

低温等离子净化挥发性有机废气研究进展

章旭明, 闫克平

(浙江大学化工系, 杭州 310028)

5 摘要: 低温等离子体系统被认为是复合污染物控制的有效途径。等离子体过程中产生的离子可用于静电收尘, 产生的 O 和 OH 自由基则用于有机废气的氧化。尽管等离子治理有机废气技术的基本过程仍需详解, 然而这并不阻碍其商业应用。本文从电源和等离子体处理工艺研究进展出发, 围绕有机废气处理过程中的两个核心问题: 能效研究和副产物控制进行讨论。对于电源来说, 交直流叠加和短脉冲供电方式是相对性价比最高的, 可以轻易达到 90% 以上
10 的能量传输效率。对于等离子体处理工艺来说, 最近提出的等离子体与传统治理工艺(如催化、吸附和吸收)相结合的方式可明显提高处理效率和抑制副产物, 具有广阔的应用前景, 进一步的需要对其使用寿命作深入研究。

关键词: 大气污染控制, 等离子技术; 挥发性有机气体; 治理

中图分类号: X511

15

Application of Non-thermal Plasma for VOCs Removal

Zhang Xuming, Yan keeping

(Zhejiang university, Hangzhou 310028)

20 **Abstract:** Non-thermal plasma technology has been considered as a potential tool for multi-pollutant emission control. In non-thermal plasma space, the generation of ions and chemical active species (such as O and OH radicals) are useful for electrostatic precipitation and air pollutants oxidation. As fundamental mechanism of plasma generation and processes are still under investigation, some of techniques have already been developed in pilot scale tests. This paper discusses two critical issues related to applications of Non-thermal plasma for VOCs abatement: energy efficiency enhancement and secondary pollutant emission control. The power source and plasma processing techniques are considered as important factors. With regard to power source, AC/DC and Nano-second pulsed power source shows very high potential. More than 90% of electrical energy conversion efficiency can be easily obtained with such source. With regard to plasma processing technique, the combination of plasma with catalysis and other traditional after treatment methods (e.g. liquid sorption and activated carbon fiber adsorption) is consider as the next generation of processing techniques. These processing techniques not only aim to promote energy efficiency but also aim to restrain by-products formation. More investigations are called for enhancing their long-term operation performance to bridge the gap between fundamental studies and industrial applications.

25

30

Key words: Air pollution control; Plasma; VOCs; Abatement

35

0 引言

随着我国经济的发展, 有机化工产品工业上的应用日趋广泛, 挥发性有机废气(VOCs)及恶臭气体引起的各类纠纷和上诉与日俱增, 甚至导致工厂被迫停产。一般来说, VOCs 的排放总量与地区的工业发展呈现出一定的正相关性, 2008 年我国的年排放总值约为 2000 万
40 吨。其中, 包括浙江省在内在有 7 个省的年排放总量超过 100 万吨。在未来的几年, 伴随 GDP 增长将保持在 8% - 9% 的高水平, 对有机化工产品的需求将更迫切, VOCs 造成的污染也必将更为严重。图 1 是现有法规条件下, 我国有机气体排放总量变化趋势^[1]。由图可以看出, 到 2020 年 VOCs 总排放量将超过 2500 万吨。有机废气的污染问题已经日益突出, 将成为

基金项目: 国家自然科学基金(20776131) 和高校博士点基金 (20070335194)

作者简介: 章旭明, 1981 年 9 月 18 日出生, 博士研究生, 研究方向为低温等离子体在环保中的应用

通信联系人: 闫克平, 1962 年 3 月出生, 教授、博导, 研究方向为低温等离子体的应用. E-mail: icespxi@zju.edu.cn

45 制约我国社会经济发展的重要环境因素。目前, VOCs 常规去除技术存在较多问题, 如工艺
资源消耗量即治理费用过高(设备投资费用通常在 6-65 元(m^3/h), 运行费用通常在 20-70 元
(m^3/h)), 且浓度越低成本越高[3]; 各种处理技术在应对不同废气时有局限性。因此, 开发
新型的 VOCs 治理技术势在必行。低温等离子体技术被认为是少数可实现复合物同时控制的
实用工艺之一, 其相对于传统技术的优势主要在于[4]: (1) 降解效果好、运行成本低, 自
50 动化程度高, 工艺简单; (2) 对气体污染物的适应性强, 易于与传统工艺结合; (3) 由于
低温等离子体在形成过程中只加速电子, 故能量利用率高, 可节约我国有限的用电资源。过
去 20 年的实验研究已经使低温等离子体净化气态污染物的能量效率提高了 7-8 倍。

