# 湿法脱硫工艺烟羽拖尾成因分析及对策研究[*1]

田 颖,王 雨,孙 磊

(包钢(集团)公司节能环保中心,内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 文章分析了石膏法湿法脱硫工艺烟气烟羽拖尾的成因及烟羽拖尾的影响因素,根据可控的主要因素提出了治理烟羽拖尾的有效措施,从源头、过程、末端综合考虑,采用低硫原燃料配比工艺,从源头控制颗粒物、$SO_2$ 等污染物的产生量;通过采用优质脱硫剂、提升除尘效率、增强除雾效率、优化气液比等措施,提高脱硫系统运行效率,降低出口 $SO_2$、颗粒物浓度;对脱硫烟气采取脱湿、加热措施,使烟囱出口的湿烟气在与空气混合后达不到饱和状态,形成不了冷凝水,达到消除烟羽拖尾的目的。

**关键词:** 脱硫烟气;烟羽拖尾;消白

**中图分类号:** X511 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2019)03-0001-05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.03.001

# Cause Analysis and Countermeasure Research on Tailing of Smoke Plume in Wet Flue Gas Desulfurization Process

*Tian Ying, Wang Yu, Sun Lei*

(*Energy Conservation and Environmental Protection Center of Baotou Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

**Abstract:** In this paper, the causes and influencing factors for tailing of flue gas and smoke plume in wet flue gas desulfurization process with gypsum process are analyzed. The effective measures to control them are put forward based on the controllable main factors. With the overall consideration of source, process and end, the output of such pollutants as particle and $SO_2$ can be controlled from the source with the matching process of low-sulfur crude fuel; the operating efficiency of gas desulfurization system is improved and the concentration of $SO_2$ and particulate at vent tower is reduced with such measures as adopting premium desulfurizer, improving the efficiencies of dust collection and demisting as well as optimizing gas liquid ratio; the desulphurized flue gas is with such measures as dehumidifying and heating so that the wet flue gas at chimney breast cannot reach the saturation condition after mix with the air and the condensate water cannot be formed so as to achieve the purpose of eliminating tailing of smoke plume.

**Key words:** desulphurized flue gas; tailing of smoke plume; white smoke elimination

电力锅炉烟气、钢铁企业烧结、球团烟气治理工艺大多为烟气经电除尘后进入石灰石—石膏法的湿法烟气脱硫系统,最后由烟囱排入大气环境。经湿法脱硫出来烟气通常会形成烟羽拖尾现象。有些石灰石—石膏法脱硫工艺,烟气脱硫后,排放呈“暗色烟羽”状,烟羽拖尾距离长,有时长度达几十米,产生景观污染[1]。

湿法脱硫系统长期连续排放大量的湿烟气,既

* 收稿日期: 2019-02-12

作者简介: 田 颖(1971-),男,吉林省长岭县人,硕士,正高级工程师,现从事环境保护研究、环境影响评价工作。

浪费大量的水资源，还影响大气流动，对雾霾产生负面影响造成视觉污染，严重影响环境治理效果。所以如何系统解决烟羽拖尾问题就显得十分必要。

包钢烧结、球团烟气处理，除一烧外基本都采用了石灰石—石膏湿法脱硫工艺，目前各系统存在不同程度的“烟羽拖尾”现象，烟羽拖尾问题除了与脱硫工艺有关，也与烧结、球团工艺原燃料来源、配比、排烟管道布置、运行管理水平等因素有关。

## 1 烟羽成因分析

湿法脱硫系统在脱硫过程中，脱硫浆液与高温烟气直接接触，发生传热传质，出口烟气温度通常在50 ℃左右。由于烟温与环境温度相差较大，烟气来不及扩散，饱和湿烟气在上升过程中，烟气自身的压力降低，绝热膨胀后促使烟气降温，形成非常细小的液滴（直径 $<1$ μm），在可见光及太阳照射下表现为白色烟羽。同时在烟囱内部，由于受惯性力的作用，烟气夹带的较大水滴撞到烟囱壁上，与烟囱壁上因外部环境温差而形成的冷凝液结合，当烟囱壁疏水不畅、并受烟囱内气流影响被裹携卷吸回流带入烟气中，这些平均直径为 100～500 μm 的液滴是“烟羽”中液滴的又一来源，进一步加剧“烟羽拖尾”的形成。

