

# 超低排放背景下烟气消白技术路线研究

谭厚章<sup>1,2</sup>, 刘兴<sup>2</sup>, 王文慧<sup>2</sup>, 刘鹤欣<sup>2</sup>

(1. 浙江西安交通大学研究院, 浙江 杭州 311215; 2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:**超低排放背景下燃煤电厂大多采用湿法脱硫装置, 装置出口饱和湿烟气排放后一般会在烟囱出口形成湿烟羽, 对生态环境及人体健康造成不利影响。本文基于切线法对烟气及环境空气状态进行计算, 确定湿烟羽消除的临界温度及混合空气当量比, 比较不同烟气消白技术路线的适用环境条件及技术参数。研究结果表明, 环境温度越低、相对湿度越高, 湿烟羽消除难度越大。环境相对湿度为60%, 脱硫塔出口烟气温度为50℃时, 不采用任何措施的前提下可实现无湿烟羽排放的临界环境温度为37.3℃, 可见在常见环境条件下, 调整湿法脱硫装置出口烟气状态参数以消除湿烟羽是有必要的。假设可适用的烟气最大降温幅度为30℃, 最大升温幅度为30℃, 仅采用烟气加热技术可消除湿烟羽的临界环境温度为12.9℃; 仅采用烟气冷凝技术可消除湿烟羽的临界环境温度为8.7℃; 采用烟气冷凝再热技术可消除湿烟羽的临界环境温度为-12.9℃。对于空气加热混合技术, 基于切线法对空气烟气混合过程进行热平衡计算, 确定可消除湿烟羽的临界空气当量比。将烟气加热、烟气冷凝及空气加热技术组合使用可拓宽烟气消白适用的环境条件。

**关键词:**湿法脱硫; 湿烟羽消除; 烟气加热; 烟气冷凝; 空气加热混合

中图分类号: X773

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2019)02-0038-07

## Research on wet flue gas plume elimination technology in the context of ultra low emission

TAN Houzhang<sup>1,2</sup>, LIU Xing<sup>2</sup>, WANG Wenhui<sup>2</sup>, LIU Hexin<sup>2</sup>

(1. Institute of Zhejiang Xi'an Jiaotong University, Hangzhou 311215, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Wet desulphurization device is widely applied in coal fired power plant in the context of ultra low emission. The saturated wet flue gas emitted from the device outlet usually form wet plume at the chimney outlet, resulting in adverse effects on ecological environment and human health. In this paper, the state of flue gas and ambient air were calculated to determine the critical temperature of wet plume removal and the equivalent ratio of mixed air, and the applicable environmental conditions and technical parameters of different flue gas blanking technology routes were compared based on the tangential method. The result shows that the wet plume is more difficult to be eliminated with lower environment temperature and higher relative humidity. If the relative humidity is 60% and the flue gas temperature at the outlet of the wet desulphurization tower is 50℃, the critical temperature of 37.3℃ for wet plume elimination can be realized without any measures. So the flue gas parameters of the wet desulfurization unit should be adjusted for wet plume elimination under ordinary environment conditions. Assuming that the maximum cooling amplitude of applicable flue gas is 30℃ and the maximum warming amplitude is 30℃, the critical environment temperature of smoke plume elimination is 12.9℃ only by flue gas heating technology, while the critical environment temperature of smoke plume elimination is 8.7℃ only by flue gas condensation technology and the critical environment temperature of smoke plume elimination is -12.9℃ by both flue gas condensation and heating technology. For air heating mixing technology, the heat balance of the air and flue gas mixing process was calculated to determine the critical air equivalent ratio of wet plume elimination based on the tangent method. The combination of flue gas heating, flue gas condensation and air heating technology can enlarge the applicable environmental conditions of wet flue gas plume elimination.

收稿日期: 2018-12-14; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.18121412

基金项目: 浙江省重点研发计划资助项目(2018C03036)

作者简介: 谭厚章(1965—), 男, 江西永新人, 教授, 主要研究方向为大型火电厂锅炉与关键辅机节能理论与应用。E-mail: tanhz@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 谭厚章, 刘兴, 王文慧, 等. 超低排放背景下烟气消白技术路线研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(2): 38-44.

TAN Houzhang, LIU Xing, WANG Wenhui, et al. Research on wet flue gas plume elimination technology in the context of ultra low emission[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(2): 38-44.



