

燃煤电厂掺烧生活污水泥燃烧及环保特性 现场试验研究

李德波¹, 阙正斌², 苗建杰³, 冯永新¹

(1. 南方电网电力科技股份有限公司, 广东 广州 510080;

2. 华北电力大学 生物质发电成套设备国家工程实验室, 北京 102206;

3. 华北电力大学 能源与动力机械工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 为了得到燃煤电厂掺烧生活污水泥燃烧及环保特性规律, 基于国内某电厂的330 MW 亚临界四角切圆燃煤锅炉, 针对6个工况开展现场试验研究。结果表明: 燃煤、污泥与混合后的燃料在成分含量上区别较大; 掺烧污泥会导致锅炉燃烧温度与热效率降低, 最大的降幅分别为28℃和0.19%, 总体降幅较小; 掺烧污泥后, 飞灰与炉渣中重金属含量及氯含量稍微上升, 不会明显提高结渣风险; 掺烧污泥后, 现有的净化工艺仍能确保常规烟气污染物的排放浓度能满足燃煤烟气超低排放要求; 随着掺烧比例的提高, NO_x的排放量呈现先增加后降低的趋势, SO₂的排放量逐渐降低, 粉尘颗粒的排放量稍微提高; 掺烧污泥不会对二噁英类和重金属及其化合物等非常规烟气污染物造成明显影响, 排放情况能够满足燃煤电厂限制要求; 风烟系统各级风机用电量普遍随着掺烧污泥量增加而提升, 最大的提升幅度为5.4A, 适当调整后均能够正常运行。

关键词: 燃煤电厂; 掺烧污泥; 运行负荷; 掺烧比例; 现场试验

中图分类号: TK221

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.08.014

[引用本文格式] 李德波, 阙正斌, 苗建杰, 等. 燃煤电厂掺烧生活污水泥燃烧及环保特性现场试验研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(8): 110-117. LI De-bo, QUE Zheng-bin, MIAO Jian-jie, et al. Field experimental research on characteristics of mixed domestic sludge combustion and environmental protection in coal-fired power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(8): 110-117.

Field Experimental Research on Characteristics of Mixed Domestic Sludge Combustion and Environmental Protection in Coal-fired Power Plant

LI De-bo¹, QUE Zheng-bin², MIAO Jian-jie³, FENG Yong-xin¹

(1. China Southern Grid Power Technology Co., Ltd., Guangzhou, China, Post Code: 510080;

2. National Engineering Laboratory of Biomass Power Generation Equipment, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206; 3. College of Energy and Power Machinery Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003)

Abstract: In order to obtain the characteristics of domestic sludge combustion and environmental protection in coal-fired power plants, field tests were carried out under six working conditions based on the 330 MW subcritical tangentially coal-fired boiler of a power plant in China. The results show that there is a great difference in the composition content between coal burning, sludge and mixed fuel; and the mixed burning of sludge will lead to the decrease of boiler combustion temperature and thermal efficiency, with the maximum decrease of 28 °C and 0.19% respectively, and the overall decrease is relatively small; after mixed with sludge, the contents of heavy metals and chlorine in fly ash and slag increase slightly,

收稿日期: 2022-25-28; 修订日期: 2022-07-01

基金项目: 中国南方电网公司重点项目资助(NYJS2020KJ005)

Fund-supported Project: Key Project funded by China Southern Power Grid Co., Ltd. (NYJS2020KJ005)

作者简介: 李德波(1983-), 男, 南方电网电力科技股份有限公司教授级高级工程师。

which can not significantly increase the risk of slagging; after mixed with sludge, the existing purification process can still ensure that the emission concentration of conventional flue gas pollutants can meet the requirements of ultra-low emission of coal-fired flue gas; with the increase of the proportion of mixed combustion, the emission of NO_x increases at first and then decreases, the emission of SO_2 decreases gradually, and the emission of dust particles increases slightly; the mixed burning of sludge will not have a significant impact on unconventional flue gas pollutants such as dioxins, heavy metals and their compounds, and the discharge can meet the restrictions of coal-fired power plants; the electricity consumption of fans at all levels of the wind and smoke system generally increases with the increase of the amount of mixed burning sludge, and the maximum range of increase is 5.4 A, which can operate normally after proper adjustment.

