·黄土高原区域研究·

引用格式:钟少辉,罗森,王凤宇,等. 菌草/半焦粉制备成型燃料及其燃烧动力学研究[J]. 延安大学学报(自然科学版),2026,45(3):3-10. [ZHONG S H,LUO S,WANG F Y,et al. Research on formed fuel prepared from fungus grass/semi-coke powder and its combustion kinetics[J]. Journal of Yan'an University(Natural Science Edition),2026,45(3):3-10.] **DOI**:10.13876/J.cnki.ydnse.260010

菌草/半焦粉制备成型燃料及其燃烧动力学研究

钟少辉[1],罗　森[1],王凤宇[1],郝玉朝[1],张壮壮[1,2,3*],付　峰[1,2,3]

(1. 延安大学 化学与化工学院;2. 延能-延大综合能源产业技术研究院;3. 陕西省化学反应工程重点实验室,陕西 延安 716000)

摘　要:针对陕北地区半焦粉利用率低、菌草资源过剩的现实问题,以菌草粉与榆林煤半焦粉为原料,围绕菌草/半焦粉清洁成型燃料制备关键技术开展研究,重点考察冷压成型工艺、型焦炭化特性、燃烧行为及燃烧动力学规律。结果表明,冷压成型的最优工艺参数为水分添加量10%、成型压力20 MPa、烘干温度125 ℃、菌草添加量50%;型焦在350 ℃、保温30 min条件下炭化处理后综合性能最佳,可有效解决挥发分偏高、发热量不足等问题。炭化处理能显著提高型焦发热量与固定碳含量,加快燃烧速率、提升放热量,有利于优化燃烧过程。燃烧动力学分析显示,型焦中挥发分燃烧的活化能与指前因子均低于固定碳燃烧。研究为陕北地区半焦粉高效资源化利用及菌草高值化利用提供了技术支撑,对促进区域资源循环与绿色低碳发展具有重要意义。

关键词:菌草;半焦粉;冷压成型;型焦炭化;燃烧动力学

中图分类号:TQ536.1　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1004-602X(2026)03-0003-08

近年来,自然资源紧缺与环境污染问题日益严峻,生物质凭借碳中性、可再生、低污染的独特优势成为能源领域研究热点[1],而半焦生产中大量细粒径半焦粉因不符合后续工艺要求,利用率偏低,既造成资源浪费,又引发环境问题。陕北作为中国核心半焦产区,年半焦产量近5×10^7 t,半焦粉年排放量达4×10^6 t,区域资源高效利用需求迫切;同时当地菌草资源禀赋优越,过剩菌草亟待高值化处置,为资源协同利用提供了契机[2]。目前,半焦粉掺配黏结剂制备成型燃料已成为破解炼焦煤短缺、固废污染的重要路径,可实现固废资源化与减排增效,而成型压力、水分添加量、黏结剂种类等是调控成型燃料性能的核心因素。商靖童等[3]通过实验观察到,适量水分的引入有利于颗粒间的相对滑移和填充,使成型燃料结构趋于致密,体积收缩效应超过了固体颗粒占比降低的影响,最终使得密度增大。杨永斌等[4]指出,采用煤沥青作黏结剂,可制得结构紧密、均质性好的型焦。这归因于煤沥青在热过程中形成的炭化骨架对焦炭颗粒的牢固黏结。

现有半焦基成型燃料研究多聚焦半焦粉与秸秆、锯末、稻壳等常规生物质配伍[5-6],尚未见半焦粉与菌草混合制备成型燃料的相关报道,缺乏菌草与半焦粉的配伍适配性研究;且现有研究多单一关注成型工艺对成型燃料物理性能的影响,针对半焦-菌草复合成型燃料燃烧过程的动力学特性研究存在空白,难以支撑该类成型燃料的多样性应用。同

收稿日期:2026-01-17

基金项目:国家自然科学基金项目(22168042);陕西省重点研发计划(2022GD-TSLD-66,2018TSCXL-NY-02-01);榆林市科技计划项目(2023-CXY-211);大学生创新创业训练计划项目(202510719053)

作者简介:钟少辉(2001—),男,硕士研究生,主要从事煤炭清洁高效转化利用研究。

*通信作者　E-mail:zhzzyau@163.com

时,菌草作为新型生物质资源,其高纤维特性是否适配半焦粉成型、能否提升成型燃料燃烧性能尚未明确,亟须开展针对性研究填补该领域空白。

本文立足陕北资源禀赋,以半焦粉与菌草为原料制备复合成型燃料,系统探究了成型工艺对成型燃料物理性能的调控规律及其燃烧动力学特性。研究构建了从原料配伍到燃烧特性的技术评价体系,实现了工业固废与农业生物质的协同资源化,为陕北半焦粉高值化、菌草能源化及工农业协同增效提供了理论依据与技术支撑。

1 实验部分

1.1 实验材料

本研究以菌草、榆林煤半焦为原料,样品通过缩分、破碎、筛分后用棕色广口瓶密封避光保存待用。煤样的工业分析、元素分析及发热量如表1所示。

表1 菌草与半焦粉工业分析、元素分析及发热量

	工业分析/%				元素分析/%					发热量/(MJ/kg)
	M_{ad}	V_{ad}	A_{ad}	FC_{ad}*	C	H	N	S	O*	
菌草	12.55	65.78	3.94	17.73	44.5	5.77	0.81	0.15	48.77	17.15
半焦	5.41	3.44	22.12	69.03	63.09	0.79	0.85	0.28	34.99	27.06

