

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.03.022

# ATR-FTIR 方法判断 PA6/PA66 共混物中两组分相对含量

唐承浩, 李齐添, 冼业明, 郭振炼, 汪炉林

(广州市聚赛龙工程塑料股份有限公司, 广州 510945)

**摘要:** 尼龙(PA)66 与 PA6 都是应用极其广泛的工程塑料, 在面对不同的性能要求、加工要求、成本要求时往往会将 PA6 与 PA66 共混后使用。共混后的材料后续的回收改性有一定困难, 需要找到一个相对简便的方法快速对 PA 共混物中的共混比例进行分析。采用衰减全反射傅里叶变换红外光谱(ATR-FTIR)分析了不同比例 PA6/PA66 共混物的峰位与峰形的差异。试验结果表明, 不同比例共混物的红外光谱图在 1 300~4 000  $\text{cm}^{-1}$  范围内的峰位和峰形与共混物共混比例相关性不大, 而在 1 169~1 180  $\text{cm}^{-1}$  处吸收峰峰位置随共混比例变化相关性较大, 可作为成分分析判据。将 1 169~1 180  $\text{cm}^{-1}$  处吸收峰峰位置与共混物中 PA6 含量进行作图拟合, 拟合结果发现, 峰位随着 PA6 含量增加的变化相关性函数一开始变化程度平缓, 在 1 172  $\text{cm}^{-1}$  到 1 178  $\text{cm}^{-1}$  位置处发生突变, 后续变化又变小, 相关系数达 0.980 76。后续用预处理试样进行测试, 发现测试与实际共混比例相差在 5% 左右, 可作为半定量分析。使用该方法可快速对未知 PA6/PA66 共混物样品进行红外光谱分析确定 PA6 和 PA66 的相对比例。

**关键词:** 尼龙 6; 尼龙 66; 红外光谱; 衰减全反射; 定量分析

**中图分类号:** TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)03-0140-06

## ATR-FTIR method for determining the relative content of two components in PA6/PA66 blends

TANG Chenghao, LI Qitian, XIAN Yeming, GUO Zhenlian, WANG Lulin

(Guangzhou Super-Dragon Engineering Plastics Co., Ltd., Guangzhou 510945, China)

**Abstract :** Polyamide 66 (PA66) and PA6 are both widely used engineering plastics. When facing different performance, processing, and cost requirements, nylon 66 is often blended with nylon 6 for application. There are certain difficulties in the subsequent recycling and modification of the blended material, and a relatively simple method needs to be found to quickly analyze the blending ratio in nylon blends. The differences in peak positions and shapes of PA 6/PA 66 blends with different ratios were analyzed using attenuated total reflection fourier transform infrared spectroscopy(ATR-FTIR). The results show that the peak positions and shapes of infrared spectra of blends with different proportions in the range of 1 300~4 000  $\text{cm}^{-1}$  have little correlation with the blending ratio of the blend, while the absorption peak positions at 1 169~1 180  $\text{cm}^{-1}$  have a significant correlation with the variation of blending ratio, which can be used as a criterion for component analysis. The fitting results show that the correlation function of peak position with the increase of PA6 content initially changes smoothly, with a sudden change at positions 1 172  $\text{cm}^{-1}$  to 1 178  $\text{cm}^{-1}$ , and subsequent changes decreases, with a correlation coefficient of 0.980 76. Using pre-treated samples for testing, it is found that the difference between the tested and actual blending ratios is about 5%, which can be used as a semi quantitative analysis. This method can quickly perform infrared spectroscopic analysis on unknown PA6/PA66 blend samples to determine the relative proportions of PA6 and PA66.

