

用于红外光谱分析的恒压光纤式衰减全反射探头

屈若媛¹, 侯立平¹, 冯 翔¹, 王志吉¹, 吴 侃^{2*}, 邹卫文², 陈建平²

¹火箭军装备研究院, 北京 100094;

²上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

摘要 研制了一种能用于红外光谱分析及原位无损检测的恒压光纤式衰减全反射(ATR)探头。基于 ATR 技术, 并配合恒压限位装置, 将该探头与样品以恒定正压力接触, 可显著提高样品吸收谱的测试可重复性, 多次测量偏差小于 5%。用该探头分析硝酸酯增塑聚醚(NEPE)推进剂中安定剂的质量分数, 测量结果与已有报道相吻合并极大提升了测量的便捷程度。所研制的光纤式 ATR 探头可广泛用于需对已安装材料进行反复无损检测的场合。

关键词 光通信; 衰减全反射; 恒压; 光谱分析; 光纤

中图分类号 TN929 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0506003

Constant Pressure Fiber Attenuated Total Reflection Probe Used in Infrared Spectrum Analysis

Qu Ruoyuan¹, Hou Liping¹, Feng Xiang¹, Wang Zhiji¹, Wu Kan²,
Zou Weiwen², Chen Jianping²

¹The Equipment Academy of the Rocket Force, Beijing 100094, China;

²State Key Laboratory on Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract A constant pressure fiber attenuated total reflection (ATR) probe which can be used in infrared spectrum analysis and in situ nondestructive testing is developed. Combined with constant pressure inhabiting device, the probe contacts with the sample under constant positive pressure based on ATR technique. It can significantly improve test repeatability of sample absorption spectra, and the multiple measurement error is less than 5%. The probe is used to analyze the stabilizer mass fraction in nitrate ester plasticized polyether (NEPE) propellant. The measurement results are in agreement with previous reports, and it can greatly improve the measurement convenience. The developed probe can be widely used in the occasions where the material has to be carried on nondestructive test repeatedly.

Key words optical communications; attenuated total reflection; constant pressure; spectrum analysis; fiber

OCIS codes 060.2390; 300.6300; 300.6340; 260.6970

1 引 言

光谱分析是一种表征材料特性的重要技术。通过研究材料在红外频谱上的吸收特性, 可以对材料的成分、性质等进行定性或定量分析。目前光谱分析已经应用于各个领域, 包括医疗诊断、材料分析等^[1-7]。材料的许多吸收峰集中分布在中红外区域, 因此对中红外区域的光谱进行分析具有重要意义。典型的分析技术如傅里叶红外光谱分析, 通过将光束经过干涉仪后照射样品的方法, 可以在几微米到几十微米的波长范围内测量样品的吸收谱^[6-9]。典型的傅里叶红外光谱分析仪采用空间光的方式进行测量, 即样品置于分析仪的样

收稿日期: 2016-11-01; **收到修改稿日期:** 2016-12-02

基金项目: 自然科学基金青年基金(61505105)、上海市扬帆计划(14YF1401600)

作者简介: 屈若媛(1985—), 女, 博士, 博士后, 主要从事光电检测及混合信号集成电路设计方面的研究。

E-mail: quruoyuan@163.com

* **通信联系人.** E-mail: kanwu@sjtu.edu.cn

品室内,这种测量方式适用于小尺寸样品,当样品尺寸较大或样品无法移动时,则很难进行测量,因此又演化出了光纤式衰减全反射(ATR)探头。光纤式 ATR 探头将光谱仪内的光束耦合到中红外光纤,用一根光纤将光导入特制的 ATR 探头,再用另一根光纤将 ATR 探头的测量信号送回光谱仪^[10-16]。ATR 技术使仪器能够在不移动、不损坏样品的前提下完成对样品吸收谱的测量^[17-23]。这种光纤式 ATR 探头也存在缺陷,测量到的样品吸收谱与探头施加在样品接触面上的压力直接相关,因此每次测量都可能得到不同幅度的吸收谱^[23-28]。通过后期数据处理可以对上述这种缺陷进行弥补,但最好的解决途径是设计一种装置,能够使 ATR 探头在每次测量时以一个恒定的预设压力与样品表面接触。

