DOI:10. 3969/j. issn. 1674-1951. 2020. 07. 004

# 热解半焦与褐煤掺烧及气体污染物排放特性 TG-FTIR研究

Study on co-combustion and gaseous pollutants emission characteristics of pyrolysis semi-coke and lignite by TG-FTIR

戴若薇<sup>1,2</sup>,赵瑞东<sup>1\*</sup>,秦建光<sup>1</sup>,陈天举<sup>1</sup>,吴晋沪<sup>1</sup> DAI Ruowei<sup>1,2</sup>,ZHAO Ruidong<sup>1\*</sup>,QIN Jianguang<sup>1</sup>,CHEN Tianju<sup>1</sup>,WU Jinhu<sup>1</sup>

(1.中国科学院青岛生物能源与过程研究所,中国科学院生物燃料重点实验室,山东青岛 266101;2.中国科学院大学,北京 100049)

(1.Key Laboratory of Biofuels, Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘 要:采用热重-傅里叶红外(TG-FTIR)联用技术对较高升温速率(100~250 ℃/min)下热解半焦与褐煤的掺烧特 性和气体污染物排放特性进行了研究。结果表明,加入褐煤可有效降低混合燃料的着火温度,缩短燃尽时间。随 褐煤掺烧比例的增加,混合燃料的着火指数、燃尽指数和综合燃烧特性指数均显著增大。提高热重试验升温速率 会增大混合燃料的着火温度和最大失重速率温度,但同时也会加快燃烧速率,提高综合燃烧特性。掺烧过程中气 体污染物的排放温度区间与其主要的热失重阶段基本对应。随褐煤掺烧比例的增加,CO2排放量逐渐降低,NO和 NO2排放量总体增大,SO2和CO排放量呈波动趋势,掺烧对NO2排放具有一定抑制作用。

关键词:热解半焦;褐煤;掺烧;热重-傅里叶红外;升温速率;气体污染物

中图分类号:X7 文献标志码:A 文章编号:1674-1951(2020)07-0028-07

Abstract: The co-combustion and gaseous pollutants emission characteristics of pyrolysis semi-coke and lignite under high heating rates (100–250 C/min) were investigated by thermogravimetric analyzer coupled with Fourier transform infrared spectrometer (TG–FTIR). Results showed that adding lignite into blends could lower the ignition temperature and shorten the burnout time of the blends. All of the index for ignition, burnout and comprehensive combustion performance increased significantly with the increment of lignite blending ratio. Higher heating rates in TG experiments would lead to a higher ignition temperature and temperature at maximum weight loss rate. Meanwhile, the burning rates would also accelerated, which resulted in improved comprehensive combustion performance. The release temperature range of gaseous pollutants was consistent with the main weight loss stages. With the increase of lignite blending ratios, CO<sub>2</sub> emission gradually decreased, while NO and NO<sub>2</sub> emission generally increased, and the SO<sub>2</sub> and CO emission fluctuated. In conclusion, co-combustion exerted certain suppression effect on NO<sub>4</sub> emission.

Keywords: pyrolysis semi-coke; lignite; co-combustion; TG-FTIR; heating rates; gaseous pollutants

# 0 引言

虽然我国煤炭资源储量相对丰富,但其中以褐 煤和次烟煤为主的低阶煤占其总储量的55%以 上<sup>[1]</sup>。低阶煤的含水量较高,热值低,且易自燃,不 便于长途运输,导致其利用较为困难,传统燃烧方 式存在效率低、污染物排放高等问题<sup>[2-3]</sup>。热解提质

收稿日期:2020-05-10;修回日期:2020-06-20

技术是一种高效、清洁的低阶煤利用方式,它通过 热解将低阶煤转化为煤气、焦油和半焦产品,实现 了低阶煤的梯级利用,有效降低了污染物排放,提 高了利用效率和经济效益<sup>[4]</sup>。近年来,随着低阶煤 热解提质技术的迅速发展,其固体产物热解半焦的 利用逐渐成为新的难题<sup>[5]</sup>。热解半焦热值高,氮、硫 元素含量低,尤其是我国神木等地区的热解半焦还 具有低灰分的特点,可作为优质燃料使用。但由于 其挥发分含量低,导致着火和燃尽困难<sup>[6]</sup>。循环流 化床燃烧技术已被证实可实现热解半焦的高效、低

