

# 燃煤机组直接掺烧污泥能耗特性试验研究

李源<sup>1</sup>, 杜学森<sup>1</sup>, 毛睿<sup>1</sup>, 岑可法<sup>2</sup>

(1. 润电能源科学技术有限公司, 河南 郑州 450052; 2. 浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 针对某1 000 MW燃煤机组开展污泥掺烧性能试验研究, 分析机组负荷、污泥含水率、掺烧比例等对机组能耗的影响。为核算入炉燃煤的消耗率, 定义了燃煤耦合污泥发电机组的燃煤耗率。结果表明: 机组掺烧污泥使得混合燃料品质下降, 导致锅炉效率降低且厂用电率上升, 从而造成机组供电燃料耗率增加, 其中, 排烟热损失和固体未完全燃烧热损失增加是造成锅炉效率降低的主要原因, 风机系统和脱硫系统电耗上升则是造成厂用电率上升的主导因素; 随着机组负荷的降低、污泥含水率的增加和污泥掺烧比例的增加, 机组供电燃煤耗率变化量呈现明显增加趋势, 当机组掺烧污泥含水率为40%、掺烧比例为4%时机组供电燃煤耗率降低0.921 g/(kW·h), 当机组掺烧污泥含水率 $\geq 60\%$ 时机组供电燃煤耗率呈现增加趋势。

**关键词:** 燃煤机组; 污泥掺烧; 锅炉效率; 厂用电率; 能耗

中图分类号: X701 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.07.012

[引用本文格式] 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 Xue-sen, 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.

## Experimental Study on Energy Consumption Characteristic of Direct Co-firing Sludge in a Coal-fired Power Unit

LI Yuan<sup>1</sup>, DU Xue-sen<sup>1</sup>, MAO Rui<sup>1</sup>, CEN Ke-fa<sup>2</sup>

(1. Rundian Energy Science and Technology Co., Ltd., Zhengzhou, China, Post Code: 450052;

2. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027)

**Abstract:** The performance experimental study of co-firing sludge was conducted in a 1 000 MW coal-fired power unit. The effects of unit load, sludge moisture content and blending proportion on energy consumption of power unit were analyzed. In order to calculate the coal consumption rate in the furnace, the coal consumption rate of the sludge-coupled power unit was defined. The results show that co-firing coal and sludge decrease the quality of the blended fuel, leading to the reduction of the boiler thermal efficiency, the increase of the auxiliary power consumption rate, and the increase of the fuel consumption rate of unit. The reduction of the boiler thermal efficiency is primarily caused by the increase of sensible heat loss in exhaust flue gas and unburned carbon heat loss in residue. The increase of auxiliary power consumption rate is mainly due to the increases of power consumption rates of the fan system and desulfurization system. With the reduction of unit load and the increase of sludge moisture content and blending proportion, the variation of net coal consumption rate increases obviously. The net coal consumption rate is reduced by 0.921 g/(kW·h) when the sludge moisture content is 40% and the blending proportion is 4%. The net coal consumption rate shows an increasing trend when the sludge moisture content is no less than 60%.

收稿日期: 2021-07-21; 修订日期: 2021-10-15

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(51621005)

Fund-supported Project: Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China(51621005)

作者简介: 李源(1990-), 男, 河南开封人, 润电能源科学技术有限公司高级工程师。

**Key words:** coal-fired power unit, co-firing sludge, boiler thermal efficiency, auxiliary power consumption rate, energy consumption

## 引言

污泥的无害化处置、资源化利用是我国建设绿色低碳循环发展经济体系的重要环节。目前,污泥处置方式主要包括农用堆肥、填埋、建材利用及焚烧等手段<sup>[1]</sup>。其中,污泥焚烧是一种高效无害化污泥处置方式<sup>[2]</sup>。燃煤耦合污泥发电技术是一种实现污泥无害化处置、资源化利用的有效途径,属于污泥焚烧利用方式,具有处理量大、效率高及适应性强等优点<sup>[3-5]</sup>。

部分学者对含水率在8%以内<sup>[6-8]</sup>的干污泥的着火和燃烧特性进行了研究,干污泥着火温度较低但综合燃烧性能较差,其燃烧过程包括脱挥发分、挥发分燃烧和焦炭燃烧等阶段。Tan等人<sup>[9]</sup>和王海川等人<sup>[10]</sup>对煤粉炉掺烧污泥的燃烧特性进行了数值模拟研究,发现掺烧污泥后炉膛温度降低且煤粉燃尽率下降,掺烧少量污泥不影响煤粉燃烧稳定性。曹通等人<sup>[11]</sup>通过现场试验研究了煤粉炉掺烧污泥对锅炉效率的影响,发现锅炉效率随污泥掺烧比例的增加而减小。周凌宇等人<sup>[12]</sup>通过热力计算分析了煤粉炉掺烧污泥对锅炉效率的影响,发现锅炉效率随污泥含水率的增大而降低。Sanger等人<sup>[13]</sup>利用小型鼓泡流化床研究了不同污泥含水率下的 $\text{NO}_x$ 排放特性,发现污泥含水率越小, $\text{NO}_x$ 排放越大。张成等人<sup>[14]</sup>利用数值模拟研究了某100 MW煤粉炉的污泥掺烧特性,发现在同一掺烧比例下,污

