

# 滑动弧等离子体技术 用于环境治理领域的研究进展

严建华<sup>1</sup>, 杜长明<sup>1</sup>, B. G. Cheron<sup>2</sup>, 李晓东<sup>1</sup>, 倪明江<sup>1</sup>, 岑可法<sup>1</sup>

(1. 浙江大学, 浙江 杭州 310027; 2. 鲁昂大学, 法国 鲁昂 76821)

**[摘要]** 叙述了滑动弧放电的产生方法、物理属性和基本原理, 以及滑动弧反应器结构及反应器在废气和废水处理等环境污染治理工程中的应用情况。利用自制的气液两相流滑动弧放电等离子体降解机理实验装置, 对制药废水和 DSD 酸的浓缩废液进行了初步处理试验, 结果表明, 高浓度有机废水通过主处理器后,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$  等去除率均可达 99% 以上, 具有良好的应用前景。

**[关键词]** 滑动弧; 等离子体; 环境污染; 废气; 废水

**[中图分类号]** X7

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1002-3364(2005)05-0001-06

滑动弧放电可产生一种周期性摆动非平衡等离子体<sup>[1~4]</sup>, 该技术产生的基本原理是在一对电极间加上电压并通过气流(图 1), 在电极之间最窄处(A)形成放电电弧, 利用气流来推动电弧(B), 使它向下游移动, 同时电弧的长度随着电极间距离的增大而增加, 当电弧长度达到临界值时消失(C), 同时在电极最窄处(A)形成新的电弧, 重复上述过程形成脉冲放电。20 世纪 90 年代初期, 法国人 Czenichovski A. 提出纯气流推动滑动弧放电方案, 并成功地应用于很多等离子体化学工艺, 使滑动弧放电再一次成为受欢迎的等离子体技术。

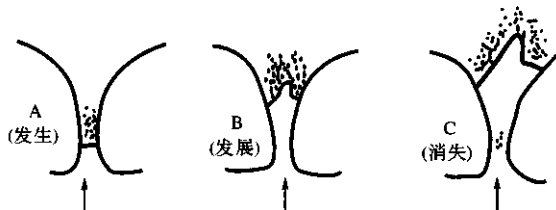


图 1 滑动弧放电的基本原理

## 1 滑动弧放电等离子体反应器结构

### 1.1 典型结构

最简单的滑动弧放电反应器结构如图 2 所示。石

英绝缘罩起着封闭反应区和绝缘的作用。当接通两电极间电压, 两电极间最小距离处空气被击穿, 形成电弧, 在喷嘴喷出的高速气流推动下, 电弧向上移动, 形成滑动电弧柱。这种反应器结构简单, 成本低廉, 因此应用最广, 可利用这种结构制造锅炉点火器。

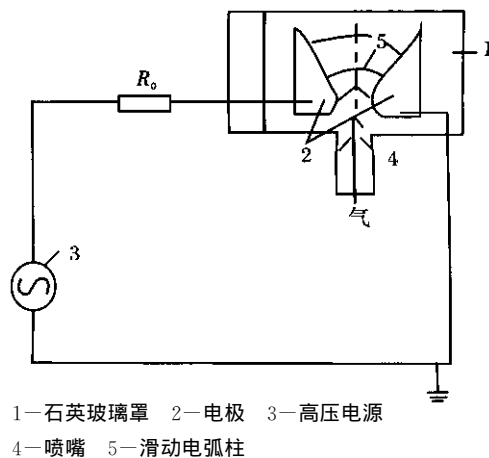


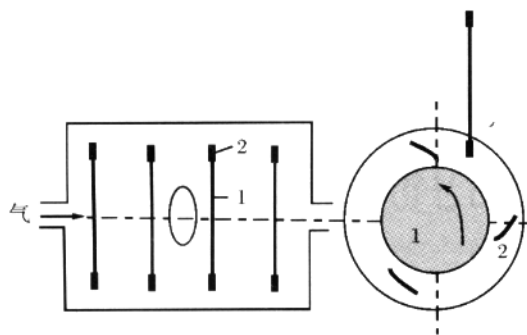
图 2 典型滑动弧放电

为了提高滑动弧放电的频率和电化学效率, 使气流和电弧的掺混比较均匀, 可通过使滑动电弧旋转来实现。实现电弧旋转有 2 种方法<sup>[6]</sup>: (1) 中心电极旋

