

煤粉大比例掺混不同生物质的混燃特性研究

李美军^{1,2,3}

(1.煤科院节能技术有限公司,北京100013;2.煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京100013;3.国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京1000013)

摘要:可再生能源生物质清洁低碳、易于获取、利于着火,含硫、氮量少且属于碳中性物质,但其能量密度低。在煤粉中大比例掺混生物质(生物质/煤粉质量比大于5:5)可有效改善煤粉着火特性,碳排放水平接近燃烧天然气,且污染物排放显著降低,进而达到节能减排目的。目前研究主要集中在低掺混比例(小于5:5)下生物质与煤粉的混燃特性,针对北方常见的玉米秸秆、稻秆和玉米芯等生物质与煤粉在大掺混比例下的燃烧特性,尚有待深入。笔者利用热重分析技术分别研究了煤粉与不同生物质种类(玉米秸秆、稻秆及玉米芯)在不同掺混比例下(5:5、6:4、7:3和8:2)的混燃特性,分析生物质种类和掺混比例对混合燃料的着火温度、燃尽温度、交互反应以及燃烧特性指数等的影响,确定了不同生物质的最佳掺混比例。结果表明:掺混比例对混合样品失重曲线的影响从大到小依次为玉米秸秆、玉米芯和稻秆。随掺混比例增加,第1阶段最大质量变化速率逐渐增大且燃烧进程前移,第2阶段则逐渐减小,这是由于挥发分相对增加且焦炭相对减少的原因。混合样品的着火温度和燃尽温度比纯煤粉分别下降约100和60。随掺混比例的增加,玉米芯着火温度逐渐减小,玉米秸秆和稻秆则先减小后增大,且均在7:3时达到最小;燃尽温度均呈现下降趋势,下降幅度由大到小分别为玉米芯、稻秆和玉米秸秆。玉米秸秆和稻秆在8:2时燃尽性能较差。混合样品发生不同程度的交互作用,该交互作用正是生物质的促进和抑制的协同作用,使3种生物质均在5:5时对煤粉燃烧抑制作用大;玉米秸秆和稻秆在7:3时、玉米芯在6:4、8:2时促进作用大。同时,3种生物质的燃烧特性指数远大于煤粉,随掺混比例的增大,玉米芯的燃烧特性指数变化最大并在8:2时达到最大值,6:4和7:3时几乎相同;稻秆的变化最小且在7:3时达到最大值;玉米秸秆在7:3和8:2时几乎相同并达到最大值。小范围改变掺混比例时,燃烧特性指数变化不大。这可能是由于燃烧特性指数不仅与着火温度和燃尽温度有关,还与样品在其主要燃烧过程的反应速率有关,而煤粉在焦炭燃烧阶段的反应剧烈程度高于生物质挥发分析出阶段,使不同掺混比例的混合样品出现以上现象。

引言

生物质能源具有可再生、清洁低碳、易于获取等优点,被认为是全球继石油、煤炭、天然气之后的第四大能源[1]。2017年12月国家发改委、国家能源局联合印发的《关于促进生物质能供热发展的指导意见》(发改能源[2017]2123号)明确指出,生物质能供热绿色低碳、经济环保,是重要的清洁供热方式[2]。我国生物质资源总量丰富,每年总量约4.6亿t,但年利用率不足5%[3]。生物质与煤粉混燃,是一种综合提高环境效益和经济效益的能源利用方式[4]。生物质挥发分高(60%~90%)、热解温度低(250~350℃),且挥发分和内在水分析出后在碳粒内部形成的空隙度较大,有利于着火[5];且生物质含硫、氮量少且属碳中性物质,燃烧后SO₂、NO_x等污染物排放量少[6-8],但其能量密度很低。在煤粉中大比例掺混生物质(大于5:5)燃烧,可快速着火与增强火焰稳定性,提高能量密度[9-11],同时碳排放水平接近天然气,污染物排放显著降低。此外,针对生物质能源利用过程中存在碱结渣、腐蚀等问题,采用化学预处理、涂层[12-13]等方法可有效减轻其危害。以逆喷强旋流燃烧器为核心的高效煤粉工业锅炉系统具有燃烧效率高、污染物排放低、即开即停等优点,在该系统上进一步技术升级,研究煤粉大比例掺混生物质的混燃特性,既可扩大系统燃料适用性,又可达到清洁能源生产、节能减排的目的。

对于生物质与煤混燃燃烧特性的研究,常见的试验方法是利用热重分析技术,研究不同影响因素下混合燃料的着火特性、挥发分释放特性、燃尽特性等[14-16]。其中掺混比例作为重要因素,直接决定混合燃料的物理性质及燃烧特性[17]。阎凡飞等[18]研究了不同变质程度煤(褐煤、烟煤和无烟煤)、生物质(小麦秸秆和玉米芯)以及不同掺混比例(1:9、2:8、3:7和4:6)下混合燃料的燃烧特性。

