

文章编号:1006-9941(2025)10-1228-27

爆炸物的现场快速检测技术研究进展

唐 乐¹,胡辰辰¹,马艺宁¹,曹润铎¹,白萃萃¹,戚晋中²

(1. 江苏警官学院, 江苏 南京 210031; 2. 沭阳县公安局, 江苏 宿迁 223652)

摘 要: 对4类爆炸物现场快速检测技术(色谱-质谱联用技术、光谱分析技术、离子迁移谱技术、化学传感技术)的研究应用进展进行了综述,分析总结其适用对象、优点和局限性,并对其发展方向进行了展望。色谱-质谱联用技术中,气质联用技术(GC-MS)灵敏度高,适用于易挥发且热稳定炸药;液质联用技术(LC-MS)操作条件苛刻,但适用于大多数无机、有机炸药。光谱分析技术中,拉曼光谱(Raman)取样量小、操作简单,但对高感度炸药存在爆炸风险;太赫兹光谱(THz)安全性高、穿透性强,但易受环境影响,适用于具有特征吸收峰炸药。离子迁移谱技术(IMS)检测限低、响应快,但难兼顾分辨率与灵敏度,只适用于易挥发炸药。化学传感技术中,荧光探针法灵敏度高、选择性好、可视化,但抗干扰弱且操作复杂,化学比色法简便廉价、响应快,但易受干扰且大部分受限于可见光,两者皆仅适用于特定爆炸物。通过分析比较现有技术,提出未来研究方向应聚焦于多技术融合、设备小型化、抗干扰能力提升及多目标检测能力优化等方面,以提升检测方法的抗干扰、多目标现场快检与智能化水平,为完善爆炸物现场检测技术、确保安全保障工作的有效开展提供参考。

关键词: 爆炸物;现场检测;色谱-质谱联用技术;光谱分析技术;离子迁移谱技术(IMS);化学传感技术

中图分类号: TJ55;O65

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2025188

0 引言

近年来,恐怖主义活动对全球安全环境造成严峻的威胁,爆炸物成为最常用的袭击工具,给各国政治经济环境带来了不同程度的威胁,如2021年8·26喀布尔机场爆炸事件造成170人死亡,2023年1·30巴基斯坦清真寺爆炸事件造成超200人伤亡。根据全球恐怖主义数据库(GTD, Global Terrorism Database)数据显示2001~2020年以爆炸方式发起的恐袭事件高达1.3万余起,占恐袭事件总数的50.47%,共造成伤亡人数6.4万余人,占总伤亡人数的65.72%^[1-2]。爆炸物成为恐怖分子首选工具的主要原因有:材料易获取,爆炸物所需原料如硝酸铵化肥、汽油、黑火药等可以通过各种渠道获得^[3-4];制备门槛低,互联网普及使制作教程易于获取,恐怖分子无需专业知识,进行专业

训练即可掌握爆炸物制作方法^[5];能量密度高,通过加大装药量和破片设计,可以增强爆炸瞬间释放的高温、冲击波及破片效应,造成大规模伤亡,制造社会恐慌^[6]。上述特性导致炸药爆炸案件具有目标无指向性、手段隐蔽性和后果严重性等特点,使得爆炸案件的犯罪既遂率居高,加速了爆炸案件的发生^[7-8]。由于恐怖爆炸案件的危害性极大,为防止爆炸案件的发生,技术人员需要利用相关检测技术,在人员聚集区域对携带和藏匿的爆炸物进行检测和鉴定,以及时消除潜在威胁,因此各国政府和相关机构对爆炸物品快速检测技术的研究非常重视。目前,色谱/质谱、光谱、离子迁移谱及化学传感等检测技术的微型化、多技术融合与现场适用性优化相关研究是国际上比较关注的研究热点^[9-13]。

因此,本研究选取了色谱-质谱联用技术、光谱分析技术、离子迁移谱技术、化学传感技术等当前常用的爆炸物现场快速检测技术,综述了此4类检测技术近年来在爆炸物检测中的最新研究应用成果,并对检测技术的适用对象、优点和局限性进行了细致地分析总结,有助于技术人员对当前的爆炸物现场快速检测技术有全面充分的了解,旨在为技术人员在实际工作中

收稿日期:2025-09-02;修回日期:2025-09-30

网络出版日期:2025-10-21

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究项目(24KJB430016);江苏警官学院自然科学研究项目(2022SJYZ01)

作者简介:唐乐(1990-),女,讲师,主要从事含能材料基础与应用技术研究。e-mail:tangle@jspi.cn

引用本文:唐乐,胡辰辰,马艺宁,等.爆炸物的现场快速检测技术研究进展[J].含能材料,2025,33(10):1228-1254.

TANG Yue, HU Chen-chen, MA Yi-ning, et al. Research Progress on Rapid On-Site Detection Technology of Explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(10):1228-1254.

选择最佳的爆炸物检测方法提供指导作用。同时,针对当前防爆领域的应用需求,展望当前爆炸物现场快速检测技术的发展趋势,旨在为完善爆炸物现场检测技术、确保安全保障工作的有效开展提供参考。本文所提及爆炸物的中英文名称及缩写见附录。

1 色谱-质谱联用技术

色谱-质谱联用技术是一种可以高效定性定量分

析的方法,其中,色谱法是一种分离有机化合物的方法,可以进行定量分析,而质谱法可以进行定性分析,但是需要对样品进行分离纯化操作。

1.1 气相色谱-质谱联用技术

气相色谱-质谱联用技术(GC-MS,图1)是使用气体流动相(氮气、氦气等)载着气化样品通过固定相,样品各组分与固定相发生不同的作用而对样品各组分进行分离,分离后的组分在质谱仪中成为离子,在电磁场作用下根据质荷比分离并送入离子检测器中进行分析检测^[14]。

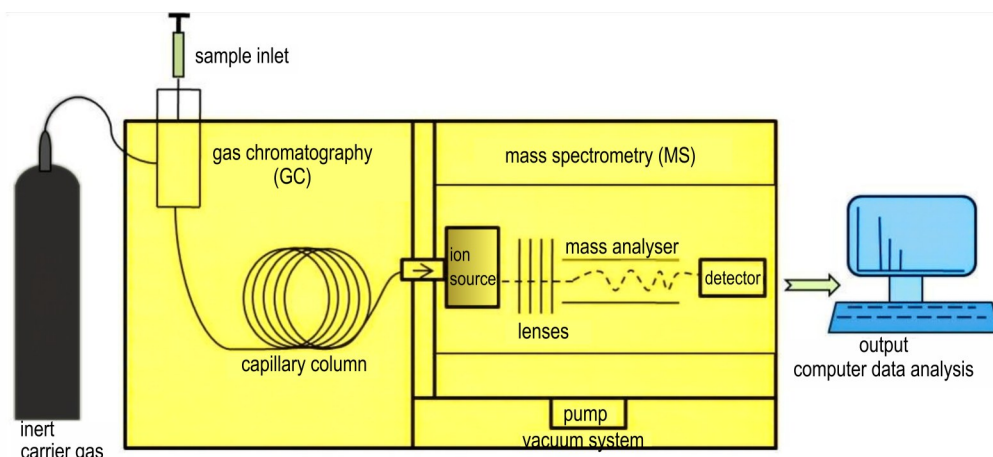


图1 气相色谱-质谱联用技术^[14]

Fig.1 Schematic diagram of the GC-MS instrument^[14]

为提升 GC-MS 在爆炸物检测中的灵敏度与准确性,研究人员对进样口温度、进样流速及分流比等关键参数进行了系统优化。黄阳等^[15]建立了 GC-MS 检测黑火药(BP)中硫磺含量的方法,通过优化萃取溶剂、进样口温度和升温程序等条件,提高了检测灵敏度、准确度,发现硫磺在 $5\sim 50\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 范围具有良好的线性关系,检出限(LOD)为 $0.65\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$,用该方法对在实际工作中收集到的 8 份 BP 样品进行检测,汇总结果后发现实验中所检测的每份 BP 中硫磺含量都不同,这表明在 BP 的检测中可用该方法对样品进行区分,从而推断其产地。周华等^[16]建立了用 GC-MS 检测六亚甲基三过氧化二胺(HMTD)的方法,发现在有机溶剂(如丙酮)中,溶剂化效应增强了 HMTD 的稳定性,且进样流速、进样口温度、起始温度和分流比对于 HMTD 响应率具有显著影响(图2),该方法解决了实际操作中 HMTD 难以检测的难题。Stambouli 等^[17]通过优化进样口温度等条件,实现了对 HMTD 的 GC-MS 检测,避免了在传统气相色谱-质谱检测中因温度过高导致 HMTD 降解产生降解产物而干扰检测效果,该方法经过检验,同样也可适用于检测三过氧化三丙酮(TATP)、硝化甘

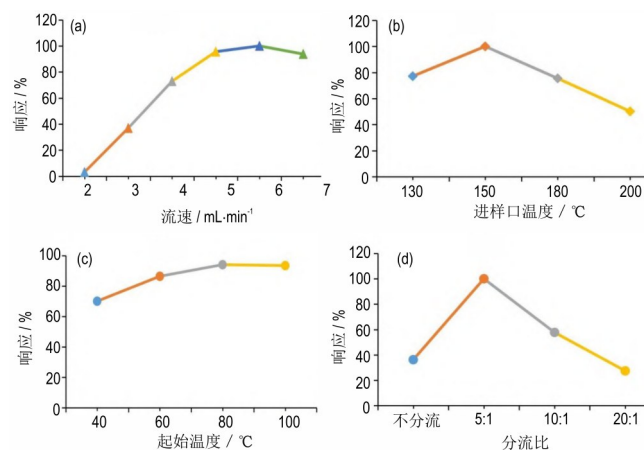


图2 不同条件对HMTD响应的影响^[16]

Fig.2 Influence of different conditions on HMTD response^[16]

油(NG)、三硝基甲苯(TNT)等爆炸物。

通过衍生化反应、串联质谱(MS/MS)与固相微萃取(SPME)等前处理和气相色谱的深度耦合,可以进一步提升 GC-MS 方法对多类炸药及其环境残留的超灵敏检测能力。万一夫等^[18]建立了一种检测苦味酸(TNP)的气相色谱-三重四极杆质谱(GC-TQMS)检测方法,该方法利用原甲酸三甲酯(TMOF)将 TNP 衍生为 2,4,6-三硝基苯甲醚(TNA),并对比在电子轰击电离(EI)模式和负化学

电离(NCI)模式下的检测效果,发现EI模式的检测效果更好(表1),该方法可以满足司法鉴定的实际需求,避免了假阳性的发生,同时发现该方法可以用于检测四种常见的硝基芳香族有机炸药TNT、二硝基甲苯(DNT)、黑索今(RDX)、特屈儿(CE)。Bünning T H^[19]开发了一种基于气相色谱-串联质谱技术(GC-MS/MS)的工具箱,用于检测海洋环境(水、沉积物、生物样本)中硝基芳香族爆炸物的飞克级(fg , $1 \text{ fg} = 10^{-15} \text{ g}$)残留。通过优化样品处理和仪器参数,建立了新的进样方法,实现了超高灵敏度的

表1 GC-EI/TQMS 和 GC-NCI/TQMS 的线性范围、相关系数、检出限及定量下限^[18]

Table 1 Linear ranges, correlation coefficients, LODs and LOQs of GC-EI/TQMS and GC-NCI/TQMS^[18]

method	linear range / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	correlation coefficient (r^2)	LOD / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	LOQ / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
GC-EI/TQMS	5–1000	0.9982	1.33	4.78
GC-NCI/TQMS	20–1000	0.9949	5.02	16.66

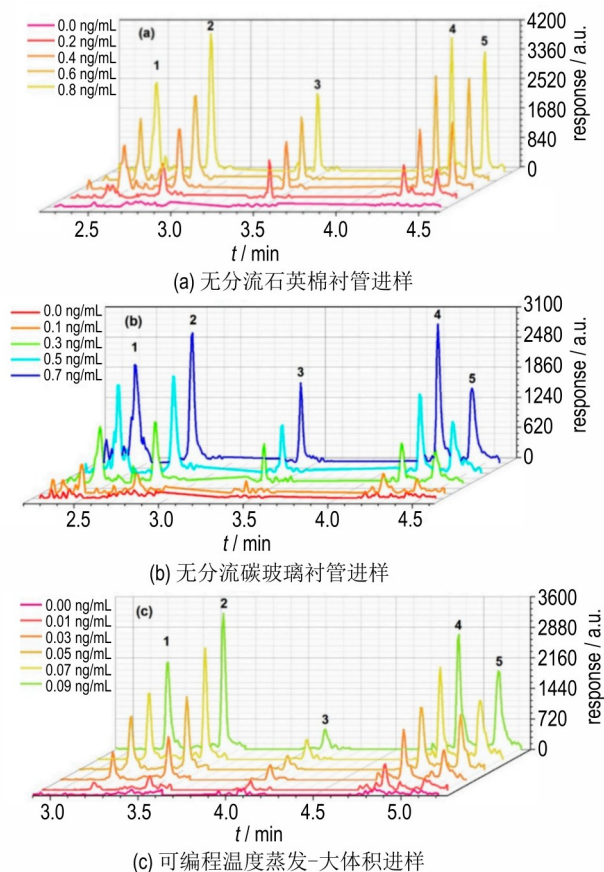


图3 用于确定检出限的校准标准色谱图(标注峰:1:1,3-DNB;2:2,4-DNT;3:TNT;4:4-ADNT;5:2-ADNT)^[19]

Fig.3 Chromatograms of the calibration standards used to determine the LODs (Peaks are 1: 1,3-DNB; 2: 2,4-DNT; 3: TNT; 4: 4-ADNT; 5: 2-ADNT)^[19]

检测(图3),与现有技术相比,该方法兼具高效、灵敏和普适性,实现了在海洋环境中检测硝基芳香族爆炸物的要求。Alexis等^[20]将固相微萃取(SPME)技术和GC-MS相结合,用以分析导火索、导爆索和起爆药等点火装置中的挥发性爆炸物,该研究采用不同的SPME纤维涂层,发现当使用PDMS/DVB纤维涂层时,该系统对爆炸物的检测效果最好(图4),该方法检测出了多种挥发性化合物,如增塑剂三丁基乙酰柠檬酸酯(ATBC)、N-丁基苯磺酰胺(N-BBSA),示踪剂二硝基丁烷(DMNB)以及降解产物2-乙基-1-己醇(2-EH)。

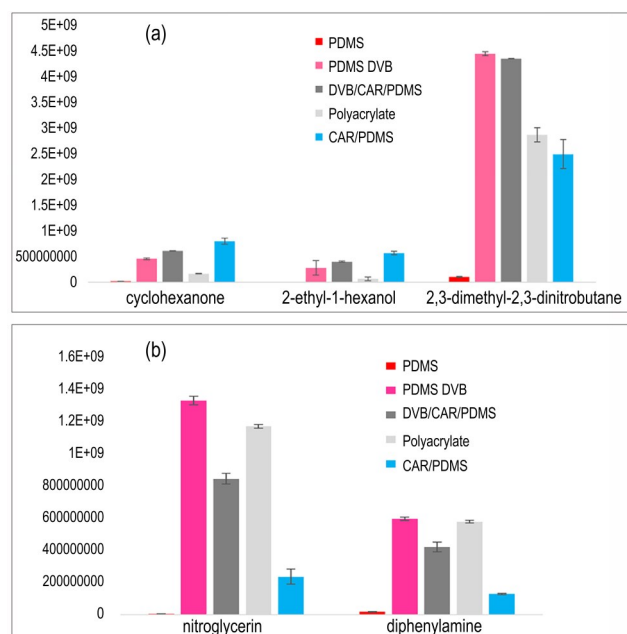


图4 不同SPME纤维涂层检测样品中挥发性成分得到的峰面积^[20]

Fig.4 Peak areas of volatile components detected in samples using different SPME fiber coatings^[20]

综上,GC-MS的优势在于其整合了气相色谱和质谱的优点,具有“色谱分离+质谱确证”的双重优势,能对易挥发炸药进行有效检测,且灵敏度高,高分辨率质谱仪通过测定样本离子的质荷比,可以推导出样本的分子式,是易挥发、热稳定炸药现场与实验室分析的主力方法。但是,其局限性在于检测的目标化合物须具备足够的挥发性与热稳定性,限制了对多数热敏、高分子或极性炸药(如无机氧化剂、部分过氧化物)的适用范围,所以GC-MS检测方法只适用于很小范围的爆炸物^[21–23]。

1.2 液相色谱-质谱联用技术

液相色谱-质谱联用技术(LC-MS,图5)是使用液体流动相载着样品通过固定相,利用样品各成分与固定相发生不同的作用分离各成分,分离后的样品在质

谱仪中经过电离,在电磁场的作用下分离并送入离子检测器中进行分析检测^[24]。其中,液相色谱-串联质谱(LC-MS/MS)是由具有高效分离能力的液相色谱和高准确分析能力的质谱串联,从而可以实现物质的高精度定性和定量分析。目前,LC-MS/MS的串联质谱主要包括三重四级杆串联质谱^[25]和四极杆-离子阱串联质谱^[26](图6),前者具有多类物质定量分析优势,但面对样品浓度较大时常会造成污染,并损伤仪器;后者是把三重四级杆的最后一级用离子阱替代,在原有基础上增加了离子阱增强型扫描功能和多级碎裂功能,显著提高检测灵敏度,但受仪器结构局限,高通量监测反应时易出现过饱和现象^[27]。

通过优化前处理方法,实现了LC-MS对复杂基质中痕量炸药的高灵敏定量检测。Irlam C R等^[28]开发了一种新型的更具通用性的萃取方法,用于在各种基

质中对爆炸物进行痕量分析,实验采用双吸附剂SPE结合LC-HRMS技术对44种有机爆炸物的回收率进行了优化,并研究了七种不同吸附剂的效果。该方法相较于单一吸附剂方法能实现低飞克级的灵敏度,将该方法首次应用于对未经处理废水中爆炸物痕迹的检测,实现了在各种复杂样本中对大量残留的爆炸物进行稳定高灵敏度的定性定量分析。杏若婷等^[29]通过采用高效液相色谱技术建立了测定某混合炸药中3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮(NTO)、RDX、2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)组分含量的分析方法,发现在一定浓度范围内三种组分的质量浓度和色谱峰高呈线性关系且相关系数较高(图7),可实现爆炸物的定量检测。

