

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.05.008

陶瓷膜烟气脱水工艺的水平衡分析

Water balance analysis for the flue gas water removing technology within ceramic membrane

韩长亮¹, 谷小兵^{2*}, 袁宗海³, 李刚³, 孙保民³, 高丹³

HAN Changliang¹, GU Xiaobing^{2*}, YUAN Zonghai³, LI Gang³, SUN Baomin³, GAO Dan³

(1. 河北国华定州发电有限责任公司, 河北 定州 073000; 2. 大唐环境产业集团股份有限公司, 北京 100097;

3. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

(1. Hebei Guohua Dingzhou Power Generation Company Limited, Dingzhou 073000, China; 2. Datang Environment Industry Group Company Limited, Beijing 100097, China; 3. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘要: 针对脱硫系统和除水装置建立水平衡模型, 对陶瓷膜除水烟气消白工艺的水平衡分布进行计算。某 600 MW 机组运行结果表明: 排烟温度、负荷与除水装置捕水量呈正比; 机组燃烧褐煤时, 工艺补水量需求最小, 除水装置捕水量远超工艺补水量; 冬季为满足消白要求, 除水装置捕水量更多; 陶瓷膜脱水效率每提高 10 百分点, 捕水量增加 25 t/h, 但烟囱出口处的烟气温度会下降, 当脱水效率从 10% 提升至 60% 时, 排烟温度下降 14.28 °C, 烟羽抬升高度下降 176.50 m。陶瓷膜除水装置烟气消白工艺在合适的条件下可有效降低脱硫系统水耗, 对全厂节水具有至关重要的意义。

关键词: 水平衡; 陶瓷膜; 除水装置; 烟气消白; 节水

中图分类号: TK 08 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2021)05-0053-06

Abstract: Water balance models for a desulfurization system and a water removal system were built to assess the capacity of ceramic membrane in water removal and wet plume eradication. The operation results of a 600 MW unit show that the exhaust gas temperature and unit load are directly proportional to the water captured by the water removal system. A boiler taking lignite as fire coal demands the least amount of process water supplement which is far exceeded by the water captured by the water removal device. To meet the requirement of wet plume eradication in winter, the captured water mounts up. The captured water increases by 25 t/h for every 10% increase in dewatering efficiency of the ceramic membrane, but the exhaust gas temperature at the chimney outlet will be lower. When the efficiency rises from 10% to 60%, the exhaust gas temperature falls by 14.28 °C, and the plume rise height reduces by 176.5 m. In the proper condition, the plume removal technology of the water removal system can effectively reduce the water consumption made by the desulfurization system, which is of great significance to the overall water saving.

Keywords: water balance; ceramic membrane; water removal system; wet plume eradication; water saving

0 引言

湿法烟气脱硫技术因脱硫效率高、适应范围广、钙硫比低、技术成熟等优点在我国火电行业中得到广泛应用^[1]。但是, 该技术中未饱和状态的烟气在经过脱硫系统时, 高温烟气蒸发吸收塔内的水分最终达到饱和状态, 出口烟气携带大量水蒸气, 在温度较低的环境下水蒸气很容易发生凝结, 产生“白烟”现象。部分燃烧褐煤的电厂, 排烟中水蒸气的质量流量可高达 280 t/h 左右, 烟气直接向外排

出, 不仅加剧“白烟”现象, 还造成大量水资源浪费^[2-4]。脱硫系统水耗在整个电厂水耗中占 35% 以上, 其主要水耗有排烟中的水蒸气、脱硫废水及外排石膏表面水和结晶水等。其中, 通过烟囱以水蒸气排出的水量占脱硫水耗的主要部分, 根据不同电厂的水平衡计算, 发现这部分水耗占脱硫总水耗的 85%~95%^[2-4]。因此, 回收烟气携带的这部分水蒸气, 对烟气消白及提高全厂水资源利用率具有十分重要的意义。

目前, 主要的烟气脱水技术有冷却冷凝、液体吸收及膜分离技术。其中, 冷却冷凝技术应用最为广泛, 但其回收的水质相对较差, 且低温冷凝过程

中容易引起设备低温腐蚀,增加设备运行成本;液体吸收技术中,需消耗吸收剂,技术运行成本费用增加,且吸收剂在吸收水蒸气的过程中会有部分排放到大气中污染环境;膜分离技术相比前两者具有效率高、回收水质纯度高,以及协同去除超细颗粒物等优点,正逐步应用于火电机组烟气脱水过程^[5-7]。

