

红外光谱在聚对苯二甲酸乙二醇酯纤维结构研究中的应用^{*}

江 渊, 吴立衡

(中国纺织科学研究院, 北京 100025)

摘要:回顾了近年来红外光谱在聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)纤维结构研究中的应用,介绍了纤维制样技术,归纳了构象含量、取向、折叠链含量等结构参数的表征方法及其应用,以及这些结构参数与纤维性能间的联系。

关键词:红外光谱; PET 纤维; 构象; 取向; 折叠链

前言

PET 纤维以其优良的性能得到广泛的应用。随着用途的不断开发,如何得到某些突出性能的产品已成为众多结构学家和工艺学家所关心的课题。纤维的性能是由其结构决定的,而纤维的结构又与其生产工艺条件密切相关,因此欲得到某些突出性能的纤维,就必须对结构与性能、工艺条件与结构的关系做深入细致的研究。对 PET 纤维结构、性能以及生产工艺条件对结构和性能的影响国内外已有大量研究报道^[1~10]。通常认为 PET 属半晶聚合物,其物理结构可用由非晶和晶区组成的两相结构模型来描述。晶区和非晶区相互堆积形成微纤,微纤聚集在一起形成纤维。晶区可看成是刚性部分,非晶区被包夹在两晶区之间。因此,非晶区的分子排列是决定纤维的力学性能的主要因素。通过多项测量技术的结合应用,如密度法、X 衍射、声速法、双折射及热分析,可以得到描述该模型的较理想的参数。红外光谱在测定与非晶区相关的参数方面显示出极大的优势,因而红外光谱在 PET 纤维的结构表征中得到了广泛的应用^[10~20]。本文总结了近年来红外光谱在 PET 纤维结构研究中的应用,同时列举了应用红外光谱研究 PET 膜结构的工作。

1 样品的制备

获得高质量的光谱是光谱分析前题,因此样品的制备至关重要。为记录透射光谱,需制备厚度合适、均匀且不漏光的样品。PET 纤维样品的制样比 PET 膜困难,PET 膜可以通过熔融挤出^[21,22](melt extrusion)得到,溶液铸膜^[23~27](solution casting)则可以得到较薄的膜。由于纤维的侧面为圆柱形,排成单层丝时,容易产生漏光,引起谱图变形;为避免漏光就需排得紧密,难免产生重叠,导致样品偏厚,透过率较低,不利于定量分析。因此欲得到较为准确的结果,需首先解决纤维的制样问题。Yazdanian 和 Ward 等人^[12,13]曾设计一套绕丝装置制得夹在两个溴化钾盐片间的平行的 PET 纤维薄层(grids of fibres);Heuvel 和 Huisman 等人^[14~16]在一金属框上将 PET 纤维绕成丝带(ribbon),使丝框的两侧形成光滑平行的单丝层,且尽量避免缝隙和重叠,他们将记录到的偏振透射光谱通过计算机

基金项目:国家自然科学基金项目(29774026)和国家科委基础研究重大关键项目“高分子凝聚态的基本物理问题研究”资助;

作者简介:江渊(1962—),男,中国纺织科学研究院高级工程师。1988年毕业于吉林大学理论化学研究所,获硕士学位。1994年于瑞士巴塞尔大学获博士学位。现在主要从事高分子材料结构与性能方面的研究。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

拟合得到相应的谱带。应用衰减全反射(ATR)技术则可避免对制样的苛刻要求,因为 ATR 研究的是样品表面的分子取向和结构,不受样品厚度的影响,故可使用较厚的样品。Jain 和 Gupta^[10]在一金属片上绕丝得到丝层(layer of fibers),用于 ATR 的测试。