本文设计了一种恒压式光纤 ATR 探头。当探头与样品接触时,压力与样品之间保持恒定压力,且探头压力在 9~11 N 之间连续可调,每次施加的压力误差可小于 1%。该恒压探头用于测量样品吸收谱时,可以有效减小操作对测量结果的影响,实际测试中,多次测量的样品吸收峰幅度偏差小于 5%。将该具有恒压功能的手持式 ATR 探头用于测量硝酸酯增聚塑醚(NEPE)推进剂中安定剂的质量分数,测试结果与已有文献报道相吻合,且大大提升了测试的便捷程度。

2 原理与设计

2.1 光纤式 ATR 探头

光纤式 ATR 探头利用光束在高折射率晶体内部发生全反射的特性,实现对接触面上样品吸收谱的测量。典型的光纤式 ATR 探头结构示意图如图 1 所示。傅里叶光谱仪的耦合输出光束经红外光纤发出,再经透镜准直后照射到探头晶体上。当探头悬空即外部介质为空气时,光束在晶体内部发生 3 次全反射,并从与入射光平行且方向相反的光路离开晶体,通过另一面透镜耦合进入红外光纤,最终返回傅里叶光谱仪。探头前端与被测样品接触时,由于样品的折射率通常比空气高,光束在第 2 个反射点处发生的不再是全反射,而是部分反射。部分反射光会携带样品的吸收谱信息,利用傅里叶光谱仪对吸收谱信息进行分析。这里侧重对中红外光谱的分析,并采用硒化锌(ZnSe)晶体(该材料在 0.6~15 μm 的波长范围内具有很高的透射率)。在波长为 7.5 μm 处,ZnSe 晶体的折射率约为 2.6,根据全反射公式可得临界入射角为 22.6°。当晶体外的介质为空气时,只要入射角大于 22.6°,就会发生全反射,采用不锈钢作为探头外壳以保护内部的 ZnSe 透镜等部件。

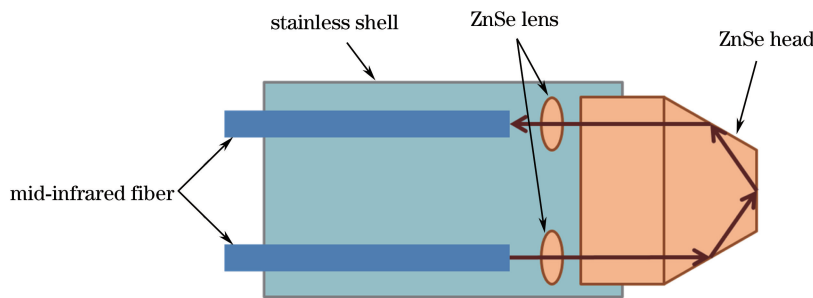


图 1 光纤式 ATR 探头结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of fiber ATR probe

实际进行探头调试时,并不要求探头内部的入射光与出射光严格平行,通过微调光纤和透镜的角度可以将耦合效率最大化。光纤在 7.5 μm 处的传输损耗约为 1.5 dB/m,出射和入射光纤长度均为 1 m,即光纤引入的损耗约为 3 dB。整个光纤式 ATR 探头的损耗约为 9 dB,其中 ZnSe 晶体部分的耦合损耗约为 6 dB,较高的损耗是由于光束在垂直入射 ZnSe 晶体表面时在界面上发生了部分反射以及非理想的耦合调试导致的。

