DOI: 10.19666/j.rlfd.202503040

燃煤机组掺烧烟气干化污泥能耗特性试验研究

李 源[1]，马 仑[2]，周海远[1]，马 帅[1]，陈科峰[1]，王留锋[1]，陈 青[1]
（1. 润电能源科学技术有限公司，河南 郑州 450052；
2. 武汉理工大学安全科学与应急管理学院，湖北 武汉 430070）

［摘 要］污泥掺烧是破解污泥围城难题的重要方法之一。针对某 350 MW 超临界燃煤机组，开展烟气干化污泥掺烧现场试验，分析污泥掺烧量、机组负荷对系统运行和能耗的影响，利用抽取的锅炉尾部烟气干化湿污泥，干化后污泥被烟气携带入炉协同焚烧。结果表明：湿污泥处理量与干化所需的烟气温度、流量呈正相关，干化 11 t/h 湿污泥需要消耗 597 ℃锅炉烟气 71 t/h；随着污泥掺烧比例的增加，锅炉效率有所下降，机组厂用电率则有所上升；污泥掺烧时，锅炉效率下降主要由排烟热损失增加导致，机械不完全燃烧热损失和灰渣物理显热损失增加为次要因素；机组厂用电率上升的主要原因是污泥干化系统电耗偏大，并且机组厂用电率上升量中污泥掺烧系统分摊了大部分；锅炉效率下降和机组厂用电率上升共同导致机组供电燃煤耗率上升，其中机组厂用电率上升的影响更加明显；在机组负荷 262 MW 和污泥掺混质量比 8.76%（污泥含水率 83%）工况下，锅炉效率下降 0.260%，机组厂用电率增加 0.466%，机组供电燃煤耗率增加 2.38 g/(kW·h)。该结论可为燃煤机组耦合烟气干化污泥发电系统能耗评估与优化提供参考。

［关 键 词］燃煤机组；烟气干化污泥；锅炉效率；厂用电率；燃料/燃煤耗率

［引用本文格式］李源，马仑，周海远，等. 燃煤机组掺烧烟气干化污泥能耗特性试验研究[J]. 热力发电，2026，55(1)：169-176.
LI Yuan，MA Lun，ZHOU Haiyuan，et al. Experimental investigation on energy consumption characteristics of co-firing sludge dried by flue gas in a coal-fired power unit[J]. Thermal Power Generation，2026，55(1)：169-176.

Experimental investigation on energy consumption characteristics of co-firing sludge dried by flue gas in a coal-fired power unit

LI Yuan[1], MA Lun[2], ZHOU Haiyuan[1], MA Shuai[1], CHEN Kefeng[1], WANG Liufeng[1], CHEN Qing[1]
(1. Rundian Energy Science and Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China;
2. School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Co-firing sludge is one of the important approaches to address the challenges of urban sludge accumulation. The field test of co-firing sludge dried by flue gas was conducted in a 350 MW supercritical coal-fired power unit to investigate the effects of blending amount and unit load on system operation and energy consumption. Wet sludge was dried using extracted boiler tail flue gas, with the dried sludge subsequently carried into the furnace for co-combustion. The results show that a positive correlation exists between the wet sludge amount and the temperature/flow rate of drying flue gas. Drying 11 t/h wet sludge required 71 t/h flue gas at 597 ℃. As the sludge blending ratio rose, the boiler thermal efficiency decreased, while the auxiliary power consumption ratio increased. The rise in sensible heat loss in exhaust gas mainly led to the decline in boiler thermal efficiency, and the rises in both unburned carbon heat loss in residue and sensible heat loss in residue were secondary factors. The rise in auxiliary power consumption ratio was primarily attributed to the high power consumption of the sludge

收 稿 日 期：2025-03-11 修 回 日 期：2025-04-16 接 受 日 期：2025-04-17
基 金 项 目：国家重点研发计划项目（2024YFB4106103）
Supported by：National Key Research and Development Program (2024YFB4106103)
第一作者简介：李源（1990），男，博士，高级工程师，主要研究方向为固废无害化处置与资源化利用，ylee2009@163.com。
通信作者简介：马仑（1990），男，博士，研究员，主要研究方向为低碳清洁燃烧与能源高效利用，malun3g@126.com。

drying system, with sludge co-combustion system dominating the rise in auxiliary power consumption ratio. The rise in net coal consumption rate was caused by the decline in boiler thermal efficiency and the rise in auxiliary power consumption ratio, and the rise in auxiliary power consumption ratio contributed more significantly. At 262 MW and with a sludge blending mass ratio of 8.76% (sludge moisture fraction: 83%), the boiler thermal efficiency decreased by 0.260%, the auxiliary power consumption ratio increased by 0.466%, and the net coal consumption rate increased by 2.38 g/(kW·h). The study provides a reference foundation for the energy consumption evaluation and optimization of co-firing sludge dried by flue gas in a coal-fired power unit.

