动态颗粒间距下焦炭辅助劣质烟煤微波点火行为

邹 鹏^{1,2},薛乃源¹,周 伟¹,李俊峰¹,高继慧¹,赵广播¹

(1. 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 烟台龙源电力技术股份有限公司, 山东烟台 264006)

摘 要:在我国电力系统中,以劣质烟煤、焦炭为代表的低挥发分煤产量巨大,但低挥发分特性限制了其在燃煤发电中的应用。微波技术已被证明能够通过其独特的非接触式加热方式以及等离子体效应高效快速地实现电磁能向热能转化,并实现额外挥发分的原位生成。然而,目前很少有研究将这种微波增强效应应用于劣质烟煤、焦炭等低挥发分碳基燃料的点火过程。为此,以劣质烟煤及其煤焦为代表,在单模态微波反应器中进行焦炭辅助劣质烟煤微波点火试验。对样品在反应过程中的微波吸收情况、温度变化情况、放电情况,以及反应各阶段残炭的结构、理化性质进行表征和分析,以探究微波与炭颗粒间的相互作用对焦/煤微波点火过程的强化规律。研究发现点火前期(煤样加热阶段)煤样温升主要依赖于样品在小流量(0.25 L/min)下的热量累积;中后期(挥发分-焦炭共燃阶段、焦炭燃烧阶段)可以观察到明显的炭颗粒间放电现象,由此引发的多点局域燃烧会形成多个"火核"强化燃烧,大流量(0.75 L/min)下强化效果更明显。在微波热效应及电效应共同作用下,煤样的石墨化度先上升后下降,吸波及热转化能力随之先升高后降低;煤样表面裂纹不断增多加深,析出的灰分先形成一层灰壳阻碍氧分子扩散,后发生岛状聚集使炭表面重新暴霉。综合来看,少量的焦炭掺混(焦炭掺混比为 25%)对劣质烟煤的吸波能力及点火效果具有显著提升,煤样在挥发分-焦炭共燃阶段中期时具有最佳的燃烧反应性,可以脱离微波作用区域,进行自持燃烧。

关键词: 微波; 等离子体; 点火; 劣质烟煤; 燃烧; 焦炭 中图分类号: TQ534 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)05-2704-18

Study on microwave ignition behavior of inferior bituminous coal assisted by coke under dynamic particle spacing

ZOU Peng^{1, 2}, XUE Naiyuan¹, ZHOU Wei¹, LI Junfeng¹, GAO Jihui¹, ZHAO Guangbo¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
 2. Yantai Longyuan Electric Power Technology Co., Ltd., Yantai 264006, China)

Abstract: In China's power system, low-volatile coals represented by inferior bituminous coal and coke exhibit significant production output, yet their application in coal-fired power generation is constrained by their low-volatile characteristics. Microwave technology has been demonstrated to efficiently convert electromagnetic energy to thermal energy through its unique non-contact heating method and plasma effect, facilitating in-situ generation of additional volatiles. However, there is limited research applying this microwave enhancement effect to the ignition process of low-volatile carbonaceous fuels such as inferior bituminous coal and coke. Therefore, this study focuses on inferior bituminous coal and its coke,

ZOU Peng, XUE Naiyuan, ZHOU Wei, et al. Study on microwave ignition behavior of inferior bituminous coal assisted by coke under dynamic particle spacing[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2704–2721.



移动阅读

收稿日期: 2024-04-09 **策划编辑**: 韩晋平 **责任编辑**: 刘雅清 **DOI**: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0379 **基金项目**: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点资助项目 (U21A2062) **作者简介**: 邹 鹏 (1988—), 男, 山东高唐人, 博士研究生。E-mail: 350156531@qq.com

通讯作者:周 伟 (1991—), 男, 山西运城人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: hitzhouw@hit.edu.cn

引用格式:邹鹏,薛乃源,周伟,等.动态颗粒间距下焦炭辅助劣质烟煤微波点火行为[J].煤炭学报,2025,50(5): 2704-2721.

conducting microwave-assisted ignition experiments in a single-mode microwave reactor. Characterization and analysis of microwave absorption, temperature variations, discharge phenomena during reaction stages, and the structure and physicochemical properties of residual char are performed to investigate the enhancement mechanisms of microwave interactions with carbonaceous particles in the microwave ignition process. The study finds that during the early ignition stage (coal sample heating phase), coal temperature rise depends mainly on heat accumulation under low flow rates (0.25 L/min). In the mid-to-late stages (co-combustion of volatiles and coke, coke combustion stage), significant interparticle discharge phenomena are observed, leading to localized multi-point combustion enhancing effects, particularly noticeable at higher flow rates (0.75 L/min). Under combined microwave thermal and electric effects, the graphitization degree of the coal sample initially increases and then decreases, while its absorption and thermal conversion capabilities first rise and then decline. Surface cracking of the coal sample intensifies, with initial ash formation creating a hindering ash shell to impede oxygen diffusion, followed by island-like aggregation exposing the coal surface again. Overall, a small amount of coke blending (25% coke blending ratio) significantly enhances microwave absorption capability and ignition efficiency of inferior bituminous coal. The coal sample exhibits optimal combustion reactivity during the mid-stage of volatile-coke co-combustion, enabling sustained combustion independent of the microwave action zone.

Key words: microwave; plasma; ignition; inferior bituminous coal; combustion; coke

0 引 言

煤炭是我国经济社会发展所依赖的主要能源, 2020 年煤炭在我国一次能源消费中的占比达 56.8%^[1]。 "双碳"战略背景下,其比例虽会不断下降,但煤炭在 我国能源结构中仍将占据非常重要的战略地位。近 年全球能源需求持续增长^[2],可再生能源建设过程逐 步放缓,人们认识到包括煤炭在内的化石燃料将继续 在能源安全保障和可再生能源消纳方面发挥重要作 用。目前,直接燃烧仍是煤炭的主要利用方式。

我国常规锅炉点火多采用喷油点火的方式,存在 启动次数多、耗油量高等问题^[3-8]。无论是从"双碳" 战略的必要要求还是从企业经济效益的角度考虑,运 用等离子体点火技术等新型节油点火技术对现有锅 炉进行改造,实现锅炉启动降频及低负荷稳燃,具有 重要意义。

煤种适用性差是等离子体点火技术推广的主要 技术瓶颈。目前电弧等离子体点火技术实现了收到 基挥发分含量 V_{ar} ≥ 18% 的优质烟煤及褐煤的直接 点火^[9-12]。然而对于 V_{ar} ≤ 12% 的劣质烟煤,在工业 上仍难以实现等离子体点火^[13-14];对于贫煤,还需要 增加电极功率^[15-16]或补充氧气^[17]。在我国电力系统 中,以劣质烟煤为代表的低挥发分煤占比高达 25%^[18]。 同时,煤热解半焦^[19]作为煤化工过程的一种副产品, 产量巨大,在工业应用中面临巨大挑战。尽管半焦的 热值高于原煤^[20],但低挥发分特性限制了其在燃煤发 电中的应用。因此,实现劣质烟煤无油点火是等离子 体点火进一步推广应用的关键。

