DOI: 10.19666/j.rlfd.202512082

中速磨煤机对生物质压型燃料适配性研究

范庆伟[1]，王 硕[2]，丛雯锴[3]，李 哲[2]，宋 涛[2]，张向宇[1]
（1. 西安热工研究院有限公司，陕西 西安 710054；
2. 华能白杨河发电有限公司，山东 淄博 255212；
3. 中国华能集团公司山东分公司，山东 济南 250002）

［摘 要］【目的】为了进一步推进燃煤火电机组耦合生物质发电，促进火电低碳化转型技术的发展，本文针对火电直燃耦合生物质技术中的关键工艺环节，即中速磨煤机对生物质压型燃料的适配性进行了深入研究。【方法】本文首先进行了某现役 MP212B 型中速磨煤机纯磨生物质压型燃料的工业试磨试验；之后，采用中速磨煤机现行碾磨出力标准计算方法进行了磨机对生物质燃料适配性的理论计算分析；最后，基于试验与理论分析的结果，进一步提出能够提升中速磨煤机对生物质燃料适配性的改进技术措施。【结果】MP212B 型磨煤机试磨试验结果表明：试验磨煤机实现了 25 t/h 的生物质燃料最大出力能力，约为磨煤时出力的 0.6 倍；风燃比维持在 3.0~5.0；加载力控制在 7.5 MPa；磨煤机出口粉料细度 R500 低于 40%，且随着分离器转速的提高而降低。基于试验结果，直接采用磨煤机出力计算方法进行生物质颗粒料制粉的理论计算结果与试验结果严重不符，为此，从基础理论层面提出将现行方法中哈氏可磨指数修正系数替换为基于磨内部循环倍率和堆积密度修正的方法，修正后的计算结果与试验结果基本吻合。【结论】该研究结果进一步丰富了燃煤火电直燃耦合生物质技术的试验数据与理论基础，对加快煤电机组生物质耦合发电技术的发展具有参考意义。

［关 键 词］燃煤火电；生物质直燃；生物质制粉；中速磨煤机；碳减排

［引用本文格式］范庆伟，王硕，丛雯锴，等. 中速磨煤机对生物质压型燃料适配性研究[J]. 热力发电，2026, 55(10): 99.
Fan Q W, Wang S, Cong W K, et al. Adaptability of medium speed coal mills to biomass pellet fuels[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(10): 99.

Adaptability of medium speed coal mills to biomass pellet fuels

Fan Qingwei[1], Wang Shuo[2], Cong Wenkai[3], Li Zhe[2], Song Tao[2], Zhang Xiangyu[1]
(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2. Huaneng Baiyanghe Power Generation Co., Ltd., Zibo 255212, China;
3. Shandong Branch of China Huaneng Group Co., Ltd., Jinan 250002, China)

Abstract: [Objective] In order to further promote the coupling of coal-fired power units with biomass fuel and advance the development of low-carbon transformation technology in coal-fired thermal power units, this paper investigates the adaptability of directly using a medium speed coal mill to grind biomass pellet fuel without any equipment modification, which is one of the key processes in directly fired biomass fuel coupling technology with coal-fired thermal power units. [Methods] Firstly, an industrial trial grinding test of pure biomass pellet fuel was conducted on a medium-speed coal mill (model MP212B, in commercial operation) of a coal-fired boiler unit. Then, the characteristics of the medium speed coal mill in grinding the biomass pellet fuel were studied using the standard method specified in the current national standard, and the results were compared with the experimental data. Finally, based on the results of the experiments and theoretical analysis, further technical improvement measures were proposed to enhance the adaptability of medium speed mills to biomass pellet fuel. [Results] The MP212B model

收 稿 日 期：2025-12-26 修 回 日 期：2026-03-09 接 受 日 期：2026-04-20
基 金 项 目：国家科技重大专项（2025ZD1701101）；中国华能集团有限公司总部科技项目（HNKJ24-H105）；西安热工研究院有限公司研究开发基金项目（TD25-TYK26）
Supported by: National Science and Technology Major Projects (2025ZD1701101); Research and Development Fund of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ24-H105); Research and Development Fund of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. (TD25-TYK26)
第一作者简介：范庆伟（1981），男，博士，正高级工程师，主要研究方向为电站锅炉性能、节能降耗、灵活性技术，fanqingwei@tpri.com.cn。

mill test results showed that the mill could achieve a maximum biomass fuel output capacity of 25 t/h, which was about 0.6 times the output capacity for coal grinding. The air-to-fuel ratio was maintained between 3.0 and 5.0. The loading force of grinding rollers was controlled at 7.5 MPa, which was much higher than that for coal grinding. The fineness of the biomass powder R_{500} in mill outlet was lower than 40%, and it was decreasing with the increase in separator speed. Compare with the experimental results, the theoretical calculations and analysis results of medium speed mill to biomass pellet fuel were significantly inconsistent. Therefore, in the fundamental theoretical level, an improved algorithm was proposed, which was replacing the current method's Hardgrove grindability index correction factor with a method based on internal mill circulation rate and bulk density for correction. Using the improved algorithm, the corrected calculation results were basically consistent with the experimental results. [Conclusion] The research findings further enrich the experimental data and theoretical basis of direct-fired biomass coupling technology with coal-fired power units, and have reference significance for accelerating the development of biomass coupled power generation technology of coal-fired power units.