Key words: coal-fired power plant, blending sludge, operating load, blending ratio, field test

引 言

随着我国生活污水产量大幅增加,污泥的无害化处置和资源化利用已成为环境领域亟待解决的问题之一^[1]。而在燃煤电厂中掺烧生活污水能够实现无害化处置,同时回收污泥中的能源,推动煤电低碳转型,是目前较为成熟的污泥处置技术之一。

国内外部分学者已针对燃煤电厂掺烧生活污水的燃烧过程开展了相关的研究工作^[2]。Park 等人^[3]基于傅里叶红外光谱分析与热重分析技术,对不同温度下碳化污泥开展研究发现,随着碳化温度的升高,燃料可燃成分比例增大,挥发物含量降低,更适合与煤进行掺烧。孟涛等人^[4]对燃煤与 3 种污泥分别以不同比例掺混后所得混合燃料开展热重分析研究,得到了混合燃料的燃烧特性与动力学反应规律。王一坤等人^[5-7]以能量守恒定律为基础,通过热平衡与热力校核计算,研究了某 300 MW 燃煤机组采用多种污泥干化处理方式对发电机组的影响规律。钱柯贞等人^[8]与陈志董等人^[9]分别采用数值模拟研究的方法,对污泥干化过程进行了相关的研究。实验与数值模拟等研究手段均存在一定的局限性,相比之下现场试验能为实际运行过程提供更有价值的参考数据。张宗振等人^[10]针对某电厂 1 000 MW 机组 1 号锅炉,开展掺烧生活污水的现场试验研究,得到了较准确且全面的数据。

目前,针对燃煤电厂掺烧污泥的研究工作仍以实验、模拟计算等方式为主,而较少有与现场试验相

关的内容。本文在文献[10]研究的基础上,基于国内某燃煤电厂的 5 号锅炉开展污泥掺烧现场试验。在 60% 和 100% 运行负荷下分别选取两种不同掺烧比例以及未掺烧的运行工况作为研究对象,通过对比燃料特性(燃煤、两种生活污水、燃煤与污泥组成的混合燃料等)、燃烧相关参数(燃烧温度和锅炉热效率)、主要固态产物(飞灰与炉渣)的成分、气态产物中多种污染物(NO_x 、 SO_2 、颗粒物、二噁英类、重金属及其化合物)等方面,整理并总结掺烧污泥对燃煤锅炉的影响规律,为进一步研究与应用提供了参考。

1 现场试验

1.1 锅炉概况

基于国内某电厂 5 号机组锅炉(330 MW)开展污泥掺烧试验,该锅炉为亚临界压力一次中间再热控制循环汽包炉,燃烧器为四角切圆布置,尾部布置有能满足超低排放要求的烟气净化系统。该电厂选用的超低排放改造技术路线为:SCR 脱硝 + 低低温电除尘器 + 海水深度脱硫。

试验锅炉的设计煤种为神府东胜烟煤,2020 年根据政府等有关方面的要求,对机组进行改造,开始掺烧当地的生活污泥。改造方案目前主要针对生活污水的进料系统,其具体工作过程为:污泥由汽车运进电厂,首先存放在一个储存区域,在开展掺烧试验时用抓斗将污泥定量送至输煤皮带上,与燃煤一起被送入指定煤仓,两者均匀混合再经过现有中速磨煤机磨碎后入炉燃烧。目前改造尚未涉及燃煤锅炉

以及后续的烟气净化系统。

1.2 试验方法

为了能够较全面地了解掺烧污泥对锅炉燃烧的影响规律,本文设计并在现场调试了6个锅炉工况,具体内容如表1所示。

参考国家标准《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223-2011)等相关规定,在不同运行工况下开展数据测量、样品取样与化验等工作,并将所得数据与检测结果进一步分析研究。采用的研究方法如表2所示。

