

大型燃煤锅炉掺烧含油污泥的数值模拟及工程应用

顾永平¹, 吴剑波², 张凡志¹, 张海丹², 张辉¹, 张光学^{3,*}

(1. 浙江浙能电力股份有限公司 台州发电厂, 浙江 台州 318016; 2. 浙江浙能技术研究院有限公司, 浙江 杭州 311121; 3. 中国计量大学 能源工程研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对我国含油污泥产生量大、成分复杂、处置困难等问题, 本文提出了在大型燃煤锅炉中掺烧含油污泥的技术路线。首先, 对掺烧含油污泥的技术方案进行数值模拟, 发现掺烧后锅炉内温度场分布变化不大, 主燃区温度轻微升高; 当部分燃料由煤粉替换为含油污泥时, 由于后者着火快、燃尽高, 可以提高主燃区燃烧温度, 进而促进 NO_x 被还原, 因此减少了 NO_x 排放; 掺烧含油污泥后, 飞灰含碳量降低, 锅炉效率提高。随后, 该技术在 330 MW 机组上进行了工程应用, 实测结果表明, 在 120 MW 负荷下, 油泥掺烧后 NO_x 排放值由 $425 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 降低至 $376 \text{ mg}/\text{Nm}^3$, 锅炉效率由原来的 91.90% 提高到 92.13%, 因此, 该掺烧技术具有较好经济性和环保性, 且具有较好的推广应用前景。

关键词: 含油污泥; 燃煤锅炉; 掺烧; 数值模拟; 工程应用

中图分类号: X51; TK229.6

文献标识码: A

Numerical simulation of oily sludge blending in large coal-fired boilers and its engineering application

GU Yongping¹, WU Jianbo², ZHANG Fanzhi¹, ZHANG Haidan²,
ZHANG Hui¹, ZHANG Guangxue^{3,*}

(1. Taizhou Power Plant of Zhejiang Zheneng Power Co., Ltd., Taizhou 318016, China;

2. Zhejiang Energy Group R&D, Hangzhou 311121, China; 3. Institute of Energy Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In response to the issues of large production volume, complex composition, and difficulties in the disposal of oily sludge in China, this paper presents a novel technical approach that involves blending and burning oily sludge in large coal-fired boilers. First, a numerical simulation was conducted to evaluate the co-burning scheme of oily sludge. The results showed that blending did not significantly alter the temperature field distribution within the boiler, except for a slight increase observed in the main combustion zone. When a portion of the fuel was replaced with oily sludge instead of pulverized coal, the combustion temperature in the main zone rose due to the fast ignition and high combustion completeness of oily sludge, resulting in a reduction of nitrogen oxides (NO_x) emissions. Additionally, burning oily sludge led to a decrease in the carbon content of the fly ash, thereby improving boiler efficiency. Secondly, this technical approach was implemented in practice on a 330 MW boiler. The measurement results demonstrated that under a 120 MW load, the blending and burning of sludge reduced the NO_x emission value from $425 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ to $376 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ and increased boiler efficiency from 91.90% to 92.13%. Therefore, the blending approach offers significant economic and environmental benefits and promising prospects for widespread applications.

Keywords: Oily sludge; Coal-fired boiler; Co-blending; Numerical simulation; Engineering application

收稿日期: 2024-01-27

修回日期: 2024-02-26

DOI: 10.20078/j.eep.20240305

基金项目: 浙江省火力发电高效节能与污染物控制技术研究重点实验室开放课题(JSYJY-KJFW-2022-015)

作者简介: 顾永平(1971—), 男, 浙江台州人, 工程师, 主要从事火力发电厂生产管理工作。E-mail: guyongping1@163.com

通讯作者: 张光学(1982—), 男, 浙江湖州人, 教授, 主要研究方向为能源清洁高效利用。E-mail: zhangguangxue@cjlu.edu.cn

