DOI: 10.19666/j.rlfd.202601061

350 MW 燃煤机组混燃压块牛粪试验研究

殷永江[1]，陈 亮[2]，刘 兴[3]，徐皓鹏[4]，彭晓军[1]，孟 浩[3]，郭 强[1]，
李皓宇[1]，聂彬宇[3]，赵 旭[2]，梁振国[2]，谭厚章[2]，王学斌[2]，杨富鑫[2]
（1. 北京京能能源技术研究有限责任公司，北京 100022；
2. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室，陕西 西安 710049；
3. 京能盛乐热电有限公司，内蒙古自治区 呼和浩特 011517；
4. 北京能源集团有限责任公司，北京 100022）

［摘 要］【目的】为响应煤电低碳化改造政策，同时解决北方畜牧业牛粪污染及资源浪费难题，开展了燃煤机组掺烧压块牛粪可行性试验。【方法】基于内蒙古某 350 MW 机组，在未对原有设备改造的前提下，采用“单磨掺烧”共磨技术，在 0~20%掺烧工况下，系统研究了掺烧对制粉系统适应性、锅炉燃烧特性、污染物排放特性及除尘系统的影响。【结果】掺烧比例超过 10%~15%时，磨煤机电流、单位功耗、前后压差变化明显，最大增幅分别为 3.96 A、0.64 kW·h/t、0.59 kPa；且燃料细度降低，R_{200}、R_{90} 最大增量分别为 1.95%、6.53%。掺烧后，锅炉燃烧状况良好，炉膛温度、排烟温度的波动较小；CO 质量浓度稳定在 60.00 mg/m^3 附近；灰渣中含碳量变化不明显；锅炉效率略降，最大降低率为 0.19 百分点，掺烧对污染物排放及除尘系统无明显影响。掺烧压块牛粪后，NO_x 生成量略微上升；SO_2 降低幅度较小；电袋除尘运行参数稳定，布袋除尘前后压差无明显变化。【结论】研究结果表明，利用机组现有设备可实现牛粪的高效掺烧，为畜禽粪污的资源化利用提供了可复制、可推广的技术新模式。

［关 键 词］牛粪；煤粉锅炉；直接掺烧；制粉特性；燃烧特性；污染物

［引用本文格式］殷永江，陈亮，刘兴，等. 350 MW 燃煤机组混燃压块牛粪试验研究[J]. 热力发电，2026, 55(10): 126. Yin Y J, Chen L, Liu X, et al. Experimental study on co-firing of briquetted cow dung in a 350 MW coal-fired power unit[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(10): 126.

Experimental study on co-firing of briquetted cow dung in a 350 MW coal-fired power unit

Yin Yongjiang[1], Chen Liang[2], Liu Xing[3], Xu Haopeng[4], Peng Xiaojun[1], Meng Hao[3], Guo Qiang[1], Li Haoyu[1], Nie Binyu[3], Zhao Xu[2], Liang Zhenguo[2], Tan Houzhang[2], Wang Xuebin[2], Yang Fuxin[2]
(1. Beijing Jingneng Energy Technology Research Co., Ltd., Beijing 100022, China;
2. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. Jingneng Shengle Thermal Power Co., Ltd., Hohhot 011517, China;
4. Beijing Energy Holding Co., Ltd., Beijing 100022, China)

Abstract: [Objective] To align with the national policy on low-carbon retrofitting of coal-fired power plants and tackle the dual challenges of cow dung pollution and underutilization of this resource in the animal husbandry sector of northern China, this study carried out a test on briquetted cow dung co-combustion in coal-fired power units, to explore a low-cost, easy-to-implement technical solution for both coal power decarbonization and livestock manure resource utilization. [Methods] This study selected a 350 MW coal-fired power plant in Inner Mongolia as the research subject and conducted briquetted cow dung co-combustion experiments adopting the “single-mill co-firing” technology, with no retrofitting required for the existing equipment. Under co-firing ratios of 0~20%, this

收 稿 日 期：2026-01-22 修 回 日 期：2026-04-18 接 受 日 期：2026-04-21 网络首发日期：2026-05-29
基 金 项 目：煤炭重大专项（2025ZD1701100）
Supported by: Coal-Major Project (2025ZD1701100)
第一作者简介：殷永江（1979），男，本科，高级工程师，主要研究方向为热能动力工程，yinyongjiang0722@163.com。
通信作者简介：杨富鑫（1985），男，博士，教授，主要研究方向为能源清洁低碳利用与热力学，fxyang@xjtu.edu.cn。

study systematically investigated the effects of co-combustion on the adaptability of the pulverizing system, combustion characteristics of the boiler, pollutant emission characteristics, and performance of the dust removal system. [Results] The results show that when the co-firing ratio exceeds the range of 10%~15%, the mill current, specific power consumption, and pressure difference across the mill exhibit significant variations, with a maximum increments of 3.96 A, 0.64 kW·h/t, and 0.59 kPa, respectively. Furthermore, the fineness of pulverized coal decreases, with the two screen residue indices (R_{200} and R_{90}) registering maximum increments of 1.95% and 6.53%, respectively. After co-firing briquetted cow dung, the boiler maintains stable combustion performance, with only slight fluctuations observed in furnace and flue gas temperatures. The CO mass concentration remains stable at 60.00 mg/m^3, the carbon content of ash shows negligible variations, and boiler thermal efficiency undergoes a marginal decline with a maximum reduction rate of 0.19 percentage point. This co-firing technology exerts no significant influence on pollutant emissions and the operating parameters of the dust removal system. Under the pure coal combustion condition, the NO_x mass concentration at the SCR inlet is 264.86 mg/m^3, and the SO_2 mass concentration at the desulfurization inlet is 2 771.38 mg/m^3. After co-firing, NO_x generation shows a slight increase with a growth rate ranging from 3.94% to 8.19% (equivalent to an absolute increment of 10.45~21.69 mg/m^3); SO_2 mass emissions experience a minimal reduction and remain essentially stable. Meanwhile, the current and voltage parameters of the electrostatic precipitator stay relatively stable, and the pressure difference across the bag filter section presents no obvious variation, with a maximum increment of only 72.87 Pa. [Conclusion] The findings demonstrate that utilizing the existing equipment of the unit enables the efficient co-combustion of cow manure, offering a replicable and scalable new technical paradigm for the resource utilization of livestock and poultry manure waste.
Key words: cow dung; pulverized coal boiler; direct co-firing; pulverizing characteristics; combustion characteristics; pollutants

随着大气中二氧化碳质量浓度持续突破历史峰值，全球温室效应不断加剧，平均温度较工业化前升高幅度已逼近 1.5 ℃临界值[1]，极端灾害频发，对全球生态系统平衡、人类生存发展构成了严峻挑战。党的二十大报告明确提出：“积极稳妥推进碳达峰碳中和”。加速能源结构革新，推动新能源发展成为这场绿色革命的关键。当前，以太阳能、风能为主的新能源虽然发展迅速，并形成了一定规模，但受限于环境因素，稳定性不足，难以满足中国庞大用电需求[2]。同时，中国“富煤贫油少气”的资源禀赋决定了以煤炭为核心的传统化石能源在未来较长时期仍是能源供应主体，煤电是能源安全保障“压舱石”[3]。实现煤电低碳转型与可持续发展，是现今“双碳”背景下，能源领域需深入研究的重大课题。

生物质资源凭借可再生性、近乎零碳排放的特性，为能源结构优化提供了重要方向。然而，生物质资源在我国仍存在利用不足等问题。国家能源局发布的《生物质能发展“十三五”规划》中数据表明[4]，我国生物质资源潜力巨大，但利用率严重不足：全国每年可用于能源利用的生物质资源，折合标准煤约 4.6 亿吨，实际利用率却不超过 10%。大量废弃生物质资源得不到有效处理，不仅造成了资源浪费，更引发了诸如大气污染等问题，加剧了环境治理压力。将废弃生物质作为燃料送入电厂，一方面可从源头解决农业废弃物露天焚烧带来的污染问题，实现环境效益与能源效益的协同提升；另一方面能够直接减少化石能源的消耗，有效降低电厂碳排放总量，助力“双碳”目标实现。基于此，燃煤耦合生物质发电技术逐渐成为燃煤电厂低碳转型的重要途径之一[5-6]。