Key words: coal-fired power unit; sludge dried by flue gas; boiler efficiency; auxiliary power consumption ratio; fuel/coal consumption rate

随着我国城镇化水平不断提高，污水处理过程中产生的污泥产量也逐年增长。城市污泥成分十分复杂，含有重金属、有机污染物、病原体和寄生虫等有害物质[1]，严重威胁社会环境和居民健康。实施污泥无害化处置与资源化利用是推动城市可持续发展和落实减污降碳目标的重要任务。燃煤耦合污泥发电技术借助成熟的煤电高效发电系统和污染物集中治理设备，能够无害化、减量化、资源化、规模化消纳城市污泥，具有处理能力强、利用效率高、污染物排放低等优势[2]，主要涵盖污泥无预处理直接耦合、污泥蒸汽干化耦合和污泥烟气干化耦合等技术类型[3]。

湿污泥普遍具有含水率高、灰分高、热值低的特点，湿污泥直接掺烧易发生制粉系统堵塞等问题，严重影响锅炉正常运行[2]。将污泥含水率由 80%干化至小于 40%，是提高污泥着火燃烧性能、热能利用效率和规模化处置水平的重要手段[4-7]。近年来，国内外已在燃煤机组掺烧干污泥方面开展了一定的技术研究和工程实践。煤与干污泥掺混会增加混合燃料的着火温度和燃尽温度，同时降低其燃烧效率和可磨性[8-10]。任少辉等[11]模拟研究了烟气干燥污泥的过程，表明高温低速烟气的干燥效率是低温高速烟气的 2.67 倍。肖懿等[12]实验分析了污泥热解特性及含碳官能团演化过程，发现污泥热解转化率为 0.40~0.70 时，污泥热解速率加速，污泥中含碳官能团加速发生热解转化。丁先等[13]通过模拟旋流燃烧器内煤/干污泥掺混燃烧行为，发现污泥掺烧会促进挥发分燃烧阶段，小比例掺烧可提前焦炭燃烧阶段，大比例掺烧则推迟焦炭燃烧阶段。Tan 等人[14]模拟研究了煤粉炉内半干污泥/干污泥的掺烧特性，当掺烧比例大于 10%时，炉内着火和燃烧稳定性明显下降，降低污泥含水率有助于改善炉内燃烧状况和燃烧效率。陈林峰等[15]针对切圆燃烧锅炉分层掺混干污泥的燃烧特性开展模拟研究，发现 F 层燃烧器掺烧含水率 40%污泥，可以基本维持炉内燃烧温度并有利于减少 NO_x 排放。何璐等[16]模拟研究对冲燃烧锅炉掺烧含水率 40%污泥的混燃特性，发现掺烧比例 10%时，炉内整体燃烧温度下降约 10 ℃，而掺烧比例 15%时，炉内各受热面温度明显下降且污染物排放显著增加。刘铭宇等[17]利用 EBSILON 软件对某 660 MW 燃煤耦合蒸汽干化污泥发电系统进行热力学分析，发现污泥掺烧会增 加锅炉和干燥设备的烟损失，导致系统烟效率下降，并建议干化污泥含水率控制在小于 50%。王一坤等[18]针对 300 MW 燃煤锅炉掺烧烟气干化污泥开展热力学模拟研究，发现抽取的烟气温度越高，锅炉运行参数受影响越小，并推荐取烟位置选择在锅炉低温过热器出口。此外，污泥烟气干化过程中生成的少量二噁英可在炉内高温环境下降解，当干污泥掺烧比例 6%时，锅炉常规污染物、二噁英和重金属均满足环保排放标准[19]。

尽管污泥蒸汽干化系统因布置灵活、处置规模大等特点广泛应用于国内外工程项目，但是污泥烟气干化在工程投资和运行成本方面更具优势[6]。当前，国内外已开始尝试采用燃煤耦合烟气干化污泥发电技术规模化处置污泥，然而关于机组耦合烟气干化污泥发电系统能耗的研究相对较少并且多集中在锅炉效率层面[18]。同时，基于电厂效率法的能耗计算方法只能反映“混合燃料”的消耗，无法准确体现真实“煤”的消耗，因此本文采用真实“煤”耗率计算方法[20-21]并明确污泥掺烧分摊的厂用电份额，探究不同工况条件下烟气干化污泥掺烧对机组能耗的影响规律。

1 试验及研究方法

1.1 燃料特性

试验用燃料包括贫煤和湿污泥，其工业分析及元素分析见表 1，其中湿污泥的含水率为 83%。

1.2 试验系统与工况

研究选取某 350 MW 超临界燃煤机组为试验对象，通过现场试验研究烟气干化污泥掺烧对机组能耗的影响。锅炉型号 HG-1163/25.4-PM1，为超临界

直流、一次再热、对冲燃烧方式，配置 20 支低 NO_x 旋流燃烧器和 5 台中速磨煤机，采用正压直吹式制粉系统。汽轮机型号 CC350/272.9—24.2/1.1/0.4/566/566，为超临界、三缸双排汽、凝汽式。

图 1 为锅炉掺烧烟气干化污泥工艺流程。污泥干化研磨机结合了球磨机和风扇磨煤机结构进行集成设计，集污泥干燥、研磨、制粉等功能于一体，湿污泥额定处理量为 11 t/h。试验期间，抽取锅炉尾部高温再热器入口烟气和脱硝系统入口烟气进行混合，湿污泥与混合烟气一起进入干化研磨机，发生强烈的传热、传质、粉碎等过程，湿污泥转变为干污泥颗粒。干污泥颗粒在烟气的携带作用下，经过增压风机加压后送入污泥燃烧器，再进入炉内掺混燃烧。

