双锥燃烧器燃用污泥水煤浆的燃烧特性和数值模拟

程晓磊1,2,3

(1.煤科院节能技术有限公司,北京 100013;2.煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;3.国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013)

摘 要:为促进城市污泥的资源化利用,解决污泥物理处置中存在的二次污染问题,以及传统污泥干 化焚烧中干燥成本高的问题,提出了将污泥浆与煤粉掺混制备污泥水煤浆,利用具有强化燃烧功能的 中心逆喷双锥燃烧器燃烧的技术思路。通过热重分析试验对比了煤粉、水煤浆、污泥水煤浆的燃烧特 性,并利用数值模拟研究污泥水煤浆在双锥燃烧器上的燃烧特性,通过降低二次风量、提高二次风旋 流强度及二次风温度等强化燃烧的措施,研究污泥水煤浆在双锥燃烧器上应用的可行性。污泥水煤 浆的基础燃烧特性试验结果表明,水煤浆中水分超过35%,除影响燃料热值外,水蒸发吸热是影响污 泥水煤浆燃烧过程着火和燃尽的关键因素。由于水分的存在,水煤浆起始着火温度高于煤粉11.3 ℃, 燃尽温度低于煤粉13.6℃, 其最大吸热速率为0.504 kW/kg, 占水煤浆最大放热速率的56.05%, 总吸热量为1.917 MJ/kg,占燃烧放热量的9.94%;掺烧20%污泥时,污泥水煤浆起始着火温度高于 水煤浆 12.3 ℃,燃尽温度低 59.1 ℃,水蒸发吸热量为 0.546 kW/kg,比水煤浆燃烧高 8.4%,总放热 量为 16.88 M.J/kg,比水煤浆燃烧低 12.5%。通过采用双 DPM 的离散相数值模拟模型,充分考虑污 泥水煤浆燃烧时水蒸发过程的影响,对污泥水煤浆燃烧的数值模拟更接近实际结果。14 MW 双锥燃 烧器的污泥水煤浆燃烧模拟结果表明,直接使用现有双锥燃烧器无法实现污泥水煤浆的稳定燃烧,仅 可燃烧水含量为25%左右的污泥水煤浆。污泥水煤浆中水含量由0增至35%时,平均每提高1%水含 量,燃烧器出口温度下降7.95℃,燃烧器内平均温度下降7.69℃;水含量为35%时,燃烧器内平均温度 降低269 ℃,燃烧器出口平均温度降低278 ℃。污泥水煤浆在双锥燃烧器内的燃烧,可通过降低二次风 量、增加二次风旋流强度、提高二次风温度等强化燃烧措施实现。二次风旋流强度由1变为2时.燃烧 器出口平均温度提高20℃,二次风量减少为理论空气量的0.6,燃烧出口平均温度提高203℃,综合使 用降低二次风量、增加旋流强度和提高二次风温的措施后,燃烧器出口平均温度提高289℃,基本接近 该燃烧器燃用煤粉时的燃烧条件,双锥燃烧器基本可达到稳定燃烧污泥水煤浆的目的。

关键词:污泥水煤浆;燃烧;热重分析;数值模拟

中图分类号:TQ534 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2019)04-0087-07

Combustion characteristics and numerical simulation of sludge coal water slurry fired by double cone combustor

CHENG Xiaolei^{1,2,3}

(1. China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to promote the utilization of municipal sludge, and further to solve the secondary pollution problem in sludge physical disposal and the high cost problem of sludge drying combustion in traditional way, a technical idea of preparing sludge-coal-water slurry by mixing sludge slurry with pulverized coal, and using the central reverse injection double cone burner with enhanced combustion function

引用格式:程晓磊.双锥燃烧器燃用污泥水煤浆的燃烧特性和数值模拟[J].洁净煤技术,2019,25(4):87-93.

CHENG Xiaolei. Combustion characteristics and numerical simulation of sludge coal water slurry fired by double cone combustor[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4):87-93.



