

基于模板匹配的太赫兹光谱识别物质方法

殷清燕¹, 车露美^{1*}, 韩占锁², 周亚西³, 罗蓓蓓²

¹西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055;

²西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065;

³西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065

摘要 针对混合物成分识别难题, 采用太赫兹时域光谱技术获得物质的特征吸收光谱, 研究 0.1~7.0 THz 宽带太赫兹吸收光谱处理方法和特征光谱识别方法。先扣除空气环境中环境噪声、背景噪声和随温度变化的水蒸气吸收光谱对待测物质造成的影响, 获得用于识别的太赫兹吸收光谱; 基于模板匹配、数值平滑、主吸收峰提取与识别和混合物成分判定等方法, 建立混合物成分的太赫兹光谱提取分析模型; 调用太赫兹光谱数据库, 采用模板匹配和吸收峰峰值、面积比对的方法, 依次判断识别扣除各样品的太赫兹吸收光谱。最后, 依据算法模型完成混合火炸药的太赫兹特征光谱探测与识别。结果表明, 所提方法可逐一分辨混合物成分, 是一种可靠的太赫兹宽带光谱特性识别方法。

关键词 机器视觉; 混合物识别; 太赫兹光谱; 模板匹配; 吸收峰提取

中图分类号 O433.1; TQ560.71

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.101506

Template Matching-Based Method for Identifying Substances in Terahertz Spectrum

Yin Qingyan¹, Che Lumei^{1*}, Han Zhansuo², Zhou Yaxi³, Luo Beibei²

¹College of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

²Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

³Xi'an Institute of Modern Control Technology, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract Aiming at the problem of mixture composition identification, terahertz time-domain spectroscopy is used to obtain the characteristic absorption spectrum of a substance, and the processing method of 0.1-7.0 THz wideband terahertz absorption spectrum and a method to identify its spectral characteristics are studied. First, we deduct the influence of the environmental noise, background noise, and water vapor absorption spectrum changing with temperature change on the measured substance in the are environment, and obtain the terahertz absorption spectrum for identification based on template matching, numerical smoothing, main absorption peak extraction and identification, followed by the determination of mixture components. We then establish a model for extracting and analyzing the terahertz spectra of the mixture components, refer to the terahertz spectrum database, use template matching, absorption peak to peak, and area comparison methods to sequentially determine and deduct the terahertz absorption spectra of each sample. Finally, based on the proposed algorithm model, the terahertz characteristic spectrum detection and identification of the mixed explosives are achieved. Results show that the proposed method can sequentially distinguish the components of the mixture, and is a reliable method to identify the terahertz broadband spectral characteristics for these components.

Key words machine vision; mixture identification; terahertz spectrum; template matching; absorption peak extraction

OCIS codes 150.1135; 150.1488

收稿日期: 2019-09-11; 修回日期: 2019-10-14; 录用日期: 2019-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(11601412)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2017JQ1034)

* E-mail: 2211952441@qq.com

1 引言

太赫兹辐射通常是指频率在 0.1~10.0 THz 范围内的电磁辐射,可穿透大多数非极性物质,同时因为太赫兹辐射具有较低的光子能量,不会对生物体产生有害的电离和伤害,因此在物质特性分析和无损检测等方面具有巨大的应用前景。许多化合物在太赫兹波段有着独特的“指纹光谱”,可应用于物质的准确识别。

现有的太赫兹时域光谱系统能够获得被测样品的太赫兹吸收光谱,并由此分析判定被测样品中感兴趣的成分;但被测样品的成分经常存在一定判定误差,尤其是被测样品为混合物时,只能检测出其中一种成分或部分成分,而不能逐一分辨出其中所有物质成分,甚至对其中任何一种成分都无法识别^[1-3]。如果被测物质处在空气环境中,由于受到各类噪声和随温度等因素变化的水蒸气吸收谱的影响,上述不足将更为明显,从而制约了太赫兹技术在物质识别方面的应用^[4-5]。

针对现有的太赫兹光谱分析和识别方法的不足,本文旨在探讨一种基于模板匹配的太赫兹光谱处理方法,建立混合物成分的太赫兹光谱提取和分析模型,采用模板匹配和吸收峰峰值、面积比对的方法,依次判断和识别并扣除各样品的太赫兹吸收光谱,逐一分辨出被测样品的组成成分。

