

中文引用格式:郝凤龙,张庆胜,姜玲玲,等. 基于FQ和IMS的痕量爆炸物探测分析[J]. 中国安全科学学报,2024,34(11):179-184.

英文引用格式:HAO Fenglong, ZHANG Qingsheng, JIANG Lingling, et al. Trace explosive detection analysis based on FQ and IMS[J].

China Safety Science Journal, 2024, 34(11): 179-184.

基于FQ和IMS的痕量爆炸物探测分析*

郝凤龙¹副研究员,张庆胜²,姜玲玲¹副研究员,金川¹研究员,
张涛¹研究员,贾二惠²研究员

(1 公安部第一研究所,北京 100048;2 北京中盾安民分析技术有限公司,北京 102200)

中图分类号:X924.2 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.11.0356

资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFF0708203);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(B21607)。

【摘要】 为及时有效地查出行李、包裹和人身中隐藏的爆炸物,利用荧光淬灭(FQ)和离子迁移谱(IMS)2种痕量爆炸物检测仪器,分别通过擦拭和吸气2种采样方式,检测三硝基甲苯(TNT)、黑索金(RDX)、三过氧化三丙酮(TATP)、硝酸铵(AN)等多种爆炸物,并主要从报警时间和恢复时间2个方面进行对比分析。结果表明:擦拭采样情况下,FQ的平均报警时间比IMS少约2 s,平均恢复时间比IMS少约30 s,具有更高的检测效率。吸气采样情况下,FQ仪器可检测TNT和TATP,IMS仪器难以检测爆炸物。

【关键词】 荧光淬灭(FQ); 离子迁移谱(IMS); 痕量; 爆炸物探测; 报警时间; 恢复时间

Trace explosive detection analysis based on FQ and IMS

HAO Fenglong¹, ZHANG Qingsheng², JIANG Lingling¹, JIN Chuan¹, ZHANG Tao¹, JIA Erhui²

(1 First Research Institute of the Ministry of Public Security, Beijing 100048, China;

2 Beijing Zhongdun Anmin Analysis Technology Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: In order to timely and effectively detect the explosives hidden in luggage, packages and individuals, multiple explosives such as trinitrotoluene (TNT), hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX), triacetone triperoxide (TATP), ammonium nitrate (AN), etc. were detected by FQ and IMS instruments by wiping and aspiration sampling methods. The comparison was mainly made from two aspects: alarm time and recovery time. The experimental results show that under wiping sampling, the average alarm time of FQ is about 2 seconds less than that of IMS, and the average recovery time is about 30 seconds less than that of IMS, which has higher detection efficiency. In the case of aspirated sampling, FQ instruments can detect TNT and TATP, while it is difficult for IMS instruments to detect explosives.

Keywords: fluorescence quenching (FQ); ion mobility spectrometry (IMS); trace; explosive detection; alarm time; recovery time

0 引言

爆炸恐怖袭击是当今世界各恐怖组织实施恐怖

活动最普遍的一种形式。这是因为实施恐怖袭击的炸药易于获取,不易追踪,便于携带;另外,爆炸现场易于对公众形成视觉和心理冲击,所造成的破坏性

和政治影响都很大。恐怖分子利用爆炸手段摧毁工业或经济中心、象征性建筑物、地铁^[1]、飞机、桥梁、电信网络和水利系统等国家要害部位,以实现其政治诉求,这是其他恐怖活动形式难以做到的。进入21世纪以来,恐怖爆炸活动在全球范围内呈现出愈演愈烈之势,对人民生命和财产造成重大损失^[2]。仅以2013年为例,全球共发生9 707起恐怖袭击,数量较上年增加44%;造成逾17 800人死亡,较2012年增长61%。同时超过32 500人受伤,2 990余人被绑架或劫持为人质^[3]。从恐袭手段来看,爆炸和武装袭击是恐怖分子最常使用的手段,高达57%的恐袭通过爆炸实现,武装袭击占比为23%。我国的反爆炸恐怖形式也十分严峻,据统计,自1998年以来,我国的爆炸案件以12%的速度递增,甚至有多起爆炸事件发生在首都天安门,其目的在于制造和扩大政治影响^[4]。这些涉爆案件暴露出明显的恐怖主义倾向,已经引起国家相关部门的高度重视。

