

ICS
G



团 体 标 准

T/HBFPIA0XX-2026

植物纤维基食品接触材料
可生物降解性评价 红外光谱法

2026 - - 发布

2026 - - 实施

河北省食品包装行业协会 发布

前 言

本文件根据GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由河北省食品包装行业协会提出。

本文件由河北省食品包装行业协会归口。

本文件起草单位：XXXX

本文件主要起草人：XXXX

本文件为首次发布。

植物纤维基食品接触材料可生物降解性评价 红外光谱法

1 范围

本标准描述了测量天然植物纤维基食品接触材料中，常见非可降解成分含量的中红外光谱试验方法。

本标准适用于快速筛查含有（或疑似含有）聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）、聚苯乙烯（PS）、聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）等常见非可降解成份的待检材料。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB T 6682-2008 分析实验室用水规格和试验方法

GB/T 6040-2019 红外光谱分析方法通则

GB 20197-2006 降解塑料的定义、分类、标识和降解性能要求

GB/T 19277.1-2021 受控堆肥条件下材料最终需氧生物分解能力的测定 采用测定释放的二氧化碳的方法 第1部分：通用方法

T/HBFPA015-2023 可生物降解塑料中 PBAT、PLA 含量测定 中红外光谱法

3 术语和定义

3.1 朗伯-比尔定律

红外光谱法定量分析的依据是朗伯-比尔定律：在线性范围内，待测样品的红外吸光度与其含量成正比：

$$Abs = \epsilon CL \dots\dots①$$

式中：

Abs：—— 吸光度（或峰高H、峰面积S），无量纲；

ϵ ：—— 样品的摩尔吸光系数，单位为 $1/(\text{mol} \cdot \text{L} \cdot \text{cm}^{-1})$ ；

C：—— 样品的浓度，单位为 mol/L ；

L：—— 光程：红外光穿透样品的有效长度，单位为 cm ；

使用ATR附件采集的红外光谱，没有“光程”这个概念，可用“穿透深度d”等效代替式，吸光度（或峰高/峰面积）与样品浓度依然呈正比关系。

3.2 红外光谱拟合

理想状态下，波数轴上每一点对应的吸光度，都符合朗伯比尔定律：

$$A_i = \epsilon_i CL \dots\dots②$$

式中：

A_i ：—— 波数i处对应的样品吸光度（或峰高H、峰面积S），无量纲；

ϵ_i ：—— 样品在波数i处的摩尔吸光系数，单位为 $1/(\text{mol} \cdot \text{L} \cdot \text{cm}^{-1})$ ；

C:样品的浓度, 单位为mol/L;

L: 光程 (或穿透深度d), 单位为cm;

郎伯-比尔定律具有加和性, 同一次测量时, 混合物的红外光谱等于各组分红外光谱的加和。

$$A_{i, \text{混合物}} = \sum_{j=1}^k \varepsilon_{i, j} C_j L \dots\dots ③$$

式中:

$A_{i, \text{混合物}}$: ——波数i处对应的混合物吸光度 (或峰高H、峰面积S), 无量纲;

k : ——混合物中有k种组分;

$\varepsilon_{i, j}$: ——样品j在波数i处的摩尔吸光系数, 单位为 $1/(\text{mol} \cdot \text{l} \cdot \text{L} \cdot \text{cm}^{-1})$;

C_j : ——样品的浓度, 单位为mol/L;

L: ——光程 (或穿透深度d), 单位为cm;

因此, 理想状态下, 可以通过各组分的红外光谱, 拟合生成混合物的红外光谱。

3.3 样品光谱

采集待测材料的红外光谱, 经过ATR校正预处理和波数轴对齐预处理后, 得到样品光谱。其中, ATR校正是用以尽量修正ATR法采集光谱带来的偏差; 波数轴对齐是为了统一光谱的点位, 方便后续计算。

这两步预处理, 由红外光谱仪自带软件提供。

3.4 模拟光谱

通过计算机枚举各单一组分平均红外光谱的份额, 拟合生成的, 与样品光谱最接近的光谱, 称为模拟光谱。

3.5 单一组分的平均红外光谱

有充分代表性的单一组分的样本的红外光谱, 求得的平均光谱, 称为该单一组分的平均红外光谱。求平均光谱前, 样本的红外光谱也要进行ATR校正和波数轴对齐两步预处理。

使用ATR法采集的红外光谱, 还需要进行“正归一化”处理。正归一化可消除光程影响, 以消除因“穿透深度d”极不稳定, 带来的红外光谱吸光度极不确定。

正归一化计算公式为:

$$A_{i, \text{正归一化}} = A_i / \sqrt{\sum (A_i - A_{i, \text{平均}})^2} \dots\dots ④$$

式中:

$A_{i, \text{正归一化}}$: ——波数i处对应的混合物吸光度, 无量纲;

A_i : ——正归一化计算之前, 波数i处对应的吸光度, 无量纲;

$A_{i, \text{平均}}$: ——波数轴上所有点位, 对应的吸光度的平均值, 无量纲;

3.6 单一组分的标准红外光谱

由于样本和红外光谱测量时的不确定性，由平均红外光谱拟合生成的模拟光谱时，会和样品光谱有较大的差异。

如果不对模拟光谱和样品光谱吸光度的差值设上限，使用计算机枚举时，可能会导致光谱份额跳出正常区间；如果对差值上限设置过死，可能提前触发枚举循环终止，导致结果失真。因此需要通过计算各单一组分在各种条件下的标准偏差范围，设置合理的偏差限值。

单一组分在波数轴上每一点吸光度对应的标准偏差，称为单一组分的标准偏差谱。模拟混合物红外光谱时，偏差限值要考虑到每一组分的偏差限值，并乘以其光谱份额。

单一组分的平均红外光谱，以及它的标准偏差谱，称为单一组分的标准红外光谱。

3.7 a值

模拟光谱中，各组分的平均红外光谱贡献的份数，称为该组分的a值。

当某单一组分有不受其它组分或未知组分干扰的红外吸收峰时，也可使用该吸收峰的峰高（或峰面积）除以该组分平均红外光谱对应的峰高（或峰面积）得到它的a值。

3.8 相对K值

模拟光谱中，含量相同的组分的a值不一定相同。此时，某一组分A相对另一组分B的a值比，称为组分A相对组分B的相对K值，写作 $K_{A/B}$ 。

良好条件下求得的相对K值是恒定值，且具有传递性：

$$K_{C/B} = K_{C/A} K_{A/B} \cdots \cdots \textcircled{5}$$

一般可定义某组分为基准组分，命令其相对K值等于1，从而统一计算其它组分的相对K值。

3.9 折百含量

各组分a值，除以各自的相对K值，折百计算，即可得各组分的百分含量。

当混合物中含有其它未知组分时，折百含量不准确。

但是，当该组分的红外吸收区域，与参与计算的组分的吸收区域有明显区分时，不影响参与计算的组分彼此之间的含量比值。

3.10 残谱

样品光谱减去模拟光谱，得到残谱。

由于扣减了主成分的绝大部分信息，未知物的特征吸收得以表征；或者，原本被掩盖的微量组分的特征吸收得以彰显，大大提升目标物的检出限。

通过残谱分析，查看滤渣中，是否含有微量的非可降解塑料成份，是本标准的重要工作之一。

4 原理

4.1 检测目的

本标准的目的是评价待检材料的可生物降解性。本标准可作为可作为“GB 20197-2006 《降解塑料的定义、分类、标识和降解性能要求》”的快速筛查办法。从待检材料的化学成分出发，如果材料中含有聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）、聚苯乙烯（PS）、聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）等目标物，含量 $\geq 1\%$ （含疑似），那么根据“GB 20197-2006”对“可生物降解塑料”的定义，该材料有极大的概率不是可生物降解材料，建议下一步根据GB/T 19277.1-2021 《受控堆肥条件下材料最终需氧生物分解能力的测定 采用测定释放的二氧化碳的方法 第1部分：通用方法》，将样本送有资质的机构进行复检。

4.2 初步鉴定

使用目视法和红外光谱法，分析样品的表面和断面，可初步鉴定待检材料。根据初步鉴定结论，可进行下一步检测。

4.3 分离、提纯

由于天然植物纤维基食品接触材料中可能出现的，含量大于1%的原料、辅料、添加剂的种类很多；且相当一部分添加剂在塑料特征吸收区域有吸收峰。必须根据初步鉴定的结论，通过提纯的办法，除去大部分干扰组分。

5 设备与材料

5.1 设备

傅里叶变换红外光谱仪	配有金刚石晶体ATR附件
液氮研磨仪	配100目、200目筛网
真空干燥箱	室温—150℃
马弗炉	能保持温度在600 ℃±25 ℃
坩埚	与试验物质不起化学作用的石英坩埚、陶瓷坩埚
分析天平	分度值为0.1 mg
超声清洗仪	室温—80℃，超声功率200w
索氏抽提器	容积500 mL，配45um银筛网自制浸笼
水浴锅	室温—99℃
温控加热台	最高可控温度不低于300 ℃，温度精度：±5 ℃

5.2 材料

三级水	符合GB/T 6682规定
氢氧化钠	约0.2mol/L;由分析纯或以上纯度氢氧化钠稀释得来
柠檬酸钠	约0.2mol/L;由分析纯或以上纯度柠檬酸钠稀释得来
浓盐酸	接近37%，分析纯
稀盐酸	约0.1mol/L;由分析纯或以上纯度盐酸稀释得来
无水乙醇	分析纯或以上纯度
丙酮	分析纯或以上纯度
三氯甲烷	分析纯或以上纯度
石油醚	沸程30—60℃；分析纯或以上纯度
工业纤维素	不同厂家，不同来源，不同批次原料；100目
酸性洗涤木质素	不同厂家，不同来源，不同批次原料；100目
聚己二酸对苯二甲酸丁二醇酯（PBAT）	不同厂家，不同来源，不同批次原料；100目
聚丁二酸丁二醇酯（PBS）	不同厂家，不同来源，不同批次原料；100目
聚乳酸（PLA）	不同厂家，不同来源，不同批次原料；100目
滑石粉	不同厂家，不同来源，不同批次原料，不同目数；
PE	不同厂家，不同来源，不同批次原料；100目
PP	不同厂家，不同来源，不同批次原料；100目

6 分析步骤

6.1 初步鉴定

采用目视法，观察样品的表面和断面；再采集样品表面和断面（或熔融后取样内部）的红外光谱，对比“附录1”提供的红外参考光谱，对样品进行主成分分析，将样品分为如下大类：

类别	依据	特点	分析方法
----	----	----	------

类别	依据	特点	分析方法
天然植物纤维基材料：	红外光谱接近天然植物纤维光谱；	成分复杂，需要进行前处理分离、提纯	按“6.2”流程前处理，“6.3”提供的方法进行分析
可生物降解塑料	红外光谱为PBAT、PLA、PBS之一；肉眼或可见黄黑色颗粒；；	成分简单，可直接测量、计算；	按“6.2”流程前处理，“6.3”提供的方法进行分析
PE或PP	PP、PE特征吸收明显可见；	无论是否填充有天然植物纤维；	直接归为“疑似不可降解”
复合覆膜材料	表面检测为PE、PP、PET、PS；内部为天然植物纤维基材料	可加热揭膜称重；或参考附录4选用有效方法。	按“6.4”方法分析
其它	比如密胺树脂、酚醛树脂	可化学降解	鉴定为密胺树脂、酚醛树脂

表 1 初步鉴定结论与后续分析方法

6.2 天然植物纤维基食品接触材料样品处理流程

6.2.1 称重、破碎

选取质量大于 5g 的样品，置于真空干燥箱中，于 110℃条件下干燥 2 小时。运用液氮研磨仪对样品进行研磨，直至样品能够通过 100 目筛，收集全部样品并称量其质量 m_0 ，精确至 0.1mg。

6.2.2 海藻酸钠的洗脱

配制洗脱溶剂：取 600ml 去离子水与 150ml 0.2mol/L 柠檬酸钠溶液混合，使用氢氧化钠溶液将 pH 值调节至 11 - 12。将称量好的样品与洗脱溶剂按重量比 1:100 置于烧杯中，采用超声清洗仪在 80℃、200w 超声功率条件下处理 90 分钟。处理完成后，使用 0.45 微米银滤膜进行减压抽滤，随后用热的洗脱溶剂和大量 80℃去离子水对滤渣清洗 2 - 3 次，将滤渣置于真空干燥箱中烘干。

6.2.3 丙酮洗脱

将 45 微米银滤网加工成可装填样品的六面体，装入滤渣。使用 500ml 索氏提取器，以丙酮为提取剂，在 60℃水浴条件下加热，并利用 15 - 25℃循环水进行冷凝，持续洗脱 6 小时。

6.2.4 纤维素和木质素的洗脱

将所得残渣转移至配备回流冷凝装置的三口烧瓶中，加入 15 倍残渣重量的接近37%的恒沸浓盐酸，在氮气保护下，于 108℃条件下搅拌反应 3 小时。反应结束后，采用 45 微米银滤膜进行减压抽滤，并用大量 80℃去离子水洗滤渣。

