

废气治理的低温等离子体-催化协同净化技术

郭玉芳 叶代启

(华南理工大学造纸与环境工程学院环境科学与工程系, 广州 510640)

摘要 低温等离子体-催化协同净化技术具有能耗低、投资少、处理效率高、不产生二次污染等显著优点备受人们的关注。从挥发性有机化合物(VOC)的转化、氮氧化合物的脱除、汽车尾气净化等不同废气治理的角度,概括了目前国内外在这方面的研究进展,最后提出了该项技术在环境保护领域的应用前景及研究方向。

关键词 低温等离子体 催化 协同作用 废气治理 挥发性有机化合物

Catalysis-assisted non-thermal plasma technique for exhaust gas control

Guo Yufang Ye Daiqi

(Department of Environmental Science and Engineering, College of Paper Making and Environmental Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract Catalysis-assisted non-thermal plasma technique becomes significant due to its advantages, such as less energy consumption, lower cost, higher removal efficiency, no secondary pollution, etc. The research and application development of the technique in VOCs disposal, NO_x removal, engine off-gases purification or else are summed up. The application prospect of this technology in the field of environmental protection is proposed.

Key words non-thermal plasma; catalysis; synergistic effect; exhaust gas control; VOCs

1 引言

目前,各种有毒有害气体的排放已造成严重的环境污染。低浓度有害气态污染物(如 SO₂、NO_x、VOCs、H₂S 等)广泛地产生于能源转化、交通运输、工业生产等过程中。国际条例加强了对这些有害废气的限制。传统的治理方法如液体吸收法、活性炭吸附法、焚烧和催化氧化等已很难达到国际排放标准^[1-3]。

近年来兴起的低温等离子体催化(non-thermal plasma catalysis)技术解决了传统的净化方法所不能解决的问题。用该项技术处理有机废气具有以下优点:能耗低,可在室温下与催化剂反应,无需加热,极大地节约了能源;使用便利,设计时可以根据风量变化以及现场条件进行调节;不产生副产物,催化剂可选择性地降解等离子体反应中所产生的副产物;不产生放射物;尤其适于处理有气味及低浓度大风量的气体。但以下两方面还有待改进:对水蒸气比较敏感,当水蒸气含量高于5%时,处理效率及效果将受到影响;初始设备投资较高。

该项技术在环境污染物处理方面引起了人们的极大关注,被认为是环境污染物处理领域中很有发展前途的高新技术之一。本文将探讨其与污染气体的作用过程及两者协同作用机理,并概述这一技术在废气治理方面的进展。

2 协同作用机理

国内外大量研究表明,等离子体-催化协同作用相比单个作用时能大大增强净化效果。Shigeru Futamura 等人^[4]发现,等离子体反应中产生的 O₃ 可被 MnO₂ 催化剂降解;同时,两者协同作用处理苯时,苯的摩尔转化率可以大大提高。K. P. Franke 等人^[5]研究指出,在仅有催化剂时,20%的 DCE(二氯乙烯)转化成 CO₂;仅放电条件下,转化 70%的 DCE,但不是 CO₂,有一定数量的甲酰氯生成,臭氧也出现于气相中;只有当等离子体和催化协同作用时,有 90%的

收稿日期:2002-11-21;修订日期:2003-01-14

作者简介:郭玉芳(1980~),女,湖南省桃江县人,在读博士研究生,主要研究方向:大气污染控制。

DCE被去除,并且 CO_2 为主要氧化产物。Stefan Bröer等人^[6]实验证明,在低于140 eV,不经过等离子体的处理时, NO_x 几乎没有被去除;而在经介质阻挡放电后再进行催化转化时,约有70%的 NO_x 被还原。

然而,目前国内外在等离子体和催化协同作用机理方面的分析和研究比较少,在这方面的认识远远不够。综合看来,低温等离子体和催化协同作用处理废气的原理如下:等离子体空间富集了大量极活泼的高活性物种,如离子、电子、激发态的原子、分子及自由基等。这些高活性物种在普通的热化学反应中不易得到,但在等离子体中可源源不断地产生。这些活性物种(特别是高能电子)含有巨大的能量,可以引发位于等离子体附近的催化剂,并可降低反应的活化能。同时,催化剂还可选择性地促进等离子体产生的副产物反应,得到无污染的物质。

