

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.18.005

燃煤电厂协同焚烧城镇污水处理厂污泥特性研究

李雪怡¹, 彭溶², 王侨¹, 王光辉³, 郑鹏凯¹, 王欢⁴,
陈北洋⁵, 朱芬芬⁴, 沈明忠⁶

(1. 北京恒润慧创环境技术有限公司, 北京 100044; 2. 中国环境保护产业协会, 北京 100045; 3. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100044; 4. 中国人民大学生态环境学院, 北京 100872; 5. 华电水务科技股份有限公司, 北京 100160; 6. 中国华电集团有限公司, 北京 100031)

摘要: 通过文献和标准应用情况的研究,根据10座城镇污水处理厂不同市政污泥pH、含水率、热值、氯含量、含砂量和重金属等理化指标的检测结果,分析提出燃煤电厂协同焚烧城镇污水处理厂污泥的泥质、掺烧比等关键指标,为燃煤电厂接纳市政污泥提供依据。考虑到锅炉最佳燃烧效率,掺烧污泥含水率宜低于60%,pH宜为5~12;结合污泥的理化性质、燃煤电厂实际掺烧情况及烟气污染物排放控制要求,当污泥含水率<80%时,污泥掺烧比宜控制在5%以下,当污泥含水率<60%时,污泥掺烧比宜在10%以下。

关键词: 燃煤电厂; 协同焚烧; 城镇污水处理厂; 市政污泥

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)18-0029-05

Study on Characteristics of Sludge from Urban Sewage Treatment Plants Co-incineration with Coal-fired Power Plants

LI Xue-yi¹, PENG Rong², WANG Qiao¹, WANG Guang-hui³, ZHENG Peng-kai¹,
WANG Huan⁴, CHEN Bei-yang⁵, ZHU Fen-fen⁴, SHEN Ming-zhong⁶

(1. Beijing Hengrun Huichuang Environmental Technology Co. Ltd., Beijing 100044, China; 2. China Association of Environmental Protection Industry, Beijing 100045, China; 3. Beijing Capital Eco-Pro Group Co. Ltd., Beijing 100044, China; 4. School of Ecology & Environment, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 5. Huadian Water Technology Co. Ltd., Beijing 100160, China; 6. China Huadian Corporation Ltd., Beijing 100031, China)

Abstract: Based on literature and application of standards, combined with testing results of physicochemical properties related to pH, moisture content, calorific value, chlorine, sand and heavy metal of 10 different types of sludge samples from different urban sewage treatment plants, this paper analyzes and proposes the key indicators such as quality and blending ratio of sludge co-incineration in coal-fired power plants, to provide a basis for coal-fired power plants to accept municipal sludge. Considering optimal combustion efficiency of the boiler, moisture content of the co-fired sludge is less than 60% and pH of the co-fired sludge is 5-12. According to the physicochemical properties of the sludge, co-firing situation and emission requirement for flue gas pollutants of coal-fired power plant, when

通信作者: 彭溶 E-mail: pengrong@caepi.org.cn

moisture content of sludge is less than 80%, co-firing ratio of sludge is less than 5%, when moisture content of sludge is less than 60%, co-firing ratio of sludge is less than 10%.

Key words: coal-fired power plants; co-incineration; urban sewage treatment plants; municipal sludge

燃煤电厂协同焚烧城镇污水处理厂污泥已成为当前污泥处置的重要补充方式。燃煤电厂协同焚烧污泥时,污泥掺烧比例的增加,对混合燃料的热值、着火和燃尽性能以及锅炉燃烧时的炉膛温度、锅炉效率、燃烧安全性等可能会产生影响。同时,污泥中氮、硫、氯以及重金属等含量高于燃煤,燃煤电厂协同焚烧污泥可能导致烟气中 SO_2 、 NO_x 、重金属以及二噁英等有毒有害物质的排放发生变化。通过对10座污水处理厂不同类型污泥特性和掺烧比的检测分析,提出了掺烧污泥的泥质、掺烧比等关键指标的接纳要求,以为燃煤电厂接收污泥提供参考。

1 调研污水厂污泥基本情况

选取东北、华北、华东、华南、华中等调研区域的10个污泥样品,对污泥特性及燃煤电厂协同焚烧污泥情况进行分析。其中,污泥样品G为城镇污水处理厂混入少量印染废水产生的混合污泥,其他样品均为市政污泥。10个污泥样品基本信息见表1。

表1 燃煤电厂协同焚烧污泥样品基本信息

Tab.1 Basic information on the co-incineration of sludge in coal-fired power plants

