循环流化床锅炉燃煤耦合污泥技术研究与展望！

 来源:《热力发电》  作者:张自丽

随着经济的高速发展、城市化进程的不断加快，污泥等固体废弃物产量不断增加，环境污染问题日益严峻。据报道，我国市政污泥年总产量逐年增大，2017年底已超过了4000万t，预计到2020年将达到6000万~9000万t，约合170万~255万t标准煤。为此，习近平总书记在十九大报告中着重强调“加强固体废弃物和垃圾处置”，把坚持“节约资源和保护环境”作为一项基本国策，强化社会的节能环保意识。《“十三五”节能减排综合工作方案》提出，推动城市污泥等典型废弃物集中处理和资源化利用，推进燃煤耦合污泥等城市废弃物发电技术研究。2018年6月，国家能源局、生态环境部联合发布了84个污泥、农林废弃物燃煤耦合生物质发电技改项目试点。可见，发展污泥处置处理技术，加速燃煤耦合污泥等固体废弃物处理技术创新和产业化推广，已经上升为国家战略，成为我国生态文明建设不可缺少的重要内容。

在能源和环保政策等影响下，燃煤耦合污泥研究受到广泛关注；电力等企业也开始掺烧污泥或生物质等燃料，实现了经济效益和社会效益的双赢。

为保证锅炉燃烧系统的安全稳定运行，燃煤锅炉掺烧污泥的工业应用一般是以煤粉燃烧为主，污泥掺烧为辅。由于煤中固定碳较高、灰分较低，与含水率很高的污泥相比，煤热值很高，煤粉与污泥的混合燃料热值远远高于污泥热值。

PIODT等利用中试鼓泡流化床装置研究了农林废弃物和污泥的燃烧特性。结果表明，二者可实现稳定燃烧，并且污泥的加入未带来NO、CO和HCl排放增加。COIMBRA等人研究了烟煤与纸浆污泥混燃的可行性，结果证实该方法可有效处理纸浆污泥，同时减少了CO2和NOx的排放。YANG等人进行了干态污泥颗粒与煤矸石的掺烧实验。LIAO等人和HU等人进行了无烟煤和纸浆污泥的掺烧性能实验，揭示了2种材料在共燃过程中的协同作用。FUBiao等研究了水煤浆和市政污泥共燃过程中的热化学机制及重金属排放行为，证明了二者燃烧过程中的协同效应。

由于循环流化床（circulatedfluidizedbed，CFB）锅炉燃料适应性广、污染物排放低、负荷调节范围大，基于CFB锅炉的燃煤耦合污泥技术也受到了广泛关注。DONG等人在220t/h的CFB锅炉上进行了皮革污泥掺烧烟煤的研究。结果表明，相比于烟煤，皮革污泥表现出更高的反应活性，皮革污泥的存在更有益于烟煤的着火。由于污泥灰分较高，在CFB锅炉掺烧过程中，普遍存在炉膛内壁磨损问题。LOUBo等针对污泥掺烧后，CFB锅炉内壁耐磨特性及耐磨材料展开了研究。

虽然CFB锅炉燃煤耦合污泥研究取得了部分成果，但总体来说，研究系统性有待加强，研究方向也有待进一步明确，尚需在有关污泥掺烧可行性、污泥燃烧工况评价、污染物一体化脱除等领域开展标准制订、技术研发等工作。

本文从燃烧工况、污染物控制与排放、数值模拟等方面综述了CFB锅炉燃煤耦合污泥研究进展，相关结论对于优化燃煤耦合污泥处理工艺、明确CFB锅炉燃煤耦合污泥研究方向、指导污泥合理利用、保护绿水青山具有重要意义。

**1、CFB锅炉燃煤耦合污泥燃烧工况**

CFB锅炉燃煤耦合污泥运行实践表明，污泥水分和灰分是污泥掺烧企业最为关注的两大指标。污泥收到基含水率很高，一般在50%~80%，有的甚至高达90%；污泥灰分也较高，一般高于20%，电镀等工业污泥灰分可高于80%。受水分和灰分等因素影响，污泥收到基热值很低，一般为0.1~15MJ/kg，大多在10MJ/kg以下。这是燃煤耦合污泥掺烧可行性的可选参考指标。