含油污泥是指混入原油、各种成品油、渣油及其他各类油质的污泥,简称油泥,是由水、油、悬浮固体、微生物及各类杂质组成的稳定的悬浮乳状液体系。含油污泥的来源广泛,包括原油开采、油田集输、炼油、钢铁冶炼及污水处理等^[1-2],脱水效果差,成分和物性受污泥生成过程、污水水质、处理工艺、加药剂、油品及运输储存等因素影响^[3-4],差异性大、处置难度高^[5]。含油污泥通常含有铜、锌、铬、汞等重金属以及细菌病毒微生物等有害物质,对环境造成较大的污染^[6-7],因此被列入《国家危险废物名录》(2016年版)^[8]。目前我国含油污泥处理技术及市场发展尚处于起步阶段^[9],含油污泥存量及每年新增油泥量很大,年产生量数百万吨,主要源于石油开采等行业。因此,亟需开展大规模含油污泥处理技术的研发及应用。

近年来已有不少学者积极探索含油污泥的处置技术与工艺。李博林等^[10]研究了油泥热解残渣改良粗粒硫酸盐渍土的力学性能,实验研究了残渣掺量和盐渍化程度对粗粒硫酸盐渍土回弹模量及抗压强度的影响规律。冯宪明等^[11]研究了热化学清洗技术应用于油泥无害化、减量化处理处置,考察了无机盐清洗剂、化学表面活性剂和生物表面活性剂等清洗剂的效果。张浩浩等^[12]研究了钢铁冶炼过程中产生的3种典型油泥,分析了热解过程中发生的热化学转化和动力学特性,发现可采用热解方式实现钢厂油泥的资源化利用。马强等^[13]从工艺技术、环境影响两方面分析了油田含油污泥水泥窑协同处置技术的可行性,发现该技术处置效率高、处理规模大,按1%比例掺加在生料中,可以满足入窑要求,水泥的理化性质满足出厂技术要求。杨勇等^[14]开展了含油污泥生物处理示范工程,对处理后的物料进行了危险性鉴别,并对比了绿化种植土壤的相关标准,探索含油污泥生物处理资源化利用途径,发现生物处理后固体废物浸出毒性和毒性物质含量均未超出规定限值。李建等^[15]结合传统钢铁企业的生产工序对焦化工艺协同处置轧钢含油污泥进行了研究,发现将焦炉炭化室温度控制在1200℃以下、含油污泥添加量为0.5%时,可利用焦化工艺协同处置轧钢含油污泥。莫榴等^[16]对含油污泥与玉米秸秆共热解特性进行了研究,分析了各温度段的协同效应,发现共热解主要呈现3个阶段:

挥发分析出、碳酸盐分解及重质油的热裂解和半焦气化。海云龙等^[17]提出了新型含油污泥焚烧近零排放处理方式,利用富氧燃烧技术焚烧含油污泥,油泥无需干化,并可回收烟气中CO₂直接用于油田驱油,鼓泡床富氧焚烧含油污泥系统的锅炉效率可达92.59%。上述含油污泥的处置方法通常比较复杂、工程应用推广困难,因此亟需开发简单易行的处置技术。

本文提出了大型燃煤锅炉掺烧含油污泥的技术方案,采用计算流体力学CFD对该方案的效果进行了数值模拟,并在一台330 MW亚临界燃煤锅炉上进行了实际工程应用。本研究为含油污泥无害化、减量化处置提供了新思路,具有较好的工程价值。

1 含油污泥特性及掺烧方案

1.1 含油污泥特性

本文研究的含油污泥主要来源于浙江省某市工业企业/港口、油罐、加油站、船舶等场所的清仓/清理过程,每年产生量约为5万吨。对含油污泥进行采样分析,2种典型样品照片如图1所示。

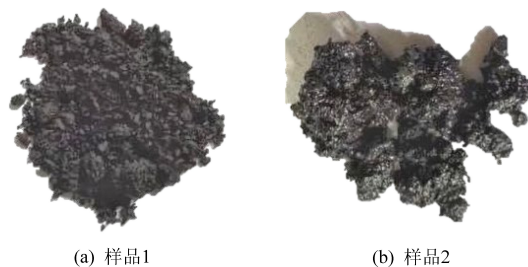


图1 含油污泥照片

Fig. 1 Photographs of oil-containing sludge

采用元素分析仪(Vario ELIII型)、数显氧弹式热量计(XRY-1A型)和马弗炉(Nabertherm B180型)等仪器对含油污泥样品进行工业分析和元素分析,其成分见表1。结果表明,不同的油泥样品成分及热值有所区别,但热值都较高,达到了20 MJ/kg左右,与普通煤粉相当;挥发分含量明显较高、水分偏低,表明其可燃性较好。另外,采用A&D SV-10型粘度计对样品粘度随温度的变化进行测试,发现当温度达到70℃以上时,含油污泥粘度低于0.2 Pa·s,此时易于输送和雾化。