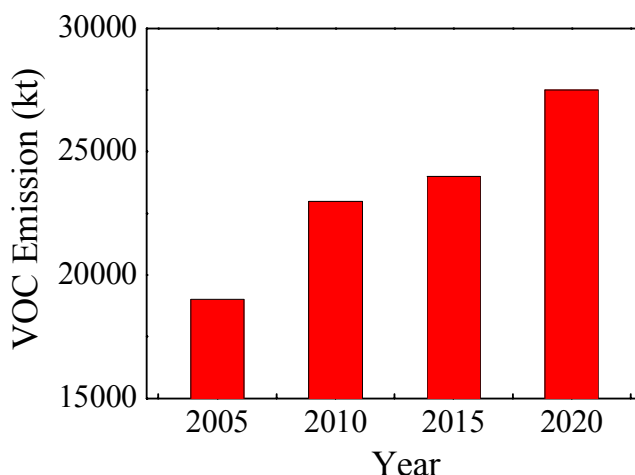


图 1 挥发性有机气体排放趋势
Figure 1. VOCs emission

55

回顾过去 20 年来的工作, 我们可将主要的研究内容分以下几大类: 等离子体时空特性
[5]; 高能电子和自由基的时空特性[6,7]; 等离子体化学反应动力学[8]; 电源和反应器等关键
设备的研制[9,10]; 等离子体同传统工艺过程的集成[11,12]; 利用添加剂、吸收剂等对过
程及副产物进行控制[13-16]; 同催化剂并用对过程及副产物进行控制[17,18]; 复合污染物同
60 时去除[10,13]。近年来, 各国学者的研究工作主要集中在如下问题: 进一步开发等离子体发
生和处理工艺以提高能量效率以及控制反应过程中产生的二次污染物。

1 等离子体发生工艺

采用电晕、沿面、滑动弧、介质阻挡或填充床等放电模式可使等离子体区域达到一定的
能量状态, 有效产生用以净化 VOCs 的高能电子和多种活性物质。典型的用于产生上述放电
65 模式的激励方式主要包括交流、直流、脉冲、交直流叠加以及直流与脉冲叠加电源。放电模
式与电源波形决定了等离子体时空分布

目前较有前景的供电方式主要有: 交直流叠加(AC/DC)和纳秒级短脉冲两种形式。交
直流叠加电源一般采用芒刺型的电极, 其工作原理是在高压放电电极施加高于起晕电压的正直
流高压的同时叠加高频交流, 正高压和高频交流同时会在芒刺尖端产生随机的流光等离子
70 体, 因此交直流叠加的供电方式也称为随机式。它的主要特点可以概括为: 对电极放电的不
均匀性敏感度较低; 投资费用低, 便于工业化应用; 使正高压产生的辉光放电转变为流光放
电, 大大提高气体净化的能效。纳秒级短脉冲的供电形式则一般采用线筒式反应器。利用超
高速相机可以观察到电晕线上的流光是同时产生的并向低压极运动, 因此纳秒级短脉冲的供
电方式也称为同步式。研究认为, 极短的上升时间($<50\text{ns}$)和脉宽($<150\text{ns}$)有助于增加自由