掺烧比例是影响CFB锅炉燃煤耦合污泥燃烧状况的重要因素。污泥掺烧比例越高，对混合燃料水分和灰分的影响越大。

此外，燃料粒径也会对CFB锅炉燃煤耦合污泥燃烧状况产生影响。

因此，以下将详细分析污泥水分、灰分、掺烧比例、燃料粒径等对CFB锅炉燃煤耦合污泥燃烧状况的影响。

**1.1 污泥水分对CFB锅炉燃煤耦合污泥影响**

污泥含水率高，在掺烧污泥过程中容易出现贴壁粘连、抱团堵塞问题。改变污泥掺烧比例，可引起混合燃料水分、灰分和发热量发生变化，带来床压波动；增加污泥掺烧比例，烟气含水率升高，引起低温腐蚀，增加CFB锅炉尾部受热面积灰或结渣的可能性，影响风机电耗和煤耗、物料循环倍率和分离器效率，降低锅炉热效率，影响烟气污染物处理水平。

针对污泥含水率高引起的上述问题，山东某热电企业CFB锅炉通过压滤、增加生活污泥仓内搅拌频率、高温炉渣或灰与污泥掺混、加装疏松器等方式降低了污泥水分和黏性，提高了生活污泥燃用量和燃用效率。将机械脱水污泥与稻壳、锯木、生物秸秆等混合，可降低燃料的含水率。徐正坦和吴松发研究了利用CFB锅炉生活垃圾焚烧发电的烟气余热干化污泥，并将干化后的污泥与垃圾一起焚烧发电的技术，实现了烟气余热和污泥热值的充分回收利用。工业锅炉和发电企业锅炉烟气排放温度在100~200℃，可利用电厂尾部烟气余热或低品位蒸汽干化污泥，之后进行污泥焚烧处置。污泥干燥系统内应贫氧，并且需及时将密闭干燥系统内气体抽吸至锅炉内燃烧处理。将机械脱水污泥经尾部烟气余热或低品位蒸汽炉外干燥后，与煤、生物质、垃圾等混合燃烧，不仅可降低烟气湿度，还提高了锅炉热效率，是目前较为推荐的掺烧方法。

**1.2 污泥灰分对CFB锅炉燃煤耦合影响**

相较于煤粉，污泥灰分较高。污泥掺烧比例加大，可引起尾部出渣扬尘或烟道积灰等问题，并且较高的灰分也会对料层压差和炉膛压差带来影响。现有燃煤耦合污泥运行实践表明，可通过调整除尘管路降低扬尘，增加吹灰频次改善尾部换热面传热，配烧煤矸石或洗混煤等劣质燃料保证床层料位和炉膛差压。

以市政污泥为例，由于污泥灰熔融性温度（变形温度、软化温度和流动温度）均在1167℃以上，而通常CFB锅炉炉膛温度在800~950℃，并且污泥与煤粉掺烧状况下床温的最佳控制温度为900℃，因此，燃煤耦合污泥技术对于减缓CFB锅炉高温结渣将具有积极作用。QIXiaobin等对准东煤和市政污泥的混合燃烧特性研究也表明，市政污泥的加入可减缓锅炉尾部受热面积灰，提高混合燃料灰熔融性，避免低温烧结情况的发生。

针对污泥燃烧过程中的沉积问题，李廉明等研究了在混烧干化污泥与煤的CFB锅炉炉内受热面沉积层各层成分，晶相分析显示均为CaSO4，并且认为氯的大量存在是受热面沉积的根本原因。CaSO4熔点高达1450℃，不具备在受热面上直接沉积的条件。因此，Ca可能是先与污泥本身和预处理过程中氯元素结合形成熔点较低的CaCl2（熔点782℃），形成黏性的初始沉积层，而后转化为CaSO4进一步沉积。