本文针对脱硫系统和除水装置建立水平衡模型,对陶瓷膜除水烟气消白工艺的水平衡进行计算,分析机组排烟温度、负荷及燃烧煤种等基本参数对水平衡分布的影响。同时,研究季节温差变化和陶瓷膜脱水效率等外部因素对水平衡分布的影响。

1 平衡模型及计算方法

随着各地政府对湿烟气治理的重视,烟气消白技术正逐步应用于火电湿法脱硫中^[8]。其中,陶瓷膜脱水技术具有脱水效率高、协同处理微小细颗粒、脱水水质较高等优点,非常适用于火电机组湿法脱硫。陶瓷膜除水烟气消白工艺是通过加装除水装置来实现,在吸收塔后加装陶瓷膜除水装置,该系统通过冷却水将烟气降温,促进烟气中的水蒸气凝结,再通过陶瓷膜捕获,脱水水质较高,可直接用于脱硫系统工艺补水。

增加该系统后,脱硫出口烟气携带的大量气态水蒸气会被捕获,液态水蒸气基本全部捕获,脱水系统捕获烟气中的水蒸气用于工艺补水,烟囱出口水蒸气的质量流量大幅度减少,“白烟”现象完全消除,且脱硫系统工艺补水量显著下降,脱硫系统整体水耗降低。

陶瓷膜脱水用于工艺补水会对脱硫系统水平衡造成一定的影响。因此,需要在原有脱硫系统水平衡的基础上结合除水装置重新建立系统水平衡^[9-10]。以脱硫系统和除水装置作为研究对象,建立物料平衡模型。针对整体系统建立固平衡、烟气平衡、氯平衡、水平衡、能量平衡等模块。物料平衡计算过程中各个子系统的平衡相互关联,水平衡作为能量平衡和烟气平衡的基础,在计算过程中还需要结合吸收塔内的氯平衡。

模型求解过程首先假定脱硫出口温度,进行烟气平衡、能量平衡、固平衡、氯平衡,以及水平衡联合计算,得出工艺补水量,根据计算出的吸收塔出口水蒸气对应的分压力进行校核。通过迭代计算求解模型,最终确定系统各部分水耗情况^[11]。

2 结果分析

2.1 不同排烟温度下的水平衡

烟气排烟温度一般根据设计煤种含硫量及酸露点确定^[12],一般机组脱硫入口烟温为 125℃,部分电厂在脱硫前设置低低温省煤器,使脱硫入口烟气温度下降至 80~90℃^[13],同时,部分电厂因为使用煤种与设计煤种存在差异或受热面积灰等因素,致使脱硫入口烟温高达 140~160℃^[14]。脱硫入口烟温差异大,进入脱硫系统后在吸收塔内的蒸发作用不同,导致出口烟气携带水蒸气的质量流量各不相同。图 1 所示为冬季某 600 MW 机组在保持燃烧煤种、负荷,以及脱水效率一定的情况下,脱硫入口不同烟温下除水装置的补水情况。

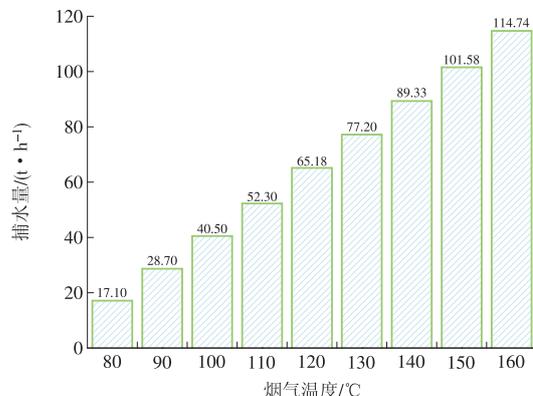


图 1 脱硫入口不同烟温下除水装置的冬季捕水量

Fig. 1 Water captured by the water removal device in winter under different flue gas temperature

