

城市轨道交通常见爆炸物及爆炸危险品的检测方法^{*}

韩 峰 张振一

(公安部第三研究所国家安全防范报警系统产品质量监督检验中心(上海),200031,上海//第一作者,副研究员)

摘 要 城市轨道交通枢纽作为人员密集场所,所面临的防爆安检压力随着人员的密集流动逐年增加,因此,在安检过程中对隐藏爆炸物及爆炸危险品的检测方法也得到高度重视。从城市轨道交通安全检查过程中常见的爆炸物及爆炸危险品分类、化学特性与物理特性入手,对基于不同技术原理的技术方法,如拉曼光谱技术、太赫兹技术、离子迁移谱技术等进行了对比分析,探讨各自的原理及优势。

关键词 城市轨道交通;爆炸物;爆炸危险品;检测方法

中图分类号 TQ560.72;U231

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.06.026

Detection Methods of Common Explosives and Explosive Dangerous Goods in Urban Rail Transit

HAN Feng, ZHANG Zhenyi

Abstract As a densely populated place, urban rail transit hub is faced with increasing pressure of explosion-proof security inspection year by year, therefore in the process of security inspection, detection methods of hidden explosives and explosive dangerous goods are highly recognized. From the perspective of classification, chemical and physical characteristics of common explosives and explosive dangerous goods in the process of safety inspection of urban rail transit, different detection technology methods based on different technical principles are compared and analyzed, including Raman spectrum technology, terahertz technology, ion migration spectrum technology, of which the principles and advantages are discussed respectively.

Key words urban rail transit; explosives; explosive dangerous goods; detection method

Author's address National Security Alarm System Product Quality Supervision and Inspection Center (Shanghai), Third Institute of Ministry of Public Security, 200031, Shanghai, China

近年来,国内外城市轨道交通中使用爆炸危险品的恐怖袭击事件频发,而由各类爆炸危险品造成的财产损失和人员伤亡程度也不断提高,因此防爆反恐形势需不断升级。为最大可能地防患于未然,需要对潜在爆炸危险品的检测方法进行技术升级。在实际应用环境中,各类爆炸危险化学品的种类不断增加,研制技术不断进步,已形成“道高一尺、魔高一丈”的局面。通过近期香港发生的一系列暴徒袭击事件来看,各类爆炸危险品广泛存在于民间,因此城市轨道交通爆炸危险品安检技术亦须“水涨船高”^[1]。

1 爆炸危险品的定义及分类

危险品在常规定义下是指具有易燃、爆炸、毒害、放射性、腐蚀等危险性质,并在物品运输、使用、装卸、保存等过程中容易引起爆炸、燃烧等引发人员伤亡和财产损失事故的物品。根据 GB 13690—1992《常用危险化学品的分类及标志》及 GB 6944—1986《危险货物分类和品名编号》两个强制性国家标准,将危险品分为8类:①爆炸品;②毒害品和感染性物品;③易燃液体;④易燃固体、自燃物品和遇湿易燃物品;⑤压缩气体和液化气体;⑥放射性物品;⑦氧化剂和有机过氧化物;⑧腐蚀品。

经上述定义,认为爆炸品涵盖在危险品范围内,一般在国际爆炸危险品研究领域是指《国际海运危险货物规则》中列为第1类的危险货物。常见的爆炸品分为以下6类:①具有整体爆炸危险的爆炸品;②具有抛射危险但无整体爆炸危险的爆炸品;③具有燃烧危险并兼有较小爆炸(局部爆炸)或较小抛射(局部抛射)危险之一,或兼有这两种危险但无整体危险、无重大危险的爆炸品;④具有整体

^{*} 国家重点研发计划(NQI)项目(2017YFF0207005)

爆炸危险的极不敏感的爆炸品;⑤不具有整体爆炸危险的极不敏感的物质、物品;⑥无重大危险的物质或物品。

2 爆炸物及爆炸危险品物质归类

1) 目前,行业内常见的爆炸危险品物质包含:梯恩梯(TNT)、硝化甘油(NG)、硝酸铵(AN)、黑火药(BP)、黑索今(RDX)、太安(PETN)、二硝基甲苯(DNT)、奥克托今(HMX)、特屈儿(TETRYL)、硝基苯(NT)、硝基甲苯(MNT)、C4、赛姆汀(Semtex)、苦味酸、硝基胍、硝基甲烷、铵梯、铵黑、铵膨及复合炸药等。

2) 常见压缩气体和液化气体包含:甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、各类杀虫剂及清洗剂等。

