

超低排放改造后烟气余热利用设备 存在问题及防治措施

牟春华¹, 王一坤¹, 白文刚¹, 郭明², 张华东³

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2.华能辛店电厂, 山东 淄博 255414;
3.华能山东发电有限公司, 山东 济南 250014)

[摘要] 随着火电厂超低排放改造的普遍应用, 低温省煤器等烟气余热利用设备获得了广泛应用。本文针对烟气余热利用设备在实际工程应用中所存在的低温腐蚀、磨损、积灰堵塞以及振动等问题, 分析了形成原因及主要影响因素, 提出了选用耐低温腐蚀性能优异的材料制造换热器, 合理设计受热面结构型式, 控制烟气流速和受热面金属壁温, 加装吹灰设备以及导流板和防振隔板等防治对策, 有效地解决了烟气余热利用设备所存在的低温腐蚀、磨损、积灰堵塞以及振动等问题。

[关键词] 低温省煤器; 低温腐蚀; 磨损; 积灰; 堵塞; 振动; 超低排放; 烟气余热

[中图分类号] TK223.3+3 **[文献标识码]** A **[DOI编号]** 10.19666/j.rfd.201908198

[引用本文格式] 牟春华, 王一坤, 白文刚, 等. 超低排放改造后烟气余热利用设备存在问题及防治措施[J]. 热力发电, 2020, 49(4): 46-50. MU Chunhua, WANG Yikun, BAI Wengang, et al. Existing problems and control measures of flue gas waste heat utilization equipment after ultra-low emission modification[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(4): 46-50.

Existing problems and control measures of flue gas waste heat utilization equipment after ultra-low emission modification

MU Chunhua¹, WANG Yikun¹, BAI Wengang¹, GUO Ming², ZHANG Huadong³

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Huaneng Xindian Power Plant, Zibo 255414, China;
3. Huanneng Shandong Power Generation Company, Jinan 250014, China)

Abstract: With the widespread application of ultra-low emission transformation of thermal power plants, flue gas waste heat utilization equipments such as low temperature economizer has been widely used. In this paper, the problems occur in low temperature economizer in practical engineering application, such as low temperature corrosion, abrasion, ash deposition and blockage, and vibration, are described, and the causes and main influence factors of these problems are analyzed. Moreover, the corresponding countermeasures are put forward, such as selecting materials with excellent low-temperature corrosion resistance to manufacture heat exchanger, reasonably designing the heating surface structure type, controlling the flue gas flow rate and metal wall temperature of heating surface, installing soot blowing equipment, guide plate and shockproof partition, which effectively solves the problems of low-temperature corrosion, abrasion, ash deposition and blockage, and vibration existing in the flue gas waste heat utilization equipment.

Key words: low temperature economizer, low temperature corrosion, abrasion, ash deposition, blockage, vibration, ultra-low emission, flue gas waste heat

我国现役燃煤电站锅炉的排烟温度普遍在110~160℃之间, 锅炉排烟热损失约占锅炉总热损失的60%~70%。锅炉排烟温度因煤质变化、受热面积灰、运行操作不当等会逐渐升高, 不仅造成了燃煤发电机组煤耗增加, 同时也会引起除尘器效率降低, 脱硫塔耗水量增加等一系列问题^[1]。

随着我国对燃煤发电机组节能减排要求的进一步提高, 从2014年开始, 我国广泛开展了燃煤机组的超低排放改造工作, 能够深度回收烟气中的低品位余热, 消除“白色烟羽”现象的烟气余热利用设备, 诸如低温省煤器、中间热媒体烟气换热器(MGGH)等也得到推广应用。目前, 烟气余热利

收稿日期: 2019-08-10

第一作者简介: 牟春华(1966), 男, 高级工程师, 西安热工研究院有限公司副总经理(副院长), 主要研究方向为火电厂节能减排与运行管理, muchunhua@tpri.com.cn。

