

DOI: 10.19666/j.rlfed.202308130

330 MW 机组煤粉锅炉耦合油污泥 低负荷燃烧数值模拟与试验研究

张海丹^{1,2}, 张凡志³, 方仙明³, 梁震³, 张光学⁴

(1. 浙江浙能技术研究院有限公司, 浙江 杭州 311121;

2. 浙江省火力发电高效节能与污染物控制技术重点实验室, 浙江 杭州 311121;

3. 浙江浙能电力股份有限公司台州发电厂, 浙江 台州 318016;

4. 中国计量大学能源工程研究所, 浙江 杭州 310018)

[摘要] 针对含油污泥的无害化处置问题, 提出预处理后送入煤粉锅炉与煤粉耦合燃烧的技术路线, 在 330 MW 机组四角切圆锅炉上做了改造, 并进行了含油污泥的热重分析及含油污泥入炉后的数值模拟, 开展了油污泥入炉低负荷稳燃试验。结果表明: 含油污泥具有易着火且热值接近动力煤的特点, 可提高锅炉低负荷稳燃能力; 含油污泥入炉后火焰中心略微下移, 排放的烟气 NO_x 量有所降低; 锅炉最低稳燃负荷率可低至 20.00%, 对应燃烧器层炉膛温度上升 30~50 °C, 煤粉燃烧器火检信号更稳定, 飞灰含碳量从 4.79% 降至 3.80%, 证明了油污泥对低负荷工况下煤粉燃烧的促进作用; 120 MW 负荷下含油污泥入炉后, 锅炉效率提高约 0.23 个百分点, 可降低供电煤耗率约 0.7 g/(kW·h), 含油污泥热值可替代标准煤约 3.7 t/h, 节能效果显著。

[关键词] 含油污泥; 锅炉; 耦合燃烧; 低负荷稳燃

[引用本文格式] 张海丹, 张凡志, 方仙明, 等. 330 MW 机组煤粉锅炉耦合油污泥低负荷燃烧数值模拟与试验研究[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 153-160. ZHANG Haidan, ZHANG Fanzhi, FANG Xianming, et al. Numerical simulation and experimental research on oil sludge co-firing in a 330 MW pulverized-coal boiler at low load condition[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 153-160.

Numerical simulation and experimental research on oil sludge co-firing in a 330 MW pulverized-coal boiler at low load condition

ZHANG Haidan^{1,2}, ZHANG Fanzhi³, FANG Xianming³, LIANG Zhen³, ZHANG Guangxue⁴

(1. Zhejiang Energy R&D Institute Co., Ltd., Hangzhou 311121, China;

2. Zhejiang Key Laboratory of Energy Conservation & Pollutant Control Technology for Thermal Power, Hangzhou 311121, China;

3. Taizhou Power Plant of Zhejiang Zheneng Electric Power Co., Ltd., Taizhou 318016, China;

4. Institute of Energy Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A method was proposed to solve the problem of oil sludge treatment environmentally by sending the pretreated oil sludge into a 330 MW pulverized coal boiler co-firing with coal. The combustion characteristics of the oil sludge were studied by thermogravimetric analysis, and it was proved to be easy to ignite with a high calorific value close to coal, which could improve the boiler's low-load stable combustion ability. Numerical simulation results showed that the combustion center shifted downward slightly after the oil sludge was sent into the boiler, while the NO_x content decreased. The experimental results proved that the minimum stable combustion load rate can be 20.00% by the benefit of oil sludge co-firing. The temperature at the coal-burner layer increased by 30~50 °C and the carbon content of the fly ash decreased from 4.79% to 3.80%. The fire detection analog signal of the coal burner was found to be more stable which validated the positive effect of the oil sludge co-firing at low load condition. The boiler efficiency increased by 0.23 percentage point which reduced the net coal consumption rate by

收稿日期: 2023-08-12

基金项目: 浙能集团科技项目资助 (ZNKJ-2022-015)

Supported by: Scientific and Technological Projects of Zheneng Group (ZNKJ-2022-015)

第一作者简介: 张海丹 (1989), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为锅炉燃烧调整、生物质耦合等, zjpdhd@qq.com。

通信作者简介: 张光学 (1982), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为计算流体力学和燃料的高效清洁利用, zhangguangxue@cjlu.edu.cn。

0.7 g/(kW·h). Moreover, about 3.7 t/h coal was saved at 120 MW load. The method was verified to have a significant energy-saving effect.

Key words: oil sludge; boiler; co-firing; low load stable combustion

浙江省沿海地区的工业企业、港口、油罐、加油站、船舶等在清仓、清理过程中会掺烧大量的含油污泥及含油废水, 本文研究对象主要是石油炼制、油罐清理过程中产生的含油污泥。我国已明确将这类含油污泥定义为危险废物, 危险废物代码主要为废矿物油和含矿物油废物 (HW08) [1]。这类含油污泥主要由乳化油、水、固体悬浮物等混合而成, 具有危害大、处理难度高、处理时效性强等特点 [2]。由于含油污泥成分复杂, 没有任何一种处置方法可以处理所有类型的含油污泥 [3-6]。目前, 我国的油污泥处置方法主要有机械分离 [7]、热解 [8]、热化学清洗 [9]、电化学处理 [10]、脱水法 [11]、生物处理 [12] 以及焚烧法 [13] 这几种。焚烧法作为热处理法的一种, 是一种高效的含油污泥减量化技术, 可以将含油污泥中的石油资源转化为热能 [14], 通常具有处理效率高、场地要求低等特点, 但需对焚烧过程中产生的废气、废渣做进一步处理 [15]。