泥含水率越低,锅炉燃烧性能越好, $\text{NO}_x$ 排放越高。煤与污泥掺烧时,污泥中Cl元素质量分数影响碱金属的释放<sup>[15]</sup>,加剧受热面结渣与积灰<sup>[16-18]</sup>。此外,现场试验表明,燃煤机组掺烧少量污泥时 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、二恶英及重金属等主要污染物均未发生急剧变化,满足国家环保排放标准<sup>[11,19]</sup>。

目前,燃煤机组耦合污泥发电能耗的研究主要集中在锅炉效率的理论计算与试验方面<sup>[11-12,20]</sup>,而关于掺烧污泥对机组能耗煤耗率影响的研究较少。本研究针对某1000 MW燃煤机组开展污泥掺烧性能试验,分析机组负荷、污泥含水率、掺烧比例等对机组锅炉效率、厂用电率及供电煤耗率的影响。由于常用机组煤耗率很难评价机组掺烧污泥是否节煤,为评估燃煤机组掺烧污泥后入炉燃煤的消耗率,定义了机组燃煤耗率,其代表机组“燃煤”耗率而非“燃料”耗率。

## 1 试验及研究方法

### 1.1 燃料特征

试验用燃煤为劣质烟煤,试验用污泥来自电厂周边污水处理厂产生的污泥。表1为试验用燃料特性,包括烟煤和3种污泥。由于污水处理厂处理工艺不同,入厂污泥的含水率在40%~80%。选用3种典型含水率的污泥进行掺烧,分别为污泥1(含水率40%)、污泥2(含水率60%)、污泥3(含水率80%)。3种污泥的含水率不同,其热值也有明显差异。

表1 燃料特性

Tab. 1 Fuel properties

燃料	工业分析/%				元素分析/%					Cl元素质量 分数/ $10^{-6}$	$Q_{ar,net}/$ $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
	M	VM	FC	A	C	H	O	N	S		
烟煤	15.20	24.95	41.84	18.01	53.01	3.04	9.41	0.70	0.63	198	19.91
污泥1	39.82	22.13	3.94	34.11	12.63	1.51	8.92	2.39	0.62	905	3.46
污泥2	60.41	15.31	2.55	21.73	8.44	1.06	6.29	1.66	0.41	611	1.55
污泥3	79.59	7.54	1.31	11.56	4.02	0.52	3.24	0.85	0.22	306	-0.35

### 1.2 试验系统及工况

在某1000 MW超超临界燃煤机组上,开展污

泥掺烧性能试验。锅炉为DG-3033/26.15-II1型超超临界参数变压直流、一次再热、单炉膛、前后

墙对冲燃烧、尾部双烟道、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构Ⅱ型炉。燃烧系统采用低 $\text{NO}_x$ 旋流燃烧器前后墙对冲布置,每层共8只,前后墙共布置48只。制粉系统为正压直吹式系统,磨煤机采用6台ZGM133N型中速磨辊磨煤机。汽轮机为N1008-25/600/600型超超临界、一次中间再热、冲动式、单轴、四缸四排汽、双背压、纯凝汽式汽轮机。

燃煤机组耦合污泥发电技术可分为污泥直接掺烧和污泥干化耦合<sup>[21]</sup>。该机组采用直接掺烧方式处理污泥。机组输送皮带上专门设置原煤、污泥进料口,原煤与污泥按设定掺混比例经输送带送入制粉系统进行干燥与研磨,产出的粉料由一次风携带进入炉膛发生燃烧反应。在不同机组负荷、污泥含水率、掺烧比例等工况下开展机组掺烧污泥对机组能耗影响的试验研究。其中,机组负荷分别选定为500,750和1 000 MW,污泥含水率分别选定为40%,60%和80%,污泥掺烧比例分别选定为2%,4%和6%。

### 1.3 计算方法

机组掺烧污泥后,入炉燃料品质降低影响锅炉效率和厂用电率,从而造成机组燃料耗率的升高。同时,污泥具有一定的热值,影响机组入炉燃煤量,若污泥热值较高会抵消部分燃煤,若污泥热值偏低会额外多消耗部分燃煤。图1为燃煤耦合污泥发电机组能量平衡图。

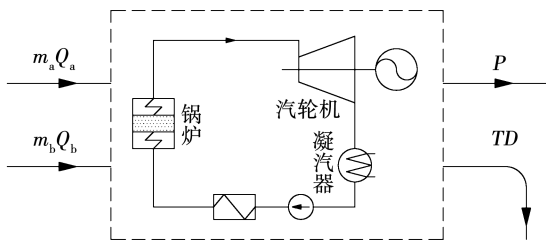


图1 燃煤耦合污泥发电机组能量平衡图

Fig. 1 Energy balance diagram of the coal-fired sludge-coupled power generation unit

根据机组能量平衡图,采用正平衡方法,计算机组燃料耗率与燃煤耗率之间的关系。其中,机组燃料耗率代表机组每生产1度电能所消耗的“燃料”等效标准煤量,机组燃煤耗率代表机组每生产1度电能所消耗的“燃煤”等效标准煤量。机组燃料耗

