

爆炸物三过氧化三丙酮检测技术的研究进展

吕 旭^{1,2} 关 明^{1*}

(1.新疆师范大学化学化工学院,乌鲁木齐 830054;
2.中国科学院新疆理化技术研究所,乌鲁木齐 830011)

摘 要 三过氧化三丙酮(TATP)是一种制备方法简单、爆炸威力巨大的爆炸物,严重威胁国家和社会稳定,因此发展灵敏度高、选择性好、稳定性好、操作简单、快速准确的 TATP 检测技术,以实现痕量 TATP 的检测,对公共安全具有重大意义。现有的 TATP 检测技术主要有质谱、色谱、红外光谱、拉曼光谱、荧光、离子迁移谱检测技术等传统检测技术,以及基于电化学法、化学发光法、化学比色法、生物免疫的新型检测技术。综述了 TATP 检测技术的国内外发展现状和研究进展,比较了各检测技术的优缺点,分析了 TATP 痕量检测技术的发展趋势,基于化学比色法的新型 TATP 检测技术将成为今后的研究热点。

关键词 三过氧化三丙酮,爆炸物检测,研究进展

Research progress on detection technology of TATP

Lv Xu^{1,2} Guan Ming¹

(1.College of Chemistry and Chemical Engineering,Xinjiang Normal University,
Urumqi 830054;2.Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry,Chinese Academy of
Sciences,Urumqi 830011)

Abstract Triacetone peroxide (TATP) is a powerful explosive with facile preparation, which could be easily applied in terrorism attack resulting in a serious threat to the national security and social stability worldwide. Therefore, the development of TATP detection technology with high sensitivity, good selectivity, good stability, simple operation, fast and accurate to achieve the detection of trace TATP is of great significance to public safety. Existing TATP detection techniques included traditional techniques, such as mass spectrometry, chromatographic detection, infrared and raman spectroscopy, fluorescence spectrometry, ion mobility spectrometry, and novel techniques, such as electrochemical, chemiluminescence, chemical colorimetry and biological immunity. The development and research progress of TATP detection techniques were reviewed. The advantages and disadvantages of each detection technique were analyzed and compared, and the future development trend of TATP detection was proposed. The TATP detection based on chemical colorimetry method will become the research hot spot in the future.

Key words triacetone triperoxide (TATP), explosive detection, research progress

世界范围内发生的恐怖爆炸事件呈逐年上升趋势,严重影响了各国的社会稳定,并对人民生命财产安全造成了巨大的威胁^[1-2]。其中,具有代表性的是 2015 年 11 月 13 日发生在法国巴黎的特大爆炸恐怖袭击事件。该事件中,恐怖分子使用三过氧化三丙酮(TATP)爆炸物制作的自杀式炸弹发动袭击,造成了 129 人身亡。TATP,别称撒旦之母,撞击感和摩擦感度极高,极易引发爆炸,且爆炸威力巨大(约 1.83TNT 当量,爆速为 5300m/s)。同时,由于

制备方法简单、原料易得,TATP 成为近年来世界范围内恐怖分子实施爆炸活动的首选爆炸物^[3]。

TATP 是一种略带酸味的白色晶体,分子式为 $C_9H_8O_{10}$,极易升华,不溶于水,但溶于甲苯、丙酮和乙醇等有机溶剂^[4-9]。TATP 由丙酮和过氧化氢在酸催化下低温合成,是一种有机过氧化物的闭环三聚体^[10]。在制备 TATP 的过程中会有二过氧化二丙酮(DADP)生成^[11],生成的二聚体比三聚体不稳定^[12-13]。TATP 爆炸时,1 个 TATP 分子分解生成

基金项目:国家自然科学基金(20465023)

作者简介:吕旭(1993-),女,硕士,主要从事爆炸物检测新方法的研究。

联系人:关明(1974-),男,教授,主要从事仪器分析及检测的研究。

4个气体分子,在分解过程中不发光、不产生热量,会产生易燃气体及氧化性气体,这也恰恰是此类爆炸物极端危险的原因之一^[14-15]。

然而,TATP具有分子结构中不含发色团和硝基基团,爆炸后固体残留少,常温下易升华挥发等,增加了检测的难度^[16-19]。因此,TATP的检测引起了世界范围内的广泛关注,并对传统检测爆炸物方法提出了挑战。国内外的学者们针对TATP检测开展了一系列探索研究。一方面,开展传统的质谱^[20-23]、色谱^[24-25]、离子迁移谱^[26-27]、红外光谱、拉曼光谱^[28-29]、荧光光谱检测技术^[30-31]等在TATP检测中的应用研究;另一方面,针对TATP开发了基于化学比色^[32-33]、电化学^[34-35]、化学发光^[36]和生物免疫^[16]等新型检测技术。

