

液相同时脱硫脱硝实验及反应特性

赵毅*, 刘凤, 郭天祥, 赵音

华北电力大学环境科学与工程学院, 保定 071003

* E-mail: zhaoyi9515@163.com

收稿日期: 2008-01-18; 接受日期: 2008-08-18

国家高技术研究发展计划(“863”计划)(批准号: 2007AA061803)资助项目

摘要 以 NaClO_2 溶液为吸收剂, 在自行设计小型鼓泡反应器中, 进行了烟气同时脱硫脱硝实验研究, 确定了最佳条件, 获得了理想的同时脱硫脱硝效果. 通过产物分析, 提出了基于酸性 NaClO_2 溶液的同时脱硫脱硝反应历程. 利用热力学原理对 NaClO_2 溶液同时脱硫脱硝的可能性和限度进行了计算. 同时脱硫脱硝反应动力学实验研究表明, SO_2 和 NO 的氧化吸收过程都分为区间, 即快速反应区和慢速反应区. 位于慢速反应区时, 两者皆为 0 级反应. 而位于快速反应区时, SO_2 的反应分级数为 1.4 级, 反应速率常数为 $1.22 (\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{-0.4}\cdot\text{s}^{-1}$, 反应活化能为 $66.25 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$; NO 的反应分级数为 2 级, 反应速率常数为 $3.15 \times 10^3 (\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 反应活化能为 $42.50 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

关键词

亚氯酸钠
同时脱硫脱硝
反应动力学实验

NO_x 和 SO_2 为火电厂排放的主要大气污染物, 国内外一般采用分别加装脱硫设备和脱硝设备的方式进行控制, 这种方式不但占地面积大, 而且投资和运行费用也高. 因此研究烟气同时脱硫脱硝新技术、新理论已引起广泛关注, 对此, 国内外已有较多相关研究[1~5].

由于烟气中的 NO 占 NO_x 的 90%左右, 而 NO 是一种几乎不被水或碱液吸收的惰性气体, 使得现有的湿法脱硫工艺难以同时脱硝. 为了实现同时脱硫脱硝, 近年来, 在溶液中添加化学试剂的方法已被国内外学者广泛尝试.

20 世纪 70 年代, 国外[6~8]开始了 NaClO_2 溶液吸收烟气中污染物的研究. 通常的做法是在 NaClO_2 溶液中添加酸或者碱共同去除烟气中的 NO_x . 从 90 年代开始, 人们认为液面物质传递系数对吸收速率有很显著影响. 为了气液混合, 研究者[9~14]采用多种反应器(填充柱、搅拌釜、喷淋塔和鼓泡柱)进行了 NaClO_2 溶液脱硫脱硝研究, 均取得了较好的效果. 值

得注意的是, 前人的研究大多在低温($20\sim 30^\circ\text{C}$)下进行, 而大型燃煤锅炉烟气经除尘后, 烟温大约为 $120\sim 150^\circ\text{C}$, 如果应用该项技术进行脱硫脱硝, 需耗用大量动力降低烟气温度. 另外, 脱硫脱硝后的净化烟气的低温排放会导致引风机和烟囱的严重腐蚀, 不得不利用大量能量进行烟气再热. 根据湿式石灰石-石膏法烟气脱硫工艺条件, 其脱硫塔内反应温度一般为 50°C 左右, 我们认为, 具有实用意义的 NaClO_2 溶液同时脱硫脱硝工艺应满足这一温度条件. 因此, 前人的研究成果尚缺乏实用价值. 另外很多学者基于 NaCl_2 在酸性条件下易分解的特点, 研究中采用了氧化性相对较弱的碱性溶液, 但已有研究表明 pH 值大于 4 的 NaClO_2 溶液仍较稳定[14].

