

文章编号:1674-7607(2017)08-0673-06

中图分类号:TK227.2

文献标志码:A

学科分类号:470.1010

O_2/CO_2 气氛下碳烟氧化的反应动力学研究

李帅帅, 王学斌, 刘梓晗, 王昭, 李艳, 谭厚章

(西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049)

摘要: 利用热重分析对典型碳烟在 O_2/CO_2 气氛下氧化的动力学特性进行研究, 对比了其于 O_2/N_2 气氛下的差异, 并重点考虑了 O_2 体积分数的影响, 建立了富氧燃烧条件下碳烟氧化反应的表现活化能 E 和频率因子 A 与 O_2 体积分数的定量关联机制. 结果表明: 与 O_2/N_2 气氛相比, O_2/CO_2 气氛下碳烟氧化的起始和结束温度均较高, 综合反应指数降低; O_2/CO_2 气氛下, 随着 O_2 体积分数增大, 碳烟氧化的 TG-DTG 曲线向低温区移动, 起始和结束温度均降低, 最大失重速率增加, 综合反应指数显著提高; 碳烟氧化反应的 E 与 A 之间总是存在显著的“动力学补偿效应”, 当 O_2 体积分数低于 20% 时, E 和 $\ln A$ 均与 O_2 体积分数呈正相关, 而当 O_2 体积分数高于 20% 时, E 与 A 随 O_2 体积分数的变化不显著.

关键词: 碳烟; 富氧燃烧; 动力学; 活化能; O_2 体积分数

Study on Reaction Kinetics of Soot Oxidation in O_2/CO_2 Atmosphere

LI Shuaishuai, WANG Xuebin, LIU Zihan, WANG Zhao, LI Yan, TAN Houzhang

(MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To study the reaction kinetics of soot oxidation in O_2/CO_2 atmosphere, thermogravimetric analysis was conducted with focus on the influence of oxygen concentration ($\varphi(O_2)$), so as to carry out a comparison with that in O_2/N_2 atmosphere, and to obtain the quantitative relations between $\varphi(O_2)$ and the kinetic parameters including apparent activation energy (E) and frequency factor (A) for soot oxidation under oxy-fuel combustion conditions. Results show that in O_2/CO_2 atmosphere, both the starting and ending temperatures of soot oxidation are higher, indicating that the reactivity is inhibited in contrast with that in O_2/N_2 atmosphere; with the rise of oxygen concentration in O_2/CO_2 atmosphere, the TG-DTG curve moves toward the lower temperature region, the maximum mass loss rate increases, and the reactivity improves significantly. Obvious kinetic compensation effect exists between A and E of soot oxidation. When the value of $\varphi(O_2)$ is lower than 20%, both E and $\ln A$ have positive correlations with $\varphi(O_2)$; whereas when the value of $\varphi(O_2)$ is higher than 20%, both E and $\ln A$ have nearly no correlation with $\varphi(O_2)$.

Key words: soot; oxy-fuel combustion; kinetics; activation energy; oxygen concentration

收稿日期:2016-06-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51306142,91544108,51376147)

作者简介:李帅帅(1993-),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事生物质燃烧过程中微细颗粒物排放方面的研究.

王学斌(通信作者),男,副教授,电话(Tel.): 029-82668703;E-mail: wxb005@mail.xjtu.edu.cn.

化石燃料的大量使用导致大气中 CO_2 等温室气体含量增加,而在各种 CO_2 减排手段中,富氧燃烧技术能使燃料在 O_2/CO_2 气氛下燃烧产生高浓度的 CO_2 ,同时还能协同减少其他污染物的排放,因而受到了广泛关注.与传统空气燃烧相比,富氧燃烧过程的燃烧气氛从 O_2/N_2 变为 O_2/CO_2 ,烟气比热容、有关传热传质和煤焦反应动力学特性均有所差异^[1].已有研究表明,煤粉颗粒在 O_2/CO_2 气氛下着火延迟,燃尽温度升高,火焰的传播速度下降显著,着火稳定性变差,有关气相和颗粒相污染物的排放特性也变化很大^[2].

