

NO 在活性炭表面的吸附平衡和动力学研究

尹艳山, 张军, 盛昌栋

(东南大学能源与环境学院, 江苏省南京市 210096)

Adsorption Equilibrium and Kinetics of NO Removal on Activated Carbons

YIN Yanshan, ZHANG Jun, SHENG Changdong

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The adsorption equilibrium and kinetics of NO removal on activated carbons (ACs) were investigated based on a quartz fixed bed reactor by temperature programmed reaction (TPR) and isothermal reaction. The results of TPR were in good agreement with that of isothermal reaction. ACs-NO in TPR (30~600 °C) showed three temperature regions, corresponding to chemisorption, transition and reduction reaction respectively with increasing temperature. Compared with Freundlich and Temkin isotherm equation, Langmuir isotherm equation presented better fitted results for NO adsorption equilibrium. Three kinetic models including intra-particle diffusion equation, Langmuir rate equation and Elovich equation were applied in describing the reaction of ACs-NO at low temperatures. The correlation efficient from the three kinetic models revealed that Elovich equation was the most suitable one. Therefore, NO removal on AC at low temperature was controlled by chemisorption rate. The initial adsorption rate varied inversely with temperature. The activation energy of chemisorption increased with the increase of NO uptakes from an initial negative value. The kinetics of ACs-NO at high temperatures was controlled by reduction reaction.

KEY WORDS: activated carbon; NO adsorption; adsorption equilibrium; kinetics

摘要: 利用石英固定床反应器研究了程序升温反应 (temperature programmed reaction, TPR) 中 NO 在活性炭表面的转化率变化和等温条件下的 NO 吸附平衡和动力学。活性炭-NO 的 TPR 结果和等温实验结果相一致。TPR(30~600 °C) 呈现 3 个温度区, 分别对应化学吸附、过渡温度区和还原反应。用 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 等温线方程

分别拟合吸附数据, 发现 Langmuir 方程能够很好地预测 NO 在活性炭表面的吸附平衡。使用颗粒内扩散方程、Langmuir 速率方程和 Elovich 方程分别拟合动力学数据, 结果表明低温时活性炭-NO 的动力学符合 Elovich 方程, 其机制由化学吸附控制, 起始吸附速率随着温度升高而降低, 吸附活化能随着吸附量增加而线性增大。高温时等温实验结果表明, 活性炭-NO 由还原反应机制控制。

关键词: 活性炭; NO 吸附; 吸附平衡; 动力学

0 引言

NO 是燃煤产生的主要大气污染物之一, 排放在大 气中的 NO 经过一系列化学作用后形成酸雨和光化学烟雾, 对人体健康会造成严重危害。碳材料中的活性炭, 由于疏松多孔、价格价廉, 在 NH₃ 选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR) NO 时可充当催化剂或催化剂载体^[1-2], 在不加入气相还原剂时其本身亦可作为 NO 的吸附剂和还原剂^[3]。相比 SCR 而言, 直接利用活性炭脱除 NO 既可以达到高效降低 NO 的目的, 又可以避免因 NH₃ 泄漏对环境造成二次污染, 因而利用活性炭去除 NO 引起了国内外研究者的广泛关注^[3-7]。C-NO 低温作用时 NO 在碳材料表面吸附形成 C(NO)络合物, 高温时 C 与 NO 发生还原反应生成 N₂、CO₂ 和 CO。由于 C-NO 反应非常复杂, 涉及到吸附、表面络合物的解吸和气相反应产物的释放, 碳材料的物理和化学结构、反应温度、气氛和无机成分的催化作用都对 C-NO 反应产生影响, 至今关于 C-NO 反应的许多问题仍不清楚, 需要进一步深入研究。尽管对 C-NO 的高温还原反应和低温吸附的机制已有不少报道^[3,6,8-12], 然而对低温时 C-NO 的吸附平衡和动力学以及由吸附到还原反应的转变的研究还少见报道。无论是 C-NO 的吸附还是还原反应, 其作用的第 1

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目) (2006CB200302)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2006CB200302).