与传统的逆向喷淋吸收方式相反, 鼓泡反应装置使吸收剂成为连续相而吸收质成为分散相, 大大降低传质阻力, 消除了临界传质和临界化学反应速率的局限性, 从而促进反应速率加快, 处理能力增大. 同时, 鼓泡反应装置可在一个吸收塔内完成 SO_2/NO_x

的吸收、氧化、中和、结晶。鉴于鼓泡反应装置的上述工艺优势, 本文在自行设计的小型鼓泡反应器系统上, 经对 NaClO_2 溶液、反应温度、吸收溶液pH值、烟气流量和烟气含氧量等实验条件的优化, 在适宜条件下, 脱硫脱硝效率分别达到 100%和 95.2%。通过产物分析, 推断出同时脱硫脱硝反应历程, 利用热力学原理对 NaClO_2 溶液同时脱硫脱硝的可能性和限度进行了计算和分析, 通过实验研究了反应动力学过程, 为工业化研究及应用提供了理论依据和基础数据。

1 实验

1.1 实验装置

实验装置主要由 3 部分组成(见图 1), 分别为烟气模拟系统、反应系统及烟气分析系统。反应系统为一个高度为 15 cm, 容积为 1 L 的小型鼓泡反应器, 反应器底部设取样口, 以抽取水样, 进行产物分析。 SO_2 , NO , N_2 由钢瓶取出, 经流量计控制流量, 在一级缓冲瓶中快速稀释, 以防止高浓度的 NO 被氧化为 NO_2 。从一级缓冲瓶中出来的混合气体, 在二级缓冲瓶中由 N_2 和 O_2 稀释成实验所需的烟气浓度, 由此形成模拟烟气。模拟烟气通入鼓泡反应器进行氧化吸收反应。反应后的烟气经尾气吸收装置吸收后排入大气。

1.2 试剂

实验所用亚氯酸钠为工业纯(NaClO_2 含量 $\geq 90\%$), 盐酸和氢氧化钠为分析纯。

1.3 实验方法

将由 SO_2 , NO 和 N_2 按一定比例组成的模拟烟气通入预先装有一定浓度的 NaClO_2 溶液的反应器中, SO_2 和 NO 在反应器中被 NaClO_2 溶液氧化吸收。模拟烟气进入反应器前, 经阀门调节使其旁路进入烟气分析仪(MRU95/3 CD, 德国, SO_2 和 NO 测量范围均为 0~4000 ppm, NO_2 测量范围为 0~1000 ppm)测定反应前烟气浓度。实验时, 关闭烟气旁路, 反应后的烟气直接进入烟气分析仪。由于 NaClO_2 溶液脱硫脱硝过程中会产生大量的 H_2SO_4 和 HNO_3 , 因此伴随着吸收过程的进行, 溶液的pH值会不断下降, NaClO_2 浓度也会相应降低。为了确保实验数据的可靠性, 通过作 SO_2 和 NO 吸收穿透曲线, 确定 2 者高吸收稳定时间段, 在该时间段取样, 测定反应器出口烟气浓度, 由入口和出口浓度差值计算脱除效率。实验采用电热水浴恒温锅调节反应温度, 通过加入 HCl 或 NaOH 溶液来调节吸收液的初始pH值, 利用玻璃转子流量计控制烟气流量。