注:*表示用差减法计算得出;M_{ad}、V_{ad}、A_{ad}和FC_{ad}分别为空气干燥基水分、挥发分、灰分和固定碳。

由表1可知,菌草的挥发分和氢含量均远高于半焦粉,说明菌草在燃烧初期更易着火,燃烧反应活性更高;而半焦粉挥发分极低,属于难燃的碳质物料。但半焦粉的固定碳含量是菌草的近4倍,碳含量也显著高于菌草,表明半焦粉是成型燃料的主要热量来源;菌草的固定碳含量较低,需依赖高挥发分实现快速燃烧。因此,菌草和半焦粉的性能具有明显的互补性,菌草高挥发分、高氢含量的特点可改善半焦粉着火难的缺陷,而半焦粉高固定碳、高热值的优势则能提升成型燃料的整体发热量。这种原料配伍有望制备出着火性能好、燃烧稳定、热值适中的清洁成型燃料。

1.2 实验方法

1.2.1 菌草/半焦粉混合冷压成型

将菌草粉与半焦粉混匀,分别添加5.0%~12.5%去离子水,在10~30 MPa压力下保压5 min成型,脱模后于50 ℃~150 ℃烘干1 h,所制备的样品定义为菌草-半焦复合型焦(简称型焦)。通过落下强度、耐磨度测试确定最优成型工艺,再考察10%~90%菌草添加量对型焦工业分析、物理性能及发热量的影响。

1.2.2 菌草/半焦粉型焦炭化特性

在最优冷压工艺下,以煤焦油沥青为黏结剂,在低氧环境中以5 ℃/min升温至300 ℃~500 ℃,恒温10~50 min进行炭化,所制备的样品定义为菌草-半焦-煤沥青复合型炭(简称型炭)。结合XRD、FTIR、工业分析及性能测试,考察烘焙温度与时间对型炭性能的影响。

1.2.3 燃烧过程及燃烧动力学

采用TGA-DSC3+热分析仪,在空气气氛下以(10~30) ℃/min升温至800 ℃,测定型焦与型炭的燃烧特性。通过TG-DTG曲线计算着火温度、最大燃烧速率、燃尽温度及着火指数[7-8]、可燃性指数[9-10]等参数,评价燃烧性能;采用Coats-Redfern(C-R)法拟合得到燃烧反应活化能与频率因子,明确动力学规律。

目前已有多种燃烧动力学的分析方法,例如Coats-Redfern法(简称CR法)、Kissinger法、Friedman法等[11-12]。由于CR法的计算过程相对比较简单且准确性较好[13-14],故本研究采用CR法对型焦和型炭的燃烧过程进行拟合计算。

当n=1时,

$$\ln\left[-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right]=\ln\frac{AR}{E\beta}-\frac{E}{RT}。\tag{1}$$

当$n\neq1$时,

$$\ln\left[-\frac{1-(1-\alpha)^{1-n}}{T^2(1-n)}\right]=\ln\frac{AR}{E\beta}-\frac{E}{RT},\tag{2}$$

其中,α为转化率,T为绝对温度,A为指前因子,R为气体常数,E为活化能,β为升温速率。

当n=1时$\ln\left[-\frac{\ln(1-a)}{T^2}\right]$对$\frac{1}{T}$进行作图;当$n\neq1$时,$\ln\left[-\frac{1-(1-a)^{1-n}}{T^2(1-n)}\right]$对$\frac{1}{T}$进行作图。斜率则为$-\frac{E}{R}$。两者都可以拟合出一条直线,由直线斜率得出反应活化能E,通过截距得出频率因子A。

1.2.4 型焦型炭性能分析

本研究采用全自动工业分析仪对型焦与型炭进行工业分析,依据GB/T15459-2006《煤的落下强度测定方法》对型焦与型炭的落下强度进行测定,

用自制滚筒对型焦与型炭进行耐磨度的测定。

松弛密度是反映型焦、型炭的紧密程度和持久度的重要参数，也是衡量其物理性能与燃烧性能的重要指标[15]。通常在理想条件下型焦与型炭的松弛密度小于且越接近1 g/cm³时，认为其对燃烧、储存、运输效果更好。松弛密度的测定用电子数显卡尺测得型焦与型炭的直径和高度，用电子天平称其质量。型焦与型炭的松弛密度可根据公式(6)计算得到。

