

燃煤电厂低低温烟气处理系统模拟优化

王争荣, 耿宣, 汪洋, 张锡乾

(中国华电科工集团有限公司, 北京 100160)

摘要:低低温烟气处理(MGGH)系统循环水进出口温度决定着换热器的平均对数温差,从而影响着降温换热器和再热换热器的换热面积;同时,由于降温换热器和再热换热器因低温腐蚀的缘故所采用材质不同,使得2个换热器的单位造价存在较大差异,需要综合换热面积和材料成本对MGGH系统进行最优化。使用Aspen Plus软件构建MGGH系统并进行数值模拟,利用该软件的敏感性分析工具,设定某电厂降温换热器循环水进口温度和出口温度双变量,求解最优运行参数。优化后,原设计循环水出口温度由95℃变为105℃,所需循环水量由619.677 t/h变为437.428 t/h,降温换热器和再热换热器的设备总价降低了5.02%,总换热面积增加了1.55%。

关键词:燃煤电厂;低低温烟气处理系统;低温腐蚀;Aspen plus 软件;模拟优化

中图分类号:TK 172 **文献标志码:**A **文章编号:**1674 - 1951(2018)02 - 0057 - 04

0 引言

随着环保要求的不断提高,实现部分或全天候消除烟囱“白烟”已受到越来越多的关注和重视。燃煤电厂湿法脱硫工艺中的脱硫塔入口烟温为100~130℃,而脱硫之后烟温为47~50℃,此时的烟气基本处于饱和状态,烟气温度的降低会造成烟囱出口烟气抬升高度减小,出烟囱后的烟气进一步遇到冷空气冷凝析出水分,形成白烟,造成一定程度的视觉污染,严重时甚至会形成“石膏雨”;同时,随着烟温的降低,烟气中的酸性成分会形成酸滴,对烟道和烟囱造成腐蚀^[1]。

低低温烟气处理(MGGH)系统是一种通过中间热媒将烟气余热回收与烟气再热联系起来同时还能保持相互独立的换热系统。脱硫后的烟气温度得到提高,加大烟气抬升高度,可实现部分或全天候消除烟囱“白烟”。起初的MGGH布置在除尘器与脱硫塔之间,煤的硫分高时,这种布置方式易导致较严重的烟道酸腐蚀现象。三菱公司于1997年开始将MGGH布置在空气预热器和除尘器之间,可使进入除尘器的烟气体积流量减少,实现余热利用的同时还提高了除尘效率,具有良好的环保和节能效果,符合超低排放的要求^[2-5]。至今,日本有多台大机组在运行,如原町电厂、常陆电厂、碧南电厂、橘湾电厂和三隅电厂等,国内也有电厂已采用该技术,如华能珞璜电厂、国投湄洲电厂、广东粤电大埔电厂、浙江嘉兴电厂和上海漕泾电厂等^[6-8]。目前国内虽有关于MGGH系统项目数据和经济性分析的报道,但对

系统的整体模拟和设备投资的综合经济性优化的研究未见报道,本文从系统流程模拟角度入手,探究其多种条件下的最佳操作参数,以降低造价、节约制作费用。

1 MGGH 技术工艺

1.1 MGGH 系统

MGGH系统包括烟气降温换热器和烟气再热换热器2台换热器,通过循环热媒水使2台换热器形成一个闭式回路。循环热媒水在降温换热器吸热以降低烟气温度,而在再热换热器中又将所带大部分热量用于加热脱硫后的烟气,使烟气温度得以提升,热媒水温度又降至初始温度回到降温换热器。配套设备有热媒水循环水泵、热媒体膨胀罐、补水系统、加药系统、清灰系统,低负荷时还需配套辅助加热器^[9],如图1所示^[3]。

