

# 新疆高碱煤旋风燃烧火焰中气相碱金属的检测与分析

徐志强<sup>1</sup>, 李东阳<sup>2</sup>, 刘玺璞<sup>2</sup>, 周强<sup>3</sup>

(1. 北方魏家峁煤电有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 010308; 2. 西安西热锅炉环保工程有限公司, 陕西西安 710054;  
3. 北方联合电力有限责任公司临河热电厂, 内蒙古巴彦淖尔 010020)

**摘要:**新疆高碱煤中富含的碱金属易挥发进入气相, 准确测量火焰中气相碱金属浓度是调控新疆高碱煤燃烧的重要基础。本文采用光谱分析方法对准东高碱煤旋风燃烧火焰中气相 Na、K 离子体积分数进行了测量。结果表明: 在可见光波段, Na 的特征谱线为 589 nm, K 的特征谱线为 765.9 和 769.3 nm, Na、K 离子特征谱线辐射强度与气相 Na、K 离子体积分数成正比关系; 旋风燃烧温度下, 煤中绝大部分水溶性的 Na 离子和全部的 K 离子会释放进入气相, 该过程不受配风方式和氧体积分数的影响; 在旋风炉尾部, 气态 Na、K 离子体积分数降低, 碱金属由气相向固相迁移。

**关键词:** 高碱煤; 旋风燃烧; 碱金属; 光谱分析; 检测

中图分类号: TK221 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.07.015

[引用本文格式] 徐志强, 李东阳, 刘玺璞, 等. 新疆高碱煤旋风燃烧火焰中气相碱金属的检测与分析[J]. 热能动力工程, 2022, 37(7): 111-115. XU Zhi-qiang, LI Dong-yang, LIU Xi-pu, et al. Detection and analysis of gaseous alkali metals of Xinjiang high-alkali coal combustion flame in cyclone furnace[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(7): 111-115.

## Detection and Analysis of Gaseous Alkali Metals of Xinjiang High-Alkali Coal Combustion Flame in Cyclone Furnace

XU Zhi-qiang<sup>1</sup>, LI Dong-yang<sup>2</sup>, LIU Xi-pu<sup>2</sup>, ZHOU Qiang<sup>3</sup>

(1. North Weijiamao Coal and Power Co. Ltd., Ordos, China, Post Code: 010308; 2. Xi'an TPRI Boiler Environmental Protection Engineering Co. Ltd., Xi'an, China, Post Code: 710054; 3. Linhe Thermal Power Plant of United North Power Co. Ltd., Bayannaer, China, Post Code: 010020)

**Abstract:** The alkali metals in Xinjiang high-alkali coal can easily volatilize and enter the gas phase, thus the accurate measurement of the gaseous alkali metal concentration in the flame is an important basis for regulating and controlling the combustion of Xinjiang high-alkali coal. In this paper, the spectral analysis method is used to measure the volume fractions of gaseous Na and K ions in the Zhundong high-alkali coal cyclone combustion flame. The results show that in the visible spectral bands, the characteristic spectral line of Na is at 589 nm, and those of K are at 765.9 nm and 769.3 nm. The radiation intensities deduced from the characteristic spectral lines of Na and K are proportional to the volume fractions of gaseous Na and K ions. At the temperature of cyclone combustion, most water-soluble Na and all K ions in coal will be released into the gas phase, which is not affected by air distribution mode and oxygen volume fraction. At the tail of the cyclone furnace, the volume fractions of the gaseous Na and K ions decrease, indicating that the alkali metals migrate from the gas phase to the solid phase.

**Key words:** high-alkali coal, cyclone combustion, alkali metal, spectral analysis, detection

收稿日期: 2021-03-31; 修订日期: 2021-04-05

基金项目: 西安西热锅炉环保工程有限公司科技项目(GA-21-TZK07)

**Fund-supported Project:** Science and Technology Program of Xi'an TPRI Boiler Environmental Protection Engineering Co., Ltd(GA-21-TZK07)

