

# 合成纤维光学各向异性的探讨

刘 妍 杨庆斌 王彩霞 李仲吉 张连房

(山东纺织工学院)

**【摘要】** 本文对合成纤维的旋光性和双折射性进行了研讨,提出了旋光性和双折射性统一研究的理论,为化纤厂制定测试取向度的标准提供了理论依据。

取向度是衡量合成纤维强力、伸长等性能的重要指标,化纤厂通常用取向度的大小来制定工艺参数,从而控制纤维的物理机械性能。取向度的大小可以用双折射率来表示,双折射率一般用色那蒙补偿法来测试。我们通过实验及理论分析证明了补偿法的测试过程中不但有双折射现象,还有旋光现象,最后引起的效果是两者综合作用的结果,为化纤厂制定测试取向度的标准提供了理论依据。

## 一、理论部分

当偏振光的振动方向与纤维轴成  $45^\circ$  角射入纤维时,将产生寻常光( $o$ 光)和非常光( $e$ 光),寻常光和非常光经过纤维射出后的相位差为:

$$\phi = \omega(t_o - t_e) \quad (1)$$

式中:  $\phi$ —相位差( $^\circ$ );  $\omega$ —光在真空中的角速度( $^\circ \cdot \text{sec}^{-1}$ );  $t_o, t_e$ — $e$ 光和 $o$ 光经过纤维的时间(sec)。

依菲涅耳旋光理论:“任何一个直线谐振动都可以分解为两个频率相同,初相位相同而反向旋转的匀速圆周运动”。因此,一线偏振光可分解为右旋和左旋两束圆偏振光,两者的相速度不同,且对应着不同的折射率  $n_{右}$  和  $n_{左}$ ,旋光性也可称为圆双折射性。光束穿出晶体时,较快的一支圆偏振光比较慢的一支相位超前,由于圆偏振光的电矢量是在垂直于光线的固定平面内作匀速圆周运动,所以相位就是它们的转动角,相位超前即是指它们中的一支比另一

支圆偏振光的电矢量转过了绝对值较大的角度。因此它们重新合成的线偏振光的振动面比入射时的方位转过了一个角度,见图1。从图1可以看出,当线偏振光穿过厚度为  $d$  的晶体时,若速度较快的圆偏振光比慢者相位超前  $\phi$ ,合成后的线偏振光振动面的偏转角  $\theta$  (即消光转动角)刚好是  $\phi/2$ 。由于  $\phi$  可以表示为:

$$\phi = 2\pi \cdot \frac{\Delta}{\lambda}$$

$$\theta = \phi/2 = \pi \cdot \Delta/\lambda = (\pi/\lambda)(n_{左} - n_{右}) \cdot d \quad (2)$$

式中:  $\Delta$ —光程差( $\mu\text{m}$ );  $\lambda$ —光波波长( $\mu\text{m}$ )。

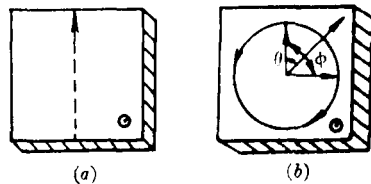


图 1-(a) 进入旋光晶体前线偏振光振动方位

图 1-(b) 穿出晶片后,两支圆偏振光重新合成线偏振光,振动面转过角  $\theta = \phi/2$

前面所述理论是将晶体的旋光性按照双折射来解释,反之,也可以将晶体的双折射性按旋光性来解释:即菲涅

耳原理仍然可以解释双折射现象:“任何一个振动方向与纤维轴成  $45^\circ$  角进入纤维的直线谐振动都可以分解为两个频率相同、初相位相差  $\frac{\pi}{2}$  而反向旋转的匀速圆周运动”。依琼斯矩阵表示法,一个电矢量分解成两个互相垂直的振幅相等的电矢量,按左旋和左旋迭加,右旋和右旋迭加,最后必然迭加成左旋和右旋两支圆