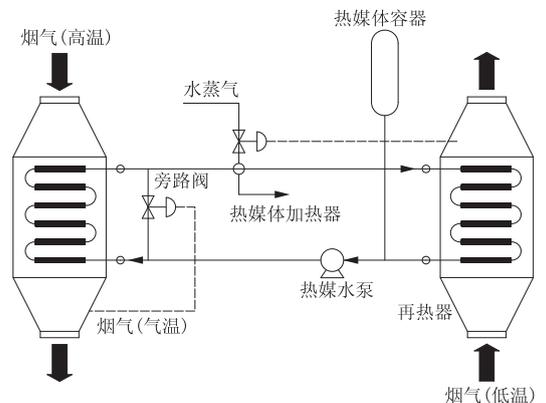


图1 MGGH 工艺原理

烟气降温换热器和再热换热器分别安装于电除尘器入口前和脱硫塔出口的烟道内,换热管采用单H或双H型翅片管。为防止换热管低温段产生低

温腐蚀,烟气降温换热器热媒水入口温度应高于烟气露点,一般设定在 65 ~ 75 °C,热媒水经降温换热器换热之后,温度升至 100 °C 左右。高负荷时,降温换热器所吸收的热量大于再热换热器烟气升温所需热量,多余热量可用于加热低压加热系统的凝结水或空气预热器;而在低负荷时,降温换热器回收热量不满足再热换热器烟气所需热量,为了保证烟气的提升高度,需开启辅助加热器^[9]。

1.2 MGGH 的技术优势

MGGH 系统使进入电除尘器的烟气体积流量减小,可减少除尘器和风机等设备的初步投资;低温除尘器中高质量浓度的粉尘对烟气中的 SO₃ 进行物理和化学吸附,脱除大部分 SO₃,减轻后续烟道和设备的腐蚀;再热换热器将脱硫塔之后的饱和湿烟气加热为非饱和烟气,不仅提升了烟气爬升高度,消除“白烟”和“石膏雨”现象,也可降低烟囱防腐维护费用;回收余热用于加热低压加热器的凝结水或空气预热器的空气,具有一定的节能效果^[3,10]。

2 主要设备及优化设计

本文以某公司 330 MW (#1, #2) 供热机组烟气超低排放改造工程为例进行说明。MGGH 系统由降温换热器、电除尘器、烟气再热换热器组成,降温换热器布置在电除尘器入口的水平烟道处,再热换热器安装于脱硫塔后部烟道处。经降温换热器后,烟气温度由 128 °C 降至 90 °C,热媒水由 70 °C 被加热

至 95 °C,循环热媒水通过再热换热器将脱硫塔后烟气温度由 45 °C 升至 75 °C,一定程度上消除了烟囱“白烟”,剩余热量约 6.66 MW,用于加热锅炉凝结水,提高锅炉效率。

2.1 系统模拟

在 Aspen Plus 软件中建立 MGGH 系统,利用 HeatX 模块来模拟降温换热器、再热换热器、辅助蒸汽加热器以及凝结水换热器,换热器壳程走烟气,管程走热媒水。利用 Flash 模块模拟脱硫塔,通过相关设定使得脱硫塔出口的烟气为 45 °C 饱和湿烟气,为了消除烟囱白烟,该项目要求将脱硫后的烟气加热至 75 °C, MGGH 工艺模拟流程如图 2 所示。

工艺流程搭建完成之后,输入烟气和水的相关工艺参数,该项目单台锅炉烟气流量为 1 279 967 m³/h(标态,湿基,实际 O₂),具体组成见表 1。

表 1 烟气成分 %

参数	数值	参数	数值
φ(CO ₂)	11.61	φ(SO ₂)	0.16
φ(O ₂)	6.57	φ(H ₂ O)	6.43
φ(N ₂)	75.23		

额定工况下,模拟所得降温段换热器原烟气质量流量为 1 674.35 t/h,与热媒水换热后烟气温度由 128 °C 降至 90 °C,回收热量为 18.52 MW,再热换热器净烟气质量流量为 1 723.31 t/h,与热媒水换热后烟气温度由 45 °C 降至 75 °C,所需热量为 15.19 MW,降温段烟气释放的热量大于升温段烟气所需热量;

