第52卷 第9期 西安交通大学学报 Vol. 52 No. 9
2018年9月 JOURNAL OF XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY Sep. 2018

DOI：10.7652/xjtuxb201809021

半焦富氧燃烧扩散效应研究

陶子宸，王长安，王鹏乾，袁茂博，车得福
（西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室，710049，西安）

摘要：为探究富氧燃烧条件下半焦的燃烧特性，研究扩散效应对实验中半焦燃烧的影响，采用热重分析法探讨了扩散对半焦富氧燃烧特性的影响和相应的动力学分析，并对反应中的氧气扩散速率建立数学模型以进行分析。采用改变气氛、坩埚高度、坩埚直径和半焦质量的方法，研究了不同内外扩散速率条件下的半焦燃烧特性。热重实验结果表明：减小燃烧反应中的外扩散行程、增大半焦表面与氧气接触面积、减小半焦床层厚度、提高反应气氛氧含量，都能使扩散阻力减小，氧气扩散速率提高，燃尽温度降低，平均反应速率增大，燃烧特性指数提升，表观活化能增加，燃烧特性变好。实验结果可为半焦富氧燃烧利用和扩散效应的研究提供理论参考。

关键词：扩散；半焦；燃烧特性；热重实验
中图分类号：TK16 **文献标志码**：A **文章编号**：0253-987X(2018)09-0155-07

Study of Diffusional Effect in Oxy-Fuel Combustion of Semi-Coke

TAO Zichen, WANG Chang'an, WANG Pengqian, YUAN Maobo, CHE Defu
(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To study the oxy-fuel (O_2/CO_2) combustion characteristics of semi-coke and analyze the diffusional effect, thermogravimetric analysis was used to explore the diffusional effect on the oxy-fuel combustion characteristics of semi-coke, and relevant kinetic analysis was performed. In addition, a mathematical model of oxygen diffusion rate in the reaction was established for analysis. The experiment investigated the combustion characteristics of semi-coke under changed conditions referring to the atmosphere, the height and diameter of crucible, and the mass of semi-coke at different internal and external diffusion rates. The results of thermogravimetric experiments show that with the reduction of external diffusion distance in the combustion reaction and the thickness of the semi-coke bed as well as the increase of contact area with oxygen on the surface of semi-coke and the oxygen concentration in the reaction atmosphere, the diffusion resistance and burnout temperature are decreased, while the oxygen diffusion rate, average reaction rate, combustion characteristic index and activation energy are all increased, and the combustion characteristics are improved. The experimental results may provide a theoretical reference for the application of oxy-fuel combustion of semi-coke and the study of diffusional effect.

Keywords: diffusion; semi-coke; combustion characteristics; thermogravimetric experiment

半焦又称为兰炭，是无黏结性或弱黏结性的高挥发分烟煤在中低温条件下干馏热解得到的较低挥

收稿日期：2018-01-29。 作者简介：陶子宸(1994—)，男，硕士生；王长安(通信作者)，男，副教授。 基金项目：国家重点研发计划资助项目(2017YFB0602003)。
网络出版时间：2018-06-13 网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180613.0936.002.html

万方数据

发分的固体炭质产品[1]。半焦的利用方式主要包括制活性炭、高炉喷吹燃料、电石用焦、气化原料、还原剂载体等。随着我国经济发展，半焦的需求量也在不断增加[2]。半焦具有高固定碳、高灰分、低挥发分、着火温度高、难以燃尽等特点[3]，所以许多研究者对半焦的燃烧利用进行了研究，并取得了一定的成果[4-8]，例如：朱建国等阐释了细粉半焦在0.2 MW预热燃烧试验台的预热特性、燃烧特性和NO_x排放特性[4]；Yao等通过半焦燃烧实验探讨了燃料氮的转化特性[6]；刘家利等总结了半焦作为大型煤粉锅炉燃料的特点，并提出防结渣与防磨损是大型煤粉锅炉燃用需要重点考虑的问题[7]。然而，对于半焦富氧燃烧特性，还需要进一步研究。

富氧燃烧技术最早在1981年由Horn和Steinberg提出，它是一种高效节能的燃烧技术，能够提高燃烧温度，减少助燃空气量，从而减少烟气量，并减少烟气热损失与节约燃料[9]。同时，与传统的空气燃烧相比，富氧燃烧过程中NO_x排放量显著降低。因此，研究富氧条件下半焦燃烧特性，对半焦的合理、高效、清洁利用具有十分重要的意义。