75 基的产量，继而提高废气的净化效率。短脉冲的产生取决于开关的性能，在等离子净化废气中较多采用的有火花开关、磁压缩开关以及固体开关。传统的火花开关缺点也显而易见：较低且不稳定的重复频率、有限的使用寿命、较大的电弧电感等。由闫克平开发的新型火花开关已在平均输出功率为 20KW 的高电压、短脉冲电源中成功应用。其结构紧凑、电极面积大，采用 LCR 作为触发电路，并在触发电极及两个主电极间通强气流。此开关具有重复频率高（~1000Hz）且稳定，上升时间(<20ns)及脉宽(<250ns)短，使用寿命(>10¹⁰脉冲)长等优点[19]。图 2 为新建的多孔隙火花开关。它的特点可概括为：最后一个空隙在导通前处于非常大的过压状态，因此其导通时间极短；开关导通时电极间的放电是多通道的，保证大电流的通过，同时也延长了开关的使用寿命；开关的恢复时间短，可在较高的重复频率下工作。

85 电源与反应器的匹配与否是另一影响能量效率的重要因素。合理的匹配不仅可以大大提高能量从电源到负载的传输效率，还可以延长开关的使用寿命(防止能量在开关中的震荡)。由于等离子反应器在放电前、放电时和放电后具有不同的电路特性，所以在匹配时有相当的难度。在放电前，反应器表现出电容特性；使反应器达到起晕电压的时间、电源的输出阻抗、



图 2. 多间隙火花开关

Figure 2. Multi-gap spark gap switch

90 反应器的电容三者关系符合 $\tau=2ZC$ 时能量传输效率最高。在放电时，反应器表现出电阻特性，电源的输出阻抗与反应器的特性阻抗相等时才能达到最高的传输效率。另外，对于一个已经设计完成的反应器，随着峰值电压的增高可以使反应器特性阻抗与电源输出阻抗达到自行匹配；对于峰值电压限定的电源，则需通过改变反应器大小使阻抗匹配[20]。过多年努力，埃因霍温理工大学（TU/E）的研究者采用基于 TLT（Transmission-Line-Transformer)的高功率火花开关，使电源与反应器之间的能量传输效率达到 90%以上[21,22]。

2 等离子体处理工艺

100 在等离子处理工艺中反应器与电极的选择是至关重要的。电极的材料与形状均会对等离子区域的能量密度产生影响。例如采用正高压直流放电时，选用针板式与线筒式反应器时可产生不同的放电模式，对废气的降解效果有很大影响。图 3 所示为辉光放电与流光放电降解苯乙烯比较。此外提高反应器内风速（通常>50m/s）可有效提高击穿电压，显著增加能量密度[23]。

