

文章编号 1004-924X(2004)06-0570-06

光纤端面研磨加工机理研究

刘德福,段吉安

(中南大学 机电工程学院,湖南 长沙 410083)

摘要:给出了研磨光纤时的材料去除机理,选用粒度为微米及亚微米级的金刚石磨料砂纸,在研磨压力为 0.48 MPa 时,在 KE-OFP-12 型光纤连接器研磨机上对光纤端面进行了研磨实验。结果表明:光纤研磨加工的材料去除存在脆性断裂、半脆性半延性、延性等 3 种模式。材料去除模式主要取决于磨料的平均粒度,磨料粒度为 3 μm 时,为脆性断裂到延性研磨的临界转换点。并从理论上对结果进行了分析,光纤以延性模式研磨加工时,光纤表面粗糙度 R_a 可达到纳米级,其表面看不到任何划痕,而光纤以脆性断裂模式研磨加工时,其表面粗糙度只能达到亚微米级,证明材料以延性模式去除是提高光纤表面质量的有效方法。

关键词:光纤研磨;脆延转变;延性去除;表面粗糙度

中图分类号: TG580.68, TN253 **文献标识码:** A

Mechanism research on lapping of optical fiber end-face

LIU De-fu, DUAN Ji-an

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The material removal mechanism in optical fiber lapping is presented. With diamond lapping-film whose abrasive grain size is from micron to sub-micron, when the nominal lapping pressure was 0.48 MPa, the optical fiber end-face lapping experiment was conducted on optical fiber connector lapping machine of KE-OFP-12. The experiment results show that there are three material removal modes during lapping optical fiber, i. e. brittle fracture mode, semi-brittle and semi-ductile mode, and ductile mode. These modes are mainly controlled by abrasive grain size; there appears brittle-ductile transition's critical point when the lapping-films whose abrasive grain size is 3 μm is used to lap optical fiber. And these material modes are analyzed theoretically. The surface roughness can reach nanometer grade and there are not any scratches and cracks on the fiber end-face when fiber material is removed by ductile mode; and only sub-micron grade surface roughness can be gotten when fiber material is removed by brittle fracture mode. It proves that the ductile lapping mode is an effective method that improves surface quality of fiber end-face.

Key words: optical fiber lapping; brittle ductile transition; ductile removal; surface roughness

收稿日期:2004-08-10;修订日期:2004-10-28.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(No. 502350400)

1 引言

目前,光纤技术一方面正在向高带宽、高数据速率的方向发展,另一方面在大力开发光纤到户技术,光纤连接器作为组成光纤系统最重要的光无源器件之一,在性能上要求其插入损耗更低、回波损耗更高^[1],以提高光纤传输系统可靠性。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^[2],加工时材料去除机理一般为脆性断裂^[3-4]。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裂纹或凹坑,造成其表面粗糙度较高,容易引起光信号的散射和吸收,这对改善光纤连接器的插入损耗及回波损耗等光学性能是极为不利的^[5]。M. Udrea^[6]等利用低功率 CO₂ 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。文献[7-11]认为对玻璃等脆性材料来说,要提高表面加工质量,使其表面粗糙度达到纳米级,只有使被加工的脆性材料的表面处于塑性流动状态,通过延性模式加工才能实现,实现延性加工的条件是:单个磨粒的最大切削深度应小于脆性材料的临界切削深度,而临界切削深度主要取决于被加工材料的力学性能。文献[12-13]仅对光纤连接器端面研磨及抛光工艺进行了研究,对光纤研磨加工的材料去除机理还未涉及到。本文选用平均粒度为 6~0.5 μm 的固着金刚石磨料的研磨砂纸,对光纤进行了研磨加工实验,通过扫描电子显微镜(SEM)观察研磨后的光纤表面形貌,研究了光纤研磨加工的材料去除机理,这对提高光纤连接器质量、开发高效的光纤研磨介质及全自动化光纤研磨设备是必不可少的。

2 实验

本文所述实验均在 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^[14];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,陶瓷插芯端部应研磨成球面,因此,研磨垫由弹性非常好的橡胶做成,金刚石磨料砂纸放置于橡胶垫上,这样,在研磨光纤端面时可保证插芯端部为球面,如图 1 所示。陶瓷插芯端部球面半径要求为 $17 \pm 2 \text{ mm}$ ^[15],实验发现,球面半径对研磨压力极为敏感,只有将名义研磨压力 P 设定为 0.48 MPa 时,才能研磨出合格的连接器。