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2017YFB0602003);国家 自然科学基金项目(U1610254)

污染燃烧利用<sup>[7-8]</sup>。此外,与高挥发分的燃料掺烧是 一种相对简单有效的改善热解半焦着火和燃尽特 性的技术。文献[9]在350kW中试煤粉锅炉上考察 了神木热解半焦与神华烟煤混合燃烧特性,发现随 热解半焦掺混比增大,混合燃料的着火性能变差, 主燃烧区出口NO.排放质量浓度增大,掺混高挥发 分烟煤有助于改善燃料的燃尽特性。文献[10]利 用热重分析仪和沉降炉研究了烟煤及其半焦的掺 烧特性,发现掺烧半焦会导致混合燃料的着火和燃 尽温度升高,但同时NO.的排放量也会降低,半焦的 掺烧比例不宜高于40%。文献[11]利用热重分析 仪研究了兰炭与废塑料的掺烧特性,结果发现随废 塑料掺烧比例增加,混合物的着火温度降低,平均 燃烧速率和燃烧特性指数均增大。文献[12]研究 了兰炭与生物质的热重掺烧特性,发现兰炭与生物 质混合燃烧时着火点比兰炭单独燃烧时降低近 200℃,考虑到热量释放特性,大豆秆的掺混比例宜 为20%~30%。

热重-傅里叶红外(TG-FTIR)联用技术是一种 先进的试验手段,它不仅可获得样品的热失重特 性,还可实现气体产物的实时检测,被广泛应用在 煤热解、燃烧等领域<sup>[13]</sup>。文献[14]采用TG-FTIR联 用技术研究了烟煤和半焦的混合燃烧及动力学特 性,发现加入Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>可降低反应活化能,提高燃料可 燃性,促进固定碳燃烧和CO<sub>2</sub>提前排放。目前,针对 煤燃烧过程的TG-FTIR试验研究大多采用较低的 升温速率(小于50℃/min),而对于较高升温速率下 其相关燃烧特性的研究相对较少。

基于此,本文采用TG-FTIR联用技术对较高升 温速率下热解半焦与褐煤的掺烧特性展开研究,考 察了掺混比例、升温速率对混合燃料燃烧特性和污 染物排放特性的影响规律,研究可为半焦与褐煤掺 烧工业应用提供理论和技术支持。

# 1 试验材料和方法

## 1.1 试验材料

试验所用半焦为陕西煤业化工集团的低温热 解半焦,褐煤为新疆淖毛湖褐煤,其工业分析和元 素分析见表1。热解半焦和褐煤这2种原料均先经 破碎筛分至粒径为75 μm,然后按褐煤的掺烧比例 (质量分数,下同)0%,20%,40%,60%,80%,100% 均匀混合。

表1 样品工业分析和元素分析(空气干燥基) Tab.1 Proximate and ultimate analyses of samples (air dried basis)

项目		工业分	分析/%				元素分析/%			低位发热量/
	$w(M_t)$	$w(\mathbf{V})$	w(FC)	$w(\mathbf{A})$	w(C)	w(H)	w(0)	w(N)	<i>w</i> (S)	$(MJ \cdot kg^{-1})$
热解半焦	10.20	7.96	71.97	9.87	72.45	1.29	4.94	0.87	0.38	23.04
褐煤	18.68	38.10	37.91	5.31	57.33	3.88	13.57	0.85	0.38	22.06