1 传统检测技术在TATP检测中的应用

1.1 质谱检测技术

质谱法具有样品用量少、特异性高、灵敏度高和分析迅速等特点,是一种被广泛应用于化学、医药、刑事科学技术、生命科学和材料科学等领域的具有普适性的谱学鉴定方法。传统的离子源不适合用于TATP的检测分析。因此,在TATP检测中一般采用基于化学电离(软电离)的新型离子源质谱技术,其中具有代表性的有:选择离子流动管质谱(SIFT-MS)、质子转移反应质谱(PTR-MS)、电喷雾电离质谱(ESI-MS)和电喷雾解吸电离质谱(DESI)等。

选择离子流动管质谱是一种可用于痕量气氛定量分析的质谱分析方法。Wilson等^[20]采用该方法对TATP粉末的顶空痕量挥发蒸汽进行了检测,并评估了水合氢离子(H_3O^+)、二氧基正离子(O_2^+)、亚硝基正离子(NO^+)3种选择性前体正离子对TATP分子的电离效果。结果表明,这3种正离子在迁移管中与TATP分子发生快速离子-分子质子转移反应时表现出相近的碰撞反应速率,但 NO^+ 作为反应离子对TATP的电离效果最好。选择离子流动管质谱技术可以实现对痕量TATP气氛的快速定量检测分析,检测限可达 10×10^{-9} 。

质子转移反应质谱是一种可用于痕量挥发性有机物在线检测的质谱分析方法。由于TATP分子中的化学键较弱,常规的质子转移反应质谱检测参数不适用于TATP的检测。因此,Shen等^[21]进行了一系列质子转移反应质谱的TATP检测应用研究,优化检测参数以实现质子转移反应质谱对TATP痕量气氛的检测。采用水放电离子源条件

下,E/N值降至50Td才能检测到TATP的质子化产物 $[\text{TATP}+\text{H}]^+$ 。而采用氨气作为放电离子源可有效提高TATP的检测灵敏度,E/N值降至100Td即可检测到TATP的加合产物 $[\text{TATP}+\text{NH}_4]^+$ 。质子转移反应质谱可以实现对痕量TATP气氛的快速高灵敏检测分析,检测限可达 $\times 10^{-9}$ 级别。

除了上述2个用于痕量TATP气氛的检测方法之外,还可以分别采用电喷雾电离质谱和解析电喷雾电离质谱对微量TATP溶液样品和固体粉末样品进行检测。Sigman等^[22]采用搭载四极杆质量分析器的电喷雾电离质谱在扫描正离子模式下对TATP溶液进行了检测,检测限可达62.5ng。Cotte-Rodriguez等^[23]结合简单的碱金属络合喷涂预处理,采用解析电喷雾电离质谱对环境中的纸、砖、金属等表面上残留的微量TATP粉末进行了检测,检测限可达纳克级级别。该方法有效避免了繁琐的样品制备程序,检测快速、灵敏,并且对样品的纯度要求较低,适用于对混合物中的TATP进行检测。

这几种质谱分析方法虽然能够实现对气相、溶液相和固相TATP痕量样品的快速、高灵敏检测,可进行实时分析检测,但由于质谱分析仪器设备体积较大、操作较繁琐等原因,不适合应用于爆炸物TATP的现场检测。

1.2 色谱联用检测技术

爆炸物形态多样,且多数都是混合物,成分复杂,难以直接进行检测。因此,需将色谱分离技术与质谱等检测技术相结合联用,以实现混合物各成分的分离和检测,提高检测的准确度。Stambouli等^[24]采用顶空气相色谱-质谱联用技术(Headspace-GC/MS)对TATP的爆炸后残留物进行了顶空进样色谱分离和质谱分析,评估并优化了热分解速率较低的TATP样品的检测参数。该方法有效地避免了繁琐的有机溶剂预处理,并成功实现了对TATP爆炸残留物的纳克级检测。

