

DOI: 10.19666/j.rlfed.202409221

垃圾衍生燃料耦合煤粉燃烧试验研究

文海南^{1,2}, 张向宇¹, 刘雯³, 马兆耀^{1,2}, 杜智华¹, 徐世明²

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2.中国矿业大学低碳能源与动力工程学院, 江苏 徐州 221116;

3.华能(天津)煤气化发电有限公司, 天津 300457)

[摘要] 利用大型燃煤机组掺烧垃圾衍生燃料(refuse derived fuel, RDF)可以减少碳排放,同时破解垃圾治理难题。为验证RDF在燃煤锅炉中掺烧的可行性,首先利用一维炉开展煤粉与RDF耦合燃烧试验,确定RDF的容纳比例极限,然后在4 MW锅炉上开展煤与RDF耦合燃烧的中试试验,研究了RDF掺烧对锅炉制粉、燃烧、污染物排放及沾污结渣的影响。结果表明:RDF掺烧质量比小于10%时,烟气中的二噁英质量浓度、灰渣中的二噁英及重金属质量浓度均小于污染物控制标准;10%的RDF与煤在中速磨煤机中共磨时,煤粉细度 R_{90} 增大到27.2%;煤与RDF混合掺烧时,火焰温度及 NO_x 生成质量浓度均减小,燃尽风区域结渣加重,水平烟道沾污变化较小,底渣中可燃物质量分数增大到约15%。该结论将为燃煤锅炉掺烧RDF提供参考。

[关键词] 燃煤锅炉; 垃圾衍生燃料; 二噁英; 重金属; 结渣

[引用本文格式] 文海南, 张向宇, 刘雯, 等. 垃圾衍生燃料耦合煤粉燃烧试验研究[J]. 热力发电, 2025, 54(8): 168-174.
WEN Hainan, ZHANG Xiangyu, LIU Wen, et al. Experimental study on co-firing of coal and refused derived fuel[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(8): 168-174.

Experimental study on co-firing of coal and refused derived fuel

WEN Hainan^{1,2}, ZHANG Xiangyu¹, LIU Wen³, MA Zhaoyao^{1,2}, DU Zhihua¹, XU Shiming²

(1.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2.School of Low-Carbon Energy and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3.Huaneng (Tianjin) Coal Gasification Power Generation Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract: The use of large-scale coal-fired power units mixed with refused derived fuel (RDF) can reduce carbon emissions and solve the problem of waste management. To verify the feasibility of co-firing RDF in coal-fired boilers, initial tests were conducted using a one-dimensional furnace to determine the maximum allowable proportion of RDF. Then, pilot-scale tests were carried out on a 4 MW boiler to study the effect of RDF co-firing on coal grinding, combustion, pollutant emissions, and slagging and fouling. The results showed that, when the co-firing ratio of RDF was less than 10% (mass ratio), the mass concentration of dioxins in the flue gas, and dioxins and heavy metals in the ash residue were all below the pollutant control standards. When 10% of RDF was co-grounded with coal in a medium speed mill, the fineness of R_{90} increased to 27.2%. When the coal and RDF were mixed and co-fired, the flame temperature and NO_x formation concentration decreased, the slagging in the combustion air zone increased, while the horizontal flue fouling changes were relatively minor, and the combustible content in the bottom slag increased to about 15%. The research will provide reference for co-firing RDF in coal-fired boilers.

Key words: coal-fired boiler; refuse derived fuel; dioxins; heavy metal; slagging

垃圾衍生燃料(refuse derived fuel, RDF)是利用城市固体废弃物中的可燃部分经过干燥、分选、

修回日期: 2024-12-23 网络首发日期: 2025-04-16

基金项目: 中国华能集团有限公司科技项目(HNKJ24-H105)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ24-H105)

第一作者简介: 文海南(1999), 男, 硕士, 主要研究方向为生物质掺烧技术, wenhainan69@163.com.

通信作者简介: 张向宇(1984), 男, 博士, 主要研究方向为低碳燃料燃烧, zhangxiangyu214.@163.com.

