

多流程循环流化床技术及其在生物质锅炉中的应用

初雷哲^{1,2}, 张衍国¹, 康建斌²

(1.清华大学能源与动力工程系, 清华大学-滑铁卢大学微纳米能源环境联合研究中心, 热科学与工程教育部重点实验室, 北京100084; 2.北京热华能源科技有限公司, 北京100085)

摘要：多流程循环流化床技术是在传统循环流化床技术基础上开发的一种新型循环流化床技术, 采用“三床两返多流程”的独特架构, 具有效率高、燃料适应性广和原始污染物排放低的优点。研究人员对多流程循环流化床内部的流动和传热做了大量的研究, 揭示了多流程循环流化床各炉膛内的气固流动及传热机理, 开发了适用于不同燃料的多流程循环流化床工业锅炉。本文介绍了多流程循环流化床的技术特点, 重点分析了该技术对生物质燃料的适应性及其在生物质锅炉中的应用现状, 结合该技术的特点及我国生物质能现状, 探讨了其在生物质锅炉中的合理利用途径, 指出应充分发挥该技术原始污染物控制的优势, 在减少排放的同时, 降低生物质锅炉运行成本。

生物质燃料具有挥发成分多、灰分低、反应活性高的特点, 适合燃烧利用, 而且生物质中硫含量很低, 全生命周期的碳排放为零, 也是一种环境友好的燃料[3-7]。生物质锅炉常用的燃烧技术是层燃技术、悬浮燃烧技术和循环流化床燃烧技术, 其中循环流化床燃烧技术具有燃烧效率高、污染排放低、燃料适应性广等优点, 是高效规模化利用生物质最具有前途的技术之一[8-11]。多流程循环流化床是一种新型的循环流化床技术, 除了具有常规循环流化床技术的优点外, 其燃烧行程长以及中温分离技术都对生物质燃烧具有很好的适应性[12-13], 本文重点介绍多流程循环流化床技术的特点及其在生物质工业锅炉领域的应用。

1多流程循环流化床技术原理

传统立式循环流化床如图1所示, 主要结构由炉膛、分离装置和返料系统构成, 这几个部件形成了一个固体物料的循环回路, 炉膛中存有大量流态化的床料, 燃料从炉膛下部给入, 反应所需空气从炉膛底部和下部分级送入, 燃料与空气在炉膛中发生反应, 燃烧的烟气携带部分固体物料进入分离装置, 大颗粒物料被分离装置分离下来, 通过返料装置回送到炉膛中, 其中未反应的大颗粒燃料可以回送到炉膛再次反应, 提高燃料的燃烧效率[14-17]。