扩散效应对于热重实验中半焦燃烧特性有着很大影响，外部的氧气扩散到坩埚内半焦物料层表面的过程即为外扩散，而氧气在坩埚中半焦床层内的扩散过程即为内扩散，内外扩散速率决定着半焦整个燃烧过程的快慢。已有学者对于煤焦燃烧中的扩散效应进行了研究，例如：李位位等通过计算效率因子评估内扩散对气化反应初始速率的影响程度[10]；林善俊等提出了评估煤和石油焦水蒸气气化反应过程中内扩散效率因子的计算方法[11]；Ollero等对生物质焦气化反应进行研究，并建立了可以预测扩散影响的动力学模型[12]。热重实验中实验条件的差异会使内外扩散的大小不同，这对低挥发分半焦的燃烧特性影响尤为显著。现有文献对热重实验中扩散的影响因素研究较少，尤其是扩散效应对半焦燃烧特性的影响以及扩散大小的定量分析缺少研究。因此，本文选用低挥发分半焦作为实验样品，研究扩散效应对半焦富氧燃烧特性的影响，以期为半焦的富氧燃烧利用及扩散效应的研究提供理论参考。

本文利用热重分析法，通过改变坩埚高度、坩埚直径和半焦质量的实验方法，研究了内外扩散改变对半焦富氧燃烧特性的影响，分析了扩散效应改变引起的半焦燃烧机理的变化，并对于燃烧反应中氧气扩散速率进行了定量分析。此外，研究了富氧气氛与氧浓度对扩散效应以及半焦燃烧特性的影响，并进行了动力学分析，求取了反应表观活化能与指前因子。

1 实验条件

1.1 实验试样

本实验选取一种陕北半焦为研究对象，其工业分析与元素分析如表1所示。半焦在磨煤机中磨成粉末，而后利用振动筛对煤样进行筛分，选取粒径为68～91 μm的半焦在室温下风干，于105 ℃的烘箱内进行干燥后，在室温下放入干燥器内保存。

1.2 实验方法

实验在塞塔拉姆公司的Labsys Evo同步热分析仪上进行，实验气流量为40 mL·min^{-1}，升温速率β为20 ℃·min^{-1}，升温至1 350 ℃。

为了对扩散效应的影响进行相关研究，实验中采用了不同尺寸的Al_2O_3坩埚。d为坩埚的内径，坩埚高度h指坩埚口到坩埚底部内表面的垂直距离。

燃烧特征参数是表征半焦颗粒燃烧特性的重要指标。已有文献对着火温度T_i、燃尽温度T_b、最大燃烧速率$(dm/dt)_{max}$、平均燃烧速率$(dm/dt)_{mean}$等燃烧特征参数进行了定义[13-14]。为了定量直观地分析比较半焦燃烧特性的优劣，本文引入燃烧特性指数S这一综合指标[15]

$$S=\frac{(dm/dt)_{max}(dm/dt)_{mean}}{T_i^2T_b} \tag{1}$$

式中：dm为半焦的质量分数变化率。S越大，表明半焦的燃烧特性越好。

2 热重实验结果及分析

2.1 外扩散行程对燃烧特性的影响

扩散效应影响着半焦的燃烧过程，为了研究外扩散行程对燃烧特性的影响，本节采用不同高度的

表1 半焦的工业分析与元素分析

w/%(工业分析)				w/%(元素分析)				
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	N_{ad}	O_{ad}	S_{ad}
7.21	9.24	8.44	75.11	78.28	1.42	0.86	2.70	0.28

注：M、A、V、FC分别表示水分、灰分、挥发分、固定碳；下标ad表示空气干燥基。

万方数据

坩埚进行研究，随着坩埚高度的增大，外扩散行程不断增加。图 1 是实验采用的不同高度坩埚的示意图，坩埚直径均为 4 mm，半焦质量均为 20 mg。

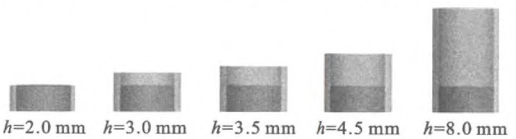


图 1　不同高度坩埚示意图

表 2 给出了体积分数分别为 21% 和 79% 的 O_2/CO_2 气氛下采用不同高度坩埚时的半焦燃烧特征参数。从表中可以看出，随着坩埚高度即外扩散行程的增加，半焦着火温度的提升较小，但燃尽温度提升很大，因此其主燃区温度区间也随之增大，燃烧速率降低，燃烧特性指数下降，燃烧过程整体延迟。这是由于在内扩散效应不变的基础上，氧气的外扩散行程增大，因此氧气扩散到坩埚内半焦表面的阻力增大，使得外扩散的速率下降，从而明显地降低了半焦燃烧的速率。