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi l d^2}, \tag{3}$$

其中，ρ为松弛密度(g/cm³)，m为型焦与型炭质量(g)，L为型焦与型炭高度(cm)，d为型焦与型炭直径(cm)，V为型焦与型炭体积(cm³)。

2　结果与讨论

2.1　冷压成型

2.1.1　成型条件对型焦性能的影响

不同成型压力、水分添加量(质量分数)及烘干温度下型焦的工业分析结果见增强出版附件1表1。可知，随着成型压力升高，型焦水分含量从3.2%增至4.2%，挥发分含量在25 MPa时降至低谷，原因是该压力下半焦缝隙被菌草纤维充分填充，阻碍了挥发分逸出；继续加压则会破坏型焦分子结构，内部因弹性反弹产生裂痕，为挥发分逸出提供通道，使挥发分回升。实验表明，当水分添加量<12.5%时，冷压成型后经125 ℃烘干1 h，大部分游离水被去除，仅残留少量结合水，且结合水含量受原料吸附特性及烘干工艺控制，故显著低于原料初始水分，使得型煤水分含量普遍低于原始菌草(12.55%)和半焦粉(5.41%)。水分添加量达12.5%时脱模后出现明显析水，故不再探究更高水分比例。由表可知，水分增加使型焦水分含量从2.6%升至4.3%，对挥发分、灰分影响较小，固定碳含量略有下降。烘干温度125 ℃时挥发分达峰值，因温度低于125 ℃时仅析出水分，木质素胶体固化收缩形成空隙，利于挥发分逸出；温度高于125 ℃时，型焦中易挥发组分受热分解，导致挥发分小幅下降。

不同成型条件下型焦落下强度分析见增强出版附件1表1，数据均通过控制变量法测定，固定水分添加量10%、成型压力20 MPa、烘干温度125 ℃、菌草添加量50%。成型压力升至20 MPa后，落下强度趋于饱和稳定，继续加压则略有下降。10~15 MPa阶段，压力主要作用为排出颗粒间空气，落下强度增长平缓；20 MPa时颗粒间空气基本排尽，压力促使菌草纤维伸长并形成纵横网状结构，增强颗粒粘结力，使落下强度大幅提升。由于成型存在塑性与弹性形变，脱模后弹性应力松弛引发膨胀，且膨胀效应随压力递增，超过20 MPa后内部裂纹增多，导致落下强度下降。水分添加量10%时落下强度最优：水分不足时，颗粒摩擦放热使木质素塑化提升强度，但纤维分散性差，型焦分层易裂；12.5%时水分过量，加压时木质素随水分溢出，烘干后水分流失形成大量裂痕，结合菌草膨胀性导致结构松散，落下强度骤降至25.47%。随着烘干温度升高，落下强度逐步上升并在125 ℃达峰值，因木质素胶体脱水收缩固化，紧密粘连半焦颗粒；温度超过125 ℃后，胶体过度收缩产生内部裂痕，使落下强度小幅回落。菌草添加量10%时，其纤维无法充分包裹半焦粉颗粒，成型压力作用下，半焦粉中高灰分杂质易聚集且难以随烘干过程脱除，同时少量菌草纤维燃烧后残留的灰分与半焦灰分叠加，导致整体灰分产率略高于单一原料。

型焦耐磨度变化趋势与落下强度基本一致，受成型条件影响显著。菌草/半焦粉混合制型焦的最佳工艺条件为：成型压力20 MPa、水分添加量10%、烘干温度125 ℃。此条件下型焦综合性能最优，菌草分散均匀，黏结效果理想。

2.1.2　菌草添加量对型焦性能的影响

不同菌草添加量型焦的工业分析结果见增强出版附件1表1。由表可知，随着菌草添加量增加，型焦挥发分含量持续上升，灰分与固定碳含量逐渐下降。结合表1数据，菌草本身挥发分远高于半焦粉，灰分及固定碳含量则低于半焦粉，由此导致型焦挥发分由8.12%升至65.25%，灰分由22.35%降至8.90%，固定碳由67.31%降至23.41%。

菌草成型后，因弹性形变与应力松弛导致型焦松弛密度随菌草添加量增加而降低。当菌草添加量为10%时，木质素等黏结性组分含量不足，无法形成有效黏结网络，型焦颗粒间仅靠物理挤压结合，故机械强度趋近于0；添加量增至50%时，两者显著提升，这是由于菌草中起黏结作用的木质素、糖类物质增多，形成的胶体可紧密粘连半焦与菌草颗粒。菌草添加量超过50%后，落下强度与耐磨度变化平缓，表明该添加量已能满足黏结需求。

不同菌草添加量型焦的发热量分析见增强出版附件1表1。半焦粉发热量(27.06 MJ/kg)明显高于菌

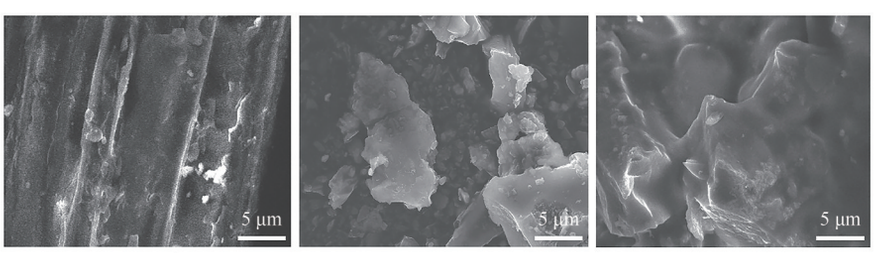
草(17.15 MJ/kg),故型焦发热量随菌草添加量增加而下降。值得注意的是,菌草与半焦粉按50∶50比例混合,理论代数加和发热量为22.11 MJ/kg,实际型焦发热量23.98 MJ/kg,高出1.87 MJ/kg,印证二者燃烧存在显著协同效应。协同作用使发热量高于加权均值的核心原因有两点:一是菌草高挥发分(65.78%)与高氢含量(5.77%)可降低半焦粉的着火门槛,加速半焦固定碳的燃烧反应,减少半焦因燃点高、燃烧不完全导致的热量损失,充分释放其高热值潜力;二是半焦粉的高固定碳特性(69.03%)可作为燃烧载体,延缓菌草挥发分的快速逸散,延长挥发分与氧气的接触时间,避免挥发分未充分燃烧即随烟气流失,同时半焦燃烧释放的热量可反哺菌草挥发分的裂解与燃烧,形成"挥发分助燃固定碳、固定碳稳燃挥发分"的良性循环,提升整体燃烧效率与热量利用率,最终使复合体系发热量超出单一体系的代数叠加值。结合燃烧动力学数据,菌草挥发分燃烧活化能(63.015 kJ/mol)远低于半焦固定碳,二者配伍后整体反应活化能降低,进一步强化了燃烧协同效果。