生物质与煤的特性差异导致其耦合燃烧技术存在诸多不确定性。为了确保电厂安全运行，必须全面评估其对现有设备的影响，系统分析混合燃烧特性与污染物排放特性，并最终建立安全可靠的运行标准。近年来，国内部分学者已围绕燃煤电厂耦合生物质技术展开相关研究。刘光鹏等[7]在理论计算的基础上，研究了不同负荷掺烧小麦秸秆对锅炉燃烧特性及锅炉效率的影响。郎范玲等[8]在低负荷情况下研究了掺烧玉米秸秆对制粉系统及燃烧性能的影响，并通过理论计算分析了碳减排效益。郭幸超等[9]以沙柳为生物质原料进行 1 000 MW 燃煤机组耦合试验，重点研究了掺烧对制粉系统及飞灰含碳的影响。孟晓超等[10]在 600 MW 燃煤机组耦合杂木研究了掺烧量对制粉系统、锅炉效率、污染物排放的影响，并对机组能耗进行了分析。尽管目前已开展较多试验，但仍存在一些不足。现有试验掺烧的生物质以玉米秸秆等农林废弃物为主，种类较为单一，不同类别的生物质掺烧研究十分匮乏。国家发展改革委与国家能源局联合印发的《煤电低碳化改造建设行动方案（2024—2027 年）》中明确提出，要因地制宜充分利用农林废弃物、沙生植物、

能源植物等各类生物质资源，大力推动煤电机组开展耦合生物质发电改造。这一政策导向为生物质原料的多元化拓展提供了明确依据。

牛粪作为一种典型的生物质资源，其内部富含木质素、纤维素与半纤维素，具备良好的能源利用潜力[11]。我国北方地区草原广袤，畜牧业产业规模庞大，牲畜在养殖过程中牛粪产量巨大。传统处理方式中，牛粪多被用作农家肥或简易取暖燃料，但是消耗有限，大量牛粪仍堆积于养殖场及周边区域，不仅滋生蚊虫、散发恶臭，对环境造成多重污染，更使得宝贵的生物质资源被严重浪费[12-13]。牛粪作为燃料，应用于燃煤电厂耦合发电，具有重要的现实意义：在实现牛粪规模化、高值化、资源化利用，破解畜牧业废弃物污染难题的同时，改善了能源结构，为燃煤电厂碳减排提供了新的有效路径[14]。

此前，笔者研究团队在国内开展大型煤电掺烧牛粪试验，初步验证了掺烧牛粪的可行性[15]。然而，关于牛粪掺烧案例仍较少，其在燃煤电厂中的适应性仍有待深入研究。为进一步推动应用落地，在内蒙古某电厂 350 MW 机组上开展压块牛粪掺烧试验，重点分析压块牛粪掺烧对现有磨煤机制粉特性、锅炉燃烧特性、污染物排放特性以及除尘系统等的影响，为燃煤电厂耦合牛粪发电技术的优化与推广提供科学依据。

1 压块牛粪掺烧试验

1.1 试验方案

试验在内蒙古某电厂 2×350 MW 超临界机组锅炉开展，该锅炉采用复合滑压及定压运行模式，具备一次中间再热、单炉膛平衡通风特性。锅炉整体呈“Π”型布置，采用固体排渣方式及炉体紧身封闭、全钢架悬吊结构。制粉系统配置有 5 台 HP863 型中速磨煤机，其中 4 台运行、1 台备用。磨煤机出口采用冷一次风直吹式设计，通过 4 根煤粉管连接至炉膛四角同一层煤粉喷嘴。20 只直流式燃烧器，分 5 层布置于炉膛下部四角，使得煤粉喷入炉膛后呈四角切圆方式燃烧。

在给煤机上游，将压型预处理后的牛粪与煤进行混合，并送入 2 号机组 3 号磨煤机进行压块牛粪比例为 0~20%（梯度为 5%）的“单磨掺烧”试验。试验采用共磨工艺，将压块牛粪与煤共同在中速磨煤机碾磨，分析掺烧对制粉系统适应性、锅炉燃烧特性、污染物排放特性及除尘系统的影响。

1.2 取样与数据采集

工况稳定后，对包括碾磨后的燃料、炉渣及飞灰等样品进行采集。制粉样品参考标准 DL/T 567.2—2018《入炉煤粉样品的采取和制备方法》进行取样分析；炉渣和飞灰分别于冷灰斗、空气预热器处收集，大渣直接取样，飞灰采取等速取样。

本次试验重点关注的数据包括磨煤机运行参数、炉膛不同位置的温度、SCR 入口 CO 和 NO_x 浓度、吸收塔入口 SO_2 浓度以及除尘系统运行参数等。相关数据从集控室系统中统一调取保存。使用便携式红外测温仪，通过观火孔实现炉膛不同高度的温度测量。文中所取数据均为稳定工况下运行 1 h 内的平均值。

1.3 燃料分析

使用小型破碎机处理原料至一定细度，收集破碎后的煤和牛粪，分别按照国家标准 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》和 GB/T 28731—2012《固体生物质燃料工业分析方法》进行分析；使用元素分析仪测定燃料中的元素含量；使用氧弹量热计测燃料的高位发热量，并结合水分含量等结果推算得到低位发热量。煤和牛粪的元素及工业分析结果如表 1 所示。与煤相比，牛粪具有较高的挥发分、灰分、氮含量，其低位发热量仅为煤的 2/3。

表 1 煤和牛粪的元素及工业分析结果

Tab.1 Proximate and ultimate analysis results of coal and cow dung

项目	符号	煤	牛粪
收到基水分/%	M_{ar}	12.79	10.35
收到基灰分/%	A_{ar}	22.65	45.45
干燥无灰基挥发分/%	V_{daf}	37.87	82.51
收到基固定碳/%	FC_{ar}	40.11	7.73
干燥基碳/%	C_d	57.15	28.03
干燥基氢/%	H_d	3.67	3.90
干燥基氧/%	O_d	11.79	15.92
干燥基氮/%	N_d	0.96	1.37
干燥基硫/%	S_d	0.46	0.08
低位发热量/(MJ·kg^{-1})	$Q_{net,ar}$	17.73	11.34

使用 Bruker S8 Tiger X 射线衍射仪对煤和压块牛粪燃烧后的灰样进行成分分析，结果如表 2 所示。与煤灰相比，压块牛粪灰中 SiO_2、CaO、MgO、K_2O、P_2O_5 含量较高，Al_2O_3、SO_3 含量较低。此外，煤灰中未检测到 Na_2O 和 Cl，而压块牛粪灰中 Na_2O、Cl 的含量分别为 2.78%、0.16%。碱金属氧化物是影响锅炉受热面结渣、沾污的核心因素，牛粪灰中高含

量的碱金属会在炉膛高温环境下形成低熔点共熔体，显著降低混合燃料灰的熔融温度，易在受热面上形成结渣沾污，影响锅炉传热效率与运行安全性。同时，Cl 元素可与碱金属结合形成 NaCl、KCl 等低熔点氯化物，会破坏锅炉受热面管壁的金属氧化层，引发高温氯腐蚀，加速管壁减薄，存在一定的设备安全风险，这也是此次试验选择较低比例掺混牛粪的原因之一。

表 2 煤和牛粪的灰成分分析结果　　单位：*w*/%

Tab.2 Analysis results of ash components in coal and cow dung

项目	煤	牛粪
SiO_2	42.33	63.03
Al_2O_3	42.63	8.32
SO_3	2.54	2.05
Fe_2O_3	2.60	2.17
CaO	5.74	9.13
MgO	0.41	3.10
Na_2O		2.78
K_2O	0.37	5.07
Cl		0.16
P_2O_5	1.35	3.71
其他	2.03	0.48