表 1 燃料样品工业分析与元素分析

Tab.1 Proximate and ultimate analysis of the fuel samples

燃料	工业分析（收到基）/%				元素分析（收到基）/%					$Q_{ar,net}$/(kJ kg^{-1})
	M	V	FC	A	C	H	O	N	S	
贫煤	7.20	12.28	49.45	31.07	53.77	2.26	3.69	0.80	1.21	19 820
湿污泥（含水率为 83%）	83.30	4.37	4.96	7.37	4.97	0.67	2.75	0.79	0.15	30

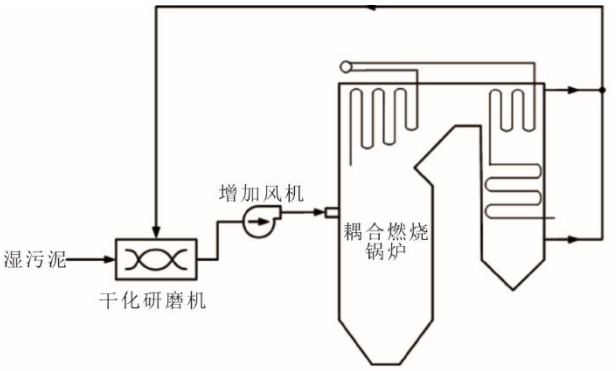


图 1 锅炉掺烧烟气干化污泥工艺流程

Fig.1 Flow chart of co-firing sludge dried by flue gas in a boiler

为研究不同工况条件下烟气干化污泥耦合发电系统的性能，机组负荷设定为 262、310 MW，湿污泥掺烧量设定为 0、5、8、11 t/h。试验期间，保持相同机组负荷下锅炉氧量和主/再热蒸汽温度维持不变。同时，为确保湿污泥干化后具有相近的着火/燃烧性能，将污泥干化研磨机出口温度设定为 220 ℃。鉴于湿污泥采用锅炉烟气进行干化并将干化后污泥送入炉内掺烧，污泥掺烧对汽轮机及热力系统影响较小，本文忽略污泥掺烧对汽轮机热耗率的影响。

1.3 计算方法

由于污泥水分大、灰分高、热值低，煤与污泥掺混会降低入炉燃料品质。基于电厂效率法计算系统能耗时，将煤与污泥作为一种“混合燃料”，表征了“混合燃料”的消耗，但无法准确计算“煤”的消耗，更难以全面评估系统能耗水平。图 2 为燃煤耦合烟气干化污泥发电系统能量平衡图。结合相关研究[20-22]，定义机组燃料耗率为系统每生产单位电能所消耗的“煤+污泥”折算标煤量，定义机组燃煤耗率为系统每生产单位电能所消耗的“煤”折算标煤量，基于正平衡法，可得：

$$b_f = \frac{m_c Q_c + m_s Q_s}{29.308P} \tag{1}$$

$$b_c = \frac{m_c Q_c}{29.308P} \tag{2}$$

式中：b_f 为机组燃料耗率，g/(kW·h)；b_c 为机组燃煤耗率，g/(kW·h)；m_c 为煤消耗量，t/h；m_s 为污泥消耗量，t/h；Q_c 为煤低位发热量，kJ/kg；Q_s 为污泥低位发热量，kJ/kg；P 为系统发电功率，MW。根据式(1)和式(2)，可得：

$$b_c = \left(1 - \frac{\phi_e}{100}\right) b_f \tag{3}$$

$$\phi_e = \frac{\phi_m Q_s}{(100 - \phi_m) Q_c + \phi_m Q_s} \times 100\% \tag{4}$$

$$\phi_m = \frac{m_s}{m_c + m_s} \times 100\% \tag{5}$$

式中：ϕ_e 为污泥掺混能量比，%；ϕ_m 为污泥掺混质量比，%。

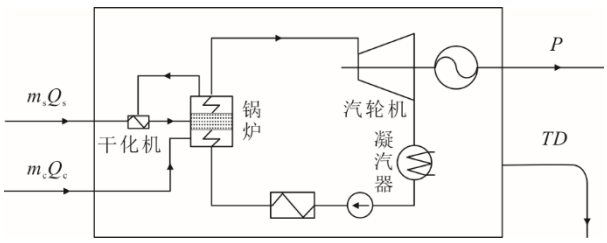


图 2 燃煤耦合烟气干化污泥发电系统能量平衡图

Fig.2 Energy balance diagram of co-firing coal and sludge dried by flue gas in a power unit