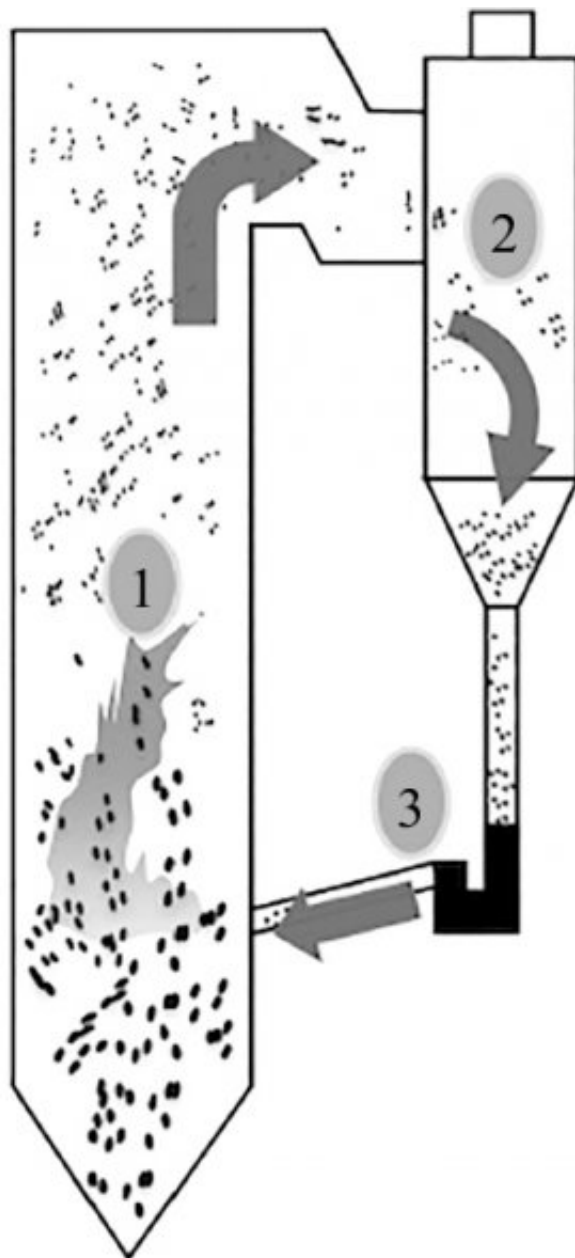


图 1 传统立式循环流化床

1—炉膛（上行床）；2—分离装置；3—返料系统

多流程循环流化床如图2所示，在传统的立式循环流化床基础上，将一级炉膛改成三级炉膛，形成一个“三床两返多流程”的独特架构，三床B3由“上行床”主燃室1“下行床”副燃室2和“上行床”燃尽室3构成，“两返R2”由主返料系统5和副返料系统6构成，反U型通道7、正U型通道8、分离器4、“三床”和“两返”等形成了“多流程Pn”的物料循环。多流程循环流化床主燃室中流动与传统立式循环流化床相似，从主燃室处理的高温烟气夹着固体物料进入副燃室，烟气通过副燃室烟温稍有下降，在副燃室底部与燃尽室拐角处部分较大颗粒物料被分离下来通过一级返料装置回送到主燃室，形成一级物料循环，烟气在燃尽室中进一步降温，到生物质能是重要的可再生能源，具有绿色、低碳、清洁、可再生等特点。我国生物质资源丰富，能源化利用潜力大，全国每年可作为能源利用的农作物秸秆及农产品加工剩余物、林业剩余物和能源作物、生活垃圾与有机废弃物等生物质资源总量约4.6亿吨标准煤[1-2]。生物质能的利用方向包括能源化、饲料化、肥料化和材料化，在生物质能源化利用方式中，燃烧是其规模化应用的主要途径，达出口的旋风分离器时温度降低到500 左右进行中温分离，烟气中携带的物料被进一步分离下来，以较低温度回送