国内外已有很多学者通过热重或热重红外联用等技术在实验室对油污泥的热解、燃烧过程展开研究, 同时也分析了含油污泥与煤、半焦等燃料的混合燃烧特性 [16]。宋薇等 [17] 分析了油污泥的热解机理, 提出油污泥的热解过程主要包括水分挥发、轻质油挥发、重质油热解、半焦炭化与矿物质分解 5 种反应; 谢磊等 [18] 通过热重分析研究了含油污泥的热解反应动力学, 并分析了粒径的影响; 周雄等 [19] 通过热重-红外联用 (FTIR) 研究含油污泥在 N_2/CO_2 气氛下的热解特性; 吉树鹏等 [20] 分析了不同配比下油污泥和煤混合燃料的挥发份析出特性、着火特性和燃尽性能, 结果表明随油污泥比例增加, 燃料的着火、燃尽温度逐渐降低, 油污泥比例为 40% 时稳燃特性最好; 赵瑞东等 [21] 通过热重-红外联用研究了

低阶煤热解半焦与油污泥混合燃料的燃烧特性, 试验表明油污泥的加入可以改善低挥发分的煤半焦着火, 但另一方面也促进了 NO_x 的生成。

油污泥与其他燃料耦合燃烧技术在国内有一些小规模应用 [22]。贾勇军等 [23] 制定了含油污泥无害化处置方案, 在 4 t/h 工业锅炉上完成了含油污泥与煤的掺烧试验; 赵帅等 [24] 将含油污泥与水、煤粉和分散剂混合制备含油污泥煤浆, 并以水煤浆为参考, 研究了掺配含油污泥对水煤浆浆体性能及燃烧性能的影响; 林炳丞等 [25] 在小型流化床试验台上将含油污泥与煤混烧, 试验结果表明油污泥在小型流化床上的燃烧不充分, 导致 CO 排放质量浓度以及飞灰含碳量偏高; 张文武等 [26] 将高水分的含油污泥雾化后送入 220 t/h 容量的煤粉锅炉中燃烧, 分析了含水率的影响以及锅炉效率的变化。上述研究主要用于小容量的工业锅炉中, 且部分燃料的指标更接近于传统污泥 [27], 相比燃煤电厂常规的污泥掺烧, 本文研究对象为含油污泥。其燃烧特性与污泥完全不同, 将经过预处理的含油污泥送入 330 MW 机组煤粉锅炉中与煤粉耦合燃烧, 达到危废无害化处置的目的, 同时也高效利用了油污泥的热值, 提高锅炉低负荷稳燃能力, 满足深度调峰需求。

1 油污泥燃料特性

对预处理后的油污泥进行取样化验, 按动力煤元素分析及工业分析标准分析了其燃料成分, 结果见表 1。预处理后油污泥挥发分质量分数极高, 计算其干燥无灰基挥发分 V_{daf} 质量分数达到 84.2% 左右, 判断其具有易着火、易燃尽的特点。收到基灰分约为 10.4%, 可见预处理工艺中已将大部分固体油污泥渣去除, 最终送入炉膛的为燃烧特性较好的液态油污泥。

表 1 预处理后油污泥成分分析
Tab.1 Compositional analysis of pretreated oil sludge

样品	工业分析/%				$Q_{net,ar}/$ ($kJ \cdot kg^{-1}$)	元素分析/%				
	$w_{ar}(M)$	$w_{ar}(A)$	$w_{ar}(V)$	$w_{ar}(FC)$		$w_{ar}(C)$	$w_{ar}(H)$	$w_{ar}(N)$	$w_{tar}(S)$	$w_{ar}(O)$
油污泥	12.4	10.4	65.0	12.2	18 000	55.6	5.3	0.5	0.2	15.7

为进一步了解预处理后油污泥的燃烧特性, 对油污泥样品进行热重分析, 并与 0 号柴油以及电厂常用烟煤进行对比, 燃料的失重 (TG) 曲线和失重

速率 (DTG) 曲线如图 1 和图 2 所示。采用美国 EPA2050B 标准消解法测定油污泥燃烧产生的灰渣中重金属含量, 所有重金属元素浸出质量浓度均低

于《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)。因此,燃煤锅炉掺烧含油污泥后产生飞灰不属于危废范畴,不会影响飞灰品质。

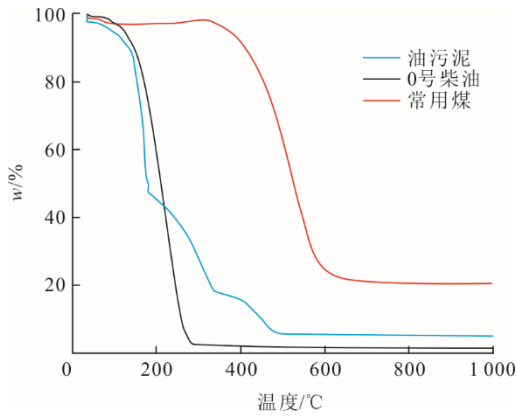


图1 油污泥、0号柴油、常用煤失重(TG)曲线
Fig.1 The weight loss (TG) curves of oil sludge, #0 diesel, and common coal

