

# 光纤端面研磨加工的表面质量\*

刘德福 段吉安 钟 掘  
(中南大学机电工程学院 长沙 410083)

摘要：研究光纤端面研磨时高质量表面的形成机理已成为提高光纤连接器质量和制造效率的重要课题。选用粒度为 0.5~6.0 μm 金刚石磨料砂纸，在 KE-OFP-12 型光纤连接器研磨机上对光纤端面进行研磨，发现光纤研磨加工存在脆性断裂、半脆性半延性和延性等三种材料去除模式，且材料去除模式主要由磨料粒度控制，磨料粒度为 3 μm 时，为其脆延转换的临界点，并从理论上对其进行了分析。试验证明以延性去除得到的光纤表面粗糙度远低于以脆性断裂去除得到的表面粗糙度，是提高光纤研磨表面质量的有效途径。光纤以延性模式研磨加工时，光纤表面粗糙度可达到 5 nm，其表面看不到任何划痕，可使光纤连接器的插入损耗及回波损耗等光学性能满足高速、宽带光纤通信的要求。

关键词：光纤研磨 材料去除模式 表面粗糙度 表面形貌

中图分类号：TG580.68 TN253

## 0 前言

光纤连接器是实现光纤之间活动连接的无源光器件，它具有将光纤与有源器件、光纤与其他无源器件、光纤与系统和仪表进行活动连接的功能。目前，光纤通信技术正在向高带宽、高数据速率的方向发展，在性能上要求光纤连接器的插入损耗更低、回波损耗更高<sup>[1]</sup>，因此，有必要对光纤连接器的制造机理进行深入研究。光纤连接器制造过程中的一道关键工序就是光纤端面的研磨，由于光纤属于硬脆玻璃材料<sup>[2]</sup>，加工时材料去除机理一般为脆性断裂<sup>[3-4]</sup>，如果不采取合适的措施，加工过程中就不可避免地要产生大量的微裂纹或凹坑，造成其表面粗糙度较高，这样容易引起光信号的散射和吸收，对提高光纤连接器的光学性能是极为不利的<sup>[5]</sup>。M.UDREA 等<sup>[6]</sup>利用低功率 CO<sub>2</sub> 激光光源对光纤端面进行抛光加工，虽然其表面质量有所改善，但抛光后光纤端面的表面粗糙度仍高达 0.1 μm，插入损耗的最佳值还高达 1.45 dB，不能满足光纤通信发展的要求<sup>[1]</sup>。参考文献[7-9]认为对陶瓷、玻璃等脆性材料进行磨削、研磨加工时，只要磨粒的切削深度小于与工件材料性能相关的某临界值，脆性材料就会以塑性流动方式去除，从而可获得表面粗糙度达到纳米级的加工表面，并通过试验进行了论证。参考文献[10-11]对光纤连接器端面研磨及抛光工艺进行了研究，但对光纤研磨加工的材料去除机理还未

涉及到。选用粒度为 0.5~6.0 μm 的固着金刚石磨料的研磨砂纸，对光纤进行了大量研磨加工试验，通过扫描电子显微镜(SEM)观察已研磨的光纤表面形貌，研究了光纤研磨加工的材料去除机理；利用非接触式光学表面轮廓仪(WYKO)测量了研磨光纤表面的粗糙度及表面微观形貌，并讨论了光纤表面粗糙度与连接器性能的关系。

## 1 光纤及磨粒材料性能

光纤是由纯度达 99.999% 以上的 SiO<sub>2</sub> 组成的非晶态石英玻璃<sup>[2]</sup>，具有高硬度和低断裂韧性，表现出高度脆性的性质，从而导致光纤在精密加工过程中，容易出现脆性裂纹。选用的磨粒材料为人工合成多晶金刚石。表 1 列出了与所探讨的光纤研磨加工机理有关材料力学性能，石英光纤的维氏显微硬度由 MHT-4 型显微硬度计测量得到，其他参数由参考文献[2, 12]查得。