污泥与煤粉掺烧，会引起飞灰或底灰含量增加，为后续除尘设备运行带来压力。HAORunlong等基于CFB锅炉的木业污泥和无烟煤掺烧研究表明：掺烧木业污泥后，尾部烟气飞灰含量增多；随着木业污泥掺烧比例由0增大至70%，飞灰排放因子呈现线性增长趋势；当掺烧比例进一步增加至100%时，飞灰产率略有下降，这体现了木业污泥和无烟煤在提高飞灰排放过程中的耦合作用。在无烟煤-木业污泥共燃过程中，为保证烟气颗粒物达标排放，建议采用电-袋组合式除尘器等更为高效的除尘设备，以提高细颗粒物脱除技术水平。

值得注意的是，城市污泥中Na、Mg、Al、Si、Ca、Fe、S、F、P、Zn、Cu、Mn、Ni、Cr、As等元素含量较高，掺烧后各元素更易在飞灰和底灰中富集。因此，燃煤耦合污泥灰分处理或建材资源化利用需得到进一步重视。

**1.3 掺烧比例对CFB锅炉燃煤耦合污泥影响**

有关污泥与煤粉掺烧计算模拟结果表明，针对某一特定种类污泥，CFB锅炉炉膛平均温度随污泥掺混比例的增加而降低，燃烧剧烈程度及火焰充满度越来越差。这主要是因为污泥热值较低，含有大量水分，燃烧特性较差，严重影响了煤粉在CFB锅炉中的稳定燃烧。采用CFB锅炉焚烧不同种类的污泥时，城市污泥与工业污泥的燃烧特性相近，掺烧不同种类污泥的CFB锅炉运行参数变化较小。

采用CFB锅炉掺烧污泥时，小比例掺烧（污泥掺烧比例小于20%）对锅炉燃烧参数，如炉内温度场变化影响不大。通过适当调整过量空气系数、一二次风配比、燃料在炉膛的停留时间等参数即可满足运行要求。但是当大比例掺烧污泥时，如掺烧比例超过20%，甚至大于30%时，燃烧区平均温度和最高温度均大幅下降，炉内燃烧不稳定；并且，由于污泥快速燃尽，需不断向炉内添加煤粉稳定燃烧，这就增加了煤耗，降低了运行经济性。

另有研究和实践表明，相较于单独燃烧煤粉，当污泥掺烧比例约7.50%时，可使CFB锅炉炉膛温度降低约20℃，此时锅炉热效率约为85%~87%；当污泥掺烧比例继续增大到31.94%时，炉膛温度逐渐降低，锅炉热效率也随之降低。这是由于污泥含水率很高，更多污泥掺烧进入炉膛，水分蒸发吸收了炉膛中更多热量，引起炉膛温度下降，排烟体积增大，排烟热损失升高，机械不完全燃烧热损失也可能加大，最终造成锅炉热效率降低。因此，燃煤电站协同处置污泥时，应尽量避免大比例掺烧污泥。若进行大比例掺烧，则需要对污泥燃烧特性及含水率等进行严格分析。

相对于煤粉单独燃烧，20%的污泥掺烧比例已足够改变煤粉的某些燃烧特性，这也与实际中电厂协同处置污泥时掺烧比例普遍较低相对应。在CFB锅炉富氧燃烧过程中，煤粉和污泥混合比可适当提高至1:1。

综上，考虑工业运行实际，在保证污泥掺烧总量的前提下，针对不同种类、不同来源污泥，CFB锅炉燃煤耦合污泥掺烧比例不宜大于30%。

**1.4 燃料粒径对CFB锅炉燃煤耦合污泥影响**

合理的燃料粒径应依据燃料燃尽特性确定。根据煤粉最佳经济细度经验式，若污泥干燥无灰基挥发分wdaf(V)大于25%，则污泥最佳经济细度R90经验式为

由式(1)显见，R90与wdaf(V)成正比。以福建无烟煤为例，其挥发分一般低于5%。相比于普通市政污泥，木屑污泥、印染污泥等一般工业污泥wdaf(V)较高。因此，这些污泥与福建无烟煤掺烧后，混合燃料挥发分升高，其可燃性相较于福建无烟煤增强。混合燃料相较于福建无烟煤较易燃尽，因此其粒径取值可偏大。