综上,菌草添加量对型焦各项性能影响显著,落下强度与耐磨度在添加量50%时趋于饱和且此时型焦综合性能最佳,故50%为菌草的最优添加量。

2.2 型焦炭化

2.2.1 炭化对型炭的影响

图1为型炭SEM图谱,可见半焦粉、菌草与沥青经低温烘焙炭化后,产物呈复杂不规则块状堆叠结构,表面起伏褶皱,孔隙分布不均,块状边界模糊,表明各组分炭化过程中发生融合。半焦粉本身含颗粒结构与孔隙,菌草含纤维素、半纤维素及木质素;低温炭化时,沥青受热软化包裹原料颗粒促进黏连,使边界模糊;温度升高后,菌草中多糖、木质素热解释放挥发分形成孔隙,沥青缩聚形成碳质骨架填充空隙,共同塑造了产物微观形貌。



A. 菌草 A. 半焦 C. 型炭(350 ℃)

图1 原料及型炭的SEM图

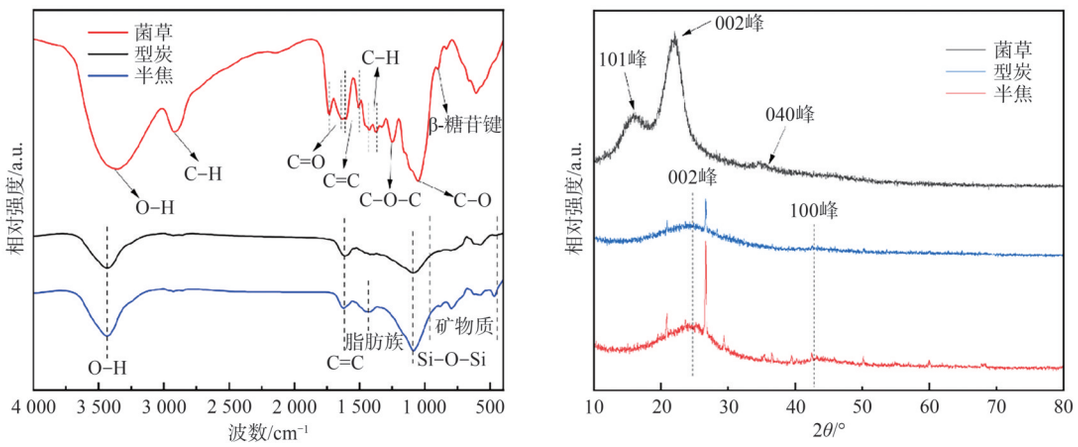
图2为菌草、半焦及型炭的FTIR与XRD图谱。菌草FTIR曲线特征峰更丰富,对应纤维素(3 400 cm^{-1} O-H、2 900 cm^{-1} C-H等)、半纤维素(1 740 cm^{-1} C=O等)及木质素(1 510 cm^{-1} C=C等)的特征官能团;半焦在3 400 cm^{-1}处有O-H伸缩振动峰(残留含氧官能团),1 600 cm^{-1}处C=C峰表明芳香稠环结构发达,1 450 cm^{-1}和1 090 cm^{-1}峰分别对应脂肪族C-H弯曲振动与Si-O-Si伸缩振动,提示含少量脂肪链及石英[16-17]。菌草XRD曲线在15.8°、21.9°、34.5°处有特征峰,分别对应纤维素I的(101)、(002)、(040)晶面;型炭与半焦均出现(002)和(100)峰,(002)峰形越尖锐对称、峰位越接近26.5°,石墨化程度越高,(100)峰反映碳层内六边形碳原子排列有序性,峰形越优则层内结构越完整[18]。

对比曲线可知,混合低氧烘焙炭化后,O-H特征峰显著减弱,C-H、C=O等含氧及脂肪族官能团峰消失,Si-O-Si峰亦下降。低氧环境下热解以脱氧、脱氢、缩聚为主,含氧官能团直接脱除,脂肪链断裂为小分子气体,自由基缩聚形成多环芳烃,碳骨架趋向石墨化;矿物质特征峰下降则因菌草矿物质含量低,混合后稀释了型炭矿物质含量[19]。炭化后菌草纤维素I特征峰消失,型炭呈现一定石墨化结构,系纤维素高温热解导致晶格瓦解,结晶结构破坏为无定形碳或部分石墨化碳。由型炭SEM图谱可见炭化后型炭内部形成致密多孔结构,颗粒间黏结界面更紧密,这为提升机械强度和燃烧稳定性提供了结构基础。