用设备收到了良好的效果,但由于其恶劣的工作环境,也出现了诸如低温腐蚀、积灰堵塞以及磨损等问题,给火力发电企业的正常生产运行带来很大影响。

本文针对烟气余热利用设备在实际应用过程中所存在的各种问题,分析了形成原因及主要影响因素,并提出了相应的防治措施。

1 存在问题

1.1 低温腐蚀

由于电站锅炉燃煤硫分的存在,燃烧后的烟气会含有一定量的二氧化硫(SO_2)、三氧化硫(SO_3)及水蒸气(H_2O)。烟气中的 SO_3 与水蒸气结合会生成硫酸蒸气。气态的硫酸蒸气不会造成受热面腐蚀,但遇到温度较低的受热面时就会凝结为液态硫酸腐蚀受热面,此时的对应温度称之为酸露点^[2-3]。

为了提高锅炉效率,锅炉制造厂出于降低排烟热损失的目的,一般将空气预热器(空预器)出口的排烟温度控制在 $140\text{ }^\circ\text{C}$ 以下。目前采用常规材料的烟气余热利用设备均布置在空预器出口下游烟道,为了深度利用锅炉排烟的余热并减少受热面的初投资,一般采用了较低的进口水温,此时部分受热面将处于烟气酸露点以下,无可避免地面对低温腐蚀问题。在近几年的烟气余热利用改造中,也出现了很多因为低温腐蚀导致受热面泄漏的案例,如国内某火电厂采用ND钢材质的低温省煤器运行一年后发生了严重的低温腐蚀^[1](图1),给电厂造成巨大损失。



图1 某火电厂低温省煤器低温腐蚀情况

Fig.1 The low temperature corrosion of low temperature economizer in a thermal power plant

1.2 磨损

由于低温省煤器及MGGH烟气余热利用设备等均布置于低温烟道中(不超过 $150\text{ }^\circ\text{C}$),低温下

烟气灰粒变硬,磨损性将大大增强,导致受热面管子的磨损问题十分突出,严重时会导致受热面管束磨穿(图2)^[4]。

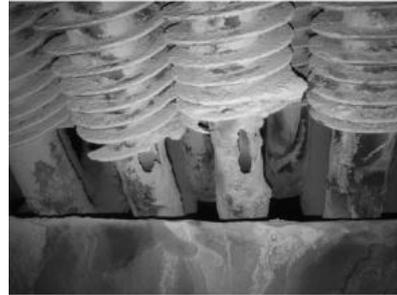


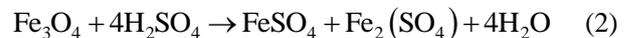
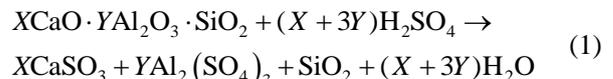
图2 管束磨穿

Fig.2 The wear out of tube bundles

由于目前烟气余热利用设备均采用水作为换热介质,一旦发生受热面管束磨穿,将会出现因为水泄漏导致低温腐蚀、堵灰加剧、烟气侧阻力增大等问题,需要进行停机处理。因此,必须采取有效措施预防受热面磨损。

1.3 积灰堵塞

烟气余热利用设备的受热面积灰可分为2种:1)受热面壁温高于酸露点温度所形成的干松灰;2)受热面壁温低于酸露点温度所积聚的低温黏结灰。其中,干松灰的形成过程是一个纯物理过程,灰层中无黏性成分,灰粒之间为松散状态,较易吹除,主要形成于管子的背面,迎风面几乎没有;低温黏结灰是当受热面壁温低于酸露点温度时,硫酸蒸气在受热面凝结形成硫酸液滴,捕捉含有 CaO 、 Al_2O_3 、 Fe_3O_4 等碱性氧化物的飞灰并生成具有黏结性的硫酸盐。低温黏结灰将不断吸附烟气中的飞灰,最终造成受热面堵塞^[2]。具体反应过程如下:



1.4 振动

当烟气流过受热面时,会在特定条件下于受热面管束背后形成“卡门涡流”产生强烈的声学共振。此时对应的漩涡不断产生和脱落的频率称之为卡门涡流频率,当受热面固有的驻波频率与之呈高阶次耦合时就会发生强烈的声学共振^[5]。

烟道声学驻波频率可按式(3)进行计算:

$$f_n = \frac{10n\sqrt{T}}{L} \quad (3)$$

式中: f_n 为驻波频率,Hz; n 为驻波阶数; T 为烟道

绝对温度, °C; L 为烟道壁面距离, mm。

卡门涡街脱落频率可按式(4)进行计算:

$$f_s = St \frac{v}{d} \quad (4)$$

式中: f_s 为涡流脱落频率, Hz; St 为斯特劳哈尔数; v 为受热面烟气流速, m/s; d 为受热面管子当量直径, mm。

2 防治措施

2.1 低温腐蚀

对于烟气余热利用设备而言, 主要有 2 种手段控制低温腐蚀速率: 1) 使用抗低温腐蚀性能优异的材料制造烟气余热利用设备; 2) 允许受热面有限腐蚀, 通过调节进入受热面的水温将其壁温和腐蚀量控制在合理范围之内。

在耐低温抗腐蚀材料开发领域, 现阶段已有不少新型材料问世, 如 ND 钢、聚四氟乙烯 (PTFE)、四氟乙烯与全氟代烷基乙烯基醚共聚物 (PFA)、聚全氟代乙丙烯 (FEP)、氟塑料-石墨、AlWaFlon 氟塑料^[6]、搪瓷管、钛管、CR1R、2205 双相不锈钢等。也有研究者从表面防腐入手, 通过为换热管增加化学转化膜、非金属覆盖层和金属覆盖层等手段, 增强换热管束的抗腐蚀性能^[7-11]。

金属壁温与受热面腐蚀速率的关系如图 3 所示。

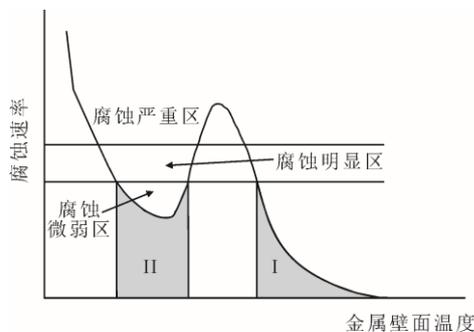


图 3 腐蚀速率随金属壁面温度变化示意
Fig.3 The change of corrosion rate with metal wall temperature

由图 3 可以看出: 当受热面壁温降低至烟气酸露点温度以下时, 硫酸蒸气开始凝结造成腐蚀, 由于初始的硫酸浓度很高且凝结的硫酸总量较少, 因此腐蚀速率较低; 随着金属壁温继续降低, 凝酸量增加, 因而腐蚀速度增大; 随着金属壁温的进一步降低, 金属与凝酸的反应速率下降, 腐蚀速度也随之下降; 当金属壁温持续降低时, 由于凝结酸浓度适中 (约 50%) 且凝酸量进一步增加, 腐蚀速度又

随之上升。整体来看, 存在 2 个腐蚀速度较低的区域^[2,12], 一个是酸露点以下约 20~45 °C 至酸露点的区域 I, 另一个是水露点以上至约 120 °C 的区域 II。

采用“有限腐蚀”的设计思路, 确定低温省煤器的安全壁温, 使烟气余热利用设备在合理的温度区间内运行, 以有效控制其受热面金属的低温腐蚀速率。当换热设备受热面壁温高于水蒸气露点温度 20 °C 且低于 105 °C 时, 金属的低温腐蚀速率小于 0.2 mm/a, 在可以接受的范围。根据这一思路, 可在此处采用耐腐蚀材料并允许部分换热器壁温处于酸露点。通常设计条件下, 只要保证烟气余热利用设备金属壁温高于烟气酸露点温度 10 °C 以上, 就能避免受热面发生严重的低温腐蚀^[12]。

