

# 脉冲放电等离子体治理甲苯废气放大试验研究

聂勇, 李伟, 施耀\*, 阮建军, 王鑫, 谭天恩

(浙江大学玉泉校区环境工程系, 杭州 310027)

**摘要:**应用脉冲放电等离子体技术,在线板式反应器内对低浓度甲苯废气的治理进行放大试验.采用闸流管开关脉冲电源,其最大输出功率 1 kW,最大脉冲电压峰值 100 kV.试验规模  $4 \sim 16 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .试验考察了峰值电压、重复频率、进口浓度和处理气量对甲苯去除率的影响.结果表明:峰值电场强度在  $9 \sim 12 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$  范围内增加,甲苯去除率相应明显提高;当处理气量为  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 、脉冲电压峰值 69 kV、进口浓度  $1180 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、重复频率 300 pps 时,甲苯的去除率可达 88%;反应器的能量利用率在  $16 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$  左右;甲苯的降解产物主要是  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ,还有少量 CO.结合甲苯去除率与能量密度、甲苯进口浓度的关系,建立反应器动力学模型,获得甲苯的反应速率常数为  $0.00356 \text{ L} \cdot \text{J}^{-1}$ .为进一步优化放大反应器设计及与电源匹配提供了基础数据.

**关键词:**高压脉冲电源;放电等离子体;放大试验;甲苯;能量利用率;能量密度

中图分类号:X701.7 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2004)03-0030-05

## Scale up Study on Pulse Corona Discharge for the Removal of Toluene

NIE Yong, LI Wei, SHI Yao, RUAN Jian-jun, WANG Xin, TAN Tian-en

(Department of Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China.)

**Abstract:** The scale-up experiments of the decomposition of toluene by pulse corona discharge in wire-plate reactor were investigated. The maximum output power of pulse voltage source was 1 kW, and the maximal peak voltage was 100 kV. The experiments were conducted with a gas-flow rate of  $4 \sim 16 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Different parameters which influenced on removal efficiency were investigated, such as peak voltage, pulse frequency, inlet concentration of toluene, gas-flow rate. The results showed that the removal efficiency was improved obviously when the peak field intensity was changed in the range of  $9 \sim 12 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ; the removal efficiency 88% was obtained when gas-flow rate, peak voltage, inlet concentration of toluene, pulse frequency were  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 69 kV,  $1180 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 300 pps respectively. The energy yield of toluene was about  $16 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ ; the main products of decomposition were  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$ , few of CO. Combining the removal efficiency of toluene with energy density and inlet concentration of toluene, a reaction kinetic mathematic model was developed. By this model, the decomposition rate constant of toluene was  $0.00356 \text{ L} \cdot \text{J}^{-1}$ . According to the results, the optimization design for the reactor and the matching of pulse voltage source were reckoned.

**Key words:** high voltage source; discharge plasma; scale-up experiments; toluene; energy yield; energy density

20 世纪 90 年代初, Yamamoto 等首先报道脉冲放电等离子体治理低浓度有机废气的实验研究<sup>[1]</sup>,至今该技术已成为研究热点之一.其基本原理是:通过陡前沿、窄脉宽(ns 级)的高压脉冲电晕放电,在常温常压下获得非平衡等离子体,即产生大量的高能电子和  $\text{O}^\bullet$ 、 $\text{OH}^\bullet$  等活性粒子,对 VOCs 分子进行氧化、降解反应,使 VOCs 最终转化为无害物.<sup>[2-8]</sup>

在国外该技术的大量研究报道仍为实验室研究,放大试验研究报道甚少<sup>[5]</sup>.国内浙江大学率先开展了这方面的实验研究,先后考察了影响去除率的主要因素、与催化剂相结合的协同效应、脉冲电源与交流电源的比较、填充式反应器的评价等,并进行了初步的理论探讨,表明该技术具有工艺简单、流程短、去除率较高、能耗较低、适用范围广等优点,有良好的应用前景<sup>[9]</sup>.