微波加热是一种具有选择性、非接触式以及快速

响应等优点的加热方式,被广泛应用于煤或焦炭等碳 基原料的处理中^[21-24]。此外,在微波辐照下,碳颗粒 间会产生细小的火花状或电弧状放电,通常被称为局 部等离子体或微等离子体^[25-26]。这种由场增强效应 引发的反应强化现象已被证明可以优化反应路径,实 现微波能量的高效利用,因此被广泛应用于污染物处 理^[27]、煤气化^[28]、煤热解^[29]以及材料合成等领域^[30]。 然而,目前很少有研究将这种微波增强效应应用于煤、 焦炭等固体燃料的点火过程^[31]。

在气体燃料燃烧领域, 微波点火技术被认为是一种有规模应用前景的点火方法^[32]。该技术可同时在 多个区域激发放电等离子体^[33], 从而提高燃烧速度^[34], 并在稀薄条件下获得高燃烧效率^[35]。类似地, 对于难 点燃的劣质烟煤, 可通过在劣质烟煤中外加焦炭强化 微波加热及放电过程, 实现煤颗粒间放电, 并向相邻 的固体颗粒提供热量^[36]。放电过程产生的等离子体 还有望实现煤的原位裂解及额外挥发分的产生^[37], 进 而在达到着火温度时形成相对分散的小"火核", 实现 对劣质烟煤等低挥发分煤的高效快速点火。

在实际锅炉燃烧过程中,为实现更充分地气固接 触及物料连续供给,煤粉通常是通过一次风快速喷入 锅炉炉膛,颗粒间距呈现动态变化特征,这对点火过 程是促进还是抑制关键在于对新热点的构建速度是 否能超过对原有热点的破坏速度。为证明动态颗粒 间距下炭颗粒间电场增强效应对焦/煤微波点火过程 的强化作用,笔者在研究组前期固定床微波点火试验 研究的基础上^[37],首先对动态颗粒间距下焦/煤微波点 火过程进行研究,系统分析了不同空气流量、微波功 率和煤焦掺混比等关键因素对焦/煤点火过程的影响, 并通过评价不同微波点火阶段残炭的燃烧反应性,探 究了最佳微波作用时间。随后通过表征不同阶段煤 样的石墨化度、灰分以及表观形貌,总结了微波点火 过程中劣质烟煤结构及理化性质的演变规律,提出了 微波场与炭颗粒相互作用机理及其对点火过程的强 化机制。本文旨在验证将焦炭作为微波吸收剂与劣 质烟煤等低挥发分煤混合进而实现二者的高效快速 点火的可行性,为未来以煤(特别是低挥发分煤)为燃 料的点火系统提供技术参考。

1 试 验

1.1 试验原料

为确保均匀性,将煤粉研磨并筛成直径在 40~ 60目 (0.2~0.4 mm)的颗粒。煤样的工业分析及元素 分析结果见表 1。焦炭由该劣质烟煤碳化制备。制备 条件:在氮气气氛下,以 10 ℃/min 的升温速率升温至 900 ℃,保持 2 h,再以 10 ℃/min 降温至 200 ℃,后随 炉冷却。焦样的工业分析及元素分析结果见表 2。

表1 煤样的工业分析及元素分析

Table 1 Proximate and elemental analysis of coal samples

工业分析/%				元素分析/%					
$M_{\rm ad}$	$A_{\rm ad}$	V _{ad}	$C_{\rm ad}$	N _{daf}	C _{daf}	$\mathrm{H}_{\mathrm{daf}}$	S _{daf}	O _{daf} *	
3.77	36.72	9.47	50.04	0.82	60.52	2.541	2.848	33.271	

注:*通过差减法计算。

表 2 焦样的工业分析及元素分析 Table 2 Proximate and elemental analysis of coke samples

工业分析/%				元素分析/%				
$M_{\rm ad}$	$A_{\rm ad}$	$V_{\rm ad}$	$C_{\rm ad}$	N _{daf}	$\mathrm{C}_{\mathrm{daf}}$	$\mathrm{H}_{\mathrm{daf}}$	S _{daf}	$\mathrm{O}_{\mathrm{daf}}^{*}$
7.37	6.01	27.02	59.60	0.74	76.79	1.171	2.280	19.019

注:*通过差减法计算。

微波功率计

1.2 试验系统及测试方法

图 1 展示了微波放电强化焦/煤点火试验台及其 表征系统。该系统由单模态微波反应器 (ZDM-3)、微 波功率计 (AV2438CB)、用于测量石英玻璃表面温度 的红外传感器 (IR)、石英反应器、放电特性评价单元 等组成。将总质量为 1 g, 粒径 40~60 目 (0.2~0.4 mm) 的劣质烟煤、焦炭按不同比例混合均匀后置于石英反 应器中,分别在不同空气流量、微波输入功率下进行 微波点火。

石英反应器示意如图 1 所示,其内径为 10 mm, 采用耐高温的石英玻璃制成,以最小化微波能量的损 失。石英反应器中部为烧结的石英砂芯用于承载煤 样,上方环状突起卡在单模反应腔上截止波导的出口, 起定位作用。环状突起距烧结石英砂芯距离为 150 mm,使单模反应腔前截止波导(前视窗)略高于 砂芯。从微波功率计可以获取正向功率和反射功率, 以评估不同样品的微波吸收特性。由于磁控管效率 以及阻抗匹配等问题,实际微波输入功率约为设定功 率的 50%。

放电特性评价单元 (图 2) 用于研究不同放电强度 变化规律及其对焦/煤点火过程的影响。使用光纤光 谱仪 (FX2000) 在 290~900 nm 范围内获得放电的发 光光谱,采样时间为 100 ms。为了阐明微波等离子体 的存在和分布规律,使用工业摄像机 (Hikrobot MV-CE200-11UM) 获取图像,曝光时间为 1 000 μs,每 0.8 s 采集 1 张图像,在减去背景光的情况下,获得亮度分 布并进行比较。

1.3 不同点火阶段劣质烟煤的制备及表征

将1g 焦炭掺混比为25%的煤样(0.75g 劣质烟 煤+0.25g 焦炭)置于石英反应器中并通入流量为 0.5 L/min空气,在500W 微波功率下处理0~5 min。 为区分样品中的焦炭及劣质烟煤,采用小粒径(40~



图 1 微波放电强化焦/煤点火试验台及其表征系统

Fig.1 Microwave discharge enhanced coke/coal ignition experimental platform and its characterization system