**2、CFB锅炉燃煤耦合污泥污染物排放研究分析**

**2.1 掺烧污泥对NOx、SOx生成和排放的影响**

岳峻峰等认为，一般情况下，CFB锅炉掺烧污泥对NOx生成和排放影响有限。这是因为，可通过空气分级燃烧、燃料分级燃烧、烟气再循环、污泥中可能含有的尿素或氨水、现有NOx脱除设备等措施控制NOx生成和排放。

同时，SOx尤其是SO2排放浓度受掺烧污泥后燃料硫分决定，生成的SO2也可能与灰中氧化物反应生成硫酸盐，因此，掺烧污泥对最终SO2排放浓度影响也不大。

李志伟在CFB试验台上开展了城市污泥与煤的焚烧试验，研究了过量空气系数对SO2、NOx排放特性的影响。结果表明，过量空气系数的增加导致N2O排放浓度和燃料氮向N2O转化率降低，NO排放浓度和燃料氮向NO转化率增加，燃料硫向SO2转化率上升。朱化军等研究表明：随着污泥掺烧量增大，CFB锅炉流化床密相区和稀相区的温度均明显下降；烟气中自由基O、OH、H的浓度降低，从而使得形成NO的最主要均相反应减弱，最终导致NOx排放浓度随着污泥掺烧量增大而下降。需要说明的是，在污泥投入炉内的瞬间，SO2、NOx瞬时排放较燃煤时高出许多，说明了较高挥发分的污泥对燃烧的促进作用。ZHAOZhenghui等研究表明：在煤粉与污泥混合燃烧的挥发分析出燃烧阶段，随着污泥掺烧比例增加，SO2释放量随之增加；但由于污泥灰分较高，同时灰分对含硫成分具有保留作用，焦炭燃烧阶段SO2释放受到抑制。这与文献有关煤粉与污泥燃烧初期SO2快速释放的研究成果一致。

总体而言，污泥掺烧对于SO2和NOx排放的影响有限。

**2.2 掺烧污泥对二噁英的生成和排放的影响**

童敏等研究表明，城市污泥中氯元素含量较高，掺烧污泥需考虑二噁英（PCDD/Fs）生成与排放问题。污泥中有机硫在燃烧环境中可将活性氯氧化成氯化氢；烟气中二噁英也较易吸附在飞灰颗粒上，并经除尘系统吸附捕集。一般而言，可以从燃料源头和燃烧中、燃烧后控制角度考虑污泥掺烧过程中二噁英的控制措施。

1）在燃料源头方面，可以选择掺烧含氯有机物低或不含氯元素的污泥。考虑到金属元素在高温燃烧过程中可能存在的对二噁英等污染物生成的催化作用，掺烧污泥种类也尽量选择金属含量低或者不含金属的污泥。

2）在燃烧中控制技术方面，需要对燃烧温度、停留时间、氧气供给量、烟气紊流等燃烧条件进行优化控制。若燃烧温度为850℃，则烟气停留时间至少保证2s以上；若燃烧温度为1000℃，则停留时间至少保证1s以上，以此来降低二噁英的生成和排放浓度。

3）在燃烧后控制方面，一种方式是快速降低尾部烟气在烟道停留时间或者实现烟气快速冷却。但受限于燃煤发电企业烟气量大等因素影响，烟气快速冷却操作难度较大。另一种方式是保证较高飞灰脱除率。因为飞灰可以为二噁英反应提供活性表面，所以采用电袋复合除尘器等高效除尘技术保证飞灰高效脱除也是控制污泥掺烧过程中二噁英生成与排放的有效方式。

**2.3 掺烧污泥后的重金属排放问题**

除SOx、NOx、二噁英外，污泥掺烧后重金属排放问题也需得到重视。

ZHANGShaorui等研究表明，随着污泥掺烧量的增加，烟气中重金属排放也明显增加。为满足国家有关重金属排放标准，污泥掺烧量应控制在10%以下；并且由于Cr、Ni、Cu和Pb等重金属浸出毒性的影响，除尘设备捕集的飞灰需进一步处置后才能进行填埋或再利用。M.HelenaLOPES等认为：与市政污泥的重金属含量相比，除尘设备底灰中重金属含量较高，但浸出毒性较低，这也为底灰的进一步利用提供了机会；然而，由于旋风分离设备中未燃尽碳的影响，该处灰样中汞含量较高，有关污泥掺烧后汞污染物控制需重点关注。

