

烟气消白技术在氨法烟气脱硫工程中的应用及相关问题探讨

吴远翔

武汉华德环保工程技术有限公司 湖北 武汉 430070

摘 要: 通过对消白技术原理及路线的分析, 结合氨法脱硫烟气的实际特点, 选择适合该工程应用的消白工艺, 简要介绍工程应用情况, 同时对应用过程中出现的相关问题进行分析探讨。

关键词: 氨法脱硫; 烟气消白; 氟塑料; 冷凝器; 加热器

引言

氨法烟气脱硫技术是一种有效处理 SO_2 的方法, 脱硫剂为一定浓度的氨水。 SO_2 与氨反应后生成亚硫酸铵强制氧化生成硫酸铵, 经过浓缩、结晶、分离、干燥等工艺, 生产出高品质的硫酸铵产品。

脱硫塔或烟筒排出的烟气所夹带的氨水挥发逸出气态氨, 与烟气中未脱除的二氧化硫通过气相反应生成亚硫酸氢铵、硫酸铵, 这些可溶性铵盐及微细颗粒物等形成气溶胶烟雾^[1-2]。另外, 烟囱出口的饱和烟气在温度较低的大气中急剧冷却, 烟气中水蒸气冷凝成液态, 烟气透光率下降, 从而表现出烟囱冒白烟现象。

1 消白技术原理及常用工艺路线

1.1 消白技术原理

湿烟羽(白烟)的定义: 烟囱排出的饱和湿烟气与温度较低的环境空气接触时, 在烟气降温过程中, 烟气中所含水蒸气过饱和凝结, 凝结水滴对光线产生折射、散射, 从而使烟羽呈现出白色或者灰色, 称其为“湿烟羽”(俗称“大白烟”)。

白烟实际就是净烟气中超微小液滴, 其形成的直接原因是烟气除了含有饱和水蒸气外, 还携带有未被除雾器除去的液滴, 烟气的水分主要是从除雾器中逃逸的雾滴组成。其形成的间接原因是饱和烟气绝热膨胀及接触烟道及烟囱内壁形成的冷凝物。饱和湿烟气在烟囱上升过程中, 烟气压力降低, 绝热膨胀后促使烟气降温, 形成非常细小的液滴(直径 $<1\mu\text{m}$), 绝热膨胀在烟囱中产生最大数量的雾滴, 即造成湿烟羽(白烟)现象^[3]。

脱硫后的净烟气温度通常在 50°C 左右, 抬升高度及扩散能力方面相对较差, 因此烟气从烟囱排出时, 由于烟温与环境温度相差较大, 烟气来不及扩散, 烟气中的饱和态水遇冷变成过饱和状态, 最终成为冷凝液落到地面形成“雨”, 烟气排放温度与环境温度相差越大, 越

容易形成。这些白烟最终在大气中冷凝, 将会造成脱硫岛周边设备的腐蚀, 同时白烟也造成视觉污染。

湿烟气的饱和含湿量是根据烟气压力及饱和温度确定的, 烟气的压力温度提升致使含湿量增加。一般情况下的烟囱出口压力近似取值于恒定大气压值, 故湿烟气的饱和含湿量只是其饱和温度的函数。湿烟气的饱和含湿量与饱和温度的关系如图1所示。

烟气的湿度-温度变化曲线如图1所示:

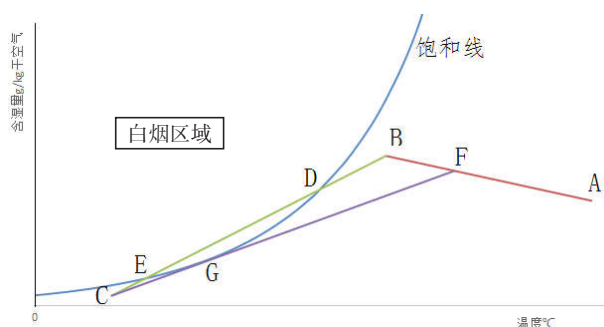


图1 温湿图

图中A点表示脱硫装置入口处烟气条件, 烟气在脱硫过程中沿绝热冷却线由A到B的方向被增湿冷却到B点状态, B点为脱硫结束时的烟气状态。

大气的状态表示在C点, 从烟囱排出的烟气与大气混合, 沿BC线向C发生状态变化, 到达D点就饱和, 开始产生白烟, 直到E点又进入非饱和区白烟即告消失, DE为白烟产生段。