87

收稿日期:2019-05-07;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19050701

基金项目:煤炭科学技术研究院科技发展基金资助项目(2017CX02);中国煤炭科工集团科技创新创业资金专项资助项目 (2018MS003)

作者简介:程晓磊(1986—),男,河北邯郸人,助理研究员,博士,主要从事煤粉高效清洁利用研究。E-mail:chengxl328@ 126.com

洁净煤技术

was proposed. The combustion characteristics of pulverized coal, coal water slurry and sludge coal water slurry were analyzed by thermogravimetric analysis experiments. The combustion characteristics of sludge coal water slurry in double-cone burner were studied by numerical simulation. The feasibility of sludge coal water slurry application in double-cone burner was studied by reducing secondary air, increasing secondary air swirl intensity and secondary air temperature. The comparison of basic combustion characteristics of sludge-coal-water slurry shows that the moisture content in sludge-coal-water slurry exceeds 35%, and the fuel calorific value, water evaporation and heat absorption are the key factors affecting the ignition and burnout of sludge-coal-water slurry combustion process. Due to the presence of water, the initial ignition temperature of CWS is 11.3 °C higher than that of coal powder, and the burnout temperature is 13.6 °C lower than that of pulverized coal. The maximum heat absorption rate is 0.504 kW/kg, accounting for 56.05% of the maximum heat release rate of CWS, and the total heat absorption is 1.917 MJ/kg, accounting for 9.94% of the combustion heat. When 20% sludge is mixed, the initial ignition temperature of sludge CWS is 12.3 °C higher than that of CWS, and the burnout temperature is 59.1 °C lower than that of CWS. The heat absorbed by water evaporation is 0.546 kW/kg, which is 8.4% higher than that of coal water slurry combustion, and the total heat released is 16.88 MJ/kg, which is 12.5% lower than that of coal water slurry combustion. In this paper, a double-DPM Discrete-Phase numerical simulation model is used to fully consider the influence of water evaporation during sludge CWS combustion, and the numerical simulation of sludge CWS combustion is closer to the actual results. The simulation results of sludge CWS combustion in 14 MW double-cone burner show that the existing double-cone burner can not achieve stable combustion of sludge CWS, only can burn sludge CWS with water concentration of ca. 25%, which is not existed in actual form. When the concentration of water in sludge CWS increases from 0 to 35%, the average temperature of burner outlet decreases by 7.95 °C and the average temperature of burner interior decreases by 7.69 °C with the increase of 1% water concentration. The average temperature of burner interior decreases by 269 °C and the average temperature of burner outlet decreases by 278 °C , when the concentration of water is 35% . The combustion of sludge CWS in a double cone burner can be realized by reducing secondary air flow, increasing secondary swirl intensity and increasing secondary air temperature. When the swirl intensity of secondary air changes from 1 to 2, the average temperature of burner outlet increases by 20 °C. When the secondary air volume decreases to 0.6 of theoretical air, the average temperature of burner outlet increases by 203 °C. The average temperature of burner outlet increases by 289 °C, it is basically close to the burning condition when the burner burner burner pulverized coal. After comprehensive application, the double-cone combustor can realize the stable combustion of sludge CWS.

Key words: sludge coal-water-slurry; combustion; thermogravimetric analysis; numerical simulation

0 引 言

城市污泥是城市污水处理后的副产品,是由有 机残片、细菌菌体、无机颗粒、胶体等组成的一种极 其复杂的非均质体。预计至2020年底,全国城镇湿 污泥(含水率为 80%)产生量将达到 6 000 万 t^[1]。 在所有处置方式中,焚烧是最不易造成二次污染的 方法。目前污泥焚烧技术在德国、日本、韩国等发达 国家应用较为广泛,在国内主要是浙江大学^[2]、中 国科学院[3]、清华大学[4]、华中科技大学[5]等在污 泥成浆特性、煤粉混烧、燃烧特性等方面开展基础研 究,实际应用相对较少。污泥焚烧分为干化燃烧和 污泥浆燃烧。干化燃烧是将污泥完全干化处理后按 照固体燃料进行燃烧,由于污泥浆污泥含水率高 (浓缩污泥含水率约为97%,脱水污泥含水率约为 80%),完全干燥成本较高。污泥浆燃烧则类似于 水煤浆燃烧方式,将污泥浆的水分干燥至 30%~ 40%,通过特定添加剂与煤粉掺混形成污泥水煤浆, 在传统水煤浆锅炉上作为燃料应用,一般掺混比例 为5%~15%。