3) 常见易燃液体包含:汽油、乙醇、二甲苯、煤油、油漆及胶粘剂等。

4) 常见易燃、自燃、遇湿自燃物质包含:红磷、碳粉、煤粉、赛璐珞、金属镁锰钛锂钠钾锌及黄磷等。

5) 常见氧化剂和有机过氧化物包括:氯酸铵、氯酸钾、过氧化氢、硝酸铋及硝酸钡等。

6) 常见毒害品包括:氰化物、四氯乙烯、苯酚、甲酚及磷化物等。

7) 常见腐蚀品包括:硝酸、硫酸、过氧酸、磷酸、丙酸、乙酸、氧化钾、氢氧化钾及马琳等。

3 爆炸危险品物质的检测原理分类

根据目前国内城市轨道交通常用的安检设备统计数据,绝大多数爆炸危险品物质的检测原理主要分为3类:

1) 根据爆炸危险品物质对各频段电磁波的吸收、反射、散射特性不同,检测主要包括拉曼光谱技术、太赫兹技术、毫米波技术、X射线技术等,且检测主要利用图谱特征进行物质分析。

2) 基于爆炸危险物品的微小粒子较为活跃,会附着在其他材料表面,如衣物、包装等,可结合气味甄别(警犬)、痕量检测技术等侦测手段进行甄别。

3) 基于爆炸危险品的分子结构中C、H、N、O的成分占比与其他类物质(原子)差异较大,尤其是N、O原子的质量分数相关性,具有非常明显的特征,检测主要包括分子分析技术、离子迁移谱技术等。虽然部分设备也通过图谱进行分析,但与第一类检测原理不同的是该类技术是通过物质分析进一步确定样品类别的。

4 常用的爆炸危险品物质新型检测技术原理解析及对比

4.1 拉曼光谱技术

拉曼光谱技术已经被广泛应用于化学、生物学、医学等各个领域,该技术对物质纯度分析、定性分析和分子结构分析都具有很大研究价值。采用拉曼光谱技术对物质样本检测具有试样制备简单、速度快、结果一致性高及环境要求低等优势。

拉曼光谱技术是C. V. 拉曼于1928年在试验中发现的。其发现当用波长远小于样品颗粒的光束照射透明气态、液态或固态样品时,除大部分按原来的光波波长散射外,还有一部分的散射光发生了频率漂移,这种现象被称为拉曼散射现象。在透明介质的散射光谱中,与入射光频率 ν_0 相同的光波称为瑞利散射光;频率对称分布在 ν_0 两侧的谱线或谱带 $\nu_0 \pm \Delta\nu$ 即为拉曼光谱。当入射光子与样品分子发生非弹性散射时,若分子吸收的能量大于释放的能量,则样本分子吸收频率为 ν_0 的光子,发射频率为 $\nu_0 - \Delta\nu$ 的光子,同时样品分子从低能级向高能级发生跃迁,因此产生斯托克斯谱线;相反,若分子释放的能量大于吸收的能量,即分子释放频率为 ν_0 的光子,发射频率为 $\nu_0 + \Delta\nu$ 的光子,同时分子从高能级向低能级发生跃迁,随即产生反斯托克斯谱线。瑞利散射与拉曼散射的原理如图1所示。

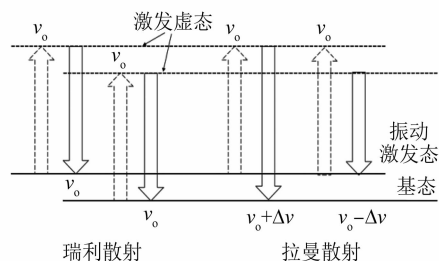


图1 瑞利散射与拉曼散射的原理示意图

由于常见爆炸危险品在分子结构中拥有特定的结构,具有独特的拉曼特征位移峰,且每个位移峰的信噪比都非常高,因此采用拉曼光谱法进行成分分析,可以得到质量非常高的拉曼谱图,通过与标准样品的特征谱库进行比对,从而进行爆炸危险品的成分分析。另一方面,由于激光拉曼光谱分析仪器一般都具有颗粒分析能力,即使爆炸危险品和其他粉末状物质混和在一起,也可以通过复合拉曼光谱分析技术对其进行识别,即通过与不掺杂爆炸危险品粉末的拉曼光谱图对比,找出具有差异的拉

曼特征峰。

拉曼光谱仪的技术核心在于拉曼激光器,而随着激光器技术的不断更新,激光器的单色性更好、谱线更窄、光强更高、相干性更突出,使得拉曼光谱仪的分析精度得到了提高,进而促进拉曼光谱分析技术的进一步发展。

