第 52 卷 第 9 期 2023 年 9 月
热力发电 THERMAL POWER GENERATION
Vol.52 No.9 Sep. 2023

DOI: 10.19666/j.rlfd.202305085

燃煤循环流化床锅炉混燃污泥研究与应用进展

姜华伟[1]，袁 淼[1]，袁 野[1]，杨海瑞[2]，李延辉[1]
（1.青岛大学机电工程学院，山东 青岛 266071；2.清华大学能源与动力工程系，北京 100084）

［摘 要］燃煤循环流化床（CFB）锅炉对污泥进行混燃是一种有效处置污水污泥的方法。在适当的污泥掺烧比例下，污泥与煤混燃不会对电厂生产造成显著不利影响，并且可以使污泥的热值得到合理利用。综述了燃煤 CFB 锅炉混燃污泥的研究与应用进展，包括煤与污泥混燃过程中污染物的排放和控制、锅炉可靠运行的掺烧比例和污泥干化等情况。分析了混燃湿污泥所带来的运行问题，介绍了采用水煤浆悬浮燃烧技术及富氧燃烧技术对污泥进行处置和利用的情况。指出结合先进烟气净化技术的污泥干化与焚烧综合利用是目前燃煤 CFB 锅炉混燃污泥应用的较为成熟的工艺之一，在对多种污染物进行有效控制的同时，可以避免污泥贮存、干燥、输送过程中产生臭气对环境的影响。相关调查和分析结论可为燃煤 CFB 锅炉混燃污泥的设计和安全运行提供参考和依据。

［关 键 词］循环流化床锅炉；燃煤；污泥；混燃；污染物排放

［引用本文格式］姜华伟，袁淼，袁野，等．燃煤循环流化床锅炉混燃污泥研究与应用进展[J]．热力发电，2023, 52(9): 11-20. JIANG Huawei, YUAN Miao, YUAN Ye, et al. Progress of research and application in circulating fluidized bed boilers co-firing coal and sewage sludge[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 11-20.

Progress of research and application in circulating fluidized bed boilers co-firing coal and sewage sludge

JIANG Huawei[1], YUAN Miao[1], YUAN Ye[1], YANG Hairui[2], LI Yanhui[1]
(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China;
2.Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An effective disposal method of municipal sewage sludge is burning sewage sludge together with coals in coal-fired circulating fluidized bed (CFB) boilers. At an appropriate weight ratio of sewage sludge in fuel blend, the co-combustion of sewage sludge and coals will not cause significant adverse effects on power plant production, and make use of the calorific value of sewage sludge. This study summarizes the progress of research and application in CFB boilers co-firing coal and sewage sludge, involving the emissions and controls of pollutants during the co-combustion of sewage sludge and coals, the weight ratio of sewage sludge in fuel blend under the reliable boiler operation, and sludge drying. The operational problems associated with the co-combustion of wet sludge and coals are analyzed. The applications of coal-water slurry suspension combustion technology and oxygen-enriched combustion technology in the disposal and utilization of sewage sludge are presented. The study points out that the drying and incineration of sewage sludge combined with advanced flue gas purification technology is one of the mature processes for the application of coal-fired CFB boilers in sewage sludge incineration, which can avoid the environmental impact of odours generated during the storage, drying and transportation of sewage sludge, and provide effective controls of a variety of pollutants. The conclusions of investigation and analysis can provide a reference and basis for the design and safe operation of CFB boilers co-firing coal and sewage sludge.

Key words: circulating fluidized bed boiler; coal combustion; sewage sludge; co-combustion; pollutant emissions

收稿日期：2023-05-31　网络首发日期：2023-07-11
基金项目：国家自然科学基金项目（52276124）；青岛市博士后应用研究项目
Supported by: National Natural Science Foundation of China (52276124); Qingdao Postdoctoral Applied Research Project
第一作者简介：姜华伟（1984），男，博士，主要研究方向为 CFB 锅炉高效清洁燃烧与气固两相流动，jianghwwh@qdu.edu.cn。

近年来，随着城市规模的扩大和经济的高速发展，城市污水排放量大幅增长，污水处理过后随之产生大量污泥。生活污水污泥和工业污泥是 2 种主要污泥来源，前者含有机物和大量病原微生物等污染物，而后者则含有生产废水中的化学成分，属于危险废弃物。根据中国行业研究网调查的数据显示，2022 年我国污泥产量达 7 288.3 万 t，其中，市政污泥约为 5 552 万 t，预计未来 5 年年均增长率将会超过 11%，若处置不当将会对城市环境造成极大污染。在现有的污泥处置技术中，焚烧可以实现对污泥的减量化、稳定化和无害化处理，近年来得到国家有关政策的大力支持和鼓励。污泥与煤的混燃被认为是降低燃煤电厂碳排放的一种可行方法[1]。在大多数情况下，污泥只占锅炉容量的一小部分，因此燃烧过程或供热量、发电量并不会受到不利影响。采用污泥和煤混合燃烧具有以下优势：1）利用燃煤电厂的有效容量和经验丰富的运行人员对污泥进行处置，使污泥在短期内得到可靠处置；2）克服了污泥燃烧困难、热值低的缺点；3）利用燃煤电厂现有的烟气净化设施来处理燃烧过程中排放的有毒气体和各种污染物。

污泥的热值较低，水分和灰分高，单独焚烧效果较差。因此在实际焚烧过程中，常按照一定掺烧比例与其他燃料进行混燃。污泥在燃烧时会表现出与煤完全不同的特性。湿污泥含水率最高可达 80%（质量分数，下同），有 50%的干燥基灰分，90%的干燥无灰基挥发分，固定碳小于 10%[2]。影响污泥整体燃烧过程的主要因素包括污泥的干燥、挥发物的释放和燃烧、高灰分焦炭的燃烧。污泥燃烧可能成为许多污染物的潜在来源，如重金属、底灰和飞灰、二噁英和呋喃、NO_x、N_2O、SO_2、HCl、HF 和 C_xH_y[3-7]，在处置过程中须高度重视。此外，掺烧污泥会对锅炉运行产生一定影响，通常要对湿污泥进行干燥并选择适宜的掺烧比例。污泥燃烧后剩余大约 30%的固体物质仍然以灰的形式存在[8]，其中含有痕量金属，应妥善处置。

污泥与煤的混燃通常借助循环流化床（circulating fluidized bed，CFB）锅炉或煤粉锅炉得以实现。现代 CFB 锅炉具有高度的燃料灵活性、宽广的负荷调节范围、较高的燃烧效率以及 NO_x、SO_2 排放低等优势[9-10]，适合燃用污泥这类具有较高灰分和氮含量的燃料，对入炉污泥的粒径要求也更加宽松，在运行成本方面优于煤粉锅炉[11]，并且可以燃烧湿污泥和半干污泥。现有的燃煤 CFB 锅炉经过适当改造后便能用于混燃污泥，但若处理不当，污泥与煤混燃也会给 CFB 锅炉带来烧结、团聚、结渣等问题[12]。

本文将从燃煤 CFB 锅炉混燃污泥的掺烧方式和污泥的干化、锅炉可靠运行的适宜污泥掺烧比例、污染物排放和控制、灰分的处置和利用等方面，综述国内外燃煤 CFB 锅炉混燃污泥在技术方面的研究与应用现状。