6.2.5 红外光谱分析

收集所有残渣，并按四分法充分混匀。将处理好的滤渣充分干燥后采集红外光谱。此时红外光谱中，仅应剩余纤维素、酸性洗涤木质素、滑石粉等硅酸盐（以滑石粉为代表）、PBAT、PLA、PBS 等可降解塑料成分、PE、PP等非可降解塑料成分的红外特征峰。对照附录 A 提供的参考谱图进行定性检查，若发现有干扰组分未被洗脱，可根据表 4（附录 3）提供的溶解、降解信息重新洗脱。例如，当发现石蜡油等非极性干扰物时，可利用 PE、PP 的低温不溶性，使用低沸点非极性溶剂（如石油醚）进行洗脱。

6.2.6 三氯甲烷洗脱

若滤渣中含有大量的 PLA、PBAT 或 PBS，以至于影响到 PE、PP 的检出限，可在索氏提取器中，使用三氯甲烷（65℃）提取 4 - 8 小时，以减少滤渣总质量，从而提高 PE、PP 的含量。

6.2.7 按照步骤“6.3”提供的信息，采集最终剩余物的红外光谱，按照步骤“6.3”建立的方法进行组分含量分析。

6.3 组分含量分析——红外光谱法

6.3.1 测量单一组分标准红外光谱

6.3.1.1 收集不同来源、不同厂家、不同批次的酸性洗涤木质素、滑石粉、二氧化硅、PBAT、PLA、PBS、PE、PP等样品，使用金刚石ATR附件采集各组分的红外光谱，采集时避开颜料部位，在样品不同位置重复测量，重复测量3次。

其中红外光谱仪的参数设置为：“分辨率 4cm^{-1} ；波数范围： $4000\text{--}400\text{cm}^{-1}$ ；测量次数32次；图谱保存为吸光度模式”；如果发现3张光谱中，有的光谱吸光度弱、噪音多，则剔除该光谱，最终保留3张光谱。与标准谱库或公开资料对比，并非该物质的，则剔除该样品。

6.3.1.2 将测得的红外光谱依次进行ATR校正（校正参数为：晶体折射率2.4，入射角 45° ，单次反射，样品平均折射率1.5）；ATR校正时，样品平均折射率可增选1.3和1.65，以兼顾实际样品的折射率被高估和低估时，带来的额外偏差。波数轴对齐；正归一化处理后，保存为csv格式。

6.3.1.3 计算各单一组分标准红外光谱，具体包括平均光谱和每一个波数点对应的吸光度的标准偏差。

6.3.2 测量预设比例二元混合物的红外光谱

6.3.2.1 分别取各单一组分（粉碎至100或200目）样品，与基准组分（粉碎至100或200目）按预设比例充分混匀，得到两元组分混合物；按步骤“3.1.1”采集红外光谱，并按步骤3.1.2处理（平均折射率取1.5）；

6.3.2.2 制作计算机枚举辅助拟合软件

（1）、步长：可通过混合物的吸收峰和单一组分平均光谱的吸收峰的面积比，确定单一组分的光谱份额上限。组分枚举步长，不得大于该上限的1%；

（2）、标准偏差限值：模拟光谱的吸光度不得超过混合物红外光谱的3倍（或4倍）标准偏差；

6.3.2.3 计算各组分的相对K值

各组分a值与基准组分a值的比值的平均值，是该组分的相对K值。

6.3.3 测量样品

6.3.3.1 根据样品的前处理方式，以及红外光谱的定性，确定需要参与计算的单一组分，组分种类多时，可按顺序分批计算。

6.3.3.2 目标物（PP、PE）的含量，是红外定量结果C，乘滤渣质量，除以样品初始质量。

6.4 加温脱膜法

将复合材料干燥至恒重，称重后，用烘箱或加热平台加热使软化：

表 2 不同材料的脱模温度

材料	温度（℃）	保温时间（min）
PE	80 - 120	1~10
PP	80 - 120	1~10
PS	120~140	5~10
PET	180~200	3~5

取出后立即用刮刀\刮板、毛刷或橡胶辊轻轻刮离。

对刮离的非可降解塑料称重，计算非可降解塑料组分的含量。

如果不易脱膜，当刮离的重量占比达到或接近1%时，可依据已刮离的覆膜质量，以及其面积占总面积的比例，估算覆膜的质量。

也可使用其它可证明有效的方法，对覆膜成分进行含量分析。

加热脱膜法适用于PE、PP、PET、PS覆膜；其中PE、PP覆膜，也可粉碎后使用步骤“6.2”提供的前处理方法。

7 可生物降解性评价结果

7.1 主成分鉴定：

经红外光谱法分析，基材主成分是：天然植物纤维或淀粉类、PLA、PBAT、PBS等；或非可降解塑料（聚乙烯、聚丙烯、PS、PET）等；或本标准不能识别。

7.2 非可降解成份的检出和定量分析结果:

(1): 使用称重法, 得到的PE、PP、PET、PS的质量分数为:

质量分数(%, PE、PP、PET或PS) = $m_i/m_0 \times 100\%$;

(2): 经溶剂分离后, 又经步骤“6.3”红外光谱法定量分析, 得到的质量分数为:

质量分数(%, PE或PP) = $C(\%, \text{PE或PP}) \times m_i/m_0 \times 100\%$;