Key words: coal-fired power unit; biomass direct firing; biomass grinding; medium speed mill; carbon emission reduction

2020 年 9 月 22 日习近平总书记在联合国大会上提出“双碳”目标。近年来，随着“双碳”目标的不断推进，清洁可再生能源的装机容量占比已超过 50%，化石能源则从主体能源变为保障性能源和调峰能源。然而，在我国新型电力系统基本框架内，燃煤火电在我国能源消费中始终具有“压舱石”的作用，因此，火电行业的低碳化转型对于“双碳”目标的实现具有极其重要的意义[1-2]。目前，燃煤火电机组耦合低碳、零碳能源是火电机组降碳的主要技术之一，尤其是耦合生物质燃料发电。国家近年来先后出台多项政策，鼓励具备条件的机组积极实施低碳化建设：示范机组采用降碳措施后，度电碳排放水平应较 2024 年同类型机组降低 10%~20%[1-4]。

我国燃煤火电机组耦合生物质技术起步较晚，连续运行数据不足。同时，研究方向又与国外存在一定差异性，主要表现在：国外技术掺烧比例大，普遍采用单独的生物质磨制粉、气力输送的技术路线，典型代表为 Drax 电厂；国内现有项目掺烧比例小，自研试验聚焦于利用现有的磨煤机进行制粉工艺，如宝二项目、布连项目等。谭厚章团队[3]研究表明，掺烧比例 20%是分水岭，低于该掺烧比例时，推荐采用现役磨煤机共磨或纯磨技术路线，反之，则推荐新增生物质独立制粉及燃烧设备的生物质耦合发电技术路线。然而，梁双荣、杜智华等[5-18]也发现现役磨煤机在磨制生物质燃料时也存在较多问题，比如出力大幅下降、风燃比偏高等，对制粉系统和燃烧系统均有较大的影响，进而影响掺烧比例。

针对上述问题，本文聚焦现役煤电机组耦合生物质燃料技术涉及的生物质燃料制粉特性进行研究。通过对磨煤机试磨（纯磨生物质颗粒燃料）试验数据的综合分析，并借鉴磨煤机理论计算经验数据，综合分析现役磨煤机对生物质颗粒燃料的适配特性及存在的主要问题，助力煤电机组耦合生物质低碳转化技术的发展。

1 煤电耦合生物质发电技术

燃煤火电机组耦合生物质主要包括直接耦合、间接耦合、蒸汽耦合 3 大类技术。其中，直接耦合掺烧技术由于设备投资成本低、对原机组影响小、发电效率高等优点，在国内外的应用最为广泛[2-4]。

20 世纪 90 年代欧美国家便开始进行煤电耦合生物质的研究工作，目前，全世界采用生物质耦合发电的机组达 230 台之多，分布于英国、荷兰、芬兰、丹麦、德国、美国等国，已形成了相对成熟的生物质掺烧体系。英国 Drax 电厂是世界上容量最大的生物质混烧燃煤电厂，已实现 4×660 MW 机组全部燃用生物质燃料，并计划联合生物质碳捕集储存技术（bio-energy with carbon capture and storage，BECCS）进行深度碳减排。荷兰有超过 50 座试验电厂采用煤电耦合生物质燃料、垃圾等，已超过其全国燃煤电厂总数的 40%。丹麦作为最早实现煤电耦合生物质发电的国家之一，多采用直燃耦合方式，以木质颗粒为主。芬兰主要采用流化床锅炉耦合生物质发电，已基本实现从煤到生物质的转变。德国在役的煤电耦合生物质发电厂以纯燃生物质（污泥）为主，此外，德国生物质发电公司也开始探索种植能源植物，以确保原料供应。美国现有燃煤耦合生物质发电厂 40 余座，并呈现逐年增加的趋势，且所有的混烧机组均为煤粉炉，采用直燃耦合方式[2-4]。

我国近年来陆续开展了煤电耦合生物质技术的相关研究工作，2005 年，山东十里泉电厂引进丹麦技术，是国内首个示范项目，该项目以秸秆为燃料，增设粉碎机和专用燃烧器，掺烧功率 2×30 MW。

2009 年，国电宝鸡第二发电厂利用备用磨煤机碾磨生物质颗粒料，实现零设备增加、零投资的耦合技术方案。国家能源布连电厂采取与宝鸡第二发电厂相同的技术方案直接掺烧沙柳压型颗粒，采用前墙顶层备用磨煤机共磨掺烧。2022 年，华能日照电厂引进德国生物质直燃耦合发电技术，实现了 34 MW 生物质耦合发电。该项目采用单独生物质制粉系统（立式锤片式粉碎机）、共管耦合掺烧方式；生物质制粉系统设计容量为 20 t/h，生物质掺烧比例为 5%。2024 年，国能寿光电厂进行了小麦与棉花秸秆等粉碎料的直燃耦合试验（共管耦合），生物质粉料掺烧量 25.36 t/h，折合标煤 11.29 t/h。鸭河口电厂进行了花生壳粉碎料独立喷燃器掺烧试验，单台炉最大掺烧量为 10 t/h[2-6]。