2.2.2 炭化条件对型炭性能的影响

不同炭化条件下型炭的工业分析、元素分析结果见增强出版附件1表2。炭化温度350 ℃~450 ℃时,挥发分下降不足1%;升至500 ℃时,挥发分下降超3%,固定碳增加超2%。350 ℃以下,半纤维素为主、少量木质素与纤维素分解,挥发分大幅下降;350 ℃~450 ℃,半纤维素基本分解,木质素与纤维素持续分解但速率放缓,固定碳略降;450 ℃~500 ℃,纤维素完全分解,沥青胶质体液态产物分解析出部分气

体，剩余组分与原料黏结缩聚固化，使挥发分显著下降、固定碳提升，同时组分分解析出导致灰分递增。炭化时间对挥发分、碳含量影响甚微，无需进一步开展FTIR与XRD分析，仅表征机械强度即可。



A. FTIR图　　B. XRD图

图2　原料及型炭的FTIR及XRD分析图

图3的SEM图谱显示，随炭化温度升高，型炭结构从松散变致密、表面从粗糙趋光滑，孔隙结构逐步复杂。300 ℃~350 ℃结构紧实度提升；350 ℃~450 ℃孔隙特征变化显著；450 ℃~500 ℃结构融合加剧、孔隙细化。沥青低温软化黏结使结构紧实，高温下炭化缩聚填充孔隙，菌草有机成分随温度升高发生梯度热解，小分子挥发分低温逸出，大分子高温深度热解缩聚，共同塑造了结构变化规律。

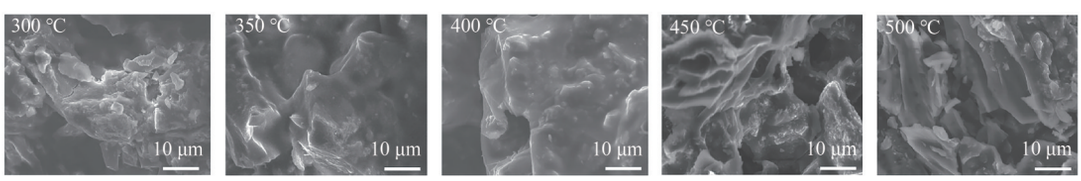
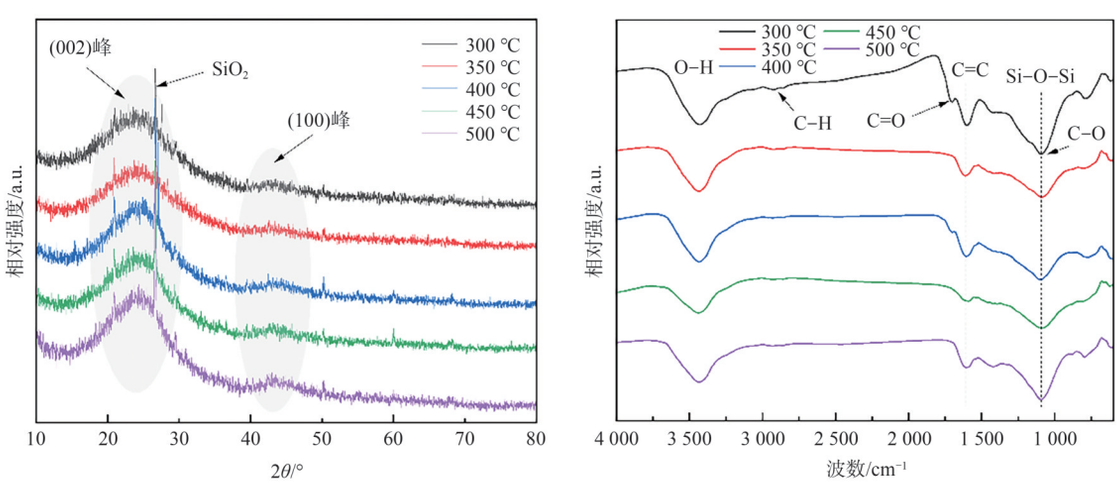


图3　不同炭化温度下型炭的SEM分析

图4的XRD及FTIR图谱显示，型炭在2θ≈26°处有(002)峰(层状结构)、2θ≈30°处有SiO_2峰(含无定形炭与二氧化硅)、2θ≈43°处有宽(100)峰(石墨有序性)。300 ℃~500 ℃时，(002)与(100)峰强度增强、宽度变窄，(002)峰位趋近26.5°，表明炭化程度加深，碳原子有序排列，石墨微晶尺寸与结晶度提升。FTIR图谱中，300 ℃时仍存在多种含氧、含氢官能团峰；随温度升高，O–H、C–H、C=O峰减弱，C=C与Si–O–Si峰相对稳定，系官能团热解脱除，芳构化缩聚保留C=C，Si–O–Si高温结构稳定且相对含量上升所致。