到主燃室，形成二级物料循环，从旋风分离器出来的烟气经尾部受热面和烟气处理后排入大气[18-19]。

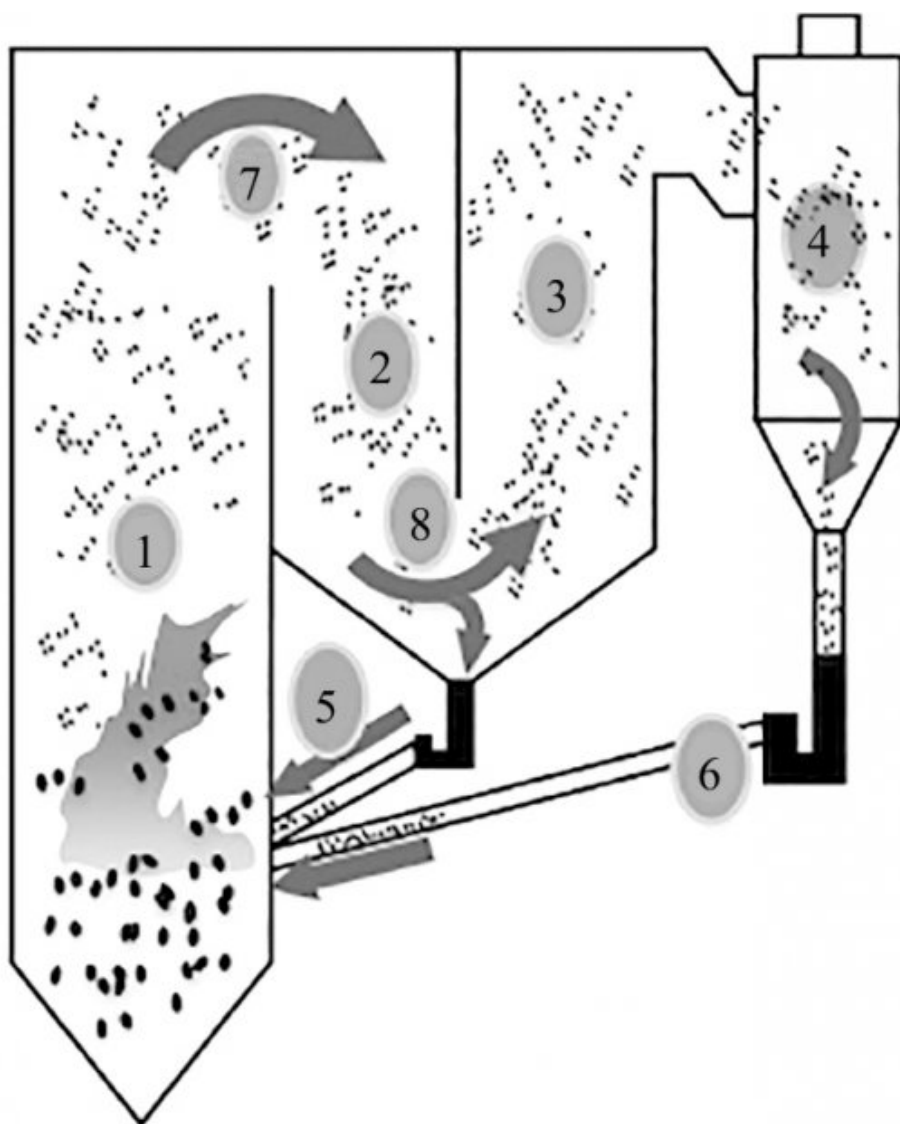


图 2 多流程循环流化床

- | | | |
|----------------------|------------|-------------|
| 1—主燃室（上行床） | } 三床 B_3 | } 多流程 P_n |
| 2—副燃室（下行床） | | |
| 3—燃尽室（上行床） | | |
| 4—分离器 | | |
| 5—主返料系统 | } 两返 R_2 | |
| 6—副返料系统 | | |
| 7—反 U 型通道（上行床 + 下行床） | | |
| 8—正 U 型通道（下行床 + 上行床） | | |

2多流程循环流化床内部流动和传热特性

多流程循环流化床结构设计的特殊性导致了其内部气固流动及物料平衡的特殊性。传统循环流化床只有一级炉膛，其中的气固流动是逆重力场的流动，而多流程循环流化床三个炉膛在水平方向依次排布，炉膛中的气固流动在流经三个炉膛的过程中依次要经过逆重力场和顺重力场的交替流动，顺重力场与逆重力场的气固特性有很大差异，在主燃室/副燃室和副燃室/燃尽室炉内气流发生两次转折，拐角处的结构对流动也会有很大影响，所以多流程循环流化床锅炉内气固流动特性较传统立式循环流化床更为复杂[20-21]。

本文作者搭建了冷态实验装置对多流程循环流化床锅炉内部的气固流动特性进行研究（图3）[22-25]。



图3 多流程循环流化床冷态实验装置 [22-25]

图4是多流程循环流化床中典型的炉膛压降分布，多流程循环流化床内部的压力损失主要分布在三个部分：主燃室、主燃室到副燃室的拐角1以及副燃室到燃尽室的拐角2。其中主燃室中物料浓度最高，压力损失占绝大部分；副燃室

中气固两相为顺重力场流动, 气体不需要支撑固体物料的重量, 所以在副燃室中压降较小; 由于副燃室与燃尽室之间的拐角物料的分离作用, 燃尽室颗粒浓度很低, 所以燃尽室的压降最小。在整个流程中两个气流转折的拐角处都有明显的局部阻力损失效应, 多流程结构产生的气流转折对炉内流动有很大的影响, 可以通过优化拐角处的结构形式, 改善炉内的流动特性。