污泥水煤浆由于污泥的低热值和水煤浆燃烧过

程吸热的特点,兼具污泥和水煤浆在燃烧上的不利 条件,需通过燃烧组织的优化实现稳定着火。不同 学者对污泥水煤浆污泥掺混比例和燃烧特性等进行 研究。董梅等[6]认为,污泥改性后添加量10%~ 20% 时污泥水煤浆成浆性较好,且着火温度、燃尽温 度等燃烧特性较水煤浆有所改善:曾成才^[7]对污泥 和煤粉掺混研究认为,随着污泥掺混比的增加,挥发 分析出温度提前,燃点变化不大,燃尽特性变差,3 种燃烧特性指数逐步下降,污泥与煤的掺混比低于 20%时,燃烧稳定性较好;胡勤海等^[8]研究表明,因 污泥的掺入,混合浆着火温度比水煤浆高约50℃, 但随掺混比例升高,最大燃烧速率、可燃性指数及综 合燃烧特性指数均增加,提高了污泥的燃尽率;曹晓 哲等^[9]对潞安煤泥水煤浆燃烧表明,其着火温度和 燃尽温度均高于低挥发分和高挥发分水煤浆,利用 可燃性指数判断潞安煤泥水煤浆燃烧性能低于低挥 发分和高挥发分水煤浆;朱建航等^[10]在3.2 MW 卧 式炉中进行了污泥水煤浆燃烧试验,掺混10%污泥 的水煤浆更易着火,燃烧和结渣特性均优于大同烟 煤水煤浆。

利用计算流体力学耦合燃烧的数值模拟方法已

广泛应用于煤粉、水煤浆等燃烧特性研究中,污泥水 煤浆的研究需考虑添加的污泥对燃烧的影响。段艳 松等[11]为解决水煤浆常规燃烧存在的运行稳定性 差等问题,以荷兰国际火焰研究基金会(International Flame Research Foundation, IFRF)的试验炉为研 究对象,化学湍流相互作用模型采用有限速率/涡耗 散模型,考虑煤焦表面化学反应,得到了水煤 浆 MILD(moderate or intense low oxygen dilution)燃 烧特性;丁宁等^[12]对410 t/h水煤浆锅炉进行研究, 认为水煤浆燃烧的关键是对水煤浆雾化效果的模拟 和对水煤浆水分蒸发的处理:朱天宇等[13]利用涡耗 散和混合分数模型模拟煤粉掺烧污泥的反应过程. 认为组分输运涡耗散 EDM 模型 (eddy disspation model)的模拟结果更符合实际情况;莫日根 等[14]利用数值模拟方法研究了煤粉和水煤浆在双 锥燃烧器中的燃烧差别。

中心逆喷双锥燃烧器^[15]是煤科院针对煤粉工 业锅炉研发的燃烧装置,已在超过 500 台套锅炉系 统上成功应用。通过在燃烧器中部的回流帽实现燃 料回燃逆喷,使燃料充分预热;二次风的回流扰动加 强了燃料与空气的传质传热,有利于燃料的高效稳 定燃烧;预燃室的结构为燃料点燃提供足够的停留 时间。在给定燃料的条件下,双锥燃烧器所需着火 热约为常规燃烧器的1/10~1/6,为污泥水煤浆等 低热值燃料的着火提供便利条件。本文基于污泥水 煤浆的燃烧特性和双锥燃烧器的强化燃烧特点,通 过基础燃烧特性和数值模拟相结合的研究方法,分 析了双锥燃烧器燃用污泥水煤浆的燃烧特点,并通 过参数优化实现污泥水煤浆的稳定燃烧,为相关技 术的工业应用提供理论和数据支持。