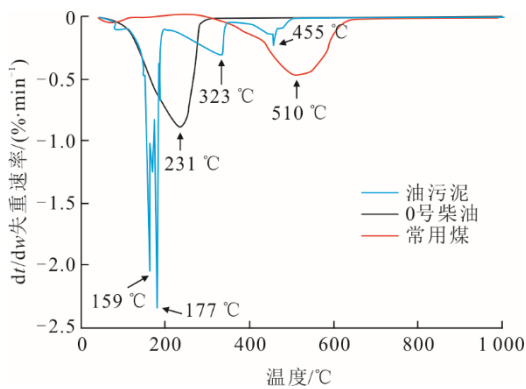


图2 油污泥、0号柴油、常用煤失重速率(DTG)曲线
Fig.2 The weight loss rate (DTG) curves of oil sludge, #0 diesel, and common coal

从图1中可以看出,预处理后油污泥失重曲线与柴油更接近,与常用煤相比失重曲线显著提前。相比0号柴油,油污泥成分更复杂,含有较多重质烃类以及固定碳,因此图2中有多处失重峰,对应温度分别为159、177、323、455 °C,其中159 °C和177 °C处的失重峰最为突出,相比0号柴油的失重峰(231 °C)更为提前,可以认为油污泥的着火点甚至比0号柴油更低,但是燃尽时间更长,油污泥的燃尽温度约为500 °C,而0号柴油在300 °C之前已基本燃烧完全。根据油污泥热值接近动力煤,着火温度低的特点,考虑将其作为锅炉低负荷运行的替代燃料,提高锅炉低负荷运行稳燃特性,同时达到节省燃煤的节能效果。

2 研究对象

2.1 锅炉概况

本文研究对象为1台330 MW 机组亚临界四角切圆锅炉,设计煤种为烟煤。锅炉采用一次中间再热、单炉膛、燃烧器摆动调温、平衡通风、固态排渣、全钢悬吊结构、半露天布置。炉膛上部布置墙式再热器和大节距的过热器分隔屏和后屏,炉膛折焰角上方布置屏式再热器,水平烟道处布置了末级再热器和末级过热器。尾部烟道转向室内布置立式低温过热器,下部布置水平低温过热器和省煤器。锅炉设计煤种和校核煤种均为烟煤,煤质参数见表2。磨煤机采用正压直吹碗式中速磨煤机,主燃烧器区域配置5层(A—E)共20只双尺度低NO_x燃烧器。上层燃烧器上方布置1层燃尽风(OFA)和4层分离型燃尽风(SOFA)。

表2 设计煤种和校核煤种煤质分析
Tab.2 Quality analysis for designed and calibrated coal

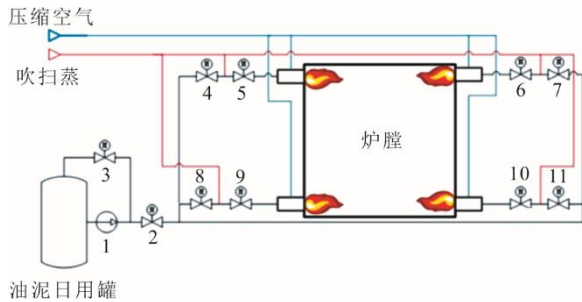
项目	工业分析/%				$Q_{net,ar}$ (kJ·kg ⁻¹)	元素分析/%				
	$w_{ar}(M)$	$w_{ar}(A)$	$w_{daf}(V)$	$w_{ar}(FC)$		$w_{ar}(C)$	$w_{ar}(H)$	$w_{ar}(N)$	$w_{tar}(S)$	$w_{ar}(O)$
设计煤种	12.0	14.0	36.0	47.4	23 000	60.0	3.5	1.0	0.8	8.7
校核煤种	20.0	22.0	39.0	41.5	21 000	54.0	3.6	1.0	0.9	8.5

2.2 油污泥入炉系统

为达到油污泥与煤粉耦合燃烧的目的,对炉膛主燃烧器区域进行油污泥入炉改造,将预处理后的油污泥分为4路同时送入炉膛的4个角,高度方向上位于C、D层燃烧器中间的二次风喷口处。图3为改造后油污泥入炉系统以及油枪位置示意。该系统设计年处理油污泥5万t,满负荷工况下处置油污泥热量可占锅炉总输入热量5%左右。

进厂油污泥经过筛分、调剂、过滤、沉降等一系列预处理工艺后,将其中高热值液态部分贮存在油污泥日用罐中。整个油污泥储存、输送系统通过伴热装置维持温度在80 °C,降低油污泥黏度,满足正常流动需求。油污泥输送系统通过2台并联的油污泥泵(1用1备)将物料输送至炉膛的4个角。油污泥母管安装了油压及流量测量装置,实时监测油污泥压力及流量。油污泥枪采用压缩空气雾化方式将油