移动阅读

**Key words:** wet desulphurization; wet plume elimination; flue gas heating; flue gas condensation; mixing air heating

## 0 引言

我国化石能源结构为“贫油、少气、富煤”,《BP能源展望》中预测,中国能源结构中煤炭消耗量将由2015年占比64%降至2035年的42%,远高于其他能源,以煤炭作为能源消费主体的工业布局将长期存在。而煤炭利用过程中排放颗粒物、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等污染物,影响环境生态、人体健康。我国针对燃煤电厂的污染物排放限值标准日益严苛,2014年发布的燃煤电厂超低排放行动计划,要求烟尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>排放浓度分别低于10、35、50 mg/Nm<sup>3</sup>(6% O<sub>2</sub>)<sup>[1]</sup>。为满足超低排放要求,国内电厂大多采用湿法脱硫装置处理烟气,湿法脱硫装置在大幅脱除烟气中SO<sub>2</sub>的同时,对烟气中粒径1~2.5 μm以上颗粒物具有一定捕集作用<sup>[2-3]</sup>。湿法脱硫装置出口烟气一般为45~55℃的饱和湿烟气,从烟囱排出后与环境中低温空气混合,混合过程中或有水蒸气冷凝析出,可见白灰色湿烟羽,俗称“白烟”。

高湿环境会促进污染物生成、气溶胶二次转化,不利于污染物扩散。湿法脱硫装置会强化SO<sub>2</sub>及逃逸NH<sub>3</sub>向PM<sub>2.5</sub>气溶胶的转化,与脱硫装置入口相比,出口烟气中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>以及SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>气溶胶分别增加18.9倍及4.2倍<sup>[4]</sup>。距离地面500 m以下形成逆温层时会抑制颗粒物在高度方向的输送和扩散,颗粒物数量积聚增长。而近地面相对湿度高或形成逆湿层,积聚的气溶胶不断吸湿增长,引起持续性雾霾天气。燃煤电厂烟囱排放的高湿烟气在逆温层内释放,对周边局部区域内污染物的生成及扩散产生不利影响<sup>[5-7]</sup>。研究表明,环境空气能见度随环境相对湿度的增加而降低<sup>[5,8]</sup>。采用湿法脱硫装置后饱和湿烟气排放到大气中,影响近地面区域空气能见度。

考虑到湿烟羽的环境危害,地方政府对燃煤电厂湿烟羽控制提出要求。2017年,上海市出台了《上海市燃煤电厂石膏雨和有色烟羽测试技术要求》,对燃煤电厂采取烟气加热技术及烟气冷凝再热技术消除有色烟羽的技术参数提出要求,采用烟气加热技术和烟气冷凝再热技术排放烟温分别高于75~78℃和54~56℃;浙江省出台了《燃煤电厂大气污染物排放标准》,建议烟囱入口烟温加热到80℃以上以消除白色烟羽;天津市环保局印发了《火电厂大气污染物排放标准》,要求燃煤电厂控制烟气排放温度在45~48℃以下,含湿量8.5%~

9.5%,建议利用余热对烟气再加热。与此同时,其他省也在加紧制定大气污染物排放的地方标准。

目前针对燃煤电厂的烟气消白技术主要有烟气加热、烟气冷凝、烟气冷凝再热<sup>[9-10]</sup>。其中烟气加热方式能够降低排出烟气相对湿度;而烟气冷凝方式能够降低烟气的绝对湿度,在消除湿烟羽的同时将烟气中的水凝结回收。空气混合方法在机械通风冷却塔消除白雾领域有所应用<sup>[11]</sup>,而在燃煤电厂烟气处理领域鲜有该技术的应用报道。

烟气加热技术利用烟气余热加热脱硫塔出口饱和湿烟气,在不改变烟气含湿量的同时降低烟气的相对湿度,在燃煤电厂的应用主要有回转式GGH<sup>[12]</sup>及MGGH<sup>[13]</sup>技术。该技术有助于实现湿烟羽消除,提高烟气扩散效果,但不能回收烟气中水分、减少污染物排放。烟气冷凝技术通过降低饱和湿烟气的温度和含湿量,回收利用烟气中过饱和水蒸气,在燃煤电厂的应用主要有间壁式冷凝换热器<sup>[14]</sup>和直接接触式换热器<sup>[15]</sup>。研究<sup>[14,16]</sup>表明,在湿法脱硫装置出口布置湿式相变凝聚器,实现烟气凝结水高效回收、消除白雾的同时,有效减少烟气中颗粒物、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>及重金属元素的排放。烟气冷凝再热技术是对冷凝后烟气进行再加热,与单一加热/冷凝技术相比适用范围更广,但系统复杂性增加。

目前针对湿烟雾消除的计算方法主要有温湿图切线计算<sup>[17]</sup>、湿烟羽抬升轨迹计算<sup>[10]</sup>、CFD数值模拟<sup>[12]</sup>等。虽然很多学者对烟气消白进行了理论研究,但存在技术路线少、环境状态单一等问题。本文基于切线法对7种不同技术路线下含湿量-温度变化关系进行研究,通过计算确定实现烟气消白的技术指标,以为不同技术路线的选择应用提供参考。

## 1 湿烟羽消除技术路线

湿烟羽消除技术路线共7种,其中湿烟羽消除的单一技术路线主要有3种:烟气加热技术、烟气冷凝技术、空气加热混合技术,如图1(a)~(c)所示。基于这3种技术两两组合联用还有3种技术路线:烟气冷凝再热技术、烟气加热/空气加热技术、烟气冷凝/空气加热技术。将3种单一技术联合使用得到空气加热/烟气冷凝再热技术,如图1(d)所示。