1.2 燃煤锅炉概况

本文采用的含油污泥处置方案是大型火力发电机组锅炉协同处置。含油污泥热值高,经适当预处理后可作为发电机组的燃料。一方面能够对含油污泥进行无害化处置,另一方面还可以替代

表 1 含油污泥成分分析

Table 1 Compositional analysis of oil-containing sludge

编号	元素分析/%					工业分析/%			热值
	$w(C_{ar})$	$w(H_{ar})$	$w(O_{ar})$	$w(N_{ar})$	$w(S_{ar})$	A_{ar}	V_{ar}	M_t	$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$
1	56.6	7.8	8.7	1.4	1.0	14.4	61.0	10.1	20.4
2	52.1	4.3	8.8	0.8	2.1	24.1	47.7	7.9	19.7

部分煤粉,具有较好的经济性。拟进行协同处置的锅炉容量为 330 MW,蒸汽参数为亚临界,采用平衡通风、直流式燃烧器、四角切圆燃烧方式,一次中间再热、控制循环汽包。主要参数见表 2。

表 2 锅炉主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of the boiler

项目	单位	最大连续蒸发工况	额定工况
过热蒸汽流量	t/h	1 086.9	965.7
过热蒸汽压力	MPa	17.55	17.44
过热蒸汽温度	℃	541	541
给水温度	℃	290	286
再热蒸汽流量	t/h	852.8	766.2
再热蒸汽压力	MPa	3.851	3.447
再热蒸汽温度	℃	541	541

表 3 煤质分析数据

Table 3 Coal quality analysis data

种类	元素分析/%					工业分析/%			热值
	$w(C_{ar})$	$w(H_{ar})$	$w(O_{ar})$	$w(N_{ar})$	$w(S_{ar})$	A_{ar}	V_{ar}	M_t	$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$
设计煤种	60.0	3.5	8.7	1.0	0.8	14.0	26.6	12.0	23.0
实际煤种	55.7	3.9	11.0	1.1	0.6	15.3	32.3	12.4	21.7

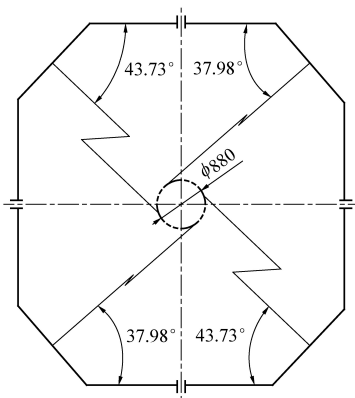
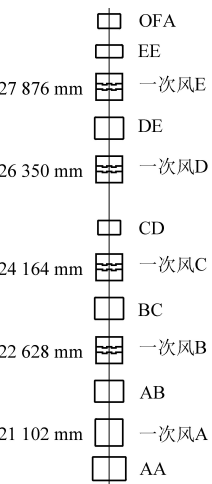


图 2 锅炉燃烧器布置图

Fig. 2 Boiler burner arrangement

1.3 含油污泥掺烧方案

温度较低时,含油污泥粘度大、流动性较差,且颗粒物等杂质会造成输送系统堵塞和磨损,因

锅炉的设计煤质及实际煤质见表 3,对比表 1 和表 3,可以发现目前锅炉实际煤质与拟掺烧的含油污泥成分比较接近,主要区别在于含油污泥的挥发分和氢元素含量较高,着火和燃烧速率高于煤粉。

机组采用正压一次风直吹式送粉系统,配置 5 台 HP863 中速磨煤机,当处于最大连续蒸发量工况时,4 台运行、1 台备用。锅炉主燃区共有 20 只一次风燃烧器,分 5 层四角切圆布置,如图 2 所示,从下往上命名为 A~E,其中 A 是微油点火燃烧器。燃烧器喷口均可以上下摆动,最大摆角为 ±30°。为了降低 NO_x 排放量,主燃区上方标高 35.05 m 处布置了 SOFA 喷口。