上述工程试验从实践的层面证实了煤电耦合生物质技术的可行性，但在理论层面，由于国内相关研究工作起步较晚、持续运行时间较短等问题，仍未形成相对完善的理论体系。张定海等[6]在一维炉试验台上进行了煤与生物质耦合燃烧特性研究，对燃尽率、污染物生成特性进行了细致研究，从燃烧的角度提出了最佳掺烧比例。郭慧娜等[7]在高温湍流实验装置上进行了粒径 2.5、6.0 mm 木质生物质颗粒的燃烧特性试验，得到了生物质颗粒燃烧时间、着火模式、火焰形态及粒径变化的相关规律，对于揭示生物质燃烧特性有积极的意义。顾玮伦等[8]在 10 MW 试验台上进行了不同掺烧比例和掺烧位置对锅炉性能的综合影响分析，对于完善理论体系提供了有力的支撑。翟胜兵等[9]在旋流燃烧器试验台上进行了生物质燃烧特性测试，对于重构炉膛内部的燃烧动力特性具有积极的意义。王一坤等[10]通过热力计算的方式定量分析了不同种类生物质燃料掺烧对现役锅炉热力特性的影响，结果表明掺烧会小幅降低锅炉效率。有多位学者对典型的 300、350、600、1 000 MW 锅炉掺烧生物质燃料热力特性进行了数值模拟研究，提供了不同炉型影响特性的定性分析结论[11-17]。

2 生物质颗粒燃料试磨试验结果

试磨试验用磨煤机为 MP212B 型中速辊式磨煤机，配置液压加载系统、动态分离器，磨盘转速 26.6 r/min。试磨用生物质颗粒为木质类圆柱形压型颗粒，颗粒粒径为 6~12 mm，成型压力为 25 MPa，颗粒料与原煤的堆积密度比约为 0.6。设计煤与试验用生物质特性如表 1 所示。设计煤全水分含量与试磨颗粒接近，但试磨颗粒内水含量更高，从磨煤机碾磨机理分析，水分升高会明显降低物料可磨性。试磨颗粒挥发分含量高达 79.9%，其着火燃烧特性较好，相比而言，设计煤的挥发分含量仅为 14.0%，对应的煤粉细度 R_{90}=10.0%，细度越细、同型号磨煤机的额定出力越低，磨煤机原设计额定出力为 41.4 t/h，最大通风量 77.8 t/h。试磨颗粒收到基碳含量低于设计煤约 10 百分点，对应的发热量降低了约 5 MJ/kg。试磨颗粒的灰分远低于设计煤，灰分降低，物料可磨性升高。设计煤质哈氏可磨指数为 58，可磨性尚可。按照哈氏可磨性指数测试标准对试磨颗粒进行测试（标准适用于烟煤和无烟煤），结果为 30 左右，说明生物质燃料非常难磨。

表 1 试磨用燃料特性
Tab.1 Characteristics of the fuels for test

内容	设计煤	生物质
全水分 M_t/%	5.00	6.40
空干燥基水分 M_{ad}/%	0.76	6.30
干燥无灰基挥发分 V_{daf}/%	14.00	79.90
收到基灰分 A_{ar}/%	31.51	8.32
收到基碳 C_{ar}/%	53.15	43.21
收到基氢 H_{ar}/%	2.13	4.95
收到基氮 N_{ar}/%	0.82	1.98
收到基全硫 $S_{t,ar}$/%	1.00	0.10
收到基低位发热量 $Q_{net,ar}$/(MJ kg^{-1})	20.54	15.59
哈氏可磨性指数 HGI	58	~30

试磨试验采用纯磨生物质运行方式，试验前原煤仓已拉空并重新上满生物质颗粒料，试验经历启磨、稳定运行、参数调整、停磨多个阶段，测试磨机出口粉料细度、记录磨机运行参数、观测磨机振动及排渣特性等。试验期间调整的参数包括磨煤机出力、加载力、分离器转速、通风量等，试验工况如表 2 所示。

表 2 试磨试验工况
Tab.2 Operating conditions of the test

工况描述	出力/(t h^{-1})	通风量/(t h^{-1})	加载力/MPa	分离器转速/%
启磨-1	6~10	75	1.0	0
变出力-2	15	70	2.0	0
变加载与出力-3	20	95	7.5	0
变出力-4	25	90	7.5	0
最大出力-5	30	75	7.5	0
变分离器-6	25	80	7.5	20
变分离器-7	20	80	7.5	30

图 1 为试磨期间给料量与磨煤机入口通风量变化曲线。启磨阶段给料量约 6 t/h，后增加到 10 t/h，稳定运行后给料量增加到 15、20、25 t/h；当给料量增加到 30 t/h 短时运行后出现磨差压持续升高、一次风管风速偏差显著增加的现象，随即降低至 25 t/h 稳定运行。试验后期，提升分离器转速，磨煤机出现轻微堵磨迹象，降低给料量至 22 t/h 后可维持稳定运行。根据试验期间磨煤机的给料量变化结果可得：磨煤机可在 20~25 t/h 的给料量下维持基本稳定的工作状态，该结果可作为磨煤机纯磨生物质颗粒料的额定出力值。启磨阶段磨煤机通风量为 70 t/h，给料后略有下降，但很快又恢复到较高水平。试验启磨的通风量高于正常启磨的通风量，但在整个试验过程中，磨煤机入口通风量几乎都维持在 80~100 t/h，在给料量 30 t/h 时，通风量略有下降，已出现轻微堵磨的迹象，为非正常状态。

