

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.007

火电厂排放烟气白雾治理新方案及节能分析

李伟科

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 烟气经过湿法脱硫后, 若不经处理直接排放, 经常会发生白雾现象, 造成“视觉污染”。[方法] 对湿法脱硫排放烟气产生的白雾现象原理进行理论研究, 通过烟气热力特性曲线方程, 采用“湿度-温度”图, 分析了白雾产生的热力过程, 提出了先降温除湿再加热的白雾治理新方案。结合某超超临界1 000 MW 等级燃煤机组, 对新方案的节能效益进行计算。[结果] 研究成果表明: 在一定的工程边界条件及设计原则下, 新方案饱和烟气的加热功率要比常规方案小 10.511 6 MW, 在考虑烟气余热用于凝结水系统和不考虑烟气余热用于凝结水系统两种情况下, 机组效率分别增加 0.231%、0.164%。[结论] 采用白雾治理新方案, 可以达到同样的白雾治理效果, 获得更好的节能效益。

关键词: 白雾; 饱和烟气; 降温除湿; 绝热加热

中图分类号: TM621.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)04-0050-05

New Scheme and Energy Saving Analysis of Flue Gas White Fog Treatment in Thermal Power Plant

LI Weike

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] The white fog is often appeared and causes “visual pollution” if the exhaust gas after wet desulphurization is not controlled. [Method] The white fog phenomenon from the exhaust gas after wet desulphurization was studied theoretically, and the thermal process of the white fog was analyzed with the help of the flue gas thermal characteristic curve equation and “temperature-humidity” chart, so a new scheme of the white fog treatment for cooling, dehumidification and heating was presented. Combined with a typical 1 000 MW ultra-supercritical coal-fired unit, the energy-saving effects of the new scheme were calculated. [Results] The results show that: based on certain boundary conditions of the project and design principles, the saturated gas heating power of the new scheme is decreased by 10.511 6 MW, in two cases that the flue gas waste heat is used to heating condensate water or is not used to heating condensate water, the unit efficiency is increased by 0.231% and 0.164% than the general scheme respectively. [Conclusion] A new scheme of the white fog treatment can achieve the same effect of the white fog treatment and that has better energy-saving effects.

Key words: white fog; saturated gas; cooling and dehumidification; adiabatic heating

湿法脱硫技术是目前市场上应用最为广泛的脱硫工艺, 全国 90% 以上的燃煤火电机组都采用了湿法脱硫技术^[1]。烟气经过湿法脱硫装置后, 烟气处于饱和状态, 温度一般为 50 ℃ 左右。饱和烟气若

不经过处理直接通过烟囱排放, 经常会发生白雾现象^[2], 造成“视觉污染”, 由此引起周边居民对环保情况的担忧, 也会增加“烟囱雨”的发生几率。现阶段, 采用湿法脱硫的电厂普遍利用高温烟气余热或其它热源对脱硫后的饱和烟气进行加热, 通过提高烟气温度来消除白雾^[3-4]。这种常规治理方案需要消耗较大的热量, 即使这部分热量来源于高温烟气余热, 在大部分电厂对尾部烟气余热进行节能综合

收稿日期: 2018-05-18 修回日期: 2018-07-18

基金项目: 中国能建广东院科技项目“烟气污染物超洁净排放技术”(EX03571W)

利用的条件下^[5-7]，烟气余热也可作为有效热量。

因此，对湿法脱硫后烟气排放产生的白雾现象进行研究，并提出可行的节能治理方案，具有重要意义。

1 白雾形成原理

烟气经过湿法脱硫后，由于高温烟气与碱性脱硫剂直接接触，高温烟气被增湿降温，碱性脱硫剂溶液中的部分水分吸热汽化，最终烟气达到饱和状态。饱和烟气从烟囱排出，与温度较低的大气混合后降温，饱和混合烟气的含湿量降低，大量水蒸汽就结露析出，形成了白雾现象。