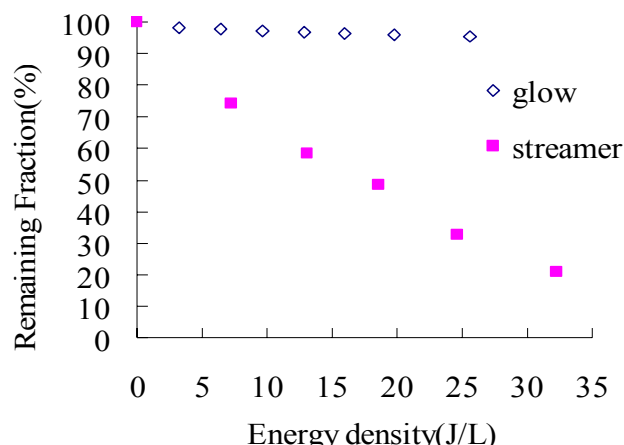


图 3. 苯乙烯在不同放电模式下的降解
Figure 3. Styrene removal in different corona mode

105

110

115

120

125

130

典型的等离子处理有机废气工艺有无声放电 (SDR)、脉冲电晕放电 (PCR)、和填充床式反应器 (FPR)。其中无声放电包括了介质阻挡放电和表面放电。以上几种工艺均靠放电区域产生的高能量密度的流光等离子体治理废气。早期的研究认为[24,25], 在相同实验条件下这四种工艺在处理废气时具有几乎相同的能效。近年来, Kim 和 Futamura 等提出了不同的观点[26,27]。Futamura 认为处理气体的类型决定了这几种放电方式的效率; Kim 的研究认为在干燥条件下处理苯时, 三种工艺的效率依次为: FPR>PCR≈SDR, 在有水蒸气的情况下则为 PCR≈SDR >FPR, 在 Kim 的报道中未见使用脉冲电晕放电时电源的具体参数 (包括脉冲上升时间、功率、脉宽等)。填充床反应器可在填充的介质 (介电通常为 10000) 与介质的接触面间产生很大的场强, 然而这种反应器的主要缺点是压降很大, 目前还难以适应大风量工业有机废气的治理要求。高功率脉冲电晕工艺的主要优势为: 可在反应器内建立起较大的等离子区域。等离子流光的速度一般约为 $2 \times 10^6 \text{ m/s}$, 而其存在时间为几十纳秒, 在保证反应器内流光横贯高低压极的情况下, 单个反应器的直径通常可达 30-35cm, 可有效降低气体的压降。如需提高处理风量, 则可采用多个反应器并联的方式, 对工业废气的风量具有较强的适应性。然而, 高功率、短脉冲电源的一次成本通常比较大。图 4 所示为一种新型的等离子处理有机废气工艺。本工艺首先使有机废气在等离子反应器中(Reactor A)中以低能量密度进行处理, 通常情况, 有机废气在低能量密度下生成气溶胶等固、液相产物 (详见产物研究部分), 接着在双极性电晕荷电凝并器(Reactor B)中增大气溶胶粒径, 最后在多电场静电除尘器 (Reactor C) 中实现气溶胶的分级收集。此新型工艺的实现可降低有机废气在处理过程中的能耗。

以上几种等离子工艺也可与传统处理方法或催化剂结合。如选择合适的催化剂不仅可以降低目标反应物的活化能还能够抑制臭氧的产生, 降低反应过程中的能耗。由于催化剂具有较强的选择性, 在使用时需“对症下药”。另外, 如何使催化剂与等离子处理工艺协同工作, 以期达到最高功效也非常重要。又如对于甲苯的治理, 采用等离子结合碱液吸收可把苯环上的甲基氧化为羧基, 定向地将甲苯转化成为可回收利用的产物苯甲酸, 有效节省反应中的能耗 [28]。

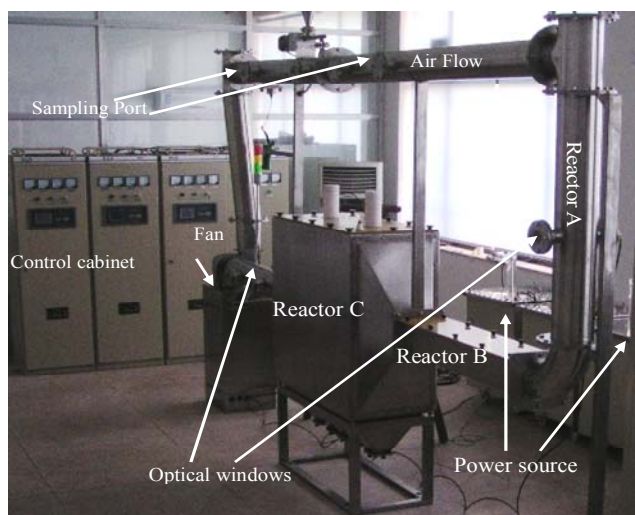


图 4. 1000m³/h 闭循环实验台

Figure 4. 1000m³/h close loop flow system

135

3 等离子净化的化学过程

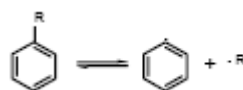
有机废气在等离子环境中的主要化学反应过程如图 1 所示，可分为两个步骤。首先是雪崩过程产生的电子与背景气 M 及目标污染物分子 X 之间的碰撞，碰撞的直接结果是生成大量的自由基、电子和离子等活性物质，时域一般在 10⁻¹²S-10⁻⁹S。此过程的效率在微观上由电子的能量决定，在宏观上则是由所选电源、电极和处理工艺综合决定。接着是自由基之间、自由基与目标污染分子、目标污染物分子碎片之间的相互反应，时域一般在 10⁻⁶S-10⁻³S。提高这一过程的效率可采用化学工程中常用的方法，如添加催化剂，对反应过程加热等。