偏振光，两者的相速度不同，且对应着不同的折射率  $n_{\perp}$  和  $n_{\parallel}$ ，因此双折射性可以解释为旋光的圆双折射性。光束穿出纤维时， $o$  光圆偏振光比  $e$  光相位超前。由于圆偏振光的电矢量是在垂直于光线的固定平面内作匀速圆周运动，所以相位就是它们的转动角，相位超前就是指  $o$  光比  $e$  光圆偏振光的电矢量转过了绝对值较大的角度。因为  $o$  光与  $e$  光的初相位差是  $\pi/2$ ，故加入  $\lambda/4$  补偿器，消除两者的初相位差，重新合成的线偏振光的振动面比入射时的方位转过了一个角度与图 1 情况完全相同，故消光转动角  $\theta$  为：

$$\theta = \pi \cdot (n_{\parallel} - n_{\perp}) \cdot d / \lambda \quad (3)$$

合成纤维属于高分子结晶结构，与低分子物质不同，其结晶不完整，大多数合纤在体系内不存在对称面，故而分子足以形成旋光异构体，合纤的旋光性不一定沿纤维轴才有，其他方向也存在。因此研究合纤双折射的同时，还要研究其旋光性，我们把纤维的双折射性和旋光性统一在琼斯矢量和琼斯矩阵中来研究。

光线垂直于纤维轴入射且起偏器与纤维轴成  $45^{\circ}$  角，起偏器的线偏振光为  $+45^{\circ}$  偏振态，设其琼斯矢量为  $\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ ，当这一线偏振光射入纤维时，将分解为水平和垂直两个偏振态：

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{分解}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{分解}} \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \text{ (右旋)} + \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \text{ (左旋)} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{分解}} \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} -i \\ 1 \end{bmatrix} \text{ (右旋)} + \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} i \\ 1 \end{bmatrix} \text{ (左旋)} \quad (5)$$

(4)，(5)式右边对应项相加：

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} + \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} -i \\ 1 \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} 1-i \\ i+1 \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} + \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} i \\ 1 \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} 1+i \\ -i+1 \end{bmatrix}$$

依以上理论分析，垂直和平行于纤维轴的两条偏振光经分解和迭加最后合成效果相当于转动方向相反，频率相同的两圆偏振光。对于

各向同性物质，两相反方向转动的圆偏振光的传播速度相同，因而从纤维中透射后仍能合成与原振动方向相同的线偏振光。对于各向异性物质，两圆偏振光的传播速度不相等，从纤维中射出后，平行纤维轴的圆偏振光比垂直于纤维轴的圆偏振光超前  $1/4$  波长，故沿纤维轴顺时方向，与纤维轴成  $45^{\circ}$  角插入一只  $\lambda/4$  波片见图 2。光束从纤维射出后合成的圆偏振光经  $1/4$  波片补偿后，使圆偏振光的两个分振动的相位差减小(或加大)而成为 0 (或  $\pi$ )，因而成为线偏振光，补偿法测定纤维双折射就是采用旋转检偏器的方法，在视野中找到纤维完全消光的位置。

依琼斯矢量和琼斯矩阵来验证：

透过纤维后合成的右旋圆偏振光

$$\left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} 1-i \\ 1+i \end{bmatrix} \text{ 经 } 1/4 \text{ 波片, 偏振态变成:}$$

$$+45^{\circ} \text{ 角时: } \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} 1-i & 1+i \\ 1+i & 1-i \end{bmatrix} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)$$

$$\begin{bmatrix} 1-i \\ 1+i \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$-45^{\circ} \text{ 角时: } \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} 1-i & -(1+i) \\ -(1+i) & 1-i \end{bmatrix} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)$$

$$\times \begin{bmatrix} 1-i \\ 1+i \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} -4 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i \\ 0 \end{bmatrix}$$

将实轴与虚轴变换即乘以  $i$  得：

$$\begin{bmatrix} -i \\ 0 \end{bmatrix} \langle \Rightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