60 目,约 0.2~0.4 mm) 焦炭与大粒径 (20~40 目,约 0.4~0.8 mm) 劣质烟煤掺混,并在反应后用 40 目 (约 0.4 mm) 筛网筛分样品,即可得到不同点火阶段的劣质烟煤。

使用热分析仪 (STA449F3) 研究不同点火阶段劣 质烟煤的燃烧反应性。试验步骤如下:将装有 (20± 0.2 mg) 样品的陶瓷坩埚放入热重分析仪的炉中。在 空气气氛下以 20 °C/min 的加热速率上升到 900 °C。 从热失重曲线可以推导出燃烧特性参数,包括点火温 度 T_i 、燃尽温度 T_b 、最大燃烧速率 R_{max} 和平均燃烧速 率 R_{mean} 。不同点火阶段劣质烟煤的燃烧反应性由式 (1) 中定义的综合燃烧特性指数 S 表征,该指数结合了 炭的点火、燃烧和燃尽特性^[38]。

$$S = \frac{R_{\max}R_{\text{mean}}}{T_{i}^{2}T_{b}}$$
(1)

使用拉曼光谱仪和 X 射线衍射 (XRD, PANalytical Empyrean) 表征点火过程中劣质烟煤石墨化度及 灰分成分的演化过程。使用比表面积和孔隙率分析 仪 (3H2000PS), 在 77 K 下测定了残炭的氦吸附等温 线, 研究点火过程中劣质烟煤的孔结构特征演变。通 过 Brunauer-Emmett-Teller(BET) 方程计算 BET 比表 面积,用 Barrett-Johner-Halenda(BJH) 方程计算了残炭 的比表面积及孔体积。使用扫描电子显微镜 (SEM, JSM-7401F) 表征点火过程中劣质烟煤形貌的演化过 程,并使用能量色散光谱仪 (EDX) 对特征区域的元素 含量进行测量。

2 结果与讨论

2.1 焦炭-劣质烟煤微波点火规律及影响因素

2.1.1 气体流量对样品床层高度的影响

首先在冷态下进行了石英反应器内的流化试验, 以确定气体流量对样品床层高度的影响。将1g煤焦 掺混比为1:1的煤样置于石英反应器内,床层静止 高度约为 1.9 cm。从下方通入流量为 0~1.25 L/min 的空气,试验过程通过录像方式记录,并随机统计5 个时刻的床层高度来表征其变化幅度,结果如图3所 示。流量为 0.25 L/min 时, 床层高度达到 2.5 cm, 样品 上层颗粒开始流化,中下层颗粒处于静止状态;流量为 0.5 L/min 时, 床层高度达到 3.00 cm, 底部仍有部分颗 粒未完全流化;流量为 0.75 L/min 时,床层高度达到 3.50 cm, 样品已完全流化。随着气体流量的进一步提 升,床层高度不断上升,当流量大于1L/min后有小粒 径焦炭飞出反应器。在后续微波加热及燃烧过程中, 由于高温导致的气体体积膨胀和放电反应带来的气 压突变,在相同输入气体流量下,焦炭颗粒的流化状 态会进一步提升。

2.1.2 气体流量对微波点火过程的影响

根据冷态流化试验,空气流量从 0.25 L/min 逐渐



图 3 不同流量下的冷态流化试验

Fig.3 Experimental investigation of cold-state fluidization at various flow rates

增大至 0.75 L/min 可以实现煤样从固定床到不同流 化状态的转变,同时又可以尽量避免煤粉飞出反应器。 因此将 1g煤焦掺混比为 1:1 的煤样在 500 W 微波 功率下,分别通入 0.25、0.5、0.75 L/min 空气处理 5 min 以探究了气体流量对微波点火过程的影响。

图 4a 记录了流量为 0.5 L/min 时样品微波点火过 程中的典型时刻。由图可见,整个点火过程可大致分 为3个阶段,这与研究组前期进行的固定床微波点火 过程相吻合^[37]。阶段 1(0~118 s) 为煤样加热阶段。 主要表现为逐渐增强的微小火花放电,以及偶尔出现 的剧烈放电(86.7 s)。可以观察到,随着放电增强以及 整体样品整体温度的升高,放电点周围出现局部燃烧 并快速消失。这是由于放电点温度较高(>800℃) 引燃了附近炭颗粒,但由于炭颗粒整体温度较低,挥 发分析出较少,燃烧过程放热量小于散热量,燃烧难 以维持。阶段 2(118~200 s) 为挥发分-焦炭共燃阶段。 随着样品整体温度的升高,底部首先出现稳定燃烧, 并逐渐向上沿伸至所有样品。通过上一节冷态流化 试验可知,反应器底部炭颗粒在较低流量下未流化, 与气体的换热面积更小,进而更容易累积热量,达到 燃烧温度。在燃烧过程中,仍可以看到颗粒间的微小 火花放电 (图 4b), 且放电变得更加频繁, 由于焦炭整 体温度的提高,放电引发的局域燃烧维持时间也更长。 阶段 3(>200 s) 为焦炭燃烧阶段。此时样品中的挥发 分已基本释放完全,而样品燃烧过程也未产生新的可 燃性气体,故主要为焦炭燃烧。与阶段2类似,焦炭 燃烧的过程依然是从反应器底部逐渐发展至所有样

品。此时煤样上层出现稳定的电弧放电,而焦炭本身 温度也足够高,放电点附近引燃的焦炭可以形成较为 稳定的局域燃烧,形成多个"火核",强化焦炭微波点 火及燃烧。

图 5、图 6 分别展示了样品在流量为 0.25 L/min 及 0.75 L/min 时样品微波点火过程中的典型时刻。 值得注意的是,当流量为 0.25 L/min 时,与流量为 0.5 L/min 时不同,燃烧的第 2 阶段火焰只出现在下层区域,直到第 3 阶段才扩散到上层样品区域。当流量为 0.75 L/min 时,可以看到比其他流量下更频繁的剧烈 放电现象,证明此流量相较于 0.5 L/min 更有利于微 波放电的发生。

进一步地,不同流量下样品的温升及微波吸收情况如图 7 所示。其中吸波效率的变化规律是基本一致的:第1阶段,吸波效率逐渐从 50% 上升至 60%,并在第1阶段结束、第2阶段开始时快速上升后又快速下降并保持稳定或缓慢下降。PENG 等^[39]将其归因于挥发物的释放对样品介电性能的影响(图 7f)。在第2阶段末期吸波效率出现了显著下降并在第3阶段保持稳定或缓慢下降,这是由于稳定的电弧放电具有类似金属的特征^[36],对电磁波衰减严重,降低了煤样的实际吸波量。

分析不同流量下样品在各燃烧阶段的温升曲线 及持续时间(图 7a—图 7d)发现,第1、2阶段结束时 石英管壁温度大致相同:第1阶段结束时约为650℃, 第2阶段结束时约为810℃。值得注意的是,流量为 0.25 L/min 时燃烧的1、2阶段持续时间明显更短,即