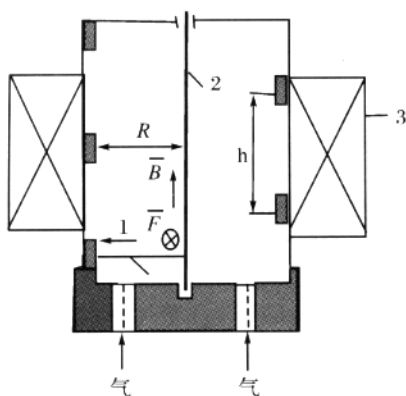
收稿日期: 2004-05-13

作者简介: 严建华(1962-), 男, 浙江宁波人, 浙江大学热能工程研究所博士, 教授, 博士生导师, 长江学者, 主要研究领域: 热能工程、废弃物无害化处理等。

转(图 3); (2) 局部外加磁场(图 4)。



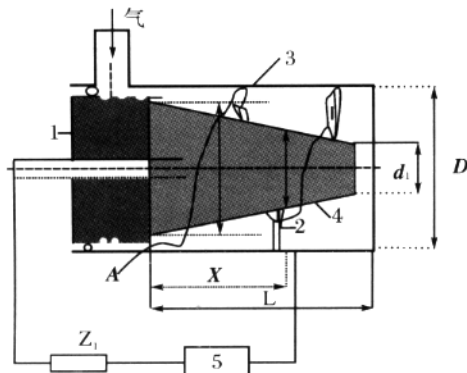
1—旋转中心电极 2—固定电极  
图 3 中心电极旋转滑动弧放电



1—外电极 2—内电极 3—磁场  
图 4 磁驱动滑动弧放电

## 1.2 新型旋转滑动弧放电

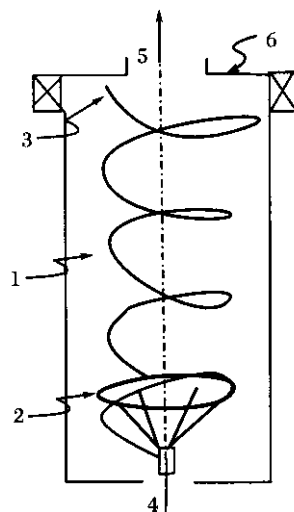
新型旋转滑动弧放电如图 5 所示。接通圆柱外电极 3 和圆锥中心电极 4 之间的高压电源 5, 电弧在外电极和中心电极之间产生, 气体切线进入反应器<sup>[7,8]</sup>, 通过螺旋结构的底座 1 实现旋转并推动电弧, 产生旋转滑动弧放电, 这种方法可以提高滑动弧放电的等离子体非平衡度。



1—底座 2—电弧 3—外电极 4—内电极 5—高压电源  
图 5 新型旋转滑动弧放电

## 1.3 旋风滑动弧放电

图 6 是旋风滑动弧放电反应器示意<sup>[9]</sup>, 出口带有金属法兰的圆柱管, 长 150 mm, 直径 40 mm, 法兰作为阳极, 同时接地。法兰上有 4 个切线入口 (2 mm×2 mm), 气体通过这些切线入口进入圆柱管内, 在管内产生强烈的倒转旋风, 入口气体速度在 (10~50) m/s 之间变化, 螺旋形电极作为阴极固定在圆柱轴线上。螺旋形电极沿着轴线上升, 形成逐渐远离阳极的圆环。接通两极间高压电源, 电极之间的空气被击穿, 产生电弧。强烈的旋风推动电弧沿着轴线移动。电弧沿着螺旋形电极延长, 到螺旋形电极底部消失, 同时在两电极间形成新的电弧。国外已有利用该结构制造柴油机点火装置的报道。



