

doi:10.3788/gzxb20154407.0730002

多角度红外差分吸收光谱的化学污染物 在线检测方法

刘家祥^{1,2}, 方勇华^{1,2}, 崔方晓¹, 吴军²

(1 中国科学院大学, 北京, 100049)

(2 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘 要: 基于多角度红外差分吸收光谱, 提出一种针对物体表面化学污染物在线检测法. 用红外遥测光谱仪和光源, 以不同角度对化学污染物进行检测, 根据不同角度吸收率的差别, 通过差分法提取化学污染物的光谱特征. 在分析多角度红外差分吸收光谱的化学污染物在线检测模型的基础上, 分别在室内和野外对不同基底上的三种化学污染物: 二甲基硅油, 磷酸三乙酯和水杨酸甲酯进行检测. 结果表明, 借助于多角度红外吸收光谱, 该方法在室内和野外都能准确提取典型基底上三种物质的光谱特征, 且基底越平整, 光源入射角的角度差别越大, 特征越明显.

关键词: 红外光谱学与光谱仪; 辐射检测; 多角度红外差分吸收光谱; 表面化学污染物; 红外光谱

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)07-0730002-8

Research on in situ Detection of Chemical Contaminants Based on Multi-angle Infrared Differential Absorption Spectra

LIU Jia-xiang^{1,2}, FANG Yong-hua^{1,2}, CUI Fang-xiao¹, WU Jun²,

(1 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(2 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to detect contaminants on surface, a method for surface contamination detection was developed based on multi-angle infrared differential absorption spectra. As contaminants' absorption ability varied with measurement angles, the spectral features of contaminants could be extracted from multi-angle observations. Firstly, multi-angle measurement model of chemical contaminants was introduced. Then three typical compounds: poly (dimethylsiloxane), triethyl phosphate and methyl salicylate were measured both in laboratory and field on different substrates. The results showed that, with multi-angle infrared differential absorption spectra, this method could extract directly spectral features of contaminants both in laboratory and field on typical surfaces, and spectral features of contaminants got more distinct with more smooth substrate and larger difference between two incidence angles employed. This method had application potential in immediate responding for chemical contaminants detection.

Key words: IR spectroscopy and spectrometers; Detection of radiation; Multi-angle infrared differential absorption spectra; Surface chemical contamination; Infrared spectra

OCIS Codes: 300.1030; 300.6340; 010.1030; 040.3060; 120.1880

0 引言

某些化学污染物会沾染在物体表面, 对周围环境

和人们的身体健康造成危害. 例如用于处理化工厂消防事故的消防车在冲洗完成后, 由于缺乏有效检测设备, 通常无法确定有害物质是否还残留于车子表面^[1].

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40171232)资助

第一作者: 刘家祥(1983-), 男, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究方向为化学污染物在线检测等. Email: luckuis@163.com

导师(通讯作者): 方勇华(1966-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为红外高光谱技术, 超高分辨率遥感技术, 遥感信息表征技术等.

Email: yhfang@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2014-10-17; 录用日期: 2015-01-04

<http://www.photon.ac.cn>

传统的色谱-质谱法^[2]由于所需设备庞大,操作过程繁琐,不太适用于化学污染物在线检测. 在一些准确度要求不是太高的场合,人们更愿意采用更为简便的红外光谱法. 目前用于在线检测的红外光谱法主要有激光诱导蒸汽发射率法^[10]、差分偏振法^[11-13]和亮温光谱法^[14-16]等.

在线检测红外光谱法使用的光谱仪通常为红外遥测光谱仪,内部光路系统与室内分析光谱仪大致相同,区别是红外遥测光谱仪没有主动光源,探测器接收的辐射来自光谱仪外部. 红外遥测光谱仪在污染气体检测方面已经有了比较成熟的应用^[3-9]. 由于物质的气相和液相的光谱特征大致相同,人们开始将红外遥测光谱仪应用于液态化学污染物研究.

Bell 等人提出激光诱导蒸汽发射率法 (Laser Induced Vapour Emission, LIVE)^[10],其优点是可直接探测化学污染物的发射谱,光谱特征明显,且可以对检测区域进行快速扫描成像,缺点是需要根据化学污染物吸收特性选择激光器波长,而热红外波段的激光器很昂贵,故不太实用;Thériault 等人^[11-13]提出差分偏振光谱法,其优点是不需要对视场,可直接对目标进行检测,操作方便,缺点是偏振片容易被污染,影响检测结果,且需要对光谱仪的偏振敏感性进行定标,日常维护比较麻烦;Harig 等人^[14-16]将污染气体检测中的亮温光谱法^[17]应用于化学污染物检测,并提出了化学污染物检测的辐射传输模型,其优点是不需要额外辅助设备,可直接使用光谱仪检测目标;缺点是只考虑了化学污染物辐射特征,忽略了基底的影响,且光学常量的获取过程复杂,实际操作有些难度.

为了简单快速在线检测化学污染物,本文提出基于多角度红外差分吸收光谱的化学污染物在线检测方法,该方法使用红外遥测光谱仪以多个角度在线检测化学污染物获得红外吸收光谱,根据不同角度吸收率的差别,通过差分方法提取化学污染物的红外差分吸收光谱,建立了基于多角度红外差分吸收光谱的化学污染物在线检测模型,可检测到化学污染物的微弱特征信息.

1 多角度红外差分吸收光谱化学污染物在线检测模型

基于多角度红外差分吸收光谱的化学污染物在线检测模型是将污染气体被动遥测中使用的辐射传输模型加以改进,将化学污染物近似为吸收层,基底近似为反射层,从辐射传输的角度来研究化学污染物.

考虑实际检测情形,将模型中的基底限为不透明朗伯面^[18],即基底的反射率与方向无关. 如图 1 所示,光谱仪接收到的能量分为两部分,一部分来自基底的热辐射,另外一部分来自基底反射的光源辐射. 设化学

污染物厚度为 d ,化学污染物的吸收系数为 a ,基底的黑体等效辐射亮度为 B ,反射率为 R_1 ,基底辐射经过化学污染物吸收,进入光谱仪时,辐射亮度为 $B(1-R_1)e^{-ad/\cos\theta}$.