破碎、造粒制备而成的固体替代燃料^[1]，来源广泛，水分低，内部空隙较小，可长期堆放和长途运输，同时具有绿色低碳的特点^[2]。RDF 燃料是固废资源化循环利用的有效途径^[3]，相比于垃圾焚烧发电，RDF 燃烧兼具垃圾减量化、资源化、无害化等优点^[4]，同时污染性更小、可利用性更强^[5]，在国内外得到广泛应用。RDF 技术的概念最早由英国在 1980 年提出^[6]，美国是最早使用 RDF 发电的国家，已有 15 家电厂使用 RDF 作为焚烧炉燃料^[7]。日本于 1994 年建成了首座 RDF 加工厂，目前已有 50 多座 RDF 加工和 RDF 发电厂在运行^[8]。国内对 RDF 的研究起步较晚，2001 年建成了国内第 1 条 RDF 生产线^[9]，RDF 相关标准也正在编制中^[10]。

利用大型燃煤机组掺烧 RDF 可以减少碳排放^[11]，同时破解垃圾治理难题，推动经济社会绿色发展，对于火电行业实现“双碳”目标具有重要意义^[12]。国内外学者围绕 RDF 与煤的共燃特性开展了大量基础研究。Karuna 等人^[13]研究了 RDF 掺烧对水冷壁及其他金属腐蚀的影响，其中氯元素的含量对锅炉腐蚀影响较大。Hryb 等人^[14]对不同 RDF 中的汞进行检测，发现 RDF 中的汞与燃煤相比较少。李延吉等^[15]研究了不同添加剂对垃圾衍生燃料热解的影响。

RDF 在燃煤锅炉中掺烧可能引起重金属和二噁英排放超标，这是目前制约其用于电厂掺烧的瓶颈^[16-17]。Buckens 等人^[18]研究表明将原生垃圾分类后其中的重金属和氯含量降低，制备的 RDF 燃烧后二噁英排放质量浓度降低。赵鹏勃等^[19-20]研究了 RDF 与煤混烧时污染物排放特性，在掺烧比例小于 20% 时，氮氧化物、硫化物、二噁英、重金属均达到排放标准。陈峰等^[21]利用 75 t/h 循环流化床锅炉掺烧 RDF，烟气中二噁英含量远低于标准控制值，同时灰渣中的重金属含量和原煤工况接近。

RDF 目前主要用于水泥窑掺烧^[22]，在燃煤电厂应用较少。意大利 Fusina 电厂^[23]进行了煤与 RDF 的共燃测试，RDF 稳定供给量达到 9 t/h。福建华电永安发电有限公司^[24]利用 300 MW 机组循环流化床锅炉掺烧 RDF，掺烧量 50 t/d，热量占比为 1.5%，取得了显著的经济效益。广东粤电云河发电有限公司在 300 MW 机组循环流化床锅炉中掺烧 RDF 燃料棒发电，采用直接掺烧工艺，掺烧比例为 5%，掺烧过程中出现的主要问题是电除尘器堵塞。

RDF 在燃煤锅炉中的高效低污染燃烧技术亟待研究。本文首先利用一维炉开展煤粉与 RDF

耦合燃烧试验，确定 RDF 的容纳比例极限，然后在 4 MW 锅炉上开展煤与 RDF 耦合燃烧的中试试验，研究 RDF 掺烧对锅炉制粉、燃烧、污染物排放及沾污结渣的影响，以期为燃煤机组掺烧 RDF 提供重要参考。

1 RDF 与煤一维炉共燃试验

1.1 试验内容

试验用一维炉系统示意如图 1 所示。炉壁由电加热积木式结构组成，共有 6 级，每级均设有测量点，可测量燃烧时的火焰温度、污染物、结渣情况等。风粉混合物由锥体顶部引入，炉顶及第 1 级炉体的锥型为渐扩结构，可使风粉混合物在加热过程中均匀膨胀，充满截面，消除了烟气回流，形成无轴向混合的柱塞状流动，因此沿炉膛轴向测定的参数可表征煤粉气流燃烧过程的特征。

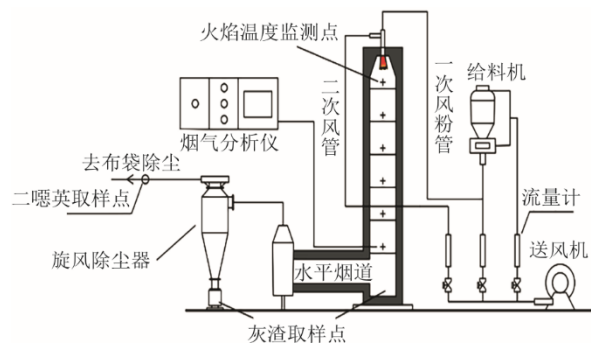


图 1 一维炉系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the one-dimensional furnace