基于电厂效率法，机组发电/供电燃料耗率可以表示为：

$$b_{\mathrm{f,f}}=\frac{\eta_{\mathrm{HR}}}{29.308\times\dfrac{\eta}{100}\times\dfrac{\eta_{\mathrm{gd}}}{100}} \tag{6}$$

$$b_{\mathrm{g,f}}=\frac{b_{\mathrm{f,f}}}{1-\dfrac{L}{100}} \tag{7}$$

式中：$b_{\mathrm{f,f}}$为机组发电燃料耗率，g/(kW·h)；$b_{\mathrm{g,f}}$为机组供电燃料耗率，g/(kW·h)；η_{HR}为汽轮机热耗率，kJ/(kW·h)；η为锅炉效率，%；η_{gd}为管道效率，%；L为机组厂用电率，%。

根据式(3)，机组发电/供电燃煤耗率表示为：

$$b_{\mathrm{f,c}}=\left(1-\frac{\phi_{\mathrm{e}}}{100}\right)b_{\mathrm{f,f}} \tag{8}$$

$$b_{\mathrm{g,c}}=\left(1-\frac{\phi_{\mathrm{e}}}{100}\right)b_{\mathrm{g,f}} \tag{9}$$

式中：$b_{\mathrm{f,c}}$为机组发电燃煤耗率，g/(kW·h)；$b_{\mathrm{g,c}}$为机组供电燃煤耗率，g/(kW·h)。机组厂用电率L包括污泥分摊的厂用电率和煤分摊的厂用电率两部分，其计算式可以表示为：

$$L=\frac{P_{\mathrm{cy}}}{P}\times100\% \tag{10}$$

$$L_{\mathrm{s}}=\frac{P_{\mathrm{s}}}{P}\times100\% \tag{11}$$

$$P_{\mathrm{s}}=P_{\mathrm{zy,s}}+P_{\mathrm{gy,s}} \tag{12}$$

$$P_{\mathrm{gy,s}}=\left(P_{\mathrm{cy}}-P_{\mathrm{zy,s}}-P_{\mathrm{zy,c}}-P_{\mathrm{gy,fg}}\right)\frac{\phi_{\mathrm{e}}}{100}+P_{\mathrm{gy,fg}}\frac{\phi_{\mathrm{fg}}}{100} \tag{13}$$

$$\phi_{\mathrm{fg}}=\frac{\phi_{\mathrm{m}}V_{\mathrm{fg,s}}}{(100-\phi_{\mathrm{m}})V_{\mathrm{fg,c}}+\phi_{\mathrm{m}}V_{\mathrm{fg,s}}}\times100\% \tag{14}$$

$$L_{\mathrm{c}}=L-L_{\mathrm{s}} \tag{15}$$

式中：P_{cy}为机组厂用电功率，MW；P_{s}为污泥分摊的厂用电功率，MW；$P_{\mathrm{zy,s}}$为污泥专用的厂用电功率，MW；$P_{\mathrm{gy,s}}$为煤/污泥共用的归属污泥的厂用电功率，MW；$P_{\mathrm{zy,c}}$为煤专用的厂用电功率，MW；$P_{\mathrm{gy,fg}}$为煤/污泥共用的烟气系统厂用电功率，MW；L_{s}为污泥分摊的厂用电率，%；L_{c}为煤分摊的厂用电率，%；ϕ_{fg}为污泥燃烧生成的烟气占总烟气的体积比，%；$V_{\mathrm{fg,s}}$为每千克污泥燃烧生成的湿烟气体积（标况下），m^3/kg；$V_{\mathrm{fg,c}}$为每千克煤燃烧生成的湿烟气体积（标况下），m^3/kg。

2 结果与讨论

2.1 烟气干化污泥掺烧对系统运行的影响

表 2 为不同工况条件下耦合系统运行参数。由表 2 可以看出，污泥干化所需的混合烟气温度/流量均随着污泥掺烧量的增加而增加。湿污泥在干化研磨机内的传热传质过程会消耗大量烟气热量，特别是湿污泥中水分的蒸发过程。当污泥处理量为 5~11 t/h 时，干化研磨机入口烟温为 433~597 ℃，入口烟气流量约为 57~71 t/h。由于试验过程中设定干化研磨机出口温度为 220 ℃，污泥干化研磨机进口混合烟气参数主要与污泥处理量相关，与机组负荷基本无关。干化研磨机及增压风机的总电流随着污泥处理量的增加而增加，这是由于污泥研磨制粉、气力输送过程消耗大量电能导致的。

表 2 不同工况条件下耦合系统运行参数

Tab.2 Operating parameters of the coupling system under different conditions

项目	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
机组负荷/MW	262	262	262	262	310	310	310	310
湿污泥掺烧量/(t·h^{-1})	0	5	8	11	0	5	8	11
湿污泥掺混质量比/%	0	4.18	6.52	8.76	0	3.58	5.61	7.56
抽取高温烟气温度/℃		620.52	621.21	621.84		679.32	680.05	680.91
抽取中温烟气温度/℃		336.11	337.19	337.88		340.63	341.72	342.98
抽取混合烟气温度/℃		433.09	522.94	596.57		433.43	522.05	596.09
抽取混合烟气流量/(t·h^{-1})		57.07	64.19	71.03		57.34	64.01	70.81
干化研磨机出口温度/℃		220.67	220.96	219.31		220.89	219.12	220.09
干化系统总电流/A	0	38.11	52.46	63.35	0	38.09	52.44	63.37
炉内燃烧温度/℃	1 217	1 202	1 198	1 194	1 279	1 262	1 255	1 250
锅炉 NO_x 质量浓度（标况下，下同）/(mg·m^{-3})	594.6	582.9	576.8	570.1	571.3	562.8	557.7	549.3
锅炉 SO_2 质量浓度（标况下，下同）/(mg·m^{-3})	3 223	3 225	3 218	3 227	3 245	3 248	3 252	3 241
锅炉排烟温度/℃	140.12	141.64	142.50	143.31	145.67	146.97	147.71	148.42