表 1 石英玻璃光纤及金刚石磨料的材料性能

材料	维氏显微硬度 HV/GPa	弹性模量 E/GPa	断裂韧度 K <sub>IC</sub> /(MPa·M <sup>1/2</sup> )	泊松比 μ
石英光纤	6.654	72.1	0.794	0.17
金刚石磨料	-	975	-	0.25

## 2 光纤端面研磨试验

试验均在 KE-OFP-12 型光纤连接器研磨机上进行。该机器采用行星轨道式运转机构，通过调节其齿圈及主轴转速可得到不同的研磨运动轨迹，使得光纤端面的每一点及研磨砂纸产生均匀磨损<sup>[13]</sup>；

\* 国家自然科学基金(50235040)和教育部新世纪人才支持计划(NCET-04-0753)资助项目。20050121 收到初稿，20050720 收到修改稿

其研磨压力也可在 0.32 ~ 1.28 MPa 之间调节。为使连接器对接时两光纤端面物理接触,陶瓷插芯端部要求预磨成球面<sup>[14]</sup>。研磨垫由弹性非常好的橡胶做成,用树脂固结的金刚石磨料研磨砂纸置于橡胶垫上,这样,在研磨光纤端面时仍可保证插芯端部为球面,如图 1 所示。

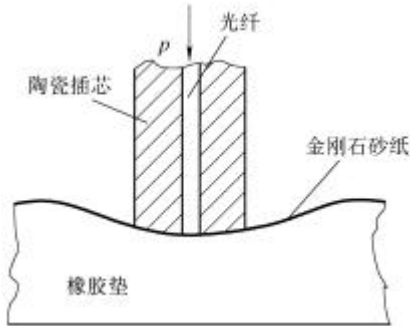


图 1 光纤端面研磨

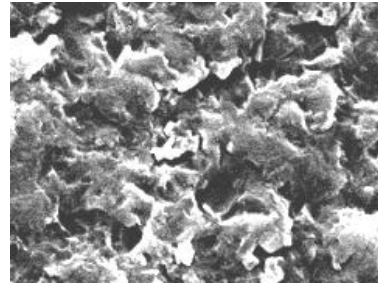
将去掉涂覆层的光纤(直径为 125  $\mu\text{m}$ )穿入一个精度非常高的陶瓷插芯(外径为 2.5 mm,内孔直径为 126  $\mu\text{m}$ )内,用 353ND 双组分环氧树脂胶将两者粘结在一起,将其放入温度为 120 固化炉中固化 2 min。将连接器分成 4 组,然后分别用平均粒度为 6、3、1、0.5  $\mu\text{m}$  的固着金刚石磨料砂纸研磨 2 min。为保证陶瓷插芯端部的球面半径合乎标准<sup>[14]</sup>,设定名义研磨压力  $p=0.48$  MPa。研磨完成后,将光纤连接器置入无水酒精中,用超声波清洗机清洗 5 min。

采用 KYKY - 2800 型扫描电子显微镜(SEM)观察研磨后的光纤表面,用 MFH - III 型非接触式光学表面轮廓仪(WYKO)测量表面粗糙度。光纤连接器回波损耗值的测量采用 RIFOCS 588RL 回损仪,插入损耗值的测量采用 RIFOCS 575L 光功率计。

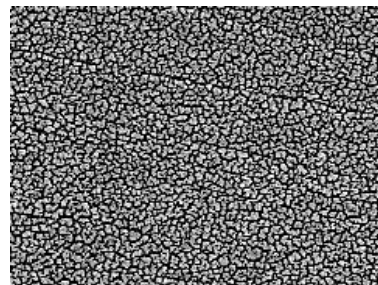
### 3 光纤研磨的材料去除机理

图 2 所示是采用不同粒度金刚石砂纸研磨的光纤端面表面形貌,为放大 3 000 倍的扫描电子显微镜图像。图 2a 是平均粒度为 6  $\mu\text{m}$  金刚石砂纸研磨得到的光纤粗糙表面,表面不透明,有较多的凹坑,呈现出片状剥落形式,表明光纤材料以脆性断裂模式去除;图 2b 是平均粒度为 3  $\mu\text{m}$  金刚石砂纸研磨得到的表面,其上存在裂纹及断续的研磨条纹,但研磨表面也出现了塑性变形,材料是以半脆性半延性模式去除;图 2c 及图 2d 是平均粒度分别为 1  $\mu\text{m}$ 、0.5  $\mu\text{m}$  金刚石砂纸研磨得到的光纤表面,其上看不到任何的微裂纹及划痕缺陷,表明微细颗粒的磨料使光纤表面材料产生了塑性流动,表面的凹凸