脱硫脱硝产物按照如下方法分析。

1) ClO^- 浓度用 N, N-二乙基-1, 4-苯二胺滴定

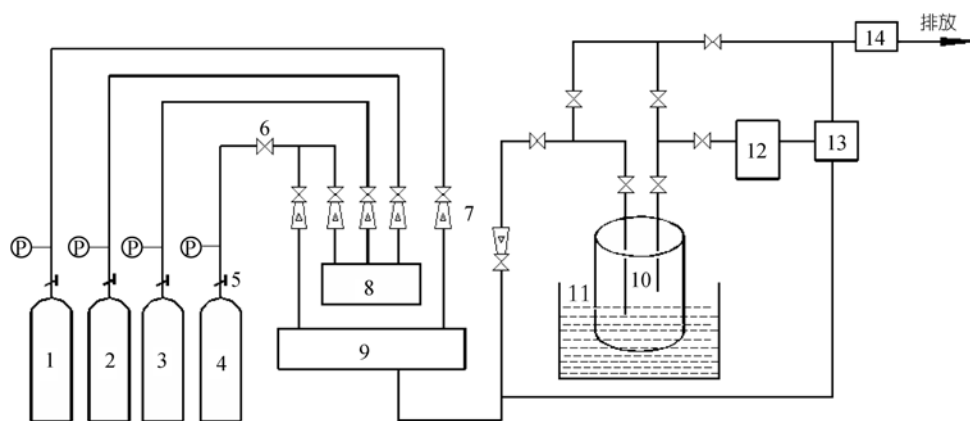


图 1 液相烟气同时脱硫脱硝实验流程图

1-氧气瓶; 2-NO钢瓶; 3- SO_2 钢瓶; 4-氮气瓶; 5-钢瓶减压阀; 6-阀门; 7-转子流量计; 8-一级缓冲瓶; 9-二级缓冲瓶; 10-鼓泡反应器; 11-电热水浴恒温锅; 12-干燥瓶; 13-烟气分析仪; 14-尾气吸收装置

法(GB11898-89)测定.

2) Cl^- , NO_2^- , NO_3^- 和 SO_4^{2-} 用离子色谱法^[15] (973 型离子色谱仪, 瑞士万通中国有限公司)测定.

3) SO_3^{2-} 浓度用碘量法(GB1576-2001)和铬酸钼分光光度法(HJ/T 342-2007)联合测定.

2 同时脱硫脱硝实验结果

通过多种同时脱硫脱硝影响因素的实验研究, 确定了在小型鼓泡反应器中 NaClO_2 脱硫脱硝的最佳实验条件为: 吸收剂浓度为 $0.005 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 反应温度 50°C , pH 值为 5, 烟气总流量为 $0.042 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, 烟气含氧量为 10%. 实验研究用 SO_2 的浓度范围为 $1000\sim 4000 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, NO 的浓度范围为 $300\sim 1200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

在最佳实验条件下, 反应器入口烟气中 SO_2 和 NO 浓度分别为 2011 和 $509 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 进行了 NaClO_2 溶液同时脱硫脱硝的平行实验, 实验结果见表 1.

从表 1 可以看出, 脱硫效率达到 100%, 脱硝效率最低值为 95.2%, 最高值为 98.4%, 平均值达到 96.8%. 同时, 脱硫的样本方差为 0, 脱硝的样本方差为 1.6. 充分说明数据的重现性好、精密度高、可靠性强; 因此, 在本实验确定的最佳条件下, NaClO_2 溶液具有很高的同时脱硫脱硝效率.

表 1 同时脱除 SO_2 , NO 的 5 次平行实验

项目	1	2	3	4	5	平均值	样本方差 S^2
SO_2 脱除率/%	100	100	100	100	100	100	0
NO 脱除率/%	96.6	95.8	95.2	98.4	98.2	96.8	1.6

3 反应历程

为了揭示 NaClO_2 溶液同时脱硫脱硝的反应机理, 以及评价其脱除产物对环境的影响, 在最佳实验条件下, 进行了反应产物分析. 其中样品 1 为单独脱硝反应后溶液, NO 初始浓度为 $512 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 样品 2 为同时脱硫脱硝反应后溶液, NO 和 SO_2 的初始浓度分别为 512 和 $2043 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 产物分析结果见表 2.

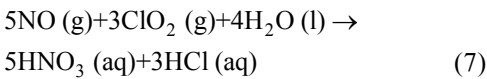
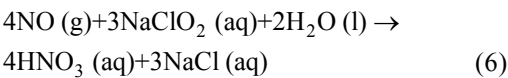
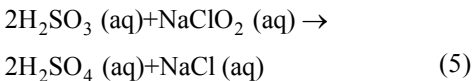
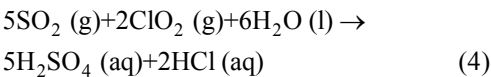
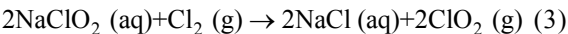
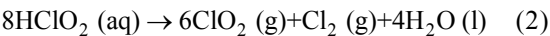
表 2 脱硫脱硝产物分析^{a)}