(6)式为沿直线偏振光，其振动方向平行于纤维轴。同理：透过纤维后合成的左旋圆偏振光

即  $\left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} 1+i \\ 1-i \end{bmatrix}$  经  $1/4$  波片后偏振态变换为：

$$+45^{\circ} \text{ 角时: } \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} 1-i & 1+i \\ 1+i & 1-i \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1+i \\ 1-i \end{bmatrix}$$

$$= \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} 4 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$-45^{\circ} \text{ 角时: } \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} 1-i & -(1+i) \\ -(1+i) & 1-i \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{2}$$

$$\begin{bmatrix} 1+i \\ 1-i \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} 0 \\ -4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -i \end{bmatrix}$$

同理将虚轴与实轴变换即乘以  $i$  得：

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -i \end{bmatrix} \langle \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

(7)式为水平线偏振光，其振动方向垂直于纤维轴。

从以上变换得知，透过纤维后合成的右旋圆偏振光经过1/4波片后转换成平行于纤维轴的线偏振光，而左旋圆偏振光经1/4波片后变

换为垂直于纤维轴的线偏振光，最后两个线偏振光再相干迭加而合成为原线偏振光：

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{合成} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

对于各向异性纤维，左旋与右旋圆偏振光传播速度不同，产生光程差，合成

后引起相位差，采用旋转检偏器的方法，在视野中找到纤维完全消光的位置，测出相位差，从而计算出光程差。

## 二、实验部分

采用五种不同波长的单色光分别对涤纶初生丝、牵伸丝，丙纶牵伸丝，锦纶牵伸丝进行测试，结果及计算值见表，表中消光角的计算结果是50个数据的均值，双折射  $\Delta n = n_{11} - n_{\perp}$  采用贝克线法测试对应样品的10个数据的均值，实验在标准状态下进行。

表中涤纶牵伸丝的  $\Delta n$  由  $\bar{n} = (n_{11} + 2n_{\perp})/3$  折算出  $n_{11}$  再计算出  $\Delta n$ ，因用贝克线法只能测

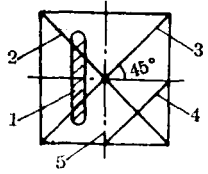


图2 相对位置图  
1-纤维；2-检偏器；  
3-起偏器；4-λ/4波片；5-十字线。

表 双折射测试结果

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$\theta$ ( $^{\circ}$ )	$\lambda\theta$ ( $\mu\text{m}\cdot^{\circ}$ )	$\lambda^2\theta$ ( $\mu\text{m}^2\cdot^{\circ}$ )	$\Delta n_1 = \frac{\lambda(\theta + N\pi)}{180 \cdot d}$	$\Delta n_2 = \frac{\lambda^2(\theta + N\pi)}{180 \cdot d}$	N	$\Delta n = n_{11} - n_{\perp}$	
0.4358	涤纶初	90.1	39.27	17.11	0.0048	0.00209	0	0.0024
	锦牵	103.0	44.89	19.55	0.0471	0.0205	2	0.0300
	丙牵	149.1	64.98	28.31	0.0411	0.0179	2	0.0235
	涤纶牵	107.9	47.04	20.50	0.1308	0.0570	6	0.1241
0.5016	涤纶初	65.6	32.91	16.51	0.0042	0.00202	0	0.0020
	锦牵	76.8	38.52	19.32	0.0510	0.0256	2	0.0310
	丙牵	104.9	52.62	26.40	0.0433	0.0217	2	0.0246
	涤纶牵	82.6	41.48	20.79	0.1455	0.0730	6	0.1247
0.5890	涤纶初	48.5	28.57	16.83	0.00349	0.00206	0	0.0024
	锦牵	57.0	33.57	19.75	0.0570	0.0337	2	0.0312
	丙牵	84.3	49.65	29.23	0.0486	0.0286	2	0.0250
	涤纶牵	60.0	35.37	20.83	0.1681	0.0990	6	0.1236
0.6328	涤纶初	41.6	26.32	16.66	0.00322	0.00204	0	0.0026
	锦牵	49.5	31.32	19.82	0.0340	0.0214	1	0.0388
	丙牵	76.2	48.22	30.52	0.0302	0.0191	1	0.0225
	涤纶牵	50.0	31.68	20.05	0.1501	0.0950	5	0.1244
0.6562	涤纶初	39.5	25.92	17.01	0.00317	0.00206	0	0.0021
	锦牵	45.7	29.99	19.69	0.0340	0.0226	1	0.0365
	丙牵	69.0	45.28	29.72	0.0303	0.0199	1	0.0229
	涤纶牵	47.7	31.30	20.54	0.1561	0.1024	5	0.1244