由图 1 可以看出,随着烟气温度升高,除水装置捕水量会持续增加。部分安装低低温省煤器的电厂,脱硫入口温度大幅下降,烟气在吸收塔内部蒸发作用减弱,脱硫出口烟气温度减小,脱硫出口烟气中水蒸气的质量流量大幅下降,除水装置捕水量减少,因此陶瓷膜除水装置不适用于安装低低温省煤器的电厂。对于排烟温度较高的电厂,脱硫入口温度大幅上升,烟气在吸收塔内部蒸发作用增强,脱硫出口烟气温度升高,烟气中水蒸气的质量流量显著增加,陶瓷膜组件在此过程作用效果显著,当脱硫入口烟温达到 160℃时,陶瓷膜除水装置冬季每小时可从烟气中捕获水蒸气 114.74 t,将陶瓷膜捕水用于工艺补水,将有效降低脱硫系统水耗,减少全厂用水量。

2.2 不同煤种下的水平衡

我国煤炭储量丰富,无烟煤、贫煤、烟煤及褐煤在我国各地区均有分布,不同煤种其挥发分、灰分及水分都具有较大差异,因此,锅炉在燃烧不同煤种时烟气成分也有明显差异。图 2 为 600 MW 机组

在保持负荷、脱水效率,以及脱硫入口排烟温度一定的情况下,不同煤种的工艺补水量和除水装置冬季捕水量。

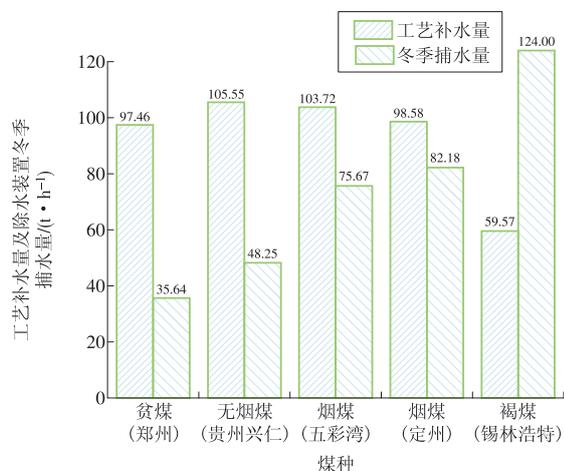


图2 不同煤种的工艺补水量及除水装置冬季捕水量

Fig. 2 Supplement of process water and water captured in winter by the water removal device with different kinds of coal

从图2可以看出,燃烧无烟煤(贵州兴仁)和贫煤(郑州)的除水装置捕水量较少,因为无烟煤和贫煤含水量较低,在经过吸收塔达到饱和状态时需要更多热量,导致出口烟温相应降低,烟气中水蒸气的质量流量下降。同时,吸收塔入口烟气含水量较低,工艺补水量较大,除水装置捕水用于工艺补水效果不佳。燃烧烟煤(定州和五彩湾)的冬季捕水量可达工艺补水量的70%~80%,节水效果显著。

对于褐煤(锡林浩特),因其含水量较高,在经过吸收塔达到饱和状态时需要较少热量,导致脱硫出口烟温升高,烟气中水蒸气的质量流量增加,除水装置捕水量增大。同时,燃烧褐煤的电厂工艺补水量较小,除水装置捕水用于工艺补水效果十分显著。某600 MW 燃烧锡林浩特煤种的电厂冬季除水装置可捕获水蒸气124.00 t/h,工艺补水量仅为59.57 t/h,除水装置捕水量是工艺补水量的2.1倍,因此,陶瓷膜除水装置捕水量不仅满足工艺补水需求,同时还可用于其他系统补水。

2.3 不同季节下的水平衡

不同季节环境温度不同,空气相对含湿量存在差异。温度较低时相对含湿量较高,且烟气温差较大,更容易凝结大量水蒸气形成“白烟”现象^[15]。形成“白烟”的根本原因在于烟气与空气混合后水蒸气的质量流量达到饱和态,气态水蒸气发生液化所致,适当降低烟气含湿量可有效消除此现象^[16-18]。为满足烟气消白要求,夏季(4—10月)烟气经过陶瓷膜组件后含湿率不得高于11.0%,冬季(11月—次年3月)烟气经过陶瓷膜组件后含湿率不得高于

