

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.14.007

## 关于污泥火电厂协同焚烧的控制性指标的思考和建议

孟春霖<sup>1</sup>, 颜莹莹<sup>1</sup>, 梁 远<sup>1</sup>, 张 闯<sup>2</sup>, 沙雪华<sup>1</sup>, 刘 迪<sup>1</sup>

(1. 北京首创污泥处置技术有限公司, 北京 100044; 2. 北京首创股份有限公司, 北京 100044)

**摘 要:** 近年来利用火电厂协同处置污泥的项目逐渐增多,污泥火电厂协同焚烧已经成为国内污泥处置的重要方式。但与之矛盾的是,污泥电厂协同焚烧却仍未有行业规范出台。为了促进行业的可持续和规范化发展,需对污泥火电厂掺烧的泥质要求、掺烧比,以及可能产生的二次污染等关键的控制性指标进行系统性的思考。关于入炉污泥泥质的污染物指标,建议可依据《城镇污水处理厂污泥泥质》(GB 24188—2009)的项目和限值进行要求。由于汞的毒性和挥发性,对总汞的限值要求适当严格,应满足总汞 $<15\text{ mg/kg}$ 干污泥的要求。关于污泥含水率和掺烧比,建议在煤粉炉掺烧的污泥基本以干化污泥为主,当污泥含水率 $\leq 40\%$ 且掺烧比 $\leq 5\%$ 时,对锅炉运行以及污染物排放影响不大。在流化床中可以掺烧脱水污泥,当污泥含水率 $\leq 80\%$ 且掺烧比 $\leq 10\%$ 时,对锅炉运行以及污染物排放影响不大。关于烟气排放标准,需综合考虑污泥火电厂掺烧可能产生大气污染物排放风险,并结合《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)、《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)、欧盟垃圾焚烧标准 2000/76/EC、《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—2018)的指标要求。此外,污泥火电厂掺烧后不应影响火电厂炉渣和粉煤灰的原处置或综合利用路径。原则上,污泥火电厂掺烧后产生的粉煤灰,应按《危险废物鉴别标准 通则》(GB 5085.7—2019)进行鉴定,属于危险废物的,按危险废物处置;不属于危险废物的,可按原路径处理和综合利用。

**关键词:** 火电厂; 污泥火电厂协同焚烧; 泥质; 污泥处置

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)14-0046-10

## Thinking and Suggestion on the Control Index of Sludge Co-incineration in Thermal Power Plant

MENG Chun-lin<sup>1</sup>, YAN Ying-ying<sup>1</sup>, LIANG Yuan<sup>1</sup>, ZHANG Chuang<sup>2</sup>, SHA Xue-hua<sup>1</sup>,  
LIU Di<sup>1</sup>

(1. Beijing Capital Sludge Disposal Co. Ltd., Beijing 100044, China; 2. Beijing Capital Co. Ltd., Beijing 100044, China)

**Abstract:** In recent years, projects using thermal power plants for incineration of sludge have gradually increased, and sludge co-incineration in thermal power plants has already become an important domestic sludge disposal method. However, sludge co-incineration in thermal power plants has not yet been regulated by corresponding specifications. To promote the sustainable and standardized development of the industry, it is necessary to systematically consider the key control indicators such as sludge quality

requirements, blending ratio, and possible secondary pollution of sludge co-incineration in thermal power plants. Regarding the pollutant index of the sludge entering the boiler, it is recommended that the requirements can be referred to the standards of *Quality of Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 24188 – 2009). The limit for total mercury should be strict and meet the requirement of total mercury ( $< 15$  mg/kg dry solid) due to its toxicity and volatility. Regarding the water content and blending ratio for sludge, it is suggested that the sludge co-incineration in the pulverized coal boiler should be dry sludge. When the sludge water content is  $\leq 40\%$  and the blending ratio is  $\leq 5\%$ , it has few effects on the operation of the boiler and the discharge of pollutants. Dewatered sludge can be co-incineration in the fluidized bed boiler. When the sludge water content is  $\leq 80\%$  and the blending ratio is  $\leq 10\%$ , it has few effects on the operation of the boiler and the discharge of pollutants. Regarding gas emission standards, it is necessary to comprehensively evaluate the risk of air pollutant emission from the sludge co-incineration in thermal power plants, and to synthetically consider the requirements of *Emission Standard of Air Pollutants for Thermal Power Plants* (GB 13223 – 2011), *Standard for Pollution Control on the Municipal Solid Waste Incineration* (GB 18485 – 2014), EU 2000/76/EC, and *Emission Standards for Odor Pollutants* (GB 14554 – 2018). In addition, the sludge co-incineration in the thermal power plant should not affect the original disposal or comprehensive utilization path of the slag and fly ash in thermal power plant. In principle, the fly ash produced should be identified in accordance with the *Identification Standards for Hazardous Waste—General Rules* (GB 5085.7 – 2019). If it is not hazardous, it can be treated and comprehensively used in the original way. Otherwise, it should be disposed according to the hazardous waste treatment and disposal regulations.