在工程实践中, 受热面的壁温主要通过控制水温实现, 常规燃煤机组锅炉尾部烟气的水露点约在 30~60 °C^[13], 因此, 应将使用金属材质的烟气余热利用设备最低入口水温控制在 55~85 °C 之间。而对于非金属材质的换热器, 一般都具有良好的耐低温腐蚀性能, 可以不受上述水温的约束。

2.2 磨损

受烟气余热利用设备工作条件的限制, 无法通过改变烟气中灰粒的浓度、磨损性能和作用时间防止换热器磨损, 只能从选择适当的烟气流速、改善受热面管组结构特性和提高材料抗冲刷性能等方面着手。

工程实践中主要采取以下几种防磨措施: 1) 顺列布置耐磨性能良好的 H 型鳍片管; 2) 设计时选择较低的管间烟气流速; 3) 将受热面焊缝和弯头布置在烟道之外; 4) 在换热器前的迎风面加装防磨瓦或假管。目前绝大部分低温省煤器及 MGGH 项目受热面都采用 H 型鳍片管对烟气整流, 并使烟气在鳍片间有序流动降低磨损, 取得了良好的效果。实际工程运行经验表明, 采用顺列布置的受热面管束寿命, 是错列布置时的 3~4 倍, 因此在布置空间及成本允许的情况下, 也可采用顺列布置换热管束减轻受热面的磨损。

已有的研究表明, 锅炉尾部受热面的磨损与烟气流速的 n 次方成正比 ($2.3 < n < 3.2$), 因此要避免出现烟气流速过大的情况。一般情况下, 对于布置在不同烟道的受热面, 可根据含尘量选择不同的烟气流速, 其设计范围通常在 9~14 m/s, 含尘量低时选择接近上限, 含尘量高时选择接近下限。在

设计时,不仅要控制受热面的平均管间流速,还要通过流场 CFD 计算,设置合理的均流及导流装置,避免因形成局部烟气走廊带来的磨损加剧问题^[2,14]。

另外,弯头和焊缝属于受热面结构中抗磨损性能较弱的部位,非常容易出现局部磨损加剧直至泄漏。目前换热器厂家均普遍采用了避免烟气直接冲刷弯头和焊缝的烟道外侧布置方案,运行效果良好。另由于换热设备管组的烟气入口效应会造成最早与烟气接触的前几排管处烟气的流动扰动剧烈,磨损加剧,对此建议在受热面前3排加装防磨瓦或设置假管,从而最大程度地减缓磨损。

2.3 积灰堵塞

依据目前烟气余热利用设备的实际运行经验,当烟气流速在 8 m/s 以上时,受热面不易发生干松灰的沉积。因此,设计时适当选择较高的管间烟气流速,以避免或减少干松灰在受热面的沉积。

对于低温黏结灰,则需要通过控制受热面壁温,减少硫酸蒸气在受热面上的凝结解决。工程实践经验表明,对于采用金属材料的低温省煤器及 MGGH 烟气余热利用设备,当燃用煤质含硫量 <2% 时,最低允许的运行金属壁温为 70 °C^[13]。我国煤炭储量中 85% 左右煤质含硫量 <2%,东北、西北和华北等广大地区的煤炭大多属于低硫煤和特低硫煤^[15]。加之随着地方政府对环保的日益重视,对燃用煤质的硫分均做了严格控制。因此,大多数情况下只要将烟气余热利用设备受热面壁温控制在 70 °C 以上即可抑制严重低温黏结灰的生成^[2]。同时,合理设置在线吹灰装置、优化吹灰频次等也是阻止初始灰污层形成的有效措施。

MGGH 升烟温段布置在湿法脱硫塔出口烟道,此时脱硫后的净烟气会携带少量的石膏浆液滴黏附在受热面上。当石膏浆液水分蒸干后,就会形成板结的沾污层,严重时还可引发受热面堵塞。对此,可通过在受热面入口处设置部分错列光管降低烟气流速,同时将大部分石膏浆液滴拦截在此处。当入口段出现严重沾污时,可通过吹扫、水冲洗等将其除去,更甚者需要对其进行人工清理或更换。