有文献认为^[7],等离子体中高密度的活性粒子就像很多高强度的紫外线一样存在于反应器中,并且当气体停留时间小于1 s时顺着反应器中气流方向分布。因此,当催化剂顺着等离子体反应器中气流分布,或者位于等离子体区附近时,这些等离子体激发的物种有可能在低温(甚至室温)下就激活催化反应。相比这些催化剂在一般状态下需达到300以上的高温才有净化效果,等离子体-催化技术可大大减少能耗。

有专利介绍说^[8],低温等离子体反应器有填充铁电粒子(高电介质陶瓷)的反应器和脉冲电晕反应器。这些低温等离子体反应器中电子平均能量远远高于周围气体的能量。当施与反应器能量时,绝大多数的电能用于产生高能电子,而不是产生离子和加热气体。因此,等离子体能量直接用于电子碰撞电离以及电离气体产生活性基团。这些活性基团反过来可以分解气体中的毒性化合物。然而,仅有等离子体处理废气时,将不可避免地产生诸多副产物,如 CO 、 CO_2 、 NO 、 NO_2 、 N_2O 、 O_3 和其他的挥发性有机化合物等。但当涂有催化剂的载体颗粒引入低温等离子体反应器中治理废气时,不但可分解毒性化合物,同时,催化剂还可选择性地促进这些副产物的净化反应,得到无污染的物质。更为突出的是,不用升高温度,载入毒性气体时还可降低气体的阻力,从而成本上更为经济。典型的催化剂有 Co 、 Cu 、 Cr 、 Ni 、 V 、 $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 Rh 、 RhZnO_2 、 FeO 、 Fe_2O_3 、沸石等。载气可用的有空气、氧气、氮气、氩气等。载体

颗粒一般为高电介质颗粒,相对介电常数大于5,可用 BaTiO_3 、 SrTiO_3 、 NbTiO_3 以及各种陶瓷。

又有文献指出^[9],等离子体多相催化作用可以发生在等离子体区、等离子体余辉区(afterglow)和产物收集区(冷阱)。在等离子体区,电极材料不纯或有涂层、电极间内置固相填充物、放电反应器器壁的涂层均可能产生催化作用。而在沿气流方向的等离子体余辉区内,富集了大量的高活性粒子,主要是长寿命的自由基等,利用这些高活性粒子可进行某些特定的化学反应。因此,余辉区内置入的催化剂及余辉区器壁的涂层所起的催化作用不容忽视。在产物收集区,冷阱壁涂层的催化作用也值得研究。

还有人认为^[10],固相催化剂的活性是由它们的化学和物相组成、晶体结构以及活性比表面所决定。在等离子体的作用下,催化剂表面将形成超细颗粒(平均颗粒直径为5—500 nm,比表面约为 $100\text{ m}^2/\text{g}$),这将大大增加催化剂的比表面积,并且破坏催化剂的晶体结构,使有更多的空穴,从而导致高的催化活性。相比普通的催化剂,等离子体作用后的催化剂有如下独特之处:具有高度分布的活性物种;能耗减少;加强了催化剂的活性和选择性,延长了催化剂寿命;缩短了制备时间。并且,催化剂的分散和组成状况可以通过改变等离子体化学参数得到控制。另外,等离子体的作用可促进催化剂中的组分均匀分布,降低对毒物的敏感程度。这些特性将使得等离子体-催化技术有更大的应用前景。

3 研究开发现状

欧美和日本等国对低温等离子体催化技术的研究开展得比较早,主要把该技术应用于脱硫脱硝、消除挥发性有机化合物、净化汽车尾气、治理有毒有害化合物等方面。这些国家的研究人员申请获得了许多低温等离子体催化方面的专利,同时也显示了低温等离子体催化技术在治理废气方面的巨大潜力。目前,很多国家的学术机构、政府和商业机构都在积极开展此类研究。比如,美国工程师协会就曾连续多年举行专门的国际学术会议,展示和讨论低温等离子体催化技术在处理机动车尾气上应用的最新进展。在一些国家,用该项技术处理有机废气已成为主流。近年来,国内有很多学者在等离子体烟气脱硫脱硝^[11-41]、汽车尾气净化^[15]、有机废气处