脱硫后的烟气有时会呈现蓝烟或黄烟，是因为生产过程中产生了较多的 $SO_2$、$SO_3$ 和 $NO_x$ 等污染物，该污染物与水分及细微的烟尘颗粒物凝聚成一种粒径与蓝光、黄光波长相当的气溶胶细颗粒物，当阳光照射时被与其光波相当的细颗粒所散射。当气溶胶的质量浓度超过一定数值时，会出现可见的蓝色烟羽，硫酸气溶胶的质量浓度越高，烟羽颜色越浓、长度也越长[2]。

## 2 烟羽拖尾影响因素研究

形成“烟羽拖尾”现象的原因比较复杂，影响因素也较多，研究认为烟羽拖尾的影响因素主要为气象环境因素、烟气的性质。气象环境因素为外因，烟气的性质为内因。

### 2.1 气象环境

环境气象条件主要指环境温度、相对湿度和大气压力。这些因素是形成“烟羽拖尾”现象的外部原因。

（1）环境温度。由于湿法烟气脱硫后烟气处于湿饱和状态，环境温度越低，烟气中凝结的水汽会越多，更易形成“烟羽拖尾”现象。对我国而言，南方地区一般只会在冬天出现“烟羽拖尾”现象，而在北方地区由于环境温度较低，出现的“烟羽拖尾”现象的几率相对较大。

（2）相对湿度。环境相对湿度的大小反映了环境空气的饱和程度。相对湿度越大，空气越接近饱和状态。对于相对湿度越大的地区（如南方地区），越易形成“烟羽拖尾”现象，而对于北方地区，空气较干燥，就较难形成“烟羽拖尾”现象。

（3）大气压力。环境大气压力越低，烟气越不易扩散，越易形成“烟羽”现象。反之，环境大气压力越高，烟气越易扩散，就越难形成“烟羽”现象。

### 2.2 烟气性质

烟气的特性主要包括烟气的含湿量、烟气温度、烟气成分及浓度、烟气出口流速等。

（1）烟气温度、湿度因素。“烟羽”的形成与烟气温度、湿度直接相关，湿法烟气脱硫系统净烟气温度一般为 45～60 ℃，烟气处于湿饱和状态，与未脱硫的原烟气直排相比，脱硫后的净烟气在抬升高度及扩散能力方面相对较差，因此当脱硫后烟气从烟囱排出时，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“白色烟羽”，烟气排放温度与环境温度相差越大，越容易形成“烟羽”。烟气温度及湿度主要影响烟羽的形成、长度及拖尾情况，烟气温度及湿度主要受烟气处理工艺影响。脱硫系统的除湿器运行效果影响很大。

（2）烟气主要成分及浓度。烟气中颗粒物含量高，则外排烟气颜色深，容易形成暗色烟羽。烟气中 $SO_2$ 与 $SO_3$ 浓度高，极易形成硫酸气溶胶，当硫酸气溶胶的质量浓度超过 71.4 mg/m$^3$ 时，会出现可见的蓝色烟羽，硫酸气溶胶的质量浓度越高，烟羽颜色越浓、长度也越长；同时，硫酸气溶胶会在大气中形成细颗粒物（PM2.5），导致雾霾加重。烟气中 $NO_x$、碳氢化合物、$O_3$ 在阳光的照射下发生一系列复杂的反应，形成黄、蓝色的光化学烟雾，这也是导致烟羽颜色变深的原因。烟气主要成分及浓度主要受烧结球团生产工艺及烟气处理工艺影响。烧结、球团的原燃料、烟气处理系统的处理效果及脱硫剂因素影响很大。其中 $SO_2$ 与颗粒物主要来源于原燃料，浓度与原燃料有一定关系，$NO_x$ 主要来源于空气，与工艺反应温度有关，与原燃料关系不大。

（3）烟气出口流速。烟气的出口流速主要影响

烟气的动能，烟气的迁移扩散、烟气的动能与烟羽长度及拖尾情况有一定关系。烟气出口流速主要受烧结、球团生产工艺及烟气处理工艺影响。

2.3　原燃料

烧结、球团湿法脱硫烟气中 $SO_2$、颗粒物的主要来源为所使用原燃料，原燃料的成分与烟气主要成分 $SO_2$、颗粒物等浓度紧密相关。原料硫分低，烟气 $SO_2$ 浓度低，燃料中的硫分及挥发分低，颗粒物、有机气态污染物的浓度低，产生烟羽拖尾的概率低一些。