2 结果与讨论

2.1 掺烧对制粉系统的影响

压块牛粪与煤在可磨性等理化性质上存在显著差异，掺烧压块牛粪是否会加剧磨煤机堵粉风险、威胁运行安全，尚未可知，无法仅凭经验判断，必须通过监测关键指标变化情况进行判断[16]。试验过程中将从磨煤机电流、磨煤机单位功耗、磨煤机前后风压及燃料细度 4 个方面分析掺烧压块牛粪对制粉系统的影响。

2.1.1 对磨煤机电流的影响

3 号磨煤机单磨混烧试验中，控制 3 号磨煤机给煤量相对稳定在（50±0.5）t/h，在单磨掺烧比为 0、5%、10%、15%、20%的试验工况下，分别对 3 号磨煤机电流参数进行监测，记录稳定工况 1 h 内的平均值。图 1 为 3 号磨煤机电流随掺烧比变化曲线。

纯煤工况下，磨煤机运行平均电流为 43.43 A；压块牛粪掺烧比例不超过 15%时，电流变化相对较小，变化幅度在–0.21~2.12 A。掺烧 20%压块牛粪工况下，磨煤机运行平均电流显著增加，电流达到 47.39 A，增幅为 3.96 A。

随着压块牛粪掺烧比例的增加，磨煤机电流呈现增长的趋势，主要是由于压块牛粪与煤在理化性质存在差异。

1）可磨性差异。生物质的可磨性普遍弱于煤，生物质的哈氏可磨指数 HGI（Hardgrove grindability index）在 20~40，而煤的 HGI 在 40~90[17]。掺入压块牛粪后混合燃料可磨性下降，达到目标细度所需碾磨功增加，电流增加。

2）破碎特性差异。煤脆性易碎，压块牛粪主要含纤维素、半纤维素和木质素，破碎以塑性变形和撕裂为主，需要更长停留时间与更高碾磨压力。掺烧比例升高导致韧性纤维占比增加、碾磨阻力增大，电流持续上升。

3）堆积密度差异。压块牛粪堆积密度低于煤，掺入后混合料堆积密度下降，相同质量下物料体积增大，磨煤机内部填充率与料层厚度增加，碾磨挤压阻力上升，电流增大。整体而言，压块牛粪掺烧比例控制在 15%以下时，磨煤机运行电流较稳定，系统运行较为安全可靠。

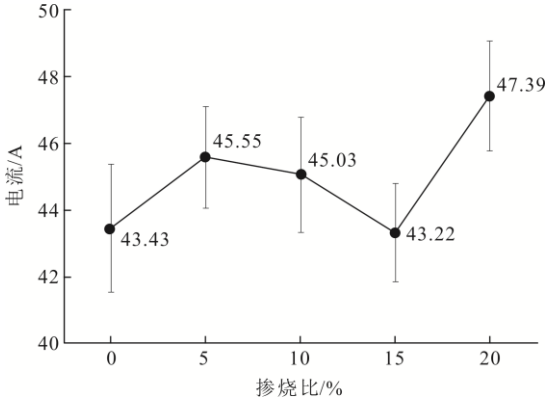


图 1 不同压块牛粪掺烧比例磨煤机电流变化

Fig.1 Current variation of coal mill under different co-firing ratios of briquetted cow dung

2.1.2 对磨煤机单位功耗的影响

磨煤机的单位功耗可以用下式计算：

$$E=\frac{1.732UI\cos\phi}{T} \tag{1}$$

式中：E 为磨煤机单位功耗，kW ħ/t；U 为磨煤机工作电压，kV；I 为磨煤机工作电流，A；cosϕ为功率因数，取定值 0.786；T 为磨煤机实时给煤量，t/h。

压块牛粪掺烧后，3 号磨煤机单位功耗变化情况如图 2 所示。掺烧压块牛粪对单位功耗的影响与对电流的影响类似。纯煤工况，磨煤机单位功耗为 7.03 kW ħ/t。相较于纯煤工况，5%~15%掺烧工况，单位功耗呈现小幅增长，变化幅度为 0.09~0.35 kW ħ/t；20%掺烧工况，单位功耗变化明显，较纯煤工况增长 0.64 kW ħ/t。由于压块牛粪的可磨性

较差，掺烧压块牛粪后，物料在磨煤机中停留时间将延长，导致单位功耗升高。实际运行过程中，可适当降低分离器转速，减少粗粉重复碾磨次数，进而控制磨煤机单位功耗；但同时需兼顾燃料细度要求，避免影响燃烧稳定性。

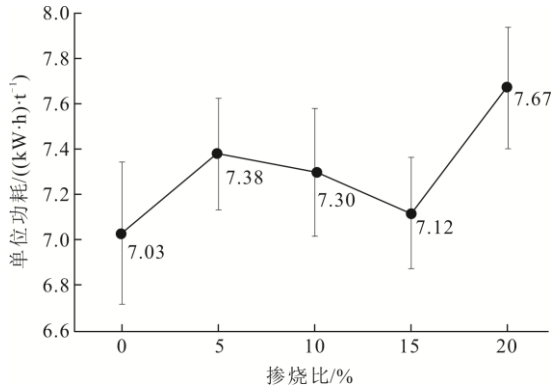


图 2 不同压块牛粪掺烧比例磨煤机单位功耗变化

Fig.2 Specific power consumption variation of the coal mill under different co-firing ratios of briquetted cow dung

2.1.3 对磨煤机进出口压差的影响

掺烧压块牛粪对磨煤机进出口压差影响如图 3 所示。在不同掺烧工况下，掺烧压块牛粪后磨煤机进出口压差均有一定程度的升高。

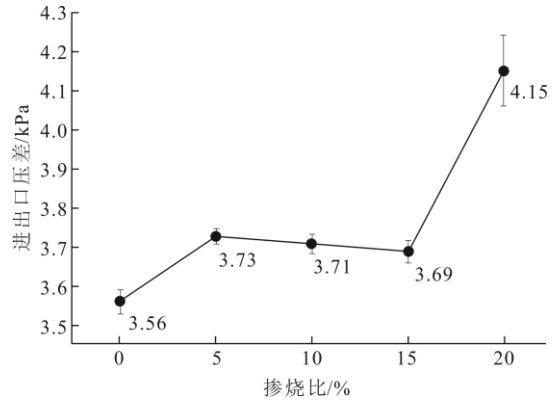


图 3 不同压块牛粪掺烧比例磨煤机进出口压差变化

Fig.3 Differential pressure variation of the coal mill under different co-firing ratios of briquetted cow dung

纯煤工况下，进出口压差为 3.56 kPa；5%~15%压块牛粪掺烧工况下，进出口压差稳定在 3.70 kPa 左右，较纯煤工况升高了 0.13~0.17 kPa，增长幅度在 3.65%~4.78%；当掺烧比例达到 20%时，压差变化较为明显，此时进出口压差为 4.15 kPa，较纯煤工况升高了 0.59 kPa，增长幅度为 16.57%。磨煤机进出口压差的升高意味着输粉阻力增大，这将显著提高磨煤机堵粉停机的风险。基于系统运行安全考虑，建议压块牛粪单磨掺烧时比例控制在 15%以下。

2.1.4 对制粉细度的影响

磨煤机出口燃料粒径的大小即制粉细度，是考核制粉系统适应性的重要指标之一。在工业试验中，通常采用 R_{90} 与 R_{200} 2 个指标来量化表征制粉细度。R_{90}、R_{200} 分别表示磨煤机出口粉末样品在 90、200 μm 的筛网上通过筛分后，筛上残余物质量占总样品质量的百分比。R_{90}、R_{200} 的数值越高，表明燃料的粉体细化程度越低，制粉系统研磨效果越差。在不同比例掺烧工况下，对 3 号磨煤机不同输粉管进行煤粉取样，将所测结果取平均值用以评估掺烧压块牛粪对燃料细度的影响，结果如图 4 所示。