Schulte-Ladbeck等^[25]则采用反相高效液相色谱法(HPLC)结合傅里叶变换红外光谱分析技术对固态TATP进行了检测。该方法通过反相高效液相色谱法对混合物样品进行分离,并通过TATP在中红外区的特征吸收光谱进行定性和定量分析,检测限可达1mmol/L。

虽然液相和气相色谱与质谱、红外等检测技术联用可以实现对痕量TATP的快速、灵敏检测,但

与质谱检测技术相似,色谱分离设备一般较大,不方便携带,且多需对样品进行预处理,因此,不适用于现场检测。

1.3 离子迁移谱检测技术

离子迁移谱(IMS)技术是爆炸物检测中最常用的检测技术之一,被广泛应用于机场安检等公共安全领域。常用的离子迁移谱多为针对含有电负性基团的硝基爆炸物检测设计的负离子模式。由于 TATP 分子中不含有硝基等电负性基团,很难被负离子模式离子迁移谱检测。因此,科研人员一般采用正离子模式离子迁移谱对 TATP 进行检测。

Buttigieg 等^[26]采用正离子模式离子迁移谱对 TATP 及其分解产物过氧化氢和丙酮进行了检测和分析。研究表明,TATP 的正离子迁移谱为三峰簇,且溶剂会影响 TATP 产物离子的迁移时间和迁移谱峰强度,TATP 的检测限为 $187\mu\text{g/mol}$ 。纯 TATP 的离子漂移时间最长的峰值为 13.06ms ;而在 TATP 被甲苯溶解后的条件下,其离子漂移时间最长的峰值变为 12.56ms ,且强度也会发生变化。

中科院大连化物所李海洋研究团队采用光电离正离子迁移谱技术开展了一系列 TATP 等过氧化物类爆炸物的检测研究。温萌等^[27]将试剂分子辅助、时间分辨热解析进样技术和非辐射性光电离源相结合,实现了 TATP 等爆炸物的高灵敏、快速检测,检测限达纳克级别,在丙酮试剂分子辅助条件下,对电场强度和进样口温度等参数进行优化后,光电离正离子迁移谱对 TATP 的检测限可达 1.2ng 。

离子迁移谱虽然具有分析速度快、灵敏度高、体积小、携带方便和操作简单等优点,并且能够克服溶剂干扰检测 TATP,但检测的安全性有待提高,TATP 有在飞行管道内爆炸的危险,同时检测结果易受温度、湿度等环境因素影响。

1.4 拉曼光谱和红外光谱检测技术

另一类可用于爆炸物现场检测分析的技术是具有指纹谱性的拉曼光谱和红外光谱为代表的光谱检测技术。

Wackerbarth 等^[28]研究了 TATP 的表面增强拉曼散射光谱,并将其与 TATP 粉末的拉曼光谱进行了对比分析。结果表明,TATP 蒸汽沉积在低温纳米结构金基底上得到的表面增强拉曼散射光谱图与 TATP 粉末的拉曼光谱特征基本相同,从而确定了 TATP 的拉曼光谱特征峰。由于拉曼光谱的指纹特性,该方法可以实现对 TATP 的高特异性检测分析。

樊武龙等^[29]对一款手持式红外光谱仪在 TATP 爆炸物相关制品临场快速检测时的应用可行性以及识别结果进行了综合分析和评判,该款手持式红外光谱仪能够对待测样本中的所有 TATP 制成品进行识别和报警,并能准确区分二聚体 DADP 与三聚体 TATP、四聚体和六聚体。

拉曼光谱和红外光谱检测技术的便携设备被认为是较为可靠的 TATP 现场检测工具^[30],具有无损、快速、损失小、特异性高和重现性好等优点。但拉曼光谱和红外光谱检测技术存在对待测物纯度要求较高、不易实现混合物中 TATP 检测的问题。此外,拉曼光谱信号较弱、易受荧光干扰,且采用红外激光激发,爆炸物有被点燃引爆的危险。

