

DOI: 10.19666/j.rlfed.202305071

中速磨煤机磨制生物质颗粒料的 适应性研究

杜智华¹, 王志超², 张向宇², 王学斌¹, 梁志远¹, 方顺利³, 李宇航^{1,2},
刘家利³, 周广钦², 贾子秀², 焦庆行⁴, 韩宝庚⁴, 张喜来², 姚伟²

(1.西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049;
2.陕西省燃煤电站锅炉环保工程技术研究中心, 陕西 西安 710000;
3.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;
4.华能集团巢湖电厂, 安徽 巢湖 238015)

[摘 要] 生物质燃烧不会增加二氧化碳排放量, 发展生物质与燃煤耦合发电技术是加快电力转型升级的可行途径。采用压型后的生物质与煤粉在不同的磨煤机中磨制且不掺混, 由不同的燃烧器分别送入炉膛, 该方式不需要增加额外的生物质处理设备和设置生物质燃料处理车间, 可大大节省投资和厂区空间。其关键限制性技术因素在于电厂的磨煤机是否能够有效研磨生物质颗粒燃料, 以及如何评估现有磨煤机对新型耦合燃料的适应性。为此, 搭建了中速磨煤机实验台, 分析中速磨煤机磨制生物质颗粒的适应性。结果表明: 中速磨煤机碾磨木屑生物质颗粒时碾磨出力降低, 有效出力修正系数为 0.65~0.70; ZGM 型中速磨煤机碾磨木屑成型颗粒时, 加载力特性、分离器特性均在料粉粒径 0.2 mm 分界下变化明显, 可考虑将筛分细度 R_{200} 和 R_{500} 定为磨煤机研磨生物质颗粒料粉均匀性指标的衡量标准; 相对于磨制煤粉, 磨制成型生物质颗粒加载力的增加或现行分离器转速的提升对细度分布影响规律有较大差异, 亟待进一步的深入研究。

[关 键 词] 生物质颗粒; 中速磨煤机; 碾磨出力; 粒径分布

[引用本文格式] 杜智华, 王志超, 张向宇, 等. 中速磨煤机磨制生物质颗粒料的适应性研究[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 56-63. DU Zhihua, WANG Zhichao, ZHANG Xiangyu, et al. Study on the adaptability of medium speed coal mill to mill bio-mass pellets[J]. Thermal Power Generation, 2023, 25(7): 56-63.

Study on the adaptability of medium speed coal mill to mill bio-mass pellets

DU Zhihua¹, WANG Zhichao², ZHANG Xiangyu², WANG Xuebin¹, LIANG Zhiyuan¹,
FANG Shunli³, LI Yuhang^{1,2}, LIU Jiali³, ZHOU Guangqin², JIA Zixiu², JIAO Qinghang⁴,
HAN Baogeng⁴, ZHANG Xilai², YAO Wei²

(1.School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2.Shaanxi Engineering Research Center of Coal-fired Boiler Environmental Protection, Xi'an 710000, China;
3.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 4.Huaneng Chaohu Power Plant, Chaohu 238015, China)

Abstract: The combustion of biomass will not increase carbon dioxide emissions, and the development of biomass coal coupled power generation technology is a feasible way to accelerate the transformation and upgrading of electricity. The compressed biomass and coal powder are ground in different coal mills without mixing, and are fed into the furnace by different burners. This method does not require additional biomass treatment equipment or setting up a biomass fuel treatment workshop, which can greatly save investment and factory space. The key limiting

收稿日期: 2023-05-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFC1910000)

Supported by: National Key Research and Development Program (2020YFC1910000)

第一作者简介: 杜智华 (1990), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电站锅炉燃烧及环保技术, duzhihua@tpri.com.cn.

通信作者简介: 王志超 (1986), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电站锅炉燃烧及环保技术, wangzhichao@tpri.com.cn.

technical factor is whether the pulverizer of the power plant can effectively grind biomass Pellet fuel, and how to evaluate the adaptability of the existing pulverizer to the new coupling fuel. To this end, a medium speed coal mill experimental platform was built to analyze the adaptability of the medium speed coal mill in grinding biomass particles. The results show that the grinding output of the medium speed coal mill decreases when grinding wood chip biomass particles, and the effective output correction coefficient is 0.65~0.70; When the ZGM medium speed coal mill grinds sawdust particles, the loading force characteristics and separator characteristics both vary significantly at the particle size boundary of 0.2 mm. Therefore, the screening fineness R_{200} and R_{500} can be considered as the measurement standards for the uniformity of biomass particle materials ground by the coal mill; Compared with pulverized coal, the increase of loading force of milled biomass particles or the increase of rotating speed of the current separator has a large difference in the influence of fineness distribution, which needs further in-depth research.