表1 污泥掺烧试验工况

Tab.1 Sludge blending test conditions

工况	运行负荷/%	污泥掺烧质量比/%
1	100	0
2	100	8
3	100	10
4	60	0
5	60	10
6	60	12

表2 现场试验主要使用的方法

Tab.2 The main methods used in field test

项目	取 样	研究/分析方法
原煤	给煤机处人工取样	实验室分析或直接采用煤检数据、日常分析数据;
污泥	污泥储场人工取样	实验室分析
风温	测量空气预热器进口温度	结合 DCS 数据计算
烟气温度	布置仪器定点测温	使用 T 型热电偶与 FLUKE 智能测温仪
炉渣	在冷渣器出口处取样	开展 pH 值、重金属成分、Cl 含量等测量分析
飞灰	在空气预热器出口选点取样	开展 pH 值、重金属成分、Cl 含量等测量分析
NO _x	烟囱入口取样	采用烟气分析仪测量浓度
SO ₂	烟囱入口取样	采用烟气分析仪测量浓度
颗粒物	烟囱入口取样	以重量法计算颗粒物质量
二噁英类	在烟囱入口使用专门的取样器取样	使用高分辨磁质谱气质联用仪测量
汞	以 EPA Method 30B 标准方法在烟囱入口取样	以汞测量仪器测量
其它重金属	在烟囱入口以过滤和分段吸收的方式取样	使用 X 荧光光谱仪等测量

2 结果分析与讨论

2.1 燃料组成

燃煤与污泥、来源不同的污泥以及处理方式不同的污泥均在成分含量上存在较大的区别,因此燃煤与污泥混合后的燃料特性受到多方面的影响^[11-12],在开展现场试验之前需要先明确燃料的组成。选取5号锅炉机组目前主要掺烧的两种污泥(以1号和2号污泥区分),按照63:37的比例混合,作为现场试验所需掺烧的污泥。以设计煤种神府东胜烟煤为现场试验掺烧的燃煤,分别对1号污泥、2号污泥和燃煤进行工业分析与元素分析,并计算出不同掺烧比例的混合燃料组成情况,结果如表3所示。

分析表3的数据,可以得到以下结论:

(1) 对比燃煤与两种污泥的数据可知,两者在组成成分、热值、样品真密度等方面并不一致,导致掺烧后混合燃料与原本的燃煤区别较大;

(2) 对比两种污泥的数据可知,两者的各项参数基本一致,但在水分与热值等方面区别较大,这两项参数的不同对燃烧过程影响较大;

(3) 对比燃煤与混合燃料的数据可知,随着掺烧比例的提升,水分、灰分、挥发分的含量逐渐增加,可以推断固定碳的含量在逐渐降低,导致热值在逐渐降低;掺烧比例较低时,两者的元素分析数据较为接近,但N元素相差较大,可以推断掺烧污泥会导致NO_x的生成量增加;混合燃料与燃煤的真密度与有机组分含量基本一致,因此同等负荷下需要输送的燃料体积相似。

表3 入炉燃料的组成情况

Tab.3 Composition of fuel entering boilers

种类	$M_{ar}/\%$	工业分析/%			元素分析/%					$Q_{net,ar}/$ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	样品真密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
		M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}	N_{ad}	S_{ad}		
燃煤	15.30	11.51	6.25	29.10	64.02	3.79	13.32	0.76	0.35	23 627	1.32
1号污泥	58.70	4.51	43.95	45.47	24.42	3.82	17.76	4.33	1.21	2 799	1.74
2号污泥	43.50	3.74	40.24	48.70	26.81	4.34	19.36	4.82	0.66	5 230	1.62
掺烧8%污泥	18.16	10.92	9.12	30.54	60.95	3.81	13.74	1.07	0.40	22 058	1.35
掺烧10%污泥	18.88	10.77	9.83	30.90	60.18	3.82	13.85	1.14	0.41	21 666	1.36
掺烧12%污泥	19.60	10.62	10.55	31.26	59.41	3.82	13.95	1.22	0.42	21 273	1.36

为了研究掺烧污泥对锅炉积灰结渣的影响,进一步对燃料进行灰熔融特性分析,结果如表4所示。分析可知,由于两种污泥的灰熔点都高于测试的燃煤,掺烧污泥不会增加锅炉结渣的风险。

表4 入炉燃料的灰熔融特性结果(°C)