1—螺旋形电极 2—圆环 3—螺旋形电极末端  
4—电源连线 5—出气 6—法兰

图 6 旋风滑动弧放电

## 2 等离子体化学应用

在滑动弧放电过程中, 电能直接进入反应区域, 产生一个充满活性粒子的非平衡态等离子体反应环境, 超过 80 % 的电能直接被化学反应吸收。反应物在反应区域平均的停留时间为 0.001 s, 这使该方法具有很大的处理量, 一般能超过电化学反应和热化学反应等其它方法的 4 倍。而且滑动弧放电等离子体结构简单, 成本低廉, 可控性好, 选择性好, 并且在各种气体和蒸汽, 甚至含固体颗粒条件下, 电极都不会被腐蚀。因此, 滑动弧反应器可在很多工业化学中应用<sup>[4,10]</sup>, 如:

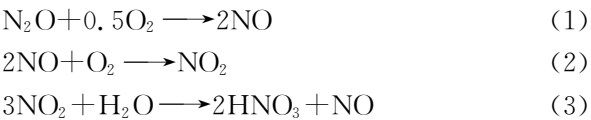
(1) 甲苯和四氯化碳等挥发性有机污染物 (VOCs) 的

控制;(2) 聚乙烯(芬芳碳氢化合物)、硫化物和氮氧化合物的控制;(3) 天然气重整制取混合气( $H_2 + CO$ );(4) 甲烷裂解为氢和乙炔;(5) 重油残渣重整制取混合气( $H_2 + CO$ );(6) 温室气体的降解;(7) 等离子体点火;(8) 金属表面清洗<sup>[11,12]</sup>;(9) 有机纤维活化<sup>[13,14]</sup>;(10) 降解高浓度有机废水。

2.1 在  $N_2O$  转化  $NO_x$  ( $x=1,2$ ) 方面的应用

$N_2O$  俗称笑气,是一种无色、降解周期长(达 170 多年)和室温下稳定的气体。大气中的  $N_2O$  主要来源于自然和人类活动,如煤的燃烧、生产己二酸和硝酸等过程都会产生  $N_2O$ 。消除  $N_2O$  的技术方法通常有:燃烧热解法、催化分解法、热转化成  $NO_x$  并进一步生成其衍生物等。

滑动弧放电处理含  $N_2O$  的废气属于第三种方法<sup>[15]</sup>,它具有独特的优点,能够使  $N_2O$  生成  $NO_x$  得到循环再利用。例如生产  $HNO_3$  和己二酸,从降低能耗和催化剂数量上来看,利用滑动弧放电把  $N_2O$  转化  $NO_x$  是一种很经济的方法,该技术可用于硝酸和己二酸厂的尾气处理<sup>[21]</sup>,主要发生以下反应:



废气中约 60%  $N_2O$  可转化成  $NO_x$ ,生成的  $HNO_3$  可回收利用。与催化分解和燃烧热解法相比较,滑动弧放电技术对  $N_2O$  具有较高的转化率,不需要催化剂,并且可以使  $N_2O$  得到循环再利用。

2.2 挥发性有机污染物(VOCs)的控制

Krawczyk K. 等人利用滑动弧放电处理含  $CCl_4$  的废气流,在湿度为 8 000  $\mu L/L$  时, $CCl_4$  的降解率最高可达 100%<sup>[16,17]</sup>。

Czernichowski A. 等人利用小型滑动弧放电反应器处理含庚烷、甲苯、二甲苯和四氯乙烯废气(表 1),发现这些挥发性有机污染物降解最终产物为  $CO_2$ 、 $H_2O$  和  $HCl$  等<sup>[18]</sup>。Benstaali B. 和 Cheron B. G. 等为强化其消解污染物能力,将气流混入一定量水蒸气,形成一定湿度的气氛。研究表明,与单相气流相比,引入水蒸气后可生成更大量的  $OH$  和  $HO_2$  等氧化性自由基<sup>[32]</sup>,说明滑动弧放电在气液两相中能够较好地降解有机污染物。