通过优化多样化电离模式、串联质谱构型等技术手段,拓展了LC-MS方法对多基质、宽谱炸药的痕量快速筛查与定量分析能力。Sener等^[30]开发了一种快

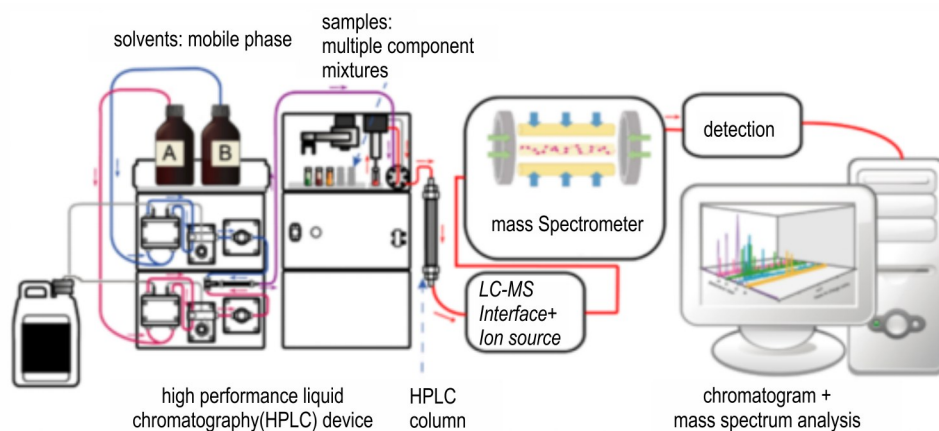
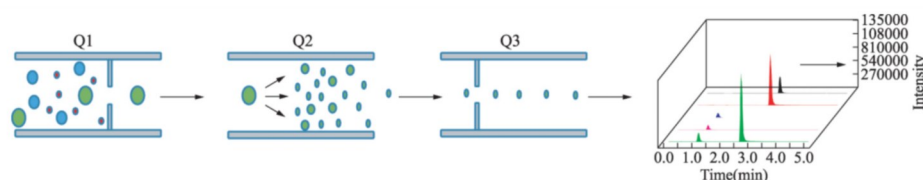
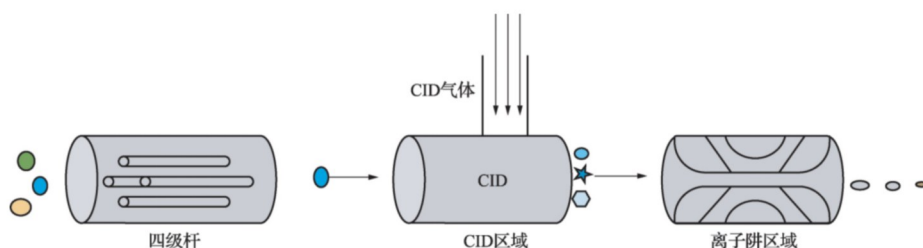


图5 液相色谱-质谱联用技术^[24]

Fig.5 Schematic diagram of the LC-MS instrument^[24]



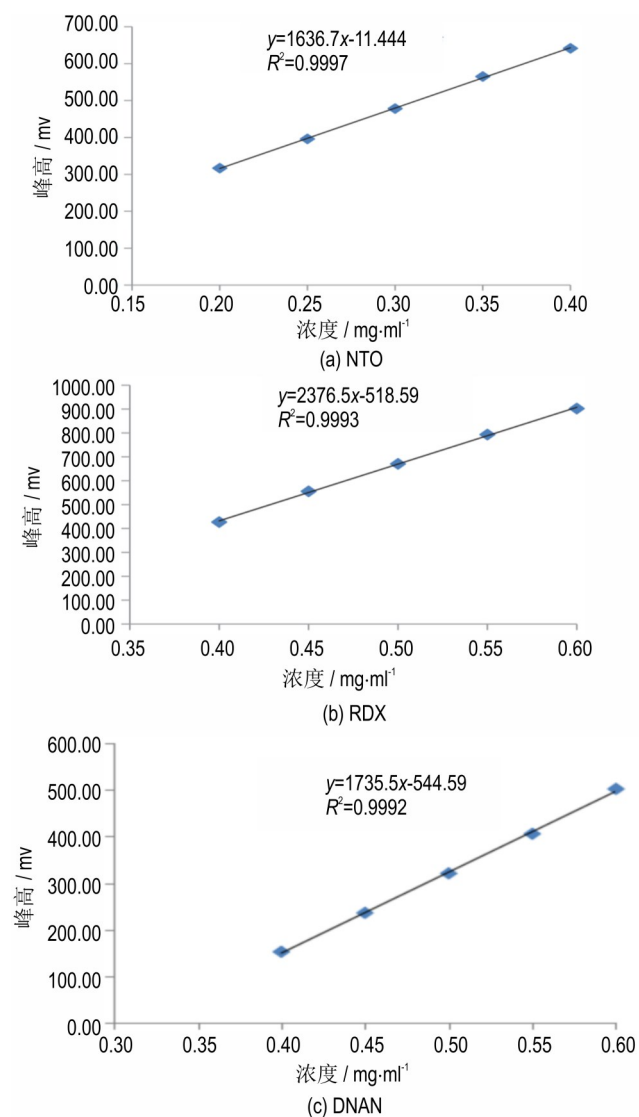
(a) 三重四级串联质谱原理图



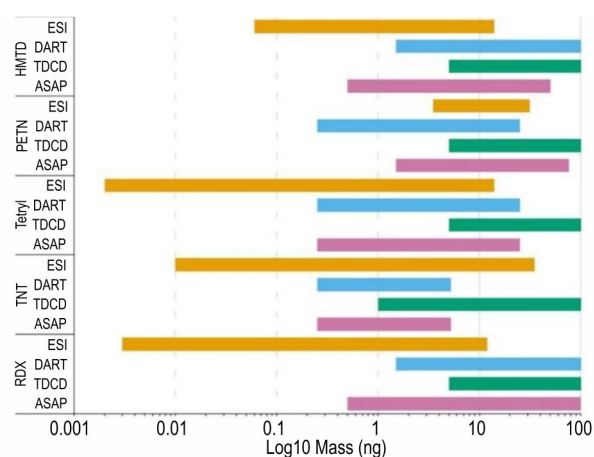
(b) 四极杆-离子阱串联质谱原理图

图6 LC-MS/MS串联质谱的两种类型^[27]

Fig.6 Two types of LC-MS/MS tandem mass spectrometry^[27]

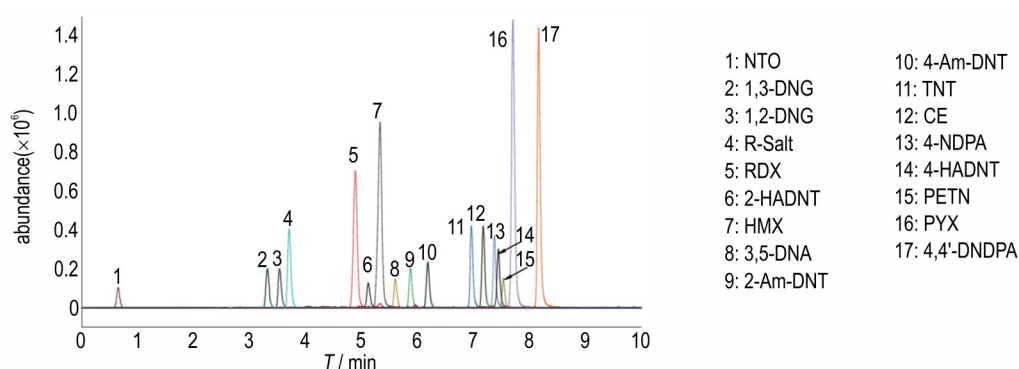
图7 NTO、RDX、DNAN的标准曲线图^[29]Fig.7 Standard curves of NTO, RDX, and DNAN^[29]

速液相色谱常压化学电离质谱(LC-APCI-MS/MS)筛选方法,用于测定爆炸后的污染土壤中痕量的TNT、RDX、奥克托今(HMX)、季戊四醇四硝酸酯(PETN)、高氯酸铵(AP)和DNT。该方法在APCI电离中使用了气体温度梯度,样品可以在10分钟内被选择性地洗脱出来,在250.0,500.0,1000.0 ngg⁻¹浓度水平下检测效果较好,该方法的LOD和LOQ分别为8.9~161.2 ngg⁻¹和13.2~241.5 ngg⁻¹。Mathias等^[31]研究了不同电离技术对LC-MS对不同爆炸物的检测限和线性关系的影响,该研究使用ESI、DART、TDCCD、ASAP四种电离技术电离RDX、HMTD、TNT等炸药,发现使用ESI电离技术时检测限最低,并且发现在不同的电离技术条件下样品观察到线性响应的质量范围也会发生变化(图8)。

图8 ESI电离技术检测炸药质量(ng)线性关系($R^2>0.9$)^[31]Fig.8 Linear relationship between explosive mass (ng) and signal intensity detected by ESI ($R^2>0.9$)^[31]

赵志东等^[32]提出了一种高效液相色谱-串联质谱(HPLC-MS/MS)法,用于测定爆炸尘土中TNT等5种常见有机炸药含量。结果显示,5种有机炸药的质量分数在一定范围内与其对应的峰面积具有良好的线性关系,该方法的LOD范围0.033~0.05 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,在实际案件应用中具有较好的表现。路林超等^[33]建立了检测TNT、RDX、HMX、CE、PETN、NG六种有机炸药及其爆炸残留物的HPLC-MS/MS检测,该方法以氯化铵为流动相缓冲盐,经实验发现该方法准确度好、灵敏度高,且可有效提高检测效率,为涉爆案件的处置提供了技术指导。蔺大伟等^[34]通过超高效液相色谱-四极杆静电场轨道阱质谱联用仪(HPLC-Q-Trap-MS)对6种炸药进行分析,结果表明,TNT、NG、HMX和RDX的质量浓度在10.0~1000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 内具有良好的线性关系,NG和PETN的质量浓度在20.0~2000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 内呈线性关系,LOD分别为5.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (TNT)、8.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (CE、HMX和RDX)和15.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (NG和PETN)。李晓飞等^[35]建立了新型的超高效液相色谱-四级杆串联飞行时间质谱测定方法(UPLC-Q-TOF/MS),采用Shim-pack Velox Biphenyl(2.1 mm×100 mm×2.7 μm)色谱柱和负离子的全扫描/数据依赖二级质谱扫描(Full MS/DDA-MS2)模式,检测了17种常见有机炸药,并对检测条件进行了优化,实现了快速准确检测17种常见有机炸药的效果(图9和附录中表2)。

综上,LC-MS技术通过优化前处理方法、电离模式和质谱构型,可以显著提升对复杂基质中痕量炸药的定性定量分析能力。其优势在于其适用于分析高沸点,难挥发,热不稳定物质,而大多数有机爆炸物的热稳定性都较差,所以LC-MS适用于大部分有机爆炸物,同时,因为

图9 17种有机炸药的提取离子色谱图^[35]Fig.9 Extracted ion chromatograms of 17 organic explosives^[35]

大部分无机爆炸物的化学成分是强电解质,在水溶液中发生完全电离,所以LC-MS也可以用于检测无机爆炸物,因此在爆炸物检验实际工作中会经常用到LC-MS^[36-37]。但是,其局限性在于其操作条件严格,重复性稍差,且由于色谱仪可能存在记忆效应,样品的分析结果会被残存在仪器内的物质影响^[38]。因此,LC-MS检测爆炸物时应严格控制实验条件,以确保理想的检测效果。

2 光谱分析技术

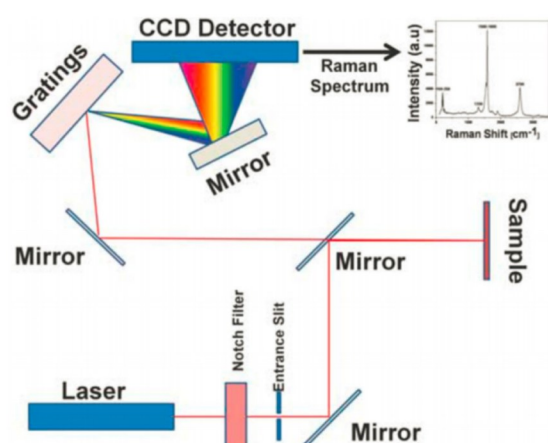
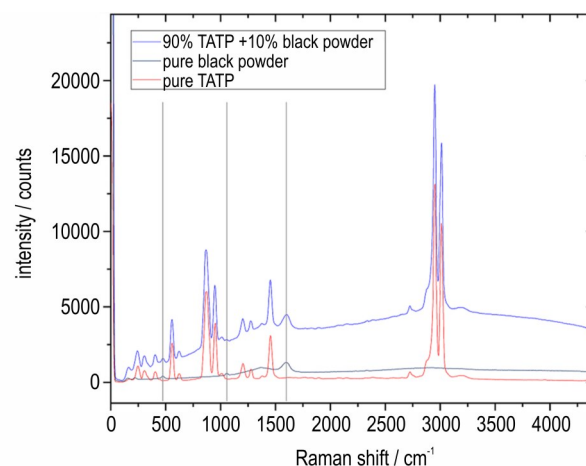
2.1 拉曼光谱法

拉曼光谱(Raman)是一种基于拉曼散射效应^[39],依据分子振动、转动能级的跃迁所产生的分子光谱^[40]。激光拉曼光谱分析技术是以拉曼效应为基础以获取分子结构和化学成分等信息的手段,由于不同物质具有独特的特征光谱,所以可以通过分析特征光谱对未知物质进行定性分析,其检测系统如图10所示^[41]。

通过优化激光参数、采用纳米材料和三维结构设计,研究人员成功提高了爆炸物如TATP、BP、TNT的

检测灵敏度,并显著降低了环境光干扰。Wild D等^[42]使用具有优化的重复频率和光束能量的脉冲纳秒激光进行实验,提出了一种在短时间内获得高质量拉曼光谱的方法,可以克服敏感爆炸物质在检测过程中发生燃烧的风险,实现快速可靠地检测爆炸物及其他危险化学物质。图11为该方法测得的敏感爆炸物TATP、BP以及两者混合物的拉曼光谱图,其混合光谱显示为TATP特征峰和BP特征峰的叠加结果。同时,该方法还可以将环境光对检测结果的影响降至最低。吴晶晶等^[43]以纳米纤维素为基底负载金银复合纳米颗粒(Au@AgNPs),构建了三维多孔结构的纳米纤维素气凝胶表面增强拉曼散射(SERS)传感器,该传感器对TNT的LOD达到 4.4×10^{-7} M。Wu J等^[44]以细菌纤维素气凝胶为基底负载被银纳米管附着的金纳米棒(AuNR@AgNCs),制备了一种新型的三维(3D)SERS传感器(图12),可用于检测微小痕量的TNT,LOD为 8×10^{-12} g·L⁻¹。

基于便携性、灵敏性等优势,手持式拉曼光谱仪在爆炸物现场检测中得到了广泛应用。通过优化仪器设

图10 拉曼光谱检测系统示意图^[41]Fig.10 Schematic diagram of the Raman system^[41]图11 敏感爆炸物TATP、BP以及两者混合物的拉曼光谱对比图^[42]Fig.11 Raman spectra of sensitive explosives TATP, BP and their mixtures^[42]

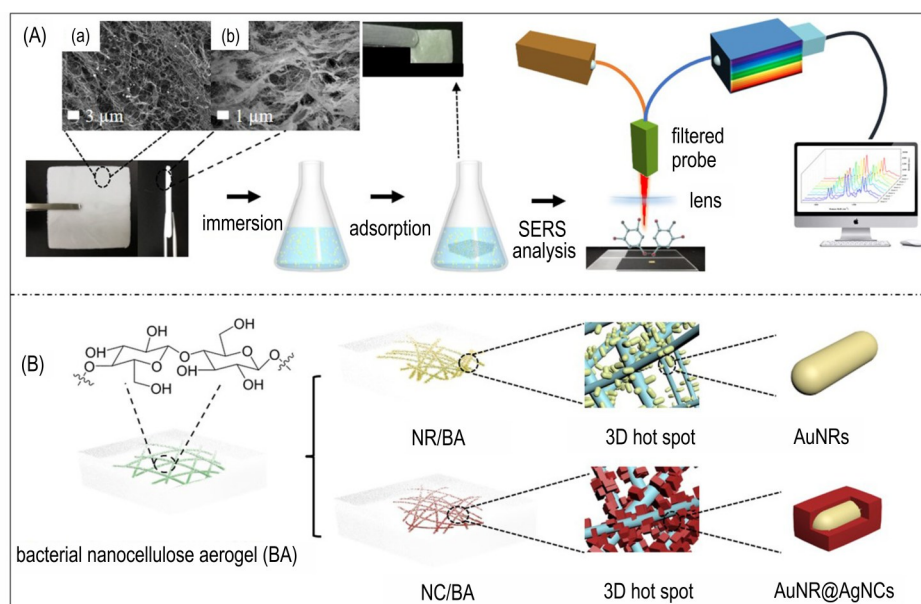


图 12 BC气凝胶基底负载 AuNRs, AuNR@AgNCs 制备 3D SERS 传感器原理示意图^[44]

Fig.12 Schematic illustration of the preparation of a 3D SERS sensor by loading AuNRs and AuNR@AgNCs onto a BC aerogel substrate^[44]

计和光源选择,可以提高爆炸物的检测灵敏度和抗干扰性,实现爆炸物的远距离、快速、灵敏检测。李永刚^[45]基于手持式拉曼红外一体机(Gemini,赛默飞世尔科技有限公司)进行爆炸物现场快速检测,得到了不同状态下的TATP和二过氧化二丙酮(DADP)的拉曼光谱。发现其在检测固体样品时,能够有效得到样品的拉曼光谱。但如果将样品溶解在丙酮试剂中时,样品的拉曼信号会被丙酮溶剂的拉曼信号遮蔽(图13)。同时检测了不同质量下TATP和DADP的拉曼光谱,得到手持式拉曼红外一体机对TATP和DADP的LOD为2 μg 。Alakai Defense Systems^[46-47]研发了采用深紫外(DUV)照明的便携式紫外拉曼爆炸物探测器(PRIED),能够增强拉曼信号、避免荧光干扰以及避免爆炸,能在10 m距离内识别出爆炸残留物,检测高效且准确率高,为现场检测爆炸物提供了条件,并且该团队几年后在PRIED的基础上开发了可单手操作的紫外

拉曼探测器 Argos,用于爆炸物的远距离痕量检测,Argos比PRIED更小、更轻,检测灵敏度更好(图14)。

先进的数据融合技术和信号处理方法可以提升拉曼光谱检测的准确性和检测范围,为爆炸物的快速、安全识别提供新的技术路径。陈争^[48]利用数据融合技术将红外光谱和拉曼光谱结合起来建立了基于SVM的爆炸物快速识别分类模型,该模型有效提升了预测准确率,研究发现把特征层融合后模型的预测准确率达到100%,为爆炸物的快速检测识别提供了新方法。Abdallah等^[49]建立了一种基于信号处理的拉曼光谱法,该方法能够对爆炸物进行实时检测和识别,并将其分类为安全物质或爆炸性物质,所用的识别模型通过MATLAB代码实现,对TNT、PETN、HMX、硝酸炸药(ANFO)和RDX进行鉴定的准确率分别为98.77%、97.41%、95.64%、97.2%和98.92%,在环境光条件下可在最远1 m的距离内进行检测(图15)。