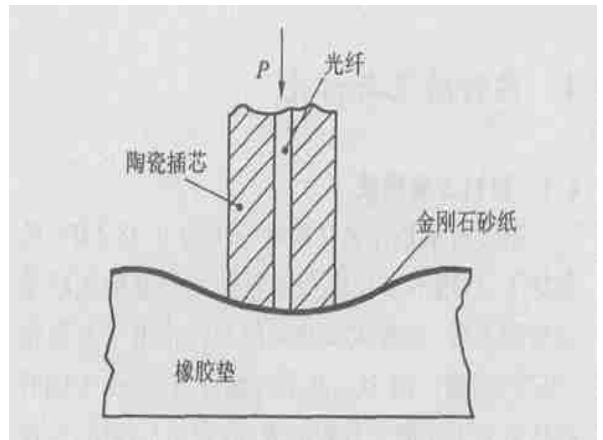


图 1 光纤端面研磨
Fig. 1 Lapping of optical fiber end-face

将去掉涂覆层的光纤(直径为 125 μm)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 μm)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,然后分别用平均磨料粒度为 6、3、1、0.5 μm 的固着金刚石磨料砂纸研磨 2 min。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,再将清洗干净的光纤连接器置于 KYKY-2800 型扫描电子显微镜(SEM)下进行表面形貌分析。

3 材料力学性能

光纤是由纯度达 99.999% 以上的 SiO₂ 组成的非晶态石英玻璃^[2],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。本文选用的磨粒材料为人工合成多晶金刚石。表 1 列出了与本文所探讨的光纤研磨加工机理有关材料的力学性能。

表 1 石英玻璃纤维及金刚石磨料的材料性能

Tab. 1 Material and properties of silex optical fiber and diamond abrasive

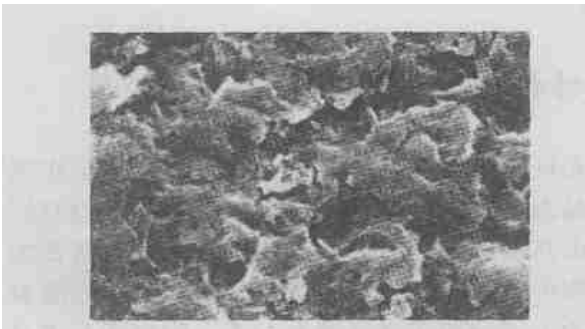
材料名称	维氏显微	弹性	断裂韧性	泊松比
	硬度 $H/$ GPa	模量 $E/$ GPa	$K_{IC}/$ MPa \sqrt{m}	ν
石英光纤	6.654 ^a	72.1 ^b	0.794 ^b	0.17 ^b
金刚石磨料		975 ^c		0.25 ^c

由 MHT-4 型显微硬度计测量得到;^b 参考文献[2];^c 参考文献[16]

