

食用油和煎炸油空芯光纤拉曼检测系统研究

王 为 陈 盼 刘炳红 汤晓黎 朱晓松 石艺尉

复旦大学信息科学与工程学院 上海 200433

摘要 基于食用油质量检测背景,使用内表面镀银空芯光纤作为传感腔,设计和搭建了食用油和煎炸油拉曼光谱检测系统。对系统的拉曼散射光强进行了理论建模,通过理论仿真与实验数据讨论了空芯光纤长度的优化。使用系统对常见食用油和小吃摊油进行了拉曼光谱采集与分析,引入了衡量油脂不饱和度的参数 I_{3005}/I_{2897} 。对某品牌大豆油的不饱和度参数采集实验发现,该油样不饱和度参数随煎炸时长增加明显降低。提供了一种灵敏高效的检测系统,可实现食用油和煎炸油结构分析及油脂饱和度评估,拉曼光谱特征峰清晰尖锐,为样品的结构分析提供了有效手段,可应用于食品安全检测领域。

关键词 光纤光学;空芯光纤;拉曼光谱;油脂饱和度;特征峰

中图分类号 TN253; TQ646; O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0906003

Research on Hollow Fiber Raman Detection System for Edible and Fried Oils

Wang Wei Chen Pan Liu Binghong Tang Xiaoli Zhu Xiaosong Shi Yiwei

School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract Based on the detection of edible oil, a Raman spectrum detection system using the hollow fiber with silver plated in the inner surface as the sensor cavity is established for detecting edible and fried oils. A mathematical model is proposed to describe Raman signal intensity. The fiber length is optimized by simulation results and experimental data. After system establishment and optimization, samples of oil are measured by the system, including: fried oils collecting from two food stands and several kinds of edible oils. Ratio of Raman peak intensities at 3005 cm^{-1} and 2897 cm^{-1} is proposed to describe the degree of oil un-saturation. The un-saturation collecting experiment for the soybean oil used shows that un-saturation degree is inversely proportional to frying time. A smart and efficient detection system is provided to analyze oil structures and estimate oil un-saturation, where Raman spectrum characteristic peak is clear and sharp. It has shown potentiality in food safety detecting field.

Key words fiber optics; hollow fiber; Raman spectrum; oil un-saturation; characteristic peak

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 120.4570; 280.4788; 300.6450; 290.5860

1 引 言

食用油是人类膳食结构中不可缺少的部分,是人类非常重要的营养物质来源。食用油中含有丰富的脂肪酸,可以根据是否含有 C=C 将脂肪酸分为饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸。煎炸老油是地沟油的一种,是食品加工过程中为了降低成本长时间高温煎炸的油脂。在反复高温煎炸过程中,食用油中的脂肪酸特别是不饱和度较高者,与氧、水分接触,发生热氧化、水解、热聚合等一系列化学反应,油脂总不饱和度下降,改变了油脂的功能特性、感官性质和营养价值,人类食用这种油脂制品会严重危害健康。为确保煎炸用油的安全卫生,应注意

收稿日期: 2015-05-07; 收到修改稿日期: 2015-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(61201062)

作者简介: 王 为(1992—),女,硕士研究生,主要从事空芯光纤拉曼光谱检测方面的研究。

E-mail: 12210720088@fudan.edu.cn

导师简介: 石艺尉(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光传输与传感方面的研究。

E-mail: ywshi@fudan.edu.cn(通信联系人)

保持油温在 200 ℃ 以下, 并且每批油脂最好一次连续使用 10 h 后全部更换新油^[1]。

感官评定法是食品加工者判断是否摒弃煎炸油脂的最常用方法^[2]。随着食用油煎炸时间的延长, 色泽会逐渐加深, 透明度不断降低, 黏度不断增加^[3]。但感官评定方法的检测结果受主观因素影响较大, 不适用于大批量样本的检测。色谱分析法^[4-6]也常被应用于食用油和煎炸油的分析检测, 但这种方法检测时间长, 检测成本高, 操作复杂, 有损于样品且难以实现在线快速测量。此外, 有研究者^[7-9]对煎炸油的羰基值、酸值、过氧化值、碘值等化学指标以及油脂劣变生成的化学物质进行了研究。但这些方法需要繁琐的测量流程和大量的化学试剂, 很难在线对油脂的劣变程度做出分析。

近年来, 光谱检测技术由于其响应速度快、无损于样本等优点, 逐渐被应用于食用油和煎炸油的分析检测。文献[10]利用傅里叶红外变换仪对煎炸油进行扫描, 发现了劣变的煎炸油的特征吸收峰。文献[11]利用激光诱导荧光探测技术对食用油和煎炸食用油进行了光谱采集和分析。拉曼光谱检测技术是利用物质的拉曼特征光谱对物质结构和化学成分进行检测分析的技术, 具有光谱特征峰尖锐清晰的优点。油类物质具有丰富的拉曼光谱特征峰, 脂肪酸碳链中 C—C、C=C 等基团对拉曼光谱贡献大, 非常适合使用拉曼光谱技术对油类物质结构进行测量分析。