2 太赫兹吸收光谱处理识别物质方法

混合物样品可能包含多种物质成分,如炸药分为单体炸药和混合炸药两类。单体炸药分为硝基类、硝胺类、硝酸脂类、以及胺类和硝酸盐类等不同种类化合物^[6]。混合炸药由单体炸药和铝粉、木粉及各种添加剂等组成。如 CL-20,化学名称为六硝基六氮杂异伍兹烷;LLm-105,化学名称为 2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物;FOX-7 属于高能硝胺炸药,化学名称为 1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(DADNE);RDX 的分子式为 $(\text{CH}_2\text{NNO}_2)_3$,化学名称为环三亚甲基三硝胺。

针对混合物样品物质成分识别的难题,采用太赫兹光谱探测技术,通过被测物质的吸收特征光谱研究相应的吸收光谱处理及识别物质方法^[7-9],具体步骤如下。

1) 利用太赫兹时域光谱系统检测混合物 A 的组分。先获取混合物 A 的太赫兹吸收光谱,再扣除环境噪声和背景噪声,消除随温度变化的水蒸气吸

收谱造成的影响,获得用于识别的太赫兹吸收光谱。

2) 调用太赫兹光谱数据库,采用模板匹配和吸收峰比对的方法,依次判断、识别并扣除各样品的太赫兹吸收光谱;分析和判定扣除后的吸收光谱数据,直到检测出混合物所有组分。

光谱数据库中要确保包含有组成所述被测混合物 A 的各种单一物质的标准太赫兹吸收光谱,还可包含太赫兹频域常见物质的标准太赫兹吸收光谱,如火炸药和铝粉等^[10]。光谱数据库中所有的太赫兹吸收光谱和所述移除样品时测得的背景环境信号 $V(T)$ (T 为太赫兹吸收频率)均在液氮环境下测量,排除水蒸气吸收等干扰;被测混合物 A 的太赫兹吸收光谱 $U(T)$ 在普通空气条件下测量,测量结果中混入了水蒸气吸收的影响和各种噪声干扰。

3 基于模板匹配的太赫兹主吸收峰提取方法

针对被测物质处在空气环境中的太赫兹特征光谱信噪比低的问题,研究了基于模板匹配、数值平滑、主吸收峰提取与识别、噪声扣除与信号计算和混合物成分判定等识别方法^[11-13]。存在的问题:1) 特征吸收峰不明显;2) 若干吸收峰接近,不易区分。太赫兹特征光谱的提取方法如图 1 所示。

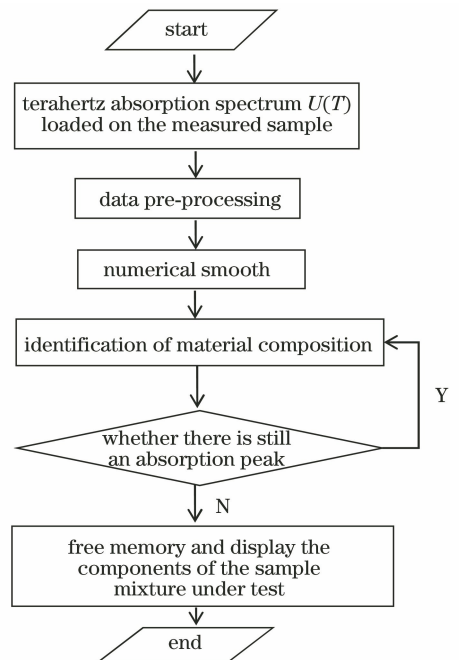


图 1 太赫兹主吸收峰的提取方法

Fig. 1 Terahertz main absorption peak extraction method
具体流程如下。

1) 消除干扰

测得被测样品的太赫兹吸收光谱和背景环境信

号,对该吸收光谱扣除背景环境信号和光谱数据库中的水蒸气吸收谱,得到预处理的太赫兹吸收光谱 $U_1(T)$ 。

2) 数值平滑

数值平滑的意义是进一步剔除太赫兹吸收光谱曲线上的随机噪声,提高识别的准确性。

当 $\left(T + \frac{b-1}{2}\right) > 10$ 时,

$$U_2(T) = [U_1(T) + U_1(T+a) + U_1(T+2a) + \dots + U_1(10) + U_1(T-a) + U_1(T-2a) + \dots + U_1(0.1)]/b, \quad (1)$$