140

等离子系统中有机气体具体的降解路径取决于被处理气体的类型和系统的能量密度。例如，CCl₄ 等少数卤代烃的主要反应过程是图 1 中②⑥或②⑧[29]。对于多数有机气体，如芳香烃类、醇类、醚类、醛类等在高温、高能量密度和低浓度时，以抽氢和氧化反应为主，如图 1 中的①③⑥过程；在低温、低能量密度和高浓度时则以②⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭为主，此时化学过程相当复杂且难以控制，并伴随有机聚合反应出现，详见产物研究进展部分。

145

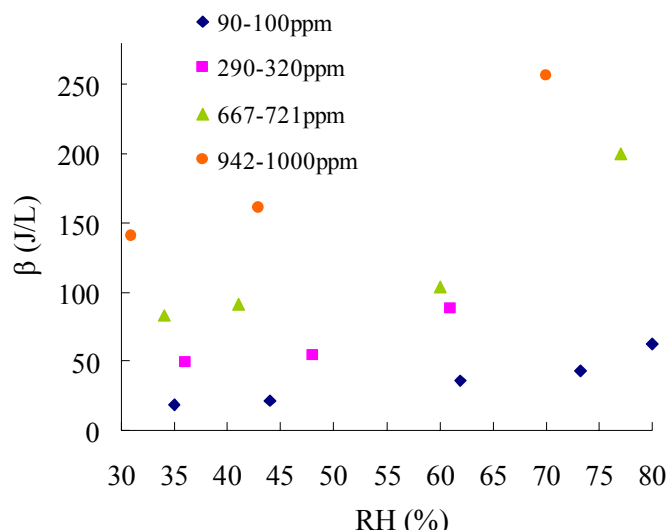
影响等离子化学反应过程活性物质效率的主要因素有：高能电子和自由基在有机链式反



应中的消耗、某些可能存在的可逆反应：、高能电子被电负性气体吸附和自由基在图 1 中④、⑤过程的消耗。例如高浓度的水蒸气不仅会吸附电子，还会消耗活性自由基，对有机废气的降解产生负面影响。图 5 所示为初始浓度 100ppm-1000ppm，相对湿度 30%-80%时苯乙烯降解时能量常数 β 与相对湿度间的关系（β 值越高则能量效率越低）。

150

如图所示，苯乙烯降解过程中的能量效率随着相对湿度、初始浓度的增加而降低。因此高效的等离子系统不仅需要合适的电源及处理工艺，背景气体的组分和浓度也十分重要。

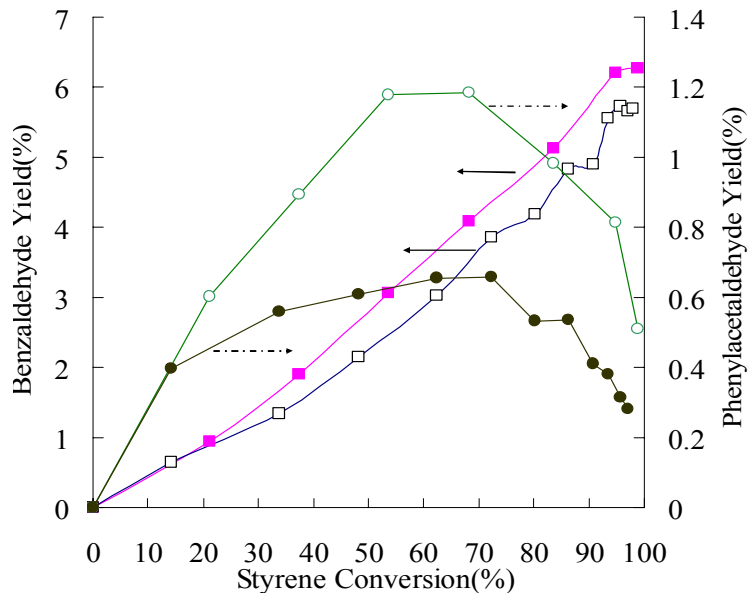


155

图 5. 不同初始浓度及相对湿度条件下 β 值的变化
Figure 5. Effects of relative humidity on energy constant β value