燃烧特性指数直观地体现了半焦的燃烧特性，为了反映不同气氛下外扩散行程改变对半焦燃烧特性影响的趋势，通过图 2 对比了不同气氛对半焦燃烧特性指数的影响。由图 2 可见，坩埚高度即外扩散行程相同时，相同氧含量的 O_2/N_2 条件下的燃烧特性指数比 O_2/CO_2 下略大，这是由于氧气在 N_2 中的扩散速率比在 CO_2 中大。外扩散行程较短时，O_2 体积分数为 30% 时的燃烧特性指数比 21% 时要大很多，说明此时氧含量对于扩散的影响较大。随着外扩散行程的增加，不同氧含量的半焦富氧燃烧特性指数越来越接近：坩埚高度为 2 mm 时，O_2 体积分数为 30% 时的燃烧特性指数比 21% 时大 55.1%，而坩埚高度为 8 mm 时，O_2 体积分数为 30% 时的燃烧特性指数比 21% 时大 34.9%。这说明，气氛对燃烧特性所带来的影响随着外扩散行程的增大而逐渐减弱，此时坩埚高度对外扩散的阻碍作用成为了影响燃烧速率的主要因素。

热重微分曲线表征了半焦燃烧过程中质量损失

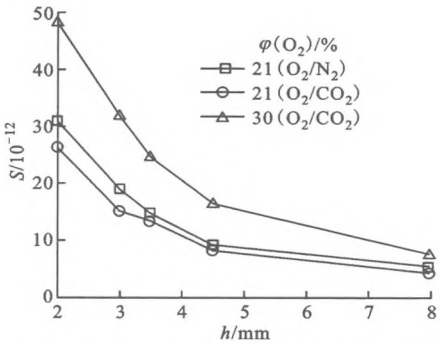
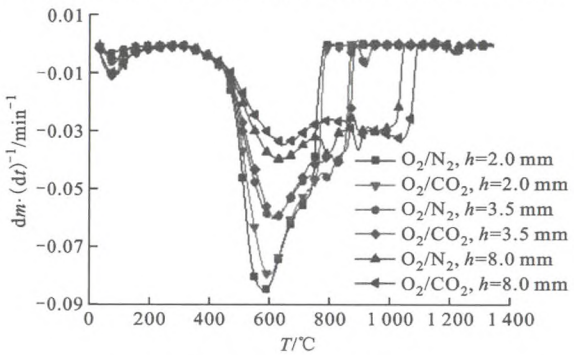
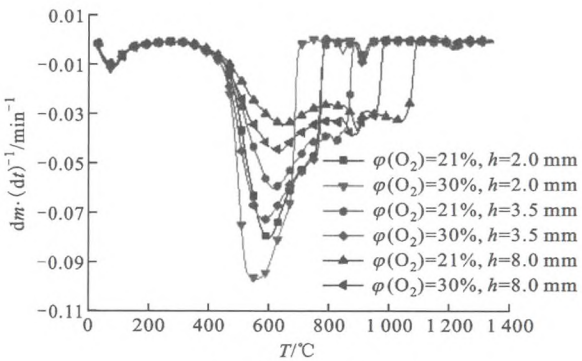


图 2　不同气氛对半焦燃烧特性指数的影响

速率的变化，图 3 通过 DTG 曲线反映了不同气氛与坩埚高度下的半焦燃烧变化规律。由图 3 可见，当坩埚高度即外扩散行程改变时，曲线的峰值数不同，这说明外扩散行程影响着半焦的反应机理。在外扩散行程较短时，挥发分的析出燃烧与半焦氧化



(a) O_2/N_2 与 O_2/CO_2 气氛对比



(b) 氧含量的影响

图 3　不同气氛与坩埚高度下半焦燃烧变化规律

表 2　采用不同高度坩埚时的半焦燃烧特征参数

h/mm	T_i/℃	T_b/℃	T_{max}/℃	$(dm\cdot(dt)^{-1})_{mean}$/min^{-1}	$(dm\cdot(dt)^{-1})_{max}$/min^{-1}	$S/10^{-12}$
2.0	450.3	775.6	596.5	-5.21×10^{-2}	-7.98×10^{-2}	26.44
3.0	454.0	851.4	611.3	-4.27×10^{-2}	-6.30×10^{-2}	15.33
3.5	456.7	872.9	615.5	-4.14×10^{-2}	-5.98×10^{-2}	13.60
4.5	459.0	953.6	617.1	-3.51×10^{-2}	-4.78×10^{-2}	8.35
8.0	470.4	1 081.8	892.7	-2.86×10^{-2}	-3.63×10^{-2}	4.34

