

氟塑料换热器在火电站中的应用实践

樊鹏¹, 李优¹, 谢杰²

(1. 北京新世翼节能环保科技股份有限公司, 北京 100176; 2. 南海长海发电有限公司, 广东 佛山 528212)

摘要:介绍了一种针对电厂烟囱冒白烟和石膏雨问题而设计的新型氟塑料零泄漏水媒式烟气再热(MGGH)系统,详述了氟塑料换热器特点、系统工艺组成、系统工作原理、系统设计参数及系统运行性能等几方面内容。通过对投运后氟塑料 MGGH 系统的换热效果、烟风系统运行阻力、低负荷工况辅助蒸汽耗量、系统漏风率等 4 方面进行性能测定和分析。结果表明,氟塑料 MGGH 系统运行状况良好,各项指标均达到或优于设计性能值,整个系统运行安全性和可靠性强,有效解决了烟囱冒白烟和石膏雨的问题。

关键词:氟塑料;换热器;火力发电;烟气再热

中图分类号:TM 621

文献标志码:B

文章编号:1674-1951(2017)12-0030-05

0 引言

伴随着全球工业化水平的提高和大量化石能源的消耗,人类的生存环境遭到了严重破坏,大气污染(雾霾天)、水污染等问题日渐突出。火力发电站作为国内发电系统的主要载体,为我国工业化进程做出了巨大贡献,但受限于燃煤尾气的处理技术,在排空的烟气中依然含有大量的硫化物、氮氧化物和水分等成分。随着火力发电站的长期运转,积累的有害排放物对大气环境造成的影响也逐渐显现出来,空气质量急转直下,雾霾天气与日俱增,人类生存与社会发展矛盾日益突出。

为了改善由工业发展而带来的环境问题,很多专家学者进行了大量的研究和实践。目前,火力发电行业主要研究及应用成果包括脱硫、脱硝、除尘、除石膏雨等技术,其中王爱军等人^[1]、杨奇文^[2]、马双忱^[3]通过对影响锅炉脱硫效率的因素进行分析研究,建立了脱硫效率预测模型,并提出了提高脱硫效率的相关措施。宋闯等人^[4]通过分析几种脱硝技术的工作原理及使用特点,为用户选择适合的脱硝技术提供了理论指导;高岩等人^[5]通过研究不同工况下一种蜂窝状选择性催化还原技术(SCR)催化剂的活性性能,确定了催化剂的活性变化规律,并提出了提高脱硝效率的措施。

赵海宝等人^[6]通过对低低温电除尘系统进行研究,明确了多种因素之间的相互影响关系。熊英莹等人^[7]通过实验测定和数值模拟方法研究了湿式相变冷凝除尘技术对不同粒径粉尘的脱除性能。吴炬等人^[8]结合实例对混合式烟气再热技术进行了经济

技术分析,明确了其相较于传统烟气换热器(GGH)的优点,为火电厂消除“石膏雨”提供了新的选择。孙志春^[9]从传统 GGH 堵塞机理出发,通过实验测定和数值模拟研究了除雾器的性能和鼓泡塔(JBR)的控制方式对 GGH 运行的影响,提出了一套解决 GGH 堵塞的技术方案。安康^[10]通过对 GGH 的结垢物成分进行分析,确定了影响 GGH 的结垢的主要因素,并提出了一系列预防和减缓 GGH 结垢的措施。通过这一系列烟气处理技术的应用,环境污染现象得到了一定程度的缓解。然而这并未从根本上解决环境污染的问题,环保技术自身存在的缺陷随着实践的深入逐渐突显,其中主要问题之一就是金属 GGH 装置的腐蚀、泄漏、堵塞等,已成为火电站技改的重要内容。

本文旨在通过引入一种新型柔性氟塑料管换热器来解决国内传统金属 GGH 装置所存在的运行问题。文章基于氟塑料换热器自身特性、工艺系统设计和运行参数分析等几个方面,阐明了氟塑料零泄漏水媒式烟气再热(MGGH)系统的工作原理及其运行性能,并通过本投运项目的长期无故障运行,说明氟塑料 MGGH 系统相较于其他 GGH 技术具有更好的安全性和可靠性,以为同类改造项目提供切实可行的技术支持和解决方案。