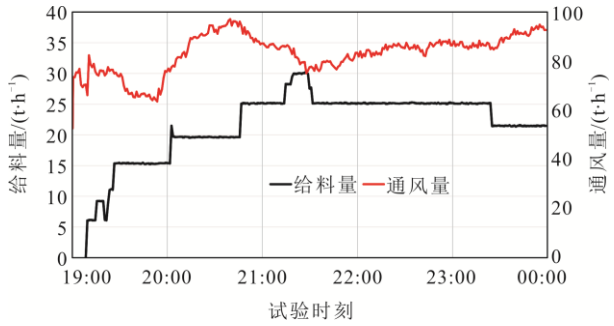


图 1 试验磨煤机给料量、通风量变化

Fig.1 Variation of the fuel feed rate and air flow rate of the test mill

图 2 为试磨期间风燃比变化曲线。磨煤机 25 t/h 稳定出力工况下的风燃比基本维持在 3.0~3.5，启磨阶段和分离器转速增加工况下的风燃比则在 4.0~5.0，最大出力 30 t/h 工况风燃比接近 2.5，但无法长时间稳定运行。相比磨煤机正常风煤比 1.8~2.5 而言，磨制生物质颗粒工况下的风燃比显著增加，该结果与文献[5,19]的试验结果（风燃比 2.9~5.0）基本一致。

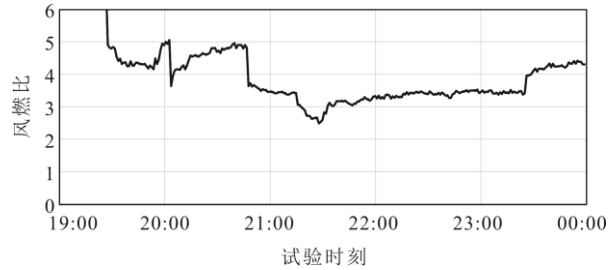


图 2 磨煤机风燃比

Fig.2 Change of the air-to-fuel ratio of the test mill

根据生物质颗粒燃料的元素分析结果，其燃烧理论空气量为 5.16 kg/kg，即气固比为 5.16 时可满足化学当量比燃烧；生物质颗粒中固定碳含量为 16.2%，固定碳部分完全燃烧的理论空气量为 1.86 kg/kg。因此，当假定燃烧反应初期固定碳不参与燃烧的理想状态时，生物质着火初期挥发分含量的理论空气量应为 3.30 kg/kg，即气固比为 3.30 时其一次风的过量空气系数为 1.0。按上述计算结果，当一次风粉气固比为 2.9~5.0 时，对应的一次风过量空气系数已达到 0.88~1.52，远超煤粉燃烧器的一次风比例。这与国内主流低氮燃烧的理念不符，可能造成 NO_x 生成量的增加，上述结论与文献[5]的结论一致。

图 3 为试磨期间加载力变化曲线。启磨阶段按照正常的加载力参数控制，磨煤机出现了较为严重的吐料情况（图 4），渣斗内的生物质颗粒显然未经过有效的碾磨就被排出磨腔体空间。当正向加载力增加至 7.0 MPa 以上，磨煤机入口通风量增加到 90 t/h 以上，渣斗内几乎无渣粒掉落，磨煤机可正常运行。

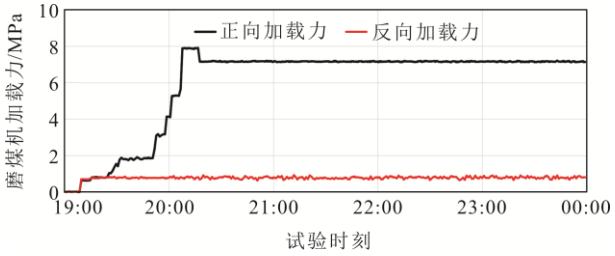


图 3 试磨磨煤机加载力参数

Fig.3 Loading forces of the test mill



图 4 磨煤机渣斗内渣粒

Fig.4 Slag particles in slag hopper of the coal mill

图 5 为试磨期间磨煤机电流和磨盘差压变化曲线。磨煤机的电流、差压与磨煤机出力呈正相关趋势，出力、分离器转速增加均对应电流和差压增加的工况。试磨期间的电流在 30~42 A 变化，均未超

出正常范围。磨煤机进出口差压则在 1.0~2.0 kPa 变化，也在正常范围内。

除上述关键指标外，磨煤机入口冷、热风门开度分别为 80%和 55%，磨煤机进、出口温度分别为 120、65 ℃。受磨煤机入口通风量较大的影响，磨煤机入口冷风门开度大、入磨热风温度低。启动磨煤机阶段分离器停转，试验中后期则测试工况为 20%、30%最大转速，对应磨煤机出力分别为 25、20 t/h。