2 特征谱带的归属

通过对 PET 红外光谱的研究,人们发现一些谱带对结构变化敏感^[28],如当 PET 样品结晶或被牵伸时,(1453、1370、1043、899) cm^{-1} 谱带减弱,而(1471、1342、972、848) cm^{-1} 谱带增强。从 PET 分子结构可知,PET 分子中乙二醇链段存在反式(*trans*)构象和左右式(*gauche*)构象,它们之间可以通过绕 C—C 轴旋转 120°而相互转换,反式构象对应分子链中较为伸展的部分,排列较为规整,存在于晶区和非晶区中;而左右式构象对应分子链中较为卷曲的部分,排列较为无序,只存在于非晶区中。在非晶的 PET 样品中,反式和左右式构象同时存在;当结晶或牵伸时,左右式转变为反式使分子链伸展以便结晶或取向。因此对应 CH_2 弯曲振动的谱带 1453 cm^{-1} 减弱,1471 cm^{-1} 增强; CH_2 面外摇摆振动 1370 cm^{-1} 减弱,1342 cm^{-1} 增强; CH_2 —O 伸缩振动 1403 cm^{-1} 减弱,972 cm^{-1} 增强; CH_2 面内摇摆振动 899 cm^{-1} 减弱,848 cm^{-1} 增强。反式和左右式构象相应的吸收峰相对强度可以反映出分子链的有序程度(拉伸样品)和结晶程度(未拉伸样品),而吸收峰相对强度的变化反映出左右式和反式构象相互间的转换,即无序有序的变化和结晶过程。

表 1 PET 红外光谱部分谱带的特性

频率/ cm^{-1}	振动归属	构象	聚集态	结构表征	α°
1580	苯环对称伸缩		非晶区	非晶取向	0
1505					
1410					
1386					
1024	苯环 CH 面内弯曲	反式	晶区	高结晶	
1021		反式	非晶区		
1018		左右式	非晶区		
1471	CH_2 弯曲	反式	非晶区和晶区		
1453		左右式	非晶区		
1370	CH_2 面外摇摆	左右式	非晶区	反式取向	21
1342		反式	非晶区和晶区		
1043	CH_2 —O 伸缩	左右式	非晶区	反式取向	34
972		反式	非晶区和晶区		
899	CH_2 面内摇摆	左右式	非晶区	反式取向	
848		反式	非晶区和晶区		
988	折叠链		高结晶	折叠链含量	
795	苯环				
875	苯环 CH 面外弯曲			整体取向, 内标	85
729					90

(1505、1410、1386 和 1018) cm^{-1} 归属为苯环 CH 面内弯曲振动^[21], 875 cm^{-1} 和 729 cm^{-1} 归属为苯环 CH 面外弯曲振动, 795 cm^{-1} 归属为与苯环相关的振动^[22], 1410^[10]、795^[11,20,27]、875^[19]和 729^[24] cm^{-1} 等谱带不受构象变化的影响,可作为内标使样品厚度的差异归一化。988 cm^{-1} 归属为与晶面折叠链

相关的振动^[23,14], 1386cm^{-1} 和 988cm^{-1} 在高结晶样品才出现^[23]。 1580cm^{-1} 归属为非晶区的苯环对称伸缩振动^[27], 可以表征非晶区分子链的取向。D'esposito 和 Koenig^[23] 发现淬火样品的 1018cm^{-1} 谱带在 150°C 退火后移至 1021cm^{-1} , 240°C 退火后移至 1024cm^{-1} , 且出现肩峰 1020cm^{-1} , 这 3 个谱带分别对应非晶左右式、非晶反式和晶区反式构象^[25]。非晶反式构象谱带相对晶区反式构象谱带有 3cm^{-1} 的位移, 反映了非晶区分子间相互作用与晶区内晶格间相互作用的不同。这一现象^[23] 也反映在 CH_2 面外摇摆振动的反式构象谱带上, 熔融样品 1339cm^{-1} 谱带退火后移至 1342cm^{-1} 。表 1 列出了结构研究中常用的 PET 红外光谱谱带及其归属, 同时列出了各谱带对应的构象结构和所处聚集态以及所表征的结构参数。