Tab.4 Results of ash melting characteristics of furnace fuel (°C)

种类	变形温度	软化温度	半球温度	流动温度
燃煤	1 165	1 170	1 180	1 190
1号污泥	1 124	1 212	1 255	1 287
2号污泥	1 258	1 324	1 366	1 422
掺烧10%的1号污泥	1 200	1 220	1 230	1 260
掺烧10%的2号污泥	1 180	1 190	1 200	1 220

2.2 燃烧参数

2.2.1 燃烧温度

污泥存在水分含量较高、热值较低等特点,因此掺烧后势必会影响燃烧过程,特别是炉膛内的燃烧温度。以往的研究指出,污泥掺烧比例越高,炉膛内的温度越低^[13]。分别针对60%和100%负荷运行工况下的燃煤锅炉,测量掺烧不同比例污泥时炉膛内的温度情况,按照高度取测量点温度的平均值,结果如图1所示。由图1可知,不同负荷工况下,炉膛内20.1 m高度处的温度变化规律不一致,因为该区域处于炉膛下部燃烧器区域附近,发生的反应较复杂,导致温度波动较大,没有明显的变化规律。重点分析炉膛内高37.7和46.5 m处的温度变化情况,与未掺烧污泥工况相比,掺烧污泥后炉膛内温度会降低,与其他学者的研究结果一致。然而,在锅炉运行负荷为100%时,未掺烧工况与掺烧12%污泥的工况对比,炉膛46.5 m处温度仅相差2°C。总而言

之,掺烧污泥会降低炉膛温度,但掺烧比例较低时产生影响较小。

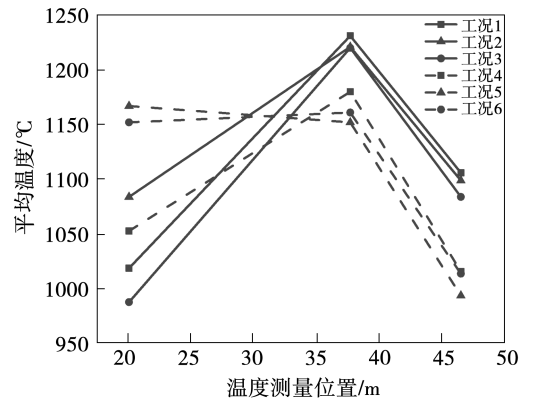


图1 不同掺烧污泥工况的炉膛温度情况

Fig.1 Furnace temperatures under different blending sludge conditions

而随着掺烧比例的提高,60%与100%运行负荷工况下得到的温度变化规律相反,表明低负荷燃烧运行调整对炉内温度影响较大,后续还需深入研究确定。一般情况下,炉内温度的变化规律应与100%运行负荷工况一致,即温度随着污泥掺烧比例的提高而降低。

2.2.2 锅炉热效率

锅炉热效率是衡量燃煤锅炉运行的重要指标之一,能通过直接的对比说明掺烧污泥的节能情况。采用反平衡法针对每个试验工况的实际情况,综合考虑机械不完全燃烧热损失、排烟热损失、灰渣热损失等损耗,并代入当地实际大气温度数据进行计算,不同工况下锅炉热效率如表5所示。由表5可知,锅炉热效率的变化不大,掺烧污泥后热效率会稍微低于未掺烧的工况。与未掺烧工况相比,降幅最大

的是 100% 运行负荷下掺烧 8% 污泥的工况,热效率降低 0.19%。

表 5 不同工况下的锅炉热效率

Tab.5 Boiler thermal efficiencies under different working conditions

工况	锅炉热效率/%
1	94.98
2	94.79
3	94.84
4	95.19
5	95.05
6	95.11

2.3 飞灰与炉渣

考虑到污泥中灰分含量较高,其中含有较多的重金属等有害物质,燃烧后大部分存在于飞灰与炉渣中^[14],因此在试验过程中对飞灰和炉渣进行了取样分析,研究了掺烧污泥对重金属迁移过程的影响。通过分析飞灰和炉渣样品中的重金属含量发现,掺烧后大部分重金属含量均会提高,但相比于总量而言变化很小,影响不大。而进一步去分析样品的浸出液发现,两者都不属于危险固体废物。综合而言,不同掺烧工况下,飞灰和炉渣都可以按照一般燃煤电厂的方式进行处理,不会导致严重的危害。