万方数据

的过程基本伴随在整个主燃区温度区间内，它们的总速率达到一个最大值时，体现为DTG曲线上的唯一极值。当外扩散行程较长时，在主燃区温度区间的前半段挥发分就已基本完全析出，因为半焦燃烧速率较慢，所以半焦的氧化过程仍未结束，并且由于高温条件下气化反应影响着反应速率，因此DTG曲线不止一个峰值。图3a是O_2/N_2与O_2/CO_2气氛下半焦燃烧变化规律的DTG曲线。由图3a可见，相同的外扩散行程下，O_2/N_2气氛下半焦的反应速率比O_2/CO_2气氛下更快，燃尽温度更低。同时，在坩埚高度达到8 mm时，从DTG曲线可以看到，空气与富氧条件下的燃尽温度差距明显。可见，外扩散行程较长时，因为燃烧进程缓慢，主燃区间增大，气氛差异带来的影响在燃烧特性曲线中被放大。图3b是O_2体积分数分别为21%与30%时，O_2/CO_2气氛下半焦燃烧变化规律的DTG曲线。由图3b可见，氧含量越高，半焦越快着火，反应速率越大，燃尽越快。这说明氧含量越高，氧气的扩散速率越快，越有利于半焦燃烧的进行。

2.2 内扩散对燃烧特性的影响

为了研究内扩散对燃烧特性的影响，分别采用不同直径的坩埚与不同质量的半焦进行了研究，图4是实验采用坩埚与半焦质量的示意图，实验中的坩埚高度均为3.5 mm。

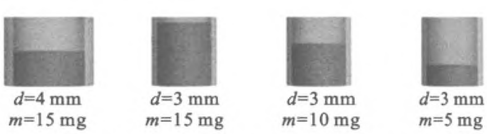


图4 不同坩埚直径与半焦质量示意图

表3是采用不同直径坩埚时的半焦燃烧特征参数。从表3中可以看出，坩埚直径增加，使得半焦的着火温度略微降低，燃尽温度显著降低，主燃区间减小，燃烧反应的速率小幅提高，燃烧特性指数上升。这是由于坩埚直径的变化改变了氧气的内扩散速率与外扩散速率。坩埚直径为3 mm时，因为半焦接近填满了坩埚，所以外扩散阻力很小，而坩埚直径为4 mm时，虽然外扩散阻力相比直径为3 mm时大很多，但燃烧特性却更好。这是因为坩埚直径为3 mm时，内扩散阻力相对4 mm时大很多。显然半焦与氧气接触面的面积越大且半焦床层厚度越小，内扩散的阻力越小，氧气扩散速率越快。

表4是采用不同质量半焦时的燃烧特征参数。从表4中可以看出，半焦燃烧速率随着半焦质量的减小而升高。这是因为半焦质量大时，床层内部温度梯度大，且分解产生的气体挥发时间变长，从而增大了内扩散的阻力。虽然半焦质量的减小使外扩散阻力增大，但半焦的床层厚度减小，从而使内扩散的阻力减小，整体而言半焦质量减小时，扩散速率提升，半焦燃烧特性变好。

2.3 扩散速率定量分析

热重实验中，氧浓度不随时间变化，整个扩散过程为稳态扩散。由菲克第一定律，可以推导出氧气在与半焦接触面的扩散通量(摩尔流率)[16]