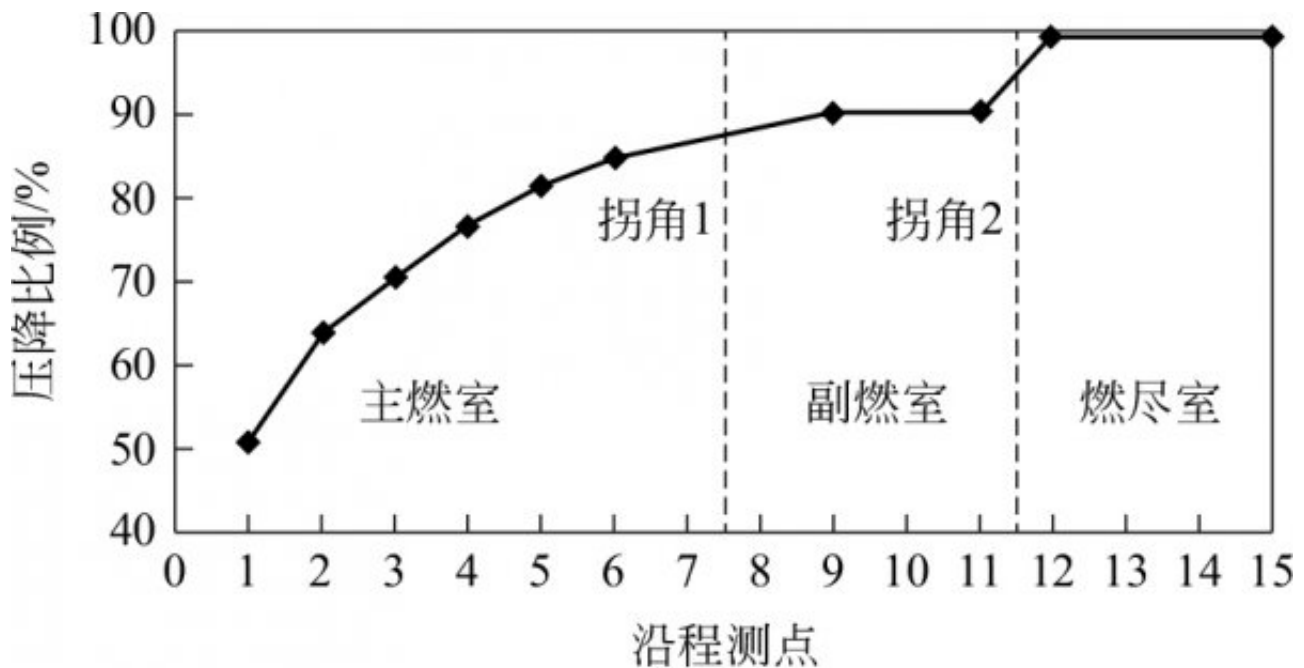


图 4 多流程循环流化床炉膛压降典型分布

对多流程循环流化床内部物料浓度的研究表明, 与传统循环流化床类似, 多流程循环流化床主燃室的沿程压降和轴向颗粒体积分数呈指数分布, 横向颗粒体积分数呈“环-核”结构分布。在副燃室, 沿流动方向上, 由于受拐角1影响, 颗粒主要集中于右侧, 且风速的增大会使这种偏向性更加严重; 在垂直于流动方向上, 受主燃室直接影响, 也呈现出类似的“边壁高、中心低”的环核分布。气体和颗粒对副燃室右侧壁面冲刷严重, 燃尽室颗粒体积分数始终很低, 颗粒主要贴着右侧壁面运动。

循环流化床锅炉内传热系数与炉内的气固流动特性密切相关, 影响传热系数的主要因素有物料浓度、粒径分布、流化风速和受热面布置形式等[26-34]。多流程循环流化床由于独特的结构, 其炉内的气固流动特性与传统循环流化床锅炉有很大不同, 尤其是副燃室和燃尽室中由于气流转折造成的气固流动特性与主燃室有很大区别, 所以多流程循环流化床内传热系数也具有其独特的分布特性[35-37]。

在多流程循环流化床气固流动特性的基础上, 黄润华、丛堃林等[38-39]对炉内的传热系数的分布进行了研究, 在冷态实验装置上采用自制的横掠单管与壁面传热测量装置对多流程循环流化床的三个炉膛内部的单管横掠传热系数和壁面传热系数进行了研究。

研究指出, 主燃室内密相区物料浓度很高, 且沿高度迅速降低, 稀相区物料浓度很低且变化较缓, 所以主燃室内传热系数沿床高方向逐渐减小, 且下部密相区换热系数变化剧烈, 上部稀相区传热系数变化平缓, 副燃室和燃尽室中物料浓度更低, 传热系数较主燃室又有明显下降, 单管实验与壁面实验主燃室密相区、稀相区、副燃室和燃尽室的传热系数比例分别为4.04 1.46 1.26 1及1.83 1.18 1.06 1。黄润华[38]还考察了物料粒径对传热系数的影响, 发现采用细颗粒的物料传热系数比粗颗粒物料明显提高, 87 μm 的物料传热系数比174 μm 的物料传热系数在不同工况下提高了10%~40%。