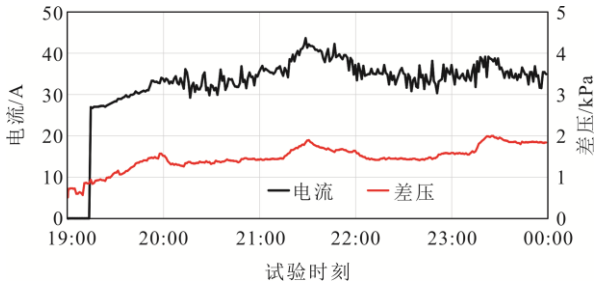


图 5 磨煤机电流与差压变化曲线

Fig.5 Change curves of the current and pressure drop of the mill

图 6 为磨煤机出力 25 t/h，分离器不同转速下磨煤机出口粉样筛分结果。分离器停转时，磨煤机出口粉料细度偏粗，R_{200}=63.16%、R_{500}=30.96%、$R_{1.0}$=7.04%。分离器转速增加到 20%最大转速后，细度则明显改善，R_{90}=48.44%、R_{200}=31.24%、R_{500}=8.68%，已较为接近褐煤的相关指标。由磨煤机出口粉料细度分析结果可知，磨煤机对颗粒料的二次破碎效果非常显著。磨煤机出口粉料粒径超过 1 mm 的占比非常少，随着分离器转速的增加，粉料细度变细，更有利于着火和燃尽，但粒径的最佳指标范围仍需综合评估。

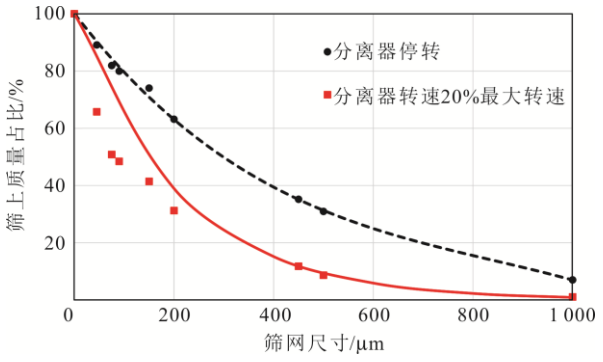
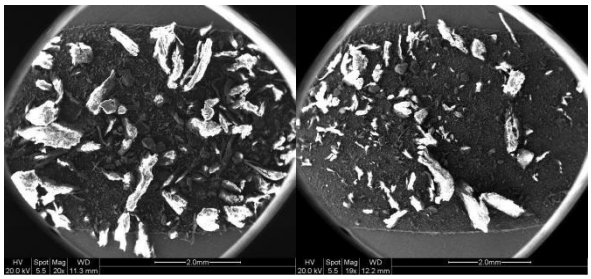


图 6 磨煤机出口生物质粉料细度

Fig.6 Biomass powder fineness at the mill outlet

图 7 为磨煤机出口取粉样的微观形貌特征。分离器停转工况的粉样粒度偏粗，放大后大颗粒的占比明显偏多，颗粒多呈现长条状、长径比较大。分离器转速提高后，大颗粒占比下降，长条状颗粒明显变少、长度变短、宽度变窄。由生物质粉料形貌特征可知，大颗粒呈现明显的非球形特征，不利于气力输送，容易诱发沉积、堵塞等问题，目前，合理的气力输送速度也缺乏相关数据支撑。



a) 分离器停转　　b) 分离器转速 20%

图 7 磨煤机出口取粉样的微观形貌特征

Fig.7 Micro-morphological characteristics of the biomass powder samples taken from the outlet of coal mill

3 磨煤机对生物质燃料出力计算分析

根据上述试磨试验结果可知，现役磨煤机可以实现纯磨生物质颗粒，且单台磨煤机出力可达 25 t/h，接近国产 2 台锤磨机的出力，出口粉料粒度更细。但同时，也暴露出明显的不匹配，如出力大幅下降、气固比偏高、需要加载力较大等问题。详细分析造成上述不匹配性的具体原因，对于后续生物质耦合技术的发展具有积极的推进意义。

生物质燃料在成分上与燃煤较为接近，但其组成成分主要为半纤维素、纤维素和木质素，与燃煤的结构差异性非常明显，这也是导致磨煤机无法较好研磨的原因之一。对于中速磨煤机而言，其经典的出力计算方法为[20]：

$$B_M = B_{M0} f_H f_R f_M f_A f_g f_e f_{si} \quad (1)$$

式中：B_M、B_{M0} 为计算碾磨出力和基本出力，t/h；f_H、f_R、f_M、f_A、f_g 分别为可磨性、煤粉细度、原煤水分、原煤灰分、原煤粒度对磨煤机出力修正系数；f_e 为碾磨件磨损至中后期时出力降低系数；f_{si} 为分离器型式对磨煤机出力修正系数。

在上述影响因素中，可磨性、煤粉细度、原煤水分、原煤灰分是主要的影响因素，其他的因素对磨煤机与生物质燃料的匹配性影响规律与原煤基本一致。按照标准规定算法及燃料的相应数据进行理论计算，结果如表 3 所示。计算结果表明，磨煤机在磨制生物质时的碾磨出力修正系数为 0.97，还要高于磨制原煤的修正系数 0.92，生物质燃料计算出力与原煤计算出力的比例为 1.05，偏离了已有试