(a)反应过程中的典型时刻

(b) 162.5 s时微小火花放电图像

注: ×100, ×10 表示对虚线框内图片亮度放大 100 倍、10 倍以便于观察,以下同。

图 4 流量为 0.5 L/min 时微波点火过程

Fig.4 Microwave ignition process at a flow rate of 0.5 L/min



图 5 流量为 0.25 L/min 时微波点火过程典型时刻 Fig.5 Microwave ignition process at a flow rate of 0.25 L/min: Typical moment



图 6 流量为 0.75 L/min 时微波点火过程典型时刻 Fig.6 Microwave ignition process at a flow rate of 0.75 L/min: Typical moment

升温速率明显高于更高流量。结合上文点火过程图像可以得出结论:在升温阶段(阶段1)以及挥发分、 焦炭共燃阶段(阶段2),热量累积是影响点火速率的 重要因素,流化状态的增强会强化对流换热过程,导 致散热损失增加,从而削弱热量累积,阻碍燃烧过程。 此外,流量为0.25 L/min及0.5 L/min条件下样品从 第2阶段进入第3阶段的过程中温度下降并逐渐回 升,这可能是由于挥发分已基本析出完成,然而焦炭 仍未完全燃烧,导致放热量短暂小于吸热量。分析流 量为 0.75 L/min 时样品的温升情况发现,在 200 s 前 后,石英管管壁温度骤升约 160 ℃,超出红外测温仪 测量上限。推测可能是由于红外测温点附近恰好发 生放电,产生大量热量,导致石英管壁温度急剧增加。 而到 250 s 左右放电结束后,石英管管壁温度逐渐降

图 7 不同流量下样品微波加热过程温升特性及吸波情况

Fig.7 Microwave heating process characteristics and absorption behavior of samples at different flow rates

低。这一现象说明微波诱导焦炭放电确实可产生局 部高温热点,且这些高温热点的温度至少比其他位置 高 160 ℃。同时,这些由放电产生的局部热点,升温 响应极快,可能是放电瞬间的大电流产生了可观的焦 耳热^[40]所致。

时间/s

(e) 不同流量下煤样实际微波吸收量及终温

此外,对比样品在不同流量下 5 min 内的总吸波 量及终温 (图 7e)发现,流量为 0.75 L/min 工况相较于 流量为 0.25 L/min 工况,实际微波吸收能量仅增加了 约 4.1%,但其终温却提升了约 16.4%。证明一定程度 的颗粒流态化更利于微波诱导焦炭放电的发生,而剧 烈放电这一能量转化形式可以快速提升样品温度,进 而抵消因气体流量上升而带来的散热量增加。可能 是由于一定程度的颗粒流态化进一步强化了焦炭颗 粒周围的电场增强效果,达到气体击穿场强 (10⁶ V/m) 的同时,也导致样品电导率指数型增加^[41-42],进而通 过影响介电损耗因子,快速提升材料的微波吸收热转 化能力。

温度/℃

(f) 煤样介电性能随微波加热温度变化情况[39]

不同流量下反应过程中的发射光谱如图 8 所示。 结合工业相机图像 (图 4—图 6)发现,尽管在微波辐 照前期也有局部放电产生,但由于光纤光谱仪探头视 野较窄、且存在强度阈值,故仅当出现大范围放电时 才会被记录。整体来看,出现高强度放电的区域主要 集中在 350~450 nm 和 550~800 nm 两个波段, 研究 者将其归因于空气电离过程发射的光谱。随着流量 的增大,放电强度以及高强度放电的频次都逐渐增加, 因此焦炭颗粒一定程度的流态化有利于微波放电 现象的发生。在 350~450 nm 波段 (图 8d-图 8f), 386 nm 附近谱峰代表激发态 O₂(a¹Δ_g-C³Δ_u)^[43], 388 nm 附近谱峰代表了 CO2^{+[44]}或 CN^[45], 357 nm 和 375 nm 附近谱峰分别代表了 CO₂ (v₃~v₁₆) 和 CO₂ (v₆~v₁₉) 振动激发态[40]。这些激发态粒子和活性基团的存 在可能对焦/煤混合物火焰燃烧起到促进作用。在 550~800 nm 波段 (图 8g-图 8i), 流量为 0.5 L/min、 0.75 L/min条件下当点火过程发展到第3阶段时出现 明显的黑体辐射特征,且在 590、680、780 nm 三个波 段附近出现高强度特征峰,前期放电区域也显著增强。

高强度的发射光谱特征谱线意味的剧烈放电过程以 及厘米级等离子体的形成,燃烧过程中形成的火焰 本就是一种弱电离的等离子体,典型离子密度约在 10¹⁰ cm⁻³ 以上^[47]。因此,与单纯的空气气氛相比,火 焰空间更容易引发放电击穿。

2.1.3 微波功率对微波点火过程的影响

将1g煤焦掺混比为1:1的煤样置于石英容器中, 通入0.5 L/min空气流量分别在不同微波功率下(300、400、500、600、700 W)处理5 min以探究微波功率对微波点火过程的影响。煤样温升曲线及发射光谱图如图9所示。在微波加热阶段, 样品温度均呈现上升趋势, 且温升速率随微波功率的增加而提升。在随后的燃烧阶段, 可以看出功率为300、400 W 时样品的温度呈先上升后平衡的特征。进一步提高微波功率, 会发现温度变化趋势变得复杂。通过观察燃烧阶段样品图像(图9b—图9f)以及发射光谱图(图9g—



Fig.8 Different flow rates under sample microwave heating process spectra

图 9k) 可知, 微波功率为 300 W 时, 样品没有发生明显的燃烧、放电现象。微波功率为 400 W 时, 光谱图中除了黑体辐射特征外, 没有明显的峰值出现, 证明在该功率下样品仅发生了燃烧, 没有明显的放电现象。 当微波功率大于 500 W 时, 样品才开始出现明显的放 电现象。由于红外测温仪工作波长为 8~14 μm, 无法透过石英管壁, 测试温度为石英反应器外壁温度, 而 非反应器内部样品温度。因此与上一节类似, 温度的 无规则波动很可能是由于红外测温点附近随机发生的放电现象导致。

相较于温度变化, 微波功率计所记录的实际微波 输出功率及计算后得到的样品的实际微波吸收量 可以更准确地表征煤样对微波能量的吸收能力。 图 10a—图 10e 展示了不同功率下微波反应器的实际 输出功率以及煤样的吸波情况。不同功率下微波反 应器的实际输出功率在整个反应过程中均基本保持



Fig.9 Variations in microwave ignition process temperature rise and optical information under different microwave powers