率、燃煤耗率可以表示为:

$$b_f = \frac{m_a Q_a + m_b Q_b}{P Q_0} \quad (1)$$

$$b_c = \frac{m_a Q_a}{P Q_0} \quad (2)$$

式中: $b_f$ —燃料耗率; $b_c$ —燃煤耗率; $m_a$ —入炉燃煤量; $Q_a$ —入炉燃煤热值; $m_b$ —入炉污泥量; $Q_b$ —入炉污泥热值; $P$ —发电功率。

燃料耗率与燃煤耗率之间的关系可以表示为:

$$b_c = \frac{b_f(1-\phi)Q_a}{(1-\phi)Q_a + \phi Q_b} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{m_b}{m_a + m_b} \quad (4)$$

式中: $\phi$ —污泥掺烧比例。当污泥热值 $Q_b > 0$ 时, $b_c < b_f$ ;当污泥热值 $Q_b = 0$ 时, $b_c = b_f$ ;当污泥热值 $Q_b < 0$ 时, $b_c > b_f$ 。因此,当机组不掺烧污泥时,燃煤耗率等于燃料耗率。

依据DL/T 904-2015《火力发电厂技术经济指标计算方法》,供电燃料耗率计算式为:

$$b_{g,f} = \frac{HR}{Q_0 \times \eta \times \eta_{gd} \times (1-L)} \quad (5)$$

式中: $b_{g,f}$ —供电燃料耗率; $\eta$ —锅炉效率; $\eta_{gd}$ —管道效率( $\eta_{gd} = 99\%$ ); $HR$ —汽轮机热耗率; $L$ —厂用电率; $Q_0$ —标煤热值。

依据GB/T 10184-2015《电站锅炉性能试验规程》,采用反平衡方法,锅炉效率计算式为:

$$\eta = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 - q_{ex}) \quad (6)$$

式中: $q_2$ —排烟热损失; $q_3$ —气体未完全燃烧热损失; $q_4$ —固体未完全燃烧热损失; $q_5$ —锅炉散热损失; $q_6$ —灰渣物理显热损失; $q_{ex}$ —外来热量与燃料热值之比。

汽轮机热耗率受机组负荷、真空度等影响较大,机组直接掺烧污泥时基本不影响汽轮机热耗率,本研究中假定机组掺烧污泥不影响汽轮机热耗率。图2为汽轮机热耗率负荷特性曲线,汽轮机热耗率随机组负荷的升高呈明显降低趋势,符合典型的汽轮机热耗率负荷特性<sup>[22]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 掺烧污泥对机组运行参数的影响

机组掺烧污泥后,入炉燃料品质的下降在一定

程度上会改变机组运行参数。表 2 为不同机组负荷下掺烧污泥前后机组运行参数。其中,炉膛温度为顶层燃烧器与燃尽风层间观火孔位置火焰温度。在不同机组负荷下,掺烧污泥对机组运行参数的影响规律基本一致。机组掺烧污泥后,入炉燃料水分增加且热值降低,燃料干燥所需热风温度有所提升而磨出口温度则有所降低,烟气 H<sub>2</sub>O 质量分数、湿烟气体量及引风机压升均呈增加趋势。另外,机组掺烧污泥后,炉膛温度降低,炉内辐射吸热量减小,炉膛出口烟温上升,并且湿烟气体量增加,从而导致排烟温度上升。由于污泥含氮量大于烟煤,机组掺烧污泥后,NO<sub>x</sub> 质量浓度有所增加。

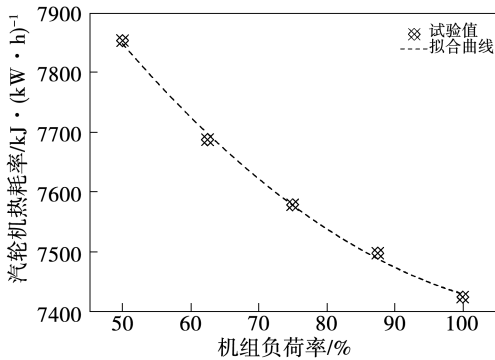


图 2 汽轮机热耗率负荷特性曲线

Fig.2 Load characteristic curve of steam turbine heat rate

表 2 不同机组负荷下机组运行参数

Tab.2 Unit operating parameters at different unit loads

参数	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
机组负荷率/%	50	50	75	75	100	100
污泥掺烧比例/%	0	4	0	4	0	4
污泥含水率/%	-	60	-	60	-	60
磨入口温度/℃	256.5	262.6	272.9	276.5	280.2	283.7
磨出口温度/℃	72.3	69.8	76.3	73.2	77.7	72.1
炉膛温度/℃	1224	1213	1295	1276	1341	1314
烟气 H <sub>2</sub> O 质量分数/%	5.03	5.26	5.46	5.71	5.77	6.04
湿烟气体量/t · h <sup>-1</sup>	2410	2435	3113	3144	3796	3833
排烟温度/℃	123.8	124.9	128.7	129.8	134.0	135.0
引风机压升/Pa	2708	2725	3585	3661	5581	5750
NO <sub>x</sub> 质量浓度/mg · m <sup>-3</sup>	206.8	219.2	225.1	240.1	252.3	268.5

表 3 为不同污泥含水率下掺烧污泥前后机组运行参数。随污泥含水率的增加,入炉燃料品质逐渐

下降,磨入口温度逐渐增加而磨出口温度则逐渐降低,炉膛温度逐渐降低,烟气 H<sub>2</sub>O 质量分数、湿烟气体量、排烟温度、引风机压升均逐渐增加。由于高含水率污泥的含氮量较低,NO<sub>x</sub> 质量浓度随污泥含水率的增加而降低。