2.2 恒压装置

当核心的光纤式 ATR 探头确定后,设计能提供恒定压力的装置,光纤式 ATR 探头和恒压装置合称为恒压光纤式 ATR 探头。

恒压光纤式 ATR 探头装置的设计示意图如图 2 所示,该设计利用了弹簧压缩距离一定时压力也一定的特性。光纤式 ATR 探头前端有一个圆盘,圆盘上托起一个弹簧,ATR 探头、圆盘和弹簧整体置于一个圆柱形套筒内。未测量时弹簧两端顶紧套筒上侧内壁和 ATR 探头前端的圆盘,使 ATR 探头最大程度地伸出

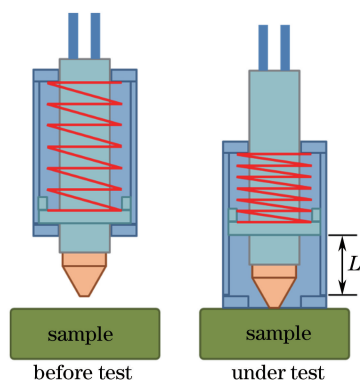


图 2 光纤式 ATR 探头恒压装置示意图

Fig. 2 Schematic of fiber ATR probe constant pressure device

套筒;测量时将套筒垂直压在样品表面,ATR 探头被压回套筒内部,直到 ATR 探头前端晶体和套筒下底面水平。这样弹簧就被压缩了固定的长度 L ,从而产生固定的下压力 $f=kL$,其中 k 为弹簧的弹性系数。

恒压装置设计的关键在于:1)对 ATR 探头运动轨迹的约束;2)探头运动距离的选择;3)探头压力的选择。对探头运动轨迹的约束要求探头只能在垂直方向上运动,而不能有水平方向上的偏移或摆动。实际设计中,通过将探头尾端置于一个直径仅比探头直径大 0.05 mm 的长圆柱通道内来保证探头运动的垂直性。探头运动距离的选择要保证下压力的一致性。实际测量中,当探头下压到被测样品时,由于被测样品具有一定的弹性,例如橡皮、橡胶等材料,探头端面与套筒的底面并不严格在一个水平面上,随材料的不同,探头端面与套筒的底面会有约 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的偏差,因此探头的运动距离要远大于 $100\text{ }\mu\text{m}$,以保证下压力的一致性,此处选用 1 cm 作为探头的移动距离。样品表面并不光滑,存在起伏,因此需要给探头施加一定的下压力以保证探头与样品的充分接触,过大的下压力可能会加剧探头晶体的磨损和测量人员的负担。此外,为防止变形或损坏,有些样品对施加的最大压强有一定限制。综合考虑以上需求,选择 $9\sim 11\text{ N}$ 作为探头的下压力范围,弹簧的弹性系数 $k=10\text{ N/cm}$,默认移动距离为 1 cm 。通过微调套筒上部的装置,可以微调弹簧的预压缩量,从而实现对接头压力的调节。

3 测试与分析

3.1 恒压探头压力测试

为了验证探头压力的可重复性,研究多次测量时探头压力的波动。探头压力为 10 N ,测量时将探头压在一个特制的压力计上,压力计的测量误差为 0.3% 。图 3 给出了 30 次测量时压力计的读数值和直方图分布,可以看到多次测量时压力具有较好的一致性,最大波动小于 1% ,均方根波动小于 0.5% ,且误差并没有随着测量次数的增多而发生明显增大。

实验测定不同压力时多次测量得到压力的一致性。通过改变恒压装置套筒内弹簧的预压缩量来实现压力调节,当探头下压时弹簧的总压缩量也随之改变,从而改变施加在探头与样品接触面上的压力。分别设定

