

基于光离子化的VOCs在线检测系统

刘瑛,王恩红*,李文,郭淇,周豪

(北方工业大学 机械与材料工程学院,北京 100144)

摘要:针对目前挥发性有机物(VOCs)在线检测系统存在系统响应速度慢、灵敏度低、检测误差大等不足,设计了一种基于光离子化的VOCs在线检测系统。通过采用介质阻挡放电技术,设计了新型光腔和电离室结构,并基于光离子化原理,实现了对VOCs的快速检测。实验结果表明:2台样机的响应时间均不超过6 s,最大示值误差为2.913 %FS,短期浓度最大偏差为0.352%,长期浓度最大偏差为0.772%。

关键词:光离子化;光腔;电离室;在线检测;挥发性有机物

中图分类号:TN253 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)01-0089-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.01.015

VOCs online detection system based on photoionization

LIU Ying, WANG Enhong*, LI Wen, GUO Qi, ZHOU Hao

(School of Mechanical and Materials Engineering, Northern Polytechnical University, Beijing 100144, China)

Abstract: To address the current shortcomings of volatile organic compounds (VOCs) online detection systems, such as slow response speed, low sensitivity, and significant detection errors, a VOCs online detection system based on photoionization technology was designed. By employing dielectric barrier discharge technology, a new optical cavity and ionization chamber structure were developed, enabling rapid VOCs detection based on the photoionization principle. Experimental results demonstrated that both prototypes achieved a response time of no more than 6 seconds, with a maximum indication error of 2.913 %FS. The maximum short-term concentration deviation was 0.352%, and the maximum long-term concentration deviation was 0.772%.

Key words: photoionization, optical cavity, ionization chamber, online detection, volatile organic compound

0 引言

随着工业化的快速发展,大量能源被消耗并产生高污染物质。这些高污染物释放了大量的挥发性有机物(VOCs)及其它有毒有害气体^[1-2],长时间摄入会有致癌、致畸、致突变的危害^[3-4]。开展并加强VOCs在线检测技术研究,有助于推进我国大气环境保护工作。

目前,光离子化检测方法已取得了一定的发展和

突破^[5-8],并在各种应用领域得到了应用。随着气体检测需求的不断增加,光离子化检测方法也在不断改进和创新。2021年,戈燕红等人^[9]以吹扫捕集-气相色谱技术为核心原理,研发出一套水中VOCs在线监测系统。2023年,于淇^[10]提出基于金属有机骨架材料(MOF)衍生氧化镍基VOC气体传感器。目前,国内比例-积分-微分(PID)技术已取得较快发展,但在性能提升方面仍存在改进空间,如响应时间和灵敏度等关键指标有待优化,电离室结构也需进一步完善。为此,本文设计一种基于光离子化的VOCs在线检测系统。

1 系统设计原理与实现

1.1 光离子化有机原理

PID技术通过紫外光源激发VOCs分子实现快速检测^[11-13]。当特定波长的紫外光照射待测气体时,挥发性有机物(M)吸收足够电离能后发生电子跃迁,生成正离子(M⁺)和自由电子(e⁻)。在电场作用下,这些

收稿日期:2024-06-11。

基金项目:国家自然科学基金项目(51205005)资助。

作者简介:刘瑛(1970—),女,陕西省华阴市人,硕士研究生,副教授,1995年于中国农业大学获得硕士学位,主要从事机器人相关研究。参与翻译的《数控编程手册》《Fanuc数控系统用户宏程序与编程技巧》分别于2007年1月获得第九届中国石油和化学工业优秀科技图书二等奖;2009年1月获第十届中国石油和化学工业优秀科技图书奖一等奖。

*通信作者:王恩红(1997—),男,硕士,主要研究方向为智能传感器和机器人。



带电粒子定向迁移形成电流信号,经检测电路滤波、放大后,其强度与 VOCs 浓度呈正相关。

1.2 系统硬件设计

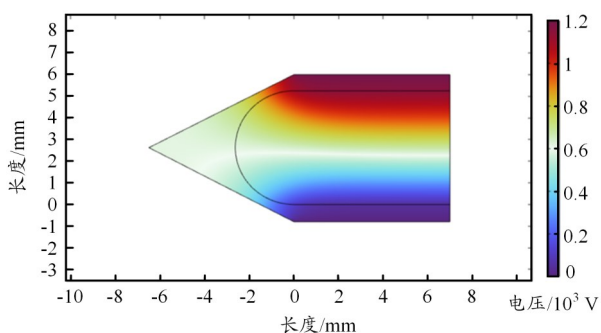
1.2.1 光腔设计

光腔是光离子化检测的核心部件,其功能是通过介质阻挡放电 (DBD) 技术^[14] 激发紫外光^[15-17], 实现 VOCs 的高效电离。本文设计的光腔实物图如图 1 所示,其关键参数如下:紫外光源选用 10.6 eV 的真空紫外灯,窗口材料采用氟化镁 (MgF_2),灯体材料选用玻璃,填充气体为氦气,排气真空度小于 5×10^{-4} Pa,窗口与灯体通过玻璃焊料密封,避免胶粘剂挥发污染。