1 污泥水煤浆燃烧基础特性

燃烧基础特性采用热重分析方法,通过研究燃烧过程中的失重和吸放热特性,确定燃料的着火、燃尽温度和反应速率,确定污泥水煤浆燃烧的基础特性,并对煤粉和水煤浆燃烧特性以及水煤浆和污泥水煤浆燃烧特性进行对比。

1.1 试验煤样

采用神府东胜煤粉和某污水厂污泥作为基础燃料,并制备相应的水煤浆。水煤浆中煤粉含量为 65%,污泥水煤浆中污泥和煤粉的含量均为65%, 污泥掺烧比例为20%,其工业及元素分析见表1。

样品 -					工业分析/%				
	C _{ad}	H_{ad}	\mathbf{O}_{ad}	\mathbf{S}_{ad}	N_{ad}	M _{ad}	$A_{\rm ad}$	V_{ad}	$FC_{\rm ad}$
煤粉	68.98	3.92	11. 22	0. 50	0. 83	5.13	9.42	32.49	52.96
污泥	15.08	2.70	13. 59	2.70	1.78	6.24	57.91	23.82	12.03
水煤浆	44.84	2.55	7.29	0.33	0.54	38.33	6.12	21.12	32.42
污泥水煤浆	37.83	2.39	7.60	0. 61	0.66	38.48	12.43	19.99	29.01

表 1 燃料的工业分析和元素分析 Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal and sludge

1.2 试验条件和方法

试验在 STA449F3 型同步 TG-DSC 热分析仪上 进行,仪器使用温度为0~1 500 ℃,升温速率为0~ 50 ℃/min。

热重试验通过 N₂ 和 O₂ 的配比模拟空气燃烧状态,其流量分别为 160 和 40 mL/min,燃烧加热终温为 1 000 ℃,加热速率为 20 ℃/min,反应达到设定 温度后保持 10 min 稳定阶段后完成试验过程。

1.3 试验结果及分析

煤粉与水煤浆的热重结果如图 1 所示,其中水 煤浆中水含量为 35%。从燃烧特性看,水煤浆燃烧 受高水分含量的影响,起始着火温度为 366.5 ℃,比 煤粉燃烧高 11.3 ℃;而燃尽温度为 607.3 ℃,低于 煤粉燃尽温度 13.6 ℃。原因是,水煤浆中水的存在 影响煤粉起始燃烧时的放热过程,导致其着火温度 提高;而水蒸发过程可能会在煤粉颗粒内部形成疏松的多孔结构,增加煤粉的比表面积,从而提高了其燃尽过程。从DSC曲线可知,水煤浆中水的吸热在反应过程中占据重要地位,影响水煤浆的燃烧特性。 167℃前水煤浆处于吸热阶段,最大吸热速率为0.504 kW/kg,占水煤浆最大放热速率(0.899 kW/kg)的56.05%;燃烧过程水总吸热量为1.917 MJ/kg,占水煤浆燃烧放热量(19.29 MJ/kg)的9.94%。

实际锅炉运行时水煤浆的燃烧特性比热重分析 结果更差,主要原因是热重分析仪的升温速率约为 10℃/min,相比于锅炉中煤粉燃烧的10³℃/s属于 慢速反应,水煤浆中水的蒸发过程相对独立,燃烧过 程中对降低燃烧温度和燃烧放热量的影响不能完全 体现。