Key words: biomass pellets; medium-speed coal mill; loading force; particle size distribution

生物质不会增加二氧化碳排放量,因为它在生长过程中吸收的碳量与作为燃料消耗时释放的碳量相同。发展生物质与燃煤耦合发电是加快电力转型升级^[1-5]、落实国务院各部委《电力发展“十三五”规划》《“十三五”控制温室气体排放工作方案》和《关于开展燃煤耦合生物质发电技改试点工作的通知》中关于生物质与燃煤机组耦合发电及降低单位供电 CO_2 排放量要求的可行技术途径^[6-7]。

进料系统的设计是燃煤机组直接耦合生物质发电的关键问题之一。近年来有学者提出采用压型后的生物质与煤粉在不同的磨煤机中磨制且不掺混,由不同的燃烧器分别送入炉膛。该方式相较于其他常见的掺混方式不需要增加额外的生物质处理设备和设置生物质燃料处理车间,可节省投资和厂区空间^[8]。例如采用生物质粉料送入磨煤机出口风粉管道内混烧的方式,需要厂外直接采购生物质粉料,厂内仍然需要独立的存储给粉系统。由于粉料的堆积密度较大,采购运输存在较大的难度,场内储存需要占用大量场地,还存在火灾隐患。

通常与煤混燃的生物质包括木材和木质废物、农业作物及其废物副产品。如果电厂直接磨制未成型的生物质,磨煤机很难将生物质磨制成与煤粉同样的粒径,且由于生物质密度轻、体积大,掺烧比例受限。再考虑到运输成本、燃料来源多样化和制粉系统适应性的问题,电厂可通过直接采购生物质成型燃料,利用现有中速磨煤机制取生物质粉料,有效利用锅炉现有燃烧器系统^[9-10]。其关键限制性技术因素为电厂磨煤机是否能够有效研磨生物质颗粒燃料,以及如何评估现有磨煤机对新型耦合燃料的适应性^[9,11]。

生物质原料经粉碎成型后,密度提高,但进入磨煤机破碎后密度大幅降低,部分较大颗粒未经充分研磨即被一次风带入分离器,较长的纤维可能堵

塞制粉系统。当生物质给料量过大时,可能造成磨煤机磨制困难,进而影响制粉系统出力^[8,12-13]。中速磨煤机因磨损件使用寿命长、电耗小的优点,在我国发电厂的实际应用较为广泛,也是我国火电厂中选用最多的磨煤机类型。提高中速磨煤机对于生物质颗粒的适应性非常关键^[14-16]。

国内某 300 MW 机组 ZGM-95G 型辊式中速磨煤机直吹式制粉系统,已完成成型生物质燃料的磨制及生物质粉料的输送相关试验,发现磨煤机的生物质出力存在一定上限值。成型生物质燃料经辊式磨煤机磨制后的粒径为 10~2 000 μm ,随着生物质给料量的增加,生物质粉料的粒径增大^[12]。本文选用同类型实验室小型中速磨煤机实验台,研究中速磨煤机磨制生物质颗粒的适应性。从磨煤机出力和制粉细度角度分析实验结果,为燃煤机组耦合生物质直燃发电安全经济运行提供技术参考。

1 实验内容

1.1 实验原料

选用木屑颗粒和秸秆颗粒作为典型生物质代表,单独开展制粉相关理化特性实验研究。表 1 为国内典型木屑颗粒、秸秆颗粒工业分析与元素分析结果。由表 1 可以看出,生物质具有灰分和硫分低、挥发分极高、灰熔点低、灰中碱金属含量高等特点^[17-18]。

生物质主要化学组分均为木质素、纤维素和半纤维素,木质素含量越高,破碎强度越大^[19-20];而纤维长宽比越大,越容易黏轴;生物质整体抗压强度小、纤维较长,物料间碰撞和破碎的概率小,故采用剪切力、磨削力破碎生物质应最为有效^[11,21-22]。生物质强度指标见表 2。

1.2 实验设备

制粉实验线工艺流程如图 1 所示。生物质颗粒通过输煤系统送入磨煤机;来自电热风炉的热风在

干燥生物质粉的同时将其带入分离器，合格的生物质粉进入袋式收尘器收集，不合格的生物质粉回到磨煤机重新碾磨。作为运送与干燥介质的热风经过

除尘器过滤后在安全位置排空^[17]。由于实验用于生物质颗粒直接入磨煤机制粉，图 1 中有相关的原煤破碎设备无需启动。

表 1 生物质燃料的工业分析与元素分析
Tab.1 Technical analysis and element analysis of biomass fuel

