

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.01.006

# TATP 模拟物的设计及安全性评估\*

徐纪琳<sup>①</sup> 徐 森<sup>①②</sup> 潘 峰<sup>①②</sup> 钱 华<sup>①③</sup> 刘大斌<sup>①</sup>

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②国家民用爆破器材质量监督检验中心(江苏南京,210094)

③特种能源材料教育部重点实验室(江苏南京,210094)

[摘 要] 三过氧化三丙酮(TATP)直接用于安检培训具有危险性高、安全隐患多的问题。设计出可代替 TATP 在 X 光机、CT 机等高通量安检仪中成像的模拟物。物质组成为  $m(\text{葡萄糖}) : m(\text{十六醇}) : m(\text{蔗糖}) = 25.77 : 9.68 : 14.55$ , 与 TATP 具有相似的外观及有效原子序数,元素质量分数相差小于 0.020%,堆积密度相差  $0.012 \text{ g/cm}^3$ 。为确保模拟物在红外、拉曼等高灵敏度安检仪中亦存在特征信号,在混合物中加入适量 TATP。结果表明,当 TATP 的加入量为 20% (质量分数)时,可有效地表征出混合物中 TATP 的红外、拉曼特征峰;同时,体系相容性较好,机械感度低,且不具有爆炸性。优化后的配方为: $m(\text{葡萄糖}) : m(\text{十六醇}) : m(\text{蔗糖}) : m(\text{TATP}) = 20.62 : 7.74 : 11.64 : 10.00$ 。该模拟物与 TATP 的相似度高、安全性好,可直接用于安检人员培训。

[关键词] TATP;炸药模拟物;安检;反恐

[分类号] TJ55

## Design and Safety Evaluation of TATP Simulant

XU Jilin<sup>①</sup>, XU Sen<sup>①②</sup>, PAN Feng<sup>①②</sup>, QIAN Hua<sup>①③</sup>, LIU Dabin<sup>①</sup>

① School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

② China National Quality Supervision Testing Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

③ Key Laboratory of Special Energy Materials, Ministry of Education (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] Aiming at the problem that triacetone trisperoxide (TATP) has high risks and many potential safety hazards when it is directly used for security inspection training, a simulant was designed to replace TATP for imaging in high-throughput security check equipment such as X-ray machines and CT machines. In TATP simulant system,  $m(\text{glucose}) : m(\text{cetyl alcohol}) : m(\text{sucrose}) = 25.77 : 9.68 : 14.55$ . It has the similar appearance and effective atomic number to TATP, the difference in chemical element percentage is less than 0.020%, and the difference in bulk density is  $0.012 \text{ g/cm}^3$ . In order to ensure that the simulant also has characteristic signals in high-sensitivity security inspection instruments such as infrared and Raman, an appropriate amount of TATP was added to the mixture. Results show that when the addition of TATP reaches 20% (mass fraction), infrared and Raman characteristic peaks of TATP in the mixture can be effectively characterized. Meanwhile, the system has good compatibility and low mechanical sensitivity, and it is not explosive. The optimized simulant formula is  $m(\text{glucose}) : m(\text{cetanol}) : m(\text{sucrose}) : m(\text{TATP}) = 20.62 : 7.74 : 11.64 : 10.00$ . It has the advantages of high similarity and good safety and can be directly used for security inspection personnel training.

[KEYWORDS] triacetone trisperoxide (TATP); simulant; security check; anti-terrorism

## 引言

恐怖主义严重威胁国际安全,其中,近 50% 的恐怖事件均使用爆炸方式。炸药威力大,破坏性强。

其中,三过氧化三丙酮(TATP,  $\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}_6$ )因其制备工艺简单、起爆容易、破坏力强,常被恐怖分子用于实施爆恐袭击<sup>[1-2]</sup>。安全检查是发现和消除事故隐患、预防事故发生的重要手段,已普遍应用于公共交通与公共场所,是防范 TATP 扩散的有效手段之一。