污泥雾化后送入炉膛燃烧,其雾化粒径、喷嘴大小采用特殊设计,以保证油污泥的流动性。该系统配置了回油管路以及蒸汽吹扫,防止管道堵塞。



1—油污泥输送泵; 2—油污泥母管隔离阀; 3—油污泥回油阀; 4—1号角进油污泥前隔离阀; 5—1号角进油污泥后隔离阀; 6—2号角进油污泥前隔离阀; 7—2号角进油污泥后隔离阀; 8—3号角进油污泥前隔离阀; 9—3号角进油污泥后隔离阀; 10—4号角进油污泥前隔离阀; 11—4号角进油污泥后隔离阀。

图3 油污泥入炉系统示意

Fig.3 Schematic diagram of the oil sludge feeding system

3 数值模拟

采用 Ansys Fluent 2019 R3 软件平台对锅炉掺烧油污泥的低负荷工况进行数值模拟,主要研究掺烧油污泥前后炉膛温度、氧量以及 NO_x 质量浓度变化。首先利用 Fluent meshing 软件划分为多面体网格,几何模型及网格如图4所示。

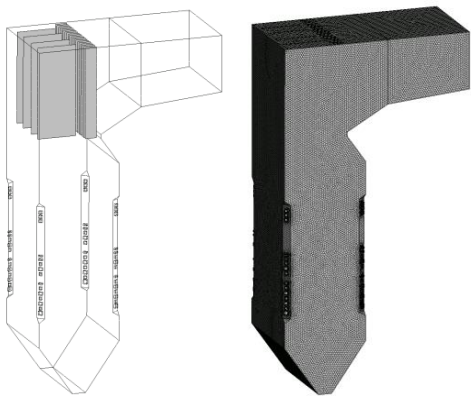


图4 几何模型及网格

Fig.4 Geometric model and mesh generation

根据网格无相关性试验,最终确定网格数量为267万,锅炉燃烧器喷嘴布置如图5所示。采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型计算气相湍流;煤粉颗粒及油污泥液滴的运动、传热及燃烧过程采用双向耦合的离散相模型(DPM),其中挥发分析出采用双方程竞争模型,焦炭表面燃烧采用扩散/动力控制模型;考虑三原子气体的辐射效应、颗粒与气体之间的辐射换热,炉内高温辐射采用 DO 模型。气相燃烧采用非

预混燃烧(PDF)模型,燃料为煤、油污泥。求解器中压力-速度耦合方式采用基于压力的 SIMPLE 算法,对流项采用二阶迎风离散格式,并采用亚松弛的方式加强计算稳定性,迭代至能量及辐射方程残差低于 10^{-6} ,其余方程残差低于 10^{-3} 为止。

数值模拟共分3个工况:1)120 MW 不投油污泥工况;2)120 MW 投油污泥工况;3)投油污泥70 MW 最低稳燃负荷工况。工况设置与后续低负荷油污泥掺烧试验对应。



图5 锅炉燃烧器喷嘴布置

Fig.5 Arrangement of burner nozzles in the boiler

图6、图7分别代表3个工况下的炉膛温度和 NO_x 分布计算结果。模拟结果表明,工况2掺烧了油污泥,主燃区燃煤量减少了5 t/h,火焰中心与工况1相比略微下移,故高温燃烧产物在还原区停留时间增加,同时高温区面积也相应减小,最终使工况2生成的 NO_x 质量浓度降低至 376 mg/m^3 (标准状态,下同),而未掺烧油污泥的工况1生成的 NO_x 质量浓度则为 401 mg/m^3 。工况3机组负荷进一步降至70 MW时,主燃区高温区面积变得非常小,相应生成的 NO_x 质量浓度降至 336 mg/m^3 ,不过燃烧器区域温度仍正常,可维持稳定燃烧。数值模拟的计算结果为低负荷下油污泥对燃烧的促进作用提供了依据,相关参数可与后续低负荷试验数据做对比。

4 低负荷稳燃试验

4.1 试验工况

为验证低负荷工况下数值模拟的计算结果,研究油污泥入炉燃烧对低负荷燃烧稳定性、经济性的实际影响,探索掺烧油污泥后锅炉的不投油稳燃极限,开展了油污泥入炉低负荷稳燃试验。试验工况与上节数

值模拟工况相同,实际负荷、各工况下的燃料比例以及磨煤机组合见表3。试验内容主要有炉膛温度测量,飞灰、炉渣含碳量检测,锅炉运行参数对比等。试验期间工况1与工况2锅炉均采用B、C、D磨煤机组合运行,工况3在减负荷过程中煤量持续下降后,停运D磨煤机,采用B、C磨煤机组合运行。试验所用

煤种煤质指标见表4,干燥无灰基挥发分 $w_{daf}(V)$ 达到44.7%,着火特性较好。试验所用油污泥化验低位发热量在5180kJ/kg左右。各工况下二次风小风门挡板开度保持不变,为了降低低负荷下烟气 NO_x 质量浓度,燃尽风保持全开,主燃烧器区域二次风挡板开度设置较低,二次风挡板设置见表5。