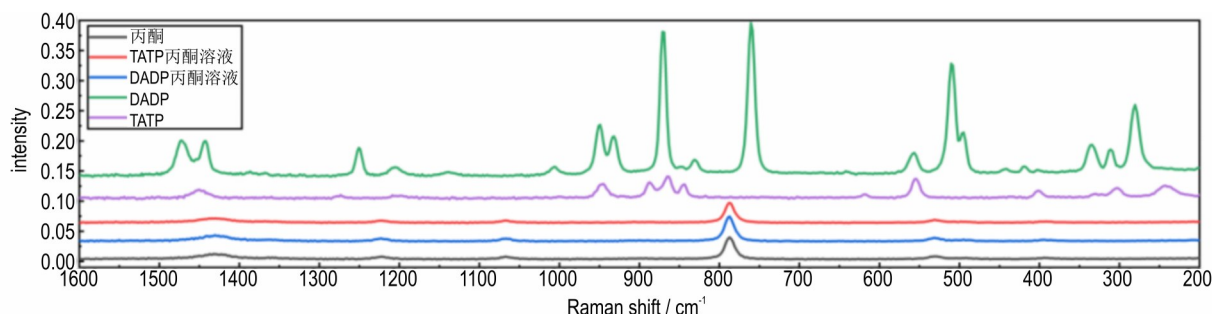
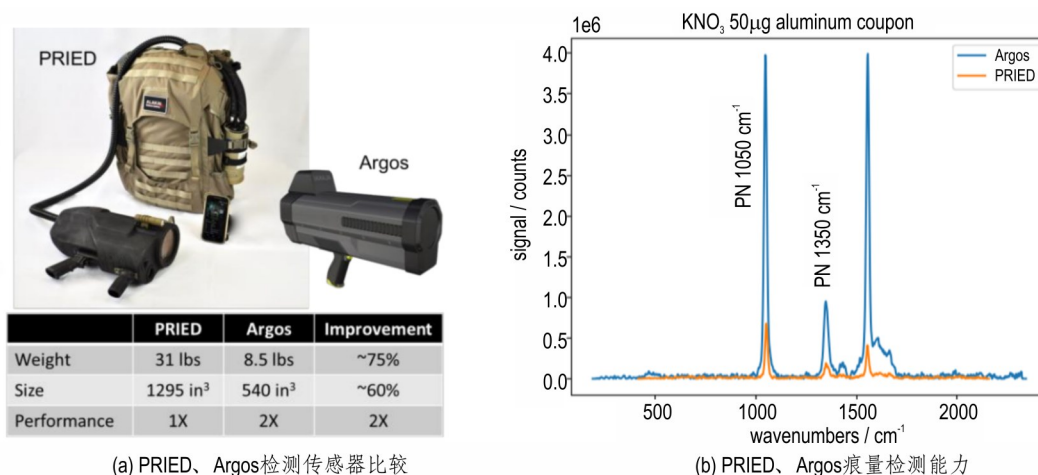
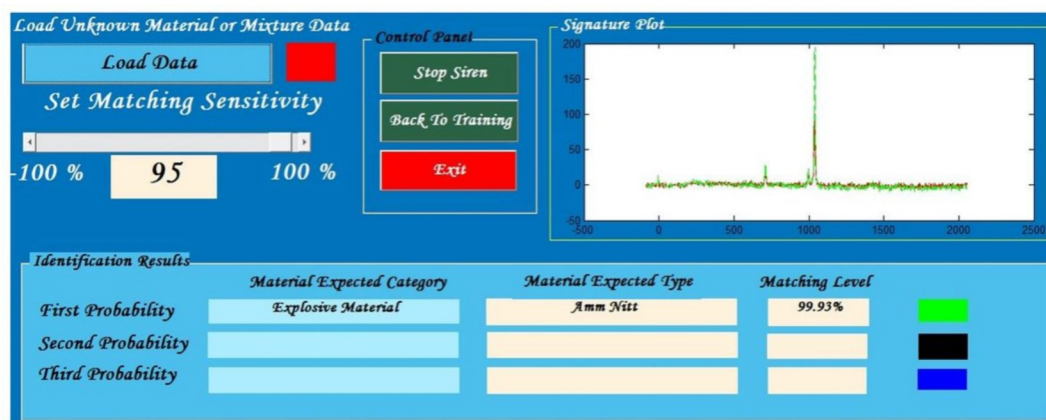


图 13 TATP、DADP 及其在丙酮溶液中的拉曼光谱^[45]

Fig.13 TATP, DADP and their Raman spectra in acetone solution^[45]

图 14 PRIED、Argos 检测设备及痕量检测能力^[47]Fig.14 PRIED and Argos trace detection sensors, and trace detection capability^[47]图 15 距离激发光源 1 m 处的硝酸铵拉曼光谱检测识别结果,匹配度为 99.93%^[49]Fig.15 Raman spectroscopy detection and identification results of ammonium nitrate at a distance of 1 m from the excitation laser source, with a matching degree of 99.93%^[49]

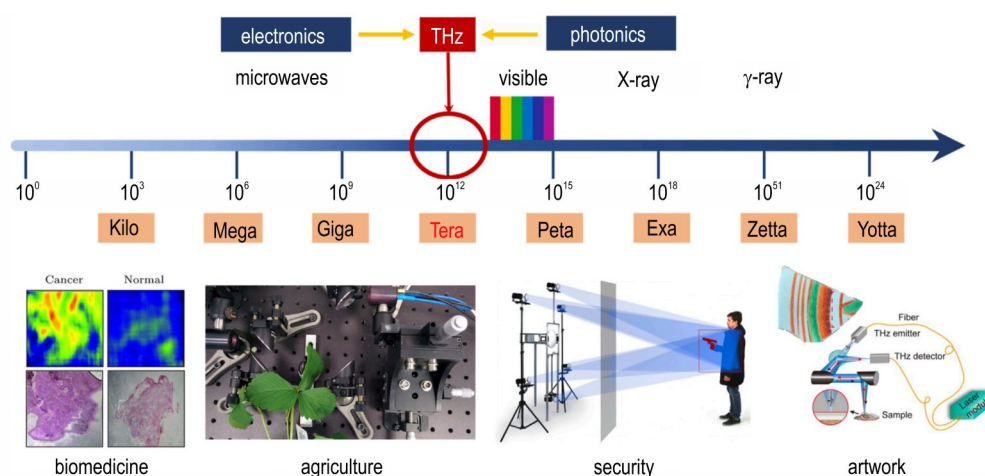
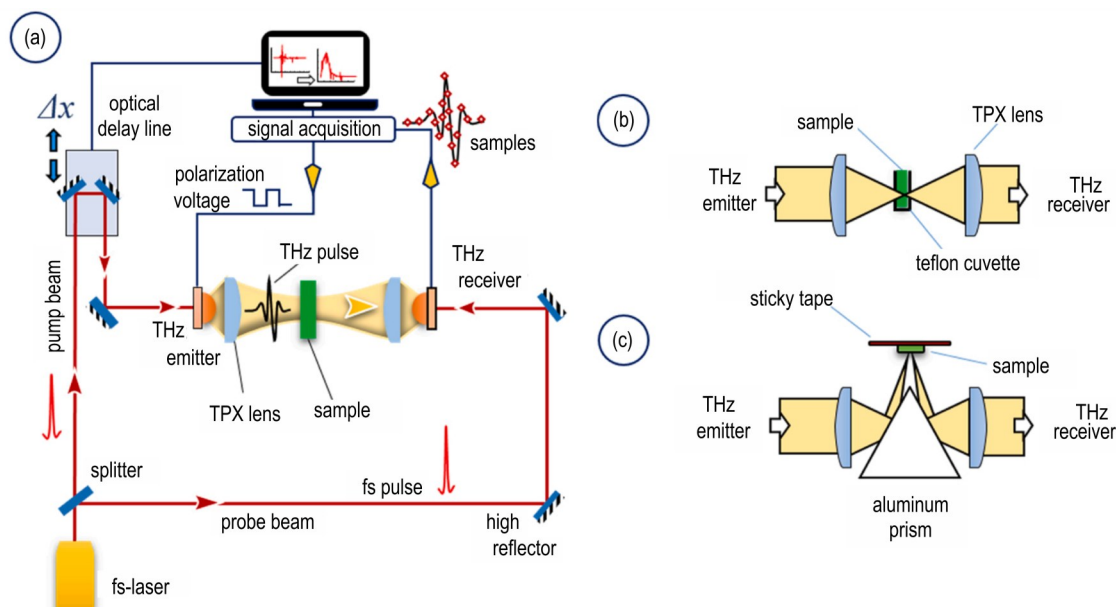
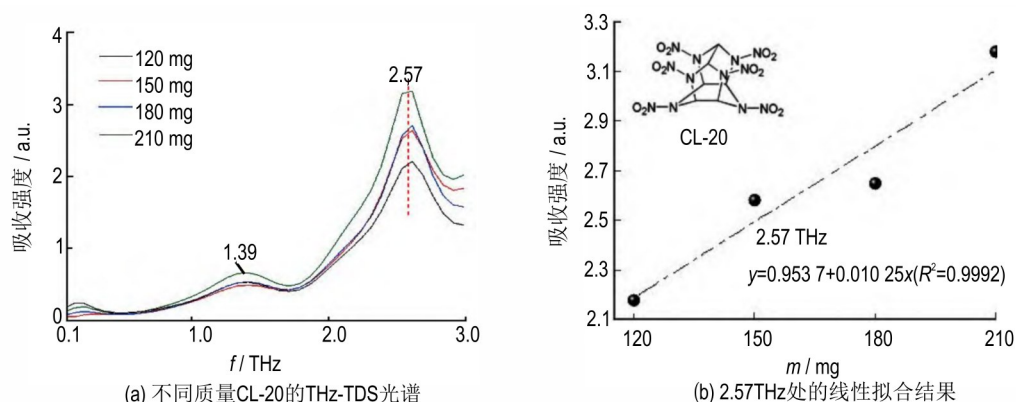
综上, Raman 法的优势在于激光束径微小、试样需求少,可在现场对 TATP、BP、TNT 等多类炸药实现微量、精准、快速识别^[50];样品无需前处理,可直接检测透明玻璃或塑料容器中的样品,同时手持式仪器的轻量化设计结合多模光源与先进数据融合、信号处理方法,可以进一步提高该方法的检验灵敏度、特异性和操作便捷性^[51-52]。但是其局限性在于拉曼光谱分析仪需要使用高能激光照射被测物质,对于感度大的炸药,极易发生爆炸风险,所以只适用于感度低的炸药,在实际应用中需在激光能量设计、安全封装及多技术互补检测方面持续优化^[42]。

2.2 太赫兹光谱法

太赫兹光谱 (THz) 的频率介于微波和红外线之间,因其具有生物安全性、指纹谱、穿透性好等独特的优势被应用于物质的检测和识别中(图 16)^[53]。太赫

兹时域光谱 (THz-TDS) 系统主要由脉冲激光器、太赫兹发射器、太赫兹探测器和时间延迟控制系统组成(图 17),飞秒激光器产生的信号被分为两路,一路激发样品,另一路作为参考,两路信号干涉叠加后被探测器测量,并记录样品对信号的影响,得到样品的物理信息,从而对样品进行定性分析^[54-55]。

通过谱库完善、定量模型构建及算法-成像融合,可以不断提升 THz-TDS 技术在复杂场景下对爆炸物的快速、灵敏、可靠识别能力。鄂秀天等^[56]利用 THz-TDS 技术检测了单环类、笼状类、含能离子盐三类共 10 种爆炸物的太赫兹吸收光谱,丰富了爆炸物的太赫兹吸收光谱数据库,并通过线性拟合,根据硝基或分子晶格振动所致的太赫兹特征吸收峰强度对每种含能材料建立了定量分析方法,六硝基六氮杂异伍兹烷 (CL-20) 的检测结果如图 18 所示。Trofimov V A 等^[57]提出了一种用于检测和识别表面不均匀样本的 THz-TDS 方

图 16 太赫兹光谱及其一些的典型应用^[53]Fig.16 Terahertz spectroscopy and some of its typical applications^[53]图 17 (a) 太赫兹时域光谱系统, 用于传输(b)和反射(c)作用的样品支架^[54]Fig.17 (a) Schematic diagram of THz-TDS experimental setup, two sample holders for transmission (b) and reflection (c) configuration^[54]图 18 THz-TDS 技术定性定量分析 CL-20 的结果^[56]Fig.18 Results of qualitative and quantitative analysis of CL-20 by THz-TDS technology^[56]

法,通过分析反射的宽带太赫兹信号中的脉冲信号,结合光谱动态分析(SDA)和积分相关准则(ICC),实现了在复杂表面条件下的高可靠性物质识别,该方法可实现实时检测,适用于安检场景。Plekhanov A A等^[58]通过具有高分辨率的太赫兹成像技术对厚度较低的爆炸物的太赫兹光谱特征进行研究,结果表明该方法可用于对各种表面上浓度在 $0.75\sim 50\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 范围内的爆炸物进行识别。Trofimov V A等^[59]建立了一种用于检测和识别具有相似光谱特性的三元混合物中爆炸物种类的高效工具,通过对主脉冲($\nu > 2.6\text{ THz}$)和次脉冲($\nu < 2.6\text{ THz}$)频率范围内显示出的混合物成分太赫兹光谱特征的分析,可以实现爆炸物识别的高准确性和可靠性。

通过制备石墨烯微纳天线、超材料共振结构与太赫兹增强传感器等工程手段,可以实现THz-TDS技术对TNT、RDX等爆炸物的高灵敏、快速精准检测。Singh G等^[60]设计了用于太赫兹光谱检测的多层双频石墨烯天线,并通过遗传算法优化获得 5.59 THz 和 7.71 THz 两种振荡频率,较低频率用于检测TNT爆炸物,较高频率用于检测褪黑素毒品,同时,该天线相比于传统天线具有尺寸更小、性能更优的特点。Koalla R等^[61]研究了一种太赫兹超材料,其具有 $5.3\text{ GHz}\cdot\text{RIU}^{-1}$ 的折射率灵敏度,通过研究 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 厚度的RDX和TNT在折射率变化下的太赫兹光谱特性(图19),可以对其进行精准识别,TNT(折射率1.61)的共振峰偏移了 0.032 THz ,RDX(折射率1.85)的共振峰偏移了 0.044 THz 。Wekalao J等^[62]通过在玻璃基板上沉积石墨烯和金制备了一种新型太赫兹增强传感器(图20),对NG、TNT和RDX进行识别,该传感器显著提高了对微量爆炸物检测的灵敏度和特异性,其最大灵敏度为 $927\text{ GHz}\cdot\text{RIU}^{-1}$,LOD为 0.189 RIU^{-1} 。

将深度学习模型与THz-TDS技术相结合,可以实现特殊条件下对爆炸物进行精准快速识别。曾子威等^[63]建立了一种基于太赫兹光谱技术的物质识别方法,该技术结合了Marr小波和深度学习方法,以TNT、RDX和淀粉为样本,测出在不同障碍物遮挡下的THz-TDS光谱,得到不同频率分辨率的太赫兹吸收光谱,再经Marr小波变换构建7200个样本的样本集,对样本集预处理后放入Xception网络训练,采用Adam优化算法等参数设置,该方法识别率达94%且频谱精确度不影响模型识别能力。该团队还建立了高湿度环境下爆炸物的太赫兹光谱检

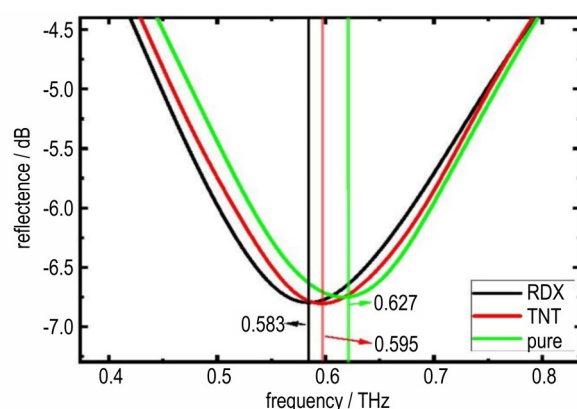


图19 沉积在超材料上的RDX和TNT太赫兹光谱特征图^[61]

Fig.19 Terahertz spectral characteristics of RDX and TNT deposited on metamaterials^[61]

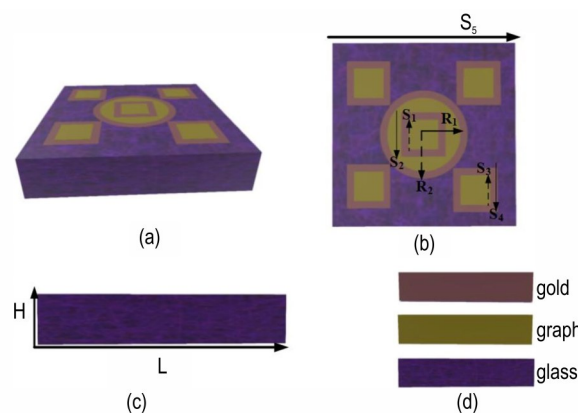


图20 设计的太赫兹增强传感器的三维视图^[62]

Fig.20 The three-dimensional view of the designed terahertz enhanced sensor^[62]

测方法,提取了不同环境湿度下的TNT、RDX等爆炸物的太赫兹光谱并进行数据处理,利用深度学习对数据进行训练,该方法检测准确率为96.6%(图21),该方法为在高湿度环境下识别爆炸物提供了解决方案^[64]。

综上,THz技术的优势在于其检测效果明显,许多炸药(如RDX,TNT,HMX,PETN,DNT等)在 $0.1\sim 10\text{ THz}$ 的光谱范围内有明显特征性吸收峰,使THz技术在检测爆炸物时有明显效果;安全性高,太赫兹光子能量低,仅有几毫电子伏特,在爆炸物检测方面相对安全,并且可以实现无损检测^[12,65-66];穿透性好,太赫兹波可以有效穿透大多数材料,包括包裹、行李、陶瓷等,可以实现对被覆盖物品进行检测^[67-68]。但是,该方法的局限性在于THz波对湿度与温度变化敏感,检测系统成本高,而且只能检测具有特征吸收峰的炸药,未来需在器件低成本化、多技术协同检测方面进一步突破。

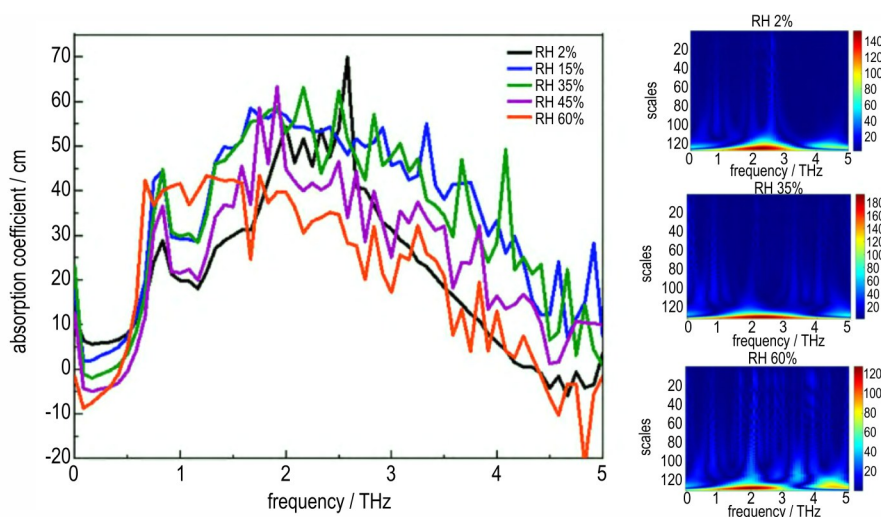


图 21 不同湿度下 RDX 的太赫兹吸收光谱和小波频域尺度图^[64]

Fig.21 Terahertz absorption spectra and Wavelet transform graphs of RDX at different humidity levels^[64]

3 离子迁移谱技术

离子迁移谱技术(IMS)是利用离子在电场中的迁移进行检测的技术。在离子源的电离作用下样品形成

离子,并在载气的推动下进入电场中,在电场力的作用下产生运动,因此不同的离子到达收集极的时间会不同^[69-70]。离子迁移谱系统主要由样品收集和引入部分、电离区、迁移管和探测器四个部分组成(图 22)^[70]。