注: 由于PET、PS在所涉及洗脱试剂中有一定溶解性, 且多作为覆膜使用; 所以本标准只使用称重法分析复合材料中PET、PS覆膜的质量分数。

8 精密度

8.1 回收率

回收率 $\geq 90\%$

8.2 检出限

检出限 $\geq 0.5\%$

8.3 重复性

两次测量PE、PP时, 结果相对偏差不超过10%; 使用热揭膜法或密度浮选法, 两次测量PE、PP、PS、PET时, 相对偏差不超过20%。

附录1：常见组分的红外光谱与特征吸收峰

1 天然植物纤维红外光谱

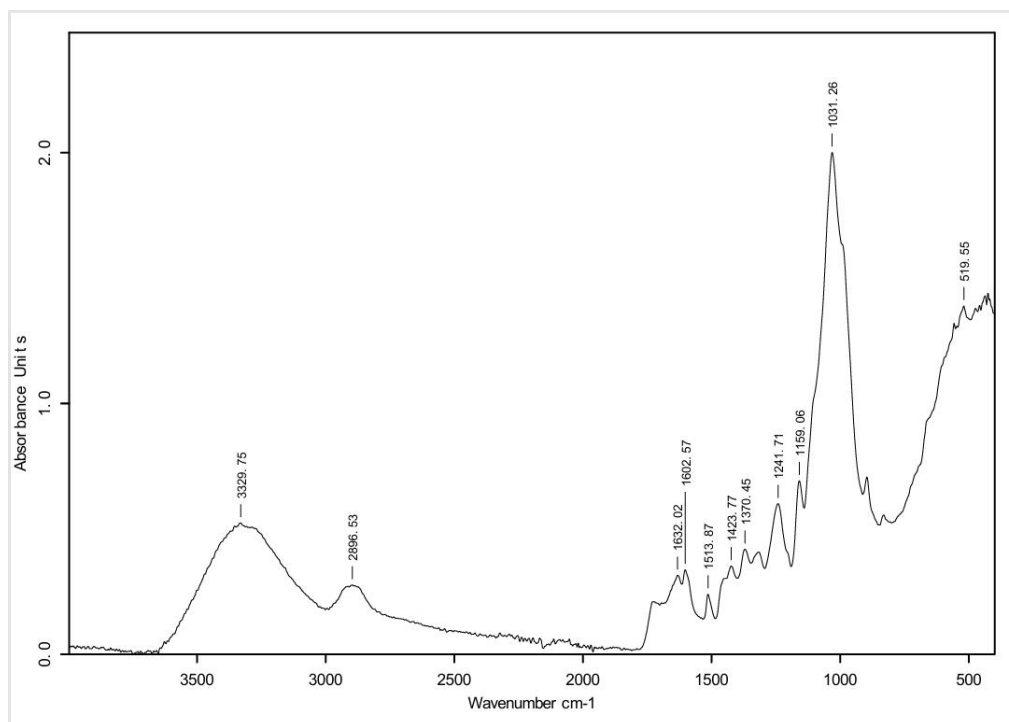


图 1 天然植物纤维（典型）红外光谱

2 纤维素(酸性洗涤)红外光谱

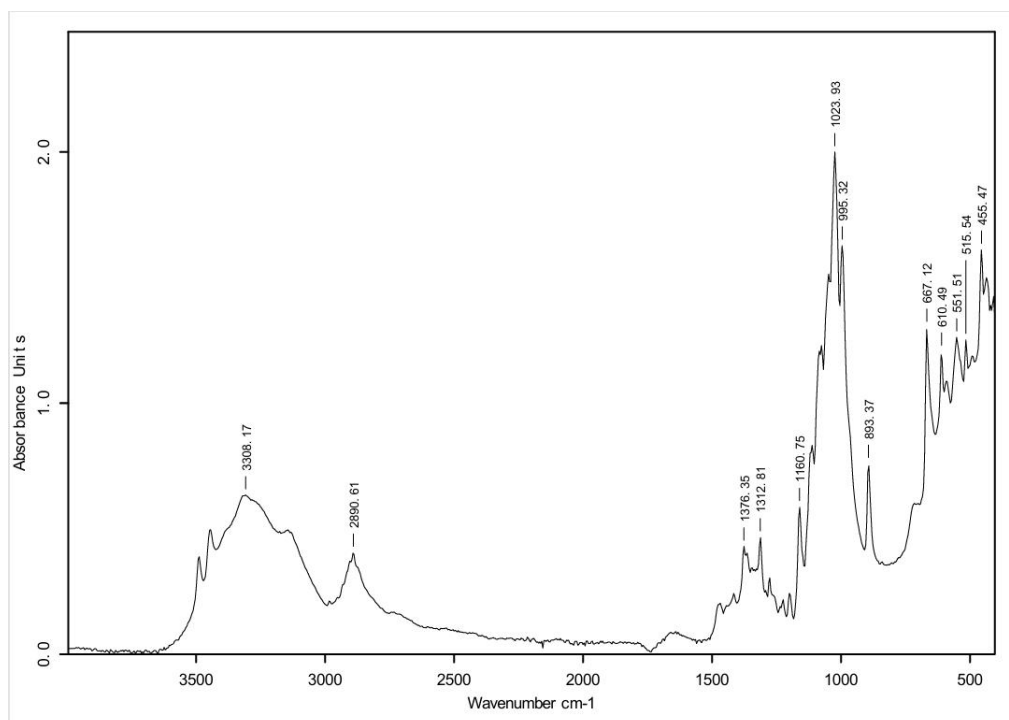


图 2 纤维素（酸性洗涤）红外光谱

3 木质素（酸性洗涤）红外光谱

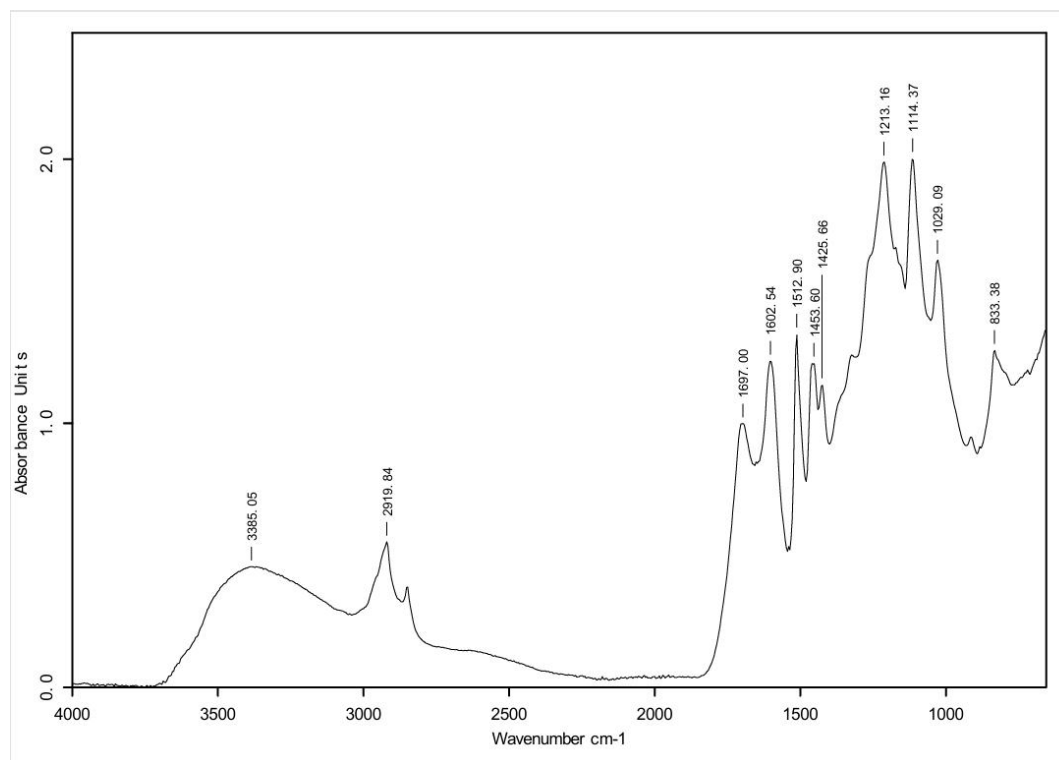


图 3 木质素（酸性洗涤）红外光谱

4 PBAT 红外光谱

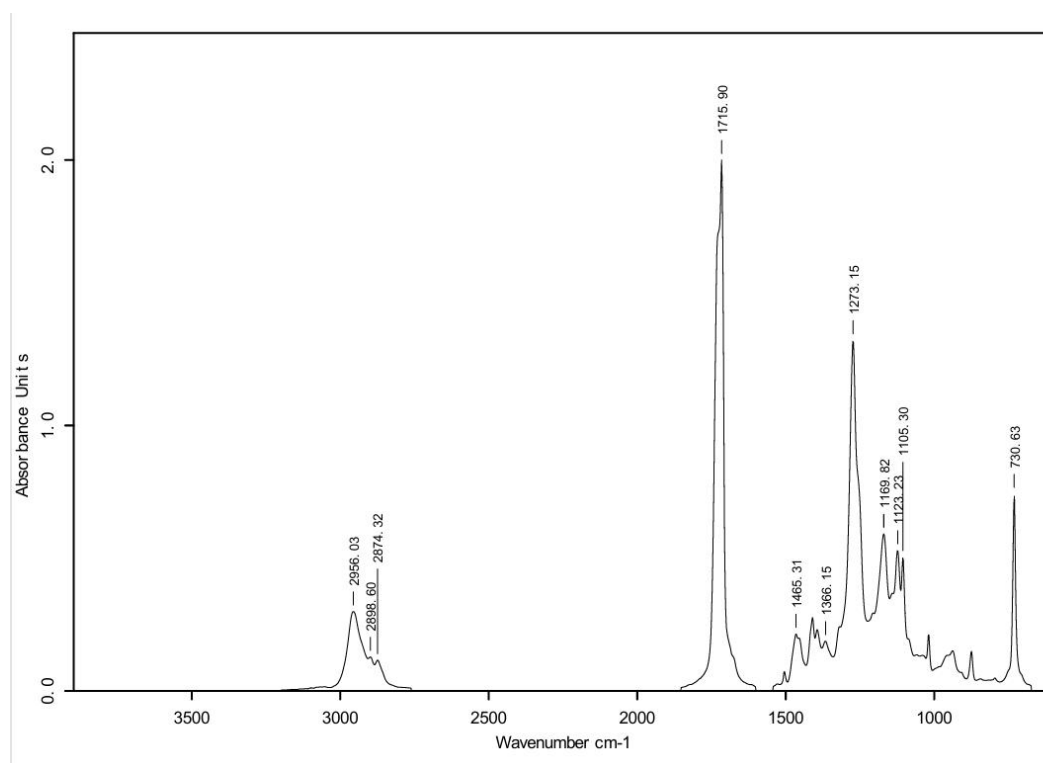


图 4 PBAT 红外光谱

5 PLA 红外光谱

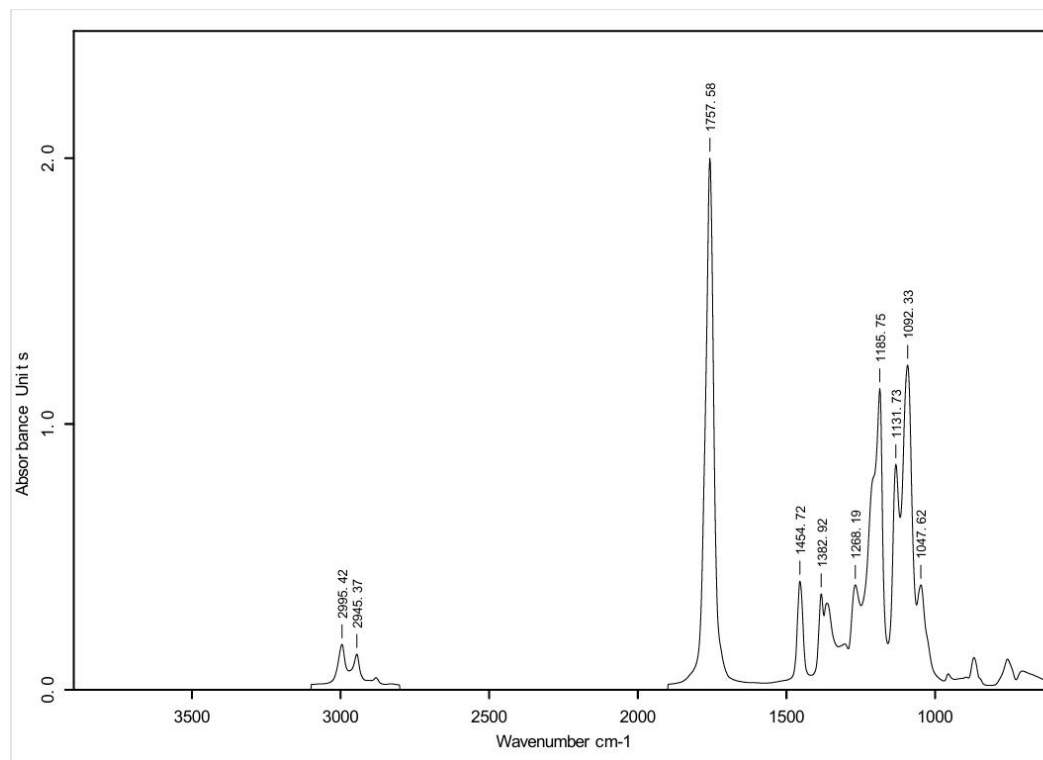


图 5 PLA 红外光谱

6 PBS 红外光谱

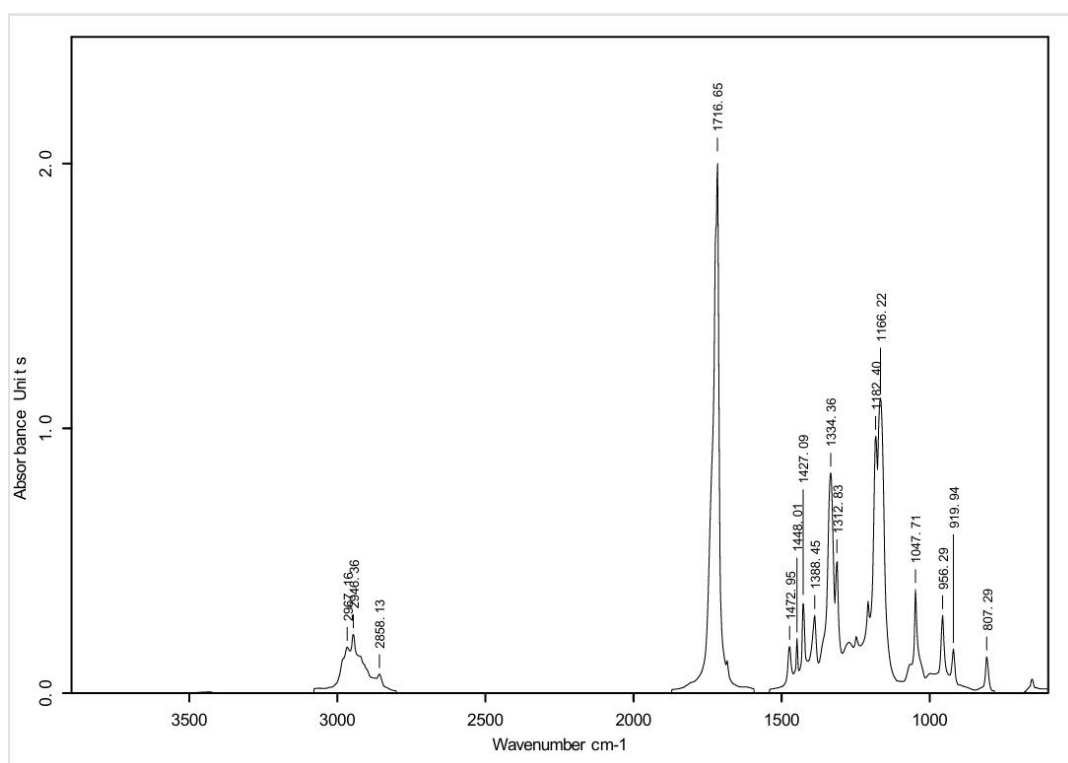


图 6 PBS 红外光谱

7 碳酸钙红外光谱

碳酸钙的红外光谱比较特殊：主特征峰宽而且平，对应的波长常常是颗粒物的粒径区域，经常处于因散射产生的基线区。因此识别碳酸钙，主要看 1575cm^{-1} – 1215cm^{-1} 是否存在大宽峰，而不是具体的峰位值（比如图示的 1443cm^{-1} ）。

对碳酸钙的定量，选择的计算位置不仅要考虑到宽峰的左右移动带来的影响；还要考虑到桥形基线对定量结果带来的影响——通常是偏高。

本研究在计算碳酸钙的相对 K 值时，已经考虑了一般情况下基线带来的影响；但是如果此处基线畸高时，本研究没有提供一般的基线校正方法，而是推荐：当定量结果偏高时，首先可以将塑料样品熔融至软化，然后上样重新测量，减小基线；如果还不行，建议使用马弗炉烧出灰分，获得碳酸钙的准确值。