从C点引饱和线的切线与AB线相交于F, G点为CF与饱和线的切点, 如果再热后的烟气状态位于CF线右侧即可避免白烟发生。

白烟控制的实质是对其温湿度及过热度进行调控, 可以由提高烟气过热度到一定数值或者降低烟气与大气环境温差到一定数值来实现。

1.2 消白技术介绍

通过消白的技术原理分析如表1，消白技术的根本是让烟气处于非饱和状态，即需要降低烟气的含湿量或通过升温手段来实现。因此，消白的技术路线一般采用冷凝烟气或加热烟气，或者互相组合的方式进行。常用的工艺路线有MGGH技术、烟气直接加热升温技术、烟气冷凝+MGGH技术、冷凝协同蒸汽加热技术等^[4]。

表1 消白工艺路线对比分析

技术路线	技术原理	应用特点
MGGH技术	通过中间媒介（水）对传递原烟气及净烟气进热量，使净烟气升温。	节能，无需增加其他热源，脱硫前烟气温度一般不低于130℃，易造成水失衡。
烟气直接加热升温	直接对烟气进行混合升温	蒸汽消耗高，需有充足蒸汽热源
烟气冷凝+MGGH	吸收塔出口装冷凝器，对烟气直接降温，同步增设MGGH，将净烟气升温。	不增加其他热源，易造成水失衡。
冷凝协同蒸汽加热	吸收塔出口装冷凝器，对烟气直接降温。冷凝后烟气经蒸汽换热升温。	蒸汽消耗较低，需有充足蒸汽热源。

2 消白技术在氨法烟气脱硫应用

2.1 项目情况

云南某化工厂5×130t/h锅炉烟气采用双塔氨法脱硫工艺，入塔烟气量约65万Nm³/h；烟气含SO₂浓度5000~8000mg/Nm³，脱硫塔直径9.2m，高41m，塔顶烟囱直径4.2m，顶高120m。烟囱出口烟气温度51℃左右。

该氨法脱硫系统正常负荷运行以来“白烟”拖尾现象严重，达数百米远。形成的液滴落在烟囱周边地面的水滴痕迹直径约40~50mm（在吸收塔平台上肉眼观察落下来的水滴约5~10mm），附近车辆表面也有比较明显的白点痕迹。

因其化工厂生产装置内循环冷却水量较为充足，且循环冷却水的使用成本远低于低压蒸汽使用成本，结合该公司的生产装置实际运行情况，通过工艺论证比选，冷凝协同加热工艺较适合该消白项目。

2.2 消白方案介绍

烟气消白改造工艺采用烟气冷凝+烟气再热（蒸汽）工艺如图2。即将烟气从吸收塔出口烟囱引出，经过烟气冷凝、气水分离、烟气再热后返回原烟囱排放。设计工况下，消白装置烟气入口温度为51.6℃，出口温度≥80℃设计。在大气环境温度5℃以上时，出口白烟肉眼基本不可见状态。

该消白改造方案是将净烟气温度从51.6℃冷凝到43℃，每小时析出~25t冷凝水，减少烟气的含湿量，即烟气饱和湿度从13.14%的将至8.18%。冷却水来水温度28℃，回水温度39℃，需要冷却水~2000t/h，再热器用

1.4MPa，260℃过热蒸汽将冷凝除水后的烟气温度加热，从43℃升至80℃，抬升烟气的出口温度，此温度下的烟气饱和湿度为58.94%，远大于8.18%实际烟气湿度，可有效消除白烟。

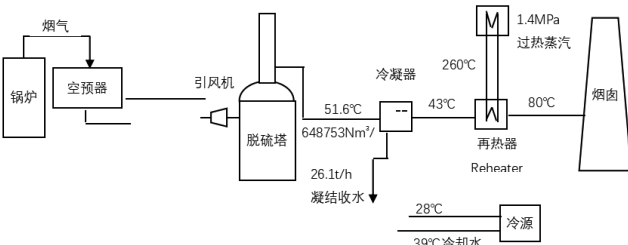


图2 消白改造工艺流程图

加热器换热面积考虑10%裕量，并可通过蒸汽阀调节蒸汽量，确保在环境温度<2℃极端条件下时，可保证烟气升温热量需求，使得最终排放烟气大于80℃。

如表2：

表2 消白改造设计参数表

项目	单位	冷凝器	再热器
数量	个	1	1
净烟气流量	Nm ³ /h	648753	/
净烟气入口温度	℃	51.6	41
净烟气出口温度	℃	43	80
冷却水流量	t/h	2000	
换热器功率	MW	20.93	12.28
冷却水设计压力	MPa	0.6	
材质		改性塑料	316L
冲洗方式		在线冲洗	在线冲洗
管板和管板支撑材质		碳钢衬PTFE，316L	碳钢衬PTFE，316L