作者简介: 徐志强(1970-), 男, 内蒙古乌兰察布人, 北方魏家峁煤电有限责任公司高级工程师。

## 引言

一些高碱煤煤灰中  $\text{Na}_2\text{O}$  含量总体在 2% 以上,有的矿区甚至高达 10%, 远高于国内其他地区动力用煤<sup>[1]</sup>。煤中的钠和钾等碱土金属易引发沾污、高温腐蚀和燃烧器结渣等问题,对锅炉的安全运行产生不利影响<sup>[2]</sup>。

煤中的碱金属物质在煤的热解过程中会发生不同形态之间的转化,以气相形式析出的碱金属主要是可溶形式的碱金属。Wang 等人<sup>[3]</sup> 研究准东煤在热解过程中 Na 的释放与转化规律时发现,大部分水溶性 Na 在热解过程中会挥发到气相中,部分水溶性 Na 则转化为不溶形式。Li 等人<sup>[4]</sup> 研究发现燃烧温度对高碱煤中钠的释放和转化有明显的影响,在 600 ~ 800 °C 温度区间,大部分钠以 NaCl 的形式被释放到气相中。Oleschko 等人<sup>[5]</sup> 利用 Factsage 软件模拟碱金属气相成分,并与高压质谱分析仪检测结果进行对比。Blasing 等人<sup>[6]</sup> 利用分子束质谱仪定性及半定量地检测了褐煤在燃烧和气化条件下碱金属的释放规律。刘建华等人<sup>[7]</sup> 利用试验台研究了准东煤在燃烧过程中碱金属的迁移路径。卢琪等人<sup>[8]</sup> 进行了灰渣在 200 ~ 800 °C 直剪试验,研究了高碱金属煤燃烧过程中的渣体抗剪特性。

高碱煤中富含的碱金属会在低温受热面上生成低熔点共熔物,引起积灰和结渣<sup>[9]</sup>。为降低进入炉膛尾部烟气中碱金属浓度,采用液态排渣旋风炉燃用高碱煤。旋风炉中较细的煤粉在旋风筒中悬浮燃烧,而较大的颗粒被甩向筒壁。高温下灰分呈熔融状态,在旋风筒壁面形成一层液态渣膜,液渣层与碱金属能够相互作用<sup>[10]</sup>。李明强等人<sup>[11]</sup> 研究发现,在旋风炉中液渣可以捕捉高碱煤中 Na、K,使其游离到液渣的 Si-Al 体系中,形成硅铝复合盐。周广钦等人<sup>[12]</sup> 研究了准东高钠煤在液态排渣旋风炉上的燃烧及沾污特性,研究发现,钠在旋风炉尾部的飞灰中富集,液渣中碱金属元素含量低于原煤灰。

为构建碱金属迁移的封闭路径,需要确定气相中碱金属浓度。目前,灰渣中碱金属浓度可通过能谱或色谱方法检测,而气相中碱金属浓度的在线检

测依然是个难点问题。燃烧火焰中气态碱金属会发射特征光谱,光谱强度与燃烧温度和碱金属浓度有关。本文将采用光谱分析的方法,从 Na、K 特征谱线中反演气态 Na、K 盐浓度,从而揭示新疆高碱煤旋风燃烧时碱金属的释放和迁移规律。

## 1 试验系统

实验在一台立式旋风炉上开展,如图 1 所示,旋风筒高 1 100 mm,筒径 300 mm,设计热功率为 100 kW。

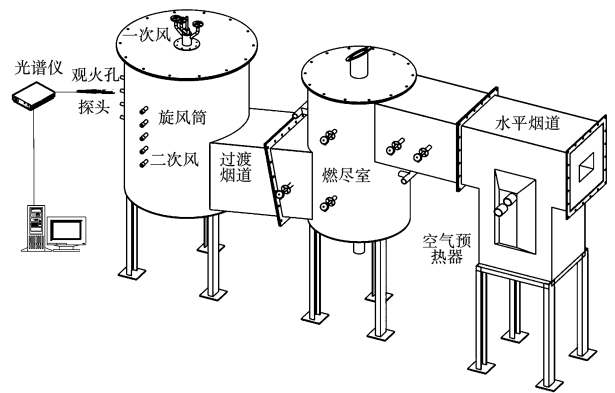


图 1 实验系统

Fig. 1 Schematic diagram of experiment system

一次风携带煤粉由筒顶向下喷入,二次风分为两路,一路送入顶部燃烧器,另一路作为助燃风由筒壁切向分级送入。分级二次风共包含 5 个风口,每级二次风量可调。烟气从旋风筒下部通过过渡烟道进入燃尽室中,过渡烟道内设置捕渣管,以降低烟气中的飞灰含量。SOFA 风在燃尽室内通入,促进焦炭燃尽。燃尽室尾部依次连接水平烟道、空气预热器、旋风除尘器和布袋除尘器,对烟气进行降温净化处理后排出。