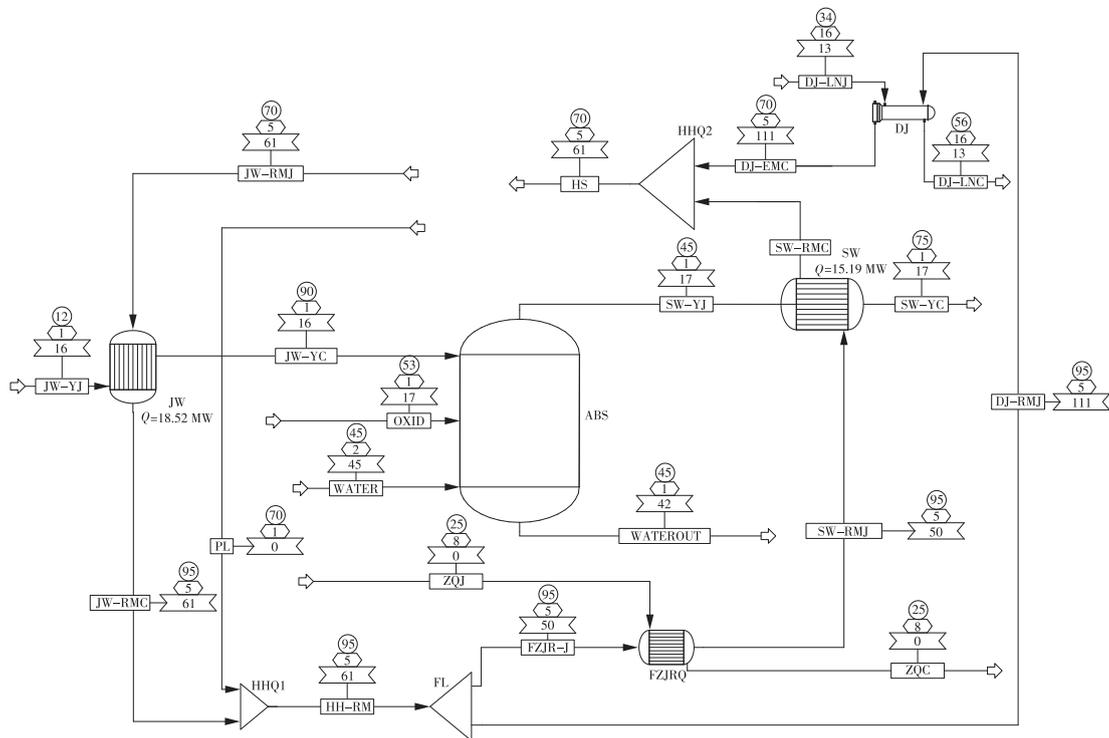


图 2 MGGH 工艺模拟流程

当热媒水由 70℃ 被加热至 95℃ 时,需热媒循环水流量为 619.677 t/h,多余的热量用于加热凝结水,来自 #8 低压加热换热器入口的凝结水温度为 33.2℃,通过凝结水换热器加热至 55.8℃,随后返回 #7 低压加热换热器入口,从而降低系统抽气,节约热耗。模拟物料和热量平衡均与电厂实际数据一致,系统模拟可靠。

2.2 改造方案

2.2.1 低温腐蚀

燃煤锅炉燃烧产生的烟气含有一定的 SO_3 , SO_2 , HCl , 与水蒸气反应生成酸,烟道中的降温换热器和升温换热器部分或全部换热面温度处于烟气露点以下,随着换热的进行,烟气与温度低于烟气露点的换热管接触时形成酸滴,就会产生低温腐蚀^[11-12]。

工程上目前可采用以下措施来防止低温腐蚀:采用能够耐低温腐蚀的材料;根据有限腐蚀理论,控制换热管壁温在合理的范围内^[13]。

依据有限腐蚀理论和工程经验,当换热管中热媒水温度高于烟气露点 25℃ 且小于 105℃ 时,低温腐蚀速率小于 0.2 mm/a,该腐蚀速率在工程上是可以接受的。依据烟气中水蒸气的质量浓度,一般烟气露点为 30~60℃,MGGH 系统中最低水温则要控制在 55~85℃。经计算,该电厂烟气露点为 39.8℃,则要求热媒水最低温度约为 65℃,根据低压加热系统水温情况,该项目低温换热器凝结水温度按 70℃ 设计^[14]。

2.2.2 低低温换热系统材质选择

降温段换热器将烟气温度降至 90℃,换热器高

温段材质选择 20G、低温段为 ND 钢(约占总换热面积的 50%),从而保证换热面温度低于 90℃ 时其换热面材料满足低温腐蚀要求。ND 钢具有优良的耐硫酸露点腐蚀和氯化物腐蚀性能,因此被广泛用于电厂热交换器的制造^[7,13]。

国内外低温换热系统换热管材质选择见表 2。

2.2.3 烟气再热系统材质选择

参考国内电厂和日本电厂烟气再热系统换热管材质的选用情况,当前烟气再热系统换热管材质选择有多种方向,具体参见表 3。

日本使用较多的是铁素体不锈钢,其一般不含镍元素,具有很好的耐氯化物应力腐蚀性能,推荐低温段材质选择 SUS444;国内倾向于使用高品质的奥氏体不锈钢及双相不锈钢^[13]。