A. XRD图　　B. FTIR图

图4　不同炭化温度下型炭XRD及FITR分析

增强出版附件1表2显示,炭化温度300 ℃~500 ℃时,型炭收率从74.48%匀速降至54.13%。350 ℃前收率下降主因挥发分逸出,结合XRD分析(图4),350 ℃后型炭(002)峰强度提升,表明碳骨架有序化程度增加,少量无序固定碳参与缩聚反应,故固定碳含量略有波动,450 ℃后沥青胶质体气态产物析出,使收率持续下降。炭化时间延长,收率仅缓慢下降,影响微弱。炭化温度对松弛密度的影响呈"升-降-稳"趋势:300 ℃~350 ℃,沥青胶质体黏结作用主导,松弛密度提升;350 ℃~400 ℃,挥发分逸出主导,质量下降且内部形成空隙,密度下降;400 ℃后趋于稳定。炭化时间超过30 min,型炭外部过度固化收缩,液态产物析出,导致密度下降。炭化温度对落下强度与耐磨度影响趋势一致:300 ℃~350 ℃,沥青胶质体气液固共存态强化黏结,机械强度提升;350 ℃~400 ℃,菌草挥发分冲破胶质体形成空隙,强度骤降;400 ℃~450 ℃,沥青胶质体固化收缩使落下强度回升,但内部空隙增多导致耐磨度略降;超450 ℃,胶质体过度收缩产生大量空隙,强度显著下降。炭化时间对落下强度影响小(略有上升),但耐磨度下降明显。型炭发热量随温度升高持续下降且降幅趋缓:300 ℃~350 ℃,残留挥发分燃烧放热减少,发热量降幅显著;炭化时间30 min前,仅挥发分逸出,发热量基本稳定;30~40 min发热量骤降后趋稳,因炭化基本完成,延长时间导致缺氧环境下部分固定碳分解。

综上,炭化温度与时间对型炭性能影响显著。炭化温度350 ℃、时间30 min时,可确保型焦完全炭化,且综合性能最优。

2.3 燃烧过程及其动力学分析

图5为型焦与型炭在20 ℃/min升温速率下的燃烧热重分析图,包含失重率曲线(TG曲线,反映质量随温度变化)、失重速率曲线(DTG曲线,反映质量变化速率随温度变化)及热流曲线(DSC曲线,反映能量差与温度关系)。

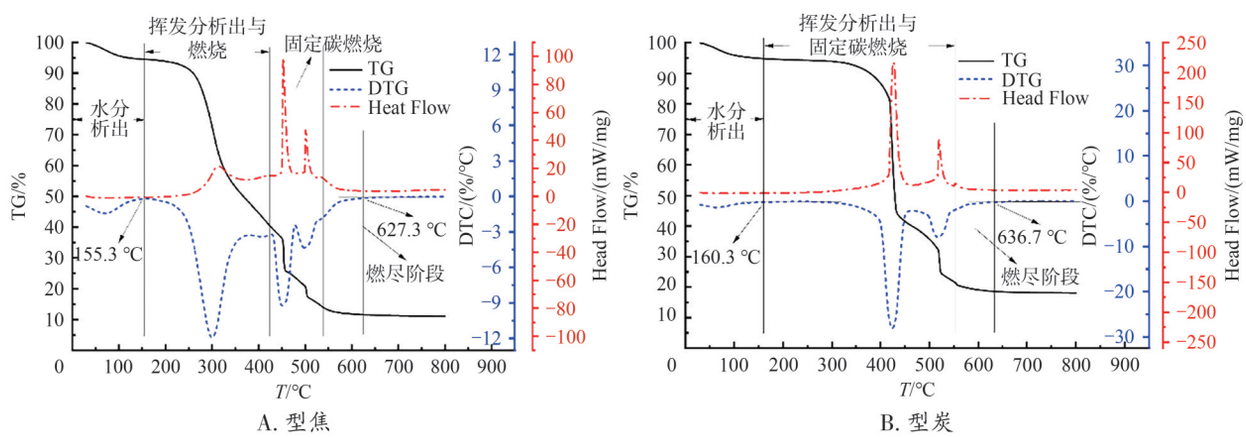


图5 型焦与型炭燃烧热分析曲线

第一阶段为水分析出阶段:样品预热后结合水受热析出,TG曲线变化平缓、幅度较小;DSC曲线出现负值小凹峰,系水分析出吸热所致。

第二阶段为挥发分析出及燃烧阶段:型炭因炭化后挥发分含量低,无独立挥发分燃烧阶段,DTG曲线仅呈现两个固定碳燃烧失重峰。型焦此阶段菌草挥发分大量析出,TG曲线先平缓下降后显著下降,总失重达53.93%,主要为菌草纤维素、半纤维素及部分木质素分解为可燃气体燃烧;DTG曲线在300 ℃出现峰值,失重速率为-11.937%/min;DSC曲线呈现明显放热峰,对应挥发分燃烧释热过程。

第三阶段为固定碳燃烧阶段:型焦挥发分已完全析出燃烧,固定碳开始燃烧,型焦与型炭的TG曲线均出现两次明显失重。DTG曲线呈现一大一小两个峰值,结合动力学分析结果(菌草固定碳燃烧活化能低于半焦固定碳),可判定先出现的大峰为半焦固定碳燃烧峰,后出现的小峰为菌草固定碳燃烧峰——菌草固定碳相对不易燃烧,而半焦固定碳率先发生反应,且燃烧反应更剧烈、失重贡献更大。对应DSC曲线亦出现两个放热峰,与DTG峰趋势一致。