洁净煤技术



图1 煤粉与水煤浆的 TG-DSC 曲线对比

Fig. 1 TG-DSC curve of coal and coal water slurry

水煤浆与污泥水煤浆的热重结果如图 2 所示, 其中污泥水煤浆中污泥掺烧比例为 20%。由于污 泥中挥发分低于煤粉,掺烧后污泥水煤浆挥发分析 出过程推迟,且水分高于水煤浆,吸热过程更长,着 火条件恶化,导致其起始着火温度为 378.8 ℃,比水 煤浆燃烧高 12.3 ℃;但由于其中所含有机物、生物 质等成分更易燃尽,其燃尽温度低于水煤浆 59.1 ℃。燃烧污泥水煤浆时其中水分蒸发吸热最高速率 为 0.546 kW/kg,比水煤浆高 8.4%;燃烧过程中总 放热量为 16.88 MJ/kg,比水煤浆低 12.5%。





根据水煤浆与煤粉、污泥水煤浆与水煤浆的燃烧特性对比可知,水煤浆中由于水含量较高,煤浆热 值降低,燃烧过程放热量减少,同时蒸发过程吸收大 量热。而污泥水煤浆中,污泥的掺烧加入加剧了燃 料着火等燃烧特性的恶化,需通过一系列强化燃烧 措施,实现污泥水煤浆的稳定着火和燃烧。

2 污泥水煤浆燃烧的数值模拟

中心逆喷双锥燃烧燃烧器在煤粉工业锅炉上有 十多年的应用经验。由于其独特的燃料逆喷、烟气 回流和双锥预燃室的特点,燃烧器在煤粉着火、稳定 燃烧方面有明显优势。但其能否直接应用于污泥水 煤浆的燃烧,还需通过数值模拟研究其可行性。中 心逆喷双锥燃烧器结构如图3所示。





2.1 数值模拟模型选取

数值模拟研究随着流体力学和燃烧理论发展的 不断完善,以及计算机性能提升,逐渐成为燃料燃烧 尤其是大型设备燃烧性能研究的关键手段。煤科院 节能技术有限公司在双锥燃烧器数值模拟方面经验 丰富,与工业现场实际运行情况对比,模拟燃烧温度 与实际温度偏差小于100 ℃^[14-15],可作为判断燃烧 可行性的依据。数值模拟研究采用商业软件 Ansys Fluent,其中,湍流模型采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型,该 模型可相对准确模拟湍流流动中的旋转射流问题: 燃烧器符合光学深度大于1的条件,辐射模型选用 P1 模型,具有较高的计算效率;化学湍流相互作用 模型选用组分输运模型中的 Eddy Dissipation 模型: 煤粉和水煤浆燃料的挥发分析出选用双竞争反应模 型,在不同温度范围区间控制析出速率,其反应动力 学参数见表 2。气固两相流动选用拉格朗日法的 DPM 离散相模型,该模型适用于离散相体积分数小 于10%, DPM 模型使用面源注入。相比于煤粉燃 烧,水煤浆和污泥水煤浆燃烧过程中水分蒸发过程 是影响计算结果的关键因素。本文将水以单独 DPM 形式与煤粉分别注入燃烧器内,充分考虑水蒸 发过程的吸热现象,适用于水煤浆和污泥水煤浆的 燃烧数值模拟。

表 2 双竞争反应模型动力学参数

 Table 2
 Reaction kinetics parameters of two competing rates model

项目	指前 因子	活化能/ (MJ・(kg・mol) ⁻¹)	生成率 因子	
一次(慢速)反应	2×10 ⁵	104. 6	0.3	
二次(快速)反应	1. 3×10 ⁷	167. 4	1.0	

对典型 14 MW 双锥燃烧器结构进行简化,包括 一次风进口、二次风进口、出口、燃烧器壁面等,采用 ICEM 进行网格划分,网格数量为 46.5 万。双锥燃 烧器网格划分如图 4 所示。

2.2 水含量对污泥水煤浆燃烧的影响

污泥水煤浆燃烧过程中,水蒸发吸热影响燃烧 反应过程的稳定性。通过数值模拟研究双锥燃烧器





Fig. 4 Meshing of double cone combustor

采用现有燃烧方式燃用污泥水煤浆的可行性。水煤 浆中水含量对 14 MW 双锥燃烧器燃烧温度的影响 如图 5 所示。模拟工况为 100% 负荷,一次风速为 25 m/s,二次风速为 17 m/s,燃料为污泥掺烧比例 20% 的污泥水煤浆。随着水含量的增加,燃烧器内 的燃烧状况不断恶化,燃烧器内整体温度和燃烧器 出口温度均呈现快速下降的趋势。在水含量由 0 增 至 35% 时,平均每提高 1% 水含量,燃烧器出口温度 下降 7.95 K,燃烧器内平均温度下降 7.69 K。