表 3 不同污泥含水率下机组运行参数

Tab.3 Unit operating parameters at different sludge moisture contents

参数	工况 3	工况 4	工况 7	工况 8
机组负荷率/%	75	75	75	75
污泥掺烧比例/%	0	4	4	4
污泥含水率/%	-	60	40	80
磨入口温度/℃	272.9	276.5	275.4	277.9
磨出口温度/℃	76.3	73.2	73.9	72.2
炉膛温度/℃	1295	1276	1281	1270
烟气 H <sub>2</sub> O 质量分数/%	5.46	5.71	5.64	5.79
湿烟气体量/t · h <sup>-1</sup>	3113	3144	3138	3149
排烟温度/℃	128.7	129.8	129.4	130.1
引风机压升/Pa	3585	3661	3650	3683
NO <sub>x</sub> 质量浓度/mg · m <sup>-3</sup>	225.1	240.1	250.8	229.8

表 4 为不同污泥掺烧比例下掺烧污泥前后机组运行参数。污泥掺烧比例越高,入炉燃料品质越低,磨入口温度越高而磨出口温度则越低,炉膛温度越低,烟气 H<sub>2</sub>O 质量分数、湿烟气体量、排烟温度及引风机压升均越高。同时,污泥含氮量偏高导致 NO<sub>x</sub> 排放质量浓度随污泥掺烧比例的增加而增加。

表 4 不同污泥掺烧比例下机组运行参数

Tab.4 Unit operating parameters in different sludge blending proportions

参数	工况 3	工况 4	工况 9	工况 10
机组负荷率/%	75	75	75	75
污泥掺烧比例/%	0	4	2	6
污泥含水率/%	-	60	60	60
磨入口温度/℃	272.9	276.5	274.3	279.6
磨出口温度/℃	76.3	73.2	74.8	71.4
炉膛温度/℃	1295	1276	1288	1255
烟气 H <sub>2</sub> O 质量分数/%	5.46	5.71	5.58	5.85
湿烟气体量/t · h <sup>-1</sup>	3113	3144	3128	3160
排烟温度/℃	128.7	129.8	129.2	130.3
引风机压升/Pa	3585	3661	3627	3758
NO <sub>x</sub> 质量浓度/mg · m <sup>-3</sup>	225.1	240.1	232.5	247.4

## 2.2 掺烧污泥对锅炉效率的影响

为分析机组掺烧污泥对锅炉效率的影响,通过性能试验获取机组掺烧污泥前后锅炉效率及各项损失的变化值。图3为不同机组负荷下掺烧污泥对锅炉效率的影响(污泥含水率60%、掺烧比例4%)。在机组负荷50%、75%和100%工况下,掺烧污泥后,锅炉效率降低幅度为0.161%~0.169%。其中,在机组负荷75%时掺烧污泥对锅炉效率影响略小,而在机组负荷50%时掺烧污泥对锅炉效率影响略大。这可能与锅炉效率的负荷特性有关,即中等负荷时锅炉效率最高而低负荷时锅炉效率偏低。在不同机组负荷下,掺烧污泥后,排烟热损失 $q_2$ 和固体未完全燃烧热损失 $q_4$ 均明显增加,其他几项热损失变化较小。排烟热损失 $q_2$ 明显增加,主要是由于锅炉湿烟气量及排烟温度增加造成的;固体未完全燃烧热损失 $q_4$ 明显增加,主要是由于炉膛温度下降引起燃料燃尽率下降造成的;灰渣物理显热损失 $q_6$ 略微增加,主要是由于污泥中灰分较大导致的;外来热量与燃料热值之比 $q_{ex}$ 略微降低,主要是由于外来热量为负值且掺烧污泥后混合燃料热值降低造成的;气体未完全燃烧热损失 $q_3$ 和锅炉散热损失 $q_5$ 变化不明显,主要是因为掺烧前后CO质量浓度和蒸汽量基本无变化。

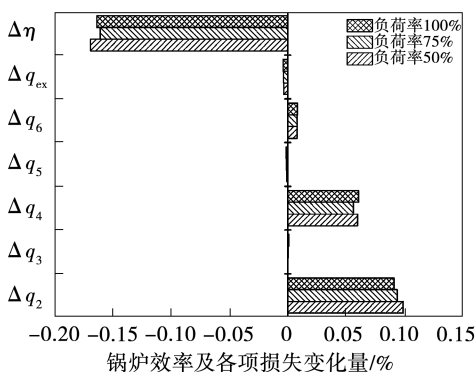


图3 不同机组负荷下掺烧污泥对锅炉效率的影响  
(污泥含水率60%、掺烧比例4%)

Fig. 3 Effect of co-firing sludge on boiler thermal efficiency at different unit loads (sludge moisture content is 60%, blending proportion is 4%)

图4为不同污泥含水率下掺烧污泥对锅炉效率的影响(机组负荷75%、掺烧比例4%)。在污泥含

水率40%、60%和80%工况下,锅炉效率降低幅度为0.152%~0.170%,污泥含水率越高,锅炉效率下降越明显。由于掺烧高含水率污泥时湿烟气量较大且排烟温度较高,排烟热损失 $q_2$ 随污泥含水率的升高而增加。由于掺烧高含水率污泥时混合燃料灰分较低,固体未完全燃烧热损失 $q_4$ 随污泥含水率的升高而降低。此外,排烟热损失 $q_2$ 受污泥含水率影响较固体未完全燃烧热损失 $q_4$ 更为明显,导致锅炉效率随污泥含水率的升高而降低。