该工程再热换热器布置在脱硫系统后,并预留下一步增设湿式除尘器的改造空间,烟气中大部分的 SO_2 和 SO_3 已经除尘器和脱硫去除,受热面的 SO_3 低温结露腐蚀减弱,但烟气中仍还含有不少具有强腐蚀性和渗透性的氟化氢和氯化物,因此,防止 Cl^- , F^- 的腐蚀对于再热换热器尤为重要。烟气中携带的石膏浆液滴黏附在换热壁上,随着浆液水分的蒸发会形成板结的粘污层^[15]。

根据实际烟气环境情况及部分电厂材质选择情况,对 MGGH 的再热换热器分 3 段布置:第 1 段换热管材质选择 SUS2205;第 2 段换热管选择性能不低于 SUS316L 的材质;第 3 段换热管选择性能不低于 ND 钢的材质,换热管基管为圆管,翅片与基管材质相同。

表 2 国内外低低温换热系统材质

电厂	机组容量/MW	低温段	高温段
日本碧南电厂	1000	STB340-EG(碳钢 TUBE)	
浙能嘉华发电有限公司	1000	ND 钢	碳钢
大唐宁德发电有限责任公司	600	Q235,SPCC(日标冷轧碳钢)	
华能榆社电厂	600	ND 钢	碳钢
浙能六横电厂	1000	ND 钢	碳钢
华能上安电厂	600	ND 钢	碳钢
华电望亭发电厂	660	ND 钢	碳钢
华能玉环电厂	1000	ND 钢	碳钢

表 3 国内外烟气再热系统换热管材质

电厂	机组容量/MW	低温段	中温段	高温段
日本碧南电厂	1000	SUS329J4L		SUS430TB
浙能嘉华发电有限公司	1000	2205	进口 SUS316L	ND 钢
华能榆社电厂	600	SUS316L		ND 钢
IHI 公司		SUS444	ND 钢	碳钢

3 MGGH 操作参数优化

由于低温腐蚀的存在,降温换热器和再热换热器选用不同的耐腐蚀材料,市场单价相差比较大,导致降温换热器和再热换热器的成本不同。而 MGGH 系统是由降温段和升温段 2 个换热器形成一个闭式循环,通过热媒循环水,用降温段的烟气热量来加热脱硫塔出口烟气。循环热媒水的入口温度和出口温度影响降温换热器和再热换热器的换热端差,依据上述选材和布置方式,通过计算,再热换热器的单位造价远高于降温换热器,在闭式循环系统中,当再热换热器温度端差变大时,其换热面积可相应减小。

烟气与水换热时,降温换热器和再热换热器烟气侧换热系数均远小于水侧换热系数,因此,可认为换热器的总换热系数由烟气侧决定,数值近似为烟气侧换热系数。保持烟气侧截面流速不变时,换热器的换热系数将不发生变化,烟气携带热量也不发生变化,换热器所需要的换热面积 S 与换热器的换热端差 Δt 成反比。

$$S = Q / (K\Delta t), \quad (1)$$

式中: Q 为换热量, kJ/s ; K 为总换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; Δt 为对数平均温差, $^\circ\text{C}$ 。

在烟气流量和烟气进、出口温度一定的情况下, Δt 由循环热媒水进、出口温度 t_1 和 t_2 决定,由此可知,此优化问题变为双变量优化问题。该项目原设计工况下热媒水进口温度 $t_1 = 70^\circ\text{C}$, 出口温度 $t_2 = 95^\circ\text{C}$, 降温段和升温段换热器的换热面积总和 $S_1 + S_2 = 43746 \text{ m}^2$, 以该设计条件下的降温换热器和再热换热器总价为基准, 设其为 1。优化后相对总造价与 t_1, t_2 变化趋势如图 3 所示。

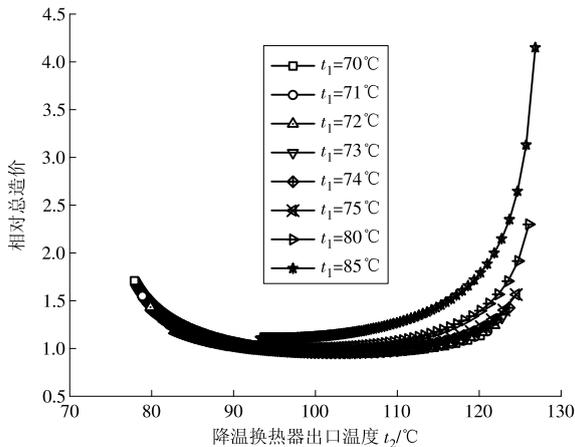


图 3 换热器相对总造价随出口水温变化

由图 3 可以看出,随着主变量 t_1 变大,造价曲线随之整体抬高,而在 t_1 一定的情况下,造价曲线随着 t_2 的增大先减小而后又增大。 $t_1 = 70^\circ\text{C}$ 、 $t_2 = 105^\circ\text{C}$ 时,降温换热器和再热换热器的换热面积总