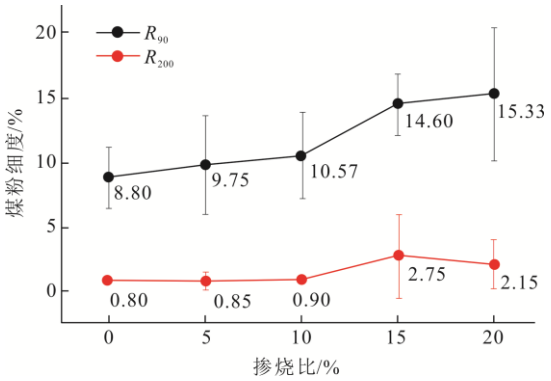


图 4 不同压块牛粪掺烧比例磨煤机制粉细度变化

Fig.4 Pulverizing fineness variation of the coal mill under different co-firing ratios of briquetted cow dung

未掺烧压块牛粪时，R_{90}、R_{200} 的值分别为 8.80%、0.80%。压块牛粪掺烧比例小于 10%时，R_{90} 和 R_{200} 基本保持稳定；R_{200} 仍保持在 0.90%以下，处于较低水平；而 R_{90} 虽然有小幅上升，但结果稳定在 10.57%以下。随着掺烧比例的增加，R_{200}、R_{90} 进一步增加；掺烧比例为 15%~20%时，燃料细度 R_{200}、R_{90} 相比纯煤工况增长率分别为 169%~244%、66%~74%。仅从燃料细度方面分析，掺烧比控制在 10%以下对制粉系统影响较小。

2.2 掺烧对燃烧特性的影响

2.2.1 对炉膛温度的影响

评估生物质掺烧对炉膛温度场的影响时，本文选取了 2 个维度的考察指标：一是基于 DCS 在线监测系统的省煤器与空气预热器入口烟温数据；二是沿炉膛高度方向布置的现场实测烟温分布。压块牛粪掺烧对省煤器、空气预热器入口烟温的影响如图 5 所示。

掺烧压块牛粪会略微降低省煤器入口烟温。纯煤工况，省煤器入口烟温为 438.98 ℃；当掺烧比例

为 5%和 10%时，入口烟温相对纯煤工况下降约 4.64 ℃。随着掺烧比例进一步提高至 15%和 20%，入口烟温降幅达到 7.77 ℃。掺烧牛粪后，烟气量增大，单位烟气分摊热量减少，同时水分蒸发吸收大量汽化潜热并抬高湿烟气比热容，二者共同作用下促使烟气温度随掺烧比例升高而逐步下降。

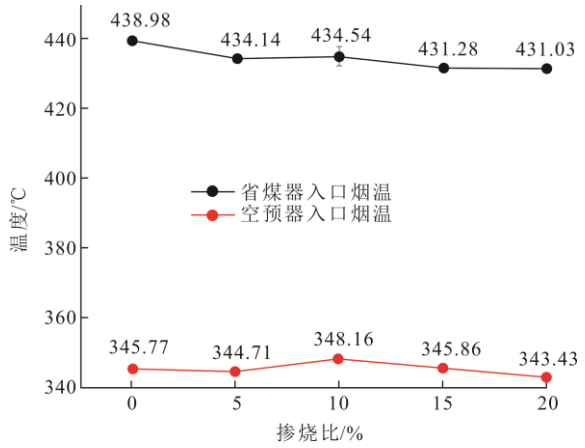


图 5 不同压块牛粪掺烧比例省煤器、空气预热器入口烟温变化

Fig.5 Inlet flue gas temperature variation of the economizer and air preheater under different co-firing ratios of briquetted cow dung

掺烧压块牛粪对空气预热器入口烟温影响较小，该烟温维持在 343.43~348.16 ℃。纯煤工况，空气预热器入口烟温为 345.77 ℃。除了 10%、20%掺烧工况会略微升高空气预热器入口烟温，升幅分别为 2.39、0.09 ℃；其余工况均会降低空气预热器入口烟温，最大降幅为 2.34 ℃。由于烟气流程存在衰减效应，热量在上游换热过程中已被部分吸收，故到达空气预热器时变化已不明显。

现场测量的炉膛温度数据如图 6 所示。相较纯煤工况，除了 15%压块牛粪掺烧工况，其他工况炉膛温度变化规律均相同。在主燃区，压块牛粪掺烧会降低炉膛温度，这一现象与燃料的热值有直接关系[18]，试验所用牛粪的低位热值（11.34 MJ/kg）约为煤低位热值（17.73 MJ/kg）的 2/3。远离主燃区，温度变化并不明显；尤其在 52 m 以上炉膛高度，温度最大变幅仅为 12.67 ℃。而 15%压块牛粪掺烧工况结果异常，这可能与现场手持测温仪的角度有关。整体而言，掺烧压块牛粪对炉膛温度的影响不大。

2.2.2 对排烟温度的影响

生物质的粒径显著大于煤粉粒径，因此锅炉内生物质的燃尽区域出现后移。同时，生物质输送需要更高的风粉比，导致锅炉过量空气系数增加，热量被更快带出炉体。因此，掺烧生物质往往会使排烟温度升高。不同工况排烟温度变化情况如图 7 所示。由图 7 可见：纯煤工况，排烟温度为 142.80 ℃；5%掺烧工况，排烟温度为 140.59 ℃；10%~20%掺烧工况，排烟温度略有增加，稳定在 144.71~146.33 ℃，但与纯煤工况相比，增长幅度为 1.91~3.53 ℃。总体而言，掺烧压块牛粪对炉膛排烟温度影响较小。

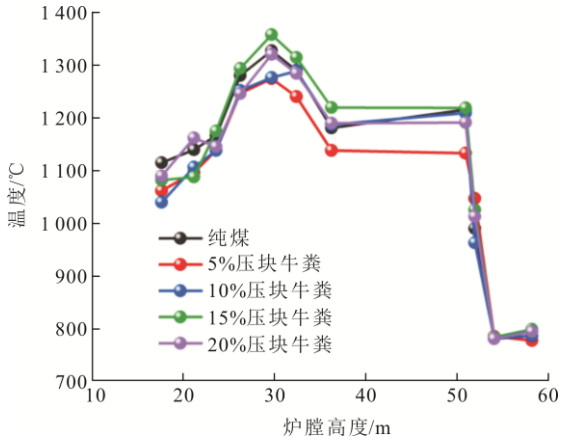


图 6 不同压块牛粪掺烧比例炉膛温度变化

Fig.6 Temperature variation at different heights of the furnace under different co-firing ratios of briquetted cow dung

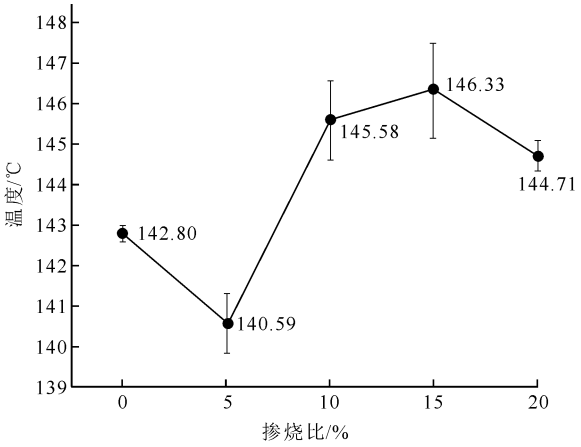


图 7 不同压块牛粪掺烧比例排烟温度变化

Fig.7 Temperature variation of the exhaust flue gas under different co-firing ratios of briquetted cow dung