Edward等[19]、Luo等[20]研究表明,随着生物质掺混比例的增大,着火温度和燃尽温度均降低。马爱玲等[21]研究同样表明掺混比例为2:8、4:6和6:4时,煤的着火温度降低,即生物质对煤的改善程度增大,并与掺混比例的变化呈正相关。黄海珍等[22]对无烟煤与玉米秸秆和木屑进行混燃特性试验,研究表明煤燃烧集中于燃烧后期,而生物质燃烧集中于前期;且随着生物质加入,煤的着火性能得到不同程度改善,并使燃烧过程有向低温区移动的趋势,混合燃烧对煤的燃尽性能影响很小。王春波等[23]研究了恒温下不同生物质和煤粉在不同掺混比例(1:9、2:8和3:7)下的混燃特性,表明掺混比例增大导致燃尽时刻提前,且生物质种类在反应初期对混合燃料燃烧特性的影响不大,含灰量高的生物质对混燃特性的改善作用随掺混比例增大逐渐减弱。

虽然对煤粉和生物质混燃的着火特性已有很多研究成果，但多针对低掺混比例（小于5:5）的工况，对于北方常见的玉米秸秆、稻秆和玉米芯等生物质与煤粉在大掺混比例（大于5:5）的燃烧特性，还有待深入。本文利用热重分析技术分别研究了煤粉与玉米秸秆、稻秆及玉米芯在不同掺混比例下的混燃特性，分析不同掺混比例对混合燃料的着火温度、燃尽温度、交互反应以及燃烧特性指数的影响，以期对生产实际中生物质煤粉混燃技术的优化提供参考。

1 试验

1.1 试验样品及工况

试验样品选用1种煤粉和3种生物质，分别为稻秆、玉米秸秆和玉米芯，其工业分析和元素分析见表1。3种生物质均经过破碎、研磨和筛分，选择粒径0.45mm以下的样品备用。每种筛分好的生物质分别与煤粉按比例要求均匀混合，掺混比例（生物质质量/煤粉质量）分别为5:5、6:4、7:3和8:2，以及仅煤粉（0:10）和仅生物质（10:0）的工况，共计6种工况。

1.2 试验装置

试验采用德国NETZSCH公司综合热分析仪（STA449F1/F3），该热重分析仪主要由加热系统、高精度称量系统、给气系统、保护系统等组成。其温度范围是室温~1450℃，温度精度为±2℃，升温速率为0.01~30℃/min。每种工况的样品量为（13±0.5）mg，平铺于氧化铝坩埚中。反应过程为程序升温，采用20℃/min升温速率，从40℃升至800℃。试验采用的保护气为氮气，炉内的气氛为20%O₂和80%N₂的混合气，气体的总流量为50mL/min。为保证数据的可靠性和重复性，每个试验工况均重复3~5次。

表1 煤粉和生物质的工业分析和元素分析
Table 1 Proximate and ultimate analysis of pulverized coal and biomass

燃料	工业分析/%				元素分析/%				
	M _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}	A _{ad}	C _{ad}	H _{ad}	O _{ad}	N _{ad}	S _{t,ad}
煤粉	15.10	27.68	49.52	7.70	62.05	2.51	11.64	0.76	0.24
玉米秸秆	5.95	62.62	13.82	17.61	37.35	4.43	33.62	1.04	0
稻秆	6.26	67.82	16.23	9.69	23.64	4.77	54.13	1.43	0.08
玉米芯	7.99	73.94	14.66	3.41	45.33	6.35	36.44	0.33	0.15

2 结果与讨论

2.1 失重曲线

TG曲线表征样品随温度变化其质量减少的变化规律；DTG曲线表征样品随温度变化其瞬间失重速率的变化曲线，反映某一时刻样品发生失重的剧烈程度。DTG曲线会至少出现1个燃烧高峰，即失重速率最大的点，该点对应的温度越小、速率越大说明燃料的燃烧情况越好。

不同掺混比例的玉米秸秆、稻秆和玉米芯与煤粉掺混的TG和DTG曲线如图1所示。纯煤粉的燃烧失重存在1个明显阶段，对应于TG曲线上表现为1个失重台阶，在DTG曲线上表现为单峰，即固定碳的燃烧，温度区间350~500℃。与此不同，纯生物质燃烧失重存在2个阶段，即TG曲线存在2个失重台阶，DTG曲线为双峰。其中，第1阶段主要是大量挥发分的析出和燃烧，温度区间：玉米秸秆200~320℃、稻秆220~320℃、玉米芯220~330℃；第2阶段主要是固定碳的燃烧，温度区间：玉米秸秆320~500℃、稻秆320~480℃、玉米芯330~500℃。由于生物质的固定碳含量小于挥发分，故该阶段失重台阶和失重峰远小于第1阶段，其中玉米芯相差最大，这与表1的工业分析数值相符。