产物	SO_4^{2-}	SO_3^{2-}	NO_3^-	NO_2^-	Cl^-	ClO^-
样品 1	—	—	40.36	<0.003	131.85	44.37
样品 2	80.35	0.55	9.00	0.77	120.49	55.69

a) 表 2 中各离子浓度的单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

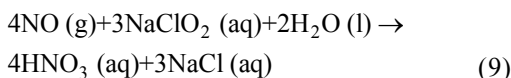
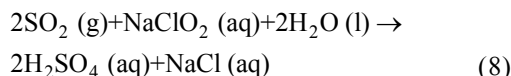
由表 2 可以看出, 单独脱硝产物中几乎不存在 NO_2^- . 同时脱硫脱硝的产物中 SO_4^{2-} 与 SO_3^{2-} , NO_3^- 与 NO_2^- 的摩尔比分别是 146 和 12, 可见脱硫的主要产物为 SO_4^{2-} , 脱硝的主要产物为 NO_3^- .

结合脱除效率实验和反应产物分析结果, 可以证实在鼓泡反应器内进行了 NO 和 SO_2 的脱除反应, 并且脱硫脱硝的主要产物分别是 SO_4^{2-} 和 NO_3^- , ClO_2^- 反应后的主要产物为 Cl^- 和 ClO^- . NO 是一种很难溶于水的气体, 因此在短时间 ($<1\text{s}$) 内 NO 的脱除率能达到 95% 以上, 可能存在一个 NO 首先被快速氧化为易溶于水的物质 (NO_2 等), 而后再被吸收剂吸收的过程. 另外从电极电势^[16] 分析, 可以发现 $\text{ClO}_2^-/\text{Cl}^-$ (酸性) (1.570 V) 和 $\text{ClO}_2^-/\text{ClO}^-$ (酸性) (1.645 V) 电对的电极电势明显高于 $\text{SO}_4^{2-}/\text{SO}_3^{2-}$ (0.93 V), NO_2/NO (1.07 V), NO_3^-/NO (0.96 V), $\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-$ (0.94 V) 等氧化还原电对的电极电势, ClO_2 在酸性溶液中的氧化性也很强, 说明 NaClO_2 溶液能将溶于水中的 SO_2 和 NO 氧化成它们的最高价态. 同时考虑到 ClO^- 的不稳定性, 并结合前人的研究结果^[6-8], NaClO_2 溶液脱硫脱硝的反应历程推测如下.



由 $\text{ClO}_2^-/\text{Cl}^-$ (酸性) (1.599 V) 和 ClO_2/Cl^- (酸性) (1.511 V) 氧化还原电对的电极电势分析可知, $\text{ClO}_2^-/\text{Cl}^-$

的电极电势要高于 ClO_2/Cl^- , 可认为(5)和(6)式是主要反应. 综合以上推测的反应历程, 得到酸性条件下 NaClO_2 溶液同时脱硫脱硝的总化学反应方程式如下.



4 热力学计算

利用以上反应(8)和(9)式, 计算了 NaClO_2 溶液脱硫脱硝反应的 $\Delta G^\ominus$, 平衡常数 $\Delta K^\ominus$ 和 $\Delta H^\ominus$, 结果见表3.

从计算结果可以看出, 脱硫脱硝反应可较深度的进行, 且为放热反应.

5 动力学研究

5.1 动力学方程确定

在 NaClO_2 同时脱硫脱硝过程中, NaClO_2 的浓度相对 SO_2 和 NO 是过量的, 而溶液中的 H_2O 可近似认为不变. 因此, 根据动力学规律^[17], (8)和(9)式的反应速率方程可简写成

$$v_{\text{SO}_2} = \frac{dc(\text{SO}_2)}{dt} = k_1 c^n(\text{SO}_2), \quad (10)$$

$$v_{\text{NO}} = \frac{dc(\text{NO})}{dt} = k_2 c^m(\text{NO}). \quad (11)$$

由(10)和(11)式可知, 只要分别作出 SO_2 和 NO 随时间的变化曲线, 并进行数据处理, 便可求得 SO_2 和 NO 的反应级数及反应速率常数.

阿仑尼乌斯方程表述了温度对反应速率的影响, 如下式所示

$$k = k_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right), \quad (12)$$

式中, R 为摩尔气体常量, $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$; k_0 为2个

指前参量; E_a 为活化能.