燃煤机组增设烟气余热利用设备后,随着烟气温度的降低,烟气流速的下降,低负荷时容易出现烟道积灰问题,尤其是对于转弯处的烟道更是如此。对此,可通过进行烟道改造,加装扰流吹扫系统,或利用烟道灰斗和定期输灰装置将灰泵送至除尘器入口加以解决^[2,16]。

2.4 振动

研究表明,当涡流脱落频率在某阶驻波频率 ±20% 范围内时,易发生声学共振现象。因此在设计时可提前计算受热面的卡门涡流脱落频率使其避开已有的烟道驻波固有频率,同时可采用消除涡流作用较强的 H 型鳍片管来避免发生此类问题。

从已有的工程项目运行经验来看,烟气余热利用设备入口烟气流场不均是造成受热面振动的主要原因。通过在入口处加装导流板,在换热器本体增加隔振板,消除复杂烟道结构对烟气流场的影响,减少受热面入口漩涡生成量,就可有效避免受热面发生振动^[17-18]。如某电厂的 2 台螺旋翅片管低温省煤器烟道在机组负荷超过 325 MW 时会发生强烈振动,测得烟道壁面振幅最大超过 50 mm/s,机组被迫降低负荷运行。通过在低温省煤器管束区中部水平方向加装防振隔板,前方烟道加装水平和垂直方向的导流板减少气流扰动,使任何负荷下的振动幅度降低至 1 mm/s 以下^[19]。

3 结 语

烟气余热利用设备普遍存在低温腐蚀、磨损、积灰堵塞及振动等问题,可以通过选用耐低温腐蚀性能优异的材料制造换热器和控制受热面金属壁温来预防烟气余热利用设备的低温腐蚀;通过合理设计受热面结构型式,控制烟气流速,加装防磨瓦或假管预防烟气余热利用设备的磨损;通过设计较高的管间流速,控制受热面金属壁温,改造烟道或加装吹灰设备预防烟气余热利用设备的积灰堵塞。另外,对于烟气余热利用设备的振动,可通过加装导流板和防振隔板解决。

[参 考 文 献]

- [1] 徐祥根,陈旭,张春华. 非金属低温省煤器在烟气余热深度回收中的应用[J]. 机电信息, 2016(13): 84-88.
XU Xianggen, CHEN Xu, ZHANG Chunhua. Application of nonmetallic low temperature economizer in deep recovery of flue gas waste heat[J]. Mechanical and Electrical Information, 2016(13): 84-88.
- [2] 刘宇钢,罗志忠,陈刚,等. 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(2): 31-35.
LIU Yugang, LUO Zhizhong, CHEN Gang, et al. Cause analyses on typical operational problems of low temperature economizer and MGGH and proposed countermeasures[J]. Dongfang Electric Review, 2016(2): 31-35.
- [3] 宋杰. 电站锅炉低温省煤器换热特性数值模拟及低温腐蚀研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016: 41-45.
SONG Jie. Research on numerical simulation of heat transfer and low temperature economizer of low