表 1 各种有机物降解结果

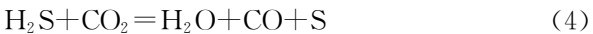
气体	初始浓度/ $\mu L \cdot L^{-1}$	流量 <sup>①</sup> / $m^3 \cdot h^{-1}$	降解率/%
二甲苯	200	120	75
庚烷	2 200	1.8	100
甲苯	1 800	2	92
四氯乙烯	500	1.9	100

①标准状态下的流量

2.3 处理含  $H_2S$  的废气

由 Claus 反应可以看出  $H-S$  之间的键能很弱,因此,在上世纪 70 年代,有人提出从含有  $H_2S$  的混和气体中就能够制取单质硫和氢气,但要求废气中  $H_2S$  含量达到一定高度。高频放电、微波放电和电晕等等离子技术是处理  $H_2S$  气体的最直接有效的方法,但由于费用、能耗、电极腐蚀、运行压力和工业应用的尺寸要求等原因,都没能在工业上应用。

等离子体技术处理  $H_2S$  和  $CO_2$  的混和气体,有以下反应式:



由于通过转移反应很容易由  $CO$  制取  $H_2$  气体,因此式中的  $CO$  可认为等价于  $H_2$ 。

Czernichowski A. 等利用小型滑动弧放电反应器处理  $H_2S$  和  $CO_2$  混合气体<sup>[20,21]</sup>,在反应器中有 3 个金属分叉电极,当两种气体的体积比  $H_2S/CO_2$  为 69/31 时, $H_2S$  分解率能达到 39%。同时,制取氢气能耗为 0.36  $kW \cdot h/m^3$  (标准状态,下同)。 $H_2$  和  $CO$  的热焓值分别为 0.25  $kW \cdot h/m^3$  和 0.76  $kW \cdot h/m^3$ 。同时,电能转化为化学能的效率以 32% 来计算,则制取 1  $m^3$   $H_2$  和  $CO$  的混合气将需要大约 2.6  $kW \cdot h$  的电能。

Saniuk S. V. 等为了与其它等离子反应器作比较<sup>[22]</sup>,用滑动弧放电反应器处理纯  $H_2S$  气体或  $H_2S$  和  $CO_2$  的混合气体,以不同的气体成分压力、气体流量、功率、电极材料和电极间距作了多组试验,结果如下:

(1)在电极间距最大为 3 mm 和进气没有预热,没有循环处理及纯  $H_2S$  分解率达到 45 % 情况下,制取  $H_2$  最小单位能耗为 4  $kW \cdot h/m^3$ ,分解  $H_2S$  单位能耗为 1  $kW \cdot h/m^3$ ,并发现在 3 mm 范围内,增大电极间距能耗可减小。

(2)当两种气体体积比  $H_2S/CO_2$  为 60/40 和  $H_2S/CO_2$  为 25/75,压力在(0.5~0.7) MPa 范围内,制取 1  $m^3$   $H_2$  和  $CO$  混合气的最小能耗为 5.5  $kW \cdot h$ ,结果发现在  $H_2S/CO_2$  为 25/75 情况下  $H_2S$  彻底分解

能耗是  $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$  为 60/40 的 2 倍。

Czernichowski A. 和 Saniuk S. V. 试验装置主要差别是对放电电流的不同限制, Czernichowski A. 使用了感应器, 而 Saniuk S. V. 使用了电容器。通过两者对比发现, 加感应器利于处理  $\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2$  混合气, 加电容器利于处理纯  $\text{H}_2\text{S}$  气。利用微波放电处理含  $\text{H}_2\text{S}$  混合气制取  $\text{H}_2$  能耗为  $1\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ , 可见在能耗方面, 滑动弧放电不具有优势, 这主要由于滑动弧放电存在不稳定状态, 但滑动弧放电反应器结构简单, 造价便宜, 并在处理高浓度  $\text{H}_2\text{S}$  气尤其含有高浓度  $\text{CO}_2$  时具有较大优势。