9.5%。

冬季相比夏季,环境温度较低,根据空气温度与饱和蒸汽的关系,随着温度的降低,饱和蒸汽相对含水量逐渐下降。因此,水蒸气更容易发生凝结现象。为解决电厂烟囱出现“白烟”现象,不同季节对烟气含水量有不同要求。冬季对排烟含湿量要求比夏季高,除水装置需要捕获较多水蒸气以满足要求。某600 MW 机组在保证负荷、燃烧煤种,以及脱水效率不变的情况下,冬季与夏季捕水情况如图3所示。夏季除水装置捕水量仅为33.97 t/h,冬季捕水量达到64.57 t/h,是夏季捕水量的1.9倍。因此,冬季除水装置节水效果更显著,对于北方火电厂在冬季运行时,可有效改善脱硫系统水耗情况。

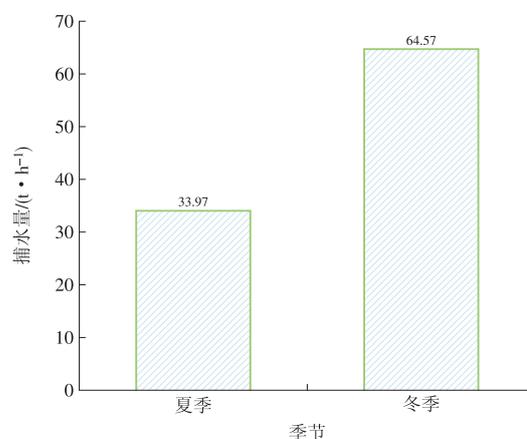


图3 除水装置在夏季和冬季的捕水情况

Fig. 3 Water capturing capacity of the water removal device in summer and winter

2.4 机组负荷影响

在灵活性发电背景下,火电机组调峰变得越来越普遍,机组每天都要经历不同负荷的变化。随着机组负荷升高,进入吸收塔内的烟气量增加,在吸收塔内蒸发作用加强,出口烟气携带水蒸气的质量流量增加。图4为某600 MW 机组在燃烧煤种、脱硫入口排烟温度,以及脱水效率一定时,不同负荷下除水装置的捕水情况。

从图4可以看出,随着机组负荷升高,除水装置捕水量明显上升,机组30%MCR(最大连续工况)负荷运行时,烟气量大幅减少,经过吸收塔的蒸发作用,脱硫出口烟气中总水蒸气的质量流量大幅下降,导致除水装置捕水量下降,仅为28.02 t/h。当负荷上升至100%MCR时,随着烟气的增加,除水装置捕水量提高了2倍以上。因此,机组在高负荷运行状态下除水装置捕水量较大,节水效果更明显。

2.5 除水装置不同效率的影响

通过调节除水装置冷却水流量及温度提高换热效率,可以有效控制陶瓷膜脱水率^[19-22]。图5为

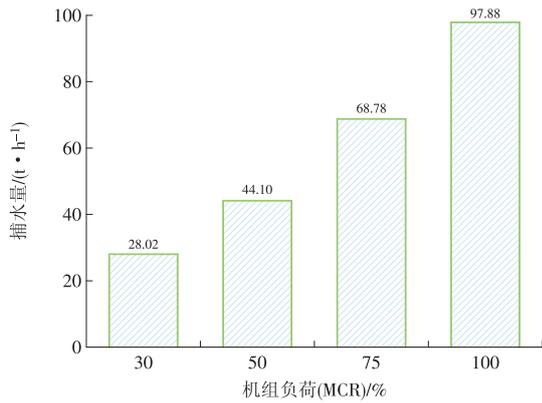


图 4 除水装置在不同负荷下的捕水量

Fig. 4 Water capturing capacity of the water removal device under different unit load

某 600 MW 机组冬季在脱硫入口烟温、负荷以及燃烧煤种一定时,除水装置不同脱水效率下的捕水情况。可以看出除水装置脱水效率提升,捕水量增加明显,脱水效率每提升 10 百分点,捕水量可增加约 25.00 t/h。