碳烟作为富燃料燃烧过程的颗粒相污染物,不仅会降低设备燃烧效率,沉积在设备表面,还会影响设备的正常运行^[3];碳烟粒径通常为纳米和亚微米级,是重要的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染源之一^[4],并且细小的碳烟易富集多环芳烃(PAH),人体吸入后可诱发癌变^[5].此外,碳烟对炉膛内部的辐射换热也会产生重要影响,研究发现由于其极强的热辐射性,火焰中的碳烟颗粒可以强化辐射换热,降低火焰区的温度^[6-8];还有研究提出在锅炉适当位置生成大量碳烟,以强化辐射换热,提高热流密度^[9-10],而生成的碳烟必须采取一定技术进行氧化脱除.近年来,针对碳烟的氧化已有一定研究,结果表明碳烟的氧化除

了与碳烟颗粒的微观结构和催化剂的使用有关外,还与碳烟颗粒氧化所处的气氛密切相关^[11-16].目前有关碳烟氧化的研究主要集中在空气燃烧气氛下,而对 O_2/CO_2 气氛下碳烟氧化的动力学机理研究较少.

笔者采用热重分析法对典型碳烟颗粒在 O_2/CO_2 气氛下氧化的动力学特性进行研究,并与 O_2/N_2 气氛下进行对比,重点考虑了 O_2 体积分数的影响,建立富氧燃烧变 O_2 体积分数条件下碳烟氧化反应的表观活化能 E 和频率因子 A 与 O_2 体积分数 $\varphi(\text{O}_2)$ 的定量关联机制.

1 研究方法

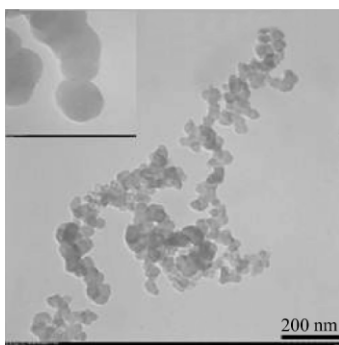
1.1 样品特性

笔者采用商业碳烟(德国赛 Printex U)模拟锅炉排放碳烟,试验前在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱里烘干 2 h 备用,样品的特性参数如表 1 所示.由表 1 可知,碳烟样品的灰分低、原生粒径小而碳元素含量高.

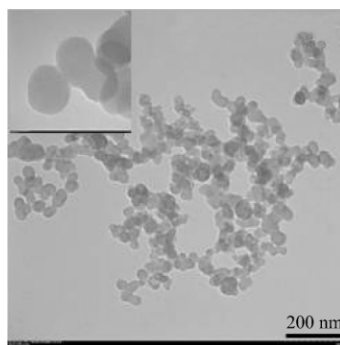
笔者将试验用碳烟样品与从蜡烛火焰和发动机排放中获取碳烟的微观形貌特征进行对比(见图 1).由图 1 可知,3 种碳烟形貌差异不大,原生粒径均小于 30 nm ,呈疏松的气溶胶形态.

表 1 试验用碳烟样品的特性参数
Tab. 1 Properties of the soot tested

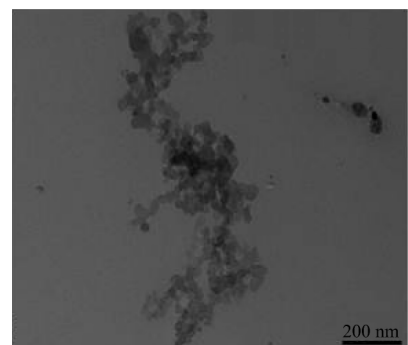
平均原生 粒径/nm	$w(\text{挥发})/\%$	$w(\text{灰分})/\%$	$w(\text{C})/\%$	$w(\text{H})/\%$	$w(\text{N})/\%$	$w(\text{S})/\%$	$w(\text{O})/\%$
13	6.00	0.04	91.20	0.65	0.21	0.15	7.79



(a) 试验用商业碳烟



(b) 蜡烛火焰碳烟



(c) 发动机排放碳烟

图 1 试验用碳烟样品与蜡烛火焰和发动机排放碳烟微观形貌的对比

Fig. 1 Comparison of TEM morphologies among the soot, candle flame, and engine emission

1.2 试验设备和条件

试验在 Netzsch STA-409PC 型热天平上进行,采用非等温的线性升温加热方式,升温速率为 20 K/min ,加热最高温度为 $900\text{ }^\circ\text{C}$,样品质量约为 5 mg ,总气体体积流量为 200 mL/min , O_2/CO_2 气氛

下的 O_2 体积分数为 $5\% \sim 40\%$,其中选取 5% 和 20% 与 O_2/N_2 气氛进行对比.

