表讲话,他指出我国造纸行业需要打造有国际影响力的品牌期刊,以增强我国造纸行业在国际上的舆论话语权,并相信在各位编委的大力支持下,PBM将会取得更好的发展。

随后,PBM执行主编刘振华高工向与会编委汇报了期刊工作情况。在期刊未来发展计划和具体实施方案讨论环节,与会编委就如何提高稿件质量、丰富期刊栏目、开拓全新文章类型、拓宽传播渠道和提升国际影响力等方面进行了热烈讨论。会议最后,曹振雷主任和曹春昱主编分别给各位编委颁发了编委聘书。

本次会议高效务实,充分体现了编委对期刊的高度责任感与使命感。相信在大家的共同努力下,PBM将迎来全新发展,并发挥国际化交流平台作用。