2.4 烟气脱硫

把  $\text{SO}_x$  从烟气中分离出来并且最终转变为其它固态产品是一项重要的目标。通常将  $\text{SO}_2$  氧化为石膏, 需要能量约为  $1\text{ MW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。

可根据下列方程把二氧化硫转化为单质硫:

$$\text{SO}_2 + 2\text{CO} = \text{S} + 2\text{CO}_2 \tag{5}$$

$$\text{SO}_2 + 2\text{H}_2 = \text{S} + 2\text{H}_2\text{O} \tag{6}$$

$$2\text{SO}_2 + \text{CH}_4 = 2\text{S} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \tag{7}$$

上述反应需要在  $(700\sim1\ 600)\text{ }^\circ\text{C}$  温度下或者存在催化剂条件下才可实现。利用等离子体化学反应把二氧化硫转化为单质硫, 不需要使用任何固体或者液体催化剂, 而只是通过等离子体反应器中的活性粒子即可。同样, 是使用还原性气体而不需要采用空气就可以把  $\text{SO}_2$  从活性炭中解吸附出来,  $\text{SO}_2$  和还原性气体可以在滑动弧中直接反应。

很多滑动弧放电大约在  $1\text{ MPa}$  压力条件下进行, 采用相同电极和电极间隙, 可以允许存在不同的气体组成, 不同的气体压力, 不同的气体流量以及不同的能量。Czernichowski A. 等人建立了一个针对  $\text{SO}_2$  的一段反应器, 6 个刀型电极分布在直径  $3\text{ mm}$  喷嘴周围, 电极间最小距离为  $3\text{ mm}$ 。反应器由  $50\text{ Hz}$  三相变压器供电, 进行了以下试验:

(1) 氢气作为还原气体。反应器中的混合气为  $37\%\text{SO}_2 + 63\%\text{H}_2$ , 初始温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , 流速为  $2.2\text{ m/s}$ , 电极功率为  $1.6\text{ kW}$ 。式(8)是主要反应, 同时存在二级反应:

$$\text{S} + \text{H}_2 = \text{H}_2\text{S} \tag{8}$$

排气中只有  $0.5\%$  的  $\text{H}_2\text{S}$ 。排气分析和质量平衡说明,  $67\%$  的二氧化硫转化为单质硫。

(2) 甲烷作为还原性气体。反应器中的混合气为  $57\%\text{SO}_2 + 43\%\text{CH}_4$ , 初始温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , 流速为  $1.8$

$\text{m/s}$ , 电极功率为  $0.5\text{ kW}$ 。式(9)是主要反应, 同时存在二级反应:

$$\text{SO}_2 + 2\text{CH}_4 = \text{S} + 2\text{CO} + 4\text{H}_2 \tag{9}$$

排气中只有  $0.2\%$  的  $\text{H}_2\text{S}$ 。排气分析和质量平衡说明,  $64\%$  的二氧化硫转化为单质硫。

2.5 制取合成气体

把  $\text{CH}_4+\text{CO}_2$  混合气通入滑动弧放电反应器, 在电极间加高电压, 将有以下反应<sup>[23~25]</sup>:

$$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 2\text{CO} + 2\text{H}_2 \tag{10}$$

从式(10)可见, 在把  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  分解的同时, 生成  $\text{H}_2+\text{CO}$  的合成气体, 其可作燃料使用。

使  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  体积比在  $0.5\sim2$  之间变化, 输入功率为  $2.5\text{ kW}$ , 对排气进行测量和分析结果如表 2。