此在掺烧处置前,含油污泥要进行预处理。具体的方案:(1)采用蒸汽加热的方式,将含油污泥前置储罐温度升高至 70~80 ℃,输送系统采用蒸汽伴热和保温;(2)提高搅拌储罐内含油污泥的均匀性和流动性,采用过滤筛板去除大于 5~10 mm 的粗颗粒;(3)使用配比罐对上清液和底部较重的浆液进行配比均化,送至中间罐和日用罐;(4)利用 0.5~0.8 MPa 压缩空气为雾化介质,将液态含油污泥雾化为粒径 100 μm 内的超细液滴,送入炉膛进行掺烧。

掺烧位置的选取非常重要,为了避免对锅炉燃烧造成不良影响,应保证含油污泥的掺烧不影响锅炉的温度场、空气动力场及组分场。虽然含油污泥热值和挥发分含量都很高,但是初始温度为常温,低于燃煤颗粒,因此考虑将含油污泥送入锅炉相对高温的位置,将喷枪布置在 C、D 二次风喷口位置(图 2),喷枪方向与锅炉一次风切圆保

持一致。

2 数值模拟分析

2.1 数值模拟方法

为了验证含油污泥掺烧方案的可行性,采用 Ansys Fluent 计算流体力学平台进行数值模拟。首先对锅炉进行 1:1 三维建模,计算区域为下部冷灰斗至炉膛上部水平烟道再热器,包括各层燃烧器、屏式过热器及再热器。随后,采用 Fluent Meshing 软件平台划分多面体网格,根据网格无相关性验证,采用 124 万网格数量,并对燃烧器喷口及附近区域进行局部加密,如图 3 所示。

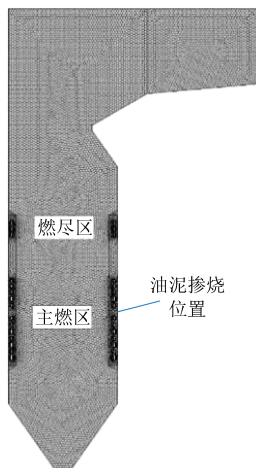


图 3 几何模型及网格

Fig. 3 Geometric model and mesh

锅炉内气相湍流流动采用 Realizable $k-\varepsilon$ 双方程模型计算,煤粉及灰粒颗粒的运动、传热及燃烧过程采用双向耦合的离散相模型计算。煤粉及含油污泥颗粒均经过水分蒸发、挥发分析出、挥发分燃烧和焦炭燃尽等 4 个过程。其中,挥发分析出采用双方程竞争反应模型,挥发分气相燃烧采用非预混燃烧模型,该模型利用混合分数输运方程,从预测的混合分数分布推导得到组分浓度,并通过概率密度函数考虑湍流影响。焦炭表面燃烧采用扩散及动力共同控制模型。另外,对于高温烟气,采用 DO 模型计算三原子气体的辐射效应、颗粒与气体之间的辐射换热。各气体的组分物性均设为温度的函数,其中粘度采用 Sutherland 关系式、比热和导热系数多项式拟合。

模拟采用的煤粉和含油污泥的成分见表 1 和表 3,一次风与二次风温度分别为 75 °C 和 330 °C,一次风率为 23.5%。迭代计算时,速度、压力及能量方程采用压力基耦合求解算法,离散格式为二阶迎风。计算至能量方程残差低于 10^{-6} 、其余方

程残差低于 10^{-3} 。

2.2 数值模拟结果分析

采用数值模拟对含油污泥掺烧前后的炉内热态燃烧过程进行分析,图 4 是炉膛中心竖截面的温度分布云图(锅炉负荷率为 100%,油泥掺烧量为 8 t/h)。由图可见,炉膛内燃烧高温区分布在燃烧器中上位置,靠近喷口区域,最高温度可以达到 1 550 °C。屏式过热器底部烟气温度降低至 1 000 °C 左右,与热力计算结果吻合。对比含油污泥掺烧前后的温度云图分布,发现两者温度场分布没有明显区别,掺烧后仅主燃区上部温度轻微升高,这是由于含油污泥的热值与燃煤相当,并且掺烧比例不高。因此可以认为,当掺烧比例较低(5%左右)时,含油污泥入炉不会显著改变炉内温度场分布。