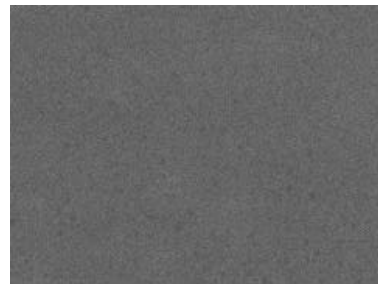
受到挤压而变平,光纤此时处于延性研磨模式。可见,用平均粒度为 0.5 ~ 6.0  $\mu\text{m}$  金刚石砂纸研磨光纤时,存在三种材料去除模式:脆性断裂模式、半脆性半延性模式和延性模式。



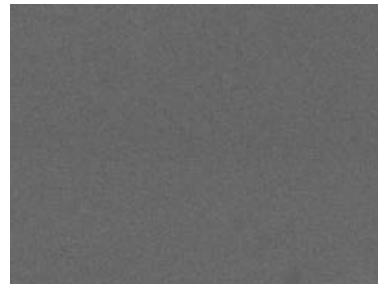
(a) 6  $\mu\text{m}$  金刚石磨料研磨表面



(b) 3  $\mu\text{m}$  金刚石磨料研磨表面



(c) 1  $\mu\text{m}$  金刚石磨料研磨表面



(d) 0.5  $\mu\text{m}$  金刚石磨料研磨表面

图 2 研磨后的光纤端面 SEM 表面形貌  $\times 3\ 000$

要使光纤端面得到优良的表面质量,在研磨时应避免出现脆性断裂研磨模式,而应采用使光纤材料出现塑性流动的延性研磨模式。已有的研究证明,玻璃等脆性材料在适当的加工条件下,当裂纹扩展所需的能量大于塑性变形所需的能量时,就可以实现脆延转变,材料以延性模式去除,从而得到粗糙度很低的光滑表面<sup>[7-9]</sup>。

BIFANO 等<sup>[7]</sup>应用显微压痕法建立了磨削玻璃

材料时实现脆延转变的条件，即单个磨粒的切削深度应小于脆性材料的临界切削深度。

$$d_c = 0.15 \left( \frac{E_f}{HV_f} \right) \left( \frac{K_{IC}}{HV_f} \right)^2 \quad (1)$$

式中  $E_f$ ——光纤材料的弹性模量  
 $HV_f$ ——光纤材料的维氏显微硬度  
 $K_{IC}$ ——光纤材料的断裂韧度

将表1中石英玻璃光纤的材料性能值代入式(1)，得到光纤的临界切削深度  $d_c=0.023 \mu\text{m}$ 。在研磨过程中，当磨粒的切削深度低于其脆延转变的临界切削深度时，即可在延性模式下研磨出高质量的光纤端面。

当金刚石磨粒的粒度小于  $20 \mu\text{m}$  时，可将磨粒近似看成为球形，通过对研磨过程中磨粒与工件的接触状态进行分析，应用 Hertz 接触理论<sup>[15]</sup>，得到单颗金刚石磨粒的切削深度

$$d = (1 - K_a) K_p \left( \frac{3\pi HV_f}{4E^*} \right)^2 \frac{D_a}{2} \quad (2)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - u_a^2}{E_a} + \frac{1 - u_f^2}{E_f} \quad (3)$$