项目	工业分析/w/%				元素分析/w/%				全硫	收到基高位发热量/(MJ·kg ⁻¹)	收到基低位发热量/(MJ·kg ⁻¹)	哈氏可磨指数 HGI	堆积密度/(t·m ⁻³)
	全水分	空气干燥基水分	收到基灰分	干燥无灰基挥发分	收到基碳	收到基氢	收到基氮	收到基氧					
木屑颗粒	6.3	3.76	1.48	82.95	46.54	5.08	0.43	40.13	0.04	18.27	17.08	15	0.33
秸秆颗粒	6.1	3.94	10.94	82.48	41.45	4.66	0.42	36.34	0.09	15.76	14.66	21	0.36

表 2 生物质强度指标
Tab.2 Biomass strength indicators

生物质	剪切强度/kPa	抗压强度/kPa
秸秆	16.50~19.90	11.10~15.90
麦秆	4.91~7.26	
木材(低级)	[5.00~10.00]	[25.00~35.00]
木材(中级)	[10.00~15.00]	[35.00~65.00]
木材(高级)	[15.00~20.00]	[65.00~84.00]

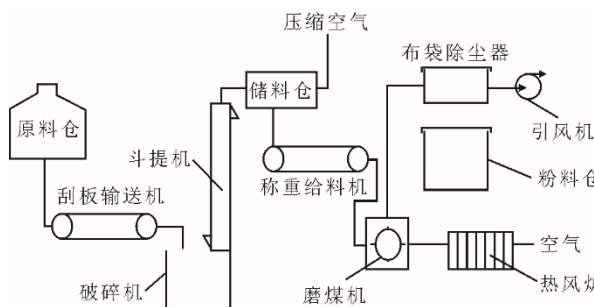


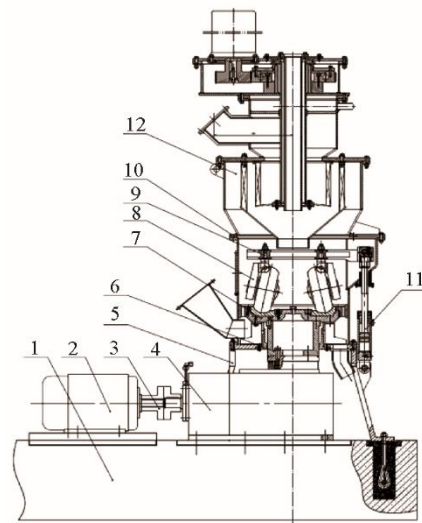
图 1 制粉实验线流程
Fig.1 Diagram of the milling test line flow

实验采用的 ZGM16 型磨煤机，通过变频电机驱动减速机带动磨盘旋转，转速可调。磨辊通过加载油缸提供压力，生物质颗粒经由分离器中央的落煤管进入磨辊和磨盘之间，经旋转咬入并挤压碾碎。生物质粉末由于离心力作用被甩至喷嘴上方，被一次风托起并干燥，进入分离器分离，合格的生物质粉被带出去，不合格的料粉返回碾磨区重新碾磨。ZGM16 型磨煤机如图 2 所示。

2 颗粒燃料制粉实验结果与讨论

2.1 试磨实验

试磨实验是不考虑入料和出料状态下，测量不同磨制时间点时磨煤机内部的粉料细度。木屑与秸秆颗粒细度 R_{90} 、 R_{200} 制粉时间变化如图 3 和图 4 所示。木屑与秸秆颗粒 R_{90} 磨制效果照片如图 5 所示。



1—基础；2—传动电机；3—联轴器；4—减速机；5—机座；6—传动盘；7—托盘与刮板；8—磨辊；9—压架与铰轴；10—机壳；11—加载油缸；12—分离器。

图 2 ZGM16 型磨煤机
Fig.2 Outline drawing of ZGM16 coal mill

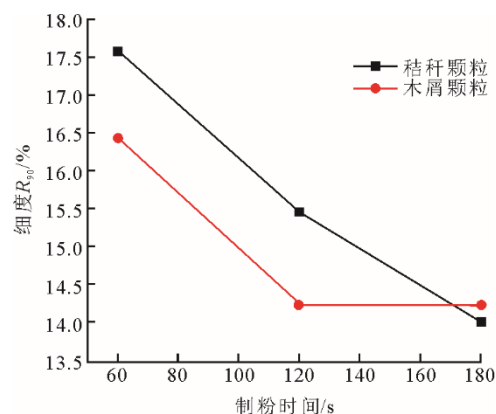


图 3 木屑与秸秆颗粒 R_{90} 随制粉时间变化
Fig.3 Wood chips and straw pellets R_{90} change with pulverization time

由图 3 和图 4 可见，无论秸秆颗粒还是木屑颗粒，其破碎制粉能力均较差，随着磨制时间的增加，

生物质颗粒的 R_{90} 和 R_{200} 降低不明显。由图 5 可见，木屑与秸秆颗粒制粉后仍存在大量木质条状纤维，会对制粉和输送均将产生不利影响^[23-24]。