空芯光纤(HF)是一种具有发展前景的特种光纤, 具有柔韧性好、无端面反射损耗等优点^[12-13]。由于其中空的特点, 在传感^[14-18]、化学发光^[19]等方面多有应用。在可见光波段, 金属膜空芯光纤具有低损耗传输特性, 使其可以在可见光波段对有色溶液进行测量^[18]。

本文结合拉曼光谱检测和镀银空芯光纤传感腔, 设计并搭建了一套油样检测系统。对系统进行了理论建模, 探讨了吸收系数对最优空芯光纤长度的影响。使用系统测量了多种食用油的拉曼光谱, 定义了油脂的不饱和度参数 I_{3005}/I_{2897} , 即油样在 3005 cm^{-1} (油脂某不饱和键振动特征峰) 和 2897 cm^{-1} (油脂某饱和烯烃键振动特征峰) 处的拉曼特征峰强度之比。对不同煎炸时长的 13 份煎炸油样品进行了不饱和度参数采集, 发现油样不饱和度参数随煎炸时长不断降低。最后, 对小吃摊采集煎炸油和未煎炸油进行拉曼光谱测量, 发现了明显的特征峰差异, 并通过理论和饱和度变化对特征峰差异进行了解释。

2 实验系统与理论分析

2.1 油样来源

煎炸油样本来自上海某两处街边食物加工摊点, 分别标记为油样 A 和油样 B, 同时采集其对应未煎炸油, 分别标记为 A₀ 和 B₀。食用油样本采购于上海各大超市, 其中含大豆油、调和油、玉米油、山茶花油、葵花籽油, 具体信息如表 1 所示。

表 1 油样分布表
Table 1 Distribution of oil samples

Number	Brand	Note
A ₀	NA	unfried oil from food stand 1
A	NA	fried oil from food stand 1
B ₀	NA	unfried oil from food stand 2
B	NA	fried oil from food stand 2
C	brand 1	camellia oil
D	brand 2	soybean oil
E	brand 2	sunflower seed oil
F	brand 2	corn oil
G	brand 2	blend oil
H	brand 3	olive and sunflower seed oil
I	brand 3	sunflower seed oil
J	brand 4	corn oil

2.2 空芯光纤

实验所用空芯光纤结构图如图 1 所示, 它是由玻璃毛细管内表面镀一层金属银膜而制成。由于金属银

膜具有高反射率,可以保证光束的能量在光纤表面几乎全部被反射,因而能量损失非常小。

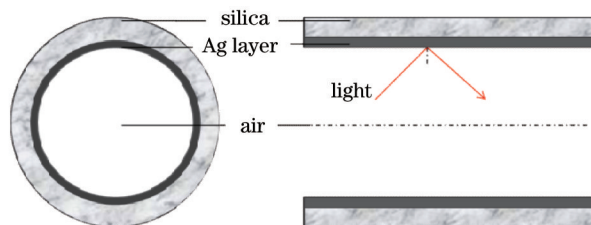


图1 金属银膜空芯光纤结构图

Fig.1 Structure of the Ag-coated hollow fiber

空芯光纤镀银工艺采用一种改进的液相镀膜法,基本原理为银镜反应。镀制前先用 SnCl_2 溶液对玻璃基管内壁进行预处理,可以减小银膜的表面粗糙度,有利于增加银膜反射率。随后使用真空泵将硝酸银液和葡萄糖溶液吸引入玻璃毛细管,使它们充分混合并在毛细管内反应,被还原的银逐渐沉积在毛细管内壁,形成光滑的银膜。具体镀制工艺及光纤参数详见文献[20]。

2.3 系统搭建

本文搭建的实验系统如图2所示。激光波长为 532 nm,最大输出功率为 200 mW。拉曼光谱仪由 HORIBA JOBIN YVON 公司生产,型号为 iHR-550,主要组成部件有光纤适配器(FA)、光栅、图像控制器(CCD)等。

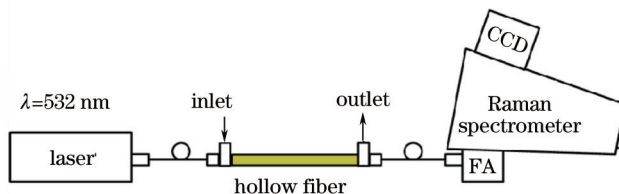


图2 油样空芯光纤拉曼检测系统

Fig.2 Hollow fiber Raman detection system for oil samples

空芯光纤两端连接有自制液路光路耦合接口,耦合接口都连接有软管,通过蠕动泵导入/导出待测油样以实现在线检测的目的。激光器发出的入射光通过发射光纤入射空芯光纤传感腔,激发纤芯中油样产生拉曼散射光,并通过收集光纤导入FA,经过FA将光耦合进拉曼光谱仪,最后经电脑获得油样的拉曼光谱。实验中选择激光功率为 30 mW,拉曼光谱仪曝光时间为 1 s,扫描范围为 $1000\sim 3100\text{ cm}^{-1}$,测量室温为 $24\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.4 理论分析