应用时, 阿仑尼乌斯方程可变换成多种形式. 对温度 T 微分, 可转化为如下方式

$$\frac{d \ln \{k_A\}}{dT} = \frac{E_a}{RT^2}. \quad (13)$$

若视 E_a 与温度无关, (13)式进行定积分, 则有

$$\ln \frac{k_{A,2}}{k_{A,1}} = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right). \quad (14)$$

通过(14)式, 求得反应在不同温度条件下的反应速率常数, 即可得此反应的活化能.

5.2 SO_2 脱除反应动力学

5.2.1 SO_2 分级数

实验条件: 温度为 50°C , NaClO_2 浓度为 $0.002 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 初始pH值为 5, 烟气总流量为 $0.042 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, NO 的初始浓度为 $500 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, SO_2 初始浓度分别为 550, 1190, 1545, 2030, 3079 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, SO_2 的初始浓度对反应速率的影响如图2所示.

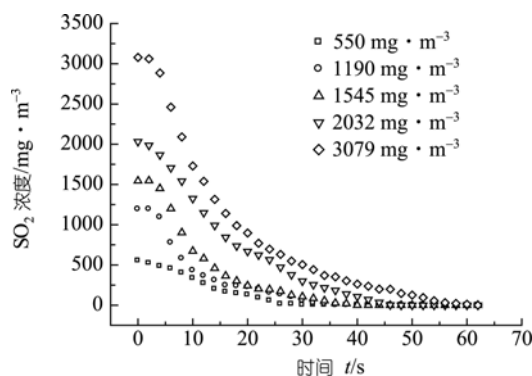


图2 SO_2 浓度随时间的变化

由图2可以看出: 1) 反应速率分为2个区间, 即从初始阶段(4~20 s)时的快速反应区过渡至后期的慢速反应区, 脱硫反应速率存在快慢2个区间的主要原因为 NaClO_2 溶液在酸性环境中发生分解反应, 产生 ClO_2 和 Cl_2 等. 这些分解产物是反应过程中有

表3 热力学计算结果

项目	$\Delta H^\ominus$ (298.15 K) / $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	ΔH (323.15 K) / $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\Delta K^\ominus$ (298.15 K)	ΔK (323.15 K)	$\Delta G^\ominus$ (298.15 K) / $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	ΔG (323.15 K) / $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
SO_2	-750.81	-746.94	$e^{227.16}$	$e^{202.41}$	-563.09	-543.83
NO	-924.45	-949.39	$e^{309.33}$	$e^{277.59}$	-766.59	-745.81

效的中间介质^[4], SO_2 通过反应溶液时, 消耗 ClO_2 和 Cl_2 , 导致反应速率降低; 2)在一定时间内, 随着 SO_2 初始浓度的增大, SO_2 的脱除效率也相应增大. 其原因推测为 SO_2 初始浓度的增加, 加大了 SO_2 在气相中的分压, 加速了气液传质, 提高了脱除效率.

在快速反应区, SO_2 浓度随时间的变化如图 3 所示.

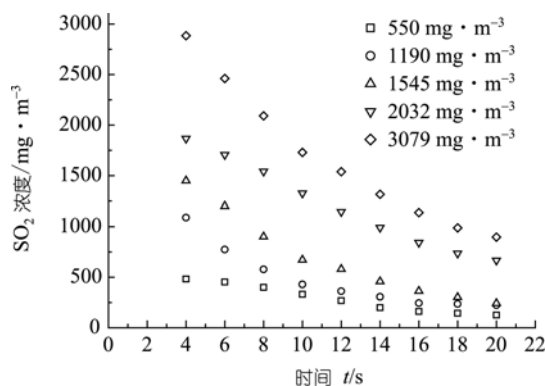


图 3 快速反应区 SO_2 浓度随时间的变化

由于 SO_2 浓度在反应体系中大约需要 3 s 左右才可稳定, 故以第 4 s 作为反应初始时刻, 采用初始浓度法, 可以计算出初始时刻的反应速率. SO_2 初始浓度和速率单位作无量纲处理, 结果如图 4 所示.