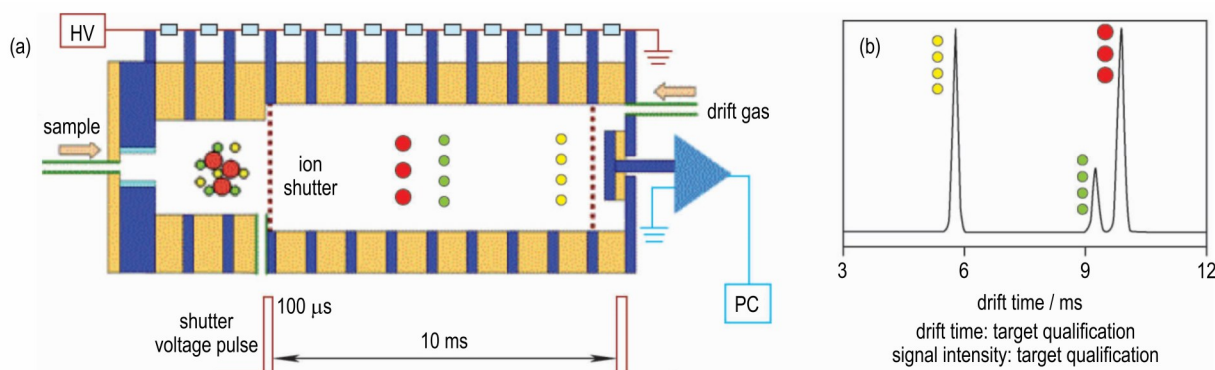


图 22 离子迁移谱系统结构(a)及离子分离原理图(b)^[70]

Fig.22 Structure of the ion mobility spectrometry system (a) and schematic diagram of ion separation principle (b)^[70]

IMS 技术对 TNT、RDX、PETN 等固态或低蒸汽压炸药的检测灵敏度和准确性主要受爆炸物蒸汽压、基质吸附-解吸特性以及采样、过滤器结构等方面的影响。Choi 等^[71]研究了利用离子迁移谱法检测混合在两种无机物质粉尘(二氧化硅和粘土)和两种有机粉尘(锯末和棉织物)中的三种炸药 TNT、RDX、PETN, 操作流程如图 23 所示, 研究发现影响爆炸物快速探测的因素有爆炸物本征蒸汽压、粉尘与爆炸物之间的相互作用、粉尘和收集过滤器的热导率以及收集过滤器的结构, 且发现吸附在粉尘上的爆炸物的检出限明显高于纯爆炸物。郝凤龙等^[72]利用 IMS 爆炸物探测器, 通过擦拭和吸气采样方式检测正常条

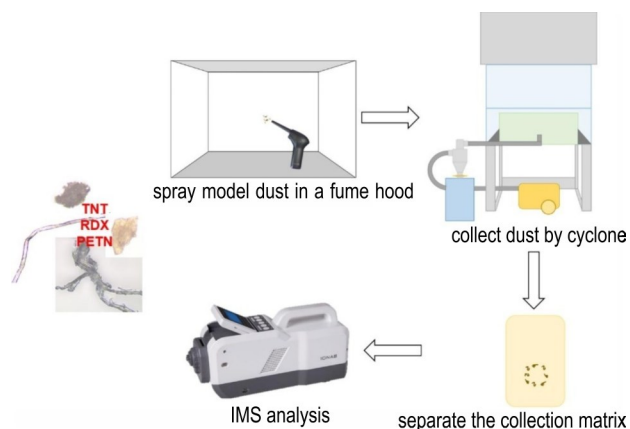


图 23 离子迁移谱法操作流程^[71]

Fig.23 Operation Flowchart of ion mobility Spectrometry^[71]

件下的 TNT、AN 等 11 种固态爆炸物,详细记录检测谱图等信息,其中擦拭采样结果为均报警,吸气采样结果为均未报警,通过观察 TNT 和 AN 的检测谱图,发现擦拭采样时的特征峰清晰可辨,可以用于鉴定样品,而吸气采样时仅有背景峰,未有样品特征峰,说明利用 IMS 技术检测固态爆炸物需要注意采样方式。Matáš E 等^[73]研制了一套结合激光脱附采样技术的 IMS 系统,对各种常见表面材料(如金属、陶瓷、塑料、玻璃等)上的常见爆炸物(TNT、DNT、RDX、PETN、C-4 塑性炸药、塞姆汀塑性炸药等)进行激光解吸(LD)采样检测,对特定表面上的不同爆

炸物确定了 LOD: TNT 为 $7 \text{ ng} \cdot \text{mm}^{-2}$, RDX、C-4、PETN 和塞姆汀塑料炸药为 $15 \text{ ng} \cdot \text{mm}^{-2}$,而 DNT 为 $50 \text{ ng} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。该设备高效、灵敏、便携,适用于野外或战斗区域使用。Son C E 等^[74]开发了一种分析低蒸气压爆炸物的 IMS 检测方法,该方法通过喷洒爆炸物丙酮溶液生成爆炸物蒸气,然后用不同的收集基质进行收集和检测,研究了以水平和垂直位置排列的不同材料的收集基质上的爆炸物离子迁移谱特征(图 24),结果表明,爆炸物气体检测效率的差异归因于收集装置的吸附和解吸能力,该方法可用于低蒸气压爆炸物的检测。

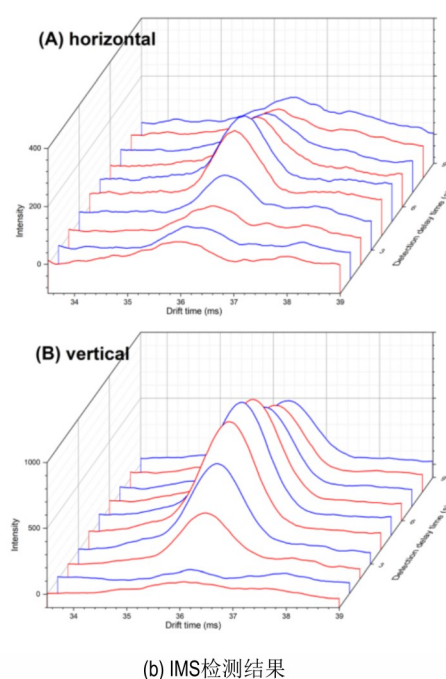
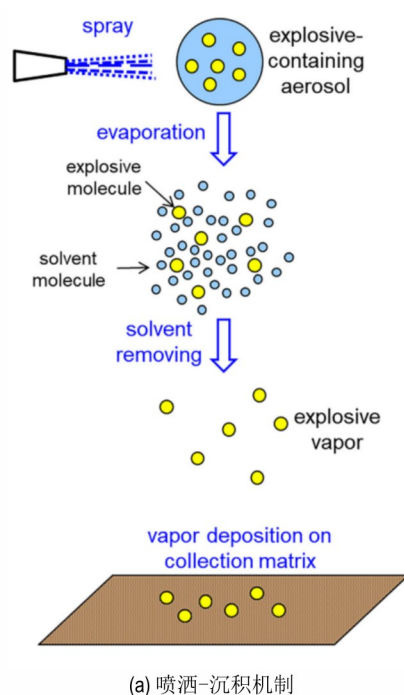


图 24 低蒸气压爆炸物喷洒-沉积机制和 IMS 检测结果^[74]

Fig.24 Low vapor pressure explosive spraying-deposition mechanism and IMS detection result^[74]

通过对高透膜材料和差分双通道离子迁移谱探测器的研究,可以显著提升对爆炸物的检测灵敏度和覆盖范围,并降低了系统维护复杂度。朱爽等^[75]研究了不同条件下的聚二甲基硅氧烷(PDMS)膜和聚四氟乙烯(PTFE)膜是否会影响自制 MI-IMS 的检测性能,发现 $100 \mu\text{m}$ 厚的 PDMS 膜不仅对样品具有高透性且会阻隔水蒸气,在实验条件下检测 TNT、NG、PETN、RDX,得到四种炸药的 LOD 分别是 109 、 37 、 172 pg 和 91 pg 。Szyposzyńska 等^[76]开发了一种基于差分离子迁移谱的固定安检装置(图 25),该设备安装了两个差分离子迁移谱探测器,其中一个有半透膜,另一个没有半透膜,这种设计可以同时检测低蒸汽压和高蒸汽压的爆炸物,该设备分析时间短,且在检测完成后能够进

行自校准和清洁避免后期维护调试。刘康怡等^[77]研制了双离子门结构的串联离子迁移谱,对硝酸铵(AN)、RDX、PETN 三种爆炸物的离子迁移谱进行研究,研究发现离子的碎裂程度主要受离子结构特性的影响,同时电场和温度的升高也会进一步促进其碎裂,二级碎片离子和母离子漂移时间相结合为爆炸物检测提供了丰富的化学信息,有望降低检爆仪器的假阳性率。

通过在微型迁移区构建非稳态强电场来增强离子迁移差异,可以实现离子短距离高分辨分离,从而在小型低功耗平台上大幅降低爆炸物的检出限。Yang B 等^[78]利用微型傅里叶分离离子迁移谱仪(FD-IMS)对黑火药进行检测(图 26),该方法明显提高了检测灵敏度,

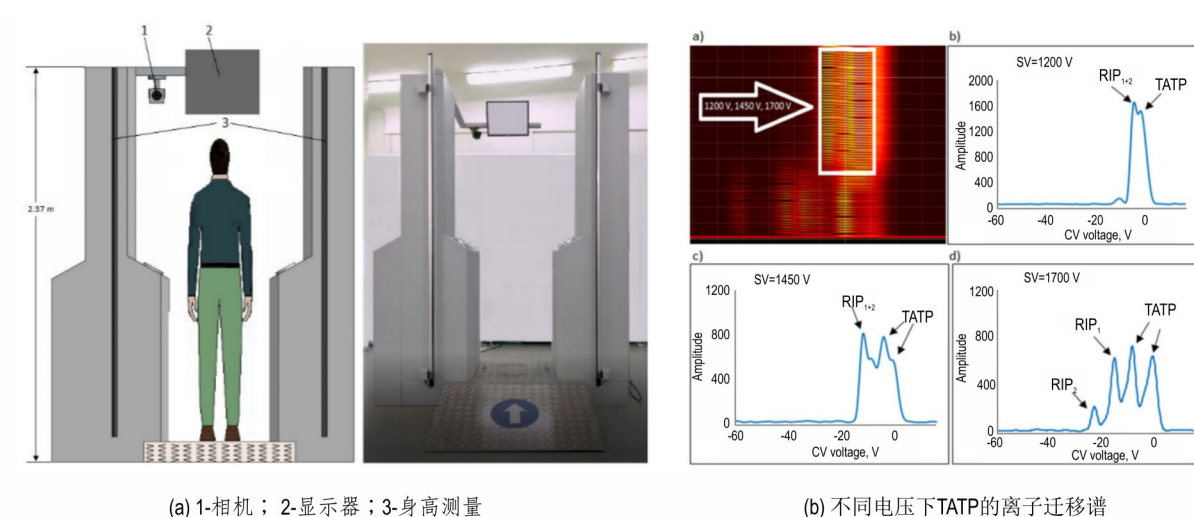


图 25 固定安检装置和 TATP 离子迁移谱检测结果^[76]

Fig.25 Fixed security inspection device and the detection results of IMS on TATP^[76]

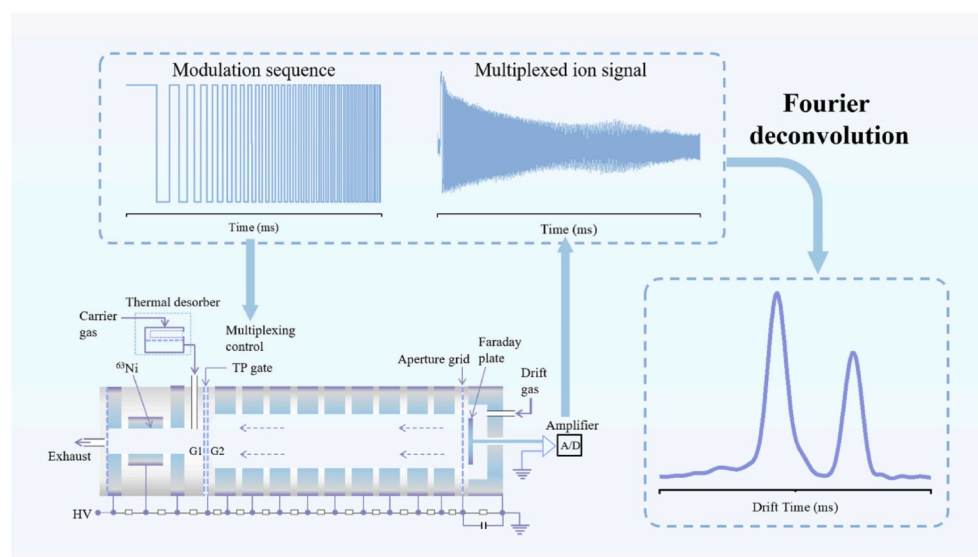


图 26 FD-IMS 原理图^[78]

Fig.26 Schematic diagram of FD-IMS^[78]

硫的 LOD 为 0.1 ng,同时验证了该方法也可以对含氮有机炸药进行检测,LOD 小于 1 ng。Kostarev V A 等^[79-80]设计了一种结合紫外激光电离和掺杂剂(甲苯和 1-甲基萘)的场不对称离子迁移谱仪(FAIMS,图 27),研究了其对含硝基爆炸物(RDX、HMX、PETN)的检测能力,结果表明,掺杂剂辅助激光电离检测的 LOD 为:RDX 为 3×10^{-15} ,PETN 为 8×10^{-15} ,HMX 为低于 $3 \times 10^{-15} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,该方法使用的激光功率更低、体积更小,在提高检测器灵敏度的基础上,又提高了 FAIMS 检测仪的便携性。

通过优化电离条件,可以提高爆炸物的检测灵敏度。张旭等^[81]研发了一种以电晕放电为电离源、可以同时检测正、负离子的双迁移管 IMS 检测仪,通过优化

气体流速、迁移管温度和热解吸温度等关键参数,对 RDX、甲基苯丙胺(METH)及 TNT 的取代产物 2,4-二氨基-6-硝基甲苯进行了检测,结果表明,在正、负离子模式下对 2,4-二氨基-6-硝基甲苯的 LOD 分别为 200、260 pg。Mullen M 等^[82]设计了一种以二次电喷雾电离(SECDI)为电离源的 IMS 检测仪(图 28),该方法结合了二次电喷雾电离(SES)和冠状放电(CD)的原理,实现了更高的灵敏度,对于痕量浓度的 TNT 和 2,6-DNT 蒸气,IMS 信号的增强幅度为单独使用 SES 或 CD 时的 2~26 倍。

综上,IMS 技术适用于易挥发炸药,其优势在于检测精度高,检测限低,可以检测 pg 级的样品浓度^[70,83-84];响应速度快,基于离子迁移谱技术的检测器

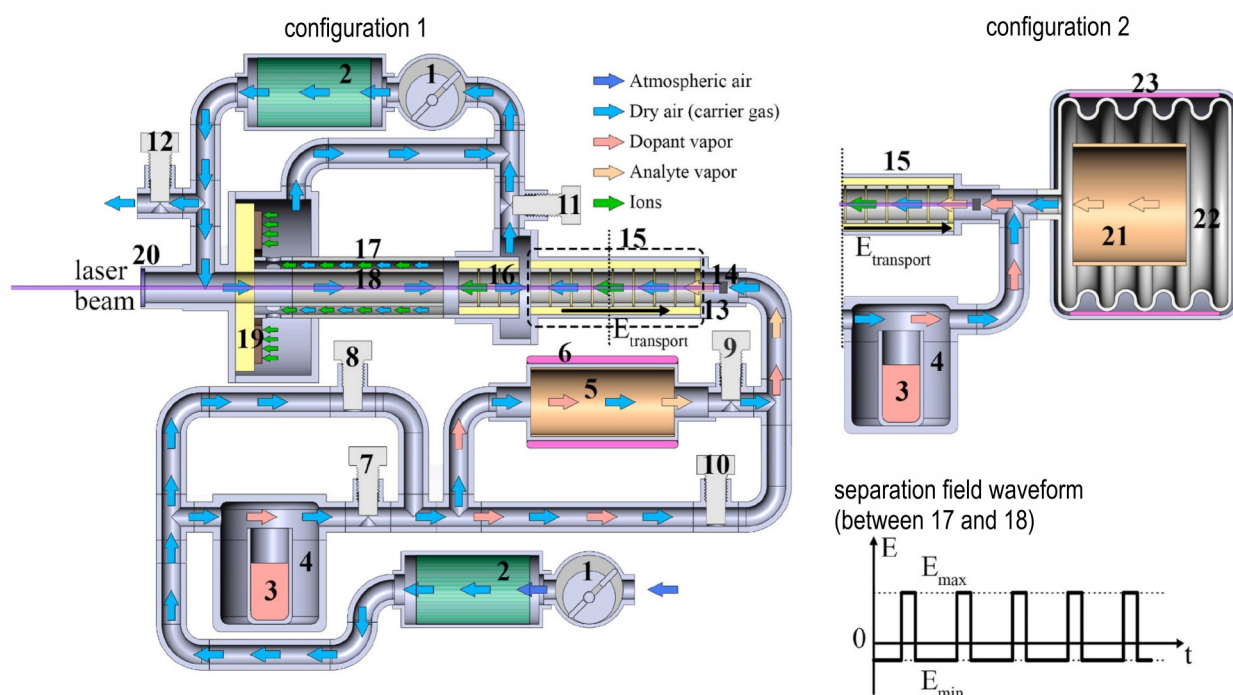


图 27 FAIMS 原理图:结合紫外激光电离和有机添加剂^[79]

Fig.27 Scheme of FAIMS:with ultraviolet laser ionization combined with organic additives^[79]

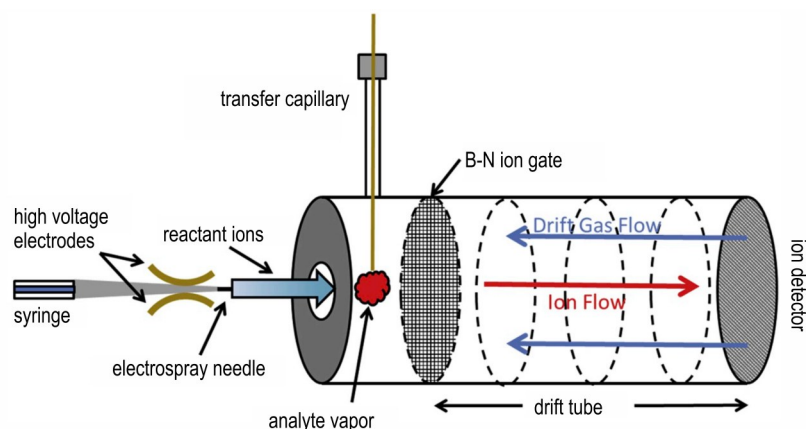


图 28 以 SECDI 为电离源的 IMS 检测仪^[82]

Fig.28 IMS detector using SECDI as the ionization source^[82]

可以在 5~30 s 内得到分析结果^[85-86];应用范围广,IMS 技术常用于危爆物品的检测,广泛用于机场安检等特殊场景^[87-89]。但是,其局限性在于受迁移管的长度限制,以离子迁移谱技术为基础的检测器体积难以精简,且分辨率与灵敏度难以平衡^[90]。未来应在离子源设计、场型优化、采样新材料等方面持续突破,以构建高灵敏、便携化、低假阳率的爆炸物快速检测体系。

4 化学传感技术

4.1 荧光探针法

爆炸物荧光探针检测技术是基于目标爆炸物与荧

光探针间的相互作用实现检测的。由于爆炸物本身通常不具备荧光特性,因而该方法属于间接检测手段,其核心在于捕捉荧光探针与爆炸物发生作用时引发的荧光变化^[91]。从理论层面来说,可以依据二者作用后产生的荧光强度(淬灭或增强)、波长、各向异性程度或荧光寿命等参数的改变,实现对爆炸物的精准检测^[92]。当前,在利用荧光探针法检测爆炸物的技术中,荧光猝灭法占据主导地位。该方法的原理主要有光诱导电子转移(PET)、能量共振转移(RET)以及分子间电荷转移(ICT),图 29 所示为 TNP 的 PET 过程、HOMO-LUMO 能级图和芯片检测结果^[91]。

