

Combustion Characteristics and Kinetic Analysis of Blended Coals of Bituminous Coal and Anthracite

Hengchao Han^{1,2}, Jingfu Wang^{1†}, Shizhi Ma², Tao Zhang³

1. Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Ministry of Education, Beijing100124, China

2. Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, Beijing Education Commission College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing100124, China

3. Shengli Power Machinery Group Co., Ltd., Shandong, China

†Email: jfwang@bjut.edu.cn

Abstract

In this paper, the combustion characteristics and kinetic parameters of bituminous coal and anthracite blended coals at different ratios were analyzed on a high temperature thermo gravimetric analyzer. The combustion characteristic parameters such as ignition temperature, burnout temperature and comprehensive combustion characteristic index of blended coals with different blending ratios are analyzed. The reaction kinetics is calculated and analyzed. The experimental results show that with the proportion of anthracite to bituminous coal is increasing, TG and DTG curves moved to high temperature region, There are two peaks in the DTG curve of mixed coals with different mixing ratio, mixed coal ignition temperature and burnout temperature increased gradually, mixed coal at high temperature the activation energy is always higher than that of low temperature, it indicates that volatile branch will be released at low temperature and release a large amount of heat, which will improve the combustion environment of fixed carbon and promote the combustion of fixed carbon. Bituminous coal and anthracite blended coals have better combustion performance and performance at low temperature.

Keywords: Blended coal; Ratio; Combustion Characteristics; Kinetic Parameters^{*}

烟煤和无烟煤混煤燃烧特性和动力学分析

韩恒超^{1,2}, 王景甫¹, 马时志², 张涛³

1. 北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室, 北京 100124

2. 北京工业大学传热与能源利用北京市重点实验室, 北京 100124

3. 胜利油田胜利动力机械集团有限公司, 山东

摘要: 实验在高温热重差热综合分析仪上对烟煤和无烟煤混煤在不同配比下的燃烧特性和动力学参数进行了分析研究。分析了不同掺混比例下混煤的着火温度、燃尽温度、综合燃烧特性指数等燃烧特性参数, 进行了反应动力学计算和分析。实验结果表明, 随着烟煤中无烟煤掺入比例的不断增加, TG 和 DTG 曲线逐渐向高温区移动, 不同掺混比例下的混煤 DTG 曲线出现双峰, 混煤的着火温度和燃尽温度逐渐升高, 混煤高温段的活化能始终高于低温段的活化能, 说明挥发分会在低温段挥发释放出来, 放出大量的热量, 从而改善了固定碳的燃烧环境, 有利于固定碳的燃烧, 烟煤和无烟煤混煤在低温段有更好的燃烧性能和表现。

关键词: 混煤; 配比; 燃烧特性; 动力学参数

引言

^{*}基金资助: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助(2013CB228306)。

随着我国电力行业的快速发展，电力用煤量也在急剧地增长，导致煤炭供应特别地紧张，由于我国煤炭质量不均衡和运输能力的制约，再加上国家要求电站尽量燃用劣质煤政策的限制，大多数电厂很难保证长期燃烧单一煤种，燃用混煤成为了目前大多数电厂的选择^[1]，但是目前国内电厂对于混煤掺烧燃烧特性的研究还缺乏深入的研究^[2,3]。实际运行表明，与单一煤种燃烧相比较，混煤的燃烧特性和结渣特性会发生较大的变化，尤其是两种煤质相差较大的混煤掺烧时，这种现象表现得更加强烈^[4]，所以利用实验的方法研究煤质相差较大的混煤掺烧的燃烧特性具有十分重要的实际应用意义和理论指导作用。

1 实验及分析方法

1.1 实验仪器及实验条件

本实验采用德国耐驰公司生产的 Netzsch STA449 型高温热重差热综合热分析仪进行不同配比下烟煤和无烟煤混煤掺烧燃烧特性的研究，实验坩埚选用氧化铝坩埚。煤粉用量约为 10mg，升温速率设置为 20K/min。实验气氛为空气，设置反应气流量为 20mL/min，保护性气体流量为 20mL/min，温度区间为 20℃-1000℃。为了便于研究混煤的燃烧特性，先将两种单煤在热重差热综合热分析仪上进行实验，然后将两种单煤按照 4:1、1:1、1:4 的比例进行掺混，依次进行热重实验。