\* 收稿日期:2020-09-05

第一作者:徐纪琳(1996 - ),女,硕士研究生,主要从事炸药模拟物研究。E-mail:2777058099@qq.com

通信作者:钱华(1981 - ),男,研究员,主要从事火炸药配方及工艺研究。E-mail:qianhua@njust.edu.cn

目前,地铁、火车站等人群密集的地方大多使用 X 光机等高通量安检仪器,该类仪器能基于物体对 X 射线的吸收特性差异,检测物体的有效原子序数、密度、厚度等,呈现物品的 X 光图像<sup>[3-5]</sup>。安检不仅需要先进的仪器,更需要经验丰富的安检人员。安检人员培训是确保安检高效、可靠的关键。鉴于炸药的易燃易爆性,不宜将其直接用于培训中;因此,需要制备相对安全的模拟物以供使用。同时,随着安检痕量检测技术的发展,基于红外、拉曼等技术的高灵敏性安检仪器逐渐投入使用<sup>[6-8]</sup>,对于成像异常的不明物品,可进一步利用该类仪器进行检测。由于模拟物分子结构与炸药不同,在红外、拉曼等光谱中显示的特征谱图不同;故在模拟物中添加一定量的真实的待模拟炸药,在整体无爆炸性前提下显示出炸药的特征峰,扩大模拟物在不同安检仪中的应用范围。结合高通量和高灵敏性安检仪器,安检人员能够更高效、更准确地检测出炸药等危险品。

卢秀娟等<sup>[9]</sup>按配方 1,6-己二醇/ $\alpha$  型乙二酸/对苯二酚制备了 TATP 模拟物,该模拟物与 TATP 具有相同的有效原子序数;但对苯二酚见光易变色,高毒,使用中存在安全隐患。刘吉平等<sup>[10]</sup>按配方羟基乙酸/1,6-己二醇/肉桂酸制备了 TATP 模拟物,与 TATP 具有相同的有效原子序数、密度及元素质量分数,其中羟基乙酸易吸湿,模拟物不易储存。已有文献报道的 TATP 模拟物均仅能用于 X 光机、CT 机等成像安检仪中;而在红外、拉曼等高灵敏性安检仪中无特征信号,限制了其适用范围。

本文中,利用 CLPSO 算法<sup>[11]</sup>设计出 TATP 初始模拟物配方,并在其中添加一定量的 TATP,通过评估 TATP 与模拟物之间相容性及 TATP 对体系爆炸性影响规律,制备出相似度高、安全性好、并可覆盖常见安检仪的 TATP 模拟物。

## 1 试验部分

### 1.1 试剂与仪器

试剂:TATP,自制,纯度 99%;无水葡萄糖,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;十六醇,化学纯,南京生健泉化玻仪器有限公司;蔗糖,化学纯,上海迈瑞尔化学技术有限公司。

仪器:差示扫描量热仪,Mettler-Toledo 国际贸易有限公司;BAM 落锤仪,中国科学院大连化学物理研究所;BAM 摩擦仪,中国科学院大连化学物理研究所;傅里叶红外光谱仪,Thermal Fisher 科技;拉曼光谱仪,HORIBA Jobin Yvon S. A. S。

### 1.2 模拟物配方设计原理

模拟物的典型特征参数包括有效原子序数、外观、元素组成、元素质量分数、密度等。考虑到实际装填情况:样品堆积密度数值波动较大、厚度也不可控,本文中,将有效原子序数作为首要考虑因素,在有效原子序数相同的前提下,力求模拟物外观、密度等与真实炸药一致。

1) 有效原子序数是 X 光机等安检仪器成像情况的重要依据,计算方法见式(1)和式(2)<sup>[12]</sup>。

$$Z_{\text{eff}} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^M a_i Z_i^{3.5}}{\sum_{i=1}^M a_i} \right]^{\frac{1}{3.5}}; \tag{1}$$

$$a_i = \frac{m_i Z_i}{A_i}。 \tag{2}$$

式中: $Z_{\text{eff}}$ 为有效原子序数; $A_i$ 为元素  $i$  的原子质量; $Z_i$ 为原子序数; $m_i$ 为有效质量。经计算,TATP 的有效原子序数为 6.794。

2) TATP 为白色结晶,无臭。综合考虑其外观、元素组成及质量分数,寻找合适的小分子化合物,混合后的组成元素及质量分数与 TATP 相同。

3) 基于现有的化学品数据库,综合模拟物典型特征参数,选择安全稳定、无毒无害的物质,设计出模拟物最佳配方,确保所制模拟物能有效地用于安检人员培训。

### 1.3 初始模拟物配方设计及制备

利用 CLPSO 算法,以与 TATP 具有相同元素质量分数为依据,计算并筛选出初始模拟物最优配方为  $m(\text{葡萄糖}):m(\text{十六醇}):m(\text{蔗糖})=25.77:9.68:14.55$ 。