当 $\left(T - \frac{b-1}{2}\right) < 0.1$ 时,

$$U_2(T) = [U_1(T) + U_1(T+a) + U_1(T+2a) + \dots + U_1\left(T + \frac{b-1}{2}a\right) + U_1(T-a) + U_1(T-2a) + \dots + U_1(0.1)]/b, \quad (2)$$

当 $\left(T - \frac{b-1}{2}\right) \geq 0.1$ 且 $\left(T + \frac{b-1}{2}\right) \leq 10$ 时,

$$U_2(T) = \left[U_1(T) + U_1(T+a) + U_1(T+2a) + \dots + U_1\left(T + \frac{b-1}{2}a\right) + U_1(T-a) + U_1(T-2a) + \dots + U_1\left(T - \frac{b-1}{2}a\right) \right] / b, \quad (3)$$

式中: b 为采样点总数; a 为采样间隔。用(1)~(3)式对预处理的太赫兹吸收光谱 $U_1(T)$ 进行数值平滑,得到用于物质识别的太赫兹吸收光谱 $U_2(T)$ 。

3) 主吸收峰识别

将太赫兹吸收光谱与太赫兹光谱数据库进行比较,提取被测样品的主吸收峰数据;从光谱数据库中逐一载入各物质的太赫兹吸收光谱。先确定光谱数据库中物质 E 的最大值点(主吸收峰),再以最大值点为中心,提取与该物质对应的被测样品吸收光谱数据,记为当前识别谱 $U_3(T)$ 。这一步提取的是与物质 E 对应频率的被测样品吸收光谱数据,需分析后才能判定物质 E 是否存在于被测样品中。

这里物质 A 是指被测混合物,物质 E 是可能存在于混合物 A 中的待检成分,具有自己的太赫兹吸收谱。虽在现有技术下,不同探测设备针对同一物质的太赫兹吸收光谱可能会获得不同的探测结果,单一物质的太赫兹吸收光谱作为具有共识的已知量来使用,物质 E 正是这样具有公认的太赫兹吸收光谱的单一物质。

4 混合物成分的太赫兹光谱提取和分析模型

建立混合物成分的太赫兹光谱提取和分析模型,通过分析主吸收峰特征和吸收谱形状以判定物质 E 是否存在于混合物中,识别流程如图 2 所示,其

中主吸收峰特征通过吸收峰高低差异进行判定,吸收谱形状通过计算比较物质 E 的吸收谱面积和 $U_3(T)$ 的面积进行判定,由此确定混合物吸收光谱中是否存在物质 E 的特性吸收谱。其中峰值偏差 ϵ 和面积偏差 f 由实验确定,取值过大导致漏判,取值过小导致错判。

4.1 基于模板匹配的判定计算

利用生成物质 E 对应的判定模板 $Z_E(T)$ 判定模板在相同频率处,包含了物质 E 的主吸收峰,其他位置用零值填充,即在 T 取值位于物质 E 的主吸收峰时, $Z_E(T) = U_E(T)$,其他频率点 $Z_E(T) = 0$,其中 $U_E(T)$ 表示物质 E 在 T 处的吸收光谱。

将 $Z_E(T)$ 覆盖在 $U_3(T)$ 上进行比对,寻找在 $U_3(T)$ 上是否出现了物质 E 的主吸收峰,判别方法如下。

1) 计算峰值偏差

计算并判断峰值偏差

$$|Z_E(t) - U_3(t)| < \epsilon \quad (4)$$

是否成立,式中: $Z_E(t)$ 为 $Z_E(T)$ 在太赫兹频率为 t 时的值; $U_3(t)$ 为 $U_3(T)$ 在太赫兹频率为 t 时的值。

若(4)式成立,说明 $U_3(T)$ 在 t 位置处出现了类似物质 E 的吸收峰,则自动进入步骤 2),进一步判定该吸收峰是否由物质 E 产生;若(4)式不成立,说明在 t 位置处未出现明显类似物质 E 的吸收峰,则自动进入步骤 3),进一步确认在 $U_3(t)$ 上是否存在