1.2 实验材料

本次实验采用内蒙古鄂尔多斯烟煤（NM 煤）和山西大同无烟煤（SX 煤）做为实验对象，首先利用粉碎装置和煤粉筛制取粒径在 180μm 左右的煤粉作为实验煤样，实验用煤的工业分析采用长沙友欣公司 YX-GYFX7703 全自动工业分析仪对样品的水分、灰分、挥发分和固定碳含量进行测定，煤粉的元素分析结果如表 1 所示。

表 1 烟煤和无烟煤工业分析

样品	工业分析/%			
	M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}
NM 煤	14.60	8.57	29.90	46.93
SX 煤	3.73	37.78	0.56	57.93

1.3 燃烧过程中特征点的定义

1.3.1 着火温度：

着火温度是燃料着火特性的重要特征点^[5,6]，定义为 Tf。本文使用最常用的 TG-DTG 法，来确定煤的着火温度^[3]，即在 DTG 曲线上，过最大失重速率对应的峰值点做垂线与 TG 曲线交于一点，过该交点做 TG 曲线的切线，该切线与失重开始时平行线的交点所对应的温度就定义为着火点。

1.3.2 燃烬点

煤粉燃烬即在 TG 曲线上不再有质量变化^[7]，燃烬温度即为质量不再变化的起始温度，定义为 Th。在 DTG 曲线上选取失重速率为-1%的点对应的温度定义为燃烬温度。

1.3.3 最大失重速率

选取 DTG 曲线上固定碳燃烧对应的最大峰值点为最大失重速率点。

为了更加全面地评价混煤的燃烧性能，本文根据热重的实验结果采用综合燃烧特性指数 SN^[9,10]来评价混煤的燃烧特性。

$$S_N = \frac{(dw/dt)_{\max} (dw/dt)_{\text{mean}}}{T_f^2 T_h} \quad (1)$$

式中: $(dw/dt)_{\max}$ 为最大燃烧速度, %/min; $(dw/dt)_{\text{mean}}$ 为平均燃烧速度, %/min; T_f 为着火温度, K; T_h 为燃烬温度, K; t 为时间, min。这几项的乘积综合反映了混煤的着火与燃烬特性, S_N 值越大, 表明混煤的燃烧性能越好^[11, 12]。

1.4 反应动力学分析

在热重条件下, 燃烧反应中的动力学方程^[13]可以表示为:

$$-\frac{d\alpha}{dt} = K \cdot (1-\alpha)^n \quad (2)$$

式中: α 为转化率, t 代表时间, n 为反应级数。煤的燃烧通常被描述成一级反应, 即 $n=1$ ^[14, 15]。根据 Arrhenius 定律的数字表达式得到:

$$K = A \cdot \exp(-E/RT) \quad (3)$$

式中, E 代表活化能, kJ/mol; A 代表频率因子, 即指前因子, 1/min; R 为气体常数, $R=8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 代表任意时刻的温度, K。转化率 α 可以表示为:

$$\alpha = \frac{W_0 - W}{W_0 - W_\infty} = \frac{\Delta W}{\Delta W_\infty} \quad (4)$$

式中, W_0 代表试样燃烧开始时的质量; W 代表任意时刻试样的质量; W_∞ 代表试样燃烧结束时的质量; ΔW 为任意时刻试样的失重量; ΔW_∞ 代表最大失重量。

在本次实验中, 温度 T 和室温 T_0 及时间 t 的关系如下:

$$T = T_0 + 20t \quad (5)$$

联立公式(2)和(3)得

$$-\frac{d\alpha}{dT} = -\frac{d\alpha}{dt} / \frac{dT}{dt} = \frac{A}{\beta} \exp(-E/RT) \cdot (1-\alpha) \quad (6)$$

式中, β 表示升温速率, 本次实验中升温速率为 $20\text{K}/\text{min}$ 。

本文采用常用的 Coats-Redfern 方程法^[16]对动力学参数进行求解。利用 Coats-Redfern 积分法对式(6)进行积分可求得:

$$\ln \left[-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2} \right] = \ln \left(\frac{AR}{20E} (1-2RT/E) \right) - \frac{E}{RT} \quad (7)$$