4.2 太赫兹技术

太赫兹波 (THz) 由 Fleming 于 20 世纪 70 年代提出,是指频率介于 0.1 THz 和 10 THz 之间的电磁辐射,在电磁波谱上位于微波和远红外线之间(见图 2)。由于大多数爆炸物危险品在 THz 波段存在特征比较明显的吸收谱,因此可以将 THz 分析技术作为爆炸危险品的检测手段之一。典型的 THz 时域谱分析系统是由超快脉冲激光器、THz 发射元件、探测和时间延迟控制系统等组成。激光器产生具有飞秒脉宽的激光脉冲串列,被光学元件分为两路,一路激发 THz 发射元件产生 THz 电磁波,另一路作为探测光与 THz 脉冲汇合后共线通过 THz 探测元件,经差分分析得到吸收谱,进而完成爆炸危险品的成分分析^[2]。

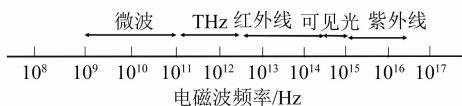


图 2 THz 频段在电磁波频段内的位置

此外,THz 脉冲光源与传统拉曼激光光源相比具有较多独特的性质^[3]:

1) 由于 THz 脉冲的典型脉宽为皮秒级,不但可以较方便地进行时域测量研究,而且能够有效地抑制背景噪声干扰。

2) 由于 THz 脉冲源通常只包含若干个周期的电磁振荡,因此单个脉冲的频带可覆盖从 GHz 至几十 THz 的范围,具有极大的带宽空间。

3) 由于 THz 的相干性源于其产生机制,它是由相干电流驱动的偶极子振荡产生,或是由相干的激光脉冲通过非线性光学差频变换产生,因此其相干性比较突出。

4) 由于 THz 光子的能量非常低,只有毫电子伏特,与 X 射线相差 7 个数量级,因此不容易破坏被检测的物质,这对爆炸危险品而言是非常重要的。因此,在样本检测过程中,极大地提高了检测过程的安全性。

5) 极性分子,如水分子等对 THz 波的吸收特

别明显,因此,在实际检测中,可去除样本中极性分子杂质的干扰。

6) THz 波对于衣物等大多数包装材料具有很强的穿透力,对物质的检测可以做到高灵敏、无损伤和远距离,因此,在反恐、毒品及安全检测等方面具有显著潜在优势。

由于目前 THz 技术产业链还未十分成熟,因此,其研发使用成本非常高昂,成为了制约其广泛应用的最大因素。

4.3 离子迁移谱技术

离子迁移谱 (Ion Mobility Spectrometry, IMS) 的检测原理是:样品由载体带入电离反应区后,载体分子和样品分子在离子源的作用下发生一系列的电离反应和离子分子反应,形成各种产物的分子离子团;在电场的驱使下,这些分子离子团通过周期性开启的离子门进入漂移区域^[4];在与逆流的中性气体分子不断碰撞过程中,由于这些离子在电场中各自迁移速率不同,使得不同的离子得到分离,先后到达收集端被检测;由于不同分子离子团迁移的速度与质量、体积及所带电荷有关,在图谱上就可以通过尖峰的分布区分不同的物质。图 3 为离子迁移谱原理图。IMS 技术具备能在大气压力条件下工作、探测灵敏度高、分析时间快、体积小、质量轻和功耗低等特点,目前已成为最具实用性的痕量检测方法,在毒品、爆炸物探测、化学战剂检测及工厂有毒气体监测等领域得到了广泛应用^[5-6]。

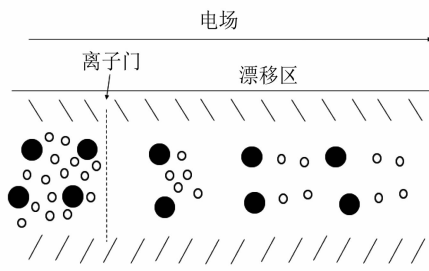


图 3 离子迁移谱原理图

离子迁移谱和质谱技术的原理有相同之处,亦有不同之处。两者均需先对目标物实施离子化,所以两者都有离子源;最终经过分离、检测的都是离子,检测器基本也相同;两者既可以检测正离子,也可以检测负离子。两者最主要的差异为离子的分离过程:离子迁移技术是利用离子的淌度不同分离离子,在离子迁移管中完成,离子的淌度与离子的电荷数、离子的体积及空间几何形状(碰撞截面)有关;而质谱技术则是利用离子的质荷比不同分离离