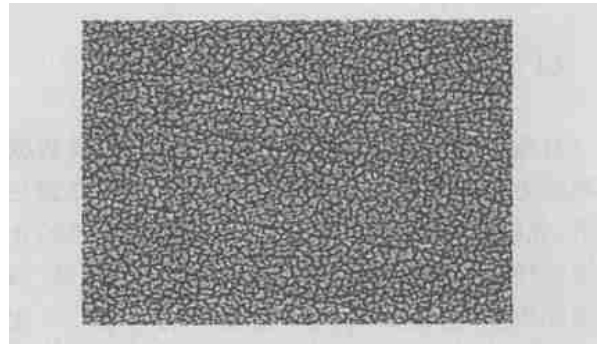
4 实验结果与讨论

4.1 材料去除模式

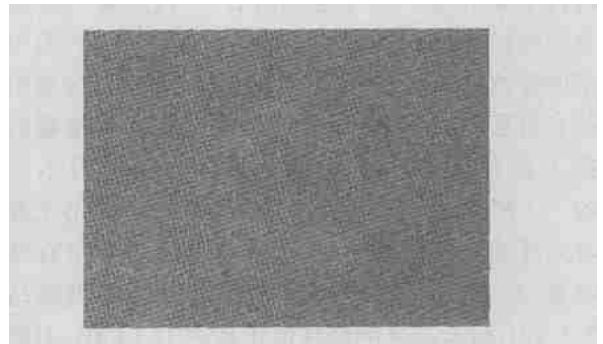
图 2 所示是在名义研磨压力为 0.48 MPa 的条件下,采用不同粒度金刚石砂纸研磨的光纤端面表面形貌,为放大 3 000 倍的扫描电子显微镜 (SEM) 图像。图 2(a) 是平均粒度为 6 μm 金刚石砂纸研磨得到的光纤粗糙表面,表面不透明,有较多的凹坑,呈现出片状剥落形式,表明光纤材料以脆性断裂模式去除;图 2(b) 是平均粒度为 3 μm 金刚石砂纸研磨得到的表面,其上存在裂纹及断续的研磨条纹,但研磨表面也出现了塑性变形,材料是以半脆性半延性模式去除;图 2(c) 及 (d) 是平均粒度分别为 1 μm 、0.5 μm 金刚石砂纸研磨得到的光纤表面,其上看不到任何的微裂纹及划痕缺陷,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 6 ~ 0.5 μm 金刚石砂纸研磨光纤时,存在 3 种材料去除模式:脆性断裂模式、半脆性半延性模式、延性模式。



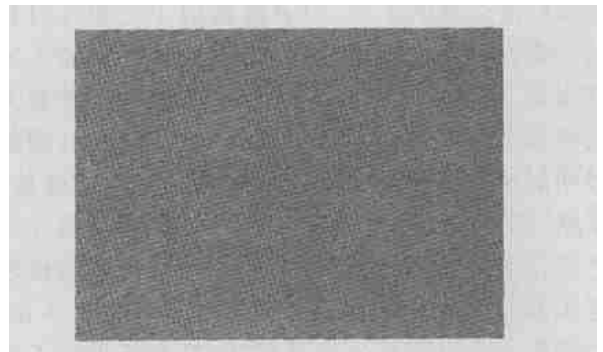
(a) 6 μm 金刚石磨料研磨表面
(a) Surface lapped by 6 μm diamond abrasive



(b) 3 μm 金刚石磨料研磨表面
(b) Surface lapped by 3 μm diamond abrasive



(c) 1 μm 金刚石磨料研磨表面
(c) Surface lapped by 1 μm diamond abrasive



(d) 0.5 μm 金刚石磨料研磨表面
(d) Surface lapped by 0.5 μm diamond abrasive

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

Fig. 2 Scanning electron micrographs of lapping surface of optical fiber end-face ($\times 3\ 000$)

4.2 表面粗糙度

通过非接触式光学表面轮廓仪 (WYKO) 测量由不同粒度砂纸研磨 2 min 后 (名义研磨压力为 0.48 MPa) 光纤表面的粗糙度,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,光纤研磨表面的粗糙度与磨粒尺寸并非线性关系,还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。因此,光纤表面粗糙度受材料去除模式的影响较为明显。以延性模式研磨加工光纤时,光纤表面粗糙度值 R_a 可达到 $5.18\ \text{nm}$,其表面看不到任何划痕。

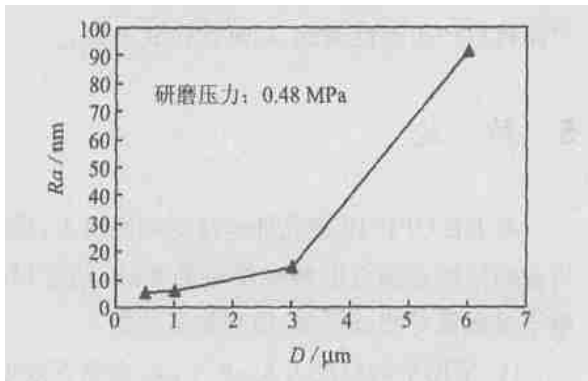


图 3 金刚石磨料粒度与光纤表面粗糙度的关系

Fig. 3 Relationship between diamond abrasive grain size and surface roughness of optical fiber