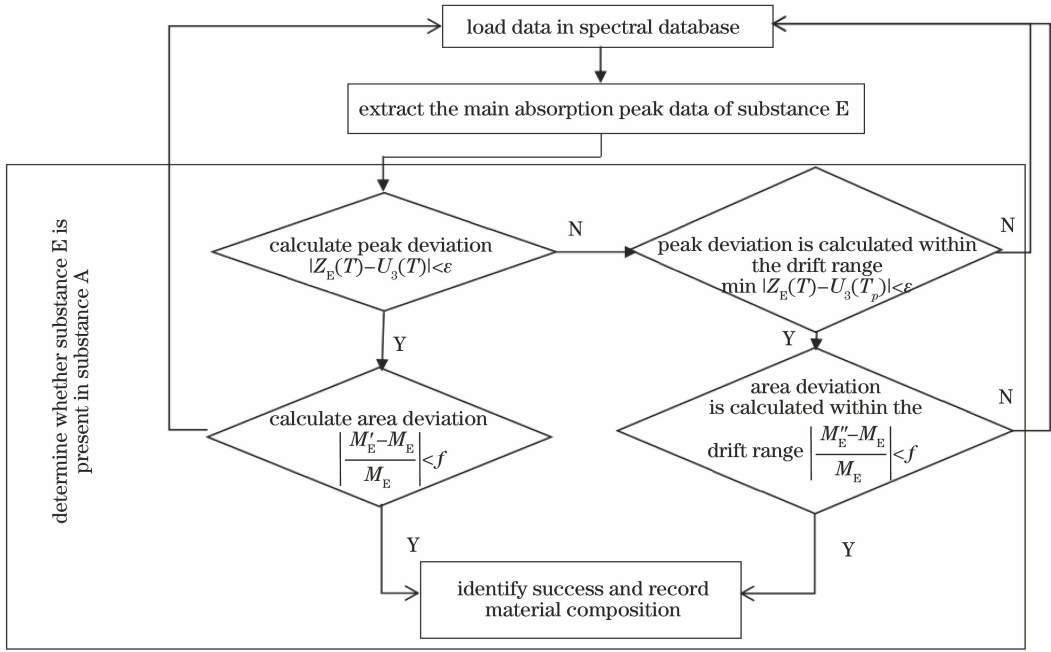


图 2 识别物质成分模型的流程图

Fig. 2 Flow chart for identifying substance components models

在物质 E 的吸收峰。

2) 计算面积偏差

计算 $Z_E(T)$ 的面积 M_E 和 $U_3(T)$ 对应区域的面积 M'_E , 即

$$M_E = \sum_{T=i-ia}^{T=i+ja} Z_E(T), \quad (5)$$

$$M'_E = \sum_{T=i-ia}^{T=i+ja} U_2(T), \quad (6)$$

式中: i, j 分别为以峰值点为中心, 向左、向右的取样点个数。

吸收峰面积偏差的表达式为

$$\left| \frac{M'_E - M_E}{M_E} \right| < f. \quad (7)$$

若(7)式成立, 说明 $U_3(T)$ 对应位置出现的吸收峰高度和面积均与物质 E 主吸收峰相同, 则可判定混合物 A 中存在物质 E, 将物质 E 记录下来。若(7)式不成立, 说明 $U_3(T)$ 对应位置出现的吸收峰不是由物质 E 产生, 当前物质 E 的判断流程结束, 返回载入下一种物质, 继续识别。

实验证明 f 的取值在 3%~8% 之间较为合理, f 值太小导致识别误差增大, 使得存在于混合物 A 中的物质未能有效识别, 甚至使识别过程陷入无限循环以致无法结束, f 值太大可能导致错判, 将不同的吸收峰错误地判定为相同物质。