## 2 数学模型

当气体的相对湿度为100%时,水蒸气的分压力即为饱和水蒸气分压力 $P_s$ 。饱和水蒸气压力可

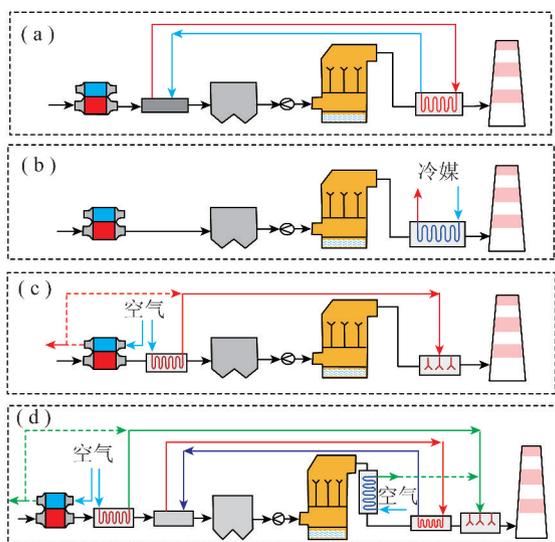


图1 烟气消白技术路线

Fig. 1 Technology roadmap of wet flue gas plume elimination

根据戈夫-格雷奇<sup>[18]</sup> (Goff Gratch) 公式(式(1))计算,进而得到含湿量公式(式(2)),对式(2)求相对湿度为100%时温度的偏导数,可得到饱和湿空气曲线的导函数方程(式(3))。过环境状态作饱和湿空气曲线的切线,式(4)的解为切点  $x_{\text{tan}}$ 。由式(5)可确定切线与湿法脱硫装置出口烟气等湿加热线的交点温度,由式(6)可确定切线与空气烟气状态点连线的交点,进而基于热平衡方程可由式(7)确定空气当量比  $r_a$  (能够消除湿烟羽的空气质量与烟气质量的临界比值)。

$$\lg \frac{P_s}{100} = C_1 \left( \frac{a}{T} - 1 \right) + C_2 \lg \frac{a}{T} - C_3 [10^{11.344 \times (1 - \frac{T}{a})} - 1] + C_4 [10^{-3.49149 \times (\frac{a}{T} - 1)} - 1] + C_5 \quad (1)$$

$$f(\varphi, T) = \omega = 622 \times \frac{\varphi P_s}{P_e - \varphi P_s} \quad (2)$$

$$f'(T) = \frac{\partial \omega}{\partial T} \Big|_{\varphi=100\%} \quad (3)$$

$$f'(x)(x - T_e) + \omega_e = f(100\%, x) \quad (4)$$

$$f(100\%, T_{\text{out}}) = f'(x_{\text{tan}})(x - T_e) + \omega_e \quad (5)$$

$$\frac{\omega_y - \omega_e}{T_y - T_{\text{eh}}}(x - T_{\text{eh}}) + \omega_e = f'(x_{\text{tan}})(x - T_e) + \omega_e \quad (6)$$

$$r_a = \frac{C_{p,y} \Delta t_y}{C_{p,e} \Delta t_e} \quad (7)$$

式中,  $C_1 = -7.90298$ ;  $a = 373.16$ ;  $C_2 = 5.028081$ ;  $C_3 = 1.3816 \times 10^{-7}$ ;  $C_4 = 8.1328 \times 10^{-3}$ ;  $C_5 = \lg 1013.246$ ;  $\varphi$  为相对湿度,该值为100%时  $f(100\%, T)$  为饱和湿空气的含湿量;  $P_e$  为大气压

力,取 101325 Pa;  $T_y$  为烟气温度;  $\omega$  为含湿量;  $T_e$  为环境温度, K;  $\omega_y$  为烟气含湿量;  $\omega_e$  为环境空气含湿量, g/kg 干空气;  $T_{\text{out}}$  为湿法脱硫装置出口烟气温度;  $T_{\text{eh}}$  为加热后空气温度;  $C_{p,y}$  为混合前烟气比热容;  $C_{p,e}$  为混合前空气比热容, J/(kg · K);  $\Delta t_y$  为混合前后烟气温度变化;  $\Delta t_e$  为混合前后空气温度变化。

### 3 结果与讨论

湿法脱硫装置出口一般为 45 ~ 55 °C 的饱和湿烟气。图 2(a) 为烟气无消白措施直接排出时湿烟羽状态。湿烟气初始状态位于点 A, 过点 A 作饱和曲线切线与环境相对湿度线交于点 E, 该点温度为该相对湿度下无可见湿烟羽的临界环境温度。图 2(b) 为不同脱硫塔出口温度下的临界环境温度。可见, 装置出口烟温 50 °C 时, 环境温度在 34.4 ~ 40.4 °C 以上时可直接排放且无可见湿烟羽, 对于高温干燥地区, 夏季饱和湿烟气直接排放即可能实现无湿烟羽运行。但在常见环境条件下, 对湿法脱硫装置出口烟气进行处理以消除湿烟羽是必要的。对饱和曲线求二阶导数可知, 二阶导数大于 0, 即该曲线上切线斜率单调递增, 与曲线有且只有一个交点。为便于计算, 假定湿法脱硫装置出口烟气温度为 50 °C。