1 氟塑料换热器简介

氟塑料作为一种高分子材料,因其特殊的分子结构而具有特别的物化特性:强度高、稳定性强、高热阻、低摩擦系数和良好的表面不黏性。随着氟塑料产品加工工艺水平的提高,氟塑料被广泛应用于航天、化工、电子、医药和汽车等领域^[11]。

上世纪 80 年代,欧洲地区相关机构经过大量试

验研究,开发出新型氟塑料材质换热器,使得氟塑料产品的应用拓展到了工业换热器领域。在国内,鲍听等人^[12]对氟塑料换热器在燃煤电站中的应用进行了可行性研究;陈林等人^[13]明确了氟塑料换热器可以解决低温烟气余热的回收问题,并对 2 种不同形式氟塑料换热器的换热性能进行了对比分析。

氟塑料种类繁多,性能差异巨大。目前在氟塑料烟气换热器产品上应用较多的主要有 2 种氟塑料:可溶性聚四氟乙烯(PFA)和聚四氟乙烯(PTFE)。

与金属换热器相比,氟塑料换热器产品的技术特点如下所示。

(1)耐腐蚀:化学性能极稳定,抗蚀性能极好,能耐 H_2SO_4 、 HCl 、王水和一切有机溶剂,彻底解决了金属烟气换热器的低温腐蚀问题。

(2)耐高温:长期安全使用温度为 $200 \sim 260 \text{ }^\circ\text{C}$ 。装置在系统中可实现全工况无障碍投入和停运,不影响电厂安全生产。

(3)低阻力:具有极小的摩擦系数(0.04),拥有较低的水侧及气侧阻力。

(4)抗积灰:具有固体材料中最小的表面张力,而且黏附的任何物质非常容易清理,壁面清洁,传热系数稳定,长期运行不降低。

(5)抗结垢:氟塑料管壁表面光滑且有适度的挠性,使用时有振动现象,故不易结垢。

(6)高强度:挠性的氟塑料管能在流体的冲击和振动中安全工作,调质后的氟塑料管抗拉强度很大,能够抵抗强烈的摆动和振动。

(7)耐老化:极强的热稳定性,管材使用寿命大于 20 年。

(8)强传热性:氟塑料换热器采用的是小管径、薄壁管束(壁厚 $0.3 \sim 1.0 \text{ mm}$),由此克服了材料本身导热系数低的缺点,换热器整体换热性能良好。同等换热量的情况下,氟塑料管换热器的体积约是金属管换热器体积的 $1/4$ 。

2 氟塑料零泄漏水媒式烟气再热(MGGH)

系统介绍

2.1 氟塑料 MGGH 系统简述

氟塑料 MGGH 系统主要由氟塑料换热器本体、热媒循环水系统、辅助加热系统、补水稳压系统、取样加药系统、在线冲洗系统和排污系统等组成,常规氟塑料 MGGH 工艺系统如图 1 所示。