2.2.3 对 CO 生成的影响

CO 是燃料不完全燃烧的产物，其含量的高低在一定程度上反映排烟热损失的大小。同时，通过观测 CO 质量浓度还能判断掺烧牛粪后，燃料供给与配风参数是否匹配，为后续运行参数的调整提供依据。不同工况选择性催化还原（selective catalytic reduction，SCR）脱硝反应器入口 CO 平均质量浓度

如图 8 所示。

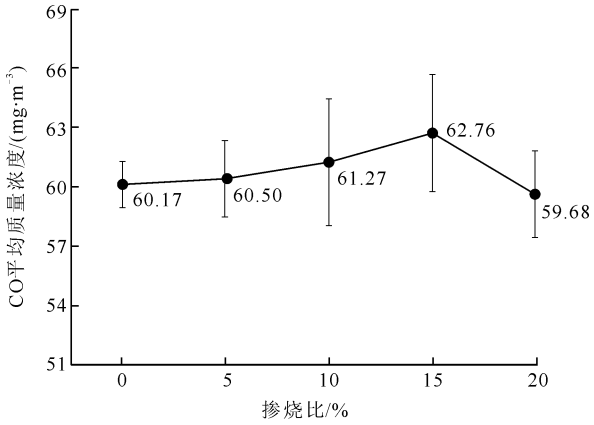


图 8 不同压块牛粪掺烧比例 SCR 入口 CO 质量浓度变化
Fig.8 CO mass concentration variation at the SCR reactor inlet under different co-firing ratios of briquetted cow dung

整体来看，掺烧牛粪对 CO 生成影响不大：纯煤工况下，CO 质量浓度 60.17 mg/m³；除 20%压块牛粪掺烧工况外，掺烧压块牛粪后 CO 质量浓度均略有上升，但总体上稳定在 59.68~62.76 mg/m³，最大变化量为 2.59 mg/m³。CO 质量浓度整体处于较低水平，且变化幅度较小，未出现因燃料特性变化导致的 CO 质量浓度突升、波动加剧等现象。结果表明，混合燃料在炉膛内仍能实现较为充分燃烧，原有的配风、燃烧参数对试验采用的各压块牛粪掺烧比例均具有良好的适应性。

2.2.4 对灰、渣含碳量的影响

掺烧压块牛粪对锅炉灰和渣中可燃物含量的影响如图 9 所示。相对于纯煤工况，掺烧压块牛粪后，灰中可燃物含量和渣中可燃物含量变化不同。

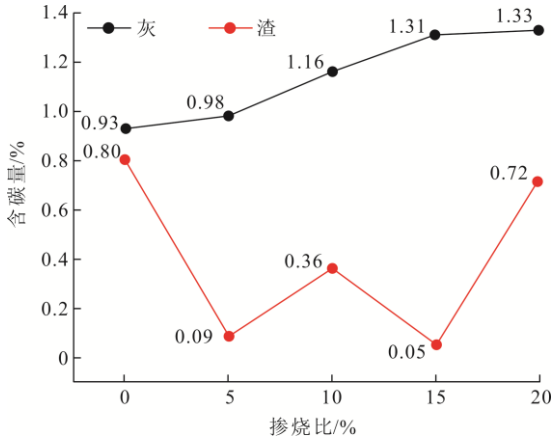


图 9 不同压块牛粪掺烧比例灰和渣中含碳量变化
Fig.9 Carbon content variation in ash and slag under different co-firing ratios of briquetted cow dung

对于灰而言，随着压块牛粪掺烧比例增大，灰中可燃物含量增加。纯煤工况下，灰中含碳量为 0.93%；掺烧比例增加到 5%时，灰中含碳量为 0.98%，变化不大；而当掺烧比例继续增加至 10%时，灰中含碳量达到 1.16%，较纯煤工况增加 0.23%；掺烧比例为 15%、20%时，灰中含碳量相近，分别为 1.31%、1.33%，较纯煤工况增加约 0.39%。飞灰含碳量变化由燃料特性与炉膛燃烧情况共同决定。掺烧压块牛粪会导致入炉燃料粒径粗化，对燃尽率存在一定影响[19]。压块牛粪挥发分含量较高且释放温度较低[20]，其挥发分的快速释放会优先消耗炉内氧气，可能与煤粉“抢风”，不利于煤粉的充分燃尽[21]。同时，高挥发分燃烧产生大量烟气可能导致炉膛内烟气流速提高，燃料未充分燃烧便被带离炉膛。此外，由于压块牛粪的低位发热量远低于煤，随着掺烧比例增大，炉膛整体燃烧温度会略微降低。在上述原因的共同作用下，随着掺烧比例增大，飞灰含碳量升高。

本次试验飞灰含碳量随掺烧比例上升的增幅较小，核心原因在于试验用煤为高挥发分烟煤。经典燃烧理论研究表明，挥发分是决定煤粉着火与燃尽特性的首要因素。高挥发分煤种在炉膛内的焦炭燃烧停留时间充足，对燃料细度的要求可显著放宽；而低挥发分煤种对燃料细度的敏感度极高，细度变化对飞灰含碳量的影响显著[22]。因此，本次试验中，即便掺烧比例超过 10%后燃料细度显著变粗，仍能保证较好的燃尽效果；若燃用中低挥发分煤种，燃料细度变粗可能加剧燃尽难度，进一步放大对飞灰含碳量、锅炉运行效率的不利影响。

对于渣而言，压块牛粪的掺烧会降低渣的含碳量。纯煤工况下，渣中含碳量为 0.80%；掺烧 5%~20%压块牛粪后，渣中含碳量在 0.05%~0.72%，较纯煤工况降低 0.08 百分点~0.75 百分点。炉渣含碳量降低可能是牛粪固定碳含量远低于原煤，且牛粪中富含碱/碱土金属，可对大颗粒燃料产生原位催化燃尽作用，使得炉渣中未燃尽碳减少所致。在 20%掺烧比例下，炉渣含碳量略微增加，这可能与压块牛粪可磨性差，导致入炉大颗粒燃料比例显著增加，燃尽难度上升有关，但整体仍低于纯煤工况。

2.2.5 对锅炉效率的影响

采用“反平衡法”计算锅炉效率，不同压块牛粪掺烧比例锅炉效率变化如图 10 所示。由图 10 可知，掺烧压块牛粪后，锅炉效率略微下降。纯煤工况下，锅炉效率为 93.23%；掺烧 5%压块牛粪后，锅炉效率基本不变；掺烧 10%压块牛粪后，锅炉效

率为 93.08%，较纯煤工况降低了 0.15 百分点；掺烧 15%压块牛粪后，较纯煤工况锅炉效率降低了 0.19 百分点；掺烧 20%压块牛粪后，较纯煤工况锅炉效率降低了 0.17 百分点。综上可见，在掺烧比例为 5%~20%时，掺烧对锅炉效率的影响较小。

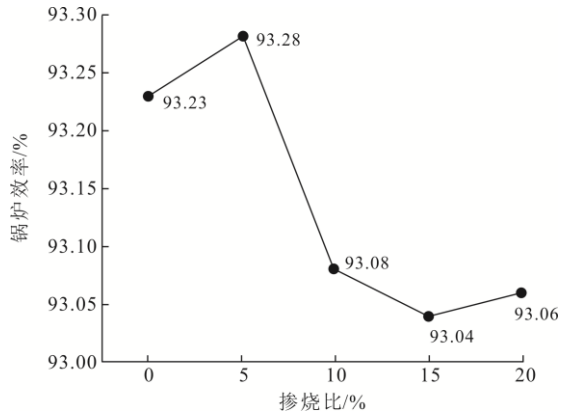


图 10 不同压块牛粪掺烧比例锅炉效率变化

Fig.10 Boiler efficiency variation under different co-firing ratios of briquetted cow dung