选择沙尔湖煤、神优煤和乌兰煤 3 个煤种与 RDF 进行掺混，RDF 选用成型棒状燃料，主要成分为塑料、布纺和毛皮，通过破碎、分选、压缩制备而成，RDF 中氯质量分数为 0.462%。RDF 掺烧质量比分别为 0%、10%、20%。试验过程中控制入炉热量不变，改变煤种、过量空气系数和 RDF 掺烧比例，测量烟气中的二噁英、灰渣中的二噁英、重金属和其他污染物含量。煤和 RDF 的工业分析和元素分析见表 1。

1.2 试验结果及讨论

控制入炉热量和风量不变，在一维炉第 1 级测点处测量火焰温度，各煤种的火焰温度随 RDF 掺烧比例的变化如图 2 所示。由图 2 可以看到：纯 RDF 的火焰温度为 1 110 °C，低于煤和 RDF 混合燃料的火焰温度；随着 RDF 掺烧比例增加，混合燃料的火焰温度逐渐降低，这表明 RDF 作为一种低热值燃料，入炉掺烧后会降低理论燃烧温度。

表 1 煤与 RDF 的工业元素分析

Tab.1 Proximate and ultimate analysis of the coals and RDF

煤质	工业分析/w%				元素分析/w%					低位热值/(MJ·kg ⁻¹)
	M _t	M _{ad}	A _{ar}	V _{daf}	C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}	
沙尔湖	17.80	12.52	19.06	36.19	46.21	2.29	14.07	0.49	0.08	16.21
神优	15.30	4.39	10.51	34.78	61.29	3.13	8.27	0.74	0.76	23.24
乌兰	12.30	4.19	9.35	35.05	64.81	3.45	8.90	0.86	0.33	28.93
RDF	1.10	0.84	24.70	92.71	40.95	4.44	27.67	0.80	0.35	14.47

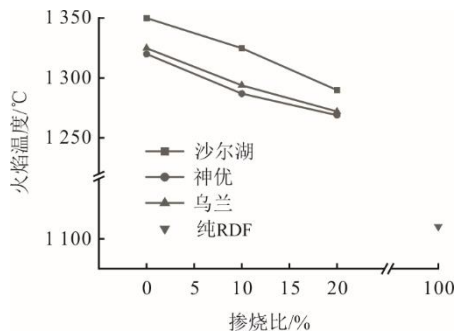


图 2 RDF 掺烧比例对火焰温度的影响

Fig.2 The influence of RDF blending ratio on flame temperature

在一维炉第 6 级测点处利用烟气分析仪测量烟气中的 NO_x 质量浓度，过量空气系数为 1.1。各煤种燃烧后生成的 NO_x 质量浓度随 RDF 掺烧比例的变化如图 3 所示。可以看到，3 个煤种的 NO_x 生成质量浓度均随着 RDF 掺烧比例的增加而减少，这表明掺烧 RDF 会降低燃煤锅炉 NO_x 生成质量浓度，并且降低的幅度会随着掺烧比例增加而增大。

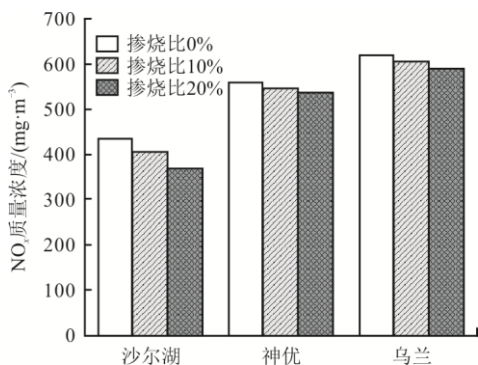


图 3 RDF 掺烧比例对 NO_x 生成质量浓度的影响

Fig.3 The influence of RDF blending ratio on NO_x generation concentration

在一维炉底部取出渣样，在旋风除尘器底部取出灰样，采用电感耦合等离子体发射光谱法 (HJ781—2016) 对灰渣中 22 种重金属元素的浸出毒性进行检测，其中主要元素的检测结果见表 2。根据《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)，

一般工业固体废物经过处理后，重金属浸出液质量浓度低于表 2 中浸出液质量浓度限值时，即可按一般工业废弃物送入生活垃圾填埋场进行处置。由表 2 可以看出，RDF 原料及灰渣中的重金属浸出液质量浓度均远小于控制标准中的浸出液质量浓度限值。即使在 RDF 掺烧比例 20% 下，煤与 RDF 混烧后的灰渣仍然属于一般工业废弃物，没有达到危废的标准。