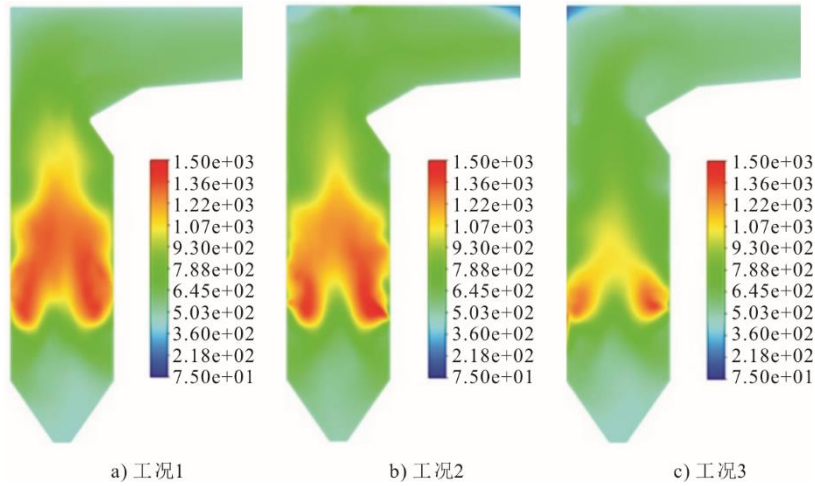


图6 炉膛温度模拟结果(°C)

Fig.6 Simulation results of temperature in furnace (°C)

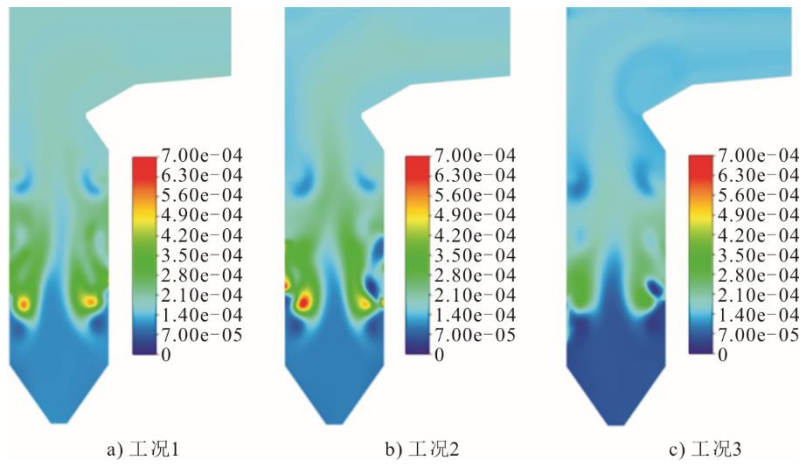


图7 NO_x 质量分数分布模拟结果

Fig.7 Simulation results of NO_x mass concentration distribution

表3 低负荷试验工况
Tab.3 Low load test conditions

试验工况	实际负荷/MW	总煤量/(t·h ⁻¹)	油污泥量/(t·h ⁻¹)	磨煤机组合
工况1	120	56	无	B、C、D
工况2	120	51	10	B、C、D
工况3	68	40	10	B、C

表4 试验煤种煤质分析
Tab.4 Quality analysis for the test coal

项目	工业分析/%				$Q_{net,ar}/$ (kJ·kg ⁻¹)	元素分析/%				
	$w_{ar}(M)$	$w_{ar}(A)$	$w_{daf}(V)$	$w_{ar}(FC)$		$w_{ar}(C)$	$w_{ar}(H)$	$w_{ar}(N)$	$w_{tar}(S)$	$w_{ar}(O)$
数值	12.4	15.3	44.7	40.0	5180	55.7	3.93	1.07	0.63	10.9

表 5 二次风小风门挡板开度
Tab.5 Damper opening of the secondary air

单位: %

项目	SOFA4 燃尽风	SOFA3 燃尽风	SOFA2 燃尽风	SOFA1 燃尽风	OFA 燃尽风	EF 二次风	E 燃烧器周界风	DE 二次风
数值	100	100	100	100	90	50	12	10
项目	D 周界风	CD 二次风	C 周界风	BC 二次风	B 周界风	AB 二次风	A 燃烧器周界风	AA 二次风
数值	14	10	30	10	30	10	12	50

4.2 试验结果

4.2.1 锅炉侧主要运行参数

试验期间锅炉侧主要运行参数见表 6。工况 2 与工况 3 试验期间投油污泥, 因投料期间油压一直无法稳定, 显示油污泥流量在 8~10 t/h 波动, 导致锅炉运行参数同步波动, 锅炉侧运行参数为一段时间内的平均值。根据试验结果, 认为工况 3 达到最低稳燃极限, 负荷约为 68 MW (对应负荷率约 20.00%), 该工况下炉膛燃烧稳定, 锅炉可正常稳定运行, 但受限于脱硝进口温度过低, 两侧平均值仅 271.5 °C, 为满足环保要求, 不再继续降低负荷。对比工况 1 和工况 2, 掺烧油污泥后 NO_x 质量浓度从 425 mg/m³ 降至 376 mg/m³, 与数值模拟结果一致。还有一部分原因可能是油污泥燃料含氮量低, 替代燃煤后生成的燃料型 NO_x 有所减少。