$$N_{O_2} = \frac{D_{O_2}}{h_D} A_N c(O_2) \tag{2}$$

式中：h_D为坩埚口到半焦表面的垂直距离；A_N为坩埚水平方向的截面积；$c(O_2)$为氧气的浓度；D_{O_2}为氧气的扩散系数。

表3 采用不同直径坩埚时的半焦燃烧特征参数

气氛	φ/%	d/mm	T_i/℃	T_b/℃	T_{max}/℃	$(dm\cdot(dt)^{-1})_{mean}$/min^{-1}	$(dm\cdot(dt)^{-1})_{max}$/min^{-1}	$S/10^{-12}$
O_2/N_2	21/79	3	454.7	880.6	590.6	-4.20×10^{-2}	-6.63×10^{-2}	15.29
		4	454.6	802.3	621.7	-4.96×10^{-2}	-6.95×10^{-2}	20.79
O_2/CO_2	21/79	3	459.0	895.2	599.5	-3.89×10^{-2}	-6.38×10^{-2}	13.16
		4	455.3	810.6	620.2	-4.73×10^{-2}	-6.79×10^{-2}	19.11
O_2/CO_2	30/70	3	443.4	778.7	571.9	-5.07×10^{-2}	-8.21×10^{-2}	27.19
		4	440.9	732.9	600.5	-5.95×10^{-2}	-8.73×10^{-2}	36.46

表4 采用不同质量半焦时的燃烧特征参数

气氛	φ/%	m/mg	T_i/℃	T_b/℃	T_{max}/℃	$(dm\cdot(dt)^{-1})_{mean}$/min^{-1}	$(dm\cdot(dt)^{-1})_{max}$/min^{-1}	$S/10^{-12}$
O_2/CO_2	21/79	5	453.7	714.5	626.0	-6.56×10^{-2}	-10.93×10^{-2}	48.76
		10	453.6	817.6	622.4	-4.69×10^{-2}	-6.96×10^{-2}	19.40
		15	459.0	895.2	599.5	-3.89×10^{-2}	-6.38×10^{-2}	13.16

万方数据

估算二元气体的扩散系数一般采用 Fuller 提出的公式[17]

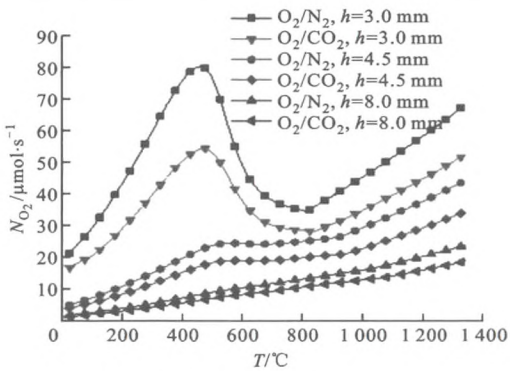
$$D_{O_2}=\frac{0.101T^{1.75}\sqrt{1/M_A+1/M_B}}{p[(\sum v_A)^{1/3}+(\sum v_B)^{1/3}]^2} \tag{3}$$

式中：T 为气体的温度；p 为气体的总压；M_A、M_B 为组分 A、B 的摩尔质量；$\sum v_A$、$\sum v_B$ 为组分 A、B 的分子扩散体积。

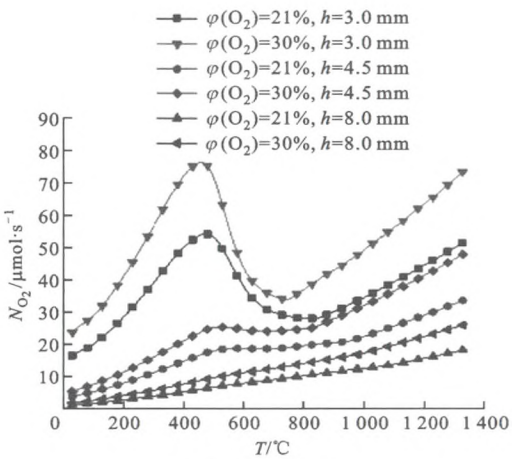
本节通过计算氧气在半焦床层与氧气接触面的摩尔流率，定量分析了氧气的扩散速率。图 5 给出了不同坩埚高度、坩埚直径与半焦质量下氧气摩尔流率的变化规律。由图 5a 和图 5b 可见，随着坩埚高度即外扩散行程的增大，氧气的外扩散速率明显减小。摩尔流率较大时，曲线呈现出两个极值点。极大值点在着火温度左右，此时随温度升高，氧气扩散速率不断提升，而半焦尚未进入燃烧过程，仅因温度升高而失水，所以氧气扩散速率受温度提高的影响而快速提升；半焦着火后质量持续下降，此时氧气扩散速率受外扩散行程增加影响而下降；极小值点在燃尽温度左右，此后因为半焦已燃尽，所以外扩散行程基本不变，受温度升高的影响，氧气扩散速率又得到提高。随着外扩散行程的增大，两个极值点更加不明显，氧气扩散速率与温度接近线性关系。