随着恐怖爆炸活动日趋猖獗,各国政府不断加强针对恐怖爆炸袭击的预防手段和措施,以及时有效查出行李、包裹和人身中隐藏的爆炸物。经过几十年的发展,爆炸物探测技术层出不穷,一般分为体探测技术和痕量探测技术2大类^[5]。体探测技术原理主要是成像技术和核技术。其中,成像技术主要包括X射线成像、毫米波成像、太赫兹成像^[6-7];核技术主要包括中子探测、核磁共振探测、核四极共振探测等^[8-9]。痕量探测技术则通过分析爆炸物挥发出的蒸气或残留在恐怖分子行李衣物表面和手部的爆炸物微粒的物性,获得物质的属性,以探测爆炸物,主要包括光谱分析^[10]、质谱分析^[11]、气相色谱、离子迁移谱(Ion Mobility Spectrometry, IMS)、声表面波、比色^[12]、生物探测^[13]等技术。目前,痕量爆炸物探测的主流技术是IMS,但荧光淬灭(Fluorescence Quenching, FQ)技术也呈现出快速发展趋势,FQ是利用特殊高分子材料的荧光淬灭性来探测爆炸物^[14],该技术在痕量爆炸物检测方面属于前沿技术,美国军方目前广泛使用的爆炸物探测仪就是基于该技术。当前研究FQ和IMS单一技术的文献比较多,并且大多仅采用擦拭采样方式,未针对2种技术进行对比分析。

鉴于此,笔者在分析系统组成和工作原理基础上,利用FQ和IMS这2类仪器,分别通过擦拭和吸气2种采样方式检测常见爆炸物,并对分析检测结果,探索2种仪器在反恐和安检领域实战应用的

可能性,以期在基层一线提供有益参考。

1 痕量爆炸物探测系统

1.1 FQ 仪器

基于FQ技术的爆炸物探测仪器,主要工作原理是机器内部的荧光材料接触到爆炸物分子后,其荧光强度、峰位发生变化,这种变化被设备内部的高灵敏度探测器记录,通过分析即可得出被测物上是否有爆炸物^[15]。仪器主要由热解析器、吸气头、气路、荧光探测系统、气泵、流量计和过滤器等组成,其中,荧光探测系统主要包括激发光源、荧光传感器、光电转换器等,具体组成如图1所示。

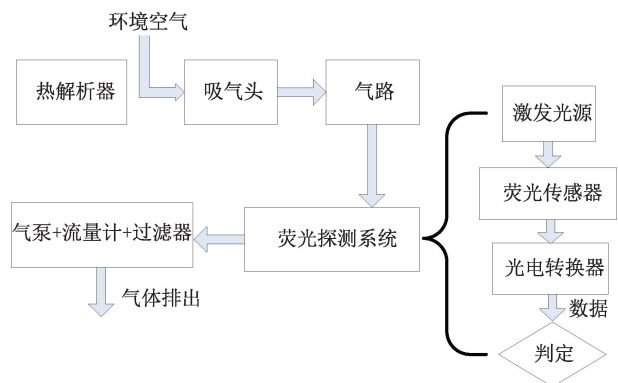


图1 FQ爆炸物探测仪系统组成

Fig. 1 Composition diagram of FQ explosive detector

擦拭采样时,热解析器可将采样试纸上的痕量物质气化,吸气采样时可将该解析器拆下,露出吸气头进行吸气采样。气泵将气化的物质抽过荧光探测系统。激发光源为365 nm紫外窄波长光源,光源照射到荧光镀膜后产生荧光,该荧光被光电转换器转变为电流,由模数转换器转换后送到上位机;气化物质的分子在经过荧光传感器时,物质分子和荧光镀膜接触,荧光镀膜的荧光强度会发生急剧变化,根据荧光强度数据变化进行物质判定。

1.2 IMS 仪器

IMS检测技术是20世纪60年代末发展起来的一种痕量化学物质分析检测技术。该技术基于气相中不同的气相离子在电场中迁移速度的差异来表征化学离子物质^[16]。IMS检测仪一般由进样系统、电离源、漂移管、微电流放大器、信号采集和处理及显示等^[17]系统组成。组成结构如图2所示。