2.4　烟气处理工艺

(1) 除尘效率。除尘系统对 PM2.5 粉尘、$SO_3$ 酸雾、气溶胶、重金属(Hg、As、Se、Pb、Cr) 等微细颗粒物的收集有较大影响。出口烟气颗粒物浓度将直接影响“烟羽”的长度及颜色，颗粒物浓度越高烟羽颜色越深、下沉越严重，若使用高效除尘器，可大幅度减弱烟羽的颜色、浊度及长度，最终达到治理烟羽拖尾的目的。

(2) 脱硫效率。脱硫效率与出口 $SO_2$ 浓度直接相关，而脱硫效率主要受脱硫剂质量、液气比、吸收液的 pH 值、等因素影响。

①吸收剂的质量，石灰石颗粒越细，其表面积越大，反应越充分，吸收速率越快，石灰石的利用率越高。

②液气比(L/G) 是指单位时间内吸收塔循环浆液量与吸收塔出口烟气的体积比。脱硫系统的液气比是保证烟气中 $SO_2$、$SO_3$ 及烟尘有效吸收的关键指标之一，足够的液气比是保证脱硫效率的前提，液气比也不能设计过高，太高的液气比会使烟气中的液滴夹带量增多，同样会增大除雾器的负荷。因此在保证脱硫效率的前提下，液气比越小越好[8]。

③pH 值影响，低 pH 的浆液环境影响 $SO_2$ 的吸收，高 pH 则不利于 $Ca^{2+}$ 的析出。

(3) 除雾器。吸收塔顶部设置有除雾器。若除雾器的除雾效率不高，净烟气将携带大量的液滴透过除雾器，在烟囱的出口处和烟气飘散方向形成“烟羽拖尾”。

影响除雾效率导致凝结液体逃逸原因主要有烟气流速、除雾器选型、除雾器结垢。

(4) 烟道、烟囱构造设计。在烟道表面液体沉积物和冷凝物被重新带走是形成“烟羽拖尾”的主要因素之一，这些二次夹带的大粒径液滴(300 ~ 2 000 μm) 再次接触和碰撞内衬壁面沉积或停留排出的可能性较低，同时凝结在烟囱内壁上的水滴在下流淌过程中，受到向上烟气的冲托，反复会互相凝并，成为较大的水滴，甚至形成浆液水膜。如果烟囱内烟气的流速很高，烟囱内壁的粗糙度比较大，这时过量液滴极易带出烟囱，加剧“烟羽拖尾”的形成[9]。

降低湿烟道、湿烟囱中液滴总量是烟囱雨治理的关键，因此不仅要维持除雾器良好运行，还应对烟道、烟囱构造及内衬材料进行优化和改造，强化疏水系统，确保分离出来的液滴不会在烟道、烟囱内积存。

## 3　烟羽拖尾对策研究

治理烟羽需要从源头、过程、末端综合考虑，一是考虑采用低硫原燃料配比工艺，从源头控制颗粒物、$SO_2$ 等污染物的产生量；二对脱硫工艺进行优化改进，采用优质脱硫剂、提升除尘效率、增强除雾效率、优化气液比等措施，提高脱硫系统运行效率，降低出口 $SO_2$、颗粒物浓度；三是对脱硫烟气采取脱湿、加热措施，使烟囱出口的湿烟气在与空气混合后达不到饱和状态，形成不了冷凝水，达到消除烟羽拖尾的目的。

3.1　优化原燃料配比

原料配比及燃料均能影响脱硫效果及烟羽情况。原料配比主要影响因素是精矿硫分，降低高硫分精矿的比例，能降低烟气中 $SO_2$ 的浓度，改善烟羽拖尾现象，降低烟气影响脱硫系统运行及烟气烟羽情况。燃料影响主要因素是干馏煤的比例，适当降低干馏煤比例有助于改善烟羽拖尾现象。

根据烧结、球团工艺要求，从产品质量、成本、烟气处理及控制尾烟多方面考虑建议降低原料的硫分，降低燃料中干馏煤的比例，原料配比中建议降低巴润、蒙古、混精、自产精矿等高硫精矿比例，提高区内、大中等低硫分精矿比例；燃料建议适当提高全焦粉的比例，符合条件的可考虑采用焦炉煤气。

3.2　烟气处理系统改进措施

烟气治理系统包括脱硫、除雾、除尘系统，其运行效果直接影响出口含湿量、$SO_2$、颗粒物浓度，最终影响烟羽排放状况。

3.2.1　脱硫系统

(1) 选择高质量脱硫剂。石灰石粉规格要求：$CaCO_3$ 含量大于 90%(相当于 CaO 含量 50%)，杂质含量小于 4%，MgO 含量小于 2%，粒度小于 350 目。