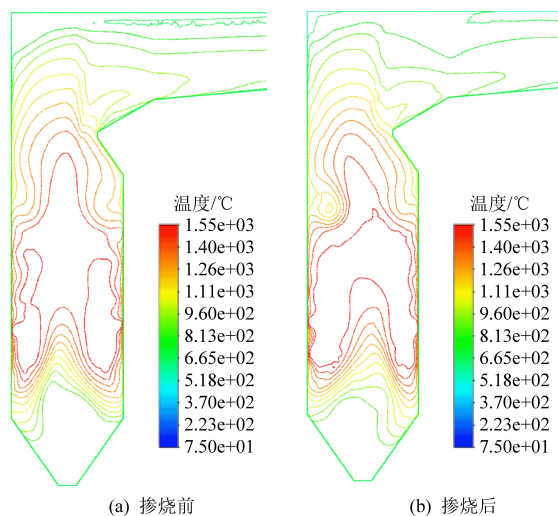


图 4 掺烧前后锅炉温度场分布

Fig. 4 Boiler temperature field distribution before and after doping

图 5 是含油污泥掺烧前后锅炉不同标高的平均温度(锅炉负荷率为 100%,油泥掺烧量为 8 t/h)。模拟结果表明,当掺烧油泥时,燃煤量相应减少,因此在主燃区下部平均温度略微降低;在含油污泥掺烧位置处,由于其挥发分含量高,着火燃烧迅速,因此温度高于掺烧前,但增幅不大;在主燃区上部,2 个工况的温度分布又趋于一致,这是因为掺烧含油污泥尽管改变了主燃区温度,但是变化幅度不大,可以认为对炉膛的辐射传热和燃料燃烧影响忽略不计。图 6 是锅炉负荷率 100% 情况下不同掺烧量时锅炉主燃区(C、D 层一次风标高)温度的变化。由图可知,随着含油污泥掺烧量的增加,主燃区温度逐渐提高,当掺烧量为 8 t/h 时,增幅约为 33 °C。

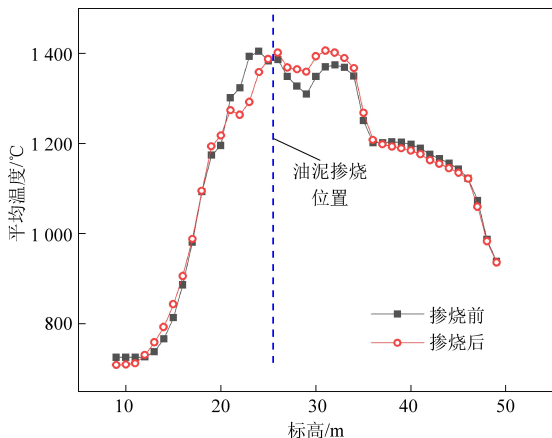


图5 掺烧前后不同标高平均温度

Fig. 5 Average temperature at different elevations before and after doping

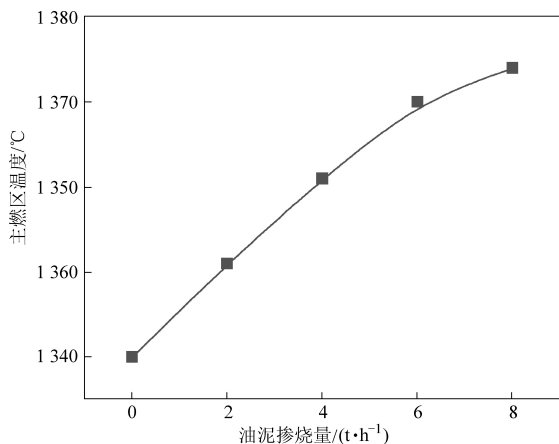


图6 不同掺烧量下主燃区温度

Fig. 6 Temperature in the main combustion zone at different dosing amounts

图7是锅炉负荷率100%时不同掺烧量对锅炉氮氧化物 NO_x (折算至6%氧量)排放的影响。由图可知,随着含油污泥掺烧量的增加,炉膛出口的 NO_x 排放值缓慢降低。一方面是因为含油污泥送入主燃区后,因其高挥发分的特点,快速消耗煤粉前期燃烧所需氧量,缺氧程度加剧,减少煤粉燃烧过程中 NO_x 的产生;另一方面,油泥燃烧区域炉膛温度的提高促进了缺氧环境下 NO_x 的还原反应过程。