沿旋风筒筒长方向布置有 4 个观火孔,将光谱仪探头布置在观火孔外部,采集炉内不同位置处的火焰光谱信号。为消除火焰脉动的影响,每个采样间隔内均连续采集 10 组光谱信号并取平均值。

试验煤样为新疆准东天池煤,煤灰中  $\text{Na}_2\text{O}$  质量分数为 2.79%,  $\text{K}_2\text{O}$  质量分数为 0.42%, 碱酸质量比为 2.35, 变形温度为 1 403 K, 煤灰流动温度为 1 473 K。

## 2 火焰光谱信号及标定

光谱仪检测到的高碱煤燃烧火焰在可见光波段内的辐射光谱如图 2 所示。光谱仪响应的波段范围为 200 ~ 1 100 nm,当波长大于 900 nm 时信号噪声较大,因此取有效的波长检测范围为 200 ~ 900 nm。谱线在 589, 765. 9 和 769. 3 nm 3 个波长处出现尖峰。

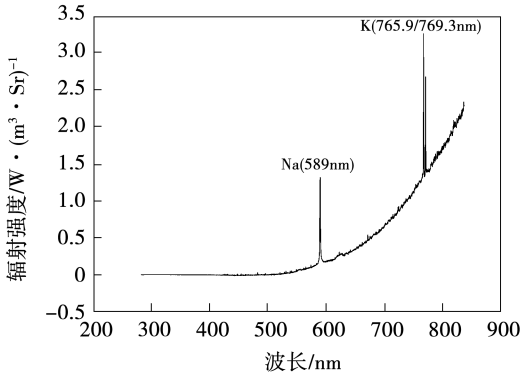


图 2 高碱煤燃烧火焰光谱信号

Fig. 2 Radiation spectrum signals of high-alkali coal combustion flame

采用主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)法分离检测谱线<sup>[13]</sup>,得到连续谱线和特征谱线,如图 3 所示。连续谱线主要表征了火焰中颗粒物的辐射,谱线强度由火焰温度决定,而特征谱线则主要来自激发态的原子或离子辐射<sup>[14]</sup>,其中 589 nm 波长处为钠的原子或离子特征谱线,765. 9 和 769. 3 nm 波长处为钾的原子或离子特征谱线。特征谱线由火焰中气态 Na、K 离子体积分数和火焰温度共同决定,经过 PCA 分离后,谱线对应的辐射强度仅与体积分数有关。

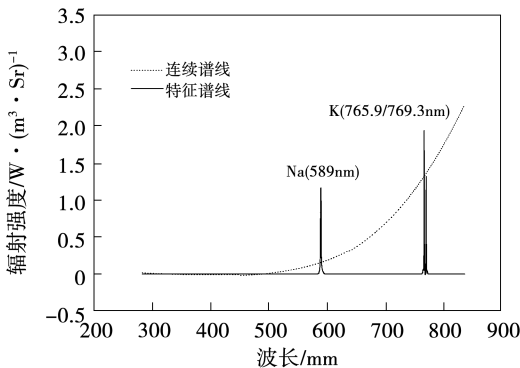


图 3 火焰辐射光谱分离

Fig. 3 Separation of flame radiation spectrum

为建立特征谱线辐射强度与火焰中气态 Na、K 离子体积分数的定量关系,将混合给定质量浓度 NaCl 和 KCl 的混合溶液通过雾化器喷入丙烷火焰中。假定液相中的 Na、K 离子全部挥发成为气态,调整 NaCl 和 KCl 溶液质量浓度并采集火焰光谱信号<sup>[15]</sup>,如图 4 和图 5 所示。