该配方中,3 种物质均为常见的糖、醇类,白色晶体,性质稳定,安全性高,无爆炸性,可用于制备初始模拟物。制备方法:称取 25.77 g 葡萄糖、9.68 g 十六醇和 14.55 g 蔗糖,机械混合均匀,所得混合粉末即为 TATP 初始模拟物。

### 1.4 模拟物评估

#### 1.4.1 典型特征参数比对

将初始模拟物与 TATP 进行外观、堆积密度、有效原子序数等方面的对比,评判初始模拟物是否满足条件。其中,堆积密度测试参照 GJB 772A—1997 方法 402.1<sup>[13]</sup>。

#### 1.4.2 爆炸性判别试验

为扩大模拟物在高灵敏性安检仪中的应用范围,在初始模拟物中添加一定质量的 TATP,对其进行克南试验及隔板试验,探究 TATP 含量对体系爆炸性的影响规律。

克南试验:采用《关于危险货物运输的建议书试验和标准手册》<sup>[14]</sup>1(b)中的试验标准,测试样品在高度密闭条件下对强加热作用是否敏感。平行试验 3 次。

隔板试验:采用《关于危险货物运输的建议书试验和标准手册》<sup>[14]</sup>1(a)中的试验标准,测试样品是否具有传播爆炸能力。平行试验 2 次。

1.4.3 相容性试验

根据爆炸性测试结果,利用差示扫描量热仪对 TATP、初始模拟物及含适量 TATP 的模拟物进行相容性试验。相容性测试参照 GJB 772A—1997 方法 502.1<sup>[13]</sup>。

试验条件:30 μL 不锈钢坩埚;温度 50 ~ 400 ℃;升温速率 10 ℃/min;氮气氛围,流速 50 mL/min。

1.4.4 机械感度试验

采用《关于危险货物运输的建议书 试验和标准手册》<sup>[14]</sup>3(a)(二)及 3(b)(一)中的试验标准,进行撞击和摩擦感度试验,测试样品对撞击及摩擦的敏感度。

1.4.5 红外、拉曼光谱测试

为检测含一定量 TATP 的模拟物在红外、拉曼等高灵敏度安检仪中是否存在特征信号,采用红外光谱仪和拉曼光谱仪对初始模拟物、TATP 及含一定质量 TATP 的模拟物进行测试。

2 结果与讨论

2.1 初始模拟物与 TATP 特征参数比对

TATP 与所制备的初始模拟物外观见图 1。初始模拟物元素质量分数、堆积密度及有效原子序数与 TATP 相关数据的比对结果如表 1 所示。

由图1、表1可知,初始模拟物与TATP的外观相似,有效原子序数相同,元素质量分数相差小于 0.020%,堆积密度相差 0.012g/cm<sup>3</sup>;两者相似度较

表 1 TATP 与初始模拟物的比对数据  
Tab.1 Comparison data of TATP and original simulant

样品	$w(\text{C})/\%$	$w(\text{H})/\%$	$w(\text{O})/\%$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$Z_{\text{eff}}$
TATP	48.640	8.160	43.200	0.560	6.794
初始模拟物	48.620	8.170	43.210	0.572	6.794

高,初始模拟物基本符合要求。

2.2 爆炸性试验

将质量分数为 10%、20%、30% 的 TATP 添加到初始模拟物中,考察 TATP 添加量对混合体系爆炸性的影响。

含质量分数为 20%、30% TATP 的模拟物克南试验结果如图 2 及表 2 所示。

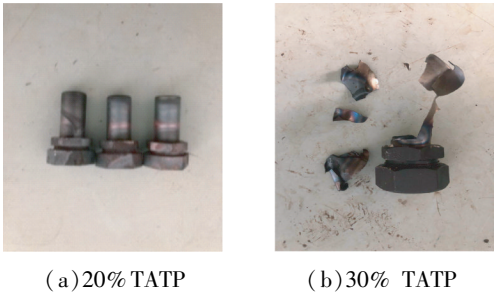


图 2 克南试验结果

Fig.2 Results of Koenen test

表 2 克南试验结果

Tab.2 Results of Koenen test

$w(\text{TATP})/\%$	钢管状态	结果
10	未破裂	-
20	未破裂	-
30	破裂	+

当  $w(\text{TATP})$  为 10% 和 20% 时,钢管未破裂;当  $w(\text{TATP})$  为 30% 时,钢管破裂。结果表明,  $w(\text{TATP}) \leq 20\%$  时,模拟物在高度密闭条件下对强加热作用不敏感,安全性较好;  $w(\text{TATP}) \geq 30\%$  时,模拟物对强加热作用较敏感,易爆炸,安全性较低。