生物质和煤粉混燃后，由于生物质中挥发分含量多，煤粉固定碳含量多，二者混燃有利于前期着火及后期固定碳燃烧释热。混合样品的失重曲线同样表现为较明显的2个阶段，相较于纯生物质，第1阶段失重峰减小而第2阶段增大。掺入生物质后，相较于纯煤粉燃烧，TG和DTG曲线都向低温区移动，最大失重峰发生的温度提前，燃烧进程前移并加快。说明生物质的加入可以促进混合样品中易燃物质的析出，改善燃烧的反应活性，提高燃烧速率并缩短燃烧时间。同时，掺混比例对混合样品失重曲线的影响不同。以稻秆为例，随掺混比例的减小，TG和DTG曲线的变化很小，混合样品的失重特性更接近于生物质。影响从大到小依次为玉米秸秆、玉米芯和稻秆。随掺混比例增加，第1阶段最大质量变化速率逐渐增大，对应温度逐渐下降，而第2阶段最大质量变化速率逐渐减小，这是由于挥发分相对增加且焦炭相对减少导致的。对于玉米秸秆和稻秆，掺混比例为8:2时，失重后的最终质量大于其他比例，燃尽性能较差。

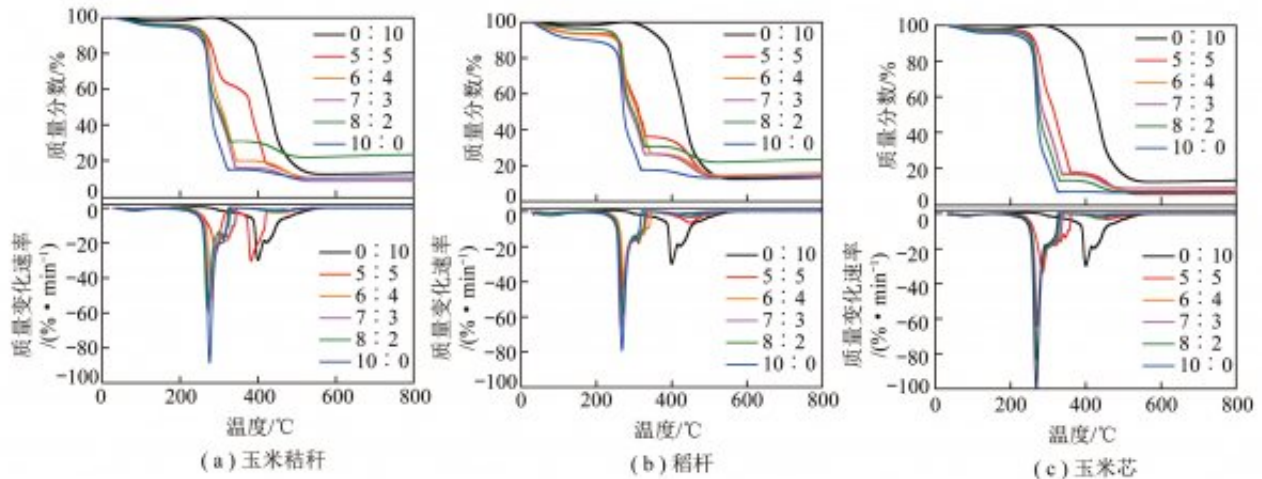


图1 不同掺混比例的玉米秸秆、稻秆和玉米芯与煤粉掺混的TG和DTG曲线

Fig.1 TG and DTG curves of corn straw, rice stalk and corn cob mixed with pulverized coal at different ratios

2.2 特征温度

失重特征温度主要包括着火温度 T_i 和燃尽温度 T_h 。着火温度直接反映样品着火的难易程度，数值越小说明着火越容易，是衡量样品着火特性的重要参数。采用TG-DTG外推法确定着火温度。燃尽温度代表燃烧后期样品质量不再发生变化的起始温度，燃尽温度越低，表明样品可以在较低的温度下实现完全燃烧，采用样品失重占总失重98%时对应的温度为燃尽温度。