2.2 氟塑料 MGGH 系统工作原理

氟塑料 MGGH 系统的核心为 2 台氟塑料烟气换热器,分别为烟气冷却器和烟气再热器,烟气冷却

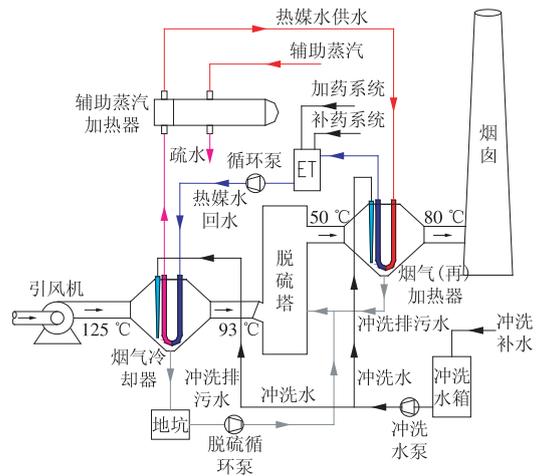


图 1 氟塑料 MGGH 工艺系统

器布置于烟气湿法脱硫装置(FGD)塔前,烟气再热器布置于 FGD 塔后,用管路系统将冷却器和再热器接通形成闭式回路,如图 1 所示,以除盐水为载热介质,在循环水泵的驱动作用下,低温除盐水首先在烟气冷却器内与高温烟气进行热交换,吸热升温后的除盐水进入烟气再热器与低温烟气完成热交换,除盐水放热降温后经循环水泵回到烟气冷却器开启下一个循环。塔前高温烟气经冷烟气冷却器降温后进入 FGD 塔内进入脱硫工序,塔后低温烟气经烟气再热器升温后由烟囱排放,升温后的烟气扩散能力增强,排放高度提升,从而达到消除火力发电厂常见的“冒白烟”和“石膏雨”的目的。

与此同时,氟塑料 MGGH 系统还配有若干辅助系统,其中热媒水循环系统采用循环水泵驱动,为载热介质提供循环动力。辅助加热系统在机组低负荷运行时,给烟气再热系统提供热源补充,由此保证排烟的温度。补水稳压系统一方面为氟塑料 MGGH 系统完成上水操作,另一方面在系统运行中维持水侧的运行压力,保障系统的安全运行。取样加药系统实时在线监测循环水的水质情况,当水质恶化时,通过加药装置向循环水中加药来保证循环水的水质。排污系统与取样加药系统配合工作,当循环水水质恶化时,可开启排污系统来改善其水质状况。在线冲洗系统采用高压在线水冲洗方式,定期对氟塑料换热管束进行冲洗,保证换热管束表面洁净度,从而提高氟塑料烟气换热器的运行效率。

2.3 氟塑料 MGGH 系统设计参数

本项目南海长海发电厂 1 台 670 t/h 煤粉锅炉烟风系统为改造对象,其原烟气处理系统流程为脱硝、静电除尘、石灰石-石膏湿法脱硫和湿电除尘,本 MGGH 系统在 FGD 前后水平烟道上各设置 1 台氟塑料烟气换热器,来实现电厂消除烟囱白烟和石膏雨的目标,设计参数见表 1~2。

表 1 烟气设计参数

项目名称	数值
环境大气压力/kPa	101
锅炉容量/(t·h ⁻¹)	670
烟气体积(标干态)/(m ³ ·h ⁻¹)	80 × 10 ⁴
FGD 入口烟温/℃	125
FGD 入口烟温要求/℃	>85
FGD 出口烟温/℃	50
排烟温度要求/℃	≥80

表 2 MGGH 系统设计参数

项目名称	烟气冷却器	烟气再热器
入口烟气温度/℃	125	50
出口烟气温度/℃	93	80
烟气侧阻力/Pa	<480	<400
漏风率/%	≤0.5	
循环热媒水流量/(t·h ⁻¹)	426	
入口热媒水温度/℃	75	98
出口热媒水温度/℃	99	76
热媒水侧阻力/MPa	<0.15	
换热管形式	U 型氟塑料软管	
消耗蒸汽量/(t·h ⁻¹)	<1	