步都是 NO 在碳材料表面的吸附,因此研究 C-NO 的吸附平衡和动力学,有助于为工业吸附过程的设计提供基础数据。

本文的目的是研究活性炭-NO 的吸附平衡、吸附速率和还原反应速率。文中以 2 种煤基活性炭为对象,利用石英管固定床反应器,在程序升温反应 (temperature programmed reaction, TPR) 下研究 NO 的转化率变化,探索活性炭-NO 的作用由吸附到还原反应的转变过程;在等温下研究活性炭-NO 的吸附平衡和吸附、还原反应动力学,分析活性炭-NO 从吸附转变到还原反应的动力学参数变化。

1 实验

1.1 活性炭的孔隙结构测定

本文选用 2 种煤基活性炭 (AC-1 和 AC-2) 作为脱除 NO 的原料,使用 Micromeritics 公司的 ASAP2020M 全自动比表面积分析仪,采用液氮吸附法对其进行孔隙结构测定,分别利用 BET 方程和 BJH 方法计算活性炭的比表面积和孔径分布,得到的孔隙结构参数和孔径分布如表 1 和图 1 所示。

表 1 活性炭的孔隙结构参数

Tab. 1 Parameters of pore structure of activated carbons

活性炭	比表面积/ (m ² /g)	总孔容积/ (cm ³ /g)	微孔容积/ (cm ³ /g)	平均孔径/ nm
AC-1	842	0.43	0.31	2.04
AC-2	297	0.15	0.12	1.99

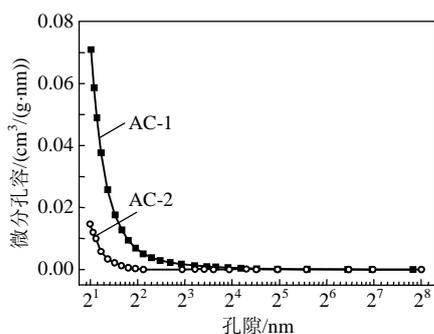


图 1 活性炭的孔径分布

Fig. 1 Pore size distribution of activated carbons

1.2 活性炭-NO 的动力学测定

实验在石英管固定床反应器 (内径 12 mm) 中进行,气体流量由质量流量计精确控制,反应器入口的 NO/Ar 总流量为 85 mL/min,每次实验装入活性炭样品约 2 g,实验过程中反应器出口气体导入气相色谱仪 (GC 112A) 中采用 Porapak Q 80/100 色谱柱和热导检测器进行在线测定。

采用程序升温反应和等温反应 2 种实验方法,前者用于观察升温过程中 NO 转化率的变化,后者

用于分析等温反应条件下的动力学特性,通过测量不同 NO 入口浓度下的平衡吸附量求解吸附平衡参数,通过记录不同温度下 NO 吸附量随时间的变化研究动力学参数。

TPR 实验前通入高纯 Ar (99.999%) 排除反应器系统内的空气,之后切换成 NO/Ar 混合气体 (0.247% NO),以 5 °C/min 的速率从 30 °C 升温到 600 °C。根据式 (1) 计算 NO 的转化率:

$$f = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: f 为 NO 的转化率, %; C_i 和 C_o 分别为 NO 的入口和出口浓度, %。

NO 吸附平衡实验采用 AC-2 样,在 50 °C 时 4 种入口浓度 (0.148%、0.247%、0.395% 和 0.593%) 条件下进行。NO 的平衡吸附量根据式 (2) 计算:

$$q_e = \frac{Q \int_0^{t_f} (C_i - C_o) dt}{22.4W} \quad (2)$$

式中: q_e 为单位质量吸附剂的 NO 平衡吸附量, mmol/g; Q 为反应器入口的 NO/Ar 流量, mL/min; t_f 为达到平衡吸附的时间, min; W 为活性炭样品的质量, g。