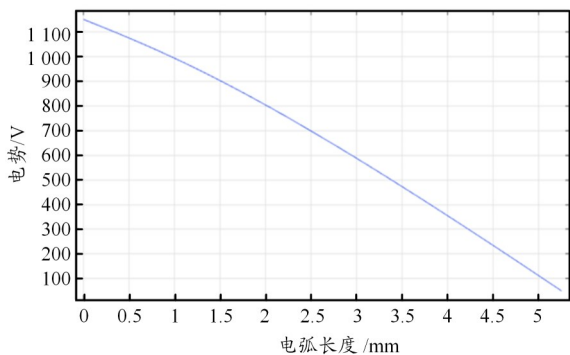


图 1 光腔实物图

本文基于 COMSOL 软件对 1 200 V 交流电激发下电势、电子密度和正离子密度的分布特性进行仿真分析,结果如图 2~图 4 所示。在时刻 $t=6.5 \times 10^{-6}$ s,放电电压达到峰值,电势从阳极到阴极逐渐减小,电势在阳极与阴极之间接近线性趋势下降,且最高电势小于电源输出电压。这是由于持续放电过程中,等离子体内部发生剧烈碰撞并产生大量电子;这些电子在电场

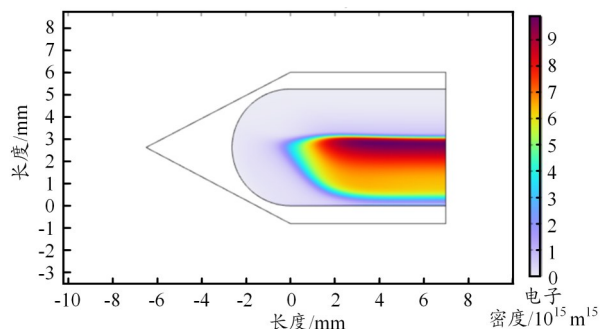


(a) 二维截面分布图

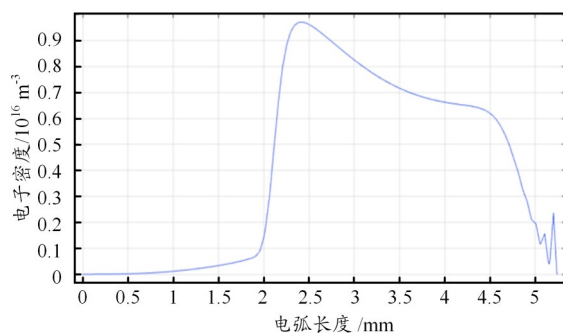


(b) 一维轴向分布图

图 2 电势分布图

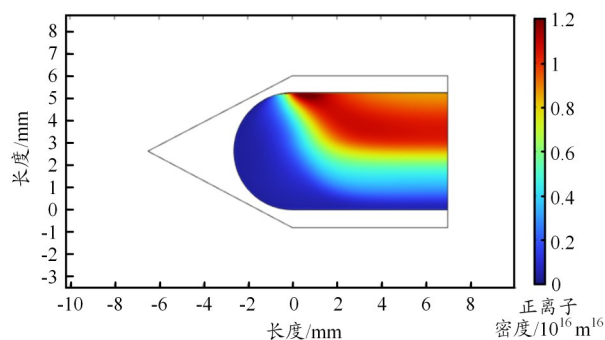


(a) 二维截面分布图

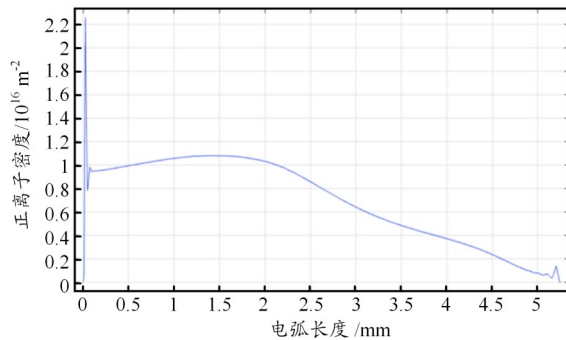


(b) 一维轴向分布图

图 3 电子密度分布图



(a) 二维截面分布图



(b) 一维轴向分布图

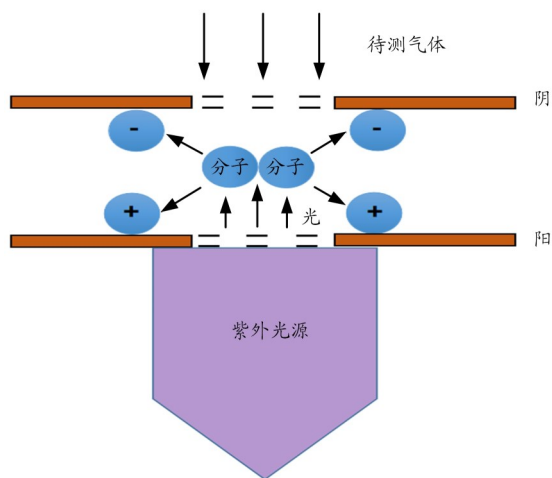
图 4 正离子密度分布图

力作用下向电势较高的阴极区域迁移,导致阳极区域的电子密度趋近于零。由图4可知,靠近阴极区域的正离子密度极低,而随着电势向中间区域降低,正离子密度逐渐增加,这是因为带正电的离子在电场中通常由高电势向低电势方向运动。

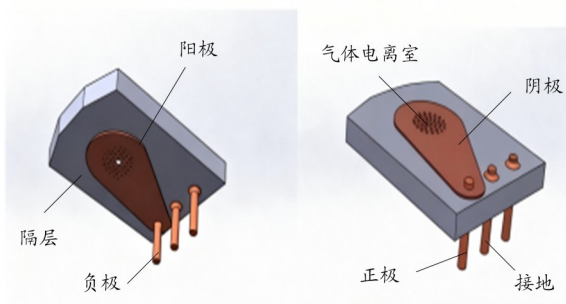