1.1 烟气热力特性曲线

在湿法脱硫中得到的增湿饱和湿烟气，其热力特性可用两部分曲线方程来表述。

“湿度-温度”特性曲线方程^[8]：

$$H_{\text{mol}} = \frac{\varphi P_s}{P_1 - \varphi P_s} \quad (1)$$

$$P_s = 10^{\frac{7.2865\theta_g - 49.94}{238.11 + \theta_g}} \quad (2)$$

烟气绝热冷却线方程：

$$\theta_g = \theta_{\text{as}} + \frac{\gamma_{\text{as}}}{c_g} (H_{\text{as}} - H_g) \quad (3)$$

式中： H_{mol} 为烟气的摩尔湿度 $[(\text{kmol H}_2\text{O}) \cdot (\text{kmol 干烟气})^{-1}]$ ； φ 为烟气相对湿度，为烟气中的水蒸汽分压力与同温度下饱和水蒸汽压力之比； P_s 为在烟气温度 θ_g 下的饱和水蒸汽压力(kPa)； P_1 为在烟气温度 θ_g 下的烟气绝对压力(kPa)； θ_g 为烟气经过绝热冷却后的烟温($^{\circ}\text{C}$)； θ_{as} 为烟气在脱硫塔内冷却到饱和状态时的绝热饱和温度($^{\circ}\text{C}$)； γ_{as} 为烟温 θ_g 下水的汽化潜热 $[\text{kJ} \cdot (\text{kmol} \cdot \text{K})^{-1}]$ ； c_g 为烟温 θ_g 下湿烟气的比热容 $[\text{kJ} \cdot (\text{kmol} \cdot \text{K})^{-1}]$ ； H_{as} 为在饱和温度 θ_{as} 下所对应的饱和烟气湿度 $[(\text{kmol H}_2\text{O}) \cdot (\text{kmol 干烟气})^{-1}]$ ； H_g 为在温度 θ_g 下所对应的烟气湿度 $[(\text{kmol H}_2\text{O}) \cdot (\text{kmol 干烟气})^{-1}]$ 。

1.2 白雾现象热力过程

根据烟气热力特性曲线方程式(1)~(3)及工程实际参数，可绘制“湿度-温度”图，如图1所示。

图1中，直线AB为烟气绝热冷却线，表示高温烟气在脱硫装置内降温增湿至饱和状态的过程，

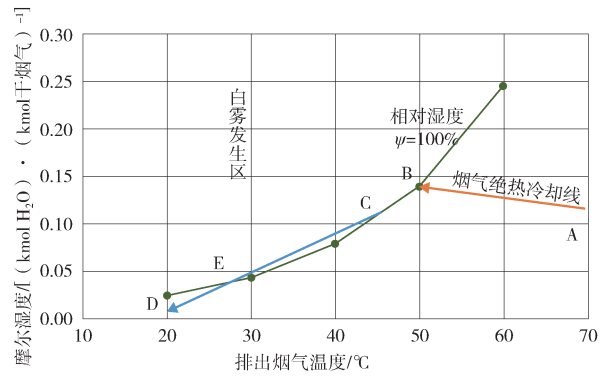


图1 白雾现象热力过程图

Fig. 1 Thermal process chart of the white fog phenomenon

饱和曲线BC为饱和烟气从脱硫装置出口至烟囱出口的湿度及温度变化过程，D点为大气状态点，从烟囱排出的饱和烟气与大气混合，沿直线CD向D点发生状态变化，C、E点处于饱和状态，直线CE为白雾发生区，当E点混合烟气进一步与大气混合达到非饱和区D点时白雾消失。