AC-1 和 AC-2 与 NO 的等温动力学实验在 50~600 °C 范围内的多个温度下进行,测定 NO 的脱除量随时间的变化,气体浓度和 NO/Ar 总流量与 TPR 实验相同。低温 (50~300 °C) 和高温时 (400~600 °C) 活性炭与 NO 的动力学实验分别保持 3 和 2 h。NO 的脱除量 q 参照式 (2) 计算,其中时间的积分上限为动力学实验的持续时间。

上述实验过程中,每个实验工况都重复 1 次,取重复测量的参数平均值作为实验值。

2 结果和讨论

2.1 活性炭的孔结构分析

表 1 显示 2 种活性炭都具有可观的比表面积和发达的微孔结构,AC-1 的比表面积、总孔容积、微孔容积和平均孔径都比 AC-2 要大。图 1 表明小于 5 nm 的微孔和中孔对 AC-1 和 AC-2 的总孔容积贡献较大。文献 [11] 报道 NO 分子的动力学直径为 0.317 nm,因此理论上来说本文选用的 2 种活性炭都能对 NO 形成较好的吸附。

2.2 活性炭-NO 的程序升温反应

活性炭在 TPR 中的 NO 转化率如图 2 所示,随着温度升高活性炭-NO 的作用呈现 3 个温度区的特征。在整个 TPR 过程中 AC-1 的 NO 转化率都大于

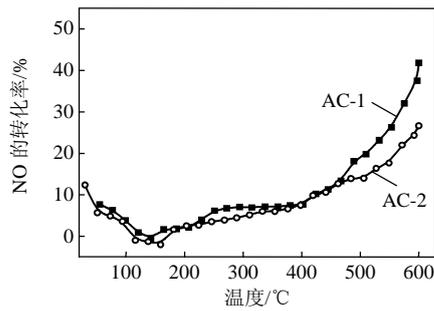


图 2 TPR 中 NO 的转化率随温度的变化
Fig. 2 Variations of NO conversion with temperature during TPR

AC-2 的值, 可能与前者具有较大的比表面积和微孔孔容有关。第 1 个温度区在 30~150 °C, 由于 NO 在活性炭表面的吸附为放热吸附, 并且存在可逆吸附过程^[10], 吸附的同时部分吸附形成的络合物产生解吸, 这种解吸作用随温度升高而增大, 使得 NO 转化率随着温度升高而下降; 第 2 个温度区位于 150~400 °C, 络合物解吸释放了部分活性位, 吸附和解吸的共同作用使得 NO 转化率随温度升高有所增大; 第 3 个温度区位于 400~600 °C, NO 在活性炭表面吸附并与表面碳原子迅速发生反应, 释放出气相产物, 使得 NO 转化率随着温度升高迅速增大。可见, 第 2 个温度区是由吸附向还原反应过渡的温度区。

2.3 活性炭-NO 的吸附平衡

气体在固体表面的吸附平衡通常用 Langmuir 方程、Freundlich 方程和 Temkin 方程描述。

Langmuir 方程可适用于物理吸附和化学吸附。假设吸附为均匀表面的单分子层吸附, 忽略被吸附的分子间的横向相互作用, Langmuir 方程^[13]可表示为

$$q_e = \frac{q_m K_A C_e}{1 + K_A C_e} \quad (3)$$

式中: q_m 为吸附剂单分子层的最大吸附量, mmol/g; K_A 为与吸附剂和吸附质之间的亲和力有关的 Langmuir 吸附常数, L/g; C_e 为 NO 的吸附平衡浓度, mmol/L。通过变换可将式(3)表示为线性方程形式:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m K_A} \frac{1}{C_e} \quad (4)$$

Freundlich 方程适用于物理吸附和化学吸附, 假设吸附热在非均匀的表面随着表面覆盖度增大呈现对数规律降低, 该方程的表达式^[13]为

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (5)$$

式中: K_F 为与温度、吸附剂种类和吸附剂的比表面积有关的吸附常数, $\text{mmol}^{1-1/n}/(\text{g}\cdot\text{L}^{1/n})$; n 为与温度和吸附强度有关的无因次常数。对式(5)两边同时取对数可得线性方程形式:

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (6)$$

Temkin 方程是描述化学吸附的方程式, 假设由于吸附质和吸附剂的相互作用, 吸附热随着吸附量增大而线性降低, 并且吸附的结合能均匀分布, 其表达式^[14-15]为

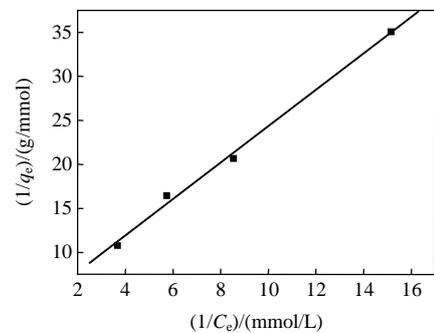
$$q_e = \frac{RT}{\beta} \ln(K_T C_e) \quad (7)$$

式(7)也可表示为线性方程形式:

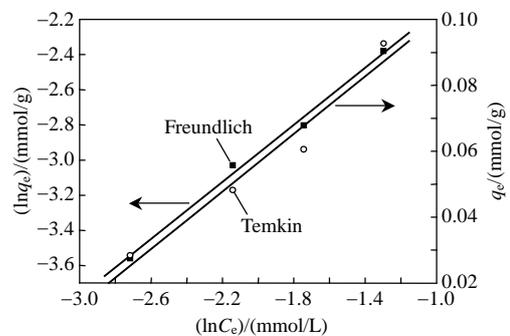
$$q_e = B_1 \ln K_T + B_1 \ln C_e, \quad B_1 = RT/\beta \quad (8)$$

式中: K_T 为对应最大结合能的平衡常数, L/g; B_1 为与温度和吸附体系性质有关的无因次常数。

利用上述 3 个等温线方程的线性形式对 NO 在 AC-2 上的吸附平衡数据进行拟合, 拟合结果如图 3 所示, 拟合得到的参数见表 2。从表 2 可以看出, 在 3 种等温线方程中, Langmuir 方程的拟合结果最佳, Freundlich 方程的拟合结果其次, Temkin 方程的拟合结果较差。因此, 利用 Langmuir 方程能够较好地预测 NO 在活性炭表面的吸附平衡。



(a) Langmuir 方程拟合



(b) Freundlich 方程和 Temkin 方程拟合

图 3 NO 在 AC-2 表面的吸附平衡数据拟合
Fig. 3 Linear fitting of adsorption equilibrium of NO on AC-2

表2 3种等温线方程拟合得到的参数和线性相关系数 R^2
Tab. 2 Parameters and correlation coefficients from linear fitting by Langmuir, Freundlich and Temkin isotherm equations

Langmuir 等温方程			Freundlich 等温方程			Temkin 等温方程		
q_m	K_A	R^2	K_F	n	R^2	B_T	K_T	R^2
0.274	1.764	0.995	0.262	1.232	0.993	0.044	26.921	0.957

2.4 活性炭-NO 的动力学

2.4.1 低温时活性炭-NO 的动力学

低温时活性炭的 NO 脱除量变化如图 4 所示。

由图 4(a)可以看出, 200 °C 时 AC-1 的 NO 脱除量最大, 100 °C 时的脱除量最小, 随着温度升高 NO 脱除量变化的规律不明显。图 4(b)显示低温时 AC-2 在 50 °C 时的 NO 脱除量最大, 300 °C 时的脱除量最小。可见, NO 在活性炭表面的吸附与 O₂ 在碳材料表面的吸附^[16]不同, NO 的吸附为放热的化学吸附, 吸附量并没有随温度升高而增大, AC-2 的吸附反而在最低的 50 °C 时呈现最大值。