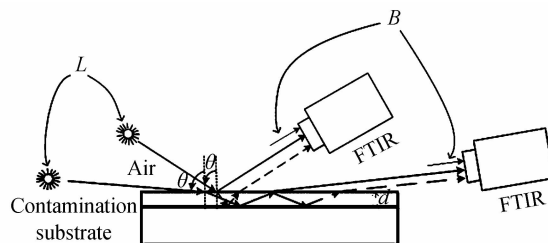


图 1 基于多角度红外差分吸收光谱的化学污染物在线检测模型

Fig. 1 In situ detection model of chemical contaminants based on multi-angle infrared differential absorption spectra

设光源的入射角为 θ ,辐射亮度为 L ,光源辐射经过化学污染物反射后也分为两部分:一部分为空气-化学污染物界面发生的表面反射的辐射,设化学污染物的反射率为 R_0 ,则反射部分的辐射亮度为 LR_0 ;另外一部分为穿透空气-化学污染物界面,经过基底反射后,重新穿透出空气-化学污染物界面的辐射,由于光源辐射两次穿过化学污染物,在一定的厚度范围内,可以将这部分辐射视为穿过的厚度为 $2d/\cos\theta$ 的厚膜,则这部分的辐射的辐射亮度为 $LR_1e^{-2ad/\cos\theta}$. 因此,光谱仪接收的总的辐射亮度为

$$L_{\text{sum}} = LR_0 + LR_1e^{-2ad/\cos\theta} + B(1-R_1)e^{-ad/\cos\theta} \quad (1)$$

当光源以 θ' 入射角进行检测,化学污染物的反射率为 R'_0 ,光谱仪接收的总的辐射亮度为

$$L'_{\text{sum}} = LR'_0 + LR_1e^{-2ad/\cos\theta'} + B(1-R_1)e^{-ad/\cos\theta'} \quad (2)$$

将式(1)和式(2)做差,即可得到不同角度的辐射改变量为

$$\Delta L_{\text{sum}} = L(R_0 - R'_0) + B(e^{-ad/\cos\theta} - e^{-ad/\cos\theta'}) + R_1 [L(e^{-2ad/\cos\theta} - e^{-2ad/\cos\theta'}) - B(e^{-ad/\cos\theta} - e^{-ad/\cos\theta'})] \quad (3)$$

将 ΔL_{sum} 称为多角度红外差分吸收光谱,式(3)即为多角度红外差分吸收光谱表达式,式中化学污染物的吸收系数 a 包含了化学污染物特征信息,故可通过对化学污染物的多角度红外差分吸收光谱进行光谱分析识别化学污染物类型.

分析式(3)可以看出,化学污染物的多角度红外差分吸收光谱由三项相加组成:1)第一项为化学污染物不同角度反射率差别造成的光源辐射改变量 $L(R_0 - R'_0)$,由于光源可近似为黑体,这部分在光谱上表现为平坦的基线;2)第三项为基底辐射在不同角度吸收改变量以及光源辐射在不同角度吸收改变量的差值与基底反射率的乘积

$$R_1 [L(e^{-2ad/\cos\theta} - e^{-2ad/\cos\theta'}) - B(e^{-ad/\cos\theta} - e^{-ad/\cos\theta'})].$$

当化学污染物厚度一定,提高基底反射率,增加光源入射角度差别以及增加基底与光源的温度差别即辐射差别,均能提高检测灵敏度;3)第二项为不同角度化学污染物对基底辐射吸收的差别量

$$B(e^{-ad/\cos\theta} - e^{-ad/\cos\theta'})$$

简单来看,如果第三项为零,只需第二项就可检测获得化学污染物特征,但从第三项可以看出,由于基底为不透明物体,反射率应当大于0,故只有当基底辐射与周围环境辐射大致相同,第三项才有可能为零,此时环境辐射噪音强度也应与基底的信号强度相当,因而基底辐射就很难将化学污染物的特征信息带出来。据此可得,多角度红外差分吸收光谱的化学污染物检测方法的三个必需条件为:1)以不同入射角进行检测;2)基底反射率不为零;3)基底与光源有温差。

在室内实验中,由于环境温度与基底温度大致相同,需要使用红外光源进行实验,这是由于光源温度高于基底温度,辐射差别增大,检测灵敏度就会提高。在野外试验中,晴朗天空辐射为天然的辐射源,将室温热辐射(等效黑体温度为300 K)与晴朗天空辐射作比较,如图2所示,这里的晴朗天空辐射由大气辐射传输模型 Modtran 4.0 计算得到。从图中可以看出,由于大气的吸收作用,室温热辐射与晴朗天空辐射存在差别,故可以进行检测。当天空云层较厚时,其辐射特性更接近于黑体辐射特性,且海拔越低的云层其温度越接近于地表温度^[1],从而辐射差别减小导致目标特征的检测对比度降低。因此,野外检测时,应当选择晴朗无云的天气进行检测。

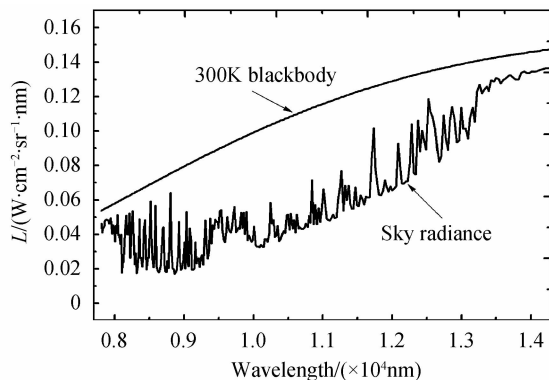


图2 晴朗天空辐射以及300 K黑体辐射曲线比较
Fig. 2 Comparison of blackbody radiance of 300 K and sky radiance