油泥掺烧工况下的锅炉效率也很重要,影响锅炉效率的主要因素是飞灰含碳量和排烟温度。由于掺烧前后的炉膛出口温度几乎无区别(图5),因此可以判定排烟温度没有变化,故只需要考察飞灰含碳量就能够评估锅炉效率变化。不同锅炉负荷下的飞灰含碳量变化情况如图8所示,负荷范围为75~330 MW,含油污泥掺烧比例为5%(按热值计)。模拟数据表明,掺烧前,当负荷增加时,飞灰含碳量逐步降低,这是因为炉膛温度提高

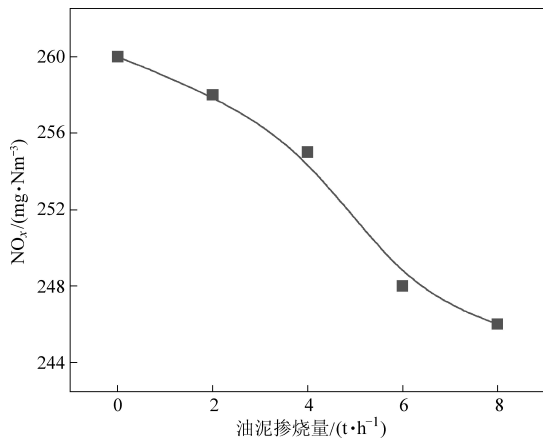


图7 不同掺烧量下锅炉 NO_x 排放值

Fig. 7 NO_x emission values of boilers with different dosing amounts

促进了焦炭燃烧;当锅炉接近满负荷时,飞灰含碳量反而有小幅升高,这是因为煤粉颗粒在炉膛停留的时间减少。掺烧后,飞灰含碳量与负荷的关系趋势与掺烧前一致,但是各负荷下飞灰含碳量均降低了约0.3%,这是因为充分雾化的油泥颗粒比煤粉更容易着火和燃尽,因此掺烧油泥时锅炉效率略有提高。

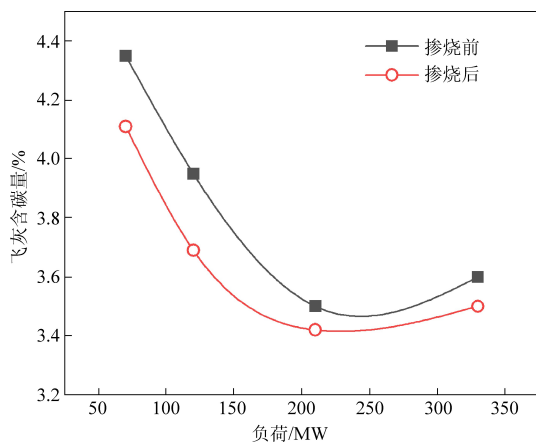


图8 不同锅炉负荷下的飞灰含碳量

Fig. 8 Carbon content of fly ash at different boiler loads

3 工程实际应用效果

大型燃煤锅炉掺烧含油污泥的工程应用在浙江某电厂330 MW机组上,并于2023年4月进行了掺烧前后的锅炉性能测试。受电网实际需求的制约,本次试验时锅炉负荷较低,为120 MW,磨煤机投用BCD3层(图2)。

表4是含油污泥掺烧前后锅炉主要运行参数,掺烧量为5 t/h,因此掺烧后燃煤量相应减少5 t/h。需要说明的是,低负荷时,通常为了保证煤粉燃尽,炉膛氧量控制得较高,低氮效果变差,因此 NO_x 排放值一般比较高。实际运行数据表明,油

泥掺烧后, NO_x 排放浓度由原来的 $425 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 降低至 $376 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ (该负荷下模拟结果为 $385 \text{ mg}/\text{Nm}^3$), 这表明掺烧油泥有利于减少锅炉 NO_x 的排放。掺烧后, 飞灰含碳量为 3.7% (数值模拟结果为 4.0%)。另外, 掺烧后锅炉效率也由原来的 91.90% 提高到了 92.13%, 增加了 0.23%, 这是因为油泥的燃烧性能较好。

表 4 掺烧前后锅炉主要运行参数

Table 4 Main operating parameters of the boiler before and after doping

项目	单位	掺烧前	掺烧后
机组负荷	MW	120	120
燃煤量	t/h	56	51
油污泥量	t/h	0	5
主蒸汽流量	t/h	321	297
主蒸汽温度	°C	425	414
主蒸汽压力	MPa	7.1	6.7
再热蒸汽温度	°C	407	402
再热蒸汽压力	MPa	1.57	1.52
炉膛 NO_x 浓度	mg/Nm^3	425	376
锅炉效率	%	91.90	92.13