若检测样本为无色液体时,激光入射光纤并传播,则拉曼散射光强为

$$I(L) = \kappa I_0 L \exp(-\alpha L), \quad (1)$$

式中 L 是空芯光纤传感腔长度, κ 为拉曼增益系数,与拉曼横截面和样本浓度有关, α 是光纤的传输损耗。

若空芯光纤中检测样本为有色溶液时,有色溶液对光的吸收作用会使接收到的拉曼散射强度降低,此时(1)式已经不再适用,应该增加考虑有色液体对光的吸收损耗。

激光入射空芯光纤后,激发出油样的拉曼散射光并传播,随着传输距离的增加,一方面拉曼散射光不断累积,另一方面样本的吸收和光纤的传输会对拉曼散射光和激光带来损耗。令同一油样对激光和拉曼散射光的吸收系数分别为 α_1 、 α_2 ,则拉曼散射光强度为

$$I(L) = \int_0^L \kappa I_0 \exp[-(\alpha + \alpha_1)L] \exp[-(\alpha + \alpha_2)(L - x)] dx = \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} \kappa I_0 \{ \exp[-(\alpha + \alpha_1)L] \exp[-(\alpha + \alpha_2)L] \}, \quad (2)$$

存在一个最优空芯光纤长度,使拉曼散射光的积累和损耗作用达到最优点,带来最大的输出拉曼光强。使(2)式中 $I(L)$ 取最大值,得到最优空芯光纤长度为

$$L_{\text{opt}} = \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \ln \frac{\alpha + \alpha_2}{\alpha + \alpha_1}. \quad (3)$$

实验中,同一油样对激光和拉曼散射光波段的吸收系数基本相同,可以令

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha', \quad (4)$$

将(4)式代入(2)式,得到拉曼散射光强度为

$$I(L) = \int_0^L \kappa I_0 \exp[-(\alpha + \alpha')x] \exp[-(\alpha + \alpha')(L - x)] dx = \kappa I_0 L \exp[-(\alpha + \alpha')L], \quad (5)$$

对(5)式求最大值,得到最优空芯光纤长度为

$$L_{opt} = \frac{1}{\alpha + \alpha'}, \quad (6)$$

实际上,(6)式为在 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha'$ 时(3)式的等价形式,后文中所有理论仿真均依据(5)式进行计算。

3 实验结果与分析

3.1 空芯光纤传感腔长度优化

实验中空芯光纤传输损耗在文中使用波段变化很小,可以认为是定值,根据(6)式,最优的空芯光纤传感腔长度与油样吸收系数密切相关。而本文中不同油样的吸收系数不同,使得最优空芯光纤传感腔长度各异。

为研究最优空芯光纤长度的选择,选取了10根内径700 μm 镀银空芯光纤,长度分别为15、20、...、60 cm。使用检测系统对油样A、B、C进行了拉曼光谱测量,并将实测数据分别与理论仿真进行了对比。图3(a)是不同光纤长度情况下油样A在1660 cm^{-1} 附近拉曼特征峰变化图,图3(b)是油样A、B、C的空芯光纤传感腔长度与峰面积关系曲线。

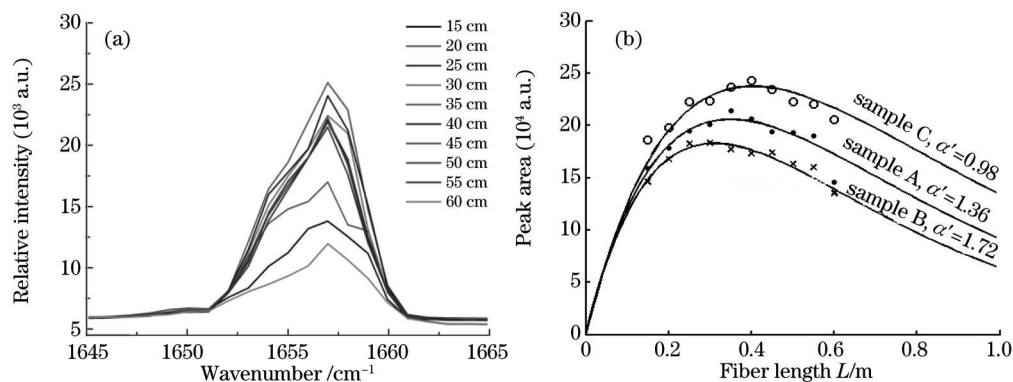


图3 (a) 油样A在不同长度光纤情况下1660 cm^{-1} 附近拉曼特征峰;
(b) 不同吸收系数(不同油样)情况下空芯光纤长度与峰面积关系曲线

Fig.3 (a) Raman peaks of oil sample A at 1660 cm^{-1} for sensing cell with various lengths;
(b) peak area versus cell length with various absorption coefficients for different samples

