

锅炉节能器失效行为的分析

齐艳飞^{1*}, 侯 帅¹, 韩宗恩¹, 刘志刚², 刘建涛², 张 妍¹

¹华北理工大学, 河北 唐山

²河北省产品质量监督检验研究院, 河北 石家庄

收稿日期: 2022年3月30日; 录用日期: 2022年4月13日; 发布日期: 2022年4月25日

摘 要

锅炉安装节能器可显著提高锅炉的热效率及能源利用率。因此, 锅炉节能器的平稳运行是保障锅炉热效率的基础及关键。本文综述了锅炉节能器的典型失效行为及机理, 分析了节能器失效的主要影响因素, 并提出了相应的防护措施, 对于充分利用节能器在燃气锅炉余热回收中的作用具有重要的现实意义, 对于提升锅炉节能器的服役寿命具有一定的指导意义。

关键词

锅炉节能器, 失效行为, 影响因素, 防护措施

Analysis on Failure Behavior of Boiler Economizer

Yanfei Qi^{1*}, Shuai Hou¹, Zong'en Han¹, Zhigang Liu², Jiantao Liu², Yan Zhang¹

¹North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

²Hebei Research Institution for Product Quality Supervision and Inspection, Shijiazhuang Hebei

Received: Mar. 30th, 2022; accepted: Apr. 13th, 2022; published: Apr. 25th, 2022

Abstract

After installing the economizer in the boiler, the thermal efficiency and energy utilization rate of the boiler can be significantly improved. Therefore, the stable operation of boiler economizer is the basis and key to ensure the thermal efficiency of boiler. This paper summarizes the typical failure behavior and mechanism of boiler economizer, analyzes the main influencing factors of economizer failure, and puts forward corresponding protective measures. It has important practical significance for making full use of the role of economizer in waste heat recovery of boiler, and

*通讯作者。

has certain guiding significance for improving the service life of boiler economizer.

Keywords

Boiler Economizer, Failure Behavior, Influence Factors, Protective Measures

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

集中供热的取暖方式在城镇居民生活中日益普及，且国家对节能减排、环保的关注不断提升，高效清洁的天然气能源在城市能源结构中的占比逐渐升高。为了净化空气，采用天然气燃料供热是发展的必然趋势，这进一步加快了燃气锅炉取代燃煤与燃油锅炉[1]。燃气锅炉的典型优势为结构紧凑，自动化程度高，劣势是运行成本提升。因此，为解决这个问题，燃气锅炉配置了余热回收节能技术装置——节能器[2]。节能器的本质就是换热器，即锅炉燃烧产生的高温烟气与节能器管外壁接触，利用烟气的高温加热节能器管内壁的水，加热后的水再进入锅炉，从而起到节能的效果。相关报道指出，锅炉安装一级节能器后，可显著降低排烟损失达 10%，从而，提高锅炉的热效率，提高能源利用率[3]。

锅炉节能器安全稳定运行是保障锅炉热效率的基础及关键。因此，了解锅炉节能器的典型失效行为及机理、失效的主要影响因素及相应的防护措施，对于充分利用节能器在燃气锅炉余热回收中的作用具有重要的现实意义。

2. 锅炉节能器的典型失效行为

锅炉在服役过程中，节能器与烟气接触的那一侧容易积灰，节能器与水接触的那一侧容易产生水垢导致节能器管发生堵塞，影响节能器的正常服役，也会降低锅炉的热效率[4]。节能器水管穿孔及节能器结垢为节能器失效的典型特点，明确节能器典型失效行为的形成机理对于提出合理的解决方案具有重要的参考价值。

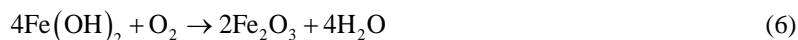
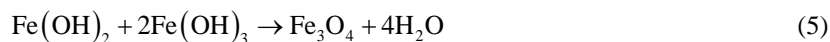
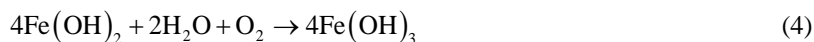
1) 节能器水管穿孔