**Key words:** thermal power plant; sludge co-incineration in thermal power plant; sludge quality; sludge disposal

随着我国城市化进程的加快,污水处理量不断增加,污水厂运行过程中产生的市政污泥的处置也成为亟需解决的难题。面对国内严峻的环保形势,住建部、发改委、能源局、生态环境部等部委相继出台了相关政策、技术指南等引导污泥处理处置行业发展,同时鼓励电力企业加大资源化利用污泥的升级改造力度,并推行燃煤与生物质耦合发电的试点项目。

利用火电厂协同处置污泥,既可以利用电厂余热作为干化热源,又可以利用火电厂已有的焚烧和尾气处理设备,节省投资和运行成本。因此,在具备条件的地区,污泥在火电厂锅炉中与煤混合焚烧是一种可行的处置方式。但因为污泥成分比燃煤复杂,尤其是接收部分工业废水的市政污水处理厂,一般含有较多的重金属等有害成分,污泥火电厂协同焚烧不应影响原有电厂的正常生产及污染物排放产生影响。

基于此,对污泥火电厂掺烧的泥质要求、掺烧比,以及可能产生的二次污染等关键的控制性指标

进行系统性思考并提出建议,以期对行业发展起到促进作用。

## 1 国内外污泥火电厂掺烧的现状

欧洲自 20 世纪 80 年代开始,逐渐兴起了利用现有窑炉对污泥进行最终处置的方式,主要集中在火力发电厂和水泥厂,目前欧洲已有超过 100 座电厂设施掺烧包括污泥在内的生物固体废物,其中德国掺烧污泥规模较大。德国污水处理厂污泥法 (AbfKlärV) 在 2017 年 8 月正式宣布生效。新版规范明确规定,在规定的过渡期(12 年或 15 年)之后,所有规模超过 5 万人口当量的污水厂都必须从污泥或者污泥灰渣内进行磷回收,同时禁止污泥土地利用。因此,污泥干化焚烧将是德国今后主要的污泥处置途径,污泥最后的主要去处是污泥单独焚烧和火电厂掺烧。1993 年美国颁布了 40 CFR Part 503 法案,针对焚烧提出了具体要求。2011 年对该法案进行了修订,针对流化床和多炉膛焚烧炉提出了更严格和具体的指标要求;欧盟制定了欧盟垃圾焚烧污染物排放标准 DIRECTIVE\_2000,规定了焚

烧厂和联合焚烧厂的焚烧污染物排放限值。

目前,我国已有十余家燃煤电厂开展了污泥焚烧工作(见表 1),还有一些热电厂正在筹建污泥焚烧项目。为了进一步促进电厂协同处置有机废弃物,2018 年 6 月,国家能源局、生态环境部联合发布《关于燃煤耦合生物质发电技改试点项目建设的通知》(以下简称《通知》)。《通知》确定技改项目试点共计 84 个,这其中包括 29 个污泥火电厂焚烧项目。国内日益增多的污泥电厂焚烧项目也迫切需要行业的规范化管理。

表 1 国内部分燃煤电厂焚烧污泥的项目

Tab. 1 Projects of sludge co-incineration in thermal power plants

项目	投产时间	脱水污泥处理量 (以 80% 含水率计)/(t·d <sup>-1</sup> )	炉型
江阴康顺热电厂	2006 年	100	流化床
常州广源热电厂	2006 年	500	流化床
徐州垞城电力	2007 年	250	煤粉炉
南京协鑫热电厂	2007 年	400	流化床
常州新港热电厂	2007 年	200	流化床
扬州港口环保热电厂	2007 年	60	流化床
枣矿八一水煤浆电厂	2009 年	140	流化床
华电滕州新源热电厂	2009 年	110	煤粉炉
宁波正源电力	2009 年	240	流化床
烟台清泉热电厂	2010 年	50	流化床
华电漯河发电有限公司	2011 年	300	煤粉炉
国电北仑发电厂	2011 年	200	煤粉炉
华电金山热电分公司	2014 年	300	煤粉炉
国电江苏谏壁发电厂	2019 年	200	煤粉炉

2 关于焚烧泥质的污染物指标及限值建议

根据李德波等<sup>[1]</sup>的研究,由于原煤中重金属含量极低,燃煤机组重金属排放量比较少,国内没有针对燃煤电厂制定重金属排放指标,污泥一般含有较多重金属,为了避免对环境造成影响,目前燃煤电厂开展污泥焚烧时参考《城镇污水处理厂污泥泥质》(GB 24188—2009)制定入炉焚烧污泥的污染物指标。表 2 为某燃煤电厂焚烧生活污水泥时,对污泥重金属进行化验得到的结果。

表 2 某燃煤电厂污泥重金属成分化验结果

Tab. 2 Test results of heavy metals in sludge in a thermal

power plant mg·kg<sup>-1</sup>干污泥

项目	干污泥样品 1	干污泥样品 2	干污泥样品 3
汞	ND	ND	ND
砷	2.02	2.49	1.84
镉	4.85	4.67	3.95
铜	457.52	4.67	3.95
铍	1.62	3.43	2.37
铬	169.3	167.29	88.64
镓	23.46	33.64	14.47
锰	143.93	133.96	177.28
锌	577.67	500.31	675.43
锡	92.23	98.75	42.08

污泥中的重金属在电厂锅炉焚烧后会通过烟气排放,以及富集在炉渣和飞灰中产生二次污染,是污泥在火电厂焚烧时需考虑的主要污染物。为了制定污泥火电厂焚烧时的污染物指标,对比了其他现行污泥泥质标准对重金属的限值要求,如表 3 所示。

表 3 现行污泥泥质标准中对重金属的要求

Tab. 3 Heavy metal requirements in current sludge quality standards

mg·kg<sup>-1</sup>干污泥

项目	污泥泥质	混合填埋	林地	土地改良	园林绿化	制砖	农用	水泥
总镉	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<15	<45
总汞	<25	<25	<15	<15	<15	<5	<15	<15
总铅	<1 000	<1 000	<1 000	<1 000	<1 000	<300	<1 000	<1 200
总铬	<1 000	<1 000	<1 000	<1 000	<1 000	<1 000	<1 000	<1 500
总砷	<75	<75	<75	<75	<75	<75	<75	—
总铜	<1 500	<1 500	<1 500	<1 500	<1 500	<1 500	<1 500	—
总锌	<4 000	<4 000	<3 000	<4 000	<4 000	<4 000	<3 000	<10 000
总镍	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	—