14 MW 双锥燃烧器在相同工况下燃用煤粉和 污泥水煤浆(水含量 35%,污泥浆掺烧比例 10%) 时燃烧器内的温度对比如图 6 所示。可知燃用污泥 水煤浆后,燃烧器出口平均温度由 1 082 K 降至 804 K,燃烧器内平均温度由 1 053 K 降至 784 K,燃烧器 内几乎无稳定集中的高温火焰着火区。表明在现有 燃烧器结构条件下,采用目前的燃烧方式无法实现 污泥水煤浆的稳定燃烧,需对燃烧器结构和燃烧器 运行方式进行优化。

2.3 燃用污泥水煤浆的双锥燃烧器优化

双锥燃烧器主要是实现燃料的稳定着火和火焰 传播,燃料燃尽功能由燃烧器后连接的锅炉炉膛实 现。采用双锥燃烧器燃用污泥水煤浆,需解决燃烧 器内温度较低、燃料停留时间短等问题。燃烧器运 行方式上可从降低二次风量、提高二次风旋流强度、 二次风采用热风等方式强化燃烧组织。目前燃烧所 需风量均由一次风和二次风提供,燃烧器内风速较 高,且由于燃料在燃烧器内的燃烧进程低于 50%,



图6 双锥燃烧器燃用煤粉和污泥水煤浆的对比

Fig. 6 Combustion comparison of double cone combustor

for pulverized coal and sludge coal water slurry 实际燃烧所需空气量低于理论空气量的一半,降低

二次风量可降低燃烧器内的流速,增加污泥水煤浆 的停留时间,同时减少过量的空气对燃烧器内高温 区域的冷却作用,起到强化燃烧的作用;提高二次风 旋流强度,通过增加燃料在燃烧器的停留时间达到 强化燃烧的作用;二次风采用热风可通过提高烟气 温度,提高燃烧器内燃烧温度。

利用数值模拟分别进行降低二次风量、提高二 次风旋流强度、采用热风等措施时的燃烧工况,其中 降低二次风量燃烧方式将燃烧器内风量降为理论空 气量的0.6;提高二次风旋流强度燃烧方式将旋流 强度由1增加为2;综合强化燃烧方式采用降低二 次风量、增加旋流强度和采用1123K热二次风的 方法。不同强化燃烧方式条件下燃烧器内的温度分 布和烟气速度矢量分布分别如图7、8所示。使用原 燃烧方式时,由于污泥水煤浆在燃烧过程中挥发分 降低和水分蒸发吸热的双重影响,燃烧器内温度较 低,最高为850℃,且高温区域集中在前锥二次风与 燃料开始混合着火的区域,但进入燃烧器后锥后由 于烟速过高(出口处烟速大于100 m/s),燃料停留 时间不足,后锥整体温度降低,火焰无法稳定传播: 增加二次风旋流强度时,由于切向速度增加,二次风 在前锥处的扩散提前,停留时间增加,燃烧温度明显 提高,但后锥燃烧温度仍较低;采用减少二次风量的 方式,燃烧器出口烟速降低至65 m/s,燃料停留时 间增加,燃烧器前锥温度略提高,后锥燃烧温度和温 度分布均匀性明显提高:综合强化燃烧方式增加了 燃烧器内燃料停留时间,提高了烟气温度,燃烧器内 整体温度均大幅提升,火焰在燃烧器后锥能实现稳 定均匀传播。