**Keywords :** polyamide 6 ; polyamide 66 ; infrared spectrum ; attenuated total refraction ; quantitative analysis

聚酰胺(PA)俗称尼龙是五大工程塑料之一, 其最大特征为分子链中具有相当数量的酰胺基团, 由于酰胺基团互相之间形成氢键导致 PA 材料具有较

好的力学性能、抗疲劳性能及耐磨性。这一特性让其在园林工具和汽车领域的发动机罩、进气歧管, 电子领域的电子元器件基板、外壳, 机械领域的轴

通信作者: 冼业明, 博士, 主要从事塑料合金及复合材料加工研究

收稿日期: 2024-02-01

引用格式: 唐承浩, 李齐添, 冼业明, 等. ATR-FTIR 方法判断 PA6/PA66 共混物中两组分相对含量[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(3): 140-145.

TANG Chenghao, LI Qitian, XIAN Yeming, et al. ATR-FTIR method for determining the relative content of two components in PA6/PA66 blends[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3): 140-145.

承、齿轮等使用环境恶劣的产品上应用广泛<sup>[1-2]</sup>。

在PA材料中PA6与PA66是最主要品种,占有绝对主导地位。PA6熔点低(220℃),其力学性能相对不如PA66、吸湿性强,但具有价格相对低廉且加工条件较宽的优点;PA66熔点高(260℃),力学性能好、耐磨性好,但价格相对较高,外观不如PA6光亮,因此面对不同的制件形状和不同的使用场景往往需要将PA6与PA66共混后使用以满足加工、性能及价格需求。而这给材料后续的回收利用带来了一些麻烦,不同比例的PA6/PA66共混物,其使用性能有较大差异,如果能在回收前就辨别出PA6/PA66的比例,将会为后续工作带来方便。

PA6与PA66在化学结构上十分接近,其分子链都由酰胺键基团与亚甲基段组成,差异在于PA6是由己内酰胺开环聚合而成,PA66是由己二胺与己二酸缩聚而成。聚合方法的不同导致酰胺键在分子链中的分布不同,因此分子链间氢键数量和位置也产生了差异,从而产生了性能差异。改性材料开发中一般使用差示扫描量热(DSC)、热重(TG)分析法辨别PA6/PA66比例<sup>[3-4]</sup>,通过不同比例的共混物其熔融峰温度与热焓情况对PA6/PA66材料进行组分判断,但考虑到PA材料的应用过程中往往会添加部分成核剂,这会影响到材料的熔融温度与结晶温度,从而导致对组分判断的失误。

傅里叶变换红外光谱(FTIR)广泛应用于物质化学成分分析、未知高聚物材料的鉴定、共聚物组成分析及材料老化过程研究等方面。而其中衰减全反射(ATR)法速度快、操作简便且几乎不需要破坏原有样品,得出的谱图出峰明显、质量高,是鉴别分析物质成分的优秀方法<sup>[5-10]</sup>。

在FTIR谱图中PA6和PA66两者差异很小,相似的结构导致两者在FTIR光谱下的谱图差异程度很小,这给分辨两种材料带来了难度。张俊佳等<sup>[8]</sup>尝试通过PA6/PA66共混物在930~935 cm<sup>-1</sup>处的出峰位置判断PA6/PA66的相对含量,但该位置出峰容易被部分填充助剂如滑石粉等掩盖其出峰。在如聚乙烯、聚丙烯及聚碳酸酯(PC)/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)材料的FTIR光谱法定量分析中,比尔-朗博定律被广泛使用<sup>[11-13]</sup>。其原理在于可见光通过介质时,其吸光度与物质的量浓度成正比,例如在同一共混比例的热塑性塑料的两次不同热压片FTIR光谱中,同一波数的吸光度峰可能会随压片

厚度的不均匀而不同,但只要共混比例相同,则同一光谱中吸光度峰A与吸光度峰B其峰面积比例基本相同。但对于PA6与PA66共混物该方法可行度较低,原因在于PA6与PA66化学结构相似度过高,大部分吸收峰都随共混比例而变化或消失,没有单一对应的红外吸收峰可供选择,因此通过FTIR分析PA6与PA66比例需要另寻他法,可尝试通过峰位置变化寻找规律。