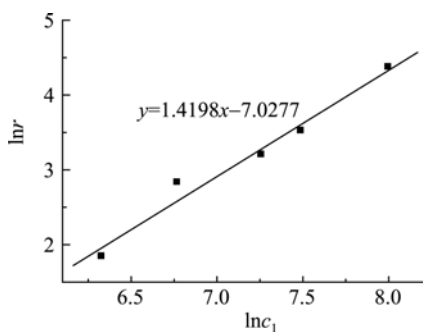


图 4 快速反应区 SO_2 分级数

由图 4 可知, 在快速反应区 SO_2 的分级数约为 1.4. 在慢速反应区, 图 2 表明, SO_2 的浓度随时间大致呈线性关系递减, 这符合 0 级反应的特点, 即 SO_2 的分级数为 0 级.

从以上结果可以得出: 当温度为 50°C 时, 在快速反应区, 反应速率表达式为: $r = k'c_{\text{SO}_2}^{1.4}$, 经计

算 $k' = 1.22 (\text{mol}\cdot\text{L})^{-0.4}\cdot\text{s}^{-1}$.

5.2.2 反应活化能

实验条件: NaClO_2 浓度为 $0.002 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 值为 5, 气体总流量为 $0.042 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, NO 初始浓度为 $500 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, SO_2 浓度为 $2000 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 温度分别为 $40, 50, 60, 72^\circ\text{C}$ 时, 温度对 SO_2 反应速率的影响如图 5 所示.

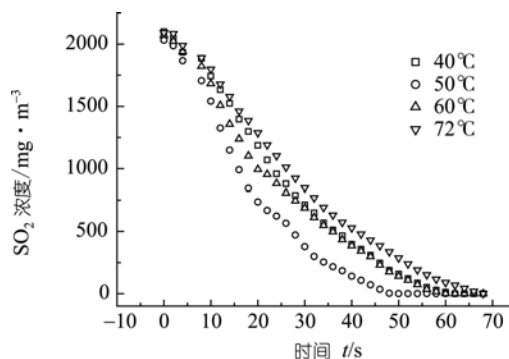


图 5 温度对 SO_2 反应速率的影响

由图 5 可看出温度为 50°C 时, 反应速率最大. 将任意 2 个温度 T_1, T_2 下的速率常数 k_1, k_2 代入由 Arrhenius 方程所推公式 (14), 即可求出表观活化能 E_a . 经计算在快速反应区, 活化能 E_a 为 $66.25 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

5.3 NO 脱除反应动力学

5.3.1 NO 分级数

实验条件: 温度为 50°C , NaClO_2 浓度为 $0.002 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 初始 pH 值为 5, 烟气总流量为 $0.042 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, SO_2 的初始浓度为 $2000 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, NO 初始浓度分别为 280, 514, 715, 980, $1550 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, NO 的初始浓度对反应速率的影响如图 6 所示.

由图 6 可以看出: 1) 反应速率分为 2 个区间, 即从初始阶段 (4~20 s) 时的快速反应区过渡至后期的慢速反应区, 脱硝反应速率存在快慢 2 个区域的原因与脱硫反应相同; 2) 在一定时间内, 随着 NO 初始浓度的增大, NO 的脱除效率也相对增大. 其原因推测为 NO 初始浓度的增加, 加大了 NO 在气相中的分压, 加速了气液传质, 提高了脱除效率.