2 实验结果

2.1 实验样品

以三种化学污染物作为实验样品进行研究,包括:二甲基硅油、磷酸三乙酯和水杨酸甲酯;其中二甲基硅油又称为SF96,被广泛使用在电气绝缘、防尘、防水等方面,成为日常生活中^[19]的重要污染源,故将其作为

日常化学污染物进行研究;磷酸三乙酯分子结构中包含磷基,与一些磷类高危化学污染物的光谱特征相似,而磷酸三乙酯本身低毒,故将其作为磷类化学污染物的替代物进行研究^[20];水杨酸甲酯分子结构中包含苯基,与一些含苯类高危化学污染物的光谱特征相似,而水杨酸甲酯本身无毒,故将其作为苯类化学污染物的替代物进行研究^[15]。

用 Nicolet 公司的 NICOLET 8700 光谱仪测得的样品的透射光谱作为标准光谱,测量窗片为 KBr,测量波段为 7 692~14 285 nm,其中 7 692 nm 附近的光谱分辨率约为 40 nm,14 285 nm 附近的光谱分辨率约为 11 nm,样品的标准光谱如图 3。

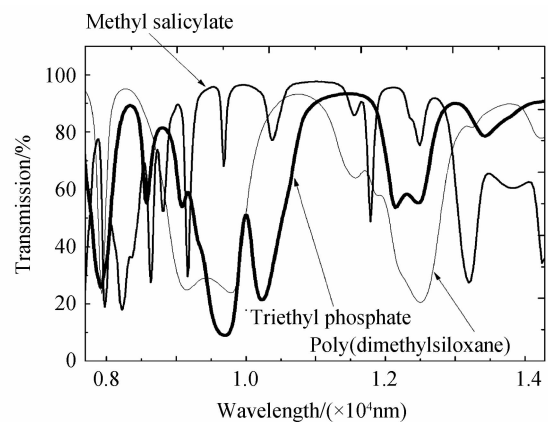
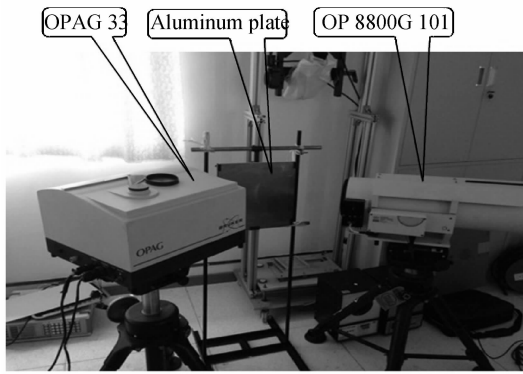


图3 样品的标准光谱
Fig. 3 Measured standard spectra of sample

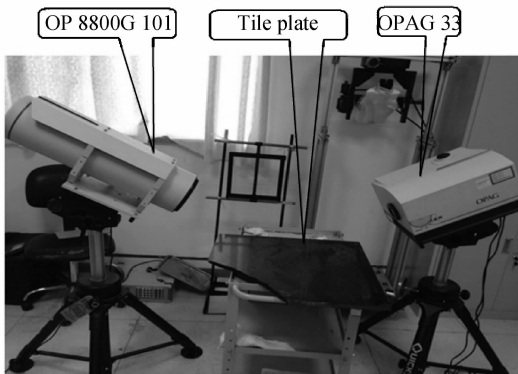
2.2 实验方法

分别在室内和野外对铝板,瓷砖,木板表面的化学污染物进行基于多角度红外差分吸收光谱的化学污染物在线检测。

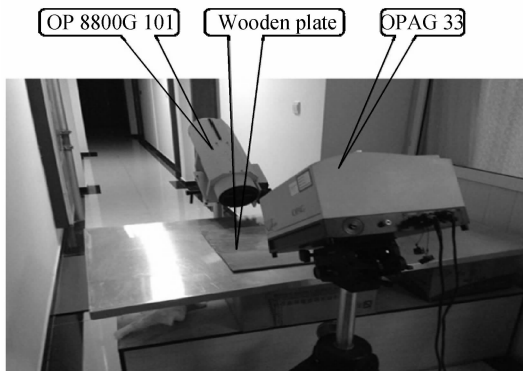
室内实验中的铝板尺寸为 80 cm×80 cm,瓷砖尺寸为 60 cm×60 cm,木板尺寸为 46 cm×46 cm;野外实验中的铝板尺寸为 160 cm×80 cm;在基底上滴上样品后,使样品均匀展开,形成厚度约为 60 μm 的薄膜;红外光源为 Bruker 公司的 OP 8800G 101,该光源为镍化铬红外光源,光源温度为 1 743 K;光谱仪为 Bruker 公司的傅里叶红外遥测光谱仪 OPAG 33,测量波段为 7 692~14 285 nm,其中 7 692.3 nm 附近的光谱分辨率约为 5.9 nm,14 285 nm 附近的光谱分辨率约为 20 nm;定标黑体为福源公司的 HFY-300A 中温黑体。室内和野外实验中,都使用了黑体对光谱进行定标,实验如图 4、图 5 所示,图 4 中由于拍摄角度原因,没有拍摄到黑体。为了获得更多的角度,并考虑光谱仪和红外光源的自身尺寸,室内试验中将铝板竖直固定在转动支架上进行实验,不过由于没有相匹配的转动支架,木板和瓷砖表面化学污染物检测试验中是将木板和瓷砖水平摆放。从检测模型分析中,可以看出,基于多角度红外差分吸收光谱的化学污染物在线检测方法仅与基



(a) Aluminum plate



(b) Tile plate



(c) Wooden plate

图4 室内多角度红外差分吸收光谱的化学污染物在线检测
Fig. 4 Detection setup of chemical contaminants by in situ detection of chemical contaminants

