

# 液中放电等离子体降解 TNT 废水的影响因素和能量效率分析

张灿<sup>1</sup>, 周从直<sup>2</sup>, 龙腾锐<sup>1</sup>, 方振东<sup>2</sup>, 陈磊<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400044; 2. 后勤工程学院 营房管理与环境工程系, 重庆 400041)

**摘要:** 利用液中放电等离子体技术对 TNT 模拟废水进行降解研究。结果表明:随着 TNT 初始浓度的升高, TNT 降解率下降, 但绝对去除量增加。降低初始 pH 值和升高温度有利于提高 TNT 降解率。投加抑制剂  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  后, TNT 降解率明显降低。液中放电等离子体降解 TNT 的反应符合表观一级反应动力学, 活化能为  $14.5 \text{ kJ/mol}$ 。在放电电压  $36 \text{ kV}$ 、电极间距  $6 \text{ mm}$ 、水温  $20$  条件下, 初始浓度  $50 \text{ mg/L}$ 、体积  $7 \text{ L}$  的 TNT 模拟废水经 300 次放电后降解率达到  $87\%$ , TNT 浓度降低为  $6.5 \text{ mg/L}$ ; 水温升高至  $50$  后降解率提高到  $97\%$ , TNT 浓度降低为  $1.5 \text{ mg/L}$ ; 能量效率  $G$  值为  $6.56 \times 10^{-2} \sim 9.33 \times 10^{-2} \text{ molecules/heV}$ 。

**关键词:** 电化学工程; 液中放电; 等离子体; TNT 废水; 动力学; 能量效率

**中图分类号:** TB115      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1093(2008)05-0615-06

## Influence Factors and Energetic Efficiency on Degradation of TNT Waste water by Electro-hydraulic Discharge Plasma

ZHANG Can<sup>1</sup>, ZHOU Cong-zhi<sup>2</sup>, LONG Teng-rui<sup>1</sup>, FANG Zhen-dong<sup>2</sup>, CHEN Lei<sup>2</sup>

(1. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. Barracks Administration and Environment Engineering Department, Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China)

**Abstract:** Degradation of TNT wastewater by the electro-hydraulic discharge plasma technique was investigated. The results show that with the improvement of TNT initial concentration, the degradation rate decreases, the absolute degradation quantity increases; the acid condition and the high water temperature promote the improvement of TNT degradation rate; adding  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  in the electro-hydraulic discharge plasma decreases the degradation rate of TNT obviously; TNT degradation reaction by the electro-hydraulic discharge plasma follows appearance first order kinetics, and the energy of activation is  $14.5 \text{ kJ/mol}$ ; under the condition of discharge voltage  $36 \text{ kV}$ , electrode-distance  $6 \text{ mm}$ , water temperature  $20$ , the TNT initial concentration  $50 \text{ mg/L}$ , simulated TNT wastewater volume  $7 \text{ L}$ , after 300 discharges, TNT degradation rate is  $87\%$ , and its concentration decreases to  $6.5 \text{ mg/L}$ ; while the water temperature increases to  $50$ , TNT degradation rate improves to  $97\%$ , TNT concentration decreases to  $1.5 \text{ mg/L}$ ; the energetic efficiency reaches to  $6.56 \times 10^{-2} \sim 9.33 \times 10^{-2} \text{ molecule/heV}$ .

**Key words:** electro-chemistry engineering; electro-hydraulic discharge; plasma; TNT wastewater; kinetics; energy efficiency

收稿日期: 2007-06-06

基金项目: 总后勤部科研基金资助项目(总后(2004)后司字第 56 号)