笔者通过比对不同共混比例的PA6/PA66共混物FTIR分析考察了不同共混比例对共混物FTIR吸收峰的影响。通过找到部分峰随着共混比例变化而变化的规律拟合出关系式,从而能快速判断PA6/PA66的共混物组成,这对PA树脂共混物的回收利用有一定的指导作用。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

PA66树脂:EPR27,平顶山神马实业股份有限公司;

PA6树脂:J2800,杭州聚合顺新材料股份有限公司。

### 1.2 仪器及设备

恒温鼓风干燥箱:DHG-9055A,甘易仪器设备(上海)有限公司;

双螺杆挤出机:CTE-35,南京瑞亚挤出机机械制造有限公司;

注塑机:EM120-V,震德塑料机械厂有限公司;

FTIR仪:Nicolet iS5,美国Thermo Fisher公司;

ATR套件:iD7 ATR,一体化ATR模块,美国Thermo Fisher公司。

### 1.3 试样制备

首先将PA66与PA6树脂置于鼓风干燥箱中110~120℃条件下烘干4~6 h,按表1的比例混合均匀后在挤出机中挤出造粒。挤出机各区段设置温度为240,250,260,270,260,250,250,250℃,机头模口温度设置为275℃,螺杆转速400 r/min。造粒后再次放到鼓风干燥箱中110℃烘干4~6 h,通过注塑机制备标准测试样条,注塑温度为220~240℃范围,样条于恒温箱放置一定时间,稳定后待测。

### 1.4 测试与表征

FTIR测试的扫描范围为4 000~400 cm<sup>-1</sup>,设定32次扫描次数,扫描背景光谱;将各组的标准测试样条切下一片薄片,保证薄片面积大于扫描窗口且

表1 PA6/PA66共混物样品配方(质量分数)  
Tab. 1 Sample formula of PA6/PA66 blends(mass fraction)

Samples	PA6	PA66	%
1 <sup>#</sup>	100	0	
2 <sup>#</sup>	90	10	
3 <sup>#</sup>	80	20	
4 <sup>#</sup>	70	30	
5 <sup>#</sup>	60	40	
6 <sup>#</sup>	50	50	
7 <sup>#</sup>	40	60	
8 <sup>#</sup>	30	70	
9 <sup>#</sup>	20	80	
10 <sup>#</sup>	10	90	
11 <sup>#</sup>	0	100	

平整即可;实验步骤:将样品覆盖在ATR附件反射晶体表面,利用附件夹具压紧后进行扫描取样,样品扫描时间约1 min,采集样品的FTIR谱图,保证每组配方样条至少采集3次不同样条的不同位置,收集实验结果。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PA6与PA66的FTIR特征峰分析

图1为1<sup>#</sup>与11<sup>#</sup>样品的FTIR谱图,其分别代表了纯PA6与纯PA66的FTIR谱图情况。可以发现由于PA6与PA66的FTIR谱图化学结构十分接近,所以两者谱图形状也十分接近。

PA6与PA66材料中较明显的特征峰有3 300 cm<sup>-1</sup>附近的胺基吸收峰、2 932 cm<sup>-1</sup>附近与2 860

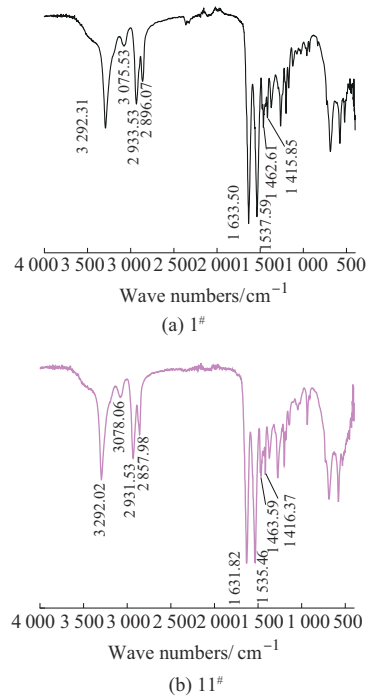


图1 1<sup>#</sup>(PA6)与11<sup>#</sup>(PA66)的FTIR谱图

Fig. 1 FTIR of 1<sup>#</sup>(PA6) and 11<sup>#</sup>(PA66)