表 2 掺烧 RDF 后灰渣中主要重金属元素质量浓度 单位:mg/L

Tab.2 Mass concentrations of heavy metals in ash residue after co-firing RDF

序号	重金属元素	浸出液质量浓度限值	重金属元素质量浓度		
			RDF 掺烧比 10%	RDF 掺烧比 20%	RDF 原料
1	铬	4.50	<0.02	<0.02	0.10
2	铜	40.00	<0.01	<0.01	<0.01
3	锌	100.00	0.02	0.08	
4	镉	0.15	<0.01	<0.01	<0.01
5	铅	0.25	<0.03	0.14	<0.03
6	汞	0.05	<0.000 02	<0.000 02	
7	铍	0.02	<0.004	<0.004	
8	钡	25.00	1.86	5.54	
9	镍	0.50	<0.02	<0.02	<0.02
10	砷	0.30	0.002 10	0.005 60	0.017 50

在旋风除尘器末端布置烟气探针，按照《环境二噁英类监测技术规范》(HJ 916—2017) 进行二噁英取样。按照《工业固体废物采样制样技术规范》(HJ/T 20—1988)，在一维炉底部取出渣样，在旋风除尘器底部取出灰样，然后对灰渣和烟气中的二噁英按照《环境空气和废气二噁英类的测定同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法》(HJ 77.2—2008) 进行检测，检测结果如图 4 所示。

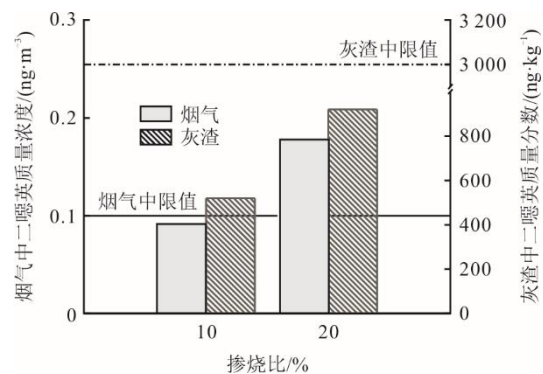


图 4 灰渣和烟气中的二噁英含量检测数据

Fig.4 The detected dioxin mass concentrations in ash and flue gas

由图 4 可以看出，RDF 掺烧比例增大，灰渣和烟气中的二噁英含量升高。根据《危险废弃物鉴别标准毒性物质含量鉴别》(GB 5085.6—2007)，固废中

二噁英质量分数应小于 15 $\mu\text{g}/\text{kg}$, GB16889—2008 中规定生活垃圾焚烧飞灰和医疗废物焚烧残渣中二噁英质量分数应小于 3 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 当 RDF 掺烧比例分别为 10% 和 20% 时, 灰渣中的二噁英质量分数分别为 520、920 ng/kg , 均远小于控制值。《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014) 中烟气中二噁英质量浓度的限制值为 0.1 ng/m^3 , 而在 20% 掺烧比例下烟气中的二噁英含量已超出控制标准, 因此当 RDF 中氯质量分数高于 0.462% 时, 应控制 RDF 的掺烧比例不大于 10%。

2 RDF 与煤 4 MW 试验台共燃试验

2.1 4 MW 试验系统

4 MW 燃烧试验台为 II 型炉, 底部有 W 火焰燃烧模块、四角切圆燃烧模块与墙式对冲旋流燃烧模块串联布置。试验台整体为积木式结构、炉内布置有水冷模块, 内径为 2 m \times 2 m, 高 16 m。烟气在前转向室转向进入过热器段, 过热器之后为后转向室。炉内每隔一定间距配备测温系统, 测量烟气沿程烟温。炉体各段均配有测量孔, 测量其中的结渣情况和污染物质量浓度等。4 MW 试验系统如图 5 所示。

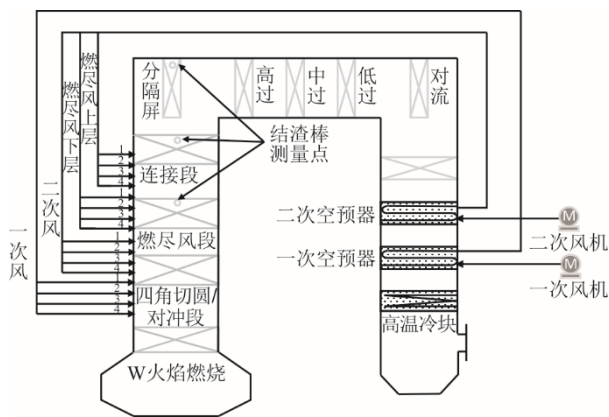


图 5 4 MW 燃烧试验台结构
Fig.5 Structural diagram of the 4 MW combustion test bench

根据一维炉试验结果, RDF 在燃煤锅炉中掺烧时应控制掺烧比例不大于 10%, 因此将沙尔湖煤与 RDF 按照质量比 9:1 均匀掺混, 然后在 4 MW 试验台上开展燃烧试验, 对沿程烟温、污染物排放、结渣情况以及燃尽性进行研究。