2 白雾治理常规方案及新方案

由白雾形成的热力过程可知，要避免湿法脱硫后排放烟气的白雾现象，必须将烟气和大气混合后的气体状态保持在非饱和区域内。

2.1 白雾治理常规方案

烟气白雾常规的治理方案主要通过加热饱和和烟气，提高烟气温度减小烟气相对湿度，使烟气处于未饱和状态，达到消除白雾的目的。热力过程如图2所示。

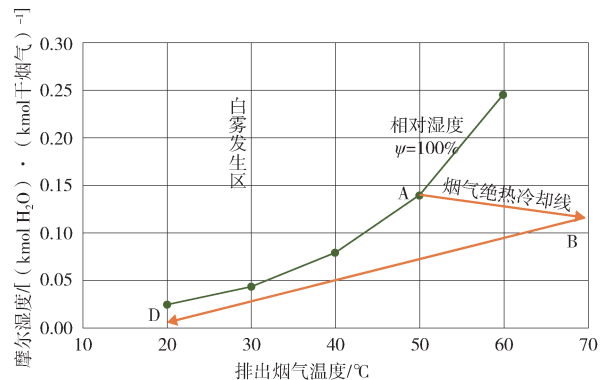


图2 白雾治理常规方案热力过程图

Fig. 2 Thermal process chart of the white fog treatment general scheme

A点为脱硫装置出口烟气饱和状态点，一般为

50~55℃；直线 AB 为烟气绝热加热线，表示饱和烟气加热至未饱和状态排至烟囱出口的过程，也是烟气相对湿度降低的过程，此过程中已考虑烟气在烟道及烟囱中的温降，B 点为烟囱出口烟气状态点，一般为 70~75℃；D 点为大气状态点，直线 BD 表示从烟囱排出的未饱和烟气与大气混合过程变化线，由于直线 BD 处于未饱和区域，因此可避免白雾发生。

2.2 白雾治理新方案

从图 2 可以看出，常规治理方案一般需将脱硫装置出口湿烟气从 50~55℃ 加热至 75~80℃（烟道及烟囱温降按 5℃ 考虑），需要较大的热量，现在电厂普遍采用除尘器前或脱硫塔前的高温烟气作为加热热源，高温烟气余热无法再进行节能综合利用，因此，治理方案应尽量减少饱和湿烟气的加热热量，并考虑烟气余热的综合利用效果。

如图 3 所示，为减少饱和和湿烟气的加热热量，可以先将脱硫装置出口的饱和湿烟气进一步降温除湿，使其从饱和状态点 A 到达饱和状态点 A'，然后再沿着绝热加热线将饱和烟气状态点 A' 加热至状态点 B'，达到与白雾治理常规方案一样的效果。但由于先对饱和湿烟气进行了降温除湿，因此大大减少了烟气的加热热量，此外，有条件可以进一步利用饱和烟气从状态点 A 降温至点 A' 的余热，提高节能效果。

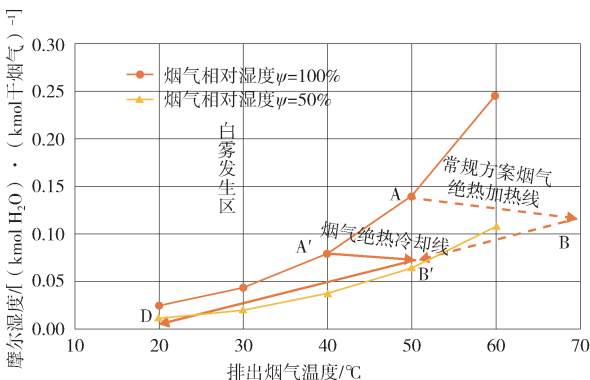


图 3 白雾治理新方案热力过程图

Fig. 3 Thermal process chart of the white fog treatment new scheme

结合工程边界条件及实际参数，可采用凝结水或工业冷却水作为冷源，凝汽器热井的凝结水温一般为 32~36℃，工业冷却水温一般为 26~35℃，可将脱硫出口饱和湿烟气从 50~55℃ 降温除湿至

40~45℃，然后再利用除尘器前或脱硫塔前的高温烟气作为热源，将饱和烟气加热至 50~55℃，最后通过烟囱排放，可以达到消除白雾的效果，富余的高温烟气余热可以用于加热冷风或凝结水。