理^[16-18]等方面取得了较多实验结果,发表的论文很多,应用也不少,在这方面的研究已比较成熟。但在低温等离子体技术与催化协同作用方面研究较少,工业上的应用还很不成熟。以下概括了国际上低温等离子体-催化协同作用技术在不同废气治理方面的研究与开发进展。

3.1 挥发性有机化合物(VOC)的转化

Shigeru Futamura 等^[41]对有害大气污染物(HAP)在低温等离子体化学处理中金属氧化物的催化活性进行了研究,发现在静电等离子体反应器中 O₃ 的浓度很高, MnO₂ 催化剂能有效地分解 O₃, 并促进了苯的降解。在没有 MnO₂ 作催化剂时,苯的摩尔转化率最高为 30%,而在相同情况下,有 MnO₂ 作催化剂时,苯的转化率可高达 94%。还通过实验发现 BaTiO₃ 氧化气体污染物以及把 CO_x 转化成 CO₂ 的效果不是很明显。并且在这种情况下, N₂ 与 O 原子结合,产生 N₂O。表 1 展示了干空气中不同 HAP 的转化率和 CO₂ 选择性的关系。从该表可以看出,在 CO 氧化成 CO₂ 中, BaTiO₃ 不是一种有效的催化剂。甚至在有 O₂ 存在时, CO 转化成 CO_x 的摩尔比率随 HAP 转化率的增加而降低。

Misook Kang 等人^[19]在常压下用等离子体/TiO₂ 催化体系去除苯,催化剂的质量百分比为 3%,苯的浓度为 1000 mg/m³。实验测得,在脉冲电压为 13 kV,仅有氧气等离子体没有 TiO₂ 催化剂时,40%的苯分解;在 TiO₂/O₂ 等离子体下,转化率大大加强,13 kV 下经 120 min 后,脱除率达到 70%;在 O₂ 等离子体中, TiO₂ 负载于 -Al₂O₃ 上时甲苯的转化率达到 80%。并且在低于 120 时,二者协同作用可分解臭氧。

秦张峰等^[31]对有害废气的低温等离子体催化净化应用进行了研究,采用了含 CuO、Pd、Pt 等活性组分的催化剂。实验表明,当反应气流速为 50—500 mL/min, 甲苯初始浓度为 2000—20 000 mg/m³ 时,单个等离子体作用甲苯的脱除效率为 70%—95%,脱除量可达 110 mg/h;两个等离子体连用时,脱除效率高达 90%—99.8%。但存在一些问题,如部分氧化产物 CO 和臭氧的排放、耗能仍然偏高等。等离子体技术与催化相结合,甲苯的转化率在室温下就可达到 93%左右,而催化剂单独作用时还需 250 左右的高温;等离子体未转化的部分在催化剂达到一定反应温度后也可以经催化氧化反应再次被脱除,所需温度与催化单独作用相类似。

表 1 干空气中 HAP 的转化率和 CO₂ 选择性的关系

HAP	HAP 最低转化率(mol %)	CO ₂ /(CO + CO ₂)	HAP 最高转化率(mol %)	CO ₂ /(CO + CO ₂)
PhH	32	0.51	79	0.46
CH ₂ =CH ₂	30	0.46	98	0.38
CH ₃ Cl	21	0.33	76	0.28
CCl ₄	32	0.22	59	0.13
Cl ₃ C-CH ₃	21	0.46	96	0.32
Cl ₂ C=CHCl	43	0.39	99	0.30
Cl ₂ C=CCl ₂	29	0.45	98	0.30
CH ₃ Br	16	0.37	73	0.32
CH ₂ Br ₂	17	0.27	95	0.25
CH ₃ CH ₂ Br	21	0.45	61	0.37

K. P. Francke 等人^[20]通过研究发现,净化有机污染物时,若没有等离子体作用,催化剂在 50 没有效果;只经过放电, VC(氯乙烯)去除效率达到 75%—99%, DCE(二氯乙烯)为 44%—69%, 苯为 34%。若两者结合,去除效率显著增加。在 120 , 仅有催化剂时处理掉 17%的 VC, DCE 和苯仅为 6%。而在 10 W · h/m³ (STP) 下,两者结合时, VC 和 DCE 降解了 80% 以上, 甲苯、乙苯、二甲苯降解了 90% 以上。