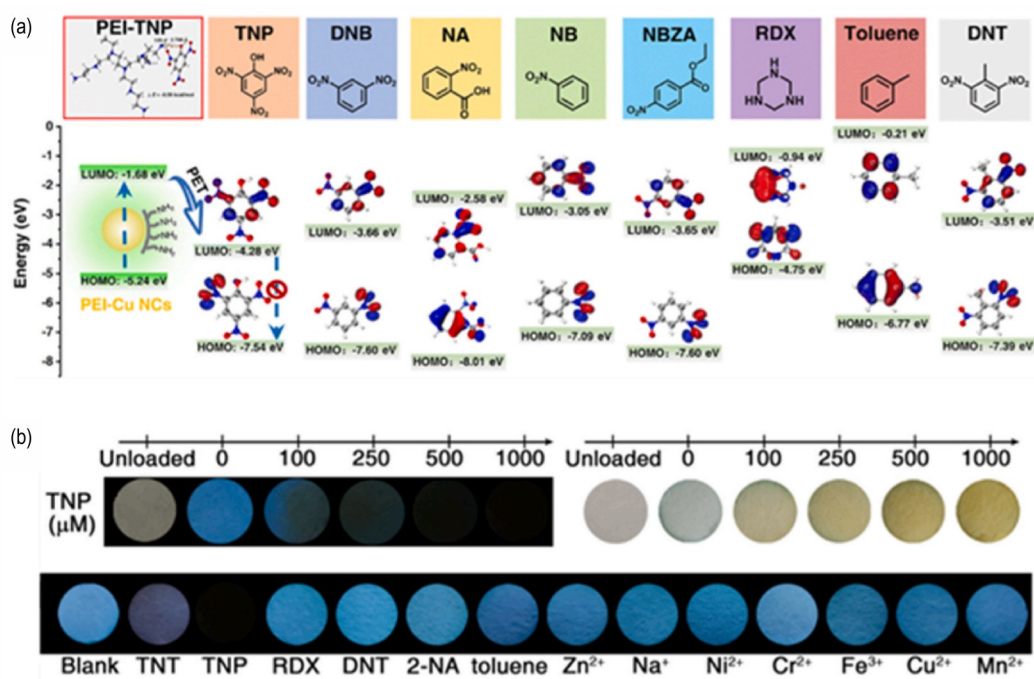


图 29 (a) TNP 的 PET 过程示意图以及 PEI-CuNCs、TNP 和有机配合物的 HOMO-LUMO 能级图; (b) PET 模式下 TNP 检测芯片图像及干扰物选择性研究^[91]

Fig. 29 (a) Schematic diagram of the PET process in fluorescence quenching of TNP and HOMO-LUMO energy levels of PEI-CuNCs, TNP and organic analogues. (b) Images of the sensing chip for detecting TNP in fluorescent mode and the selectivity study of interferents^[91]

针对有机骨架荧光探针,利用硝基芳香族炸药和金属阳离子对发光体系的荧光猝灭效应,实现对 TNP、TNT 等有机爆炸物和金属阳离子的高选择性、高灵敏度识别。杨成等^[93]以苯甲酸乙酯为骨架,在不同位置引入不同数量的三苯乙烯和四苯乙烯,制备了含苯甲酸乙酯结构的系列共轭化合物 EB1~EB4 荧光探针,该荧光探针对于六种硝基芳香族化合物具有良好的检测效果,做成试纸检测器的裸眼 LOD 为 $1.14 \text{ ng} \cdot \text{cm}^{-2}$,可以用于硝基芳烃爆炸物的快速识别。尤斐莹等^[94]设计了一种荧光探针分子 S1 (图 30),实验发现 S1 可以用于对硝基爆炸物的检测,以 4-硝基苯酚为爆炸物模型化合物,对其进行检测,发现该探针的 LOD 为 $4.59 \mu\text{M}$ 。Chen Z H 等^[95]通过 Suzuki-Miyaura 偶联反应合成了两

种新型的多功能 N-熔荧光探针,用于 Fe^{3+} 和 NACs 的荧光识别 (图 31),也适用于水环境中 NACs 的检测。将其附着在测试条和薄膜上可以制备 NACs 的便携式检测工具。Desai V 等^[96]设计并合成了一种基于氧杂杯芳烃的高效荧光探针 (DMANSOC),该探针可以高效检测水相体系中 TNP 爆炸物,浓度线性范围为 $7.5 \sim 50 \mu\text{M}$,LOD 低至 $4.64 \mu\text{M}$,对 TNP 的结合亲和力高达 $2.45 \times 10^4 \text{ M}$ (图 32)。冀超等^[97]制备了一种具有 fcu 拓扑的铈-金属有机骨架材料 JLU-MOF128,该荧光探针在二甲基甲酰胺 (DMF) 溶液中对 Fe^{3+} 、TNP 和 2,4-DNP 具有良好的灵敏度和选择性,LOD 分别为 5.99 、 1.51 、 $1.93 \mu\text{M} \cdot \text{L}^{-1}$,在金属阳离子和硝基芳香族爆炸物 (NACs) 的检测方面是一种理想的多感应荧光传感材料。

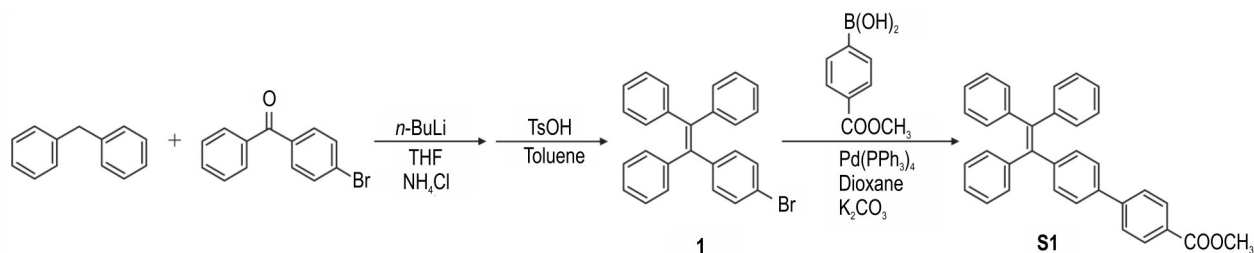
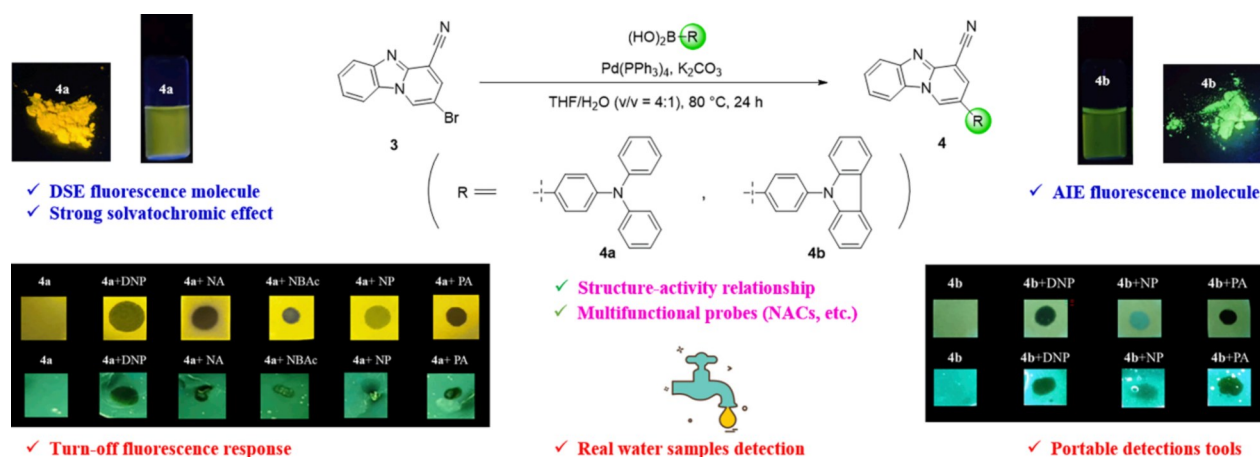
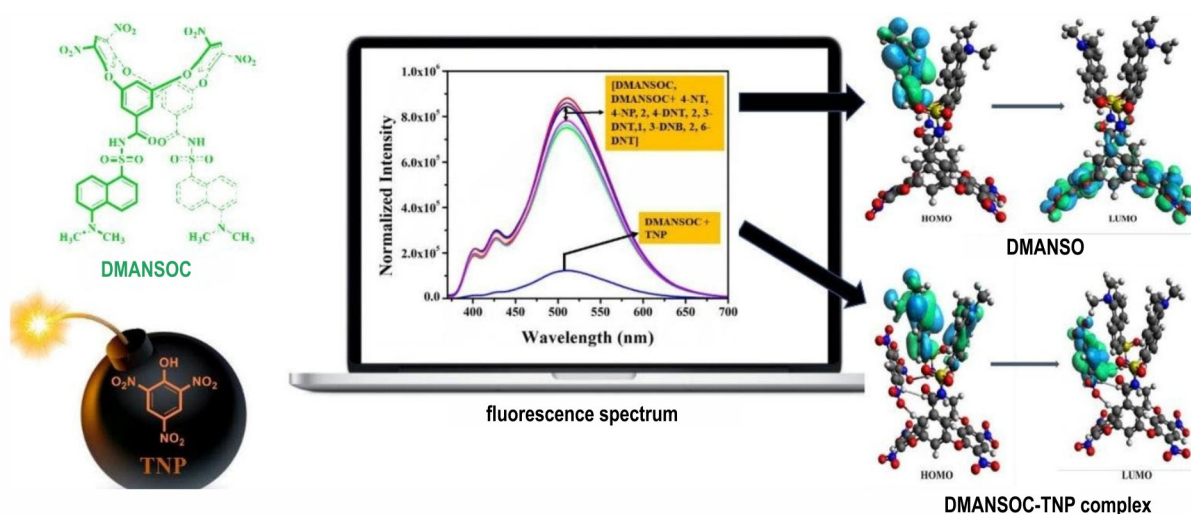


图 30 S1 合成原理^[94]

Fig.30 Synthesis Principle of S1^[94]

图 31 两种荧光探针的合成过程和对 DNP 的检测结果^[95]Fig.31 Synthesis process of two fluorescent probes and the detection results of DNP^[95]图 32 DMANSOC 的化学结构式和对 TNP 的检测结果^[96]Fig.32 Chemical structural formula of DMANSOC and the detection results of TNP^[96]

利用功能化纳米结构无机骨架荧光探针,可以实现对硝基芳香族炸药和硝酸盐等无机炸药的高效、精准识别。Rehman 等^[98]制备了一种二维铋钼氧化物(2D-BMO)纳米片用于检测硝基芳香族化合物,如聚酰胺(PA)、2,4-二硝基苯肼(2,4-DNPH),发现该纳米片在检测 PA 和 2,4-DNPH 时具有高选择性和高灵敏度,如图 33 所示,2D-BMO、PA 和 2,4-DNPH 均有明显的紫外-可见吸收光谱特征峰,向 2D-BMO 中加入 PA 和 2,4-DNPH 后会出现蓝绿色荧光减弱现象,即荧光猝灭机制,该荧光猝灭现象会随 PA 和 2,4-DNPH 浓度的增加而增强,从而可以实现对检测物的定性定量分析,该方法对 PA 和 2,4-DNPH 的 LOD 分别是 2.21 nM 和 2.30 nM,线性范围分别是 50~1100 nM 和 50~1400 nM。Bhatt N 等^[99]合成了一种二硒化钨(WSe₂)量子点荧光探针,在 270 nm 处表现出强烈的

吸收,对 2,4,6-TNP 具有明显选择性,是一种具有高度稳定性、灵敏性和选择性的光致发光探针。Zhang J 等^[100]设计了一种新型荧光探针(10-CBMA),可以对溶液和固体条件下的硝酸盐进行精准识别,溶液条件下的 LOD 为 8.558×10^{-8} M,固体条件下快速检测时间为 2 mins,并且在其他干扰离子存在时仍具有出色的特异性。

综上,荧光探针检测只适用于特定炸药,其优势在于灵敏度高,荧光传感器在低浓度下也能得到准确结果;选择性好,通过设计合适的荧光探针分子,可以实现对特定目标物质的选择性识别和检测^[101];可视化,探针与样品作用产生的荧光是可见光,因此可以直接观察和记录荧光信号的变化^[91,102]。但是,其局限性在于抗干扰性弱,产生的荧光极易受到温度、光照等环境因素的影响,而且检测不同种类的样品需要重新制备

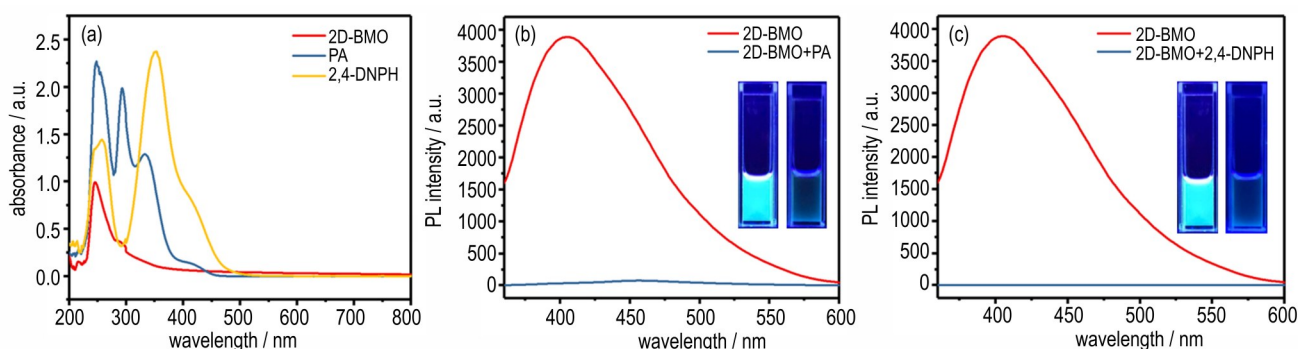


图33 2D-BMO纳米片、PA和2,4-DNPH的紫外-可见吸收光谱及其荧光猝灭现象^[98]

Fig.33 UV-visible absorption spectra and the fluorescence quenching of 2D-BMO nanosheets, PA, and 2,4-DNPH^[98]

合适的荧光探针^[103]。

4.2 化学比色法

化学比色法是利用样本与检测基体混合后发生化学反应形成偶氮染料、默森海默复合物等分子结构而产生颜色变化来进行定性分析的,并根据朗伯比尔定律(Lambert-Beer law)^[104]可知物质对某一波长光吸收的强弱与吸光物质的浓度及其液层厚度的关系成正比,从而实现定量分析^[105-106]。其计算公式为:

$$A = \lg(1/T) = Kbc \quad (1)$$

其中, A 为吸光度, T 为透射比(透光度),为出射光强度与入射光强度之比, K 为摩尔吸光系数,其与吸收物质的性质及入射光的波长 λ 有关, c 为吸光物质的浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, b 为吸收层厚度,cm。

通过针对炸药特征官能团的化学衍化或络合反应,将TNT、CL-20、TATP等爆炸物转化为显著可见色

差,可以实现无需仪器的比色快速识别,LOD可达ng级。Alizadeh N等^[107]使用 NaBH_4 在二甲基亚砜(DMSO)中对TNT进行化学还原,会生成一种稳定的红色产物,从而实现对TNT的选择性比色识别。Huang C等^[108]建立了一种基于 γ -环糊精(γ -CD)分子容器的超分子可视化比色法, γ -CD-TNT包合物能够与氢氧化钠反应生成具有增强吸收能力的有色迈森海默络合物,实现对TNT的高灵敏度比色检测,线性动态范围为0~200 μM 的,LOD为0.8 μM 。Tang J等^[109]通过将CL-20的水解过程与含亚硝酸盐的Griess反应有效串联起来,以生成一种呈粉红色的偶氮产物,实现了对CL-20的可视化定性定量分析(图34),灵敏度达nM级别。李永刚等^[110]基于酸性条件下过氧化物爆炸物快速分解产生的 H_2O_2 与草酸钛钾发生特征显色反应,建立了TATP、DADP的现场快速检测及区

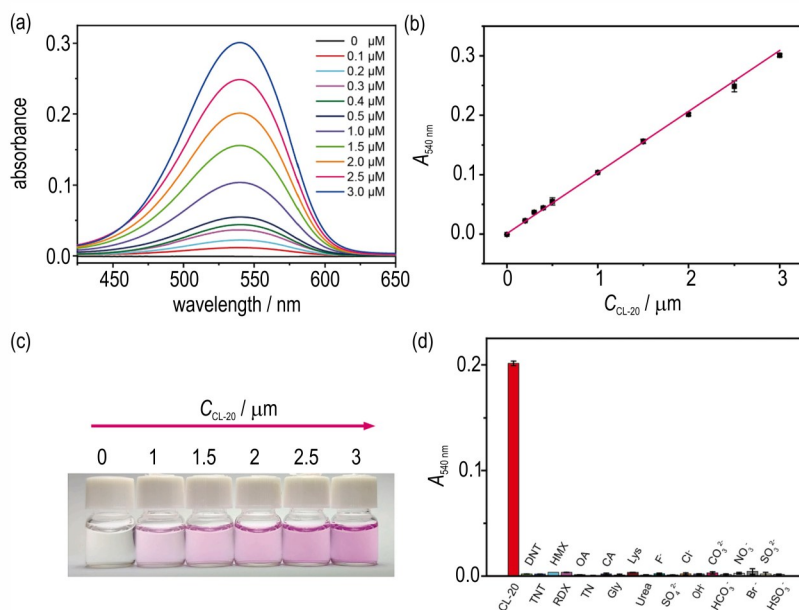


图34 不同浓度的CL-20的可视化定性定量分析^[109]

Fig.34 Visual qualitative and quantitative analysis of CL-20 at different concentrations^[109]

分方法,实现过氧化物爆炸物的定性和半定量分析。Liu Y等^[111]设计了一种基于 C_3H_7KO 和DMSO的即时检测识别常见爆炸物的通用比色试剂,对TNT、DNT、S和 $KMnO_4$ 的检测分别显现出紫红色、蓝绿色、黄绿色和绿色,LOD低至1.45 ng。

基于金纳米粒子(AuNPs)的比色探针具有极高的检测选择性和灵敏性,可以对痕量爆炸物进行检测。Demircioglu T等^[112]用四甲基硫代二磺酰胺(代姆)对合成的金纳米粒子表面进行修饰,制备了AuNPs@Thr

探针,实现了对TNT和CE的定性定量分析,LOD和LOQ分别为5和15 $\mu g \cdot L^{-1}$ 。Mamatioğlu F等^[113-114]设计了由4-ATP修饰的金纳米颗粒(4-ATP-AuNPs)和墨菲林(MEL)功能化的金纳米粒子(MEL-AuNPs,图35),其与氨基二硝酰胺(ADN)分解产物会发生反应产生有色产物,从而实现对ADN的定性定量分析,该方法测定ADN的LOD和LOQ分别为0.013 $\mu g \cdot L^{-1}$ 和0.043 $\mu g \cdot L^{-1}$,灵敏度很高,即使在皮摩尔以下也能用肉眼对ADN进行比色检测。