3) 在漂移处理数 p 以内计算峰值偏差

某些情况下, 在采集、处理、分析和转换等软硬

件环节中引入的误差, 会导致测得的吸收谱与物质 E 的实际吸收谱出现偏差, 从直观上看好像吸收谱在频率坐标上出现偏移, 在这种情况下为了识别出物质 E, 需允许频率有一个合理的偏移量, 这个偏移量就是漂移处理数 p 。

在 $U_3(T)$ 中 t 附近寻找是否存在与物质 E 类似的吸收峰, 方法如下。

吸收峰的太赫兹频率个数为

$$2p = |Z_E(t) - U_3(T_p)|$$

$$T_p = t + a, t + 2a, \dots, t + pa, t - a, t - 2a, \dots, t - pa, \quad (8)$$

式中: T_p 为太赫兹吸收频率值序列; $U_3(T_p)$ 为 $U_3(T)$ 在 T_p 处的值。

找出在 $2p$ 个值中的最小值, 记为 $\min |Z_E(t) - U_3(T_p)|$, 并记录取得该最小值时 T_p 的漂移频率值 q 。判断

$$\min |Z_E(t) - U_3(T_p)| < \epsilon \quad (9)$$

是否成立。若(9)式不成立, 说明在 $U_3(T)$ 上找不到物质 E 的吸收峰, 即混合物 A 中没有物质 E, 则物质 E 的识别流程结束, 回到步骤 1) 计算峰值偏差选择下一种物质继续识别; 若(9)式成立, 说明在 $U_3(T)$ 上存在与物质 E 相似的吸收峰, 则进入步骤 4), 进一步判断。

p 值的大小决定了在处理中允许主吸收峰频率漂移的范围, p 值越大, 允许主吸收峰频率漂移的范

围也越大,同时造成错误识别的可能性也越大,实验表明 p 的最佳取值范围为 3~12。

4) 在 p 以内计算面积偏差

计算 $Z_E(T)$ 的面积 M_E 和 $U_3(T)$ 在 q 附近的面积 M''_E , 即

$$M_E = \sum_{T=t-ia}^{T=t+ja} Z_E(T), \quad (10)$$

$$M''_E = \sum_{T=q-ia}^{T=q+ja} U_3(T). \quad (11)$$

吸收峰面积偏差的表达式为

$$\left| \frac{M''_E - M_E}{M_E} \right| < f. \quad (12)$$

若(12)式成立,说明 $U_3(T)$ 在 q 位置出现的吸收峰高度和面积均与物质 E 主吸收峰相同,则可判定混合物 A 中存在物质 E,将物质 E 记录下来。若(12)式不成立,说明 $U_3(T)$ 对应位置出现的吸收峰不是由物质 E 产生,载入下一种物质,继续识别。这增加了在一定频率漂移范围内的识别和判断,消除了漂移带来的影响,使得处理更可靠。

4.2 样品吸收谱的扣除与判定方法

当第一次有物质被识别时,使用 $U_2(T)$ 扣除物质 E 的 $U_E(T)$,扣除后的吸收光谱作为 $U_3(T)$,即 $U_3(T) = U_2(T) - U_E(T)$; 已有物质被识别时,从 $U_3(T)$ 中扣除物质 E 的 $U_E(T)$,扣除后的吸收光谱 $U_3(T) - U_E(T)$ 作为 $U_3(T)$ 。

判定是否仍有吸收峰存在的方法如下。

判定 $U_3(T)$ 是否有大于吸收峰高度阈值 r 的点;若 $U_3(T)$ 中没有大于 r 的点,说明 $U_3(T)$ 中已没有吸收峰,所有被测样品中存在的物质都已被识别。

实验证明 r 的取值在 0.2~0.3 之间较为合理, r 值太小导致识别过程冗长,甚至使识别过程陷入无限循环以致无法结束, r 值太大会使一些吸收峰被错过,导致部分物质无法从被测样品中识别出来。

5 混合火炸药太赫兹光谱实验结果

采用美国 Zomega 公司生产的 ZAP(空气产生原理的太赫兹光谱仪)宽带太赫兹时域光谱仪分别对硝基弧、TNT(三硝基甲苯)固态样品和 TTNT-F(炸药)粉末等三种混合物火炸药样品的太赫兹光谱进行测试,对测试结果采用太赫兹光谱识别算法进行处理,火炸药太赫兹光谱的测试实验是在氮气环境下进行,始终对 ZAP 宽带太赫兹时域光谱仪内部充氮气,氮气环境下的光谱测试结果,如图 3~5 所示。