不同掺混比例的玉米秸秆、稻秆和玉米芯与煤粉掺混后的着火温度和燃尽温度如图2所示。3种生物质的着火温度明显低于煤粉，煤粉约380℃，玉米芯和稻秆约260℃，玉米秸秆约270℃。这是由于生物质粉中挥发分较高，在较低温度下即可开始燃烧反应。煤粉加入大比例生物质粉后，混合样品的着火温度明显下降约100℃，这是因高挥发分的生物质在燃烧初期析出大量挥发分并燃烧释热，为焦炭燃烧提供大量热量，促进煤粉着火，使燃料着火向低温区偏移，着火温度降低；同时燃烧初期生物质释放热量后，焦炭的表面孔隙率增加，表面氧含量及后期焦炭与氧气的接触面积增大，使得煤粉燃烧更加充分，可见生物质加入对改善煤粉燃烧分布情况的影响很大。

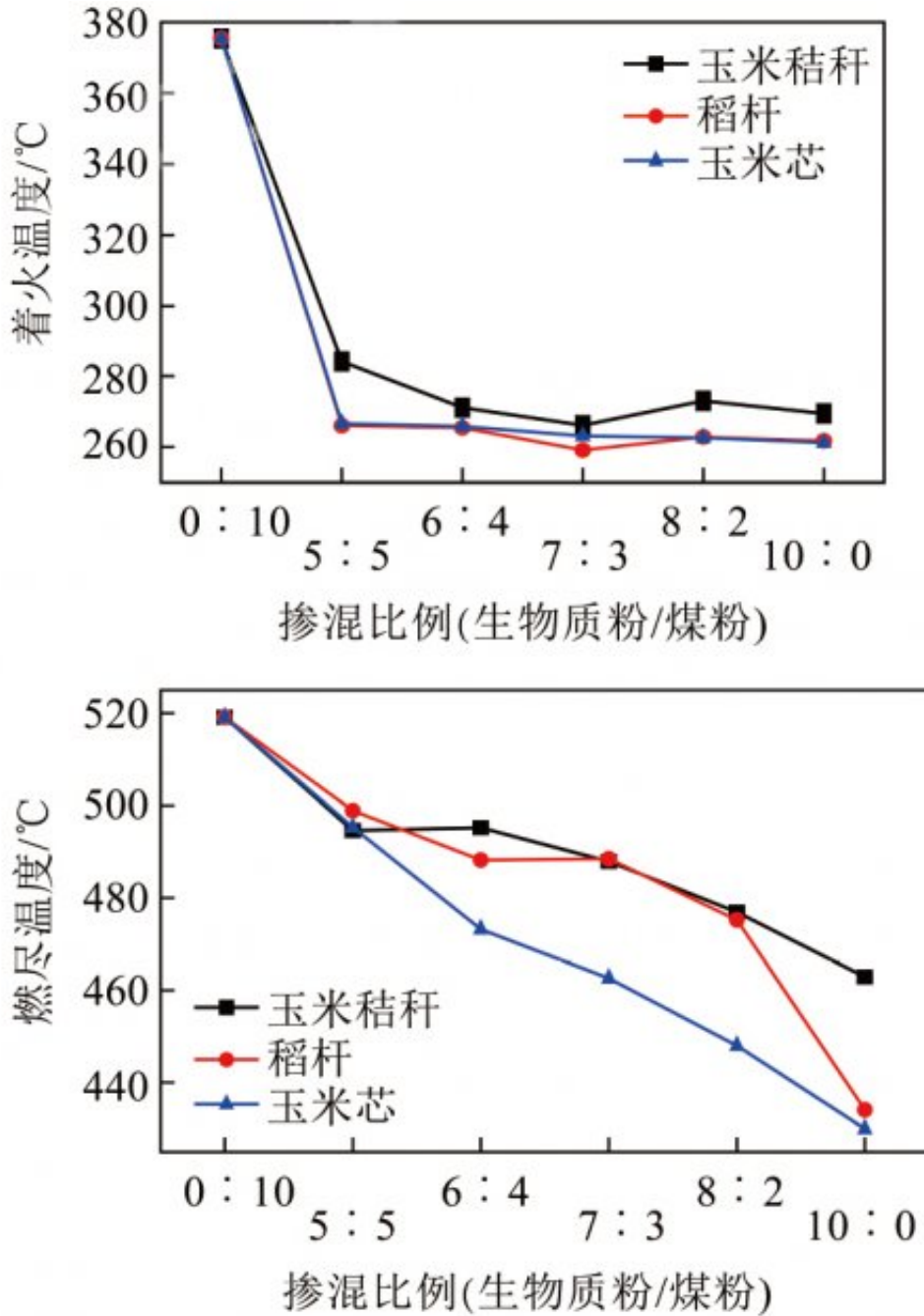


图2 不同掺混比例的不同生物质与煤粉掺混的着火温度和燃尽温度

Fig.2 Initial temperature and burn-out temperature of different biomass mixed with pulverized coal at different ratios