4 低温等离子体处理 VOCs 过程的产物

160 如上所述，在高温、高能量密度下处理低浓度有机气体时，等离子反应中的氧化过程起主导作用，生成的产物以 CO_2 、水或其它低分子化合物为主；在低温、低能量密度下处理高浓度有机气体时，电子更倾向于直接攻击有机分子，在此过程中产生的 HC 中间产物的活性位相互结合进行链式反应，生成固、液态产物（气溶胶或高分子聚合膜）。在应用中多数情况则介于两者之间。图 6 定量分析了 $1000\text{m}^3/\text{h}$ 闭循环实验台中降解初始浓度为 $667\text{ppm}-721\text{ppm}$ 的苯乙烯时得到的两种主要气相副产物。



165

图 6. 苯乙烯降解过程中苯甲酸及苯乙酸的收率

Figure 6. By-products formation

□苯甲酸(RH=60%) ■苯甲酸 (RH=33%) ○苯乙醛(RH=33%) ●苯乙醛(RH=60%)

170

由图可知当相对湿度为 33%、苯乙烯的去除率为 100%时，苯甲酸和苯乙醛的收率仅约 6.2%和 0.5%。产物中除了部分进一步氧化成二氧化碳和水以外，相当一部分转化成了高分子固相产物（气溶胶、有机聚合膜）。图 7 所示为等离子反应器低压极板上收集到的淡黄色固相产物。

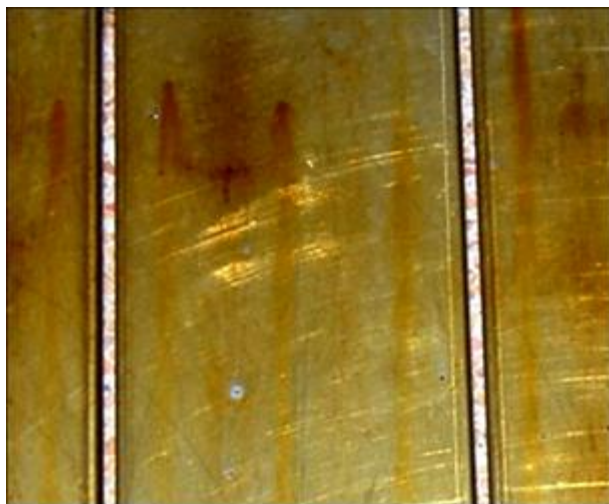


图 7. 苯乙烯降解过程固相产物

Figure 7. Non-volatile deposits on ground plates

175

近年来，等离子降解有机废气的产物研究多集中在气相副产物。其中仅 Parissi[24]，Kim[26]，Yamamoto[30]等测量了气溶胶的产生数量和粒径分布，发现其粒径普遍小于 1 μm 。Kim 等比较了几种等离子处理工艺降解苯时的产物分配及气溶胶粒径分布，实验结果显示：在相同条件下，脉冲电晕放电产生的碳平衡比例要低于表面放电、介质阻挡放电以及填充床反应器，而其在此过程中生成的气溶胶数量则多于另外几种处理工艺；气溶胶在各级的数量分布与所加能量之间的关系是先增加后减小的趋势。然而，目前的研究仅限于现象的描述，尚未开展气溶胶形成过程的实验研究。

180

针对等离子过程产生的气、固相二次污染物，解决的方法主要有：等离子体与催化剂或传统治理工艺结合。图 4 所示的新型工艺为二次污染控制开辟一条新途径。此工艺的实现可有效收集有机废气降解过程中产生的气溶胶，目前相关研究正在进行中。