本文还考察了飞灰与炉渣中 Cl 元素含量,整理后如表 6 所示。

表 6 飞灰与炉渣中的 Cl 元素含量

Tab.6 Cl⁻ content in fly ash and slag

工况	样品	Cl 元素含量/mg·kg ⁻¹
1	飞灰	29.24
2	飞灰	28.36
3	飞灰	72.81
4	飞灰	29.25
5	飞灰	48.74
6	飞灰	12.40
1	炉渣	35.45
2	炉渣	0
3	炉渣	8.86
4	炉渣	0
5	炉渣	28.24
6	炉渣	27.47

由表 6 可知,不同掺烧污泥工况下飞灰与炉渣中 Cl 元素含量的变化规律复杂,整体呈现增加的趋势,但也存在下降的情况。这一情况与取样测量方法、燃烧过程等因素有关。

2.4 烟气污染物

燃煤掺烧污泥的过程中,污泥的水分、热值、化学组成等均会对烟气污染物的生成和排放造成影响^[2,12,14-18]。基于现场试验研究,考虑现有烟气净化系统的影响与作用,对烟气中 NO_x、SO₂、颗粒物、二噁英和重金属及其化合物等污染物进行取样检测,研究其变化规律。

2.4.1 NO_x

根据表 3 的元素分析结果可知,1 号和 2 号污泥中的 N 元素含量较高,掺烧后会增加燃料型 NO_x 的生成量。而由图 1 可知,掺烧污泥后炉膛整体温度水平会稍微降低,会减少热力型 NO_x 的生成量。理论研究中一般认为,前者的影响大于后者,最终 NO_x 的生成量将增加^[19-20]。基于现场的试验研究,采用了网格法,对表盘测点进行标定后,测量烟气中 NO_x 的排放浓度。

为了考察现有的 SCR 脱硝系统能否正常运行及其对掺烧污泥烟气的脱硝效果,本文将测量点布置在烟囱入口烟道,多点取样测量后将实测数据折算并取平均值。整理 NO_x 折算浓度平均值如图 2 所示。

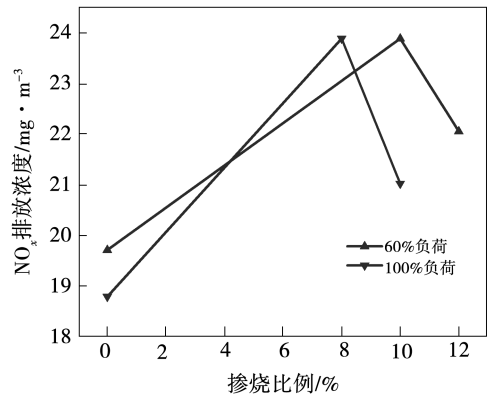


图 2 不同工况下锅炉 NO_x 排放情况

Fig.2 NO_x emission in boiler under different working conditions

由图 2 可知,掺烧污泥产生的烟气经过 SCR 脱硝系统后,NO_x的排放浓度相对未掺烧污泥燃料的工况有所提高,但仍能满足燃煤电厂的超低排放要求,不需要再针对脱硝系统进行超低排放改造。而且随着掺烧比例的进一步提高,NO_x的排放浓度呈现下降的趋势,表明掺烧比例还可继续提高,有利于减少 NO_x的排放。

2.4.2 SO₂

针对 SO₂的取样分析与数据处理过程与 NO_x类似,通过分析最终得到的 SO₂排放情况如图 3 所示。由图 3 可知,随着污泥掺烧比例的提高,烟囱出口排放烟气中 SO₂排放浓度降低,与其他学者的结论一致^[21]。分析认为,由于污泥中含水量较高,燃烧过程中污泥的水分大部分都会吸收热量成为蒸汽存在于烟气中,因此污泥掺烧比例越高,烟气中的水分含量越高,有利于海水脱硫过程。因此,掺烧污泥基本不影响 SO₂的生成过程,反而会由于含水量较高促进后续的脱酸过程,进而降低 SO₂的排放浓度。