此外，随生物质掺混比例的增加，玉米芯着火温度逐渐减小，玉米秸秆和稻秆则呈现先减小后增大的趋势，且均在7:3时达到最小。这是由于决定混合样品燃烧特性的是生物质的促进和抑制2种作用的竞争关系[24]。其中，促进作用表现为挥发分高、燃点低的生物质粉先燃烧，提高燃烧初期局部温度，促进煤粉的着火，并有利于后期固定碳燃烧；抑制作用表现在生物质粉先燃烧会消耗大量氧气，导致煤粉燃烧处于欠氧状态。2种作用相互协同，导致不同生物质在不同比例下的着火温度变化规律不同。同时，煤粉的燃尽温度约为520℃，而3种纯生物质的燃尽温度约比煤粉低

100%，表明纯生物质的燃烧可以在较低温度下燃尽，有利于稳燃。加入生物质后，混合样品的燃尽温度下降约70%，这从定量角度证明了生物质的加入使煤粉的燃烧进程加快。随生物质掺混比例的增加，各种混合样品的燃尽温度整体均呈现下降趋势，下降幅度由大到小分别为玉米芯、稻秆和玉米秸秆。

2.3交互反应

为探究不同生物质与煤粉混燃过程中是否发生交互作用，本文计算了不同掺混比例下混合样品的理论失重曲线，公式如下：

$$(dm/dt)_{cal} = w_{biomass} (dm/dt)_{biomass} + w_{coal} (dm/dt)_{coal} \quad (1)$$

其中， $w_{biomass}$ 和 w_{coal} 分别为生物质和煤粉在混合样品中的质量分数； $(dm/dt)_{biomass}$ 和 $(dm/dt)_{coal}$ 分别为试验得到的生物质和煤粉的实际质量变化速率，%/min； $(dm/dt)_{cal}$ 为计算得到的混合样品的理论质量变化速率，%/min。由此计算，玉米秸秆、稻秆和玉米芯与煤粉的混合样品的理论质量变化速率如图3所示。