漂移管是IMS检测仪的核心部件,其性能的好坏直接决定着IMS检测仪的灵敏度和分辨率。漂移管一般由电离区、反应区、离子栅门、漂移区和检

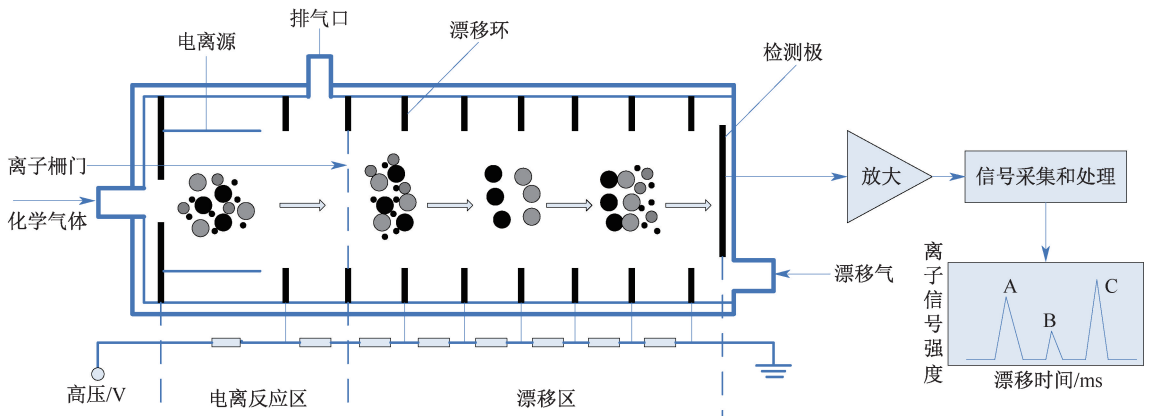


图 2 IMS 探测仪系统组成及结构

Fig. 2 Schematic diagram of IMS detector composition and structure

测极等组成。在检测分析时,被测气体样品从前端气路入口进入漂移管中的电离反应区,经过电离源放射生成产物离子,生成的产物离子群在环境气压和电场 E (V/cm) 作用下通过漂移区中的常压气体(通常为空气)并获得一定的速度,称为漂移速度 v_d (cm/s)^[18]:

$$v_d = d/t_d \quad (1)$$

式中: d 为离子栅门与检测器之间的距离, cm; t_d 为离子群经该距离所需的时间, 称为漂移时间, ms。漂移速度对 E 的归一化产生了迁移率系数 K (cm²/(V·s)), 即单位场强的离子群速度:

$$K = v_d/E \quad (2)$$

漂移管中的漂移速度受温度 T 和气压 p 影响, K 值可以归一到 273.15 K 和 101 324.72 Pa, 产生了约化迁移率 K_0 :

$$K_0 = K \cdot \frac{273.15}{T} \cdot \frac{p}{760} \quad (3)$$

通常情况下,用 K_0 值来描述离子迁移率。一般而言,在同一电场中不同气相离子的迁移率是不同的。因此,不同种类的离子会在不同的迁移时间到达检测极并产生电流信号,电流信号经过放大器放大及信号采集与处理后便会得到随时间变化的信号谱图,也就是在谱图上不同的迁移时间处会出现不同离子的信号峰,从而实现离子的分离,这就是 IMS 检测仪实现不同检测样品定性鉴定的工作原理。

2 爆炸物探测试验和结果分析

2.1 FQ 仪器检测爆炸物

2.1.1 擦拭采样试验

试验中,选择三硝基甲苯(Trinitrotoluene, TNT)、黑索金(Hexahydro-1, 3, 5-Trinitro-1, 3,

5-Triazine, RDX) 和三过氧化三丙酮(Triacetone Triperoxide, TATP) 和硝酸铵(Ammonium nitrate, AN) 等 10 种比较典型的爆炸物作为检测样品。根据荧光分子和爆炸物分子能级之差以及 FQ 效应的强弱,以丙酮作为溶剂,配制 10 种合适质量浓度的样品。通过擦拭采样方式对这 10 种不同质量浓度的爆炸物样品分别进行 10 次的检测,记录每次试验的报警响应时间和报警恢复时间,将每种样品的 10 次测试数据取平均值,形成的爆炸物擦拭采样测试数据见表 1。