注: 污泥泥质指《城镇污水处理厂污泥泥质》(GB 24188—2009);混合填埋指《城镇污水处理厂污泥处置 混合填埋用泥质》(GB/T 23485—2009);林地指《城镇污水处理厂污泥处置 林地用泥质》(CJ/T 362—2011)的中性和碱性土壤;土地改良指《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》(GB/T 24600—2009);园林绿化指《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(GB/T 23486—2009)的中性和碱性土壤;制砖指《城镇污水处理厂污泥处置 制砖用泥质》(GB/T 25031—2010);农用指《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)的 B 级污泥产物;水泥指《水泥窑协同处置污泥工程设计规范》(GB 50757—2012)。

考虑到与污泥土地利用相比,污泥在火电厂焚烧时进入食物链以及人的暴露风险均较小,重金属指标相对土地利用可适当放宽。各指标限值取值主要依据《城镇污水处理厂污泥泥质》(GB 24188—2009)的标准要求。由于汞的毒性和挥发性,对总汞的限值要求适当严格,应满足总汞 < 15 mg/kg 干污泥的要求。

因此,建议污泥火电厂焚烧的污染物控制指标和限值应满足表 4 的要求。

表 4 污泥火电厂焚烧的污染物控制指标及限值

Tab. 4 Pollutant control index and limit of sludge co-incineration in thermal power plant

mg · kg<sup>-1</sup>干污泥

控制项目	限值
总镉	<20
总汞	<15
总铅	<1 000
总铬	<1 000
总砷	<75
总铜	<1 500
总锌	<4 000
总镍	<200

3 关于焚烧泥质的理化指标的建议

焚烧污泥泥质的理化指标主要指污泥含水率和焚烧比。

3.1 电站用循环流化床锅炉与煤粉炉的比较

火电厂燃煤锅炉主要可分为循环流化床锅炉和煤粉炉两大类。根据李建锋等<sup>[2]</sup>的统计,截至 2014 年底,我国现役燃煤火力发电机组中,300 MW 容量等级的燃煤火电机组总装机数量达 880 台,为装机数量最多的一个容量,占火电全国总装机容量的 30% 以上。这其中有近 80 台循环流化床锅炉,其余 800 余台均为煤粉炉。

根据王海豹等<sup>[3]</sup>的研究结果,与煤粉炉相比,循环流化床有以下优点:

① 燃料适用性广

按质量计算,循环流化床内的燃料只是床料的 1% ~ 3%,其余均为不可燃的固体颗粒。良好的蓄热性能和物料混合可以使进入炉膛的燃料被包围并迅速加热到 800 ℃ 左右。

循环流化床和煤粉炉的燃烧特性对比如表 5 所示。

表 5 循环流化床和煤粉炉的焚烧特性比较

Tab. 5 Comparison of incineration characteristics between circulating fluidized bed boiler and pulverized coal boiler

项 目	煤粉炉	循环流化床
燃烧温度/℃	1 200 ~ 1 500	850 ~ 950
燃料停留时间/s	2 ~ 3	约 5 000
燃料升温速度/(℃ · s <sup>-1</sup> )	10 ~ 10 000	10 ~ 1 000
挥发分燃尽时间/s	<0.1	10 ~ 50
焦炭燃尽时间/s	约 1	100 ~ 500
混合强度	差	强
燃烧过程控制因素	扩散控制为主	动力 - 扩散

② 燃料预处理系统简单且给煤点少

循环流化床锅炉的给煤粒度一般小于 12 mm,因此与煤粉锅炉相比,燃料的制备破碎系统大为简化<sup>[4]</sup>。此外,循环流化床锅炉能直接燃用高水分煤(水分可达到 30% 以上),不需要专门的处理系统。煤粉炉要求燃料粒径在 0.1 mm 以下,且必须配备磨煤机,以免石块儿、铁块儿、木块儿给磨煤机造成伤害。循环流化床给煤点少,物料循环机构使给煤系统更简单,而煤粉炉一般都有十几个给煤点。

由于以上两个优点,相比煤粉炉,循环流化床炉更适合焚烧污泥,这体现在对入炉污泥的含水率要求更低、焚烧比更高。

3.2 污泥与燃煤的燃烧特性对比

污泥的热值随含水率降低而升高。以污泥干基热值为 12 557.6 kJ/kg 为例。当污泥含水率为 80% 时,低位热值为 288.0 kJ/kg;当污泥含水率降至 30% 时,低位热值为 7 956.6 kJ/kg,可作为低品质生物质燃料。污泥含水率和低位热值的关系如表 6 所示。

表 6 污泥含水率和低位热值的关系

Tab. 6 Relationship between sludge water content and low calorific value

含水率/%	低位热值/(kJ · kg <sup>-1</sup> )
90	-1 245.7
80	288.0
70	1 821.7
60	3 355.4
50	4 889.1
40	6 422.8
30	7 956.5
20	9 490.2
10	11 023.9
0	12 557.6