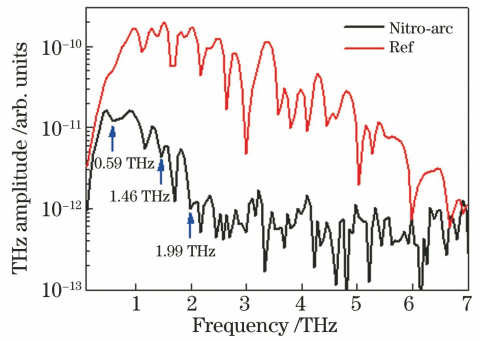


图 3 硝基弧混合样品的有效太赫兹吸收峰曲线
Fig. 3 Effective terahertz absorption peak curves of nitro-arc mixed samples

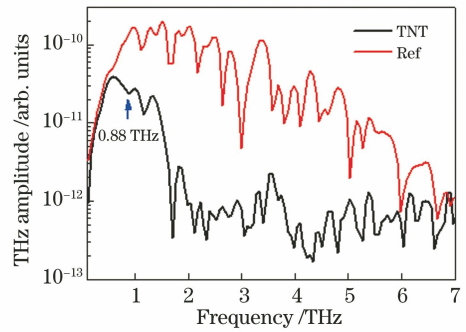


图 4 TNT 固态混合样品的有效太赫兹吸收峰曲线
Fig. 4 Effective terahertz absorption peak curves of TNT solid mixed samples

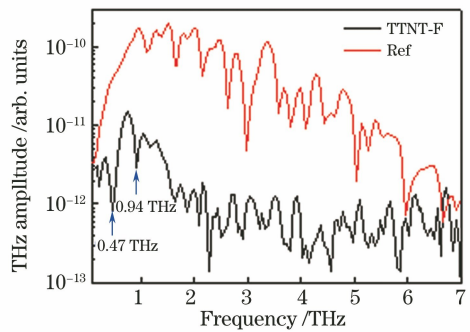


图 5 TTNT-F 粉末混合样品的有效太赫兹吸收峰曲线
Fig. 5 Effective terahertz absorption peak curves of TTNT-F powder mixed samples

该系统采用飞秒激光激发空气产生太赫兹波,其频谱覆盖范围为 0.1~7.0 THz。原始测试结果包含了信号吸收峰、水吸收峰和噪声峰,根据太赫兹吸收光谱处理识别物质方法去除水吸收峰;进而,按照基于模板匹配的太赫兹主吸收峰提取算法运行软件,滤掉噪声吸收峰。在识别物质成分时,识别出水吸收峰和噪声产生无效的太赫兹光谱特征峰:1.05, 1.64, 2.17, 2.63, 3.00, 5.04, 6.03 THz, 根据识别算法,扣除这些特征吸收峰。据此判断出火炸药混合

物中包含铝粉和粘合剂等物质,铝粉和粘合剂的吸收峰分别为 0.468 THz 和 0.937 THz。

物质识别的结果:有效太赫兹吸收峰值在 0.59, 1.46, 1.99 THz 时,对应的样品为硝基弧炸药;有效太赫兹吸收峰值在 0.88 THz 时,对应的样品为 TNT 固态样品;有效太赫兹吸收峰值在 0.47 THz 和 0.94 THz 时,对应的样品为 TTNT-F 粉末样品。基于模板匹配的太赫兹光谱识别物质方法,可解决混合物样品物质成分的识别难题,其中 Ref 为无样品时的有效太赫兹吸收峰曲线。

6 结 论

对于混合了铝粉和粘合剂等的炸药,吸收峰的提取比较困难,采用基于模板匹配的宽带太赫兹光谱识别物质方法可有效识别物质典型的太赫兹吸收峰。该方法将实验环境下的太赫兹光谱与普通环境下的太赫兹光谱结合,扣除环境噪声和背景噪声,消除随温度变化的水蒸气吸收造成的影响,获得用于识别的太赫兹吸收光谱,再调用太赫兹光谱数据库,采用模板匹配和吸收峰高度、面积比对的方法,依次判断和识别并扣除各样品的太赫兹吸收光谱;判定扣除后的吸收光谱数据,根据对多种混合物样品的检测结果,可检测出混合物中所有组分。