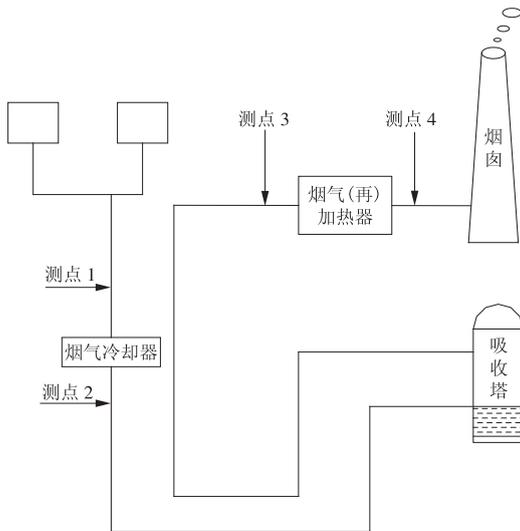


图 2 烟道测孔位置示意

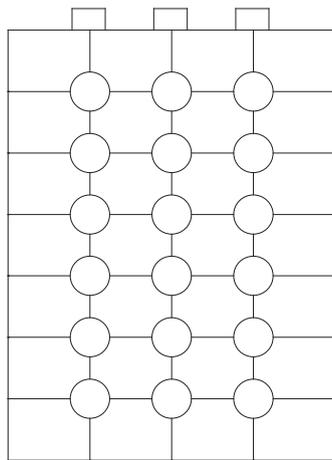


图 3 截面测点布置示意

3 氟塑料 MGGH 系统运行性能

3.1 性能测定方法

本项目氟塑料 MGGH 系统于 2016 年 2 月份正式投运,投运后一直保持无故障运行。为了掌握氟塑料 MGGH 系统的实际运行情况,电厂委托某权威机构对本系统进行了性能测试,测试内容主要围绕氟塑料 MGGH 系统烟气侧阻力、烟气换热器进出口烟温、低负荷辅助加热蒸汽耗量及换热器的漏风率等几个方面展开。

本次性能测试中,在烟气换热器进出口烟道各设 3 个测孔,每个测孔分别设置 6 个测点,烟道测孔位置及测点布置情况分别如图 2、3 所示。

本性能测试中,辅助加热蒸汽的耗量主要通过测量蒸汽母管的蒸汽流量来确定。

3.2 烟气温度

烟气温度采用 K 型热电偶进行测量,分别对每个测孔的 6 个测点依次测量,最后求各个测点温度的平均值作为该截面的目标温度。

3.2.1 75% ~ 100% 锅炉最大连续蒸发量 (BMCR) 工况

如图 4 ~ 7 所示,锅炉负荷为 527 t/h,未投辅助加热蒸汽,烟气冷却器进口烟温为 125.89 ℃,出口烟温为 88.56 ℃,大于 85.00 ℃;烟气再热器进口烟

温为 47.48 ℃,出口烟温为 81.26 ℃,大于 80.00 ℃。由此可知,氟塑料 MGGH 系统的运行参数达到了设计的烟温要求。

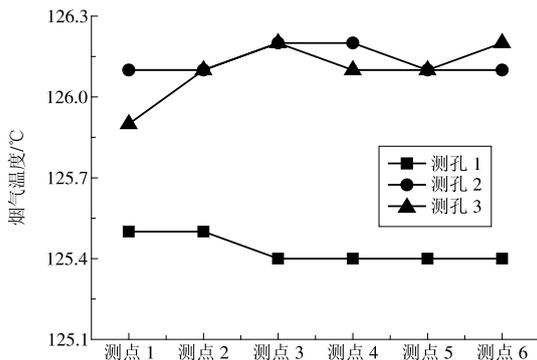


图 4 75% ~ 100% BMCR 工况下烟气冷却器进口烟温曲线

3.2.2 50% ~ 75% BMCR 工况

如图 8 ~ 11 所示,锅炉负荷为 442 t/h 时,烟气冷却器进口烟温为 123.59 ℃,出口烟温为 95.07 ℃,为了保证烟气再热器出口烟温达到 80.00 ℃ 以上,投入了一定量的辅助加热蒸汽,此时测得,烟气再热器进口烟温为 45.82 ℃,出口烟温为 82.93 ℃。