通过对1200 V放电电压峰值时刻的仿真结果分析可知,等离子体放电腔体内的电势沿放电电极纵向呈现平稳下降的分布特征。在此过程中,高能粒子碰撞电离产生的电子在电场力作用下向阳极区域迁移,而正离子则向阴极方向运动,形成明显的电荷分离现象。这种符合理论预期的载流子迁移行为,有效验证了光腔模型的合理性及其在VOCs电离检测中的适用性。

1.2.2 电离室设计

本文对系统中电离室结构进行设计,原理图和结构图如图5所示。该结构的电离室中电极平行于紫外光源窗口表面,同时为了使紫外光能够透过电极照射进电离室腔体内部,新结构的电离室电极采用的是网



(a) 原理图



(b) 结构图

图5 电离室结构设计图

孔结构。电离室中待测气体平行于紫外光发射方向,在有限的结构中充分提升对紫外光的利用效率。这种创新的结构设计既保留了轴向电离室对光程的高效利用,又显著优化了空间结构,为VOCs检测设备的微型化和性能提升提供了有效的解决方案。

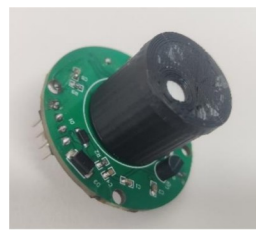
1.2.3 光离子传感器结构设计

本文设计的光离子传感器的结构示意图和实物图如图6所示。该传感器由电路板、紫外光源、顶盖、防水膜、垫片、接线柱和外壳等零部件构成。顶盖、垫片和外壳的加工方式采用3D打印。本文搭建的实验平台如图7所示。通过标气瓶对光离子传感器进行校准。

1.2.4 VOCs在线检测系统设计



(a) 结构图



(b) 实物图

图6 光离子传感器结构图和实物图



图7 传感器实验平台

本文提出的VOCs在线检测系统由进气/预处理单元、气体检测单元、实时显示单元和数据上传单元构成,其工作原理及实物如图8所示。系统具体工作流程如下:首先,待测空气在气泵驱动下,依次通过过滤器(净化杂质)、流量计(监测流量)完成进气与预处理;该流程由继电器(控制模块)调控,确保气体稳定输送至检测环节。随后,预处理后的气体进入检测室,通过光离子化(PID)传感器(含电离室)实现浓度检测;检测后的气体排出系统。此环节依托“光离子