由图3(a)可知,当空芯光纤传感腔长度为35 cm时油样A的拉曼散射强度达到最大值。图3(b)中曲线代表油样空芯光纤长度与峰面积的理论仿真曲线,散点为1660 cm^{-1} 处实测特征峰数据。油样A、B、C的吸收系数分别为1.36、1.72、0.98 dB/m ,实验中光纤传输损耗为1.5 dB/m 。可以发现,理论仿真与实测数据具有较高的吻合度,证明了理论模型的可靠性和传感系统的实用性。为了使各种油样都能获得较好的拉曼散射效果,后续实验均选取一个折中的传感腔长度35 cm。

3.2 食用油拉曼光谱测量与分析

利用油样检测系统对8种市购食用油进行了拉曼光谱测量,经过荧光背景扣减、平滑滤波后,得到拉曼光谱如图4所示。

图4中食用油在1260、1660、3005 cm^{-1} 波数特征峰来自于顺式RHC = CHR基团,分别是=C—H键剪式弯曲振动、C = C键伸缩振动、=C—H键对称伸缩振动特征峰;1300、1440、2850 cm^{-1} 波数特征峰分别是—CH₂基团中的C—H键扭曲振动、剪式振动、对称伸缩振动特征峰;2897 cm^{-1} 波数的强特征峰是—CH₃基团中的C—H键对称伸缩振动特征峰。

实验结果表明,各种食用油拉曼光谱中出现的特征峰数、峰形和特征峰频移基本一致,即不同食用油脂脂肪酸结构组成几乎相同。但不同食用油样品的相同特征峰间的相对强度有所差异,这表明食用油样品的构成组分和含量有所差异。例如,油样C和油样D的1660、2987 cm^{-1} 处特征峰相对强度分别为0.516和0.588,

可以定性判断油样 C 和油样 D 含有的不饱和脂肪酸成分不同。

将油脂在 3005 cm^{-1} (顺式 $\text{RHC}=\text{CHR}$ 基团中 $=\text{C}-\text{H}$ 键对称伸缩振动) 和 2897 cm^{-1} (饱和烯烃 $-\text{CH}_3$ 基团中 $-\text{C}-\text{H}$ 键对称伸缩振动) 的特征峰强度比值 I_{3005}/I_{2897} , 作为衡量油脂不饱和度的参数。比值 I_{3005}/I_{2897} 越大, 说明油脂中不饱和键含量越多, 不饱和程度越高; 反之, 油脂不饱和程度越低。