注:①0元素的质量分数是利用差减法,即100%- $w(M_t)-w(A)-w(C)-w(H)-w(S)-w(N)求得。$ 

## 1.2 试验装置和方法

掺烧试验在TG-FTIR联用仪中进行。其中,热 重分析采用Mettler-Toledo公司的TGA-2型热重分 析仪,红外分析采用Bruker公司的Tensor II型傅里 叶红外分析仪。每次试验时,先将样品(约10 mg) 平铺于热重坩埚中,然后分别以一定加热速率 (100,150,200,250℃/min)从室温升至1000℃并恒 温10 min,以确保样品燃烧完全。试验反应气氛为 空气,流量为60 mL/min。热重试验产生的气体经伴 热管线(250℃)直接通入傅里叶红外分析仪进行检 测分析。傅里叶红外分析仪扫描分辨率为4 cm<sup>-1</sup>, 扫描次数为8次,扫描区间为4 000~600 cm<sup>-1</sup>。

#### 1.3 数据分析方法

本研究主要采用着火温度 $t_i$ 、燃尽温度 $t_f$ 、最大 失重速率温度 $t_m$ (单位为 °C),以及着火指数 $D_i$ (单位 为 min<sup>-3</sup>)、燃尽指数 $D_f$ (单位为 min<sup>-4</sup>)和综合燃烧特 性指数S(单位为 min<sup>-2</sup>·°C<sup>-3</sup>)来评价热解半焦与褐煤 的掺烧特性。其中, $t_i$ 为TG曲线上 $t_m$ 对应点的切线 与样品起始失重点的水平延长线的交点所对应的 温度, $\mathbb{C}$ ; $t_f$ 为样品实际失重量达到其总失重量的 98%时所对应的温度<sup>[15]</sup>, $\mathbb{C}$ 。 $D_i$ , $D_f$ 和S的计算公式 如下<sup>[16]</sup>。

$$D_{\rm i} = \frac{\rm DTG_{\rm max}}{t_1 t_2} , \qquad (1)$$

$$D_{\rm f} = \frac{\rm DTG_{\rm max}}{\Delta t_{1/2} t_2 t_3} , \qquad (2)$$

$$S = \frac{\text{DTG}_{\text{max}}\text{DTG}_{\text{mean}}}{t_i^2 t_f} , \qquad (3)$$

式中:DTG为失重速率,DTG<sub>max</sub>为最大失重速率, DTG<sub>mean</sub>为平均失重速率,%/min; $t_1$ , $t_2$ 和 $t_3$ 分别为着 火温度、最大失重速率温度和燃尽温度所对应的时 间,min; $\Delta t_{1/2}$ 为DTG/DTG<sub>max</sub>=0.5所对应的时间区间, min。

掺烧过程中气体污染物(CO2, CO, NO, NO2和

SO<sub>2</sub>)的排放特性主要通过红外谱图上其相应特征吸 收峰的吸收强度确定<sup>[17-18]</sup>。CO<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub> 的典型特征吸收峰值分别为2 360,2 176,1 520, 1762和1342 cm<sup>-1</sup>。

# 2 结果与讨论

#### 2.1 燃烧特性

### 2.1.1 褐煤掺烧比例影响

图1所示为不同褐煤掺烧比例下混合燃料的 TG和DTG曲线(升温速率为100℃/min)。由图1a 可知,在相同温度下,随褐煤掺烧比例的增加,混合 燃料的失重量逐渐增大,即热重曲线向低温区移 动。此外,由于褐煤的灰分含量较低,随褐煤掺烧 比例的增加,混合燃料燃烧后残余物的质量也逐渐 降低。由图1b可知,混合燃料主要存在3个明显的

失重阶段。第1个失重阶段对应的失重峰温度为 110~130℃,主要是由于水分脱除导致。第2个失重 阶段为挥发分析出和燃烧阶段,对应的失重峰温度 为430~450℃。随褐煤掺烧比例的增加,混合燃料 在此阶段的最大失重速率也逐渐增大。这主要是 由于褐煤中挥发分含量远高于热解半焦导致。特 别地,由于热解半焦中挥发分较低,其在此阶段并 没有明显失重峰。第3个失重阶段为固定碳燃烧阶 段。常规低升温速率下的固定碳燃烧DTG曲线存 在明显的峰值<sup>[19]</sup>,而本研究由于升温速率较高,导 致固定碳燃烧阶段整体的失重温度区间较宽(600~ 100 ℃),峰值并不显著。随褐煤掺烧比例的增加, 混合燃料固定碳燃烧阶段的时间逐渐缩短,这主要 是因为热解半焦的减少降低了混合燃料中固定碳 的比例。