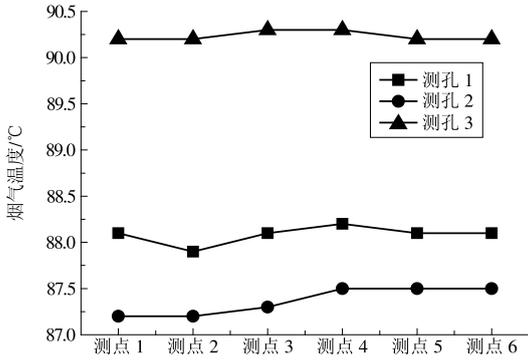


图 5 75% ~ 100% BMCR 工况下烟气冷却器出口烟温曲线

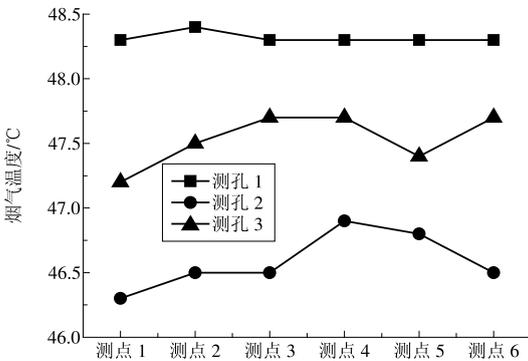


图 6 75% ~ 100% BMCR 工况下烟气再热器进口烟温曲线

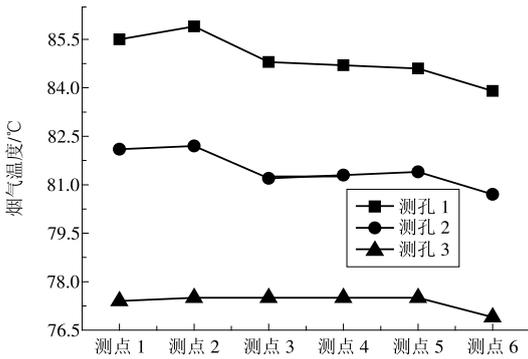


图 7 75% ~ 100% BMCR 工况下烟气再热器出口烟温曲线

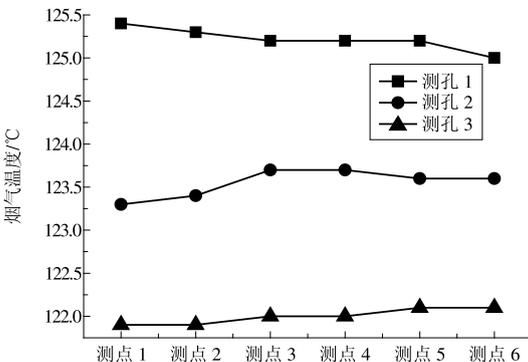


图 8 50% ~ 75% BMCR 工况下烟气冷却器进口温度曲线

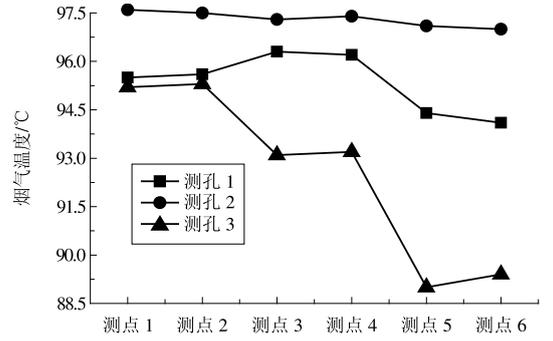


图 9 50% ~ 75% BMCR 工况下烟气冷却器出口烟温曲线

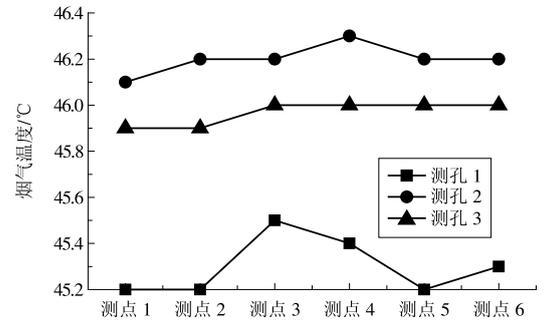


图 10 50% ~ 75% BMCR 工况下烟气再热器进口烟温曲线

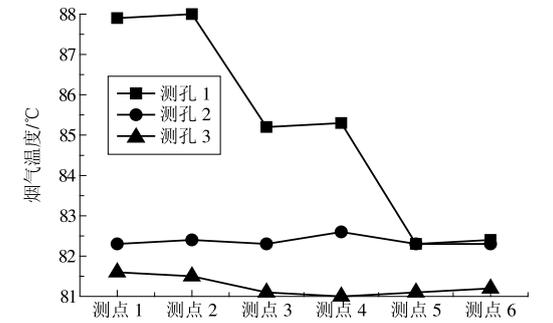


图 11 50% ~ 75% BMCR 工况下烟气再热器出口烟温曲线

系统投入运行,每隔 5 min,读取并记录分布式控制系统(DCS)画面蒸汽流量读数,依次得到 13 个蒸汽耗量数据,绘制蒸汽耗量曲线如图 12 所示,本项工作与 3.2 中烟温测试工作同步开展。

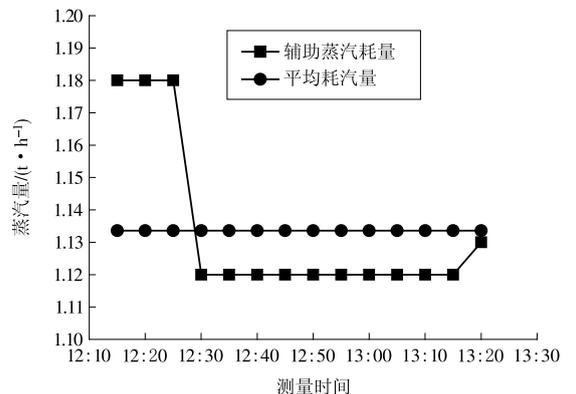