作者简介: 张灿(1975—), 女, 博士研究生。E-mail: zhangcancqu@163.com

## 0 引言

TNT(2, 4, 6-三硝基甲苯)是一种重要的军事战略物质,其废水主要来源于弹药生产过程和拆毁过程。TNT的生产废水成份复杂,种类也非常多,按所含污染物特征,可以分为冷凝水、黄水和红水。冷凝水的主要成份是二硝基甲苯和氨基二硝基甲苯的各种异构体。黄水呈酸性,其中95%为TNT,其余为DNT、三硝基苯甲酸、二硝基甲酚以及一些未知物。TNT红水是在TNT精制过程中产生的,典型的成分为:水76.5%、有机物17.6%、无机物5.9%,其中有机物主要是 $\alpha$ -TNT和二硝基甲苯磺酸钠。红水中的有机物成分异常复杂,已知其中含有的有机物小分子达70种以上,红色焦油物的化学结构至今尚未弄清。由于红水毒性较大,处理困难,国家明令禁止TNT红水排放<sup>[1]</sup>。据调查,我军炮弹中炸药的主要成分是TNT,弹药销毁废水中的主要污染成分也是TNT,拆弹废水TNT浓度约为60 mg/L, COD约为120 mg/L, pH=7.2<sup>[2]</sup>。TNT废水毒性强,对人的血液、肝脏、中枢神经、眼球等都有明显的破坏作用,若处理不当,必然会危害人类健康和生态环境。TNT属于难以生物降解物质,常规生化方法对TNT降解难以奏效,目前工业生产中一般采用活性炭吸附、萃取等方法,但是后续处理中存在二次污染,易引起爆炸隐患。有必要研究和开发新型、实用、低能耗的TNT废水处理工艺。

液中放电等离子体技术(EHD)又称液相放电、电水锤效应、电液脉冲技术,指在液体(通常是水)中施加陡前沿、窄脉宽的脉冲高压,把较高的能量在时间和空间上进行集中压缩,使液体介质被瞬间击穿产生等离子体,诱发多种复杂的物理和化学效应<sup>[3]</sup>。液中放电等离子体技术作为一种新型的高级氧化水处理技术,主要利用高能电子轰击、高温热解、光化学氧化、自由基氧化等综合效应降解有机物<sup>[4-5]</sup>,具有快速、高效、无二次污染、适用范围广等优点,在难生物降解废水处理方面显示出巨大的优越性,具有良好的发展前景。目前液中放电在降解TNT废水方面有少量研究。刘晓春<sup>[6]</sup>采用液中放电技术降解TNT废水,许正<sup>[7]</sup>等利用脉冲放电等离子体装置进行了TNT降解初步研究,敖澍<sup>[8]</sup>研究了液中放电降解TNT的因素主次顺序。

本研究以TNT模拟废水为研究对象进行降解试验,研究了液中放电降解TNT模拟废水的影响因素,分析了TNT降解反应的动力学规律和能量

效率。

## 1 试验方法

### 1.1 试验装置

试验装置由高压脉冲发生系统、反应器和接地系统三部分组成,如图1所示。高压脉冲发生系统为反应器提供高密度的电能来源,包括调压变压器、高压变压器、整流硅堆、限流电阻、储能电容及空气开关。调压变压器在0~220 kV无级调压,高压变压器在0~100 kV输出,限流电阻为水电阻,电容为1  $\mu$ F,空气开关为间隙式可调开关。反应器为内径250 mm、高400 mm的钢制圆筒,内设绝缘座,安装尖-尖钢制电极。接地系统用来保证设备和操作人员安全,主要包括自动接地装置和接地地网。

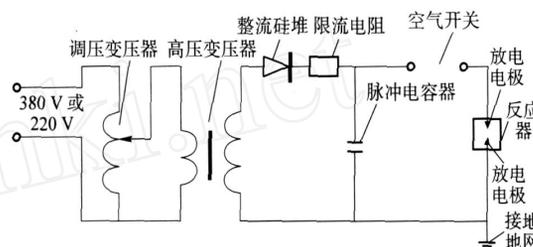


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Principle scheme of the test facilities

### 1.2 仪器与试剂

主要仪器:S-53紫外分光光度计;pHS-3C型精密pH计;JJ-1增力电动搅拌器;KXH1 01-24恒温干燥箱;A Y220电子天平;AUP-2-75 G 01实验室纯水机。

主要试剂:TNT(工业纯);无水 $\text{Na}_2\text{SO}_3$ (分析纯);HCl(分析纯);NaOH(分析纯); $\text{Na}_2\text{CO}_3$ (分析纯)。TNT模拟废水由TNT(工业纯)与自来水配制而成。

### 1.3 试验方法与测试分析

#### 1) 试验条件与方法

试验条件:放电电压36 kV;电极间距6 mm、8 mm;TNT初始浓度为40~100 mg/L;水温为20~50  $^{\circ}\text{C}$ ;初始pH值为3~10,由HCl和NaOH调节;每次试验处理水量为7 L。