图 9 是含油污泥掺烧前后炉膛主燃区温度变化情况的实测值, 由于锅炉负荷较低, 仅为 120 MW, 因此主燃区温度比满负荷时 $1\ 300 \sim 1\ 400 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度水平低得多。掺烧后的主燃区温度比掺烧前提高了 $30 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$, 为 $1\ 100 \sim 1\ 200 \text{ }^\circ\text{C}$, 与数值模拟结果相吻合。

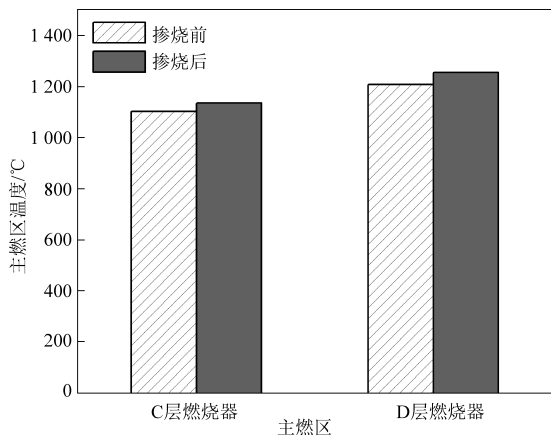


图 9 掺烧前后炉膛主燃区温度变化

Fig. 9 Temperature changes in the main combustion zone of the furnace before and after doping

4 结 论

针对含油污泥产生量大、处置困难等难题, 本

文提出了在大型燃煤锅炉中掺烧含油污泥的技术路线, 并采用计算流体力学技术对掺烧方案进行仿真, 验证了其可行性, 最终在 330 MW 锅炉中进行了工程实际应用, 主要结论如下。

(1) 由于含油污泥的热值与煤粉相当, 数值模拟结果表明, 掺烧后锅炉内温度场分布变化不大, 主燃区温度有轻微升高。因此, 当掺烧比例在 5% 以内时, 含油污泥入炉不会显著改变炉内温度场分布。

(2) 当部分燃料由煤粉替换为含油污泥时, 由于后者着火快、燃尽高, 可以提高主燃区的燃烧温度, 进而促进 NO_x 被还原, 因此掺烧油泥一定程度上能够降低 NO_x 排放量。

(3) 掺烧 5% 含油污泥后, 飞灰含碳量降低了 0.3% 左右, 这是因为充分雾化的油泥颗粒比煤粉更容易着火和燃尽, 使锅炉效率提高。

(4) 本掺烧方案工程应用在 330 MW 机组上, 实测结果显示, 在 120 MW 负荷下, 油泥掺烧后, NO_x 排放浓度由 $425 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 降低至 $376 \text{ mg}/\text{Nm}^3$, 锅炉效率由 91.90% 提高到了 92.13%。这表明掺烧方案具有很好经济性和环保性, 具有较好的推广应用前景。

参考文献 (References):

- [1] 全坤, 谢加才, 谢水祥, 等. 含油污泥化学热洗技术研究进展[J]. 化工环保, 2023, 43(6): 744-749.
TONG Kun, XIE Jiakai, XIE Shuixiang, et al. Research progress in chemical hot washing technology for oily sludge[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2023, 43(6): 744-749.
- [2] 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 of processing technology and characteristics of oily sludge[J]. China Environmental Science, 2023, 43(8): 4106-4120.
- [3] 汪建柱, 巩志强, 朱丽云, 等. 含油污泥催化热解研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(4): 1164-1167+1173.
WANG Jianzhu, GONG Zhiqiang, ZHU Liyun, et al. Research progress of catalytic pyrolysis of oil sludge[J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(4): 1164-1167+1173.
- [4] 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+146.
BAI Dongrui, ZHANG Tao, ZHAN Yuyu, et al. Progress in oily sludge treatment technologies[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(8): 207-212+146.
- [5] 姚立荣, 陈慧娴, 张大山, 等. 微波-超声法预处理油泥浮渣试验研究[J]. 能源环境保护, 2022, 36(1): 29-35.
YAO Lirong, CHEN Huixian, ZHANG Dashan, et al. Experimental study on pretreatment of oil sludge scum by microwave-