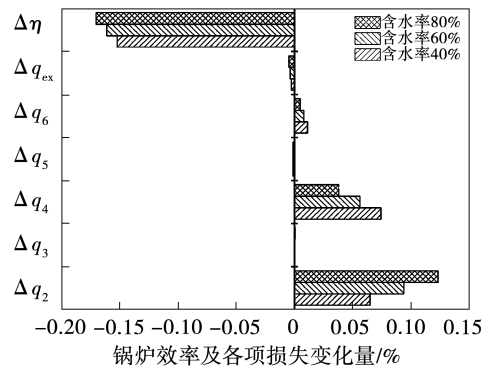


图4 不同污泥含水率下掺烧污泥对锅炉效率的影响(机组负荷75%、掺烧比例4%)

Fig. 4 Effect of co-firing sludge on boiler thermal efficiency at different sludge moisture contents (unit load factor is 75%, blending proportion is 4%)

图5为不同污泥掺烧比例下掺烧污泥对锅炉效率的影响(机组负荷75%、污泥含水率60%)。在污泥掺烧比例2%、4%和6%工况下,锅炉效率降低幅度为0.079%~0.246%,污泥掺烧比例越高,锅炉效率下降越明显。排烟热损失 $q_2$ 和固体未完全燃烧热损失 $q_4$ 均随污泥掺烧比例的增加而增加。污泥掺烧比例越高,湿烟气量越大且排烟温度越高,排烟热损失 $q_2$ 越大。同时,污泥掺烧比例越高,炉膛温度越低,固体未完全燃烧热损失 $q_4$ 也越大。

## 2.3 掺烧污泥对厂用电率的影响

图6为不同机组负荷下掺烧污泥对厂用电率的影响(污泥含水率60%、掺烧比例4%)。在机组负荷50%、75%和100%工况下,掺烧污泥后,厂用电率增加幅度为0.210%~0.294%,机组负荷越低,厂用电率增加越明显。在不同机组负荷下,掺烧污泥后,风机系统和脱硫系统厂用电率增加幅度均较

大,而制粉系统和除尘系统厂用电率增加幅度均较小。入炉混合燃料品质下降时,入磨混合燃料量增加导致制粉系统电耗增加,燃烧所需风量及湿烟气量增加导致风机系统电耗增加,入炉总灰量增加导致除尘系统电耗增加,入炉总硫/氯量增加导致脱硫系统电耗增加。

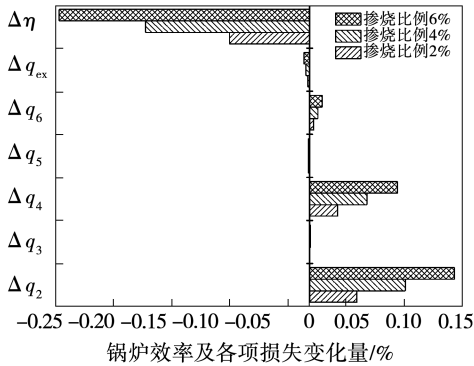


图 5 不同污泥掺烧比例下掺烧污泥对锅炉效率的影响(机组负荷 75%、污泥含水率 60%)

Fig. 5 Effect of co-firing sludge on boiler thermal efficiency in different sludge blending proportions

(unit load factor is 75%, sludge moisture content is 60%)

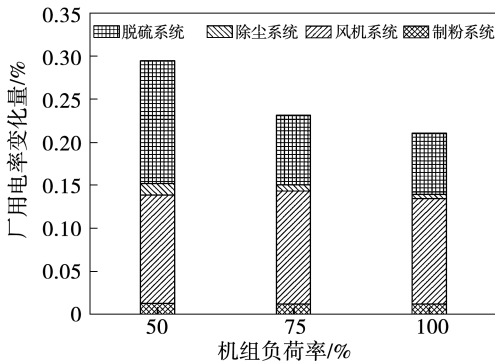


图 6 不同机组负荷下掺烧污泥对厂用电率的影响(污泥含水率 60%、掺烧比例 4%)

Fig. 6 Effect of co-firing sludge on auxiliary power consumption rate at different unit loads (sludge moisture content is 60%, blending proportion is 4%)

图 7 为不同污泥含水率下掺烧污泥对厂用电率的影响(机组负荷 75%、掺烧比例 4%)。在污泥含水率 40%、60% 和 80% 工况下,厂用电率增加幅度为 0.229% ~ 0.232%,厂用电率变化量随污泥含水率变化不明显。风机系统和脱硫系统厂用电率变化量随污泥含水率的增加而增加,这主要是因为掺烧高含水率污泥时锅炉效率较低且湿烟气量较大。脱硫系统厂用

电率变化量随污泥含水率的增加而降低,这主要是因为高含水率污泥的含硫/氯量较低。由于风机系统和脱硫系统厂用电率变化量随污泥含水率变化呈相反趋势,厂用电率变化量基本不随污泥含水率的变化而变化。