本文以模拟甲苯废气为研究对象,在线板式反应器内进行了放大试验,处理气量由原来最大  $0.072 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ <sup>[10]</sup>增大到  $4 \sim 16 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .主要考察了电参数(电压峰值、重复频率)及工艺参数(处理气量、进口浓度)对甲苯去除率的影响.针对电晕反应器的电能消耗进行了评价,并得出降解动力学方程模型,为进一步优化放大反应器设计及与电源匹配提供了基本数据.

### 1 实验部分

#### 1.1 实验流程

实验流程如图 1 所示,主要包括虚线框内的模

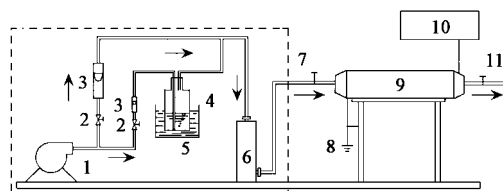
收稿日期:2003-05-31;修订日期:2003-08-17

基金项目:杭州市“5112”工程专项基金

作者简介:聂勇(1976~),男,博士研究生,现主要从事脉冲放电等离子体治理废气技术研究.

\* 联系人

拟甲苯废气配气系统、电晕反应器 9 和高压脉冲电源 10。由鼓风机产生的空气流分成 2 股,小股通过恒温槽 5 中的鼓泡瓶 4,带出甲苯蒸气,在缓冲罐 6 内与空气主流混合均匀,然后进入电晕反应器 9 处理,图 1 中箭头指示气路流动方向。反应器 9 的进出口设置甲苯取样口 7、11。甲苯浓度采用 GC7890II 色谱分析,检测器采用氢火焰,色谱柱为毛细管柱,操作条件:进口温度  $100^{\circ}\text{C}$ ,柱温  $50^{\circ}\text{C}$ ,检测器温度  $200^{\circ}\text{C}$ 。甲苯降解产物采用傅立叶红外仪分析。



1. 鼓风机 2. 阀门 3. 流量计 4. 甲苯液瓶  
5. 恒温槽 6. 缓冲罐 7. 进口取样点 8. 接地端  
9. 电晕反应器 10. 高压脉冲电源 11. 出口取样点

图 1 实验装置流程

Fig.1 Experimental setup

## 1.2 电晕反应器

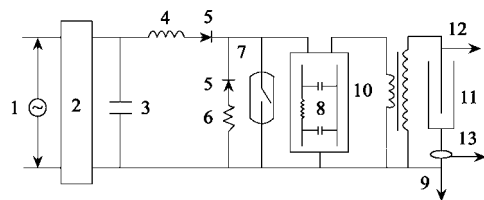
实验所采用的反应器为线板式电极结构,有利于进一步放大。电晕线为镍铬合金丝(直径  $0.5\text{ mm}$ ),电晕线与极板间距  $60\text{ mm}$ ,电晕线间距  $100\text{ mm}$ 。正脉冲高压加在电晕线上,极板接地,反应器的有效长度为  $1200\text{ mm}$ 。

## 1.3 高压脉冲电源

放大试验采用了 2 种电源,其一为传统的火花隙式,另一为闸流管式。本文着重介绍后者,其对前者的优点主要体现在:避免了火花隙开关噪声及脉冲重复频率的不稳定性;缩短了脉冲电压在反应器上衰减时间;利于实现大功率化。其最大输出功率  $1\text{ kW}$ ,最大脉冲电压峰值  $100\text{ kV}$ 。电路简图如图 2 所示,基本原理是:交流供电 1 给直流高压电源 2,然后经电容 3、电感 4、硅堆 5 为 Blumlein 脉冲形成网络 8 谐振充电;通过闸流管 7 在脉冲变压器 10 的初级线圈形成脉冲高压,进一步在脉冲变压器的次级线圈形成更高的脉冲高压,并加到电晕反应器 11 上。

反应器上的电压、电流波形通过 Lecroy 公司的 LT264 数字存储式示波器、INC 公司的 PI50-GL/5k 高压探头( $1/5000$ )、自制的电流探头( $1/5$ )进行同步测量,取样点分别为图 2 中的 12、13。图 3(a)给出电晕反应器上同步测量的典型电压、电流波形,