参 考 文 献

- [1] Li H G, Yang H R, Xue Z L, et al. Terahertz radiation detection of low temperature blackbody based on narrowband spectral filter method [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21 (6): 1410-1416.
李宏光, 杨鸿儒, 薛战理, 等. 窄带光谱滤光法探测低温黑体太赫兹辐射[J]. 光学精密工程, 2013, 21 (6): 1410-1416.
- [2] Zhang X N, Chen J, Zhou Z K. THz time-domain spectroscopy technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(7): 35-38.
张兴宁, 陈稷, 周泽魁. 太赫兹时域光谱技术[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(7): 35-38.
- [3] Feng R S, Li W W, Zhou Q L, et al. Terahertz spectroscopy of explosives and the related compounds [J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(5): 337-339.
冯瑞姝, 李微微, 周庆莉, 等. 爆炸物及相关混合材料的太赫兹波谱[J]. 无损检测, 2009, 31(5): 337-339.
- [4] Wang G, Zhou H C, Yao B D, et al. Progress of

terahertz spectroscopy detection technique of explosives [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(1): 013001.

王高, 周汉昌, 姚宝岱, 等. 爆炸物太赫兹光谱探测技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48 (1): 013001.

- [5] Du Y, Zhang W B, Xiao L. Application of terahertz wave technology in explosive analysis [J]. Information and Electronic Engineering, 2011, 9(3): 287-290.
杜宇, 张伟斌, 肖丽. 太赫兹检测技术在炸药检测中的应用[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(3): 287-290.
- [6] Xie Q, Yang H R, Li H G, et al. Explosive identification based on terahertz time-domain spectral system[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 34(10): 2392-2399.
解琪, 杨鸿儒, 李宏光, 等. 基于太赫兹时域光谱系统的爆炸物识别[J]. 光学精密工程, 2016, 34(10): 2392-2399.
- [7] Lu S H. Detection of explosives by terahertz spectroscopic techniques [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(4): 040006.
卢树华. 基于太赫兹光谱技术的爆炸物类危险品检测[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(4): 040006.
- [8] Chen T, Li Z, Mo W. Identification of terahertz absorption spectra of explosives based on fuzzy pattern recognition[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(11): 2480-2486.
陈涛, 李智, 莫玮. 基于模糊模式识别的爆炸物 THz 光谱识别[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2480-2486.
- [9] Yao B D, Wang G. Analysis of terahertz spectrum of explosives RDX and HMX [J]. Electro-Optic Technology Application, 2010, 25(6): 11-13.
姚宝岱, 王高. 钝感 RDX 及 HMX 炸药的太赫兹光谱分析[J]. 光电技术应用, 2010, 25(6): 11-13.
- [10] Chen T, Zhang C J, Xu C P. Study on terahertz time-domain spectroscopy of tartaric acid isomers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54 (8): 081202.
陈涛, 张超杰, 许川佩. 酒石酸异构体的太赫兹时域光谱研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 081202.
- [11] Gong W P, Li Q, Dong R J. Comparison of composite image segmentation methods for terahertz holography reconstruction images [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 090901.
巩文盼, 李琦, 董儒汲. 分割太赫兹全息再现像的复

- 合方法的比较[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 090901.
- [12] Wang Y Y, Ren Y C, Chen L Y, et al. Terahertz wave wide-beam imaging technology based on block compressive sensing theory[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0407001.
王与焯, 任宇琛, 陈霖宇, 等. 基于分块压缩感知理论的太赫兹波宽光束成像技术[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0407001.
- [13] Liu J X, Du B, Deng Y Q, et al. Terahertz-spectral identification of organic compounds based on differential PCA-SVM method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614039.
刘俊秀, 杜彬, 邓玉强, 等. 基于差分-主成分分析-支持向量机的有机化合物太赫兹吸收光谱识别方法[J]. 中国激光, 2019, 46(6): 0614039.