1.5 荧光检测技术

荧光检测技术一般通过检测 TATP 的典型标记物过氧化氢(H_2O_2)来实现对 TATP 的检测。Xu 等^[31]采用荧光探针分子 DAT-B 与 H_2O_2 反应引起的荧光发射光谱变化实现了对 H_2O_2 蒸汽的检测。并通过加入有机碱如四丁基氢氧化铵(TBAH)加快反应速率,有效缩短了反应时间,得到了 H_2O_2 蒸汽浓度为 1×10^{-6} 条件下,响应时间小于 0.5s 的荧光比率传感器,该传感器的检测限可达 7.7×10^{-9} 。荧光检测技术虽然具有成本低、操作简单、移动性好、灵敏度高和选择性好等优点,但容易受到环境温度、杂质等的影响,误报率较高。

2 新型检测技术在 TATP 检测中的应用

除了上述传统检测方法在 TATP 检测中的应用研究,科研人员还针对 TATP 开展了一系列基于化学比色、电化学、化学发光和生物免疫等方法的新型检测技术研究。这些新型检测技术是对传统检测技术的有力补充,具有自动化、智能化和微型化的潜力,更适用于爆炸物现场检测。

2.1 化学比色法

由于兼具简单、快速、直观和准确等特点,基于化学比色法检测过氧化物类爆炸物的检测技术近年来备受研究者关注。该方法要求显色反应具有较高的灵敏度和选择性。

Lin 等^[32]采用比色传感阵列实现了对 $50\times 10^{-6}\sim 10\times 10^{-9}$ TATP 气氛的半定量检测。该方法中,TATP 蒸气经固体酸催化分解得到的分解产物 H_2O_2 与阵列中的氧化还原敏感染料发生氧化反应,引起颜色变化,从而实现了对 TATP 气氛的高灵敏检测。 H_2O_2 的检测限可达 2×10^{-6} 。结果表明,

阵列可以将 TATP 与 H_2O_2 、漂白剂等其他氧化剂区分开来,并能够完全排除湿度、有机挥发物和香水等常见干扰物的干扰,具有较强的特异性和识别能力。

Li 等^[12]采用不同的酸催化以及不同原料制备了 9 种方式合成的一系列 TATP 混合物样品,并用比色传感器阵列对新制混合样品以及老化 30d 的混合样品进行了数据统计学分析,发现尽管老化 30d 并没有影响到比色结果,但老化确实改变了 TATP 的组成和结晶阶段。TATP 检测限为 $100\mu\text{g}$ 。化学比色法虽然具有操作简便、结果直观、可现场检测和选择性高等优势,但检测速率和检测灵敏度都有待进一步提高。

2.2 电化学法

电化学法是建立在物质在溶液中的电化学性质基础上的分析方法。Mamo 等^[33]采用吡咯基分子印迹聚合物电化学传感器实现了溶液相 TATP 的高灵敏、高选择性检测。在吡咯单体电致聚合到玻碳电极表面的过程中,TATP 模板通过氢键相互作用进行分子印迹,以获得具有良好 TATP 选择性的分子印迹玻碳工作电极。实验结果表明,分子印迹聚合物修饰玻碳电极在低浓度范围表现出良好线性,相关系数 $R^2 = 0.996$ 。对 TATP 的检测限(LOD)和定量限(LOQ)分别为 $26.9\mu\text{g/L}$ 和 $81.6\mu\text{g/L}$ 。该电化学传感器具有良好的重复性和精密度,且在季戊四醇四硝酸酯(PETN)、环三次甲基三硝胺(RDX)等其他爆炸物存在的情况下,对 TATP also 具有很好的选择性。

Mbah 等^[34]采用一次性的固相电解质/电极界面电化学传感器实现了室温下痕量未提纯固相 TATP 的高灵敏检测,检测限达 $(8.66 \pm 1.048)\text{ng}$ 。尽管由于电极界面传质阻力的影响只能在第一次使用时表现出良好的性能,制作简单、响应迅速和检测灵敏的 SPEE 传感器可以发展成为过氧化物类爆炸物及其原料现场筛查的微型化设备。

电化学传感器为 TATP 现场检测提供了一种便携性好、选择性高、灵敏度高和响应快速的可能选择,但多为实验室研究。

2.3 化学发光法

化学发光法是通过测量化学发光强度实现痕量待测物的检测和分析的方法。Girotti 等^[35]采用化学发光法通过对 TATP 酸催化产物 H_2O_2 与鲁米诺反应发出的光强度进行测量,实现了对 TATP 的间接定量检测,并设计了可进行现场检测的便携式

分光光度计。该装置对 TATP 的检测限和定量限分别为 50ng/mL 和 100ng/mL ,但检测时间较长,分析时间为 $5\sim 10\text{min}$ 。