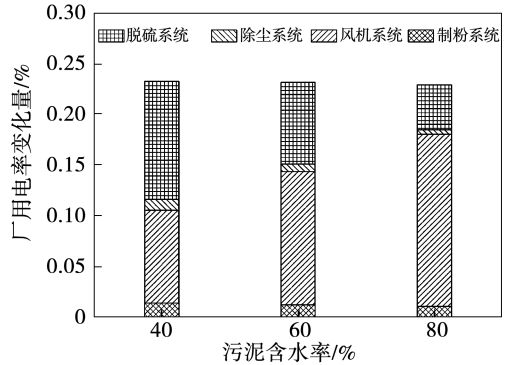


图 7 不同污泥含水率下掺烧污泥对厂用电率的影响(机组负荷 75%、掺烧比例 4%)

Fig. 7 Effect of co-firing sludge on auxiliary power consumption rate at different sludge moisture contents (unit load factor is 75%, blending proportion is 4%)

图 8 为不同污泥掺烧比例下掺烧污泥对厂用电率的影响(机组负荷 75%、污泥含水率 60%)。在污泥掺烧比例 2%、4% 和 6% 工况下,厂用电率增加幅度为 0.114% ~ 0.352%,污泥掺烧比例越高,厂用电率增加越明显。风机系统和脱硫系统厂用电率变化量均随污泥掺烧比例的增加而增加,这主要是因为污泥掺烧比例高时混合燃料品质较差且入炉总硫/氯量较大。

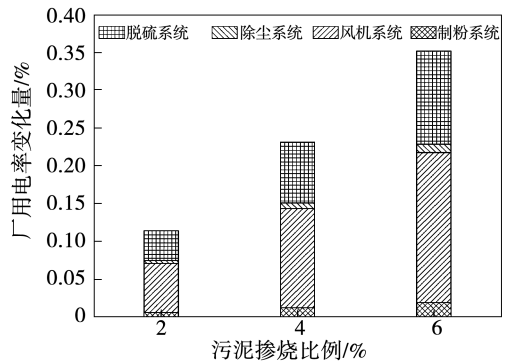


图 8 不同污泥掺烧比例下掺烧污泥对厂用电率的影响(机组负荷 75%、污泥含水率 60%)

Fig. 8 Effect of co-firing sludge on auxiliary power consumption rate in different sludge blending proportions (unit load factor is 75%, sludge moisture content is 60%)

## 2.4 掺烧污泥对机组供电煤耗率的影响

图 9 为不同机组负荷下掺烧污泥对机组供电煤耗率的影响(污泥含水率 60%、掺烧比例 4%)。在机组负荷 50%、75% 和 100% 工况下,掺烧污泥后,机组供电燃料耗率变化幅度为 1.143 ~ 1.518 g/(kW·h),机组供电燃煤耗率变化幅度为 0.208 ~ 0.518 g/(kW·h)。掺烧污泥后,机组供电燃料耗率变化量和供电燃煤耗率变化量均随机组负荷的升高而降低,这主要与机组能耗的负荷特性有关。机组负荷越高,能耗水平越低,加之厂用电率增加量越小,导致机组供电燃料耗率变化量和供电燃煤耗率变化量也越小。

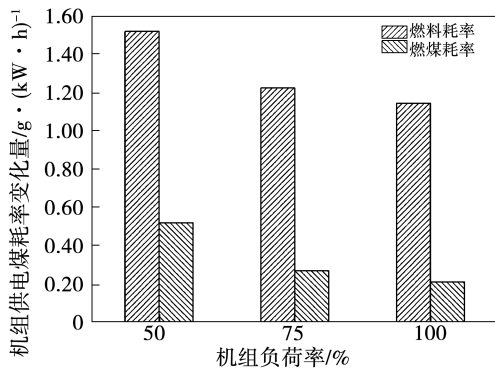


图 9 不同机组负荷下污泥掺烧对机组供电煤耗率的影响(污泥含水率 60%、掺烧比例 4%)

Fig. 9 Effect of co-firing sludge on coal consumption rate at different unit loads (sludge moisture content is 60%, blending proportion is 4%)

图 10 为不同污泥含水率下掺烧污泥对机组供电煤耗率的影响(机组负荷 75%、掺烧比例 4%)。在污泥含水率 40%、60% 和 80% 工况下,机组供电燃料耗率变化幅度为 1.197 ~ 1.244 g/(kW·h),机组供电燃煤耗率变化幅度为 -0.921 ~ 1.462 g/(kW·h)。机组供电燃料耗率变化量随污泥含水率的增加而略微增加,这主要是由于污泥含水率对厂用电率变化量影响较小造成的。机组供电燃煤耗率变化量随污泥含水率的增加而明显增加,这主要是因为高含水率污泥的热值较小。当机组掺烧含水率 40% 的干污泥时,机组燃煤耗率变化量为负值,即机组掺烧干污泥节约了入炉燃煤量。

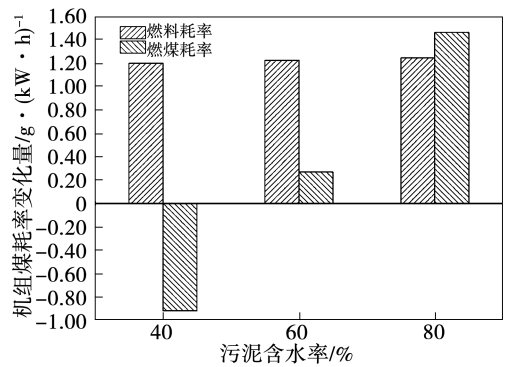


图 10 不同污泥含水率下掺烧污泥对机组供电煤耗率的影响(机组负荷 75%、掺烧比例 4%)