2.3 掺烧对 NO_x 和 SO_2 排放的影响

2.3.1 对 NO_x 排放的影响

掺烧压块牛粪对 NO_x 生成的影响如图 11 所示。从图 11 可以看出，纯煤工况，SCR 入口 NO_x 质量浓度为 264.86 mg/m^3。而掺烧 5%~20%压块牛粪后，SCR 入口 NO_x 质量浓度在 275.31~286.55 mg/m^3，增幅为 3.94%~8.19%。掺烧压块牛粪会使 SCR 入口 NO_x 质量浓度略微升高。

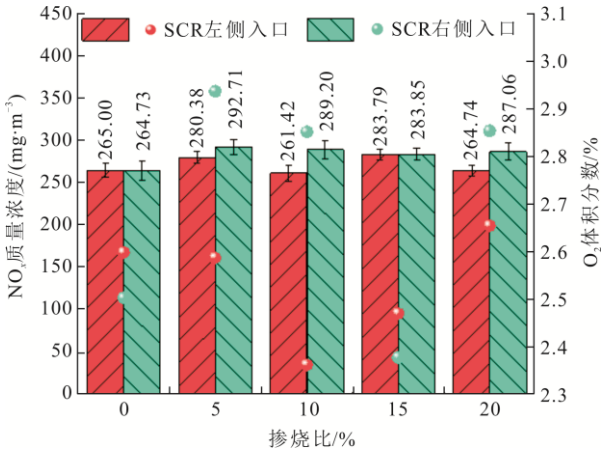


图 11 不同压块牛粪掺烧比例下 SCR 反应器入口 NO_x 质量浓度变化

Fig.11 NO_x mass concentration variation at the SCR reactor inlet under different co-firing ratios of briquetted cow dung

根据生成机理不同，NO_x 被分为燃料型、热力型、快速型 3 种类型[23]。在煤粉炉中，除了局部高温（>1 500 ℃）和缺氧区域外，快速型 NO_x 的生成量通常极少，因此它并不是导致 NO_x 总质量浓度上升的主要原因[24]。燃料型 NO_x 占 NO_x 总量的 60%~80%，其产生与燃料 N 含量及存在形态直接相关[25]。通过原料元素分析发现，牛粪 N 含量高于试验所用煤，牛粪 N 质量分数为 1.37%，煤 N 质量分数为 0.96%，因此掺烧压块牛粪后混合燃料的 N 含量升高。同时，牛粪中 N 主要以蛋白质、氨基酸等有机形态存在，其 C-N 键能更低，更容易生成 NH_3、HCN、NH_i 等燃料型 NO_x 的直接前驱体；试验中掺烧生物质后，总风量增大，使得炉内氧气浓度增加，在氧化性气氛下前驱体进一步转化为燃料型 NO_x。热力型 NO_x 占 NO_x 总量的 10%~20%，其生成速率与炉膛温度呈指数相关。虽然掺烧牛粪会导致炉膛温度略微降低，直接抑制热力型 NO_x 的生成，但燃料型 NO_x 的增加量可能已完全抵消并超过热力型 NO_x 的减少量，最终造成 NO_x 总质量浓度上升。

有研究表明[26]，将生物质由顶层送入炉膛，在还原性气氛下可生成大量 NH_i、CH_i 等活性基团，此类基团能有效将下层燃料产生的 NO_x 还原为 N_2 或 HCN，从而降低 NO_x 质量浓度。实际运行中需通过合理调节配风参数优化燃烧状态，避免系统氧量过剩，借助还原性气氛抑制燃料氮向 NO_x 的转化，最终实现 NO_x 减排。

2.3.2 对 SO_2 排放的影响

生物质具有低硫、高碱的特性[27]。考虑燃料中硫总量对 SO_2 质量浓度的直接影响，以及碱金属对硫的固化作用[28]，掺烧生物质往往会降低 SO_2 质量浓度。不同压块牛粪掺烧比例烟气中 SO_2 变化情况如图 12 所示。纯煤工况，SO_2 平均质量浓度为 2 771.38 mg/m^3。与纯煤工况相比，5%掺烧工况下 SO_2 质量浓度增长最大，为 3 206.62 mg/m^3，增长了 435.24 mg/m^3；10%、15%掺烧工况下，烟气中 SO_2 质量浓度均呈现降低趋势，为 2 675.95~2 763.47 mg/m^3，相较于纯煤工况降幅在 0.29%~3.44%；20%掺烧工况下，SO_2 质量浓度与纯煤工况相近，为 2 803.37 mg/m^3。

试验所用煤和压块牛粪的干燥基硫质量分数分别为 0.46%、0.08%，压块牛粪的掺混会降低混合燃料的硫含量。然而，试验采用单磨掺烧压块牛粪，相较于总燃料量，单磨掺烧压块牛粪的量过少，因此掺烧对 SO_2 质量浓度变化影响较小。而 5%掺烧工况下，SO_2 质量浓度异常增加，其原因可能与当

天煤质变化有关。一方面压块牛粪为低硫燃料，理论上不具备使 SO_2 质量浓度升高的条件；另一方面，在 10%、15%、20%比例掺烧工况下，SO_2 质量浓度均呈现小幅下降或基本不变的趋势，符合理论规律。查阅当天煤质检测数据发现，5%掺烧工况所用煤的干燥基全硫含量为 1.19%，较纯煤工况所用煤硫含量有所升高，进一步验证了煤质波动是造成 SO_2 异常上升的主要原因。

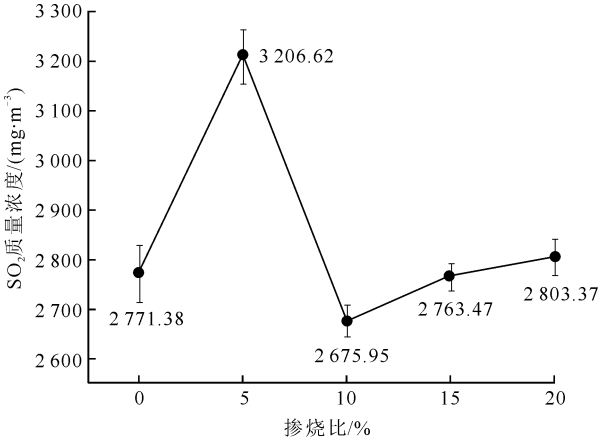


图 12 不同压块牛粪掺烧比例 SO_2 质量浓度变化

Fig.12 SO_2 mass concentration variation under different co-firing ratios of briquetted cow dung

2.4 掺烧对除尘系统的影响

试验所在电厂采用的除尘方式为电袋除尘，其除尘效果依赖于静电除尘段与布袋除尘段的协同作用。因此，研究压块牛粪掺烧对除尘系统的影响，将从静电除尘运行参数和布袋除尘前后压差 2 个方面进行。

不同工况下，静电除尘器一次侧、二次侧的电流、电压变化情况如图 13 所示。由图 13 可见，压块牛粪掺烧后，静电除尘电气参数整体稳定。压块牛粪掺烧对静电除尘一次、二次电流的影响极其微小；相较于纯煤工况，变化幅度分别在–0.05~ –0.02 A、–0.11~0.01 mA。由于掺烧牛粪后，颗粒物中 SiO_2 等高比电阻成分增加（由表 2 灰成分结果可推测），电场阻抗增大，变压器需提高输入电压以维持二次侧电场稳定。因此，一次电压缓慢增加，但整体变化幅度较小，变化幅度在 4.20~8.69 V；二次电压保持小幅波动，变化幅度在 0.11~1.41 kV。整体上来看，压块牛粪掺烧后，静电除尘的电场工况未出现剧烈波动，仍能稳定运行。