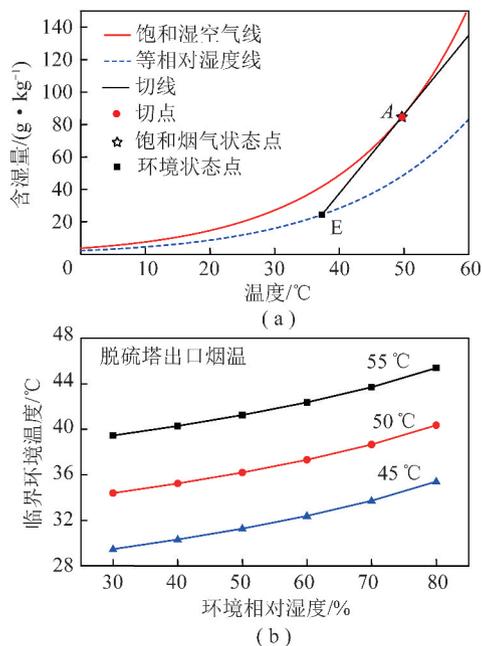


图2 未处理烟气直接排放临界环境温度计算结果  
Fig. 2 Calculation results of direct discharge critical environment temperature of untreated flue gas

#### 3.1 方案1(烟气加热技术)

烟气加热技术是对饱和湿烟气进行加热,使烟

气状态远离饱和湿度曲线。图3(a)为烟气加热技术消除湿烟羽原理示意。湿烟气初始状态位于点A,经加热后沿等湿度线升温。升温后烟气沿直线与环境空气掺混、冷却至环境状态点E。过点E作切线与AC交于点B。若烟气排出状态点在点B右侧,则整个ABE变化过程均与饱和湿度曲线不相交,不产生湿烟羽;若烟气排出状态点在点B左侧,排出后会产生湿烟羽。定义点B温度为临界加热烟气温度,定义A、B两点温差为临界升温幅度。图3(b)为一定环境下烟气临界升温幅度变化曲线。临界烟气升温幅度随环境温度的升高而降低,随相对湿度的增大而增大。环境温度越低,临界烟气升温幅度受环境相对湿度影响越大。环境相对湿度小于80%时,环境温度低于11℃,烟气升温幅度需达到30℃以上才能消除湿烟羽;环境温度高于16℃,烟气升温幅度在30℃以下即可消除湿烟羽。

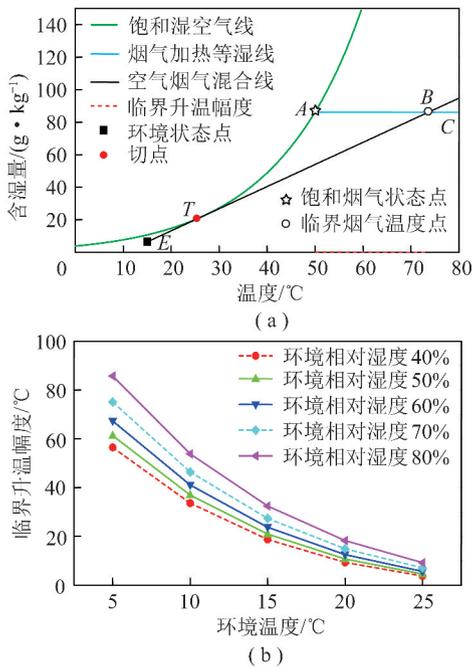


图3 烟气加热方式临界升温幅度计算结果

Fig. 3 Calculation results of critical temperature rise of flue gas heating mode

### 3.2 方案2(烟气冷凝技术)

烟气冷凝技术通过降低烟气温度,使烟气沿着饱和湿度曲线降温凝水,回收烟气中过饱和的水蒸气,减少烟气绝对湿度。图4(a)为烟气冷凝技术消除湿烟羽原理示意。湿烟气初始状态位于点A,沿饱和曲线降温凝水。过环境状态点E可做饱和曲线的切线,切点为T。降温后烟气与环境空气掺混、冷却至环境状态点E。若降温后烟气状态点在点T左侧,则整个变化过程与饱和湿度曲线不相交,不产生湿烟羽;若烟气状态点在点T右侧,烟气排出后

会产生湿烟羽。定义点T温度为临界冷凝烟气温度,A、T两点温差为临界降温幅度。图4(b)为一定环境条件下临界降温幅度变化曲线。由图4可知,采用烟气冷凝降温方式,临界降温幅度随环境温度的升高而线性降低,随环境湿度的增大而增大;环境温度变化对临界降温幅度影响较大,环境相对湿度变化对临界降温幅度影响较小。低温下(5℃)临界降温幅度较大,达32.0~36.8℃;高温下(25℃)临界降温幅度较小,达10.52~15.73℃。低温下,冷凝降温后临界烟气温度比环境温度高8.2~13.0℃,高温下高9.3~14.5℃。对于相对湿度60%,环境温度为5~25℃时,将烟气温度降至16.0~37.3℃,即高于环境温度11.0~12.3℃,可消除湿烟羽,该数值与脱硫塔出口温度无关。