和 $S_1 + S_2 = 44423 \text{ m}^2$, 降温换热器和再热换热器总价为最低,与原设计条件下的比值为 0.9498。优化后成本降低约 5.02%, 换热面积增加 1.55%, 在降温换热器和再热换热器烟气流速不变的情况下,增加的面积只能沿烟气纵深方向布置,可认为压力降与纵向管排数(烟道方向)成正比,因此,系统压降也相应增加 1.55%,对整个系统的压降几乎无影响。

设计值 t_2 为 95°C 时,再热换热器换热对数平均温差为 22.5°C , 所需循环水量为 638.100 t/h , 优化后 t_2 为 105°C 时,对数平均温差变为 27.4°C , 需要循环水量为 455.786 t/h , 循环水量变小,循环热媒水泵的功耗随之下降,3 种工况所需的循环水量随温度的变化如图 4 所示。

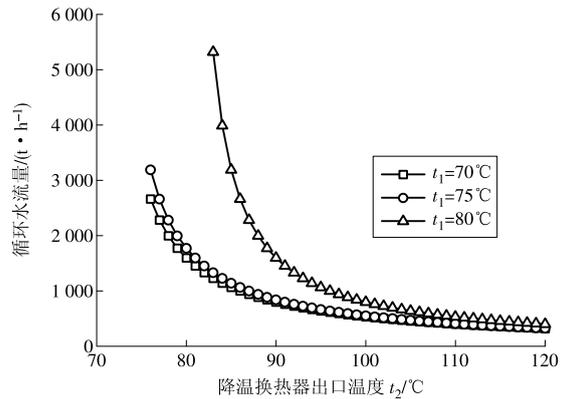


图 4 循环水量随出口水温变化

4 结论

(1) 根据电厂工艺参数和设备操作条件,利用 Aspen Plus 软件内置模块对 MGGH 系统进行搭建,完成数值模拟。

(2) 使用软件的敏感性分析工具,利用双变量进行了工艺优化,分析得到 MGGH 系统设计经济最优点,循环水温度由 $70^\circ\text{C} \rightarrow 95^\circ\text{C}$ 变为优化设计工况的 $70^\circ\text{C} \rightarrow 105^\circ\text{C}$, 所需循环水量由 619.677 t/h 变为 437.428 t/h , 降低了循环水泵所需功率。

(3) 优化后再热换热器换热平均对数温差由原来的 22.5°C 增大至 27.4°C , 再热换热器需要换热面积随之减小;优化后降温换热器和再热换热器的总换热面积比原设计增加 1.55%, 但降温换热器和再热换热器的设备总价降低 5.02%, 经济效益良好。

参考文献:

[1] 廖增安. 应用 LMGH 技术解决火电厂湿烟筒问题的可行性分析[J]. 环境保护与循环经济, 2014, 34(4): 29-32. (下转第 63 页)

本可满足制浆用水和废水处理用水水质要求;用作冲洗水和冷却用水虽然存在结垢的风险,但因循环水中加有缓蚀阻垢剂且在流动的状态下,不易成垢。首先在一台机组进行试验,运行 3 个月后,发现无不良影响,随后在全厂推广应用,效果良好。

循环水排污水作为脱硫工艺水时,水中的碳酸盐硬度会参与二氧化硫吸收反应,在节水的同时还可节约石灰石用量;但循环水排污水作为除雾器冲洗水和转动设备冷却水存在结垢风险,需在机组停运时对设备进行检查。

5 经济性分析

将循环水排水用作脱硫工艺水需增加管道、阀门及施工费用,但可节约水费、排污费等。每年可节约新鲜水 230 万 m^3 ,节约水费和电费共计 390 万元;每年减少排水 230 万 m^3 ,减少排污费 15 万元;每年少用碳酸钙 810 t(相当于石灰石 900 t),减少石灰石购置费 5.5 万元;减少磨煤机及循环泵电费、维护费共计 1 万元;增加管道、阀门及施工费用总计 10 万元;该电厂用循环水排水作为脱硫工艺水后,需增加投资 10 万元,但每年可节约费用约 411 万元。