子,在质量分析器中完成,质荷比取决于离子的质量数和电荷数。

5 结语

本文对目前国内城市轨道交通部门常规采用的 3 种爆炸物危险品检测方法进行了原理性阐述及优缺点对比。随着新技术的不断涌现,新型的爆炸物危险品检测手段也会层出不穷,包括核磁共振等,但是由于新技术的设备成本较高且相应的爆炸物危险品图谱不完整,因此一直未得到充分的应用;另一方面,爆炸物危险品的种类也在不断地升级,还有待于研究人员进行更加充分的学习和研究,新技术研发工作仍然“任重道远”。

参考文献

[1] 刘明,胡文祥.爆炸性物质的测量测定技术方法[J].有机化

学研究,2015(1):77.

- [2] 石小溪,赵国忠.爆炸性物质的太赫兹 (THz) 光谱分析[J].现代科学仪器,2006(2):48.
- [3] 许欣,吴勋,孟宪君,等.太赫兹技术在爆炸物检测中的应用[J].光学技术,2008(增刊1):265.
- [4] 黄超群,夏磊,李爱悦,等.非放射源离子迁移谱爆炸物检测技术发展和应用[C]//第五届全国“公共安全领域中的化学问题”暨第三届危险物质与安全应急技术研讨会论文集.北京:中国化学会,2015.
- [5] 吕勇杰.离子迁移谱技术及其在毒品和爆炸物检测中的应用[D].上海:华东师范大学,2006.
- [6] 李金香,武波涛,王兴军.离子迁移谱技术发展趋势和应用前景[J].舰船科学技术,2006(2):13.
- [7] 马建福,王俊.爆炸危险品检测技术浅探[J].科技情报开发与经济,2006(1):160.

(收稿日期:2020-04-17)

(上接第 120 页)

量超过安全控制标准,砌体结构墙体仍会出现破坏产生裂缝。因此需综合考虑沉降和应力来判断砌体结构房屋的安全性。

2) 在盾构隧道下穿道北小区住宅群的施工过程中,采用“隧道径向加固半径 2 m+建筑物前后加固 4 环+隧道全断面加固”的深孔注浆加固方案,砌体结构墙体应力增量值大幅减小,且均能控制在规定的范围内,满足建筑物安全使用要求,由此证实该方案是可行的加固方案。

3) 将现场实测数据与数值模拟结果进行对比,结果表明实测数据与数值模拟结果的沉降趋势相同,沉降值也较为接近,说明本文数值模拟方案能较好地盾构隧道下穿砌体结构建筑物进行仿真分析。

参考文献

- [1] 范培.盾构隧道近距离侧穿砌体结构建筑物施工技术[J].施工技术,2019(11):111.
- [2] 杨啸南.地铁隧道盾构法施工下穿建筑物分析[D].南昌:南昌大学,2015.
- [3] 杨宏泰,张怀静.软土地区大直径盾构下穿建筑物注浆方案优化[J].北京建筑大学学报,2015(2):29.
- [4] 魏新江,魏纲,丁智.盾构施工与邻近不同位置建筑物相互影响分析[J].岩土力学,2007(增刊1):505.

- [5] 兰宇,方勇,段绍和,等.地铁盾构隧道侧穿锦江大桥施工的三维数值模拟[J].铁道工程学报,2009(3):79.
- [6] 王春凯,许恺,周冠南,等.盾构隧道穿越条基框架结构影响研究[J].城市轨道交通研究,2009(9):47.
- [7] 温裕春.武汉地铁盾构下穿京广铁路变形影响分析[J].现代城市轨道交通,2016(1):30.
- [8] 祁文睿.大直径盾构侧穿古建筑引起沉降分析及注浆加固研究[J].铁道建筑技术,2018(3):93.
- [9] 任建喜,张引合,冯超.地铁隧道盾构施工引起的古城墙变形规律及其控制技术[J].岩土力学,2011(增刊1):445.
- [10] 曹振,张宁,杨锋.地铁盾构隧道下穿古城墙变形规律预测与施工安全防控技术[J].城市轨道交通研究,2015(8):119.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.砌体结构设计规范:GB 50003—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [12] 刘钊,李子春,刘国楠,等.花岗岩残积土的修正摩尔库伦模型参数取值研究[J].铁道建筑,2017(3):89.
- [13] 来弘鹏,郑海伟,何秋敏,等.砂土地层盾构隧道小角度斜下穿既有隧道施工参数优化研究[J].中国公路学报,2018(10):130.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑变形测量规范:JGJ 8—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.

(收稿日期:2020-03-24)