1.3 特征参数和动力学分析方法

选取碳烟氧化过程的起始温度 T_i 、结束温度 T_f 和失重峰值温度 T_{peak} 作为反应特征温度,相关特征

温度的求取方法如图 2 所示^[17]. 为了综合考虑氧化起始温度 T_i 、结束温度 T_f 、最大失重速率 w_{\max} 和平均失重速率 w_{mean} 的影响, 引入综合反应指数 S 作为评价碳烟氧化反应活性的综合性参数指标^[18-19]:

$$S = \frac{w_{\max} \times w_{\text{mean}}}{T_i^2 \times T_f} \quad (1)$$

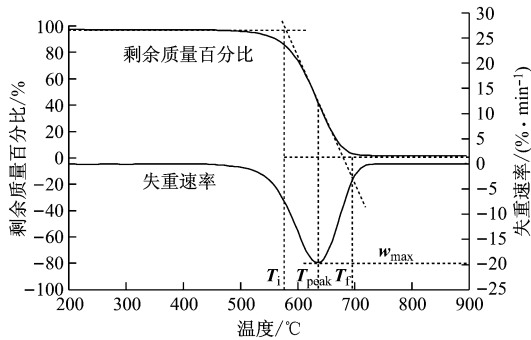


图 2 碳烟氧化特征参数的确定

Fig. 2 Definition of characteristic parameters in TG-DTG curves of soot oxidation

由于碳烟成分相对简单, 其氧化过程呈单峰分布, 因此在动力学分析法中把碳烟假设为单一组分, 采用 Coats-Redfern 积分法对该反应的表现活化能和频率因子进行求解. 此外, 根据早期有关碳烟氧化反应动力学的初步结果, 碳烟氧化的反应级数近似等于 1^[15], 故可采用 $f(\alpha) = 1 - \alpha$ 作为碳烟氧化反应的机理函数. 因此, 碳烟氧化的反应速率可表示如下:

$$\frac{d\alpha}{dT} = (A/\beta) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (2)$$

经过进一步的积分和转化可得:

$$\ln\left[-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right] = \ln\left[\frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E}\right)\right] - \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (3)$$

式中: α 为失重率, 取 1; β 为升温速率, K/min; A 为频率因子, s⁻¹; E 为表现活化能, kJ/mol; R 为通用气体常数, 为 8.314 J/(mol·K); T 为热力学温度, K. 一般反应的 $2RT/E \ll 1$, 故 $\ln\left[\frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E}\right)\right]$ 可当成常数, 因此 $\ln\left[-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right]$ 与 $1/T$ 呈线性关系. 根据失重(TG)曲线上每一点的 α 和 T 值可求出相应 $1/T$ 与 $\ln\left[-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right]$ 的值, 进一步对其进行线性拟合作图, 可通过拟合直线的斜率和截距值, 计算得到碳烟氧化的表现活化能 E 和频率因子 A .