1 掺烧污泥对燃煤 CFB 锅炉运行影响

1.1 污泥掺烧方式

污泥的掺烧方式主要有 2 种。

1）*湿污泥直接入炉掺烧* 主要处理过程是将湿污泥暂存在湿污泥仓中，利用污泥处理系统将其送入炉膛直接掺烧。对于含水率低于 65%的污泥，可以利用现有的输煤系统将其与燃煤混合后直接送入炉膛进行燃烧。而对于含水率高于 65%的污泥，由于其呈现黏稠的泥浆状，使用皮带输送很容易导致粘滞和堵塞问题，所以只能通过专用的污泥螺杆泵进行单独输送[13]。此外，还可以将湿污泥送入干燥室内，使湿污泥雾化呈悬浮状态后直接送入炉膛燃烧[14]。

2）*将湿污泥通过污泥干化设备进行干化后再掺烧* 使用单独的污泥干化设备将污泥含水率降低至 40%以下后，通过干污泥输送装置，利用现有输煤系统将干污泥送入炉膛燃烧。目前广泛应用的是导热式和对流式污泥干燥机，使用热蒸汽、热空气或专用导热油等作为加热流体[15]。

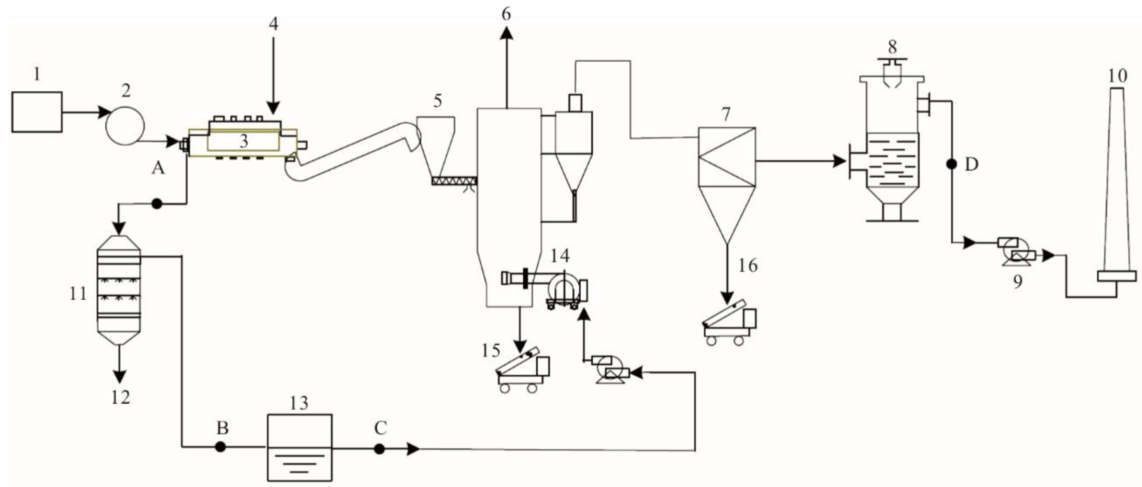
1.2 污泥水分的影响及污泥干化

污水处理产生的污泥经自然干燥和机械脱水后含水率仍然很高，不利于污泥的掺烧利用。虽然也可将高含水率的湿污泥直接送入炉膛燃烧，使污泥在炉膛内完成干燥和燃烧过程，但高水分易导致锅炉燃烧不稳定、燃烧效率低以及排烟热损失大等问题。李云玉等[16]基于杭州七格污水处理厂 100 t/d CFB 污泥焚烧示范装置的性能试验和商业试运行数据，研究发现污泥含水率为 75%时，CFB 污泥焚烧系统不需要添加煤等辅助燃料，便可实现装置的自持燃烧；当污泥含水率从 75%增加到 80%时，辅助燃料的消耗量略微增加，日消耗量控制在 2 t 以内；但当污泥含水率高于 80%时，辅助燃料急剧增加，日消耗量超过 4 t。对于 CFB 锅炉的运行，要保证较

高的锅炉热效率，往往需要对湿污泥做干化处理。

目前的污泥干化技术包括直接干化技术、间接干化技术和直接–间接联合技术等传统干化技术，以及水热干化技术和生物干化技术等新型污泥干化技术。直接干化技术利用高温烟气直接对污泥进行干燥；间接干化技术则是借助换热器实现干燥，污泥和热介质不直接接触[17]。在污泥干化过程中，由于污泥中有机物含量高，易产生臭气，产生的 NH_3、SO_2、NO_x 等有害气体需要及时去除。

近些年，污泥干化与焚烧综合利用技术在燃煤电厂得到了推广和应用，主要采用旋转圆盘干燥机和桨叶式干燥机等 2 种间接干燥设备对污泥进行干化。东南大学与某公司合作研发了 250 t/d 污泥干化焚烧系统，将脱水污泥送入旋转圆盘干燥机中与汽轮机中间抽汽进行换热，干化后的污泥由螺旋给料器连续送入 CFB 锅炉内进行燃烧[18]。浙江大学陆胜勇等[19]采用污泥干燥、混燃相结合的系统处置污泥，该系统由空心桨叶干燥机、热干燥废气控制系统、1 台 75 t/h 的 CFB 锅炉和烟气净化系统组成（图 1）。湿污泥用泵送入空心桨叶干燥机中，通过低压余热蒸汽加热，将污泥干燥至含水量为 40%。污泥干燥过程中释放的废气被送到洗涤器进行冷凝，使可凝性化合物如 NH_3（气味的主要来源）和 SO_2 被凝结，然后将废气引入生物滤池进一步除臭。从干燥机输出的干污泥与煤混合，然后和生物滤池净化过的废气一齐送往 CFB 锅炉进行焚烧。该系统有效解决了污泥干化过程中产生的臭气污染问题，还利用了干燥废气的热值，提高了系统的热效率。



A、B、C、D—废气取样点；1—湿污泥仓；2—泵；3—空心桨叶干燥机；4—低压余热蒸汽；5—干污泥仓；6—75 t/h CFB 锅炉；7—四电场静电除尘器；8—双碱湿法烟气脱硫系统；9—引风机；10—烟囱；11—洗涤器；12—冷凝水；13—生物滤池；14—燃烧室；15—炉渣；16—粉尘。

图 1 污泥干燥和混燃系统示意
Fig.1 Schematic diagram of sludge drying and co-combustion system

1.3 掺烧比例的选定

掺烧比例是燃煤 CFB 锅炉混燃污泥的重要参数。污泥中的水分、灰分高，掺烧比例过大易使炉膛燃烧温度降低，燃烧效率下降，烟气损失增加并引起低温腐蚀，因此选择合适的污泥掺烧比例尤为关键。

为研究掺烧比例对锅炉稳定运行的影响，江苏省环境科学研究院以市政污泥为原料，利用某热电厂 CFB 锅炉进行了煤与含水率为 81%的污泥的协同焚烧试验研究[20]。该研究发现通过调节泥煤质量比可以实现锅炉负荷的控制和锅炉的稳定运行。泥煤比在 0.4 以内时，能够确保烟气达标排放；而出于燃料热值变化和蒸汽用户需求等方面综合考虑，泥煤比应不大于 0.3。