试验方法:调节电极间距和空气开关间隙,开启脉冲放电发生器电源开关,升高电压,进行放电试验,共放电300次,每隔50次断电取水样25 mL,进行TNT浓度检测与分析。

#### 2) TNT浓度的检测

TNT浓度采用亚硫酸钠分光光度法(GB/T

13905—92) 检测<sup>[9]</sup>。

$$\text{降解率} = \frac{(\rho_0 - \rho)}{\rho_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\rho_0$  为 TNT 初始浓度 (mg/L);  $\rho$  为降解后的 TNT 浓度 (mg/L)。

$$\text{绝对去除量} \quad q = (\rho_0 - \rho) V \quad (2)$$

式中:  $V$  为 TNT 模拟废水的体积 (L)。

## 2 影响因素研究

### 2.1 初始浓度对 TNT 降解效果的影响

在电极间距 8 mm、初始 pH=7、水温 20 的条件下进行试验,考察 TNT 初始浓度分别为 43 mg/L、55 mg/L、70 mg/L、100 mg/L 的 TNT 模拟废水在 300 次放电过程中的降解效果,试验结果见图 2,  $N$  为放电次数。由此导出的初始浓度对 TNT 降解率和绝对去除量的影响,如图 3 所示。

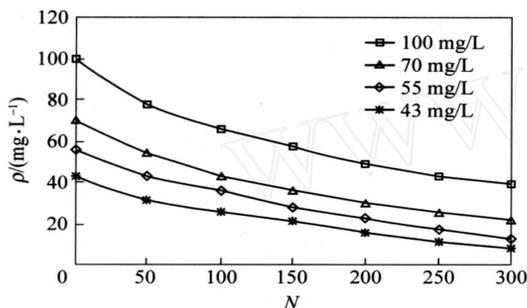


图 2 不同初始浓度条件下的 TNT 降解曲线

Fig. 2 TNT degradation curves at different initial concentrations

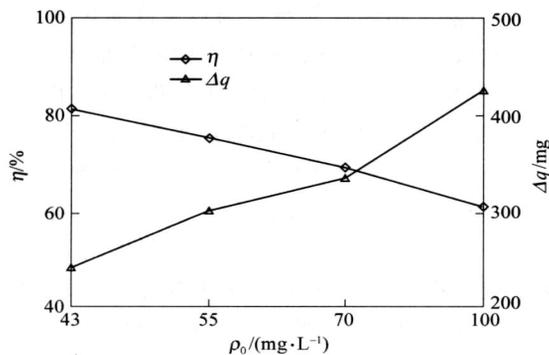


图 3 初始浓度对 TNT 降解率和绝对去除量的影响

Fig. 3 The influence of the initial concentration on  $\eta$ ,  $q$  of TNT

由图 3 可知,随着初始浓度的上升,TNT 降解率逐渐下降,但绝对去除量却呈上升趋势。这是因为输入能量和放电模式都不变时,放电产生的活性

物质数量一定。TNT 初始浓度越大,TNT 分子越多,放电产生的活性物质和 TNT 分子发生碰撞、反应的机会增多,绝对去除量也相应增大。随着 TNT 分子增多,反应中间产物增多,在降解过程中与 TNT 分子竞争活性物质的分子增多,每个 TNT 分子和活性物质碰撞的机率减少,导致相对降解率下降。

### 2.2 初始 pH 值对 TNT 降解效果的影响

在电极间距 8 mm、TNT 初始浓度 55 mg/L、水温 20 的条件下进行试验,考察初始 pH 为 3.5、7、9.5 时的 TNT 模拟废水在 300 次放电过程中的降解效果,试验结果见图 4。