白雾治理新方案系统流程如图 4 所示。利用凝结水作为冷源，可以将饱和烟气余热用于凝结水系统，增加排挤汽机抽汽所做的热功，提高机组效率，获得更好的节能效益。

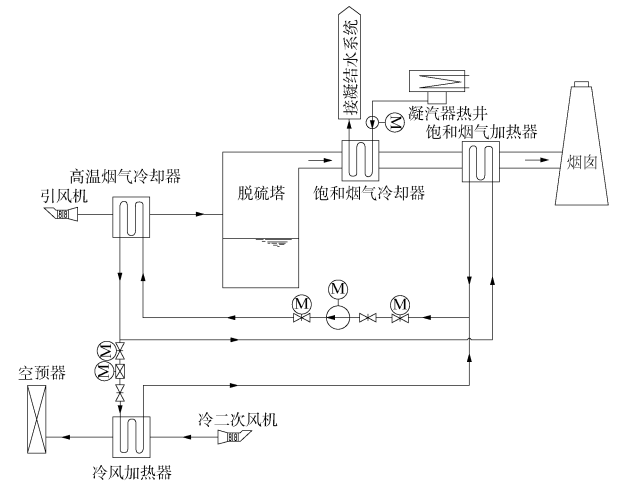


图 4 白雾治理新方案系统流程图

Fig. 4 The white fog treatment new scheme process diagram

3 白雾治理新方案的节能分析

3.1 工程边界条件及设计原则

本文以国内某超超临界 N1 000-27/600/600 MW 等级燃煤机组为例，以白雾治理常规方案的能耗为基准，对白雾治理新方案的能耗进行计算，分析其节能效益。

白雾治理常规方案和新方案的工程边界条件及设计原则综合考虑机组实际运行参数，按如下设计：

1) 按常规气象条件，大气温度取 20℃，相对湿度取 50%。

2) 两方案燃用煤质相同，燃煤量相等，计算工况都为 THA 工况，原煤水份取 10.2%。

3) 脱硫塔出口饱和烟气按常规工程取 50℃，两方案都采用脱硫塔前的高温烟气作为加热热源，烟气温度取 100℃，烟道及烟囱温降统一按 5℃ 考虑。

4) 常规方案将饱和烟气加热至 75℃，考虑系统温降后烟囱出口的排放烟气温度为 70℃，高温烟气由 100℃ 降温为 75℃。

5) 新方案饱和烟气先被凝结水降温至 40 ℃, 再被高温烟气加热至 55 ℃, 考虑系统降温后烟囱出口的排放烟气温度为 50 ℃, 高温烟气由 90 ℃ 降温为 75 ℃。

6) 新方案利用饱和烟气余热加热凝结水, 水温取 32 ℃, 对应的该级抽汽效率按最末级效率, 取 0.061。

7) 高温烟气的富余热量预热锅炉冷二次风, 高温烟气由 100 ℃ 降温至 90 ℃, 此系统一般与低温省煤器结合, 富余热量加热能级更高的凝结水^[9], 考虑锅炉效率及对应抽汽效率, 综合利用效率取 0.208。