根据孙伟等<sup>[5]</sup>对燃煤耦合污泥燃烧特性的研究结果,燃煤和污泥的生物质燃料特性对比见表 7。

表 7 燃煤和污泥的生物质燃料特性对比

Tab. 7 Comparison of biomass fuel characteristics of coal and sludge

项目	污泥	设计煤种	校核煤种 I	校核煤种 II
收到基水分/%	19.30	11.10	9.00	12.00
收到基低位发热值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	10 151	20 749	18 204	22 093
收到基灰分/%	30.20	23.81	33.17	17.73
收到基碳分/%	23.84	55.80	49.83	59.67

由表 7 可知:①与燃煤相比,污泥固定碳含量较低,含量仅为 23.84%,不足燃煤的一半;②与燃煤相比,污泥的含水率较高,燃煤的含水率一般仅为 10%;③污泥发热量较低,即使是含水率 < 20% 的污泥,收到基发热量也仅为 9 490 kJ/kg,约为燃煤的一半。

此外,掺烧污泥还会产生锅炉结焦和腐蚀的风险。由于污泥中氯和氟元素含量偏高,燃煤掺烧污泥,燃烧后烟气中的 HCl 和 HF 成分偏高,同时由于污泥中碱金属含量较高,导致燃料熔点较低,使锅炉受热面易于结焦和腐蚀。一般对锅炉受热面采取喷涂和优化吹灰系统的方法,并在主燃区增设吹灰器的辅助手段,来防止锅炉腐蚀和结焦;为降低锅炉烟气酸度、抑制二噁英合成,在脱硝入口增设钠基微粉烟气干法净化工艺单元。虽然污泥与燃煤相比,在燃料的属性上有诸多的不足,但在一定的掺烧比内,通过合理的技术手段,其掺烧对电厂锅炉运行的影响是可控的。其中,污泥含水率和掺烧比是污泥电厂掺烧的重要控制指标。

### 3.3 污泥火电厂掺烧的含水率和掺烧比建议

根据李欢等<sup>[6]</sup>对国内外电厂掺烧污泥的综述,燃煤电厂掺烧污泥是欧美发达国家处理污泥的重要

方式,其中德国掺烧污泥规模较大。受德国新修订的“德国污泥条例”(AbklärV)和“德国肥料条例”(DüMV)影响,德国的污泥处理处置近年来呈现出土地利用比例降低而污泥焚烧比例升高的趋势,焚烧方式以独立焚烧为主,火电厂掺烧为辅。

德国电厂消纳污泥有两种方式,即湿污泥直接掺煤混烧和干化后混烧,流化床锅炉掺加湿污泥比例(污泥与燃煤质量比,下同) < 25%,煤粉炉掺加干污泥的比例 < 10%,一般为 5%。根据王国华等<sup>[7]</sup>的统计,德国 Berrenroth 电厂和 Weisweiler 电厂将污泥放在循环流化床锅炉中混合焚烧,其燃煤与污泥的质量比为 3:1,所用污泥为脱水污泥,含水率为 70%,燃烧后烟气排放指标符合德国 17. BlmSchV 标准的要求。在德国,利用煤粉炉混烧污泥已有多个成功应用案例,且电厂规模较大(如 Frankenll Bayernwerk 装机容量达 104.7 × 10<sup>4</sup> kW),混烧污泥比例在 10% 以下,多数在 5% 左右,脱水污泥与干化污泥均可使用,少量污泥掺烧不影响电厂环保指标达标。美国威斯康星州和底特律市也有这类污泥掺烧发电厂。

我国目前已经有十余家燃煤电厂开展了污泥掺烧工作,循环流化床的湿污泥掺烧比例约为 20% ~ 25%,煤粉炉的干污泥掺烧比例为 1% ~ 5%。

统计了国内的相关研究<sup>[1,5,8-17]</sup>(见表 8),在煤粉炉掺烧的污泥基本以干化污泥为主,当污泥含水率 ≤ 40%,且掺烧比 ≤ 5% 时,对锅炉运行以及污染物排放影响不大。在流化床中也可以掺烧脱水污泥,当污泥含水率 ≤ 80%,且掺烧比 ≤ 10% 时,对锅炉运行以及污染物排放影响不大。

根据吴浪等<sup>[18]</sup>的研究结果,污泥含水率过大可能会导致磨煤系统堵塞,严重时可能造成跳机事件。因此对于煤粉炉,应采用干化后的污泥进行掺烧。

表 8 关于污泥含水率和掺烧比的文献调研统计

Tab. 8 Literature survey statistics on sludge water content and blending ratio

作者	炉型	含水率/%	掺烧比/%	火电厂掺烧情况
李德波等 <sup>[1]</sup>	煤粉炉	≈ 10	≤ 10	掺烧比例控制在 10% 以内,污泥掺烧对于煤的元素成分影响不大,对飞灰浓度影响不大,不会造成省煤器等受热面磨损加剧;掺烧比例控制在 10% 以内,烟囱出口处粉尘浓度 NO <sub>x</sub> 和 SO <sub>2</sub> 都能满足超低排放要求,脱硫石膏、脱硫废水、脱硫浆液、飞灰和炉渣中重金属满足相关环保标准排放要求
孙伟等 <sup>[5]</sup>	煤粉炉	20	≤ 10	采用污泥经制粉系统进入锅炉燃烧的技术改造方案后,一方面解决了污泥掺烧对锅炉带来的问题;另一方面掺烧系统安全、稳定,可以实现污泥掺烧发电
张成等 <sup>[8]</sup>	煤粉炉	56	≤ 10	炉膛整体温度水平较燃烧单煤有所降低,总燃尽率降低,飞灰含碳量增加,NO <sub>x</sub> 排放上升,但差别均较小,煤泥掺烧对锅炉的正常运行影响较小,表明实际掺烧较低配比污泥是可行的