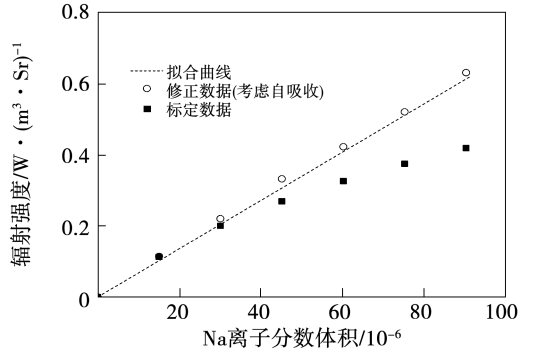


图 4 钠的光谱标定曲线

Fig. 4 Spectral calibration curves of sodium

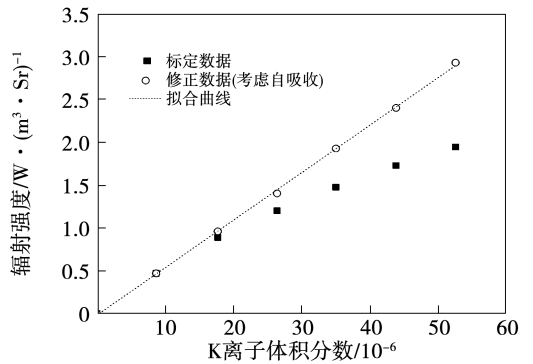


图 5 钾的光谱标定曲线

Fig. 5 Spectral calibration curves of potassium

在低体积分数下,特征谱线辐射强度与火焰中钠、钾离子体积分数之间存在线性关系,但在高体积分数下可以观察到明显的自吸收现象,这导致拟合曲线是一条非线性曲线。根据 Beer-Lambert 定律修正火焰的自吸收<sup>[16]</sup>,并对修正后的参数点进行拟合得到特征谱线辐射强度与火焰中气态 Na、K 离子体积分数的比例关系:

$$I_{Na,589\text{ nm}} = 6.79 \times 10^6 c_{Na} \quad (1)$$

$$I_{K,765.9\text{ nm}} = 5.5 \times 10^7 c_K \quad (2)$$

式中: $I_{Na,589\text{ nm}}$ —钠在 589 nm 处的特征谱线辐射强度, $W/(m^3 \cdot Sr)^{-1}$ ;  $c_{Na}$ —火焰中 Na 离子的体积分数, $10^{-6}$ ;  $I_{K,765.9\text{ nm}}$ —K 在 765.9 nm 处的特征谱线辐

射强度,  $W/(m^3 \cdot Sr)^{-1}$ ;  $c_K$ —火焰中 K 离子的体积分数,  $10^{-6}$ 。

可以看到,修正自吸收后,谱线辐射强度与气态 Na、K 离子体积分数成正比例关系。

### 3 实验结果及分析

试验工况如表 1 所示。总过量空气系数设定为 1.1,燃烧器处一次风和二次风比例为 40%,调节切向二次风和 SOFA 风量控制旋风筒内氧体积分数。共设置 5 组切向二次风的配风方式,分别对应不同的喷口位置组合,各工况下均测定氧体积分数和火焰温度。可以看到,配风方式和氧体积分数对火焰温度有较大影响。配风方式中 1 表示第一级二次风口,2 表示第二级二次风口,4 表示第四级二次风口。

表 1 试验工况

Tab. 1 Experimental conditions

工况	配风方式(二次风喷口)	O <sub>2</sub> 体积分数/%	火焰温度/K
1	1+2	1.29	1 691
2	1+2	3.40	1 743
3	1+4	2.21	1 698
4	1+2+4	2.42	1 728
5	1+2+4	1.76	1 716

在筒长 0.32 m 处(对应炉膛主燃区)采集 5 个工况下的火焰光谱信号,如图 6 所示。不同工况下火焰光谱的强度和斜率有较大变化,但均在 589 nm 处检测到 Na 的一条特征发射光谱,在 765.9 和 769.3 nm 处检测到 K 的两条特征发射光谱。

从火焰光谱信号中提取钠、钾离子的特征谱线辐射强度,可以得到 5 个工况下火焰中钠、钾离子的体积分数,如图 7 所示。不同配风方式和氧体积分数下,主燃区气相中钠、钾离子体积分数变化较小。