3多流程循环流化床生物质燃烧的适应性

传统的立式循环流化床锅炉应用于中小型工业锅炉领域, 受限于炉膛高度, 燃料在炉膛内停留时间较短, 难以满足燃料的燃尽要求, 导致锅炉效率低下, 一般认为 $35\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$

以下的锅炉不适合采用循环流化床技术[40-41], 这限制了循环流化床技术作为一种高效低排放燃烧技术在中小型工业

锅炉领域应用。多流程循环流化床技术“三床两返”的结构用纵向深度换竖直高度，真正实现了循环流化床锅炉小型化。

多流程循环流化床三级炉膛的设计延长了燃料在炉内的燃烧行程，有利于燃料充分燃烧，同时，三级炉膛的设计使得锅炉受热面的布置更灵活，可以合理组织炉内燃烧过程，这些都有利于提高锅炉的效率，使得中小型的循环流化床锅炉能达到接近大型锅炉的效率（88%~92%）。

生物质的燃烧利用过程中，由于其碱金属含量高、灰熔点低、灰的黏度比较大，容易在分离器中发生后燃、结焦现象，还容易造成锅炉尾部受热面积灰[42-48]。多流程循环流化床技术采用的是中温分离技术，炉膛出口的温度控制在500℃左右，低于碱金属黏结沉积温度，能有效防止尾部对流管束积灰；同时由于采用三级炉膛，炉内的辐射受热面较多，尾部对流受热面比例减小，也有效减少了积灰风险。

多流程循环流化床的三级炉膛形成了两级物料循环，一方面可以将未燃尽的燃料回送炉膛提高燃尽率，另一方面将温度较低的灰，尤其是中温分离的二级灰返回到主燃室，可以降低主燃室密相区温度，避免密相区超温，在燃用低灰熔点的生物质燃料时，能有效防止炉膛结焦。