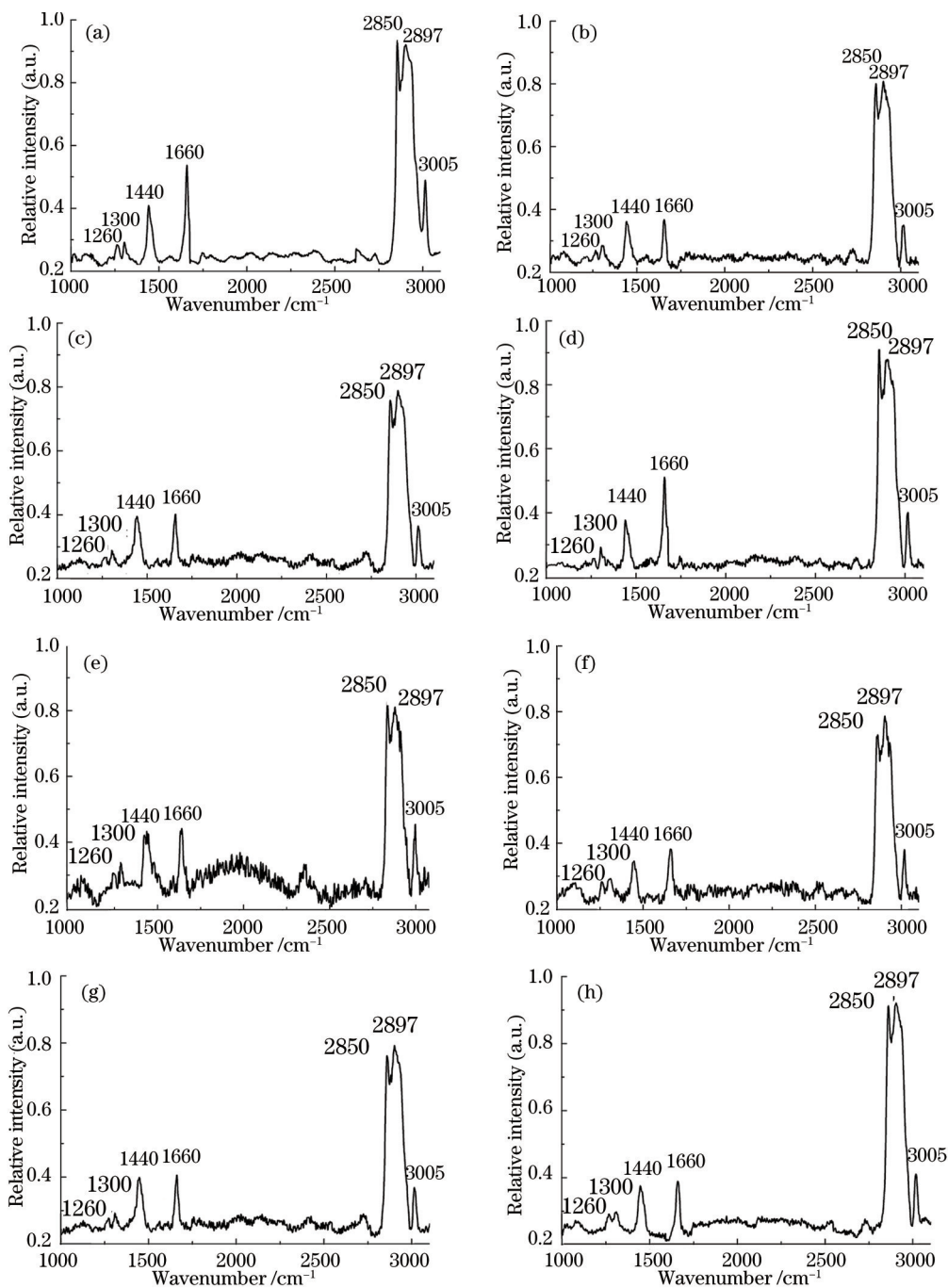


图 4 几种食用油拉曼光谱图。(a) 油样 C; (b) 油样 D; (c) 油样 E; (d) 油样 F; (e) 油样 G; (f) 油样 H; (g) 油样 I; (h) 油样 J

Fig.4 Raman spectra of several edible oil samples. (a) C; (b) D; (c) E; (d) F; (e) G; (f) H; (g) I; (h) J

3.3 小吃摊油拉曼光谱测量与分析

使用油样检测系统对小吃摊油样 A、A₀、B 和 B₀ 进行拉曼光谱测量。为了避免煎炸油含有颗粒物给拉曼光谱测量带来影响, 预先使用一次性实验用针管和 1.2 mm 规格过滤塞对煎炸油样 A 和 B 进行了 2 次过滤。图 5(a) 和 (b) 分别是 2 个小吃摊采集油煎炸前后拉曼光谱对比图, 图 5(c) 是 2 处小吃摊煎炸前后油样的实物图。

图 5(a)、(b) 对比了小吃摊油煎炸前后的拉曼光谱, 发现了明显的光谱变化, 由于 2 组光谱变化具有共性,

一同分析如下：

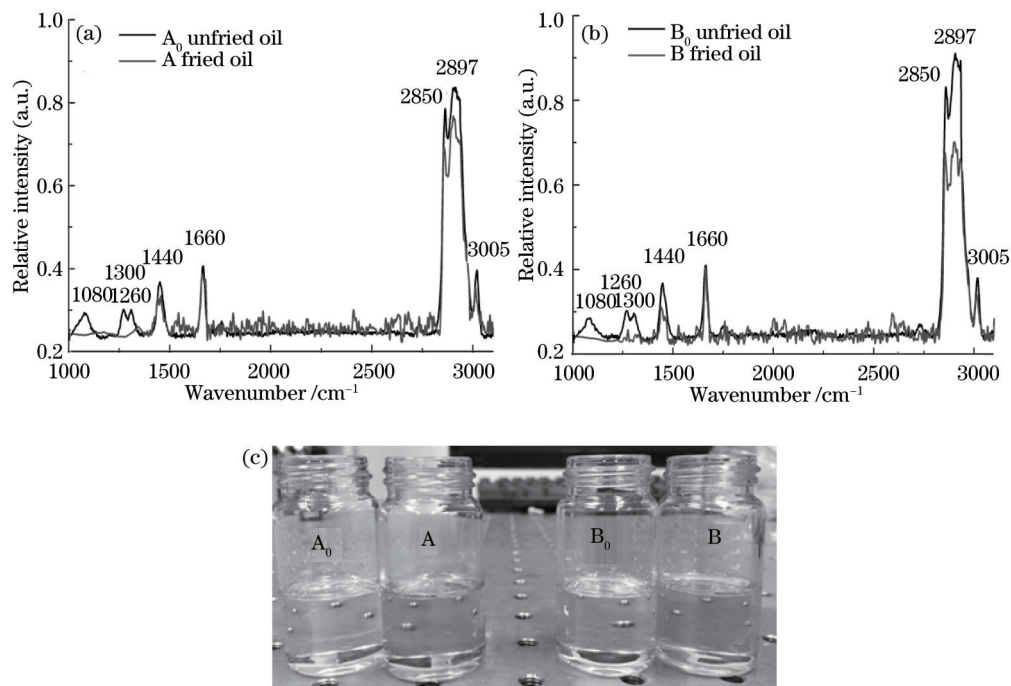


图5 (a) 油样 A₀和油样 A 拉曼光谱对比图; (b) 油样 B₀和油样 B 拉曼光谱对比图; (c) 油样实物图

Fig.5 (a) Raman spectra of oil sample A₀ and A; (b) Raman spectra of oil sample B₀ and B; (c) picture of oil samples from food stands