2 结果与讨论

2.1 O₂/N₂ 气氛和 O₂/CO₂ 气氛的影响

为了便于进行比较, 将碳烟氧化所有工况的特

征参数统一汇总于表 2. 碳烟分别在 O₂/N₂ 气氛和 O₂/CO₂ 气氛下高温氧化的失重曲线和失重速率曲线(TG-DTG 曲线)如图 3 所示. 由图 3 可知, 2 种气氛下碳烟氧化的失重曲线差异显著: 与 O₂/N₂ 气氛相比, 同一 O₂ 体积分数下, O₂/CO₂ 气氛下的 TG-DTG 曲线向高温区偏移, 以 5% O₂ 体积分数为例, 碳烟着火温度(即起始温度)由 632.9 °C 提高到 650.8 °C, 燃尽温度(即结束温度)由 778.4 °C 提高到 838.2 °C. 说明 O₂/CO₂ 气氛推迟了碳烟的着火和燃尽, 这主要是由 O₂ 在 CO₂ 中比在 N₂ 中的扩散传质能力低导致的^[20-21]; 同时, CO₂ 具有较高的摩尔比热容, 且高温下高体积分数 CO₂ 加剧了碳烟表面的 CO₂ 气化吸热反应, 导致 O₂/CO₂ 气氛下碳烟颗粒表面温度降低^[22]. 进一步增大碳烟氧化环境中的 O₂ 体积分数到 20% 时, O₂/N₂ 气氛和 O₂/CO₂ 气氛下碳烟氧化的失重曲线差异较小, 这主要是由于 O₂ 体积分数增大后碳烟氧化活性提高, 失重速率较快. 纵观气氛改变对碳烟氧化综合反应指数的影响, 由表 2 可知, 当碳烟氧化气氛从 O₂/N₂ 切换到 O₂/CO₂ 时, 5% 和 20% O₂ 体积分数下的综合反应指数分别由 1.05×10^{-7} 和 2.52×10^{-7} 下降到 6.63×10^{-8} 和 2.25×10^{-7} , 分别降低了 37% 和 11%.

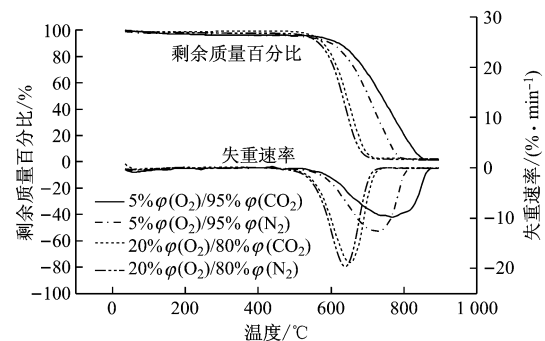


图 3 O₂/N₂ 气氛和 O₂/CO₂ 气氛下 TG-DTG 曲线的对比

Fig. 3 Comparison of TG-DTG curves respectively in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmosphere

2.2 O₂ 体积分数的影响

在 O₂/CO₂ 气氛下, 不同 O₂ 体积分数下碳烟氧化的 TG-DTG 曲线和特性参数分别见图 4 和图 5. 从图 4 和图 5 可以看出, 随着 O₂ 体积分数的增大, 碳烟氧化的 TG-DTG 曲线向低温区移动, 起始和结束温度均降低, 而最大失重速率增加, 综合反应指数显著升高. 当 O₂ 体积分数由 5% 提高到 40% 时, 碳烟的着火温度、峰值和燃尽温度分别降低了 90.7 K、162.5 K 和 191.8 K; 碳烟氧化综合反应指数由 6.63×10^{-8} 提高到 3.15×10^{-7} , 提高了 375.1%. 可见提高 O₂ 体积分数可以显著改善碳烟的高温氧化

表 2 碳烟燃烧特性参数

Tab. 2 Combustion characteristic parameters of soot samples

气氛	$\varphi(\text{O}_2)$	$T_i/\text{°C}$	$T_{\text{peak}}/\text{°C}$	$T_f/\text{°C}$	$\tau_{\text{max}}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$\tau_{\text{mean}}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$S/(\% \cdot \text{min}^{-2} \cdot \text{°C}^{-3})$
O ₂ /N ₂	0.05	632.9	726.1	778.4	12.633	2.579	1.05×10^{-7}
O ₂ /N ₂	0.20	585.0	638.2	678.6	19.820	2.951	2.52×10^{-7}
O ₂ /CO ₂	0.05	650.8	768.8	838.2	9.828	2.395	6.63×10^{-8}
O ₂ /CO ₂	0.10	631.7	715.6	765.7	13.679	2.598	1.16×10^{-7}
O ₂ /CO ₂	0.15	607.4	673.3	714.3	16.825	2.713	1.73×10^{-7}
O ₂ /CO ₂	0.20	590.4	651.6	692.2	18.861	2.883	2.25×10^{-7}
O ₂ /CO ₂	0.30	576.5	630.1	670.9	19.693	3.037	2.68×10^{-7}
O ₂ /CO ₂	0.35	570.2	617.8	663.8	19.488	3.065	2.77×10^{-7}
O ₂ /CO ₂	0.40	560.1	606.3	646.4	20.933	3.049	3.15×10^{-7}