图 12 辅助蒸汽耗量曲线

3.3 辅助蒸汽耗量

在机组 50% ~ 75% 负荷工况下,辅助蒸汽加热

这里取 13 个蒸汽耗量数据的平均值为辅助蒸汽的目标耗量,为 1.13 t/h。

为了对标设计工况下的蒸汽耗量值,须对上述测得的目标蒸汽耗量进行修正,根据氟塑料烟气换热器的换热特性,绘制烟气再热器的烟温修正曲线如图 13 所示。

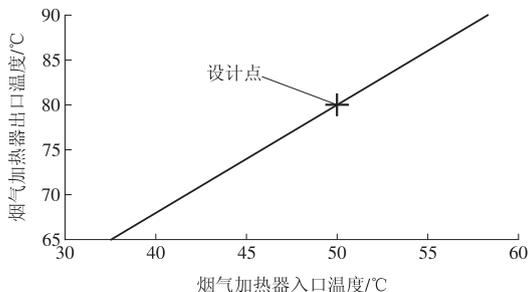


图 13 烟温修正曲线

根据上述烟温修正曲线及实测烟温数据,折合到设计工况下,计算得到低负荷运行时 MGGH 系统达到设计要求的烟温指标所消耗的蒸汽量为 0.11 t/h,小于设计蒸汽耗量值 1.00 t/h。

3.4 烟气阻力

如图 14 所示,当锅炉负荷为 442 t/h 时,烟气冷却器和烟气再热器气侧阻力之和为 612 Pa。当锅炉负荷为 527 t/h 时,烟气冷却器和烟气再热器气侧阻力之和为 669 Pa。锅炉满负荷时,烟气冷却器和烟气再热器气侧阻力之和约为 765,均低于对应工况下烟气阻力设计值。

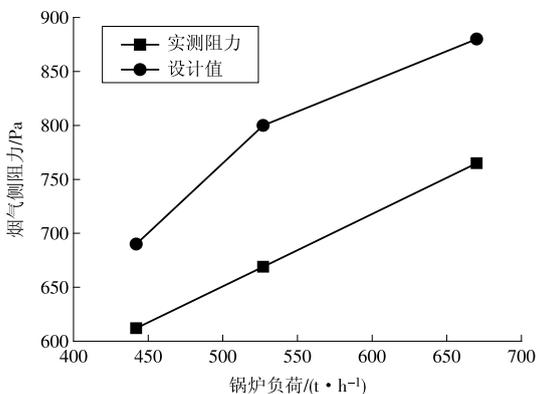


图 14 烟气侧阻力曲线

3.5 漏风率

本项目中烟气量采用自动烟尘测试仪进行测定,分别对氟塑料烟气冷却器和再热器进出口的 6 个测孔 36 个测点进行测量,由此得到换热器的进口烟气量和出口烟气量,最终计算得到烟气冷却器和烟气再热器的漏风率曲线如图 15 所示。