污泥掺烧后，炉内燃烧温度有所降低，锅炉 NO_x 排放量有所减少，锅炉 SO_2 排放量基本不变，锅炉排烟温度有所增加。由于污泥低位发热量接近于 0 且污泥干化过程中产生的水蒸汽被烟气携带一起

进入炉内，总体来看，污泥掺烧无法减少煤的消耗，更多的是降低掺混燃料的品质，从而降低炉内燃烧温度并同时增加锅炉湿烟气量。与此同时，采用抽炉烟方式干化污泥，大量再循环烟气进入炉膛，又进一步降低炉内燃烧温度并增加锅炉湿烟气量。锅炉湿烟气量增加会缩短烟气与受热面之间的接触时间，导致烟气热量无法充分传递，从而造成锅炉排烟温度上升。污泥掺烧会降低锅炉 NO_x 排放量，一方面是因为炉内燃烧温度降低有助于减少热力型 NO_x 生成，另一方面是由于污泥中燃料-N 以挥发分-N 为主，挥发分快速释放过程对炉内 NO_x 有一定的还原作用[22]。虽然污泥硫含量小于煤，但污泥水分较大，污泥的干基折算硫分略大于煤，导致污泥掺烧对锅炉 SO_2 排放影响不大。

2.2 烟气干化污泥对锅炉效率的影响

根据《电站锅炉性能试验规程》（GB/T 10184）标准计算锅炉效率，并将污泥干化研磨机划入锅炉效率计算边界之内。图 3 为烟气干化污泥掺烧对锅炉效率的影响。可以看出，污泥掺烧会明显降低锅炉效率，且锅炉效率下降量随着污泥掺烧量的增加而增加并随着机组负荷的增加而减小。在锅炉各项热损失中，污泥掺烧会明显增加排烟热损失 q_2，略微增加机械不完全燃烧热损失 q_4 和灰渣物理显热损失 q_6，而其他项热损失（化学不完全燃烧热损失 q_3，锅炉散热损失 q_5）基本不受污泥掺烧的影响。污泥掺烧时，锅炉排烟温度有所上升，导致排烟热损失 q_2 有所增加。炉内燃烧温度降低不利于煤/污泥的燃尽，同时锅炉湿烟气量增加在一定程度上会缩短炉内颗粒停留时间，进一步降低煤/污泥的燃尽率，从而增加机械不完全燃烧热损失 q_4。由于污泥灰分较大，污泥掺烧会增加锅炉灰/渣排出量，从而增加灰渣物理显热损失 q_6。污泥掺烧后，外来热量与燃料低位发热量之比 q_{ex} 有所增加，这主要是因为污泥干化系统所消耗的电能会以外来热量的形式输入锅炉。可以发现，污泥掺烧比例越高，锅炉各项热损失受污泥掺烧的影响越明显。由图 3 可见：在机组负荷 262 MW 下，污泥掺烧量为 5~11 t/h 时，锅炉效率下降 0.122%~0.260%；在机组负荷 310 MW 下，污泥掺烧量为 5~11 t/h 时，锅炉效率下降 0.102%~0.218%。

2.3 烟气干化污泥掺烧对厂用电率的影响

图 4 为烟气干化污泥掺烧对机组厂用电率的影响。随着污泥掺烧量的增加，机组厂用电率有所增加；并且机组负荷越低，机组厂用电率增加幅度越明显。污泥掺烧时，一是污泥的干化研磨和气力输送过程会增加干化研磨机和增压风机的电耗；二是入炉混合燃料品质下降会增加锅炉湿烟气量，从而增加锅炉烟气系统的电耗。机组厂用电率增加量中污泥分摊的厂用电率增加量占比较大，而煤分摊的厂用电率增加量占比较小。由于污泥掺混质量比不足 10%且污泥掺混能量比不足 0.1%，污泥掺烧分摊的烟气侧、汽水侧共用部分电耗相对较小，但是烟气干化污泥过程中干化研磨机、增压风机的电耗较大，导致污泥专用的厂用电功率较大，从而明显增加污泥分摊的厂用电率。污泥掺烧后，煤分摊的厂用电率略有增加，主要是由于污泥掺烧后机组发电效率下降导致燃煤消耗量略有增加造成的。在机组负荷 262 MW 下，污泥掺烧量为 5~11 t/h 时，机组厂用电率增加 0.255%~0.466%；在机组负荷 310 MW 下，污泥掺烧量为 5~11 t/h 时，机组厂用电率增加 0.216%~0.395%。