特性. 这主要是因为提高 O₂ 体积分数可使碳烟颗粒表面物理和化学吸附的 O₂ 增多, 从而使碳烟颗粒的氧化反应速率增大、热重曲线向低温区移动^[23-24]. 进一步观察图 4 可知, O₂ 体积分数较低时 ($\varphi(\text{O}_2) < 20\%$), 提高 O₂ 体积分数对碳烟氧化的 TG-DTG 曲线影响较为显著, 当 O₂ 体积分数升高到 20% 以上时, O₂ 体积分数对 TG-DTG 曲线的影响减弱. 这是因为当 O₂ 体积分数足够高时, 碳烟颗粒表面物理和化学吸附的 O₂ 随 O₂ 体积分数增大而增加的速率降低, 此时 O₂ 向碳烟表面的扩散对氧化反应速率的影响减弱.

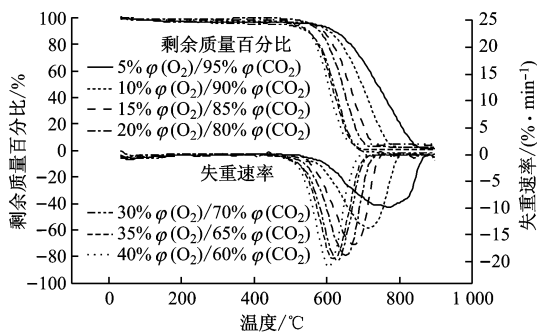


图 4 O₂ 体积分数对碳烟氧化 TG-DTG 曲线的影响

Fig. 4 TG-DTG curves at different oxygen concentrations

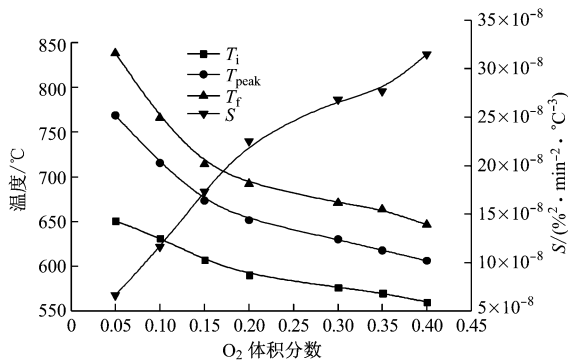


图 5 O₂ 体积分数对碳烟氧化特性参数的影响

Fig. 5 Effect of oxygen concentration on characteristic parameters of soot oxidation

2.3 碳烟在不同气氛下的动力学分析

按照 1.3 节所述对热重数据进行处理, 各工况下的动力学特征曲线如图 6 所示, 其动力学参数汇总于表 3. 由图 6 和表 3 可知, O₂ 体积分数为 5% 时, 碳烟在 O₂/CO₂ 气氛下的 E 和 A 均低于 O₂/N₂ 气氛下的 E 和 A; 提高 O₂ 体积分数到 20%, 2 种气氛下的 E 差异很小, 但 O₂/CO₂ 气氛下的 A 依然较低.