Parajuli 等^[36]采用电致化学发光(ECL)方法通过其与三联吡啶钌在阴极发生电化学反应产生的光实现了对 TATP 的直接定量检测。研究结果表明,TATP 电化学还原形成的羟基自由基中间体是产生 ECL 的关键,溶液体系组成对羟基自由基的稳定性影响很大。笔者采用水/乙腈的混合溶剂体系实现了对 TATP 的高灵敏检测,检测限可达 $2.5\mu\text{mol}$ 。化学发光法虽然具有灵敏度高、仪器设备简单等优点,但是抗干扰能力较差,易受各种环境杂质影响。

2.4 生物免疫传感器检测方法

除了上述检测 TATP 的方法,还有利用生物免疫原理开发的生物免疫传感器检测方法等。Walter 等^[16]设计合成了 1 种 TATP 衍生物,并成功进行了小鼠免疫接种,得到了 TATP 衍生物抗体。基于这种抗体的生物免疫传感器可以实现对 TATP 的高灵敏、快速特异性直接检测,检测限低于 10ng/L ,检测时间 10s 左右。虽然生物免疫传感器具有特异性强、灵敏度高的优点,但其特异性会被 TATP 分子的构型变化所影响,且生物免疫反应对环境温度等条件要求较高。

3 结论与展望

综述了质谱法、色谱法、离子迁移谱、拉曼光谱、红外光谱和荧光检测等传统检测技术在 TATP 检测中的应用,以及化学比色法、电化学法、化学发光和生物免疫传感器等新型 TATP 检测技术的研究进展,这些检测技术为实现 TATP 的准确、快速检测奠定了基础。可以根据不同应用环境的检测需求选择合适的检测技术。基于特异性强的化学比色法和生物传感器检测技术开发体积微小、操作简便、分析快速和灵敏度高的现场检测设备将是未来发展的方向。

非接触检测方式是避免检测设备直接与 TATP 爆炸物产生碰撞或者摩擦、确保检测安全的首选方式。同时,还要进一步加强对行李包裹中的爆炸物、密闭的炸弹或空气中的爆炸物蒸汽等隐蔽爆炸物的检测技术研究。因此,期待随着检测技术的发展,能实现 TATP 的非接触式检测,做到对爆炸案的案前预警,更好保障人民的生命财产安全。