根据克南试验结果,选择  $w(\text{TATP})$  为 20% 的模拟物进行隔板试验,结果如图 3 和表 3 所示。

当  $w(\text{TATP})$  为 20% 时,验证板未见到损伤,表明  $w(\text{TATP}) \leq 20\%$  时,模拟物不再具备传播爆轰的能力。

综上,当模拟物中  $w(\text{TATP}) \leq 20\%$  时,该物质在高度密闭条件下对强加热作用不敏感,不具备传播爆轰的能力。分析可知,由于 TATP 含量较低,爆

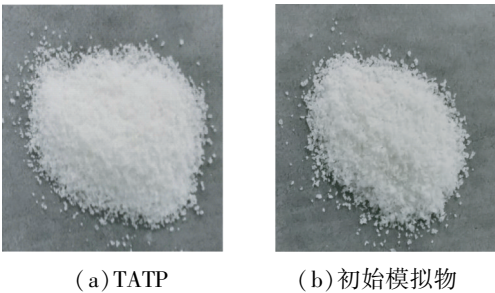


图 1 TATP 及初始模拟物外观

Fig.1 Appearance of TATP and original simulant





图3 联合国隔板试验结果

Fig.3 Results of UN gap test

表3 联合国隔板试验结果

Tab.3 Results of UN gap test

$w(\text{TATP})/\%$	破裂长度/cm	验证板状态	结果
20	20	突出	-

炸时放出的热量较少,不足以使其他组分发生化学反应;同时,组分中的糖、醇类化学性质稳定,阻断了反应的连续发生;因此,该模拟物失去了爆炸性,安全性提高。

2.3 相容性试验

测试得到 TATP、初始模拟物及  $w(\text{TATP})$  为 20% 的模拟物的 DSC 曲线,以体现 TATP 与模拟物之间的相容性。试验结果见图 4。

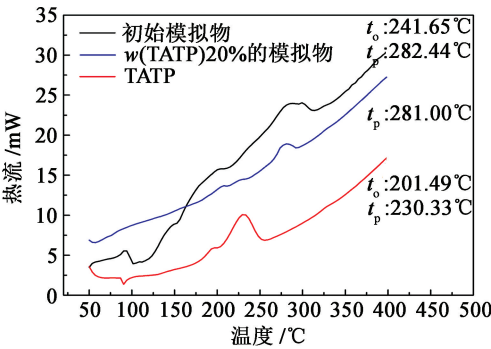


图4 DSC 测试结果

Fig.4 Results of DSC test

由图 4 可知,初始模拟物、TATP 的起始放热温度  $t_0$  分别为 241.65、201.49 °C。分析可知,TATP 中含有不稳定的过氧基—O—O—,受热过高时易断裂;而初始模拟物为糖、醇类,含有的羰基—CHO 和羟基—OH 比过氧基稳定;因此,其热稳定性优于 TATP。初始模拟物、 $w(\text{TATP})$  为 20% 的模拟物的峰温  $t_p$  分别为 282.44、281.00 °C,  $\Delta t_p < 2$  °C,说明两者之间相容性较好。根据相容性结果,对  $w(\text{TATP})$  为 20% 的模拟物进行机械感度试验。

2.4 机械感度试验

TATP 及  $w(\text{TATP})$  为 20% 的模拟物的撞击感度试验结果如表 4 所示。

表4 TATP 的临界撞击能量试验

Tab.4 Results of critical impact energy test for TATP

$w(\text{TATP})/\%$	试验条件			结果	$E/\text{J}$	$E_c/\text{J}$
	$t/^\circ\text{C}$	$m/\text{kg}$	$h/\text{cm}$			
100	25	1	30	1/2	3	
100	25	1	20	1/4	2	$\leq 2$
20	25	10	50	0/6	50	$> 50$