3 构象含量的确定与应用

构象含量通常可以选择相应构象谱带和内标谱带来确定。研究 PET 膜的构象结构时, 由于可能制得较薄的膜 ($10\mu\text{m}$), 上述的多数谱带都可以表征其构象变化。 1472cm^{-1} 、 1453cm^{-1} 谱带相互影响且 1453cm^{-1} 谱带受到相邻谱带的较大干扰, 因此未见应用这两个谱带表征构象变化的文献报道。 1370cm^{-1} 、 1342cm^{-1} 谱带相对独立, 受其它谱带的影响较小, 是研究 PET 膜构象变化较为理想的谱带。钱人元和沈德言^[26] 等人通过溶液铸膜、熔融淬火、退火得到非晶和不同结晶度的 PET 膜, 记录其光谱并用 1342cm^{-1} 和 1370cm^{-1} 谱带的吸光度作图, 线性回归后得到两谱带的吸光度比 ($k=6.6$), 进而可以按 (1) 和 (2) 式计算样品中反式和左右式构象的含量 (X^t) 和 (X^g):

$$X^t = \frac{A^t}{A^t + kA^g} \quad (1)$$

$$X^g = \frac{kA^g}{A^t + kA^g} \quad (2)$$

A 为相关谱带吸光度, 上标 t 和 g 分别表示反式和左右式构象。作者等用同样的方法确定了 PET 膜的 848cm^{-1} 和 899cm^{-1} 两谱带的吸光度比, 并将该比值用于 PET 工业用纤维反式和左右式构象含量的计算。沈德言和杨小震^[25] 曾发现 1020cm^{-1} 谱带对 PET 的晶区反式、非晶区反式和左右式构象结构很敏感, 通过谱带分离技术, 将其分解为 1024cm^{-1} , 1021.5cm^{-1} 和 1018cm^{-1} 分别对应晶区反式, 非晶区反式和左右式构象的三条谱带。通过对 18 个不同结晶状态的 PET 膜结果的线性回归分析, 得到三个谱带的相对吸收率之比 ($1.89:1.36:1$), 使用该方法可以独立地测定不同结晶结构 PET 样品中的晶区反式, 非晶区反式和左右式构象的含量。

在研究纤维的构象结构时, 由于纤维的侧面为圆柱形, 记录 PET 丝带光谱时, 存在严重的散射, 再加上漏光的影响, 光谱将产生变形, 不利于上述分峰技术的应用。又由于纤维本身存在取向, 构象谱带的强度将受到取向的影响。可以用两种方法消除取向的影响。第一种方法是将纤维剪碎, 然后做溴化钾压片记录光谱。Statton 和 Koenig 等人^[11] 用此方法研究 PET 纤维链折叠特征时, 以 795cm^{-1} 为内标, 分别选用 973cm^{-1} 和 896cm^{-1} 谱带表征反式构象和左右式构象。他们认为左右式构象可以出现在分子的非晶区和折叠部分, 对在退火松弛过程中 PET 纤维的 896cm^{-1} 谱带强度增加给出两种解释: 一是因为原丝经过高倍牵伸, 非晶区或晶片间分子链被拉紧且伸展, 存在大量反式构象, 在高温收缩过程中, 这些被拉紧的构象将松弛并转换成左右式构象; 二是因为松弛过程将产生链折叠, 左右式构象参与折叠过程。因为数据没有足够的一致性, 所以他们不能确定是那种机理。

第二种方法是将纤维制成单层丝带, 记录其偏振光谱, 进而可求得结构吸光度。Yazdanian 和

Ward 等人^[12]在应用红外光谱研究 PET 纤维结构时,用拟合得到 978cm^{-1} 、 962cm^{-1} 和 973cm^{-1} 三谱带强度和表征反式构象含量; 899cm^{-1} 和 889cm^{-1} 两谱带和表征左右式构象含量,用双折射测得的取向函数表示的整体取向,将构象含量对整体取向作图,得到很好的对应关系,随整体取向的增加,反式含量单调上升,左右式含量单调下降,从而支持了他们用来表征构象含量的方法。Long 和 Ward^[13]利用熔融纺丝制备分子取向范围较宽的 PET 纤维,并比较了它们在两种牵伸方法下拉伸性能,一种是 80°C 下热盘牵伸;另一种是 180°C 下热盘和热板的牵伸。他们发现 973cm^{-1} 反式构象谱带的含量在 180°C 牵伸的纤维中比初生丝和在 80°C 牵伸的纤维中高,以及 973cm^{-1} 反式构象谱带的含量与断裂强力有很好的对应关系。因此说明对应 973cm^{-1} 反式构象构成分子承受负荷以及决定模量的骨架结构。