续表 8 (Continued)

作者	炉型	含水率/%	掺烧比/%	火电厂掺烧情况
李锸 <sup>[9]</sup>	煤粉炉	干化污泥,含水率未明确	≤10	上海某燃煤电厂 300 MW 等级锅炉进行了干化污泥掺烧的试验,结果表明干化后的污泥分别按 5%、10% 掺烧,锅炉烟气排放主要污染物指标几乎无影响,飞灰的重金属成分几乎不变;污泥干化掺烧是城市污泥处置的有效途径之一
董亦华等 <sup>[10]</sup>	煤粉炉	30	≤6	电厂运行时应严格控制干化污泥的掺烧比例,宜低于 6%
刘政艳等 <sup>[11]</sup>	煤粉炉	30	≤7.35	污泥掺烧率的增大会对污染物排放浓度产生影响。含水率为 30% 的城市污水污泥在 7.35% 的掺烧率内,随着污泥掺烧率的增大,SO <sub>2</sub> 排放浓度变化不大,NO <sub>x</sub> 排放浓度逐渐降低,烟粉尘排放量有增大趋势,但最终的排放浓度均在《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)的限值内,大气重金属污染物排放浓度并无显著影响,符合《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014),对周围环境并未产生较大影响
岳峻峰等 <sup>[12]</sup>	煤粉炉	40	≤20	掺烧比例以不高于 20% 为宜。燃煤中掺烧污泥对 NO <sub>x</sub> 和 SO <sub>2</sub> 排放影响不大,结合燃煤电厂尾气处理装置可以将排放浓度控制在《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)的最高允许限值以下。虽然掺烧污泥后飞灰 Cr 和 As 等有害元素含量增加,但是基本满足《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)的要求
丁玲 <sup>[13]</sup>	煤粉炉	22	≤9	试验过程中各种污染物排放均符合《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014),二噁英含量未见明显升高,未增加飞灰重金属含量,不影响飞灰的建材利用
张峰 <sup>[14]</sup>	煤粉炉	30	≤10	各类污染物浓度均控制在较低的范围
朱化军等 <sup>[15]</sup>	流化床	81	≤30	泥煤比不大于 0.4 时可保证循环流化床锅炉的稳定运行,确保烟气能够达到《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)的要求,但出于燃料热值变化和蒸汽用户需求等方面综合考虑,泥煤比不应大于 0.3
王国华等 <sup>[7]</sup>	流化床	70	≤33	燃烧后烟气指标符合德国 17. BImSchV 的允许排放值
	煤粉炉	脱水污泥与干化污泥均可	≤5	少量污泥掺烧不影响电厂环保指标达标
邱旻昊 <sup>[16]</sup>	流化床	80	≤10	该项目投运后,经吴中区环境监测站监测,电厂排放的烟气中烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放浓度能达到《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)第 3 时段标准
洪扬生等 <sup>[17]</sup>	流化床	80	≤15	试验过程中污泥掺烧质量分数最高达到 15%,锅炉运行良好

综上所述,污泥火电厂协同焚烧可以利用电厂锅炉的高温彻底杀灭污泥中的病原体,并最大程度地实现污泥减量,是当前破解污泥处置难困境的方式之一。从稳妥推进污泥火电厂协同焚烧,促进行业健康发展,以及减少环境风险的角度,需要控制污泥入炉含水率和掺烧比两个关键指标。基于审慎取严的考虑,根据以上文献调研结果,污泥火电厂协同焚烧的入炉含水率和掺烧比宜满足表 9 的要求。

表 9 污泥火电厂协同焚烧适宜含水率及掺烧比

Tab. 9 Suitable water content and blending ratio of sludge co-incineration in thermal power plant %

掺烧方式	含水率	掺烧比
流化床锅炉污泥掺烧	≤80	≤10
煤粉炉污泥掺烧	≤40	≤5

4 关于二次污染的控制

为有效控制二次污染,污泥火电厂协同焚烧产

生的烟气、臭气、灰渣均应进行监测与控制。

4.1 烟气

根据王国华等<sup>[7]</sup>的研究结果,污泥在发电厂焚烧烟气的环境影响主要有以下三个方面:

① 烟气中的重金属

污泥与煤相比,其重金属含量偏高,因此存在潜在污染环境的风险。这种风险有多大,需要结合具体的重金属含量和污泥掺加量进行评估。以重金属汞为例,由于其在高温下极易挥发,传统的烟气净化装置很难完全将其截留。汞在煤中的含量约为 0.02 ~ 1.5 mg/kg,而在污水污泥中汞约为 0.1 ~ 10 mg/kg。因此,当污泥中的汞超过一定限值时,可能会带来较大的环境风险。

② 氮氧化物排放问题

污泥中的氮主要以有机氮的形式存在(蛋白质、低级脂肪胺等),有机氮在高温下容易挥发,而

煤中的氮主要以杂环氮的形式存在,杂环氮的分解需要一个过程,这种结构形式的差异决定了氮分解温度的不同。污泥与煤相比,其含氮量偏高。在高温条件下,氮和氧形成  $\text{NO}_x$ ,而且温度越高,生成的  $\text{NO}_x$  越多,存在对大气污染的风险。国外的研究者对污泥在电厂焚烧中产生的  $\text{NO}_x$  排放问题的关注也比较多。

### ③ 二氧化硫排放问题

一般污泥中的硫以有机硫的形式存在(80%以上),硫铁矿硫及硫酸盐硫含量很少,而煤正好相反。有机硫在高温下易于分解挥发,而硫铁矿硫结合较牢固,分解需要一个过程,因此污泥燃烧易释放  $\text{SO}_2$ 。试验表明,在含硫量相同的条件下,污泥燃烧释放的  $\text{SO}_2$  比煤高出 4 倍。