3 相关问题探讨分析

3.1 消白系统设备结垢问题

氨法脱硫的烟气经过消白处理后，由于烟气本身携带大量超微细浆液雾滴，这些液滴成分主要为：（NH₄）₂SO₄、（NH₄）HSO₄、NH₄Cl、不溶物等。雾滴最终被截留或蒸发析出在换热管壁上，当运行一定时间后，会造成换热器结垢堵塞，影响换热效果，同时增加烟气系统阻力。因此，在消白系统设计时，应充分考虑换热器的清洗处理。

在脱硫烟气消白改造工程中，冷凝系统、加热器系统前后均配置有压力变送器，实时关注冷凝器的阻力情况。

当冷凝器差压大于设计限值时，冲洗装置，进行在线间歇冲洗。但同时会存在下面问题：冲洗水雾滴会随着烟气带入后段的加热器，影响加热器换热效果，此时出口的烟气温度会略低于正常设计值，可能影响消白效果，因此，在换热器设计时，应充分考虑换热裕量。

加热器为消白系统末端设备，冷凝器后的饱和低温烟气最终通过加热器，因此，加热器的结垢情况会更严重，经过一定时间后，加热器的阻力会逐步增加。云南某化工厂5×130t/h循环流化床锅炉氨法脱硫消白系统运行6个月后，加热器阻力增加500Pa，已经明显影响换热器效率。图3、图4为加热器运行6个月后换热器冲洗前后实物照片。



图3 加热器换热管冲洗前实物图



图4 加热器换热管冲洗后实物图

可以看出，烟气大量的浆液泥渣已粘结在换热管上，经过冲洗后，压降仅为200Pa左右，换热效率明显提升，也节约了大量蒸汽。

建议在消白改造空间条件良好情况下，可在冷凝器与加热器之间增设除雾器，尽量减少加热器结垢带来的运行风险，也可节约蒸汽耗量，同时具有协调除尘、去除烟气中的SO₃及可溶性硫酸盐等作用。

3.2 换热器材质选择问题

氨法脱硫后饱和烟气温度一般约为50℃，主要成分为铵盐、少量SO₂、NO_x、粉尘等，为酸性环境。换热器的材质需要结合运行工况环境确定，选择材质考虑主要耐温性能、耐腐蚀性、抗压抗弯、导热性、抗污垢挂壁等因素。

从目前湿法脱硫烟气消白改造应用来看，市场上选择的材质主要为氟塑料或高耐腐合金钢。

根据传热计算公式，氟塑料管的传热系数比金属管偏小，在实际使用过程中，金属管的传热系数会随着污垢增加而显著下降，而氟塑料管具备抗污垢的特性，传热系数能够基本保持恒定。因此在使用寿命内，其平均换热性能与金属换热器相当，甚至优于金属换热器，如表3。

表3 换热器材质比选

比较类别	氟塑料材质	金属材质（不锈钢）
防腐性能	呈惰性，烟气成分及酸露点温度无要求，难腐蚀	难腐蚀，但在高Cl ⁻ 浓度且高温条件下，易产生腐蚀点
耐温性	< 180℃	< 450℃
导热性	比金属材质导热性能略小	导热性能良好
结垢情况	管表面光滑、表面张力小，不易结垢	一般采用翅片管，翅片数量多，间隙小，容易积灰
清灰方式	间歇冲洗。线膨胀系数高，膨胀后灰垢脱落一部分	间歇冲洗
使用寿命	15~20年	5~10年

由此可见，在冷凝阶段，冷凝器可选择氟塑料材质作为换热管，由于加热器的热源为饱和或过饱和蒸汽，在此高温条件下，使用金属材质耐温性、稳定性更好，更有利于换热替替，兼顾耐腐蚀问题，加热器推荐使用316L以上材质。

4 结语

（1）应充分理解消白技术原理，并结合现有工程脱硫技术特点，以及能源介质提供情况，选择适合的消白工艺路线。

（2）消白系统运行过程中，实时观察换热器设备的阻力变化情况，必要时启动冲洗系统，提升换热器效率。

（3）烟气消白换热器材质选择应用时，冷凝器可选用氟塑料材质，加热器选用氟塑料的应用少见，选择金属（不锈钢）材质较为可靠。

（4）经过烟气消白处理后，整个脱硫系统的水平衡问题需要进一步关注。

参考文献

[1]张翠玲,刘宜堂.脱硫烟气消白技术及其应用案例分析[J].山东化工,2024,53(12):180-182.
[2]刘志强.FRIPP烟气深度除尘除雾消白烟技术在催化裂化装置上的应用[J].四川化工,2025,28(03):31-35.
[3]张鑫.某区域锅炉房烟气消白节能技术应用研究[J].节能与环保,2022,(07):86-88.
[4]丁志远,陈林.高效除尘除雾技术在催化裂化烟气脱硫脱硝装置的应用[J].炼油技术与工程,2025,55(12):6-9.