Heuvel 和 Huisman^[14~16]在应用偏振红外光谱分析 PET 纤维时,选用 1043cm^{-1} 、 899cm^{-1} 谱带表征非晶区左右式构象的含量,用 972cm^{-1} 、 848cm^{-1} 谱带表征晶区和非晶区反式构象的含量,并由此表征分子链的弯曲或伸直程度。从 PET 分子反式和左右式结构可知,弯曲的分子需要左右式结构单元的存在,而伸直的分子只能由反式结构单元构成。他们发现当 PET 丝拉伸时,左右式构象降低,反式构象增加,说明部分左右式构象转变为反式构象使分子开始伸直。此外 Heuvel 和 Huisman^[14,15]还通过观察拉伸时左右式构象含量变化的程度判断连接链(tie-chain)长度分布。当丝受到牵伸时,左右式构象含量不随形变的增加而产生明显的变化,说明丝含有较长的松弛分子链以致形变不能将其拉直,进一步说明连接链长度分布较宽。 972cm^{-1} 谱带的位移可以反映作用于分子上的应力。Heuvel 和 Huisman^[16]建立了在丝的形变过程中在线测量红外光谱的方法,应用红外光谱跟踪丝的形变过程,他们发现 PET 纤维在受拉伸形变时将引起反式构象谱带 972cm^{-1} 向低波数位移,他们认为这是因为作用于拉紧的连接链分子(tie-molecules)上的应力增加。反式构象是由晶区和非晶区两者的贡献,通过拟合分峰可以将其分开,他们观察到对应非晶区谱峰的位移大于对应晶区谱峰的位移,这与低模非晶材料伸长较大的物理图象相一致。

Wu 和 Cuculo^[17,19]等人应用非偏振红外光谱对纺程中包括恒温浴和后牵伸技术制得的高模、高强、尺寸稳定的 PET 单丝进行分析研究时,用 $899\text{cm}^{-1}/845\text{cm}^{-1}$ 两峰吸光度比值表征样品的反式构象的百分含量,并与力学性能相联系。这一比值大,说明左右式构象的百分含量高,较高的左右式构象含量对应较低的非晶取向,导致较差的力学性能。他们也利用 972cm^{-1} 、 848cm^{-1} 和 899cm^{-1} 谱带与内标谱带 875cm^{-1} 吸光度比分别表征反式构象和左右式构象的归一化强度。发现当 PET 单丝中大量的分子构象由卷曲状态转变为拉伸的直链形态时,反式构象谱带的相对强度增加,左右式构象谱带降低。反式构象谱带既有晶区的贡献又有非晶区的贡献,晶区的贡献对应较窄的谱带,非晶区的贡献对应较宽的谱带^[14~16]。Wu 和 Cuculo^[19]等人用 972cm^{-1} 和 848cm^{-1} 谱带的半峰宽判断反式构象存在于晶区和非晶区的多少,他们发现对应初生丝、热牵伸丝和热定型丝,反式构象谱带 972cm^{-1} 和 848cm^{-1} 的强度变化不是很大,但是峰宽变窄,说明热牵伸和热定型使部分非晶区的伸直链转变为晶区伸直链。