25 °C 条件下,TATP 的临界撞击能  $E_c \leq 2 \text{ J}$ ,即撞击能达到下限值时,仍有爆响声,说明 TATP 的撞击感度较高,对机械撞击敏感; $w(\text{TATP})$  为 20% 的模拟物的临界撞击能大于 50 J,即撞击能达到上限值时仍无明显现象,说明模拟物撞击感度较低,对机械撞击不敏感。

TATP 及  $w(\text{TATP})$  为 20% 的模拟物的摩擦感度试验结果如表 5 所示。

表5 TATP 的临界摩擦力试验

Tab.5 Results of critical friction test for TATP

$w(\text{TATP})/\%$	试验条件		结果	$F_c/\text{N}$
	$t/^\circ\text{C}$	$F/\text{N}$		
100	25	48	1/3	
100	25	36	1/3	
100	25	20	1/1	$\leq 20$
20	25	360	0/6	$> 360$

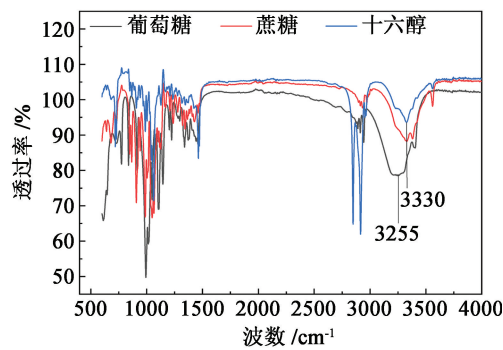
25 °C 条件下 TATP 的临界摩擦力  $F_c \leq 20 \text{ N}$ ,即在摩擦力较小的情况下,仍有明显噼啪声,说明 TATP 摩擦感度较高,对机械摩擦敏感; $w(\text{TATP})$  为 20% 的模拟物的临界摩擦力大于 360 N,即摩擦力达到上限值时仍无明显现象,说明模拟物摩擦感度较低,对机械摩擦不敏感。

综上,TATP 对机械撞击及摩擦较敏感,危险性高;当  $w(\text{TATP}) \leq 20\%$  时,模拟物对机械撞击及摩擦并不敏感。分析可知,这是由于模拟物中 TATP 含量低,受到机械冲击时,由于大量稳定的糖、醇类的存在,整体的高敏感性大幅度下降,因此,该模拟物对机械撞击及摩擦敏感度明显下降,安全性提高。

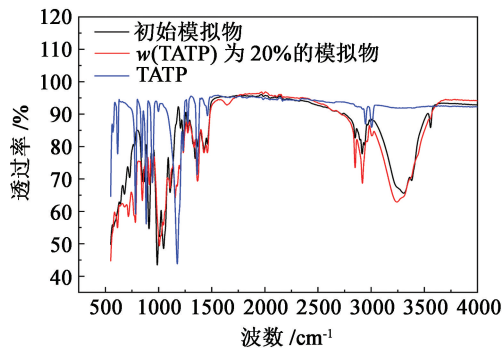
2.5 红外及拉曼光谱测试

初始模拟物各组分、TATP、初始模拟物及  $w(\text{TATP})$  为 20% 的模拟物的红外光谱测试结果如图 5 所示。

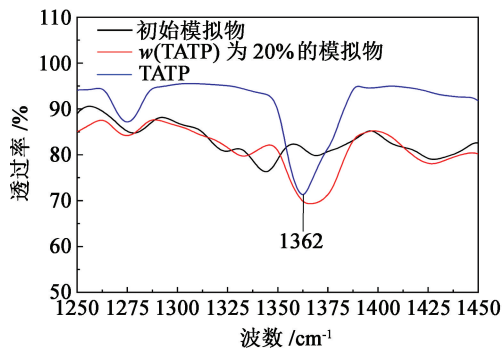
图5(a)为初始模拟物各组分在波数4 000~600  $\text{cm}^{-1}$ 之间的红外图;图5(b)为TATP、初始模拟物及  $w(\text{TATP})$  为20% 的模拟物在波数4 000~500  $\text{cm}^{-1}$ 之间的红外图;图5(c)为各样品在在波数1 450~1 250  $\text{cm}^{-1}$ 之间的红外局部图。图5(a)中,3 255