第四阶段为燃尽阶段:TG、DTG、DSC曲线均趋于平稳,DTG无明显失重峰,主要为剩余固定碳的残余燃烧。

型焦与型炭的燃烧性能及燃烧特性指数分别如图6、表2所示。由表2可知,型焦着火温度比型炭低约150℃,因型焦挥发分含量远高于型炭,挥发

分析出伴随大量释热，易引发着火；型焦燃尽温度比型炭低 15 ℃，归因于型炭固定碳含量更高，燃烧阶段延长。尽管炭化处理显著提高了样品着火温度与燃尽温度，但两者着火指数、可燃性指数及综合燃烧特性指数差异较小，原因是型炭最大燃烧速率远超型焦。炭化处理虽未明显改变燃烧特性，但通过低氧中温焙烧（350 ℃保温 30 min），使型焦中菌草组分的高挥发分发生温和热解，脱除水分、甲烷、CO_2等低热量挥发性杂质，促使固定碳含量增加直接导致发热量增大。同时，炭化脱除的低热量挥发分减少了燃烧过程中无效烟气带走的热量损失，提升单位质量燃料的有效放热量，从而精准解决生物质成型燃料因挥发分过高、碳含量不足导致的发热量偏低问题，兼顾燃烧稳定性与热量供给能力。

利用 Origin 软件对型焦和型炭的燃烧过程各部分燃烧曲线进行拟合，拟合过程见增强出版附件 2 图 1 所示。表 3 为型焦与型炭的燃烧动力学参数，型炭因挥发分含量低，仅对两个固定碳燃烧峰进行分析。结果显示，型焦中挥发分燃烧的活化能与指前因子远低于固定碳，因固定碳燃烧需更高热量，反应更剧烈。菌草固定碳燃烧活化能低于半焦固定碳，印证其更易燃烧（对应 DTG 曲线中先出现的菌草固定碳峰）；但半焦固定碳指前因子更高，表明其燃烧反应速率更快、分子碰撞频率更高。对比可知，炭化处理使半焦固定碳更易燃烧，却增加了菌草固定碳燃烧所需热量。

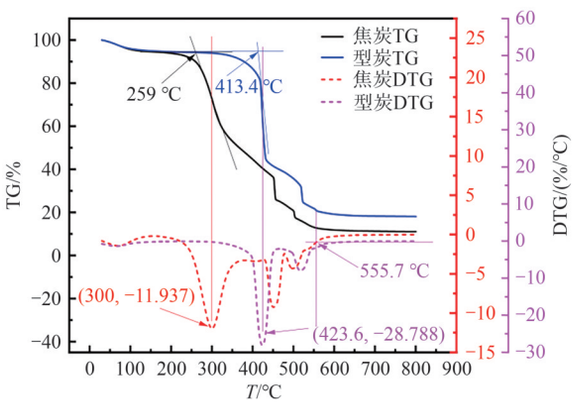


图 6　型焦和型炭 TG-DTG 曲线

表 2　型焦和型炭的燃烧特性指数

	T_i /℃	T_p /℃	$(dw/dT)_{max}$ /(%/℃)	T_b /℃	Z_i /×10^{-2}	P /×10^{-4}	S /×10^{-10}
型焦	259	300	11.937	555.7	7.72	1.78	7.40
型炭	413.4	423.6	28.788	571	7.63	1.68	6.28

表 3　型焦和型炭的燃烧动力学参数

	燃烧阶段	温度区间/℃	拟合方程	R^2	E/(KJ/mol)	A/min^{-1}	n
型焦	挥发分燃烧	250~350	Y=−0.363 27−7 578.904 97x	0.981	63.015	2.635×10^4	2
	半焦固定碳燃烧	451~456	Y=92.945 04−76 222.201 25x	0.995	633.747	8.842×10^{45}	2
	菌草固定碳燃烧	500.3~505	Y=16.524 94−22 449.898 01x	0.965	186.659	2.635×10^{12}	1
型炭	半焦固定碳燃烧	418~434	Y=80.938 28−65 766.389 88x	0.968	546.813	2.635×10^{40}	2
	菌草固定碳燃烧	518~523	Y=47.299 76−47 551.197 65x	0.983	395.363	2.635×10^{25}	1

3　结论

1）冷压成型最优工艺为水分添加量 10%、成型压力 20 MPa、烘干温度 125 ℃、菌草添加量 50%，此条件下型焦落下强度达 98.11%、耐磨度 91.82%、发热量 23.98 MJ/kg，菌草高挥发分与半焦高固定碳形成有效互补，弥补单一原料缺陷；

2）以煤焦油沥青为黏结剂，低氧环境中 350 ℃保温 30 min 炭化处理效果最优，型炭固定碳含量提升至 62.75%、挥发分降至 14.25%，机械强度与 70.02% 的收率兼顾，有效解决型焦挥发分偏高、发热量不足的瓶颈。

3）炭化处理使型炭最大燃烧速率提升 141.2%，达到 28.788%/min，发热量稳定在 24.43 MJ/kg，显著优化燃烧性能，动力学分析显示挥发分燃烧活化能（63.015 kJ/mol）远低于固定碳，且菌草与半焦固定碳存在燃烧特性差异，为燃烧过程调控提供理论依据。

特别提醒：本文的附件材料见知网增强出版附件。

参考文献：

[1]牛志睿，封温俐，黄华，等. 钴镍铁氧体—生物炭的制备及对亚甲基蓝的吸附[J]. 延安大学学报（自然科学版），2021，40（3）：1-5.