表 1 爆炸物擦拭采样测试数据

Table 1 Explosive wip sampling test data

样品名称	样品质量浓度/ (ng·μL ⁻¹)	平均报警响应 时间/s	平均报警恢复 时间/s
TNT	0.1	1.38	4.32
RDX	20	3.58	5.80
黑火药	10	2.36	4.79
膨化炸药	10	5.41	9.07
TATP	10	1.42	5.08
硝基苯	1	4.23	5.40
AN	5	1.16	5.05
硝基甲苯	5	1.52	4.82
奥克托金	100	2.38	4.93
8701 炸药	10	1.43	5.87

从表 1 中可以看出,报警响应时间在 2 s 以内的爆炸物有 5 种,分别是 TNT、TATP、AN、硝基甲苯以及 8701 炸药。报警响应时间最长的是膨化炸药,响应时间为 5.41 s,其他的炸药报警响应时间均在 5 s 以内。报警恢复时间最高的也是膨化炸药,达到 9.07 s,其他 9 种爆炸物的报警恢复时间均在 6 s 以内。综上所述,除膨化炸药外,其他样品的测试效果是非常理想的。

2.1.2 吸气采样试验

在常温下爆炸物通常是固态,而吸气采样的检测对象一般是气体。对于固体而言,在常温下会挥发出少量的气体,这些少量的气体可以称为该爆炸物在常温下的饱和蒸气压。

吸气采样是通过定性的方式进行的,通过控制试验环境的温度,测试对照饱和蒸气压。吸气采样试验表1中的10种爆炸物,只有TNT和TATP能够通过吸气采样方式检测到,其余8种爆炸物均未检测到。

吸气采样和擦拭采样的报警响应时间、报警恢复时间接近,具体的数据对比见表2。

表2 擦拭采样和吸气采样测试数据对比

Table 2 Comparison of wipe sampling and aspiration sampling test data

样品名称	采样方式			
	擦拭采样		吸气采样	
	TNT	报警响应时间	1.38	报警响应时间
	报警恢复时间	4.32	报警恢复时间	4.90
TATP	报警响应时间	1.42	报警响应时间	1.07
	报警恢复时间	5.08	报警恢复时间	7.15

通过吸气采样方式检测到样品需要同时满足2个条件:①荧光材料对样品的检测灵敏度要高;②样品的饱和蒸气压高。荧光材料对TNT的检测灵敏度在10种样品中是最高的,在20℃的温度下,TNT在空气中的饱和蒸气压为 6×10^{-9} ,能够通过吸气采样方式检测到。而在常温下,TATP的饱和蒸