峰值电压  $70\text{ kV}$ 、上升前沿  $190\text{ ns}$ 、脉冲宽度  $470\text{ ns}$ 、峰值电流  $133\text{ A}$ ;图 3(b)给出在上述脉冲电压下,单个脉冲的峰值功率为  $9.3\text{ MW}$ ,能量为  $1.18\text{ J}$ 。



1. 交流输入( $0 \sim 380\text{ V}$ ,三相) 2. 直流高压电源 3. 滤波电容  
4. 电感 5. 硅堆 6. 电阻 7. 闸流管  
8. Blumlein 脉冲形成网络 9. 接地端 10. 脉冲变压器  
11. 电晕反应器 12. 电压取样点 13. 电流取样点

图 2 高压脉冲电源

Fig.2 High pulse voltage source

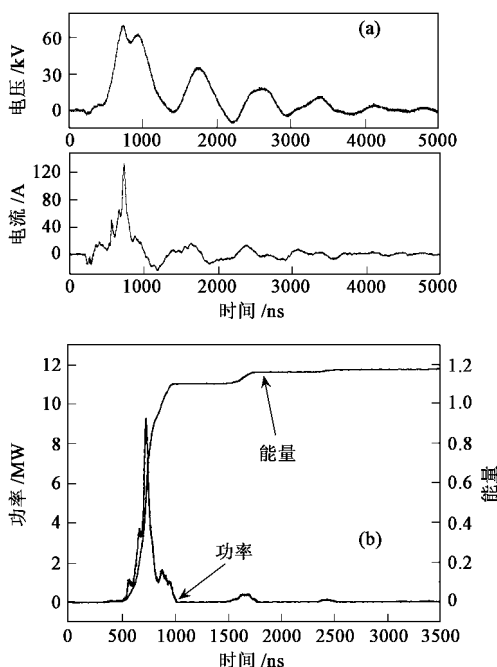


图 3 电晕反应器上同步测量的电压、电流波形(a)和脉冲功率和能量(b)

Fig.3 Waveforms of pulse voltage and current(a); power and energy(b)

## 2 结果与讨论

### 2.1 电参数对甲苯去除率影响

#### 2.1.1 峰值电压(峰值电场强度)

从图 4 可看出,甲苯的去除率随峰值电压  $V_p$  的增大而增大。 $V_p$  增加,电场强度也相应增加,所产生的电子能量和数量都增大,也就越能断开甲苯的化学键,去除率随之提高。

平均峰值电场强度(电晕线周围为非均匀电场,

文献上常以两电极间的峰值电压  $V_p$  除以其距离  $S$ , 即  $V_p/S$ , 作为平均电场强度; 以下省略“平均”二字) 考虑了极间距  $S$  的影响, 作为操作中的电参数, 代表性较  $V_p$  全面. 文献[11]报道: 要充分发挥脉冲放电等离子体中高能粒子的作用, 必须保证反应器内峰值电场强度为  $10 \sim 20 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$  或更高. 表 1 示出某些试验值. 反应器放大的过程中, 极间距增大, 要保证适宜的电场强度, 必须提高电源的  $V_p$ . 表 1 示出, 本文的最大峰值电场强度为  $12.3 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 比小试时<sup>[10]</sup>低, 但去除率有所提高. 甲苯进口浓度  $1180 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、峰值电压  $69 \text{ kV}$ 、重复频率  $300 \text{ pps}$  时, 处理气量  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  的甲苯去除率可达  $88\%$ .