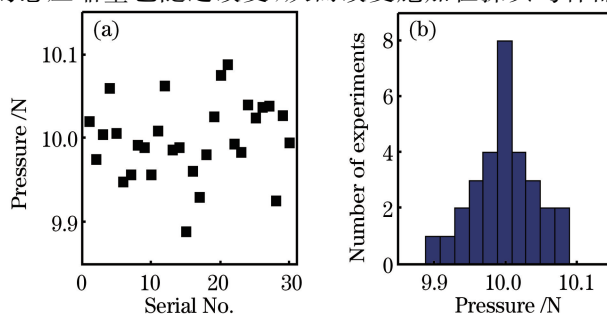


图 3 (a)压力计读数随测量次数的变化;(b)压力计读数的直方图分布

Fig. 3 (a) Variation of reading from pressure meter with measurement times;
(b) histogram distribution of reading from pressure meter

了 9 N 和 11 N 两个压力,图 4 给出了两组测试的压力分布,可以看到压力仍然具有较好的一致性,最大波动均控制在 1% 以内,均方根波动均控制在 0.5% 以内。需要说明的是,每一次压力值均受到了人员操作、探头接触位置、探头位移等诸多因素的影响,因此压力值具有一定的随机性,每次得到的柱状图并不完全相同,但总的波动误差基本类似。

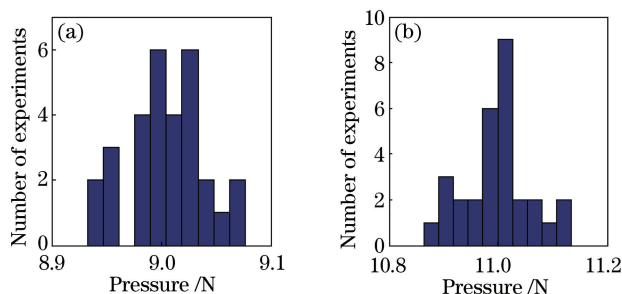


图 4 设定压力为(a) 9 N 和(b) 11 N 时测得的压力分布直方图

Fig. 4 Histograms of measured pressure distributions when the set pressure is (a) 9 N and (b) 11 N respectively

3.2 样品测试

为了验证恒压探头在测量样品时的作用,对一个样品进行了吸收谱测试,测试用的 ART 探头照片如图 5 所示。图 5(a)为恒压 ATR 探头的正面图,顶端锥形部分为 ZnSe 晶体,中间圆柱形部分为套筒,弹簧置于套筒内部。套筒中部的尼龙带连接安全手环,操作时安全手环将佩戴在操作员的手臂上,防止因操作失误导致探头损坏;图 5(b)为探头测量前的摆放位置,探头下方为被测样品,此处为一块绘图橡皮;图 5(c)为探头测量时的状态,探头前端的 ZnSe 晶体被压入套筒内部,套筒前端平面与被测样品接触,使得套筒内部弹簧产生了一个恒定压缩量,从而保证了恒定的下压力。

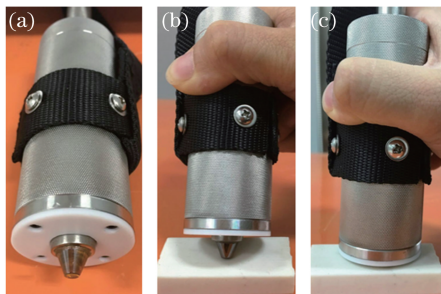


图 5 (a)恒压 ATR 探头正面图;(b)探头测量前的摆放图;(c)探头测量时的示意图

Fig. 5 (a) Front view of constant pressure ATR probe; (b) figure of probe before measurement; (c) diagram of probe in measurement

测试压力设定为 10 N,测试中所用光谱仪为傅里叶红外光谱分析仪。选用的中红外光纤的透射谱在 $1000 \sim 2000 \text{ cm}^{-1}$ 之间,因此吸收谱的测量范围也在该区间内。测量分辨率选取 4 cm^{-1} ,对每组测量数据进行 32 次平均,3 组测量得到的吸收谱如图 6 所示。由此可见,测试结果具有很好的一致性,吸收峰最大值的波动在 5% 以内。