在热重实验的反应温度区内, $2RT/E$ 远小于 1, 则 $(1-2RT/E) \approx 1$, 所以 $\ln[AR/\beta E(1-2RT/E)]$ 通常为常数, 就有 $\ln[-\ln(1-\alpha)/T^2]$ 与 $1/T$ 成线性比例关系。于是就可以通过 $\ln[-\ln(1-\alpha)/T^2]$ 对 $1/T$ 作图, 来计算活化能、指前因子和其他动力学参数。

2 实验结果与分析

2.1 两种单煤的 TG-DTG 曲线分析

取两种单煤各 10mg 左右, 粒径在 $180\mu\text{m}$ 左右, 分别在升温速率为 $20\text{K}/\text{min}$ 的空气气氛下进行燃烧实验, 实验得到的 TG-DTG 曲线如图 1、图 2 所示。

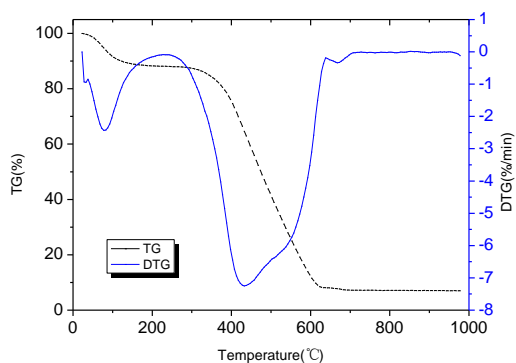


图 1 NM 煤的 TG-DTG 曲线

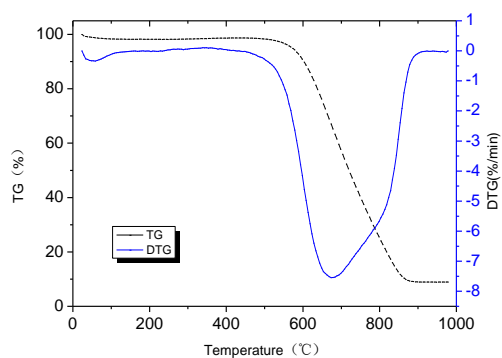


图 2 SX 煤的 TG-DTG 曲线

- (1) 由图 1 和图 2 看出两种单煤的燃烧过程都分为两个阶段，分别为水分蒸发和挥发分以及煤粉中其余成分形成的碳粒燃烧，水分蒸发之后 DTG 曲线只出现一个单峰，所以 NM 煤和 SX 煤的挥发分和固定碳同时燃烧，不过 NM 煤和 SX 煤的燃烧还是有所区别。
- (2) 由 DTG 曲线看出 NM 煤的水分的析出峰明显比 SX 煤的大，说明 NM 煤的水分含量明显比 SX 煤大，这也和两种单煤的工业分析结果相吻合。
- (3) SX 煤的着火温度和最大燃烧速率对应的温度都要比 NM 煤高，说明 NM 煤要比 SX 煤更容易着火和燃烧，烟煤和无烟煤的着火点分别为 372.7°C 和 584.8°C，说明两种煤的煤质差别还是相差较大。
- (4) 燃烬阶段，温度为 628°C 时，NM 煤基本燃烬；温度为 877°C 时，SX 煤基本燃烬，所以 NM 煤的燃烬温度要比 SX 煤的燃烬温度要低将近 150°C，NM 煤的燃烧更加迅速。

2.2 不同掺混比例对混煤燃烧特性的影响

采用热重分析研究不同配比的烟煤和无烟煤混煤的着火温度、燃烬温度、燃烧速率、以及对混煤燃烧过程中综合燃烧特性指数的影响。根据实验结果得到不同掺混比例下着火温度和燃烬温度的变化曲线如图 3 所示。