表 2 尾气中  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  体积浓度 %

$\text{CO}_2/\text{CH}_4$ 体积比	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	$\text{CO}$	$\text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	排气温度 / $^\circ\text{C}$
0.5	44	19	9	12	0.2	810
1.0	40	38	9	11	1.0	750
1.5	33	46	9	9	2.8	750
2.0	26	52	10	7	3.6	750

2.6 降解高浓度有机废水

浙江大学热能工程研究所在分析液电效应和液电脉冲等离子体法<sup>[26~28]</sup>及滑动弧等离子体特性<sup>[29~31]</sup>的基础上提出了气液两相流滑动弧放电等离子体降解高浓度有机废水治理方法, 其也可用于制药废水、造纸废水、餐饮废水和电厂废水等的治理。该方法特征在于滑动弧放电的基本原理是在一对电极间加上电压并通过气流, 如当气流中存在水蒸气(废水和压缩空气通过雾化喷嘴形成待处理的废水水雾), 气液混合物推动起弧端形成的滑动电弧向下游移动产生气液混合体滑动弧放电, 在常压下获得非平衡等离子体, 产生的臭氧、紫外线、高能电子、 $\text{OH}$  和  $\text{O}$  等活性粒子直接作用于被雾化废水中的有机污染物, 并使废水转变为无害物。

利用自制的气液两相流滑动弧放电等离子体降解实验装置(图 7), 对制药废水和生产 DSD 酸的浓缩废液进行初步处理试验。首先接通  $10\text{ kV}$  交流高压电源(8), 废水溶液从储水槽(7)中通过气体引射吸出, 废水和压缩空气(1)通过空气雾化喷嘴(10)产生小于  $15\text{ }\mu\text{m}$  的雾化颗粒, 形成待处理的废水水雾, 喷出气水混合物的速度大于  $10\text{ m/s}$ , 气水混合物推动起弧端(11)



形成的滑动电弧(12)向下游移动产生滑动弧放电。处理时间主要由水雾在滑动弧放电区域停留的时间决定,水雾流量由喷嘴(10)调节。通过气体采样口(15)进行采样,尾气(18)通过排气管道(16)排出,在冷却水套(17)的冷却下,水汽冷凝成液体,通过导液管(14)流入储液槽(13)。初步试验结果(表 3、4)表明,高浓度有机废水通过主处理器后,COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 和 NH<sub>3</sub>-N 等去除率均可达 99% 以上。同时,发现废水 COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 和 NH<sub>3</sub>-N 等的浓度越高降解率越高,可见气液两相流滑动弧放电等离子体适于降解高浓度有机废水。试验时反应条件是:电压(7 000~10 000) V,频率 50 Hz;废液流量 42.4 mL/min,气体流量 11.2 L/min,载气为空气;喷嘴中空气压力(0.3~1.5) MPa。

表 3 制药废水降解结果 mg/L

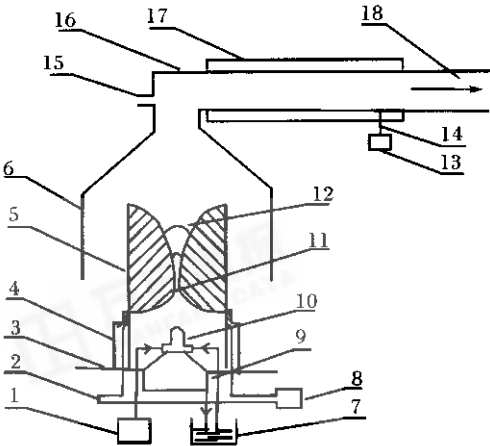
项目	未采用本技术	采用本技术	降解率/%
COD <sub>Cr</sub>	1 570	14	99.11
	1 570	15	99.04
	1 570	10	99.36
BOD <sub>5</sub>	1 340	11	99.18
	1 340	8	99.40
	1 340	12	99.10
NH <sub>3</sub> -N	1 200	7	99.42
	1 200	10	99.17
	1 200	8	99.33