Fig. 1 TG and DTG curves at different blending ratios of lignite

表2为不同褐煤掺烧比例下燃烧特征参数。由 表2可知,随褐煤掺烧比例的增加,混合燃料的t和 t\_先逐渐下降,而当褐煤掺烧比例高于40%时,混合 燃料的t<sub>i</sub>和t<sub>m</sub>变化相对较小。此时,相比纯热解半 焦,t,和t,分别下降约150℃和360℃。相应地,混合 燃料的D.随褐煤掺烧比例的增加而逐渐增大。这 说明混合燃料的着火特性得到了明显改善。由于 升温速率较快,除纯褐煤工况以外,其余工况在程 序升温阶段并未燃烧完全,因此其燃尽温度均取恒 温燃烧时的1000℃。

但由表2可知,随褐煤掺烧比例的增加,混合燃 料的t,逐渐缩短,D,逐渐增大,这说明混合燃料的燃 尽特性也得到显著改善。这一方面是因为褐煤中 挥发分含量较高,其在掺烧过程中易于析出和燃 烧。燃烧放出的热量可以预热半焦,促使其提前着 火。另一方面,挥发分析出和燃烧后会增大剩余燃 料的孔隙率,促进热解半焦与空气的接触,从而提 高热解半焦中固定碳的燃烧速率。

此外,由表2可知,随褐煤掺烧比例的增加,混 合燃料的综合燃烧特性指数也逐渐增大。综上所 述,褐煤的加入可显著提高热解半焦的燃烧特性。

表2 不同褐煤掺烧比例下燃烧特征参数 Tab. 2 Co-combustion characteristic parameters at different lig

nite	blend	ling	ratios
------	-------	------	--------

余数	掺烧比例/%						
2 X C	0	20	40	60	80	100	
$t_i/^{\circ}C$	505	410	352	360	352	358	
$t_{\rm m}/^{\circ}{\rm C}$	792	785	432	435	428	432	
$t_{\rm f}$ /°C	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	988	
$t_3/\min$	13.22	12.40	11.65	10.85	10.38	9.58	
$\mathrm{DTG}_{\mathrm{max}}/(\% \boldsymbol{\cdot} \mathrm{min}^{-1})$	11.75	11.09	11.07	14.75	17.37	21.55	
$D_{i} \times 10^{-2} / \text{min}^{-3}$	0.33	0.39	0.86	1.10	1.36	1.64	
$D_{\rm f} \times 10^{-4} / {\rm min}^{-4}$	1.41	1.44	2.83	4.60	6.30	9.42	
$S \times 10^{-11} / (\min^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-3})$	4.41	6.24	8.66	12.03	15.63	21.04	

2.1.2 升温速率影响

图2所示为不同升温速率下混合燃料的TG和

DTG曲线(褐煤掺烧比例为40%),相应燃烧特征参数见表3。由图2可知,随升温速率逐渐增大,混合燃料的TG曲线逐渐向高温区移动,对应表3中混合燃料的t<sub>i</sub>和t<sub>m</sub>均逐渐增大。这说明热重试验过程中,高升温速率会导致混合燃料的着火和燃烧滞后。这主要是因为升温速率越高,样品颗粒内部的传热阻力就越大,传热滞后效应就越明显<sup>[20]</sup>。由图2和表3还可得出,混合燃料的最大失重速率随升温速率的增大而逐渐增大,燃尽时间t<sub>3</sub>则逐渐缩短。这意味着高升温速率会提高混合燃料的燃烧反应速率。因此,表3中混合燃料的S随升温速率的增大



表 3 不同升温速率下的燃烧特征参数 Tab. 3 Co-combustion characteristic parameters at different heating rates

including rates						
<i>会 */r</i>	升温速率/(℃•min <sup>-1</sup> )					
参奴	100	150	200	250		
$t_i$ /°C	352	353	357	368		
$t_{\rm m}/^{\circ}{\rm C}$	443	445	460	480		
t₁/°C	1 000	1 000	1 000	1 000		
$t_3/\min$	11.18	9.12	8.63	8.40		
$\mathrm{DTG}_{\mathrm{max}}/(\% \cdot \mathrm{min}^{-1})$	11.93	13.98	15.84	16.86		
$S \times 10^{-11} / (\min^{-2} \cdot C^{-3})$	9.21	13.16	14.54	14.38		