样品编号	污泥种类	掺烧前污泥处置方式	掺烧污泥含水率设计值/%	掺烧比/%
A	市政污泥	带机脱水+低温干化	≤40	0.625
B	市政污泥	深度脱水	≤60	<10
C	市政污泥	深度脱水	≤60	<10
D	市政污泥	带机脱水	≤80	<10
E	市政污泥	板框脱水	≤60	12.50
F	市政污泥	带机脱水+低温干化	≤40	
G	混合污泥	蒸汽圆盘干化	35~40	1.5
H	市政污泥	深度脱水	≤60	0.385
I	市政污泥	干燥炭化	≤20	5~10
J	市政污泥	烟气干化	≤20	0.32

注: 污泥样品A、H、I取自华北区域,污泥样品B、C、D取自华南区域,污泥样品E取自华中区域,污泥样品F、G取自华东区域,污泥样品J取自东北区域。

2 污泥理化性质

一般燃煤电厂锅炉都会配备相应的燃料破碎

系统(流化床锅炉)或磨煤机(煤粉炉),故未对污泥粒径进行限定,重点对污泥pH、含水率及热值、含氯量、含砂量和重金属等指标进行研究。

2.1 pH

调研污水厂污泥样品实测pH如图1所示。可知,10个样品的pH为5.6~11.8,其中样品E污水厂在污泥板框脱水过程中投加了一定量的铁盐,故污泥pH偏酸性;样品A、F、H污水厂均采用投加石灰方式脱水,故污泥pH呈碱性,而样品F污水厂同时添加了铁盐,其pH低于样品A、H;其他污水厂的污泥pH均在中性范围内。

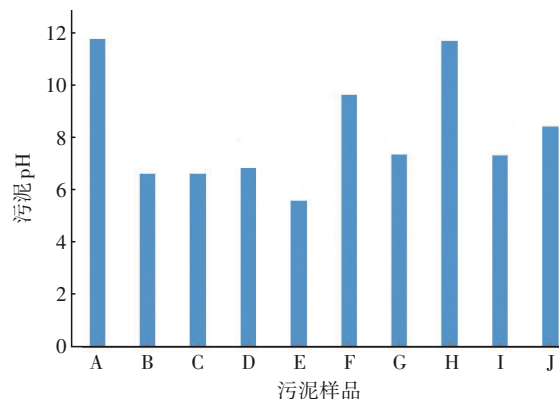


图1 污泥样品pH

Fig.1 pH of sludge samples

依据《城镇污水处理厂污泥泥质》(GB 24188—2009)、《城镇污水处理厂污泥处置 单独焚烧用泥质》(GB/T 24602—2009)、《城镇污水处理厂污泥处置 水泥熟料生产用泥质》(CJ/T 314—2009)规定,单独焚烧的污泥pH限值为5~10,水泥熟料生产用泥质pH限值为5~13。因此,结合调研污水厂污泥样品的实测值和相关标准规范,建议进入燃烧系统的污泥pH控制在5~12。

2.2 含水率及热值

按照《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南(试行)》,燃煤电厂协同处置污泥的方式主要有两种:一是直接将含水率为80%的湿污泥掺入锅炉进行协同焚烧;二是将含水率<40%的污泥,即经过干

化或半干化处理的污泥加入煤粉炉或者循环流化床锅炉进行焚烧。电厂余热资源可用于污泥干化,并且干化后的污泥具有更高的热值,更趋近燃煤的性状。对掺烧污泥进行取样检测,结果如图2所示。其中样品I因掺烧现场取样受限,故未测其含水率,仅测试其热值。