1.4 掺烧比例对 CFB 锅炉运行性能的影响

李博等[21]针对 240 t/h 的 CFB 锅炉，采用湿污泥直接进炉的方式对其进行改造，发现 CFB 锅炉运行床温和氧量随着掺烧比例的增大而下降，炉膛出口负压同时升高；但其脱硝还原剂耗量变化很小，说明掺烧污泥对 NO_x 排放的影响比较小。该研究为同类型 CFB 锅炉掺烧污泥的改造提供了参考依据。

李森等[22]分析了 300 MW CFB 电站锅炉掺烧污泥后的运行数据，发现掺烧比例为 10%对锅炉燃烧工况没有明显影响，锅炉稳定安全运行；掺烧污泥比例达到 20%及以上时，对锅炉的进料系统和系统运行稳定产生了一定影响，因此建议掺烧比例可选定为 10%~40%。但从 CFB 锅炉的稳定运行角度考虑，认为污泥的掺烧比例应控制在 20%左右。

鄢晓忠等[23]通过改变不同造纸污泥的掺烧比例来解决湖南某纸业公司 260 t/h CFB 锅炉燃用运行燃料时飞灰和炉渣含碳量高、排烟温度高以及热效率偏低的问题。结果表明，掺烧约 3.5 t/h 的少量污泥，可以有效减轻掺烧污泥所带来的负面影响，确保燃料完全燃烧，烟气中的飞灰含碳量和 CO 排放量均有所降低，提高了锅炉的燃烧效率。

有学者借助模拟软件研究污泥的掺混比例对 CFB 锅炉运行的影响。柯希玮等[24]利用一维 CFB 的数学模型模拟了污泥掺烧对某 330 MW CFB 锅炉物料平衡特性的影响。模拟和实验的结果表明，掺烧 10%的污泥对 CFB 锅炉整体的运行性能影响较小，甚至有利于改善 CFB 锅炉物料循环性能。

1.5 掺烧比例对燃烧工况的影响

污泥掺烧比例对燃烧工况的影响主要体现在炉内燃烧温度和锅炉热效率。

随着污泥掺烧比例的增加，炉内的燃烧温度呈下降趋势。这主要是由于污泥掺烧比例增大后，混合燃料的水分增多，水分蒸发会吸收炉内更多的热量，使炉内温度降低。

污泥掺烧比例的增加也会降低锅炉的热效率。由于炉内水分增多导致排烟热损失增加，并且污泥的热值较低，燃烧时需要吸热，导致燃烧温度明显下降，因此锅炉热效率降低。另外，随着污泥掺烧比的增加，部分燃料有可能燃烧不充分，造成了不完全燃烧的热损失。山东大学孙宇等[25]研究了不同污泥掺烧比例对 CFB 锅炉运行的影响。考虑到燃烧的稳定性、锅炉的热效率以及污泥的结渣问题，污泥的掺烧比例应该控制在 20%以下。

1.6 掺烧比例对 CO 和污染物排放的影响

学者们除了研究污泥掺烧比例对 CFB 锅炉运行和燃烧工况的影响，也研究了其对 CO 和污染物的排放的影响。蒋孟宴等[26]以城市生活污泥、徐州烟煤为研究对象，在 0.3 MW CFB 实验台上开展了煤与污泥的掺烧实验。结果表明，污泥添加比例由 0 增加到 40%时，CO 和 SO_2 的排放量增加，NO 的排放量下降。污泥与煤的燃烧温度较低，一般为 850~950 ℃。污泥掺烧比例增加造成燃料水分增多，燃烧过程产生更多的水蒸气，通过氧化和还原反应抑制了 NO 的产生，所以 NO 的排放量下降。

综上，10%~20%的污泥掺烧比例较为理想。在此条件下，CFB 锅炉的运行性能受影响很小，锅炉的热效率较高，污泥结渣问题较轻。但当污泥掺烧比例高至 50%时，污泥中的水分会吸收大量的热量，导致炉膛温度降低，产生二噁英。

2 燃煤 CFB 锅炉混燃污泥的燃烧系统改进及新型燃烧技术

2.1 CFB 锅炉的改良

现有混燃污泥的 CFB 装置在设计之初往往只考虑燃煤，因此在实际混燃过程中，难免会产生各样的问题。一些研究人员从技术出发，开发改良了锅炉运行的工艺和设备，并在实际生产过程中取得了良好的效果。

CFB 锅炉混燃湿污泥的燃料输送系统易出现堵塞，炉膛内燃烧也因此变得不稳定。江西江联重工集团有限公司开发、设计并制造了一台 180 t/h 高温高压差速 CFB 锅炉[27-28]，用于混燃煤和造纸污泥。针对造纸污泥高水分、低热值、黏性大等特点，该锅炉采用高低差速床技术形成主、副床的内循环流，提供一个高温、稳定的温度场，保证了混合燃料入炉后的快速稳定燃烧。其利用烟气干燥污泥并采用气力输送方式，在不耗费额外热量的情况下提高燃料入炉热值，并保证污泥输送通畅，使锅炉燃烧稳定。该锅炉通过污泥干化提质与锅炉受热面布置相结合，避免了将造纸污泥中大量水分带入锅炉，使烟气中水分增多，露点升高，造成尾部受热面低温腐蚀的问题。同时，燃料输送系统的堵塞问题得到有效解决。

王慧青等[29]发明了一种中温分离 CFB 锅炉掺烧污泥的系统。在中温分离 CFB 锅炉掺烧污泥时，通过柱塞泵将污泥送入设置在中温分离旋风分离器中心筒转角烟道上方的立式给料机，立式给料机将污泥切割打散。在湍流的作用下污泥中的水分迅速蒸发，含水率降至 40%左右。通过中温旋风分离器使污泥含水率下降，实现在中温分离 CFB 上掺烧污泥的目的。李昱喆等[30]发明了一种 CFB 锅炉污泥低氮燃烧系统，通过改变 CFB 锅炉的构造实现污泥的低氮燃烧。

2.2 水煤浆悬浮燃烧技术

近些年，出现了 CFB 锅炉水煤浆悬浮燃烧技术对湿污泥进行合理处置和利用的工程案例。江苏苏州角直热电厂利用 35 t/h 水煤浆 CFB 锅炉，将煤泥伴生物污泥燃烧供热。所用污泥源于附近印染厂排放污泥，用含水率高的污泥替代需要添加的水分来配置水煤浆，并调整污泥掺混比后与煤泥进行混

燃[31-32]。将印染厂污泥与煤泥混燃产生的烟气中的 SO_2 和 NO_x 排放量得到显著降低。此外，污泥掺入量的增加使烟气中 SO_2 质量浓度下降，可节省烟气脱硫脱硝处理的成本。污泥水煤浆悬浮燃烧产生烟气中的二噁英的排放达到了我国污泥单独焚烧处理标准，并符合危险废物焚烧污染控制标准中对二噁英排放的要求。另外，针对烟气测定的多氯联苯含量也远低于《含多氯联苯废物污染控制标准》中所规定的含有多氯联苯废物的限定值。该项目的应用，综合考虑了 SO_2、NO_x、重金属、飞灰和炉渣以及二噁英和多氯联苯等污染物对环境的影响。角直热电厂采用 1 台 20 t/h 和 1 台 35 t/h 的 CFB 锅炉燃烧煤泥混生物污泥。经过 2010 年至 2013 年 6 月 2 年半的运行，总供热量 54.6 万 t，共消耗生物污泥 2.4 万 t，节省能源成本约 600 多万元，取得了可观的经济效益。在 CFB 锅炉内采用水煤浆悬浮燃烧方式，综合利用了煤泥和污泥 2 种废弃物的热值，拓宽了燃煤 CFB 锅炉混燃湿污泥的应用途径。