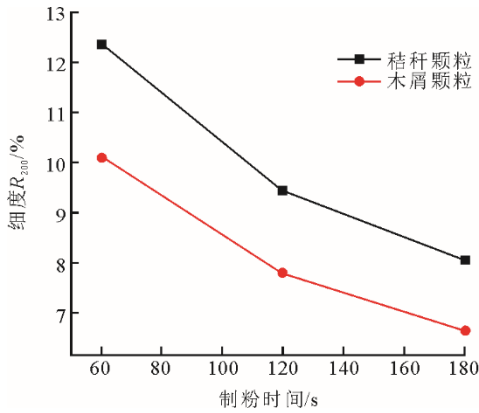


图 4 木屑与秸秆颗粒 R_{200} 随制粉时间变化
Fig.4 Wood chips and straw pellets R_{200} change with pulverization time



图 5 木屑与秸秆颗粒 R_{90} 磨制效果
Fig.5 Wood chips and straw pellets R_{90} grinding effect

2.2 加载力对生物质煤粉细度影响

在给料量约 200 kg/h 时，分离器转速为 317.3 r/min 时，调整加载油压分别为 4.5、5.0、5.3 MPa，进行磨煤机的变加载力特性实验，结果如图 6 所示。由图 6 可见，在给料量 202 kg/h 时，加载力由 4.5 MPa 升至 5.3 MPa 的过程中，料粉细度 R_{200} 及 R_{90} 均呈上升趋势，表现出与燃煤制粉相反的规律。

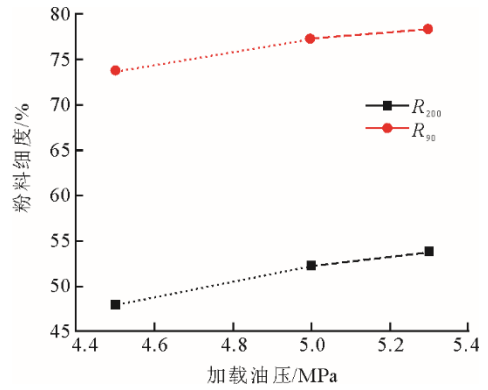


图 6 粉料细度随加载油压变化
Fig.6 The powder changes with the loading oil pressure

2.3 分离器转速对生物质煤粉细度影响

在给料量约 200 kg/h，加载油压 4.5 MPa，分别调节分离器转速为 246.8、282.0、317.3、352.5 r/min 时，进行磨煤机的分离器转速特性实验，结果如图 7、图 8 所示。

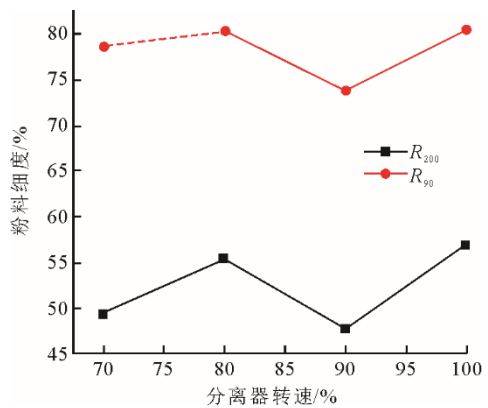


图 7 料粉细度随分离器转速变化
Fig.7 The powder changes with the speed of the separator

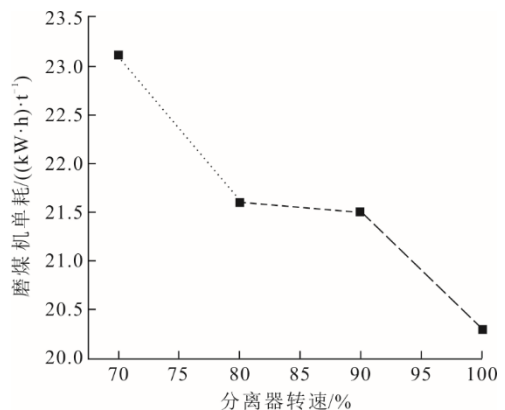


图 8 磨煤机单耗随分离器转速变化
Fig.8 The unit consumption of the mill varies with the speed of the separator

由图 7 可见，在给料量约 200 kg/h 时，分离器转速由 246.8 (70%)、282 (80%)、317.3 (90%) r/min

逐步升高到 352.5 r/min (100%) 的过程中, 料粉细度 R_{200} 及 R_{90} 变化并不规律, 分离器转速在 317.3 r/min 时细度最细。由图 8 可见, 分离器转速越高, 磨煤机单耗越低。综合考虑, 给料量约 200 kg/h 时, 合适的分离器转速调节范围为 317.3~352.5 r/min。

分离器转速的提高并不能有效进行选粉, 推测是由于生物质细粉呈纤维状态且碾磨细度无法进一步降低, 分离器转子速度提高至 100% 后粉料无法顺利进入叶片, 导致选粉效果并不明显。