cm<sup>-1</sup>附近的亚甲基吸收峰、1 633 cm<sup>-1</sup>处的酰胺 I 峰(C=O 伸缩振动引起)、1 536 cm<sup>-1</sup>附近的酰胺 II 峰(N—H 变形振动引起)、1 460 cm<sup>-1</sup>处的亚甲基的弯曲振动峰、1 416 cm<sup>-1</sup>处的C—N的伸缩振动峰。表2总结整理了不同共混比例的PA6/PA66共混物在1 400~4 000 cm<sup>-1</sup>范围内的最明显的特征峰峰位<sup>[13]</sup>。

表2 不同共混比例的PA6/PA66共混物在1 400~4 000 cm<sup>-1</sup>范围内的特征峰情况

Tab. 2 Infrared spectral absorption peaks of PA6/PA66 blends with different blending ratios in range of 1 400-4 000 cm<sup>-1</sup>

Samples	3 300	2 932	1 633	1 536	1 460	1 416
	N—H stretching vibration	—CH <sub>2</sub> — stretching vibration	amide peak	amide peak	—CH <sub>2</sub> — stretching vibration	C—N bending vibration
1 <sup>#</sup>	3 292.31	2 933.85	1 633.38	1 537.59	1 462.61	1 415.85
2 <sup>#</sup>	3 295.24	2 933.50	1 633.84	1 537.43	1 462.61	1 416.65
3 <sup>#</sup>	3 295.40	2 933.06	1 633.67	1 537.58	1 462.68	1 416.90
4 <sup>#</sup>	3 295.51	2 932.87	1 633.84	1 537.72	1 462.68	1 416.06
5 <sup>#</sup>	3 296.08	2 932.53	1 633.72	1 536.36	1 462.73	1 417.05
6 <sup>#</sup>	3 296.04	2 932.27	1 635.24	1 535.68	1 462.71	1 417.03
7 <sup>#</sup>	3 295.75	2 933.03	1 633.26	1 537.55	1 462.98	1 416.95
8 <sup>#</sup>	3 295.48	2 931.39	1 632.02	1 534.75	1 463.14	1 416.87
9 <sup>#</sup>	3 295.50	2 931.43	1 632.46	1 534.81	1 463.60	1 416.77
10 <sup>#</sup>	3 296.14	2 931.93	1 633.36	1 535.23	1 463.61	1 416.85
11 <sup>#</sup>	3 296.02	2 931.98	1 631.85	1 535.46	1 463.59	1 416.37

通过观察各组特征峰位置情况发现,3 300 cm<sup>-1</sup>处峰位随着PA6含量的下降和PA66含量的上升而不断向高波数移动,而峰强无太大变化。但该峰在部分范围内峰位置出现了反常变化,PA66含量更高

组别的波数反倒下降,这说明该位置吸收峰不够可靠;2 932 cm<sup>-1</sup>附近与2 860 cm<sup>-1</sup>附近处峰位随共混物组成中PA6的下降而向低波数移动,但也存在与3 300 cm<sup>-1</sup>处同样的问题,不够可靠;1 633 cm<sup>-1</sup>处的

酰胺 I 峰随着 PA6 含量的下降波数向低波数移动,变化较小,灵敏度不够且波动较大;1 536  $\text{cm}^{-1}$  处的酰胺 II 峰情况较为特殊,表现为 1 533  $\text{cm}^{-1}$  与 1 537  $\text{cm}^{-1}$  的两处出峰共同结果,一般由更强一方出峰位置盖过另一方,但两峰峰强并无明显规律,无法通过该峰判断组成;1 460, 1 416  $\text{cm}^{-1}$  处红外吸收峰随 PA6 含量变化无明显变化。