由于节能器水管内外壁与空气、水等外部介质接触，故水管外壁会受到带尘烟气的冲刷磨损；水管内壁会受到水流的冲击、内压及温度压力的应力的作用。因此，水管会被腐蚀，水管内壁会有大大小小的腐蚀坑，有的腐蚀坑穿孔，有的腐蚀坑未穿孔，且水管腐蚀穿孔位置的管壁明显减薄[5]。由于水管内壁接触的是潮湿有氧环境，故节能器管内壁与水中的溶解氧构成腐蚀电池，水管内壁与水中的溶解氧发生了氧腐蚀(电化学腐蚀的一种)。在此过程中由于铁的电位低，铁失去电子成为正价的铁离子；氧的电位高，在水中得到电子成为水化离子，故此腐蚀电池中的氧为阴极，铁为阳极，不断失去电子，从而导致管壁变薄，阴阳极的反应式如下[6] [7]：



随上述反应的持续进行，节能器水管的腐蚀越来越严重，终将会造成管壁出现溃疡或局部穿孔，同时节能器管内壁的腐蚀产物普遍为黄褐色、砖红色或黑色物质。通过能谱分析发现，这些腐蚀产物为

$\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 。这是因为阳极的 Fe^{2+} 在水中发生了一系列反应如下[8] [9]:



起初形成的是不稳定的腐蚀产物 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ，随着反应继续进行，一部分 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 被氧化形成稳定的腐蚀产物 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ；一部分 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 与 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 持续反应生成 Fe_3O_4 ；还有一部分 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 被氧化成 Fe_2O_3 。此外，水管内壁的腐蚀产物在水流的冲刷下，会撞击水管内壁加速腐蚀。尤其是在水流不稳的情况下，水流一会慢一会快，会给水管内壁带来不同的水压力，加速腐蚀失效的进程，腐蚀贯穿水管服役及停运的整个期间。如果锅炉的节能器布置不合理，容易造成节能器肋片管发生腐蚀现象。如果腐蚀严重则会导致所形成的铁锈堵塞烟气通道，降低节能器的受热面积，降低锅炉效率。

2) 节能器异常结垢

节能器管外壁的正常结垢也是其典型失效行为之一。管外壁结垢轻则会降低换热效果，造成能源浪费；重则会覆盖管壁的实际腐蚀情况，不易被工作人员察觉，造成严重后果，还会进一步加快腐蚀进程。锅炉节能器管外壁出现的棕黄色鳞片状结垢主要是由硫酸亚铁、硫酸铁、亚磷酸铁等一种或多种产物组合而成的混合物，典型形貌特征如图 1 所示[10]。这种现象出现的主要原因是发生了低温腐蚀。排烟温度的高低决定了燃气锅炉热效率的高低，排烟温度越高，热效率损失越严重。因此，锅炉添加节能器的目的就是降低排烟温度，提高热效率。但是排烟温度并非越低越好，当烟气的排烟温度低于烟气露点温度时，会造成管壁外表面形成冷凝水。当冷凝水与烟气中的二氧化硫和三氧化硫相遇时，会形成亚硫酸和硫酸。当亚硫酸和硫酸的浓度达到一定值时，节能器管外壁表面会被腐蚀，形成如图 1 中所示的黄色结垢，形成机理见方程式(7)~(11)。

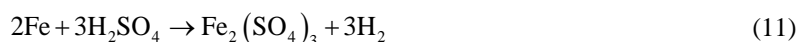
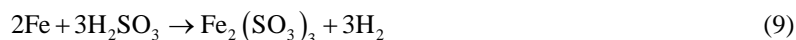


Figure 1. Abnormal scaling on the outer wall of economizer tube [10]

图 1. 节能器管外壁的正常结垢[10]

此外, 锅炉的实际运行情况也会对节能器的结垢产生影响。锅炉的昼夜负荷运行情况不一致, 白天处于满负荷运行状态, 黑夜处于低负荷运行状态, 低负荷运行会降低排烟温度, 增加冷凝水汇集, 给冷凝水与亚硫酸和硫酸的相遇创造了条件, 进一步加剧了节能器的腐蚀。同时, 因为锅炉白天满负荷运行, 黑夜低负荷运行, 所以, 节能器内壁的水温存在昼夜有温差。白天水温较高, 氧的扩散系数较大、水的黏度低, 所以水中的溶解氧容易与管内壁发生化学反应, 腐蚀速率较高。夜晚水温较低, 氧的扩散系数降低, 水的黏度升高, 故水中的氧不易到达管内壁, 降低了与管内壁的反应, 腐蚀速率下降。