稳定,大致为设定功率值的 45%。当微波功率为 300 W 时,煤样的实际吸波效率稳定在 45% 附近,而当微波 功率大于 300 W 时,煤样的吸波效率先上升后下降, 最后保持稳定直至燃尽,这一趋势随着微波功率的增 加而变得越发明显。结合反应图像及发射光谱(图 9) 可见,微波吸收效率的变化与放电及燃烧过程具有明 显的相关性:前期火花状放电阶段,样品微波吸收效 率呈上升趋势,推测这是由于炭颗粒间放电产生的局 部高温导致附近区域石墨化度提升,进而使煤样介电 常数提升,吸波能力增强。而随后吸波效率的下降则 与上一节类似,是由于稳定的电弧放电对电磁波衰减 严重,降低了煤样的实际吸波量(图 10f)。结合 700 W 功率工况光谱图(图 9k)及 226 s 时的光谱细节(图 9l) 可知,稳定电弧放电形成后可以持续检测到 388 nm 附近高强度谱峰(代表 CO₂⁺或 CN),说明电弧放电与 这些粒子的产生具有较强的相关性。



图 10 不同微波效率下样品吸波情况

Fig.10 Different microwave efficiency conditions under sample absorption

2.1.4 焦/煤掺混比对微波点火过程的影响

为探究煤焦掺混比对焦/煤微波点火过程的影响, 本部分在 500 W 微波功率、0.5 L/min 空气流量下,对 焦炭掺混比例为 0,25%、50%、75%、100% 五组样品 进行微波点火试验。样品的温升、吸波情况如图 11 所示。当焦炭掺混比例为 0,即对纯劣质烟煤进行微 波点火时,可以观察在 5 min 内几乎没有燃烧及放电 现象发生,样品温度缓慢上升,实际微波吸收功率基 本稳定在 100 W 左右。当有焦炭掺混时,可以看出煤 样温度变化趋势基本相同,5 min 后温度相差小于 200 ℃,焦炭掺混比例为 25% 的样品终温及吸波量最 高。此外,对比焦炭掺混占比为 25%(图 11h)、100% (图 11i)样品的发射光谱,纯焦炭组(焦炭掺混比例 100%)在 388 nm 附近波段未形成稳定的高强度谱峰。 上一节中提到,该波段对应的粒子与电弧放电具有较 强相关性,因此推断在纯焦炭微波点火在 5 min 内未





图 11 不同焦/煤掺混比煤样的微波点火过程样品温升吸波情况及光谱信息

Fig.11 Different microwave ignition processes, sample temperature rise, absorption characteristics, and spectral information of coal samples with varying coal-to-coke blending ratios

能形成稳定的电弧放电,或电弧放电强度较弱。因此, 过高的焦炭掺混比例并不会对微波点火效果产生明 显提高,相反还可能会由于挥发分含量过少、无法形 成稳定的高强度电弧放电等原因,削弱对点火过程的 强化效果。

进一步,对比不同煤样微波点火 5 min 内的总吸 波量及终温发现,纯劣质烟煤组与煤焦掺混组的实际 微波吸收能量相近 (相差< 10%),但由于放电现象的 明显差异,其终温变化接近 50%。这一差异说明剧烈 放电这一能量转化形式可以快速提升样品温度,进而 抵消因气体流量上升而带来的散热量增加,进而提升 微波电磁能向热能的转化效率。

2.2 劣质烟煤理化性质及表观形貌演化规律

为了进一步证明炭颗粒在微波点火过程中,自身 石墨化度以及电导率的提升是增强其微波吸收以及 热转化能力的原因,对不同阶段煤样的石墨化度、灰 分以及表面微观形貌进行表征。由于红外测温仪只 能检测石英管外壁的局部温度,具有随机性,因此并 不能准确描述煤样点火过程。得益于单模态微波反 应器高度聚焦的微波能量密度,煤样的实际吸波量及 吸波效率可靠性较高,在不同工况下表现出极强的规 律性。因此本章以煤样的实际吸波效率为参考,将煤 样微波点火过程分为4个阶段:缓慢上升区、迅速上 升区、迅速下降区、缓慢下降区。并在如图12所示的 取样点处取样,分别对应的微波处理时间为0、60、 105、127、135、230 s。

2.2.1 微波点火过程劣质烟煤燃烧反应性演变规律

为探究最佳微波作用时间,对样品进行热重分析, 得到燃烧失重曲线 (图 13)。各阶段煤样失重峰值都 集中在 450~800 ℃。而随着微波燃烧时间的增加, 煤样热重分析后的残余率逐渐提高,这是由于随着燃 烧过程的进行,碳逐渐被消耗,灰分占比不断升高。

各煤样的燃烧特性参数见表 3。从综合燃烧特性



图 12 微波点火过程中劣质烟煤取样点的选取 Fig.12 Selection of sampling points for inferior bituminous coal

during microwave ignition process

指数 S 的变化趋势上看, 点火前期 (0~105 s), 煤的燃烧反应性大幅下降。而与传统燃烧过程不同的是, 微波燃烧过程中煤的燃烧反应性并非随燃烧时间的增加一直下降, 而是在燃烧的中后期 (105 s 后) 出现波动, 在 127 s 时具有相对较好的燃烧反应性。这可能与微波燃烧过程中煤颗粒自身理化结构变化以及挥发分的产生有关。

2.2.2 微波点火过程劣质烟煤理化结构演变规律

微波点火不同阶段样品的 Raman 散射光谱如 图 14 所示。碳材料的 Raman 光谱散射峰通常位于 D峰 (1 360 cm⁻¹ 附近)、G峰 (1 580 cm⁻¹ 附近)以及 2D峰 (2 700 cm⁻¹ 附近)。其中,D峰和G峰的峰强比 常被用于评价碳材料的石墨化度:一般认为峰强比 *I*_D/*I*_G越小,石墨化度越高^[48]。与传统燃烧、热解导致 石墨化度上升的认知不同,劣质烟煤在微波点火过程 中石墨化度存在波动,且整体向逆石墨化方向发展。 在碳材料的微观结构中,能够产生D峰的结构除了挥 发分碳氢结构 (sp³杂化)外,还有石墨烯便于及缺陷 结构 (sp²杂化);而能够产生G峰的则主要是石墨烯 表面和完美的石墨烯结构^[49]。因此在微波点火过程 煤



Fig.13 Microwave ignition different stage samples thermal data

Table 3	Microwave ignition different stage samples
表 3	微波点火不同阶段样品的燃烧特性参数

combustion characteristic parameters

点火时间/s	<i>T</i> _i /℃	<i>T</i> ^b /℃	$R_{\rm max}/$ min ⁻¹	$R_{\text{mean/}}$ min ⁻¹	$\frac{S}{(10^{11} \min^{-2} \cdot K^{-3})}$
0	497.6	799.9	0.148	0.102	7.62
60	537.8	777.8	0.148	0.113	7.43
105	448.4	765.1	0.113	0.059	4.33
127	555.0	769.4	0.124	0.094	4.92
135	540.6	761.7	0.110	0.079	3.90
230	566.9	765.2	0.113	0.088	4.04