2.2 试验结果及分析

2.2.1 RDF 制粉特性

将煤与 RDF 均匀掺混后送入中速磨煤机中制

粉, 控制磨煤机出口风温小于 70 $^{\circ}\text{C}$, 改变磨煤机给粉量, 在磨煤机出口取样, 测量混合燃料的细度, 结果如图 6 所示。中速磨煤机研磨纯煤时, 约为 10%, 掺入 10% 的 RDF 后, 混合燃料研磨后的细度显著升高, R_{90} 增大到 27.2%, 并且随着给粉量增加, R_{90} 持续增大, 细度 R_{200} 的变化趋势与 R_{90} 基本一致。这表明, 以塑料、毛皮为主的 RDF 在中速磨煤机中的可磨性较差, 出料细度很粗, 并且会影响煤的制粉细度。

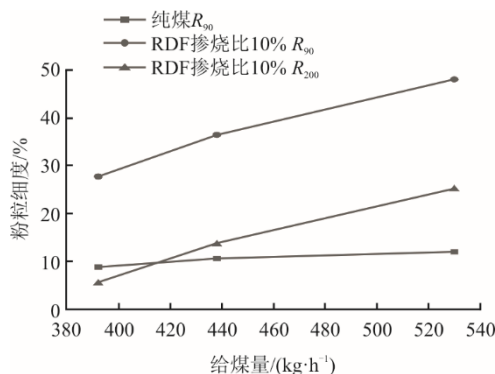


图 6 RDF 与煤混合燃料的制粉细度
Fig.6 Fineness of the coal and RDF blended fuel powder

2.2.2 火焰温度变化

按照相同的入炉热负荷控制煤粉和混合燃料的给粉速率, 测量沿程烟温分布, 结果如图 7 所示。掺烧 10% RDF 后火焰温度降低约 50 $^{\circ}\text{C}$, 与一维炉试验结果一致。掺烧 RDF 后水平烟道处烟温升高, 会引起锅炉效率降低, 这主要是由于 RDF 制粉后粒径偏大, 燃烧过程向尾部烟道处延迟, 部分粗颗粒在水平烟道处继续燃烧引起烟温升高。

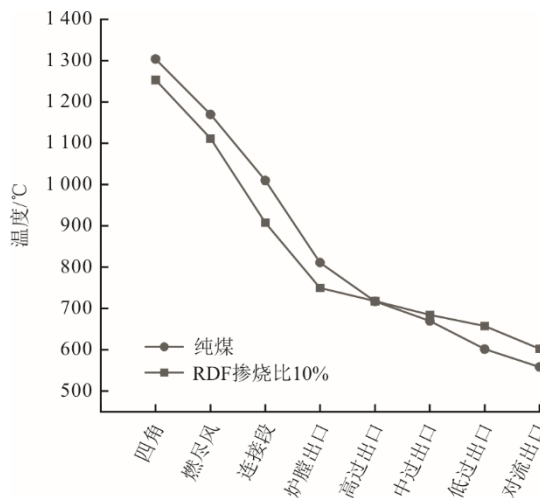


图 7 纯煤和掺烧 RDF 工况下沿程烟温分布
Fig.7 Flue temperature distribution along the route under pure coal and co-fired RDF conditions

2.2.3 NO_x 质量浓度变化

根据不同过量空气系数调节入炉总风量，纯煤和掺烧工况下一、二次风配比均保持不变。在低温过热器出口处抽取烟气测量 NO_x 质量浓度，结果如图 8 所示。相同的过量空气系数下，掺烧 RDF 后 NO_x 生成质量浓度比纯煤燃烧有所减少。随着过量空气系数增加，NO_x 生成质量浓度均显著升高。