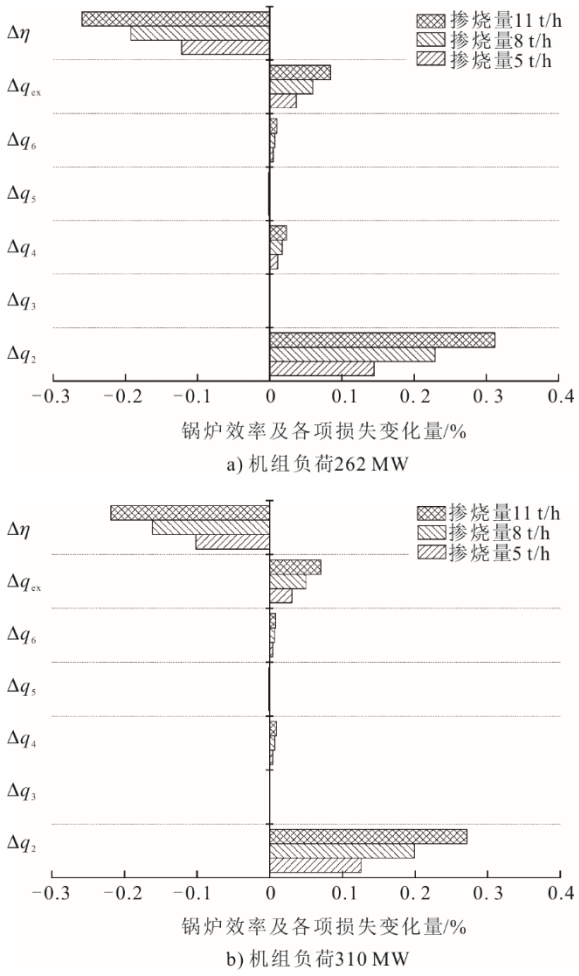


图 3 污泥掺烧对锅炉效率的影响

Fig.3 Effect of co-firing sludge on boiler thermal efficiency

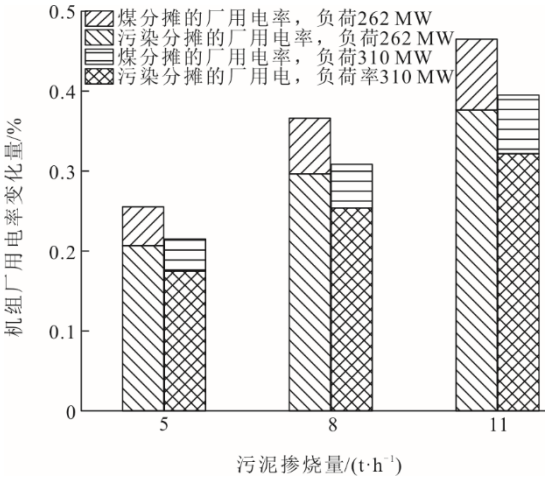


图 4 污泥掺烧对机组厂用电率的影响
Fig.4 Effect of co-firing sludge on auxiliary power consumption ratio

2.4 烟气干化污泥掺烧对机组能耗的影响

图 5 为烟气干化污泥掺烧对机组燃料耗率的影响。可以看出，污泥掺烧量越大，机组发电/供电燃料耗率上升量越大；并且机组负荷越小，机组发电/供电燃料耗率上升量也越大。污泥掺烧后，锅炉效率下降导致机组发电燃料耗率上升，锅炉效率下降和机组厂用电率上升共同造成机组供电燃料耗率上升。可以发现，在机组供电燃料耗率增加量中，机组厂用电率上升对应的供电燃料耗率增加量明显大于锅炉效率下降的影响，这主要是因为污泥烟气干化系统消耗了大量电能。在机组负荷 262 MW 下，污泥掺烧量为 5~11 t/h 时，机组供电燃料耗率增加 1.25~2.42 g/(kW·h)；在机组负荷 310 MW 下，污泥掺烧量为 5~11 t/h 时，机组供电燃料耗率增加 1.04~2.02 g/(kW·h)。