表 6 炉侧运行参数
Tab.6 Operating parameters of the boiler

项目	工况 1	工况 2	工况 3
机组负荷/MW	120	120	68
总煤量/(t·h ⁻¹)	56	51	40
总风量/(t·h ⁻¹)	714	715	650
一次风比例/%	26.8	28.1	22.3
二次风比例/%	73.2	71.9	77.7
热一次风温度/°C	252	251	247
热二次风温度/°C	246	245	240
油污泥量/(t·h ⁻¹)	0	8~10	8~10
主蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	301	297	175
主/再热蒸汽温度/°C	425/407	414/402	402/384
主/再热蒸汽压力/MPa	7.10/1.57	6.70/1.52	4.10/1.52
A/B 侧原烟气 NO _x 质量浓度 (φ(O ₂)=6%) / (mg·m ⁻³)	425	376	343
A/B 侧脱硝反应器进口烟气温度/°C	283	282	273
A/B 侧脱硝反应器进口氧量/%	6.7	7.3	11.4
A/B 侧空气预热器出口温度/°C	121	116	109

4.2.2 掺烧油污泥低负荷稳燃分析

试验期间测量了 C 层燃烧器、D 层燃烧器、SOFA 风下方以及屏式过热器下方 4 个高度位置的炉膛温度, 同时观察燃烧器层煤粉气流着火情况,

验证低负荷燃烧工况的安全性。图 8 为炉膛温度实测值与数值模拟结果对比。由图 8 可见, 炉膛各截面的温度实测结果与数值模拟计算结果接近, 对比工况 1 和工况 2, 在相同负荷下, 掺烧油污泥后燃烧器 C、D 层的炉膛温度有所上升, 上升幅度为 30~50 °C, 屏式过热器下方位置炉膛温度差异不大。原因主要是投入油污泥虽然热值比燃煤低, 但挥发分高, 着火温度低, 燃烧特性更接近油类燃料, 油污泥与煤粉混合燃烧使着火提前, 主燃烧区域温度上升。工况 3 机组负荷仅 68 MW, 同时 D 磨煤机停止运行, 炉膛温度相比工况 1 与工况 2 显著降低, 但就地观察火焰仍可保持正常稳定燃烧, 炉膛温度可维持在 1 000 °C 以上, 满足低负荷稳燃的要求。

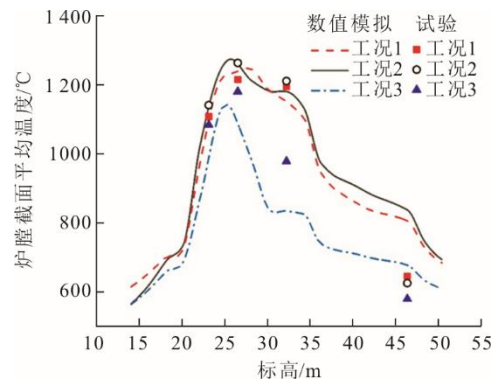


图 8 炉膛温度实测值与数值模拟结果对比
Fig.8 Comparison between measured furnace temperature and numerical simulation results

图 9 为 1 号角 B、C 层掺烧油污泥前后火检模拟量强度变化。由图 9 可见, 120 MW 负荷下 (投油污泥后因油污泥流量波动, 造成负荷波动) 投油污泥前火检信号不太稳定, B 层火检在 90%~100% 波动, C 层火检在 55%~68% 波动; 而掺烧油污泥后, B 层火检基本稳定在 100%, C 层火检稳定在 68%, 波动频次显著减少。

综合分析掺烧油污泥前后的炉膛温度及火检强度变化, 可得出掺烧油污泥可促进煤粉燃烧, 加强着火稳定性, 提高主燃区炉膛温度, 降低锅炉稳燃极限, 与数值模拟计算结果吻合。

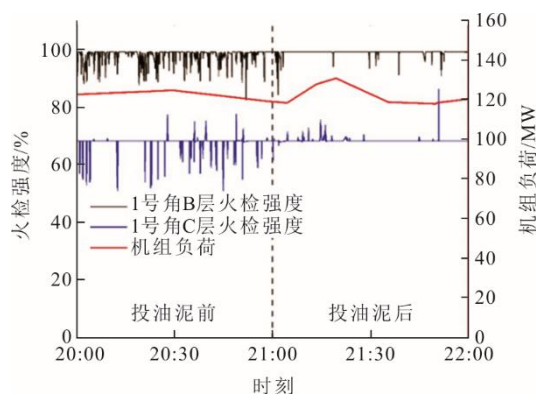


图9 掺烧油污泥前后火检模拟量强度变化

Fig.9 The fire detection analog signal trend before and after oil sludge co-firing

4.2.3 掺烧油污泥低负荷经济性分析

1) 提高锅炉效率。表7为工况1和工况2的实测锅炉效率。120 MW 掺烧油污泥后实测锅炉效率为92.13%，相比掺烧油污泥前锅炉效率提高了约0.23个百分点，降低供电煤耗率约0.7 g/(kW·h)。这是由于掺烧油污泥后，飞灰含碳量从4.79%降至3.80%，固体未完全燃烧热损失减少。