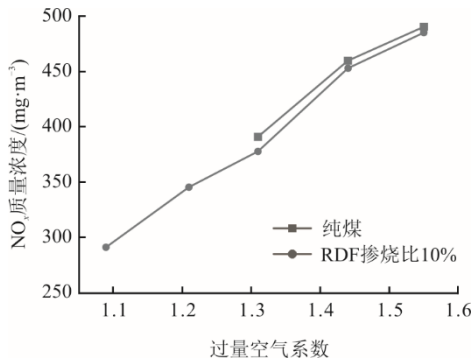


图 8 纯煤和掺烧 RDF 工况下 NO_x 生成质量浓度
Fig.8 The NO_x generation mass concentrations under pure coal and co-fired RDF conditions

2.2.4 结渣速率

进一步研究 RDF 掺烧对锅炉结渣沾污的影响。在 4 MW 锅炉的燃尽风段、连接段、分隔屏段分别放入结渣探针，稳定燃烧 30 min 后取出结渣探针。纯煤和 RDF 掺烧工况下结渣探针的照片如图 9 所示。可以看到，掺烧 RDF 后燃尽风段结渣量显著增加，而连接段和分隔屏段渣量较少。

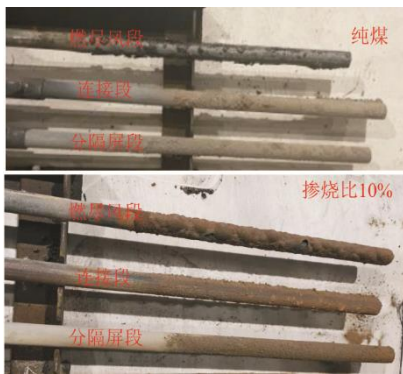


图 9 结渣棒示意
Fig.9 The slagging rods

从结渣探针上刮下渣样并进行称重，得到不同工况和位置下的结渣和沾污速率，结果如图 10 所示。与纯煤燃烧相比，掺烧 10%RDF 后燃尽风段的结渣速率显著升高，这表明 RDF 是一种易结渣燃料，在锅炉中掺烧时容易引起结渣。2 个工况下锅炉连接段和分隔屏段的结渣速率变化不大，同时纯

RDF 的灰分中钾、钠质量分数分别为 0.56%、0.97%，碱金属质量分数偏低，而秸秆、木材灰分中的钾钠碱金属总质量分数往往在 12%~41%、2%~30%^[25]，RDF 灰分中的钾钠总质量分数远低于农林生物质，表明掺烧 RDF 不会引起锅炉水平烟道严重沾污。

进一步观察不同位置的结渣速率，纯煤 3 个位置的结渣速率逐步下降，而掺烧比 10% 时分隔屏段较连接段反而出现小幅度上升。结合图 5 可知，分隔屏段处于水平烟道和炉膛的垂直处，相比于连接段，烟气与结渣棒在此处接触面积更大，烟气中的颗粒和结渣棒在此处的碰撞概率会更大，导致结渣速率变大。纯煤的 3 个位置结渣速率逐步下降，而掺烧比 10% 在分隔屏段出现小幅度上升，表明 RDF 掺烧时颗粒在连接段、分隔屏段颗粒变化较小，燃烧向尾部烟道处延迟，与火焰温度变化中结论一致。

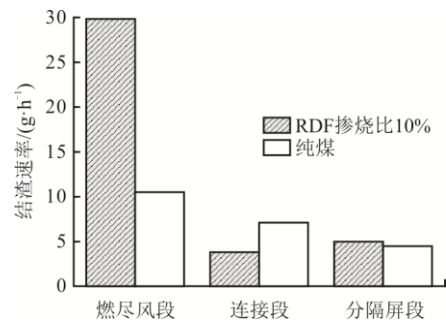


图 10 不同位置结渣速率
Fig.10 Slag deposition rates at different locations

2.2.5 灰渣中可燃物质量分数

在纯煤和掺烧 10%RDF 2 个工况下，检测灰渣样中的可燃物质量分数见表 3。

表 3 灰渣中的可燃物质量分数
Tab.3 Mass fractions of combustible matters in ash residue

煤质	给料量/(kg·h ⁻¹)	飞灰/%	底渣/%
纯煤	350	3.11	0.58
	417	3.65	0.64
RDF 掺烧比 10%	350	4.08	14.22
	417	4.55	15.36

纯煤燃烧时，飞灰中的可燃物质量分数约为 3%，底渣中的可燃物质量分数小于 1%。在煤中掺入 RDF 后，飞灰中的可燃物质量分数增加到约 4%，而底渣中的可燃物质量分数增大到约 15%，这表明有大量的未可燃物掉入了低渣中。结合 RDF 燃料的制粉特性可以发现，由于 RDF 燃料在中速磨煤机中无法破碎，制粉粒径远大于煤粉，进入炉膛后大粒