4.3 材料去除机理

固着磨料研磨加工光纤过程中,磨粒对光纤只有滑动挤压和犁削作用,而没有滚动挤压的作用,实质上是在磨粒刃的切向力和挤压力组合作用下,光纤表层产生材料去除的过程。单颗磨粒的受力状况如图 4 所示,磨粒相对于光纤沿 v 方向运动,在外载荷为 P_t 时,磨粒受到挤压力 P_1 及剪切力 P_2 的作用^[3]。光纤研磨过程中,当材料以脆性断裂模式去除时,主要是由于裂纹在光纤本体中的扩展,因为此时裂纹扩展所需的能量小于塑性变形所需的能量,这些裂纹深入到表面以下的某一深度并互相交错形成一个机械变弱层,它很容易被磨料的反复作用而去除,如图 5 (a) 所示;已有的研究证明^[7-11],玻璃等脆性材料在加工时,如果切削深度小于材料的临界切削深度(主要取决于材料的力学性能),那么裂纹扩展所需的能量就会大于材料塑性变形所需的能量,此时,加工表面的材料将出现塑性流动,材料去除即由脆性断裂转变为延性去除,如图 5 (b) 所示。因此,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。

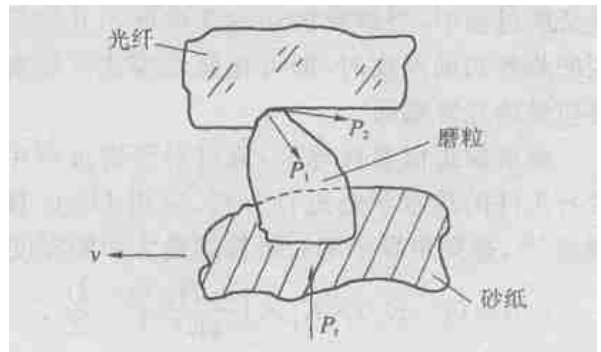
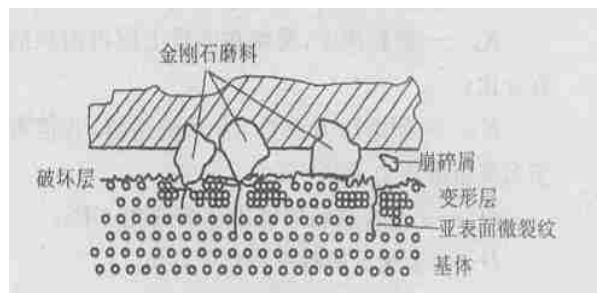


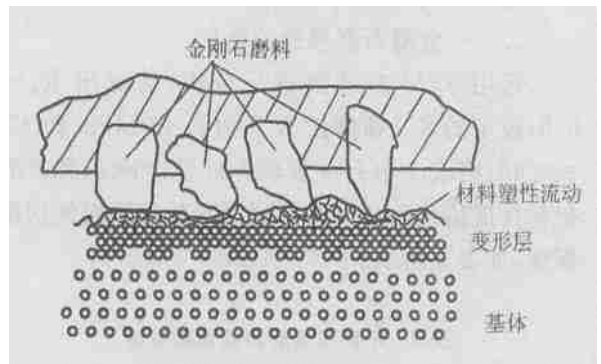
图 4 金刚石磨粒受力状况

Fig. 4 Load of diamond abrasive



(a) 脆性断裂去除模式

(a) Brittle fracture mode



(b) 延性去除模式

(b) Ductile mode

图 5 光纤研磨时的材料去除模式

Fig. 5 Material removal modes during lapping optical fiber

T. G. Bifano^[7]等应用显微压痕法,对玻璃等脆性材料的临界切削深度进行了定量研究:

$$d_c = 0.15 \left[\frac{E}{H} \right] \left[\frac{K_{IC}}{H} \right]^2, \quad (1)$$

式中, d_c ——实现脆延转变的临界切削深度, μm ;
 E ——光纤材料的弹性模量, GPa ;
 H ——光纤材料的维氏显微硬度, GPa ;
 K_{IC} ——光纤材料的断裂韧性, $\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ 。

将表 1 中石英玻璃光纤的材料性能值代入 (1) 式, 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。

将磨粒近似看成球形, 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^[17], 得到单颗金刚石磨粒的最大切削深度:

$$d = (1 - K_a) \times K_p \times \left(\frac{3 H_w}{4 E^*} \right)^2 \times \frac{D}{2}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \nu_w^2}{E_w}. \quad (3)$$

式中, d ——金刚石磨粒切削深度, μm ;

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, 为无量纲值, 其值等于名义研磨压力 P , MPa;

H_w ——光纤材料的维氏显微硬度, GPa;

D ——金刚石磨料平均粒度, μm ;