由图 15 可以看出,当锅炉负荷为 442 t/h 时,测得烟气冷却器的漏风率为 0.48%,再热器的漏风率为 0.39%;当锅炉负荷为 527 t/h 时,测得烟气冷却

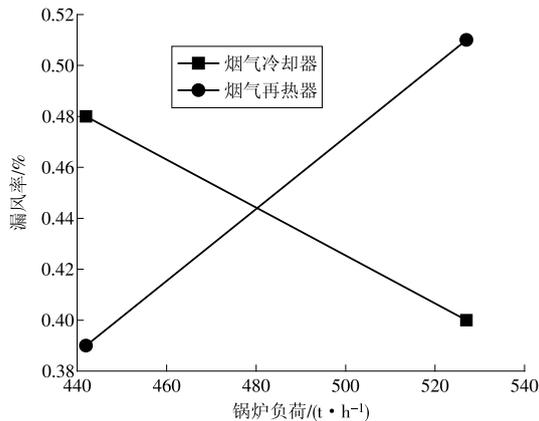


图 15 漏风率曲线

器的漏风率为 0.40%,再热器的漏风率为 0.51%。取 2 个工况下的漏风率平均值为目标漏风率,计算得到烟气冷却器的漏风率为 0.44%,烟气再热器的漏风率为 0.45%,均小于系统设计漏风率 0.50%,达到设计要求。

4 结束语

由第 3 部分氟塑料 MGGH 系统的性能测定数据可知,氟塑料 MGGH 系统的运行性能达到了设计的要求如下。

(1) 机组高负荷运行时,未投辅助蒸汽加热器,烟气再热器出口烟温为 81.26℃,大于烟温设计值 80℃。

(2) 机组满负荷工况下,烟气冷却器和烟气再热器气侧阻力之和为 765 Pa,小于烟气阻力设计值 880 Pa。

(3) 机组低负荷运行时,投入辅助蒸汽加热器,使得烟气再热器出口烟温 > 80℃,系统消耗辅助蒸汽量为 0.11 t/h,小于蒸汽耗量设计值 1 t/h。

(4) 烟气冷却器的漏风率为 0.44%,烟气再热器的漏风率为 0.45%,均小于系统漏风率设计值 0.5%。

本项目运行以来,氟塑料 MGGH 系统未出现换热管的泄漏、腐蚀和磨损等问题,整体运行状况良好,烟囱冒白烟的现象消失,石膏雨问题也得到彻底解决,为企业的节能环保事业做出了重要贡献,给企业和社会带来了显著的环境效益。

本氟塑料 MGGH 项目的成功投运实践,不仅从技术、设备、工艺等方面证明了氟塑料换热器产品在锅炉尾气处理方面的可行性和安全性,而且从运行效果方面体现了氟塑料换热器产品良好的运行性能,给工业企业的节能改造和环保升级提供了一项新的选择,为企业排放指标达到环保要求注入了新的动力。
(下转第 52 页)

表 4 燃煤烟气体积热值比估算法计算结果

项目	单位	数值
总烟气量	m ³ /h	1 992 750
与理论计算的误差	%	3.61
SO ₂ 质量浓度	mg/m ³	3 280.49
与理论计算的误差	%	3.75
烟尘质量浓度	g/m ³	49.21
与理论计算的误差	%	0.72

排放标准限值分别为 35, 50, 5 mg/m³。本文选用标准煤收到基低位发热量 29 270 kJ/kg, 计算节标准煤量情况下污染物 SO₂ 的减排量, 通过两种计算方法进行对比。

(1) 采用常规烟气量估算公式计算^[3]。

$$V_0 = 0.249 \frac{Q_{\text{net,ar}}}{1000} + 0.77 + (\alpha - 1) V_a = 11.096 \text{ (m}^3/\text{kg)}。$$