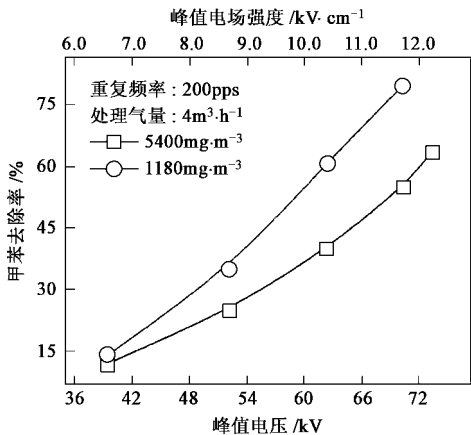


图 4 脉冲电压峰值对甲苯去除率的影响

Fig. 4 Effect of peak voltage on removal efficiency of toluene

表 1 反应器尺寸、工艺参数、电参数和去除率比较

Table 1 Comparisons of reactor size, technical parameters, electrical parameters and removal efficiency of toluene

| 反应器尺寸<br>(长×板距×宽)<br>/ mm | 处理气量<br>/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $V_p/S$<br>/ $\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ | $t/s$ | 进口浓度<br>/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 去除率<br>/ % |
|---------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------|-------------------------------------------|------------|
| 180×40×85 <sup>[10]</sup> | 0.072                                      | 24                                            | 30.6  | 859                                       | 34         |
| 810×30×90 <sup>[12]</sup> | 0.3                                        |                                               | 26.3  | 580                                       | 60         |
| 1200×120×250              | 4                                          | 12.3                                          | 32.5  | 5400                                      | 64         |
| 1200×120×250              | 4                                          | 11.5                                          | 32.5  | 1180                                      | 88         |

2.1.2 重复频率

从图 5 可看出, 进口浓度  $1180 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 在相同的峰值电压下, 重复频率越大, 甲苯的去除率越高. 实验观察到相同的  $V_p$  下, 不同频率的单个脉冲能量相近, 所以重复频率决定了注入反应器的功率 (注入功率  $P = \text{重复频率 } f \times \text{单个脉冲能量 } e$ ). 注入功率越大, 产生的高能电子数就越多, 去除率也越高.

图 5 表明, 不同频率下的去除率随  $V_p$  的增高而差别增大, 可解释为电压低时, 电子能位低, 多出的电子数较少起到有效作用; 而电压高时, 因重复频率高所多出电子的能位也高, 因此去除率也相应增大.

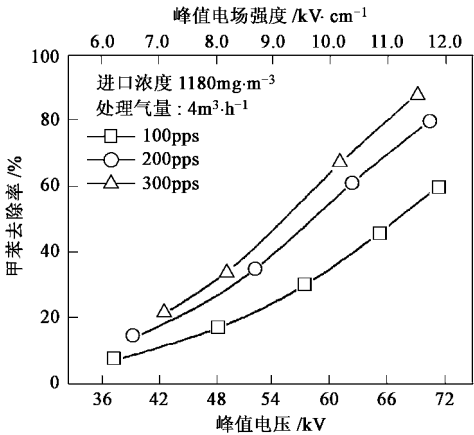


图 5 重复频率对甲苯去除率的影响

Fig. 5 Effect of pulse frequency on removal efficiency

2.1.3 反应器峰值阻抗

峰值阻抗定义为  $V_p$  与  $I_p$  (同步测量的电流峰值, 参见图 3a) 之比值<sup>[13]</sup>. 由图 6 可知在实验范围内, 随  $V_p$  增大, 阻抗在高台 ( $\text{k}\Omega$  级) 平缓一段距离 (峰值电场强度从 6 到  $9 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ), 然后较快降低到  $500 \Omega$  左右 (峰值电场强度从 9 至  $12 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ). 值得注意的是, 从峰值阻抗降低开始, 甲苯的去除率增加明显, 约从  $35\%$  升高到  $80\%$ , 显然阻抗降低的过程是反应器内电晕区扩大的过程, 随着产生的高能电子和活性粒子增多, 去除率也越大. 同时阻抗的大小也决定了反应器与高压脉冲电源匹配的程度<sup>[13]</sup>.