2) 节省燃煤量。根据表6数据，120 MW 负荷下掺烧油污泥后总煤量可降低约5 t/h（折算成标准煤约3.7 t/h）。这部分热值由入炉的油污泥替代。

3) 带来油污泥处置费收入。含油污泥属于危险废弃物，一般每吨可获得上千元的处置费用。

表7 锅炉效率计算
Tab.7 Boiler efficiency calculation

项目	工况1	工况2
排烟温度/℃	121.00	116.00
飞灰含碳量/%	4.79	3.80
干烟气热损失/%	5.50	5.51
燃料燃烧生成水蒸气的热损失/%	0.29	0.31
燃料固有水蒸气热损失/%	0.10	0.10
空气中水蒸气的热损失/%	0.12	0.12
气体未完全燃烧热损失/%	0.01	0.01
固体未完全燃烧热损失/%	1.20	0.94
锅炉散热损失/%	0.38	0.38
灰渣物理显热损失/%	0.12	0.12
其他热损失/%	0.35	0.35
外来热源占比/%	-0.02	-0.02
实测锅炉效率/%	91.90	92.13

5 结论

本文提出将含油污泥经过预处理后送入330 MW 机组煤粉锅炉中与煤粉耦合燃烧的技术路线，不仅可以利用电厂现有锅炉设备及配套的烟气净化系

统达到危险废弃物无害化处置的目的，同时也利用油污泥易着火燃尽的特点，提高锅炉低负荷稳燃能力。

1) 含油污泥具有较高热值、易着火的特点，可作为锅炉低负荷运行的替代燃料，提高锅炉低负荷稳燃特性。

2) 根据现场试验结果，掺烧油污泥后机组最低稳燃负荷可低至20.00%左右，受限因素主要是脱硫系统反应器进口烟温过低。

3) 低负荷掺烧油污泥后，对应的燃烧器层炉膛温度上升30~50℃，屏式过热器下方位置炉膛温度差异不大，煤粉火检信号更稳定。

4) 120 MW 负荷下，掺烧油污泥后锅炉效率提高约0.23个百分点，可降低供电煤耗率约0.7 g/(kW·h)。油污泥热值可替代标准煤约3.7 t/h，同时考虑危废处置费收入，经济效益显著。

[参考文献]

- [1] 王君. 基于热处理的含油污泥资源化利用技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 12.
WANG Jun. Resource utilization technology of oily sludge based on thermal treatment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019: 12.
- [2] 包清华. 油气田含油污泥生物处理技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院渗流流体力学研究所), 2022: 13.
BAO Qinghua. Research on biological treatment technology of oil-containing sludge in oil and gas fields[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Seepage Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2022: 13.
- [3] 李巨峰, 操卫平, 冯玉军, 等. 含油污泥处理技术与发展方向[J]. 石油规划设计, 2005(5): 30-32.
LI Jufeng, CAO Weiping, FENG Yujun, et al. Oily sludge treatment technology and its prospect[J]. Petroleum and New Energy, 2005(5): 30-32.
- [4] 姜勇, 赵朝成, 赵东风. 含油污泥特点及处理方法[J]. 油气田环境保护, 2005(4): 42-45.
JIANG Yong, ZHAO Chaocheng, ZHAO Dongfeng. Characteristics of oily sludge and several treatment methods[J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2005(4): 42-45.
- [5] 金一中, 陈小平, 陈雪明, 等. 含油污泥处理技术进展[J]. 环境污染与防治, 1998(4): 30-32.
JIN Yizhong, CHEN Xiaoping, CHEN Xueming, et al. Development of oil contaminated sludge treatment technology[J]. Environmental Pollution and Control, 1998(4): 30-32.
- [6] 杨双春, 刘国斌, 张金辉, 等. 国内外含油污泥处理技术研究进展[J]. 现代化工, 2012, 32(11): 36-39.
YANG Shuangchun, LIU Guobin, ZHANG Jinhui, et al. Progress in oily solid waste treatment technology at home and abroad[J]. Modern Chemical Industry, 2012, 32(11): 36-39.
- [7] 白冬锐, 张涛, 詹雨雨, 等. 含油污泥处理技术进展