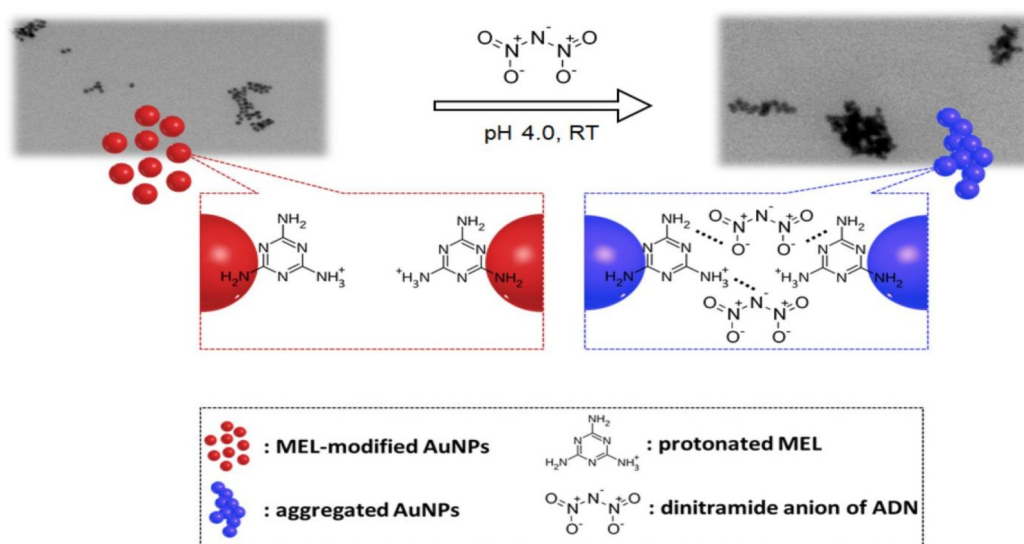


图35 MEL-AuNPs的设计原理^[114]

Fig.35 The design principle of MEL-AuNPs^[114]

荧光比色检测基于其荧光效果而具有更高的灵敏性。Batoool R等^[115]利用Suzuki-Miyaura偶联反应合成了三种基于芴的共轭聚合物(CP1、CP2和CP3),它们对TNP的荧光检测具有高度灵敏性,LOD分别为3.2、5.7 nM和6.1 nM。Ilyas Q等^[116]设计了两种基于荧光素的新型传感器F2和F3,该传感器对TNP爆炸物的LOD为F2: 0.73 nM, F3: 1.7 nM,已成功应用于工业水样中TNP炸药的荧光比色检测(如图36),制造的荧光条和爆炸物响应测试套件具有很好的经济性、便捷性。Junaid H M等^[117]合成的荧光酮传感器3对TNP具有纳米级选择性检测灵敏度,其LOD为0.5 nM,传感器4和5对TNT具有高度选择性和灵敏性,LOD分别为5.0 nM和7.0 nM。该方法通过荧光发射增强机制可以实现对工业废水中爆炸物的快速灵敏检测。Liu S等^[118]设计了一种基于木材与碳点(CDs)结合的便携式荧光木材(FW)试纸(图37),可用于快速识别和检测硝基芳烃爆炸物。碳点优化了木材的功能,而天然木材的多孔结构为碳点提供了网格结构,有效避

免了碳点的堆积。碳点通过多层封锁固定在木材骨架中,即使在恶劣的环境条件下其荧光强度也不会受到影响,确保了FW试纸对TNP检测的高灵敏度和选择性。

为了提高比色法识别爆炸物的效率和准确性,克服依赖肉眼观察的缺点,可以通过设计荧光比色传感阵列、图像处理程序和建立机器学习模型来对检测结果进行分析。郎宇博等^[119]设计了一种荧光比色传感阵列,获得了识别TNT、PA、Tetryl、RDX、PETN的指纹图谱,该方法具有较好的选择性和抗干扰能力,基本不受其他常见炸药离子的影响,准确率达100%。李宏达等^[120-121]设计了一种爆炸物液体比色传感器阵列,对TNT、PA、Tetryl三种爆炸物进行检测(图38),利用3种数学分析方法处理采集传感器阵列收集到的RGB值,实现了对3种爆炸物的准确区分和正确分类,识别准确率达100%。该方法对真实涉爆案件中15种常见的爆炸物进行检测,均取得很好的效果。Pourhasan等^[122]设计了一种苯酚-次氯酸盐试剂,该试剂与NTO

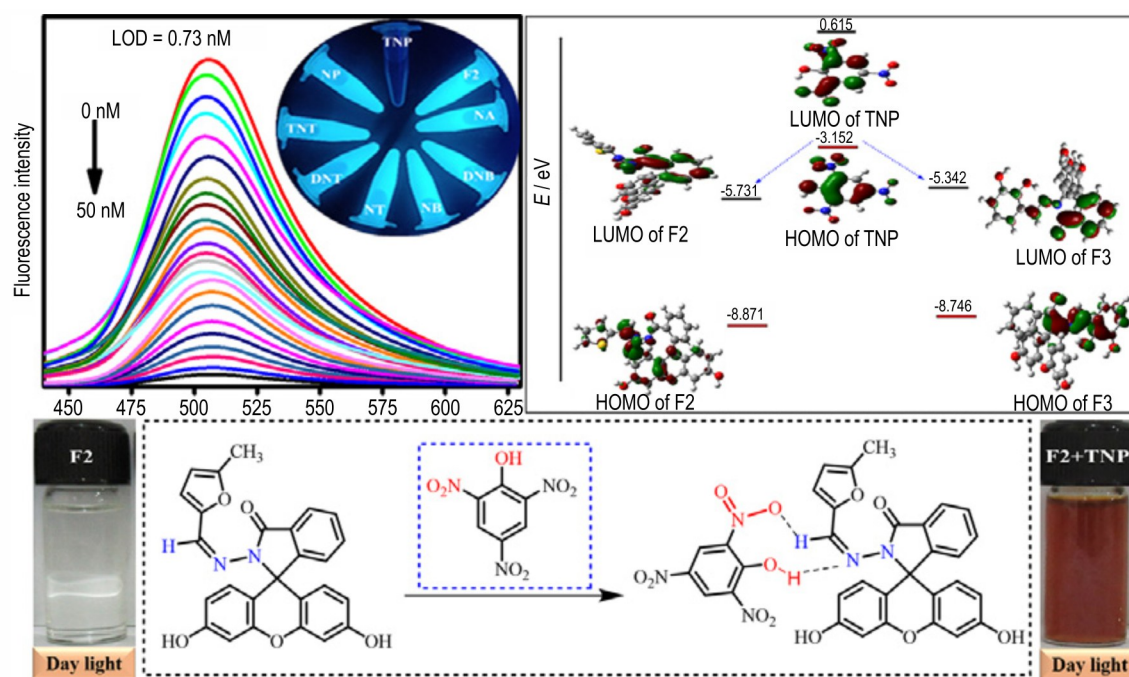


图 36 传感器 F2 的合成过程和对 TNP 的检测效果^[116]

Fig.36 Synthesis process of sensor F2 and its detection effect on TNP^[116]

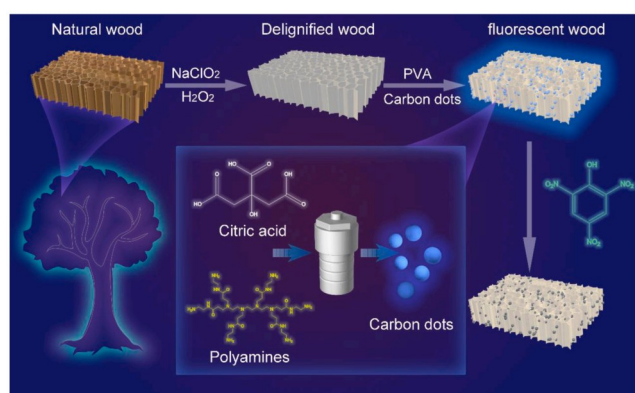


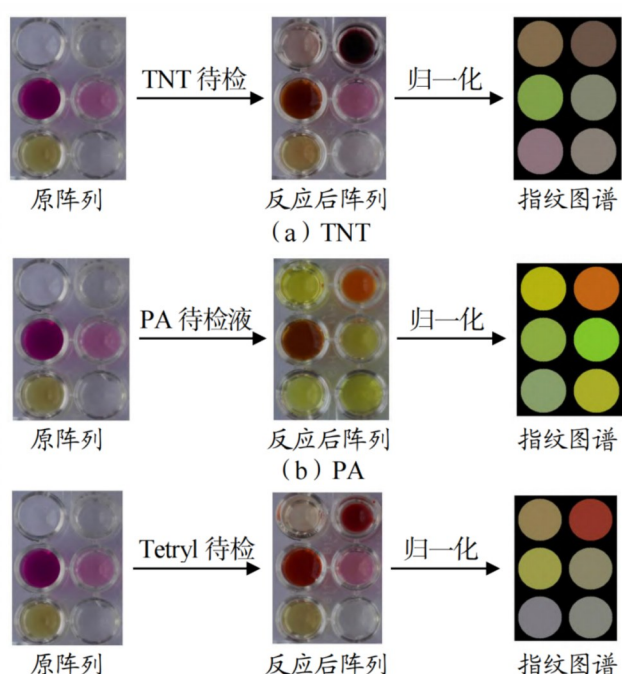
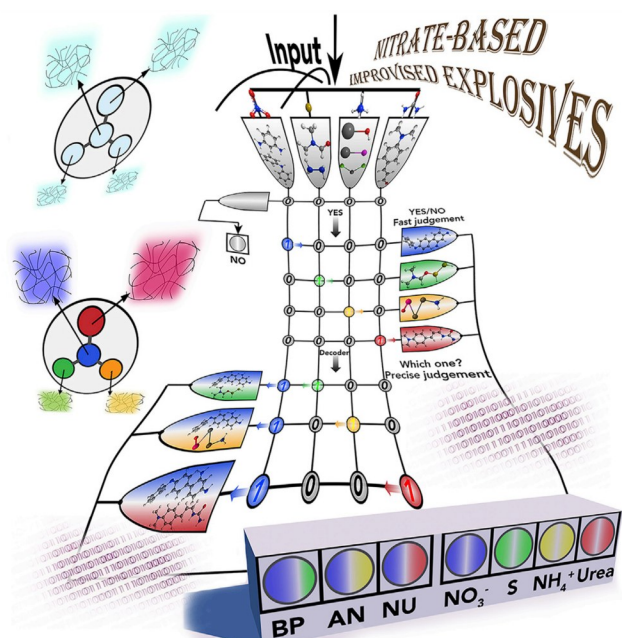
图 37 封装荧光碳点的木质比色试纸结构设计^[118]

Fig.37 Structural design of wood-based colorimetric test paper encapsulated with fluorescent carbon dots^[118]

反应会变成绿色,利用 MATLAB 编写程序提取并处理手机拍摄图像中的 RGB 三种颜色通道等信息,发现 RGB 中的 B 颜色通道会随着 NTO 浓度的变化而变化,根据此现象来绘制校准曲线,该方法检测限为 $3.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,且实验中发现该试剂与 NTO 的显色反应具有特异性,该方法的优势在于使用简单试剂和智能手机作为便捷设备,即可实现 NTO 炸药的高效检测。Wang G 等^[123]提出了一种色度逻辑设计(图 39),该设计利用“是/否”逻辑门来进行快速区分,并采用了色度解码器来进行更精确的判断,该方法可以对最常用的爆炸物(BP、AN、(硝酸尿素)UN 及其相关成分)进行

快速准确的识别,有望扩展到其他领域,如毒品检测、环境污染和诊断设备。Francis D P 等^[124]使用各种机器学习模型,基于含有 26 种化学响应染料的比色芯片的检测结果进行分析,对 HMTD、TATP 和 MEKP 检测的真阳性率(TPR)分别为 70~75%、73~90% 和 60~82%。根据化学反应的动力学对算法进行改进,利用 GPLASSO 算法对重要染料进行特征选择,提高识别准确性。

综上,化学比色法只适用于特定炸药,其优势在于操作简便,只需将样品融入试剂中,观察颜色变化并根据标准比色卡读取信息即可,且灵敏度高^[125-127];成本低廉,化学比色试剂价格一般不会很高,且一盒试剂可以连续检测多次,极大的降低了检测成本^[128-129];检测便捷迅速,以 96 孔聚合物凝胶传感器为例,该方法不需要对样本进行处理,可同时对 96 个爆炸物样本进行快速检测,检测准确且便捷^[130-131]。但是,其局限性在于易被干扰,有些物质可能和试剂发生反应生成分子,其颜色变化与期望一致;大部分仅适用于可见光范围,利用试剂颜色与标准比色卡比对,通常只能通过肉眼观察进行检测^[132-133],可通过构建荧光-比色多通道传感阵列、引入手机图像处理与机器学习算法,提升抗干扰与定量能力,实现低假阳率、自动化、现场化的高通量炸药检测体系。

图 38 TNT、PA、Tetryl 的指纹谱图^[120]Fig.38 Fingerprint spectra of TNT, PA, Tetryl^[120]图 39 色度逻辑设计原理图^[123]Fig.39 Schematic diagram of chromaticity logic design^[123]

5 总结与展望

本文对当前爆炸物快速检测技术(色谱-质谱联用技术、光谱分析技术、IMS技术和化学传感技术)的适用对象、优点和局限性及其研究应用现状进行了分析总结。其中,色谱-质谱联用技术兼具定性定量优势,

GC-MS法检测灵敏度可达fg级,但受限于技术,只能检测热稳定炸药;LC-MS法可检测硝酸铵等高沸点、难挥发、热不稳定炸药,但是存在溶剂效应与记忆效应问题。光谱分析技术中,Raman法可以实现非接触检测,样本前处理少,但强激光易诱发高感度炸药爆炸,适用于低感度炸药;THz法安全性高,可穿透塑料、织物等非极性材料,但对湿度、温度敏感且设备成本高昂,只能检测具有特征吸收峰的炸药。IMS基于离子迁移速率差异实现快速筛查,对常规炸药检测限低至纳克(ng)级,适用于易挥发炸药,响应时间短,但是设备体积大,难以兼顾分辨率与灵敏度。化学传感技术包括荧光探针法与化学比色法,两种技术都需要根据炸药性质制备探针分子和比色试剂,只适用于特定炸药。荧光探针法通过PET等机制可实现高灵敏检测,但易受环境干扰;化学比色法利用显色反应实现可视化检测,操作简便,但是大部分仅适用于可见光范围,通常只能通过肉眼观察进行检测。各类技术呈现互补性,实际应用需结合场景需求权衡灵敏度、特异性与实用性。对各种爆炸物现场快速检测技术的技术特点和研究应用现状的归纳总结,可以为技术人员开展爆炸物检验工作提供指导作用。

对爆炸物现场快速检测技术的发展方向进行展望,主要包括以下几个方面:(1)开展多技术融合,通过整合各类现场快速检测技术的优势,研发兼具灵敏度和便携性的集成化检测装置,以满足现场快速检测需求,如将IMS的秒级响应与Raman/THz的非接触定性、LC-MS的准确定量集成起来,实现“一键取样/多模判读”全流程操作;(2)开发多目标检测,研究广谱识别技术,实现对混合炸药中不同成分的同步检测,提升检测效率,如在前端采样口引入多孔固相微萃取-热解析耦合设计,实现对有机物、无机物及过氧化物的同步检测;(3)增强抗干扰能力,如通过对设备硬件的设计及软件的优化,增强检测设备在复杂环境(如高湿度、多背景噪声等)下的检测稳定性;(4)开展新材料研发,探究新型功能材料在爆炸物痕量检测中的应用潜力,如MOF金属有机骨架、碳量子点等;(5)推进智能化进程,将人工智能与检测设备相结合,对数据进行实时分析,提升检测设备的检测精准度和高效性。此外,还需强化技术标准化与实战化验证,推动研究成果向安检、反恐等实际应用场景转化,为社会公共安全治理提供有力保障。

参考文献:

- [1] 王大开, 芦鹏. 上合组织成员国恐袭形势分析及应对策略—基于GTD恐怖主义数据库[J]. 云南警官学院学报, 2023, (3): 58-67.
WANG Da-kai, LU Peng. Analysis of terrorist attack situations and response strategies in SCO member states: Based on the GTD terrorism database[J]. *The Journal of Yunnan Police College*, 2023, (3): 58-67.
- [2] LI Zhong-bei, LI Xiang-chun, DONG Chen, et al. Quantitative analysis of global terrorist attacks based on the global terrorism database[J]. *Sustainability*, 2021, 13(14): 7598-7598.
- [3] COLLETT G, LADYMAN M, HAZAEL R, et al. The use of a predictive threat analysis to propose revisions to existing risk assessments for precursor chemicals used in the manufacture of home-made explosives (HME) [J]. *Heliyon*, 2021, 7(12): e08343.
- [4] 张全, 张宏哲, 徐森, 等. 硝酸铵溶液的爆炸危险性及其储运安全条件研究[J]. 爆破器材, 2023, 52(3): 10-15.
ZHANG Quan, ZHANG Hong-zhe, XU Sen, et al. Study on explosion risk and safety conditions of storage and transportation of ammonium nitrate solution [J]. *Explosive Materials*, 2023, 52(3): 10-15.
- [5] DOCTOR A C, HUNTER S. The future of terrorist use of improvised explosive devices: Getting in front of an evolving threat [J]. *CTC Sentinel*, 2023, 16(11): 41.
- [6] QIN H, Stewart M G. Casualty risks induced by primary fragmentation hazards from high-explosive munitions[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 215: 107874.
- [7] BENDA A N, DOCTOR A C. Investigating terrorist use of improvised explosive devices in the united states[J]. *Perspectives on Terrorism*, 2025, 19(2): 99-112.
- [8] XU Z, LIN Y, CAI H, et al. Risk assessment and categorization of terrorist attacks based on the Global Terrorism Database from 1970 to 2020 [J]. *Humanities and Social Sciences Communications*, 2024, 11(1): 1-14.
- [9] BURYAKOV I A, BURYAKOV T I. State-of-the-art technologies in explosives detection [J]. *Journal of Analytical Chemistry*, 2025, 80(4): 591-607.
- [10] LI B, ZAPPALÁ G, DUMONT E, et al. Nitroaromatic explosives' detection and quantification using an attention-based transformer on surface-enhanced Raman spectroscopy maps [J]. *Analyst*, 2023, 148(19): 4787-4798.
- [11] FRANCIS D P, LAUSTSEN M, DOSSI E, et al. Machine learning methods for the detection of explosives, drugs and precursor chemicals gathered using a colorimetric sniffer sensor [J]. *Analytical Methods*, 2023, 15(19): 2343-2354.
- [12] 刘强, 张皋, 王嘉宇. 光谱分析技术在火炸药领域的应用研究进展[J]. 火炸药学报, 2023, 46(12): 1023-1042.
LIU Qiang, ZHANG Gao, WANG Jia-yu. Research progress in the application of spectral analysis technology for explosive and propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(12): 1023-1042.
- [13] 张瑞萍, 王琴, 暴雨霞. 太赫兹光谱技术在爆炸物探测中的应用及研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2024, 53(12): 20240293-1-20240293-8.
ZHANG Rui-ping, WANG Qin, BAO Li-xia. Application and research progress of terahertz spectroscopy technology in explosive detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(12): 20240293-1-20240293-8.
- [14] RANJAN S, CHAITALI R O Y, SINHA S K. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS): A comprehensive review of synergistic combinations and their applications in the past two decades [J]. *Journal of Analytical Sciences and Applied Biotechnology*, 2023, 5(2): 72-85.
- [15] 黄阳, 朱军, 胡灿, 等. 气相色谱-质谱法测定黑火药中硫磺 [J]. 分析试验室, 2022, 41(8): 930-933.
HUANG Yang, ZHU Jun, HU Can, et al. Determination of sulfur in black powder by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2022, 41(8): 930-933.
- [16] 周华, 张亮, 徐越, 等. GC-MS法检测过氧化物炸药 HMTD [J/OL]. 刑事技术, 1-7 [2025-03-24].
ZHOU Hua, ZHANG Liang, XU Yue, et al. Detection of peroxide explosive HMTD by GC-MS [J/OL]. *Forensic Science and Technology*, 1-7 [2025-03-24].
- [17] STAMBOULI H, BOURI A E, DAHROUCH A, et al. Novel Optimization of HMTD Traces Detection by HS-SPME- GC/MS and HS-SPME-GC/ μ ECD [J]. *Journal of Forensic Research*, 2019, 10: 1-4.
- [18] 万一夫, 杨瑞琴, 张冠男, 等. 气相色谱-三重四极杆质谱法快速检验爆炸案件中苦味酸 [J]. 分析测试学报, 2022, 41(12): 1808-1814.
WAN Yi-fu, YANG Rui-qin, ZHANG Guan-nan, et al. Rapid detection of bitter acid in Explosion cases by Gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2022, 41(12): 1808-1814.
- [19] BÜNNING T H, STREHSE J S, HOLLMANN A C, et al. A toolbox for the determination of nitroaromatic explosives in marine water, sediment, and biota samples on femtogram levels by gc-ms/ms [J]. *Toxics*, 2021, 9(3): 60.
- [20] ALEXIS J, HECKER BS, JOHN V. Screening of volatiles from explosive initiators and plastic-bonded explosives (PBX) using headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (SPME/GC-MS) [J]. *Forensic Sciences*, 2024, 69(3): 847-855.
- [21] PRAMOD S K, NAVNATH K A, PRAMOD S M, et al. A review on gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) [J]. *World J. Pharm. Res. Factor*, 2021, 10: 741-763.
- [22] MOQUIN K, HIGGINS A, LEARY P, et al. Optimized explosives analysis using portable gas chromatography-mass spectrometry for battlefield forensics [J]. *Current Trends in Mass Spectrometry*, 2020, 18(2): 10-17.
- [23] ARCE-RUBÍ S, VARGAS-RAMÍREZ S, SOLÍS-MONTIEL E, et al. Identification of organic explosives clues postexplosion by gc-ms and gc-npd method [J]. *Revista Tecnología en Marcha*, 2020, 33(3): 25-44.
- [24] JADHAV R U, DIGHE P R. Liquid chromatography-mass spectrometry-a brief review [J]. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 2025, 7(4): 1327-1343.
- [25] YANG L, SUN Y, WEI S, et al. Chemical profiling of Simiao pill and quantification of main effective constituents in it by ultra-high-performance liquid chromatography coupled with Q Exactive Orbitrap and triple quadrupole mass spectrometry [J]. *Journal of Separation Science*, 2024, 47(1): 2300615.
- [26] FANG X, XIE J, CHU S, et al. Quadrupole-linear ion trap tandem mass spectrometry system for clinical biomarker analysis [J]. *Engineering*, 2022, 16: 56-64.
- [27] 易可可, 谢洁, 龚晓云, 等. 液相色谱-串联质谱应用研究进展 [J]. 计量科学与技术, 2021, 2: 7-15.
YI Ke-ke, XIE Jie, GONG Xiao-yun, et al. Progress in the appli-