2.3 富氧燃烧技术

除水煤浆悬浮燃烧技术外，相关学者有意将富氧燃烧技术运用到 CFB 锅炉混燃污泥上，取得了理想的研究结果。Gao 等人[33]采用热重分析方法研究了污泥与无烟煤在空气和富氧条件下混燃的燃烧特性。结果表明，污泥的加入可以改善无烟煤的着火和燃尽特性。加热速度为 50 ℃/min 时，共燃物综合性能指标比加热速度为 20 ℃/min 时提高近 3 倍。与空气相比，在 $\varphi(O_2)$=21%、$\varphi(CO_2)$=79%条件下，样品的燃尽温度更低，着火温度更高，最大质量损失率、综合性能指标得到相应改善。随着 $\varphi(O_2)$从 21%增加到 30%，样品的着火温度和燃尽温度降低，最大质量损失率和综合性能指标提高。这些发现为进一步研究煤与污泥混燃提供了思路。

韩国延世大学环境工程系的 Jang 等人[34]在 30 kW 的 CFB 中试装置上验证了在混燃污泥 CFB 上富氧燃烧的可行性。分别向炉膛注入空气和不同纯度的氧气，发现富氧燃烧的烟气温度高于空气燃烧。除此之外，富氧燃烧使得底灰和飞灰中的铝、钾和钙化合物大幅减少，CO_2 的捕集效果也达到了预期目标。波兰琴斯托霍瓦大学热能机械研究所的 Monika 等人[35]在 12 kW CFB 燃烧室中，研究了污泥和烟煤的富氧燃烧过程中 NO、N_2O、NO_2、SO_2 和 CO 的排放特性。研究发现，污泥在空气中燃烧时 NO、N_2O 和 SO_2 的瞬时和平均排放量均远高于煤。随着 O_2/CO_2 气氛中 O_2 体积分数的增加，NO 和 SO_2 的排放量增加，N_2O 和 CO 的排放量减少。尽管污泥中 N 的含量较高，但污泥中 NO_x 和 N_2O 的总转化率远低于煤。这些研究为 CFB 锅炉富氧混燃污泥提供了参考依据，在“双碳”目标的大环境下，富氧燃烧技术为燃煤 CFB 锅炉混燃污泥的发展提供了方向和思路。

3 燃煤 CFB 锅炉混燃污泥气体污染物控制

3.1 混燃污泥对气体污染物排放的影响

虽然污水污泥中含有大量的 N 和 S，但 CFB 锅炉的优势显著降低了 NO_x 的排放，只有百分之几的 N 被转化为 NO 或 N_2O。污泥中含有的 S，通过增加炉内石灰石供给处理即可；结合尾部烟气的石灰石−石膏湿法脱硫技术，可实现烟气中 SO_2 的超低排放；也可在烟气进入布袋除尘器之前使用熟石灰来脱硫，同时捕获 HCl。

浙江大学的邓文义等[36]采用实验室规模的流化床炉焚烧高硫分污泥。污染物分析结果表明，污泥中硫、氮和挥发性物质的含量较高，单独焚烧污泥产生的烟气中含有较高质量浓度的 SO_2、NO_x、二噁英等有机污染物。随后将污泥与煤混燃，二噁英等有机污染物质量浓度显著降低，掺烧污泥的焚烧方式对于减排污染物尤为适合。

适量掺烧污泥不会对气体污染物排放造成显著影响。位于德国 Ville-Berrenrath 的 Rheinbraun AG 公司的电厂研究了 CFB 锅炉中机械脱水污泥与褐煤混燃[37]，其褐煤容量为 93 t/h。该厂进行了为期 1 年的机械脱水污泥与褐煤的混燃试验，在燃烧和排放特性方面取得了很好的结果，SO_2、NO_x、CO 和颗粒物的排放量均低于根据煤炭和废物燃烧条例实施的限值。

瑞典查尔默斯理工大学能源转换系的 Leckner 等人分别在实验室 CFB 装置和中试 12 MW CFB 锅炉中，研究了污泥与波兰烟煤的混燃[38]。研究表明，在燃煤 CFB 装置中进行污泥的混燃，有害气体排放不超过污泥能量份额小于 25%时的欧盟和德国排放限值。燃煤 CFB 混燃污泥后主要污染物排放仍能满足目前的排放标准，但要注意 CO、HCl 及有机污染物的排放控制。

Wu 等人[39]模拟了三维 CFB 中煤与污泥共燃，从流动特性、气体组成、反应速率曲线和颗粒燃烧

特性方面对煤和污泥共燃结果进行了定性和定量分析。结果表明，随着煤与污泥比例的降低，挥发物、CO 和 CO_2 的质量浓度略有上升。

除 SO_2 和 NO_x 等常规污染物外，污泥与煤混合燃烧过程中也会产生有机污染物。二噁英是一种毒性较强的有机污染物，需要控制其排放量。童敏等[40]进行了煤掺烧污泥的实验，其中温度停留在 250~500 ℃时间较长，研究发现在掺烧 10%含水率 30%的污泥时，二噁英的排放质量浓度比纯煤燃烧时高了 0.136 ng/m^3。李帅英等[41]在同一套设备中对比了掺烧污泥和未掺烧污泥时的二噁英排放质量浓度，炉内温度在 1 000 ℃以上，研究发现，二噁英的排放质量浓度并未有明显的变化，皆小于 0.02 ng/m^3。因此，二噁英的产生与温度有关，当温度超过 850 ℃时，二噁英能够分解。此时煤掺烧污泥并不会对二噁英的排放质量浓度有较大的影响。

3.2 控制气体污染物排放技术的发展

除传统的减排工艺外，结合先进烟气净化技术的污泥干化与焚烧综合利用，是燃煤 CFB 锅炉混燃污泥应用的新方向。上海青浦工业园区热电有限公司利用 75 t/h 燃煤 CFB 锅炉，对附近青浦污泥干化厂生产的含水量为 30%的干化污泥进行了焚烧利用[42]，每日总焚烧量约 450 t，其中污泥每日焚烧量达 30~40 t。该热电厂将煤和污泥一起送入破碎机破碎，之后混合燃烧，计划采用气力输送方式单独输送污泥进入炉膛，从而控制每小时污泥燃烧量。污染物排放方面，采用氨气喷射脱硝技术、尾部干法加湿法脱硫技术和电除尘技术，起初可以使 NO_x 控制在 100 mg/m^3 以下，SO_2 控制在 35 mg/m^3 以下，粉尘控制在 10 mg/m^3 以下，达到了排放标准。在采用一种 AO 干法脱硫脱硝协同技术之后，锅炉中的 SO_2 和 NO_x 等污染物全部稳定实现超低排放[43]。该项目还实现了无带电荷水蒸气排出以及烟气脱硫脱硝过程零废水、零废渣、无腐蚀、无氨泄漏风险，达到了循环经济的目的。