各种强化燃烧方式均能改善燃烧器内燃烧组 织、提高燃烧器内平均温度。不同措施的强化燃烧 效果见表3。增加旋流强度,燃烧器出口平均温度 和燃烧器内平均温度分别增加了20和43 K;减少 二次风量的作用最为明显,燃烧器出口平均温度和 燃烧器内平均温度分别增加了203和104 K;综合 洁净煤技术



分布的影响

Fig. 8 Effects of different intense combustion method on the velocity vector of air in combustor

强化燃烧方式下,燃烧器出口温度接近燃烧器燃用 煤粉时的工况,燃烧器内平均温度降低约100 K,基 本可达到稳定燃烧污泥水煤浆的目的。

表 3 不同强化燃烧方式对双锥燃烧器燃用污泥水 煤浆的影响

 Table 3 Effect of different intense combustion method on sludge coal slurry combustion

强化燃 烧方式	出口平均 温度/K	燃烧器平均 温度/K	出口氧含 量/%	反应总放 热量/MW
燃用煤粉	1 082	1 053	11.82	6. 804
增加旋流强度	804 824	827	13. 00	4. 426
减少二次风量 综合强化方式	1 007 1 093	888 953	9.37 9.13	5. 507 5. 606

3 结 论

1)水蒸发吸热是影响水煤浆燃烧过程的关键因素,其最大吸热速率为0.504 kW/kg,占水煤浆最

大放热速率的 56.05%, 总吸热量为 1.917 MJ/kg, 占燃烧放热量的 9.94%; 掺烧 20% 污泥时水蒸发吸 热量为 0.546 kW/kg, 比水煤浆高 8.4%, 总放热量 为 16.88 MJ/kg, 比水煤浆低 12.5%。

2) 离散相模型中考虑水蒸发过程的吸热现象, 更适用于水煤浆燃烧的数值模拟。14 MW 双锥燃 烧器的模拟结果表明,水煤浆中水含量由0增至 35%时,平均每提高1%水含量,燃烧器出口温度下 降7.95℃,燃烧器内平均温度下降7.69℃;水含量 为35%时,燃烧器内平均温度降低269℃,燃烧器 出口平均温度降低278℃;直接使用现有双锥燃烧 器仅可燃烧水含量为25%左右的煤浆,无法实现污 泥水煤浆的稳定燃烧。

3)降低二次风量、提高二次风旋流强度、提高 二次风温度的强化燃烧措施,均可改善污泥水煤浆 燃烧状态。二次风旋流强度由1变为2时燃烧器出 口平均温度提高20℃,二次风量减少至为理论空气 量的0.6,燃烧出口平均温度提高203℃,综合使用 3种措施后,燃烧器出口平均温度提高289℃,双锥 燃烧器基本可达到稳定燃烧污泥水煤浆的目的。

参考文献(References):

- 张东,董岳,黄瑛,等. 国内外污泥处理处置技术研究与应用现状[J]. 环境工程,2015,33(S1):600-604.
 ZHANG Dong, DONG Yue, HUANG Ying, et al. Research and application situation of sludge treatment and disposal technology at home and abroad[J]. Environment Engineering, 2015,33(S1): 600-604.
- [2] 李廉明,张恒立,余春江,等. 污泥焚烧循环流化床锅炉受热面 沉积特性研究[J]. 能源与环境,2015(3):61-65.
 LI Lianming, ZHANG Hengli, YU Chunjiang, et al. Study on de-

posits derived from sewage sludge CFB bioler[J]. Energy and Environment, 2015(3):61–65.

- [3] 黄毅,朱建国,吕清刚,等. 城市下水污泥循环流化床焚烧工艺 分析[J]. 工业加热,2013,42(3):37-39.
 HUANG Yi, ZHU Jianguo, LYU Qinggang, et al. Analysis of city sewage sludge incineration using circulating fluidized bed[J]. Industry Heating,2013,42(3):37-39.
- [4] 李洋洋,金宜英,聂永丰. 污泥与煤混烧动力学及常规污染物 排放分析[J]. 中国环境科学,2014,34(3):604-609.
 LI Yangyang, JIN Yiying, NIE Yongfeng. Effects of sewage sludge on coal combustion using thermo-gravimetric kinetic analysis[J].
 China Environmental Science,2014,34(3):604-609.
- [5] 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]. Journal of Combustion Science and Technology, 2015,21(2):114-123.