表 4 DSD 酸的浓缩废液降解结果 mg/L

项目	未采用本技术	采用本技术	降解率/%
COD <sub>Cr</sub>	1.46×10 <sup>5</sup>	97	99.93
	1.46×10 <sup>5</sup>	85	99.94
	1.46×10 <sup>5</sup>	92	99.93
BOD <sub>5</sub>	4 660	37	99.21
	4 660	31	99.33
	4 660	29	99.38
NH <sub>3</sub> -N	8 040	29	99.64
	8 040	25	99.69
	8 040	32	99.60

上述废水处理方法具有如下特点:(1)将液相废水充分雾化,液滴的反应表面积成几何级数增加,大大提高反应能力;(2)基于气液两相进行反应,并不是将液相完全进行蒸发,90%~95%的电能转化成等离子能量,少部分传给反应器,因此能耗仅为液电脉冲电处理法的 40%~50%;(3)待处理的废水全部通过强放电区域,在大量自由基氧化及高能电子轰击、紫外辐射等交互作用下,高浓度有机废水可完全得到处理;(4)可

以连续处理废水,不需要较长的停留时间;(5)制造电极的原料廉价(目前一般采用的是铝片),系统占地面积小,可广泛用于高浓度有机废水的处理。



1—压缩空气 2—高压绝缘线 3—绝缘底座 4—绝缘支柱  
5—刀型分叉电极 6—反应罩 7—废水槽 8—高压电源  
9—废液收集槽 10—喷嘴 11—起弧端 12—滑动电弧  
13—储液槽 14—导液管 15—气体采样口 16—排气管道  
17—冷却水套 18—尾气

图 7 气液两相流滑动弧放电反应器

3 结 论

(1)在大气压下,滑动弧放电等离子体是一种复杂的时空结构,电能直接用来产生一个非平衡态的等离子体,75%~80%总能量在非平衡态等离子区释放,因此具有很高的选择性和能量利用率,可在等离子体化学反应中得到广泛的应用。

(2)滑动弧放电等离子体可以用于处理多种工业废气污染,如 VOCs、硫化氢和二氧化硫等。还可以通过甲烷和二氧化碳为原料制取合成气(H<sub>2</sub>+CO)。

(3)气液两相流滑动弧放电等离子体可用于降解高浓度有机废水,此废水通过主处理器后,COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N 等去除率均可达 99% 以上。

[参 考 文 献]

[1] Pfend E., 齐志红. 热等离子体技术:现状及发展方向[J]. 力学进展,1999,29(2):251-267.  
[2] 晏乃强,吴祖成. 放电等离子体降解三氯乙烯[J]. 环境科学,2001,22(3):11-14.  
[3] 吴承康,等. 气压非平衡等离子体中非平衡度的探讨[J]. 核聚变与等离子体物理,1998,18(2):57-60.  
[4] Czenichowski A., Gliding arc applications to engineering and environment control[J]. Pure & appl Chemistry,