**3、CFB锅炉燃煤耦合污泥燃烧机理分析**

研究表明，污泥中可燃成分主要是挥发分，固定碳含量较少。燃煤耦合污泥技术可借助煤中较高的固定碳含量促使混合燃料稳定持续燃烧，即混合试样燃烧速率主要取决于煤粉燃烧。在燃烧的低温阶段（约500℃以下），污泥着火方式可认为是均相燃烧；在高温段（高于500℃），燃烧方式应为多相燃烧。

不同污泥和煤粉掺烧比的试样的燃烧都可分为干燥脱水、挥发分等有机物析出和燃烧、高分子大沸点有机物分解燃烧、固定碳及残留物燃烧分解4个阶段，这与煤粉燃烧过程大致相同。其中，挥发分的析出与燃烧是燃烧的初始阶段，对燃料的着火、燃烧的稳定性及燃尽有着重要影响。一方面，挥发分析出使得燃料颗粒质量降低，挥发分燃烧又在气相加速了燃料的着火与燃烧，提高了燃烧反应前期的反应能力；另一方面，挥发分的析出与燃烧使得颗粒化学结构﹑表面形态及孔隙结构发生很大变化，影响了O2向颗粒表面和孔隙内扩散能力，改变了焦炭的反应能力和燃烧速率，提高了混合燃料的综合燃烧燃尽能力。

基于木屑污泥、印染污泥、市政污泥等挥发分较高的特性，将污泥与无烟煤或其他煤粉进行掺烧，充分利用混合燃料挥发分析出和燃烧释放的热量，有利于混合燃料的着火和燃尽。

**4、CFB锅炉燃煤耦合污泥数值模拟**

目前，CFB锅炉燃煤耦合污泥的整体数学模型基本可以分为两大类：

1）以设计CFB锅炉控制系统为主要目的，主要关注重要输入输出参数，通过系统辨识CFB锅炉动态过程的“控制模型”；

2）依据CFB燃烧理论、实验成果和经验公式，结合CFB床内流动、燃烧、传热等建立起来的“机理分析模型”，主要用于燃煤耦合污泥CFB锅炉结构设计优化与运行指导。

目前，涉及燃煤耦合污泥CFB锅炉固体物料破碎、磨损、燃烧、传热等系统过程的计算流体力学模型还未出现，已有的燃煤流化CFB锅炉计算流体力学数学模型也有待完善。

**5、总结与建议**

1）采用现有CFB锅炉技术，进行煤粉与城市污泥掺烧，相比于新建污泥焚烧炉具有投资省、成本低等优点。对城市污泥进行焚烧处理不但能回收能源，还能实现最大程度的减量化，是城市污泥最佳处置技术之一。

2）在CFB锅炉燃煤耦合污泥掺烧运行和设计过程中，需注意污泥水分、灰分对燃烧状况的影响，保证炉膛温度和燃烧的稳定性，避免由于污泥掺烧比例过大，烟气含水率和酸露点升高，引起尾部受热面低温腐蚀，污泥掺烧比例不宜大于30%。

3）根据污泥种类和污泥中硫、氮等元素含量变化，调整原有烟气污染物处理工艺参数，可保证污染物达标排放。调整炉膛燃烧温度、烟气停留时间和尾部烟气温度等运行参数变化，可避免由于污泥掺烧带来的二噁英生成与排放问题。加强对污泥的吹洗清理，可减少污泥输送和喷入过程中的粘结和板结。

4）为提高污泥焚烧技术的资源化利用程度，还需开展如污泥干化、灰渣中重金属含量、固化与回收，飞灰浸出毒性、制砖和水泥综合利用评价等研究工作。其中，污泥干化后废汽可通过密封管道与空气一同输入锅炉炉膛进行燃烧，废水经检测若无有害成分，可排入污水管网，否则需按照危险废物有关标准进行妥善处置。