成分鉴别需要稳定可靠且可信的结果,但实际实验时每次都会存在制样差异、仪器误差等问题,如果吸收峰的灵敏度不够或可靠性不足则无法得出可信的结果。因此无法通过这几处特征峰的峰强与峰位置简单判断出体系的组成情况。

不同共混比例的 PA6/PA66 共混物在 600~

1 300  $\text{cm}^{-1}$  范围内的特征峰情况见表 3。由表 3 与图 1 可以发现,在 600~1 300  $\text{cm}^{-1}$  范围内有着许多弱峰,该范围内的红外吸收峰位置在不同共混比例的共混物中出现了明显差异。随着共混物中 PA66 含量的上升,由于酰胺键平面振动所导致的 930~935  $\text{cm}^{-1}$  处峰位置从 928  $\text{cm}^{-1}$  向 935  $\text{cm}^{-1}$  方向移动且峰强逐渐增加,该处峰位与峰强变化明显且相关性较强;而 960  $\text{cm}^{-1}$  处峰位置逐渐从 959  $\text{cm}^{-1}$  变化至 957  $\text{cm}^{-1}$ ,然后于 PA6 质量分数下降至 10% 时消失,其峰强较小且整体变化不显著;1 122  $\text{cm}^{-1}$  处峰位从 1 122  $\text{cm}^{-1}$  变化至 1 123  $\text{cm}^{-1}$  后于 PA6 质量分数下降至 10% 时消失,峰位整体变化较小。

表 3 不同共混比例的 PA6/PA66 共混物在 600~1 300  $\text{cm}^{-1}$  范围内的特征峰情况

Tab. 3 The infrared absorption peaks of PA6/PA66 blends with different blending ratios in the range of 600-1 300  $\text{cm}^{-1}$

Samples	930-935	960	1 122	1 169-1 181
	—CO—NH— stretching vibration	—CO—NH— in-plane vibration	C—C stretching vibration	—CO—NH— stretching vibration
1 <sup>#</sup>	928.89	959.37	1 122.48	1 168.87
2 <sup>#</sup>	929.56	959.14	1 122.21	1 169.96
3 <sup>#</sup>	930.10	959.09	1 122.31	1 170.23
4 <sup>#</sup>	931.31	959.04	1 122.36	1 170.79
5 <sup>#</sup>	931.91	958.93	1 122.63	1 171.85
6 <sup>#</sup>	932.01	958.92	1 122.84	1 172.12
7 <sup>#</sup>	933.20	958.94	1 123.09	1 174.98
8 <sup>#</sup>	933.86	958.55	1 123.73	1 178.14
9 <sup>#</sup>	934.55	957.93	1 124.29	1 179.05
10 <sup>#</sup>	934.57	—	—	1 179.13
11 <sup>#</sup>	935.26	—	—	1 179.77

造成 PA6/PA66 材料 900~960  $\text{cm}^{-1}$  处峰形变化的原因是 PA6 与 PA66 结晶结构不同<sup>[14-15]</sup>,许多文献提到利用 900~960  $\text{cm}^{-1}$  范围的峰形特点可以辨别 PA6 与 PA66 材料。具体为若在 905  $\text{cm}^{-1}$  与 935  $\text{cm}^{-1}$  两处出峰且 935  $\text{cm}^{-1}$  处峰强明显较高,则可判定为 PA66;若在 930  $\text{cm}^{-1}$  与 959  $\text{cm}^{-1}$  两处出峰且峰强接近,则可判定为 PA6。这是一种简单有效的方法用来判断体系材料成分,但该种方法无法判断 PA6/PA66 共混材料的相对含量。

有一种思路是通过找到 930~935  $\text{cm}^{-1}$  处峰位置与 PA6/PA66 相对含量之间的关系从而反推判断共混体系组成情况<sup>[9]</sup>。但实际应用该方法存在部分问题。PA 材料在使用时会采用改性处理,期间会添加多种助剂以满足生产要求和耐久需求,若加入质量分数小于 1% 的加工润滑剂与抗氧剂等,其不会对红外光谱出峰造成明显的影响,但如果是滑石粉