- temperature corrosion of utility boiler[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016: 41-45.
- [4] 严小华, 鲍昕. 电厂 MGGH 早期失效原因分析及对策[J]. 发电设备, 2018, 32(5): 366-369.
YAN Xiaohua, BAO Ting. Cause analysis and countermeasures for early MGGH failures in a power plant[J]. Power Equipment, 2018, 32(5): 366-369.
- [5] 于泽忠. 低温省煤器受热面振动分析及治理措施[J]. 锅炉制造, 2016(5): 4-6.
YU Zezhong. Analysis and countermeasures on vibration of low temperature economizer heating surface[J]. Boiler Manufacturing, 2016(5): 4-6.
- [6] 胡清, 蒋文, 朱文中, 等. 氟塑料换热器在烟气余热回收领域中的应用分析[J]. 发电与空调, 2016 (3): 37-39.
HU Qing, JIANG Wen, ZHU Wenzhong, et al. Application analysis of fluorine plastic heat exchange in the field of flue gas heat recovery[J]. Power Generation & Air Condition, 2016(3): 37-39.
- [7] 睢文杰, 赵文杰, 秦立光, 等. 铜合金表面防腐涂层研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(1): 88-94.
SUI Wenjie, ZHAO Wenjie, QIN Liguang, et al. Research progress on surface anticorrosive coating of copper alloy[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2016, 28(1): 88-94.
- [8] 王帅, 吴新, 张庆国. 低温省煤器防腐换热管表面耐腐蚀性能[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(3): 266-272.
WANG Shuai, WU Xin, ZHANG Qingguo. Corrosion resistance of different tube coatings for low-temperature economizers[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(3): 266-272.
- [9] CHENG Y H, ZOU Y, CHENG L, et al. Effect of the microstructure on the properties of Ni-P deposits on heat transfer surface[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203(12): 1559-1564.
- [10] XU X Q, MIAO J, BAI Z Q, et al. The corrosion behavior of electroless Ni-P coating in Cl⁻/H₂S environment[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(22): 8802-8806.
- [11] YANG H, GAO Y, QIN W. Investigation of the corrosion behavior of electroless Ni-P coating in flue gas condensate[J]. Coatings, 2017, 7(1): 16.
- [12] 李传胜, 聂鑫. 防止锅炉低温省煤器发生低温腐蚀的工程思路[J]. 电站系统工程, 2016(5): 37-40.
LI Chuansheng, NIE Xin. Engineering design thinking of preventing low temperature corrosion of boiler[J]. Power System Engineering, 2016(5): 37-40.
- [13] 车得福, 庄正宁, 李军, 等. 锅炉[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2008: 386.
CHE Defu, ZHUANG Zhengning, LI Jun, et al. Boiler[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2008: 386.
- [14] 郝文蛇. 燃煤电厂低温省煤器流场及导流板结构优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018: 23-35.
HAO Wenshe. Study on optimization of flow field and diversion plate structure of low temperature economizer in coal-fired power plant[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018: 23-35.
- [15] 罗鹏飞, 李文华, 姜英, 等. 中国煤中硫的分布特征研究[J]. 煤炭转化, 2005, 28(3): 14-18.
LUO Yunfei, LI Wenhua, JIANG Ying, et al. Distribution of sulfur in coals of China[J]. Coal Conversion, 2005, 28(3): 14-18.
- [16] 齐林虎, 黄新元, 刘红英. 低低温省煤器联合暖风器系统在 300 MW 机组的应用[J]. 华电技术, 2016(10): 22-26.
QI Linhu, HUANG Xinyuan, LIU Hongying. Application of low and low temperature economizer combined with air heater system in 300 MW power plant[J]. Huadian Technology, 2016(10): 22-26.
- [17] 黄艺辉. 汕尾电厂 MGGH 升温段振动大原因分析[J]. 节能与环保, 2017(7): 70-73.
HUANG Yihui. Analysis of the large vibration of MGGH heating section in shanwei power plant[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2017(7): 70-73.
- [18] 蒋建伟, 朱伟, 廖晓春. 600 MW 机组 MGGH 烟道振动原因分析及对策[J]. 发电设备, 2018, 32(3): 220-222.
JIANG Jianwei, ZHU Wei, LIAO Xiaochun. Vibration analysis of MGGH flue duct in a 600 MW unit and corresponding countermeasures[J]. Power Equipment, 2018, 32(3): 220-222.
- [19] 李健, 秦松波. 低温省煤器及 MGGH 振动原因分析与消振措施[J]. 发电设备, 2017, 31(6): 438-441.
LI Jian, QIN Songbo. Cause analysis and countermeasures for vibration of a low-temperature economizer and MGGH[J]. Power Equipment, 2017, 31(6): 438-441.

(责任编辑 马昕红)