- [J]. 环境工程, 2020, 38(8): 207-212.
BAI Dongrui, ZHANG Tao, ZHAN Yuyu, et al. Progress in oily sludge treatment technologies[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(8): 207-212.
- [8] 刘彤, 马跃, 岳长涛. 含油污泥热解及传热特性研究现状[J]. 应用化工, 2022, 51(9): 2675-2680.
LIU Tong, MA Yue, YUE Changtao. Research status of pyrolysis and heat transfer characteristics of oily sludge[J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(9): 2675-2680.
- [9] 王宇晶, 张楠, 刘涉江, 等. 热化学清洗含油污泥的效果评价及机理[J]. 化工进展, 2022, 41(6): 3333-3340.
WANG Yujing, ZHANG Nan, LIU Shejiang, et al. Evaluation of the effectiveness and mechanism of thermochemical cleaning of oily sludge[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(6): 3333-3340.
- [10] 汤文文, 林子增. 含油污泥电化学处理技术研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(6): 1658-1662.
TANG Wenwen, LIN Zizeng. Research progress of electrochemical treatment technology of oily sludge[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(6): 1658-1662.
- [11] 屈京, 马跃, 岳长涛, 等. 含油污泥脱水技术国内外研究现状[J]. 应用化工, 2021, 50(11): 3079-3086.
QU Jing, MA Yue, YUE Changtao, et al. Research status of oily sludge dewatering technology at home and abroad[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(11): 3079-3086.
- [12] 包清华, 黄立信, 修建龙, 等. 油气田含油污泥生物处理技术研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(5): 2762-2773.
BAO Qinghua, HUANG Lixin, XIU Jianlong, et al. Development in the biological treatment of oily sludge in oil and gas fields[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(5): 2762-2773.
- [13] 康定宇, 林海, 牛东坡, 等. 含油污泥特性及处理技术研究进展[J]. 中国环境科学, 2023, 43(8): 4106-4120.
KANG Dingyu, LIN Hai, NIU Dongpo, et al. Research progress and prospect of oily sludge characterization and treatment technology[J]. China Environmental Science, 2023, 43(8): 4106-4120.
- [14] 褚志炜, 巩志强, 王振波, 等. 含油污泥热处置技术研究[J]. 应用化工, 2021, 50(2): 526-531.
CHU Zhiwei, GONG Zhiqiang, WANG Zhenbo, et al. Study on heat treatment technology of oily sludge[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(2): 526-531.
- [15] GONG Z Q, WANG Z T, WANG Z B. Study on migration characteristics of heavy metals during oil sludge incineration[J]. Petroleum Science and Technology, 2018, 36(6): 469-474.
- [16] 段一航, 高宁博, 全翠. 水热处理对含油污泥热解特性及动力学影响[J]. 化工进展, 2023, 42(2): 603-613.
DUAN Yihang, GAO Ningbo, QUAN Cui. Effect of hydrothermal treatment on pyrolysis characteristics and kinetics of oily sludge[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(2): 603-613.
- [17] 宋徽, 刘建国, 聂永丰. 含油污泥的热解特性研究[J]. 燃料化学学报, 2008(3): 286-290.
SONG Wei, LIU Jianguo, NIE Yongfeng. Pyrolysis properties of oil sludge[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2008(3): 286-290.
- [18] 谢磊, 李爱民, 高宁博, 等. 含油污泥大物料热重实验研究[J]. 热力发电, 2014, 43(3): 52-57.
XIE Lei, LI Aimin, GAO Ningbo, et al. Macro thermogravimetric analysis on oil sludge[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(3): 52-57.
- [19] 周雄, 李伟, 柏继松, 等. N₂/CO₂气氛下含油污泥热解特性实验研究[J]. 热力发电, 2016, 45(10): 64-69.
ZHOU Xiong, LI Wei, BAI Jisong, et al. Experimental investigation on pyrolysis characteristics of oil sludge in N₂/CO₂ atmosphere[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(10): 64-69.
- [20] 吉树鹏, 衣怀峰, 杜文军, 等. 含油污泥-煤混合燃料燃烧特性研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(6): 55-59.
JI Shupeng, YI Huaifeng, DU Wenjun, et al. Combustion characteristics of oil sludge mixed with coal[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(6): 55-59.
- [21] ZHAO R, QIN J, CHEN T, et al. Experimental study on co-combustion of low rank coal semicoke and oil sludge by TG-FTIR[J]. Waste Management, 2020, 116: 91-99.
- [22] 任蕊, 苏华, 李丛妮, 等. 含油污泥资源化处理技术研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(4): 1044-1048.
REN Rui, SU Hua, LI Congni, et al. Research progress on the technology of recycling oily sludge[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(4): 1044-1048.
- [23] 贾勇军, 彭旭, 高汉英, 等. 含油污泥无害化处理与资源化利用[J]. 工业锅炉, 2013(2): 26-32.
JIA Yongjun, PENG Xu, GAO Hanying, et al. Clay sand harmless treatment and resource utilization technology[J]. Industrial Boiler, 2013(2): 26-32.
- [24] 赵帅, 李寒旭, 武成利, 等. 掺配含油污泥对水煤浆浆体性能及燃烧性能的影响[J]. 煤炭转化, 2021, 44(4): 20-28.
ZHAO Shuai, LI Hanxu, WU Chengli, et al. Effects of blending oil-bearing sludge on slurry properties and combustion performance of coal water slurry[J]. Coal Conversion, 2021, 44(4): 20-28.
- [25] 林炳丞, 吴平, 吴丽萍, 等. 油田油泥与煤在流化床中的混烧[J]. 环境工程学报, 2018, 12(4): 257-265.
LIN Bingcheng, WU Ping, WU Liping, et al. Co-combustion of oily sludge and coal in fluidized bed[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(4): 257-265.
- [26] 张文武, 余云松, 张早校. 含油污泥在煤粉锅炉雾化喷燃的研究分析[J]. 化工机械, 2013, 40(3): 311-315.
ZHANG Wenwu, YU Yunsong, ZHANG Zaoxiao. Study on atomized oil sludge burning in pulverized coal boilers[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2013, 40(3): 311-315.
- [27] 温燕军, 蒋驰, 李文轩, 等. 含油污泥各组分热解相互作用的反应力场模拟研究[J]. 化工学报, 2021, 72(2): 1100-1106.
WEN Yanjun, JIANG Chi, LI Wenxuan, et al. Study on reaction force field simulation of pyrolysis interaction among components of oily sludge[J]. CIESC Journal, 2021, 72(2): 1100-1106.

(责任编辑 杨嘉蕾)