中,除了高温作用使原本热力学不稳定的碳原子实现 由乱层结构向石墨晶体结构的转化(热效应)外,放电 产生等离子体中的活性物质还可能对煤结构产生 2 种作用 (电效应):① 石墨化作用:如断侧链、脱氢; ② 逆石墨化作用:破坏石墨边缘碳结构。这 2 种作用 都将产生额外的挥发分,进一步强化劣质烟煤点火及 燃烧,延缓劣质烟煤燃烧反应性的下降。在微波点火 全过程中,焦炭加热阶段由于放电不剧烈,因此热效 应占主导,煤样石墨化度上升;焦炭及挥发分共燃阶 段,放电增强,电效应逐渐突显,石墨化度上升速度变 缓;焦炭燃烧阶段,由于挥发分基本释放完全,热效应 及电效应中的石墨化作用减弱,逆石墨化作用增强, 煤样石墨化度下降。

微波点火不同阶段样品的 XRD 图谱如图 14b 所示。劣质烟煤中灰分主要以 Ca_{1.01}Mg_{0.33}Fe_{0.57}(CO₃₎₂

(钙镁菱铁矿)、SiO₂(石英)、Al₂Si₂O₅(OH)₄(高岭石)的 形式存在。随着微波辐照时间的增加 (105 s 前), 灰分 中的碳酸盐、硅酸盐逐渐分解为氧化物。105 s 后, 多 数灰分的特征衍射峰强度显著下降, 证明此时多数灰 分以非晶态共熔物的形式存在。

2.2.3 微波点火过程劣质烟煤表观形貌演变规律 微波点火不同阶段样品的比表面积及孔隙结构 特征如图 15 所示。原始劣质烟煤的氮气吸/脱附等温 线几乎不存在解吸滞后现象。而微波辐照后的样品 存在解吸滞后现象,其氮气吸/脱附等温线根据 IUPAC 分类标准^[50],属于 H3 型的磁滞回线,这表明微波作用 下,焦炭表面出现许多裂纹。图 15b 显示了劣质烟煤 比表面积及空体积的变化情况。二者均随微波辐照 时间的延长而增加。证明微波点火过程中劣质烟煤



注:图中的虚线分别位于各物相主要衍射峰处。







图 15 微波点火不同阶段样品氮吸附表征

Fig.15 Microwave ignition different stage samples nitrogen adsorption characterization

表面的裂纹不断增多、加深,增加了煤的气固接触界面,有效促进后续挥发分的产出及焦炭燃烧。

微波点火不同阶段样品的表观形貌如图 16 所示。 原始劣质烟煤除存在一些碎屑外,表面完整、相对光 滑(图 16a)。对其表面进行局部 EDX 分析,其中 C 元 素的摩尔分数为 85.26%, O 元素为 8.63%(图 16b)。

微波燃烧至105s时,炭颗粒表面出现裂纹,这与

样品氮吸附数据吻合 (图 15a)。对裂纹中析出的小颗 粒进行 EDX 分析, C 元素的摩尔分数为 64.18%, O 元 素为 30.87%, 其余为 Al、Si、Cl、K、Ca、Fe、Ni、Cu、 Zn 等元素 (图 16d)。说明有灰分逐渐从内部迁移到 颗粒表面的。

微波燃烧至 135 s 时,炭颗粒表面裂纹进一步增加,表面相对平整 (图 16e)。进一步放大后可以看到



Fig.16 Microwave ignition different stage samples SEM and local EDX. Microwave ignition

表面绝大部分覆盖了一层小颗粒。对这部分炭表面 及小颗粒进行局部 EDX 分析发现, C 元素的摩尔分 数为 62.83%, 除了 33.63% 的 O 外, 剩余为 Na、Al、 Si 等元素 (图 16f)。说明此时在炭颗粒表面形成了一 层灰壳。而灰壳的存在可能会阻止氧分子由外向内 扩散, 阻碍燃烧反应进行。这与微波燃烧 135 s 时劣 质烟煤燃烧反应性较低相对应 (表 3), 说明对于劣质 烟煤等灰分较高的煤种, 灰分形貌的演化对其微波燃 烧过程具有重要影响。

微波燃烧至 230 s 时,炭颗粒表面不再被灰颗粒 覆盖,暴露出的炭表面出现明显的分层现象,形成片 层结构 (图 16g)。此外,炭表面还聚集了一些体积较 大的"絮状物"。对其进行局部 EDX 分析发现,其中 O 摩尔分数为 65.15%, S 元素为 18.63%, Si 元素为 14.62%,剩余为 Ca、Zn 等金属元素,未检测到 C 元 素 (图 16h)。结合 XRD 数据,推测这些"絮状物"为 CaO 等金属氧化物、硫化物和 SiO₂ 等灰分发生岛状 聚集形成的固熔物。此时大量炭表面又重新暴露出 来,片层结构又进一步增加了气固接触面积,因此此 时碳材料的燃烧活性得到增强。

微波燃烧至 300 s 时,可以观察到在片层状炭表 面出现大量规则的微米级的圆坑,且部分圆坑中存在 直径略小于圆坑的球形颗粒 (图 16i),这与研究组前 期工作发现的现象一致^[51]:这些球体为焦炭中熔融灰 分与少量残碳形成的固溶物,被燃烧或气化反应所产 生的大量气体吹胀而成。而由于灰分中金属元素 (图 16j, Ca、Al、Mg等)的存在,灰球成为了燃烧过程 中的气固反应活化中心,在其附近的焦炭表面引发刻 蚀,加速焦炭消耗,并增加更多的气固反应界面。除 规则的微米级圆坑外,还可以在片层表面、边缘看到 大量不规则的刻蚀。微波燃烧至 300 s 时,已出现稳 定剧烈的电弧放电,因此这些刻蚀可能是由于等离子 体中的活性物质与炭表面发生剧烈反应造成的。这 一现象印证了之前微波等离子体对碳材料逆石墨化 作用的推测。

3 结 论

1) 总结了动态颗粒间距下焦炭辅助劣质烟煤微 波点火规律。与固定床微波点火过程类似,流化床微 波点火过程主要分为3个阶段:首先是煤样加热阶段, 伴随有微小火花放电,此时煤样温升主要依赖于样品 在小流量(0.25 L/min)下的热量累积;随后是挥发分-焦炭共燃阶段,煤样底部首先出现稳定燃烧,并逐渐 向上发展至所有样品;最后是焦炭燃烧阶段,此时挥 发分已基本释放完全,主要为焦炭燃烧。2、3 阶段由 炭颗粒间放电引发的多点局域燃烧会形成多个"火核" 强化燃烧,大流量(0.75 L/min)下强化效果更明显。 此外,少量的焦炭掺混(25%)对劣质烟煤的吸波能力 及点火效果具有显著提升。