E_w ——光纤材料的弹性模量, GPa;

E_a ——金刚石磨料的弹性模量, GPa;

ν_w ——光纤材料的泊松比;

ν_a ——金刚石磨料的泊松比。

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 为 0.48 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 (2) 式, 得到不同粒度磨料的切削深度, 如表 2 所示。

表 2 不同粒度磨料的切削深度

Tab. 2 Cutting depth of abrasive of different sizes of abrasive

粒度/ μm	切深/ μm
6	0.037 6
3	0.018 8
1	0.006 3
0.5	0.003 0

参考文献:

- [1] 林学煌. 光无源器件[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1998:1-42.
LIN X H. *Passive optical devices*[M]. Beijing: The People's Post and Telecommunications Press, 1998:1-42. (in Chinese)
- [2] 扎齐斯基 J. 玻璃与非晶态材料[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
ZARZYCKI J. *Glasses and amorphous materials*[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)

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。

5 结 论

在 KE-OFP-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, 结合扫描电子显微镜等测试仪器, 得到如下结论:

采用平均粒度为 $6 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 金刚石砂纸, 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 3 种材料去除模式, 材料去除模式主要由磨料粒度控制。光纤材料以延性模式去除时, 表面的形成是材料塑性流动的结果, 而不是脆性断裂形成的。

光纤在研磨过程中, 当材料以延性模式去除, 可得到纳米级的表面粗糙度, 光纤表面用 SEM 放大 3 000 倍时, 看不到任何缺陷; 当材料以脆性断裂模式去除, 其表面粗糙度仅为亚微米级, 用 SEM 放大 3 000 倍时, 可以看到光纤表面不透明, 且呈现崩碎状。

要使研磨后的光纤表面满足高速、宽带光纤通信的要求, 应使用粒度小于 $3 \mu\text{m}$ 的金刚石砂纸进行研磨。

- [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.
XIN Q M. Cutting Mechanism research on optical glasses with diamond[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1990, 11(2): 216-219. (in Chinese)
- [4] 王平, 张春河, 张飞虎, 等. 光学玻璃的磨削加工方法[J]. 光学精密工程, 1996, 4(1): 53-58.
WANG P, ZHANG CH H, ZHANG F H, *et al.* Grinding manufacture of optical glass[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, 4(1): 53-58. (in Chinese)
- [5] AVRAM E, 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, ALACA KIR A. Laser polishing of optical fiber end surface[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(9): 2026-2030.
- [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] SINHOFF V. Generative precision grinding of optical glass[J]. *Annals of CIRP*, 1998, 47(1): 253-258.
- [9] ONG N S, VEN KATSH V C. Semi-ductile grinding and polishing of Pyrex glass [J]. *Materials Processing Technology*, 1998, 83: 261-266.
- [10] 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.
CHEN M J, DONG SH, LI D, *et al.* Study on the influence factors of the surfaces quality in ultra-precision grinding machining of brittle materials[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2001, 37(3): 1-4. (in Chinese)
- [11] 张文生, 张飞虎, 董申. 光学脆性材料的金刚石切削加工[J]. 光学精密工程, 2003, 11(2): 139-143.
ZHANG W SH, ZHANG F H, DONG SH. Diamond cutting of optical brittle materials[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(2): 139-143. (in Chinese)
- [12] TAKAHASHI M. Elastic polishing plate method and conditions for forming angled convex surface on Ferrule End-face [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(9): 1675-1680.
- [13] LIN S FEN. Effect of polishing conditions on terminating optical connectors with spherical convex polished ends[J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(1): 88-95.
- [14] 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.
WU H J, CAO L X, LIU J. Analysis of kinematic geometry on face grinding process on lapping machines[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(6): 144-147. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] XIE Y, BHUSHAN B. Effect of particle size, polishing pad and contact pressure in free abrasive polishing[J]. *Wear*, 1996, 200(1-2): 281-295.
- [17] JOHNSON K L. 接触力学[M]. 北京: 教育出版社, 1992: 96-174.
JOHNSON K L. *Contact mechanics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1992: 96-174. (in Chinese)

作者简介: 刘德福(1971 -), 男, 湖南茶陵人, 讲师, 中南大学机电工程学院微纳制造中心博士研究生, 研究方向为超精密加工、机械 CAD/CAM 等, 发表论文 10 余篇。Email: liudefu@mail.csu.edu.cn