和阻燃剂等这类需要大量添加的填料或助剂,其质量分数达到 10% 甚至更多,红外光谱上会出现明显的吸收峰。例如滑石粉的硅氧键伸缩振动峰出峰在 1 016  $\text{cm}^{-1}$  且是个宽峰,其遮盖了在 930~960  $\text{cm}^{-1}$  附近的 PA 特征吸收峰,影响了实际判断。

因此笔者聚焦于相对明显且不受干扰的 1 169~1 181  $\text{cm}^{-1}$  区域,该处出峰原因为酰胺基团骨架振动,各类助剂较少在此处出峰。可以发现随共混物比例变化其出峰位置变化很明显。当组分为纯 PA6 时,峰位出现在 1 168.87  $\text{cm}^{-1}$  处,随着组分中 PA6 含量减少 PA66 含量增加,出峰位置逐渐向高处变化。可以发现,共混组成 PA6/PA66 在 PA6/PA66 质量之比为 60/40 到 70/30 范围时峰位置出现明显突变,从 1 172  $\text{cm}^{-1}$  附近跳跃至 1 178  $\text{cm}^{-1}$  附近,判断原因为在这一过程中该峰变化的主导因素从 PA6 转变到 PA66。最后当组分为纯 PA66 时峰位出现在

1 179.77  $\text{cm}^{-1}$ 。

由于该处峰位置变化与共混组成相关性很好,那么可以通过拟合公式反推未知样品的PA6/PA66组成。通过Origin软件对1 169~1 180  $\text{cm}^{-1}$ 处峰位置变化与共混组成作图。为方便计算,将所有峰位置减去1 175  $\text{cm}^{-1}$ 后再作图拟合,得出结果如图2所示。可以发现峰位随着PA6含量增加的变化一开始变化程度平缓,在1 172  $\text{cm}^{-1}$ 到1 178  $\text{cm}^{-1}$ 位置后发生突变,后续变化又变小。

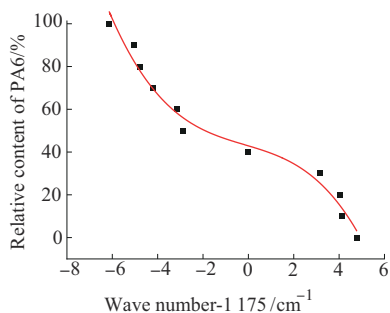


图2 1 169~1 180  $\text{cm}^{-1}$ 峰位波数减去1 175  $\text{cm}^{-1}$ 后的数值随PA6含量变化关系

Fig. 2 Relationship between wavenumber values of peak position of 1 169-1 180  $\text{cm}^{-1}$  after subtracting 1 175  $\text{cm}^{-1}$  and change in PA6 content

对结果进行拟合,拟合结果见公式(1)。

$$y = 42.89998 - (x - 1750) \times 3.16706 - (x - 1750)^2 \times 0.10331 - (x - 1750)^3 \times 0.20443 \quad (1)$$

式中: $x$ 表示待测样品在1 169~1 180  $\text{cm}^{-1}$ 处出峰位置; $y$ 表示根据公式计算出的PA6含量,相关系数 $R=0.98076$ 。后续可以通过将未知的PA6/PA66共混物样品在1 169~1 180  $\text{cm}^{-1}$ 处出峰位置代入该公式判断未知样品的组成情况。

## 2.2 鉴别未知尼龙共混物样品

选取了3种不同PA6/PA66比例的预制尼龙塑料粒子,分别为样品X1,X2,X3。PA6/PA66共混比例分别为1:3,1:1,3:1。三样品FTIR光谱在1169~1181  $\text{cm}^{-1}$ 处的出峰情况列于表4。