根据李欢等<sup>[6]</sup>的研究,二噁英也是造成电厂掺烧污泥烟气排放环境风险的因素之一。混烧污泥时由于污泥性质波动、流化床锅炉炉温下降、烟气停留时间缩短等因素,有可能造成二噁英在某些时段超标排放。一些火电厂混烧化工污泥、印染污泥、造纸污泥等工业污泥时,二噁英的排放风险会更大。

根据丁玲<sup>[13]</sup>的研究,污泥与燃煤掺混后异味严重,存在臭气排放的环境风险。

我国目前现行的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)中关于燃煤锅炉的大气污染物项目仅规定了烟尘、二氧化硫、氮氧化物、汞和烟气黑度,而对重金属、二噁英类以及臭气浓度并未进行限定。当火电厂掺烧污泥后,可能会产生新的环境风险,因此需根据污泥的特点制定火电厂掺烧污泥后的排放标准。

基于以下原则对污泥火电厂掺烧的烟气排放标准提出建议:a.火电厂目前执行的大气排放污染物标准中规定的项目和限值已经达到国际先进水平,可维持不变;b.新增加的大气排放污染物项目和限值参考相关国标和国际标准,考虑前瞻性,按审慎取严的原则选择。

参考的大气污染物排放标准主要有:a.《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011);b.《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014);c.欧盟 2000/76/EC。考虑到审慎取严的原则,针对一些重复的项目,对以上标准进行了对比,结果见表 10。

表 10 不同大气排放污染物相关标准中的项目与限值的对比

Tab. 10 Comparison of items and limits in relevant standards for different atmospheric pollutants

项 目	GB 13223—2011	GB 18485—2014		欧盟 2000/76/EC
	重点地区的大气污染物排放特别限值	24 h 均值	1 h 均值	
烟尘(颗粒物)/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	20	20	30	10
二氧化硫( $\text{SO}_2$ )/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	50	80	100	50
氮氧化物(以 $\text{NO}_2$ 计)/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	100	250	300	200
汞及其化合物(以 Hg 计)/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	0.03	0.05 (测定均值)		0.03
烟气黑度(林格曼黑度)/级	1	—		—
一氧化碳(CO)/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	—	80	100	50
氯化氢(HCl)/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	—	50	60	10
镉、铊及其化合物(以 Cd + Tl 计)/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	—	0.1 (测定均值)		0.05
锑、砷、铅、铬、钴、铜、锰、镍及其化合物(以 Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni 计)/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	—	1.0 (测定均值)		0.5
二噁英类/( $\text{ngTEQ} \cdot \text{m}^{-3}$ )	—	0.1 (测定均值)		0.1
HF/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	—	—		1
测定值标准化基准	标态含氧量为 6% 干烟气	标态含氧量为 11% 干烟气		标态含氧量为 11% 干烟气

通过以上的对比,综合考虑污泥火电厂掺烧可能产生大气污染物排放风险,污泥火电厂协同焚烧大气污染物排放标准建议应满足表 11 的要求。

其中,烟尘、烟气黑度、二氧化硫、氮氧化物以及汞及其化合物,这五项指标的限值取自《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011);一氧化碳、



氯化氢、镉、铊及其化合物,锑、砷、铅、铬、钴、铜、锰、镍及其化合物,二噁英类这几项指标的限值取自《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014);氟化氢的限值取自欧盟 2000/76/EC;臭气浓度指标限值取自《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—2018)。

表 11 污泥火电厂协同焚烧大气污染物排放标准

Tab. 11 Emission standard of air pollutants for sludge co-incineration in thermal power plant

控制项目		限值
烟尘/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		20(测定均值)
烟气黑度(格林曼黑度)/级		1(测定值)
一氧化碳/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		80(小时均值)
氮氧化物/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		100(小时均值)
二氧化硫/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		50(小时均值)
氯化氢/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		50(小时均值)
汞及其化合物(以 Hg 计)/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		0.03(测定均值)
镉、铊及其化合物(以 Cd + Tl 计)/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		0.1(测定均值)
锑、砷、铅、铬、钴、铜、锰、镍及其化合物/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		1.0(测定均值)
二噁英类/( $\text{ngTEQ} \cdot \text{m}^{-3}$ )		0.1(测定均值)
氟化氢/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		1(测定均值)
臭气浓度	20 m 排气筒	4 000(测定均值)
	25 m 排气筒	6 000(测定均值)
	30 m 排气筒	10 000(测定均值)
	35 m 排气筒	15 000(测定均值)
	40 m 排气筒	20 000(测定均值)
	50 m 排气筒	40 000(测定均值)
	≥60 m 排气筒	60 000(测定均值)

4.2 灰渣的处理处置

① 炉渣

燃煤锅炉掺烧污泥焚烧发电产生的炉渣、脱硫石膏,作为一般工业固废综合利用;综合利用不畅时,运至灰场分区碾压堆存,执行《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》(GB 18599—2001)的有关规定。

② 飞灰

燃煤发电厂中的飞灰即粉煤灰,一般作为工业固废进行综合利用。在粉煤灰质量标准方面,《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB 1596—1979)对粉煤灰的分级及相应质量标准进行了规定,确保了粉煤灰利用过程中的工程质量。随着对粉煤灰性能认识的不断深入,粉煤灰的利用已经从节约水泥的