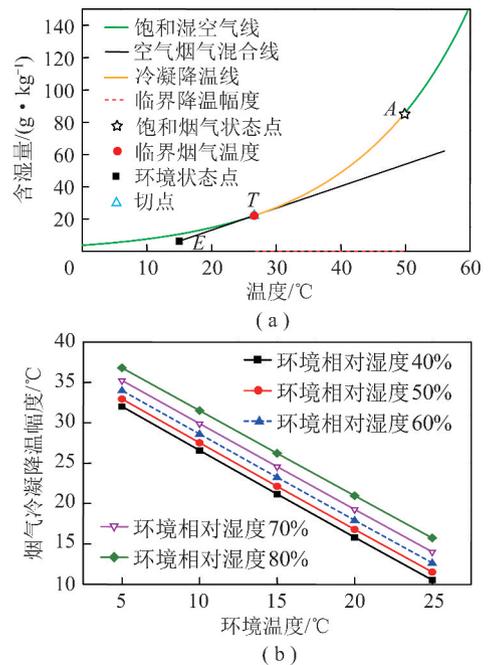


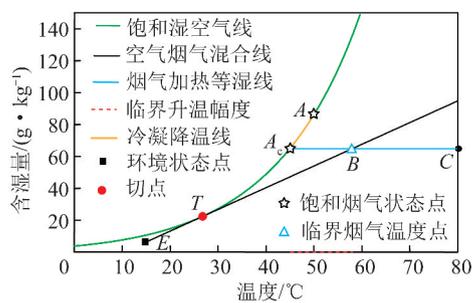
图4 烟气冷凝方式临界降温幅度计算结果

Fig. 4 Calculation results of critical temperature cooling of flue gas condensation mode

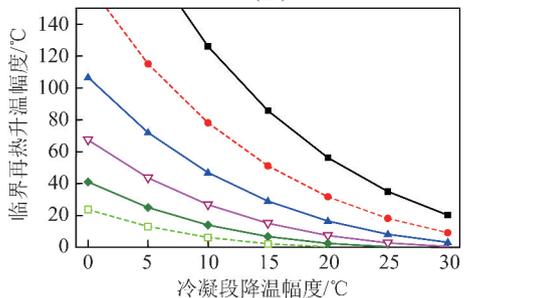
### 3.3 方案3(烟气冷凝再热技术)

烟气冷凝再热技术是将方案1、2组合使用,对冷凝后烟气再进行加热。消除湿烟羽的机理如图5(a)所示,湿烟气初始状态位于点A,沿饱和曲线降温凝水,再沿等湿度线A<sub>c</sub>C升温,升温后烟气从烟囱排出与空气混合,冷却至环境状态点E。过点E作切线与A<sub>c</sub>C交于点B。定义A、A<sub>c</sub>两点温差为降温幅度,A<sub>c</sub>B两点温差为该降温幅度下的临界再热升温幅度。温度降幅达到临界降温幅度后,无需加热即可实现湿烟羽消除。图5(b)为环境湿度为60%时烟气临界再热升温幅度变化曲线。

由图5可知,采用烟气冷凝再热方式,消除湿烟



(a)



(b)

图5 烟气冷凝再热方式临界升温幅度计算结果

Fig. 5 Calculation results of critical temperature rise of flue gas condensation and heating mode

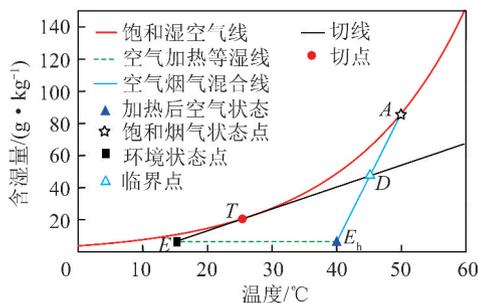
羽所需的降温幅度、升温幅度低于单一采用加热或冷凝技术;采用冷凝再热方式能够拓宽湿烟羽消除适用范围。假设可适用最大降温、升温幅度均为30℃,对于相对湿度为60%的环境,采用烟气加热技术、烟气冷凝技术、烟气冷凝再热技术最低适用温度分别为12.9、8.7、-12.9℃。