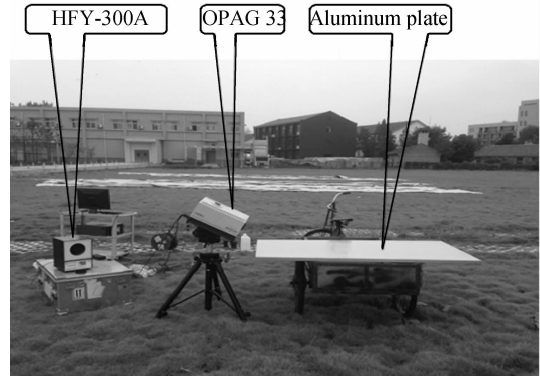
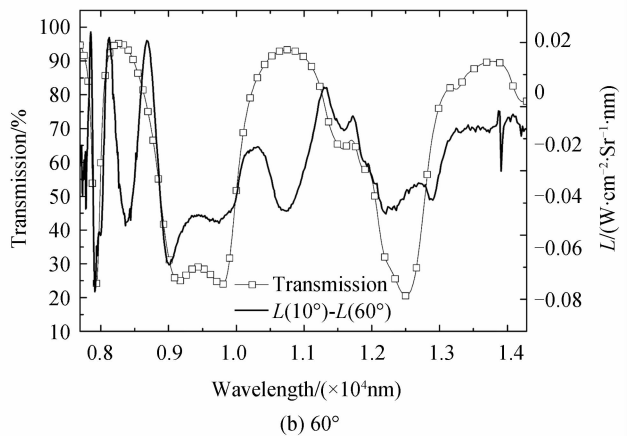
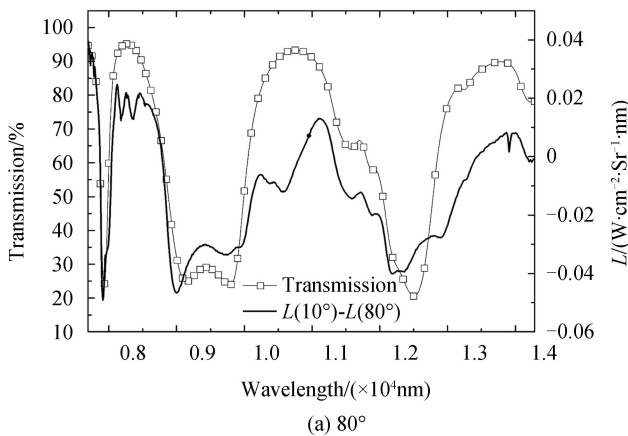


图5 野外多角度红外差分吸收光谱的化学污染物在线检测
Fig. 5 Detection setup of chemical contaminants on aluminum plate based on multi-angle infrared differential absorption spectra in field

底反射率、不同入射角差别以及光源与基底的温度差有关,而与基底摆放方式没有直接关系,故不影响检测结果。

2.3 结果分析

2.3.1 二甲基硅油实验结果分析

室内实验.在室内使用红外光源以入射角为 10°, 30°, 45°, 60°, 80°检测铝板表面的二甲基硅油,将 10°入射角的光谱与其他入射角的光谱做差,提取的铝板表面的二甲基硅油的多角度红外差分吸收光谱如图 6 所示.从图中可以看出,80°入射角提取的多角度红外差分吸收光谱与标准光谱最为相似,其各个特征峰的形状及位置均与标准光谱的基本吻合.随着光源入射角度减小,提取的铝板表面的二甲基硅油的多角度红外差分吸收光谱中的特征峰变的越来越不明显,且增加了更多的干扰峰.由此可得,采用基于多角度红外差分吸收光谱的化学污染物在线检测方法检测化学污染物时应该选择尽量大的光源入射角作为背景角,例如 80°.

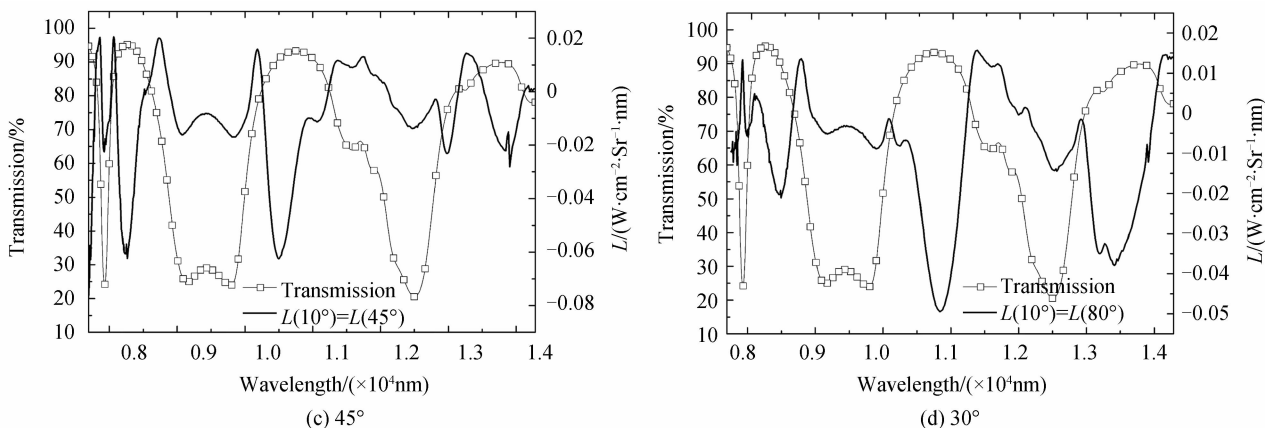


图6 室内实验中,将 10° 入射角的光谱与其他入射角的光谱做差,提取的各个入射角的铝板表面二甲基硅油的多角度红外差分吸收光谱与标准光谱比较

Fig.6 Comparison of extracted multi-angle infrared differential absorption spectra of poly (dimethylsiloxane) on aluminum plate in different incidence angles based on incidence angle of 10° in laboratory and standard spectra

以 80° 角作为背景角,提取的铝板表面的二甲基硅油的多角度红外差分吸收光谱如图7所示,从图中可以看出,随着光源入射角的增加,各个角度的铝板表面的二甲基硅油的多角度红外差分吸收光谱与标准光谱的差别越来越大,这说明随着入射角增大,化学污染物

光程减小,使得化学污染物吸收作用变得越来越弱,光谱特征也变得越来不明显.因此,可以得出,采用基于多角度红外差分吸收光谱的化学污染物在线检测方法检测化学污染物时,光源入射角相差越大,目标的光谱特征就越明显.