2.4 最大出力实验

逐步增加给料量, 按照加载力、分离器转速适宜值, 保证磨煤机达到稳定运行的工况。最大出力实验结果见表 3。由表 3 可以看出, 在最大出力实验中, 给料量约 265 kg/h 时, 磨煤机压差趋于稳定且磨煤机最大通风阻力约 1 800 Pa 时, 料粉细度 $R_{200}=49.4\%$ 、 $R_{90}=75\%$, 磨煤机单耗 16.7 (kW·h)/t, 此时排渣量几乎为零。综合考虑 ZGM16II 型磨煤机碾磨实验结果, 生物质物料的最大出力为 265 kg/h。

表 3 最大出力实验
Tab.3 Maximum output test

项目	最大出力工况
给煤机给料量/(kg·h ⁻¹)	265.0
热风炉出口流量实际值/(kg·h ⁻¹)	405.2
热风炉出口风温/℃	21.0
磨煤机内入口风量与煤量比	1.5
加载压力/MPa	4.7
主电机速度反馈/(r·min ⁻¹)	819.0
磨盘实际转速/(r·min ⁻¹)	80.2
磨煤机功率/kW	4.4
分离器电机转速/(r·min ⁻¹)	634.5
分离器实际转速/(r·min ⁻¹)	317.3
磨煤机进出口差压/Pa	1 818.9
磨煤机出口风温/℃	29.0
磨煤机单耗/((kW·h)·t ⁻¹)	16.6
料粉细度 $R_{200}/\%$	49.4
料粉细度 $R_{90}/\%$	75.0

3 成型颗粒研磨粒径分布

相对于煤粉, 生物质成型颗粒制粉粒径较大, 并且变工况实验下细度变化并不明显。因此, 以往磨煤的细度控制要求可能不适用于生物质成型颗粒。为此, 需进一步研究生物质成型颗粒制粉的细度区间, 并对生物质颗粒的碾磨特性进行深入研究。

取木屑颗粒的制备原料 100 g, 使用 1.25、0.50、

0.30、0.20、0.09 mm 粒径的筛子进行筛分, 筛余细度见表 4、粒径分布如图 9 所示。

表 4 生物质强度指标 单位: %
Tab.4 Biomass strength indicators

细度	$R_{1\ 250}$	R_{500}	R_{300}	R_{200}	R_{90}
筛余量	2.56	32.99	50.43	63.26	77.59

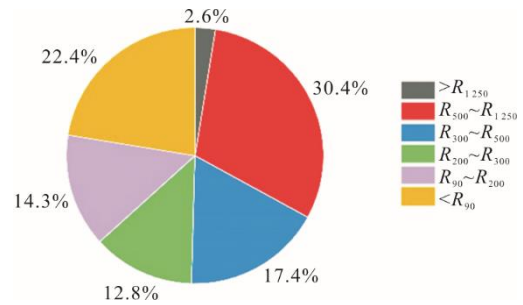


图 9 原料粒径分布

Fig.9 Raw material particle size distribution

3.1 加载力对制粉粒径分布影响

设置给料量约 265 kg/h, 调整加载力为 4.2、4.7、5.2 MPa, 分别用 1.25、0.50、0.30、0.20、0.09 mm 粒径的筛子进行筛分, 以探究不同加载力对于不同粒度区间的细度影响以及碾磨出粉的粒径分布。变加载下不同区间的细度变化及分布如图 10 所示。由图 10 可见: 加载力由 4.2 MPa 升至 4.7 MPa 后, 料粉细度 R_{200} (>0.20 mm) 数值的各区间细度均有下降, 1.25~0.20 mm 内的料粉比例均有上升; 加载力由 4.7 MPa 升至 5.2 MPa 后 (<0.09 mm) 的料粉略有增多, 其余各区间细度无明显变化。

3.2 分离器转速对制粉粒径分布影响

设置给料量约 254 kg/h 左右, 调整分离器转速为 317.3 (90%)、282.0 (80%)、352.5 (100%) r/min, 分别用 1.25、0.50、0.30、0.20、0.09 mm 粒径的筛子进行筛分, 以探究分离器转速的变化对于不同粒度区间的细度影响以及碾磨出粉的粒径分布。变分离器转速下不同区间的细度变化及分布如图 11 所示。由图 11 可见, 在变分离器转速情况下, 料粉细度 R_{200} (>0.2 mm) 明显下降, 分离器转速为 317.3 r/min (90%) 时, 选粉细度达到最低值, 分离器转速的提升对 0.2~0.3 mm 的料粉细度选粉效果明显。