- 1994,66(6):1301-1310.
- [5] Czernichowski A. . system and method for ignition and reignition of unstable electrical discharges. USA, US20020093294A1,2002
- [6] 林烈,吴承康. 磁驱动滑动弧放电大气压非平衡等离子体[J]. 核聚变与等离子体物理,2000 20(2): 121-124.
- [7] Cormier J. M. ,Rusu I. . Syngas Production via methane steam reforming with oxygen: plasma reactors versus chemical reactors[J]. J. Phys. D: Appl. Phys, 2001, 34: 2798-2803.
- [8] Rusu I. ,Cormier J. M. . Study of a rotarc plasma reactor stability by means of electric discharge frequency analysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy. 2003,28 (10): 1039-1043.
- [9] Chiranjeev S. K. , et al. . Electrical discharges in the Reverse Vortex Flow - Tornado Discharges [J]. ISPC16. 2003.
- [10] Fridman A. ,et al. Energy and Comb[J]. Sci. 1999,25: 211-231.
- [11] Bellakhal N. , et al. Cleaning of copper foil coated with sodium hexanoate as corrosion inhibitor[J]. Journal of Applied Electrochemistry,2000,30(5):595-600.
- [12] Benstaali B. , Addou A. , Brisset J. L. . Electrochemical and X - ray investigation of austenitic 304L and 316L stainless steels treated by a gliding arc in humid air[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 78 (1): 214 - 221.
- [13] Janca J. ,et al. A Plasma Surface Treatment of Polyester Textile Fabrics Used for Reinforcement of Car Tires[J]. Plasmas and Polymers,2001,6(1/2):15-26.
- [14] Czernichowski A. , Janca J. . Wool treatment in the gas flow from gliding discharge plasma at atmospheric pressure[J]. Surface and Coatings Technology,1998,98(1): 1112-1115.
- [15] Krawczyk K. , Wiczorkowski M. . Combined plasma - catalytic processing of nitrous oxide[J]. Applied Catalysis B:Environmental,2001,(30):233-245.
- [16] Krawczyk K. , Ulejczyk B. . Decomposition of Chloromethanes in gliding discharges[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing,2003,23(2):265-281.
- [17] Krawczyk K. , Ulejczyk B. . Influence of Water Vapor on  $\text{CCl}_4$  and  $\text{CHCl}_3$  Conversion in gliding discharge[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing,2004,24(2): 155-167.
- [18] Czernichowski A. , Ranaivosoaarimanana A. . Zapping VOCs with a discontinuous electric arc[J]. Chemtech, 1996,26(4):45-49.
- [19] Dalaine V. ,Cormier J. M. , lefauchaux P. . A gliding discharge applied to  $\text{H}_2\text{S}$  destruction[J]. Journal of applied physics,1998, 83(5):2435-2441.
- [20] Czernichowski A. . Destruction of Waste and Toxic Materials Using Electric Discharges[C]. IEE Colloquium on. 19 Nov 1992:4/1-4/5.
- [21] Saniuk S. V. , Kingsep S. S. , Rusanov V. D. , Czernichowski A. . Complete valorization of  $\text{H}_2\text{S}$  or  $\text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2$  waste gases in a gliding arc reactor[C]. Proc. ISP-CII. 1993.
- [22] Czernichowski A. , Czernichowski P. . Pyrolysis of natural gas in the gliding arc reactor[J]. Hydrogen Energy Progress XI, 1996,1:661-669.
- [23] Rusu I. ,Cormier J. M. . On a possible mechanism of the methane steam reforming in a gliding arc reactor[J]. Chemical Engineering Journal,2003,91(1): 23-31.
- [24] Czernichowski A. . Glidarc assisted preparation of the synthesis gas from natural and waste hydrocarbons gases [J]. Oil&Gas Science and Technology, 2001,56(2):181-198.
- [25] Michael G. N. , et al. Removal of benzene and selected alkyl - substituted benzenes from aqueous solution utilizing continuous high - energy electron irradiation[J]. Environmental Science and Technology,1992, 26(1):144-152.
- [26] Willberg D. M. , Lang P. S. . Degradation of 4 - chlorophenol, 3, 4 - dichloroaniline, and 2, 4, 6 - trinitrotoluene in an electrohydraulic discharge reactor[J]. Environmental Science and Technology,1996,30:2526-2534.
- [27] Tezuka M. ,Iwasaki M. . Plasma induced degradation of chlorophenols in an aqueous solution[J]. Thin Solid Films,1998,316(2):123-127.
- [28] Moussa D. , Brisset J. L. . Disposal of spent tributylphosphate by gliding arc plasma[J]. Journal of Hazardous Materials,2003, 102(2-3): 189-200.
- [29] Doubla A. , et al. Post-hyphen; discharge plasma&hyphen; chemical oxidation of Iron&lpar;II&rpar; complexes[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2003 , 33 (1):73-77.
- [30] Janca J. , et al. Investigation of the Chemical Action of the gliding and“Point”arcs Between the Metallic Electrode and Aqueous Solution[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing,1999, 19(1):53-67.