浙江嘉兴新嘉爱斯热电有限公司运行有 2 台 220 t/h CFB 污泥与煤混燃锅炉[44]，每日可处理污泥 3 000 t 左右，实现了污泥焚烧综合利用的热电联产。其工艺流程如图 2 所示[43]。

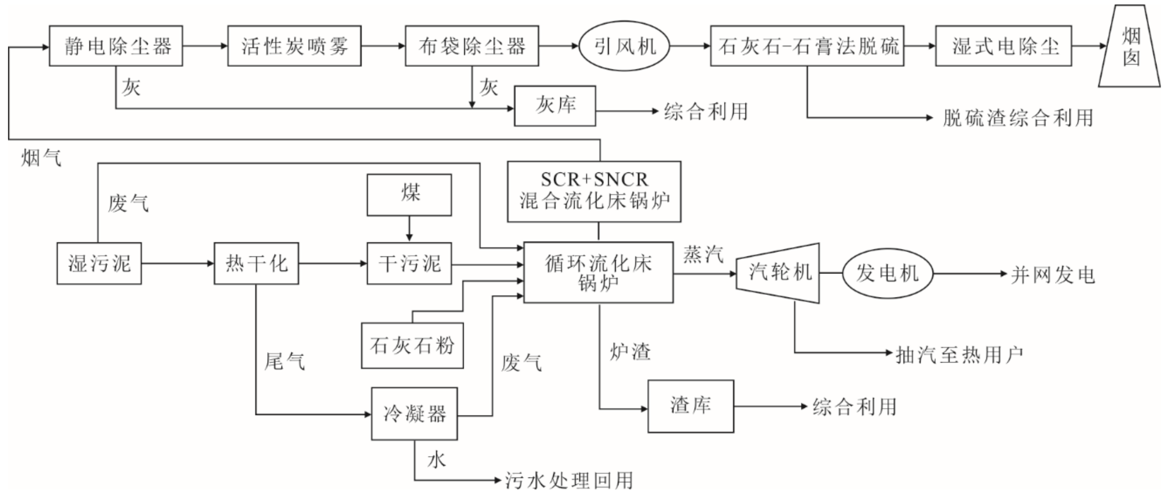


图 2 燃煤 CFB 锅炉污泥焚烧综合利用热电联产工艺流程

Fig.2 Process flow chart of heat and power cogeneration by sludge incineration integrated utilization in a coal-fired circulating fluidized bed boiler

湿污泥通过螺旋压榨机机械脱水后，进入超圆盘式干燥机被干化，得到含水率 40%的干污泥与煤按 1:1 的比例混合后，输送到 CFB 锅炉炉膛燃烧。圆盘干燥机出来的干化尾气进入冷凝器，将其中的蒸汽凝结成水后，剩余的尾气与湿污泥仓引出的贮存废气也分别被引入到 CFB 锅炉炉膛，避免了臭气排放对环境造成的影响。气体污染物控制方面，采用向炉膛内投入石灰石粉，用于炉内脱硫，结合尾部烟气的石灰石-石膏湿法脱硫技术，使 SO_2 排放基本控制在 35 m^3/h 以下；采用 SCR 和 SNCR 混合脱硝技术，将 NO_x 降低到 50 mg/m^3 左右。此外，尾部烟气依次经过静电除尘器除尘，活性炭吸收重金属及二噁英，布袋除尘器除尘，石灰石-石膏湿法脱硫和湿式电除尘等，有效控制了粉尘、重金属和二噁英的排放。该项目的应用，在综合考虑了多种污染物排放控制的同时，还引入了对与污泥干燥有关的尾气、凝结水以及湿污泥仓贮存废气等物质的处理。其无害化处理嘉兴市 80%以上的污泥，真

正做到了变废为宝、节能减排，在脱硫、脱硝和脱汞方面采用的先进烟气净化技术，也是值得借鉴的。

4 燃煤 CFB 锅炉混燃污泥固体污染物处置

4.1 重金属的排放及处置

污泥经过焚烧处理后，污泥中的有机污染物和病原体组分被燃烧殆尽，但污泥中所含的重金属和焚烧过程中产生的二噁英却被保留了下来。焚烧后产生的飞灰和底渣被认定为危险废物。针对 CFB 锅炉混燃污泥灰分的特性，卡帕里卡大学的 Barbosa 等人[45]在流化床燃烧室中将只燃烧煤和掺烧污泥进行对照。结果发现与燃煤相比，共燃试验形成的灰中 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Fe 等金属含量均较高。法国法规 CEMWE 也将煤与污泥混燃产生的飞灰归类为危险废物。

4.2 灰渣中重金属的迁移

污泥和煤中都含有多种重金属，将二者混合燃烧会使灰渣中重金属的迁移特性有所变化，从而影响灰渣的处置方式。刘蕴芳等[46]发现，污泥中重金属的质量分数普遍高于煤，在混烧后，灰渣中的重金属质量分数明显增加。此外，不同灰渣样品中重金属的残留呈现出相似的趋势，即大部分难挥发的重金属（如 Pb、Cu、Cr 和 Ni）残留在灰渣中，部分较弱挥发性的重金属（如 Zn 和 Cd）也存在于灰渣中，而易挥发的重金属（如 As、Hg 和 Se）在灰渣中的质量分数较低。

葛江等[47]探讨了污泥掺混比例对煤掺烧污泥灰渣中 As、Zn 和 Cr 等 3 种重金属迁移特性的影响。研究结果表明，随着污泥掺混比例的增加，灰渣中的 As 质量分数呈现下降趋势，而 Zn 和 Cr 的质量分数则呈现增加趋势。出现这样的结果主要是因为 As 活泼，容易与 O_2 在高温下反应生成易挥发的 As 化合物；Zn 相对不活泼，且污泥中 Zn 的含量远比煤更高；Cr 属于难挥发的金属，在高温下容易与 O_2 生成稳定的 Cr_2O_3，污泥中的 Cr 含量也比煤的高[36]。

赵晓莉等[48]探索了在流化床中混烧污泥和煤时，灰渣中重金属的毒性问题。研究结果显示，在掺烧比例为 30%的情况下，灰渣中的 Cd、Mn、Pb、Ni 和 Cr 质量分数较低，在此条件下对环境较为友好。

4.3 飞灰中重金属的迁移

对于飞灰中重金属迁移富集特性，查尔默斯理工大学的 Åmand 等人[49]在 12 MW CFB 锅炉中，研究了机械脱水污泥与波兰烟煤混燃过程中痕量金属的排放。研究发现，在为燃煤设计的 CFB 锅炉中进行混燃是可行的。随着污泥比例的增加，灰中 Hg、Cd、Cr、Cu 和 Zn 等痕量元素的含量增加，Hg 主要分布在袋式除尘器中，而 Cd 在二次旋风分离器和袋式除尘器之间均匀分布。Åmand 等人的研究表明，燃煤 CFB 混燃污泥后的痕量金属大多数存在于飞灰中，其排放可以控制在允许的范围之内。蒋志坚等[50]在 120 t/d 的城市污泥 CFB 焚烧炉中进行了试验研究，分析了飞灰中 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 等 8 种重金属的迁移富集特性。结果表明，飞灰、底渣中的主要化学成分为 SiO_2、Fe_2O_3、CaO、$A1_2O_3$ 和 P_2O_5，而 SiO_2-CaO-Al_2O_3 金属氧化物的结构为容纳重金属提供了空间。Cd、As 为易挥发金属，分别会在 503 ℃和 475 ℃时重新富集在飞灰颗粒上；而 Cr、Mn、Cu、Zn 为难挥发性金属，则通过夹带富集于飞灰颗粒中，这些富重金属元素的灰分要谨慎处置。