分离器转速持续由 90% 提至 100% 的过程中整体选粉效果并不明显, 说明木屑成型颗粒碾磨后细度分布并不规律, 现行分离器无法进一步进行细粉分离。

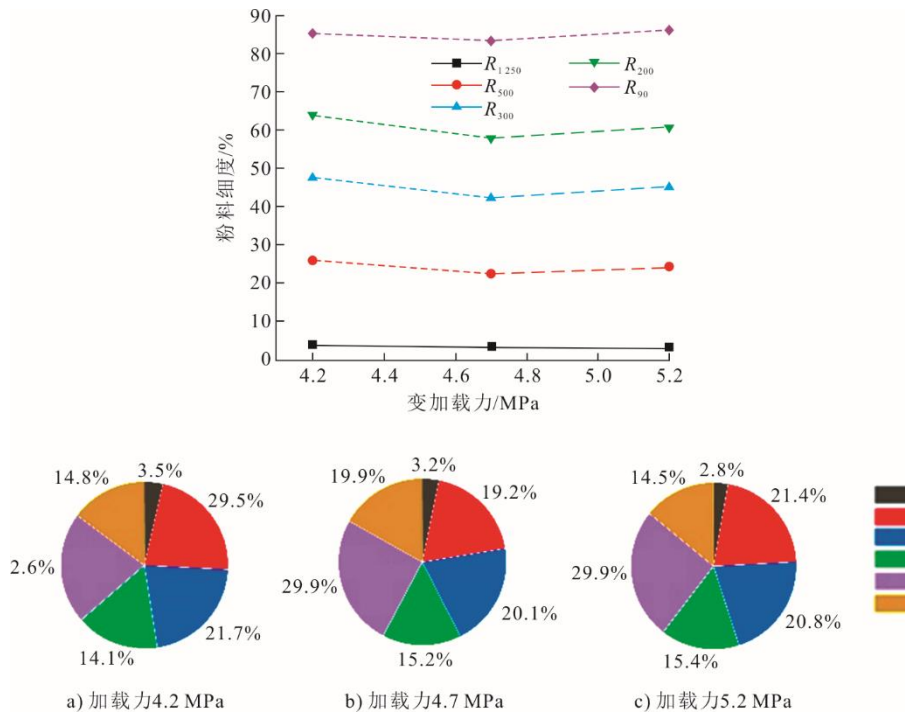


图 10 变加载下不同区间的细度变化及分布
Fig.10 Fineness variation and distribution of different intervals under variable loading

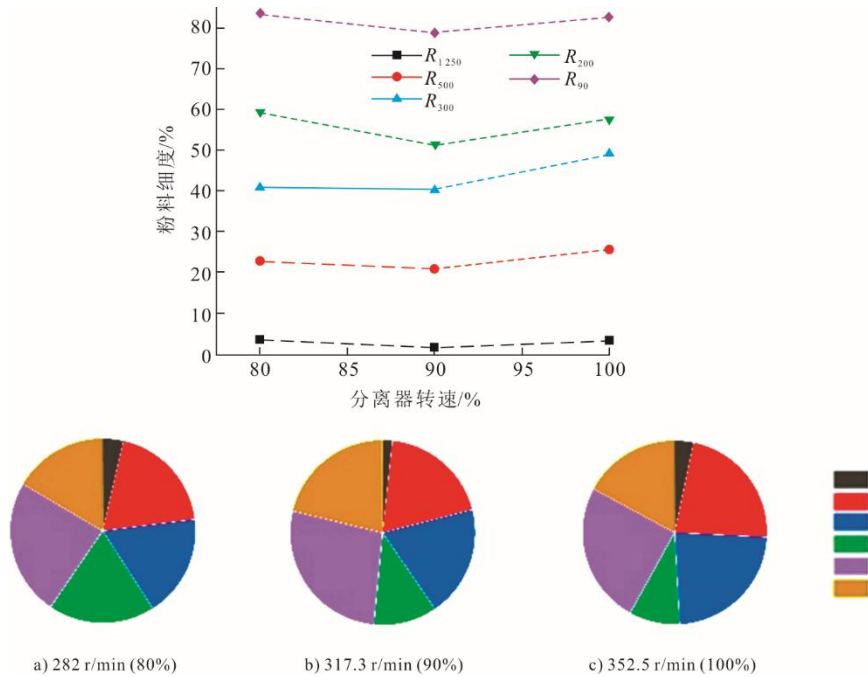


图 11 变分离器转速下不同区间的细度变化及分布
Fig.11 Fineness variation and distribution of different intervals at variable separator speed

4 燃尽性试验

采用一维火焰炉对上述所磨制合格细度的木屑颗粒粉料进行燃尽性试验。试验采用粉料分别与半焦预混掺烧，检测燃烧后的飞灰含碳量，结果如

图 12 所示。由图 12 可见，随着木屑粉料掺烧比例的增加，混合燃料的燃尽率均呈升高趋势，混合燃料的燃尽性能得到改善。混合燃料具有较佳的燃尽性能，生物质掺烧过程中可以采用较低的氧量以控制污染物生成。