- cation study of liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *Metrology Science and Technology*, 2021, 2: 7-15.
- [28] IRLAM C R, PARKIN C M, BRABAZON P D, et al. Improved determination of femtogram-level organic explosives in multiple matrices using dual-sorbent solid phase extraction and liquid chromatography-high resolution accurate mass spectrometry[J]. *Talanta*, 2019, 20365-76.
- [29] 杏若婷, 杨琰鹏, 白卫兵, 等. 高效液相色谱法测定含铝熔铸炸药中组分含量[J]. *分析仪器*, 2024, (6): 46-49.
- XING Ruting, YANG Yanpeng, BAI Weibing, et al. Determination of component content in aluminium containing molten explosives by high-performance liquid chromatography [J]. *Analytical Instrumentation*, 2024, (6): 46-49.
- [30] SENER H, ANILANMERT B, CENGİZ S. A fast method for monitoring of organic explosives in soil: a gas temperature gradient approach in LC-APCI/MS/MS [J]. *Chem. Pap.*, 2017, 71: 971-979.
- [31] MATHIAS S, AMERIO-COX M, JACKSON T, et al. Performance comparison of ambient ionization techniques using a single quadrupole mass spectrometer for the analysis of amino acids, drugs, and explosives[J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2024, 35(10): 2480-2489.
- [32] 赵志东, 孟娇, 周殷玄, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定爆炸尘土中 5 种有机炸药的含量[J]. *理化检验-化学分册*, 2022, 58(4): 433-438.
- ZHAO Zhi-dong, MENG Jiao, ZHOU Yin-xuan, et al. Determination of 5 organic explosives in explosion dust by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *PTCA(PART B: CHEM. ANAL.)*, 2022, 58(4): 433-438.
- [33] 路林超, 武继锋, 马广鹏, 等. 超快速液相色谱-串联质谱法检测爆炸案件中常见有机炸药[J]. *刑事技术*, 2019, 44(3): 250-253.
- LU Lin-chao, WU Ji-feng, MA Guang-peng, et al. Analysis of common organic explosives from explosion cases by UFLC-MS/MS[J]. *Forensic Science and Technology*, 2019, 44(3): 250-253.
- [34] 蔺大伟, 夏庆兵, 邵凯, 等. 超高效液相色谱-四极杆静电场轨道阱质谱法定性-定量分析爆炸残留物中 6 种有机炸药[J]. *理化检验-化学分册*, 2023, 59(2): 160-165.
- LIN Da-wei, XIA Qing-bing, SHAO Kai, et al. Qualitative and quantitative analysis of six organic explosives in explosion residues by ultra-performance liquid chromatography-quadrupole electrostatic field orbital-well mass spectrometry [J]. *PTCA(PART B: CHEM. ANAL.)*, 2023, 59(2): 160-165.
- [35] 李晓飞, 谢伟宏, 徐洁蕾. UPLC-Q-TOF/MS 快速检验 17 种有机炸药[J]. *刑事技术*, 2023, 48(3): 300-305.
- LI Xiao-fei, XIE Wei-hong, XU Jie-lei. Rapid testing of 17 Organic explosives by UPLC-Q-TOF/MS [J]. *Forensic Science and Technology*, 2023, 48(3): 300-305.
- [36] AVCI G F Y, ANILANMERT B, CENGİZ S. Rapid and simple analysis of trace levels of three explosives in soil by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Acta Chromatographica*, 2017, 29(1): 45-56.
- [37] BECCARIA M, CABOOTER D. Current developments in LC-MS for pharmaceutical analysis [J]. *Analyst*, 2020, 145(4): 1129-1157.
- [38] ALI A H. High-performance liquid chromatography (HPLC): A review[J]. *Ann. Adv. Chem*, 2022, 6: 010-020.
- [39] RAMAN C V, KRISHNAN K S. A new type of secondary radiation[J]. *Nature*, 1928, 121(3048): 501-502.
- [40] 吴清华, 张振宇. 拉曼光谱技术在法庭科学领域中的应用[J]. *云南警官学院学报*, 2017, (4): 111-116.
- WU Qing-hua, ZHANG Zhen-yu. Application of raman spectroscopy in the field of forensic science[J]. *Journal of Yunnan Police College*, 2017, (4): 111-116.
- [41] BISWAS A, WANG T, BIRIS A S. Single metal nanoparticle spectroscopy: Optical characterization of individual nanosystems for biomedical applications[J]. *Nanoscale*, 2010, 2(9): 1560-1572.
- [42] WILD D, THEIß C, KONSTANTYNOVSKI K. Fast and safe detection of sensitive explosives via pulsed raman spectroscopy [J]. *The European Physical Journal Plus*, 2025, 140(8): 737.
- [43] 吴晶晶, 吴伟兵. 基于表面增强拉曼散射的纳米纤维素复合传感器[C]//中国化学会, 中国化学会第一届全国纤维素学术研讨会论文集, 南京, 2019: 225-226.
- WU Jing-jing, WU Wei-bing. Nanocellulocellulose composite sensor based on surface-enhanced Raman scattering [C]//Chinese Chemical Society, Proceedings of the First National Cellulose Academic Symposium of the Chinese Chemical Society, Nanjing, 2019: 225-226.
- [44] WU J, FENG Y, ZHANG L, et al. Nanocellulose-based surface-enhanced raman spectroscopy sensor for highly sensitive detection of TNT[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 248: 116766.
- [45] 李永刚. 常见过氧化丙酮类爆炸物的现场快速检测技术研究[D]. 中国人民公安大学, 2023.
- LI Yong-gang. On-site rapid detection for common acetone peroxide explosives [D]. People's Public Security University of China, 2023.
- [46] HOPKINS A J, COOPER J L, PROFETA L T M, et al. Portable deep-ultraviolet (duv) raman for standoff detection [J]. *Applied Spectroscopy*, 2016, 70(5): 861-873.
- [47] WATERBURY R, CONGHUYENTONNU T, HARDY H, et al. Development of a handheld UV Raman sensor for standoff trace detection-Argos [C]//Applied Industrial Spectroscopy. Optica Publishing Group, 2023: JW2A. 20.
- [48] 陈争. 基于红外-拉曼光谱的常见爆炸物快速识别分类研究[D]. 人民公安大学, 2023.
- CHEN Zheng. Research on rapid identification and classification of common explosives based on infrared and raman spectroscopy [D]. People's Public Security University of China, 2023.
- [49] ABDALLAH A, MAHMOUD A, MOKHTAR M, et al. Raman spectroscopic and advanced signal processing analyses for real time standoff detection and identification of explosives [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2022, 54: 265.
- [50] 李文俊, 高树辉, 石慧霞. 紫外拉曼光谱技术在法庭科学中的研究进展与应用展望[J]. *激光与光电子学进展*, 2025, 62(7): 0700004.
- LI Wen-jun, GAO Shu-hui, SHI Hui-xia. Progress and application prospects of ultraviolet raman spectroscopy in forensic science [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2025, 62(7): 0700004.
- [51] 黄钰聪, 张思航, 张巍. 拉曼光谱技术在法庭科学中的应用进展[J]. *山东化工*, 2023, 52(21): 142-147.
- HUANG Yu-cong, ZHANG Si-hang, ZHANG Wei. Application progress of raman spectroscopy in forensic science [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2023, 52(21): 142-147.
- [52] 付艳青, 张钊, 徐孟林. 炸药辨别误差的成因及解决方法—拉曼光谱技术和离子迁移谱技术的对比分析[J]. *警察技术*, 2019, (4): 92-94.
- FU Yan-qing, ZHANG Zhao, XU Meng-lin. The causes and so-

- lutions of explosive identification errors: A comparative analysis of raman spectroscopy and ion mobility spectrometry [J]. *Police Technology*, 2019, (4): 92–94.
- [53] FU X, LIU Y, CHEN Q, et al. Applications of terahertz spectroscopy in the detection and recognition of substances [J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 869537.
- [54] MAAMAR N, LAZOUL M, LATRECHE F Y, et al. Terahertz time-domain spectroscopy characterization of nitrocellulose in transmission and reflection configurations [J]. *Optik*, 2020, 224: 165711.
- [55] WANG Q, XIE L, YING Y. Overview of imaging methods based on terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2022, 57(3): 249–264.
- [56] 鄂秀天凤, 李伟, 任山福, 等. 太赫兹时域光谱技术定量检测含能材料研究[J]. 火工品, 2023 (5): 56–62.
E Xiu-tian-feng, LI Wei, REN Shan-fu, et al. Quantitative detection of typical explosives by terahertz time domain spectroscopy[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2023 (5): 56–62.
- [57] TROFIMOV V A, VARENTSOVA S A. High effective time-dependent THz spectroscopy method for the detection and identification of substances with inhomogeneous surface [J]. *Plos One*, 2018, 13(8): e0201297.
- [58] PLEKHANOV A A, AKMALOV A E, KOTKOVSKII G E, et al. Study of terahertz reflection spectra of optically thin RDX samples by terahertz imaging with spectral resolution [J]. *Optical Engineering*, 2023, 62(3): 034109–034109.
- [59] TROFIMOV V A, VARENTSOVA S A. A possible way for the detection and identification of dangerous substances in ternary mixtures using THz pulsed spectroscopy[J]. *Sensors*, 2019, 19 (10): 2365.
- [60] SINGH G, SANDHA K S, KANSAL A. GA based optimized graphene antenna design for detection of explosives and drugs using THz spectroscopy[J]. *Micro and Nanostructures*, 2023, 179: 207566.
- [61] KOALLA R, CHAUDHARY A K, CHOWDHURY D R. Application of terahertz metamaterials for low-concentration sensing of premium explosives like RDX and TNT [C]//Terahertz Photonics III. SPIE, 2024, 12994: 97–101.
- [62] WEKALAO J, U A K, ALBARGI H B, et al. Graphene and gold metasurface-based terahertz surface plasmon resonance sensor for explosive detection[J]. *Plasmonics*, 2024, 19(6): 3131–3145.
- [63] 曾子威, 李宏光, 郭宇烽, 等. 隐匿危险品高准确度太赫兹光谱识别方法[J]. 量子电子学报, 2023, 40(3): 340–348.
ZENG Zi-wei, LI Hong-guang, GUO Yu-feng, et al. High-accuracy terahertz spectral identification method for concealed dangerous goods[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2023, 40(3): 340–348.
- [64] 曾子威, 金尚忠, 李宏光, 等. 高湿度环境下爆炸物太赫兹光谱的特征提取与精准识别[J]. 光学精密工程, 2023, 31(7): 1065–1073.
ZENG Zi-wei, JIN Shang-zhong, LI Hong-guang, et al. Terahertz spectral features detection and accuracy identification of explosives in high humidity environment[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(7): 1065–1073.
- [65] SHARMA S, SHARMA U, PANDEY A, et al. Copper-silicon based THz metamaterial structure design for explosive detection[J]. *Microsystem Technologies*, 2025: 1–11.
- [66] NSENGIYUMVA W, ZHONG S, ZHENG L, et al. Sensing and nondestructive testing applications of terahertz spectroscopy and imaging systems: State-of-the-art and state-of-the-practice [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1–83.
- [67] YAN Z, SHI W. Detection of aging in the common explosive RDX using terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 39(3): A9–A12.
- [68] KUMAR P N, NAGARAJU M, ARJUN K V, et al. Comparative study of real-time terahertz imaging of concealed metallic objects, drug, wood and TNT explosive in transmission/reflection modes using uncooled microbolometer and ultrafast pulsed terahertz imaging systems[J]. *Indian Journal of Physics*, 2023, 97(10): 3109–3118.
- [69] MOHAMMED A F A, NABAT K Y, JIANG T, et al. Recent innovations in explosive trace detection: Advances and emerging technologies[J]. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 2025: e00261.
- [70] 徐一仟, 杨其穆, 蒋丹丹, 等. 超高分辨离子迁移谱技术及应用进展[J]. 质谱学报, 2021, 42(5): 610–622.
XU Yi-qian, YANG Qi-mu, JIANG Dan-dan, et al. Ultra-high resolution ion mobility spectrometry technology and application progress[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2021, 42(5): 610–622.
- [71] CHOI H R, SON C E, CHOI S S. Rapid detection of explosives in collected dust using ion mobility spectrometry[J]. *Microchemical Journal*, 2024, 203: 110882.
- [72] 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.
HAO Feng-long, ZHANG Qing-sheng, JIANG Ling-ling, et al. Trace explosive detection and analysis based on FQ and IMS [J]. *China Safety Science Journal*, 24, 34(11): 179–184.
- [73] MAŤAŠ E, PETRÍK M, SABO M, et al. Laser desorption of explosives from the surface of different real-world materials studied using C₂Cl₆-dopant-assisted ion mobility spectrometry [J]. *Molecules*, 2024, 29(18): 4482.
- [74] SON C E, CHOI H R, CHOI S S. Test method for vapor collection and ion mobility detection of explosives with low vapor pressure [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2023, 37(23): e9645.
- [75] 朱爽, 代渐雄, 黄小静, 等. 不同膜材料在离子迁移谱用于爆炸物检测中的对比研究[J]. 分析仪器, 2020, (4): 122–127.
ZHU Shuang, DAI Jian-xiong, HUANG Xiao-jing, et al. Comparative study on the impact different membrane materials on detection of explosive by ion mobility spectrometry [J]. *Analytical Instruments*, 2020, (4): 122–127.
- [76] SZYPOSYŃSKA M, SPŁAWSKA A, CEREMUGA M, et al. Stationary explosive trace detection system using differential ion mobility spectrometry (dms)[J]. *Sensors*, 2023, 23(20): 8586.
- [77] 刘康怡, 冼天信, 李灵峰, 等. 常压下配备强电场碎裂单元的串联离子迁移谱研制与爆炸物检测[J]. 质谱学报, 2025, 46(1): 106–114.
LIU Kang-yi, XIAN Tian-xin, LI Ling-feng, et al. Development of tandem ion mobility spectrometry with high-voltage fragmentation unit at atmospheric pressure for explosives detection [J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2025, 46 (1): 106–114.
- [78] YANG B, ZHENG X, LU F, et al. Accurate detection of trace level black powder with miniaturized Fourier deconvolution ion mobility spectrometer[J]. *Talanta*, 2026, 297: 128559.
- [79] KOSTAREV V A, KOTKOVSKII G E, CHISTYAKOV A A, et al. Detection of explosives in vapor phase by field asymmetric ion mobility spectrometry with dopant-assisted laser ionization [J]. *Talanta*, 2022, 245: 123414.
- [80] KOSTAREV V A, KOTKOVSKII G E, CHISTYAKOV A A, et al.