注：涤纶牵  $\bar{d} = 22.14\mu\text{m}$ ，涤纶初  $\bar{d} = 45.45\mu\text{m}$ ，锦牵  $\bar{d} = 23.85\mu\text{m}$ ，丙牵  $\bar{d} = 29.93\mu\text{m}$ 。

出  $n_{\parallel}$ 。

### 三、实验结果分析

1. 涤纶初生丝由于本身结构及工艺条件决定它的取向度很小, 结晶度仅在 2% 左右, 采用  $\Delta n_2$  公式计算值与贝克线计算值  $\Delta n$  大致相等, 可知涤纶初生丝的旋光度大致与入射光波长的平方成反比, 故涤纶初生丝的旋光性占主导地位, 与 Biot 的实验结果相同。

2. 锦纶牵伸丝, 当  $N=0$  时可认为  $\theta$  为中心消光角。  $\lambda^{2\theta}$  近似为常量, 相当于锦纶中心的消光角  $\theta$  与  $\lambda^2$  成反比, 旋光占主导地位。  $N \neq 0$  时, 双折射占主导地位。  $N \geq 2$  时, 双折射完全掩盖了旋光性。

3. 丙纶牵伸丝中心消光角  $\theta$  与  $\lambda^2$  大致成反比, 即丙纶牵伸丝中心旋光性占主导地位。 贝克线法测试的是纤维表面的双折射, 而色那蒙法测的是纤维截面的平均双折射, 对它们进行相关分析:

$$\Delta n = 0.01888 + 0.12458 \Delta n_1, \\ r = 0.9503$$

$$\Delta n = 0.01941 + 0.20015 \Delta n_2, \\ r = 0.7891$$

$$r_{0.05}(4) = 0.811$$

由相关分析可知,  $\Delta n_1$  计算值与  $\Delta n$  相关程度大,  $\Delta n_2$  计算值与  $\Delta n$  相关程度小。 我们可以把消光角与  $\lambda$  成反比看作是由双折射引起的, 而把消光角与  $\lambda^2$  成反比看作是由旋光性引起的, 丙纶牵伸丝的消光角  $(\theta + N\pi)$ , 双折射起主要作用旋光性也起作用, 但作用较小, 消

光角  $(\theta + N\pi)$  是双折射和旋光性迭加的结果。

4. 涤纶牵伸丝的中心消光角  $\theta$  与  $\lambda$  乘积差异较大, 而  $\lambda^{2\theta}$  之值相接近, 都在 20.50 左右。 根据 K.E. 彼列彼尔理论<sup>[1]</sup>: “合成纤维中心层有较小的取向和均一的宏观结构”。 故可知, 涤纶牵伸丝中心层与涤纶初生丝的性质相近, 即涤纶牵伸丝的中心层, 旋光性占主导地位。

### 四、结论

1. 研究合成纤维光学性质旋光性和双折射时, 可以统一采用琼斯矢量和琼斯矩阵解决偏振光相干迭加、合成和分解的问题。

2. 采用色那蒙补偿法的消光角  $(\theta + N\pi)$  是合成纤维旋光性和双折射性的总和。

3. 所有合成纤维其中中心层只具有较小的取向度和均一的宏观结构, 芯层旋光性占主导地位, 表层双折射性占主导地位, 其旋光性已被双折射所掩盖。

本文属山东省自然科学基金会资助项目, 并经严灏景、王喜山教授的指教, 在此表示感谢。

### 参考资料

- [1] [苏] K.E. 彼列彼尔金: 《化学纤维成形过程中的物理化学基础》。
- [2] 张宗杨: 《涤纶生产分析检验》, 纺织工业出版社, 1980。
- [3] 田志伟: 《偏振光及其应用》, 上海科技出版社, 1985。