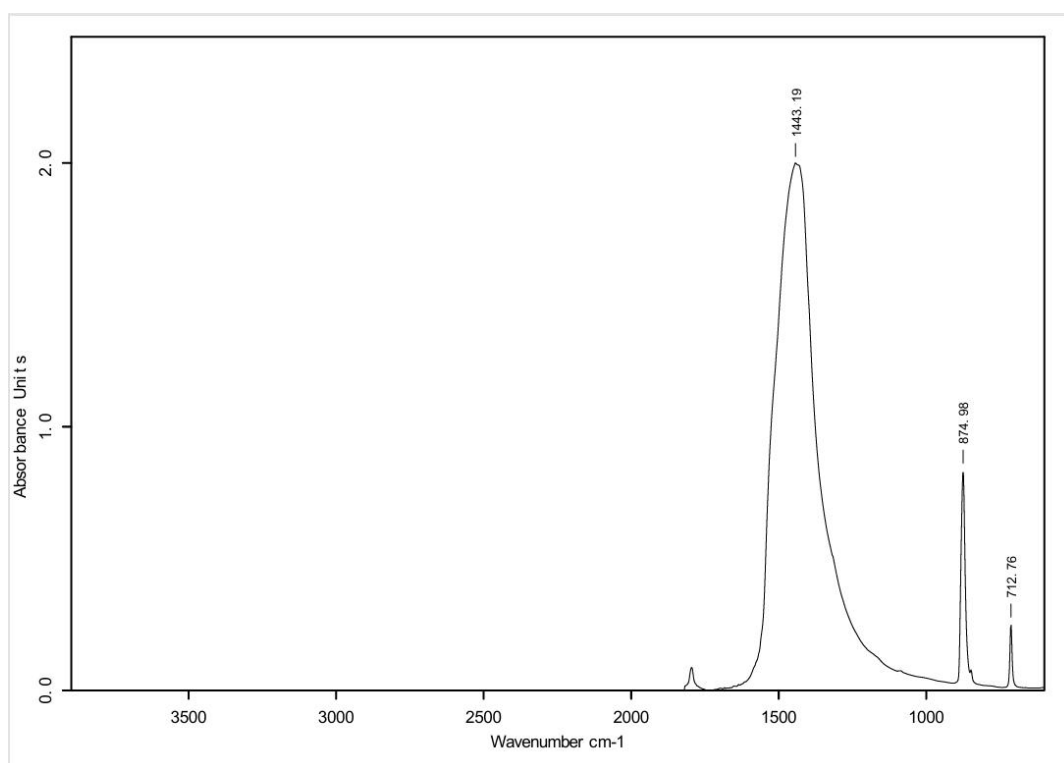


图 7 碳酸钙红外光谱

8 滑石粉红外光谱

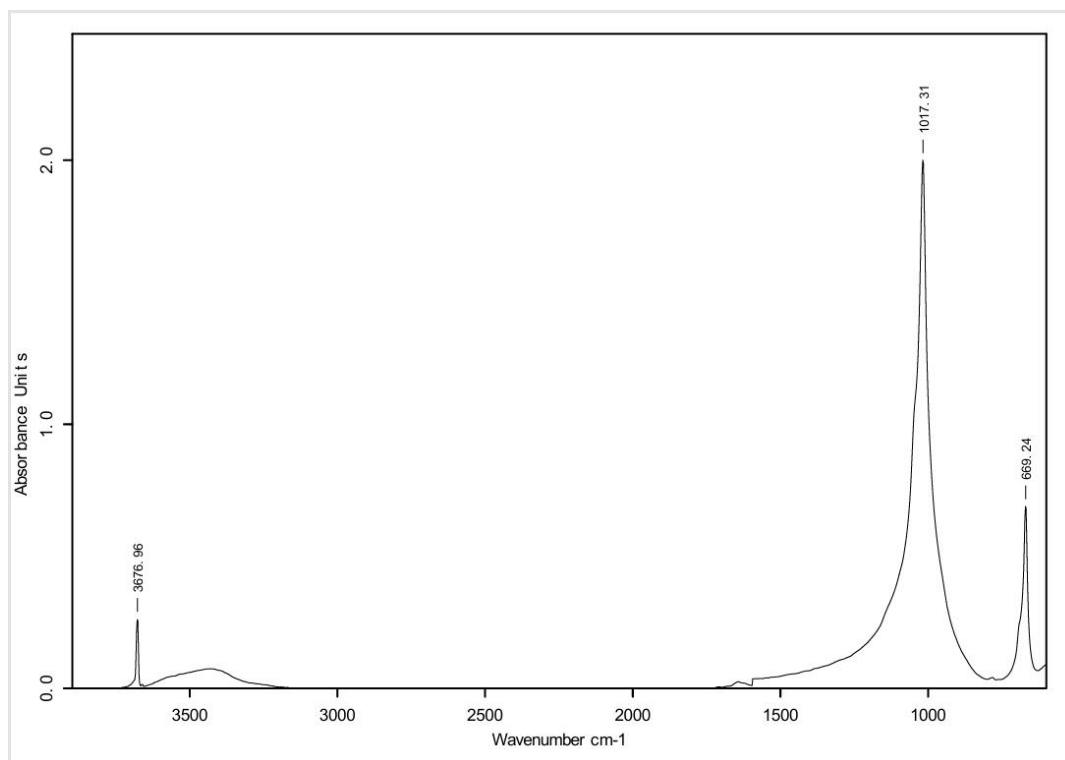


图 8 滑石粉红外光谱

9 淀粉红外光谱

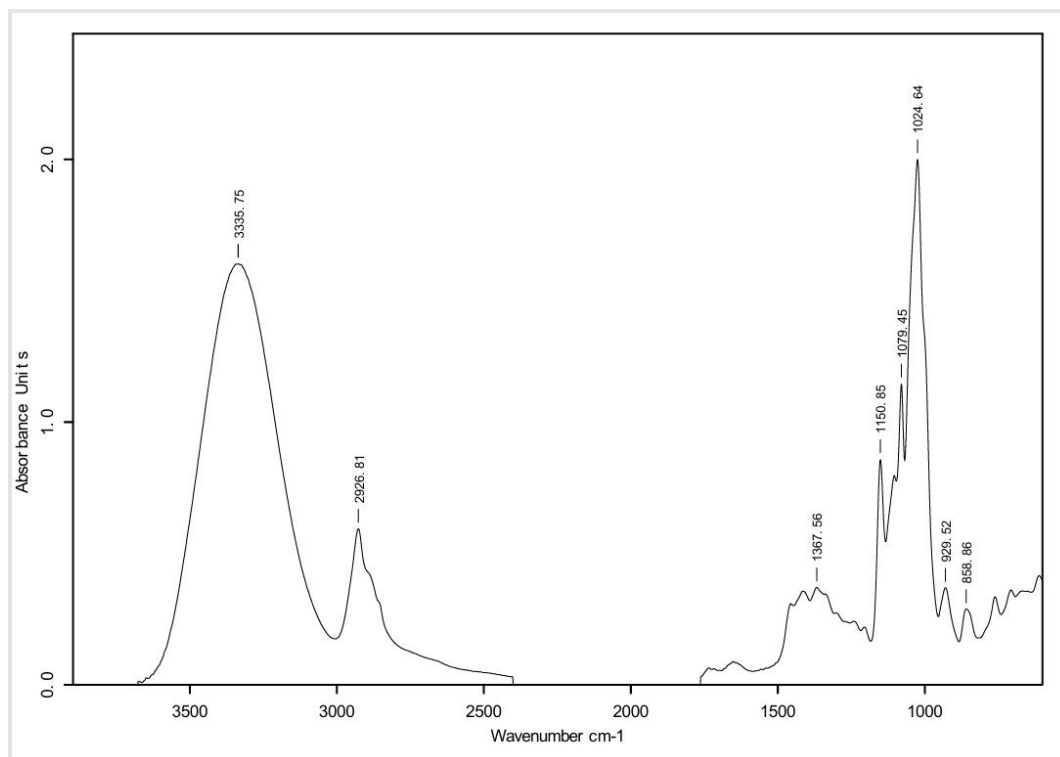


图 9 淀粉红外光谱

10 PE 红外光谱

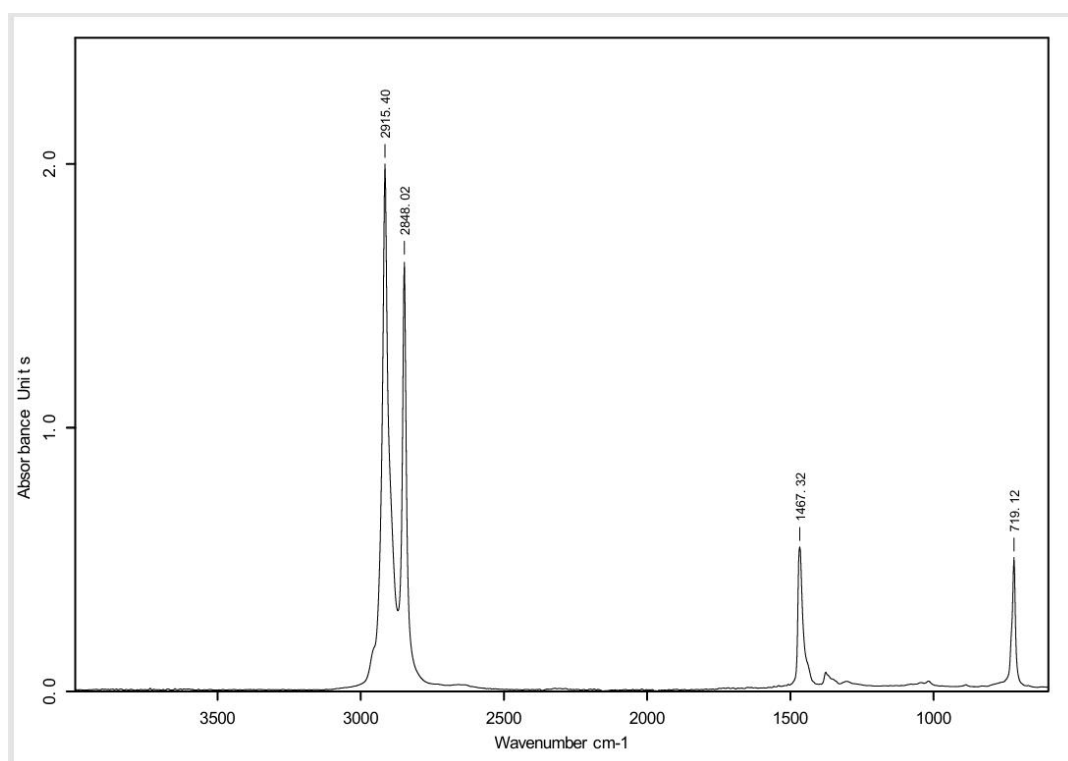


图 10 PE 红外光谱

11 PP 红外光谱

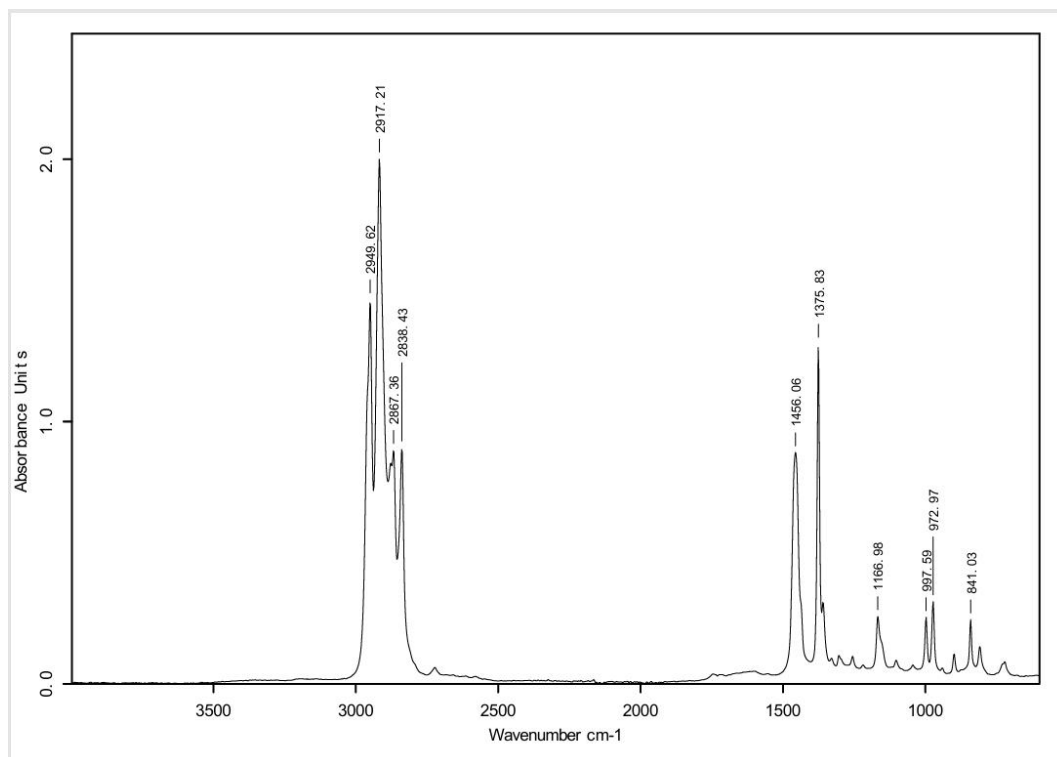


图 11 PP 红外光谱

12 PS 红外光谱

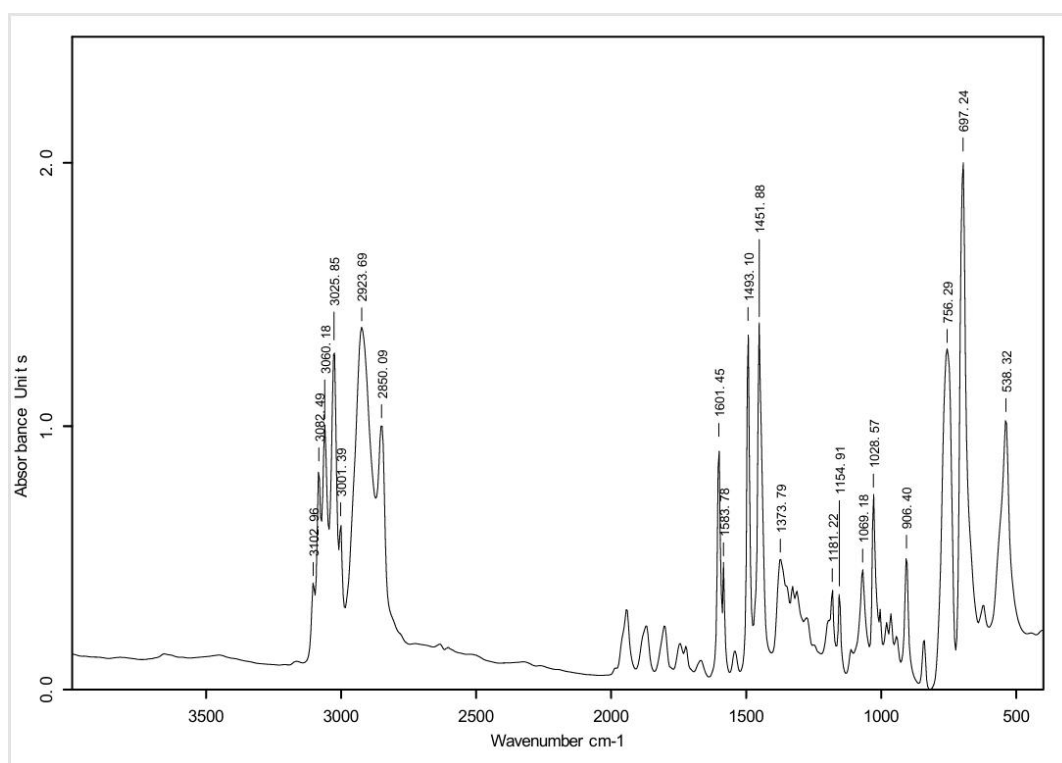


图 12 PS 红外光谱

13 PET 红外光谱

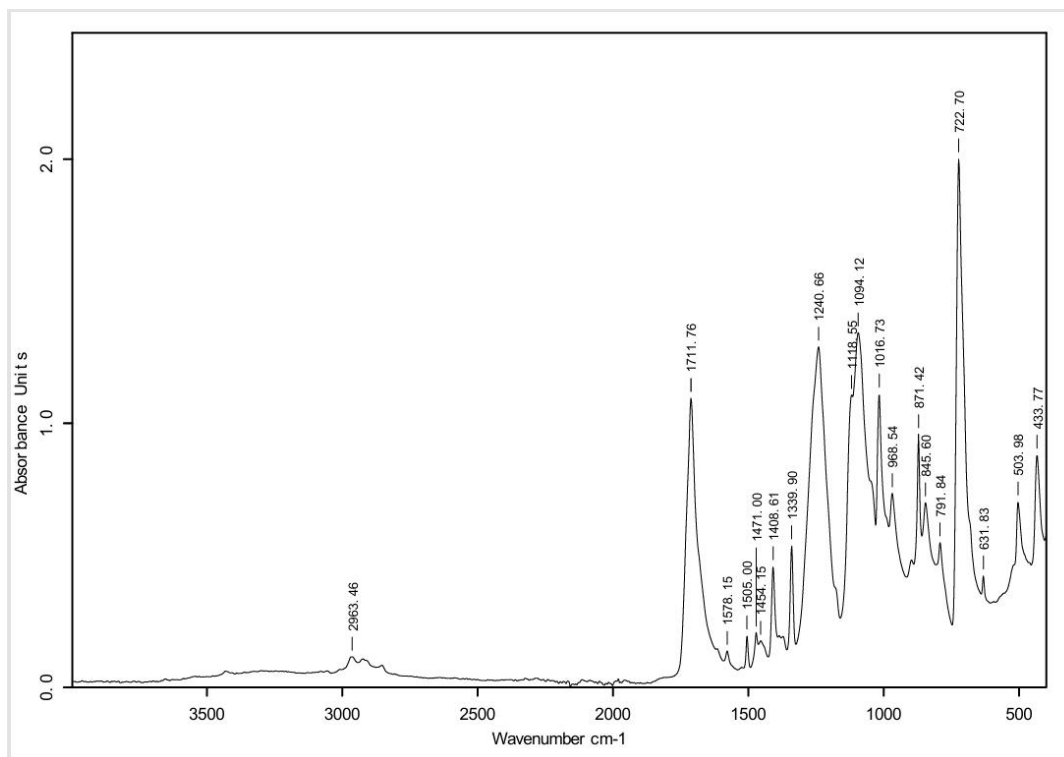


图 13 PET 红外光谱

14 PVC 红外光谱

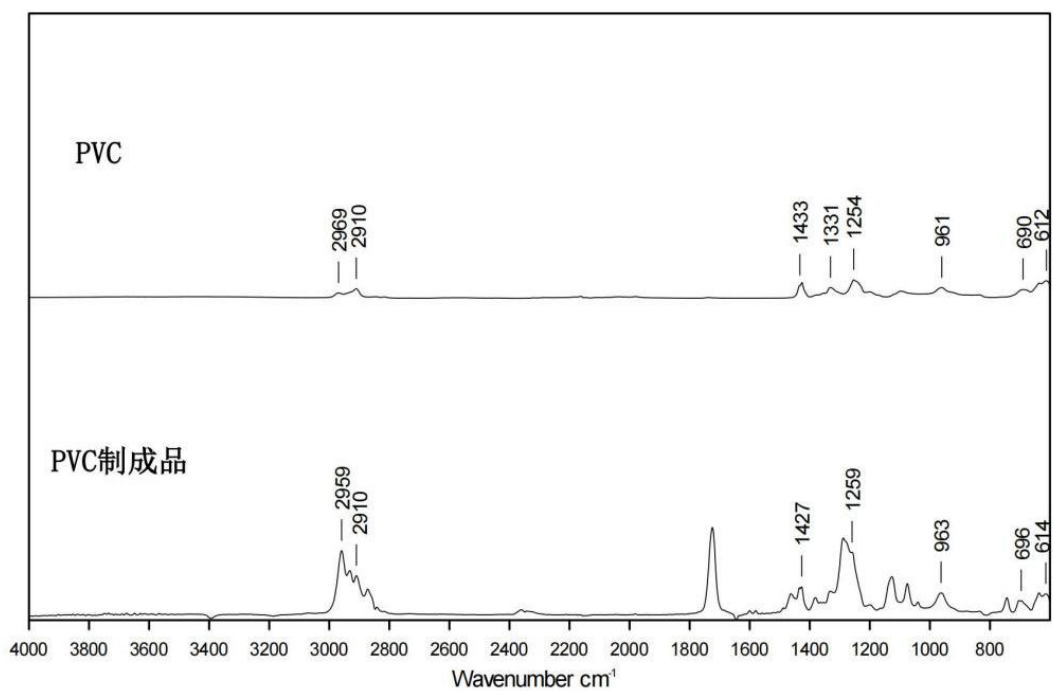


图 14 PVC红外光谱 上图为纯PVC，下图为邻苯二甲酸酯增塑的PVC

15 EVA 红外光谱

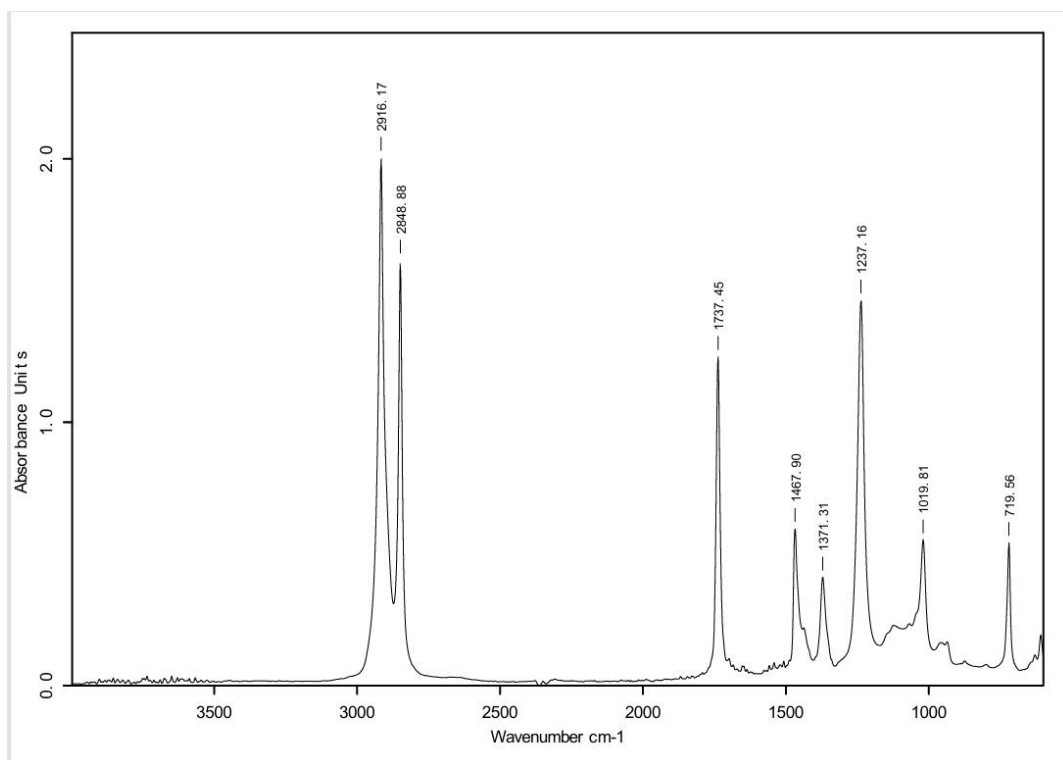


图 15 EVA 红外光谱

16 PVA 红外光谱

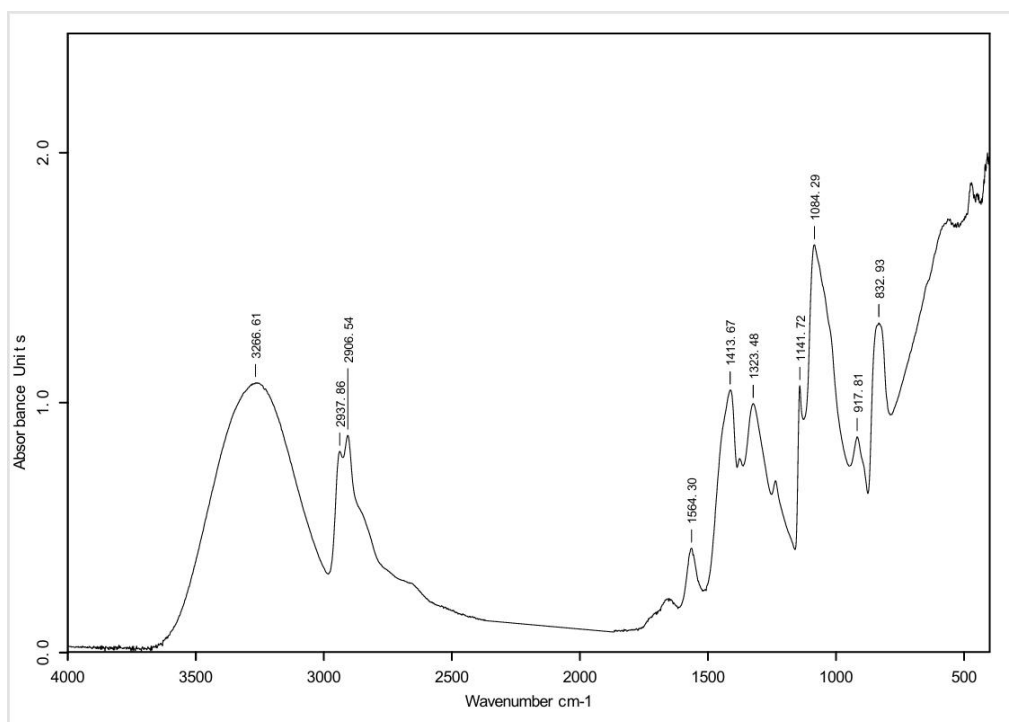


图 16 PVA 红外光谱

17 PEG(聚乙二醇)红外光谱

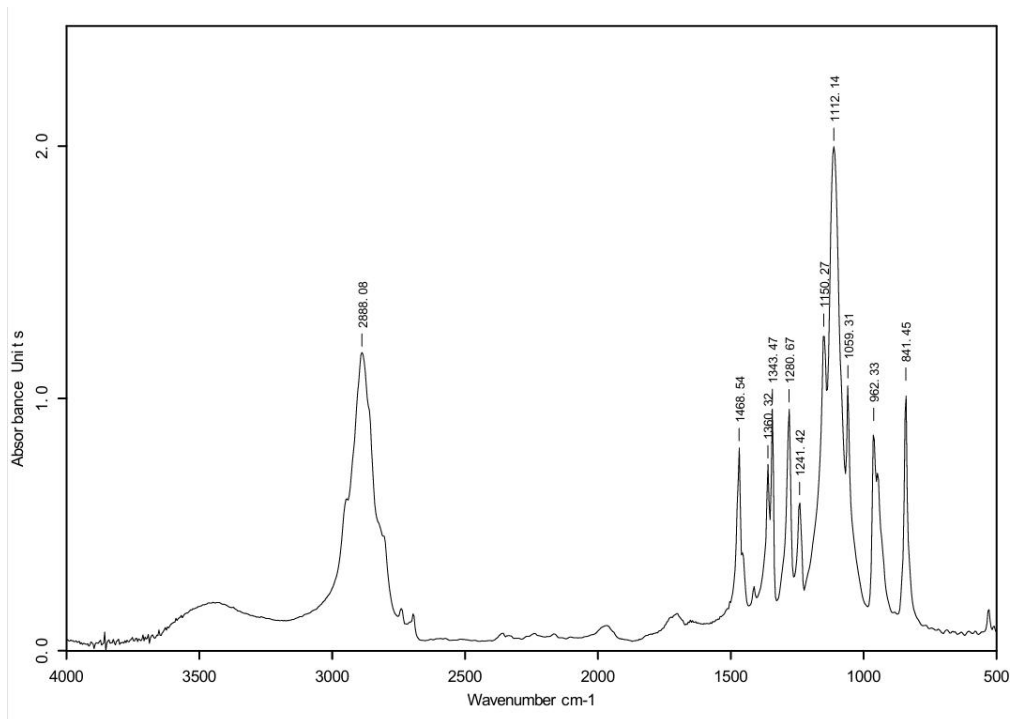


图 17 PEG(聚乙二醇)红外光谱

18 聚乙二醇酯红外光谱

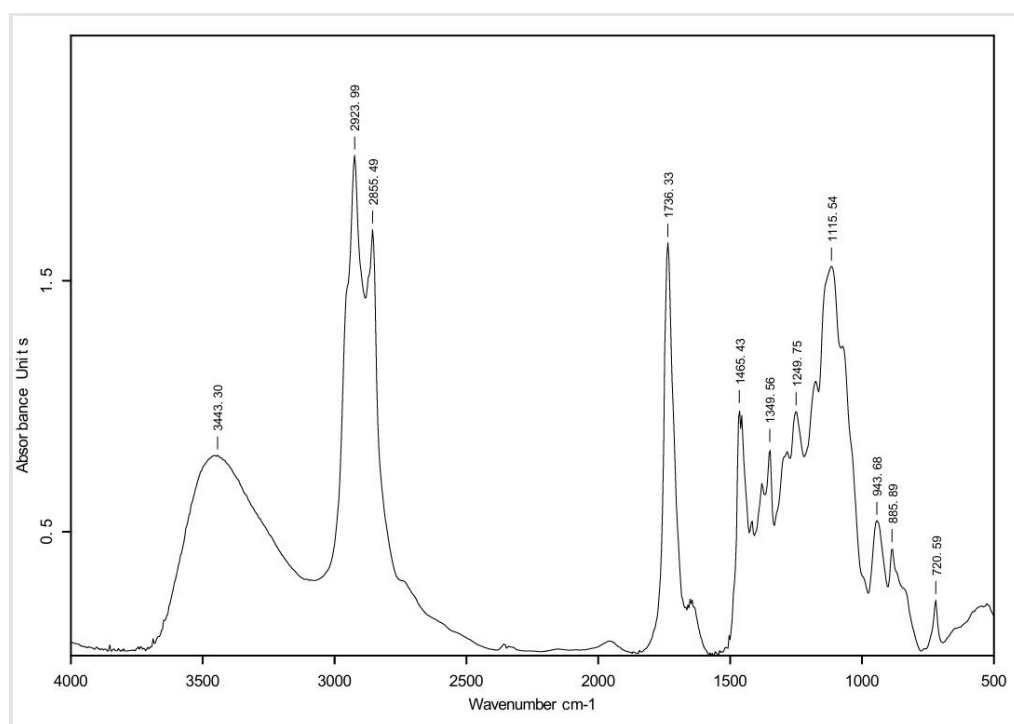


图 18 聚乙二醇酯红外光谱

19 海藻酸钠红外光谱