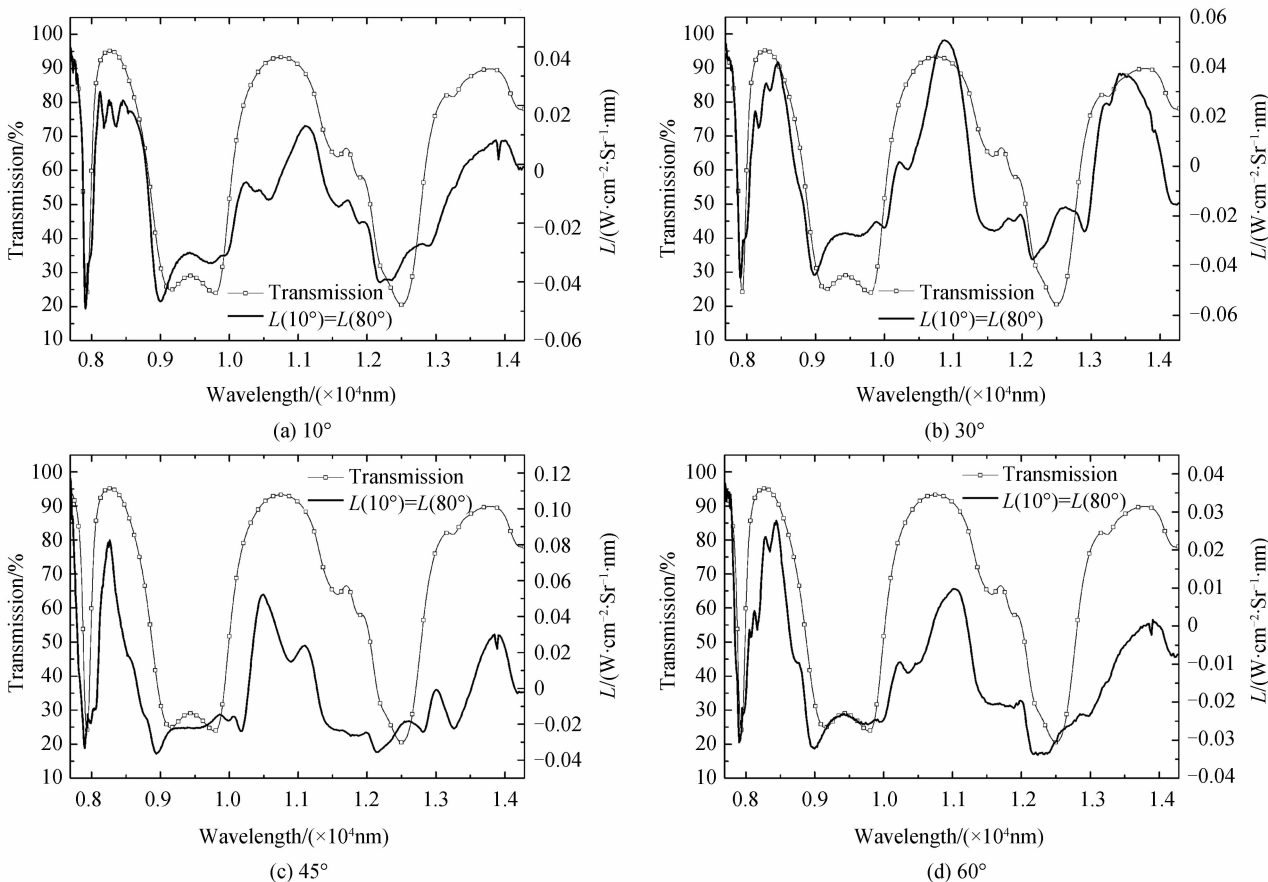


图7 室内实验中,以 80° 作为背景角,提取的各个入射角的铝板表面的二甲基硅油的多角度红外差分吸收光谱与标准光谱比较

Fig.7 Comparison of extracted indoor multi-angle infrared differential absorption spectra of poly (dimethylsiloxane) on aluminum plate in different incidence angles based on background angle of 80° in laboratory and standard spectra

室内以瓷砖作为基底,使用红外光源以入射角为 $60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ 对其表面的二甲基硅油进行检测实验,以

80°入射角作为背景角,提取的瓷砖表面的二甲基硅油的多角度红外差分吸收光谱如图8.从图中可以看出,60°,70°入射角的瓷砖表面的二甲基硅油的多角度红外差分吸收光谱中12 500 nm,7 917 nm处的光谱特征清晰可见,由于基线的存在,10 000 nm,9 090 nm处的光谱特征则不太明显.