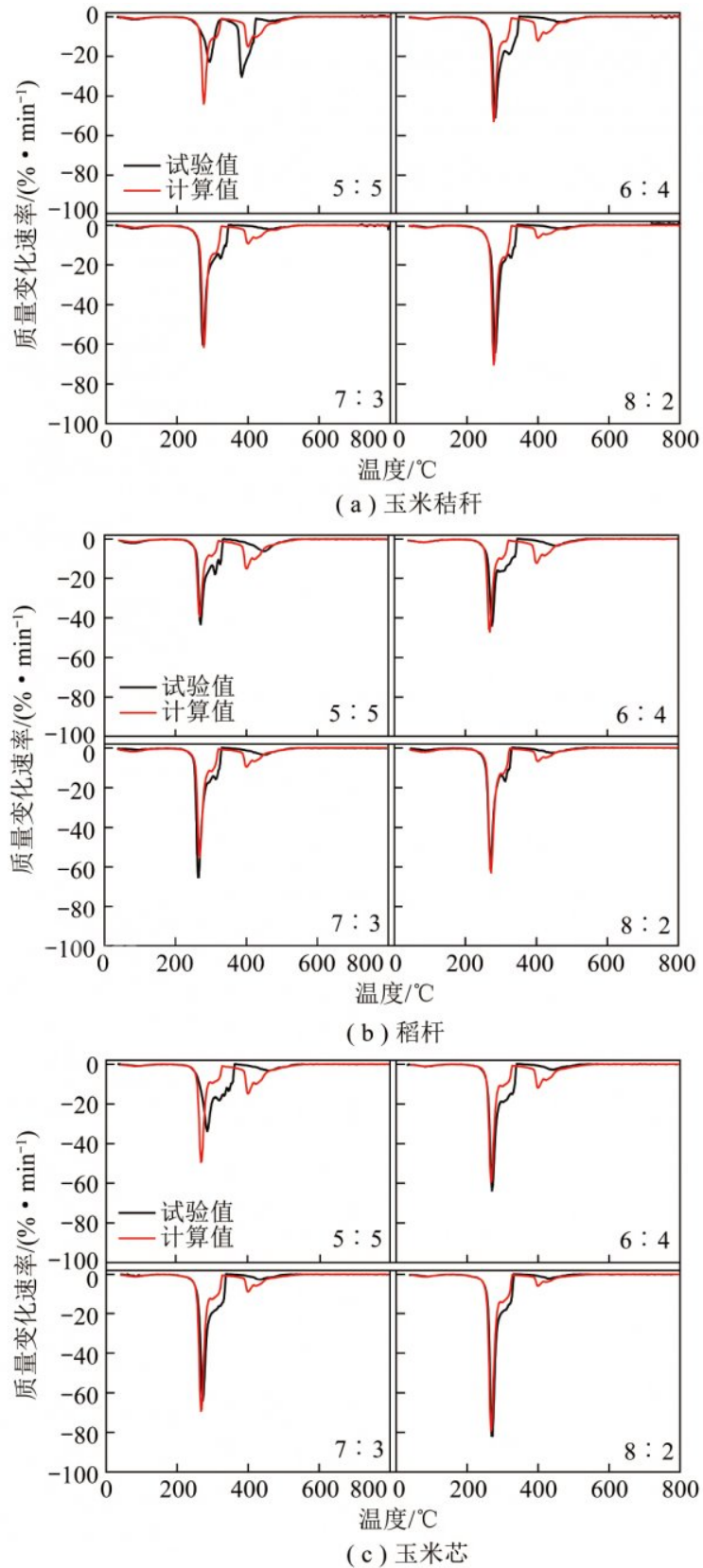


图3 不同掺混比例的不同生物质与煤粉掺混的 DTG
试验值和计算值对比

Fig.3 Comparison of experimental DTG and calculated DTG of
different biomass mixed with pulverized coal at different ratios

混合样品的实际失重曲线相比于理论叠加曲线有不同程度的偏离，说明混合样品在热重试验中发生了不同程度的交互作用。该交互作用正是生物质的促进和抑制的协同作用[22]。对于玉米秸秆，6 4、7 3和8 2时试验和理论计算的最大质量变化速率几乎相同，5 5时试验值明显小于计算值，同时7 3时实际着火和燃烧提前。对于稻杆，7 3时试验最大质量变化速率明显大于计算值，且实际着火和燃烧提前。对于玉米芯，5 5时试验最大质量变化速率小于试验值，且实际着火和燃烧推迟，其他掺混比例下实际着火与计算结果几乎相同，且6 4和8 2时实际最大质量变化速率略大于计算值。以上结果表明，3种生物质与煤粉混合，在5 5时生物质的抑制作用大于促进作用，不利于煤粉的燃烧。玉米秸秆和稻杆在7 3时、玉米芯在6 4和8 2时促进作用大于抑制作用，燃烧特性更好。

2.4综合燃烧特性指数

为全面评价各混合样品的燃烧情况，计算了综合燃烧特性指数S，该指标反映燃料着火和燃尽的综合特性。S值越大，则认为燃料的燃烧特性最好。定义式如下：

$$S = \frac{(dm/dt)_{\max} (dm/dt)_{\text{mean}}}{T_i^2 T_h} \quad (2)$$

式中， $(dm/dt)_{\max}$ 和 $(dm/dt)_{\text{mean}}$ 分别为最大和平均的质量变化速率，mg/min。

3种生物质在不同掺混比例下的综合燃烧特性指数如图4所示。3种生物质的燃烧特性指数远大于煤粉，其中玉米芯、玉米秸秆和稻杆的燃烧特性指数分别约为煤粉的9、6和5倍，说明生物质的燃烧活性远大于煤粉。随掺混比例的增大，不同生物质的S总体呈上升趋势，但变化大小不同。其中玉米芯的变化最大，在8 2时达到最大综合燃烧指数，且6 4和7 3的综合燃烧指数接近，即2种掺混比例对燃烧性能的影响接近。稻杆的变化最小，且在7 3时达到最大值。玉米秸秆在7 3和8 2时几乎相同并达到最大值。小范围改变掺混比例时，燃烧特性指数变化不大。这可能是由于燃烧特性指数不仅与着火温度和燃尽温度有关，还与样品在其主要燃烧过程的反应速率有关，而煤粉在焦炭燃烧阶段的反应剧烈程度高于生物质挥发分析出阶段，使不同掺混比例的混合样品出现以上现象。