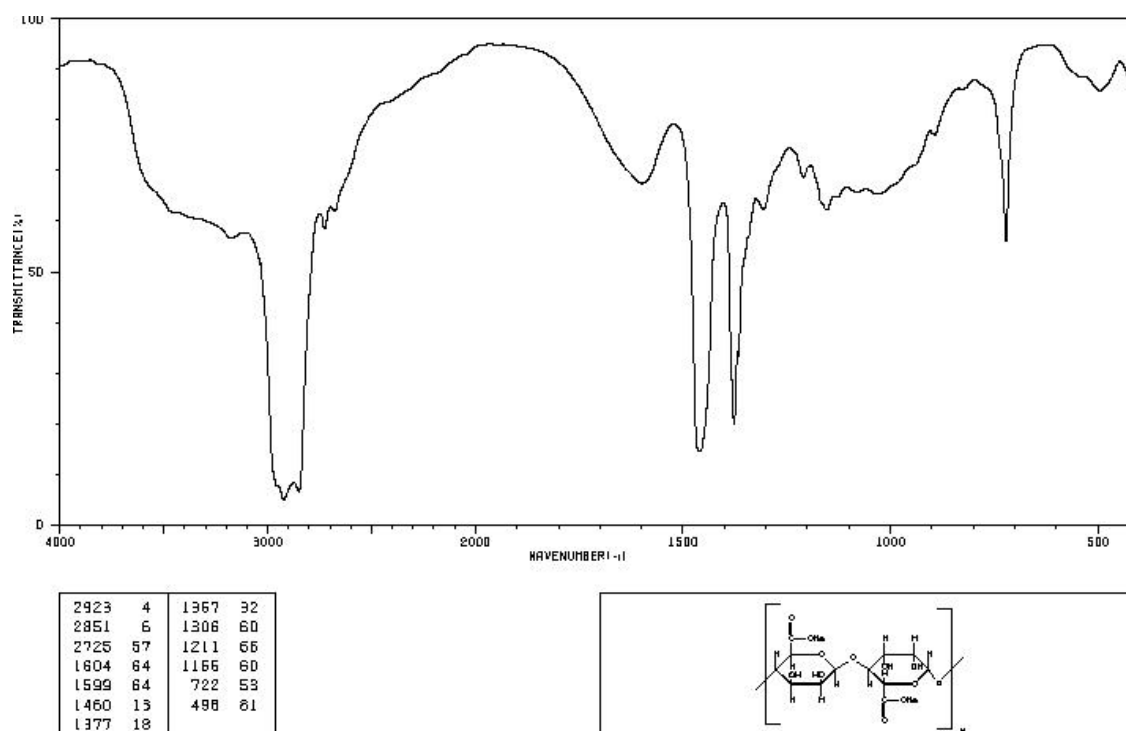


图 19 海藻酸钠红外光谱（光谱来源于“chembook”）

20 明胶红外光谱

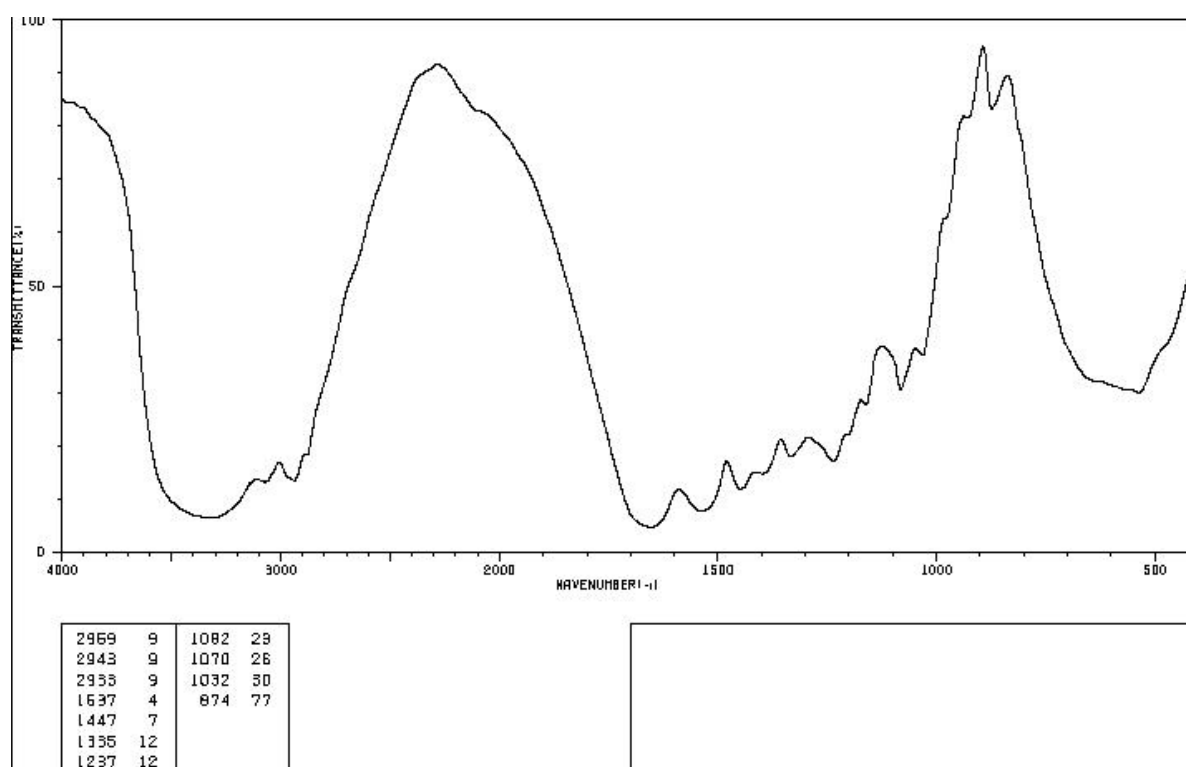


图 20 明胶红外光谱（光谱来源于“chembook”）

2.1 甘油红外光谱

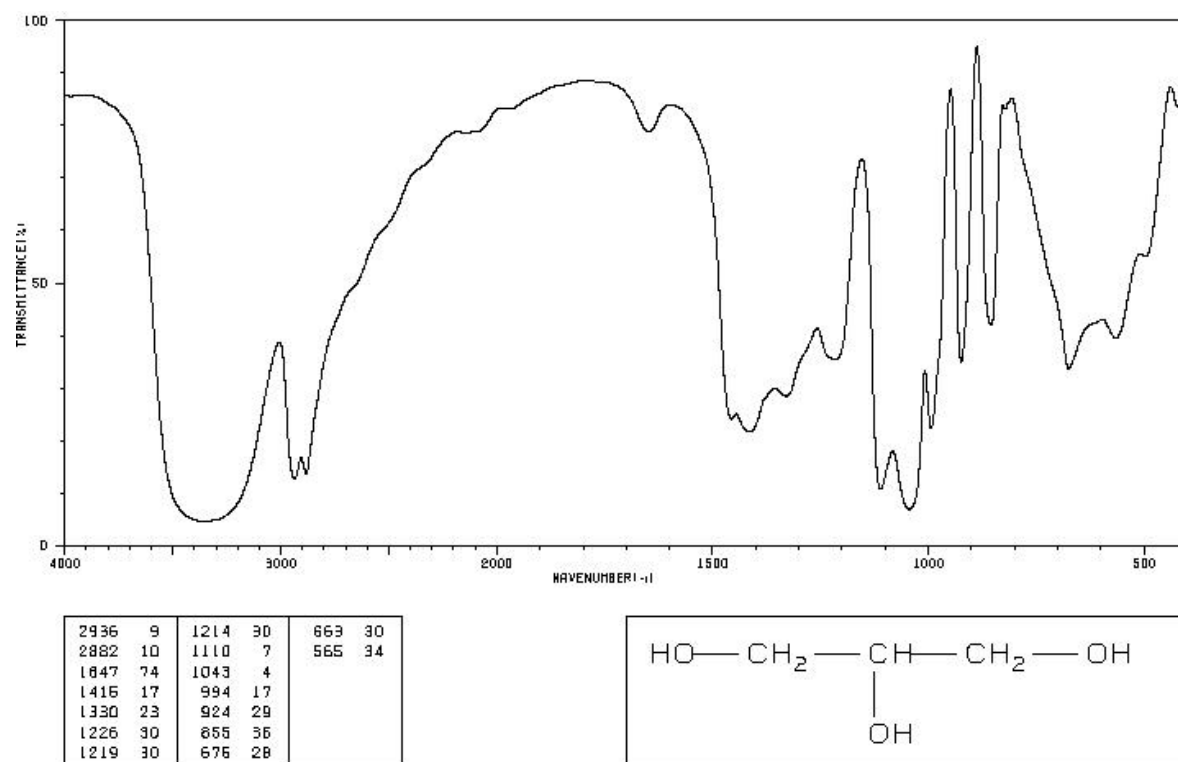


图 21 甘油红外光谱（光谱来源于“chembook”）

2.2 石蜡油红外光谱

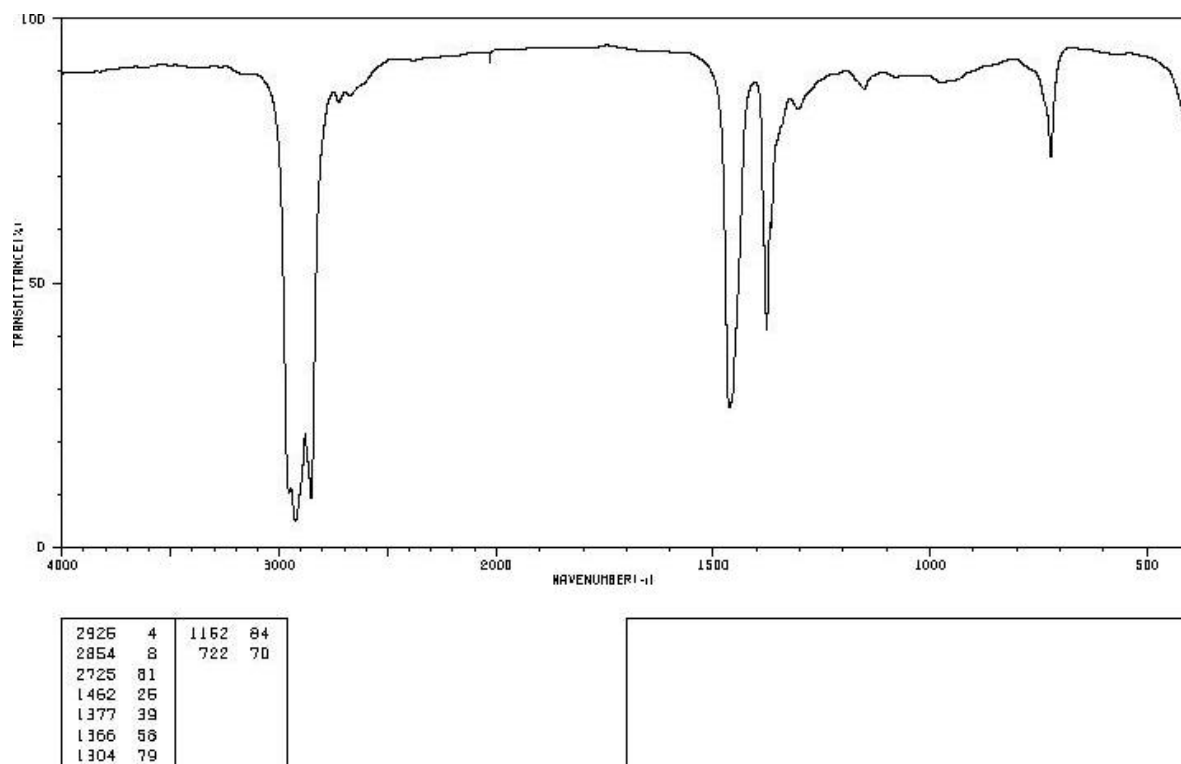


图 22 石蜡油红外光谱（光谱来源于“chembook”）

表 1 常见组分红外特征吸收峰位及识别要点表

组分	主要特征吸收峰位 (cm ⁻¹)	识别要点
天然植物纤维	3300-3400 (羟基)、2920±5、2850±5 (C-H 伸缩)、1640±5 (吸附水)、1030±5 (C-O-C 伸缩)	羟基峰宽且强, 1640cm ⁻¹ 附近有弱吸收峰 (吸附水), 无明显塑料特征峰
纤维素 (酸性洗涤)	3350±10 (羟基)、2900±5、2850±5 (C-H 伸缩)、1430±5、1370±5、1050±5 (C-O 伸缩)	羟基峰尖锐, 1640cm ⁻¹ 吸附水峰极弱, 1050cm ⁻¹ 处 C-O 伸缩峰强度高
木质素 (酸性洗涤)	3400±10 (羟基)、2930±5、2850±5 (C-H 伸缩)、1600±5、1510±5 (芳环骨架振动)、1270±5 (C-O 伸缩)	1600cm ⁻¹ 、1510cm ⁻¹ 处有芳环特征峰, 是与纤维素的核心区别
PE	2916±5、2848±5 (C-H 伸缩)、1470±5、1460±5 (C-H 弯曲)、720±5 (长链亚甲基摇摆)	仅在饱和 C-H 相关峰位有吸收, 无其他特征峰, 720cm ⁻¹ 处峰为长链 PE 特征