可减少 SO₂ 的排放量 = 11.096 × 200 470.75 × 1 000 × 35 × 10⁻⁹ = 77.855 (t/a)。

(2) 采用燃煤烟气体积热值比计算。

$$V_0 = 36.6 \times 10^{-5} \times Q_{\text{net,ar}} = 10.713 \text{ (m}^3/\text{kg)}。$$

可减少 SO₂ 的排放量 = 10.713 × 200 470.75 × 1 000 × 35 × 10⁻⁹ = 75.168 (t/a)。

(上接第 34 页)

参考文献:

[1] 王爱军, 祁海鹰, 由长福, 等. 循环流化床烟气脱硫技术实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2000, 6(4): 351 - 355.

[2] 杨奇文. 内循环流化床烟气脱硫技术研究[D]. 湖南: 湘潭大学, 2003.

[3] 马双忱. 烟气循环流化床脱硫技术实验研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2002.

[4] 宋闯, 王刚, 李涛, 等. 燃煤烟气脱硝技术研究进展[J]. 环境保护与循环经济, 2010, (1): 63 - 65.

[5] 高岩, 栾涛, 彭吉伟, 等. 燃煤电厂真实烟气条件下 SCR 催化剂脱硝性能[J]. 化工学报, 2013, 64(7): 2611 - 2688.

[6] 赵海宝, 郇建国, 何毓忠, 等. 低低温电除尘关键技术研究与应用[J]. 中国电力, 2014, 47(10): 117 - 121, 147.

[7] 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.

[8] 吴炬, 邹天舒, 冷杰, 等. 采用混合式烟气再热技术治理火电厂“石膏雨”[J]. 中国电力, 2012, 45(12): 26 - 30, 41.

[9] 孙志春. 火力发电机组脱硫系统 GGH 堵塞机理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.

计算误差为 3.5%, 由此可见, 可以满足污染物减排量估算精度要求。

5 结论

本文提出的燃煤烟气体积热值比的计算公式合理, 用来估算煤质的污染物排放量误差较小, 在工程项目缺少准确可靠燃煤资料的情况下, 可以用来估算燃煤产生的污染物质量浓度及污染物减排量。

参考文献:

[1] 丁立新. 电厂锅炉原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 33 - 40.

[2] 火力发电厂燃烧系统设计计算技术规程: DL/T 5240—2010 [S].

[3] 全国勘察设计注册工程师公用设备专业管理委员会秘书处. 注册公用设备工程师动力专业职业资格资格考试教材 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2013.

(本文责编: 刘芳)

作者简介:

张金柱 (1981—), 男, 宁夏中卫人, 高级工程师, 从事火力发电厂锅炉专业设计研究 (E-mail: 6726386@qq.com)。

[10] 安康. 电站湿法脱硫系统 GGH 结垢问题的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2010.

[11] 陈生, 李明武, 王燕冬. 国内外氟塑料制品的发展与应用 [J]. 化工新型材料, 2004, 32(5): 1 - 5.

[12] 鲍听, 李复明, 李文华, 等. 氟塑料换热器应用于超低排放燃煤机组的可行性研究 [J]. 浙江电力, 2015, (11): 74 - 78.

[13] 陈林, 孙颖颖, 杜小泽, 等. 回收烟气余热的特种耐腐蚀塑料换热器的性能分析 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(17): 2778 - 2783.

(本文责编: 齐琳)

作者简介:

樊鹏 (1985—), 男, 河北石家庄人, 工程师, 工学硕士, 从事工业企业节能环保技术、设备的研发及相应工艺系统设计方面的工作 (E-mail: beyondfanpeng@163.com)。

李优 (1987—), 男, 河北石家庄人, 工程师, 工学学士, 从事工业企业节能环保设备的结构及系统设计方面的工作 (E-mail: liyou@bjxsy.cn)。

谢杰 (1987—), 男, 广东湛江人, 助理工程师, 工学学士, 从事电厂工程改造及检修管理方面的工作 (E-mail: 510773864@qq.com)。