由式(3)可知，在同一气氛与坩埚尺寸下，p、M、$\sum v_A$、$\sum v_B$ 均为定值，因此 $D_{O_2}\propto T^{1.75}$，又知 A_N、$c(O_2)$ 也为定值，所以 $N_{O_2}\propto T^{1.75}/h_D$。如图 5a 所示，以坩埚高度为 3 mm 时为例，当温度在第一个极值点前与第二个极值点后时，T 升高，h_D 几乎不变，因此 N_{O_2} 增大；在两个极值点之间的区域，T 与 h_D 均增大，N_{O_2} 整体呈下降趋势；当坩埚高度较大($h=8$ mm)时，在两个极值点之间的区域，T 升高时 h_D 增大的幅度较小，所以此时曲线的极值点不明显，N_{O_2} 呈上升趋势。

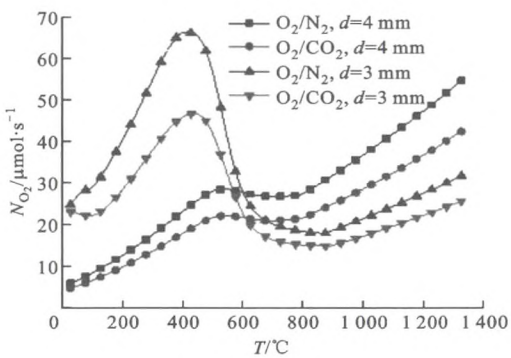
又由图 5a 可见，同一氧含量下，氧气在空气中的扩散速率比富氧下快，且随着坩埚高度增大，空气条件下的扩散速率减小的也比富氧下更快。由图 5b 可见，高氧含量下的扩散速率比低氧含量快，这是因为式(2)中高氧含量下 $c(O_2)$ 较大，因此 N_{O_2} 也相对较大。由图 5c 可见，在反应过程的前半段，坩埚直径较小时氧气外扩散速率更大。这是因为坩埚口距半焦表面较近，而反应的后半段，坩埚直径较大时，氧气外扩散速率更大，因为半焦此时已基本燃尽，两种坩埚的坩埚口与半焦表面距离基本相同，此时坩埚水平方向的截面积成为影响最终氧气扩散速率的因素。由图 5d 可见，半焦质量增大提高了外扩



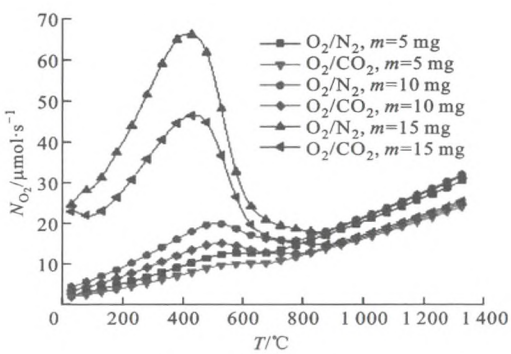
(a)不同坩埚高度



(b)不同氧含量



(c)不同坩埚直径



(d)不同半焦质量

图 5　氧气摩尔流率变化规律

万方数据

散速率，这是因为坩埚口与半焦表面距离较小，氧气的扩散速率受气氛的影响随着温度升高而升高。随着半焦质量减小，外扩散速率的下降速度也在减缓，这与式(2)中 h_D 的增大比例下降密切相关，可见随着半焦质量减小，外扩散趋于稳定，此时气氛对外扩散的影响也在减弱。

2.4 动力学分析

本节采用 Coats-Redfern 积分法[18]对程序升温过程中半焦燃烧反应进行动力学分析。根据 Coats-Redfern 方程，$n\neq1$ 时

$$\ln\left[\frac{-\ln(1-\alpha)^{1-n}}{T^2(1-n)}\right]=\ln\left[\frac{AR}{\beta E}\left(1-\frac{2RT}{E}\right)\right]-\frac{E}{RT} \tag{4}$$

$n=1$ 时

$$\ln\left[\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2}\right]=\ln\left[\frac{AR}{\beta E}\left(1-\frac{2RT}{E}\right)\right]-\frac{E}{RT} \tag{5}$$

式中：α 为半焦的转化率；β 为程序升温速率；E 为表观活化能；A 为指前因子；R 为理想气体常数。

由于对于一般的反应温度区间和大部分的表观活化能而言，$E/RT\gg1$，因此 $1-2RT/E\approx1$，Coats-Redfern 方程右端第一项几乎都是常数。当 $n=1$ 时，将 $\ln[-\ln(1-\alpha)/T^2]$ 对 $1/T$ 作图，能得到一条斜率为 $-E/R$ 的直线。由此，可以求取半焦燃烧反应的表观活化能与指前因子。