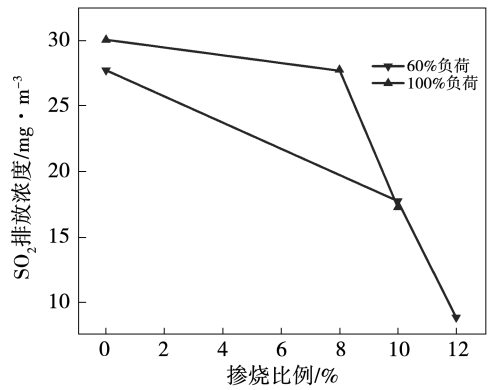


图 3 不同工况下锅炉 SO₂排放情况

Fig. 3 SO₂ emission in boiler under different working conditions

2.4.3 颗粒物

针对不同锅炉工况开展试验,最终所得的烟气中颗粒物的排放情况如表 7 所示。

由低低温电除尘器进口烟气的颗粒物浓度分析可知,掺烧污泥会导致颗粒物的产生量增加,在其它条件不变时除尘效率基本不变,因此相应的出口烟气中颗粒物浓度同样增加。然而,由于除尘效率较高导致出口烟气中颗粒物浓度的实际变化量较小。

表 7 不同工况下的颗粒物排放情况

Tab. 7 Particulates emission under different working conditions

工况	进口颗粒物浓度/g·cm ⁻³	初重/g	终重/g	尘量/g	干烟气量/Nm ³	出口颗粒物浓度/g·cm ⁻³	除尘效率/%
1	6 160.5	11.51	18.39	0.014	1 165	12.446	99.798
2	6 477.1	4.51	18.69	0.014	1 058	12.854	99.801
3	7 045.5	3.74	18.77	0.016	1 125	13.956	99.802
4	5 497.7	18.89	18.90	0.011	1 078	9.833	99.821
5	5 824.6	18.14	18.15	0.012	1 079	10.121	99.802
6	5 798.3	18.45	18.46	0.012	1 235	11.492	99.826

2.4.4 二噁英

气相中生成二噁英的适宜温度在 800 ℃ 以下,过高的温度会使二噁英分解。根据图 1 的数据与结论可知,各掺烧工况测得的最低炉膛温度均大于 900 ℃,平均炉膛温度均接近或高于 1 100 ℃,超过适宜二噁英生成的温度条件,因此温度不是影响二噁英排放量的主要因素。由于二噁英的生成与污泥处理量和进入炉内的氯元素总量密切相关^[2],Cl 元素含量有可能会影响二噁英的排放,选择污泥处理

量最大,Cl 元素总量最多的工况 3 进行二噁英排放测试,并与不掺烧污泥的试验工况相比较,以评估掺烧污泥对二噁英生成量的影响。

测量的数据经过折算与取平均值后,得到工况 1 和 3 的二噁英平均排放量分别为 0.002 9 和 0.002 0 mg/m³,可见不掺烧污泥工况下二噁英排放量反而更高。结合实际二噁英排放量数据分析认为,这一情况与 Cl 元素含量等影响因素关系不大。可能是工况 3 的过量空气系数高,对燃烧过程造成

影响,间接地影响了二噁英的生成过程。

综上所述,掺烧污泥前后二噁英的排放浓度一般能够满足燃煤电厂的排放标准。然而考虑到掺烧污泥会对燃烧过程造成影响,有必要进一步深入研究,制定合理的排放标准。

2.4.5 重金属及其化合物

工业实践表明,锅炉烟气中的重金属及其化合物主要吸附在颗粒物上,因此在经过除尘工艺后大部分随颗粒物脱除^[22-23]。然而,经过除尘器后的烟气仍会有少部分细小的粉尘存在,其中含有一定量的重金属及其化合物,因此需要检测以避免排放烟气的重金属含量超标。在烟囱入口取样分析发现,掺烧污泥后各种重金属的排放浓度均能满足排放标准。