185

5 展望

等离子技术处理工业有机废气是非常有前景的。目前，风量在 1000 m^3/h 的室内空气净化处理装置已经成功应用于商业项目，在医院病房、医疗储藏室、办公楼、宾馆等得到过很好的应用，该类技术产品已在世界各地推广。工业级有机废气的净化系统需要与之相适应的电源和等离子体工艺。因此，仍需进一步围绕能量效率和二次污染两个核心问题，对高功率电源、电源与反应器的匹配、等离子结合催化技术以及新型等离子处理工艺进行深入研究。相信在不久的将来，等离子技术会成为一种常规的治理有机废气的方法。

190

195

致谢

感谢国家自然科学基金(20776131)和博士点基金 (20070335194)对本课题的资助。

[参考文献] (References)

200

[1] 闫克平. 气体放电在气体净化领域的应用[J]. 科技导报, 2007, 25 (18) : 69-74.

Yan Keping. Application of Corona- Induced Non- thermal Plasma in Gas Cleaning [J]. Science & Technology Review, 2007, 5: 69-74.

[2] Yan K, Hui H X, Cui M, Miao J S. Corona Induced Non-thermal Plasmas: Fundamental Study and Industrial Applications[J]. J. Electrostatics, 1998, 44: 17-39

- 205 [3] Kim H H. Nonthermal Plasma Processing for Air-pollution Control: A Historical Review, Current Issues, and Future Prospects [J]. *Plasma Process. Polym.*, 2004, 1: 91-110.
- [4] Mizuno A. Industrial Application of Atmospheric Non-thermal Plasma in Environmental Remediation [J]. *Plasma phys. Control Fusion*, 2007, 49: A1-A5.
- 210 [5] A. J. M. Pemen, L. Devi, K. Yan, E. J. M. van Heesch, R. Kerst, K. J. Ptasinski, S. A. Nair. Plasma-catalytical removal of tars from fuel gas obtained by biomass gasification. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 2007, 10(1):116-120
- [6] K. Yan, R. Li, T. Zhua, H. Zhang, X. Hub, X. Jiang, H. Liang, R. Qiu, Y. Wang. A semi-wet technological process for flue gas desulfurization by corona discharges at an industrial scale. *Chemical Engineering Journal*, 2006, 116: 139-147
- 215 [7] G.J.J. Winands, K. Yan, A.J.M. Pemen, S.A. Nair, Z. Liu, E.J.M. van Heesch. An industrial streamer corona plasma system for gas cleaning. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2006, 34, 2426-2433
- [8] G.J.J. Winands, Z. Liu, A.J.M. Pemen, E.J.M. van Heesch K. Yan (闫克平). Temporal development and chemical efficiency of positive streamers in a large scale wire-plate reactor as a function of voltage waveform parameters. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39, 3010-3017
- 220 [9] Z. Liu, K. Yan, G. J. J. Winands, A. J. M. Pemen, E. J. M. Van Heesch, D.B. Pawelek. Multiple-gap spark switch. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77, 073501
- [10] Z. Liu, K. Yan, G. J. J. Winands, E.J.M. van Heesch, A. J. M. Pemen. Novel multiple-switch Blumlein generator. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77, 033502
- 225 [11] S. A. Nair, K. Yan, A. Safitri, A.J.M. Pemen, E.J.M. van Heesch, K.J. Ptasinski, A.A.H. Drinkenburg. Streamer corona plasma for fuel gas cleaning – comparison of energization techniques. *Journal of Electrostatics*, 2005, 63(12): 1105-1114
- [12] G.J.J. Winands, K. Yan, S. A. Nair, A.J.M. Pemen, E.J.M. van Heesch. Evaluation of corona plasma techniques for industrial applications: HPPS and DC/AC systems. *Plasma Processes and Polymers*, 2005, 2, 232-237
- 230 [13] S. A. Nair, K. Yan, A.J.M. Pemen, E.J.M. van Heesch, K.J. Ptasinski, A.A.H. Drinkenburg. Tar removal from biomass derived fuel gas by pulsed corona discharges: chemical kinetic study II. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, 44: 1734-1741
- [14] G. J. J. Winands, Z. Liu, A. J. M. Pemen, E. J. M. van Heesch, K. Yan. Long lifetime, triggered, spark-gap switch for repetitive pulsed power applications. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76, 85-107