图6是体积分数分别为21%、79%的 O_2/CO_2 气氛下半焦采用不同高度坩埚燃烧时的 Coats-Redfern动力学分析曲线。由图6可见，$\ln[-\ln(1-\alpha)/T^2]$ 随 $1/T$ 的变化具有良好的线性关系，表明假设半焦在 O_2/CO_2 气氛下的燃烧反应为一级反应是合理的；随着坩埚高度的增加，拟合直线斜率的绝对值减小。

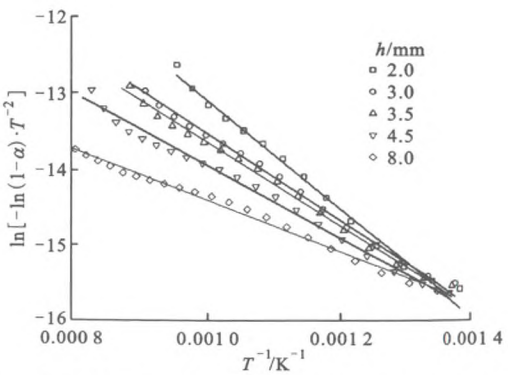


图6 半焦采用不同高度坩埚燃烧时的 Coats-Redfern 动力学分析曲线

表5是采用 Coats-Redfern 积分法求取的半焦燃烧动力学参数。从表5中可以看出，相同气氛下，坩埚高度降低减小了外扩散阻力，从而使半焦燃烧的表观活化能和指前因子得到提升。在相同尺寸的坩埚中，相同氧含量下空气中的表观活化能和指前因子比富氧条件下大。同时，随着氧含量的增大，半焦燃烧的表观活化能与指前因子也随之提升。

表5 采用不同高度坩埚的半焦燃烧动力学参数

气氛	φ/%	h/mm	E/kJ·mol^{-1}	A/min^{-1}	R^2
O_2/N_2	21/79	3.0	61.70	387.57	0.990 9
		4.5	45.38	23.34	0.989 8
		8.0	38.29	5.91	0.982 7
O_2/CO_2	21/79	3.0	47.85	48.39	0.994 6
		4.5	40.25	10.74	0.984 3
		8.0	31.96	2.08	0.991 1
O_2/CO_2	30/70	3.0	60.76	554.60	0.992 9
		4.5	48.32	56.55	0.993 9
		8.0	37.25	6.54	0.984 7

3 结 论

本文通过设计不同工况的热重实验和不同的理论分析方法，在不同气氛下采用不同高度与直径的坩埚并改变半焦质量，研究了扩散效应对半焦富氧燃烧的影响，得出以下结论：

(1)在程序升温的热重实验中，富氧气氛下氧含量升高能够提高扩散速率，使半焦着火更容易，燃尽温度更低，主燃区温度区间缩小，最大反应速率和平均反应速率均增大，燃烧特性指数提高，反应进行更迅速。在相同氧含量的条件下，相比于 O_2/CO_2 气氛，O_2/N_2 气氛下燃烧反应相对更快。

(2)外扩散行程的减小会降低外扩散的阻力，半焦床层厚度减小，坩埚内半焦表面与氧气接触面面积增大，会降低内扩散阻力。内外扩散阻力减小，会使得燃烧特性指数提升。同时，扩散阻力较小时，半焦的挥发分析出和半焦的氧化在整个主燃区温度区间内同时进行，而扩散阻力较大时，在燃烧反应的前半程挥发分就已基本完全析出。当初始外扩散行程较大时，半焦燃烧过程中外扩散速率与环境温度之间接近线性关系。

(3)半焦在富氧气氛下的燃烧反应为一级反应。随着扩散阻力的减小，半焦燃烧的表观活化能与指前因子得到提升。

万方数据

参考文献：

[1] 杨忠灿，刘家利，王志超，等. 半焦着火性能评价指标在电站锅炉上的应用 [J]. 热力发电，2017，46(3)：109-113.
YANG Zhongcan，LIU Jiali，WANG Zhichao，et al. Application of ignition performance evaluation indicator of semi-coke in utility boilers [J]. Thermal Power Generation，2017，46(3)：109-113.

[2] 巩志强. 低阶煤热解半焦的燃烧特性和 NO_x 排放特性试验研究 [D]. 北京：中国科学院大学，2016：3.