在快速反应区, NO 浓度随时间的变化如图 7 所

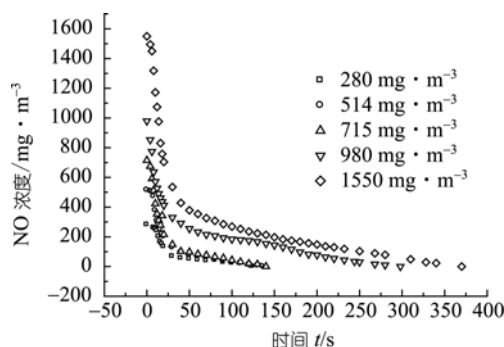


图6 NO 浓度随时间的变化

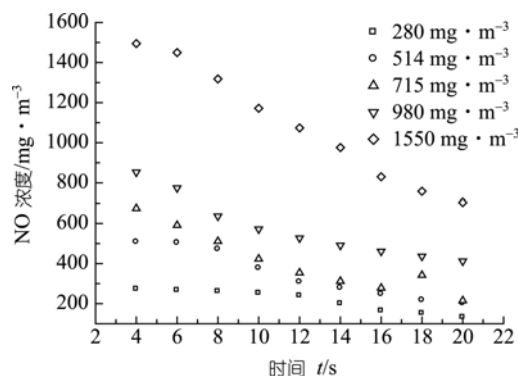


图7 快速反应区 NO 浓度随时间的变化

示. 与 SO_2 实验同理. NO初始浓度和速率作无量纲, 处理, 结果如图8所示.

由图8可知, 在快速反应区 NO 的分级数约为 2. 在慢速反应区, 图6表明, NO 的浓度随时间大致呈线性关系递减, 这符合0级反应的特点, 即NO 的分级数为0级.

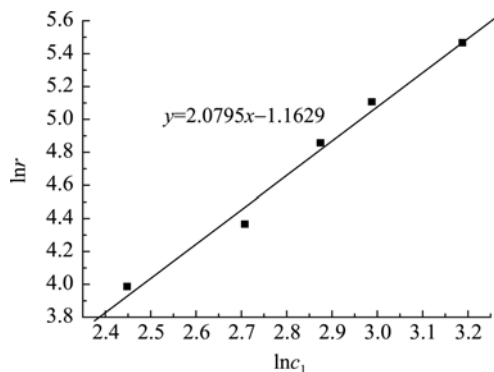


图8 快速反应区 NO 分级数

从以上结果可以得出: 当温度为 50°C 时, 在快速反应区, 反应速率表达式为: $r = k'c_{\text{NO}}^2$, 经计算得 $k' = 3.15 \times 10^3 (\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$.

5.3.2 反应活化能

实验条件: NaClO_2 浓度为 $0.002 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH值为 5, 气体总流量为 $0.042 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, NO初始浓度为 $500 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, SO_2 浓度为 $2000 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 温度分别为 $40, 50, 60, 72^\circ\text{C}$ 时, 温度对NO反应速率的影响如图9所示.

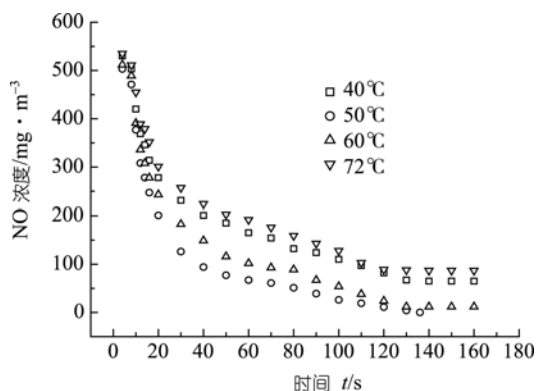


图9 温度对 NO 反应速率的影响

由图9可看出, 与温度对 SO_2 的影响相似, 50°C 时, 反应速率最大. 由公式(14), 经计算在快速反应区, NO的反应活化能 E_a 为 $42.50 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

6 结论

NaClO_2 溶液同时脱硫脱硝实验表明, 在最佳实验条件下, 同时脱硫脱硝效率分别达到100%和95%以上, 脱硫脱硝的主要产物为 SO_4^{2-} 和 NO_3^- . 根据产物分析数据, 提出了 NaClO_2 溶液同时脱硫脱硝反应历程, 在此基础上, 计算了化学反应吉布斯函数和化学反应平衡常数等热力学参数, 表明 NaClO_2 溶液同时脱硫脱硝是可行的.

动力学实验结果表明, NaClO_2 同时脱硫脱硝反应分为2个区间, 即快速反应区和慢速反应区. 在快速反应区, SO_2 的分级数为1.4, 反应速率常数为 $1.22 (\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{-0.4}\cdot\text{s}^{-1}$, 反应活化能为 $66.25 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$; NO的分级数为2, 反应速率常数为 $3.15 \times 10^3 (\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 反应活化能为 $42.50 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. 在慢

速反应区, NO 和 SO₂ 的分级数均为 0 级.