另外,除了粉尘中固态的重金属污染物外,还有部分重金属是以气态存在于烟气中,基本不会被低温电除尘器脱除,比如汞(Hg)金属^[24-25],需要被单独检测。在60%与100%运行负荷工况下,检测到Hg的排放浓度分别为1.19和1.25 μg/m³,能够满足相关的排放标准,不需要增设脱除Hg等重金属的系统。

2.5 风烟系统运行

掺烧污泥与未掺烧的工况相比,由于需要的燃烧空气量与后续排放的烟气量不同,因此需对风烟系统进行运行调整优化^[26],主要包括引风机、一次风机和二次风机。试验过程中对比了工况1和3中风烟系统各风机运行时的最大电流值与平均电流值,结果如表8所示。

表8 100%负荷下风机运行电流情况

Tab. 8 Current in wind turbine operation at 100% load

风机	工况1 电流值/A		工况2 电流值/A	
	最大	平均	最大	平均
引风机	217.2	217.9	222.6	222.9
一次风机	82.6	83.2	82.9	84.9
二次风机	42.7	44.1	42.2	44.0

由表8可知,掺烧污泥前后各风机的平均电流

值基本一致,说明掺烧污泥对风烟系统的运行影响较小,经过适当调整后风烟系统可以正常运行。其中引风机的平均电流相对提升较多,达到5.4 A。分析认为,由于污泥中含水量较高,而水分在燃烧过程中大部分都以水蒸气的形态随烟气排出,导致工况3的总烟气体积大于工况1,因此引风机所需的耗电量增加。而一次风机和二次风机的运行最大电流值与平均电流值之间相差增大,主要原因是污泥的成分含量不稳定,在掺烧过程中需要不断调整一次风量和二次风量。

3 结 论

对国内某燃煤电厂的5号锅炉开展污泥掺烧现场试验,得到以下结论:

(1) 燃煤与污泥在组成成分上区别较大,若两者组合为混合燃料,需要确定污泥的种类并选取合适的掺烧比例。

(2) 掺烧污泥后,燃烧温度与锅炉热效率等参数均会降低,但与实际数值相比降幅较小,在工程上可以忽略影响,因此在燃煤锅炉中合理掺烧污泥是可行的生活污泥处置方式之一。

(3) 掺烧污泥会使大部分烟气污染物的生成量增加,但燃烧烟气经过燃煤电厂现有净化系统作用后,各污染物的排放浓度变化较小,不需要考虑增设额外的烟气净化装置。

参考文献:

[1] LIANG Y, XU D, FENG P, et al. Municipal sewage sludge incineration and its air pollution control[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 295(3): 126456.

[2] 王 飞, 张 盛, 王丽花. 燃煤耦合污泥焚烧发电技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 82-94.

WANG Fei, ZHANG Sheng, WANG Li-hua. Research progress of coal-fired coupled sludge incineration power generation technology [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 82-94.

[3] PARK S W, JANG C H. Characteristics of carbonized sludge for co-combustion in pulverized coal power plants[J]. Waste Management, 2011, 31(3): 523-529.

[4] 孟 涛, 邢小林, 陈传恒, 等. 污泥-烟煤混合燃料燃烧特性与动力学研究[J]. 热力发电, 2021, 50(5): 87-93.