式中  $K_a$ ——磨粒浓度，磨粒在砂纸上所占面积的百分比  
 $K_p$ ——研磨压力系数，为量纲一值，其值等于名义研磨压力  $p$   
 $D_a$ ——磨料粒度  
 $E^*$ ——等效弹性模量  
 $E_a$ ——磨料的弹性模量  
 $u_f$ ——光纤材料的泊松比  
 $u_a$ ——磨料的泊松比

运用 SEM 对砂纸进行分析，估算出  $K_a$  0.5；设定的名义研磨压力  $p=0.48 \text{ MPa}$ ，即  $K_p=0.48$ ；将表1中石英玻璃光纤及金刚石磨料的材料性能值代入式(2)，得到不同粒度磨粒的切削深度，如表2所示。

表2 不同粒度磨粒的切削深度

磨料粒度 $D_a / \mu\text{m}$	切削深度 $d / \mu\text{m}$
6	0.037 6
3	0.018 8
1	0.006 3
0.5	0.003 0

对照图2所示的光纤研磨后的表面形貌及材料去除模式，当金刚石磨料平均粒度为  $6 \mu\text{m}$  时，大部分磨粒的切削深度为  $0.037 6 \mu\text{m}$  左右，大于临界切深，光纤材料以脆性断裂模式去除；当金刚石磨料平均粒度为  $3 \mu\text{m}$  时，磨粒的切削深度为  $0.018 8 \mu\text{m}$ ，

与临界切削深度  $d_c$  相近，但是，实际上有部分磨粒尺寸大于  $3 \mu\text{m}$ ，从而使这部分磨粒的切削深度大于临界切深，因而材料去除表现为半脆性半延性；当金刚石磨料平均粒度小于  $1 \mu\text{m}$  时，绝大部分磨粒的切削深度小于临界切深，光纤表面材料产生塑性流动，以延性模式去除。

#### 4 连接器性能与磨料粒度的关系

通过非接触式光学表面轮廓仪测量由不同粒度砂纸研磨 2 min 后的光纤表面粗糙度，得到金刚石磨料粒度与表面粗糙度  $R_a$  (分别为各组连接器的平均值)的关系曲线如图3所示，光纤表面粗糙度与研磨时材料的去除模式有关。随着材料去除模式从脆性断裂去除到延性去除的转变，表面粗糙度在半脆性半延性去除模式的临界点(磨料粒度为  $3 \mu\text{m}$ )存在一个转折点，在延性去除模式时，表面粗糙度值随磨料粒度变化比较平缓，而在脆性断裂去除模式时，表面粗糙度值随磨料粒度减小而迅速降低。图4示出了用  $0.5 \mu\text{m}$  金刚石磨料研磨 2 min 后光纤表面微观形貌的过滤图形，其表面粗糙度  $R_a=5.18 \text{ nm}$ ，在其表面看不到任何划痕。

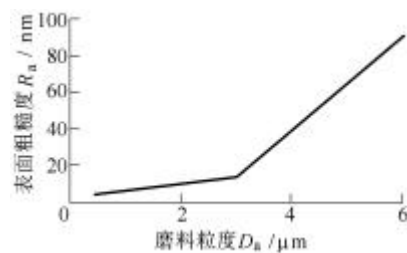


图3 研磨压力为 0.48 MPa 时金刚石磨料粒度与光纤表面粗糙度的关系

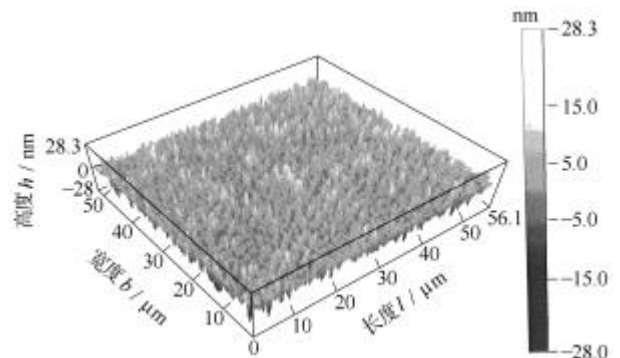


图4 0.5 μm 金刚石磨料研磨后光纤表面微观形貌

对光纤进行精密研磨的目的就是要提高光纤连接器的回波损耗值以及降低其插入损耗值，图5所示为光纤端面用不同粒度的金刚石磨料砂纸分别研磨 2 min 后，测得的磨料粒度与光纤连接器回波损耗及插入损耗的关系。对照图3所示的金刚石磨