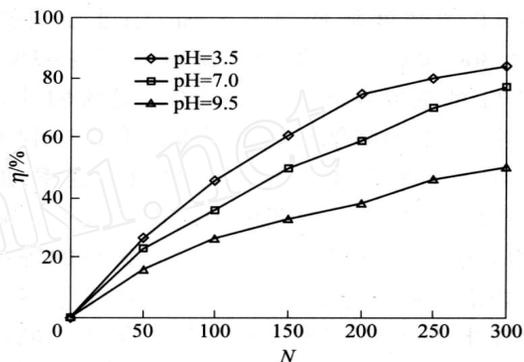


图 4 初始 pH 值对 TNT 降解率的影响

Fig. 4 The influence of the initial pH on  $\eta$  of TNT

结果表明:pH=3.5 时 TNT 降解率最高,达到 84%;pH=9.5 时 TNT 降解率最低,为 50%。其原因可从以下两方面来说明:1) pH 值对放电过程产生的  $\cdot\text{OH}$  的氧化性有重要的影响。pH=3.5 时, $\cdot\text{OH}$  的氧化电极电位为 2.70 V;pH=9.0 时, $\cdot\text{OH}$  的氧化电极电位为 2.34 V。 $\cdot\text{OH}$  在酸性条件下的氧化能力远远高于碱性,所以酸性条件下有较快的反应速率,降解效果好。2) 放电过程中 TNT 在多种综合效应下逐渐矿化生成  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ ,在碱性条件下,降解所产生的  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  大多滞留在水中。 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  是  $\cdot\text{OH}$  的清除剂,因此碱性条件下的反应速率慢,降解效果差。

### 2.3 温度对 TNT 降解效果的影响

在电极间距 6 mm、TNT 初始浓度 50 mg/L、初始 pH=7 的条件下进行试验,考察水温 20、30、40、50 的 TNT 模拟废水在 300 次放电过程中的降解效果,试验结果见图 5。

图 5 表明随着温度上升,TNT 降解率升高。水温 20 时,300 次放电后的 TNT 降解率为 87%,水

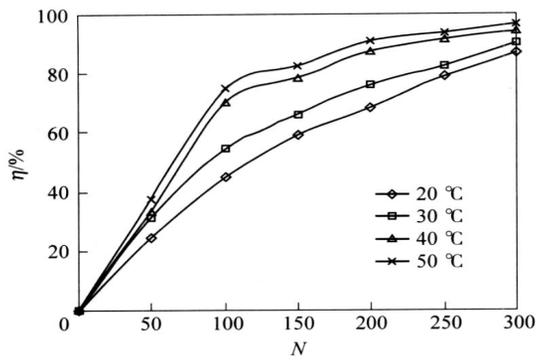


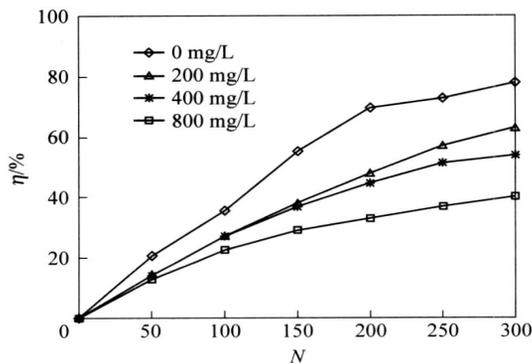
图 5 温度对 TNT 降解率的影响

Fig. 5 The influence of the temperature on of TNT

样中 TNT 的浓度降低为 6.5 mg/L; 水温升高至 50 时, 300 次放电后的 TNT 降解率高达 97%, 水样中 TNT 的浓度降低为 1.5 mg/L. 这说明升高温度会加速 TNT 的降解反应。温度的升高有利于加快  $\cdot\text{OH}$  的产生速率及其与 TNT 的反应速率, 促进 TNT 降解。同时这也说明液中放电等离子体降解 TNT 的反应并不仅发生在电极之间狭小的等离子体通道内部。在击穿放电瞬间, 放电产生了多种复杂的物理化学效应, 等离子体通道外部的区域以及反应器的边壁都参与了降解。

#### 2.4 添加 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 对 TNT 降解效果的影响

碳酸根是一种良好的  $\cdot\text{OH}$  抑制剂。在电极间距 8 mm、水温 20、初始 pH = 7, TNT 初始浓度 55 mg/L 的条件下进行试验, 考察不投加  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和投加  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  200 mg/L、400 mg/L、800 mg/L 的 TNT 模拟废水在 300 次放电过程中的降解效果, 试验结果见图 6。

图 6 抑制剂  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度对 TNT 降解率的影响Fig. 6 The influence of the concentration of depressor  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  on of TNT