1) 与小吃摊未煎炸油拉曼光谱相比,煎炸油大部分特征峰强度降低。其中 1440、2850、2897、3005 cm^{-1} 处特征峰幅度明显降低,原本拉曼强度较小的 1080、1260、1300 cm^{-1} 处特征峰淹没于噪声中,无法被检测出。这是因为油样经过长时间煎炸,使油色加深,透光性降低,吸收系数增加,由图 3(b)可以看出,吸收系数增加会造成拉曼散射光强度降低。

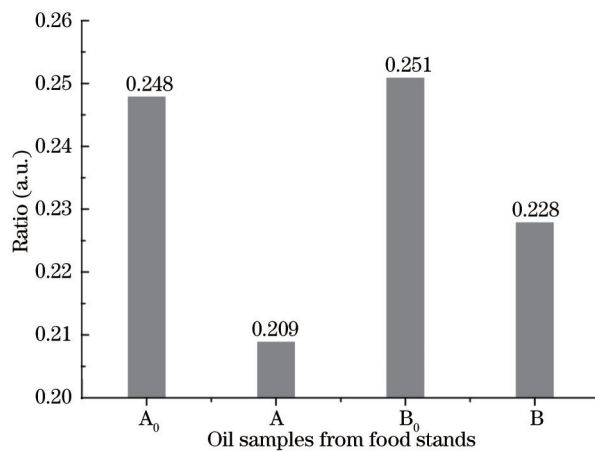


图6 A₀, A, B₀, B 样品前后不饱和度参数 I_{3005}/I_{2897} 值

Fig.6 Un-saturation ratio I_{3005}/I_{2897} of oil samples A₀, A, B₀ and B

2) 在高波数波段,小吃摊煎炸油的甲基和亚甲基中 C—H 对称伸缩振动在 2850 cm^{-1} 和 2897 cm^{-1} 处特征峰强度都有所减弱,还可能是因为长期高温煎炸导致了油中脂肪酸烃链结构的紊乱^[21]。同时,油脂发生的聚合反应使不饱和键数量减少,也会使得 3005 cm^{-1} 处特征峰强度下降,结合图 6 的煎炸前后小吃摊油不饱和度参数采集结果可以发现,经过煎炸后两个小吃摊油样的不饱和度均出现明显下降。

3) 相比于其他特征峰的变化,代表不饱和脂肪酸 C = C 键振动的 1660 cm^{-1} 处特征峰得到了增强,可能是因为不饱和亚甲基的结构链在长期高温煎炸下发生了构象的改变^[22]。

3.4 油样不饱和度参数采集与分析

为了研究煎炸对油脂不饱和度带来的影响,实验室对油样D进行了煎炸实验:取2 L油样D倒入油炸锅,设置煎炸温度为190 ℃,每间隔2 h取样一次,取得煎炸2、4、…、26 h后共13份煎炸油样本。图7给出了油样D经过不同时长煎炸后的几个油样实物图片。随着煎炸时长的不断增加,油样颜色不断加深,并伴随着煎炸油粘稠度不断增加。

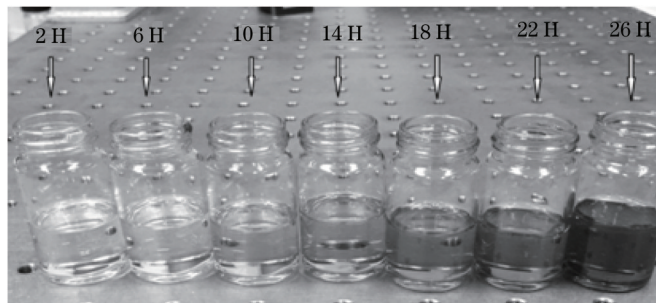


图7 油样D经过不同煎炸时长的几个油样实物图片

Fig.7 Several fried oils of sample D

将煎炸取得的13个油样分别放入油样检测系统进行拉曼光谱测量,并对本文中所有油样进行不饱和度参数采集。图8(a)为不同煎炸时长的油样D不饱和度参数 I_{3005}/I_{2897} 柱状图,图8(b)是食用油的不饱和度参数 I_{3005}/I_{2897} 值。