料粒度与光纤表面粗糙度的关系,连接器的插入损耗及回波损耗与光纤表面的粗糙度存在对应关系,表面粗糙度值越低,光纤连接器的插入损耗值越小,回波损耗值越高。例如,采用  $1\ \mu\text{m}$  粒度的金刚石砂纸研磨光纤 2 min,其表面粗糙度  $R_a=6.09\ \text{nm}$ ,连接器插入损耗仅为 0.06 dB,回波损耗高达 36.28 dB,完全可以满足高速、宽带光纤通信的要求<sup>[1]</sup>。因此,要提高连接器的光学性能,应努力降低光纤研磨表面粗糙度,选用粒度小于  $1\ \mu\text{m}$  的金刚石砂纸,使得光纤材料以延性模式去除。

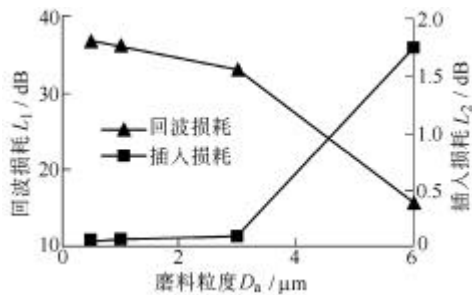


图 5 磨料粒度与回波损耗及插入损耗的关系

## 5 结论

在 KE-OPF-12 型光纤连接器研磨机上,采用树脂粘结的金刚石磨料砂纸研磨光纤,结合 SEM 及 WYKO 等测量手段,得到如下结论。

采用平均粒度为  $0.5\sim 6.0\ \mu\text{m}$  金刚石磨料砂纸,研磨压力为 0.48 MPa 时,光纤研磨加工存在脆性断裂、半脆性半延性、延性等三种材料去除模式,研磨模式主要由磨料粒度控制。当磨料粒度大于  $3\ \mu\text{m}$  时,光纤产生脆性破坏以断裂模式去除;当磨料粒度小于  $3\ \mu\text{m}$  时,光纤表面产生塑性流动而以延性模式去除。

(2) 光纤表面粗糙度与研磨时材料的去除模式有关,在延性去除模式时,表面粗糙度随磨料粒度变化比较平缓;而在脆性断裂去除模式时,表面粗糙度随磨料粒度减小而迅速降低。

(3) 以延性模式研磨加工光纤端面时,光纤表面粗糙度可达到  $5.18\ \text{nm}$ ,其表面看不到任何划痕,可使光纤连接器的插入损耗及回波损耗等光学性能满足高速、宽带光纤通信的要求。

## 参 考 文 献

- [1] 林学煌. 光无源器件[M]. 北京:人民邮电出版社,1998.
- [2] 扎齐斯基·J. 玻璃与非晶态材料[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [3] 辛企明. 光学玻璃金刚石加工机理初探[J]. 仪器仪表

学报,1990,11(2):216-219.