验数据的实际情况（试磨期间试验结果为 0.60）。因此，中速磨煤机对于生物质燃料匹配性的评估不能直接套用现有计算方法。

表 3 磨煤机出力特性修正
Tab.3 Mill output characteristic correction

项目名称	原煤	生物质	
		常规方法	改进方法
哈氏可磨性指数	58	30	30
煤粉细度/%	14	50	50
水分/%	5.0	6.4	6.4
灰分/%	31.5	8.3	8.3
f_H	1.09	0.75	
f_{KC}			0.42
f_R	0.90	1.30	1.30
f_M	1.00	1.00	1.00
f_A	0.94	1.00	1.00
$f_H \times f_R \times f_M \times f_A$	0.92	0.97	
$f_{KC} \times f_R \times f_M \times f_A$			0.55
B_{Mb}/B_{Mc}	0.60*	1.05	0.59

注：*为试磨试验值。

结合试磨试验结果，在加载力较小、给料量也不大的情况下，磨煤机出现了吐料情况，说明磨盘上的料层厚度超过了磨煤机的可承受能力，为此，本文从料层厚度方面进一步分析。磨煤机料层存在动态平衡：落料口连续下料，经磨盘磨辊碾磨后的细料被一次风携带到分离器区域，经过分离器合格的粉料离开磨煤机出口，不合格的粉料则回落至磨盘继续碾磨。其中，落料口下料与磨煤机出口的合格粉料质量相等时磨煤机正常运行；落料口下料大于磨煤机出口的合格粉料质量时开始逐渐堵磨。分离器分离下来的不合格粉料量不影响磨煤机正常运行，但会影响磨盘料层厚度。磨煤机循环倍率 K_C 是表征上述过程的关键变量，其与磨煤机出力的关系式如式(2)所示。

$$B_{M1} = (K_C + 1) \times \frac{100 - M_f}{100} \times B_M \tag{2}$$

式中：B_{M1} 为磨煤机内煤量，t/h；M_f 为原煤的外在水分，%。

标准规定，对于烟煤和贫煤取 K_C=7，对褐煤取 K_C=4。我国的褐煤炭化程度较高，按照国外相关标准修正后的哈氏可磨指数较高、容易被磨碎，因此，在较低的循环倍率下即可达到细度要求。烟煤和贫煤相对难磨，循环倍率较高。生物质燃料半纤维素成分韧性较强，易于破坏成丝状结构但不易断裂、破碎，导致更难被磨成细小颗粒，相同碾磨能量下则需要更高的循环倍率才能达到细度要求。基于上述分析，在现役中速磨煤机对生物质燃料的匹配性分析中引入循环倍率修正因子 f_{KC}。由于生物质燃料的循环倍率没有试验数据支撑，参考烟煤与褐煤的经验关系，取 K_C=10。磨煤机在磨制原煤和生物质燃料时按照相同的磨煤机内物料体积计算，从而可达相同的料层厚度。此外，由于生物质颗粒的堆积密度较原煤低，计算中按 0.6 的堆积密度比考虑。对式(2)进行推导：

$$f_{KC} = \frac{B_{Mb}}{B_{Mc}} = 0.6 \times \frac{K_{Cc} + 1}{K_{Cb} + 1} \times \frac{100 - M_{fc}}{100 - M_{fb}} \tag{3}$$

式中：下标 b、c 分别为生物质、原煤。

考虑到循环倍率修正是由生物质燃料的可磨性下降导致的，因此，出力计算过程中 f_H 修正就无需重复修正了，即利用 f_{KC} 修正代替 f_H 修正，计算结果如表 3 所示。将原煤和生物质燃料特性代入式(3)可得 f_{KC}=0.42，相比 f_H=0.75 修正力度更大，综合修正系数为 0.55，生物质燃料计算出力与原煤计算出力的比值为 0.59，该值与试磨期间的试验结果 0.60 吻合度非常高。由此可知，对于现役磨煤机直接磨制生物质燃料，根据燃料的可磨性、密度等因素进行循环倍率修正的方法可行，但仍需要大量经验数据确定合理的循环倍率、密度等经验数据的取值规律。

4 中速磨煤机匹配生物质燃料改进措施

现役中速磨煤机扩展性磨制生物质颗粒料已被证实可实现，但受限于现有设备参数已确定，其对于生物质的适配性仍存在问题，主要表现如下。

1）由于生物质燃料韧性更强，其可磨性指数大幅下降，导致了磨煤机内部的循环倍率升高，磨煤机出力大幅下降；

2）由于生物质燃料堆积密度更小，其对磨煤机内有效的腔体空间需求更大，更容易引发料层厚度超限、吐料等问题；

3）现有磨煤机（一次风管道）通风量与出力的关系已确定，磨制生物质燃料时会导致风燃比偏高，对于磨煤机自身运行、燃烧控制、污染物生成等均有不利影响；

4）现役磨煤机为了实现较高的碾磨出力，需要在高于正常加载力下运行，会引起磨煤机振动。

针对上述问题，本文从设备结构设计方面提出以下改进措施，以提高中速磨煤机对生物质燃料的

适配性，实现更加理想的性能指标：

1）针对磨煤机内部循环倍率较高的问题，可考虑通过提高碾磨能力或提升碾磨效率来解决，即在单位时间内让物料经过更多次的碾磨或者单次碾磨的破碎程度更高。为此，提出以下 2 种改进措施。

①改进磨辊、磨盘型线及提升磨盘转速。提升磨盘的旋转速度可提高磨辊与磨盘的线速度，进而提高切向剪切力，实现更高碾磨能力的效果。磨辊、磨盘的匹配型线可考虑增加有效碾磨面积，提高单次过辊的碾磨物料量，同样可实现更高碾磨能力。