由图 6 可知, 投加  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  对 TNT 的降解产生

了很大影响。随着水样中  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的升高, TNT 降解率明显下降。这是因为当溶液中有  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  等物质时, 能迅速与  $\cdot\text{OH}$  反应, 生成无活性的产物, 而终结自由基反应历程, 致使反应降解减慢。 $\text{CO}_3^{2-}$  对  $\cdot\text{OH}$  的抑制机理为  $\cdot\text{OH} + \text{CO}_3^{2-} \longrightarrow \text{OH}^- + \text{CO}_3^{\cdot-}$ 。

此外, 这也表明  $\cdot\text{OH}$  是降解 TNT 的主要活性物质, 在液中放电等离子体降解 TNT 废水的反应中起到了重要作用。

### 3 动力学分析

#### 3.1 反应级数的确定

采用微分法确定反应级数<sup>[10]</sup>。液中放电等离子体降解 TNT 的反应速率方程可以表达为

$$r = -\frac{d}{dt} = k^n, \quad (3)$$

式中:  $r$  为 TNT 的降解速率;  $k$  为反应速率常数;  $n$  为反应级数;  $t$  为放电时间。

相同试验条件下, 放电频率不变, 为简化计算, 以放电次数  $N$  代替式(3)中放电时间  $t$ 。

$$r = -\frac{d}{dN} = k^n. \quad (4)$$

对式(4)两边取对数, 得

$$\ln r = n \ln - + \ln k. \quad (5)$$

在不同初始浓度  $c_{0i}$  的条件下进行试验, 作出浓度变化曲线, 求曲线上各点的瞬时速率。每条曲线上起始点的切线斜率为初始反应速率  $r_{0i}$ 。用  $\ln r_{0i}$  对  $\ln c_{0i}$  作图得一直线, 直线的斜率就是反应级数  $n$ 。这种方法求得的反应级数为对浓度而言的级数。此种级数求法可以消除试验中产物和其他因素的干扰, 较为可靠。将不同初始浓度条件下的 TNT 降解曲线(见图 2)进行多项式拟合求得  $r_{0i}$ 。 $\ln r_{0i}$  与  $\ln c_{0i}$  的关系如图 7 所示。图 7 中直线斜率为 0.932 1, 接近 1, 即反应级数为 1,  $R^2 = 0.971$ , 相关系数高。这初步说明液中放电等离子体对 TNT 的降解反应可用一级反应动力学来描述。因此, 液中放电降解 TNT 的反应速率方程可以表达为

$$r = -\frac{d}{dN} = k, \quad (6)$$

积分得:

$$\ln c/c_0 = -kN, \quad (7)$$

半衰期:

$$T_{1/2} = \ln 2 / k. \quad (8)$$

将不同初始浓度条件下的试验数据(见图 2)按

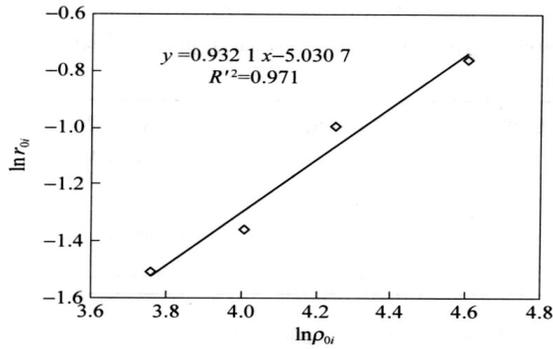


图 7  $\ln r_{0i}$  与  $\ln \rho_{0i}$  的关系

Fig. 7 The curve of  $\ln r_{0i}$  vs.  $\ln \rho_{0i}$

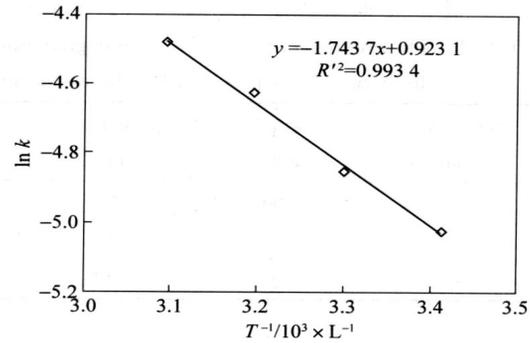


图 8  $\ln k$  与  $1/T$  的关系

Fig. 8 The curve of  $\ln k$  vs.  $1/T$

一级反应动力学拟合,结果列于表 1。可知  $\ln \rho_{0i}/N$  与放电次数  $N$  呈线性关系,相关系数高。这进一步验证了该反应遵循一级反应动力学规律。由表 1 可知,随着初始浓度上升,TNT 降解的反应速率常数发生改变,这说明液中放电降解 TNT 的反应只是表观一级反应, $k$  也只是表观反应速率常数。