径的颗粒会直接掉入底渣中,在底渣中燃烧并升高了底渣可燃物质量分数。因此,在燃煤锅炉中掺烧 RDF 时,应选择炉膛上部燃烧器耦合。

3 结 论

1) 根据《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)中对二噁英的限值,燃煤锅炉掺烧 RDF 的容纳比例极限为 10% (质量比),煤与 RDF 混烧后灰渣中的重金属和二噁英质量浓度均小于控制标准,属于一般工业废弃物。

2) 以塑料、毛皮为主的 RDF 燃料在中速磨煤机中基本无法破碎制粉,与煤混磨后 R_{90} 增大到 27.2%。掺烧 10% RDF 后煤粉火焰温度降低约 50 °C, NO_x 生成质量浓度减小, RDF 延迟燃烧,在锅炉燃尽风区域结渣速率显著增大,在水平烟道区域沾污速率变化较小,飞灰可燃物相比纯煤燃烧略有升高,底渣中可燃物质量分数增大到约 15%。

3) 利用大型燃煤机组掺烧 RDF 可以减少碳排放,同时破解垃圾治理难题。掺烧 RDF 时应控制掺烧比例,选择炉膛上部燃烧器耦合,应关注 RDF 燃料对炉膛结渣的影响,对机组高温腐蚀、脱硫、除尘等系统的影响还有待进一步研究。

[参 考 文 献]

[1] YANG Y, LIEW R K, TAMOTHRAN A M, et al. Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: a review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19 (3): 2127-2140.

[2] 陈盛建, 高宏亮, 余以雄, 等. 垃圾衍生燃料技术及研究现状[J]. *四川化工*, 2004(4): 19-23.
CHEN Shengjian, GAO Hongliang, YU Yixiong, et al. Garbage derived fuel technology and research status[J]. *Sichuan Chemical Industry*, 2004(4): 19-23.

[3] DALAI A K, BATTI N, ESWARAMOORTHY I, et al. Gasification of refuse derived fuel in a fixed bed reactor for syngas production[J]. *Waste Management*, 2009, 29(1): 252-258.

[4] 王文波, 张灿. 我国垃圾焚烧发电行业现状与发展趋势分析[J]. *有色冶金节能*, 2022, 38(3): 43-47.
WANG Wenbo, ZHANG Can. Analysis on the status quo and development trend of China's waste-to-energy industry[J]. *Sustainable Mining and Metallurgy*, 2022, 38(3): 43-47.

[5] 张焕伟, 宋迎春, 高语晨, 等. 垃圾衍生燃料应用技术研究及工程应用现状[J]. *当代化工研究*, 2023(20): 135-137.
ZHANG Huanwei, SONG Yingchun, GAO Yuchen, et al. Recent developments of application technologies of refuse-derived fuel[J]. *Modern Chemical Research*, 2023(20): 135-137.

[6] 余渡江. 垃圾衍生燃料(RDF)流化床空气气化特性的实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 1.
YU Dujiang. The experimental study on refuse derived

fuel (RDF) air gasification characteristics of fluidized bed[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 1.

[7] 张贺. 垃圾衍生燃料的热解耦合化学链气化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 1.
ZHANG Yunhe. Research on chemical looping gasification coupled with pyrolysis of refuse derived fuel[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 1.

[8] 张焕芬, 喜文华. 日本垃圾衍生燃料(RDF)的研究开发[J]. *甘肃科学学报*, 1999, 11(3): 66-72.
ZHANG Huanfen, XI Wenhua. Research and development of Japanese garbage derived fuel (RDF)[J]. *Gansu Journal of Science*, 1999, 11(3): 66-72.

[9] 雷建国, 周斌, 陈君. 垃圾衍生燃料 RDF 制备技术及市场需求分析[J]. *再生资源与循环经济*, 2009(12): 24-28.
LEI Jianguo, ZHOU Bin, CHEN Jun. Manufacturing and preparing technology of refuse derived fuel (RDF) from municipal waste and the market demand analysis[J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*, 2009(12): 24-28.

[10] 王小宏, 陈灏, 赵玉柱. 关于垃圾衍生燃料标准的研究现状[J]. *现代化工*, 2016, 36(4): 1-3.
WANG Xiaohong, CHEN Hao, ZHAO Yuzhu. Current situation of the standards for refuse derived fuel (RDF)[J]. *Modern Chemical Industry*, 2016, 36(4): 1-3.

