

# 激光前向散射图形应用于硅树脂 涂复石英光纤的同心度监视

王建国 秦 晨 陈惠民

(中国科学院上海硅酸盐所)

**提要:** 激光前向散射技术也能用来保证硅树脂涂复石英光纤的同心度。本文用射线光学的原理解释了散射图形的产生及其变化,介绍了同心度监视方法在随机拉丝中的应用结果。

## Application of laser forward scattering pattern to monitoring centricity of silicone resin coated optical fibers

Wang Jianguo, Qin Chen, Chen Huimin

(Shanghai Institute of Ceramics, Academia Sinica)

**Abstract:** In this paper, it is indicated that laser forward scattering pattern can also be used to insure good centricity of silicone resin coated silica optical fibers. The generation and change of the pattern are explained by ray-optics principle. The feasibility of actual application of laser forward scattering pattern during the drawing-coating process is confirmed.

### 一、引 言

目前,人们已发现激光前向及背向散射是两种获得基本上对称涂层的有效技术。前者应用在折射率比石英玻璃高的涂层,如紫外光固化的丙烯酸环氧涂层。但 B. R. Eichenbaum<sup>[1]</sup>认为涂层的折射率减小时会减小散射图形的能见度。而后者应用在折射率比石英玻璃低的涂层<sup>[2,3]</sup>,我们认为激光前向散射原理同样也可应用于低折射率涂层,如硅树脂涂层。

### 二、理论分析

对于硅树脂涂复的石英光纤,涂层的折射率  $n_1=1.43$ ,玻璃的折射率  $n_2=1.457$ 。当我们用激光束垂直于光纤轴向入射时,出射光线形成前向散射图形,这散射图形与无涂层的裸纤维明显地不同(见图 1 及图 2)

由图 1 我们看到,在图形的两侧存在两个亮暗分明的干涉条纹带(图中用  $BA$  与  $B'A'$  标出),它们是否对中心对称与涂层同

收稿日期:1981年12月8日。

图1 涂层光纤前向散射图形示意图

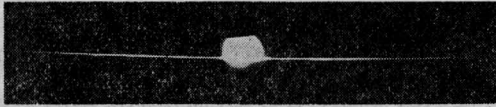


图2 裸光纤前向散射图形示意(为实拍照片)

心度有关。而裸纤维显然是不存在这种条纹带的。

这种散射干涉现象可以用射线光学原理来解释。

### 1. 基本假设

图3和图4各代表一根同心涂层光纤与不同同心涂层光纤的横断面。假定玻璃纤维与树脂涂层均为光学均匀的圆柱体。并且入射光是平行的,照射到纤维上的光强是均匀的。

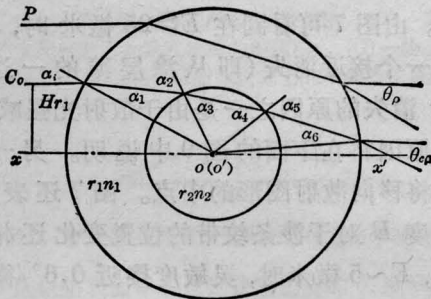


图3 同心涂层光纤的特征光线

$r_1$ —涂层光纤半径;  $r_2$ —玻璃纤维半径;  $n_1$ —涂层折射率;  $n_2$ —玻璃折射率;  $H$ —归一化高度( $X-X'$ 轴之上为正);  $E$ —偏心度( $X-X'$ 轴之下为正);  $\alpha$ —界面上的入射角或折射角;  $\theta$ —出射角(顺时针方向为正)

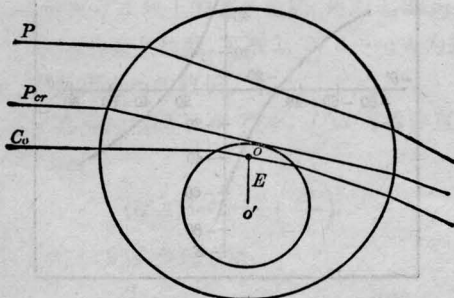


图4 偏心涂层光纤的特征光线

每条入射光线用其归一化高度  $H$  鉴别,即光线的高度由涂层半径  $r_1$  的分数表示:  $H = h/r_1$ 。实际上,  $\sin^{-1} H$  即为入射角。入射到纤维内的光线可分为两种特征光线: (1) 通过涂层和穿过纤维的标以  $C_0$  线; (2) 只通过涂层的标以  $P$  线。每条光线在各个界面上的转折可应用 Snell 定律来确定。

### 2. 在同心涂层光纤的情况下光线的追迹

当涂层与纤维同心时,用简单的几何光学就可以推导出(1)<sub>a</sub>和(1)<sub>b</sub>公式来描绘  $H$  与  $\theta$  间的关系。