NO 在活性炭表面的吸附过程包括气膜扩散、微孔扩散和表面吸附, 吸附速率由其中最慢的一步控制。通常气膜扩散的速率较大, 因此吸附速率不由气膜扩散控制。为了分析 NO 在活性炭表面的脱除机制是微孔扩散还是化学吸附控制, 本文使用颗粒内扩散方程和描述化学吸附动力学的 Langmuir 速率方程以及 Elovich 方程对实验数据进行拟合,

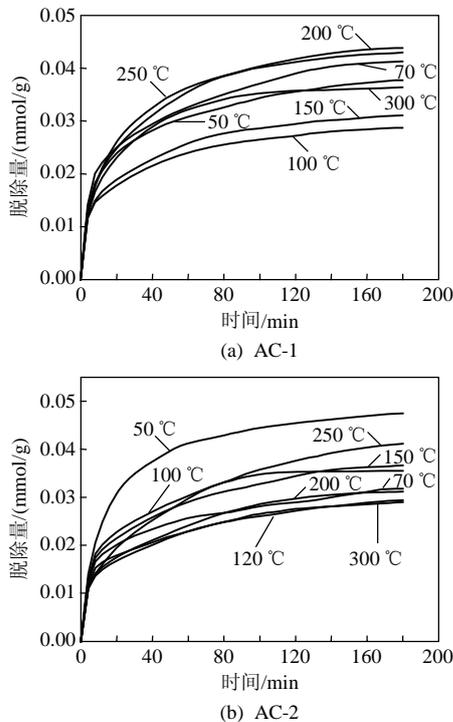


图4 低温时活性炭的 NO 脱除量变化

Fig. 4 Variations of NO uptakes on activated carbons at low temperatures

符合颗粒内扩散方程表明由微孔扩散控制, 符合 Langmuir 速率方程或 Elovich 方程说明由化学吸附控制。

颗粒内扩散方程^[14]表示如下:

$$q = k_{id}t^{1/2} + I \quad (9)$$

式中: q 为单位质量吸附剂的 NO 吸附量, mmol/g; k_{id} 为颗粒内扩散速率常数, mmol/(g·min^{1/2}); I 为与边界层厚度有关的常数, mmol/g。

假设吸附活化能与表面覆盖度无关, 并且一个吸附位上只吸附一个分子, Langmuir 速率方程^[15]可表示如下:

$$\ln\left(1 - \frac{q}{q_e}\right) = -kC_e t \quad (10)$$

式中 k 为 Langmuir 速率常数, L/(mmol·min)。

耶洛维奇(Elovich)方程广泛应用于 O₂、NO 和 H₂ 等在固体吸附剂表面的化学吸附动力学^[9-10,16-18], 假设吸附速率与表面覆盖度成指数关系, 吸附活化能与表面覆盖度成线性关系, 其速率方程的表达式为

$$\frac{dq}{dt} = a \exp(-bq) \quad (11)$$

式中: a 为 $q \rightarrow 0$ 时的起始吸附速率, mmol/(g·min); b 为与吸附活化能有关的常数, g/mmol。式(11)进行积分处理后, 当 $t \gg 1/(ab)$ 时得到方程(12):

$$q \approx \frac{1}{b} \ln abt = \frac{1}{b} \ln t + \frac{1}{b} \ln ab \quad (12)$$

利用上述 3 个动力学方程的线性形式对低温时活性炭-NO 的动力学数据进行拟合, 得到的相关系数 R^2 如表 3 所示。总体上来说颗粒内扩散方程的拟合结果较差, 表明 NO 的吸附速率并不取决于微孔扩散。比较 Langmuir 速率方程和 Elovich 方程的拟合结果不难发现后者明显比前者要好, 因此在 50~300 °C 时, NO 在活性炭表面的等温吸附过程主

表3 3个动力学方程拟合的线性相关系数 R^2 和 Elovich 常数 b

Tab. 3 Correlation coefficients from linear fitting by three kinetic equations and Elovich constant b