Jain 和 Gupta^[10]应用红外光谱衰减全反射(ATR)技术记录 PET 纤维的光谱,以 1410cm^{-1} 谱带为内标,分别通过 1342cm^{-1} 和 1370cm^{-1} 谱带确定 PET 分子中反式和左右式构象的含量,研究了不同热定型温度对 PET 纤维结构的影响。他们发现随热定型温度的增加,反式含量略有增加,左右式含量略有降低。他们认为这是由于在结晶过程中,由于分子重排,非晶区部分左右式构象转变为反式构象,使结晶增加。Kunugi 等^[20]在用红外光谱研究通过区域退火(zone annealing)处理 PET 纤维的特点时,以 795cm^{-1} 谱带为内标,分别用 973cm^{-1} 谱带表征反式构象, 895cm^{-1} 谱带表征左右式构

象,并结合力学性能、密度、双折射、X 衍射、DSC 的测定,比较了在不同退火条件下处理所得纤维的结构与机械性能之间的联系。区域退火得到的纤维在升温过程中显示了极好的力学性能和尺寸稳定性,相应的红外光谱中反式构象 973cm^{-1} 谱带的相对强度较强,左右式构象 895cm^{-1} 谱带的相对强度较弱,说明区域退火得到的纤维中反式构象含量较多,左右式构象含量较少。

4 取向的表征

反式构象谱带如 1340cm^{-1} 、 972cm^{-1} 等除了可以表征反式构象相对含量外,还可以用来表征反式构象单元取向;此外 $(1580, 1018, 875, 795, 729)\text{cm}^{-1}$ 等谱带也有较强的二向色性,因此可以通过其偏振红外光谱得到经过拉伸的 PET 样品的取向信息, 1580cm^{-1} 归属为非晶区苯环对称伸缩振动,可以表征非晶区分子链的取向^[27], 875cm^{-1} 和 729cm^{-1} 归属为苯环 CH 面外弯曲振动, 795cm^{-1} 为与苯环相关的振动,它们都不直接受构象变化的影响,能很好地表征分子的整体取向^[21, 22]。

样品的取向可以用相应谱带的二向色性比 (R) 来表示^[28, 29], 其值为偏振光电矢量平行和垂直于样品拉伸方向相应谱带的吸光度 $A_{//}$ 和 $A_{\perp}$ 之比。更经常使用二向色性函数 (DF) 表征分子链的取向,其定义由(4)式给出。如果知道某动模式跃迁矩与分子链夹角 α 的相应值,则可根据(5)式计算取向函数(f):

$$R = A_{//} / A_{\perp} \quad (3)$$

$$DF = \frac{R-1}{R+2} \quad (4)$$

$$f = \frac{R-1}{R+2} \times \frac{2}{3\cos^2\alpha - 1} \quad (5)$$

Cunningham 和 Ward^[22] 等人将 875cm^{-1} 和 795cm^{-1} 谱带红外取向因子与光取向函数相结合表征 PET 拉伸膜的取向,其实验显示这两个谱带的两组参数间有非常好的线性关系,说明这两种方法测量的是相同的物理参数。他们以光取向函数为绝对校正值,求得 875cm^{-1} 谱带振动跃迁矩与分子链轴的夹角为 85° ,如前所述 875cm^{-1} 谱带归属为苯环 CH 面外弯曲振动,其跃迁矩垂直于苯环平面,因此所得角度与其振动归属相符。而反式构象谱带 972cm^{-1} 红外取向因子与光取向函数间不存在线性关系,说明反式构象的取向不能代表分子链轴的整体取向。Yazdanian 和 Ward 等人^[12] 将上述方法用于 PET 纤维,其结果与膜一样, 875cm^{-1} 谱带的红外取向因子与光取向函数间存在极好的相关性,以 972cm^{-1} 红外取向因子表示的反式构象取向比以光取向函数表示的整体取向增加得快,并进一步估计出 972cm^{-1} 谱带相应振动跃迁矩与分子链轴的夹角为 33° 。Cole 和 Dumoulin^[21] 等人收集到一些谱带振动跃迁矩与分子链轴的夹角,峰位在 1018cm^{-1} 的苯环 CH 面内弯曲振动为 20° ,峰位在 1340cm^{-1} 的 CH_2 面外摇摆振动为 21° 。 729cm^{-1} 苯环 CH 面外弯曲振动谱带具有较强的垂直二向色性,因此可以假设跃迁矩与牵伸方向的夹角为 90° 。他们利用 729cm^{-1} 谱带对非晶牵伸膜和热结晶牵伸膜的取向分别进行了研究,利用 1340cm^{-1} 、 1370cm^{-1} 谱带^[31, 32] 表征 PET 膜的反式和左右式取向随牵伸比的变化。他们发现与左右式构象相关的谱带如 $(1453, 1370, 1043, 899)\text{cm}^{-1}$ 检测不到二向色性^[21]。Jain 和 Gupta⁽¹⁰⁾ 根据 1342cm^{-1} 、 972cm^{-1} 和 846cm^{-1} 谱带的二向色性函数确定反式分子在晶区和非晶区的取向,根据 1410cm^{-1} 和 875cm^{-1} 谱带的二向色性函数确定分子的整体取向,对不同热定型温度对 PET 纤维取向的影响进行了研究。他们应用 Ward 等人得到的 972cm^{-1} 谱带相应振动跃迁矩与分子链轴的夹角计算出反式构象的取向函数,结合 X 衍射数据得到结晶度和晶区取向计算出非晶区的取向因子。Heuvel 和 Huisman^[14] 通过 873.5cm^{-1} 苯环 CH 面外弯曲振动谱带的二向