布袋除尘部分有 A、B 两侧，每侧均有 2 个通道。对每侧 2 个通道数据取平均，结果如图 14 所示。

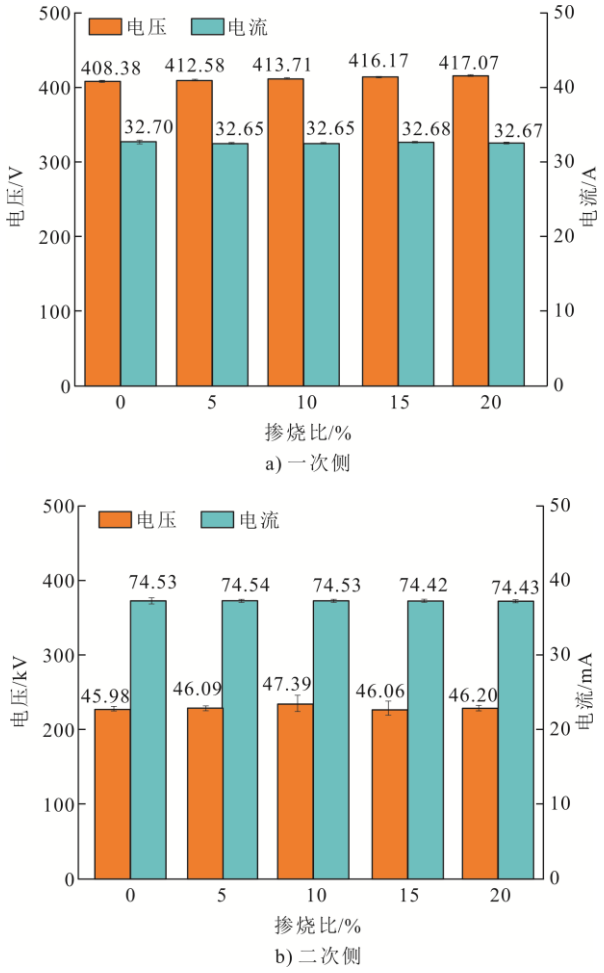


图 13 不同压块牛粪掺烧比例静电除尘电流电压变化

Fig.13 Current and voltage variations of the ESP under different co-firing ratios of briquetted cow dung

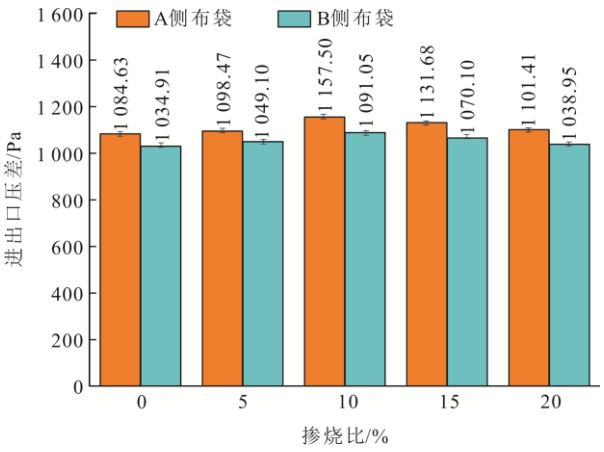


图 14 不同压块牛粪掺烧比例布袋除尘前后压差变化

Fig.14 Differential pressure variation of the baghouse before and after dust removal under different co-firing ratios of briquetted cow dung

纯煤工况，A、B 侧布袋的进出口压差分别为 1 084.63、1 034.91 Pa。压块牛粪掺烧，A、B 两侧布袋前后压差均会增加，但变化幅度较小，分别在

16.78~72.87 Pa、4.04~56.14 Pa。布袋除尘前后压差的变化与粉尘特性、入口烟气特性等因素有关。由于掺烧生物质会对烟气中颗粒物含量、粒径分布产生影响[29]；若烟气中细颗粒物含量更多，则其更易穿透滤布表面形成致密的粉尘层，从而降低透气性，前后压差因此增加[30]。入口烟气特性，如烟气温度也可通过影响滤袋纤维的膨胀程度，改变其孔隙率、透气性，引起前后压差的变化。整体来看，压块牛粪掺烧对布袋除尘的影响并不明显。

2.5 掺烧对机组碳减排的影响

生物质作为碳中性能源，燃烧产生的 CO_2 不计入碳排放总量。将生物质的总热量折算为标煤的质量，再结合单位质量标准煤的碳排放因子，即可获得掺烧牛粪的碳减排总量。具体公式如下：

$$Q_{CO_2} = M_{cow} \times \frac{Q_{net,ar,cow}}{Q_{net,ar,sc}} \times F_{sc} \tag{2}$$

式中：Q_{CO_2} 为压块牛粪掺烧的 CO_2 总减排量，t；M_{cow} 为掺烧压块牛粪的总消耗量，t；$Q_{net,ar,cow}$ 为压块牛粪收到基低位发热量，MJ/kg；$Q_{net,ar,sc}$ 为标准煤热量，取定值 29.27 MJ/kg；F_{sc} 为单位质量标准煤的 CO_2 排放因子，取为 2.66 t CO_2/t 标煤。

该电厂 2024 年 2 号机组运行时长为 6 253 h，计算单磨掺烧不同比例压块牛粪碳减排量如表 3 所示。以 350 MW 满负荷运行，5%、10%、15%、20%单磨掺烧工况下，年碳减排总量分别为 16 109、32 218、48 327、64 436 t。

表 3 不同压块牛粪掺烧比例年度碳减排总量变化
Tab.3 Annual total carbon emission reduction variation under different co-firing ratios of briquetted cow dung

单磨掺烧比例/%	年运行时长/h	单磨燃料总量/(t·h^{-1})	年度碳减排总量/t
5	6 253	50	16 109
10	6 253	50	32 218
15	6 253	50	48 327
20	6 253	50	64 436

3 结　论

本次试验在内蒙古某电厂 2×350 MW 超临界机组锅炉开展。基于电厂原有制粉输送设备，采用“单磨掺烧”技术，在 5%、10%、15%、20% 4 个掺烧比例工况下，分析了掺烧压块牛粪对制粉系统、锅炉燃烧特性、污染物排放特性等的影响，主要结论如下。

1）对于磨煤机电流而言，掺烧比例在 15%以下时，磨煤机电流较为稳定，变化幅度为–0.21~2.12 A，而 20%掺烧工况下，电流变化幅度达 3.96 A；对于磨煤机前后压差而言，掺烧比例在 5%~15%时，磨煤机前后压差稳定在 3.7 kPa，较纯煤工况变化 0.1 kPa 左右，掺烧比例为 20%，磨煤机前后压差变化较明显，变化了 0.6 kPa；随着压块牛粪的掺入，磨煤机制粉能力变弱，当掺烧比例超过 10%，R_{90}、R_{200} 指标持续增加，最大增量分别为 6.53%、1.95%。

2）掺烧压块牛粪后，锅炉燃烧状况良好。炉膛温度、排烟温度的变化较小；CO 质量浓度稳定在 60 mg/m^3 附近，表明掺烧后锅炉运行稳定、燃烧状况良好；灰中含碳量增加，渣中含碳量降低，总体变化较小；锅炉效率略微下降，保持在 93.04%~93.28%，掺烧对锅炉效率无明显影响。

3）掺烧压块牛粪对污染物排放及除尘系统的影响较小。未掺烧前，NO_x、SO_2 质量浓度为 264.86、2 771.38 mg/m^3。掺烧后，NO_x 略微上升（增幅为 3.94%~8.19%），SO_2 基本不变。掺烧前后，电袋除尘参数较为稳定，一次电流、二次电流的变化幅度分别为–0.05~–0.02 A、–0.11~0.01 mA，一次电压、二次电压的变化幅度分别为 4.20~8.69 V、0.11~1.41 kV；布袋除尘前后压差未出现明显变化，最大增量为 72.87 Pa。

4）综合考虑制粉系统运行安全、燃料燃尽特性与不同煤种机组的工程普适性，单磨掺烧压块牛粪时，掺烧比例应控制在 10%以下，对燃用高挥发分烟煤的机组可放宽到 15%以下。

5）单磨掺烧 5%、10%、15%、20%压块牛粪，机组年碳减排量分别为 16 109、32 218、48 327、64 436 t。

[参 考 文 献]

[1] World Meteorological Organization. State of the global climate 2024[R]. Geneva: WMO, 2025: 17.