刘瑛,王恩红,李文,等: 基于光离子化的 VOCs 在线检测系统

化”技术完成气体浓度的传感分析。检测数据经数据采集、数据处理后,通过 TPC7032Kx 触摸显示屏(显示模块)实现现场实时显示,直观呈现气体浓度信息。最后,系统配备数据传输单元(DTU)远程通信设备第4代移动通信(4G)模块,将处理后的数据通过4G通信远程传输至上位机(远程终端),支持数据的远程分析与存储。

2 实验结果分析

2.1 基础性能测试

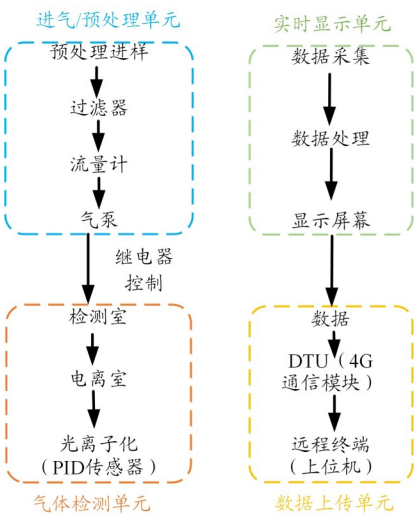
本文对光离子化传感器的响应时间和设备平行性进行了系统测试与分析。响应时间是评价 VOCs 在线检测系统实时性能的关键指标,而平行性测试则用于评估多台设备间检测结果的一致性。在测试中,2 台样机在正常工作状态下,分别于0、198、398 s这3个时间点依次通入0、10、20 ppm 标准浓度异丁烯气体。测试结果显示:2 台样机响应时间均未超过 6 s,满足技术性能要求。在整个实验过程中,最小示值误差为 0.001 %FS,最大示值误差为 2.913 %FS,平均最小示值误差为 0.688 %FS,平均最大示值误差为 1.259 %FS,均未超出误差范围。

通过分析 2 台样机在相同测试条件下的检测数据,计算得到系统平行性指标 P 值为 2.7%。该结果表明,不同设备间的测量差异控制在较低水平(<5%),满足多设备协同监测的技术要求。

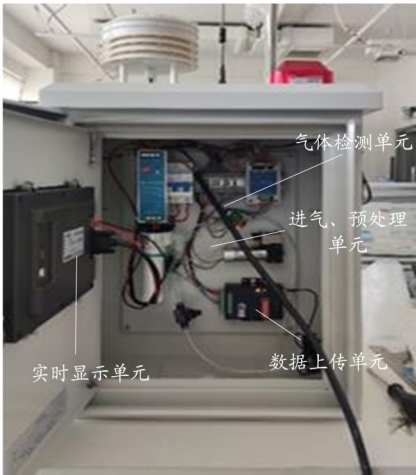
2.2 稳定性测试

本文对 VOCs 在线检测系统进行稳定性测试。

首先,对系统的短期稳定性进行评估。测试方法为:系统连续运行测试 24 h,每小时交替通入 10 ppm 和 20 ppm 的标准异丁烯气体各 10 min,待读数稳定后记录检测值。据此共获得 24 组有效数据,如表 1 所示。基于表 1 的测试数据,对通入的 10 ppm 与 20 ppm 标准异丁烯气体的检测结果进行统计分析。



(a) 原理图



(b) 实物图

图 8 VOCs 在线检测系统

表 1 短期稳定性实验数据

标准浓度/ ppm	测量时段/h	检测浓度值/ ppm	标准浓度/ ppm	测量时段/h	检测浓度值/ ppm
10	1	10.002	20	1	20.019
	2	10.021		2	20.041
	3	10.078		3	19.989
	4	10.074		4	20.004
	5	10.078		5	20.021
	6	10.060		6	20.031
	7	10.055		7	20.002
	8	10.084		8	20.023
	9	10.029		9	20.029
	10	10.096		10	20.030
	11	9.997		11	20.038
	12	10.045		12	19.967
	13	10.025		13	20.002
	14	10.062		14	20.001
	15	10.003		15	20.056
	16	10.098		16	19.989
	17	10.011		17	20.007
	18	10.090		18	20.011
	19	10.082		19	19.940
	20	9.994		20	19.990
	21	10.092		21	20.002
	22	10.028		22	20.022
	23	10.108		23	19.998
	24	10.060		24	20.011

计算得到2组数据的浓度平均值分别为 $\bar{X}_1 = 10.053$ ppm与 $\bar{X}_2 = 20.009$ ppm,样本标准差分别为 $s_1 = 0.035$ 与 $s_2 = 0.024$ 。进一步计算其相对标准偏差(RSD)分别为 $S_1 = 0.352\%$ 与 $S_2 = 0.121\%$ 。该值远低于标准要求的阈值,表明系统短期稳定性良好。