气压是TNT的10~20倍,因此,虽然荧光材料对TATP的检测灵敏度没有TNT高,但它的饱和蒸气压足够高,也能通过吸气采样方式检测到。

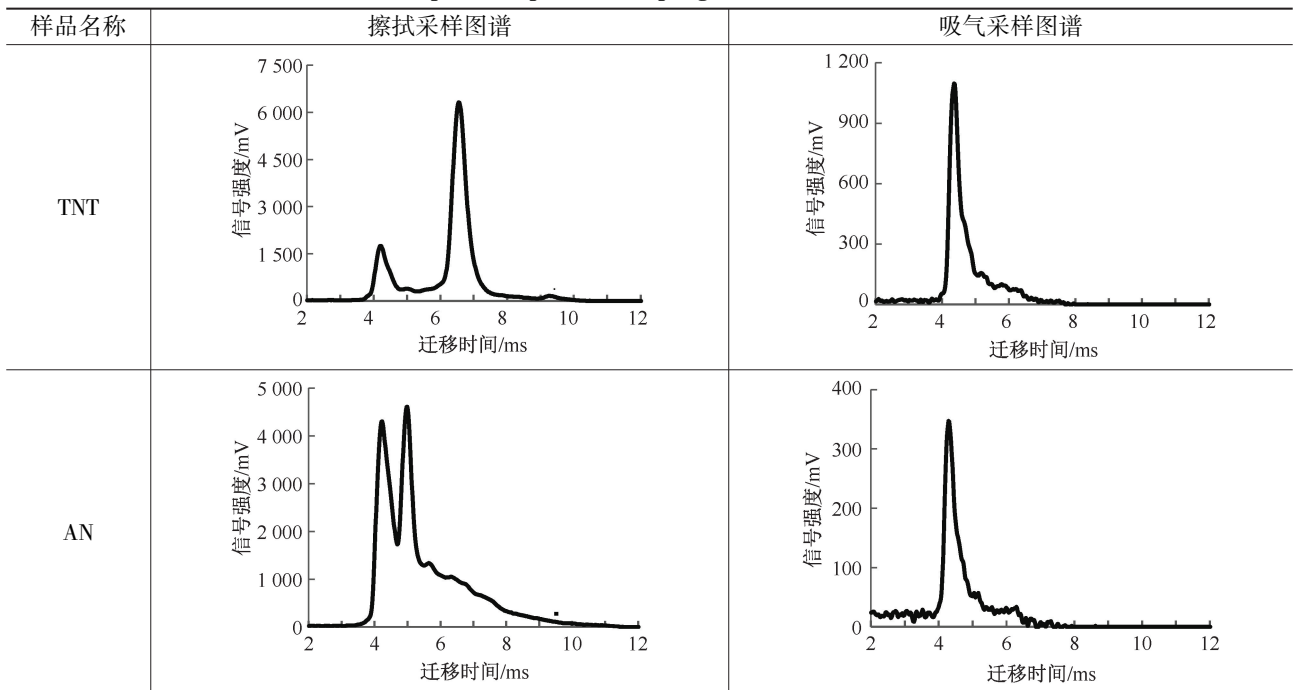
虽然在吸气采样试验中能够实现TNT和TATP的检测,但是在非饱和状态下(在一些开放环境中)爆炸物的蒸气压约为其饱和蒸气压的 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ ^[19]。以最常见的炸药TNT为例,TNT的饱和蒸气压为 6×10^{-9} (20℃),要通过吸气采样方式探测开放环境炸药装置中的TNT,需要使探测装置能够探测 $0.1 \sim 0.000 01 \times 10^{-9}$ 的TNT分子。而且,大部分的非芳香类爆炸物的饱和蒸气压比较低,如RDX为 5×10^{-12} ,太安为 7×10^{-12} t,而奥克托今更是低至 0.1×10^{-12} ,且其热稳定性更高,使得这类炸药的探测更为困难^[20-21],通过吸气采样方式检测开放环境中的爆炸物,现阶段还难以实现,今后需要进一步提高荧光探测装置的灵敏度。

2.2 IMS 仪器检测爆炸物

利用IMS爆炸物探测仪,分别通过擦拭和吸气采样方式检测常温常压下的TNT、AN、黑火药、RDX、太安、硝化甘油、吉纳、复合炸药、TATP、塞姆丁和铵梯等11种爆炸物样品,每种样品检测10次,并详细记录检测谱图、报警时间和恢复时间等信息,其中,擦拭采样结果是11种爆炸物均报警,吸气采样结果是均未报警。为便于对比分析,仅列出TNT和AN的检测结果,见表3。

表3 TNT和AN在擦拭采样和吸气采样时的检测结果

Table 3 Wipe and aspiration sampling test results of TNT and AN



从表 3 中可以看出, TNT 和 AN 的检测谱图, 在擦拭采样时特征峰清晰可辨, 在吸气采样时仅有背景峰, 未有样品特征峰, 由此验证现阶段 IMS 技术难以通过吸气方式检测固态爆炸物。

3 痕量爆炸物探测对比分析

对比分析 2 种技术在擦拭采样情况下检测的 TNT、RDX、黑火药、TATP 和 AN 等 5 种相同样品的数据。分析发现, FQ 的报警响应时间均在 2~3 s, 恢复时间均在 4~5 s, IMS 的报警响应时间均在 4~5 s, 恢复时间均在 35~36 s。5 组数据对比结果一致, 表明 FQ 的爆炸物检测时间更快, 检测效率更高。文中仅列出有代表性的 TNT 和 AN 这 2 种物质的实测数据, 见表 4。