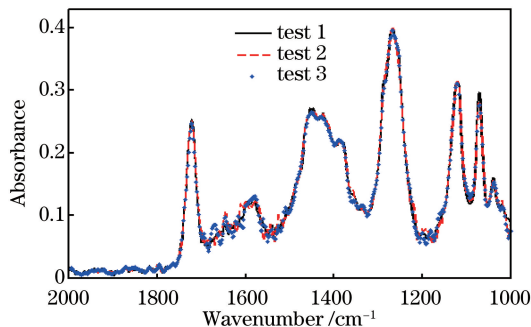


图 6 3 组测量得到的样品吸收谱

Fig. 6 Absorption spectra of samples obtained by three group measurements

3.3 安定剂质量分数测试

为进一步验证恒压 ATR 探头的实用性,将其应用于对高能 NEPE 推进剂寿命的测试中。NEPE 推进剂是硝酸酯类推进剂,存在自催化反应。自催化反应循环发生,消耗硝酸酯,因此 NEPE 推进剂存储时间越久,性能越差。这种自催化反应会产生氧化氮、酸和一些自由基,在其中掺入安定剂可以中和硝酸酯自催化生产的产物,达到抑制自催化反应、延缓其老化进程的效果。同时,安定剂也在不断减少,因此,监测 NEPE 推进剂中安定剂质量分数的变化可对推进剂的存储年份进行估算。

首先制备出不同安定剂质量分数的 NEPE 推进剂样品。通过对样品在 75 °C 下进行老化处理,并控制处理时间来得到不同安定剂的质量分数。采用 GJB770A 方法测量安定剂的质量分数,得到安定剂的质量分数与老化时间的关系如表 1 所示,且绘制在图 7 中。

表 1 安定剂质量分数与老化时间的关系

Table 1 Relationship between stabilizer mass fraction and aging time

Aging time /d	20	25	30	35	40	45	50
Stabilizer mass fraction /%	0.3789	0.3251	0.2736	0.2241	0.1716	0.1212	0.0723

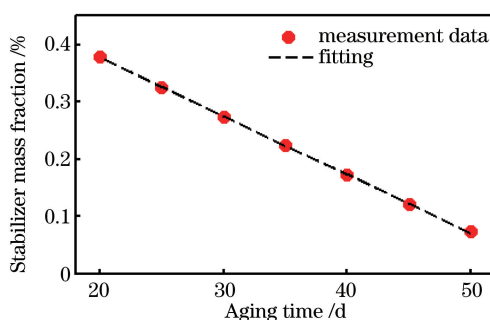


图 7 安定剂的质量分数与老化时间的线性关系

Fig. 7 Linear relationship between stabilizer mass fraction and aging time

由图 7 可以看出,安定剂的质量分数与老化天数基本呈线性关系,可表示为

$$\eta = -0.0102t + 0.5812, \quad (1)$$

式中 η 为安定剂的质量分数, t 为 75 °C 下样品的老化天数。

根据已有研究结果,观察在 1598 cm^{-1} 处测得的吸收谱信号的二次导数值,该值与安定剂的质量分数呈负线性关系^[29]。利用研制的恒压 ATR 探头可以无损地对不同老化时间的 NEPE 推进剂样品进行测试,由于恒压 ATR 探头保证了测量数据的可重复性,因此对测量图谱进行分析也具有较好的重复性。测得吸收谱二次导数值与安定剂质量分数的关系如表 2 所示,二者的关系曲线如图 8 所示。

表 2 安定剂的质量分数与吸收谱二阶导数值的关系

Table 2 Relationship between stabilizer mass fraction and 2nd order derivative of absorption spectrum

Stabilizer mass fraction /%	0.3789	0.3251	0.2736	0.2241	0.1716	0.1212	0.0723
2 nd order derivative / 10^{-5}	0.0556	0.0765	0.1207	0.1634	0.2173	0.2347	0.2909