PLAZCAT 公司已证实了等离子体-催化协同作用去除苯酚、甲醛、己烷、苯、丙烯醛、丁醇、苯并芘等有机物,去除效率可高达 90%—98%。某些技术参数和特性为:气体流速 7000 m³/h;空气相对湿度 80%;反应器尺寸 1420 mm × 1027 mm × 990 mm;去除效率 90%—98%;最大压降 700 Pa;反应器重量 420 kg;气体温度 50 ;输入能量 2500 W;反应器价格 4500 美元。

由上可以看出,等离子体-催化协同作用净化废气,可大大减少能耗,降低成本,处理效果良好。

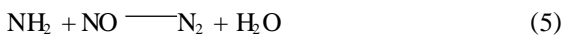
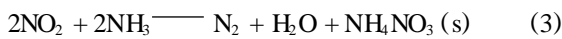
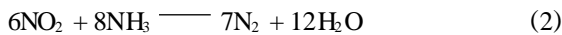
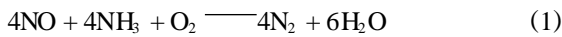
华南理工大学环境工程系已将该项技术成功地应用于治理喷涂生产有机废气、化工厂甲醛及甲醇尾气以及炼油石化污水厂臭气等方面,均得到了较好的净化效果。

3.2 氮氧化物的脱除

B. S. Rajanikanth 等人^[21]对模拟气体在等离子体放电催化中 NO_x 的脱除进行了实验研究,指出介质填充床的存在可使 NO 在低电压下有更高的去除效率。实验对三种不同的催化剂 (Al₂O₃、BaTiO₃、Al₂O₃ + Pd) 进行了探讨,发现 BaTiO₃ 颗粒在气体

组成为 NO 、 O_2 、 N_2 以及 NO 在 N_2 中时有更高的去除效率。在 NO 的初始浓度为 265 mg/m^3 时, NO 的去除效率几乎达到 99%。在模拟汽车尾气(组成为 NO 、 O_2 、 CO_2 、 N_2)中, 相比其他介质, 涂了 Pd 的 Al_2O_3 催化剂有更高的 NO 去除效率。随着脉冲电压以及频率的增加, 去除效率也增加。并且值得注意的是, 室温下 NO 去除效率相当于 300 甚至更高温度下尾气在惯常催化剂作用下的效率。在人口稠密的城市地区, 柴油车在平均负荷下, 转速非常低, 导致尾气温度低至 40—50, 一般的催化转化器在如此低的温度下很难适用, 在这种情况下最好推广放电等离子体协同的催化反应器。

Stefan Bröer 等人^[61] 在 100—250 下以氨作为还原剂, 用介质阻挡放电等离子体和 $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$ 催化剂选择性催化还原氮氧化物。反应气体的组成类似于机动车排气(含 82% N_2 、13% O_2 、5% H_2O 、500 mg/m^3 NO_x 和 500 mg/m^3 NH_3)。在低于 140, 不经过等离子体处理时 NO_x 几乎没有去除效率; 而在催化转化前有介质阻挡放电时, 约有 70% 的 NO_x 被还原, 此时温度低于 100。等离子体处理后 170 mg/m^3 NO 被转化, 其中 110 mg/m^3 被氧化成 NO_2 , 60 mg/m^3 被 NH_3 还原。 NO 和 NO_2 在催化剂中共存, 加强了选择性催化还原。反应方程式如下:



K. P. Franke 等^[51] 研究指出, 在 120 下、53 mg/m^3 的丁酸在仅有等离子体作用时, 20% 转化; 只有催化剂时, 约有 40% 转化; 当二者结合时, 转化率可达 80% 以上。不仅等离子体和催化作用是否协同时效果有很大差异, 而且两者协同作用时若相对位置不同, 效果也会有较大区别。仅在放电条件下, 部分 NO 被氧化成 NO_2 ; 在仅有氨作为还原剂, 沸石作为催化剂时, 可去除 20% 的 NO ; 当等离子体置于催化之后, 仅少量 NO 氧化成 NO_2 ; 放电置于催化之前, 约 50% NO 被去除; 而当等离子体靠近催化放置时, 超过 80% 的 NO 转化成 N_2 。