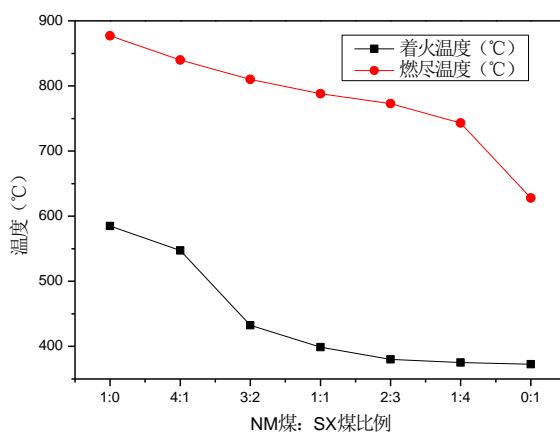


图 3 混煤着火点、燃烬点随混煤比例的变化曲线

由图 3 可知随着挥发分占比不断增大，混煤的着火温度、燃烬温度越来越低，这是由于挥发分能够在较低的温度下析出和着火、燃烧，使煤粒周围的温度迅速提高，从而为焦炭的着火与燃烧提供极为有利的条件，同时挥发分的析出过程，可以使煤粉颗粒膨胀，从而增大了煤粉颗粒的内部孔隙率以及与外部反应的表面积^[17]，有利于提高焦炭的燃烧速率。随着混煤种烟煤的比例不断增加，挥发分的占比越来越高，越有助于混煤的着火和燃烧，所以混煤的着火点会随着混煤挥发分占比的不断增大而减小。

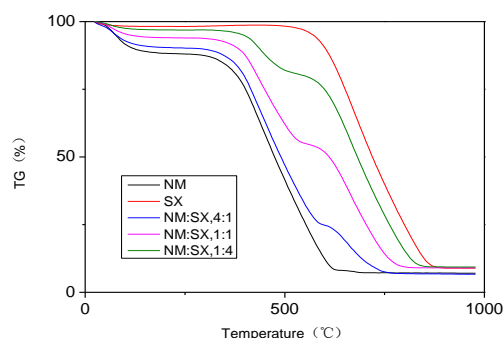


图 4 不同掺混比下混煤的 TG 曲线

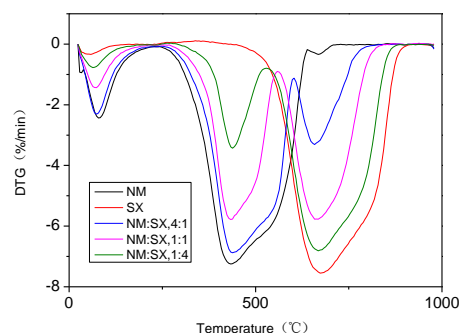


图 5 不同掺混比下混煤的 DTG 曲线

根据图 4 和图 5 得知随着烟煤中无烟煤掺入比例的不断增加, TG 和 DTG 曲线逐渐向高温区移动, 原因在于随着无烟煤的掺入比例的增加, 混煤中挥发分含量越来越低, 根据图 3 得知, 混煤的着火点会不断升高; SX 煤的灰分含量要远高于 NM 煤, 对于混煤的燃烬有很大的影响, 所以混煤的 TG 曲线会移向高温区。两种煤不同掺混比例下的混煤 DTG 曲线出现双峰, 水分的蒸发量随着无烟煤掺入比例的增高而逐渐减少。由图 5 得到混煤燃烧过程出现双峰结构, 表明两种单煤混合之后出现先后的燃烧顺序, 两者之间的最大燃烧峰并没有叠加, 表明两种单煤的相互影响并不大, 影响比较一致的在于两种煤的水分上, 出现一起蒸发的现象。当两种单煤相互混合之后挥发分的成分还是各自包裹单煤自身的固定碳成分, 在燃烧过程中挥发分的引燃还是有就近的原则, 所以会出现双峰结构, 但是内蒙古烟煤的高挥发分和山西无烟煤的高固定碳之间还是相互有一定的影响, 从而降低了混煤的着火温度和燃烬温度。

根据实验结果计算的得到混煤的综合燃烧特性指数如表 2。

表 2 样品综合燃烧特性参数

样品	掺混比例	着火温度 T_f K	燃烬温度 T_h K	最大反应速率 $(dw/dt)_{\max}$ $\% \cdot \text{min}^{-1}$	平均反应速率 $(dw/dt)_{\text{mean}}$ $\% \cdot \text{min}^{-1}$	综合燃烧特性指数 $S_N \cdot 10^{-8} \text{ K} \cdot \text{min}^{-2}$
NM: SX	1:0	645.85	901.15	7.26	2.66	5.14
NM: SX	4:1	648.45	1016.15	6.89	2.39	3.85
NM: SX	1:1	671.85	1061.15	5.17	2.21	2.39
NM: SX	1:4	820.65	1112.85	6.82	2.12	1.93
NM: SX	0:1	857.95	1150.15	7.32	2.02	1.75