- Enhancement of characteristics of field asymmetric ion mobility spectrometer with laser ionization for detection of explosives in vapor phase[J]. *Chemosensors*, 2020, 8(4): 91.
- [81] 张旭, 宋瑜, 罗元江, 等. 基于电晕放电电离源的双迁移管离子迁移谱检测仪[J]. 质谱学报, 2024, 45(5): 616–623.
- ZHANG Xu, SONG Yu, LUO Yuan-jiang, et al. Dual-drift tube ion mobility spectrometry based on corona discharge ionization source[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2024, 45(5): 616–623.
- [82] MULLEN M, GIORDANO B C. Combined secondary electrospray and corona discharge ionization (SECDI) for improved detection of explosive vapors using drift tube ion mobility spectrometry[J]. *Talanta*, 2020, 209: 120544.
- [83] ARMENTA S, ESTEVE-TURRILLAS F A, ALCALÀ M. Analysis of hazardous chemicals by “stand alone” drift tube ion mobility spectrometry: A review[J]. *Analytical Methods*, 2020, 12(9): 1163–1181.
- [84] CHOI S S, SON C E, CHOI H R. Interference in ion mobility spectrometric detection of common explosives by lactic acid of human sweat[J]. *Talanta*, 2026, 297: 128685.
- [85] BURYAKOV T I, BURYAKOV I A. Detection of trace amounts of explosives in the presence of lactic acid by ion mobility spectrometry[J]. *Journal of Analytical Chemistry*, 2022, 77(1): 43–52.
- [86] SIM H S, LEE J, KIM C, et al. Comparative Analysis of Ion Mobility Spectrometry-Based Explosive Trace Detectors[J]. *Electronics*, 2025, 14(13): 2689.
- [87] 万一夫, 杨瑞琴, 刘占芳, 等. 常见有机炸药质谱检验技术进展[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2021, 3(3): 29–39.
- WAN Yi-fu, YANG Rui-qin, LIU Zhan-fang, et al. Development of organic explosives analysis by mass spectrometry[J]. *Journal of People's Public Security University of China (Natural Science Edition)*, 2021, 3(3): 29–39.
- [88] BURYAKOV T I, BURYAKOV I A. Detection of explosives: A comparison of analytical and operational characteristics of mass spectrometers and ion mobility spectrometers[J]. *Journal of Analytical Chemistry*, 2025, 80(3): 411–422.
- [89] FELIZZATO G, SABO M, PETRÌK M, et al. Laser desorption-ion mobility spectrometry of explosives for forensic and security applications[J]. *Molecules*, 2025, 30(1): 138.
- [90] 李文静. 爆炸物常用传感检测技术及其在安检领域的应用[J]. 中国安防, 2023, (5): 84–88.
- LI Wen-jing. Common sensing detection technologies for explosives and their applications in security inspection[J]. *China Security*, 2023, (5): 84–88.
- [91] GAO W, ZHAO H, SHANG L. Fluorescent metal nanoclusters for explosive detection: A review[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2024, 180: 117919.
- [92] ZHANG C L, YUAN Y X, ZHANG S M, et al. Biosensing platform based on fluorescence resonance energy transfer from up-converting nanocrystals to graphene oxide[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2011, 50(30): 6851–6854.
- [93] 杨成, 胡欣, 陶涛. 含苯甲酸乙酯结构的共轭材料对硝基芳烃爆炸物的荧光检测[J]. 发光学报, 2023, 44(10): 1862–1871.
- YANG Cheng, HU Xin, TAO Tao. Conjugated materials containing ethyl benzoate structure for fluorescent detection of nitroaromatic explosives[J]. *Chinese journal of luminescence*, 2023, 44(10): 1862–1871.
- [94] 尤斐莹, 范逸鎬, 洪周怡, 等. 四苯乙烯基荧光探针的合成及对硝基爆炸物的检测[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2021, 20(1): 8–12.
- YOU Fei-ying, FAN Yi-qi, HONG zhou-yi, et al. Synthesis of tetraphenylethylene-based fluorescent probe for nitro-explosive detection[J]. *Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 20(1): 8–12.
- [95] CHEN Z H, CHEN Z J, ZENG Y, et al. Multifunctional N-fused fluorescent probes for detection of iron ions and nitro explosives[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2025, 326: 125281.
- [96] DESAI V, MODI K, PANJWANI F, et al. Design and synthesis of an efficient fluorescent probe based on oxalix[4] arene for the selective detection of trinitrophenol (TNP) explosives in aqueous system[J]. *Journal of Fluorescence*, 2024, 34(3): 1219–1228.
- [97] 冀超, 李文, 张丽荣, 等. 一例 Eu-MOF 材料的构筑及对 Fe³⁺ 与硝基芳族爆炸物的荧光检测性能[J]. 高等学校化学学报, 2024, 45(2): 135–143.
- Ji Chao, Li Wen, ZHANG Lirong, et al. Construction of a eu-mof material with Fe³⁺ and nitro-aromatic explosives fluorescence detection performance[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2024, 45(2): 135–143.
- [98] REHMAN S, BABULAL S, MUSTAFA M, et al. Synthesis of two-dimensional bismuth molybdenum oxide (2D-BMO) nanosheets and their application as fluorescent probes for the detection of explosive nitroaromatic compounds[J]. *Environ. Sci.: Nano*, 2025, 12: 597–607.
- [99] BHATT N, MEHATA M S. WSe₂ Quantum Dots: A Fluorescent Probe for Ultra-Sensitive Detection of Explosive 2, 4, 6- Trinitrophenol[J]. *Materials Research Bulletin*, 2025: 113633.
- [100] ZHANG J, HU T, XIONG B, et al. Fluorescent probe/hydrogel-based portable platform for ultrasensitive on-site detection of explosive particles containing nitrite[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 475: 146311.
- [101] 余奕, 居佳, 栾林栋, 等. 光功能金属有机骨架材料在爆炸物检测中应用的研究进展[J]. 含能材料, 2017, 25(9): 786–792.
- YU Yi, JU Jia, LUAN Lin-dong, et al. Progress on luminescent metal-organic framework materials in the detection of explosive substances[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(9): 786–792.
- [102] 成乐琴, 陶韵琦, 张跃伟, 等. 有机小分子荧光探针结合静电纺丝用于爆炸物检测研究进展[J]. 发光学报, 2025, 46(1): 126–139.
- CHENG Le-qin, TAO Yun-qi, ZHANG Yue-wei, et al. Advances in integration of organic small molecule fluorescent probes with electrospinning techniques for detection of explosives[J]. *Chinese journal of luminescence*, 2025, 46(1): 126–139.
- [103] DESAI V, PANCHAL M, DEY S, et al. Recent advancements for the recognition of nitroaromatic explosives using calixarene based fluorescent probes[J]. *Journal of Fluorescence*, 2022, 32(1): 67–79.
- [104] SONG X, LIU L. A regression model of color value and substance concentration of colored solution based on lambert beer's law[C]//The International Conference on Cyber Security Intelligence and Analytics. Cham: Springer International Publishing, 2020: 814–820.
- [105] TAEFI Z, GHASEMI F, HORMOZI-NEZHAD M R. Selective colorimetric detection of pentaerythritol tetranitrate (PETN) using arginine-mediated aggregation of gold nanoparticles[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020, 228: 117803.
- [106] DHAKA G, JINDAL G, KAUR R, et al. Multianalyte azo dye

- as an on-site assay kit for colorimetric detection of Hg^{2+} ions and electrochemical sensing of Zn^{2+} ions[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020, 229: 117869.
- [107] ALIZADEH N, YOOSEFIAN J. Chemical reduction as a facile colorimetric approach for selective TNT detection by spectrophotometry and photothermal lens spectroscopy[J]. *Talanta*, 2023, 257: 124334.
- [108] HUANG C, WANG J, LIN J, et al. Improved colorimetric detection of 2, 4, 6-trinitrotoluene through γ -cyclodextrin complexation[J]. *Forensic Chemistry*, 2022, 30: 100444.
- [109] TANG J, WU J, HE Y. A naked-eye colorimetric assay for highly sensitive detection of CL-20 explosive[J]. *Forensic Chemistry*, 2024, 38: 100568.
- [110] 李永刚,张冠男,刘兴胜,等. 基于化学比色法的TATP和DADP现场快速检测及区分[J]. 分析试验室, 2023, 42(7): 903-909.
LI Yong-gang, ZHANG Guan-nan, LIU Xing-sheng, et al. On-site rapid detection and discrimination of TATP and DADP based on chemical colorimetric method[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2023, 42(7): 903-909.
- [111] LIU Y, LI J, WANG G, et al. One-step instantaneous detection of multiple military and improvised explosives facilitated by colorimetric reagent design [J]. *Analytical Chemistry*, 2020, 92(20): 13980-13988.
- [112] DEMIRCIOĞLU T, KAPLAN M, TEZGIN E, et al. A sensitive colorimetric nanoprobe based on gold nanoparticles functionalized with thiram fungicide for determination of TNT and tetryl[J]. *Microchemical Journal*, 2022, 176: 107251.
- [113] MAMATIOĞLU F, ÜZER A, ERÇAĞ E, et al. Development of a gold nanoparticles-based colorimetric sensor for the indirect determination of ammonium dinitramide and tetryl[J]. *Talanta*, 2021, 226: 122187.
- [114] MAMATIOĞLU F, ÜZER A, APAK R. Melamine-modified gold nanoparticle-based direct colorimetric sensing of the solid rocket propellant ammonium dinitramide (ADN) at Sub-Picomolar Levels[J]. *Analytical Letters*, 2025: 1-18.
- [115] BATOOL R, RIAZ N, JUNAID H M, et al. Fluorene-based fluorometric and colorimetric conjugated polymers for sensitive detection of 2, 4, 6-trinitrophenol explosive in aqueous medium[J]. *ACS omega*, 2021, 7(1): 1057-1070.
- [116] ILYAS Q, WASEEM M T, JUNAID H M, et al. Fluorescein based fluorescent and colorimetric sensors for sensitive detection of TNP explosive in aqueous medium: Application of logic gate[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2022, 272: 120994.
- [117] JUNAID H M, WASEEM M T, KHAN Z A, et al. Fluorescent and colorimetric sensors for selective detection of TNT and TNP explosives in aqueous medium through fluorescence emission enhancement mechanism[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2022, 428: 113865.
- [118] LIU S, DU G, RAN X, et al. Visual, customizable wood-based colorimetric test paper encapsulated with fluorescent carbon dots for rapid explosive detection [J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 194: 116398.
- [119] 郎宇博,李宏达,阎石,等. 荧光比色传感阵列结合计量学分析Tetryl、RDX和PETN[J]. 分析测试学报, 2023, 42(12): 1645-1651.
LANG Yu-bo, LI Hong-da, YAN Shi, et al. Analysis of TNT, PA, Tetryl, RDX, PETN by Fluorescence Colorimetric Sensing Array Combines Metrology[J]. *FENXI CESHIXUEBAO (Journal of Instrumental Analysis)*, 2023, 42(12): 1645-1651.
- [120] 李宏达,刘春庆,郎宇博,等. TNT、Tetryl、PA爆炸残留物液体比色传感阵列[J]. 火工品, 2022, (4): 72-76.
LI Hong-da, LIU Chun-qing, LANG Yu-bo, et al. Liquid colorimetric sensor array for TNT, tetryl and PA explosion residues[J]. *Initiators & pyrotechnics*, 2022, (4): 72-76.
- [121] 李宏达,刘春庆,尹雨晴,等. 基于碳量子点可视化识别TNT、PA、Tetryl的荧光比色传感阵列[J]. 火工品, 2023, (1): 74-80.
LI Hong-da, LIU Chun-qing, YIN Yu-qing, et al. Fluorescent colorimetric sensing array for visualization of TNT, PA and tetryl based on carbon quantum dots [J]. *Initiators & pyrotechnics*, 2023, (1): 74-80.
- [122] POURHASAN F S, POURETAL H R, DAMIRI S, et al. Spot test and quantitative analysis of NTO explosive by smartphone-based digital image colorimetry[J]. *Chemical Papers*, 2024, 78(12): 7201-7212.
- [123] WANG G, CAI Z, DOU X. Colorimetric logic design for rapid and precise discrimination of nitrate-based improvised explosives[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2021, 2(2): 1-16.
- [124] FRANCIS D P, LAUSTSEN M, DOSSI E, et al. Machine learning methods for the detection of explosives, drugs and precursor chemicals gathered using a colorimetric sniffer sensor[J]. *Analytical Methods*, 2023, 15(19): 2343-2354.
- [125] ÇEKEM B K, ÜZER A, APAK R. Direct colorimetric detection of triacetone triperoxide explosive by hydroxylamine-mediated Fenton chemistry catalyzed by goethite nanoparticles [J]. *Microchemical Journal*, 2024, 207: 111853.
- [126] ADEGOKE O, NIC DAEID N. Colorimetric optical nanosensors for trace explosive detection using metal nanoparticles: advances, pitfalls, and future perspective[J]. *Emerging Topics in Life Sciences*, 2021, 5(3): 367-379.
- [127] 曹润鱼,李毓姝,王广发,等. 爆炸物原料过氧化氢的比色和荧光可视化检测方法探讨[J]. 分析测试学报, 2021, 40(12): 1810-1818.
CAO Hui-yu, LI Yu-shu, WANG Guang-fa, et al. Investigation on colorimetric and fluorescent methods for visual detection of hydrogen peroxide explosive [J]. *FENXI CESHIXUEBAO (Journal of Instrumental Analysis)*, 2021, 40(12): 1810-1818.
- [128] ANUDEVI S D, EBENEZAR K K, NARAYAN S. Colorimetric methods using gold nanoparticles for forensic investigations [J]. *Forensic Science, Medicine and Pathology*, 2025: 1-19.
- [129] 郭林娥,杨军. 三过氧化三丙酮的识别检测技术研究进展[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2023, 29(3): 95-101.
GUO Lin'e, YANG Jun. Research Progress on Identification and Detection Technology of triacetone triperoxide[J]. *Journal of People's Public Security University of China (Natural Science Edition)*, 2023, 29(3): 95-101.
- [130] THIPWIMONMAS Y, THIANGCHANYA A, PHONCHAI A, et al. The development of digital image colorimetric quantitative analysis of multi-explosives using polymer gel sensors[J]. *Sensors*, 2021, 21(23): 8041.
- [131] WASEEM M T, JUNAID H M, GUL H, et al. Fluorene based fluorescent and colorimetric sensors for ultrasensitive detection of nitroaromatics in aqueous medium [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2022, 425: 113660.
- [132] PAUL T, CHOUDHURY D R, GHOSH D, et al. Advancements in optical sensors for explosive materials Identification: A comprehensive review[J]. *Results in Chemistry*, 2024, 8: 101602.
- [133] LI Y, LIU X, ZHANG G, et al. Rapid and selective on-site detection of triacetone triperoxide based on visual colorimetric method [J]. *Journal of Chemical Research*, 2022, 46(4): 17475198221117409.

附录：

表 1 爆炸物中英文名称及缩写对照

Table 1 The Chinese names, English names and abbreviations of explosives

chinese names	english names	abbreviations
黑火药	black powder	BP
六亚甲基三过氧化二胺	hexamethylene trioxide diamine	HMTD
三过氧化三丙酮	triacetone triperoxide	TATP
硝化甘油	nitroglycerin	NG
三硝基甲苯	trinitrotoluene	TNT
苦味酸	trinitrophenols	TNP
2,4,6-三硝基苯甲醚	2,4,6-trinitroanisole	TNA
二硝基甲苯	2,4-dinitrotoluene	DNT
黑索金	cyclonite	RDX
特屈儿	2,4,6-trinitrophenylmethylnitramine	CE
3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮	3-nitro-1,2,4-triazol-5-one	NTO
2,4-二硝基苯甲醚	2,4-dinitroanisole	DNAN
奥克托今	Cyclotetramethylene tetranitroamine	HMX
季戊四醇四硝酸酯	pentaerythrite tetranitrate	PETN
高氯酸铵	ammonium perchlorate	AP
二过氧化二丙酮	diacetone peroxide	DADP
硝铵炸药	ammonium nitrate-fuel oil	ANFO
六硝基六氮杂异伍兹烷	hexanitrohexaazaisowurtzitane	CL-20
硝酸铵	ammonium nitrate	AN
甲基苯丙胺	methamphetamine	METH
聚酰胺	polyamide	PA
2,4-二硝基苯肼	2,4-Dinitrophenylhydrazine	2,4-DNPH
硝基芳香族爆炸物	aromatic nitrocompound explosive	NACs

表 2 17 种有机炸药的质谱信息^[35]

Table 2 Mass spectrometric information of 17 organic explosives^[35]

compound	t_r /min	parent ion	theoretical mass number/(m/z)	measured mass number/(m/z)	error/ $\times 10^{-6}$	product ion 1 /(m/z)	product ion 2 /(m/z)
HMX	5.34	$[M + ^{35}Cl]^-$	331.01591	331.01627	1.09	182.99282	147.01613
RDX	4.89	$[M + ^{35}Cl]^-$	257.00428	257.00405	-0.89	248.97291	45.99284
CE	7.20	$[M + ^{35}Cl]^-$	321.98321	321.98387	2.05	245.99271	181.02514
TNT	6.97	$[M + ^{35}Cl]^-$	226.01056	226.01016	-1.77	197.00529	45.99292
2-Am-DNT	5.88	$[M + ^{35}Cl]^-$	232.01306	232.01268	-1.64	227.09169	196.03664
4-Am-DNT	6.19	$[M + ^{35}Cl]^-$	232.01306	232.01352	1.98	227.09094	196.03690
PETN	7.54	$[M + ^{35}Cl]^-$	350.98327	350.98311	-0.46	108.98909	61.98824
PYX	7.71	$[M - H]^-$	619.99995	619.99906	-1.44	572.99973	497.00911
2-HADNT	5.12	$[M - H]^-$	212.03129	212.03127	-0.09	194.02094	167.01009
4-HADNT	7.40	$[M - H]^-$	212.03129	212.03102	-1.27	182.03482	165.03095
1,2-DNG	3.54	$[M + ^{35}Cl]^-$	216.98690	216.98742	2.40	61.98803	—
1,3-DNG	3.32	$[M + ^{35}Cl]^-$	216.98690	216.98721	1.43	61.98803	—
3,5-DNA	5.41	$[M + ^{35}Cl]^-$	217.99741	217.99701	-1.83	153.03051	45.99291
R-SALT	3.71	$[M + ^{35}Cl]^-$	209.01954	209.01900	-2.58	197.80863	162.83961
4-NDPA	7.38	$[M - H]^-$	213.06695	213.06664	-1.45	183.06914	45.99329
NTO	0.65	$[M - H]^-$	129.00541	129.00495	-3.57	55.01708	—
4,4'-DNDPA	8.17	$[M - H]^-$	258.05203	258.05190	-0.50	198.05618	45.99324

Research Progress on Rapid On-Site Detection Technology of Explosives

TANG Yue¹, HU Chen-chen¹, MA Yi-ning¹, CAO Run-duo¹, BAI Cui-cui¹, QI Jin-zhong²

(1. Jiangsu Police Institute, Nanjing 210031, China; 2. Shuyang County Public Security Bureau, Suqian 223652, China)

Abstract: This paper reviews the research and application progress of four types of on-site rapid detection methods for explosives (chromatography-mass spectrometry coupling, spectroscopic analysis, ion mobility spectrometry, and chemical sensing), analyzes and summarizes their suitable targets, advantages, and limitations, and provides an outlook on their development directions. Among chromatography-mass spectrometry coupling technologies, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) offers high sensitivity and are suitable for volatile and thermally stable explosives. Liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS) requires stringent operating conditions but are suitable for most inorganic and organic explosives. Among spectroscopic techniques, Raman spectroscopy requires only a small sample amount and are simple to operate, but it poses explosion risks for highly sensitive explosives. Terahertz spectroscopy (THz) is safer and has strong penetration, but it is easily influenced by environmental factors and is suitable for explosives with characteristic absorption peaks. Ion mobility spectrometry (IMS) provides low detection limit and rapid response, but they are difficult to balance resolution and sensitivity, making it more appropriate for volatile explosives. Among chemical sensing technologies, fluorescence probe methods show high sensitivity, good selectivity, and visualization capabilities, but they are susceptible to interference and relatively complex to operate. Chemical colorimetric methods are simple, inexpensive, and fast-responding but are easily interfered with and mostly limited to the visible light. Both methods are only suitable for specific explosives. By analyzing and comparing existing technologies, it is proposed that future research should focus on the integration of multiple technologies, device miniaturization, enhancement of anti-interference capability, and optimization of multi-target detection capabilities, in order to improve the anti-interference performance, on-site rapid detection of multiple targets, and intelligence level of detection methods, providing a reference for perfecting on-site explosive detection technology and ensuring the effective implementation of safety and security measures.

Key words: explosives; on-site detection; chromatography-mass spectrometry coupling technology; spectroscopic analysis technology; ion mobility spectrometry (IMS); chemical sensing technology

CLC number: TJ55;O65

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025188

Grant support: Natural Science Foundation of Jiangsu Higher Education Institutions of China (No. 24KJB430016) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Police Institute of China (No. 2022SJYZ01)

(责编:高毅)