2)总结了微波作用下劣质烟煤石墨化度的演变规律对点火效果的影响机制。微波通过改变劣质烟煤石墨化度影响介电常数,进而影响吸波及热转化。微波对劣质烟煤石墨化度的影响主要存在热效应石墨化作用(碳原子由乱层结构向石墨晶体结构转化)、电效应石墨化作用(断侧链、脱氢)、电效应逆石墨化作用(破坏石墨边缘碳结构)3种机制。焦炭加热阶段热效应石墨化作用占主导,煤样石墨化度上升,介电常数上升,吸波及热转化能力增强;挥发分-焦炭共燃阶段,放电增强,电效应逐渐突显,石墨化度上升速度变缓;焦炭燃烧阶段,由于挥发分基本释放完全,热效应及电效应石墨化作用减弱,逆石墨化作用增强,煤样石墨化度下降。

3)总结了微波作用下劣质烟煤结构的演变规律 对点火效果的影响机制。劣质烟煤在微波点火过程 中,其表面微观形貌及灰分演化过程主要有4个阶段: 首先碳表面出现裂纹,灰分析出;随后裂纹进一步增 多变深,灰分在炭颗粒表面形成一层灰壳,阻碍氧分 子扩散,抑制燃烧过程;接着析出的灰分发生岛状聚 集,大量片层状炭表面重新暴露,燃烧反应性回升;最 后在灰分及等离子体共同作用下,片层状碳材料表面 出现大量微米级刻蚀,比表面积增加,燃烧反应性进 一步回升。

因此,综合考虑微波对劣质烟煤结构及理化性质 两方面的影响,在挥发分、焦炭共燃阶段中期时劣质 烟煤具有最佳的燃烧反应性,可以脱离微波作用区域, 进行自持燃烧。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴. 2002(总第 21 期)[M]: 北京:中国统计出版社, 2002.
- [2] ESCUDERO A I, AZNAR M, DÍEZ L I, et al. From O₂/CO₂ to O₂/H₂O combustion: The effect of large steam addition on anthracite ignition, burnout and NO_x formation[J]. Fuel Processing Technology, 2020, 206: 106432.
- [3] 仝其云. 浅析燃煤工业锅炉的耗能与节能[J]. 科技与企业, 2015(9): 108.

TONG Qiyun. Analysis of energy consumption and energy con-servation of coal fired industrial boilers[J] Technology and Enter-prise, 2015 (9): 108.

[4] 吴立志,常峥,雍占锋.煤粉锅炉微波等离子点火研究[J].热力发电,2007,36(6):80-82.

WU Lizhi, CHANG Zheng, YONG Zhanfeng. Study on microwave

plasma ignition of pulverized coal boilers[J]. Thermal Power Generation, 2007, 36(6): 80-82.

[5] 张斌. 微油点火技术在 200 MW 锅炉中的应用研究[D]. 北京: 华北 电力大学, 2016

ZHANG Bin. Application of tiny-oil ignition technology at a 200 MW boiler[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016

- [6] 韩时菲. 长春三热 2×350 MW 火电机组锅炉等离子点火技术改造
 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017
 HAN Shifei. Plasma ignition technology transformation of 2 × 350 MW thermal power unit boiler in datang Changchun third thermal power plant[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017
- [7] 方涛, 徐淑姣. 1 000 MW 火电机组节油点火效益分析[J]. 节能技术, 2016, 34(4): 345-348.
 FANG Tao, XU Shujiao. Analysis of fuel saving ignition benefits for 1 000 MW thermal power units[J]. Energy saving technology, 2016, 34(4): 345-348.
- [8] 张博,张辉,谢伟.火力发电厂煤粉锅炉节油点火技术分析及应用
 [J]. 能源研究与利用, 2010(3): 29-32.
 ZHANG Bo, ZHANG Hui, XIE Wei. Analysis and application of pulverized coal fired boiler fuel-efficient firing technique in thermal power plant[J]. Energy Research & Utilization, 2010(3): 29-32.
- [9] 国家能源局. 等离子体点火系统设计与运行导则: DL/T 1127—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [10] 林再江,李国堂. 燃煤锅炉等离子点火与微油点火技术的选用[J].
 科技传播, 2012, 4(20): 162–163.
 LIN Zaijiang, LI Guotang. The selection of plasma ignition and micro oil ignition technologies for coal-fired boilers[J]. Technology Communication, 2012, 4(20): 162–163.
- [11] ASKAROVA A S, KARPENKO E I, MESSERLE V E, et al. Plasma enhancement of combustion of solid fuels[J]. High Energy Chemistry, 2006, 40(2): 111–118.
- [12] 车丹,林树彪. 微油点火在燃用贫煤锅炉上的试验研究[J]. 山西电力, 2009(3): 39-41, 72.
 CHE Dan, LIN Shubiao. Experimental research on tiny-oil ignition technology on a meager-coal fired boiler[J]. Shanxi Electric Power, 2009(3): 39-41,72.
- [13] 王永豪. 电站锅炉等离子体与气化微油点火技术应用研究[J]. 中 国设备工程, 2018(7): 141-142.
 WANG Yonghao. Study on application of plasma and gasification

micro-oil ignition technology in utility boiler[J]. China Plant Engineering, 2018(7): 141–142.

- [14] 闫高程,齐心,任婷,等.无烟煤煤粉气流在特定高温氧气氛围下的点火特性[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 1016-1024.
 YAN Gaocheng, QI Xin, REN Ting, et al. Ignition character of pulverized anthracite coal stream in specific high-temperature oxygen atmosphere[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 1016-1024.
- [15] 黄琳. 微油点火及低负荷稳燃技术在无烟煤煤粉锅炉的应用[J].
 知识经济, 2009(6): 119–120.
 HUANG Lin. Application of micro-oil ignition and low-load stable combustion technology in anthracite pulverized coal boiler[J].
 Knowledge Economy, 2009(6): 119–120.
- [16] 郭伯春.大功率等离子点火技术在贫煤电厂的应用实践[J].发电 设备,2017,31(5):376-378,382.

GUO Bochun. Application of high power plasma ignition technology in lean coal-fired power plants[J]. Power Equipment, 2017, 31(5): 376–378,382.

[17] 钟航.我国用等离子技术攻克燃煤锅炉贫煤点火难题[J].广西电 业,2015(5):94.

ZHONG Hang. China uses plasma technology to overcome the problem of poor coal ignition in coal-fired boilers[J]. Guangxi Electric Power, 2015(5): 94.