由表 2 可以看出随着无烟煤比例的不断增加, 混煤的着火温度和燃烬温度都相应提高, 最大反应速率和平均反应速率几乎不变, 根据公式 (1) 得到的综合燃烧特性指数不断减小, 内蒙古烟煤单煤的综合燃烧指数是山西无烟煤单煤综合燃烧特性指数的 2.93 倍, 这和烟煤中的高挥发分和无烟煤中的高灰分有很大关系^[18], 烟煤中的挥发分比例较高易于着火, 掺入灰分较高的无烟煤之后, 混煤的综合燃烧指数随着烟煤比例的不断增大而增大, 混煤相比山西无烟煤单煤改善了燃烧特性, 表明烟煤中的挥发分可以有效改善低挥发分、高灰分的无烟煤的燃烧。

2.3 不同掺混比例下混煤的燃烧动力学分析

Coats-Redfern 法认为, 煤在燃烧的过程中存在着反应机理不相同的反应阶段, 由之前的分析可知, 对于单煤的燃烧, 挥发分和固定碳一起燃烧, 但是由于混煤是由两种不同的煤种进行不同比例的掺混, DTG 曲线会出现两个不同的峰, 所以在进行动力学求解的时候, 单煤对一个阶段进行求解, 而混煤会对两个阶段分别进行动力学参数的求解^[19]。以 NM 煤单煤和 NM 煤: SX 煤比例为 1:1 的混煤为例, 分别做出 $\ln[-\ln(1-$

$\alpha/T2]$ 与 $1/T$ 的线性回归曲线, 如图 (6) 所示:

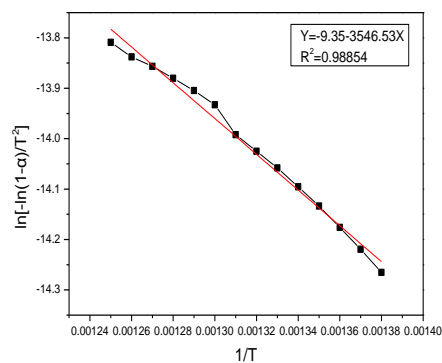


图 6 (a) NM 煤: SX 煤 1:1 混煤
第一阶段线性回归曲线

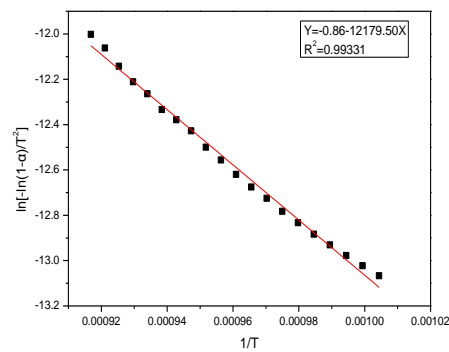


图 6 (b) NM 煤: SX 煤 1:1 混煤
第二阶段线性回归曲线

由图 (6) 可已得到, 对于三条拟合曲线的相关系数 R^2 都接近于 1, 说明针对单煤一个阶段和混煤两个阶段分别求其动力学参数非常适合混煤燃烧, 同时也说明了一开始的假设 $n=1$ 是正确的^[20]。根据一级 Coats-Redfern 方程求出的不同掺混比下烟煤和无烟煤混煤燃烧的反应动力学参数见表 3 和表 4。

表 3 单煤的燃烧反应动力学参数

煤种	温度范围 ℃	拟合方程	活化能 $E(\text{kJ/mol})$	指前因子 $A \text{ 1/min}$	相关系数 R^2
NM 煤	352-622	$Y=-7.28-4617.94X$	38.39	63.65	0.99484
SX 煤	518-723	$Y=-0.89-14633.14X$	121.66	120.18	0.99397