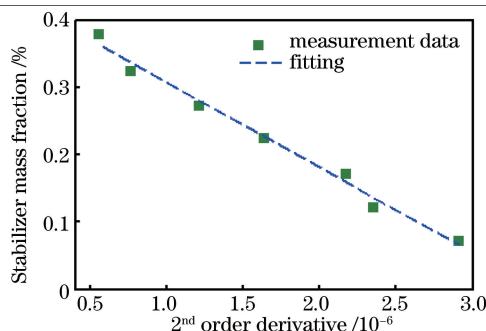


图 8 安定剂的质量分数与 1598 cm^{-1} 处吸收谱二阶导数值的关系

Fig. 8 Relationship between stabilizer mass fraction and 2nd order derivative of measured absorption spectrum at 1598 cm^{-1}

利用最小二乘法进行线性拟合,得到

$$\eta = -1.2630 \times 10^5 x + 0.4330, \quad (2)$$

式中 x 为二次导数值。

与文献[29]中的相关实验结果进行比较,可以发现两者具有很高的相似性。文献[29]采用将推进剂样品取样压片的方式进行傅氏转换红外线光谱分析仪(FTIR)测量,而此处所设计的光纤式恒压 ATR 探头可以直接对样品进行无损原位 FTIR 测量。测量结果与采用压片法得到的结果保持较高的一致性,且大大简化了测试流程。使用者只需要将探头按压在样品上,即可直接进行测量,无需对样品进行预处理。实际使用中,当样品已经完成安装且不允许取样时,所设计的恒压 ATR 探头就成了完成样品中安定剂的质量分数分析的首选。

4 结 论

设计并实现了一种能够提供恒定下压力的光纤式 ATR 探头。每次测量时,探头前端的晶体可以以恒定的压力与样品表面接触,探头压力在 9~11 N 之间连续可调,每次施加压力的误差可小于 1%。当该恒压 ATP 探头用于测量样品吸收谱时,可以减小操作对测量的影响。实验表明,多次测量的偏差小于 5%。将该探头用于对 NEPE 推进剂样品进行安定剂质量分数的分析,可以实现对样品的原位无损检测,得到的数据与传统的压片法 FTIR 测试结果具有一致性且极大程度上简化了测试流程。所研制的光纤式恒压 ATR 探头具有较大的实用价值。

参 考 文 献

- [1] Kupper L, Heise H M, Butvina L N, *et al.* Novel developments in mid-IR fiber-optic spectroscopy for analytical applications[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2001, 563(11): 173-181.
- [2] Ferri D, Baiker A. Advances in infrared spectroscopy of catalytic solid-liquid interfaces: The case of selective alcohol oxidation[J]. *Topics in Catalysis*, 2009, 52(10): 1323-1333.
- [3] Littler B J, Looker A R, Blythe T A, *et al.* Optimization of a hydrogenation process using real-time mid-IR, heat flow and gas uptake measurements[J]. *Organic Process Research and Development*, 2010, 14(6): 1512-1517.
- [4] Li Dingming, Deng Jun, Zhang Lihua, *et al.* Near infrared spectrometry determination of nitrate content in aqueous solution[J]. *Annual Report of China Institute of Atomic Energy*, 2010(1): 270.
李定明, 邓 军, 张丽华, 等. 近红外光谱法测定水溶液中的硝酸含量[J]. *中国原子能科学研究院年报*, 2010(1): 270.
- [5] Li Dingming, Zhao Shengyang, Wang Ling. Near infrared spectrometry determination of sodium nitrite content in aqueous solution[J]. *Annual Report of China Institute of Atomic Energy*, 2010(1): 271.
李定明, 赵胜洋, 王 玲. 近红外光谱法测定亚硝酸钠的含量[J]. *中国原子能科学研究院年报*, 2010(1): 271.
- [6] Qi Xiuzhen. Infrared spectrometry determination of dL-HM-PAO content[J]. *Annual Report of China Institute of Atomic Energy*, 1990: 181-182.
齐秀珍. 红外光谱法测定 dL-HM-PAO 含量[J]. *中国原子能科学研究院年报*, 1990: 181-182.
- [7] Yao Hongwei, Liu Yaqi, Fu Wei, *et al.* Initial research on Fourier transform infrared spectroscopy for the diagnosis of colon neoplasms[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(2): 297-301.
姚宏伟, 刘亚奇, 傅 卫, 等. 红外光谱用于大肠肿瘤诊断的初步研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(2): 297-301.
- [8] Huang Hongying, Yin Qihe. Fundamentals and application advances in attenuated total internal reflectance Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR)[J]. *Journal of the Graduates Sun YAT-SEN University (Natural Sciences, Medicine)*, 2011, 32(1): 20-31.
黄红英, 尹齐和. 傅里叶变换衰减全反射红外光谱法(ATR-FTIR)的原理与应用进展[J]. *中山大学研究生学刊(自然科学, 医学版)*, 2011, 32(1): 20-31.
- [9] Bai Yuekui, Yu Liwei, Zhang Le, *et al.* Research on application of Fourier transform infrared spectrometry in the diagnosis of lymph node metastasis in gastric cancer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(3): 599-602.
白月奎, 余力伟, 张 乐, 等. 傅里叶变换红外光谱在胃癌淋巴结转移诊断中的应用研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(3): 599-602.