6 结束语

循环水排污水用作湿法脱硫工艺用水,既节约

水资源又减少排污,经济和环境效益显著,但因循环水排污水含盐量和硬度均较高,用作除雾器冲洗水和转动设备冷却水时需注意结垢风险。

参考文献:

- [1] 中国水资源[EB/OL]. [2017-12-13]. <https://baike.baidu.com/item/中国水资源/4326130?fr=Aladdin>.
- [2] 世界水日:中国到底有多缺水? 世界水资源现状严峻吗?[EB/OL]. (2015-03-22) [2017-12-13]. <http://www.askci.com/travel/2015/03/22/114812offl.shtm>.
- [3] 全球燃煤电厂每年的用水量,足以供应 10 亿人需求[N]. 科技新报,2016-04-02.
- [4] 湿法烟气脱硫装置专用设备 除雾器:JB/T 10989—2010[S].
- [5] 火力发电厂设计技术规程:DL 5000—2000[S].
- [6] 金栋,崔小明,庞如振. 我国石化行业循环冷却水处理技术现状[C]//中国化工学会工业水处理专业委员会. 水处理技术研讨会论文集,1999:41.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

刘兴传(1972—),男,山东潍坊人,工程师,从事火电厂化学环保工作(E-mail:876447434@qq.com)。

(上接第 60 页)

- [2] 王中伟,李超,于丽新. 350 MW 燃煤机组加装 MGGH 系统设计方案的制定[J]. 环境保护与循环经济,2014,34(2):42-47.
- [3] 陈文理. MGGH 技术在 1000 MW 机组中应用的技术、经济性分析[J]. 电力建设,2014,35(5):103-107.
- [4] 马金祥,陈军. 低温省煤器在火力发电厂中的优化设计[J]. 华电技术,2016,38(7):15-19.
- [5] 王枢. 烟气换热器在某厂的设计及使用分析[J]. 科技创新与应用,2016(23):139.
- [6] 孙玉芳,李国堂. 浅析热煤管式烟气加热器系统的设置方案[J]. 节能技术,2016,34(4):377-381.
- [7] 刘文. 330 WM 机组 MGGH 系统改造分析与研究[J]. 锅炉制造,2016(4):37-39.
- [8] 张瑾. 华电望亭电厂 MGGH 及其控制系统的设计应用[J]. 机电技术,2016,39(3):29-32.
- [9] 任海聪,郭军. 火力发电厂超低排放改造低低温省煤器(MGGH)[C]//中国节能协会热电产业联盟. 2016 燃煤电厂超低排放形势下 SCR 脱硝系统运行管理及氨逃逸监测、空预器堵塞与低低温省煤器改造技术交流研讨会论文集,2016:243-249.
- [10] 殷戈. 燃煤电厂中间热媒体烟气换热器系统改造[J]. 发电设备,2016,30(3):191-193.

- [11] 杭州锅炉集团股份有限公司. MGGH 换热系统低温腐蚀问题浅析[C]//中国动力工程学会环保技术与装备委员会. 煤电厂“超低排放”新技术交流研讨会论文集,2014:243-250.
- [12] 张建中. 燃煤烟气降温除尘过程中 SO_3 浓度的浓淡分离现象及对酸露点温度影响的分析[J]. 锅炉技术,2015,46(3):12-13.
- [13] 张全斌,朱青国,何翊皓. 搪瓷换热管在燃煤发电机组 MGGH 上的应用研究[J]. 浙江电力,2016,35(9):57-61.
- [14] 刘宇钢,罗志忠,陈刚,等. 低低温省煤器及 MGGH 运行中存在典型问题分析及对策[J]. 东方电气评论,2016,30(2):31-35.
- [15] 孙春农. 燃煤掺烧下 1000 MW 机组洁净排放深度优化与实施[J]. 上海节能,2016(6):340-343.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

王争荣(1984—),男,陕西咸阳人,工程师,工学硕士,从事烟气余热利用方面的研究(E-mail:wangzr@chec.com.cn)。

耿宣(1986—),男,陕西西安人,工程师,工学硕士,从事烟气余热利用及流场模拟方面的研究(E-mail:gengx@chec.com.cn)。