[2] 李政, 李伟起, 张忠伟, 等. “双碳”目标下我国电力系统灵活性资源发展策略研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 108.
Li Z, Li W Q, Zhang Z W, et al. Development strategy of flexible resources in China’s power system under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 108.

[3] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806.
Zhang Z G, Kang C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806.

[4] 国家能源局. 生物质能发展“十三五”规划[R/OL]. 2017-08-09 https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/

201708/t20170809_1196882.html.
National Energy Administration. 13th five-year plan for biomass energy development[R/OL]. 2017-08-09. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/201708/t20170809_1196882.html.

[5] 毛健雄, 郭慧娜, 吴玉新. 中国煤电低碳转型之路: 国外生物质发电政策/技术综述及启示[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 1.
Mao J X, Guo H N, Wu Y X. Road to low-carbon transformation of coal power in China: a review of biomass co-firing policies and technologies for coal power abroad and its inspiration on biomass utilization[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 1.

[6] 于伟静, 杨鹏威, 王放放, 等. 双碳战略背景下中国煤电技术发展与挑战[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2641.
Yu W J, Yang P W, Wang F F, et al. Research and challenge of coal power technology development in China under the background of dual carbon strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2641.

[7] 刘光鹏, 曾洁, 冉燊铭, 等. 煤粉锅炉大比例直燃耦合生物质的影响研究及工程应用[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(增刊 2): 237.
Liu G P, Zeng J, Ran S M, et al. Research and engineering application on the influence of large-scale direct coupled biomass in pulverized coal boiler[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(S2): 237.

[8] 郎范玲, 蒲建业, 邹天舒. 600 MW 燃煤机组锅炉低负荷掺烧生物质颗粒试验研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(增刊 2): 1166.
Lang F L, Pu J Y, Zou T S. Experimental study on biomass pellet co-firing in a coal-fired boiler of 600 MW unit[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S2): 1166.

[9] 郭幸超, 董帅, 苏国新, 等. 1 000 MW 燃煤机组掺烧沙柳成型燃料制粉和燃尽特性[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(5): 29.
Guo X C, Dong S, Su G X, et al. Milling and burnout characteristics of co-firing Salix pellets in a 1 000 MW coal-fired power plant[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(5): 29.

[10] 孟晓超, 李源, 张中洲, 等. 600 MW 燃煤机组直接掺烧生物质实验研究[J/OL]. 发电技术, 2025-07-24, https://link.cnki.net/urlid/33.1405.TK.20250723.1657.002.
Meng X C, Li Y, Zhang Z Z, et al. Experimental study on direct co-firing of biomass in a 600 MW coal-fired unit[J/OL]. Power Generation Technology, 2025-07-24, https://link.cnki.net/urlid/33.1405.TK.20250723.1657.002.

[11] 游洋, 吴波, 胡国全, 等. 牛粪生物质资源综合利用研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(2): 401.
You Y, Wu B, Hu G Q, et al. Research progress of the comprehensive utilization of cow dung biomass resources[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2018, 24(2): 401.

[12] 孔源, 韩鲁佳. 我国畜牧业粪便废弃物的污染及其治理对策的探讨[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(6): 92.
Kong Y, Han L J. Environmental contamination from animal faeces in China and control countermeasures[J]. Journal of China Agricultural University, 2002, 7(6): 92.

[13] 国辉, 袁红莉, 耿兵, 等. 牛粪便资源化利用的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(5): 68.
Guo H, Yuan H L, Geng B, et al. Research progress in resource utilization of cattle manure[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(5): 68.

[14] 张文成. 燃煤机组中新型生物质牛粪直燃技术的效益与关键技术研究[J]. 能源科技, 2025, 23(3): 36.
Zhang W C. Research on benefits and critical technologies of novel biomass cattle dung direct co-firing in coal-fired units[J]. Energy Science and Technology, 2025, 23(3): 36.

[15] 卫翔, 潘腾, 田亚钊, 等. 660 MW 燃煤机组直接掺烧生物质牛粪试验[J]. 热力发电, 2025, 54(9): 71.
Wei X, Pan T, Tian Y Z, et al. Experimental study on direct co-combustion of biomass cow manure in a 660 MW coal-fired unit[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(9): 71.

[16] 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.

[17] Sher F, Yaqoob A, Saeed F, et al. Torrefied biomass fuels as a renewable alternative to coal in co-firing for power generation[J]. Energy, 2020, 209: 118444.

[18] Wielgosiński G, Łechtańska P, Namiecińska O. Emission of some pollutants from biomass combustion in comparison to hard coal combustion[J]. Journal of the Energy Institute, 2017, 90(5): 787.

[19] Sung Y, Moon C, Eom S, et al. Coal-particle size effects on NO reduction and burnout characteristics with air-staged combustion in a pulverized coal-fired furnace[J]. Fuel, 2016, 182: 558.

[20] Ma M, Bai Y H, Song X D, et al. Investigation into the co-pyrolysis behaviors of cow manure and coal blending by TG–MS[J]. Science of the Total Environment, 2020, 728: 138828.

[21] 陈鑫科, 马启磊, 方庆艳, 等. 混煤燃烧中的交互作用: 掺烧方式和配风对着火和燃尽特性的影响[J]. 动力工程学报, 2019, 39(7): 524.
Chen X K, Ma Q L, Fang Q Y, et al. Interaction in blended coal combustion process: effects of coal blend way and air distribution mode on ignition and burnout characteristics of the blended coal[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(7): 524.

[22] 孙学信. 燃煤锅炉燃烧试验技术与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 78.
Sun X X. Technology and method of combustion test for coal-fired boilers[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 78.

[23] 钟北京, 张怀山, 傅维标. 煤焦燃烧 NO 释放规律研究[J]. 燃烧科学与技术, 2000, 6(1): 28.
Zhong B J, Zhang H S, Fu W B. Study on NO release from a char combustion[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2000, 6(1): 28.

[24] 杨富鑫, 赵旭, 谭厚章, 等. 660 MW 燃煤机组直接掺烧沙柳颗粒试验研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(6): 3161.
Yang F X, Zhao X, Tan H Z, et al. Experimental study on the effect of direct co-firing *Salix psammophila* pellets in a 660 MW coal-fired power plant[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(6): 3161.

[25] Miller J A, Bowman C T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1989, 15(4): 287.

[26] 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.
Tan H Z, Yang F X, Ruan R H, et al. Study on influence of biomass co-firing on a 660 MW pulverized coal-fired boiler[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(4): 23.

[27] 周义, 张守玉, 郎森, 等. 煤粉炉掺烧生物质发电技术

研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(6): 26.
Zhou Y, Zhang S Y, Lang S, et al. Research progress of biomass blending technology in pulverized coal furnace for power generation[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(6): 26.

[28] 郭慧娜, 吴玉新, 王学斌, 等. 燃煤机组耦合农林生物质发电技术现状及展望[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 12.
Guo H N, Wu Y X, Wang X B, et al. Current status of power generation technology of the agriculture and forest biomass co-firing in coal-fired power plants[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 12.

[29] Fei L Z, Zhao B T, Liu J J, et al. Emission characteristics and formation mechanisms of $PM_{2.5}$ from co-firing of algal biomass and coal[J]. Journal of the Energy Institute, 2018, 98: 354.

[30] 吕超, 柳静献. 高炉除尘灰细微颗粒物单/双预荷电强化滤袋过滤特性[J]. 环境工程学报, 2023, 17(1): 180.
LüC, Liu J X. Unipolar/bipolar pre-charging enhanced the filtration performance of bag filter for fine particulate matter from blast furnace dust[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(1): 180.

（责任编辑　杨嘉蕾）