(a) 初始模拟物各组分

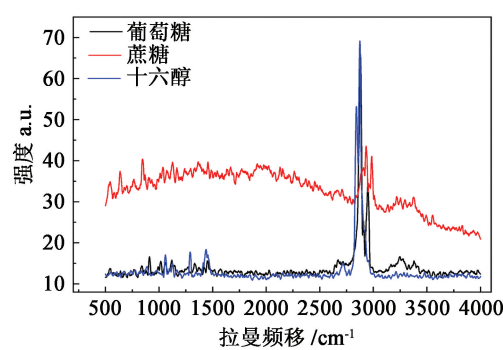


(b) TATP、初始模拟物及  $w(\text{TATP})$  为 20% 模拟物

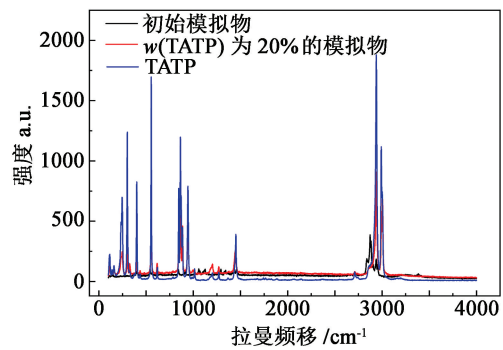


(c) TATP、初始模拟物及  $w(\text{TATP})$  为 20% 模拟物的局部  
图 5 红外光谱图

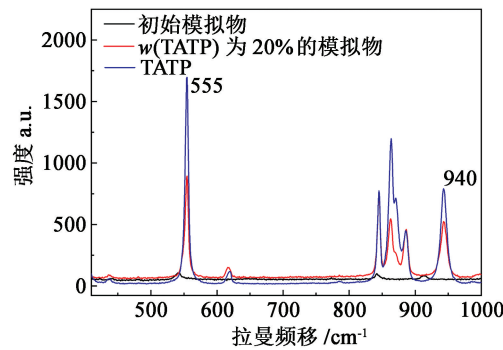
Fig. 5 Infrared spectrum



(a) 初始模拟物各组分



(b) TATP、初始模拟物及  $w(\text{TATP})$  为 20% 的模拟物



(c) TATP、初始模拟物及  $w(\text{TATP})$  为 20% 的模拟物的局部  
图 6 拉曼光谱图

Fig. 6 Raman spectrum

$\text{cm}^{-1}$  处为葡萄糖的—OH 的伸缩振动峰;  $3\,330\,\text{cm}^{-1}$  左右存在蔗糖、十六醇的—OH 伸缩振动峰; 结合图 5(b) 中初始模拟物红外图可知, 各组分充分混合后, 谱图中特征峰并无明显变化, 说明混合过程中并无新的化学键产生; 图 5(c) 中,  $1\,362\,\text{cm}^{-1}$  处为 TATP 中 C—O 键的伸缩振动特征峰<sup>[15]</sup>, 此类特征峰在 TATP 及  $w(\text{TATP})$  为 20% 的模拟物的谱图中均有呈现, 而初始模拟物中无该类特征峰; 说明红外谱图能根据特征峰有效检测出模拟物中的 TATP, 可有效用于安检培训。

初始模拟物各组分、TATP、初始模拟物及  $w(\text{TATP})$  为 20% 的模拟物的拉曼光谱测试结果如图 6 所示。

图 6(a) 为初始模拟物各组分在拉曼频移  $4\,000 \sim 500\,\text{cm}^{-1}$  之间的拉曼图; 图 6(b) 为 TATP、初始模拟物及含 20% TATP 模拟物  $4\,000 \sim 100\,\text{cm}^{-1}$  的拉曼图; 图 6(c) 为 3 种样品在拉曼频移为  $1\,000 \sim 400\,\text{cm}^{-1}$  之间的拉曼局部图。图 6(a) 中,  $2\,800 \sim 2\,900\,\text{cm}^{-1}$  之间存在各组分的较强特征峰; 结合图 6(b) 中初始模拟物拉曼图, 除该位移附近有较强特征峰外, 并无其他明显峰, 进一步说明各组分混合后并无发生化学反应, 即无新物质产生; 图 6(c) 中,  $555\,940\,\text{cm}^{-1}$  处为 TATP 的拉曼特征峰, 此类特征峰在 TATP 及含 20% TATP 模拟物的谱图中均有呈现, 吻合度较高, 而初始模拟物中无该类特征峰; 说明拉曼谱图能根据特征峰有效检测出模拟物中的