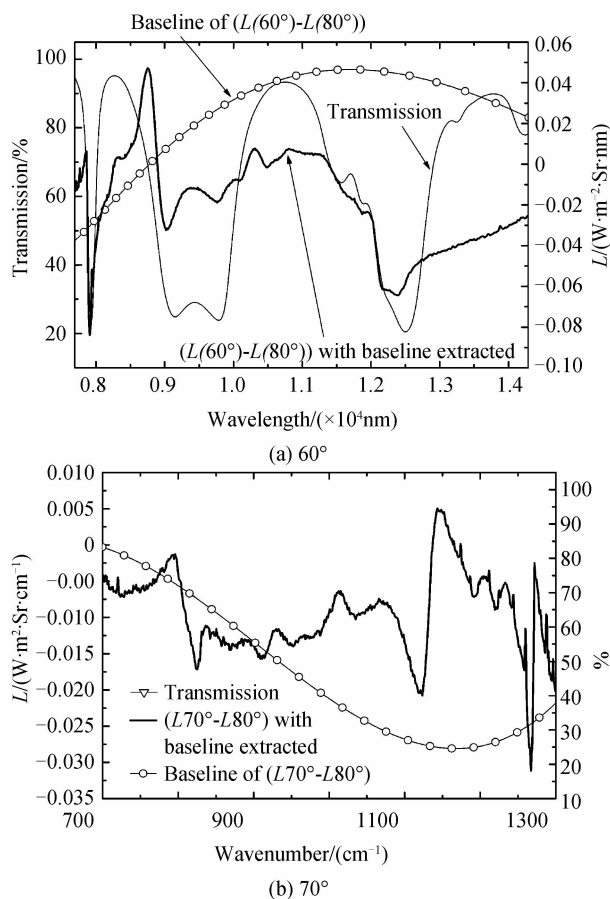


图8 室内实验中,以80°入射角作为背景角,提取的瓷砖表面二甲基硅油的多角度红外差分吸收光谱与标准光谱比较

Fig. 8 Comparison of extracted indoor multi-angle infrared differential absorption spectra of poly (dimethylsiloxane) on tile plate in different incidence angles based on background angle of 80° in laboratory and standard spectra

室内以表面相对粗糙的木板作为基底,使用红外光源以入射角为60°,70°,80°对其表面的二甲基硅油进行检测实验,以80°入射角作为背景角,提取的木板表面的二甲基硅油的多角度红外差分吸收光谱如图9所示.从图中可以看出,木板表面的二甲基硅油的多角度红外差分吸收光谱中能够看到12 500 nm,7 917 nm处的光谱特征,而10 000 nm,9 090 nm处的特征则不太明显.

从室内实验中的三种基底的二甲基硅油的检测结果可以看出,铝板检测效果最好,木板检测效果最差,其原因分析如下:三种基底中的铝板平面不但平整,且

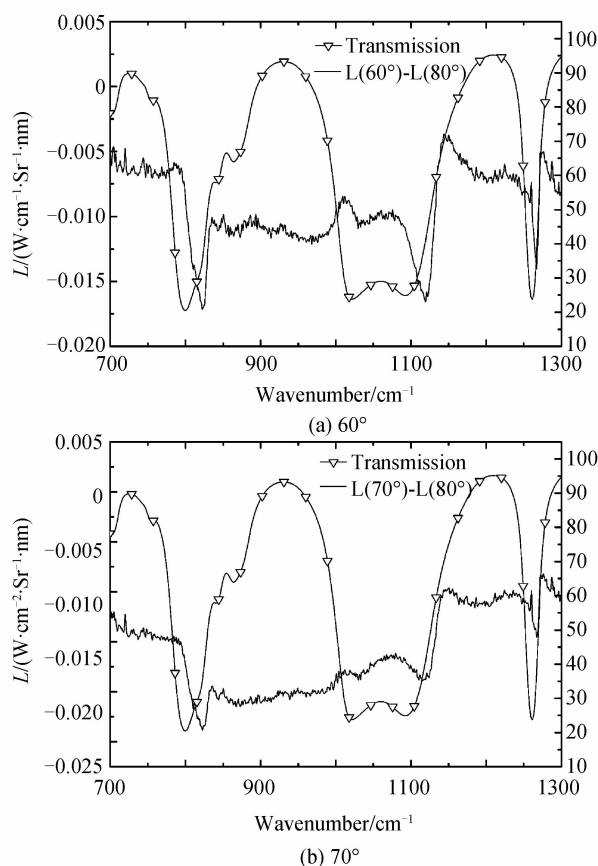


图9 室内实验中,以80°入射角作为背景角,提取的木板表面二甲基硅油的多角度红外差分吸收光谱与标准光谱比较

Fig. 9 Comparison of extracted indoor multi-angle infrared differential absorption spectra of poly (dimethylsiloxane) on wooden plate in different incidence angles based on background angle of 80° in laboratory and standard spectra

反射率非常高,携带着化学污染物信息的绝大部分辐射都能够被基底反射进入光谱仪,光谱仪接收到的辐射包含了大量的化学污染物信息,故化学污染物的光谱信噪比高,检测效果好;而瓷砖虽然表面平整,但反射率不高,光谱中化学污染物信息相对少些,导致检测效果不如铝板;而木板则表面粗糙,携带着化学污染物信息的辐射在其表面发生漫反射,光谱仪只接收了一定立体角内的反射光,因而化学污染物信息非常微弱,光谱特征非常不明显,检测效果最差.

由于红外光源体积大,携带比较麻烦,考虑实际应用需求,并结合检测模型分析,晴朗天空与基底也有较大的温差,故以晴朗天空作为光源,将铝板水平摆放进行实验.实验中发现,受光谱仪尺寸限制,当光源入射角过小时,光谱仪自身就会挡住天空辐射,无法进行实验.因此没有进行小角度实验,而分别以入射角为50°,60°,70°和80°对铝板表面的二甲基硅油进行检测实验.实验完成后,以80°入射角作为背景角,提取各个入射角的铝板表面的二甲基硅油的多角度红外差分吸收光

谱如图 10 所示.从图中也可以看出野外探测获得的铝板表面的二甲基硅油的多角度红外差分吸收光谱的光谱特征与标准光谱大致相同.将图 10 与图 7 中野外实验的铝板表面的二甲基硅油的多角度红外差分吸收光谱($L(60^\circ)-L(80^\circ)$)与室内实验的铝板表面的二甲基硅油的多角度红外差分吸收光谱($L(60^\circ)-L(80^\circ)$)对比来看,野外实验中由于光源与基底温差小,铝板表面的多角度红外差分吸收光谱光谱上噪音更多,其中 12 500 nm 和 10 000 nm,9 090 nm 处的特征峰由于处