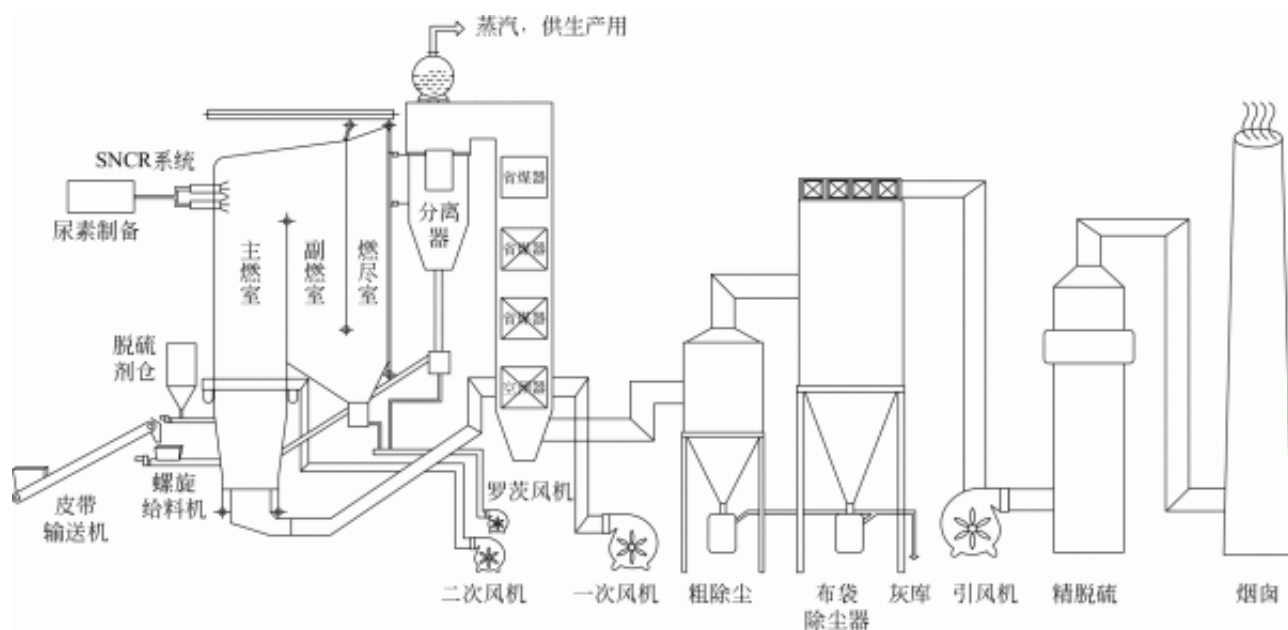


图5 多流程循环流化床超低排放工艺流程

在环保方面，多流程循环流化床配以炉外经济合理的污染物控制措施可以达到超低排放，典型的多流程循环流化床超低排放工艺流程如图5所示，烟尘采用一级粗除尘加一级高效布袋除尘，粗除尘成本低，可以将大部分颗粒分离下来，降低后端布袋除尘负荷，高效布袋除尘可以严格控制出口的烟尘浓度；脱硫采用炉内石灰石脱硫加尾部碱液脱硫，由于三级炉膛延长了炉内的反应时间，配合两级物料循环，炉内脱硫效率可以达到85%，炉内脱硫的成本低，尾部碱液脱硫可靠性高，运行稳定，可以保证出口SO₂

排

放达

标，尽管

碱液价格较高，但

由于大部分脱硫负荷在炉内完成，所

以总体脱硫成本不高。对于氮氧化物（NO_x

），多流

程循环流化床炉膛

内反应温度低，结合分级配风，在主

燃室密相区形成还原性氛围，可以控制NO_x的原始排放小于150mg·m⁻³

，再配以选择性非催化还原（SNCR）可以进一步降低NO_x

排放，由于多流程循环流化床内有较长的高温区，其NO_x控制对变燃料、变负荷都有很好的适应性。

4多流程循环流化床生物质锅炉的应用案例

多流程循环流化床燃烧技术对生物质燃料有很好的适应性，该技术已经在多种不同种类生物质工业锅炉上得到应用，并取得很好的效果。

2009年德彦纸业（厦门）有限公司建设了第一台 $15\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$

多流程循环流化床生物质锅炉，燃料为稻壳，至今已有生物质锅炉项目13个，共三百多蒸吨（蒸吨的单位 t/h ， $1\text{t/h}=0.7\text{MW}$ ，下同）。已应用的生物质燃料包括秸秆、木屑、稻壳、玉米芯、生物质成型燃料等。

2009年华润三九（枣庄）药业有限公司建设了第一台2

$0\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$

燃有机固废的多流程循环流化床锅炉，燃料为“煤+中药渣”，至今已有燃有机固废项目26个，共600多蒸吨，已应用项目的燃料包括中药渣、咖啡渣、酒糟、烟梗[49-50]、造纸废料等。



图6 $2 \times 45\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ 多流程循环流化床生物质锅炉

图6是位于江苏兴化脱水蔬菜工业园区的 $2 \times 45\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$

多流程循环流化床生物质锅炉，用于替代原有的三十多台小型燃煤锅炉向园区企业供汽，锅炉效率达到90%，污染物排放达到GB13271-2014锅炉大气污染物排放标准中燃气锅炉排放标准，彻底解决园区各厂分散小锅炉的污染问题，同时充分利用了当地丰富的生物质资源，以生物质代替化石能源，实现了节能减排和可持续发展。

在多流程循环流化床生物质锅炉实际运营过程中，由于生物质原料供给的波动，很多项目出现了燃料更换甚至多种燃料混用的情况，在这种情况下多流程循环流化床锅炉能保证稳定运行，表现出了强大的适应能力。

5多流程循环流化床生物质锅炉的应用前景

生物质燃料的堆积密度低，原料的收集和储运成本较高，所以其收集半径不宜过大，更适用于中小型的工业锅炉，多流程循环流化床技术真正实现了循环流化床技术的小型化，能够实现生物质燃料的清洁高效利用，具有广阔的应用前景。