- ultrasonic method[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(1): 29-35.
- [6] 武跃, 袁圆, 张静, 等. 亚临界湿式氧化法脱除含油污泥中的重金属[J]. 化工环保, 2015, 35(3): 236-240.
WU Yue, YUAN Yuan, ZHANG Jing, et al. Removal of heavy metals from oily sludge by subcritical wet air oxidation[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2015, 35(3): 236-240.
- [7] 刘武军. 含油污泥热解资源化及过程污染控制研究进展及发展趋势[J]. 能源环境保护, 2023, 37(2): 196-204.
LIU Wujun. Research progress and developing trend of oil sludge pyrolysis and the process pollution control[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(2): 196-204.
- [8] 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.
- [9] 张敏革, 张文晖, 聂凡, 等. 低温水热处理含油污泥研究进展[J]. 现代化工, 2023, 43(12): 31-35+41.
ZHANG Minge, ZHANG Wenhui, NIE Fan, et al. Research progress of low temperature hydrothermal treatment of oily sludge[J]. Modern Chemical Industry, 2023, 43(12): 31-35+41.
- [10] 李博林, 冉武平, 曾立峰, 等. 油污泥热解残渣改良粗粒硫酸盐渍土力学性能试验研究[J/OL]. 力学与实践; 1-10 [2024-01-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2064.o3.20231116.0929.002.html>.
LI Bolin, RAN Wupin, ZENG Lifeng, et al. Experimental study on mechanical properties of oil sludge pyrolysis residue improved coarse grain sulfate saline soil[J/OL]. Mechanics in Engineering: 1-10 [2024-01-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2064.o3.20231116.0929.002.html>.
- [11] 冯宪明, 周金喜, 王邻睦, 等. 含油污泥热化学清洗剂研究进展[J]. 辽宁石油化学大学学报, 2023, 43(5): 7-13.
FENG Xianming, ZHOU Jinxi, WANG Linmu, et al. Research progress of thermochemical cleaning agent for oily sludge[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2023, 43(5): 7-13.
- [12] 张浩浩, 胡晓炜, 李敏, 等. 钢厂典型含油污泥热解特性试验研究[J]. 冶金与材料, 2023, 43(8): 40-42.
ZHANG Haohao, HU Xiaowei, LI Min, et al. Experimental study on pyrolysis characteristics of typical oil-containing sludge in steel mills[J]. Metallurgy and Materials, 2023, 43(8): 40-42.
- [13] 马强, 杨廷臣, 刘雄才, 等. 冀东油田含油污泥水泥窑协同处置技术研究[J]. 油气田环境保护, 2023, 33(3): 33-38.
MA Qiang, YANG Tingchen, LIU Xiongcai, et al. Research on co-processing in cement kiln of oily sludge in Jidong oilfield[J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2023, 33(3): 33-38.
- [14] 杨勇, 杨庭, 郭兵. 含油污泥生物处理物料的危险特性分析及资源化利用研究[J]. 应用化工, 2022, 51(12): 3425-3429.
YANG Yong, YANG Ting, GUO Bin. Analysis of hazardous characteristics and resource utilization of materials after biological treatment of oily sludge[J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(12): 3425-3429.
- [15] 李建, 毛晓明, 胡德生. 焦化工艺协同处置轧钢含油污泥的基础研究[J]. 宝钢技术, 2018(2): 39-45.
LI Jian, MAO Xiaoming, HU Desheng. Foundational research on the treatment of oily sludge by coking process[J]. Bao-Steel Technology, 2018(2): 39-45.
- [16] 莫榴, 林顺洪, 李玉, 等. 含油污泥与玉米秸秆共热解协同特性[J]. 环境工程学报, 2018, 12(4): 1268-1276.
MO Liu, LIN Shunhong, LI Yu, et al. Synergy effect during co-pyrolysis of oily sludge and corn stalk[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(4): 1268-1276.
- [17] 海云龙, 阎维平. 鼓泡床锅炉富氧焚烧含油污泥技术[J]. 环境工程学报, 2017, 11(7): 4313-4319.
HAI Yunlong, YAN Weipin. Oxygen-enriched combustion technology of oil sludge in bubbling fluidized bed[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(7): 4313-4319.