### 3.4 方案4(空气加热混合技术)

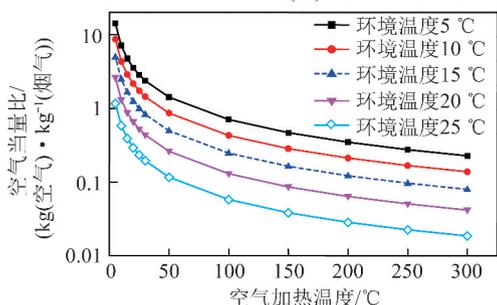
空气加热混合技术是将空气加热后与烟气混合排出。消除湿烟羽的机理如图6(a)所示,湿烟气初始状态位于点A,空气沿等湿线 $EE_h$ 升温,升温后空气与烟气混合,从烟囱排出后冷却至环境状态点E。过点E作切线与 $AE_h$ 交于点D。定义点D温度为临界混合温度,与烟气混合后达到点D的空气量与烟气量之比定义为空气当量比。图6(b)为环境相对湿度为60%条件下空气当量比的变化曲线。空气当量比随空气加热温度的升高而降低,降幅逐渐缩小。空气当量比随环境温度升高而降低,降幅逐渐增大。假设可适用最大空气升温幅度为30℃,最大空气当量比为0.3,相对湿度为60%时,采用空气加热混合技术的环境最低适用温度为22.5℃。

### 3.5 方案5(烟气加热/空气加热技术)

烟气加热/空气加热技术是将加热后空气与加热后烟气混合,从烟囱排出。消除湿烟羽的机理如图7(a)所示。湿烟气初始状态位于点A,经加热后沿等湿度线升温至点B,空气沿等湿线 $EE_h$ 升温后,



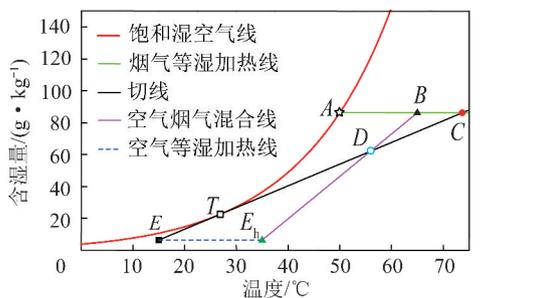
(a)



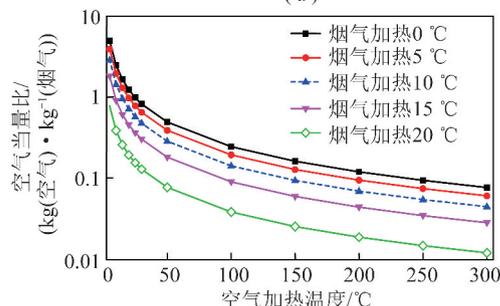
(b)

图6 空气加热混合方式空气当量比计算结果

Fig. 6 Calculation results of equivalence ratio of air mixing heating mode



(a)



(b)

图7 空气加热/烟气加热方式空气当量比计算结果

Fig. 7 Calculation results of equivalence ratio of air heating and flue gas heating mode

空气与烟气沿 $BE_h$ 混合,从烟囱排出后冷却至环境状态点E。过点E作切线与 $BE_h$ 交于点D。定义与烟气混合后到达点D的空气量与烟气量之比为空气当量比。图7(b)为环境温度15℃、相对湿度60%条件下空气当量比的变化曲线。随着烟气加热

温度的升高,消除湿烟羽所需空气当量比降低,降幅逐渐增大;不同烟气加热温度下空气当量比的比值为常数,与空气加热温度无关。

### 3.6 方案6(烟气冷凝/空气加热技术)

烟气冷凝/空气加热技术是将加热后空气与冷凝后烟气混合后,从烟囱排出。消除湿烟羽的机理如图8(a)所示。湿烟气初始状态位于点A,经过冷凝沿饱和曲线降温至点B。空气沿等湿线 $EE_h$ 升温后,空气与烟气沿 $BE_h$ 混合,混合气体从烟囱排出后冷却至环境状态点E。过点E作切线与 $BE_h$ 交于点D。定义与烟气混合后到达点D的空气量与烟气量之比为空气当量比。图8(b)为环境温度15℃、相对湿度60%条件下空气当量比的变化曲线。随烟气冷凝温度的升高,消除湿烟羽所需空气当量比降低,降幅逐渐增大;不同烟气冷凝温度对应的空气当量比的比值为常数,与空气加热温度无关。15℃、相对湿度60%条件下,烟气冷凝20℃时,消除湿烟羽仅需加热至315℃、空气当量比 $>0.001$ 即可。

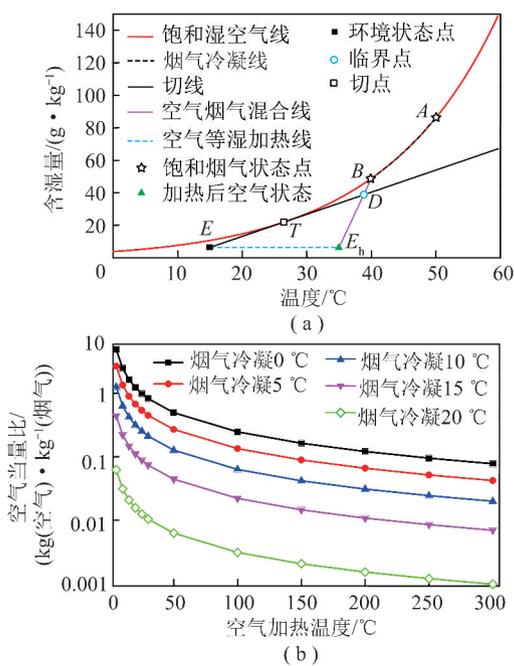


图8 空气加热/烟气冷凝方式空气当量比计算结果

Fig. 8 Calculation results of equivalence ratio of air heating mixed with flue gas condensation mode