旋风燃烧时颗粒温度超过 1 400 ℃,因此煤中绝大部分水溶性的钠和全部的钾会释放进入气相<sup>[17]</sup>,该过程不受配风方式和氧体积分数的影响。气相中钠的体积分数远高于钾的体积分数,这与煤灰中两者的含量是相符的。

沿筒长方向 0.32,0.64 和 0.96 m 分别采集火焰光谱信号,如图 8 所示。可以看出,3 个光谱信号均在 589,765.9 和 769.3 nm 处检测到钠、钾离子的

特征谱线,但谱线强度存在较大差别。

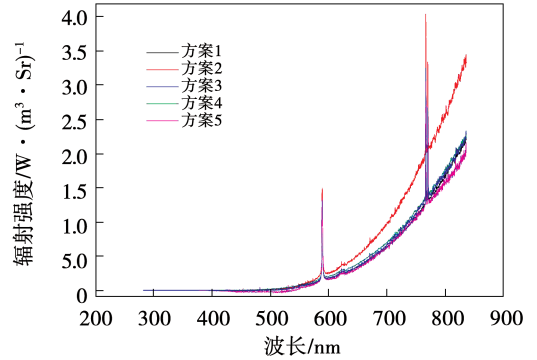


图 6 不同工况下火焰光谱信号

Fig. 6 Flame radiation spectrum signals under different working conditions

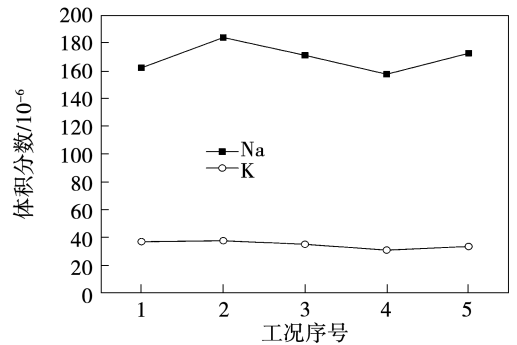


图 7 不同工况下气相 Na、K 离子体积分数变化

Fig. 7 Variations of volume fractions of gaseous Na and K ions under different working conditions

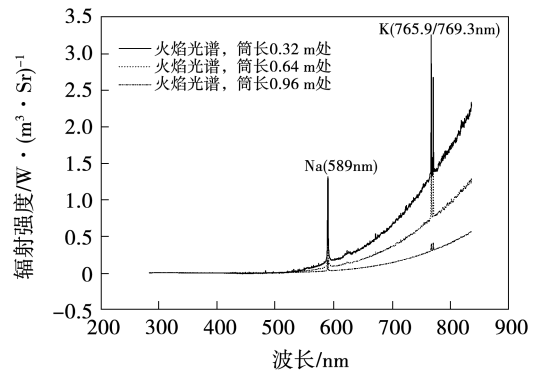


图 8 沿筒长方向 3 个位置处火焰光谱信号

Fig. 8 Flame radiation spectrum signals at three positions along the height of the cyclone furnace

旋风筒内不同高度处钠、钾离子体积分数的检测结果如图 9 所示。可以看出,沿筒长方向钠、钾离子体积分数均逐渐减小。在旋风筒上部主燃区,煤

中的钠和钾释放进入气相,气态钠、钾离子体积分数较高,随着燃烧过程的进行,飞灰及液渣与气相钠、钾离子相互作用,碱金属钠和钾由气态向固态迁移,到达旋风筒尾部时,气态钠、钾离子体积分数降低。

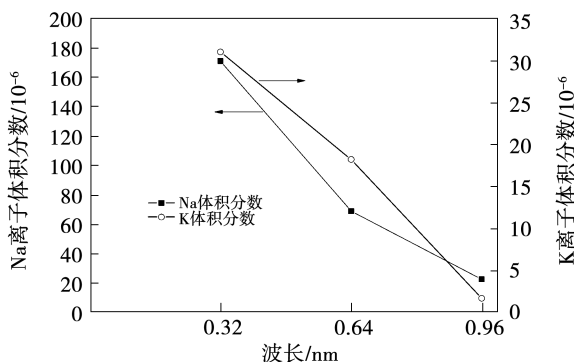


图9 沿筒长方向气相Na、K体积分数变化

Fig.9 Variations of volume fractions of gaseous Na and K ions along the height of the cyclone furnace