3.3 机动车排气净化

Kathi Epping^[22] 指出, 为实现美国环保局 (EPA) 提出的机动车尾气中 NO_x 必须还原 90% 以上的目标, 等离子体协同的催化体系 (plasma-assisted catalyst systems) 在治理机动车排气方面有了很大进展。目前, 用该项技术 NO_x 的还原效率可达到 65% 以上, 同时, 该项技术还可脱除 92%—96% 的颗粒物, 去除甲醛 (EPA 认定的一种排气毒物) 40% 以上。

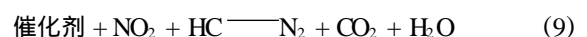
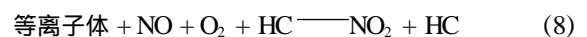
中国专利^[23] 提供了一种后置式汽车尾气净化器。尾气经锥体分散后进入电场的催化剂中, 在低温等离子体和催化剂的协同作用下, 尾气净化率大大提高。该汽车尾气净化器一方面可使催化剂活性增加, 转化率提高; 另一方面可避免催化剂烧结, 从而可大大降低汽车尾气中有害气体的排放。

与现有技术相比较, 该净化器具有以下优点: 有机地将低温等离子体技术与催化技术相结合, 克服了现有的催化剂烧结现象, 使汽车尾气进一步净化。适用于各种车型, 不受汽车的原始排放限制; 不同于现有的三元催化装置要受到汽车的原始排放限制。没有起燃温度限制, 对冷车启动同样有效。适用范围广, 对汽油标号没有限制。结构紧凑, 设计独特、新颖。安装后汽车尾气能达到国家限制的排放标准, 见表 2。

表 2 尾气净化前后的比较

净化前			净化后		
NO_x (mg/m^3)	HC (mg/m^3)	CO (%)	NO_x (mg/m^3)	HC (mg/m^3)	CO (%)
1000	900	6	< 80	< 200	< 1.0

美国专利指出^[24], 在富氧废气中采用低温等离子体技术处理汽车尾气, 可使 NO 在 O_2 和碳氢氧化物的协同作用下转变为 NO_2 。而随后的金属氧化物催化剂可使 NO_2 转化为 N_2 。该方法强化了机动车排气中氮氧化物的还原, 特别是那些有相对较高硫含量的汽车尾气。反应式如下:



Hans Miessner 等^[25] 在文章中指出, SCR 和低温等离子体相结合净化机动车排气, 加强了整体反应, 在相对低的温度下就能有效地去除 NO_x 。 Al_2O_3 和 ZrO_2 作为催化剂的加入, 促进了反应向有利方向进行。当供给每个 NO 分子 30 eV 的能量, 温度为

300 , 气速为 20 000/h 时, 500 mg/m³ 的 NO 能还原一半以上。表 3 总结了不同实验条件下尾气的排出浓度。另一方面, 仅当等离子体催化系统中加入 C₃H₆ 时, NO_x 能去除一半以上。

表 3 有无等离子体-催化协同作用时机动车排气的平均组成比较

项目	CO (mg/m ³)	CO ₂ (%)	HC (mg/m ³)	O ₂ (%)	NO _x (mg/m ³)
不处理	249	8.3	13	9.5	434
仅催化剂	0	8.2	0	9.4	428
无 C ₃ H ₆ 时等离子体 -催化协同作用	0	7.2	0	10.7	404
有 C ₃ H ₆ 时等离子体 -催化协同作用	0	7.9	0	9.7	190

废气流速: 600 L/h (STP) (GHSV 10 000/h); 放电能量密度: 15 W · h/m³; 催化剂温度: 250 ; 加入丙烯流速: 1.2 L/h (STP)。