在多流程循环流化床生物质燃烧应用中，应该充分利用该技术的“多燃料混烧”特点，在生物质资源丰富的地区以

及工业废弃物集中的用户，实施“一炉多燃料”，综合利用不同种类的生物质和工业废弃物燃料，既可以有效应对燃料季节性波动，又可以降低运行成本。

国家对工业锅炉污染物排放的要求日趋严格，充分利用多流程循环流化床污染物原始排放低的特点，设计合理的超低排放工艺，可以降低污染物控制成本，有利于该技术在生物质和有机固废领域的推广应用，在节约化石燃料消耗的同时，还可有效减少二氧化硫和氮氧化物等污染物的排放，助力解决大气污染环境。

参考文献

- [1] 栗鸿源.《生物质能发展“十三五”规划》公布[N]. 中国矿山报, 2016-12-6.
- [2] 李冲, 蒋志坚, 李俊, 等. 我国生物质成型燃料产业化现状及发展瓶颈浅析[J]. 工业锅炉, 2017 (6) : 11-15.
- [3] 马文超, 陈冠益, 颜蓓蓓, 等. 生物质燃烧技术综述[J]. 生物质化学工程, 2007, 41 (1) : 43-48.
- [4] 徐德良, 孙军, 陈小娟, 等. 工业锅炉生物质燃烧应用现状[J]. 林产工业, 2009 (6) : 3-7.
- [5] 徐永前. 生物质颗粒燃料及直燃式生物质锅炉[J]. 工业锅炉, 2013 (6) : 34-38.
- [6] 武文璇, 李寒松, 李青, 等. 生物质锅炉的发展现状及农业中的应用[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56 (3) : 81-84.
- [7] 马隆龙, 唐志华, 汪丛伟, 等. 生物质能研究现状及未来发展策略[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34 (4) : 434-442.
- [8] 谷开兴, 靳宗伟, 高永彬. 循环流化床燃烧秸秆类生物质技术的探讨[J]. 工业锅炉, 2010 (6) : 15-17.
- [9] 张建春, 顾君苹, 张缦, 等. 纯燃生物质循环流化床锅炉设计与运行[J]. 锅炉技术, 2018 (1) : 28-32.
- [10] 郎丽萍. 生物质循环流化床锅炉技术介绍[J]. 电站系统工程, 2019, 35 (4) : 27-29.
- [11] 任晓平, 唐欣彤, 孙晓婷, 等. 生物质成型燃料循环流化床燃烧技术探讨[J]. 应用能源技术, 2019 (1) : 17-19.
- [12] 张衍国, 勾宏图. 卧式循环流化床锅炉技术简介及应用[J]. 锅炉制造, 2008 (1) : 5-7.
- [13] LI Q H, ZHANG Y G, MENG A H. Design and application of novel horizontal circulating fluidized bed boiler[C]//The 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Xi'an, 2009.
- [14] 岑可法, 倪明江, 骆仲泐, 等. 循环流化床锅炉理论设计与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 583-587.
- [15] 朱国祯, 徐洋. 循环流化床锅炉设计与计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [16] 岳光溪, 吕俊复, 徐鹏, 等. 循环流化床燃烧发展现状及前景分析[J].