Fig. 2 TG and DTG curves at different heating rates

#### 2.2 污染物排放特性

110

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

2

TG/%

#### 2.2.1 CO和CO<sub>2</sub>排放

图3所示为不同褐煤掺烧比例下,CO和CO<sub>2</sub>排 放特性(升温速率为100℃/min)。不同褐煤掺烧比 例下,混合燃料的CO和CO<sub>2</sub>排放特性随温度和时间 的变化趋势基本一致。由图3a可知,CO主要存在2 个排放阶段。第1阶段峰值温度为520~650℃,第2 阶段峰值温度为850~1000℃,这与图1中混合燃料 的主要失重阶段基本对应。但由于升温速率较高, CO排放峰值温度相比失重峰值温度存在一定滞后。 而由图3b可知,CO<sub>2</sub>仅存在1个排放峰值,温度为 930~1000℃。此外,随着褐煤掺烧比例的增加,CO 和CO<sub>2</sub>的排放峰值温度均逐渐降低,这进一步验证 了2.1.1节所述,褐煤的加入可以促进混合燃料提 前燃烧,并加快燃烧反应速率。

为进一步定量研究不同褐煤掺烧比例下污染物排放特性的变化,对所获得的污染物排放曲线进行了积分,并将总积分面积除以热重试验所用样品质量,获得了单位质量样品下污染物的排放量(无量纲值),结果见表4。由表4可知,随褐煤掺烧比例的增大,混合燃料CO<sub>2</sub>的排放量逐渐降低,而CO的

排放量则先降低,然后呈波动趋势,但变化幅度相 对较小。这主要是由于热解半焦中的碳含量高于 褐煤所致。

#### 表4 不同褐煤掺烧比例下气体污染物排放量 Tab. 4 Emission of gaseous pollutants at different lignite

hl	anding	ratios	

Stending runos							
掺烧比例/%	CO	$CO_2$	NO	$\mathrm{NO}_2$	$SO_2$		
0	1.260	43.934	0.709	0.854	0.673		
20	1.081	41.124	0.697	0.935	0.652		
40	1.129	39.307	0.744	1.014	0.747		
60	1.043	36.229	0.758	1.164	0.720		
80	1.069	34.341	0.792	1.201	0.803		
100	1.042	31.365	0.884	1.495	0.832		

2.2.2 NO和NO<sub>2</sub>排放

图4所示为不同褐煤掺烧比例下,NO和NO<sub>2</sub>排 放特性(升温速率为100℃/min)。由图4可知,NO 和NO<sub>2</sub>的排放特性基本一致。对于纯褐煤,NO和 NO<sub>2</sub>主要的排放峰值温度约为481℃。此外,在 630~660℃范围内也存在稍小的NO和NO<sub>2</sub>排放峰。 而纯热解半焦NO和NO<sub>2</sub>的排放则呈明显的单峰特 性,对应的峰值温度约为974℃。随褐煤掺烧比例 的增大,低温区的NO和NO<sub>2</sub>排放峰值逐渐增大,而 高温区的排放峰值则逐渐降低。这主要与氮元素 在原料中的赋存形态有关。对于热解半焦,其挥发 分含量较低,氮元素主要以焦炭氮的形式存在,因 此其排放温度较高。而对于褐煤,由于其挥发分和 固定碳含量接近,因此氮元素是以挥发分氮和焦炭 氮2种形式存在。