Fig. 10 Effect of co-firing sludge on coal consumption rate at different sludge moisture contents (unit load factor is 75%, blending proportion is 4%)

图 11 为不同污泥掺烧比例下掺烧污泥对机组供电煤耗率的影响(机组负荷 75%、污泥含水率 60%)。在掺烧比例 2%、4% 和 6% 工况下,机组供电燃料耗率变化幅度为 0.600 ~ 1.865 g/(kW·h),机组供电燃煤耗率变化幅度为 0.132 ~ 0.402 g/(kW·h)。机组供电燃料耗率变化量和供电燃煤耗率变化量均随污泥掺烧比例的增加而增加,这主要是因为高污泥掺烧比例时锅炉效率较低且厂用电率较大。

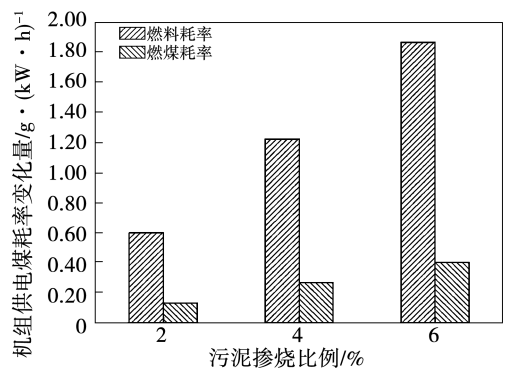


图 11 不同污泥掺烧比例下掺烧污泥对机组供电煤耗率的影响(机组负荷 75%、污泥含水率 60%)

Fig. 11 Effect of co-firing sludge on coal consumption rate in different sludge blending proportions (unit load factor is 75%, sludge moisture content is 60%)

## 3 结 论

本研究针对某 1 000 MW 燃煤机组开展了掺烧

污泥对机组能耗影响的试验研究,分析了机组负荷、污泥含水率、掺烧比例等对机组锅炉效率、厂用电率、供电煤耗率的影响。为衡量入炉燃煤的消耗率,定义了燃煤耦合污泥发电机组的燃煤耗率。主要结论为:

(1) 机组掺烧污泥会造成锅炉效率的下降,其中,排烟热损失和固体未完全燃烧热损失增加较大,其他热损失变化较小。锅炉效率降低量随污泥含水率、掺烧比例的增加而明显降低,随机组负荷变化较小。

(2) 机组掺烧污泥会造成厂用电率的上升,其中,风机系统和脱硫系统厂用电率上升较为明显,制粉系统和除尘系统厂用电率上升较小。厂用电率增加量随机组负荷的增加而减小,随污泥掺烧比例的增加而增大,且随污泥含水率的变化较小。

(3) 机组掺烧污泥会造成机组供电燃料耗率的增加。当机组掺烧污泥含水率为40%时,机组供电燃煤耗率有所下降;当机组掺烧污泥含水率60%~80%时,机组供电燃煤耗率则有所增加。机组供电燃料耗率变化量随污泥含水率变化较小,机组燃煤耗率变化量随污泥含水率的增加而明显增加。机组供电燃料耗率变化量和燃煤耗率变化量均随机组负荷的增加而减小且随污泥掺烧比例增加而增大。

## 参考文献:

[1] 李雄伟,李俊,李冲,等.我国污泥处理处置技术应用现状及发展趋势探讨[J].中国给水排水,2016,32(16):26-30,5.  
LI Xiong-wei, LI Jun, LI Chong, et al. Current application situation and development trend of sludge treatment and disposal technologies in China[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(16): 26-30, 5.

[2] ROY M M, DUTTA A, CORSCADDEN K, et al. Review of biosolids management options and co-incineration of a biosolid-derived fuel[J]. Waste Management, 2011, 31(11): 2228-2235.

[3] NACZIAKIEWICZ J, KOZIOŁ M. Co-combustion of sludge with coal[J]. Applied Energy, 2003, 75(3): 239-248.

[4] LECKNER B, AMAND L E. Co-combustion of sludge with coal or wood[J]. International Journal of Power & Energy Systems, 2004, 24(3): 172-178.

[5] 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.

[6] KIJÓ-KLECKOWSKA A, ŚRODA K, KOSOWSKA-GOLACHOWSKA M, et al. Combustion of pelleted sewage sludge with reference to coal and biomass[J]. Fuel, 2016, 170: 141-160.

[7] 闫云飞,张磊,张力,等.不同氧气浓度和粒径下工业污泥燃烧特性的实验研究[J].热能动力工程,2012,27(6):726-731.  
YAN Yun-fei, ZHANG Lei, ZHANG Li, et al. Experimental study of the combustion characteristics of industrial sludge at various oxygen concentrations and particle diameters[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2012, 27(6): 726-731.

[8] 何艳峰,卓建坤,李水清,等.污水污泥的燃烧特性及动力学研究[J].热能动力工程,2011,26(5):609-614.  
HE Yan-feng, ZHUO Jian-kun, LI Shui-qing, et al. Combustion characteristics and dynamic study of sewage water and sludge[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(5): 609-614.