表 4 不同掺混比例混煤的燃烧反应动力学参数

混煤比例	温度范围 ℃	拟合方程	活化能 $E(\text{kJ/mol})$	指前因子 $A \text{ 1/min}$	相关系数 R^2
NM:SX 4:1	453-578	$Y=-8.38-3982.68X$	33.11	0.02	0.99870
	728-783	$Y=-2.26-10262.87X$	85.33	21.42	0.99339
NM:SX 1:1	452-527	$Y=-9.35-3546.53X$	28.87	6.17	0.98854
	722-812	$Y=-0.86-12179.50X$	101.26	103.08	0.99331
NM:SX 1:4	392-472	$Y=-5.70-6822.07X$	56.72	0.46	0.99094
	617-777	$Y=-5.80-7784.93X$	64.72	0.47	0.99970

由表 3、表 4 得到, 内蒙古烟煤中掺入山西无烟煤比例由 4:1 到 1:1 能够有效降低内蒙古烟煤的活化能, 从而改善煤粉的燃烧, 缩短反应时间, 这是由于内蒙古烟煤中的挥发分成分较高, 而山西无烟煤中固定碳成分较高, 二者掺烧后使得混煤更容易着火和燃烬。当两种单煤比例为 1:1 时, 混煤在低温段的活化能达到最低, 并且均低于两种单煤的活化能, 表明混煤比例在 1:1 时最有利于混煤的燃烧。由于活化能是反应物分子由初始稳定状态为活化分子所需吸收的能量, 因此煤的活化能比着火温度更能从本质上描述煤的着火性能。混煤高温段的活化能始终高于低温段的活化能, 这是由于挥发分会在低温段挥发释放出来, 放出大量的热量, 从而改善了固定碳的燃烧环境, 有利于固定碳的燃烧, 从而可以有效降低低温段的活化能, 也表明混煤在低温段有更好的燃烧性能和表现。

3 结论

本实验通过对烟煤和无烟煤混煤在不同配比下的燃烧特性和动力学参数进行了分析研究得出以下结论。

- (1) 两种单煤之间的 TG 曲线和 DTG 具有很好的相似性, 不同比例混煤的 TG 曲线和 DTG 曲线 also 具有很好的相似性, 随着烟煤中无烟煤掺入比例的不断增加, TG 和 DTG 曲线逐渐向高温区移动, 不同掺混比例下的混煤 DTG 曲线出现双峰, 混煤的着火温度和燃尽温度逐渐升高。
- (2) 随着烟煤中无烟煤掺入比例的不断增加, 混煤的综合燃烧特性指数会不断减小, 说明高挥发分、低灰分的混煤有利于改善燃烧特性。
- (3) 根据一级 Coats-Redfern 方程求出的不同掺混比下烟煤和无烟煤混煤燃烧的反应动力学参数, 单煤和混煤的拟合曲线的相关系数 R^2 都接近于 1, 说明拟合结果具有较高的可行性。由计算结果得知混煤高温段的活化能始终高于低温段的活化能, 说明挥发分会在低温段挥发释放出来, 放出大量的热量, 从而改善了固定碳的燃烧环境, 有利于固定碳的燃烧, 烟煤和无烟煤混煤在低温段有更好的燃烧性能和表现。