### 3.7 方案7(空气加热/烟气冷凝再热技术)

空气加热/烟气冷凝再热技术是将空气加热后与冷凝再热烟气混合排出。消除湿烟羽的机理如图9(a)所示,湿烟气初始状态位于点A,沿饱和湿度曲线降温凝水至点B,再沿等湿线升温至点C。空气沿等湿线 $EE_h$ 升温,升温后空气与烟气沿 $CE_h$ 混合,混合气体从烟囱排出后冷却至环境状态点E。

过点E作切线与 $CE_h$ 交于点D。定义与烟气混合后到达点D的空气量与烟气量之比定义为临界空气当量比。图9(b)为相对湿度60%条件下空气当量比的变化曲线。通过确定烟气冷凝度、烟气加热度及空气加热温度,能够获得消除湿烟雾的空气当量比。该技术的系统复杂度增加,但可进一步拓宽适用环境范围。

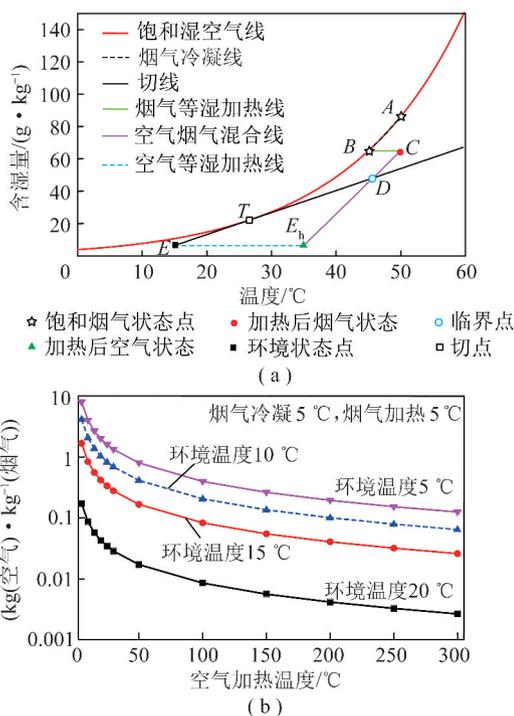


图9 空气加热/烟气冷凝再热混合方式空气当量比变化

Fig. 9 Change of air equivalence ratio of air heating mixed with flue gas condensation and heating mode

基于各方案技术参数进行经济性分析比较,可确定优选技术路线,对烟气消白技术路线的选择应用提供参考。

## 4 结论

1)对于相对湿度为60%的环境,脱硫塔出口烟气温度为50℃,不采用任何措施消除湿烟羽的临界环境温度为37.3℃。

2)假设可适用的烟气最大升、降温幅度均为30℃,采用烟气加热技术、烟气冷凝技术、烟气冷凝再热技术的临界环境温度分别为12.9、8.7、-12.9℃。

3)对于空气加热混合技术方案,基于切线法对空气烟气进行热平衡计算,可获得消除湿烟羽的空气当量比,与其他技术联用可进一步拓宽适用环境范围。选定烟气冷凝度/再热度,可计算出联用空气加热混合技术时消除湿烟羽所需的空气当量比。