3. 锅炉节能器失效的主要影响因素

1) 溶解氧的浓度

氧腐蚀是节能器水管腐蚀失效的重要原因之一, 水中的溶解氧含量越高, 与管内壁发生电化学反应的几率越大。因此, 应将水中的溶解氧控制在合理范围内, 可降低给水中溶解氧与水管内壁发生电化学反应, 降低腐蚀进程。溶解氧的浓度直接关系到金属的腐蚀速率。当溶解氧浓度低于 0.1 mg/L 时, 金属腐蚀不明显; 当溶解氧浓度为 $10\sim 100 \text{ mg/L}$ 时, 加速金属腐蚀。溶解氧浓度越高, 腐蚀速度越快[11]。因此, 应尽量控制溶解氧的浓度在较低的水平。

2) 管内壁的水流情况

水流的平稳性及水流速度也会影响节能器内壁的耐腐蚀性能。如果水流平稳, 不会对内壁造成波动式的冲击, 会降低由此引起的湍流腐蚀[8]。水流速度达到一定值后会形成湍流, 冲刷掉管内壁的保护膜、腐蚀物或结垢物等, 加速金属腐蚀。尤其是水流速度快慢相间时, 会对管内壁造成不同的内压力, 加速管转角处或管内壁凹坑位置的腐蚀进程。此外, 水温的高低也会影响氧扩散系数、水黏度及电导率等。水温提高, 氧扩散系数升高、水黏度降低, 氧容易到达金属表面发生去极化作用。水温提高, 水的电导率升高, 会加快腐蚀速率[12]。因此, 应将水流及水温控制在合理的范围内。

3) 烟气的排烟温度

排烟温度越低燃气锅炉的热效率越高, 但是当排烟温度低于烟气露点温度时, 管外壁形成冷凝水。烟气中又含有 SO_x 等遇水形成酸性物质(H_2SO_3 和 H_2SO_4)的气体。节能器外壁与酸性物质发生化学反应, 导致管外壁被腐蚀。因此, 烟气的排烟温度过低会加速节能器的腐蚀[13]。所以, 应将烟气的排烟温度控制在合理范围, 即在避免管外壁形成冷凝水的前提下, 尽量降低排烟温度, 提高锅炉的热效率。

4) 水温及水的 PH 值

水温会影响水中溶解氧的扩散系数、水黏度及电导率等。水温提高会提高氧扩散系数、降低水黏度, 加速氧与管内壁的相遇及电化学反应进程。同时水的电导率升高, 加快了腐蚀速率。有资料显示, 水温升高 10°C , 钢铁的腐蚀速率增加月 30% [12]。因此, 水温通过影响电化学反应进程及腐蚀速率, 而影响管内壁腐蚀, 故应将水温控制在合理的范围内。

此外, 水的 PH 值也会影响腐蚀情况。当 $\text{PH} < 4.5$ 时, PH 值越低, 腐蚀速率越高。这是因为发生了析氢反应, 铁表面的保护膜被溶解; 当 $4.5 < \text{PH} < 10$ 时, 钢表面形成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 保护膜, 腐蚀介质中的氧含量是影响腐蚀速率的关键, 氧含量越高, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 保护膜越容易与氧反应, 产生的腐蚀产物 Fe_2O_3 越多, 腐蚀速率越快; 当 $\text{PH} > 10$ 时, 腐蚀速度迅速降低; $\text{PH} \geq 12$, 腐蚀速率非常低[14], 所以, 应加强水质 PH 值的监控。

5. 锅炉节能器失效的防护措施

根据锅炉节能器的工作环境特点及其腐蚀失效的主要因素, 并结合文献点烟, 提出几点锅炉节能器失效的防护措施:

1) 控制水中溶解氧浓度

氧腐蚀是水管腐蚀失效的重要原因之一,应将水中的溶解氧控制在合理范围内,可降低给水中溶解氧进入锅炉节能器而引起的腐蚀。因此,应给锅炉安装除氧设备,通过化学除氧剂或电化学等方法除氧,且保证除氧设备正常运行[15]。