②增加磨辊数量、减小磨辊体积。煤电中速磨煤机普遍采用三磨辊结构，磨盘旋转 1 周有效碾磨次数为 3 次。为提高碾磨效率，可通过增加磨辊数量、减小磨辊体积的技术措施，在磨盘同样旋转 1 周的情况下，过辊次数增加，有效碾磨次数增加，对应的碾磨效率必然提升。最佳磨辊数量应结合结构设计、试验性能参数等综合评估确定。

2）针对磨煤机内部有效腔体空间需求大的问题，结合磨盘转速提高，磨辊、磨盘型线改进、磨辊数量增加等措施可在一定程度上减小磨煤机内部有效空间。在此基础上，再根据实际出力的需求增加磨盘尺寸，磨盘尺寸选取可参考本文提出的 f_{KC} 计算公式进行。

3）针对磨煤机风燃比偏高的问题，可考虑对磨煤机的通风量进行适配性设计，即设计合理的风环结构参数。同时，应考虑磨盘尺寸增加带来的风环直径增加的影响。

4）针对磨煤机需要的加载力较大的问题，应谨慎处置。考虑到磨盘尺寸增加、转速升高，即便理论上的料层厚度一致，但加载力较大仍会导致设备振动问题。因此，适配性改型建议尽量不对现有的加载力系统进行优化改造。

此外，为了适配生物质颗粒的特性，可能还需要很多技术细节方面的改进，但由于目前尚缺乏相关的试验证据支撑，本文不做讨论。

5 结　论

燃煤火电机组耦合生物质零碳燃料是未来我国实现低碳转型重要的技术路线之一，其受重视程度会越来越显著。国内外已报道的典型生物质耦合工程案例多采用新增生物质磨煤机的技术路线，但其存在设备单体出力低、转速高、设备稳定性不高、维护工作量大等问题。在我国，利用现役磨煤机磨生物质燃料实现直接耦合受关注程度较高。本文介绍了燃煤电厂现役磨煤机试磨生物质颗粒燃料的试验结果。

1）磨煤机在试磨生物质颗粒料时的最大出力约 25 t/h，约合磨煤机设计出力的 0.60 倍，出力降低的幅度较大。

2）试磨试验风燃比在 3.0~5.0 变化，与已有文献的结果一致，对应的一次风过量空气系数为 0.88~1.52，与低氮燃烧的分级燃烧理论相悖，将造成燃烧区 NO_x 生成量的增加。

3）试磨期间磨煤机入口冷风门开度达到 80%，入口温度仅为 120 ℃左右，冷风流量大导致空气预热器换热量下降，排烟温度升高，锅炉效率下降。

4）试磨期间磨煤机正向加载力为 7.0 MPa 以上，通风量 90 t/h 以上，可保证磨煤机排渣口不吐料，磨煤机有振动现象，但仍在安全运行范围内。

5）在分离器停转工况下磨煤机出口粉料细度略粗，R_{200}=63.16%；分离器转速增加到 20%最大转速时，粉料细度变细，R_{200}=31.24%；进一步增加分离器转速到 30%最大转速时，影响磨煤机出力能力。根据结果可知，磨煤机在磨制全生物质燃料时，磨煤机出口所需分离特性要低于磨煤工况。

6）生物质粉料微观形貌表现为长条状结构，球形度不佳，不易破碎、更易沉积。上述特性与原煤差异性较大，应在工程实践中予以重视。

根据试磨试验的结果，借鉴中速磨煤机碾磨出力经验公式进行理论计算，计算结果与试验数据偏离较大，为此，进一步通过可磨性指数与循环倍率的关系，提出使用循环倍率修正代替可磨性指数修正的计算方法，完善后的计算结果与试验结果基本一致。在此基础上，提出了中速磨煤机匹配生物质燃料的改进技术措施：改进磨辊、磨盘型线，提升磨盘转速，增加磨辊数量、减小磨辊体积，增加磨盘尺寸，减小磨煤机通风量、优化动环参数等。本文研究结果丰富了燃煤火电机组高比例耦合生物质零碳燃料技术制粉系统选型技术路线，对于推动技术的快速推广具有重要的意义。鉴于生物质燃料种类繁多、特性差异较大，本文的试验及分析结果适用于本次试验使用的木质类生物质颗粒料，对其他类型的生物质燃料有待更多试验结果的验证。

［参 考 文 献］

［1］ 杨阳, 杨东泰, 张超群, 等. 双碳背景下火电厂低碳化改造技术路径及经济分析[J]. 电力科技与环保, 2025,

41(1): 13.
Yang Y, Yang D T, Zhang C Q, et al. Tech-economic and carbon emissions analysis of net zero emissions technologies under the background of carbon peaking and carbon neutrality[J]. Electric Power Environmental Protection, 2025, 41(1): 13.

[2] 谭厚章, 王学斌, 杨富鑫, 等. 大型燃煤发电机组低碳技术进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 1052.
Tan H Z, Wang X B, Yang F X, et al. Progress in low carbon technologies for large-scale coal-fired power plants[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1052.

[3] 谭厚章, 杨富鑫, 王新宁, 等. 全链条大型燃煤机组直接耦合生物质发电降碳技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 631.
Tan H Z, Yang F X, Wang X N, et al. Whole-chain biomass direct co-firing technology for the coal-fired power plant to reduce CO_2 emission[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 631.