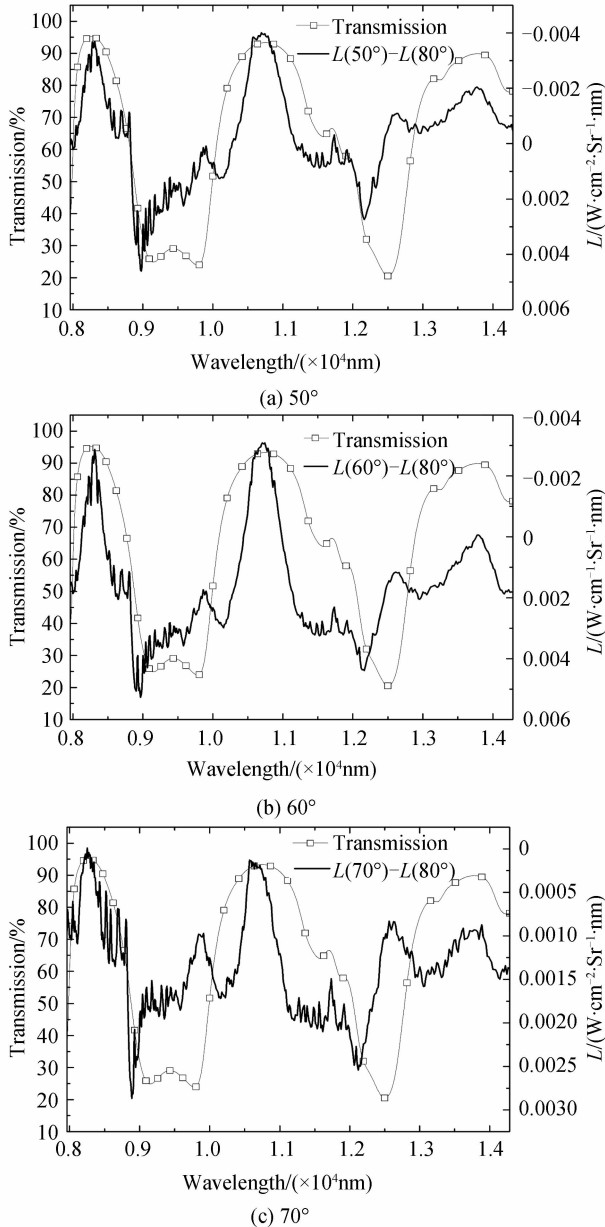


图 10 野外实验中,以 80° 作为背景角,提取的铝板表面的二甲基硅油的多角度红外差分吸收光谱与标准光谱比较

Fig. 10 Comparison of extracted outdoor multi-angle infrared differential absorption spectra of poly (dimethylsiloxane) on aluminum plate in different incidence angles based on background angle of 80° in field and standard spectra

于大气窗口内,受大气影响小,特征峰比较明显,而 7 917 nm 处的特征峰由于处于大气窗口边缘,化学污染物的黑体辐亮度与天空辐亮度相差不大,导致该特征峰不大明显.

2.3.2 磷酸三乙酯和水杨酸甲酯实验分析

将铝板竖直摆放,在室内使用红外光源以入射角为 $9.2^\circ, 80^\circ$ 对其表面的磷酸三乙酯,水杨酸甲酯进行实验.由于仪器摆放有些差别,对磷酸三乙酯,水杨酸甲酯小入射角探测时所选的角度 (9.2°) 与对二甲基硅油小角度室内小角度检测时所选的角度 (10°) 不同,但是两者的差别并不影响检测结果,其主要原因是由于化学污染物的光程与光源入射角的余弦有关, 9.2° 和 10° 的余弦只有千分之一的差别,故影响可以忽略不计.实验完成后,以 80° 作为背景角,提取的多角度红外差分吸收光谱如图 11 所示.从图中可以看出,在该波段内,铝板表面的磷酸三乙酯和水杨酸甲酯的多角度红外差分吸收光谱的特征峰以及光谱形状与标准光谱吻合程度非常好,检测效果非常好.

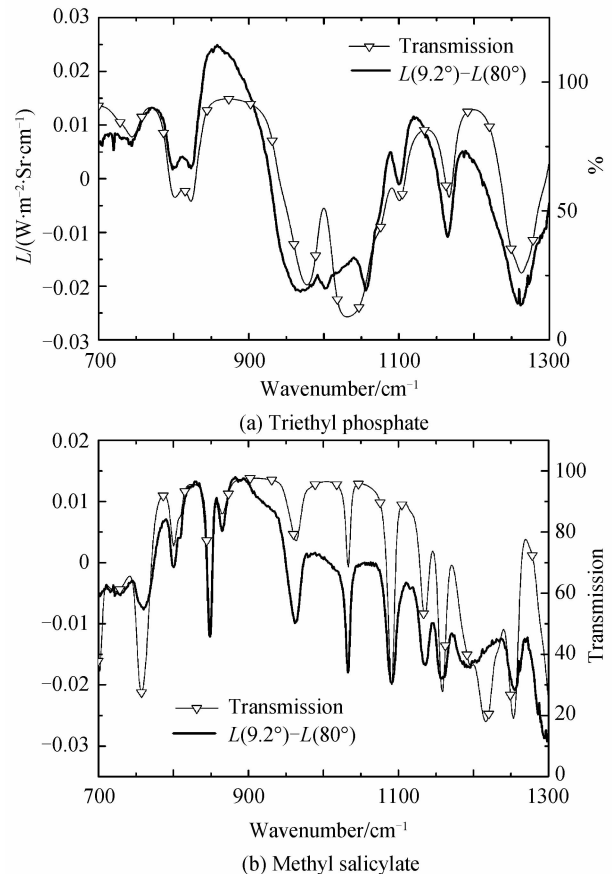


图 11 室内实验中,以 80° 作为背景角,提取的铝板表面的磷酸三乙酯和水杨酸甲酯的多角度红外差分吸收光谱与标准光谱比较

Fig. 11 Comparison of indoor multi-angle differential spectra of triethyl phosphate and methyl salicylate on aluminum plate in different incidence angles based on background angle of 80° in laboratory and standard spectra

综合分析,可以得出该方法具有以下两个优点:1)与激光诱导蒸汽发射率法^[10]和差分偏振光谱法^[11-13]相比,所需测量设备少,除了用于光谱获取的必需的红外遥测光谱仪外,室内实验只需要增加红外光源作为光源,野外实验则可以将晴朗天空辐射作为光源进行实验;2)与亮温光谱法^[14-16]相比,可以直接获得与标准光谱大致吻合的光谱,不需要使用光学常量模拟光谱,故可快速识别化学污染物。