对  $C_0$  光线:

$$\theta_A(H) = 2[\sin^{-1} H - \sin^{-1}(H/n_1) + \sin^{-1}(Hr_1/n_1r_2) - \sin^{-1}(Hr_1/n_2r_2)] \quad (1)_a$$

对  $P$  光线:

$$\theta_B(H) = 2[\sin^{-1} H - \sin^{-1}(H/n_1)] \quad (1)_b$$

由图3和公式(1)<sub>a</sub>可以看到,如果  $\alpha_2 = 90^\circ$  ( $\alpha_2$ 为光线在涂层/纤维界面上的入射角),即可得到临界归一化高度  $H_{cr} = n_1(r_2/r_1)$ ,同时公式(1)<sub>a</sub>变为(1)<sub>b</sub>,此时通过纤维内的光线正好与纤维/涂层的界面相切。设  $r_1 = 130$  微米,  $n_1 = 1.43$ ,  $r_2 = 60$  微米,  $n_2 = 1.457$ ,则同心硅树脂涂复的石英纤维其  $\theta-H$  图示于图5中。图上反映出两点:第一,当入射光线的  $H$  在  $0 \rightarrow H_{cr}$  ( $=0.66$ ) 范围内时属  $C_0$  光线,出射角随  $H$  变大。当  $H$  接近  $H_{cr}$  时,  $\theta$  迅速变大。其极值达  $49^\circ$ ; 当入射光线的  $H$  大于  $H_{cr}$  之后属  $P$  光线,出射角  $\theta$  突然下降为  $27.6^\circ$ ,然后又随  $H$  而逐步增大。第二,在  $\theta = 27.6^\circ \rightarrow 49^\circ$  的范围内存在着来自两种特征光线的两组相互平行的出射光线。因为它们经过不同的介质存在着光程差,因此发生了干涉现象。我们认为这就是激光前向散射图形中干涉带形成的原因,而开始产生干涉的与  $H_{cr}$  相应的  $\theta_{crB}$  位置就可以作为判别涂层位置的特征位置(即

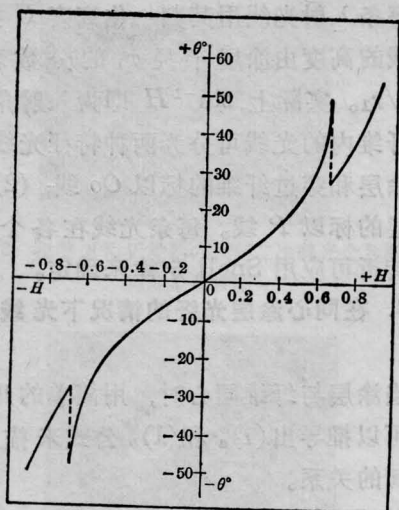


图5 同心涂层光纤出射角  $\theta$  与归一化高度  $H$  的关系

图1中的  $B$ (或  $B'$ )点)。

### 3. 偏心涂层光纤的光线追迹

由于在这种情况下存在偏心度  $E$ , 函数  $\theta(H, E)$  是一个复杂的函数, 我们不在此详细介绍它的计算方法。只是把计算的一个实例示于图6。此图取  $E=24$  微米, 并规定入射方向与  $E$  相垂直。纤维中心位置在涂层中心位置下面时,  $E$  为正向, 其它各参数与

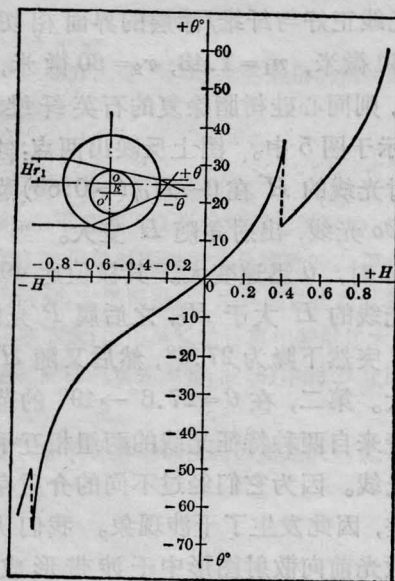


图6 偏心涂层光纤的出射角  $\theta$  与归一化高度  $H$  的关系

图5相同。比较图6与图5可以明显看到偏心度  $E$  对散射图形的影响, 散射图形相对于中心点( $H=0$ )不再是对称的, 但在一定角度范围内仍然存在出射光线相互重叠的情况。当  $E$  为正时, 从涂层厚的一边出射的  $\theta$  角变小, 使条纹带向中心移动, 而从涂层薄的一边出射的  $\theta$  角变大, 使条纹带离开中心。