色性计算不同纺速得到的 PET 纤维的取向函数, 计算时假定跃迁矩与分子链轴的夹角为 90° 。他们发现在较低的卷绕速度时, f 值接近零。当卷绕速度低于 2000m/min 时, 将得到负取向。其物理含义是在较低的卷绕速度得到的纤维, 大部分与苯环相关的分子链段的取向是垂直于纤维轴。这些聚在一起的分子可以看成热结晶的核, 这一结果与 Liska 的发现一致, 他观察到低速卷绕得到的初始非晶纤维结晶后其双折射为负值。

5 折叠链谱带的应用

Heuvel 和 Huisman^[14,15] 在应用偏振红外光谱分析 PET 纤维结构与加工条件的关系时, 用 988cm^{-1} 谱带表征折叠链的多少, 他们观察到随纺速的增加和牵伸温度的提高折叠链含量明显增加。Zhou 和 Cuculo^[18] 等人用非偏振光谱中 988cm^{-1} 谱带的吸光度表征只存在于晶面的折叠链的数量, 他们首先将 988cm^{-1} 谱带面积归一化, 其值记为结晶指数, 代表折叠链的结晶含量。再与密度法得到结晶含量比较, 对于未经过恒温浴的初生丝, 两方法吻合很好。而对于经过恒温浴的初生丝, 红外法比密度法的值低, 说明结晶中有相当一部分来自非分子链折叠的贡献。Kunugi、Suzuki 和 Hashimoto^[20] 用红外光谱研究不同退火方法处理所得 PET 纤维的结构与机械性能之间的关系时, 还发现 988cm^{-1} 折叠链谱带在松弛退火纤维中为弱的独立峰, 而在区域退火纤维中为弱的肩峰。结合本文前面所述区域退火纤维中反式构象含量较多的结果, 他们认为区域退火纤维的非晶区由高度取向和紧密聚集的伸展的分子束组成。Long 和 Ward^[13] 在比较两种牵伸方法处理所得 PET 纤维的拉伸性能时发现, 在高结晶退火纤维和 pin-and plate-drawn 纤维中出现 988cm^{-1} 折叠链谱带, 并且其强度在高牵伸倍数时减小, 他们认为链折叠是二级结晶过程。

6 总结

通过 PET 纤维红外光谱的测量, 可以得到分子链段构象相对含量、分子链取向、晶区和非晶区、晶面折叠链含量以及连接链长度分布等结构信息, 结合纤维性能的测试及工艺条件的选择, 为研究结构与性能的关系、工艺条件对结构及性能的影响提供了一种有效手段。