[9] 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.

[10] 王海川,李德波,曾祥浩,等.污泥掺混煤粉燃烧过程的数值模拟模型适应性研究[J].热能动力工程,2020,35(2):189-196.  
WANG Hai-chuan, LI De-bo, ZENG Xiang-hao, et al. Adaptability of numerical simulation model for the combustion process of sludge mixed with coal[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(2): 189-196.

[11] 曹通,殷立宝,方立军,等.煤粉锅炉协同处置工业污泥现场试验[J].热力发电,2016,45(2):86-90.  
CAO Tong, YIN Li-bao, FANG Li-jun, et al. Field test of collaborative disposal of industrial sludge in pulverized coal boiler[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2): 86-90.

[12] 周凌宇,王一坤,陈钢,等.燃煤机组耦合污泥发电对锅炉运行影响分析[J].热力发电,2020,49(7):77-83.  
ZHOU Ling-yu, WANG Yi-kun, CHEN Gang, et al. Effect of sludge-coal blending combustion on operation of coal-fired boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(7): 77-83.

[13] SANGER M, WERTHER J, OGADA T. NO<sub>x</sub> and N<sub>2</sub>O emission characteristics from fluidised bed combustion of semi-dried municipal sewage sludge[J]. Fuel, 2001, 80(2): 167-177.

[14] 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 Tian-yu, YIN Li-bao, et al. Field test and numerical simulation for co-combustion of sludge in a 100 MW coal fired boiler[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2015, 21(2): 114-123.



- [15] KIM S S, KANG Y S, LEE H D, et al. Release of potassium and sodium species during combustion of various rank coals, biomass, sludge and peats[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2012, 18(6): 2199 - 2203.
- [16] KAMP D E, VAN W L, MORGAN D J. The co-firing of pulverised bituminous coals with straw, waste paper and municipal sewage sludge[J]. *Combustion Science and Technology*, 1996, 121(1 - 6): 317 - 332.
- [17] 魏砾宏, 马婷婷, 杨天华, 等. 污泥/煤混烧灰的结渣特性及矿物质转变规律[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(18): 4697 - 4702.
- WEI Li-hong, MA Ting-ting, YANG Tian-hua, et al. Slagging characteristics and minerals conversion of co-firing ash of coal and sludge at high temperature[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(18): 4697 - 4702.
- [18] 张成, 王丹, 夏季, 等. 煤粉掺烧干化污泥的燃烧特性及能效分析[J]. *热能动力工程*, 2012, 27(3): 383 - 387.
- ZHANG Cheng, WANG Dan, XIA Ji, et al. Combustion characteristics and analysis of the energy efficiency of a coal-fired boiler burning coal diluted and mixed with dried sludge[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2012, 27(3): 383 - 387.
- [19] 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 application 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.
- [20] 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. Research of sludge incineration technology in coal fired power plant[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(3): 137 - 140.
- [21] RULKENS W. Sewage sludge as a biomass resource for the production of energy: overview and assessment of the various options[J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22(1): 9 - 15.
- [22] 刘学亮, 陈胜利, 万超, 等. 间接空冷汽轮机组变工况特性研究[J]. *中国电力*, 2018, 51(4): 108 - 114.
- LIU Xue-liang, CHEN Sheng-li, WAN Chao, et al. Study on off-design performance of indirect air-cooling steam turbine unit[J]. *Electric Power*, 2018, 51(4): 108 - 114.

(姜雪梅 编辑)

## (上接第 69 页)

- [11] 丁国玉, 何小民, 薛冲, 等. 头部及掺混孔对三级旋流器燃烧室出口温度分布影响的试验[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(4): 807 - 813.
- DING Guo-yu, HE Xiao-min, XUE Chong, et al. Experiment on effect of dome and dilution holes on outlet temperature distribution for triple swirler combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(4): 807 - 813.
- [12] 李瑞明, 刘玉英, 等. 驻涡燃烧室主流对凹腔涡流动的影响[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(7): 1483 - 1488.
- LI Rui-ming, LIU Yu-ying, et al. Impact of mainstream on the vortex flow of cavity in trapped vortex combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(7): 1483 - 1488.
- [13] 高志刚, 赵明, 等. 可变几何燃烧室技术发展[J]. *航空制造技术*, 2017(15): 70 - 75.
- GAO Zhi-gang, ZHAO Ming, et al. Development of variable geometry combustor technology[J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2017(15): 70 - 75.
- [14] 颜应文, 李红红, 赵坚行, 等. 双环预混旋流低污染燃烧室数值研究[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(9): 1923 - 1929.
- YAN Ying-wen, LI Hong-hong, ZHAO Jian-xing. Numerical study of low emissions for twin annular premixing swirler combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(9): 1923 - 1929.
- [15] 许全宏, 林宇震, 刘高恩, 等. 航空发动机高温升燃烧室贫油熄火及冒烟性能研究[J]. *航空动力学报*, 2005, 20(4): 636 - 640.
- XU Quan-hong, LIN Yu-zhen, LIU Gao-en. Research on the high-temperature rise combustor lean blow-out and smoke emission characteristics[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2005, 20(4): 636 - 640.

(姜雪梅 编辑)