对比图1可以看出,褐煤燃烧过程中NO和NO<sub>2</sub>的排放温度区间与其挥发分和固定碳的燃烧失重 阶段基本一致。









由表4中NO和NO<sub>2</sub>排放量的变化可知,随褐煤 掺烧比例增大,NO的排放量先略有降低然后逐渐 升高,而NO<sub>2</sub>的排放量则是单调增加。然而,由表1 可知,褐煤氮含量略低于热解半焦。这说明褐煤燃 烧过程中氮元素更容易生成NO和NO<sub>2</sub>。为进一步 研究掺烧过程中热解半焦与褐煤的相互作用对污 染物排放特性的影响,基于热解半焦和褐煤单独燃 烧时的污染物排放数据,对假设无相互作用时不同 掺烧比例下污染物排放的理论值进行了加权计算, 结果见表5。对比表4和表5可知,不同掺烧比例 下,NO和NO<sub>2</sub>排放的试验值均低于其理论计算值, 这说明掺烧过程中存在对NO和NO<sub>2</sub>排放的抑制作 用。这主要是因为焦炭对NO<sub>4</sub>具有较强的异相还原 作用<sup>[21]</sup>,其在燃烧过程会抑制NO<sub>4</sub>的生成。

表5 NO,和SO,排放量加权计算值

 Tab. 5
 Weighted NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emissions at different lignite

blending ratios							
掺烧比例/%	NO	$\mathrm{NO}_2$	$SO_2$				
20	0.744	0.982	0.705				
40	0.779	1.110	0.737				
60	0.814	1.239	0.768				
80	0.849	1.367	0.800				

2.2.3 SO<sub>2</sub>排放

图5所示为不同褐煤掺烧比例下,SO<sub>2</sub>排放特性 (升温速率为100℃/min)。由图5可知,SO<sub>2</sub>的排放 特性整体与NO<sub>4</sub>较为相似。褐煤燃烧过程中SO<sub>2</sub>排 放温度较低,排放峰值温度约为523℃。此外,在 900℃附近也有排放峰出现。而纯热解半焦燃烧时 SO<sub>2</sub>的排放峰值温度约为1000℃,这与图1中二者 主要的失重区间基本对应。随褐煤掺烧比例增加, SO<sub>2</sub>的主要排放温度区间逐渐向低温区移动。由表 4和表5中SO<sub>2</sub>排放量的变化可知,随褐煤掺烧比例 增大,SO<sub>2</sub>排放量总体呈波动趋势,相互作用的变化 规律也不明确。但仍可以看出,虽然热解半焦的硫 含量与褐煤相同,其SO<sub>2</sub>排放量却相对较低。这主 要是因为本研究所采用热解半焦的CaO和K<sub>2</sub>O等碱 土金属和碱金属含量较高,具有较强的自脱硫 效果<sup>[22]</sup>。



Fig. 5 SO<sub>2</sub> emission curves with different lignite blending ratios

## 3 结论

本文采用TG-FTIR联用技术研究了在较高升 温速率下热解半焦与褐煤掺烧特性和气体污染物 排放特性,主要结论如下。

(1)随褐煤掺烧比例的增加,热解半焦与褐煤 混合燃料的着火特性、燃尽特性和综合燃烧特性均 得到明显改善。

(2)热重试验升温速率增大,混合燃料的着火 温度和最大失重速率温度升高,但燃烧反应速率加快,综合燃烧特性提高。

(3)气体污染物的排放特性与其主要的热失重 阶段基本对应。随褐煤掺烧比例的增加,CO<sub>2</sub>排放 量逐渐降低,NO和NO<sub>2</sub>排放量总体上升,SO<sub>2</sub>和CO 排放量呈波动趋势,掺烧对NO<sub>x</sub>排放具有一定抑制 作用。

#### 参考文献:

- [1] 巩志强.低阶煤热解半焦的燃烧特性和NO<sub>x</sub>排放特性试验研究[D].北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所),2016.
- [2]周琦.低阶煤提质技术现状及完善途径[J].洁净煤技术, 2016,22(2):23-30.

ZHOU Qi.Status and improvement approach of low rank coal

upgrading technologies[J].Clean Coal Technology, 2016, 22 (2):23-30.