## 4 结论

煤粉火焰辐射光谱中包含钠、钾等碱金属被激发产生的原子发射谱线,这些特征谱线为气相碱金属浓度在线检测提供了可能。本文首先通过标定,得到了特征谱线辐射强度与气相钠、钾离子浓度之间的正比例关系,在旋风炉上开展试验研究,利用光谱分析的方法对新疆高碱煤旋风燃烧火焰中气相钠、钾离子浓度及迁移特性进行研究。钠离子特征谱线在 589 nm,钾离子特征谱线在 765.9 nm 和 769.3 nm,钠、钾离子特征谱线辐射强度与气相钠、钾离子浓度成正比例关系。旋风燃烧温度下,煤中绝大部分水溶性钠和全部钾会释放进入气相,该过程不受配风方式和氧量的影响。在旋风炉尾部,气态钠、钾离子浓度降低,碱金属由气相向固相迁移。本文研究的检测方法可为调控高碱煤燃烧过程中碱金属迁移、防止锅炉积灰结渣提供重要基础。

## 参考文献:

[1] 张守玉,陈川,施大钟,等.高碱煤燃烧利用现状[J].中国电机工程学报,2013,33(5):1-12.  
ZHANG Shou-yu, CHEN Chuan, SHI Da-zhong, et al. Situation of combustion utilization of high sodium coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(5): 1-12.

[2] 张向宇,陆续,张波,等.燃用准东煤的旋风炉空气分级方式试验研究[J].热力发电,2020,49(9):150-155.  
ZHANG Xiang-yu, LU Xu, ZHANG Bo, et al. Modeling and experimental study on air staging method in cyclone combustion of Zhundong coal [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9): 150-155.

[3] WANG Chang-an, JIN Xi, WANG Yi-kun, et al. Release and transformation of sodium during pyrolysis of Zhundong coals[J]. Energy & Fuels, 2015(29): 78-85.

[4] LI X, WU H, HAYASHI J, et al. Volatilisation and catalytic effects of alkali and alkaline earth metallic species during the pyrolysis and gasification of Victorian brown coal (part VI): further investigation into the effects of volatile-char interactions[J]. Fuel, 2002, 81(2): 143-149.

[5] OLESCHKO H, MÜLLER, MICHAEL. Influence of coal composition and operating conditions on the release of alkali species during combustion of hard coal [J]. Energy & Fuels, 2007, 21(6): 3240-3248.

[6] BLASING M, MICHAEL M. Mass spectrometric investigations on the release of inorganic species during gasification and combustion of Rhenish lignite[J]. Fuel, 2010, 89(9): 2417-2424.

[7] 刘建华,孙亦鹏,张清峰,等.准东煤旋风燃烧过程碱金属迁移规律[J].热能动力工程,2021,36(2):43-48.  
LIU Jian-hua, SUN Yi-peng, ZHANG Qing-feng, et al. Migration mechanism of alkali metals in cyclone combustion of Zhundong coal [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(2): 43-48.

[8] 卢琪,魏博,马凤云,等.高碱金属煤燃烧过程中渣体抗剪特性研究[J].热能动力工程,2020,35(7):84-88,158.  
LU Qi, WEI Bo, MA Feng-yun, et al. Study on shear resistance of slag body during combustion of high-alkali coal[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(7): 84-88, 158.

[9] 张向宇,杨玉,白文刚,等.准东煤旋风燃烧数值模拟[J].西安交通大学学报,2019,11(53):112-118.  
ZHANG Xiang-yu, YANG Yu, BAI Wen-gang, et al. Numerical simulation of cyclone combustion of Zhundong coal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 11(53): 112-118.

[10] 张向宇,白文刚,贾子秀,等.空气分级对旋风燃烧液态排渣及NO<sub>x</sub>排放的影响[J].燃烧科学与技术,2020(4):376-381.  
ZHANG Xiang-yu, BAI Wen-gang, JIA Zi-xiu, et al. Influence of staged air on liquid slagging and NO<sub>x</sub> reduction of cyclone combustion [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2020(4): 376-381.