- 中国电力, 2016, 49 (1): 1-13.
- [17] 蔡润夏, 吕俊复, 凌文, 等. 超临界循环流化床锅炉技术的发展[J]. 中国电力, 2016, 49 (12): 1-7.
- [18] 张衍国, 姚忠建, 李清海, 等. 一种卧式循环流化床燃烧设备及其循环燃烧方法: 200510126362.6[P]. 2006-06-14.
- [19] 张衍国, 李清海, 蒙爱红, 等. 一种多流程循环流化床锅炉: 201010110352.4[P]. 2011-07-20.
- [20] 单露, 张纘, 张翼, 等. 循环流化床全回路气固流动动态模型及分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (S1): 98-104.
- [21] 史丹君, 卢玫, 唐昭帆. 循环流化床锅炉气固流动特性的CPFD数值模拟[J]. 能源工程, 2018 (2): 65-71.
- [22] 吴荣. 卧式循环流化床的颗粒浓度分布研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [23] 李清海, 甘超, 冯衡, 等. 卧式循环流化床回料器性能实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19 (3): 193-199.
- [24] 向杰, 李清海, 张衍国, 等. 卧式循环流化床锅炉压降和颗粒体积分数分布[J]. 动力工程学报, 2014, 34 (4): 253-259, 266.
- [25] 向杰. 气固流化床的压力和空隙率波动信号分析[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- [26] BLASZCZUK A, NOWAK W. Bed-to-wall heat transfer coefficient in a supercritical CFB boiler at different bed particle sizes[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2014, 79 (79): 736-749.
- [27] MOON H, CHOI S, PARK Y K, et al. Thermal-fluid characteristics on near wall of gas-solid fluidized bed reactor[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2017, 114: 852-865.
- [28] 李金晶, 李燕, 吕俊复, 等. 循环流化床锅炉炉内传热的影响因素[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47 (11): 2026-2030.
- [29] 张瑞卿, 杨海瑞, 吕俊复, 等. 循环流化床锅炉炉膛的传热计算[J]. 动力工程学报, 2011, 31 (4): 248-252, 262.
- [30] 张小辉, 刘柏谦, 李志伟. 循环流化床锅炉内颗粒流传热研究[J]. 电站系统工程, 2008 (6): 9-11.
- [31] 张纘, 别如山. 循环流化床锅炉水冷壁的传热系数[J]. 锅炉制造, 2005 (2): 32-33.
- [32] 程乐鸣, 王勤辉, 施正伦, 等. 大型循环流化床锅炉中的传热[J]. 动力工程, 2006, 26 (3): 305-310.
- [33] 张瑞卿, 杨海瑞, 吕俊复, 等. 循环流化床锅炉炉膛的传热计算[J]. 动力工程学报, 2011, 31 (4): 248-252.
- [34] 温山, 阎维平, 吴威, 等. 循环流化床锅炉炉内传热研究[J]. 电站系统工程, 2012, 28 (5): 5-7.
- [35] 李清海, 周晓彬, 陈庚, 等. 卧式循环流化床燃烧时的数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53 (3): 353-357.
- [36] 鲁伟. 卧式循环流化床锅炉热力计算方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.

- [37] 丛堃林, 李清海, 鲁伟, 等. 多流程循环流化床锅炉热力计算方法研究[J]. 中国电力, 2018, 51 (8): 139-146.
- [38] 黄润华. 卧式循环流化床锅炉设计及床内对流传热实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [39] 丛堃林, 李清海, 韩峰, 等. 多流程卧式循环流化床气固流动的传热特性[J]. 燃烧科学与技术, 2018, 24 (4): 315-322.
- [40] 薛晓垒, 卢啸风, 刘汉周, 等. 我国中小型循环流化床工业燃煤锅炉存在的问题及分析[J]. 工业锅炉, 2010 (1): 13-16.
- [41] 刘德昌, 杨国来, 张世红, 等. 工业循环流化床锅炉的发展[J]. 工业锅炉, 2004 (2): 8-12.
- [42] 刘仁平, 金保升, 仲兆平. 循环流化床燃烧生物质的结渣问题研究[J]. 锅炉技术, 2007, 38 (9): 73-78.
- [43] 秦建光, 余春江, 李双江, 等. 循环流化床秸秆燃烧中的碱金属迁徙转化研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30 (5): 667-672.
- [44] 别如山, 王庆功, 修太春. 生物质燃烧发电过程中若干问题的探讨[J]. 工业锅炉, 2009 (6): 6-10.
- [45] 刘强. 流化床秸秆锅炉炉膛温度控制与烟道积灰预防[J]. 工业锅炉, 2014 (1): 29-30.
- [46] 张小辉, 王启民, 宗晨. 生物质秸秆锅炉受热面积灰沉积物分析[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2015, 11 (2): 119-122.
- [47] 王准, 华晓宇, 胡卿, 等. $75\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$ 生物质循环流化床锅炉高温过热器沉积特性研究[J]. 电力科技与环保, 2017, 33 (3): 42-44.
- [48] 李志峰, 种振宇, 林七女. 生物质锅炉受热面的防腐研究[J]. 工业锅炉, 2017 (4): 16-18.
- [49] 崔建军, 杨雷, 白彦茹, 等. DCS在燃烟梗卧式循环流化床蒸汽锅炉系统的应用[J]. 机电信息, 2014 (12): 37-38.
- [50] 刘勇军, 周国生, 崔建军, 等. 物料掺烧对燃烟梗卧式循环流化床锅炉的影响[J]. 节能技术, 2017, 35 (204): 309-312.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/176449.html>