角度转变为粉煤灰是水泥和混凝土的重要组分,因此该标准在 1991 年、2005 年、2017 年进行了修订。

另外,《电厂粉煤灰渣排放与综合利用技术通则》(GB/T 15321—1994)对电厂粉煤灰综合利用评价指标、利用类别和管理要求进行了规定,《硅酸盐建筑制品用粉煤灰》(JC/T 409—2016)对用于硅酸盐建筑制品用粉煤灰的技术要求等进行了规定。以粉煤灰为原料的产品方面,国家和行业层面针对不同的应用出台了不同的标准。例如,《矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥及粉煤灰硅酸盐水泥》(GB 1344—1999)、《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)对粉煤灰水泥的强度、技术要求进行了规定。《粉煤灰混凝土应用技术规范》(GB/T 50146—2014)、《用于耐腐蚀水泥制品的碱矿渣粉煤灰混凝土》(GB/T 29423—2012)等对混凝土合理应用粉煤灰提出了具体要求,以节约水泥,提高工程质量。粉煤灰可以用于生产建材制品,相关标准有包括《蒸压粉煤灰多孔砖》(GB 26541—2011)、《蒸压粉煤灰空心砖和空心砌块》(GB/T 36535—2018)、《粉煤灰混凝土小型空心砌块》(JC/T 862—2008)等。此外,一些行业和省份根据需求,制定了粉煤灰用于建材及其制品的标准。

除了建筑行业外,其他领域也有一些标准规程。例如,《水工混凝土掺用粉煤灰技术规范》(DL/T 5055—2007)对各类水电水利工程掺用粉煤灰的混凝土进行规定;山西省地方标准《粉煤灰与煤矸石混合生态填充技术规范》(DB 14/T 1217—2016)对粉煤灰用于露天矿坑和沟壑填充以及生态恢复提出了要求。内蒙古地方标准《硅钙渣粉煤灰稳定材料路面基层应用规范》(DB 15/T 1225—2017)促进了粉煤灰应用于道路工程中。《石油企业粉煤灰综合利用技术要求》(SY/T 7290—2016)对石油企业的粉煤灰排放、储存、运输和综合利用进行了规定。另外,在冶金领域,《氧化铝生产用粉煤灰标准样品》(GSB 04—3263—2015)促进了粉煤灰的精细化和高值化利用。

总体而言,粉煤灰的用途集中在建材及其制品方面。污泥火电厂掺烧后不应影响火电厂炉渣和粉煤灰的原处置或综合利用路径。原则上,污泥火电厂掺烧后产生的粉煤灰,应按《危险废物鉴别标准通则》(GB 5085.7—2019)进行鉴定,属于危险废物的,按危险废物处置;不属于危险废物的,可按原路



径处理和综合利用。

## 5 思考和建议

污泥进入电厂锅炉掺烧发电,不仅可为电厂增加经济效益,还大大减轻了污泥填埋对环境造成的污染,是污泥无害化处置的有效路径之一。为了使行业的发展更加健康和规范化,对污泥火电厂掺烧的泥质要求、掺烧比,以及可能产生的二次污染等关键控制性指标进行系统性的思考并提出如下建议:

① 泥质中的污染物指标,建议可依据《城镇污水处理厂污泥泥质》(GB 24188—2009)的项目和限值进行要求。由于汞的毒性和挥发性,对总汞的限值要求适当严格,应满足总汞 $<15\text{ mg/kg}$ 干污泥的要求。

② 关于污泥含水率和掺烧比,建议在煤粉炉掺烧的污泥以干化污泥为主,当污泥含水率 $\leq 40\%$ 且掺烧比 $\leq 5\%$ 时,对锅炉运行以及污染物排放影响不大。在流化床中也可以掺烧脱水污泥,当污泥含水率 $\leq 80\%$ 且掺烧比 $\leq 10\%$ 时,对锅炉运行以及污染物排放影响不大。

③ 关于烟气排放指标,综合考虑污泥火电厂掺烧可能产生大气污染物排放风险,应结合《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)、《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)、欧盟垃圾焚烧标准 2000/76/EC、《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—2018)的指标要求,综合制定相应的排放标准。

④ 污泥火电厂掺烧后不应影响火电厂炉渣和粉煤灰的原处置或综合利用路径。原则上,污泥火电厂掺烧后产生的炉渣粉煤灰,应按《危险废物鉴别标准》(GB 5085.7—2019)进行鉴定,属于危险废物的,按危险废物处置;不属于危险废物的,可按原路径处理和综合利用。