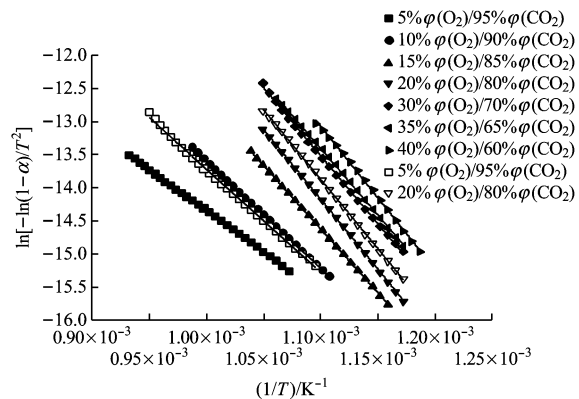


图 6 不同气氛和 O₂ 体积分数下的动力学特性曲线

Fig. 6 Arrhenius plotting under different atmospheres and oxygen concentrations

进一步将 O₂ 体积分数对动力学参数的影响统计(见图 7)并进行线性拟合(见表 4). 由图 7 和表 4 可知, O₂/CO₂ 气氛下, O₂ 体积分数低于 20% 时, 碳烟氧化的表观活化能 E 和频率因子的自然对数 ln A 均与 O₂ 体积分数呈正相关, 线性拟合可得 $E = 82.27 + 485.46 \times \varphi(\text{O}_2) \text{ kJ/mol}$, $\ln A = 2.97 + 77.41 \times \varphi(\text{O}_2)$, 故碳烟氧化的速率可表述为: $da/dt = 19.49 \times \exp[77.41\varphi(\text{O}_2) - (82.270 + 485.46\varphi(\text{O}_2)) / RT] \times (1 - \alpha)$; 而当 O₂ 体积分数高于 20% 时, E 和 A 随 O₂ 体积分数的变化不明显, 分别约等于 172.96 kJ/mol 和 $7.861 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, 此时碳烟氧

表 3 碳烟燃烧的动力学参数汇总表

Tab. 3 Kinetic parameters of soot oxidation under all conditions

气氛	$\varphi(O_2)$	温度范围/°C	$E/(kJ \cdot mol^{-1})$	A/s^{-1}	$\ln(A/s^{-1})$	相关系数 R
O ₂ /N ₂	0.05	640~780	129.29	3.23×10^4	10.382	-0.999 1
O ₂ /N ₂	0.20	580~680	174.19	6.73×10^7	18.024	-0.999 9
O ₂ /CO ₂	0.05	660~800	102.63	5.56×10^2	6.320	-0.999 9
O ₂ /CO ₂	0.10	630~740	134.49	7.07×10^4	11.165	-1.000 0
O ₂ /CO ₂	0.15	590~690	159.48	4.15×10^6	15.237	-1.000 0
O ₂ /CO ₂	0.20	580~680	175.21	5.73×10^7	17.864	-1.000 0
O ₂ /CO ₂	0.30	580~680	170.38	5.66×10^7	17.851	-0.999 7
O ₂ /CO ₂	0.35	580~670	166.73	3.81×10^7	17.457	-0.999 6
O ₂ /CO ₂	0.40	570~640	179.52	3.12×10^8	19.559	-0.999 0

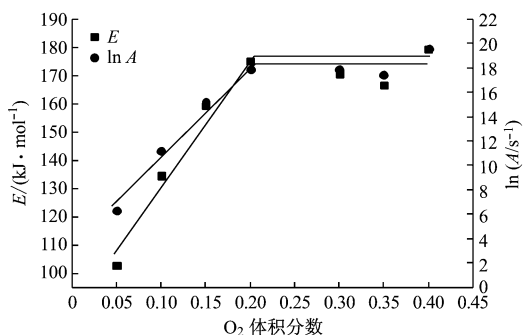


图 7 O₂ 体积分数对碳烟氧化表观活化能 E 和频率因子 A 的影响
Fig. 7 Effect of oxygen concentration on kinetic parameters E and A

表 4 O₂/CO₂ 气氛下 E 和 $\ln A$ 与 O₂ 体积分数的关系

Tab. 4 Relations of E and $\ln A$ with oxygen concentration in O₂/CO₂ atmosphere

参数	$\varphi(O_2)$	关系式	相关系数 R^2
$E/(kJ \cdot mol^{-1})$	[0.05, 0.2]	$E = 82.27 + 485.46 \times \varphi(O_2)$	0.989
	(0.2, 0.4]	$E = 172.96$	0.996
$\ln(A/s^{-1})$	[0.05, 0.2]	$\ln A = 2.97 + 77.41 \times \varphi(O_2)$	0.992
	(0.2, 0.4]	$\ln A = 18.18$	0.999

化的速率可忽略 O₂ 体积分数的影响,表达式如下:
 $da/dt = 7.861 \times 10^7 \times \exp(-172\ 960/RT) \times (1-\alpha)$.