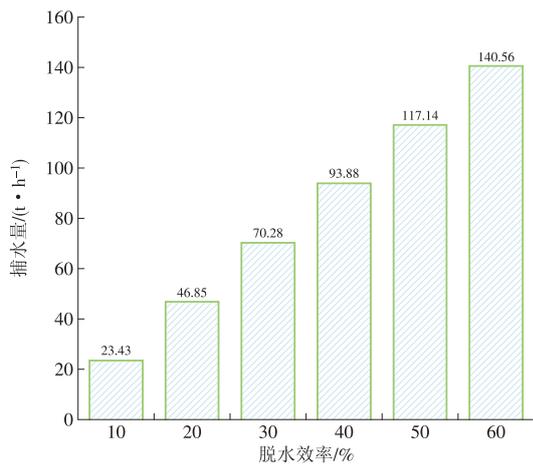


图 5 除水装置不同脱水效率下的捕水情况

Fig. 5 Water captured by the water removal device under different dehydration efficiency

当除水装置脱水效率为 42% 时,除水装置捕水量正好与工艺补水量相等,此时捕水可正好满足工艺补水量的要求,脱硫系统将无须额外取水用于工艺补水,脱硫系统用水量大幅下降。当除水装置脱水效率达到 60% 时,除水装置捕水量在满足工艺补水量的需求时,还额外增加 42.08 t/h 的捕水量用于其他系统,可有效减少全厂用水量。

2.6 烟羽抬升高度

提高除水装置脱水效率需要增大循环水流量,降低循环水温度,使烟气温度降低促进水蒸气凝结从而通过陶瓷膜除水装置捕获。图 6 为该机组在不同脱水效率下的排烟温度变化情况,可以看出随着脱水效率的升高排烟温度下降,当脱水效率从 10% 提升至 60% 时,排烟温度下降 14.28 ℃。

依据 GB 13223—2003《火电厂大气污染物排放标准》进行烟羽抬升高度的计算。在环境条件一定的情况下排烟温度直接决定了烟羽抬升高度,随着排烟温度下降,烟羽抬升高度下降。图 7 为该机组在不同脱水效率下的烟羽抬升高度,可以看出排烟温度下降 14.28 ℃ 时,烟羽抬升高度下降 176.50 m。

因此,在改善除水装置脱水效率的同时,必须将排烟温度、烟羽抬升高度考虑在内,结合电厂所处环境及当地环保要求等因素,选取合适的脱水效率,有效改善全厂整体用水情况。

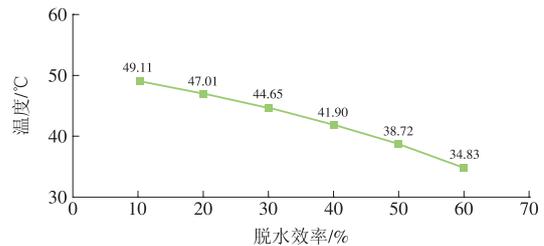


图 6 不同脱水效率下的排烟温度

Fig. 6 Exhaust gas temperature under different dehydration efficiency

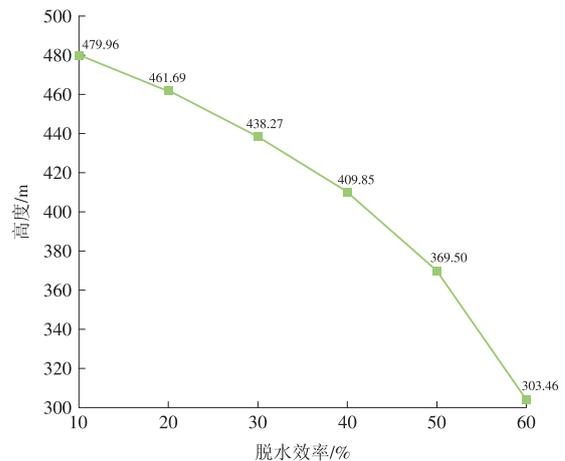


图 7 不同脱水效率下的烟羽抬升高度

Fig. 7 Plume rise height under different dehydration efficiency

3 结论

(1) 机组排烟温度升高,吸收塔内蒸发作用增强,烟气中水蒸气的质量流量增加,除水装置捕水量增加。

(2) 相比无烟煤和烟煤,褐煤水分较高,烟气携带水蒸气的质量流量较大,烟气除水装置捕水量完全可以满足吸收塔工艺补水需求,且有剩余可用于其他系统。

(3) 冬季环境温度较低,水蒸气易发生凝结作用产生“白烟”现象,除水装置捕水量要求比夏季更高,捕水量会显著增加。

(4) 负荷升高时机组烟气量增大,吸收塔内蒸

发作用加强,烟气携带水蒸气的质量流量增加,除水装置捕水量上升。

(5)除水装置脱水效率提高,捕水量增长显著,同时导致排烟温度和烟羽抬升高度下降。

参考文献:

- [1]杜家芝,曹顺安.湿法烟气脱硫技术的现状与进展[J].应用化工,2019,48(6):1495-1500.
DU Jiazhi, CAO Shun'an. Research status and progress of wet flue gas desulfurization technology [J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(6): 1495-1500.
- [2]汤君军,徐俊.烟气湿法脱硫系统中的白烟现象及治理[J].上海节能,2019(9):782-787.
TANG Junjun, XU Jun. White smoke phenomenon and countermeasures of flue gas wet desulfurization system [J]. Shanghai Energy Conservation, 2019(9): 782-787.
- [3]曹凌燕.燃煤电厂白色烟羽的形成与消除研究[J].锅炉技术,2019,50(3):60-65.
CAO Lingyan. Research on formation and elimination of white plume in coal-fired plant [J]. Boiler Technology, 2019, 50(3): 60-65.
- [4]范江,黄晨希,陈伟雄,等.燃煤机组“消白”技术排烟温度的理论分析[J].发电技术,2019,40(3):239-245.
FAN Jiang, HUANG Chenxi, CHEN Weixiong, et al. Theoretical analysis of flue gas exhaust temperature of white smoke elimination technology for coal-fired units [J]. Power Generation Technology, 2019, 40(3): 239-245.
- [5]江自生,韩买良.火电机组水资源利用情况及对策[J].华电技术,2008,30(6):1-5.
JIANG Zisheng, HAN Mailiang. Water resources utilization situation and countermeasures of thermal power unit [J]. Huadian Technology, 2008, 30(6): 1-5.
- [6]国家发展改革委,水利部,住房城乡建设部.节水型社会建设“十三五”规划[EB/OL].(2017-01-17)[2020-04-20]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201701/W020190905497902966773.pdf>.
- [7]康阿青.电厂循环冷却水系统节水及零排放技术研究[J].中国设备工程,2019(7):199-201.
KANG Aqing. Research on water saving and zero discharge technology of circulating cooling water system in power plant [J]. China Plant Engineering, 2019(7): 199-201.
- [8]杨爱勇,舒喜,韦飞,等.湿烟羽治理中脱硫系统水平衡影响因素分析研究[J/OL].洁净煤技术:1-7[2020-05-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20200210.0856.002.html>.
YANG Aiyong, SHU Xi, WEI Fei, et al. Analysis and research of influencing factors on water balance of desulfurization system in wet plume control [J/OL]. Clean Coal Technology: 1-7 [2020-05-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20200210.0856.002.html>.
- [9]张占立,李旭,李东,等.脱硫系统水平衡[C]//国家火力发电工程技术研究中心.2017清洁高效燃煤发电技术交流研讨会论文集.国家火力发电工程技术研究中心:北京中能联创信息咨询有限公司,2017:212-217.
- [10]郭炯.超低排放改造对脱硫水平衡影响及对策[J].装备维修技术,2020(1):189,147.
GUO Jiong. Influence of ultra - low emission retrofit on desulfurization water balance and countermeasures [J]. Equipment Technology, 2020(1): 189, 147.
- [11]马双忱,武凯,万忠诚,等.旁路蒸发系统对燃煤电厂脱硫系统水平衡和氯平衡的影响[J].动力工程学报,2018,38(4):298-307.
MA Shuangchen, WU Kai, WAN Zhongcheng, et al. Effect of evaporation bypass on water and chlorine balance in desulfurization system of a coal - fired power plant [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(4): 298-307.
- [12]王璐,王晓霖,孔丽静,等.燃气锅炉烟气冷凝设备节能潜力计算[J].计量技术,2019(10):73-76,57.
WANG Lu, WANG Xiaolin, KONG Lijing, et al. Calculation of energy saving potential of gas boiler flue gas condensing equipment [J]. Measurement Technique, 2019(10): 73-76, 57.
- [13]张方,修正平,方津.低低温省煤器经济性计算及应用[J].华电技术,2019,41(2):65-68.
ZHANG Fang, XIU Zhengping, FANG Jin. Economy calculation and application of low - low temperature economizer [J]. Huadian Technology, 2019, 41(2): 65-68.
- [14]徐亚梅,韦志霞,关志成.浅析达电#6机组低低省煤器对凝结水品质影响[J].科技经济导刊,2016(8):127.
XU Yamei, WEI Zhixia, GUAN Zhicheng. Analysis on the influence of the low and low economizer of Dadian #6 unit on the condensate quality [J]. Technology and Economic Guide, 2016(8): 127.
- [15]杨丽,杨雪峰,张相,等.150 t/h及100 t/h循环流化床锅炉烟气除湿消白技术改造及研究[J].能源工程,2019(5):75-79.
YANG Li, YANG Xuefeng, ZHANG Xiang, et al. Modification and research on the flue gas dehumidification and whitening in the 150 t/h and 100 t/h circulating fluidized bed boilers [J]. Energy Engineering, 2019(5): 75-79.
- [16]王皓,李军,王霄楠,等.燃气热水锅炉烟气余热利用及消白雾技术分析热能与热能计算[J].区域供热,2019(5):139-145.
WANG Hao, LI Jun, WANG Xiaonan, et al. Analysis and calculation of heat energy of gas-fired hot water boiler flue gas waste heat utilization and white fog elimination technology [J]. District Heating, 2019(5): 139-145.