- [3]王娜.提质低阶煤热解特性及机理研究[D].北京:中国矿 业大学,2010.
- [4]XUE F F, LI D, GUO Y T, et al. Technical progress and prospect of low lank coal pyrolysis in China [J]. Energy Technology, 2017, 5(11):1897-1907.
- [5]ZHU S J, LYU Q G, ZHU J G, et al. Preheating combustion characteristics of ultra-low volatile carbon-based fuel [J]. Journal of Thermal Science 2019, 28(4):772-779.
- [6]FENG Y C, XU S P. Blue-coke production technology and the current state-of-the-art in China [J]. Carbon Resources Conversion, 2020(3):82-94.
- [7]XIAO Y, SONG G L, SONG W J, et al. Influence of feeding position and post-combustion air arrangement on NO<sub>x</sub> emission from circulating fluidized bed combustion with post-combustion[J].Fuel, 2020, 269:117394.
- [8]ZHU S J, LYU Q G, ZHU J G, et al. Effect of air distribution on NO<sub>x</sub> emissions of pulverized coal and char combustion preheated by a circulating fluidized bed[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(7): 7909–7915.
- [9]彭政康,闫永宏,孙刘涛,等.掺混比对半焦与烟煤混合燃 烧及 NO<sub>x</sub>排放特性影响的试验研究[J].动力工程学报, 2020,40(5):356-364.

PENG Zhengkang, YAN Yonghong, SUN Liutao, et al. Effect of blend ratio on combustion characteristics and NO<sub>x</sub> emission in co-firing process of semi-char and bituminous coal [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(5):356–364.

- [10]HU L L, ZHANG Y, CHEN D G, et al. Experimental study on the combustion and NO<sub>x</sub> emission characteristics of a bituminous coal blended with semi-coke [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 160:113993.
- [11]邢相栋,王莎,张秋利,等.废塑料与兰炭混合燃烧动力 学分析[J].煤炭转化,2019,42(4):50-57.
  XING Xiangdong, WANG Sha, ZHANG Qiuli, et al.
  Kinetic analysis of mixed combustion of waste plastics and semi-coke[J].Coal Conversion,2019,42(4):50-57.
- [12]孙环.兰炭与生物质掺混燃烧特性研究[D].秦皇岛:燕山大学,2019.
- [13]SONG H J, LIU G R, ZHANG J Z, et al. Pyrolysis characteristics and kinetics of low rank coals by TG-FTIR method[J].Fuel Processing Technology, 2016, 156: 454-460.
- [14]户英杰,王志强,程星星,等.基于TG-FTIR研究Fe<sub>2</sub>0<sub>3</sub>对 烟煤/半焦混合燃烧特性和动力学的影响[J].工程热物 理学报,2019,40(4):938-944.

HU Yingjie, WANG Zhiqiang, CHEN Xingxing, et al. Investigation into the effect of  $Fe_2O_3$  on combustion characteristics and kinetic of coal/char co-combustion based on TG-FTIR [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(4):938-944.

- [15]ZHANG K H, ZHANG K, CAO Y, et al. Co-combustion characteristics and blending optimization of tobacco stem and high-sulfur bituminous coal based on thermogravimetric and mass spectrometry analyses[J].Bioresource Technology, 2013,131C:325-332.
- [16]张圆圆.煤矸石燃烧特性及影响机制研究[D].太原:山 西大学,2016.
- [17]TIAN L N, YANG W, CHEN Z H, et al. Sulfur behavior during coal combustion in oxy-fuel circulating fluidized bed condition by using TG-FTIR[J].Journal of the Energy Institute, 2016, 89(2):264-270.
- [18] 汪曌. 基于 TG-FTIR 及 PY-GC/MS 的印染污泥催化热解 机理研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [19] 巩志强,夏红德,刘志成,等.煤焦燃烧含氮硫气体生成的TG-MS定量分析[J].煤炭转化,2016,39(1):86-91.
   GONG Zhiqiang, XIA Hongde, LIU Zhicheng, et al.
   Quantitative study on nitrogen and sulfur gas emissions in combustion of shenmu coal and shenmu char by TG-MS

[J].Coal Conversion, 2016, 39(1):86–91.