(2) 稳定吸收塔浆液的pH值。吸收塔浆液pH值建议控制为5~6。

(3) 采用较小液气比。液气比建议控制为13~15 L/m³。

(4) 优化运行调整。"石膏雨"现象多出现在系统高负荷运行期间,这与烟气流量有关,当机组大负荷时,在保证正常燃烧用氧前提下,适当减少风量,控制炉膛负压与升压风机压力,降低烟气流量与流速。

3.2.2 提高除尘器除尘效率

保持气流分布均匀和防止漏风;制定合理的振打方式;改善供电方式。

3.2.3 提高除雾器处理效果

(1) 选择合适的除雾器类型。目前主流使用除雾器类型为折板式除雾器和屋脊式除雾器,屋脊式除雾器对烟气流速的适应范围更宽些,结构较折板型除雾器更稳定,可以耐受的温度较高。

建议包钢湿法脱硫系统采用屋脊式二级除雾,4层喷淋,低压空心锥喷嘴;碳化硅材质,保证出口雾滴都在小于75 mg/m³以下。

(2) 除雾器结垢预防。通过定期检查除雾器状况及合理选择除雾器的冲洗周期预防除雾器结垢。

3.2.4 烟囱内壁优化

包钢烧结工艺所使用的烟囱内衬材料为预硫化丁基橡胶、玻璃鳞片及纤维化玻璃,各厂烟囱内壁均存在不同程度的腐蚀、热蚀。

(1) 烟囱内壁防腐。为尽可能减少烟羽造成环境视觉污染,最有效的处理措施是有效收集烟气带入液滴及烟囱内壁二次携带液体,为此要求内筒内衬表面应尽可能地平滑,烟囱排烟筒内烟气流速不得超过酸液液膜撕裂的临界流速,该临界流速与内衬表面的粗糙度有关。而烟囱内壁的腐蚀程度将直接影响烟囱内衬粗糙度,所以做好烟囱内壁防腐工作能有效抑制烟羽拖尾的形成。建议考虑防腐、抗热涂层防腐措施,对现有设施进行优化改造,延长烟囱内壁使用寿命。

(2) 烟囱顶,增加"破风圈"。"烟羽下洗"本质上是一种空气动力学现象,流体横向流过圆柱体时,在圆柱体背面的两侧交替产生旋涡,且在脱离后形成旋涡尾流的现象,产生旋涡的原因是流体受阻后动能和压能相互转换,且压强沿圆柱体周围及边界层方向发生变化,边界层外部流体的较大压强作用迫使边界层内部压强较小的质点向相反方向流动,从而使边层增厚,形成旋涡,然后从圆柱体表面脱离,旋涡随着流速增大被拉长后消失。当一侧旋涡长大脱离时,另一侧的旋涡正在形成并长大,这样交替形成两行旋涡尾流[5]。在烟囱顶,增加"破风圈",烟囱内筒由"直筒型"改为"直筒型+出口收缩段"型式设计。此时可避免或者减少卡曼涡旋引起烟囱出口横向旋涡尾流对烟气抬升的影响。烟囱截面面积缩小,可提高烟气出口流速,减小大气横向气流的影响,减少烟流下洗,便于扩散。

3.3 烟气脱湿、加热处理措施

对脱硫烟气进行脱湿、加热处理,改变外排烟气的性质,使脱硫后湿烟气外排与空气混合后达不到饱和状态,就不会形成烟羽,这样就达到了消除烟羽的目的。

3.3.1 消除白色烟羽技术

主要有以下三种技术思路,即烟气再热法、烟气冷凝法、烟气冷凝再热法。

其中烟气冷凝再热法方案,可通过利用工业循环水作为冷源可以实现烟气深度冷凝,回收烟气中的水分,实现节水和循环利用,在消减白烟的同时能够有可观的节水收益相对较好,条件允许应当采用。

3.3.2 技术路线选择

以包钢四烧为例,根据包头地区的气象条件及包钢烧结烟气的特点,分析烟气冷凝再热法是否适合。

影响因素分析

(1) 气象条件。包头地区的日平均温度一般在20~30 ℃之间,均值为8.64 ℃,全年约70%的时间日均值温度高于5 ℃。综合考虑投资、实际环境条件,建议本次改造环境温度按5 ℃左右考虑,环境湿度按30%考虑。同时,5—10月日平均温度相对较高,高于10 ℃,湿度相对更大,故按10 ℃环境温度,50%湿度作为校核工况。