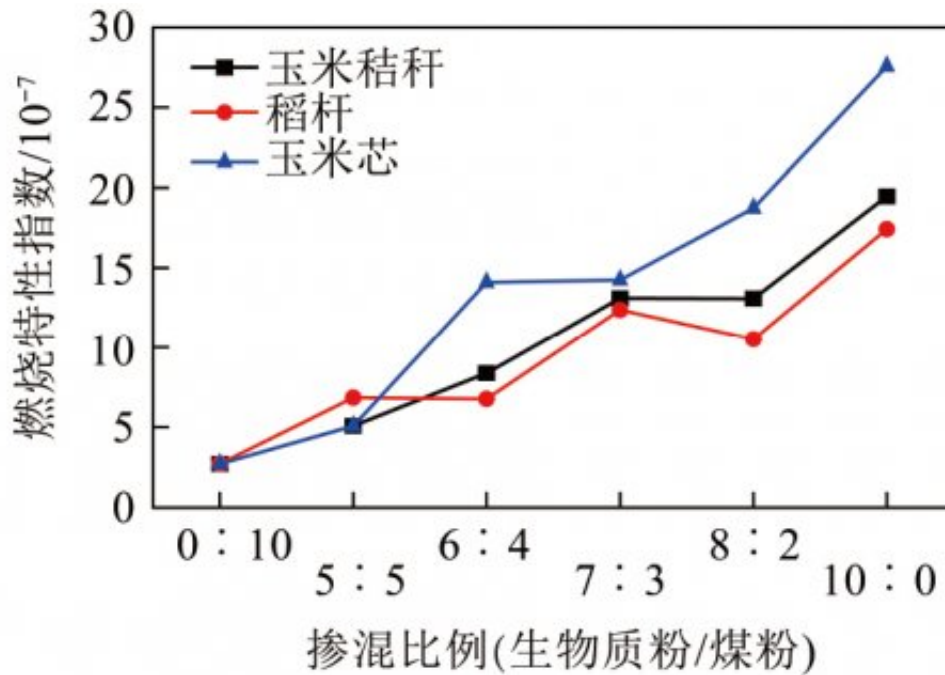


图 4 不同掺混比例的不同生物质与煤粉掺混的综合燃烧特性指数

Fig.4 Combustion characteristics index of different biomass mixed with pulverized coal at different ratios

3结论

1) 利用热重分析技术,对玉米秸秆、稻秆和玉米芯等生物质与煤粉在大掺混比例(5:5、6:4、7:3和8:2)的燃烧特性进行了试验测试。研究了生物质种类变化和掺混比例变化对混合样品热失重特性的影响,并计算和分析了混合样品的燃烧特征参数和交互作用等。掺混比例对混合样品失重曲线的影响从大到小依次为玉米秸秆、玉米芯和稻秆。随掺混比例增加,第1阶段最大失重速率逐渐增大且燃烧进程前移,第2阶段则逐渐减小。玉米秸秆和稻秆在8:2时燃尽性能较差。

2) 混合样品的着火温度和燃尽温度比纯煤粉分别下降约100 和60 。随掺混比例的增加,玉米芯着火温度逐渐减小,玉米秸秆和稻秆则先减小后增大,且均在7:3时达到最小;燃尽温度均呈现下降趋势,下降幅度由大到小分别为玉米芯、稻秆和玉米秸秆。

3) 混合样品发生不同程度的交互作用,使3种生物质均在5:5时对煤粉燃烧抑制作用大;玉米秸秆和稻秆在7:3时、玉米芯在6:4、8:2时促进作用大。

4) 3种生物质的燃烧特性指数远大于煤粉,随掺混比例的增大,玉米芯的燃烧特性指数变化最大并在8:2时达到最大值,6:4和7:3时几乎相同;稻秆的变化最小且在7:3时达到最大值;玉米秸秆在7:3和8:2时几乎相同并达到最大值。

参考文献 (References):

- [1] 朱开伟,刘贞,吕指臣,等.中国主要农作物生物质能生态潜力及时空分析[J].中国农业科学,2015,48(21):4285-4301.
ZHU Kaiwei,LIU Zhen,LYU Zhichen, et al.The ecological development potential and time-space analysis of Chinese main agricultural crop biomass energy[J].Scientia Agricultura Sinica,2015,48(21):4285-4301.
- [2] 国家能源局.国家能源局关于印发《生物质能发展“十三五”规划》的通知[EB/OL].[2016-10-28].http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201612/t20161205_2328.htm?keywords=.
- [3] 何选明,曾宪灿,张杜,等.高炉喷吹新材料的研究进展[J].燃料与化工,2015,46(2):12-18.
HE Xuanming,ZENG Xiancan,ZHANG Du, et al.Development of new material for blast furnace blowing [J]. Fuel & Chemical Processes,2015,46(2):12-18.
- [4] KRUCZEK H,TATAREK P R A.The effect of biomass on pollutant emission and burnout in co-combustion with coal [J]. Combustion Science & Technology,2006,178(8):1511-1539.
- [5] 张海清.生物质混煤燃烧及污染物排放特性研究[M].济南:山东大学,2007.
ZHANG Haiqing.Study on the combustion and pollutant emission characteristics of biomass and blending with coal [M]. Jinan:Shandong University,2007.
- [6] WAN Houpeng,CHANG Ying-hsi,CHIEN Wen-Cheng, et al. E-missions during co-firing RDF-5 with bituminous coal,paper sludge and waste tires in a commercial circulating fluidized bed co-generation boiler[J].Fuel,2008,87:761-767.
- [7] AGBOR.E,ZHANG X,KUMAR A.A review of biomass co-firing in North America[J].Renewable & Sustainable Energy Reviews,2014,40:930-943.
- [8] ABREU P,CASACA C,COSTA M.Ash deposition during the co-firing of bituminous coal with pine sawdust and olive stones in a laboratory furnace[J].Fuel,2010,89(12):4040-4048.
- [9] 肖军,段菁春,王华,等.生物质与煤共燃研究(II)燃烧性质分析[J].煤炭转化,2003,26(2):43-47.
XIAO Jun,DUAN Jingchun,WANG Hua, et al.Study on co-firing of biomass with coal part(II) analyse of their co-firing combustion performance[J].Coal Conversion,2003,26(2):43-47.
- [10] 韩娟娟.600 MW 煤粉/生物质富氧燃烧锅炉热力特性分析及模拟[M].北京:华北电力大学,2012.
HAN Juanjuan.Characteristics research and simulation of 600 MW pulverized coal boiler co-firing biomass under oxygen-enriched combustion[M].Beijing:North China Electric Power University,2012.
- [11] MOGHTADERI B,MEESRI C,WALL T F.Pyrolytic characteristics of blended coal and woody biomass [J]. Fuel,2004,83(6):745-750.
- [12] WERKELIN J,SKRIFVARS B J,ZEVENHOVEN M, et al.Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels [J].Fuel,2010,89:481-493.
- [13] LI Y S,SPIEGEL M,SHIMAD A S.Corrosion behaviour of various model alloys with NaCl-KCl coating [J].Mater Chemical