观察各样品光谱的1 169~1 180  $\text{cm}^{-1}$ 处出峰位

表4 3种预制尼龙样品的PA6的理论及实际含量

Tab. 4 Theoretical and actual content of PA6 in three pre-formed nylon samples

Samples	Wave number/ $\text{cm}^{-1}$	Calculated PA6 content	Actual PA6 content
X1	1 178.67	19.78	25
X2	1 173.47	48.24	50
X3	1 170.52	73.39	75

置,X1为1 178.67  $\text{cm}^{-1}$ 、X2为1 173.47  $\text{cm}^{-1}$ 、X3为1 170.52  $\text{cm}^{-1}$ 。分别将三个样品的出峰位置带入公式(1)得出结果为X1中PA6质量分数为19.78%,X2中PA6质量分数为48.24%,X3中PA6质量分数为73.39%。计算结果与样品实际的共混比例差距最大为5.22%,最小为1.61%。由此结果看出,该方法存在一定误差,但误差最大为5%左右,可以作为一种半定量分析方法对未知PA6/PA66共混物样品进行分析。

## 3 结论

通过ATR-FTIR法观察不同共混比例的PA6/PA66合金的红外光谱,发现共混物红外光谱有以下几个特点。

(1)在1 400~4 000  $\text{cm}^{-1}$ 范围内不同PA6/PA66共混物的特征峰存在一定差异,但由于变化不够稳定且差异较小,无法简单通过该部分峰位置判断PA6/PA66实际比例。

(2)在600~1 300  $\text{cm}^{-1}$ 范围内各个小峰的差异较为明显,这是由于不同共混比例PA材料的结晶情况不同所导致的。930~935  $\text{cm}^{-1}$ 处峰位置从928  $\text{cm}^{-1}$ 向935  $\text{cm}^{-1}$ 方向移动,峰强逐渐增加;960  $\text{cm}^{-1}$ 处吸收峰从959  $\text{cm}^{-1}$ 变化至957  $\text{cm}^{-1}$ ,于PA6质量分数下降至10%时消失。1 169~1 180  $\text{cm}^{-1}$ 处随着PA6含量的下降,峰位逐渐从1 169  $\text{cm}^{-1}$ 向1 180  $\text{cm}^{-1}$ 移动,且于1 172~1 178  $\text{cm}^{-1}$ 范围发生突变,相关性十分明显。

(3)通过对共混物在1 169~1 180  $\text{cm}^{-1}$ 处峰位置随共混物中PA6含量的变化关系进行作图拟合,得到半定量分析公式,通过实际测试发现该方法误差控制在5%左右,对于PA材料的回收利用有实际意义,能够快速分析材料中PA6/PA66的相对含量。

## 参考文献

- 梁尚锋,韩天元,刘震,等.尼龙改性新进展[J].当代化工研究,2023(5):14-16.  
LIANG Shangfeng, HAN Tianyuan, LIU Zhen, et al. Research progress on nylon modification[J]. Modern Chemical Research, 2023(5):14-16.
- 李积迁,何和智.尼龙6改性研究进展[J].塑料科技,2009,37(6):82-86.  
LI Jiqian, HE Hezhi. Research progress on modification of nylon 6[J]. Plastics Science and Technology, 2009, 37(6):82-86.
- 张永,周华龙,王丰,等.尼龙66与尼龙6及其共混物的熔融与结晶行为[J].工程塑料应用,2015,41(6):86-89.  
ZHANG Yong, ZHOU Hualong, WANG Feng, et al. Melting and