## 参考文献:

- [1] 李德波,孙超凡,冯斌全,等. 300 MW 燃煤电厂污泥掺烧技术研究及应用[J]. 浙江电力,2019,38(7): 109-114.  
LI Debo, SUN Chaofan, FENG Binqun, *et al.* Investigation and application of sewage sludge co-combustion in a 300 MW coal-fired boiler[J]. Zhejiang Electric Power,2019,38(7):109-114(in Chinese).
- [2] 李建锋,周宏. 中国300 MW 等级循环流化床锅炉机组与煤粉锅炉机组可靠性对比与分析[J]. 中国电力,2016,49(1):14-18,22.  
LI Jianfeng, ZHOU Hong. Analysis and comparison on reliability of 300 MW circulating fluidized bed boiler units and pulverized coal boiler units [J]. Electric Power,2016,49(1):14-18,22(in Chinese).
- [3] 王海豹,连瑞静. 电站用循环流化床锅炉与煤粉锅炉的比较[J]. 内蒙古石油化工,2007(8):312.  
WANG Haibao, LIAN Ruijing. Comparison of circulating fluidized bed boiler and pulverized coal boiler for power plant[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry,2007(8):312(in Chinese).
- [4] 叶江明. 电厂锅炉原理及设备[M]. 北京:中国电力出版社,2005.  
YE Jiangming. Principles and Equipment of Power Plant Boilers[M]. Beijing: China Electric Power Press,2005 (in Chinese).
- [5] 孙伟,王岩,揭其良,等. 300 MW 机组锅炉燃煤耦合生物质发电的可行性研究[J]. 电站系统工程,2019,35(4):11-14.  
SUN Wei, WANG Yan, JIE Qiliang, *et al.* Feasibility study of coal-biomass fired boiler for 300 MW unit[J]. Power System Engineering, 2019, 35(4): 11-14 (in Chinese).
- [6] 李欢,李洋洋,金宜英. 国内外电厂混烧污泥的烟气污染控制标准比较[J]. 中国给水排水,2012,28(14):33-37.  
LI Huan, LI Yangyang, JIN Yiyang. Comparison of Chinese and foreign flue gas pollution control standards for co-combustion of sludge and coal in power plants [J]. China Water & Wastewater,2012,28(14):33-37 (in Chinese).
- [7] 王国华,孙晓,张辰,等. 污水污泥送火力发电厂焚烧的环境风险研究进展[J]. 给水排水,2006,32(6): 20-23.  
WANG Guohua, SUN Xiao, ZHANG Chen, *et al.* Review on the environmental hazards during the co-combustion of coal and sewage sludge in the power plants[J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(6): 20-23 (in Chinese).
- [8] 张成,朱天宇,殷立宝,等. 100 MW 燃煤锅炉污泥掺烧试验与数值模拟[J]. 燃烧科学与技术,2015,21(2):114-123.  
ZHANG Cheng, ZHU Tianyu, YIN Libao, *et al.* Field test and numerical simulation for co-combustion of sludge in a 100 MW coal fired boiler[J]. Combustion Science and Technology,2015,21(2):114-123(in Chinese).

- [9] 李鐸. 300 MW 等级燃煤电站锅炉污泥掺烧的试验研究[J]. 电力与能源, 2015, 36(4): 574-576.  
LI E. Experimental study of sludge-coal blending combustion in 300 MW coal-fired boiler[J]. Power & Energy, 2015, 36(4): 574-576 (in Chinese).
- [10] 董亦华, 钱轶晟. 电厂污泥掺烧关键影响因素分析及有关建议[J]. 上海节能, 2018(11): 861-867.  
DONG Yihua, QIAN Yizheng. Relative suggestions on key influencing factors of sludge mixed burning at power plant[J]. Shanghai Energy Conservation, 2018(11): 861-867 (in Chinese).
- [11] 刘政艳, 郑新梅, 章严韬. 燃煤电厂掺烧市政污泥工程大气污染分析[J]. 环境影响评价, 2017, 39(6): 34-38.  
LIU Zhengyan, ZHENG Xinmei, ZHANG Yantao. Analysis and research on air pollution of municipal sludge and coal co-firing power plants [J]. Environmental Impact Assessment, 2017, 39(6): 34-38 (in Chinese).
- [12] 岳峻峰, 邹磊, 张恩先. 燃煤电厂掺烧污泥的影响及制粉系统优化分析[J]. 化工管理, 2019(1): 69-71.  
YUE Junfeng, ZOU Lei, ZHANG Enxian. Research status of coal and sewage sludge blending combustion in power plant[J]. Chemical Enterprise Management, 2019(1): 69-71 (in Chinese).
- [13] 丁玲. 上海某电厂污泥掺烧试验的全过程分析[J]. 环境科技, 2018, 31(6): 25-28.  
DING Ling. Whole process analysis of sludge blending combustion test in a power plant in Shanghai [J]. Environmental Science and Technology, 2018, 31(6): 25-28 (in Chinese).
- [14] 张峰. 上海燃煤电厂污泥焚烧试验及环保可行性研究[J]. 西南给排水, 2014(3): 6-12.  
ZHANG Feng. Shanghai coal-fired power plant sludge incineration test and environmental protection feasibility study [J]. Southwest Water & Wastewater, 2014(3): 6-12 (in Chinese).
- [15] 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).
- [16] 邱旻昊. 循环流化床焚烧城市污水处理厂污泥的探讨[J]. 污染防治技术, 2013, 26(4): 44-46.  
QIU Minhao. Discussion on circulating fluidized bed incineration of municipal sewage sludge [J]. Pollution Control Technology, 2013, 26(4): 44-46 (in Chinese).
- [17] 洪扬生, 黄亚继, 许建国. 循环流化床燃煤锅炉污泥掺烧试验研究[J]. 能源与环境, 2015(5): 8-10.  
HONG Yangsheng, HUANG Yaji, XU Jianguo. Experimental study on sludge blending of circulating fluidized bed coal-fired boiler [J]. Energy and Environment, 2015(5): 8-10 (in Chinese).
- [18] 吴浪, 李畅. 掺烧污泥对电厂锅炉的影响[J]. 锅炉制造, 2014(5): 14-17.  
WU Lang, LI Chang. The influence of mixed incineration of sludge in power plant boiler [J]. Boiler Manufacturing, 2014(5): 14-17 (in Chinese).

作者简介: 孟春霖 (1978 - ), 男, 湖北黄冈人, 本科, 高级工程师, 长期从事污水污泥处理的技术、管理工作。

E-mail: beijingmen@126.com

收稿日期: 2020-04-19

修回日期: 2020-05-11

(编辑: 丁彩娟)

科学调水, 依法管水, 安全供水