3 结论

本文提出基于多角度红外差分吸收光谱的化学污染物在线检测方法,建立了该方法的检测模型.采用该方法在室内和野外对不同基底上的二甲基硅油、磷酸三乙酯和水杨酸甲酯进行实验.从结果来看,通过选择合适的光源,对平整的基底上的化学污染物进行检测,能够更容易获得与标准光谱非常吻合的多角度红外差分吸收光谱,且光源入射角所选的角度差别越大,检测效果越明显.该方法操作简单,提取的光谱特征明显,解决了简单、快速识别化学污染物类别的问题,有一定的应用潜力。

参考文献

- [1] ZHANG Cun-wei, WANG Hui-fei, CHEN Yuan-hang, *et al.* [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2012, **8**(01): 103-107.
张存位, 王慧飞, 陈远航, 等. 化学事故中应急洗消方案的研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2012, **8**(01): 103-107.
- [2] XIAO Jie. Determination of two kinds of contaminations in food by gel permeation chromatography and gas chromatography/Mass [D]. Chongqing: Southwest University, 2013: 19-33.
肖洁. 凝胶渗透色谱净化-气相色谱质谱法在两类食品污染物检测中的应用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013: 19-33.
- [3] LAVOIE H, THÉRIAULT J M, BOUFFARD F, *et al.* Detection of chemical pollutants by passive LWIR hyperspectral Imaging[C]. International Society for Optics and Photonics, 2012, **8513**(851503): 1-10.
- [4] LAVOIE H, THÉRIAULT J M, BOUFFARD F, *et al.* LWIR hyperspectral imaging application and detection of chemical precursors[C]. International Society for Optics and Photonics, 2012, **8546**(85460J): 1-10.
- [5] HARIG R, MATZ G, RUSCH P. Scanning infrared remote sensing system for identification, visualization, and quantification of airborne pollutants[C]. International Society for Optics and Photonics, 2002, **4574**(1): 83-94.
- [6] HARIG R. Passive remote sensing of pollutant clouds by Fourier-transform infrared spectrometry: signal-to-noise ratio as a function of spectral resolution[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(23): 4603-4610.
- [7] GUO Yong-cai, ZHANG Tian-hua, GAO Chao, *et al.* Application of differential optical absorption spectroscopy in detection of airborne pollutants[J]. *Journal of Chongqing University*, 2003, **26**(8): 27-31.
郭永彩, 张天华, 高潮, 等. 差分吸收光谱技术及在大气监测领域中的应用[J]. *重庆大学学报*, 2003, **26**(8): 27-31.
- [8] XIE Pin-hua, LIU Wen-qing, WEN Qing-nong. Remote sensing spectroscopy of airborne pollutants[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2000, **17**(5): 385-394.
谢品华, 刘文清, 魏庆农. 大气环境污染气体的光谱遥感监测技术[J]. *量子电子学报*, 2000, **17**(5): 385-394.
- [9] LUO Yun-han, SUN Li-guang, LIU Wen-qing, *et al.* MAX-DOAS measurement of NO₂ column densities and vertical distribution at Ny-Alesund, arctic during summer [J]. *Sepectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(9): 2003-2400.
罗宇涵, 孙立广, 刘文清, 等. 采用 MAX-DOAS 观测北极新奥尔松地区夏季 NO₂ 的柱浓度与垂直分布[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(9): 2336-2440.
- [10] BELL A, DYER C, JONES A, *et al.* Standoff liquid CW detection[C]. International Society for Optics and Photonics, 2004, **5268**(1): 302-309.
- [11] THÉRIAULT J M, PUCKRIN E, HANCOCK J, *et al.* Passive standoff detection of chemical warfare agents on surfaces[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(31): 5870-5885.
- [12] LAVOIE H, PUCKRIN E, THÉRIAULT J M, *et al.* Passive standoff detection of SF₆ at a distance of 5.7 km by differential Fourier Transform infrared radiometry [J]. *Applied Spectroscopy*, 2005, **59**(10): 1189-1193.
- [13] LAVOIE H, THÉRIAULT J M, PUCKRIN E, *et al.* Passive standoff detection of surface contaminants: a novel approach by differential polarization FTIR spectrometry[J]. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 2008, **18**(2): 251-262.
- [14] HARIG R, GERHARD J, BRAUN R, *et al.* Remote detection of gases and liquids by imaging Fourier transform spectrometry using a focal plane array detector: first results [C]. International Society for Optics and Photonics, 2006, **6378**(637816): 1-12.
- [15] HARIG R, BRAUN R, CHRIS D, *et al.* Short-range remote detection of liquid surface contamination by active imaging Fourier transform spectrometry[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(8): 5708-5714.
- [16] BRAUN R, EICHMANN J, SABBAAH S, *et al.* Remote detection of liquid surface contamination by imaging infrared spectroscopy: measurements and modelling[C]. SPIE, 2011, **8189**(81890G): 1-13.
- [17] CUI Fang-xiao, FANG Yong-hua. Infrared background compression method based on brightness temperature spectrum[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(11): 1-6.
崔方晓, 方勇华. 基于亮温光谱的红外背景压缩方法[J]. *光学学报*, 2013, **33**(11): 1-6.
- [18] HU Zhuang-li. Experiment investigation of steel and aluminum alloy surface emissivity characteristics[D]. Henan Normal University, 2010: 1-7.
胡壮丽. 钢和铝合金表面发射率特征的实验研究[D]. 河南师范大学, 2010: 1-7.
- [19] HE Fu. Silicon oil and its contaminant[J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2010, **12**(6): 10-17.
贺福. 硅油剂及其硅污染[J]. *高科技纤维与应用*, 2010, **12**(6): 10-17.
- [20] KYCIA A H, VEZVAIE M, ZAMLYNNY V, *et al.* Non-contact detection of chemical warfare simulant triethyl phosphate using PM-IRRAS[J]. *Analytica Chimica acta*, 2012, **737**(1): 45-54.