- [18] 吴庆龙,张兴豪,周虹光,等. 富氧条件下低挥发分煤微油点火试验研究[J]. 热力发电, 2016, 45(9): 51-55.
 WU Qinglong, ZHANG Xinghao, ZHOU Hongguang, et al. Experimental investigation on ignition of low-volatile pulverized coal in a tiny-oil burner under oxygen-enriched conditions[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(9): 51-55.
- [19] ZHANG J P, JIA X W, WANG C A, et al. Experimental investigation on combustion and NO formation characteristics of semi-coke and bituminous coal blends[J]. Fuel, 2019, 247: 87–96.
- [20] XIE K C, LI W Y, ZHAO W. Coal chemical industry and its sustainable development in China[J]. Energy, 2010, 35(11): 4349– 4355.
- [21] SINGH S, NECULAES V B, LISSIANSKI V, et al. Microwave assisted coal conversion[J]. Fuel, 2015, 140: 495–501.
- [22] KAMEI O, ONOE K, MARUSHIMA W, et al. Brown coal conversion by microwave plasma reactions under successive supply of methane[J]. Fuel, 1998, 77(13): 1503–1506.
- [23] PICKLES C A, GAO F, KELEBEK S. Microwave drying of a lowrank sub-bituminous coal[J]. Minerals Engineering, 2014, 62: 31–42.
- [24] USLU T, ATALAY Ü. Microwave heating of coal for enhanced magnetic removal of pyrite[J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(1): 21–29.
- [25] DAWSON E A, PARKES G M B, BARNES P A, et al. The generation of microwave-induced plasma in granular active carbons under fluidised bed conditions[J]. Carbon, 2008, 46(2): 220–228.
- [26] FERNÁNDEZ Y, FIDALGO B, DOMÍNGUEZ A, et al. Carbon nanofilament synthesis by the decomposition of CH₄/CO₂ under microwave heating[J]. Carbon, 2007, 45(8): 1706–1709.
- [27] CHA C Y, KIM D S. Microwave induced reactions of sulfur dioxide and nitrogen oxides in char and anthracite bed[J]. Carbon, 2001, 39(8): 1159–1166.
- [28] HONG Y C, LEE S J, SHIN D H, et al. Syngas production from gasification of brown coal in a microwave torch plasma[J]. Energy, 2012, 47(1): 36–40.
- [29] LI H, SHI S L, LIN B Q, et al. Effects of microwave-assisted pyrolysis on the microstructure of bituminous coals[J]. Energy, 2019, 187: 115986.
- [30] ZHONG G, XU S M, DONG Q, et al. Rapid, universal surface engineering of carbon materials *via* microwave-induced carbothermal shock[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(18): 2010968.
- [31] PALOMINO J E, BILÉN S G, CAWLEY T, et al. Combustion of aluminum powder with steam entrained in a helium plasma using a 2.45 GHz microwave plasma torch[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(18): 185204.

- [32] HWANG J, KIM W, BAE C, et al. Application of a novel microwave-assisted plasma ignition system in a direct injection gasoline engine[J]. Applied Energy, 2017, 205: 562–576.
- [33] WANG Q, HOU L Y, ZHANG G X, et al. Using indium tin oxide material to implement the imaging of microwave plasma ignition process[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(7): 074107.
- [34] LIU C, ZHANG G X, XIE H, et al. Experimental study of multipoint ignition in methane–air mixtures by pulsed microwave power[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(10): 3499–3503.
- [35] WANG Y Y, ZHU L, WANG J H, et al. Numerical study and experimental validation of minimum ignition energy for microwave spark ignition[J]. IEEE Access, 2021, 9: 30654–30662.
- [36] CHA C Y, KIM B I, LUMPKIN R E, et al. Electromagnetic enhancement of chemical reactions (Devolatilization of Char and Coal)[J]. Fuel Science and Technology International, 1993, 11(9): 1175–1202.
- [37] SU Y L, ZHOU W, LI J F, et al. Coke-assisted microwave ignition and combustion behaviors of anthracite in a switching atmosphere [J]. Fuel, 2022, 316: 123316.
- [38] LIU H P, CHEN T P, FANG L X. Evolution of char structure during non-isothermal low temperature pyrolysis of Zhundong coal by microwave heating: A comparative study with conventional heating [J]. Journal of the Energy Institute, 2020, 93(3): 1195–1206.
- [39] PENG Z W, HWANG J Y, KIM B G, et al. Microwave absorption capability of high volatile bituminous coal during pyrolysis[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(8): 5146–5151.
- [40] ZHANG D, ZHOU R, YANG X Q, et al. Design of novel dual-port tapered waveguide plasma apparatus by numerical analysis[J]. Physics of Plasmas, 2016, 23(7): 073504.
- [41] LUONG D X, BETS K V, ALI ALGOZEEB W, et al. Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis[J]. Nature, 2020, 577(7792): 647–651.

- [42] METZ R, BLANC C, DOMINGUEZ S, et al. Nonlinear field dependent conductivity dielectrics made of graphite nanoplatelets filled composites[J]. Materials Letters, 2021, 292: 129611.
- [43] WANG Z P, NELSON J K, HILLBORG H, et al. Graphene oxide filled nanocomposite with novel electrical and dielectric properties[J]. Advanced Materials, 2012, 24(23): 3134–3137.
- [44] REYES P, GÓMEZ A, VERGARA J, et al. Plasma diagnostics of glow discharges in mixtures of CO₂ with noble gases[J]. Revista Mexicana de Física, 2017, 63(4): 363–371.
- [45] REYES P G, TORRES C, TORRES J, et al. Electrical and optical characterization of CO₂/He glow discharge[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2015, 591(1): 012066.
- [46] ALREBDI T A, FAYYAZ A, ASGHAR H, et al. Laser spectroscopic characterization for the rapid detection of nutrients along with CN molecular emission band in plant-biochar[J]. Molecules, 2022, 27(15): 5048.
- [47] KHAN M I, REHMAN N U, KHAN S, et al. Spectroscopic study of CO₂ and CO₂-N₂ mixture plasma using dielectric barrier discharge
 [J]. AIP Advances, 2019, 9(8): 085015.
- [48] LI J F, ZHOU W, HUANG Y M, et al. Rapid, simple and sustainable preparation of N-rich activated carbons with high performance for gas adsorption, via microwave heating[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 330: 125464.
- [49] ULYANOVA E V, MOLCHANOV A N, PROKHOROV I Y, et al. Fine structure of Raman spectra in coals of different rank[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 121: 37–43.
- [50] GREGG S J, SING K S W, SALZBERG H W. Adsorption surface area and porosity[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1967, 114(11): 279C.
- [51] SU Y L, ZHOU W, LI J F, et al. Enhanced gasification effect from discharges and the formation of centimeter-scale plasma during microwave combustion of coke[J]. Fuel, 2023, 332: 126058.