PP	2954±5、2922±5、2868±5 (C-H 伸缩)、1458±5、1377±5 (C-H 弯曲)、998±5、973±5 (甲基弯曲)	1377cm ⁻¹ 处为甲基特征峰, 998cm ⁻¹ 和 973cm ⁻¹ 双峰是 PP 关键识别点
PS	3025±5 (芳环 C-H 伸缩)、2921±5、2848±5 (饱和 C-H 伸缩)、1601±5、	3025cm ⁻¹ 芳环 C-H 伸缩峰和 757cm ⁻¹ 、699cm ⁻¹ 单取代苯环

组分	主要特征吸收峰位 (cm ⁻¹)	识别要点
	1583±5 (芳环骨架)、757±5、699±5 (单取代苯环)	峰为核心特征
PET	1716±5 (酯羰基 C=O 伸缩)、1240±5 (C-O-C 伸缩)、1090±5、1018±5 (C-O 伸缩)、725±5 (苯环邻位二取代)	1716cm ⁻¹ 强羰基峰和 1240cm ⁻¹ 酯键特征峰为主要识别依据
PBAT	1715±5 (酯羰基 C=O 伸缩)、2950±5、2860±5 (C-H 伸缩)、1450±5 (C-H 弯曲)、1260±5、1100±5 (C-O-C 伸缩)	羰基峰与 PE/PP 的 C-H 峰共存, 是与单一塑料的区别
PLA	1755±5 (酯羰基 C=O 伸缩)、2995±5、2945±5 (C-H 伸缩)、1455±5、1385±5 (C-H 弯曲)、1180±5、1080±5 (C-O-C 伸缩)	1755cm ⁻¹ 羰基峰位置高于 PBAT, 是 PLA 的关键识别特征
滑石粉	3670±5、3615±5 (羟基伸缩)、1010±5 (Si-O 伸缩)、660±5、540±5 (Si-O-Mg 弯曲)	3670cm ⁻¹ 、3615cm ⁻¹ 双羟基峰和 1010cm ⁻¹ 强 Si-O 峰为特征
碳酸钙	1443±10 (CO ₃ ²⁻ 伸缩)、875±5、712±5 (CO ₃ ²⁻ 弯曲)	1443cm ⁻¹ 处有宽峰, 875cm ⁻¹ 和 712cm ⁻¹ 双峰辅助识别