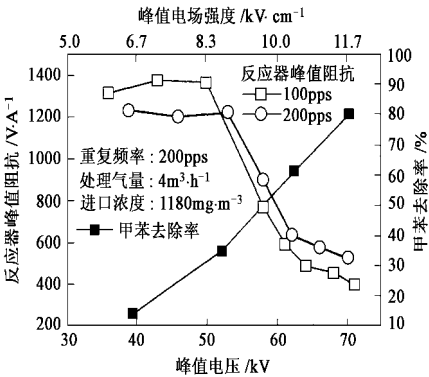


图 6 反应器阻抗与甲苯去除率的关联

Fig. 6 Correlation of reactor resistance and removal efficiency

2.2 工艺参数对甲苯去除效率影响

2.2.1 处理气量 (停留时间)

气量为  $4.10.16\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  (停留时间 13s) 的去除率与  $V_p$  的关系如图 7 所示,可以看出,在相同的  $V_p$  下,处理气量增大,去除率降低,可解释为注入反应器的能量密度  $P/Q(\text{J}\cdot\text{L}^{-1})$  (注入反应器的功率  $P$  与处理气量  $Q$  之比,即对每 L 废气注入的电能与气量成反比. 显然,去除率将随  $P/Q$  的减小而降低. 表 2 示出有关试验数据. 在表 1 中,处理气量从  $0.3\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ <sup>[12]</sup> 增大到  $4\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ,甲苯的去除率从 60% 增加到 88%,而且放大试验的进口浓度也高于小试,表明反应器的放大效应不明显. 还可看出,放大试验设计中,甲苯废气的停留时间以 30s 左右较适宜.

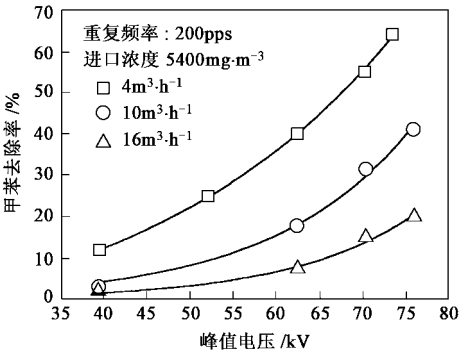


图 7 处理气量对甲苯去除率的影响

Fig.7 Effect of gas-flow rate on removal efficiency

表 2 不同处理气量下去除率与峰值电压和能量密度的关系

Table 2 Effect of peak voltage,energy density and gas-flow rate on removal efficiency

| 处理气量                            | $V_p$        | 能量密度                          | 去除率   |
|---------------------------------|--------------|-------------------------------|-------|
| $/\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ | $/\text{kV}$ | $/\text{J}\cdot\text{L}^{-1}$ | $/\%$ |
| 4                               | 62.4         | 136                           | 40    |
| 10                              | 62.4         | 55                            | 18    |
| 16                              | 62.4         | 34                            | 7     |
| 4                               | 70           | 216                           | 55    |
| 10                              | 70           | 87                            | 31    |
| 16                              | 70           | 54                            | 15    |

2.2.2 进口浓度

进口浓度的影响可参见图 4,在相同的  $V_p$  下,进口浓度较大,则去除率较低,而除去量增加(  $V_p$  为 70kV 时,去除量从  $944\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  增加到  $2\,970\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  ),与小试规律相同<sup>[10]</sup>.

2.3 电晕反应器评价

放电等离子体过程的评价通常采用能量利用率  $EY[\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$ 、G 值[分子数 $\cdot(100\text{eV})^{-1}$ ]或能量损耗  $EQ[\text{eV}\cdot(1\text{ 个分子})^{-1}]$ <sup>[3]</sup>. 本文采用  $EY$  考察反应器在放大过程中的变化. 表 3 表明,进口浓

度  $1180\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  下,不同重复频率下最大去除率的  $EY$  都在  $16\text{ g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$  左右.

表 3 不同处理气量下的能量利用率

Table 3 Energy yield of toluene at different gas-flow rate

| 处理气量                            | $V_p$        | $f$           | 进口浓度                           | 去除率   | $EY$                                          |
|---------------------------------|--------------|---------------|--------------------------------|-------|-----------------------------------------------|
| $/\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ | $/\text{kV}$ | $/\text{pps}$ | $/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ | $/\%$ | $/\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$ |
| 4                               | 71           | 100           | 1 180                          | 60    | 18                                            |
| 4                               | 70           | 200           | 1 180                          | 80    | 16                                            |
| 4                               | 69           | 300           | 1 180                          | 88    | 15                                            |

2.4 产物分析

经傅立叶红外分析仪分析,甲苯的降解产物主要是  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ , 还有少量  $\text{CO}$ ,如图 8 所示. 试验过程中还发现:随  $V_p$  的增大, $\text{CO}_2$  的浓度一直增大,而  $\text{CO}$  的浓度先增大后减小,原因是部分  $\text{CO}$  进一步氧化成  $\text{CO}_2$ <sup>[14]</sup>.