$T/^\circ\text{C}$	R^2				Elovich 方程的常数 b			
	颗粒内扩散方程		Langmuir 速率方程		Elovich 方程		Elovich 方程的常数 b	
	AC-1	AC-2	AC-1	AC-2	AC-1	AC-2	AC-1	AC-2
50	0.941	0.828	0.896	0.915	0.999	0.979	153.85	119.05
70	0.966	0.880	0.916	0.796	0.990	0.993	133.33	200.00
100	0.942	0.932	0.918	0.978	0.993	0.987	204.08	144.93
120	—	0.911	—	0.880	—	0.982	—	204.03
150	0.938	0.920	0.933	0.920	0.992	0.991	181.82	149.25
200	0.913	0.935	0.919	0.937	0.996	0.978	117.65	163.93
250	0.919	0.971	0.977	0.907	0.991	0.979	119.05	108.70
300	0.953	0.919	0.987	0.961	0.997	0.983	135.14	188.68

要是由化学吸附控制, 吸附速率遵循 Elovich 方程。关联前文 TPR 的实验结果可以发现, Elovich 方程适用的范围包含了 TPR 中的第 1 个温度区和第 2 个过渡温度区。

根据上文的结论, 采用 Elovich 方程分析活性炭-NO 的吸附动力学参数。活性炭的起始吸附速率如图 5(a)所示, 起始吸附速率随着温度升高呈现减小的趋势。根据起始吸附速率遵循 Arrhenius 公式, 得到 AC-1 和 AC-2 的起始吸附活化能分别为 -2.2 和 -8.8 kJ/mol。前人的研究表明^[9-10]低温时焦炭吸附 NO 的起始吸附速率与温度成反比, 因此出现负的起始吸附活化能。此外, Low 等^[17]关于 H₂ 在镍-硅藻土上的吸附研究, 也得到起始吸附活化能为负值的结论。可见起始吸附活化能为负值并不奇怪, 其正负只是表示随着温度升高, 起始吸附速率增大或减小, 并不代表整个吸附过程的机制。

将起始吸附活化能和 Elovich 方程中的常数 b (见表 3)代入式(13)可以获得吸附活化能^[19]。图 5(b)表示 AC-1 的吸附活化能随吸附量的变化, 可以看出, 不同温度下的吸附活化能都随着吸附量增加而增大, 从最初的负值增大到正值, 不难推算 AC-2 的吸附活化能会显示相同的特征。这表明在吸附过占据, 随着吸附进行, 吸附需要的活化能逐渐增大,

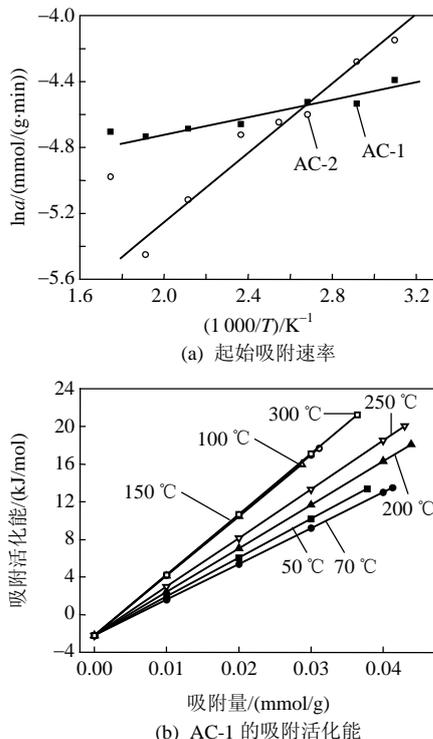


图 5 活性炭的起始吸附速率和 AC-1 的吸附活化能

Fig. 5 Initial chemisorption rate and adsorption activation

吸附愈来愈困难:

$$E_a = E_a^0 + bR_g T q \quad (13)$$

式中: E_a 为吸附活化能, kJ/mol; E_a^0 为起始吸附活化能, kJ/mol; R_g 为气体常数, 8.314 J/(mol·K)。

2.4.2 高温时活性炭-NO 的动力学

同低温一样, 对活性炭在高温时(400~600 °C)脱除 NO 的动力学数据也利用 Elovich 方程进行拟合, 得到的相关系数 R^2 如表 4 所示。与低温(见表 3)相比, 高温时线性相关系数的值要小得多, 不难看出后者几乎不成线性关系, 因此意味着高温时活性炭-NO 的动力学不再符合 Elovich 方程。上文 TPR 的实验结果和前人的研究^[3]表明高温时活性炭-NO 的作用以还原反应为主, 因此, 需要采用反应动力学方程描述。考虑到 C-NO 反应通常为一级还原反应, 其动力学方程^[3]为

$$k' \tau = -\ln(1 - f') \quad (14)$$

式中: k' 为反应速率常数, s⁻¹; τ 为 NO 在活性炭床层中的停留时间, s; f' 为稳态还原反应时的 NO 转化率, %。

表 4 高温时 Elovich 方程拟合的相关系数和还原反应速率常数

Tab. 4 Correlation coefficients from linear fitting by Elovich equation and reduction reaction rate constants of activated carbon-NO at higher temperatures

T/°C	相关系数 R^2		反应速率常数 k'/s^{-1}	
	AC-1	AC-2	AC-1	AC-2
400	0.929	0.958	0.452	0.258
500	0.942	0.951	0.927	0.520
550	0.922	0.923	1.880	1.246
600	0.869	0.894	5.439	3.850

由式(14)计算得到的反应速率常数 k' 如表 4 所示, AC-1 和 AC-2 的速率常数都随着温度升高而迅速增大, AC-1 的速率常数大于 AC-2 的值。根据 k' 遵循 Arrhenius 公式, 得到 AC-1 和 AC-2 与 NO 反应的活化能分别为 56.5 和 61.8 kJ/mol。上述活化能与文献[3]和文献[20]关于 C-NO 反应在相同温度范围内的活化能相接近, 这进一步证明 400~600 °C 时 NO 在活性炭表面的脱除主要由 C-NO 还原反应机制控制。

3 结论

在 Langmuir 方程、Freundlich 方程和 Temkin 方程中, NO 在 AC-2 表面的吸附很好地遵循 Langmuir 方程, 表明 Langmuir 等温线方程能够预测 NO 在活性炭上的吸附平衡。

活性炭-NO 的 TPR 结果和等温反应结果相一

致。随着温度升高,活性炭-NO 的反应经历了以化学吸附为主、向还原反应过渡和以还原反应为主的过程。低温时(50~300 °C)NO 在活性炭表面的等温吸附动力学可以由 Elovich 方程很好地进行描述,活性炭-NO 的机制由化学吸附控制,随着吸附量增加,吸附活化能从初始的负值增大到正值。