致谢: 本文撰写过程中曾得到中国科学院化学所沈德言教授的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 穆淑华, 黄象安, 蒋国英, 等. 合成纤维, 1984, (1): 1
- [2] 胡学超, 张 瑜, 丁卓敏, 等. 合成纤维工业, 1988, (4): 1
- [3] 傅树人, 戚绍棋, 王海琳. 合成纤维, 1989, (1): 1
- [4] 刘 勇, 邵 宇, 罗吉江. 合成纤维工业, 1991, (3): 11
- [5] Mukhopadhy S K, Mwaisengela D J, Foster P W. J Text Inst, 1991, 82(4): 427
- [6] Salem D R, Weigmann H D. J Polym Sci Polym Phys, 1991, 29(6): 765
- [7] Tzou D L, Desai P, Abhiraman A S, et al. J Polym Sci Polym Phys, 1991, 29(2): 49
- [8] Bechev C D, Mishinev J T. J Appl Polym Sci, 1992, 45(1): 29
- [9] Chen G Y, Cuculo J A, Tucker P A. J Appl Polym Sci, 1992, 44(3): 447
- [10] Jain A K, Gupta V B. J Appl Polym Sci, 1990, 41: 2931
- [11] Statton W O, Koenig J L, Hannon M J. Appl Phys, 1970, 41(11): 4290
- [12] Yzdanian M, Ward I, Mrody H. Polymer, 1985, 26: 1779

- [13] Long S D, Ward I M. J Appl Polym Sci, 1991, 42, 1911
- [14] Heuvel H M, Huisman R. J Appl Polym Sci, 1985, 30, 3069
- [15] Huisman R, Heuvel H M. J Appl Polym Sci, 1989, 37, 595
- [16] Van Den Heuvel C J M, Heuvel H M, Fassen W A, et al. J Appl Polym Sci, 1993, 49, 925
- [17] Wu G, Zhou Q, Chen J Y, et al. J Appl Polym Sci, 1995, 55, 1275
- [18] Zhou Q, Wu G, Tucker P A, et al. J Polym Sci Polym Phys, 1995, 33, 909
- [19] Wu G, Tucker P A, Cuculo J A. Polymer, 1997, 38(5), 1091
- [20] Kunugi T, Suzuki A, Hashimoto M. J Appl Phys Sci, 1981, 26, 1951
- [21] Cole K C, Guevremont J, Ajji A, et al. Appl Spectrosc, 1994, 48(12), 1513
- [22] Cunningham A, Ward I M, Willis H A, et al. Polymer, 1974, 15, 749
- [23] D'esposito L, Koenig J L. J Polym Sci Polym Phys, 1976, 14, 1731
- [24] 孙福革, 沈德言, 钱人元. 高分子学报, 1995, 1, 93
- [25] 沈德言, 杨小震. 光谱学与光谱分析, 1985, 5(4), 19
- [26] Qian R, Shen D, Sun F. Macromol Chem Phys, 1996, 197, 1485
- [27] Shen D, Long F, Wen Z, et al. Makromol Chem, 1991, 192, 301
- [28] 沈德言. 红外光谱法在高分子研究中的应用. 北京: 科学出版社, 1982. 195
- [29] 吴平平. 偏振红外光谱法. 吴瑾光主编. 近代傅立叶变换红外光谱技术及应用. 北京: 科学技术文献出版社, 1994. 302
- [30] Guevremont J, Ajji A, Cole K C, et al. Polymer, 1995, 36(17), 3385
- [31] Ajji A, Guevremont J, Cole K C, et al. Polymer, 1996, 37(16), 3707

Applications of Infrared Spectroscopy in the Structural Study of Poly (Ethylene Terephthalate) Fibers

JIANG Yuan, WU Li-heng

(China Textile Academy, Beijing 100025, China)

Abstract: Applications of infrared spectroscopy in the structural study of Poly (Ethylene Terephthalate) (PET) fibers in recent years have been reviewed. Some techniques of sample preparation for infrared measurement have been introduced. Characterizations and applications of the structural parameters, such as conformers contents, chain orientation, folded chain contents, and the relationship between these parameters and yarn properties have been summarized.

Key words: IR; PET fiber; Conformation; Orientation; Folded chain