3.2 能耗计算

结合工程边界条件及设计原则, 对两方案能耗进行计算, 如表 1 所示。

表 1 白雾治理方案能耗计算

Tab. 1 Energy consumption calculation of the white fog treatment scheme

名称	符号/单位	常规方案	新方案
锅炉排烟焓(烟温为 40 ℃)	$H_{py1}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	428.2	428.2
锅炉排烟焓(烟温为 50 ℃)	$H_{py2}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	536.0	536.0
锅炉排烟焓(烟温为 55 ℃)	$H_{py3}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	589.6	589.6
锅炉排烟焓(烟温为 75 ℃)	$H_{py4}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	804.1	804.1
锅炉排烟焓(烟温为 90 ℃)	$H_{py5}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	964.9	964.9
锅炉排烟焓(烟温为 100 ℃)	$H_{py6}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	1 072.1	1 072.1
各方案用于加热饱和烟气的热功率	Q_1/MW	26.278 9	15.767 3
新方案可利用的饱和烟气余热功率	Q_2/MW	—	10.570 4
新方案可利用的富余高温烟气余热功率	Q_3/MW	—	10.511 6
新方案增加凝结水侧循环泵功率	P_1/kW	—	141.2
新方案增加引风机功率	P_2/kW	—	471.0
新方案用于凝结水加热功率折算为机组增加的发电功率	Q_2'/kW	—	644.8
新方案富余烟气用于预热冷风的功率折算为机组增加的发电功率	Q_3'/MW	—	2.185 4
新方案增加的发电功率(考虑余热用于凝结水系统)	Q_c'/MW	—	2.830 1
新方案增加的发电功率(不考虑余热用于凝结水系统)	Q'/MW	—	2.185 4
新方案增加的供电功率(考虑余热用于凝结水系统)	Q_{gc}'/MW	—	2.217 9
新方案增加的供电功率(不考虑余热用于凝结水系统)	Q_g'/MW	—	1.573 1
新方案比常规方案的机组效率增加值(考虑余热用于凝结水系统)	$\delta_{nc}/\%$	—	0.231
新方案比常规方案的机组效率增加值(不考虑余热用于凝结水系统)	$\delta_{\eta}/\%$	—	0.164

由计算结果看出, 饱和烟气加热功率新方案比常规方案小 10.511 6 MW, 此部分热量可用于预热冷风, 折算为机组增加的发电功率 2.185 4 MW, 新方案可利用的饱和烟气余热功率为 10.570 4 MW, 在考虑烟气余热用于凝结水系统和不考虑烟气余热用于凝结水系统两种情况下, 新方案比常规方案的机组效率分别增加 0.231%、0.164%, 节能效果更好。

4 结论

1) 烟气经过湿法脱硫后, 达到饱和状态, 排出烟囱后, 与温度较低的大气混合后降温, 饱和气体的含湿量降低, 大量水蒸气结露析出, 形成了白雾现象。从白雾现象热力过程图也可以看出, 饱和烟气与大气混合的过程处于白雾发生区, 因此会产生白雾现象。

2) 为减少饱和烟气的加热热量, 新方案采用先降温除湿再加热的原理, 使饱和烟气到达更低温度的饱和状态点, 脱除部分水分后, 再利用更少的热量进行绝热加热, 达到与白雾治理常规方案一样的效果。

3) 新方案可采用凝结水或工业冷却水作为冷源, 利用除尘器前或脱硫塔前的高温烟气作为热源。富余的高温烟气余热可以用于加热冷风或凝结水, 饱和烟气余热可用于加热凝结水, 增加排挤汽机抽汽所做的热功, 提高机组效率, 获得更好的节能效益。

4) 在一定的工程边界条件及设计原则下, 新方案饱和烟气的加热功率要比常规方案小 10.511 6 MW, 此部分热量可用于预热冷风, 折算为机组增加的发电功率 2.185 4 MW, 新方案可利用的饱和烟气余热功率为 10.570 4 MW, 在考虑烟气余热用于凝结水系统和不考虑烟气余热用于凝结水系统两种情况下, 机组效率分别增加 0.231%、0.164%, 节能效果更好。

5) 虽然新系统有更好的节能效益, 但脱硫后的饱和烟气仍有一定的腐蚀性, 换热设备需考虑防腐材料, 投资费用较高, 因此电厂需结合工程运行数据, 计算烟气的酸露点, 并进行年费用分析, 选取合理系统, 确保取得最优的经济效益。

参考文献:

[1] 王沛迪, 王雪涛, 刘予, 等. 火电厂湿法脱硫“石膏雨”成因

- 分析与防治措施 [J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(3): 283-286.
- WANG P D, WANG X T, LIU Y, et al. Cause analysis and control measure of gypsum rain of wet flue gas desulfurization in coal-fired power plants [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2014, 30(3): 283-286.
- [2] 周洪光, 李延兵. 火电厂湿法脱硫石膏雨和白雾治理措施及效果分析 [J]. 电力科技与环保, 2014, 30(6): 34-37.
- ZHOU H G, LI Y B. Control measures and effect of gypsum rain and mist in thermal power plant with FGD [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2014, 30(6): 34-37.
- [3] 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, 30(5): 326-328.
- CHEN L F, XU X R, MA C Y, et al. Formation of white smoke in wet flue gas desulfurization processes and ways of prevention [J]. Power Equipment, 2005, 30(5): 326-328.
- [4] 李占元, 孙月, 杨建兴, 等. 台山发电厂 600 MW 机组以二次热风加热脱硫后净烟气技术的研究 [J]. 广东电力, 2008, 21(8): 35-38 +42.
- LI Z Y, SUN Y, YANG J X, et al. Research on heating desulfurized flue gas by secondary hot air of 600 MW unit in Taishan power plant [J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21(8): 35-38 +42.
- [5] 薛宁, 印旭洋, 王春昌. 热一次风加热器与低压省煤器的联合应用 [J]. 热力发电, 2015, 44(2): 64-68.
- XUE N, YIN X Y, WANG C C. Combined application of hot primary air heater and low pressure economizer [J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(2): 64-68.
- [6] 杨勇平, 黄圣伟, 徐钢, 等. 电站锅炉烟气余热利用系统的热力学分析和优化 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(1): 78-83.
- YANG Y P, HUANG S W, XU G, et al. Thermodynamic analysis and optimization of the waste heat recovery system for utility boiler [J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2014, 41(1): 78-83.
- [7] 李秀平, 李博, 谢津伦. 燃煤锅炉低温余热利用技术应用分析 [J]. 中国电力, 2011, 44(12): 86-88 +96.
- LI X P, LI B, XIE J L. Application of low-temperature waste heat utilization technology in coal-fired boiler [J]. Electric Power, 2011, 44(12): 86-88 +96.
- [8] 国家能源局. 火力发电厂燃烧系统设计计算技术规程: DL/T 5240—2010 [S]. 北京: 中国电力出版社出版, 2010: 70-73.
- National Energy Administration. Technical code for design and calculation system of fossil-fired power plant: DL/T 5240—2010 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010: 70-73.
- [9] 马有福, 杨丽娟, 吕俊复. 联合旁通烟道与暖风器的锅炉烟气余热利用系统 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5359-5366 +5535.
- MA Y F, YANG L J, LÜ J F. Analysis of an exhaust heat recovery process of integrating bypass flue and condensate air heater for efficient power generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5359-5366 +5535.

作者简介:



LI W K

李伟科 (通信作者)

1979-, 男, 广东兴宁人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司机务环保部部长, 教授级高级工程师, 华南理工大学学士, 主要从事热力发电与节能研究 (e-mail) liweike @ geddi.com.cn.

(责任编辑 李辉)

订 阅

《南方能源建设》的办刊宗旨立足于为能源行业尤其是电力行业工程建设提供技术支持和信息服务, 推广新理论、新技术的工程应用, 提高我国能源建设质量和技术水平。主要面向全国能源行业尤其是电力行业设计、建设、制造等企业、以及相关的研究机构 and 高等院校的广大工程技术人员、管理人员、专家学者等。本刊设有能源资讯、专家论坛、规划咨询、勘测设计、施工建设、装备制造、工程管理、投资运营、运行维护、案例分析、简讯等栏目, 将优先报道低碳环保、节能减排等技术研究和工程应用以及风能、太阳能、生物质能、海洋能等可再生能源的技术研究及工程建设。

出版周期: 季刊(季末25号)

订阅年价: 60元

国内刊号: CN 44-1715/TK

国际刊号: ISSN 2095-8676

联系电话: 020-32115630

传 真: 020-32118078

期刊网站: <http://nynf.cbpt.cnki.net>

微 信 号: ceec-gedi