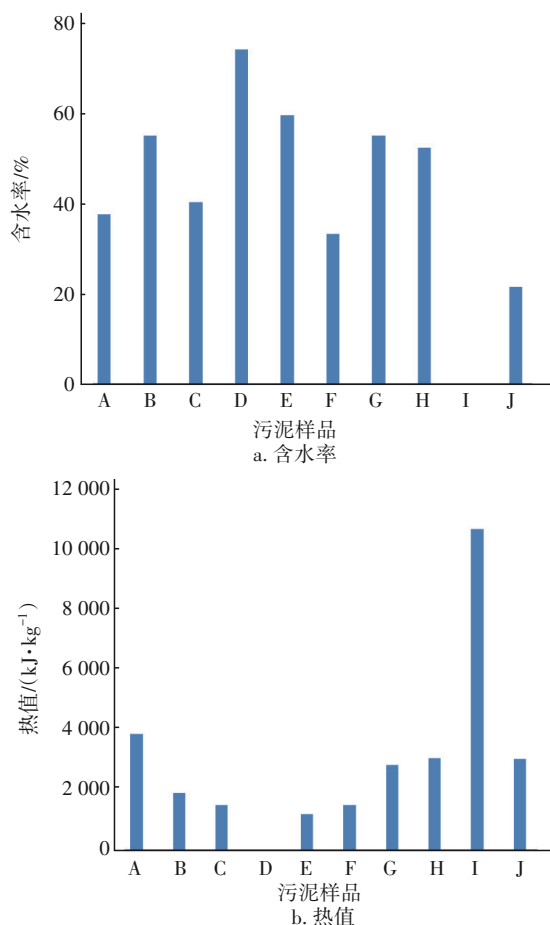


图2 污泥样品含水率和热值

Fig.2 Moisture content and calorific value of sludge samples

由图2可知,3个污泥样品含水率<40%,5个污泥样品含水率在40%~60%之间,样品D污泥含水率最高,达到74.12%。此外,污泥样品热值略低,除样品I外,其他均在1208~3858 kJ/kg之间。相比于燃煤热值(平均为13254 kJ/kg),干化污泥的热值(平均为2808 kJ/kg)明显较低,但高于深度脱水后的污泥(平均热值为1918 kJ/kg)。已有研究表明,脱水污泥含固率为20%~35%时其热值为1000~3500 kJ/kg,干化污泥含固率为40%~85%时热值为4000~7000 kJ/kg^[1]。对含水率较高的污泥样品D进行热值分析,检测结果为负值,说明高含水率

污泥直接掺烧时无热量产生,会增加燃煤消耗量。

然而,湿污泥直接掺烧投资较低,故部分电厂仍采用湿污泥直接掺烧方式。如四川某燃煤电厂掺烧含水率为80.3%的湿污泥(设计规模为150 t/d,掺烧比为3.92%),湿污泥收到基低位热值为206 kJ/kg。由于掺烧比较低,湿污泥掺烧后暂未对锅炉设备造成明显影响。因此,结合污泥的热值以及实际燃煤电厂掺烧项目情况,掺烧污泥的含水率可按低于80%考虑,若考虑锅炉的最佳燃烧效率,建议污泥含水率不高于60%。

2.3 氯含量

氯含量是导致燃烧结渣和腐蚀的主要因素之一。我国煤炭的氯含量平均值为192~264 mg/kg,低于全球硬煤氯平均浓度(340 mg/kg)^[2]。依据《煤中有害元素含量分级第2部分:氯》(GB/T 20475.2—2006),根据氯含量的不同,可将煤炭划分为4个类别:特低氯煤(氯含量≤0.05%)、低氯煤(氯含量为0.05%~0.15%)、中氯煤(氯含量为0.15%~0.30%)以及高氯煤(氯含量>0.30%)。目前,国内外对燃煤设备中煤的氯含量临界值没有统一标准,通常来说,煤中氯含量<1500 mg/kg(0.15%)安全可行,超过3000 mg/kg(0.30%)会产生危害^[2]。因此,污泥与燃煤混合后的燃料氯含量也应低于0.15%。

调研污水厂污泥样品氯含量(绝干污泥氯含量)如图3所示。其中,6个污泥样品氯含量较低,在0.02%~0.23%之间,另外4个污泥样品的氯含量较高,在0.41%~3.34%之间。样品A、E、F、H污泥在脱水过程中均有三氯化铁药剂的投加,故污泥中氯含量相对较高。此外,根据燃煤的氯含量及全水分和污泥的氯含量、含水率及掺烧比,可以计算出污泥与燃煤混合后的燃料氯含量。其中,燃煤氯含量按0.026%计,燃煤全水分按调研项目的平均值9.21%计,污泥氯含量按调研项目的平均值0.581%计,污泥含水率最低以10%计(一般难达到,仅用于计算污泥干基量最大情况下的氯含量极限值),计算得到不同污泥含水率及对应掺烧比条件下的混合燃料氯含量范围如表2所示。结果表明,混合燃料氯含量均能满足前文所述燃料氯含量<0.15%的要求。此外,根据污泥最大掺烧干基量,计算得到污泥干燥基中氯含量限值为1.57%,取值为1.50%(即15000 mg/kg干基)。