程晓磊:双锥燃烧器燃用污泥水煤浆的燃烧特性和数值模拟

- [6] 董梅,李和平,马涛,等.改性化工污泥与煤的成浆性及燃烧性 分析[J].信阳师范学院学报,2017,30(4):614-617.
 DONG Mei,LI Heping, MA Tao, et al. Slurryability and combustibility of modified chemical sludge and coal[J]. Journal of Xinyang Normal University,2017,30(4):614-617.
- [7] 曾成才.烟煤掺烧污泥燃烧特性实验研究及分析[D].广州: 华南理工大学,2014.
- [8] 胡勤海,熊云龙,朱妙军,等.城市污泥掺制水煤浆燃烧动力学 特性[J].环境科学学报,2008,28(6):1149-1154.
 HU Qinhai,XIONG Yunlong,ZHU Miaojun, et al. Study on combustion kinetics of coal water slurry prepared with sewage sludge
 [J]. Acta Science Circumstance,2008,28(6):1149-1154.
- [9] 曹晓哲,赵卫东,刘建忠,等. 煤泥水煤浆燃烧特性的热重研究
 [J]. 煤炭学报,2009,34(10):1394-1399.
 CAO Xiaozhe, ZHAO Weidong, LIU Jianzhong, et al. A thermogravimetry inverstigation on the combustibility of coalslime water slurry[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(10):1394-1399.
- [10] 朱建航,胡勤海,陈菊芬,等. 污泥水煤浆燃烧和污染排放特性研究[J].燃料化学学报,2012,40(2):252-256.
 ZHU Jianhang, HU Qinhai, CHEN Jufen, et al. Combustion of sludge coal water slurry and emission property of contaminants
 [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(2): 252-256.
- [11] 段艳松,张立麒,毛志慧,等.水煤浆 MILD 燃烧数值模拟研究
 [J].洁净煤技术,2017,23(4):36-41,46.

DUAN Yansong, ZHANG Liqi, MAO Zhihui, et al. Numerical simulation of MILD combustion on coal-water slurry[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 36-41, 46.

[12] 丁宁,张传名,曹欣玉,等.410 t/h 六角切圆锅炉水煤浆燃烧 试验与数值模拟[J].中国电机工程学报,2006,26(11):41-46.

DING Ning, ZHANG Chuanming, CAO Xinyu, et al. Experimental research and numerical simulation on combusting CWS in 410 t/h six – corner tangentially firing boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11):41–46.

- [13] 朱天宇,殷立宝,湛志刚,等. 涡耗散模型和混合分数模型模 拟锅炉煤粉掺烧污泥过程的适应性[J].中南大学学报(自然 科学版),2016,47(8):2864-2872.
 ZHU Tianyu, YIN Libao, ZHAN Zhigang, et al. Adaptability of PDF transport model and eddy-dissipation model in simualtion of coal combustion and co-combustion with sludge in coal-fired boiler[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2016,47(8):2864-2872.
- [14] 莫日根,王乃继,程晓磊.水煤浆在双锥逆喷燃烧器内燃烧过程的数值分析[J].洁净煤技术,2018,24(2):83-89.
 MO Rigen, WANG Naiji, CHENG Xiaolei. Numerical analysis of coal water mixture combustion in double cone reversed injection burner[J]. Clean Coal Technology,2018,24(2):83-89.
- [15] 姜思源,王永英,周建明,等.中等挥发分烟煤回燃逆喷式燃烧数值模拟[J].煤炭学报,2014,36(6):1147-1153.
 JIANG Siyuan,WANG Yongying,ZHOU Jianming, et al. Numerical simulation on middle volatile coal combustion in reversed injection burner[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(6): 1147-1153.