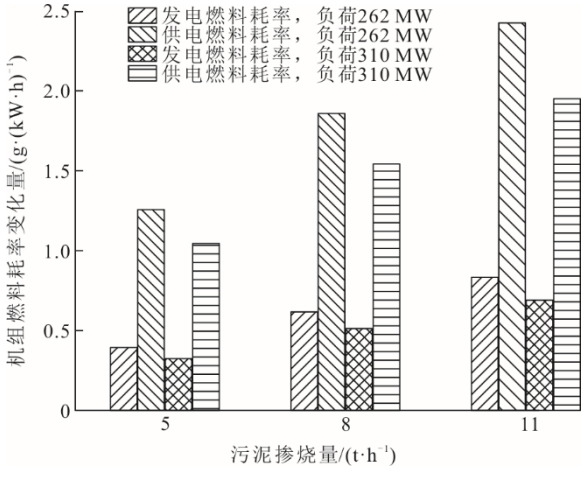


图 5 污泥掺烧对机组燃料耗率的影响
Fig.5 Effect of co-firing sludge on fuel consumption rate

图 6 为烟气干化污泥掺烧对机组燃煤耗率的影响。由于污泥掺烧后锅炉效率的下降和机组厂用电率的上升，机组发电/供电燃煤耗率有所上升。在污泥掺烧量较大且机组负荷较小时，机组发电/供电燃煤耗率增加量较大。由于污泥掺混能量比不足 0.1%，根据式(8)和式(9)，机组发电/供电燃煤耗率基本与机组发电/供电燃料耗率保持一致的变化规律，并且机组发电/供电燃煤耗率略微小于机组发电/供电燃料耗率。由于污泥干化系统电耗较大，机组厂用电率上升对应的供电燃煤耗率增加量也明显大于锅炉效率下降的影响。在机组负荷 262 MW 下，污泥掺烧量为 5~11 t/h 时，机组供电燃煤耗率增加 1.23~2.38 g/kW·h；在机组负荷 310 MW 下，污泥掺烧量为 5~11 t/h 时，机组供电燃煤耗率增加 1.02~1.98 g/kW·h。

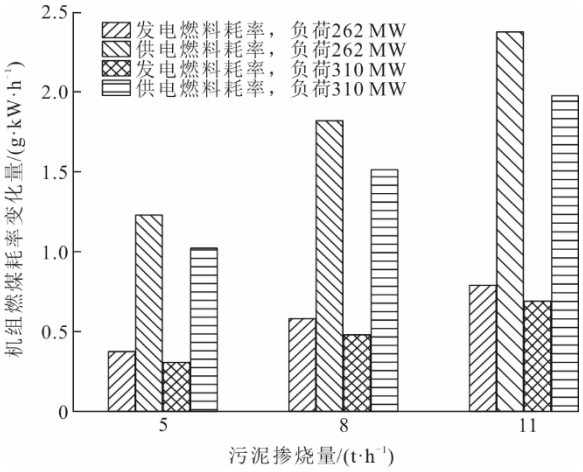


图 6 污泥掺烧对机组燃煤耗率的影响
Fig.6 Effect of co-firing sludge on coal consumption rate

3 结 论

本文通过在某 350 MW 燃煤机组上开展试验，深入分析了烟气干化污泥掺烧对系统运行和机组能耗的影响，得出以下结论。

1）污泥干化研磨机入口烟气温度和流量随污泥处理量的增加而增加，污泥处理量为 11 t/h 时，干化研磨机入口烟温和流量为 597 ℃和 71 t/h。同时，烟气干化污泥掺烧会降低炉内燃烧温度，减少锅炉 NO_x 排放，基本不影响锅炉 SO_2 排放并增加锅炉排烟温度。

2）随着污泥掺烧比例的增加，锅炉效率有所下降，且各项热损失也随之上升。其中，排烟热损失的显著增加是导致锅炉效率降低的主要因素，而机械不完全燃烧热损失和灰渣物理显热损失的增加

则是次要因素。在机组负荷 262 MW 下，污泥掺混质量比 8.76%（污泥含水率 83%）时，锅炉效率下降 0.260%。

3）污泥掺烧会增加机组厂用电率，并且其随着污泥掺烧比例的增加而增加。由于污泥烟气干化时干化研磨机和增压风机的电耗较大，污泥分摊的厂用电率增加量明显大于煤分摊的厂用电率增加量。在机组负荷 262 MW 下，污泥掺混质量比 8.76%（污泥含水率 83%）时，机组厂用电率增加 0.466%。

4）机组发电/供电燃料耗率和发电/供电燃煤耗率均随着污泥掺烧比例的增加而增加。由于污泥掺混能量比不足 0.1%，机组供电燃煤耗率与供电燃料耗率相差不大，锅炉效率下降和机组厂用电率上升导致机组供电燃煤耗率上升，并且机组厂用电率上升对应的供电燃煤耗率增加量明显大于锅炉效率下降的影响。在机组负荷 262 MW 下，污泥掺混质量比 8.76%（污泥含水率 83%）时，机组供电燃煤耗率增加 2.38 g/(kW·h)。

［参 考 文 献］

［1］ MARKOWICZ A, BONDARCZUK K, CYCOŃ M, et al. Land application of sewage sludge: response of soil microbial communities and potential spread of antibiotic resistance[J]. Environmental Pollution, 2021, 271: 116317.

［2］ 李帅英, 武宝会, 王一坤, 等. 燃煤机组污泥掺烧项目工程设计[J]. 热力发电, 2020, 49(4): 150-154.
LI Shuaiying, WU Baohui, WANG Yikun, et al. Engineering design of sludge blending combustion project for coal-fired units[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(4): 150-154.

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

［4］ YAO H, NARUSE I. Combustion characteristics of dried sewage sludge and control of trace-metal emission[J]. Energy & Fuels, 2005, 19(6): 2298-2303.

［5］ IM H, KIM C G. Characterization of dried sewage sludge for co-firing in coal power plant by using thermal gravimetric analysis[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2017, 19(3): 1044-1051.

［6］ 颜莹莹, 黄荣敏, 王保龙, 等. 燃煤机组掺烧城市污泥发电的干化工艺对比[J]. 中国给水排水, 2023, 39(24): 53-58.
YAN Yingying, HUANG Rongmin, WANG Baolong, et al. Comparison of drying processes of coal-fired generating units mixed with municipal sludge[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(24): 53-58.