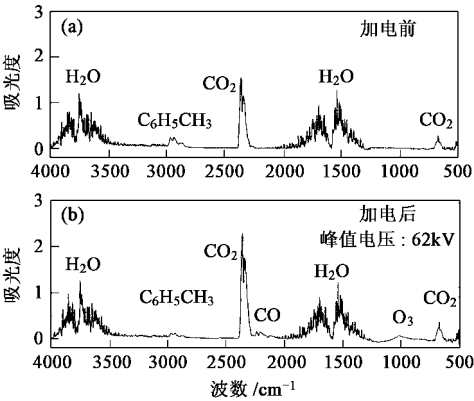


图 8 甲苯废气加电前(a)和加电后(b)的 FTIR 谱图

Fig.8 FTIR spectrum patterns before(a) and after(b) power

2.5 电晕反应器动力学模型

放大试验需要解决 2 个问题:其一是电源的功率要满足需要,另一是反应器的合理放大,两者相互影响相互制约. 在大功率脉冲电源基础上,反应器的去除率与电参数、工艺参数关系如何,是优化反应器设计的基础.

在影响因素中,可将峰值电压、重复频率、处理气量三者归纳成能量密度  $P/Q(\text{J}\cdot\text{L}^{-1})$ . 文献中假定脉冲放电等离子体降解 VOCs 的速率与  $P/Q$  和 VOCs 浓度成正比<sup>[12,15,16]</sup>,再加上简化假定:①反应器内为活塞流,无轴向混流;②横向浓度分布均匀<sup>[12]</sup>,可得:

$$\ln(c_1/c_2) = k_d \cdot P/Q \tag{1}$$

式(1)中, $c_1$ 、 $c_2$  表示反应器的进、出口有机物的浓度; $k_d$  为反应速率常数,与分子的结构有关,其值越

大表明该物质越容易降解。

通过上述模型(式1),对不同的脉冲电压峰值、气量、进口浓度和重复频率下的甲苯去除率拟合,获得甲苯在放大线板式电晕反应器内的反应速率常数  $k_d = 0.00356 \text{ L} \cdot \text{J}^{-1}$ ,如图9所示。值得注意的是:文献[12]和[17]报道甲苯在脉冲放电反应器内反应速率常数分别为  $0.0046$ ,  $0.0039 \text{ L} \cdot \text{J}^{-1}$ ,与本文相近。

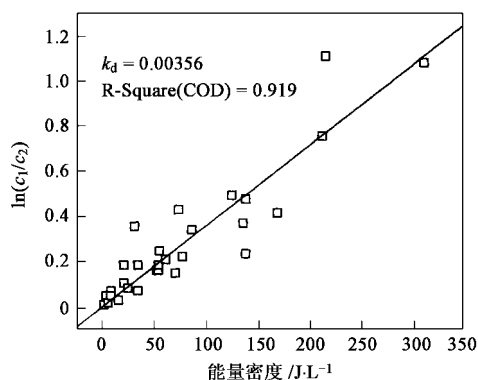


图9 脉冲电晕下甲苯速率常数

Fig.9 Rate constant of pulse corona

根据上述模型,可在进一步优化设计反应器的过程中,获得较好去除率的条件下,又尽量减少  $\text{CO}$  等副产物产生,选择合适的能量密度。

### 3 结论

(1) 在放大试验中,甲苯进口浓度  $1180 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、峰值电压  $69 \text{ kV}$ 、重复频率  $300 \text{ pps}$  时,处理气量  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  的甲苯去除率可达  $88\%$ 。

(2) 反应器峰值阻抗从  $\text{k}\Omega$  降低至  $500 \Omega$  左右(峰值电场强度为  $9 \sim 12 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ),甲苯的去除率增加明显。