- [10] Heise H M, Kupper L, Butvina L N, *et al.* Novel infrared optical probes for process monitoring and analysis based on next-generation silver halide fibers[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2003, 375(8): 1116-1123.
- [11] Bogomolov A, Hesling M, Wenzel U, *et al.* Development and testing of mid-infrared sensors for in-line process monitoring in biotechnology[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 221: 1601-1610.
- [12] Li Chenxi, Zhao Huijuan, Zheng Jiaxiang, *et al.* Design and property of depth-selective fiber-optical probes applied in diffuse reflection measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0717001.
李晨曦, 赵会娟, 郑家祥, 等. 深度分辨漫反射测量光纤探头设计及特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0717001.
- [13] Lu Wenquan, Wang Shiyang, Huang Wenling, *et al.* A compensable reflection type fiber-optic probe[J]. *Optical Communication Technology*, 1992, 16(3): 182-186.
卢文全, 王世英, 黄文玲, 等. 全光路补偿反射式光纤探头[J]. *光通信技术*, 1992, 16(3): 182-186.
- [14] Teng Aiping, Li Yingjun. Theoretical study on structure of reflecting optical fibre probe[J]. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering)*, 1995, 8(4): 9-12.
滕爱萍, 李英骏. 反射式光纤探头结构的理论研究[J]. *烟台大学学报(自然科学与工程版)*, 1995, 8(4): 9-12.
- [15] Teng Aiping, Li Yingjun. Reflective triangles intensity analysis of optical fiber probe[J]. *Journal of Shandong Institute of Building Materials*, 1996, 10(4): 81-85.
滕爱萍, 李英骏. 反射式三角形光纤探头的光强分析[J]. *山东建材学院学报*, 1996, 10(4): 81-85.
- [16] Luo Rui. The optical design of OP-FTIR spectrometer[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
罗 瑞. 开放式 FTIR 光谱仪光路系统设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [17] Schuchardt P, Siesler H W. Real-time analysis of the polymerization kinetics of 1, 4-butanediol and 4, 4'-diphenylmethanediisocyanate by fiber-coupled Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2017, 409: 833-839.
- [18] Li X, Coldham I. Synthesis of 1, 1-disubstituted tetrahydroisoquinolines by lithiation and substitution, with in situ IR spectroscopy and configurational stability studies[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2014, 136(15): 5551-5554.
- [19] Jiang Yan, Shen Yi, Wu Peiyi. Application of ATR-FTIR spectroscopy in polymer film study[J]. *Progress in Chemistry*, 2007, 19(1): 173-185.
江 艳, 沈 怡, 武培怡. ATR-FTIR 光谱技术在聚合物膜研究中的应用[J]. *化学进展*, 2007, 19(1): 173-185.
- [20] Yu Xiuzhu, Du Shuangkui, Yue Tianli, *et al.* Trans-fatty acid determination of edible oil by attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR)[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2008, 23(2): 189-193.