表 1 不同初始浓度条件下的一级拟合结果

Tab. 1 The first fitting results at different initial concentrations

初始浓度/ (mg L <sup>-1</sup> )	一级反应 动力学方程	$k/$ 次 <sup>-1</sup>	$R^2$	$T_{1/2}/$ 次
43	$\ln \rho_{0i}/N = 0.0055N - 0.0287$	0.0055	0.9903	126
55	$\ln \rho_{0i}/N = 0.0047N - 0.0200$	0.0047	0.9954	148
70	$\ln \rho_{0i}/N = 0.0038N + 0.0623$	0.0038	0.9900	182
100	$\ln \rho_{0i}/N = 0.0031N + 0.0700$	0.0031	0.9832	224

### 3.2 活化能的计算

根据试验数据,还可求得反应中的活化能。由 Arrhenius 公式得

$$\ln k = -\frac{E_a}{R} \frac{1}{T} + \ln A, \quad (9)$$

式中: $E_a$  为反应的活化能 (kJ/mol);  $R$  为气体摩尔常数,  $8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ ;  $T$  为绝对温度;  $A$  为指前因子。由式(9)知,通过  $\ln k$  与  $1/T$  直线的斜率可求得反应的活化能。将不同温度条件下的试验数据(见图 5)按一级反应动力学拟合,将得到的  $\ln k$  与  $1/T$  作图,如图 8 所示。可知  $\ln k$  与  $1/T$  呈现良好的线性关系,相关系数高,这说明  $k$  与  $T$  符合 Arrhenius 公式,并得到

$$\ln k = -1.7437 \times 10^3 \frac{1}{T} + 0.9231. \quad (10)$$

根据  $\ln k$  与  $1/T$  直线的斜率求得液中放电降解 TNT 反应的活化能为  $14.5 \text{ kJ/mol}$ 。该活化能明显低于一般化学反应的活化能 ( $60 \sim 250 \text{ kJ/mol}$ ),因此液中放电等离子体降解 TNT 的反应所要克服的势能垒较低,反应容易发生。

## 4 能量效率分析

能量效率是脉冲放电系统的一个重要因素,用来判断放电装置的能量利用状况,而不是放电中固有的特征。能量效率  $G$  值的定义为每 100 eV 电容储能所引起变化的 TNT 分子数,计算见式(11)。

$$G = q \frac{N_A}{M W_C N} \text{ (molecule/ heV)} \quad (11)$$

式中: $N_A$  为阿弗伽德罗常数,  $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ molecule/mol}$ ;  $M$  为 TNT 的摩尔质量,  $M = 227 \text{ g/mol}$ ;  $N$  为放电次数;  $W_C$  为电容储能 (J), ( $1\text{J} = 6.24146 \times 10^{18} \text{ eV} = 6.24146 \times 10^{16} \text{ heV}$ ); 计算见式(12)。

$$W_C = \frac{1}{2} C U^2, \quad (12)$$

式中: $C$  为电容器的电容量 ( $\mu\text{F}$ );  $U$  为电容器上的充电电压 (kV)。

表 2 列出了本文中几组试验降解效果以及能量效率  $G$  值。本试验的能量效率  $G$  值为  $6.56 \times 10^{-2} \sim 9.33 \times 10^{-2} \text{ molecule/heV}$ 。同其他研究相比<sup>[11]</sup>,能量效率提高了  $3 \times 10^3$  倍。这表明本试验具有很高的能量效率。分析原因如下:本试验装置中反应器和高压脉冲电源匹配良好,降解效率高,而且反应器的体积大,能量效率明显高于其他研究中的试验装置。

表 2 液中放电等离子体降解 TNT 模拟废水的能量效率(放电电压 36 kV, 放电 300 次, 体积 7 L)

Tab. 2 The energetic efficiency on the degradation of TNT wastewater by electro-hydraulic discharge plasma at the discharging voltage of 36 kV, the discharging times of 300, the volume of 7 L