[4] 王光磊, 孙立刚, 赵传进, 等. 燃煤机组直燃耦合与气化耦合发电研究进展[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(1): 17.
Wang G L, Sun L G, Zhao C J, et al. Research advancements in co-firing of coal powder and biomass[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(1): 17.

[5] 梁双荣, 徐艳, 段丽, 等. 煤电机组掺烧生物质需关注问题及分析[J]. 节能, 2025, 44(1): 138.
Liang S R, Xu Y, Duan L, et al. Issues and analysis of co-firing biomass in coal-fired power units[J]. Energy Conservation, 2025, 44(1): 138.

[6] 张定海. 煤与生物质直接和间接耦合燃烧特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022: 62.
Zhang D H. Direct and indirect coupling combustion of coal and biomass characteristic study[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022: 62.

[7] 郭慧娜, 吴玉新, 冯乐乐, 等. 湍流热环境中毫米级木质生物质颗粒燃烧特性[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(6): 36.
Guo H N, Wu Y X, Feng L L, et al. Combustion characteristics of millimeter-sized wood biomass particles in high-temperature turbulent environments[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(6): 36.

[8] 顾玮伦, 孙锁柱, 王静杰, 等. 生物质颗粒与煤粉耦合燃烧热态试验研究[J]. 锅炉制造, 2021, (3): 8.
Gu W L, Sun S Z, Wang J J, et al. Experimental study on coupled combustion of biomass particles and pulverized coal[J]. Boiler Manufacturing, 2021(3): 8.

[9] 翟胜兵, 李伟, 王明昊, 等. 旋流燃烧器生物质掺烧试验研究[J]. 锅炉制造, 2020(6): 14.
Zhai S B, Li W, Wang M H, et al. Experimental study on the pulverized coal-biomass swirling burner[J]. Boiler Manufacturing, 2020(6): 14.

[10] 王一坤, 邓磊, 贾兆鹏, 等. 燃煤机组大比例直接耦合生物质发电对机组影响研究[J]. 热力发电, 2021, 50(12): 80.
Wang Y K, Deng L, Jia Z P, et al. Influence of large-scale direct coupled biomass power generation on coal-fired units[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(12): 80.

[11] 高硕. 300 MW 褐煤锅炉掺烧生物质的数值模拟及优化分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2021: 45.
Gao S. Numerical simulation and optimization analysis of biomass mixed burning in a 300 MW lignite boiler[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2021: 45.

[12] 武利斌, 常岩超, 唐宏彬, 等. 350 MW 超临界对冲燃烧锅炉煤与生物质混燃数值模拟研究[J]. 青海电力, 2023, 43(2): 58.
Wu L B, Chang Y C, Tang H B, et al. Numerical simulation of mixed combustion of coal and biomass in 350 MW supercritical offset combustion boiler[J]. Qinghai Electric Power, 2023, 43(2): 58.

[13] 傅祯. 350MW 燃煤锅炉混煤掺烧数值模拟研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2023: 40.
Fu Z. Numerical simulation study of blended coal in 350 MW coal-fired boiler[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2023: 40.

[14] 孙安良, 武利斌, 唐宏彬, 等. 350 MW 超临界锅炉煤与生物质混燃热力计算研究[J]. 设备管理与维修, 2025(1): 18.
Sun A L, Wu L B, Tang H B, et al. Thermodynamic calculation study of co-firing coal and biomass in a 350 MW supercritical boiler[J]. Plant Maintenance Engineering, 2025(1): 18.

[15] 刘三举, 鲁许鳌, 成松廷, 等. 四角切圆电站锅炉生物质气混燃的数值模拟[J]. 节能, 2020, 39(12): 45.
Liu S J, Lu X A, Cheng S T, et al. Numerical simulation of biomass gas co-firing in a square-to-round power plant boiler[J]. Energy Conservation, 2020, 39(12): 45.

[16] 王智. 1 000 MW 燃煤锅炉掺烧生物质的数值模拟及优化分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2022: 45.
Wang Z. Numerical simulation and optimization analysis of biomass mixed burning in a 1 000 MW coal-fired boiler[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2022: 45.

[17] 宋欣, 杜宪涛, 关靖宇, 等. 1000MW 超超临界燃煤机组掺烧生物质技术研究[J]. 锅炉制造, 2025(2): 8.
Song X, Du X T, Guan J Y, et al. Research on co-firing biomass technology for 1000MW ultra-supercritical coal-fired power units[J]. Boiler Manufacturing, 2025(2): 8.

[18] 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.
Du Z H, Wang Z C, Zhang X Y, et al. Study on the adaptability of medium speed coal mill to mill bio-mass pellets[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 56.

[19] 潘升全, 谭厚章, 刘潇, 等. 大型电厂煤粉炉掺烧成型生物质试验[J]. 中国电力, 2010, 43(12): 51.
Pan S Q, Tan H Z, Liu X, et al. Experimental investigation on biomass co-firing in large coal-firing utility furnace[J]. Electric Power, 2010, 43(12): 51.

[20] DL/T 5145—2012 火力发电厂制粉系统设计计算技术规定[S].
DL/T 5145—2012 Technical code for design and calculations of coal pulverizing system of fossil-fired power plant[S].

（责任编辑 杨嘉蕾）