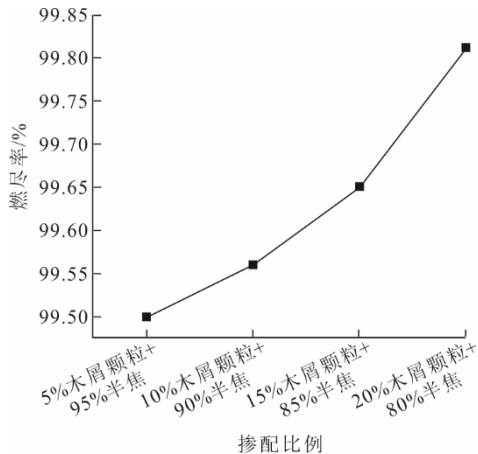


图12 变生物质粉料掺烧比例对燃尽性的影响
Fig.12 Effect of the mixing ratio of biomass powder on burnability

5 结 论

1) 相对于磨制煤粉,磨制成型生物质颗粒加载力的增加或现行分离器转速的提升对细度分布影响规律有较大差异。

2) 在实验物料下,ZGM16型磨煤机最大出力265 kg/h,料粉细度 $R_{200}=49.4\%$ 、 $R_{90}=75\%$,磨煤机单耗16.7 (kW·h)/t。根据《火力发电厂制粉系统设计计算技术规定》(DL/T 5145—2002)计算^[25],ZGM16磨煤机最大出力为0.38 t/h,根据实验所得最大出力为0.265 t/h,因此建议磨煤机碾磨木屑生物质颗粒的出力修正系数为0.65~0.70。

3) ZGM型中速磨煤机碾磨木屑成型颗粒时,加载力特性、分离器特性均在料粉粒径0.2 mm分界下变化明显。因此,可考虑将 R_{200} 的筛余量定为磨煤机性能的衡量标准,从燃尽性角度来看合适的 R_{200} 的变化范围在50%~60%。

4) 类似于煤粉均匀性指数,计算生物质颗粒制粉均匀性指数,建议增加 R_{500} 作为参考指标。

5) 采用粉料分别与半焦预混掺烧,混合燃料的燃尽性能得到改善。电站锅炉掺烧可采用较低的氧量以控制污染物生成。

【参 考 文 献】

[1] 帅永,赵斌,蒋东方,等.中国燃煤高效清洁发电技术现状与展望[J].热力发电,2022,51(1):1-10.
SHUAI Yong, ZHAO Bin, JIANG Dongfang, et al. Current situation and prospect of coal-fired efficient and clean power generation technology in China[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 1-10.

[2] 李少华,刘冰,彭红文,等.燃煤机组耦合生物质直燃发电技术研究[J].电力勘测设计,2021(6):26-31.
LI Shaohua, LIU Bing, PENG Hongwen, et al. Research

on biomass direct-fired power generation technology coupled with coal-fired units[J]. Electric Power Survey and Design, 2021(6): 26-31.

[3] 孙伟,王岩,揭其良,等.300 MW 机组锅炉燃煤耦合生物质发电的可行性研究[J].电站系统工程,2019,35(4):11-14.
SUN Wei, WANG Yan, JIE Qiliang, et al. Feasibility study on coal-fired coupled biomass power generation in 300 MW boiler[J]. Power Station Systems Engineering, 2019, 35(4): 11-14.

[4] VERMA M, LOHA C, SINHA A N, et al. Drying of biomass for utilising in co-firing with coal and its impact on environment-a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 71: 732-741.

[5] RONI M S, CHOWDHURY S, MAMUN S, et al. Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: a global review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 78: 1089-1101.

[6] PRIYANTO D E, UENO S, HASHIDA K, et al. Energy-efficient milling method for woody biomass[J]. Advanced Powder Technology, 2017, 28(7): 1660-1667.

[7] SCARLAT N, DALLEMAND J, MONFORTI-FERRARIO F, et al. The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: policies and facts[J]. Environmental Development, 2015, 15: 3-34.

[8] 张开萍,高明明,龙江,等.生物质直燃式循环流化床锅炉燃烧系统建模及预测研究[J].动力工程学报,2023,43(4):452-460.
ZHANG Kaiping, GAO Mingming, LONG Jiang, et al. Modeling and prediction of combustion system of biomass direct-fired circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(4): 452-460.

[9] 谭厚章,杨富鑫,阮仁晖,等.掺烧生物质对660 MW 燃煤机组锅炉影响研究[J].热力发电,2022,51(4):23-29.
TAN Houzhang, YANG Fuxin, RUAN Renhui, et al. Study on the influence of blended biomass on boiler of 660 MW coal-fired unit[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(4): 23-29.