[11] PARADELA F, PINTO F, GULYURTLU I, et al. Study of the co-pyrolysis of biomass and plastic wastes[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2009, 11(1): 115-122.

[12] TOSTI S, SOUSA M A, BUCETI G, et al. Process analysis of refuse derived fuel hydrogasification for producing SNG[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(39): 21470-21480.

[13] KARUANA F, PRISMANTOKO A, WICAKSONO A, et al. Effects of ash formation during co-firing refuse-derived fuel with coal on initial superheater material degradation[J]. *Energy Sources Part a: Recovery Utilization and Environmental Effects*, 2024, 46(1): 1-15.

[14] HRYB W, MATYASIK P. Mercury content in refuse-derived fuels[J]. *Archives of Environmental Protection*, 2018, 44(4): 65-72.

[15] 李延吉, 宋政刚, 赵宁, 等. 垃圾衍生燃料热解半焦特性试验研究[J]. *热力发电*, 2011, 40(6): 34-37.
LI Yanji, SONG Zhenggang, ZHAO Ning, et al. Test study on properties of carbocoal form pyrolysis of refused derived fuel[J]. *Thermal Power Generation*, 2011, 40(6): 34-37.

[16] 马永怡, 李倩倩, 孙博华, 等. 生活垃圾焚烧全过程二噁英防治技术研究进展[J]. *能源环境保护*, 2025, 39(2): 44-55.
MA Yongyi, LI Qianqian, SUN Bohua, et al. Research progress on dioxin prevention and control technology in the entire process of domestic waste incineration[J]. *Energy Environmental Protection*, 2025, 39(2): 44-55.

[17] 黎涛, 熊祖鸿, 鲁敏, 等. 垃圾衍生燃料灰渣中主要元素变化的研究[J]. *环境科学学报*, 2018, 38 (8): 3169-3176.
LI Tao, XIONG Zuhong, LU Min, et al. Study on change of major elements in waste residue of refuse derived fuel[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(8): 3169-3176.

[18] BUEKENS A, HUANG H. Comparative evaluation of techniques for controlling the formation and emission of chlorinated dioxins in municipal waste incineration[J].

- Journal of Hazardous Materials, 1998, 62: 1-33.
- [19] 赵鹏勃, 李楠, 袁野, 等. 垃圾衍生燃料耦合燃煤流化床燃烧特性研究[J]. 动力工程学报, 2019, 39(9): 752-757.
ZHAO Pengbo, LI Nan, YUAN Ye, et al. Study on combustion characteristics of RDF-coal mixtures in a CFB boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(9): 752-757.
- [20] 赵鹏勃, 茹宇, 王鹏利, 等. CFB 锅炉燃烧生物质及 RDF 燃料的广谱污染物排放研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2201-2212.
ZHAO Pengbo, RU Yu, WANG Pengli, et al. Study on broad spectrum pollutant emission of CFB boiler burning biomass and RDF fuel[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2201-2212.
- [21] 陈峰, 胡勇有, 陈丹. 垃圾衍生燃料(RDF)与原煤混合试烧试验分析[J]. 环境卫生工程, 2016, 24(6): 33-37.
CHEN Feng, HU Yongyou, CHEN Dan. Mix combustion experiment test analysis of refuse derived fuel (RDF) and raw coal[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2016, 24(6): 33-37.
- [22] 吴国明. 水泥窑协同处置城市生活垃圾现状分析[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(6): 110-113.
WU Guoming. Analysis on the current situation of collaborative disposal of urban household waste by cement kilns[J]. New Building Materials, 2024, 51(6): 110-113.
- [23] RIGAMONTI L, GROSSO M, BIGANZOLI L. Environmental assessment of refuse-derived fuel co-combustion in a coal-fired power plant[J]. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(5): 748-760.
- [24] 张世鑫, 许燕飞, 吕勇, 等. 垃圾衍生燃料焚烧技术研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(6): 184-191.
ZHANG Shixin, XU Yanfei, LYU Yong, et al. Research on waste derived fuel incineration technology[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(6): 184-191.
- [25] 刘延静. 煤与生物质共燃烧过程中钾、镁的迁移及其对熔融性的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021: 1.
LIU Yanjing. Migration of potassium and magnesium during co combustion of coal and biomass and their impact on melting properties[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021: 1.

(责任编辑 杨嘉蕾)

广告目次

《热力发电》	封三
河南日立信股份有限公司	后彩插 1
西安热工研究院有限公司	后彩插 2—27
《热力发电》订阅	后彩插 28