### 4. 临界归一化高度 $H_{Cr}$ 和偏心度 $E$ 的关系

在  $H=H_{Cr}$  的特殊情况下,  $H_{Cr}$  和  $E$  的关系可用下面的公式(2)来表示

$$\sqrt{1 - \sin^2[\sin^{-1} H - \sin^{-1}(H/n_1)]} = \frac{|r_2 n_1 - H r_1|}{n_1 E} \quad (2)$$

再采用公式(1), 计算出相应的  $\theta_{CrB}$ 。利用这些关系, 我们系统地估计了偏心度  $E$  对散射图形中干涉条纹带位置的影响, 结果表示在图7。由图7可看到在  $E \geq 25$  微米时,  $\theta_{CrB}$  中的一个接近消失(即从涂层薄的一边出射), 消失的原因之一是由于散射光强减弱; 另一原因将在下面的图9中说明。另一个  $\theta_{CrB}$  将移向散射图形的中点。图7还表明, 偏心度  $E$  对干涉条纹带的位置变化还相当敏感,  $E \sim 5$  微米时, 灵敏度接近  $0.6^\circ/\text{微米}$ (即  $3^\circ/5$  微米)。如果观察屏与纤维间的距离为160毫米时, 干涉带位移达9毫米。

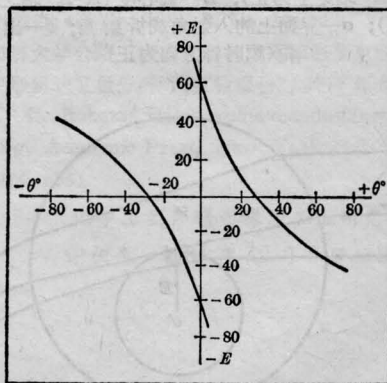


图7 偏心度  $E$  和  $\theta_{CrB}$  的关系  
 $n_1=1.43, r_1=130$  微米,  $n_2=1.457, r_2=60$  微米

### 5. 其他因素对临界出射角 $\theta_{CrB}$ 的影响

当光纤其他参数不变时, 临界角  $\theta_{CrB}$  与涂层折射率  $n_1$  有一定的关系, 如图 8 所示。 $\theta_{CrB}$  也随比值  $r_2/r_1$  的变化而变化, 如图 9 所示。

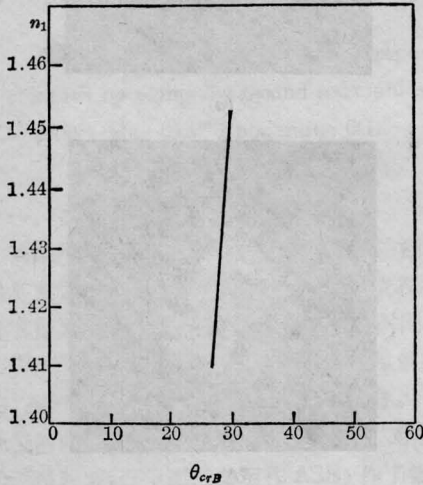


图 8 临界角  $\theta_{CrB}$  随涂层折射率  $n_1$  的变化  
( $r_2/r_1=0.4615$ ,  $n_2=1.457$ )

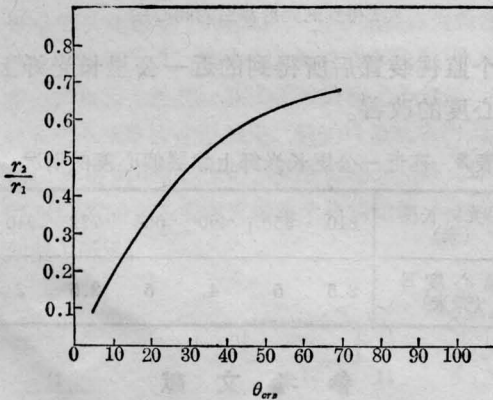


图 9 临界角  $\theta_{CrB}$  与半径比  $r_2/r_1$  的关系  
( $n_1=1.43$ ,  $n_2=1.457$ )

由图 9 可以知道: 当  $r_2/r_1$  小于某一数值时 ( $\sim 0.7$ ),  $\theta_{CrB}$  先是逐渐增大, 而后趋于一个极限值 ( $\sim 90^\circ$ ), 因此在散射图形上的干涉条纹可能消失。这就解释了为什么涂层很薄时, 或偏心度很大时 (即一边很薄时), 前向散射图形中观察不到条纹带, 或只能在一侧看到条纹带的现象。