(3) 放大试验设计中,甲苯废气在电晕反应器内的停留时间以  $30 \text{ s}$  较适宜。

(4) 进口浓度  $1180 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  下,不同重复频率下最大去除率的能量利用率在  $16 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$  左右。

(5) 甲苯的降解产物主要是  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ,还有少量  $\text{CO}$ 。

(6) 通过模型计算获得甲苯在试验中的降解速率常数为  $0.00356 \text{ L} \cdot \text{J}^{-1}$ 。

致谢:中国工程物理研究院环保中心、浙江大学无线电厂分别制成闸流管式、火花隙式脉冲电源,并

进行电源调试工作,特此致谢。

### 参考文献:

- [1] Yamamoto T, *et al.* Control of volatile organic compounds by an ac energized ferroelectric pellet reactor and a pulsed corona reactor[J]. IEEE Transaction on Industry Application, 1992, **28** (3): 528 ~ 534.
- [2] Yamamoto T, *et al.* Optimization of nonthermal plasma for the treatment of gas streams[J]. Journal of Hazardous Materials, 1999, **B67**(2): 165 ~ 181.
- [3] Hyun Ha Kim, *et al.* Performance evaluation of discharge plasma process for gaseous pollutant removal[J]. Journal of Electrostatics, 2002, **55**(1): 25 ~ 41.
- [4] Yan K, *et al.* A triggered spark-gap switch for high-repetition rate high-voltage pulse generation[J]. Journal of Electrostatics, 2003, **57**(1): 29 ~ 33.
- [5] Yan K, *et al.* Corona induced non-thermal plasmas: fundamental study and industrial applications[J]. Journal of Electrostatics, 1998, **44**(1-2): 17 ~ 39.
- [6] Yan K, *et al.* From chemical kinetics to streamer corona reactor and voltage pulse generator[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2001, **21**(1): 107 ~ 137.
- [7] 晏乃强,吴祖成,施耀,谭天恩,等.电晕-催化技术治理甲苯废气的实验研究[J].环境科学,1999, **20**(1): 11 ~ 14.
- [8] Huang Li Wei, *et al.* Decomposition of dichloromethane in a wire-in-tube pulsed corona reactor[J]. Environ. Sci. Technol., 2001, **35**(6): 1276 ~ 1281.
- [9] 谭天恩,聂勇,晏乃强,等.等离子体与环境保护[A].第十一届全国化工科技报告会[C].湘潭:2002, 922 ~ 925.
- [10] 黄立维,谭天恩.脉冲电晕法治理甲苯的实验研究[J].中国环境科学,1997, **17**(5): 449 ~ 452.
- [11] Phil A Lawless, *et al.* Characteristics of a fast rise time power supply for a pulsed plasma reactor for chemical vapor destruction[J]. IEEE Transaction on Industry Application, 1996, **32**(6): 1257 ~ 1265.
- [12] Young Sun Mok, *et al.* Decomposition of volatile organic compounds and nitric oxide by nonthermal plasma discharge process[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2002, **30**(1): 408 ~ 415.
- [13] Yan K, *et al.* Elements of pulsed corona induced non-thermal plasmas for pollution control and sustainable development[J]. Journal of Electrostatics, 2001, **51** ~ **52**(5): 218 ~ 224.
- [14] Lawless Phil A, *et al.* Characteristics of a fast rise time power supply for a pulsed plasma reactor for chemical vapor destruction[J]. IEEE Transaction on Industry Application, 1996, **32**(6): 1257 ~ 1265.
- [15] Erwin H W M Smulders, *et al.* Pulsed power corona discharge for air pollution control[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, **26**(5): 1476 ~ 1484.
- [16] Smulders E H W M, *et al.* Pulsed power corona discharges for air pollution control[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, **26**(10): 1476 ~ 1484.
- [17] Roush R A, *et al.* Effects of pulse risetime and pulse width on the destruction of toluene and  $\text{NO}_x$  in a coaxial pulsed corona reactor[A]. IEEE 22nd Int. Power Modulator Symp, 1996: 79 ~ 84.