电极间距/ mm	初始浓度/ (mg L <sup>-1</sup> )	初始 pH	温度/ °C	降解率/ %	绝对去除量/ mg	能量效率 G 值/ (molecule/ heV)
8	100	7	20	61	427	0.093 3
6	50	7	50	97	340	0.074 3
8	55	7	20	78	300	0.065 6

## 5 结论

1) 液中放电等离子体技术降解 TNT 模拟废水效果显著。在放电电压 36 kV、电极间距 6 mm、初始浓度 50 mg/L、体积 7 L 的 TNT 模拟废水在 20 °C 条件下 300 次放电的降解率达到 87%, 出水 TNT 浓度降低为 6.5 mg/L; 升高至 50 °C 后 300 次放电的降解率达到 97%, 出水 TNT 浓度降低为 1.5 mg/L。

2) 随着 TNT 初始浓度的升高, TNT 降解率下降, 但绝对去除量增加。降低初始 pH 值和升高温度有利于提高反应速率。投加抑制剂 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 后, TNT 降解率明显降低。

3) 液中放电对 TNT 的降解反应符合表观一级反应动力学, 活化能为 14.5 kJ/mol, 明显低于一般化学反应的活化能。

4) 本试验中液中放电等离子体技术降解 TNT 模拟废水的能量效率 G 值为  $6.56 \times 10^{-2} \sim 9.33 \times 10^{-2}$  molecule/ heV, 表明本试验具有很高的能量效率。

### 参考文献(References)

- [1] GB 14470.1—2002. 兵器工业水污染物排放标准—火炸药[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- GB 14470.1—2002. Discharge standard of wastewater from weapon industry-explosives and propellants[S]. Beijing: Standard Press of China, 2002. (in Chinese)
- [2] 郭新超. 水解酸化+好氧膜生物工艺处理弹药销毁废水的试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2001.
- GUO Xin-chao. A laboratory study on treatment of the explosive disposal wastewater using biological hydrolysis-membrane biological reactor[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2001. (in Chinese)
- [3] 秦曾衍, 左公宁, 王永荣, 等. 高压脉冲放电及其应用[M]. 北

京: 北京工业出版社, 2000: 206 - 243.

QIN Zeng-yan, ZUO Gong-ning, WANG Yong-rong, et al. Use of high voltage discharge[M]. Beijing: Beijing Industry Press, 2000: 206 - 243. (in Chinese)

- [4] Sun B, Sato M, Clements J S. Oxidative processes occurring when pulsed high voltage discharges degrade phenol in aqueous solution[J]. Environ Sci Technol, 2000, (34): 509 - 513.
- [5] Sugiarto A T, Sato M. Pulsed plasma processing of organic compounds in aqueous solution[J]. Thin Solid Films, 2001, (386): 295 - 299.
- [6] 刘晓春. 液中放电及其应用于 TNT 废水的降解研究[D]. 北京: 北京理工大学, 1998.
- LIU Xiao-chun. Degradation of TNT wastewater by electro-hydraulic discharge[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1998. (in Chinese)
- [7] 许正, 夏连胜, 刘晓春. 脉冲等离子体技术降解 TNT 初步研究[J]. 火炸药学报, 1999, 22(4): 54 - 56.
- XU Zheng, XIA Lian-sheng, LIU Xiao-chun. Pulsed plasma technology application in the preliminary research of TNT degradation[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1999, 22(4): 54 - 56. (in Chinese)
- [8] 敖澹. 电液脉冲降解装置与 TNT 废水降解影响因素的研究[D]. 重庆: 后勤工程学院, 2006.
- AO Lu. Influence factors and experiment setting research on degradation TNT wastewater by electro-hydraulic discharge[D]. Chongqing: Logistical Engineering University, 2006. (in Chinese)
- [9] GB/T13905—92. 水质 梯恩梯的测定 亚硫酸钠分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- GB/T13905—92. Water quality, Determination of TNT, Sodium sulfite spectrophotometry[S]. Beijing: Standard Press of China, 1992. (in Chinese)
- [10] 何玉蓉, 袁永明, 童冬梅, 等. 物理化学: 下册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 138.
- HE Yure, YUAN Yong-ming, TONG Dong-mei, et al. Physical chemistry: lower volume[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 138. (in Chinese)