附录2: 残谱中非可降解材料成分的出峰表现

1 含 PE 样品在红外光谱和计算残留光谱中的表现

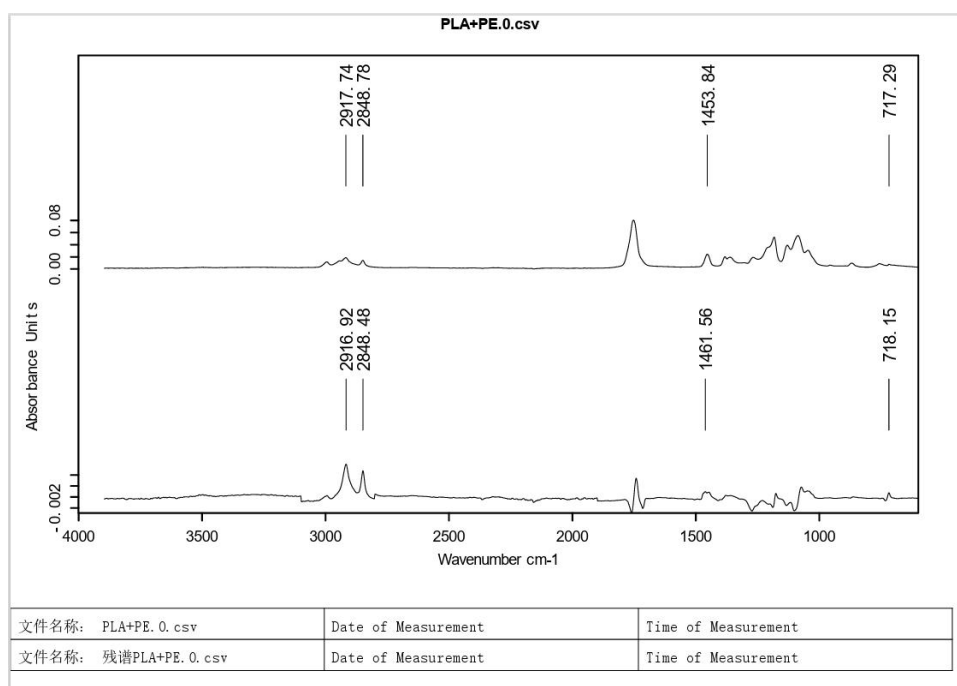


图 23 含 PE 样品在红外光谱和计算残留光谱中的表现

2 含 PP 样品在红外光谱和计算残留光谱中的表现

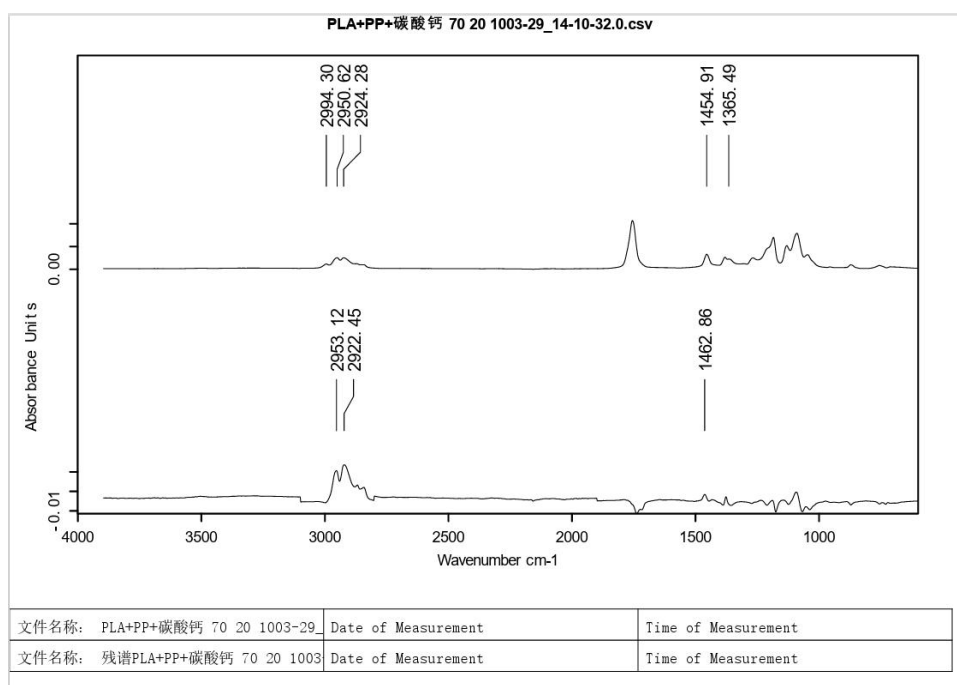


图 24 含 PP 样品在红外光谱和计算残留光谱中的表现

3 含 PVC 样品在红外光谱和计算残留光谱中的表现

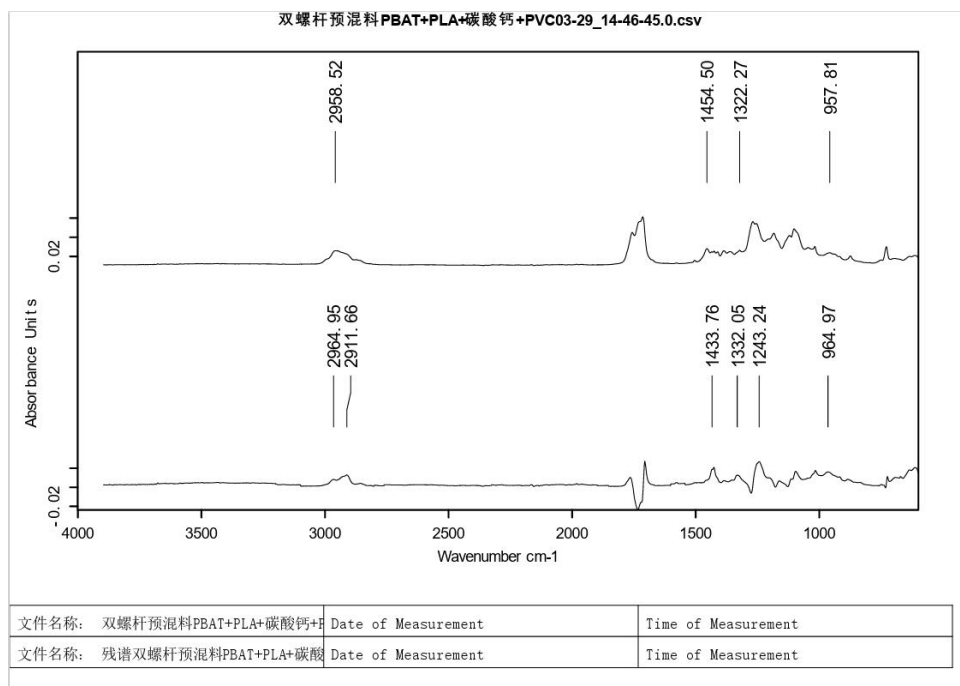


图 25 含 PVC 样品在红外光谱和计算残留光谱中的表现

4 含 PS 样品在红外光谱和计算残留光谱中的表现

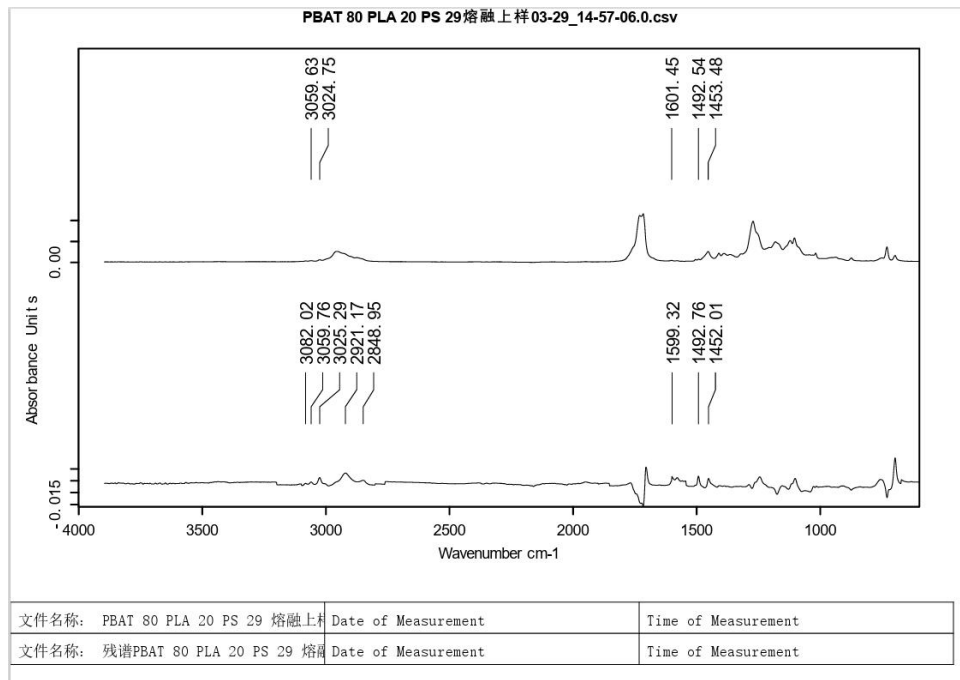


图 26 含 PS 样品在红外光谱和计算残留光谱中的表现

5 含 EVA 样品在红外光谱和计算残留光谱中的表现

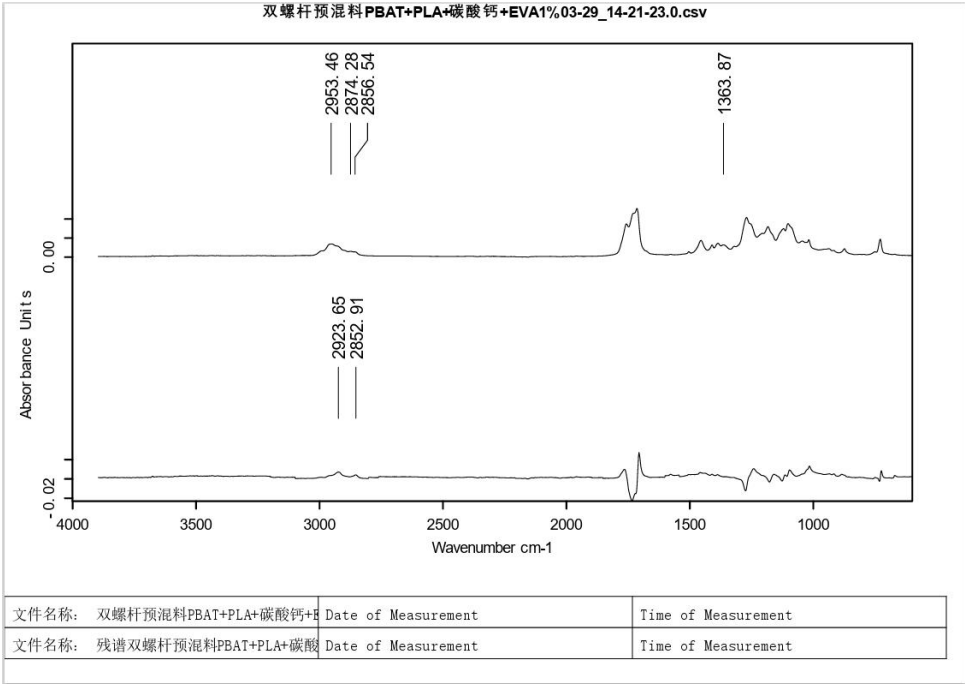


图 27 含 EVA 样品在红外光谱和计算残留光谱中的表现

6 含 PBS 样品在红外光谱和计算残留光谱中的表现

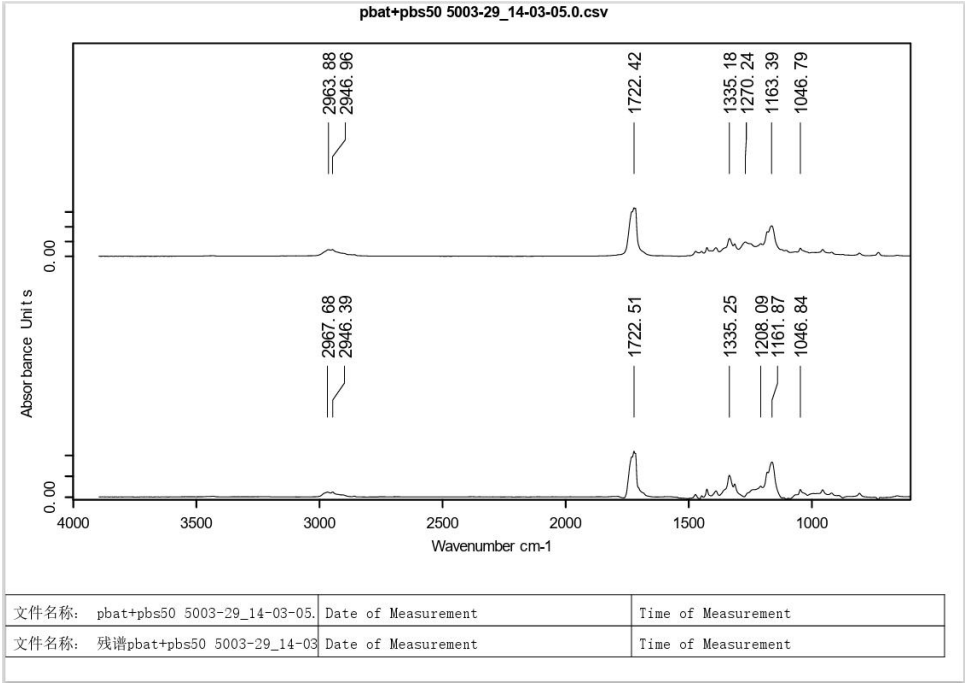


图 28 含 PBS 样品在红外光谱和计算残留光谱中的表现

7 含长碳链-酰胺样品在红外光谱和计算残留光谱中的表现

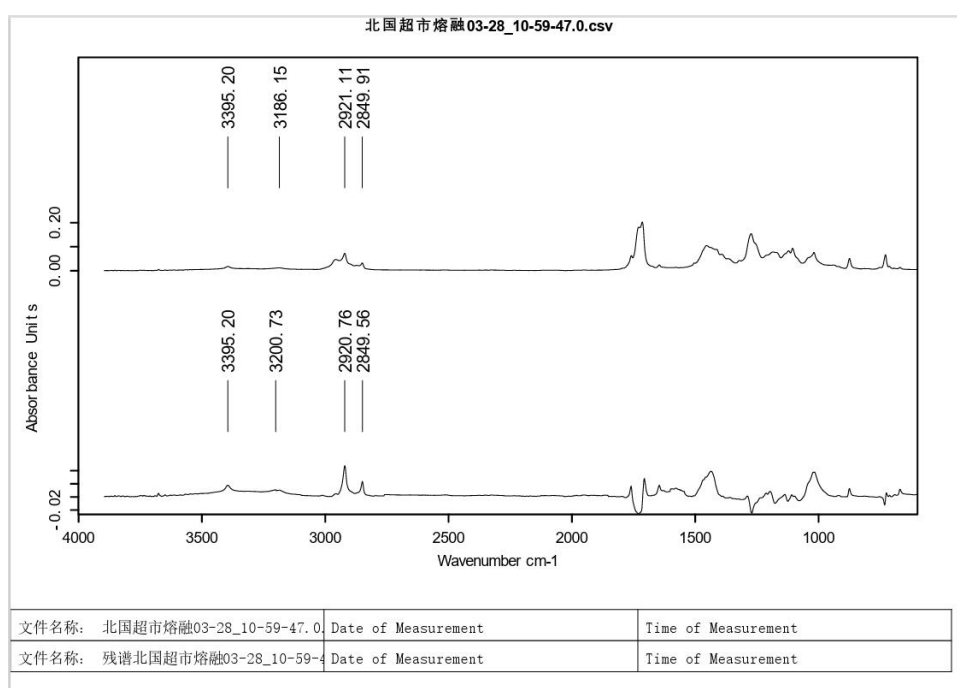


图 29 含油酸酰胺样品在红外光谱和计算残留光谱中的表现

8 可降解塑料在残谱上的特征峰位

表 3 可降解塑料在残谱上的特征峰位

成分	出峰情况			
PE	$(2916 \pm 5) \text{ cm}^{-1}$	$(2848 \pm 5) \text{ cm}^{-1}$		
PP	$(2954 \pm 5) \text{ cm}^{-1}$	$(2922 \pm 5) \text{ cm}^{-1}$		
PVC	$(2965 \pm 5) \text{ cm}^{-1}$	$(2911 \pm 5) \text{ cm}^{-1}$		
PS	$(3025 \pm 5) \text{ cm}^{-1}$	$(2921 \pm 5) \text{ cm}^{-1}$	$(2848 \pm 5) \text{ cm}^{-1}$	
EVA	$(2923 \pm 5) \text{ cm}^{-1}$	$(2854 \pm 5) \text{ cm}^{-1}$		
PBS	$(2965 \pm 5) \text{ cm}^{-1}$	$(2947 \pm 5) \text{ cm}^{-1}$		
油酸酰胺	$(2921 \pm 5) \text{ cm}^{-1}$	$(2850 \pm 5) \text{ cm}^{-1}$	$(3395 \pm 5) \text{ cm}^{-1}$	$(3190 \pm 10) \text{ cm}^{-1}$

说明:

(1): 使用PBAT\PLA做主成分计算时, 假设待检材料中不含PBAT而是含有PBS, 那么软件计算时, 难以分清PBAT和PBS的区别。可通过残谱上PBS特征峰(见表3), 核对定量中采用的主成分是否准确;