[17]高劲豪,姜树伟,高原.湿烟气消白雾技术经济比较[J]. 环保科技,2019,25(2):61-64.
GAO Jinhao, JIANG Shuwei, GAO Yuan. Technical and economic comparison for technologies of eliminating white from wet flue gas [J]. Environmental Protection and Technology, 2019, 25(2): 61-64.

[18]裘立春.大型燃煤电站锅炉冒白烟的研究[J]. 锅炉技术, 2015, 46(3): 26-29.
QIU Lichun. The research on stack white fume in large utility boiler burning coal [J]. Boiler Technology, 2015, 46(3): 26-29.

[19]陈海平,谢天,杨博然,等. 火电厂烟气水分及余热陶瓷膜法回收实验[J]. 热力发电, 2018, 47(11): 46-52.
CHEN Haiping, XIE Tian, YANG Boran, et al. Water and waste heat recovery from flue gas of thermal power plants: Using ceramic membrane method [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(11): 46-52.

[20]杨彭飞,吴冲,张锡乾,等. 烟气“消白”改造项目设计参数的确定[J]. 华电技术, 2020, 42(6): 31-34.
YANG Pengfei, WU Chong, ZHANG Xiqian, et al. Setting for design parameters of a wet plume treatment project [J]. Huadian Technology, 2020, 42(6): 31-34.

[21]林瑜. 脱硫塔内 2 种喷嘴喷淋特性及对塔壁影响的数值模拟[J]. 华电技术, 2020, 42(9): 16-25.
LIN Yu. Numerical simulation of spraying effects and impacts on the desulphurization tower shell with two types of nozzles [J]. Huadian Technology, 2020, 42(9): 16-25.

[22]刘秀如,李佩佩,王先鹏,等. 锅炉烟气酸露点研究现状及展望[J]. 华电技术, 2020, 42(9): 45-55.
LIU Xiuru, LI Peipei, WANG Xianpeng, et al. Review and prospect of researches on boilers' flue gas acid dew point [J]. Huadian Technology, 2020, 42(9): 45-55.

(本文责编:张帆)

作者简介:

韩长亮(1984—),男,河北定州人,工程师,从事环保技术工作(E-mail:67580389@qq.com)。

谷小兵*(1976—),男,河南临颍人,高级工程师,工学硕士,从事环保技术开发方面的工作(E-mail: dtguxiaobing@163.com)。

袁宗海(1991—),男,宁夏吴忠人,在读硕士研究生,从事全厂各类废水进入脱硫系统后对脱硫系统各过程的影响方面的研究(E-mail:13366010711@163.com)。