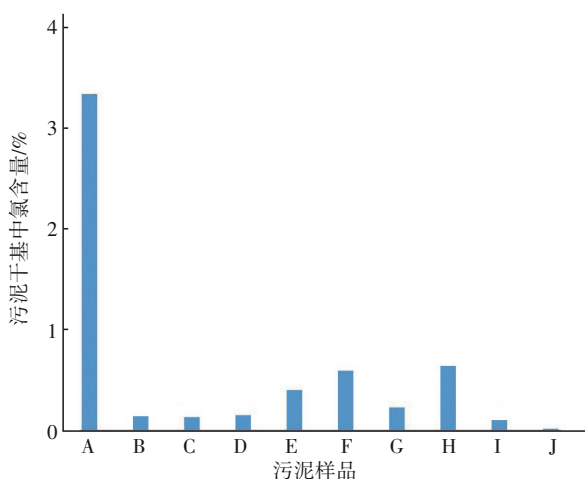


图3 不同来源污泥样品氯含量

Fig.3 Chlorine content of sludge samples from different sources

表2 不同污泥含水率和掺烧比条件下的混合燃料氯含量
Tab.2 Chlorine content of mixed fuel under different sludge moisture content and co-firing ratio %

污泥含水率	掺烧比	混合燃料氯含量
60~80	5	0.028~0.034
10~60	10	0.043~0.069

尽管燃煤电厂脱硫系统可去除污泥中的氯元素,但氯含量过高导致的锅炉结渣和高温腐蚀问题无法解决,因此对于采用燃煤电厂协同焚烧处置的污泥,在脱水过程中不宜使用含氯类污泥调理剂。特殊情况下若污泥深度脱水必须添加含氯药剂,建议检测污泥、燃煤实际含氯量并结合污泥掺烧比,将污泥与燃煤混合后的燃料氯含量控制在0.15%以内。

2.4 含砂量

城市污水处理厂污水中通常会挟带一定量的砂粒,污水经过处理后,大部分砂粒会留存于污泥中,在燃煤电厂协同焚烧处置污泥时可能会给电厂设备运行带来负面影响,如对高速旋转的给料分配器上部内壁、螺旋分离器的内壁和干化器中管式流化床热交换器管壁磨损的影响较大^[3]。同时,污泥中较高的含砂量也会对热值产生显著影响^[4]。调研污水厂污泥样品含砂量如图4所示。可知,除了样品A外,其余9个污泥样品含砂量均低于2%(样品H未检出含砂量)。样品A的污泥含砂量明显较高,可能受特殊的地理位置和气候因素影响。污泥含砂量过高,可能会使焚烧设备产生磨损,因此燃煤电厂在掺烧污泥时应综合考虑污泥含砂量的影响,

定期对相关设备进行检查和维护。

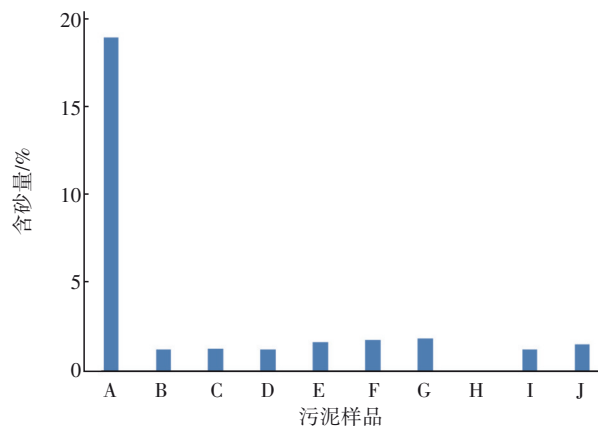


图4 污泥样品实测含砂量

Fig.4 Sand content of sludge samples

2.5 重金属含量

对调研污水厂污泥及燃煤样品重金属含量进行检测,结果见表3。

表3 不同来源污泥样品、燃煤样品重金属含量

Tab.3 Heavy metal content of sludge samples and coal samples from different sources mg·kg⁻¹

重金属	污泥样品(干污泥)	燃煤样品
总镉	0.04~2.01	0.02~0.95
总铅	9.33~108.65	1.58~372.00
总铬	3.12~1 101.48	1.73~229.26
总砷	2.72~44.76	0.71~20.59
总铜	6.27~2 386.94	1.54~294.64
总锌	30.92~1 025.45	8.30~3 122.91
总镍	1.12~153.91	1.01~121.59
总汞	0.68~21.21	0.07~5.30

综合8种重金属指标的检测结果显示,污泥中重金属含量相对于燃煤来说较高,但大多数情况下并未达到数量级的差距。如果污泥掺烧比不高,且污泥重金属指标达到《城镇污水处理厂污泥泥质》(GB 24188—2009)的要求,则不会给系统增加过高的重金属负荷,但考虑到汞的挥发性较强,建议在掺烧过程中重点关注其入炉指标,并定期检测焚烧烟气,必要时对燃煤电厂烟气处理工艺进行改造。