2) 制定合理的排烟温度范围

设置合理的排烟温度范围,防止管内温度太低形成冷凝水,冷凝水与烟气接触形成酸性物质腐蚀管壁,从而提高设备的耐腐蚀性能及服役寿命[3]。另外,还应兼顾锅炉的热效率。

3) 预处理烟气中遇水呈酸性的气体

为提高节能器的耐腐蚀性,可以考虑在节能器前添加气体处理装置,有效处理烟气中的含硫气体,防止其与冷凝水接触,形成硫酸,腐蚀管壁[16]。

4) 做好节能器外壁的防腐工作

做好节能器管外壁的涂层防腐,可有效避免节能器与空气,雨水,烟气等直接接触,可减少由此产生的腐蚀。同时,做好节能器内壁的涂层防腐,可有效降低内壁与水中溶解氧的接触,进而减少腐蚀现象的发生,还可以降低水流与管内壁之间的摩擦力,进而提高节能器的服役寿命。根据锅炉节能器服役环境特征,选取合理的涂层剂,阻隔钢管与腐蚀环境的接触,降低腐蚀速率,提高耐腐蚀性,延长使用寿命。

5) 定期维护

提高锅炉节能器安全监管能力。建立完善的安全管理专业队伍,对工作人员进行专业知识技能及防腐知识技能的培训,控制水温、水流平稳性及水流流速,且定期检查节能器的腐蚀情况且对其进行防腐处理,定期清理节能器肋片间的灰尘杂质及外壁结垢,始终保持节能器受热面处于清洁状态,将日常维护与日常防腐落到实处,加强日常管理,这样才能防患于未然,提高锅炉节能器的服役寿命。

6. 结论

燃气锅炉添加节能器装置,可有效提高锅炉的热效率及能源利用率。节能器出现失效行为会破坏其平稳性,甚至服役寿命。因此,掌握节能器的典型失效行为及机理,对于明确其失效的主要影响因素具有重要的参考价值,对于制定合理的防护措施以解决此问题具有重要的指导意义,对于最大限度的提高锅炉节能器的服役寿命具有重要意义。

基金项目

唐山市科技计划项目(20130209b)。

参考文献

- [1] 闵叶,孙培雷,项阳,等. 燃气锅炉直接接触式节能器性能测试系统的研制与试验分析[J]. 锅炉技术, 2012, 43(4): 16-20.
- [2] 刘宁. 浅谈集中供热热水锅炉节能器的优化设计[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2018(32): 164.
- [3] 王一闻. 二级节能器在工厂锅炉上的应用案例分析[J]. 上海节能, 2020(5): 458-461.
- [4] 巩国宏. 城市在用工业锅炉使用现状与节能分析[J]. 山西科技, 2020, 35(6): 127-129.
- [5] 张莹,余建飞,张明,等. 开式冷却水管腐蚀穿孔失效分析[J]. 工业水处理, 2013, 33(11): 92-94.
- [6] 田广,高占洋,宋玉柱. 某锅炉省煤器组腐蚀机理分析[J]. 锅炉制造, 2012, 11(6): 37-38.
- [7] 邱征宇,郑蕾,潘鸿,等. 蒸汽锅炉节能器管失效机理分析[J]. 化学工程与装备, 2017(4): 147-151.
- [8] 柯伟,杨武. 腐蚀科学技术的应用和失效案例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 152.

-
- [9] 白龙. 锅炉氧腐蚀过程及其控制措施[J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(5): 87-91.
- [10] 刘志坚. 燃气锅炉节能器异常结垢原因分析及预防措施[J]. 化工管理, 2020, (01): 118-119.
- [11] 杨卫国, 徐君铭. (溶)氧腐蚀——一种容易被忽视的腐蚀形式[J]. 广州化工, 2005, 33(4): 74-75.
- [12] 张春辉, 张芹芹, 张珍, 等. 一起节能器氧腐蚀原因分析及防腐措施[J]. 工业加热, 2020, 49(10): 40-42.
- [13] 王璐. 冷凝式节能器在燃气锅炉余热回收中的应用[J]. 中国设备工程, 2017(14): 202-203.
- [14] 李学林, 陈霞, 冯彦香, 等. 燃气锅炉节能器管子穿孔原因分析[J]. 工业锅炉, 2020(2): 62-64.
- [15] 郑会海. 锅炉给水管失效原因分析及解决措施[J]. 大众化标准, 2020(17): 195-196.
- [16] 王稷超, 马超, 韩喆. 小型燃气锅炉烟气节能器防腐措施[J]. 化工管理, 2015(7): 155.