然后,对系统的长期稳定性开展了为期7 d的连续测试。测试方法为:每日固定时间点通入10 ppm与20 ppm的标准异丁烯气体进行检测,对实验数据进行计算得到2组检测结果的浓度平均值分别为 $\bar{X}_3 = 10.049$ ppm与 $\bar{X}_4 = 20.131$ ppm,样本标准偏差分别为 $s_3 = 0.078$ 与 $s_4 = 0.114$,据此计算出的RSD分别为 $s_3 = 0.772\%$ 与 $s_4 = 0.565\%$ 。

标准浓度偏差符合长期稳定性技术参数要求。实测结果与技术要求^[18-19]如表2所示。可以看出,实测结果均符合技术参数需求。

表2 实测结果与技术要求

序号	性能指标	技术参数要求	实测结果
1	响应时间/s	≤ 15	≤ 6
2	示值误差/%	± 3	1.259
3	平行性/%	≤ 5	2.7
4	短期稳定(24 h)/%	—	0.352
5	长期稳定(7 d)/%	—	0.772

3 结束语

本文面向VOCs在线检测的应用需求,基于光离子化传感技术,设计并研制了VOCs在线检测系统。系统以10.6 eV真空紫外灯为核心激发源,设计了高效光腔结构,优化了光子传输路径。核心部件电离室采用了新型网孔电极构型,使其平行于紫外窗口表面,在紧凑空间内最大化提升了紫外光利用率,增强了电离效率。实验验证表明,2台样机响应时间均不超过6 s,示值误差控制在0.001~2.913 %FS内,短期与长期的RSD分别高达0.352%与0.772%。

本研究为复杂环境下的VOCs精准、快速检测提供了一种强有力的解决方案,具有重大的实用价值和推广潜力。

参考文献:

- [1] 陈天舒. 能源开采和利用过程的挥发性有机物排放对大气光化学的影响[D]. 济南:山东大学,2024.
- [2] 王可鑫. 煤化工行业及污水处理挥发性有机物污染特征及影响研究[D]. 武汉:长江大学,2023.
- [3] 房建. 大气环境中挥发性有机物废气的环境监测及治理技术研究[J]. 皮革制作与环保科技,2023,4(24):59-61.
- [4] 梁小明,陈来国,沈国锋,等. 中国生活源挥发性有机物排放清单[J]. 环境科学,2021,42(11):5162-5168.
- [5] 宋婷. 环境空气和固定污染源中挥发性有机物监测方法探讨[J]. 环境与发展,2018,30(10):125-126.
- [6] 杨红云,许康,景晨. 便携式VOCs检测设备技术现状分析[J]. 分析仪器,2021(6):105-108.
- [7] 张颢,魏庆农,张伟,等. 光离子化技术发展综述[J]. 现代科学仪器,2007(2):8-15.
- [8] 殷亚飞,梁庭,牛坤旺,等. 便携式光离子化有害气体检测仪的设计[J]. 自动化仪表,2011,32(4):74-76.
- [9] 戈燕红,郭隽虹. 水中挥发性有机物在线监测系统的研发[J]. 化工管理,2021(10):51-58.
- [10] 于淇. MOF衍生氧化镍基VOC气体传感器研究[D]. 长春:吉林大学,2023.
- [11] 孙万启,张勇,方双喜. 真空紫外单光子电离质谱技术的研究进展及其在挥发性有机物在线分析中的应用[J]. 分析化学,2019,47(7):976-984.
- [12] 刘增源. 基于光离子化检测器的挥发性有机物监测方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.
- [13] 赵彤. 光离子化法检测TVOC的研究[J]. 环境科学与管理,2018,43(6):141-144.
- [14] 李持滨. 探究PID光离子化学气体分析仪[J]. 当代化工研究,2017(2):88-89.
- [15] 许冠捷. 便携式光离子化VOCs检测器的研究与实现[D]. 重庆:重庆邮电大学,2021.
- [16] 梁庭,王凯,李颖,等. 多量程紫外光离子化气体传感器的设计[J]. 制造业自动化,2013,35(13):46-48.
- [17] Niu K W, Liang T, Yang F, et al. Study of high sensitivity sensor based on the principle of photoionization[J]. Key Engineering Materials, 2012,1663(503-503): 188-193.
- [18] 北京鉴衡认证中心. 气体检测仪通用检测方法:BJJL-ZYC-E019[S]. 北京:北京鉴衡认证中心,[出版年不详].
- [19] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会. 作业场所环境气体检测报警仪通用技术要求:GB 12358-2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.