4.4 污泥焚烧灰的处置利用

目前，污泥焚烧灰的主要处理方法可分为固化法、提取分离法、热处理法三大类。提取分离法较为复杂，还会导致水体中重金属的富集；固化法成本较高，还会增大灰分产物体积，给填埋场带来负担[51]；熔融法处理焚烧灰可使灰分体积减少 70%，形成的灰渣可作为工业生产的原料，重金属被包裹在灰渣中不易浸出，是未来主要的发展方向。Ma 等人[52]在实验室规模的 30 kW 直流等离子弧熔融炉中进行了熔融试验，在 1 200~1 600 ℃的熔融温度下对燃烧城市固体废弃物和污泥后产生的飞灰熔融 5 min，发现飞灰熔融化的最低温度为 1 230 ℃。在热等离子体的形成过程中，必须保持足够的温度。经热等离子体处理后，重金属的毒性指数显著降低。

除以上 3 种处置方法外，还可以将焚烧灰经过某些处理后，直接用于工业生产。陈冀渝等[53]介绍了一种使用污泥焚烧灰制作彩色烧结铺地砖的工艺。利用高分子凝聚剂凝聚污泥焚烧灰，并在该灰中适当添加氧化钛、氧化锰、氧化锌等组分，然后混合、成形、烧结，制成着色铺地砖。这种方法有效处置了焚烧灰，节约了资源，降低了制砖成本。除此之外，焚烧污水污泥后的灰分富含磷，有很大的回收潜力。巴姆联邦材料研究和测试研究所的 Oliver 等人[54]开发了一种新的污泥灰热化学处理工艺，将灰分转化为可销售的肥料产品。在还原性条件下，用钠、钾添加剂对灰分进行热化学处理，使

含磷矿物相转化为植物可以有效吸收的磷酸盐。添加剂中的 K_2CO_3 和 KOH 的摩尔比必须大于 2.5，以达到一定的磷溶解度。同时，挥发性过渡金属 As 以及挥发性重金属如 Cd、Hg、Pb 和 Zn 通过废气处理系统去除。示范试验产品的特点是可用度高，有毒元素质量分数低于德国肥料条例的限值，符合磷肥的质量标准。

5 结　论

本文介绍了燃煤 CFB 锅炉混燃污泥的技术研究与应用进展，通过归纳总结，主要有以下几个方面的结论。

1）目前燃煤 CFB 锅炉混燃污泥所采用的燃料搭配方式主要有以下 3 种：①煤和污泥；②煤、污泥和生物质；③煤、污泥和固体废弃物。与污泥混燃的煤种包括烟煤、无烟煤、次烟煤、褐煤、煤泥等。送入炉膛的污泥含水率范围较大，涵盖从含水率 20%左右的干燥污泥到含水率 81%的湿污泥。另外，煤、污泥和固体废弃物的协同燃烧受制于技术发展还不够成熟，需要相关学者的共同努力。

2）在燃煤 CFB 锅炉中混燃污泥需选取合适的掺烧比例，尽量降低掺烧污泥对 CFB 锅炉运行效果的影响。混燃干污泥与煤的最大质量比，还受限于干污泥的进料问题；而湿污泥进入炉膛焚烧则会降低炉膛温度，甚至造成空气预热器腐蚀；污泥带来的大量水分的蒸发造成炉内烟气量增加，排烟热损失增大，而且导致烟气流速明显增加，会加剧炉体和水冷壁管的磨损，需要对 CFB 锅炉系统进行合理改造。

3）虽然污水污泥中含有大量的 N 和 S，但 CFB 锅炉低温燃烧的优势使得 NO_x 排放量显著降低，只有百分之几的 N 转化为 NO 或 N_2O；污泥中所携带的 S，通过向炉内添加石灰石来处理即可，结合尾部烟气的石灰石-石膏湿法脱硫技术可实现烟气中 SO_2 的超低排放；将污泥与煤混燃，可使二噁英等有机污染物浓度相比单独焚烧污泥得以显著降低，因 CFB 锅炉炉膛温度一般在 850 ℃以上，二噁英能够得到有效分解。此外，还可以利用先进烟气净化技术，将污泥干化与焚烧综合利用，使各种气体污染物均能得到有效控制。

4）污泥掺烧比例的增加也会使灰中重金属的质量分数增加，因此需要谨慎处置，产生的灰分可以通过熔融化法或其他工艺进行处置利用。可通过现有的一系列技术有效控制尾部烟气中粉尘、重金属等的排放。

5）根据处理与污泥干燥有关的凝结水、气味、粉尘和 CO 排放等所需的能量和设备，干燥过程还需要额外的财政和技术投入，比如用于凝结干化尾气中蒸汽、NH_3 和 SO_2 的冷凝器，将干化剩余尾气与污泥仓贮存废气引入 CFB 炉膛所需的管道和设备，以及用于对干化废气进行除臭的生物滤池等。

目前，国内外利用燃煤 CFB 锅炉混燃污泥，主要是通过供热锅炉或热电联产锅炉，尚未报道于 300 MW 以上等级的大型电站 CFB 锅炉利用。由于大型电站 CFB 锅炉采用先进的高效洁净燃烧技术、炉内脱硫技术和烟气净化技术，将会是未来实现污泥处置减量化、稳定化、无害化和资源化的理想途径。此外，我国城市污水污泥中砂粒的含量普遍偏高，砂粒分布结构也与国外有明显不同，容易导致污泥干化焚烧系统和设备的磨损，也是未来需要关注和研究的课题。

［参 考 文 献］

［1］ HUANG Q, XU J. Bi-level multi-objective programming approach for carbon emission quota allocation towards co-combustion of coal and sewage sludge[J]. Energy, 2020, 211: 118729.

［2］ 吕清刚，范晓旭，那永洁，等. 城市下水污泥和煤/LPG 在循环流化床上的混烧试验研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(2): 339-342.
LYU Qinggang, FAN Xiaoxu, NA Yongjie, et al. Experimental study on the blending of municipal sewage sludge and coal/LPG on a circulating fluidized bed[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(2): 339-342.

［3］ DUAN Y, ZHAO C, WANG Y, et al. Mercury emission from co-combustion of coal and sludge in a circulating fluidized-bed incinerator[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(1): 220-224.

［4］ AHN H, KIM D, LEE Y. Combustion characteristics of sewage sludge solid fuels produced by drying and hydrothermal carbonization in a fluidized bed[J]. Renewable Energy, 2020, 147: 957-968.

［5］ LI X, CHEN L, MEI Q, et al. Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China[J]. Water Research, 2018, 142: 75-85.

［6］ MALERIUS O, WERTHER J. Modelling the adsorption of mercury in the flue gas of sewage sludge incineration[J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 96(1): 197-205.