3 污泥掺烧比

考虑到污泥本身热值远低于燃煤而含水率高于燃煤,且污泥含有的氯、重金属等污染物也高于燃煤等因素,为避免燃煤电厂焚烧过程中增加污染物排放风险,及避免影响燃烧效率和增大焚烧设备故障率,燃煤电厂协同焚烧市政污泥须设定合理的

掺烧比例。

调研污水厂污泥的掺烧比为0.32%~12.50%,根据在线监测数据,10个污泥样品的烟气污染物排放均不超标。其中,5座污水处理厂的污泥在掺烧前均进行热干化处理,热干化后含水率均不高于40%,甚至可达20%。结合污泥的理化性质、燃煤电厂实际掺烧情况及烟气污染物排放控制要求,参考已有标准、文献结果^[5],建议掺烧污泥含水率<80%时,掺烧比<5%;当污泥含水率<60%时,掺烧比<10%。实际掺烧比可结合当地燃煤和污泥性质,燃烧锅炉型号、类型和设备稳定性,以及实际污染物排放情况和当地实际污泥处置需求进行综合评估并调整。

4 结论

对不同区域10座城镇污水处理厂污泥进行调研,分析了污泥样品的pH、含水率、热值、氯含量及重金属等理化性质,综合考虑污泥掺烧后对燃烧系统的影响及污染物的达标排放,形成如下结论:①进入燃烧系统的污泥pH宜为5~12,含水率最高不宜超过80%,考虑锅炉的最佳燃烧效率,建议掺烧污泥含水率不高于60%;②污泥脱水过程中不应使用含氯类污泥调理剂,特殊情况下必须添加含氯药剂时,污泥干燥基中氯含量限值为1.50%(即15 000 mg/kg干基),污泥与燃煤混合后的燃料氯含量应低于0.15%;③污泥含砂量过高会对焚烧设备造成磨损,因此燃煤电厂在掺烧污泥时应综合考虑污泥含砂量的影响;④若污泥掺烧比不高,且掺烧污泥的重金属指标达到《城镇污水处理厂污泥泥质》(GB 24188—2009)要求,则不会给系统增加过多的重金属负荷;⑤鉴于污泥的理化性质、燃煤电厂污泥掺烧实际情况及烟气污染物排放控制要求,当掺烧污泥含水率<80%时,建议掺烧比<5%;当污泥含水率<60%时,建议掺烧比<10%。

参考文献:

- [1] 胡维杰. 城镇污水污泥燃煤电厂协同焚烧技术解析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(8): 24-31.
HU Weijie. Analysis on the urban sewage sludge co-incineration technology of coal-fired power plants [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(8): 24-31 (in Chinese).

- [2] 刘彩,张天友,王青峰,等. 贵州省燃煤电厂入炉煤氯含量的分布特征及影响因素[J]. 能源环境保护, 2022, 36(6): 47-51.
LIU Cai, ZHANG Tianyou, WANG Qingfeng, et al. Distribution characteristics and influencing factors of chlorine content in the feed coal of coal-fired power plants in Guizhou Province [J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(6): 47-51 (in Chinese).
- [3] 胡维杰,周友飞,陈汝超,等. 上海市石洞口片区污泥干化焚烧处理工程设计总结与分析[J]. 给水排水, 2018, 44(9): 34-41.
HU Weijie, ZHOU Youfei, CHEN Ruchao, et al. Summary on sludge drying and incineration treatment project design for Shanghai Shidongkou area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(9): 34-41 (in Chinese).
- [4] 许劲,范准,吕秋颖,等. 山地城市污泥水热炭化产物特性研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(21): 21-27, 34.
XU Jin, FAN Zhun, LÜ Qiuying, et al. Characteristics of hydrothermal carbonization products of municipal sludge in mountainous cities [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(21): 21-27, 34 (in Chinese).
- [5] 朱化军,徐俊,刘伟京,等. 市政污泥热电厂循环流化床协同焚烧技术验证研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(12): 3101-3107.
ZHU Huajun, XU Jun, LIU Weijing, et al. Validation of municipal sludge incineration in circulation fluidized bed boiler from a thermal power plant [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(12): 3101-3107 (in Chinese).

作者简介:李雪怡(1982-),女,天津人,硕士,正高级工程师,北京工业大学硕士研究生产业导师,曾为近400个污水污泥处理和臭气治理项目提供过技术支持,作为技术负责人提供方案、设计、建设运营的全流程技术支持项目20余个;2019年开始开展污泥、污水相关领域的技术研发工作,参与多项国家级、集团级和公司内部多项课题研究和标准的编制工作。

E-mail: 13811505570@139.com

收稿日期: 2024-04-24

修回日期: 2024-09-02

(编辑:丁彩娟)