(2) 烧结烟气处理系统电除尘器出口烟尘浓度一般在80~150 mg/m³之间。

(3) 烟气温度现状。脱硫入口烟气温度大部分在125~135 ℃之间,烟气温度点在除尘器出口;脱硫出口烟气温度大部分在42~52 ℃之间,烟气温度点在烟囱入口,即原有除雾器后。

(4) 场地条件从烧结机开始,依次为电除尘器、引风机、增压风机、脱硫塔、烟囱。引风机出口烟道转进90°后水平进入吸收塔,吸收塔出口烟道经过一定水平段后转向90°进入新建的钢烟囱。

从现有资料来看，原烟气温度较高，具备加热净烟气的条件。原烟气烟温在 130 ℃左右，净烟气烟温在 47 ℃左右，烟气含湿量基本 10% 左右，烟气含湿量大，因此采用除湿去白烟具备一定的条件。

烟气 $SO_2$ 浓度常年在 2 000 ~ 5 000 mg/m$^3$ 之间，根据经验烧结机烟气 $SO_3$ 转化率一般为 2.5% 左右，经过计算得出烟气酸露点在 110 ℃左右。因此，在设计时要充分考虑到防腐蚀的需要。从现场场地条件看，脱硫进出口均有较长烟道，具备增加换热器以及除雾器改造的条件。

综上所述，四烧烟气烟羽拖尾治理可以采用烟气先冷凝再加热技术进行改造。

## 4　结论

(1) 烟羽成因主要是烟气中所夹带的水蒸汽与大气接触扩散后，造成扩散区域空气相对湿度提高，超过空气饱和湿度后凝结所致。凝结水滴对光线产生折射、散射，在烟囱尾部行成长长的白色尾迹，这就是烟羽拖尾现象，俗称“白烟”。烟羽拖尾的影响因素主要是为气象环境因素、烟气的性质。气象环境因素为外因，烟气的性质为内因。烟气的特性主要包括烟气的含湿量、烟气温度、烟气成分及浓度、烟气出口流速等。烟气特性主要受烧结球团生产工艺及烟气处理工艺影响。其中工艺中原燃料配比、除尘脱硫效率、除雾器处理效果等是可以采取措施优化的。

(2) 烟羽治理对策需要从源头、过程、末端综合考虑，一是考虑采用低硫原燃料配比工艺，从源头控制颗粒物、$SO_2$ 等污染物的产生量；二对脱硫工艺进行优化改进，采用优质脱硫剂、提升除尘效率、增强除雾效率、优化气液比最大限度提高脱硫系统运行降低出口 $SO_2$、颗粒物浓度；三是对脱硫烟气采取脱湿、加热措施，使烟囱出口的湿烟气在与空气混合后达不到饱和状态，形成不了冷凝水，达到消除烟羽拖尾的目的。

(3) 通过分析包头气象环境、包钢烧结烟气治理现状及现场条件。推荐烟气烟羽脱白方案采用为烟气先冷凝再加热技术，该方案可通过利用工业循环水作为冷源可以实现烟气深度冷凝，回收烟气中的水分，实现节水和循环利用，在消减白烟的同时能够有可观的节水收益。

## 参　考　文　献


[1] 张朝峻，陈文学. 石灰石—石膏湿法脱硫工艺关键技术参数研究 [J]. 燃气与动力，2015，35(7)：20 - 24.

[2] 陈莲芳，徐夕仁，马春元，等. 湿式烟气脱硫过程中白烟的产生及防治 [J]. 发电设备，2005，19(5)：326 - 328.

[3] 杜谦，马春元，董勇，等. 液气比对石灰石—石膏湿法烟气脱硫过程的影响 [J]. 动力工程学报，2007，27(3)：422 - 426.

[4] 王颖聪. 湿法脱硫烟气石膏雨成因分析及处理方案综述 [J]. 华北电力技术，2012，(10)：68 - 71，75.

[5] 姚增权. 湿烟气的抬升与凝结 [J]. 国际电力，2003，7(1)：42 - 46.


# 启　　事

本刊已加入“万方数据库”、“中国知网”、“维普数据库”等。凡向本刊投递的稿件一经采用，即视为作者同意将作品的网络传播权及电子版使用权授予本刊，本刊一次性给付的稿酬已包含上述授权的费用。若不同意上述内容者，请在投递的稿件上予以特别声明，以便本刊酌情处理。

《包钢科技》编辑部