3.4 其他

二噁英是一类极毒有机化合物的总称, 常在含氯有机物燃烧的过程中产生。当多种毒性物质共同作用时, 毒性更大, 是强致癌物质。Fujitsu 公司用等离子体-催化协同技术处理二噁英毒性气体, 达到的效果超过传统方法处理效果的 100 倍。用该项技术处理 1 μg/m³ 的二噁英气体, 去除效率可达 99%, 并且残留物经分析后已不含苯和氯苯。

Plasmacat 公司用等离子体催化方法治理市政废水处理系统的臭气, 入口臭气浓度为 80 000 OU (臭气单位), 出口为 100 OU, 脱除率约为 99.9%; 又用该项技术处理了食品生产工业产生的臭气, 入口浓度为 800 mg/m³, 出来时已经没有臭味。并且该公司证实了该项工艺用于工业上时, 维护费用最低, 能耗最小。

华中理工大学的研究人员^[26]利用 10⁻⁹ s 高压脉冲将 CO₂ 部分分解为 CO, 使用具有选择性的催化剂, 由脉冲放电产生的部分高能电子提供反应所需能量, 将烟气中的 SO₂ 还原。常温下气体流量为 700 L/h 时, 脱硫率达 90% 以上, 而能耗只有 2.7 W · h/m³ 左右。另有文献^[27]分析研究了催化剂在脉冲放电等离子体作用下, CO₂ 转化为 CO 的规律。催化剂载体对 CO₂ 有一定的吸附能力, 在其表面形成 CO₂ 富积区; 而且催化剂表面为场强加强区, 更易发生化学

反应, 因此催化剂存在时, CO 的产生量几乎不受 CO₂ 含量的影响; 而无催化剂的情况下, CO₂ 含量对 CO 的生成有较大影响。当有 O₂ 存在时, 有无催化剂情况下, CO 生成量都随 O₂ 含量的增加而减少, 尤其是 O₂ 含量从零刚开始增加时; 无催化剂情况下 CO 生成量受 O₂ 含量影响较大。

4 结 语

低温等离子体催化处理技术是一种全新概念的处理技术。等离子体技术与催化相结合, 等离子体场产生高能量活性粒子, 促进催化反应, 使催化反应甚至无需加热即可发生; 催化主导反应方向, 让反应具有选择性, 并大大减少反应副产物。该项技术被认为是处理低浓度、大流量有毒有害气体的最有效方法。等离子体与催化技术相关联, 展示了其特有的化学现象和崭新的应用领域。在净化机动车排气、烟气脱硫、脱除氮氧化物、降解挥发性有机化合物、去除毒性化合物等方面都有着广阔的发展前景。但是就应用技术本身来讲, 目前还不完全成熟, 还需要对低温等离子体催化协同作用产生机理、与被处理废气间的物理、化学过程加以研究, 以优化工艺设计。

参 考 文 献

- [1] 吕唤春, 潘洪明, 陈英旭. 低浓度挥发性有机废气的处理进展. 化工环保, 2001, 21(6): 324—327
- [2] 秦张峰, 关春梅, 王浩静等. 有害废气的低温等离子体脱出研究. 宁夏大学学报, 2001, 22(2): 201—210
- [3] 秦张峰, 关春梅, 王浩静等. 有害废气的低温等离子体催化净化应用研究. 燃料化学学报, 1999, 12(增刊): 179—185
- [4] Shigeru Futamura, Aihua Zhang, Hisahiro Einaga, et al. Involvement of catalyst materials in nonthermal plasma chemical processing of hazardous air pollutants. Catalysis Today, 2002, 72: 259—265
- [5] K. P. Francke, H. Miessner, R. Rudolph. Plasmacatalytic processes for environmental problems. Catalysis Today, 2000, 59: 411—416
- [6] Stefan Bröer, Thomas Hammer. Selective catalytic reduction of nitrogen oxides by combining a nonthermal plasma and a V₂O₅-WO₃/TiO₂ catalyst. Applied Catalysis B: Environmental, 2000, 28: 101—111
- [7] Uniko Urashima, Jenn-Shih Chang. Removal of volatile organic compounds from air streams and industrial flue gases by nonthermal plasma technology. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(5): 602—614