REFERENCES

- [1] 高正阳, 方立军, 周健等. 混煤燃烧特性的热重试验研究[J]. 动力工程, 2002, 22(3):1764-1767
- [2] GAO Zhengyang, FANG Lijun, ZHOU Jian, et al. Thermogravimetric study on combustion characteristics of Blended Coals [J]. Power Engineering, 2002, 22(3):1764-1767
- [3] Artos V, Scaroni AW. Fuel, 1993,72(7):927-933
- [4] SHEN Guo-dong, WANG Zhi-qi, et al. Combustion characteristics of low-rank coal chars in O₂/CO₂, O₂/N₂ and O₂/Ar by TGA. Journal of Fuel Chemistry and Technology[J]. 2016, 44(9):1066-1073
- [5] Jeffrey J. Murphy, Christopher R. Shaddix. Combustion kinetics of coal chars in oxygen-enriched environments. Combustion and Flame[J]. 2006(144):710-729
- [6] 聂其红, 孙绍增, 李争起, 等. 褐煤混煤燃烧特性的热重分析法研究[J]. 热能动力工程, 2003, 18(6): 561-563.
- [7] NIE Qihong, SUN Shaozeng, LI Zhengqi, et al. Study on combustion characteristics of lignite blended coals by thermogravimetric analysis[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2003, 18(6): 561-563.
- [8] 李永波. 配比及粒径对煤粉燃尽特性影响的实验研究[D]. 华中科技大学, 2009
- [9] LI Yongbo. Experimental study on the influence of mixture ratio and particle size on the burnout characteristics of pulverized coal.[D]. Huazhong University of Science and Technology, 2009
- [10] Yunfei Yan, Zhien Zhang, Lei Zhang et al. Influence of Coal Properties on the Co-combustion Characteristics of Low-grade Coal and City Mud. GlobalNEST International Journal[J]. 2014, 16(2):330-339
- [11] LW Wang, N Karimi, MC Paul. Numerical study of single coal particle combustion in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres. HEFAT 2016, Malaga, Spain, 11-13 Jul 2016.
- [12] 李永波. 配比及粒径对煤粉燃尽特性影响的实验研究[D]. 华中科技大学. 2009
- [13] Li Yongbo. Experimental study on the influence of proportioning and particle size on burnout characteristics of pulverized coal [D]. Huazhong University of Science and Technology. 2009
- [14] S.J. Wang, F Wu, G Zhang et al. Research on the combustion characteristics of anthracite and blended coal with composite catalysts. Journal of the Energy Institute[J]. 2014, (87): 96-101
- [15] SC Wang, J Yao, GG Hu. Distribution of apparent activation energy and apparent pre exponential factor of Chinese power coals from TGA method. Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society[J]. 2013, 38 (6): 1078-1083
- [16] Nozomu Sonoyama, Jun-ichiro Hayashi. Characterisation of coal and biomass based on kinetic parameter distributions for pyrolysis. Fuel[J]. 2013, (114): 206-215

- [17] Jeffrey J.Murphy, Christopher R. Shaddix. Combustion kinetics of coal chars in oxygen-enriched environments. Combustion and Flame[J].2006(144):710-729
- [18] R. Ebrahimi-Kahrizsangi,M. H. Abbasi. Evaluation of reliability of Coats-Redfern method for kinetic analysis of non-isothermal TGA. Trans.Nonferrous Met.Soc.China[J]. 2008,(18):217-221
- [19] Coats A W, Redfern J P. Kinetic Parameters form thermo-gravimetric data[J]. Nature,1964,201(1)
- [20] Wu Haibo, Dong Shouhua, Li Donghui et al. Experimental study on dynamic elastic parameters of coal samples. International Journal of Mining Science and Technology[J]. 2015,(25) :447-452
- [21] Terry Wall, Yinghui Liu, Chris Spero et al. An overview on oxyfuel coal combustion—State of the art research and technology development[J]. Chemical Engineering Research and Design.2009,8:1003-1016
- [22] Kizgut S, Kobayashi N,Hasatani M. CO₂,NO_x and SO₂ emissions form the combustion of coal with high oxygen concentration gases[J]. Fuel,2000,79:1925-32
- [23] 岑可法. 高等燃烧学[M]. 浙江大学出版社. 2002
- [24] Cen Kefa. Advanced combustion [M]. Zhejiang University Press. 2002
- [25] 刘建忠,刘明强,赵卫东等. 褐煤半焦燃烧特性的热重试验研究[J]. 热力发电,2013,42(11):86-92
- [26] Liu Jianzhong, Liu Mingqiang, Zhao Weidong et al. Thermogravimetric study on combustion characteristics of lignite char [J].

【作者简介】



¹ 韩恒超（1990-），男，汉族，硕士，研究生在读，研究方向：可再生能源利用及先进环境能源理论与技术。
Email:18810329600@163.com

² 王景甫（1963-），男，汉族，博导，教授，研究方向：可再生能源利用及先

进环境能源理论与技术。Email: jfwang@bjut.edu.cn

³ 马时志（1989-），男，汉族，硕士，研究生学历，研究方向：可再生能源利用及先进环境能源理论与技术。

Email:15650751752@163.com