[3] 刘典福，魏小林，盛宏至. 半焦燃烧特性的热重试验研究 [J]. 工程热物理学报，2007，28(z2)：229-232.
LIU Dianfu，WEI Xiaolin，SHENG Hongzhi. Thermogravimetric experimental study on combustion characteristics of semicoke [J]. Journal of Engineering Thermophysics，2007，28(z2)：229-232.

[4] 朱建国，贺坤，欧阳子区，等. 0.2 MW 细粉半焦预热燃烧试验研究 [J]. 电站系统工程，2015(5)：9-12.
ZHU Jianguo，HE Kun，OUYANG Ziqu，et al. 0.2 MW experimental study on preheated combustion of pulverized semi-coke [J]. Power System Engineering，2015(5)：9-12.

[5] YANG Y，LU X，WANG Q. Investigation on the co-combustion of low calorific oil shale and its semi-coke by using thermogravimetric analysis [J]. Energy Conversion & Management，2017，136：99-107.

[6] YAO Y，ZHU J，LU Q. Experimental study on nitrogen transformation in combustion of pulverized semi-coke preheated in a circulating fluidized bed [J]. Energy & Fuels，2015，29(6)：150526165241009.

[7] 刘家利，杨忠灿，王志超，等. 兰炭作为动力用煤的燃烧性能研究 [J]. 洁净煤技术，2016，22(2)：84-88.
LIU Jiali，YANG Zhongcan，WANG Zhichao，et al. Combustion characteristics of blue-coke as fuel for pulverized coal boiler [J]. Clean Coal Technology，2016，22(2)：84-88.

[8] NAGAYAMA M，FUKADA K，MATSUI T，et al. Evaluation of coal compatibility effect in coke strength by surface tension of semi-coke [J]. ISIJ International，2017，57(6)：989-995.

[9] 徐文，肖彬. 富氧燃烧对烟气酸露点的影响 [J]. 工业炉，2017，39(6)：57-59.
XU Wen，XIAO Bin. Effect of oxygen enriched combustion on acid dew-point of flue gas [J]. Industrial Furnace，2017，39(6)：57-59.

[10] 李位位，黄戒介，王志青，等. 煤焦 CO_2 气化反应动力学及内扩散对气化过程的影响分析 [J]. 燃料化学学报，2016，44(12)：1416-1421.
LI Weiwei，HUANG Jiejie，WANG Zhiqing，et al. Reaction kinetics of coal char gasification with CO_2 and the effect of internal diffusion on the gasification [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology，2016，44(12)：1416-1421.

[11] 林善俊，周志杰，霍威，等. 内扩散对煤和石油焦水蒸气气化反应性能的影响 [J]. 燃料化学学报，2014，42(8)：905-912.
LIN Shanjun，ZHOU Zhijie，HUO Wei，et al. Effect of internal diffusion on steam gasification reactivity of coal and petroleum coke [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology，2014，42(8)：905-912.

[12] OLLERO P，SERRERA A，ARJONA R，et al. Diffusional effects in TGA gasification experiments for kinetic determination [J]. Fuel，2002，81(15)：1989-2000.

[13] WANG C A，HAN T，DU Y，et al. Diffusional effects on differences of coal char reactivity between air and oxy-fuel combustion in thermogravimetric experiments [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry，2016，125(2)：897-904.

[14] MORGAN P A，ROBERTSON S D，UNSWORTH J F. Combustion studies by thermogravimetric analysis：1 Coal oxidation [J]. Fuel，1986，65(11)：1546-1551.

[15] 陈建原，孙学信. 煤的挥发分释放特性指数及燃烧特性指数的确定 [J]. 动力工程学报，1987(5)：15-20.
CHEN Jianyuan，SUN Xuexin. Determination of volatilization characteristic index and combustion characteristic index of coal [J]. Power Engineering，1987(5)：15-20.

[16] BABINSKI P，SCIAZKO M，KSEPKO E. Limitation of thermogravimetry for oxy-combustion analysis of coal chars [J/OL]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry，2017 [2018-01-10]. doi：10.1007/s10973-017-6782-6.

[17] 王文杰. 基于集对分析法的码头储罐区重大危险源动态分级研究 [D]. 天津：天津理工大学，2013：17.

[18] COATS A W，REDFERN J P. Kinetic parameters from thermogravimetric data [J]. Nature，1964，201：68-69.

（编辑　荆树蓉）

万方数据