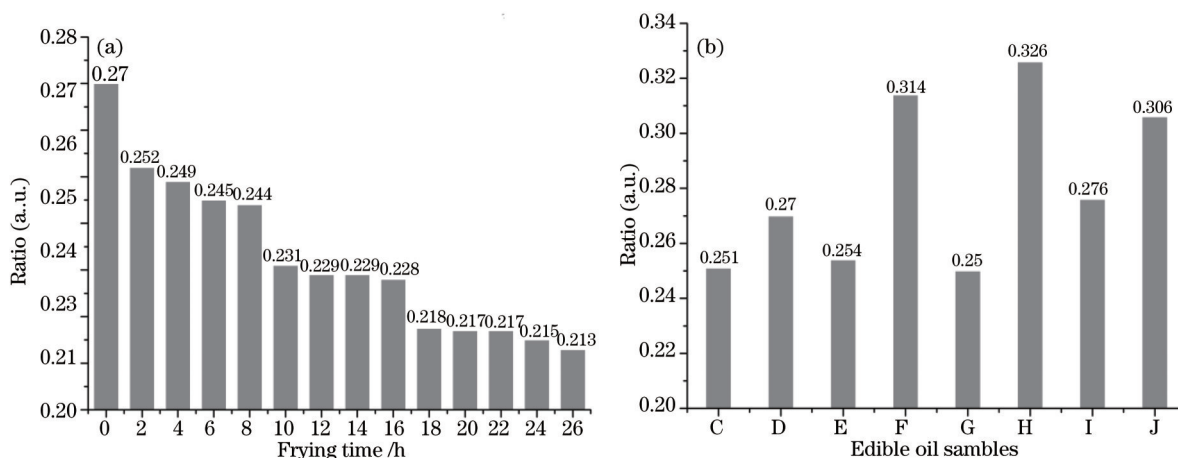


图8 不同油样的不饱和度参数 I_{3005}/I_{2897} 值。(a) 油样D不饱和度参数与煎炸时长的变化图;(b) 几种食用油不饱和度参数值

Fig.8 Un-saturation ratio I_{3005}/I_{2897} of several oil samples. (a) I_{3005}/I_{2897} versus frying time of sample D;

(b) I_{3005}/I_{2897} of several edible oil samples

由图8(a)可以看出,随着煎炸时长的增加,油样D的不饱和度参数 I_{3005}/I_{2897} 不断减小,这是因为油样D中不饱和脂肪酸在煎炸过程中逐渐发生深度聚合反应,油样不饱和键数量减少,不饱和度不断降低。当煎炸时长达到10 h后,油脂不饱和度参数会出现明显降低,这与文献[1]中油脂煎炸10 h后必须更换新油的时限结论相符,说明提出的不饱和度参数 I_{3005}/I_{2897} 可以很好地评估食用油的煎炸程度。由图8(b)可以看出食用油不饱和度参数具有较大差异, I_{3005}/I_{2897} 在0.249~0.326范围内波动,难以给出可以判定所有食用油煎炸程度的统一阈值标准。对各种食用油的煎炸程度阈值设定,需要进一步进行大量煎炸实验。

4 结 论

从食用油和煎炸油安全背景出发,设计并搭建了一套基于空芯光纤的食用油和煎炸油拉曼光谱检测系统。由于系统使用镀银空芯光纤作为传感腔,可以高效收集拉曼散射光,减小耦合损耗,提高检测灵敏度。通过理论建模对系统传感腔长度进行了优化,理论仿真与实测数据具有很好的吻合度。在最优传感腔长度下对各种食用油和煎炸油油样进行了拉曼光谱测量,提出了油样的不饱和度参数,分析了不饱和度参数与