高温时(400~600 °C)等温实验结果表明,活性炭-NO 由还原反应机制控制。

参考文献

- [1] Teng H, Hsu Y F, Tu Y T. Reduction of NO with NH₃ over carbon catalysts-the influence of carbon surface structures and the global kinetics[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 1999, 20(2): 145-154.
- [2] Zhu Z, Liu Z, Liu S, et al. A novel carbon-supported vanadium oxide catalyst for NO reduction with NH₃ at low temperatures[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 1999, 23(4): 229-233.
- [3] Aarna I, Suuberg E M. A review of the kinetics of the nitric oxide-carbon reaction[J]. Fuel, 1997, 76(6): 475-491.
- [4] Illan-Gomez M J, Linares-Solano A, Radovic L R, et al. NO reduction by activated carbons. 7. some mechanistic aspects of uncatalyzed and catalyzed reaction[J]. Energy Fuels, 1996, 10(1): 158-168.
- [5] 高志明, 吴越, 王学忠, 等. 活性炭作为载体和还原剂对 NO 的还原作用[J]. 催化学报, 1996, 17(2): 117-122.
Gao Zhiming, Wu Yue, Wang Xuezhong, et al. Reduction of nitric oxide by active carbons as both support and reducing agent[J]. Chinese Journal of Catalysis, 1996, 17(2): 117-122(in Chinese).
- [6] Klose W, Rincon S. Adsorption and reaction of NO on activated carbon in the presence of oxygen and water vapour[J]. Fuel, 2007, 86(1-2): 203-209.
- [7] 万先凯. 渗氮和热处理对炭还原 NO 的活性影响及机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
Wang Xiankai. Effect of nitrogen doping and heat treatment on reduction of NO with activated carbons and mechanisms thereof[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008(in Chinese).
- [8] 张春林, 张娜, 刘德昌. 流化床温度下石油焦炭炭与 NO 反应动力学研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(32): 13-17.
Zhang Chunlin, Zhang Na, Liu Dechang. Study on the reaction kinetics of petroleum coke char and nitrogen oxide on the temperature range of fluidized bed[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(32): 13-17(in Chinese).
- [9] Teng H, Suuberg E, Calo J. Reactions of nitric oxide with carbons: the kinetics of NO chemisorption on carbon[J]. Preprints of American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry, 1990, 35(3): 592-597.
- [10] Teng H, Suuberg E M. Chemisorption of nitric oxide on char. 1. reversible nitric oxide sorption[J]. Journal of Physical Chemistry, 1993, 97(2): 478-483.
- [11] Zhang W J, Rabiei S, Bagreev A, et al. Study of NO adsorption on activated carbons[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2008, 83(1-2): 63-71.
- [12] Tomita A. Suppression of nitrogen oxides emission by carbonaceous reductants[J]. Fuel Processing Technology, 2001, 71(1-3): 53-70.
- [13] 叶振华. 化工吸附分离过程[M]. 北京: 中国石化出版社, 1992: 46-48.
Ye Zhenhua. Separation process of chemical industry adsorption. Beijing: China Petrochemical Press, 1992: 46-48 (in Chinese).
- [14] Rajoriya R, Prasad B, Mishra I, et al. Adsorption of benzaldehyde on granular activated carbon: kinetics, equilibrium, and thermodynamic[J]. Chemical and Biochemical Engineering Quarterly, 2007, 21(3): 219-226.
- [15] 郭汉贤. 应用化工动力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 146-147.
Guo Hanxian. Kinetics of applied chemical engineering. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 146-147(in Chinese).
- [16] Bradbury A G W, Shafizadeh F. Chemisorption of oxygen on cellulose char[J]. Carbon, 1980, 18(2): 109-116.
- [17] Low M J D. Kinetics of chemisorption of gases on solids[J]. Chemical Reviews, 1960, 60(3): 267-312.
- [18] Alcaniz-Monge J, Bueno-Lopez A, Lillo-Rodenas M, et al. NO adsorption on activated carbon fibers from iron-containing pitch[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2008, 108(1-3): 294-302.
- [19] 刘家钧, 陈钰瑄, 李耀冀. 氧在 CO₃O₄ 催化剂上的化学吸附[J]. 催化学报, 1984, 5(2): 115-122.
Liu Jiajun, Chen Yuxuan, Li Yaoji. Chemisorption of oxygen on CO₃O₄ catalyst[J]. Chinese Journal of Catalysis, 1984, 5(2): 115-122 (in Chinese).
- [20] Li Y H, Lu G Q, Rudolph V. The kinetics of NO and N₂O reduction over coal chars in fluidised-bed combustion[J]. Chemical Engineering Science, 1998, 53(1): 1-26.



尹艳山

收稿日期: 2010-06-10。

作者简介:

尹艳山(1980), 男, 博士研究生, 主要研究方向为燃煤污染控制, yinyanshan5431@163.com;

张军(1963), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为燃煤污染控制、生物质利用和电站锅炉运行优化等, junzhang@seu.edu.cn;

盛昌栋(1967), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为燃煤污染控制、生物质利用和电站锅炉运行优化等, c.d.sheng@seu.edu.cn。

(责任编辑 王庆霞)