［7］ 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 circulating fluidized bed incineration process for municipal sewage sludge[J]. Industrial Heating, 2013, 42(3): 37-39.

［8］ AKDAĞ 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］ 李影平，辛胜伟，王凤君. 660 MW 超超临界循环流化床锅炉超低 NO_x 排放研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(5): 86-92.
LI Yingping, XIN Shengwei, WANG Fengjun. Study on ultra-low NO_x emissions from 660 MW ultra-supercritical

circulating fluidized bed boilers[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(5): 86-92.

[10] 吕清刚，李志伟，那永洁，等. CFBC 混烧城市污泥与煤: N_2O 和 NO 的排放[J]. 工程热物理学报，2004, 25(1): 163-166.
LYU Qinggang, LI Zhiwei, Na Yongjie, et al. CFBC blending of municipal sludge with coal: emissions of N_2O and NO[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(1): 163-166.

[11] 李欢，李洋洋，金宜英. 国内外电厂混烧污泥的烟气污染控制标准比较[J]. 中国给水排水，2012: 28(14): 33-37.
LI Huan, LI Yangyang, JIN Yiying. Comparison of Chinese and foreign flue gas pollution control standards for co-combustion of sludge and coal in power plants[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(14): 33-37.

[12] 常州市: 科技创新解决污泥处置难题[J]. 建设科技，2007(1): 18-19.
Changzhou City: Solve the problem of sludge disposal by scientific and technological innovation[J]. Construction Science and Technology, 2007(1): 18-19.

[13] ZHAO X, ZHU W, HUANG J, et al. Emission characteristics of PCDD/Fs, PAHs and PCBs during the combustion of sludge-coal water slurry[J]. Journal of the Energy Institute, 2015, 88(2): 105-111.

[14] FYTILI D, ZABANIOTOU A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(1): 116-140.

[15] 刘明强. 污泥干化焚烧利用技术探讨[J]. 中国设备工程, 2019(20): 199-200.
LIU Mingqiang. Exploration of sludge drying and incineration utilization technology[J]. China Equipment Engineering, 2019(20): 199-200.

[16] 李云玉，欧阳艳艳，许泓，等. 循环流化床一体化污泥焚烧工艺运行成本影响因素分析[J]. 给水排水，2016, 42(4): 45-48.
LI Yunyu, OUYANG Yanyan, XU Hong, et al. Analysis of factors influencing the operating cost of circulating fluidized bed integrated sludge incineration process[J]. Water Supply and Drainage, 2016, 42(4): 45-48.

[17] 王荣建. 生活垃圾焚烧炉协同处置污泥技术的研究[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(12): 176-177.
WANG Rongjian. Study of sludge co-disposal technology in domestic waste incinerators [J]. Chemical Design Communication, 2020, 46(12): 176-177.

[18] 张天琦，杨宏伟，袁琦，等. 污泥干化焚烧技术研究及应用[J]. 化工装备技术, 2019, 40(1): 33-37.
ZHANG Tianqi, YANG Hongwei, YUAN Qi, et al. Research and application of sludge drying and incineration technology[J]. Chemical Equipment Technology, 2019, 40(1): 33-37.

[19] LU S, YANG L, ZHOU F, et al. Atmospheric emission characterization of a novel sludge drying and co-combustion system[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(10): 2088-2092.

[20] 朱化军，徐俊，刘伟京，等. 市政污泥热电厂循环流化床协同焚烧技术验证研究[J]. 环境科学学报，2012, 32(12): 3101-3107.
ZHU Huajun, XU Jun, LIU Weijing, et al. Validation study of circulating fluidized bed co-incineration technology for municipal sludge cogeneration plants[J]. Journal of Environmental Science, 2012, 32(12): 3101-3107.

[21] 李博. 循环流化床锅炉掺烧城市污泥方案研究与改造实践[J]. 热力发电, 2020, 49(5): 152-156.
LI Bo. Research and modification practice of circulating fluidized bed boiler blending with municipal sludge[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(5): 152-156.

[22] 李森. 300 MW 循环流化床锅炉耦合城市污泥焚烧研究与应用[J]. 煤炭科技, 2020, 41(5): 91-93.
LI Sen. Research and application of 300 MW circulating fluidized bed boiler coupled with urban sludge incineration[J]. Coal Science and Technology, 2020, 41(5): 91-93.

[23] 鄢晓忠，何旭，马琪顺，等. 260 t/h 循环流化床锅炉燃烧优化调整试验研究[J]. 浙江工业大学学报，2022, 50(5): 553-558.
YAN Xiaozhong, HE Xu, MA Qishun, et al. Experimental study on combustion optimization adjustment of 260 t/h circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2022, 50(5): 553-558.

[24] 柯希玮，孙国瑞，黄中，等. 330 MWe 循环流化床锅炉掺烧污泥性能影响[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 102-108.
KE Xiwei, SUN Guorui, HUANG Zhong, et al. Effect of sludge blending on the performance of 330 MWe circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 102-108.

[25] 孙宇，龙慎伟，马同胜，等. 污泥干化混煤燃烧工艺在循环流化床锅炉应用探讨[J]. 应用能源技术，2020(1): 30-35.
SUN Yu, LONG Shenwei, Ma Tongsheng, et al. Exploration of sludge drying and coal combustion process in circulating fluidized bed boilers[J]. Applied Energy Technology, 2020(1): 30-35.

[26] 蒋孟宴，张自丽，孙光，等. 0.3 MW_{th} 循环流化床污泥与煤掺烧试验[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 130-138.
JIANG Mengyan, ZHANG Zili, SUN Guang, et al. Experimental blending of 0.3 MW_{th} circulating fluidized bed sludge with coal[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 130-138.

[27] 徐燕贵. 简谈 1 台 180 t/h 焚烧造纸污泥差速流化床锅炉的设计[J]. 能源研究与管理, 2019(3): 83-86.
XU Yangui. Brief discussion on the design of a 180 t/h differential fluidized bed boiler for incineration of paper sludge[J]. Energy Research and Management, 2019(3): 83-86.

[28] 徐燕贵. 简谈焚烧造纸污泥差速流化床锅炉技术[J]. 能源研究与管理, 2019(4): 122-124.
XU Yangui. Brief discussion on differential fluidized bed boiler technology for incinerating paper sludge[J]. Energy Research and Management, 2019(4): 122-124.

[29] 王慧青，赵永坚，冯斌，等. 一种中温分离循环流化床锅炉掺烧污泥的系统及方法: CN202011264462.6[P]. 2022-08-02 [2023-05-30].
WANG Huiqing, ZHAO Yongjian, FENG Bin, et al. A system and method for medium temperature separation of circulating fluidized bed boiler blending sludge: CN202011264462.6[P]. 2022-08-02 [2023-05-30].

[30] 李昱喆，王磊，钟犁，等. 循环流化床锅炉污泥低氮燃烧系统及燃烧方法: CN202210198738.8[P]. 2022-07-12 [2023-05-30].
LI Yuzhe, WANG Lei, ZHONG Li, et al. Circulating fluidized bed boiler sludge low-NO_x combustion system and combustion method: CN202210198738.8[P]. 2022-07-12 [2023-05-30].