［7］ 张伟军, 彭赛楠, 王东升. 污泥高效脱水微界面调控原理与技术进展[J]. 环境工程学报, 2025, 19(1): 21-39.
ZHANG Weijun, PENG Sainan, WANG Dongsheng. Advances in micro-interface regulation theory and technology for efficient sludge dewatering[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2025, 19(1): 21-39.

［8］ AKDAG A S, ATAK O, ATIMTAY A T, et al. Co-combustion of sewage sludge from different treatment processes and a lignite coal in a laboratory scale combustor[J]. Energy, 2018, 158: 417-426.

［9］ 贾子秀, 王志超, 屠竞毅, 等. 市政污泥与煤配伍(磨制)焚烧特性试验[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(9): 51-60.
JIA Zixiu, WANG Zhichao, TU Jingyi, et al. Experiment on the co-burning characteristics of municipal sludge blending with coal (grinding)[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(9): 51-60.

［10］ LUO Z, XU D, MA Y, et al. Experimental study on co-firing of coal and brewery wastewater sludge[J]. Applied Sciences, 2020, 10(21): 7589.

［11］ 任少辉, 向家涛, 张世红, 等. 城市污泥干燥动力学特性及其与生物质共气化热电联产系统模拟[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 1-13.
REN Shaohui, XIANG Jiatao, ZHANG Shihong, et al. Drying kinetics of sewage sludge and simulation of its co-generation system with biomass co-gasification[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 1-13.

［12］ 肖懿, 王理明, 李东阳, 等. 市政污泥热解特性及含碳官能团演化过程分析[J]. 环境工程学报, 2023, 17(5): 1589-1598.
XIAO Yi, WANG Liming, LI Dongyang, et al. Pyrolysis characteristics of municipal sludge and transformation of carbon containing functional groups during pyrolysis process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(5): 1589-1598.

［13］ 丁先, 吴何来, 臧剑南, 等. 燃煤耦合城市污泥燃烧特性与NO_x生成行为模拟[J]. 动力工程学报, 2022, 42(3): 207-214.
DING Xian, WU Helai, ZANG Jiannan, et al. Numerical simulation on co-combustion characteristics and NO_x formation behavior of coal with municipal sludge[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(3): 207-214.

［14］ TAN P, MA L, XIA J, et al. Co-firing sludge in a pulverized coal-fired utility boiler: combustion characteristics and economic impacts[J]. Energy, 2017, 119: 392-399.

［15］ 陈林峰, 朱凌君, 李芳芹, 等. 污泥掺烧方式对燃煤锅炉燃烧影响的模拟研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(10): 122-129.
CHEN Linfeng, ZHU Lingjun, LI Fangqin, et al. Simulation study of the effect of sludge blending method on the combustion of coal-fired boilers[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(10): 122-129.

［16］ 何璐, 潘小天, 仲兆平, 等. 630 MW 机组超临界直流锅炉煤粉与污泥混烧数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(增刊 2): 188-195.
HE Lu, PAN Xiaotian, ZHONG Zhaoping, et al. Numerical simulation of pulverized coal and sludge mixed combustion in a 630 MW supercritical direct current boiler[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(Suppl.2): 188-195.

［17］ 刘铭宇, 陈志董, 张浩儒, 等. 燃煤电站掺烧污泥热力学与经济性分析[J]. 热力发电, 2024, 53(4): 73-83.
LIU Mingyu, CHEN Zhidong, ZHANG Haoru, et al. Thermodynamic and economic analysis of co-firing dried sludge in coal-fired power plants[J]. Thermal Power

Generation, 2024, 53(4): 73-83.
[18] 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 Yikun, LIU Honggang, ZHOU Lingyu, et al. Effects of flue gas extraction position on sludge-coal blending combustion generation units[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 43-48.
[19] 叶骥, 陈创庭, 邹祥波, 等. 700 MW 燃煤锅炉耦合污泥发电的工程应用[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(9): 61-68.
YE Ji, CHEN Chuangting, ZOU Xiangbo, et al. Engineering application of coal & sludge co-fired power generation on a 700 MW coal-fired boiler[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(9): 61-68.
[20] 李源, 杜学森, 毛睿, 等. 燃煤机组直接掺烧污泥能耗特性试验研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(7): 84-92.
LI Yuan, DU Xuesen, MAO Rui, et al. Experimental study on energy consumption characteristic of direct co-firing sludge in a coal-fired power unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(7): 84-92.
[21] 李源, 郭志成, 赵鑫平, 等. 燃煤机组耦合蒸气干化污泥能耗特性试验[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 95-101.
LI Yuan, GUO Zhicheng, ZHAO Xinping, et al. Experiment of energy consumption characteristic in a coal-fired power unit coupled with steam desiccation sludge[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 95-101.
[22] WU X, SONG Q, ZHAO H, et al. Synergetic effect of biomass volatiles on NO reduction and the influence of K/Na on it[J]. Fuel, 2015, 158: 634-640.

（责任编辑　杨嘉蕾）