### 三、静态试验

将一个直径约 146 毫米的筒型暗盒装在一台普通的工具显微镜的载物台上, 在暗盒的内壁贴附有 8 定的底片作为屏幕, 在暗盒中心竖立着的一根短光纤样品刚好也处于显微镜视场的中心, 一束 0.5 毫瓦的 He-Ne 激光经由一个可控的照相机快门垂直地射向光纤。由光纤引起的激光前向散射图形被投射在底片上。曝光前后对光纤的偏心度、几何尺寸等进行测量, 以便与拍摄的散射图形照片相对照。图 10 为由此实验装置摄取的一张典型的散射图形照片。由图可以知道被测光纤的涂层具有较好的对称性, 量取条纹带起点离开中心的距离分别为 41 毫米和 43 毫米。由此算得  $\theta_{CrB}$  各为  $32.3^\circ$  和  $34^\circ$ , 而由理论计算 (公式 (1)<sub>b</sub>) 求得的  $\theta_{CrB}=34.2^\circ$ , 两者还是相当接近的。表 1 列出了一些偏心涂层光纤的测量结果, 并与理论的计算作了对照。具体作法如下: 由显微镜测得光纤的实际涂层偏心度  $E_{实}$ , 由摄取的干涉图象照片测出条纹带起始点位置  $\theta_{CrB}$ , 用公式 (1)<sub>b</sub> 与 (2) 把此  $\theta_{CrB}$  转化成  $E$  值, 这  $E$  值则为  $E_{算}$ 。由表 1 的数值来看两者还是较为接近



图 10 由静态实验装置摄取的典型的散射图形照片

$r_1 \approx 68$  微米, 涂层厚度  $\sim 60$  微米,

表 1 测算  $E_{算}$  与实际  $E_{实}$  之间的比较

样品编号	条纹带位置 (毫米)	$E_{算}$ (微米)	平均 $E_{算}$ (微米)	$E_{实}$ (微米)
1	21(46)	20(15)	17.5	$\sim 16$
2	16.5(-)	32.5(-)	32.5	$\sim 35$
3	33(57)	10.5(8.1)	9.3	$\sim 7.5$

注: 样品 2 由于涂层严重的偏心, 只能测得一侧的条纹带位置。

的。两者之间的差别主要是由于测量误差、光纤的不圆度以及  $E$  方向与激光入射方向是否严格垂直等因素造成的。

#### 四、动态试验——在随机拉丝中的试验

上述的理论分析和静态试验说明了激光前向散射图形能够反映涂层的偏心情况，并且具有一定的灵敏度，干涉条纹带也容易辨认，因此我们就把它应用到光纤的控制工艺中。图 11 示意了在拉丝机上使用的交叉监视装置，该装置就放在涂层涂复系统的下面。

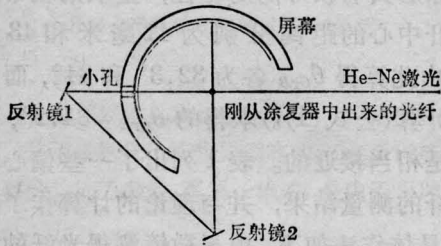
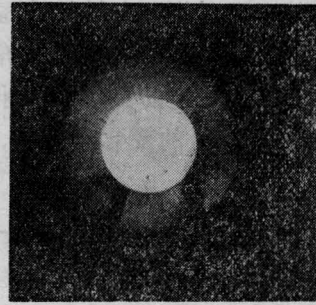
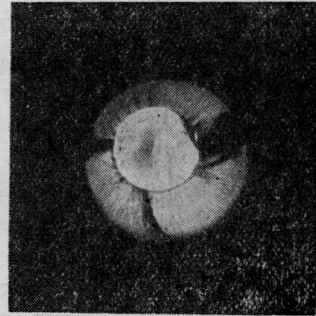


图 11 用于随机拉丝的交叉监视装置示意图

He-Ne 激光束垂直照射刚从涂复杯中穿出表面已附有一层硅树脂涂层的纤维。由纤维产生的散射光在前方的屏幕上构成了前向散射图形，由于在光线经过的方向开有一个小孔，很大一部分激光将穿过小孔到达反射镜 1 和反射镜 2 后，折向与原入射方向垂直的方向又射到纤维，结果在屏幕上与原来位置成  $90^\circ$  的方向上也产生了散射图形。为避免两个方向的散射图形相混杂，可调节反射镜 2 的仰角，使两个方向的激光沿纤维的轴稍偏一点距离。图 12 和表 2 表示了采用



(a)



(b)

图 12

(a) 为采用激光前向散射图形监视后的涂层同心度 (b) 为用过去的对中心方法得到的光纤涂层的同心度

这个监视装置后所得到的近一公里长光纤上同心度的改善。

表 2 在近一公里长光纤上涂层偏心度的情况

沿光纤长度 (米)	210	350	490	665	772	910
偏心度 $E$ (微米)	2.5	5	4	5	2.5	2

#### 参 考 文 献

- [1] B. R. Eichenbaum; *BSTJ*, 1980, **59**, No. 3, 313~332.
- [2] H. M. Presby; *BSTJ*, 1976, **55**, No. 10, 1525~1537.
- [3] D. Marcuse *et al.*; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, 2333.