- [8] Toshiaki Yamamoto, Chapel Hill, N. C. Methods and apparatus for controlling toxic compounds using catalysis assisted non-thermal plasma. United States Patent, 5609736, Mar. 11, 1997
- [9] 朱爱民, 宫为民, 师华等. 低温等离子体催化. 化学研究与应用, 1997, 9(5): 449—454
- [10] Chang-jun Liu, Gheorghi P. Vissokov, Ben W.-L. Jang. Catalyst preparation using plasma technologies. Catalysis Today, 2002, 72: 173—184
- [11] 白敏冬, 周锦进, 白希尧等. 超高压脉冲综合治理 SO_2 、 NO_x 和 CO_2 气体. 大连理工大学学报, 1996, 36(1): 47—50
- [12] 宁成, 李劲, 周文俊等. SO_2 和 NO 在脉冲电晕放电中氧化及影响因素研究. 华中理工大学学报, 1994, 22(1): 17—22
- [13] 周黎明, 杨兰均等. 高压脉冲电晕放电脱硫脱硝技术. 高电压技术, 1995, 21(3): 25—29
- [14] 宫为民, 朱爱民, 刘辉等. 脉冲电晕放电去除 NO 的反应途径研究. 中国环境科学, 1997, 17(4): 369—372
- [15] 杨新桦, 李晓红, 卢义玉等. 高压脉冲电晕处理发动机尾气中的 NO 的实验研究. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(3): 56—59
- [16] 郑光云, 侯健, 蒋洁敏等. 非平衡等离子体降解流动态低浓度甲苯气体的研究. 复旦大学学报(自然科学版), 2001, 40(4): 364—367
- [17] 季金美, M. ArifMalik, 姜玄珍. 脉冲电晕放电降解 CFC-113 和 CCl_4 . 环境科学, 1999, 20(5): 53—54
- [18] 郑雷, 姜玄珍. 脉冲电晕放电降解 CH_2Cl_2 的初步研究. 环境科学, 1997, 18(5): 62—95
- [19] Misook Kang, BumJoon Kim, Sung M. Cho, et al. Decomposition of toluene using an atmospheric pressure plasma/ TiO_2 catalytic system. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2002, 180: 125—132
- [20] K. P. Francke, H. Miessner, R. Rudolph. Cleaning of air streams from organic pollutants by plasma-catalytic oxidation. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2000, 20(3): 393—403
- [21] B. S. Rajanikanth, Satyabrata Rout. Studies on nitric oxide removal in simulated gas compositions under plasma-dielectric/catalytic discharges. Fuel Processing Technology, 2001, 74: 177—195
- [22] <http://www.ott.doe.gov/success.html>
- [23] 孟殿强, 陈济民, 刘术宝等. 后置式汽车尾气净化器. 中国专利, 实用新型, 00231748.6, 2001,
- [24] Penetrante, et al. Plasma-assisted catalytic storage reduction system. United States Patent, 6038853, March 21, 2000
- [25] Hans Miessner, Klaus Francke, Rolf Rudolph. Plasma-enhanced HC-SCR of NO_x in the presence of excess oxygen. Applied Catalysis B: Environmental, 2002, 36: 53—62
- [26] 李胜利, 李劲, 李端娇等. 脉冲放电等离子体催化脱硫技术的试验研究. 华中理工大学学报, 2000, 28(5): 98—100
- [27] 李胜利, 李劲, 李端娇等. 催化剂对脉冲放电转化 CO_2 为 CO 的影响. 高电压技术, 1999, 25(4): 41—42

(责任编辑: 郑晓梅)

展会消息

“2003 国际环境监测技术及设备 (广州) 展览会”延期举办

因受非典型肺炎的影响, 原定 2003 年 6 月 27—29 日在广州举办的“2003 国际环境监测技术及设备(广州)展览会”, 将延期至今年 11 月 7—9 日举行。原定参展厂商保持不变, 原参观券在新拟定的展期依然有效。我们对由此而给大家造成的不便深表歉意!

我们相信, 在各参展商及专业观众的继续支持下, 通过我们的努力, 延期举办的展会将会办得更具规模, 效果更佳。

联系单位: 广州市亿帆展览服务有限公司

联系人: 沈先生 陈小姐

联系电话: 020 - 87636108

E-mail: yfzl_fair@21cn.com