TATP,可有效用于安检培训。

3 结 论

- 1) TATP 模拟物与 TATP 具有相似的外观及相同的有效原子序数,元素质量分数相差不大于 0.020%,堆积密度相差 0.012 g/cm<sup>3</sup>,符合模拟物要求。
- 2) TATP 模拟物组分间相容性较好,安全性高,原料来源广泛,易于制备。
- 3) TATP 模拟物应用范围广,不仅可以代替 TATP 在 X 光机、CT 机等高通量安检仪中进行成像培训,也可用于基于红外、拉曼等需要特征峰的高灵敏度安检仪中。

参 考 文 献

[1] 郭亚婷,徐旭冉,潘峰,等. TATP 和 DADP 的安全性研究[J]. 刑事技术, 2017, 42(2): 103-106.  
GUO Y T, XU X R, PAN F, et al. Study on safety of TATP and DADP[J]. Forensic Science and Technology, 2017, 42(2): 103-106.

[2] 刘玲,袁俊明,刘玉存,等. 自制炸药的冲击波超压测试及 TNT 当量估算[J]. 火炸药学报, 2015, 38(2): 50-53.  
LIU L, YUAN J M, LIU Y C, et al. Shock wave overpressure test and evaluation of TNT equivalent of self-made explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015, 38(2): 50-53.

[3] 吴文山,王昊,许春春. 基于 RFID 技术的 X 光机安检图像识别绑定分流方法[J]. 警察技术, 2019(5): 82-85.

[4] 马小虎,刘志华. 双能量的多视角 X 射线衍射探测技术在机场行李安检中的应用[J]. 自动化应用, 2016(10): 78-79.

[5] 刘亚昌,孙玉友,张冀峰,等. 使用手持式 X 射线荧光光谱仪临场检测爆炸装置塑料碎片[J]. 刑事技术, 2019, 44(3): 228-232.  
LIU Y C, SUN Y Y, ZHANG J F, et al. Applying portable X-ray fluorescent spectrometer to rapidly detect the plastic components from improvised explosive devices

[J]. Forensic Science and Technology, 2019, 44(3): 228-232.

[6] 温晓燕,苏鹏飞,潘清,等. 改性 B 炸药主要组分的近红外光谱检测方法[J]. 含能材料, 2019, 27(2): 162-166.  
WEN X Y, SU P F, PAN Q, et al. Detection method of the main components in modified composition B by near infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(2): 162-166.

[7] FANG X, AHMAD S R. Detection of explosive vapour using surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. Applied Physics B, 2009, 97(3): 723-726.

[8] 高凤,刘文芳,孟子晖,等. 激光拉曼光谱技术在火炸药分析检测中的应用研究进展[J]. 含能材料, 2018, 26(2): 185-196.  
GAO F, LIU W F, MENG Z H, et al. Review on application of laser raman spectroscopy in analysis and detection of explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(2): 185-196.

[9] 卢秀娟,徐文国,刘吉平,等. TATP 射线级仿真炸药模拟物: CN 201210336676.9[P]. 2012-12-26.

[10] 刘吉平,阚美秀. TATP 全仿真炸药模拟物: CN 201210297379.8[P]. 2012-11-28.

[11] HUANG V L, SUGANTHAN P N, LIANG J J. Comprehensive learning particle swarm optimizer for solving multiobjective optimization problems[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2006, 21(2): 209-226.

[12] 杨立瑞. 双能量 X 射线安检机的炸药、毒品探测功能[J]. 警察技术, 2000(1): 8-10.

[13] 国防科学技术工业委员会. 中华人民共和国国家军用标准 炸药试验方法: GJB 772A—1997[S]. 北京: 国防科工委军标出版社, 1997.

[14] Recommendations on the transport of dangerous goods: tests and criteria[M]. 7th Revised ed. New York: United Nations Publication, 2020.

[15] 蔡建刚,郭俊虎. 手持式红外和拉曼光谱仪实时检测炸药的应用分析[J]. 中国公共安全(学术版), 2013(4): 122-125.  
CAI J G, GUO J H. Application of handheld ATR-FTIR spectrometer and Raman spectrometer in real-time detection of explosives[J]. China Public Safety (Academic Edition), 2013(4): 122-125.