- crystallization behavior of nylon 66, nylon 6, and their blends[J]. *Engineering Plastics Applications*, 2015, 41(6):86–89.
- [4] 毛月红,刘建涛,张黎明. ATR-FTIR结合DSC法快速鉴别食品接触用塑料包装制品[J]. *塑料包装*, 2023, 33(2):30–34.
- MAO Yuchong, LIU Jiantao, ZHANG Liming. Rapid identification of plastic packaging products in contact with food using ATR-FTIR combined with DSC[J]. *Plastics Packaging*, 2023, 33(2):30–34.
- [5] 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:自然科学与医学版*, 2011, 32(1):20–21.
- HUANG Hongying, YIN Qihe. Principle and application progress of fourier transform attenuated total reflection infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) [J]. *Journal of the Graduates SUN YAT-SEN University: Natural Science and Medical Edition*, 2011, 32(1): 20–31.
- [6] 孟玲,付露,桂玉梅.红外光谱仪在鉴定塑料材质的应用[J]. *广东化工*, 2013, 40(10):54–56.
- MENG Ling, FU Lu, GUI Yumei. The application of infrared spectrometer in identifying plastic material[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2013, 40(10):54–56.
- [7] 刘荣仲,刘俊松.用红外光谱鉴定塑料成分[J]. *塑料科技*, 2008, 36(6):72–77.
- LIU Rongzhong, LIU Junsong. Identification of plastic composition by IR spectra[J]. *Plastics Science and Technology*, 2008, 36(6): 72–77.
- [8] 张俊佳,孙秋菊,初增泽,等. ATR-FTIR在尼龙共混物组份分析中的应用[J]. *仪器仪表与分析监测*, 2018(1):40–44.
- ZHANG Junjia, SUN Qiuju, CHU Zengze, et al. Application of ATR-FTIR in analysis of nylon blend components[J]. *Instrumentation Analysis Monitoring*, 2018(1):40–44.
- [9] 安振华,赵东艳,叶焱,等.一种尼龙老化评价的新方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(1):43–48.
- AN Zhenhua, ZHAO Dongyan, YE Yan, et al. A new method for evaluating the aging of nylon[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(1):43–48.
- [10] 刘玉飞,王方方,黄彩娟,等.红外光谱定量分析的研究进展[J]. *上海塑料*, 2014(1):9–13.
- LIU Yufei, WANG Fangfang, HUANG Caijuan, et al. Progress in infrared spectrum quantitative analysis[J]. *Shanghai Plastics*, 2014 (1):9–13.
- [11] 马哲,陈光岩. FTIR法分析PC/ABS共混物中PC含量[J]. *工程塑料应用*, 2016, 44(10):102–105, 133.
- MA Zhe, CHEN Guangyan. The quantification analysis of polycarbonate in PC / ABS by FTIR[J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 44(10):102–105, 133.
- [12] 翁志凡,冯喆.乙丙共聚抗冲聚丙烯中乙烯含量的测定研究[J]. *化工设计通讯*, 2022, 48(11):97–99.
- WENG Zhifan, FENG Zhe. Study on determination of ethylene content in ethylene-propylene copolymer impact-resistant polypropylene[J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2022, 48(11):97–99.
- [13] 陈蕾,董美玉,喻爱芳.傅立叶变换红外光谱测定PMMA-S共聚物的共聚组分[J]. *合成技术及应用*, 2002, 17(2):50–52.
- CHEN Lei, DONG Meiyu, YU Aifang. Fourier transform infrared spectroscopy determination of copolymer components in PMMA-S copolymers[J]. *Synthetic Technology Application*, 2002, 17(2): 50–52.
- [14] 李洪.傅立叶红外光谱(ATR)法鉴别尼龙6和尼龙66[J]. *合成材料老化与应用*, 2020, 49(1):53–54.
- LI Hong. Identification of nylon 6 and nylon 66 with fourier transform infrared spectroscopy(ATR) [J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2020, 49(1):53–54.
- [15] VASANTHAN N, SALEM D R. FTIR spectroscopic characterization of structural changes in polyamide-6 fibers during annealing and drawing[J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2015, 39(5):536–547.
- [16] MA Y, ZHOU T, SU G, et al. Understanding the crystallization behavior of polyamide 6/polyamide 66 alloys from the perspective of hydrogen bonds: Projection moving-window 2D correlation FTIR spectroscopy and the enthalpy[J]. *Rsc Advances*, 2016, 6. DOI:10.1039/C6RA09611E.