(2): 油酸酰胺作为常见的脱模剂, 常附着在塑料制品表面; 其特征峰与PE、PP、EVA重叠(见表3和图27)。油酸酰胺的特征是, 在3300-3400附近有明显的、尖锐的吸收。当检测到油酸酰胺时, 可将待检样品加热使软化, 测量内部红外光谱, 假设其特征峰消失, 说明是油酸酰胺类脱模剂;

(3): 羟基峰是淀粉、天然植物纤维重要的特征吸收峰; 假设样品中含有水分, 会给天然植物纤维、淀粉等组分的定量带来干扰; 将检出淀粉或天然植物纤维时, 将样品充分干燥, 可消除干扰。

表 4 待检材料中常见添加剂洗脱性质

材料类型	溶解或降解特点
PE	常温不溶于任何溶剂，高温可溶于非极性溶剂；高结晶度PE不溶。
PP	常温不溶于任何溶剂，高温可溶于非极性溶剂；高结晶度的PP或EPDM不溶。
淀粉、糊精、低聚糖等	可被稀酸加热溶解、或水解成葡萄糖；
甘油	可溶于极性溶剂比如水、乙醇、丙酮；
聚乙烯醇（PVA）	常见添加剂，可溶于80℃以上热水；溶剂中含乙醇等会阻碍PVA溶解；
聚乙二醇（PEG）	常见添加剂，可溶于60℃以上热水；
聚乙二醇酯	部分PEG类与PE、PP特征峰严重重合；可溶于极性溶剂比如乙醇、丙酮洗脱；
海藻酸钠	可在加入络合剂的热水中溶解，强碱容易分解成低分子量水溶物质；酸性环境生成海藻酸沉淀；
明胶	在热水中溶解度 $\geq 2\%$ ，在碱性条件下容易分解成低分子量水溶物质；
PLA（聚乳酸）	常温或加热后（低于60℃），易溶于三氯甲烷；
PBAT	加热后（低于60℃），易溶于三氯甲烷；
PBS	加热后（70℃），易溶于三氯甲烷；低于30℃溶解度降至很低。
天然植物纤维中纤维素	在强酸中（37%浓盐酸，沸腾，3 h），能溶解90%以上；
天然植物纤维中木质素	与强碱（15%氢氧化钠，140—180℃）反应，几乎全部溶解；在强酸中（37%浓盐酸，沸腾，3 h），能溶解50—70%；
复杂硅酸盐、滑石粉	不溶于任何试剂；有时候滑石粉会被PE、PP包裹在内，无法分离。
PS（聚苯乙烯）	易溶于石油醚、三氯甲烷、二甲苯等；溶解后难与其它组分分离。
PET（聚对苯二甲酸乙二醇酯）	不溶于常见试剂；
EVA（乙烯—醋酸乙烯酯共聚物）	醋酸乙烯含量高的EVA，常温可溶于甲苯、二甲苯、环己酮等有机溶剂；
PVC（聚氯乙烯）	不溶于常见试剂；其增塑剂可溶于常见试剂；

附录4：非可降解塑料密度浮选法参考数据

表 5 非可降解塑料真实密度

材料类型	真实密度（g/cm ³ ）
PE（聚乙烯）	LDPE 0.91~0.925； HDPE 0.941~0.965
PP（聚丙烯）	均聚 PP 0.90~0.91； 共聚 PP 0.905~0.915
PS（聚苯乙烯）	1.04~1.06
PET（聚对苯二甲酸乙二醇酯）	1.37~1.39
EVA（乙烯—醋酸乙烯酯共聚物）	0.92~0.98（醋酸乙烯含量越高，密度越大）
PVC（聚氯乙烯）	1.30~1.45
PLA（聚乳酸）	1.24~1.27
PBAT	1.18~1.26
PBS	1.10~1.20
天然植物纤维塑料	1.50~1.56 g/cm ³
纤维素	1.50~1.56（结晶区 1.56；无定形区 1.33）
木质素	1.28~1.35

备注：塑料中包裹滑石粉时，密度会增大

表 6 浮选液的密度

材料类型	饱和密度（g/cm ³ ）
乙醇—水混合液	0.78~1；随水量增加；
饱和食盐水	1.1~1.2

饱和氯化锌	1.04-1.64
饱和氯化钙:	1.43
饱和溴化钠	1.52
饱和氯化锌	1.64