[10] CHOUDHURY B J, MUGAI H H, KALITA P, et al. Biomass blend derived porous carbon for aqueous supercapacitors with commercial-level mass loadings and enhanced energy density in redoxactive electrolyte[J]. Applied surface science, 2022, 601: 154202.

[11] 杨伟,朱有健,成伟,等.黏结剂对生物质成型燃料燃烧过程中颗粒物排放特性的影响[J].中国电机工程学报,2019,39(15):4515-4522.
YANG Wei, ZHU Youjian, CHENG Wei, et al. Effect of binders on particulate matter emission characteristics from the combustion of biomass pellets[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4515-4522.

[12] 王学斌,谭厚章,陈二强,等.300 MW 燃煤机组混燃秸秆成型燃料的试验研究[J].中国电机工程学报,2010,30(14):1-6.
WANG Xuebin, TAN Houzhang, CHEN Erqiang, et al. Experimental study on mixed straw forming fuel for 300 MW coal-fired unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(14): 1-6.

[13] LEE K, LANNING D, LIN L, et al. Wear mechanism analysis of a new rotary shear biomass comminution system[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9(35): 11652-11660.

[14] 杨章宁,卢啸风,倪刚,等.生物质气与煤粉耦合燃烧

- 再燃还原 NO 热态试验研究[J]. 动力工程学报, 2020, 40(10): 781-785.
YANG Zhangning, LU Xiaofeng, NI Gang, et al. Experimental study on re-ignition of biomass gas and pulverized coal to reduce NO hot state[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(10): 781-785.
- [15] 刘家利, 屠竞毅, 方顺利, 等. 中速磨煤机在大型煤粉电站锅炉应用现状研究[J]. 热力发电, 2021, 50(3): 19-26.
LIU Jiali, TU Jingyi, FANG Shunli, et al. Research on the application status of medium speed coal mill in boiler of large pulverized coal power station[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 19-26.
- [16] 袁宏伟, 王雷, 高正阳, 等. 电站锅炉制粉系统出力影响因素分析[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(2): 65-70.
YUAN Hongwei, WANG Lei, GAO Zhengyang, et al. Analysis of influencing factors of output of boiler milling system in power station[J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(2): 65-70.
- [17] 曹忠耀, 张守玉, 吴顺延, 等. 预处理工艺对生物质成型燃料理化特性的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3288-3295.
CAO Zhongyao, ZHANG Shouyu, WU Shuntian, et al. Study on the influence of pretreatment process on physical and chemical characteristics of biomass forming fuel[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3288-3295.
- [18] 武岳, 王永征, 栗秀娟, 等. 生物质混煤燃烧锅炉过热器受热面金属氯腐蚀特性[J]. 动力工程学报, 2014, 34(9): 690-695.
WU Yue, WANG Yongzheng, LI Xiujuan, et al. Chlorine corrosion characteristics of heating surface of biomass coal combustion boiler superheater[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(9): 690-695.
- [19] CLAIRE M, NICOLAS B, ROVA K R, et al. Comminution of dry lignocellulosic biomass, a review: part I. from fundamental mechanisms to milling behaviour[J]. Bioengineering, 2018, 5(2): 41.
- [20] 董信光, 李荣玉, 刘志超, 等. 生物质与煤混燃的灰分特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(26): 118-124.
DONG Xinguang, LI Rongyu, LIU Zhichao, et al. Ash characteristics analysis of biomass and coal mixed combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(26): 118-124.
- [21] 文博, 张晓辉. 煤粉炉中生物质和煤直接混烧及其运行分析[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2007(4): 330-332.
WEN Bo, ZHANG Xiaohui. Direct co-firing of biomass and coal in pulverized coal furnace and its operation analysis[J]. Journal of Shenyang Institute of Technology (Natural Science Edition), 2007(4): 330-332.
- [22] ZHANG J, ZHENG S, CHEN C, et al. Kinetic model study on biomass pyrolysis and CFD application by using pseudo-Bio-CPD model[J]. Fuel, 2021, 293: 120266.
- [23] 谢方磊. 十里泉发电厂 140 MW 机组秸秆发电技术应用研究[J]. 山东电力技术, 2006(2): 65-68.
XIE Fanglei. Application research on straw power generation technology of 140 MW unit of Shiliquan power plant[J]. Shandong Electric Power, 2006(2): 65-68.
- [24] TEJASWINI M S S R, PATHAK P. Co-combustion of multilayered plastic waste blend with biomass: thermokinetics and synergistic effect[J]. Fuel, 2023, 337: 127168.
- [25] 制粉计算规定电力行业标准: DL/T 5145—2002[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 1
Pulverization calculation stipulates the power industry standard: DL/T 5145—2002[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 1.

(责任编辑 杨嘉蕾)