- 235 [15] Z. Liu, K. Yan, A. J. M. Pemen, G. J. J. Winands, E. J. M. Van Heesch. Synchronization of multiple spark-gap switches by a transmission line transformer. *Rev. Sci. Instrum.* 2005, 76, 113507
- [16] K. Yan, G. J.J. Winands, S.A. Nair, E.J.M. van Heesch, A.J.M. Pemen, I. de Jong. Evaluation of pulsed power sources for plasma generation. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 2004, 7, 116-122
- 240 [17] A.J.M. Pemen, S.A. Nair, K. Yan, E.J.M. van Heesch, K.J. Ptasinski, A.A.H. Drinkenburg. High temperature pulsed corona processing of fuel gas. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 2004, 7, 123-127
- [18] E.J.M. van Heesch, K. Yan, A.J.M. Pemen, S.A. Nair, G.J.J. Winands, I de Jong. Matching repetitive pulsed power to industrial processes. *IEEE Tran. on Fundamentals and Materials*, 2004, 124, 607-612
- 245 [19] Liu Z. Multiple-Switch Pulsed Power Generation Based on a Transmission Line Transformer. Ph.D. thesis, Eindhoven university of technology, 2008
- [20] Yan K. Corona Plasma Generation. Ph.D. thesis, Eindhoven University of technology, 2001
- 245 [21] Yan K, Heesch E J M, Pemen A J M, Huijbrechts P A H J. From Chemical Kinetics to Streamer Corona Reactor and Voltage Pulse Generator[J]. *Plasma Chem. Plasma Process*, 2001, 21; 107-137.
- [22] 刘振, Heesch E J M, Pemen A J M, Winands G J J, 闫克平. 新型多开关脉冲功率技术[J]. *科技导报*, 2008, 26: 76-83.
- 250 Liu Z, Heesch E J M, Pemen A J M, Winands G J J, Yan K. Novel Multiple-Switch Pulsed Power Technologies[J]. *Science & Technology Review*, 2008, 26: 76-83.
- [23] Hu X, Jiang X, Yan K, Li R. "Streamer Corona Plasma and NO Removal", in *Electrostatic Precipitation*, edited by Keping Yan, Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-89250-2, Oct 2008, 653-656.
- 255 [24] Van Veldhuizen E M. *Electrical Discharges for Environmental Purposes: Fundamental and Applications*. Nova Science Publisher, Inc., New York 11743, 2000.
- [25] Penetrante B M, Hsiao M C, Merritt B T, Vogtlh G E, et al. Comparison of Electrical Discharge Techniques for Non-thermal Plasma Processing of NO in N₂[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci*, 1995, 23: 679-687.
- 260 [26] Kim H H, Kobara H, Ogata A, Futamura S. Comparative Assessment of Different Nonthermal Plasma Reactors on Energy Efficiency and Aerosol Formation from the Decomposition of Gas-phase Benzene[J]. *IEEE Trans. Ind. Appl*, 2005, 41: 206-214.
- [27] Futamura S, Einaga H, Zhang A H. Comparison of Reactor Performance in the Nonthermal Plasma Chemical Processing of Hazardous Air Pollutants [J]. *IEEE Trans. Ind. Appl*, 2001, 37: 978-985.
- 265 [28] 黄立维, 林鑫海, 顾巧浓, 等. 电晕-吸收法治理甲苯废气实验研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26: 17-21.
- Huang L W, Lin X H, Gu Q N, et al. Experimental Study on the Destruction of Toluene by Pulsed Corona Combined with Absorption [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26: 17-21.
- [29] Penetrantey B M, Hsiao M C, Bardsley J N, et al. Identification of Mechanisms for Decomposition of Air Pollutants by Non-thermal Plasma Processing [J]. *Plasma Sources Sci. Technol*, 1997, 6: 251-259.
- 265 [30] Yamamoto T, Jang B W L. Aerosol Generation and Decomposition of CFC-113 by the Ferroelectric Plasma Reactor [J]. *IEEE Trans. Ind. Appl*, 1999, 35: 736-742.