- MENG Tao, XING Xiao-lin, CHEN Chuan-heng, et al. Study on co-combustion characteristics and kinetics of mixing fuel of sludge and coal[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(5): 87-93.
- [5] 王一坤, 吕凯, 周平, 等. 蒸汽抽取位置对抽蒸汽干化污泥耦合发电机组影响[J]. 热力发电, 2020, 49(12): 78-83.
- WANG Yi-kun, LYU Kai, ZHOU Ping, et al. Effects of steam extraction position on sludge-coal blending combustion generating unit[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(12): 78-83.
- [6] 王一坤, 柳宏刚, 周凌宇, 等. 烟气抽取位置对抽烟气干化污泥耦合发电机组的影响[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 43-48.
- WANG Yi-kun, LIU Hong-gang, ZHOU Ling-yu, et al. Effects of flue gas extraction position on sludge-coal blending combustion generation units[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 43-48.
- [7] 王一坤, 邓磊, 柳宏刚, 等. 湿污泥掺烧量对抽烟气干化污泥耦合发电机组影响[J]. 热力发电, 2020, 49(11): 47-54.
- WANG Yi-kun, DENG Lei, LIU Hong-gang, et al. Effects of wet sludge amount on sludge-coal co-combustion generation unit using extracted flue gas to heat sludge[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(11): 47-54.
- [8] 钱柯贞, 陈德珍, 段妮娜, 等. 城市污水污泥干化-焚烧系统热力分析[J]. 热力发电, 2022, 51(5): 48-54.
- QIAN Ke-zhen, CHEN De-zhen, DUAN Ni-na, et al. Thermal analysis of municipal sewage sludge drying-incineration system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(5): 48-54.
- [9] 陈志董, 林育超, 刘铭宇, 等. 污泥干燥及其与燃煤电站耦合的热力特性分析[J]. 热力发电, 2022, 51(5): 55-64.
- CHEN Zhi-dong, LIN Yu-chao, LIU Ming-yu, et al. Thermodynamic characteristic analysis of sewage sludge drying and its integration with coal-fired power plant[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(5): 55-64.
- [10] 张宗振, 李德波, 冯永新, 等. 1 000 MW 燃煤锅炉污泥掺烧试验研究与工程应用[J]. 热能动力工程, 2020, 35(1): 210-216.
- ZHANG Zong-zhen, LI De-bo, FENG Yong-xin, et al. Investigation and applications of co-combustion of sludge in a 1 000 MW coal fired boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(1): 210-216.
- [11] 彭金宝, 刘好文, 周科, 等. 不同含水率污泥与煤混烧的燃烧特性与反应动力学研究[J]. 锅炉技术, 2021, 52(4): 30-37.
- ZHANG Jin-bao, LIU Hao-wen, ZHOU Ke, et al. Thermogravimetric analysis on the co-combustion characteristics and kinetic of sewage sludge with different moisture contents and power coal [J]. Boiler Technology, 2021, 52(4): 30-37.
- [12] 陈小涵. 污泥的燃烧特性与氯析出规律的实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- CHEN Xiao-han. Experimental study on sludge combustion characteristics and chlorine release[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [13] 何洪浩, 李文军, 徐众, 等. 火力发电厂污泥掺烧技术应用[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 137-140.
- HE Hong-hao, LI Wen-jun, XU Zhong, et al. Application of sludge co-incineration technology in coal fired power plant[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 137-140.
- [14] 童敏, 封羽涛, 罗永浩. 城市污泥掺煤混烧特性及污染物排放研究[J]. 环境工程, 2018, 36(3): 133-137.
- TONG Min, FENG Yu-tao, LUO Yong-hao. Study on co-combustion characteristics and pollutants emission of municipal sludge and coal[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(3): 133-137.
- [15] 倪琳, 崔小峰, 徐立家, 等. 燃料煤重金属元素在飞灰及炉渣中的分布与富集研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5): 203-208.
- NI Lin, CUI Xiao-feng, XU Li-jia, et al. Study on distribution and enrichment of heavy metal elements in fly ash and slag from fuel coal[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 203-208.
- [16] 周科, 刘好文, 彭金宝, 等. 含水/脱水市政污泥与煤混烧的NO和SO₂排放特性研究[J]. 锅炉技术, 2022, 53(1): 8-15.
- ZHOU Ke, LIU Hao-wen, ZHANG Jin-bao, et al. NO and SO₂ emission behaviors of co-combustion of power coal and high water or de-water sewage sludge[J]. Boiler Technology, 2022, 53(1): 8-15.
- [17] 张自丽, 孙光, 段伦博. 煤与污泥混燃及污染物逸出特性[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 118-129.
- ZHANG Zi-li, SUN Guang, DUAN Lun-bo. Combustion characteristic and pollutants emission behavior during co-combustion of coal and municipal sewage sludge[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 118-129.
- [18] 徐向鹏, 钟文琪, 陈曦, 等. 污泥煤泥协同燃烧动力学及污染物排放特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(1): 25-33.
- XU Xiang-peng, ZHONG Wen-qi, CHEN Xi, et al. Co-combustion kinetics and pollutant emission characteristics of sludge and coal slime[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52(1): 25-33.