油样煎炸程度间的关系。实验结果表明,该不饱和度参数与食用油的煎炸程度有很好的相关性,在判定食用油煎炸程度方面有很大的应用潜力。

参 考 文 献

- 1 Jin Yuan. Food Nutrition and Hygiene[M]. Beijing: China Commercial Press, 1987: 122-123.
金 园. 食品营养卫生学[M]. 北京: 中国商业出版社, 1987: 122-123.
- 2 Wu Shimin. Quality evaluation of fried oils[J]. Cereals Oils, 2000, (5): 33-35.
吴时敏. 煎炸过程中油脂质量评定[J]. 粮食与油脂, 2000, (5): 33-35.
- 3 Shahina Naz, Rahmanullah Siddiqi, Hina Sheikh, *et al.*. Deterioration of olive, corn and soybean oils due to air, light, heat and deep-frying [J]. Food Research International, 2005, 38(2): 127-134.
- 4 Yin Pinghe, Pan Jianyu, Zhao Ling, *et al.*. Quick discrimination of ageing frying oil and hogwash oil from good edible vegetable oil with thin layer chromatography[J]. China Oils and Fats, 2004, 29(4): 47-49.
尹平河, 潘剑宇, 赵 玲, 等. 薄层色谱法快速鉴别泔水油和煎炸老油的研究[J]. 中国油脂, 2004, 29(4): 47-49.
- 5 Fan Lu, Wu Nana, Huo Quangong, *et al.*. Pattern recognition analysis of 5 kinds of vegetable oil and fat by the content of fatty acids[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2008, 36(8): 1133-1137.
范 璐, 吴娜娜, 霍权恭, 等. 模式识别法分析 5 种植物油脂[J]. 分析化学, 2008, 36(8): 1133-1137.
- 6 Fritsch W C. Measurements of frying fat deterioration: A brief review[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1981, 58(3): 272-274.
- 7 Liu Yulan, Wang Yinghui, Li Shijun. Nutritional ingredient of frying rice bran oil and the quality of deep-fried dough sticks[J]. China Oils and Fats, 2014, 39(3): 28-32.
刘玉兰, 王莹辉, 李时军. 煎炸米糠油营养成分及煎炸油条品质分析[J]. 中国油脂, 2014, 39(3): 28-32.
- 8 Huang Xing, Yao Tingxiang, Wang Jiliang, *et al.*. Discussion of quality change detection methods for fried oils[J]. Food Science, 1995, 16(8): 50-53.
黄 兴, 姚庭香, 王吉良, 等. 煎炸油质变检验方法探讨[J]. 食品科学, 1995, 16(8): 50-53.
- 9 Mallia S, Piccinalli P, Rehberger B, *et al.*. Determination of storage stability of butter enriched with unsaturated fatty acids/conjugated linoleic acids (UFA/CLA) using instrumental and sensory methods[J]. International Dairy Journal, 2008, 18(10-11): 983-993.
- 10 Martina H, Harette H, Heinz Dieter Isengard. Determination of total polar parts with new methods for the quality survey of frying fats and oils[J]. Talanta, 1998, 47(2): 447-454.
- 11 Mu Taotao, Chen Siying, Zhang Yinchao, *et al.*. Laser induced fluorescence spectrum characteristics of common edible oil and fried cooking oil[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(9): 2448-2450.
牟涛涛, 陈思颖, 张寅超, 等. 常见食用油和煎炸食用油的激光诱导荧光光谱特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(9): 2448-2450.
- 12 Du Jiuhui, Hou Lantian, Li Shaosheng, *et al.*. Theories and applications on output energy distribution of hollow fiber[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(10): 1261-1265.
堵久辉, 侯蓝田, 李绍胜, 等. 空芯光纤输出能量分布及其应用的研究[J]. 中国激光, 2004, 31(10): 1261-1265.
- 13 Zeng Xuan, Liu Binghong, He Yujing, *et al.*. Fabrication of low-loss AgI/Ag hollow fiber for laser light delivery in the near infrared region [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0306001.
曾 旋, 刘炳红, 何宇婧, 等. 近红外低损耗 AgI/Ag 空芯光纤的制作[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0306001.
- 14 Zhao Huaxin, Jiang Yongxiang, Luo Tianqiong, *et al.*. Hollow fiber sensor based surface plasmon resonance[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0628001.
赵华新, 蒋永翔, 罗天穷, 等. 基于表面等离子体共振原理的空芯光纤传感器[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0628001.
- 15 Jiang Yongxiang, Liu Binghong, Zhu Xiaosong, *et al.*. Study of silver coated hollow-core fiber surface plasmon resonance sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0223004.
蒋永翔, 刘炳红, 朱晓松, 等. 镀银空芯光纤表面等离子体共振传感器的研究[J]. 光学学报, 2014, 34 (2): 0223004.
- 16 Tan Wei, He Yujing, Yang Conghi, *et al.*. Remote measuring system for infrared spectral features using hollow fiber probe[J]. 2012, 31 (2): 148-152.
谭 伟, 何宇婧, 杨从辉, 等. 采用中红外空芯光纤探头的特征谱遥测系统[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(2): 148-152.
- 17 Liu Binghong, Shi Yiwei. Flexible silver-coated hollow fibers for remote Raman spectroscopic measurements[J]. Appl Opt, 2013, 52(21):

5165-5170.

18 Wei Zhonghan, Sheng Xiaoxia, Liu Binghong, *et al.*. Spectroscopic sensing system for colored solutions based on metallic hollow fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33 (7): 0706001.

魏中晗, 盛小夏, 刘炳红, 等. 基于金属膜空芯光纤的有色溶液浓度传感系统[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706001.

19 Sheng Xiaoxia, Chen Guoping, Shi Yiwei. Novel chemiluminometric sensing system based on hollow fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0923004.

盛小夏, 陈国平, 石艺尉. 基于空芯光纤的新型化学发光传感系统[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0923004.

20 Sui Kerong, Tang Xiaoli, Zhu Xiaosong, *et al.*. Infrared Ag/AgI hollow waveguides with high performance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(11): 2186-2190.

隋可融, 汤晓黎, 朱晓松, 等. 高性能 Ag/AgI 红外空芯光纤的研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(11): 2186-2190.

21 E C Y Li-Chan. The applications of Raman spectroscopy in food science[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1996, 7(11): 361-370.

22 Wong P T T. Raman scopy of thermotropic and high-pressure phases of aqueous phospholipid dispersions[J]. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, 1984, (13): 1-24.

栏目编辑: 王晓琰