4)本文所采用的计算方法能够确定不同环境

条件下消除湿烟羽所需要达到的技术指标,对烟气消白技术路线的选择应用具有一定参考价值。

## 参考文献(References):

- [1] 史文峥,杨萌萌,张绪辉,等. 燃煤电厂超低排放技术路线与协同脱除[J]. 中国电机工程学报,2016,36(16):4308-4318,4513.  
SHANG Wenzheng, YANG Mengmeng, ZHANG Xuhui, et al. Ultra-low emission technical route of coal-fired power plants and the cooperative removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(16):4308-4318, 4513.
- [2] 朱杰,许月阳,姜岸,等. 超低排放下不同湿法脱硫协同控制颗粒物性能测试与研究[J]. 中国电力,2017,(1):168-172.  
ZHU Jie, XU Yueyang, JIANG An, et al. Test and study on performance of wet FGD coordinated particulate matter control for ultra-low pollutants emission[J]. Electric Power, 2017, (1):168-172.
- [3] 王琿,宋蓄,姚强,等. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物脱除作用的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(5):1-7.  
WANG Hui, SONG Qiang, YAO Qiang, et al. Experimental study on removal effect of wet flue gas desulfurization system on fine particles from a coal-fired power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(5):1-7.
- [4] LI Zhen, JIANG Jingkun, MA Zizhen, et al. Influence of flue gas desulfurization(FGD) installations on emission characteristics of PM<sub>2.5</sub> from coal-fired power plants equipped with selective catalytic reduction(SCR)[J]. Environ Pollut, 2017, 230:655-662.
- [5] 龙时磊,曾建荣,刘可,等. 逆温层在上海市空气颗粒物积聚过程中的作用[J]. 环境科学与技术,2013(S1):104-109.  
LONG Shilei, ZENG Jianrong, LIU Ke, et al. Impact of temperature inversion layer on accumulation process of particulate matters in Shanghai[J]. Environmental Science & Technology, 2013(S1):104-109.
- [6] 邓长菊,尹晓惠,甘璐. 北京雾与霾天气大气液态水含量和相对湿度层结特征分析[J]. 气候与环境研究,2014,19(2):193-199.  
DENG Changju, YIN Xiaohui, GAN Lu. Stratification characteristic analysis of atmospheric liquid water content and relative humidity during fog and haze weather in Beijing[J]. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(2):193-199.
- [7] 张小玲,唐宜西,熊亚军,等. 华北平原一次严重区域雾霾天气分析与数值预报试验[J]. 中国科学院大学学报,2014,31(3):337-344.  
ZHANG Xiaoling, TANG Yixi, XIONG Yajun, et al. Analysis and numerical forecast of a regional fog-haze in North China plain[J]. Journal of University of Chinese Academy of Science, 2014, 31(3):337-344.
- [8] 王晓敏,韩军彩,陈静,等. 石家庄地区能见度变化特征及其与相对湿度和颗粒物浓度的关系[J]. 干旱气象,2016,34(4):648-655.  
WANG Xiaomin, HAN Juncai, CHEN Jing, et al. Variation characteristics of atmospheric visibility and their relationship with relative humidity and particle concentration in Shijiazhuang of Hebei [J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(4):648-655.
- [9] 舒喜,杨爱勇,叶毅科,等. 冷凝再热复合技术应用于燃煤电厂湿烟羽治理的可行性分析[J]. 环境工程,2017(12):82-85.  
SHU Xi, YANG Aiyong, YE Yike, et al. Feasibility analysis of the condensation and reheating composite technology applied to the west plume control in coal fired poer plant[J]. Environmental Engineering, 2017(12):82-85.
- [10] 马修元,惠润堂,杨爱勇,等. 湿烟羽形成机理与消散技术数值分析[J]. 科学技术与工程,2017,17(22):220-224.  
MA Xiuyuan, HUI Runtang, YANG Aiyong, et al. Numerical analysis of wet plume formation mechanism and dissipation technique [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(22):220-224.
- [11] 朱高鹏,姚金海,邹昌宏,等. 空气混合控制对冷却塔性能影响的分析与研究[J]. 洁净与空调技术,2016(4):35-37.  
ZHU Gaopeng, YAO Jinhai, ZOU Changhong, et al. Analysis and study on the influence of air mixture control on the performance of cooling tower[J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2016(4):35-37.
- [12] 李文艳,王冀星,车建炜. 湿法脱硫烟气湿排问题分析[J]. 中国电机工程学报,2007,27(14):36-40.  
LI Wenyang, WANG Jixing, CHE Jianwei. Analysis on corresponding problems of WFGD flue gas wet emission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(14):36-40.
- [13] 李再亮,邢岩岩,马成龙. 管式热媒水烟气换热器(MGGH)技术在发电厂除尘提效和消除烟羽的研究与应用[J]. 黑龙江科技信息,2017(4):119.
- [14] 谭厚章,熊英莹,王毅斌,等. 湿式相变凝聚器协同多污染物脱除研究[J]. 中国电力,2017(2):128-134.  
TAN Houzhang, XIONG Yingying, WANG Yibin, et al. Study on synergistic removal of multi-pollutants by WPTA [J]. Electric Power, 2017(2):128-134.
- [15] 刘华,周贤,付林. 烟气与水冷凝换热影响因素实验研究[J]. 暖通空调,2015,45(7):90-95.  
LIU Hua, ZHOU Xian, FU Lin. Experimental study on influence factors of direct-contact flue-gas-water condensation heat exchange[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2015, 45(7):90-95.
- [16] 熊英莹,谭厚章. 湿式相变冷凝除尘技术对微细颗粒物的脱除研究[J]. 洁净煤技术,2015,21(2):20-24.  
XIONG Yingying, TAN Houzhang. Influence of wet phase transition condensate dust removal technology on fine particle removal [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2):20-24.
- [17] 王贵彦,黄素华. 湿法脱硫燃煤机组“白色烟羽”节能治理[J]. 华电技术,2016,38(11):64-65.  
WANG Guiyan, HUANG Suhua. Wet desulfurization coal-fired unit "white smoke plume" energy saving treatment [J]. Huadian Technology, 2016, 38(11):64-65.
- [18] 周西华,梁茵,王小毛,等. 饱和水蒸汽分压力经验公式的比较[J]. 辽宁工程技术大学学报,2007,26(3):331-333.  
ZHOU Xihua, LIANG Yin, WANG Xiaomao, et al. Comparison of saturation vapor pressure formulas [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(3):331-333.