温度对反应速率影响的结果表明, 在本实验所选温度范围内, 温度升高, 基本上有利于反应向正向进行. 在温度达到 50℃ 以后, 随着温度的升高, 反应速率有所下降. 上述现象说明温度对脱硫脱硝反应有正负 2 方面影响, 首先, 温度升高可提高反

应速率, 但热力学分析表明, 脱硫脱硝反应均为放热反应, 温度升高则抑制了反应的进行, 另外, 随着温度的升高, NaClO₂ 容易分解为其他氧化物种. 因此 NaClO₂ 溶液脱硫脱硝存在一个最佳温度, 根据 NaClO₂ 溶液同时脱硫脱硝实验, 最佳反应温度为 50℃.

参考文献

- 1 赵毅, 徐佩瑶, 孙小军, 等. 烟气循环流化床同时脱硫脱硝试验及机理研究. 中国科学 B 辑: 化学, 2006, 36(5): 439—448
- 2 Zhao Y S, Xiao J, Fang H. Simultaneous removal of SO₂ and NO from flue gas using "Oxygen-enriched" highly reactive absorbent. *Environ Eng Sci*, 2007, 24(3): 360—370
- 3 赵毅, 马双忱, 黄建军, 等. 烟气循环流化床同时脱硫脱氮试验研究. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 120—124
- 4 Abboun N E, Chaaban F B, Tabanji W E. Economic evaluation of alternatives to reduce emissions from power plants. *Intern J Environ Studies*, 2000, 57(2): 225—238[DOI]
- 5 Takuya T, Tanaka H. Dry process desulfurization and denitrification system for sinter machines. *Sumitomo Jukikai Giho*, 2001, 146: 39—40
- 6 Sada E, Kumazawa H, Kudo I, et al. Absorption of NO in aqueous mixed solutions of NaClO₂ and NaOH. *Chem Eng Sci*, 1978, 33(1): 315—318[DOI]
- 7 Sada E, Kumazawa H, Yamanaka Y, et al. Kinetics of absorption of sulfur dioxide and Nitric oxide in aqueous mixed solution of sodium chlorite and sodium Hydroxide. *J Chem Eng Jpn*, 1978, 11(4): 276—282[DOI]
- 8 Sada E, Kumazawa H, Kudo I, et al. Absorption of lean NO_x in aqueous solutions of NaClO₂ and NaOH. *I&EC Process Des Dev*, 1979, 18(2): 275—278[DOI]
- 9 Chan K F. Experimental Investigation and Computer Simulation of NO_x and SO_x Absorption in a Continuous-flow Packed Column. Dissertation of Doctoral Degree. Canada: University of Windsor, 1991
- 10 Yang C L, Shaw H, Perlmutter H D. Absorption of NO promoted by strong oxidizing agents: 1. Inorganic oxychlorites in titric acid. *Chem Eng Commun*, 1996, 143(1): 23—38[DOI]
- 11 Yang C L, Shaw H. Aqueous absorption of NO_x induced by sodium chlorite oxidation in the presence of sulfur dioxide. *Environ Prog*, 1998, 17(2): 80—85[DOI]
- 12 Hsu H W, Lee C T, Chou K S. Absorption of NO by NaClO₂ solution: Performance characteristics. *Chem Eng Commun*, 1998, 170(1): 67—81[DOI]
- 13 Brogren C, Karlsson H T, Bjerle I. Absorption of NO in an aqueous solution of NaClO₂. *Chem Eng Tech*, 1998, 21(1): 61—70[DOI]
- 14 Yusuf G, Adewuyi, He X D, et al. Simultaneous absorption and oxidation of NO and SO₂ by aqueous solutions of sodium chlorite. *Chem Eng Comm*, 1999, 174(1): 21—51[DOI]
- 15 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 309—311
- 16 吴维昌, 冯洪清, 吴开治. 标准电极电位数据手册. 北京: 科学出版社, 1991. 65
- 17 肖衍繁, 李文斌. 物理化学. 天津: 天津大学出版社, 2005. 364—422