表 4 FQ 和 IMS 在擦拭采样时探测 TNT 和 AN 的数据对比

Table 4 Comparison of FQ and IMS data for detection of TNT and AN by wipe sampling

样品名称	FQ 仪器		IMS 仪器	
	平均报警时间	平均恢复时间	平均报警时间	平均恢复时间
TNT	1.38	4.32	3.48	35.63
AN	1.16	5.05	3.57	35.33

从报警响应时间看, 利用 IMS 技术检测时, 需经

历气化、渗透、电离、漂移等环节, 还需要一定样品量的积累, 报警响应时间较长; 而 FQ 技术检测时没有电离和漂移环节, 响应时间较短。从报警恢复时间看, IMS 仪器内残留的样品较多, 特别是漂移管和渗透膜中的残留需要高温等方式进行清洁处理, 恢复时间较长; 而 FQ 仪器内部是相对简单的开放气路, 样品检测后直接排出, 基本无残留, 恢复时间较短。

4 结 论

1) 利用 FQ 和 IMS 这 2 类仪器, 分别通过擦拭和吸气采样方式检测多种爆炸物。在擦拭采样情况下, 2 类仪器均可实现爆炸物检测, 并对比分析 TNT、RDX、黑火药、TATP 和 AN 等 5 种相同样品的检测数据, 结果表明: FQ 的报警响应时间比 IMS 的约少 2 s, 而恢复时间比 IMS 的约少 30 s, 具有更高的检测效率。

2) 在吸气采样情况下, FQ 仪器可检测出饱和蒸气压下的 TNT 和 TATP, 2 种爆炸物的报警响应时间均小于 2 s, 恢复时间均小于 8 s, 而 IMS 仪器难以实现爆炸物检测。

3) 文中仅从采样方式、报警响应时间和恢复时间等方面对比分析 FQ 和 IMS 技术, 后续可从爆炸物检出限、误报率、稳定性和耗材成本等多方面进行深入研究。

参 考 文 献

- [1] 魏琳, 李丽华, 秦立强, 等. 城市地铁恐怖袭击事件应急能力综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 213-221.
WEI Lin, LI Lihua, QIN Liqiang, et al. Comprehensive evaluation of emergency response capability of urban subway terrorist attacks [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(7): 213-221.
- [2] 许兴鹏, 许清风, 房志明, 等. 全球恐怖袭击发展趋势与伤亡风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 170-175.
XU Xingpeng, XU Qingfeng, FANG Zhiming, et al. Development trend of global terrorist attacks and analysis on casualty risk [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(6): 170-175.
- [3] US State Department. Global terrorism index 2013 [R], 2014.
- [4] 黄杰, 张显峰. 以南疆为例的区域暴力恐怖袭击风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(2): 192-199.
HUANG Jie, ZHANG Xianfeng. Risk assessment of regional violent terrorist attacks in southern Xinjiang [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(2): 192-199.
- [5] 方子龙. 兰姆波型声表面波爆炸物传感器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
FANG Zilong. Research on lamb type surface acoustic wave explosive sensor [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [6] 陈瑞. 面向安检透视成像应用的闪烁体光子计数 X 射线探测器[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
CHEN Rui. A scintillation photon-counting X-ray detector for security inspection imaging [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [7] 周焯. 近场毫米波人体成像仿真设计与优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
ZHOU Ye. Research on simulation design and optimization of near-field millimeter wave personnel screening [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.