参考文献

- [1] Pinnaduwa L A, Gehl A, Hedden D L, et al. A microsensor for trinitrotoluene vapour[J]. *Nature*, 2003, 425 (6957): 474-476.
- [2] Hannink N, Rosser S J, French C E, et al. Phytodetoxification of TNT by transgenic plants expressing a bacterial nitroreductase[J]. *Nature Biotechnology*, 2001, 19(12): 1168-1172.
- [3] Oxley J C, Smith J L, Shinde K, et al. Determination of the vapor density of triacetone triperoxide (TATP) using a gas chromatography headspace technique[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2005, 30(2): 127-130.
- [4] Scott A M, Petrova T, Hill F, et al. Density functional theory study of interactions of cyclotrimethylene trinitramine (RDX) and triacetone triperoxide (TATP) with metal-organic framework (IRMOF-1 (Be)) [J]. *Structural Chemistry*, 2012, 23 (4): 1143-1154.
- [5] Schulte-Ladbeck R, Kolla P, Karst U. Trace analysis of peroxide-based explosives[J]. *Analytical Chemistry*, 2003, 75 (4): 731-735.
- [6] Burks R M, Hage D S. Current trends in the detection of peroxide-based explosives[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2009, 395(2): 301-313.
- [7] Dubnikova F, Kosloff R, Almog J, et al. Decomposition of triacetone triperoxide is an entropic explosion[J]. *Journal of The American Chemical Society*, 2005, 127(4): 1146-1159.
- [8] Widmer L, Watson S, Schlatter K, et al. Development of an LC/MS method for the trace analysis of triacetone triperoxide (TATP)[J]. *The Analyst*, 2002, 127(12): 1627-1632.
- [9] Van Duin A C T, Zeiri Y, Dubnikova F, et al. Atomistic-scale simulations of the initial chemical events in the thermal initiation of triacetone triperoxide [J]. *Journal of The American Chemical Society*, 2005, 127(31): 11053-11062.
- [10] Oxley J C, Smith J L, Canino J N. Insensitive TATP training aid by microencapsulation[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2015, 33(3): 215-228.
- [11] Sinditskii V P, Kolesov V I, Egorshv V Y, et al. Thermochemistry of cyclic acetone peroxides[J]. *Thermochimica Acta*, 2014, 585: 10-15.
- [12] Li Z, Bassett W P, Askim J R, et al. Differentiation among peroxide explosives with an optoelectronic nose[J]. *Chemical Communications*, 2015, 51(83): 15312-15315.
- [13] Guo C L, Persons J, Woodford J N, et al. Gas-phase infrared and NMR investigation of the conformers of diacetone diperoxide (DADP)[J]. *Journal of Physical Chemistry A*, 2015, 119 (40): 10221-10228.
- [14] Bali M S, Armitt D, Wallace L, et al. Rapid degradation of cyclic peroxides by titanium and antimony chlorides[J]. *Dalton Transactions*, 2015, 44(15): 6775-6783.
- [15] Pachman J, Matyas R, Kunzel M. Study of TATP; blast characteristics and TNT equivalency of small charges[J]. *Shock Waves*, 2014, 24(4): 439-445.
- [16] Walter M A, Panne U, Weller M G. A novel immunoreagent for the specific and sensitive detection of the explosive triacetone triperoxide (TATP)[J]. *Biosensors*, 2011, 1(3): 93-106.
- [17] Climent E, Groninger D, Hecht M, et al. Sensitive and rapid analysis with lateral-flow assays based on antibody-gated dye-delivery systems: the example of triacetone triperoxide[J]. *Chemistry-a European Journal*, 2013, 19(13): 4117-4122.
- [18] Ostmark H, Wallin S, Ang H G. Vapor pressure of explosives; a critical review[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2012, 37(1): 12-23.
- [19] Brady J E, Smith J L, Hart C E, et al. Estimating ambient vapor pressures of low volatility explosives by rising-temperature thermogravimetry[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2012, 37(2): 215-222.
- [20] Wilson P F, Prince B J, McEwan M J. Application of selected-ion flow tube mass spectrometry to the real-time detection of triacetone triperoxide[J]. *Analytical Chemistry*, 2006, 78(2): 575-579.
- [21] Shen C Y, Li J Q, Han H Y, et al. Triacetone triperoxide detection using low reduced-field proton transfer reaction mass spectrometer[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2009, 285(1/2): 100-103.
- [22] Sigman M E, Clark C D, Caiano T, et al. Analysis of triacetone triperoxide (TATP) and TATP synthetic intermediates by electrospray ionization mass spectrometry[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2008, 22(2): 84-90.
- [23] Cotte-Rodriguez I, Chen H, Cooks R G. Rapid trace detection of triacetone triperoxide (TATP) by complexation reactions during desorption electrospray ionization[J]. *Chemical Communications*, 2006, 9: 953-955.
- [24] Stambouli A, El Bouri A, Bouayoun T, et al. Headspace-GC/MS detection of TATP traces in post-explosion debris[J]. *Forensic Science International*, 2004, 146: 191-194.
- [25] Schulte-Ladbeck R, Edelmann A, Quintas G, et al. Determination of peroxide-based explosives using liquid chromatography with on-line infrared detection [J]. *Analytical Chemistry*, 2006, 78(23): 8150-8155.
- [26] Buttigieg G A, Knight A K, Denson S, et al. Characterization of the explosive triacetone triperoxide and detection by ion mobility spectrometry [J]. *Forensic Science International*, 2003, 135(1): 53-59.
- [27] 温萌, 蒋蕾, 刘巍, 等. 丙酮-辅助光电离子迁移谱检测 TATP 炸药的研究[J]. *质谱学报*, 2014, 35(6): 481-487.
- [28] Wackerbarth H, Salb C, Gundrum L, et al. Detection of explosives based on surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(23): 4362-4366.
- [29] 樊武龙, 张冀峰, 孙玉友, 等. 手持式红外光谱仪在 TATP 临场检测中的应用研究[J]. *刑事技术*, 2016, 41(2): 93-95.
- [30] Oxley J C, Smith J L, Shinde K, et al. Determination of the vapor density of triacetone triperoxide (TATP) using a gas chromatography headspace technique[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2005, 30(2): 127-130.