于修焯, 杜双奎, 岳田利, 等. 衰减全反射傅里叶变换红外光谱(ATR-FTIR)技术测定油脂中反式脂肪酸[J]. *中国粮油学报*, 2008, 23(2): 189-193.
- [21] Yin Hao, Pan Tao, Tian Peiling, *et al.* Rapid quantitative analysis for the human blood hemoglobin applied through FTIR/ATR spectrum[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2009, 26(2): 431-436.
尹 浩, 潘 涛, 田佩玲, 等. FTIR/ATR 光谱应用于人体血液血红蛋白的快速定量分析[J]. *光谱实验室*, 2009, 26(2): 431-436.
- [22] Zhang Pudun, Dong Weixiao. Rapid determination of ethanol content in alcoholic beverage by ATR-FTIR[J]. *Chemical Research and Application*, 2009, 21(3): 334-337.
张普敦, 董蔚潇. ATR-FTIR 技术用于酒精饮品中乙醇含量的快速测定[J]. *化学研究与应用*, 2009, 21(3): 334-337.
- [23] Tao Lizhen, Pan Zhijuan, Jiang Yaoxing, *et al.* Application of ATR-FTIR on textile fiber qualitative identification[J]. *Shanghai Textile Science and Technology*, 2009, 37(9): 16-19.
陶丽珍, 潘志娟, 蒋耀兴, 等. 衰减全反射傅里叶红外光谱在纤维鉴别中的应用[J]. *上海纺织科技*, 2009, 37(9): 16-19.
- [24] Zhu Shunping, Xue Ying. Rationale, calibration and testing of ATR[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2005, 19(3): 18, 26-29.
朱顺平, 薛 英. ATR 的工作原理、校准及检测[J]. *北京测绘*, 2005, 19(3): 18, 26-29.
- [25] Chen Lushi. Blood glucose detection experiments and data processing based on mid-infrared ATR spectroscopy[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
陈露诗. 中红外 ATR 光谱法血糖检测实验与数据处理[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [26] Wu Peiyun. Quick qualitative analysis of new type fiber by FTIR-ATR[J]. *Wool Textile Journal*, 2010, 38(2): 48-53.
吴佩云. 新型纤维的 FTIR-ATR 快速定性分析[J]. *毛纺科技*, 2010, 38(2): 48-53.

- [27] Yang Xiaofang, Wang Dongsheng, Sun Zhongxi, *et al.* Application of ATR-FTIR spectroscopy in the study of adsorption on environmental micro-interfaces[J]. *Progress in Chemistry*, 2010, 22(6): 1185-1194.
杨晓芳, 王东升, 孙中溪, 等. ATR-FTIR 在研究环境固液微界面吸附过程中的应用[J]. *化学进展*, 2010, 22(6): 1185-1194.
- [28] Xu Lin, Wang Naiyan, Song Dongming. Rapid determination of cypermethrin remained on vegetable surface by ATR-FTIR[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2003, 20(6): 888-890.
徐 琳, 王乃岩, 宋东明. ATR-FTIR 快速检验蔬菜表面残留氯氰菊酯[J]. *光谱实验室*, 2003, 20(6): 888-890.
- [29] Wan Qian, Sui Xin, Wang Ningfei. Quantitative method for monitoring stabilizers content of NEPE propellant by FTIR [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2013, 36(2): 274-277.
万 谦, 隋 欣, 王宁飞. FTIR 监测 NEPE 推进剂中安定剂含量的定量表征方法[J]. *固体火箭技术*, 2013, 36(2): 274-277.