- Physics, 2005, 93; 217-223.
- [14] KASTANAKI D E, GRAMMELIS V P. Thermogravimetric studies of behavior of lignite-biomass blends during devolatilization [J]. Fuel Processing Technology, 2002, 77; 159-166.
- [15] GIL M V, CASAL D, PEVIDA C, et al. Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion [J]. Bioresource Technology, 2010, 101; 5601-5608.
- [16] WANG Cuiping, WU Yajue, LIU Qing, et al. Analysis of the behaviour of pollutant gas emissions during wheat straw/coal cofiring by TG - FT - IR [J]. Fuel Processing Technology, 2011, 92; 1037-1041.
- [17] KASTANAKI E, VAMVUKA D. A comparative reactivity and kinetic study on the combustion of coal-biomass char blends [J]. Fuel, 2006, 85(9); 1186-1193.
- [18] 闵凡飞, 张明旭. 生物质与不同变质程度煤混合燃烧特性的研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(2); 236-241.
MIN Fanfei, ZHANG Mingxu. Research on combustion characteristics of biomass and coals with different ranks [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(2); 236-241.
- [19] EDWARD Lester, MEI Gong, ALAN Thompson. A method for source apportionment in biomass/coal blends using thermo-gravimetric analysis [J]. Journal of Analytical and Applied Paralysis, 2007, 80(1); 111-117.
- [20] LUO S Y, XIAO B, HU Z Q, et al. Experimental study on oxygen-enriched combustion of biomass micro fuel [J]. Energy, 2009, 34(11); 1880-1884.
- [21] 马爱玲, 谌伦建, 黄光许, 等. 生物质与煤混烧燃烧特性研究 [J]. 煤炭转化, 2010, 33(1); 55-60.
MA Ailing, CHEN Lunjian, HUANG Guangxu, et al. Research on co-combustion of biomass and coal [J]. Coal Conversion, 2010, 33(1); 55-60.
- [22] 黄海珍, 陈海波, 苏俊林, 等. 煤与生物质混合燃烧特性及动力学分析 [J]. 节能技术, 2007, 25(1); 26-29.
HUANG Haizhen, CHEN Haiho, SU Junlin, et al. Combustion characteristics and kinetic analysis of coal-biomass blends [J]. Energy Conservation Technology, 2007, 25(1); 26-29.
- [23] 王春波, 王金星, 雷鸣. 恒温下煤粉/生物质混燃特性及 NO 释放规律 [J]. 煤炭学报, 2013, 38(7); 1254-1259.
WANG Chunbo, WANG Jinxing, LEI Ming. Co-combustion characteristics and NO emission characteristics of pulverized coal and biomass blends at constant temperature [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(7); 1254-1259.
- [24] 马仑, 汪涂维, 方庆艳, 等. 混煤燃烧过程中的交互作用: 机理实验研究与数值模拟 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(9); 2340-2346.
MA Lun, WANG Tuwei, FANG Qingyan, et al. Interaction of blended-coal combustion process; Influence of coal blending method on combustion characteristics [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9); 2340-2346.

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/165935.html>