[31] 徐谷仓. 对在循环流化床锅炉用煤泥伴生物污泥燃烧供热项目的评价和建议[J]. 纺织导报, 2014(1): 79-82.
XU Gucang. Evaluation and recommendations on the use of coal sludge with bio-sludge combustion for heating in

circulating fluidized bed boilers[J]. Textile Journal, 2014(1): 79-82.
［32］吴植华，严伟，陈金根，等. 以废治废变废为宝在循环流化床锅炉中燃用煤泥拌生物污泥供热[J]. 染整技术, 2014, 36(12): 1-9.
WU Zhihua, YAN Wei, CHEN Jingen, et al. Combining coal sludge with bio-sludge for heating in circulating fluidized bed boilers[J]. Dyeing and Finishing Technology, 2014, 36(12): 1-9.
［33］GAO F, ZHOU C, DU J, et al. Effect of gaseous agents on co-combustion characteristics of sewage sludge and coal[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(5): 106227.
［34］JANG H N, KIM J H, BACK S K, et al. Combustion characteristics of waste sludge at air and oxy-fuel combustion conditions in a circulating fluidized bed reactor[J]. Fuel, 2016, 170: 92-99.
［35］KOSOWSKA-GOLACHOWSKA M, LUCKOS A, KIJO-KLECZKOWSKA A, et al. Gaseous emissions during oxy-fuel combustion of sewage sludge in a circulating fluidized bed[J]. Powder Technology, 2020, 371: 209-216.
［36］DENG W Y, YAN J H, LI X D, et al. Emission characteristics of dioxins, furans and polycyclic aromatic hydrocarbons during fluidized-bed combustion of sewage sludge[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(12): 1747-1752.
［37］WERTHER J, OGADA T. Sewage sludge combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999, 25(1): 55-116.
［38］LECKNER B, ÅMAND L E, LÜCKEK, et al. Gaseous emissions from co-combustion of sewage sludge and coal/wood in a fluidized bed[J]. Fuel, 2004, 83(4-5): 477-486.
［39］WU W, DUAN L, DUAN Y, et al. Three-dimensional full-loop numerical simulation of coal and sludge co-combustion in a circulating fluidized bed[J]. Fuel, 2023, 337: 127235.
［40］童敏，封羽涛，罗永浩. 城市污泥掺煤混烧特性及污染物排放研究[J]. 环境工程, 2018, 36(3): 133-137.
TONG Ming, FENG Yutao, LUO Yonghao. Study on the characteristics and pollutant emission of municipal sludge mixed with coal[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(3): 133-137.
［41］李帅英，周虹光，李文杰，等. 燃煤电厂城市废弃物前置干燥炭化处置技术小型化工业应用[J]. 热力发电, 2022, 51(6): 96-101.
LI Shuaiying, ZHOU Hongguang, LI Wenjie, et al. Small-scale industrial application of pre-dried charring disposal technology for municipal waste from coal-fired power plants[J]. Thermoelectricity, 2022, 51(6): 96-101.
［42］龚旭，王贤，张敏. 污泥处置之道-污泥干化协同发电技术[J]. 净水技术, 2016, 35(A01): 75-77.
GONG Xu, WANG Xian, ZHANG Ming. Sludge disposal: sludge drying and co-generation technology[J]. Water Purification Technology, 2016, 35(A01): 75-77.
［43］中国环境保护产业协会. AO 干法脱硫脱硝协同技术在上海青浦热电成功应用[J]. 中国环保产业, 2018(4): 74.
China Environmental Protection Industry Association. Successful application of AO dry desulfurization and denitrification synergistic technology in Shanghai Qingpu Cogeneration[J]. China environmental protection industry, 2018(4): 74.
［44］陈雪芹，梁玲. 节能减排：设备管理的重中之重——浙江省嘉兴新嘉爱斯热电有限公司设备管理经验浅析[J]. 中国设备工程, 2015(7): 12-15.
CHEN Xueqin, LIANG Ling. Energy saving and emission reduction: the top priority of equipment management - an analysis of the experience of equipment management of Jiaxing Xinjiaaishi Thermal Power Co. in Zhejiang Province[J]. China Equipment Engineering, 2015(7): 12-15.
［45］BARBOSA R, LAPA N, LOPES H, et al. Stabilization/solidification of fly ashes and concrete production from bottom and circulating ashes produced in a power plant working under mono and co-combustion conditions[J]. Waste Management, 2011, 31(9-10): 2009-2019.
［46］刘蕴芳，滕建标，苏耀明，等. 煤粉炉掺烧干化污泥的污染物排放研究[J]. 环境工程学报, 2014(11): 4969-4976.
LIU Yunfang, TENG Jianbiao, SU Yaoming, et al. Study of pollutant emissions from pulverized coal furnace blending with dried sludge[J]. Journal of Environmental Engineering, 2014(11): 4969-4976.
［47］葛江，郭义杰，吴浪，等. 烟煤与污泥混烧过程中重金属 As、Zn 和 Cr 的迁移规律和灰渣的浸出特性[J]. 广东电力, 2017, 30(4): 37-42.
GE Jiang, GUO Yijie, WU Lang, et al. Migration patterns of heavy metals As, Zn and Cr and leaching characteristics of ash during the mixing of bituminous coal and sludge[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 37-42.
［48］赵晓莉，朱伟，徐德福，等. 污泥/煤流化床混烧底灰中的重金属毒性研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2013, 5(3): 244-250.
ZHAO Xiaoli, ZHU Wei, XU Defu, et al. Toxicity of heavy metals in the bottom ash of sludge/coal fluidized bed mix[J]. Journal of Nanjing University of Information Engineering (Natural Science Edition), 2013, 5(3): 244-250.
［49］ÅMAND L, LECKNER B. Metal emissions from co-combustion of sewage sludge and coal/wood in fluidized bed[J]. Fuel, 2004, 83: 1803-1821.
［50］蒋志坚，曾小强，陈晓平，等. 城市污泥流化床焚烧炉飞灰中重金属迁移特性[J]. 热能动力工程，2017, 32(9): 92-98.
JIANG Zhijian, ZENG Xiaoqiang, CHEN Xiaoping, et al. Migration characteristics of heavy metals in fly ash from municipal sludge fluidized bed incinerator[J]. Thermal Power Engineering, 2017, 32(9): 92-98.
［51］别如山. 垃圾焚烧技术和产品及其在垃圾分类条件下的新进展[J]. 工业锅炉, 2020(3): 1-10.
BIE Rushan. Waste incineration technologies and products and their new advances in waste separation conditions[J]. Industrial Boiler, 2020(3): 1-10.
［52］MA W, SHI W, SHI Y, et al. Plasma vitrification and heavy metals solidification of MSW and sewage sludge incineration fly ash[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 408: 124809.
［53］陈冀渝. 下水道污泥焚烧灰彩色烧结铺地砖的研制[J]. 砖瓦, 2020(6): 26-29.
CHEN Jiyu. Development of colored sintered paving tiles from sewer sludge incineration ash[J]. Brick and Tile, 2020(6): 26-29.
［54］KRÜGER O, ADAM C. Phosphorus in recycling fertilizers-analytical challenges[J]. Environmental Research, 2017, 155: 353-358.

（责任编辑　刘永强）