- [20]XIE Z Q, MA X Q. The thermal behaviour of the cocombustion between paper sludge and rice straw [J]. Bioresource Technology,2013,146C:611-618.
- [21]ZHAO K, GLARBORG P, JENSEN A D.NO reduction over biomass and coal char during simultaneous combustion [J]. Energy & Fuels, 2013, 27(12):7817–7826.
- [22]LASEK J, KAZALSKI K. Sulfur self-retention during cocombustion of fossil fuels with biomass [J]. Energy & Fuels, 2014, 28(4):2780-2785.

(本文责编:张帆)

#### 作者简介:

戴若薇(1996—),女,辽宁大连人,在读硕士研究生,从 事低阶煤高效低污染燃烧利用相关工作(E-mail: dairw@qibebt.ac.cn)。

赵瑞东\*(1986—),男,山东泰安人,助理研究员,博士, 从事固体含碳燃料热解、气化、燃烧利用和能源系统集成与 优化等领域相关工作(E-mail:zhaord@qibebt.ac.cn)。

# 

# "面向电力用户的安全计算"专刊征稿启事

面向电力用户的安全计算是智能电网(包括智慧电厂)和智慧能源互联网领域的新兴发展方向。基于大数据、人工智能、 物联网等构建的能源互联网中大量电力终端被投入使用,在"发电-变电-输电-配电-用电"过程中,终端设备起着重要作用。 虽然当前能源互联网中的电力终端基本支持网络接入和访问,但是通信过程中无法保障安全性,如部分设备的加密通讯密钥 可直接从注册表读出,本地管理协议没有身份认证机制,通讯协议未加密或加密方式过于简单;接入网络时访问数据可能会被 窃取或者篡改,访问系统面临多方威胁且普遍存在脆弱性;终端通信可能会遭到各种类型的攻击,如中间人攻击、DDoS攻击 等;基于电表细粒度读数的大数据分析会泄露家庭用电隐私;数据注入攻击导致电力生产和调度数据出现偏差等。

为此,《华电技术》作为行业科技创新、技术交流平台,特推出"面向电力用户安全计算专刊",并邀请上海电力大学教授田 秀霞、华北电力大学副教授龚钢军共同担任特约主编,欢迎业内同仁踊跃投稿。

#### 一、征文范围

(1)电力终端安全:新能源电厂PLC设备的安全分析;电力终端身份认证;"新基建"下电力终端设施的安全管控;移动电力作业终端的安全防护技术;可信计算在电力终端的应用;保护隐私的终端数据安全采集。

(2)用户端安全:电力用户数据的追溯与安全监管;电力用户的安全脆弱性评价与分析;用电数据注入攻击与防护;用户用 电异常行为检测;基于机器学习/深度学习的窃电检测;基于云-边-端的电力用户安全协同管理。

(3)网络安全:传输数据机密性和完整性;流量异常检测;电力协议攻击与安全防御;新能源电厂的网络安全监测技术;等 保2.0下能源电力网络空间的安全态势感知。

(4)边缘计算安全:边缘计算与区块链的边缘协同与安全;边缘计算中的数据安全与隐私保护;边缘网关安全技术;边缘计 算的信息安全与功能安全;综合能源服务系统的安全防护技术;微网交易安全。

#### 二、时间进度

专刊拟于2020年8月31日截稿,2020年8期(8月25日)后择期出版。

#### 三、征文要求

(1)专题只收录未公开发表的论文,拒绝一稿多投。作者对论文内容真实性和客观性负责。

(2)按照《华电技术》论文格式要求使用Word软件排版,请登录《华电技术》在线采编系统(http://www.hdpower.net)在下载 中心下载论文模板。

(3)请保留论文图片、曲线和表格原始文件,并在投稿时按规定提交。

(4)论文作者应遵守相关学术不端规定。

#### 四、投稿方式

(1)在线投稿(推荐):登录《华电技术》在线采编系统(http://www.hdpower.net),完成在线全文投稿。

(2)邮箱投稿:xxtian@shiep.edu.cn(田教授); gong@ncepu.edu.cn(龚教授); hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)

(3) 咨询联系:刘 芳 0371-58501060 13838002988;杨满成 010-63918755 13801175292