[2]杨晓霞，田大香，黄银，等. 低阶煤热解提质技术的研究进展[J]. 延安大学学报（自然科学版），2017，36（4）：30-33.

[3]商靖童，姚润生，牛志龙，等. 高静压粉煤成型条件对制备型焦质量的影响[J]. 煤炭转化，2026，49（1）：21-33.

[4]杨永斌，钟强，姜涛，等. 煤沥青型焦制备与固结机理[J]. 中南大学学报（自然科学版），2016，47（7）：2181-2188.

[5]方顺利，刘家利，杨云，等. 乌拉盖褐煤半焦与生物质冷压成型特性试验[J]. 热力发电，2021，50（4）：30-35.

[6]党红艳，陈明胜，刘晓华，等. 小麦秸秆制备热解型煤黏结

剂的实验研究[J]. 煤炭技术,2024,43(6):282-285.
[7]马楠,孙军,曹燕. 竹柳燃烧特性试验研究[J]. 木材加工机械,2013(1):34-36.
[8]QU X Y, ZHOU G L, CAO Y J, et al. Synergetic effect on the combustion of lignite blended with humus: thermochemical characterization and kinetics [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 152: 137-149.
[9]潘冠福. 补连塔煤燃烧特性综合分析[J]. 当代化工,2019,48(7):1384-1387.
[10]刘敬勇,傅杰文,孙水裕,等. 不同来源污泥混燃特性及其综合燃烧性能评价[J]. 环境科学学报,2016,36(3):940-952.
[11]DWIVEDI, KANT K, PRAMANICK, et al. Synergistic effect on Co-pyrolysis mechanism and kinetics of waste coal blended with high-rank coal and biomass [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021, 147(15): 1-21.
[12]刘振海. 热分析导论[M]. 第一版. 北京:化学工业出版社,1991.
[13]肖波,郭勇,杨加宽. 生物质粉体燃烧技术的初步研究[J]. 电力与能源,2004,25(5):197-199.
[14]SI F Y, ZHANG H M, FENG X R, et al. Thermodynamics and synergistic effects on the Co-combustion of coal and biomass blends [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2024, 149(14): 7749-7761.
[15]余点点冰. 芒草型煤成型与燃烧特性试验研究[D]. 南京:南京林业大学,2022.
[16]侯建伟,邢存芳,杨莉琳. 不同炭化条件制备油茶果壳生物质炭的理化性质比较研究[J]. 土壤通报,2024,55(2):383-390.
[17]SINGH K, ZONDLO J. Characterization of fuel properties for coal and torrefied biomass mixtures [J]. Journal of the Energy Institute, 2016, 90(4): 505-512.
[18]LIU M J, BAI J, KONG L X, et al. The correlation between coal char structure and reactivity at rapid heating condition in TGA and heating stage microscope [J]. Fuel, 2020, 260: 116318-116318.
[19]戚海洋,魏聂晶,王文静,等. 小麦秸秆生物质炭的结构特征及其对Cr(VI)的吸附性能研究[J/OL]. 土壤,1-8[2025-12-11]. https://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2024.01.018.

[责任编辑 张 香]

Research on formed fuel prepared from fungus grass/semi-coke powder and its combustion kinetics

ZHONG Shaohui[1], LUO Sen[1], WANG Fengyu[1], HAO Yuzhao[1], ZHANG Zhuangzhuang[1,2,3*], FU Feng[1,2,3]

(1. School of Chemistry & Chemical Engineering, Yan'an University; 2. Research Institute of Comprehensive Energy Industrial Technology; 3. Shaanxi Key Laboratory of Chemical Reaction Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

Abstract: In response to the current problems of low utilization rate of semi-coke powder and excessive resources of fungus grass in the Shaanxi North region, this paper focuses on the key technologies for preparing clean briquettes from fungus grass powder and semi-coke powder from Yulin coal. The research mainly examines the cold pressing molding process, the properties of the formed coke, the combustion behavior, and the combustion kinetics laws. The results show that the optimal process parameters for cold pressing molding are moisture addition of 10%, molding pressure of 20 MPa, drying temperature of 125 ℃, and fungus grass addition of 50%. The type coke processed at 350 ℃ with 30 min of holding time has the best comprehensive performance, effectively solving the problems of high volatile content and insufficient calorific value. The carbonization treatment can significantly increase the calorific value and fixed carbon content of the type coke, accelerate the combustion rate, and enhance the heat release, which is conducive to optimizing the combustion process. The combustion kinetics analysis indicates that the activation energy and pre-exponential factor of volatile component combustion in the type coke are lower than those of fixed carbon combustion. This research provides technical support for the efficient resource utilization of semi-coke powder in the Shaanxi North region and the high-value utilization of fungus grass, and is of great significance for promoting regional resource recycling and green low-carbon development.

Key words: fungus grass; semi-coke powder; cold pressing molding; type coke carbonization; combustion kinetics