- [4] NAMBA Y, ABE M. Ultraprecision grinding of optical glasses to produce super-smooth surfaces[J]. Annals of CIRP, 1993, 42(1): 417-420.
- [5] AVRAME, MAHMOOD W, ÖZER M. Quantification of scattering from fiber surface irregularities[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(4): 634-637.
- [6] UDREA M, ORUN H, ALACAKIR A. Laser polishing of optical fiber end surface[J]. Optical Engineering, 2001, 40(9): 2 026-2 030.
- [7] BIFANO T G, DOW T A, SCATTERGOOD R O. Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials[J]. Journal of Engineering for Industry, 1991, 113(5): 184-189.
- [8] ONG N S, VENKATSH V C. Semi-ductile grinding and polishing of Pyrex glass[J]. Materials Processing Technology, 1998, 83: 261-266.
- [9] 陈明君,董申,李旦,等. 脆性材料超精密磨削时影响表面质量因素的研究[J]. 机械工程学报,2001,37(3): 1-4.
- [10] TAKAHASHI M. Elastic polishing plate method and conditions for forming angled convex surface on ferrule endface[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(9): 1 675-1 680.
- [11] LIN S I. Effect of polishing conditions on terminating optical connectors with spherical convex polished ends[J]. Applied Optics, 2002, 41(1): 88-95.
- [12] XIE Y S, BHUSHAN B. Effect of particle size, polishing pad and contact pressure in free abrasive polishing[J]. Wear, 1996, 200: 281-295.
- [13] 吴宏基,曹利新,刘健. 基于行星式平面研磨机研抛过程的运动几何学分析[J]. 机械工程学报,2002,38(6): 144-147.
- [14] SHINTAKU T, SUGITA E, Nagase R. Highly stable physical-contact optical fiber connectors with spherical convex ends[J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(2): 241-248.
- [15] JOHNSON K L. 接触力学[M]. 北京:高等教育出版社,1992.

## SURFACE QUALITY IN END-FACE LAPPING OF OPTICAL FIBER

LIU Defu DUAN Ji'an ZHONG Jue  
(College of Mechanical & Electronic Engineering,  
Central South University, Changsha 410083)

**Abstract:** The study on high quality surface formation mechanism in lapping of optical fiber end-face has become an important topic about improving performances of optical fiber connectors. With diamond abrasive lapping-films whose grain sizes are from 0.5  $\mu\text{m}$  to 6  $\mu\text{m}$  used, the optical fiber end-face lapping experiments are processed on optical fiber connector lapping machine, whose style is KE-OFP-12. The experimental results show that there are three material removal modes during lapping optical fiber, namely, brittle fracture mode, semi-brittle & semi-ductile mode, and ductile mode. These modes are mainly controlled by abrasive grain size. Brittle-ductile transition's critical point appears when the lapping-films whose abrasive grain size is 3  $\mu\text{m}$  are used to lap optical fiber; and they are analyzed theoretically. The surface roughness from ductile lapping mode is much less than that from brittle fracture

lapping mode, and the ductile lapping mode is an effective method that improves surface quality of fiber end-faces. The surface roughness  $R_a$  5 nm can be obtained and there are not any scratches and cracks on the fiber end-face when fiber material is removed by ductile mode; it makes insertion loss and return loss of optical fiber connectors meet the requirements of high-speed and broad-brand optical fiber communication.

**Key words :** Optical fiber lapping  
Material removal mode  
Surface roughness  
Surface topography

作者简介：刘德福，男，1971年出生，博士研究生，讲师。主要研究方向为超精密加工、CAD/CAM等，发表论文10余篇。

E-mail : liudefu@mail.csu.edu.cn

(上接第 186 页)

### APPLICATION OF SCALARIFORM MULTIPLE HOLE CONDITIONER ON HORIZONTAL ROTAMETER

GE Lijun ZHANG Tao YE Jiamin MA Kui  
(School of Electrical Engineering & Automation,  
Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract :** Flow measurement is strongly influenced by the velocity profile upstream the flowmeter. Flowmeters are designed and calibrated under the condition that the velocity is fully developed, while the disturbance such as swirl, cross-flow

and asymmetry will induce the system errors. Mounting conditioner is a effective way for solving this problem. A novel flow conditioner is presented based on computational fluid dynamics(CFD). Flow fields in the horizontal rotameter with and without the scalariform multiple holes conditioner are simulated. In order to testify the efficiency, the conditioner are installed in two different caliber rotameters and the field tests are carried out. In fact , the conditioner in the horizontal floater flowmeter decreases the uncertainty by 0.5%.

**Key words :** Conditioner CFD Rotameter Uncertainty

作者简介：葛利俊，男，1973年出生，博士研究生。主要研究方向为自动化仪表及检测装置方面的研究。

E-mail : lijunge0128@hotmail.com ; lijun\_ge@163.com