从表 3 还可以看出,随着表观活化能 E 的增大,相对应的频率因子 A 也增大,将碳烟氧化的 E 和 $\ln A$ 作图(见图 8)。从图 8 可以看出, $\ln A$ 与 E 之间存在良好的线性关系,拟合直线 $\ln A = -11.38 + 0.17 \times E$ 的相关系数为 0.996,即 E 与 A 之间存在显著的“动力学补偿效应”。

3 结 论

(1) 与 O₂/N₂ 气氛相比, O₂/CO₂ 气氛下碳烟

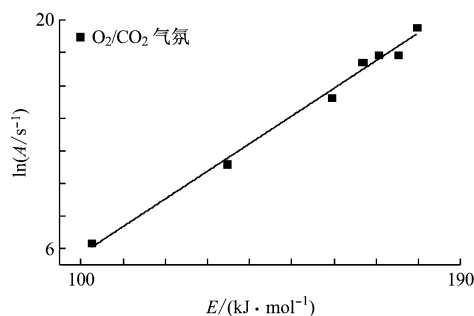


图 8 频率因子 A 与表观活化能 E 之间的补偿效应分析
Fig. 8 Compensation relationship between $\ln A$ and E of soot oxidation

氧化的 TG-DTG 曲线向高温区偏移,氧化的起始和结束温度均较高,综合反应指数降低;当 O₂ 体积分数由 5% 提高至 20% 时,碳烟反应活性提高,因而 O₂/N₂ 气氛和 O₂/CO₂ 气氛下碳烟氧化失重曲线的差异减小。在 O₂/CO₂ 气氛下,随着 O₂ 体积分数的增大,碳烟氧化的 TG-DTG 曲线向低温区移动,起始和结束温度均降低,最大失重速率增加,综合反应指数显著提高。

(2) 碳烟氧化反应的表观活化能 E 与频率因子 A 之间总是存在“动力学补偿效应”,拟合直线为: $\ln A = -11.38 + 0.17 \times E$,该补偿关系与气氛无关。O₂/CO₂ 气氛下,当 O₂ 体积分数低于 20% 时, E 和 $\ln A$ 均与 O₂ 体积分数呈正相关,碳烟氧化的反应速率可表示为: $da/dt = 19.49 \times \exp[77.41\varphi(O_2) - (82\ 270 + 485\ 460\varphi(O_2))/RT] \times (1-\alpha)$;而当 O₂ 体积分数高于 20% 时, E 与 A 随 O₂ 体积分数的变化不显著,分别为 172.96 kJ/mol 和 $7.861 \times 10^7 s^{-1}$,此时可忽略 O₂ 体积分数对碳烟氧化动力学方程的影响,碳烟氧化的反应速率变为 $da/dt = 7.861 \times 10^7 \times \exp(-172\ 960/RT) \times (1-\alpha)$ 。

参考文献:

[1] 葛学利, 乌晓江, 张建文, 等. 富氧燃烧条件下炉内数值模拟研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(3): 172-177.
GE Xueli, WU Xiaojiang, ZHANG Jianwen, et al. Numerical simulation of oxy-fuel combustion characteristics in a 300 MW coal-fired boiler[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2016, 36(3): 172-177.

[2] SUDA T, MASUKO K, SATO J I, et al. Effect of carbon dioxide on flame propagation of pulverized coal clouds in CO₂/O₂ combustion[J]. **Fuel**, 2007, 86(12/13): 2008-2015.