- [8] 刘伏龙,王浩然,薄楠,等.基于核共振吸收法开展爆炸物检测的原理验证研究[J].原子能科学技术,2022,56(增1):258-264.
LIU Fulong, WANG Haoran, BO Nan, et al. Proof-of-principle study of explosive detection based on nuclear resonance absorption [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, 56(S1): 258-264.
- [9] 华仁军,刘伟鹏,许鑫鑫,等.核电四极矩共振信号强度检测模型修正[J].核电子学与探测技术,2021,41(3):524-527.
HUA Renjun, LIU Weipeng, XU Xinxin, et al. Modification of signal strength detection model for nuclear quadrupole resonance [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2021, 41(3): 524-527.
- [10] 谷天予,张大成,冯中琦,等.痕量爆炸物的激光诱导击穿光谱快速鉴别方法[J].现代应用物理,2023,14(2):106-111,132.
GU Tianyu, ZHANG Dacheng, FENG Zhongqi, et al. Identification of trace explosives by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Modern Applied Physics, 2023, 14(2): 106-111, 132.
- [11] 叶倩,洪欢欢,周峰,等.基于机器学习的直接电离质谱爆炸物检测方法[J].分析测试学报,2021,40(4):589-595.
YE Qian, HONG Huanhuan, ZHOU Feng, et al. Detection of explosives by direct ionization mass spectrometry based on machine learning algorithm [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2021, 40(4): 589-595.
- [12] 吴昊天,王广发,窦新存.比色法在爆炸物检测中的研究进展[J].分析测试学报,2021,40(4):468-477.
WU Haotian, WANG Guangfa, DOU Xincun. Advances on colorimetry in explosives detection [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2021, 40(4): 468-477.
- [13] 孙宁,胡庭溪,徐澍,等.基于远程遥控方式训练松鼠识别毒品和爆炸物气味[J].中国药物依赖性杂志,2024,33(1):28-35.
SUN Ning, HU Tingxi, XU Shu, et al. Experiment of training squirrels to recognize the odor of drugs and explosives based on remote control [J]. Chinese Journal of Drug Dependence, 2024, 33(1): 28-35.
- [14] 窦新存,王广发,代卓华.非制式爆炸物比色/荧光传感研究进展(特邀)[J].光子学报,2022,51(8):121-135.
DOU Xincun, WANG Guangfa, DAI Zhuohua. Recent progress in colorimetric/fluorescent sensing toward improvised explosives (invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(8): 121-135.
- [15] 程传钦.高光稳定性共组装荧光传感材料的开发及在爆炸物检测方面的应用[D].北京:中国科学院大学,2022.
CHENG Chuanqin. Development of high-photostability co-assembled fluorescence sensing materials and their application in explosives detection [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [16] 金洁,疏天民.离子迁移管中湿度变化对毒品和烟酰胺检测的影响[J].分析实验室,2021,40(9):1 044-1 048.
JIN Jie, SHU Tianmin. Effect of humidity changes in ion migration tubes on drug and nicotinamide detection [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2021, 40(9): 1 044-1 048.
- [17] 代新雄,赵忠俊,朱爽,等.微波诱导等离子体离子迁移谱用于痕量爆炸物检测的研究[J].分析化学,2018,46(8):1 238-1 244.
DAI Jianxiang, ZHAO Zhongjun, ZHU Shuang, et al. Microwave induced plasma ionization ion mobility spectrometry for detection of trace explosives [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2018, 46(8): 1 238-1 244.
- [18] 金洁,尤晓明.离子迁移谱(第三版)[M].上海:复旦大学出版社,2021:2-3.
- [19] 薛伟.有机聚合物复合荧光纤维及其传感性能研究[D].南京:南京邮电大学,2020.
XUE Wei. Organic polymer composite fluorescence fibers and their sensing properties [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [20] 郭海军,吴昱辰,唐寒露,等.HMX基钝感传爆药制备技术[J].中国安全科学学报,2022,32(2):139-144.
GUO Haijun, WU Yuchen, TANG Hanlu, et al. Preparation technology of HMX-based insensitive booster explosives [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(2): 139-144.
- [21] 母鸿斌.新型三过氧化三丙酮(TATP)荧光探针的设计、合成与性能研究[D].长春:吉林大学,2022.
MU Hongbin. Design, synthesis and performance study of novel fluorescent probes for triacetone triperoxide (TATP) [D]. Changchun: Jilin University, 2022.

作者简介: 郝凤龙 (1985—),男,黑龙江绥化人,博士,副研究员,主要从事反恐、禁毒理论与装备等方面的工作。E-mail:haofenglong110@126.com。