[3] 谢广录, 范卫东, 徐宾, 等. 天然气炭黑燃烧特性的

- 热天平研究[J]. 热能动力工程, 2005, 20(5): 521-526.
- XIE Guanglu, FAN Weidong, XU Bin, et al. Thermogravimetric study of the combustion characteristics of natural-gas soot[J]. **Journal of Engineering for Thermal Energy and Power**, 2005, 20(5): 521-526.
- [4] 王清成, 罗永浩, 陆方, 等. 煤燃烧系统中碳黑的研究进展[J]. 锅炉技术, 2007, 38(2): 35-39.
- WANG Qingcheng, LUO Yonghao, LU Fang, et al. Investigation on coal derived soot in coal combustion system[J]. **Boiler Technology**, 2007, 38(2): 35-39.
- [5] CHHITI Y, PEYROT M, SALVADOR S. Soot formation and oxidation during bio-oil gasification: experiments and modeling[J]. **Journal of Energy Chemistry**, 2013, 22(5): 701-709.
- [6] KATTA V R, ROQUEMORE W M, MENON A, et al. Impact of soot on flame flicker[J]. **Proceedings of the Combustion Institute**, 2009, 32(1): 1343-1350.
- [7] WEN J X, HUANG L Y. CFD modelling of confined jet fires under ventilation-controlled conditions[J]. **Fire Safety Journal**, 2000, 34(1): 1-24.
- [8] WEN J X, HUANG L Y, ROBERTS J. The effect of microscopic and global radiative heat exchange on the field predictions of compartment fires[J]. **Fire Safety Journal**, 2001, 36(3): 205-223.
- [9] AL-OMARI S-A B, KAWAJIRI K, YONESAWA T. Soot processes in a methane-fueled furnace and their impact on radiation heat transfer to furnace walls[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2001, 44(13): 2567-2581.
- [10] BELTRAME A, PORSHNEV P, MERCHAN-MERCHAN W, et al. Soot and NO formation in methane-oxygen enriched diffusion flames[J]. **Combustion and Flame**, 2001, 124(1/2): 295-310.
- [11] WAGLÖHNER S, REICHERT D, BOCKHORN H, et al. Studies on the effect of physico-chemical soot properties and feed gas composition on the kinetics of soot oxidation on Fe_2O_3 catalyst[J]. **Chemie Ingenieur Technik**, 2013, 85(5): 686-695.
- [12] VANDER WAL R L, TOMASEK A J. Soot oxidation: dependence upon initial nanostructure[J]. **Combustion and Flame**, 2003, 134(1/2): 1-9.
- [13] DARCY P, DA COSTA P, MELLOTTÉE H, et al. Kinetics of catalyzed and non-catalyzed oxidation of soot from a diesel engine[J]. **Catalysis Today**, 2007, 119(1/4): 252-256.
- [14] SHIMIZU KI, KAWACHI H, SATSUMA A. Study of active sites and mechanism for soot oxidation by silver-loaded ceria catalyst[J]. **Applied Catalysis B: Environmental**, 2010, 96(1/2): 169-175.
- [15] STANMORE B R, BRILHAC J F, GILOT P. The oxidation of soot: a review of experiments, mechanisms and models[J]. **Carbon**, 2001, 39(15): 2247-2268.
- [16] NEEFT J P A, NIJHUIS T X, SMAKMAN E, et al. Kinetics of the oxidation of diesel soot[J]. **Fuel**, 1997, 76(12): 1129-1136.
- [17] HUANG Xiangyong, JIANG Xiumin, HAN Xiangxin, et al. Combustion characteristics of fine-and micro-pulverized coal in the mixture of O_2/CO_2 [J]. **Energy & Fuels**, 2008, 22(6): 3756-3762.
- [18] 姜秀民, 李巨斌, 邱建荣. 超细化煤粉燃烧特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 71-74.
- JIANG Xiumin, LI Jubin, QIU Jianrong. Study on combustion characteristic of micro-pulverized coal[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2000, 20(6): 71-74.
- [19] 唐子君, 岑超平, 方平. 城市污水污泥与煤混烧的热重试验研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(11): 878-884, 897.
- TANG Zijun, CEN Chaoping, FANG Ping. Thermogravimetric experiment on co-firing characteristics of coal with municipal sewage sludge[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2012, 32(11): 878-884, 897.
- [20] AL-ABBAS A H, NASER J, DODDS D. CFD modelling of air-fired and oxy-fuel combustion of lignite in a 100 kW furnace[J]. **Fuel**, 2011, 90(5): 1778-1795.
- [21] WALL T, LIU Yinghui, SPERO C, et al. An overview on oxyfuel coal combustion—state of the art research and technology development[J]. **Chemical Engineering Research and Design**, 2009, 87(8): 1003-1016.
- [22] MOLINA A, SHADDIX C R. Ignition and devolatilization of pulverized bituminous coal particles during oxygen/carbon dioxide coal combustion[J]. **Proceedings of the Combustion Institute**, 2007, 31(2): 1905-1912.
- [23] 李道强. O_2/CO_2 气氛下煤粉燃烧特性及性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [24] 刘国伟, 董芃, 韩亚芬, 等. 富氧条件下煤燃烧特性的热重分析实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(1): 104-108.
- LIU Guowei, DONG Peng, HAN Yafen, et al. Experimental study on combustion characteristics of coals under enriched-oxygen condition by thermogravimetric analysis[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2011, 43(1): 104-108.