

文章编号 1004-924X(2015)08-2243-07

光纤石英玻璃基板微 V 槽阵列的精密磨削

谢 晋*, 冯彦科, 程 剑, 吴可可

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要:针对脆性石英玻璃的微加工,利用自主研发的金刚石砂轮微尖端修整工艺,研发了光纤阵列石英玻璃微 V 槽磨削技术。分析了 60° 的微 V 槽形状偏差对光纤耦合损耗的影响,然后,研究了砂轮微尖端的误差补偿修整工艺。最后,实验分析了微 V 槽的磨削精度。理论分析显示:微 V 槽角度、间距和宽度的偏差分别控制在 $\pm 0.42^\circ$ 、 $\pm 1.04 \mu\text{m}$ 和 $\pm 1.2 \mu\text{m}$ 以内时,耦合损耗小于 0.5 dB。实验结果表明:开发的数控磨削工艺可加工高精度的 60° 微 V 槽阵列;采用数控轨迹和角度补偿修整后,砂轮微尖端半径可平均达到 $10.46 \mu\text{m}$,角度精度为 $(60 \pm 0.22)^\circ$;对石英玻璃进行微磨削后,微 V 槽的角度偏差达到 0.4° ,尖端半径为 $10.5 \mu\text{m}$,宽度偏差为 $0.3 \mu\text{m}$,间距偏差为 $0.5 \mu\text{m}$,可保证光纤阵列的精密对接。

关键词:光纤石英玻璃;光纤阵列;微 V 槽;微磨削;金刚石砂轮;微尖端;耦合损耗

中图分类号: TQ171.731; TN305.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152308.2243

Precision grinding of micro V-groove array on optical fiber quartz glass substrate

XIE Jin*, FENG Yan-ke, CHENG Jian, WU Ke-ke

(School of Mechanical and Automotive Engineering,
South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

* Corresponding author, E-mail: jinxie@scut.edu.cn

Abstract: As quartz glass is hard to be micro-machined, a self-researched truing technique of diamond wheel micro-tip was utilized to develop the grinding technique of micro V-groove arrays on the quartz glass. The influences of profile errors of 60° micro V-grooves on the coupling losses of optical fibers were analyzed. Then, the error compensation truing for grinding wheel micro-tip was researched. Finally, the grinding accuracy for micro V-grooves on quartz glass was experimentally investigated. The theoretical analysis indicates that when the angle, interval and the width of micro V-groove range $\pm 0.42^\circ$, $\pm 1.04 \mu\text{m}$ and $\pm 1.2 \mu\text{m}$, respectively, the coupling loss is less than 0.5 dB. The experimental results show that the Numerical Control (NC) precise grinding technique proposed can machine higher precise arrays, and the the V-tip angle and the radius of trued diamond wheel may reach $10.46 \mu\text{m}$ and $(60 \pm 0.22)^\circ$ by NC path and angle compensation truing, respectively. After micro-grinding of quartz glass, the micro V-groove shows an angle error of 0.4° , a tip radius of $10.5 \mu\text{m}$, a width error of $0.3 \mu\text{m}$ and an interval error of $0.5 \mu\text{m}$, which assures the precision connection of optical fiber ar-

收稿日期:2015-01-03;修订日期:2015-02-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61475046)

rays.

Key words: optical fiber quartz glass; optical fiber array; micro V-groove; micro-grinding; diamond wheel; micro-tip; coupling loss

1 引言

光纤阵列(Fiber Array, FA)是一种高集成、小型化和大数据传输的光学器件,已经被广泛用于光通信、医学、工业等领域^[1]。光纤阵列制作中的光通道密排法是在槽内紧密排放光纤,这种方法槽内平面的累计偏差大,且很难任意调节通道间距;微V槽阵列法是在基板上加工出微V槽阵列,光纤通过微V槽的两侧面定位,该方法定位简单、精确,且光纤的定位间距可任意调节^[1,2]。另外,U型槽、矩型槽等方法也已经被应用,但它们存在定位不稳定和受力裂变等问题^[1,3]。

在多根光纤集成对接时,微V槽阵列的极小几何偏差都会造成极大的耦合损耗^[4,5]。目前,微V槽阵列主要依靠于化学蚀刻、激光加工等方法,例如,蚀刻加工可制作深度为 $59\ \mu\text{m}$,宽度为 $164\ \mu\text{m}$ 的微V槽阵列硅基板^[6];激光加工可制作出深度为 $4.5\ \mu\text{m}$,宽度为 $6.5\ \mu\text{m}$ 的微V槽阵列硅基板^[7],但其工艺复杂、加工精度低,且硅存在各向异性,在加工中会损伤微V槽形状^[8,9]。

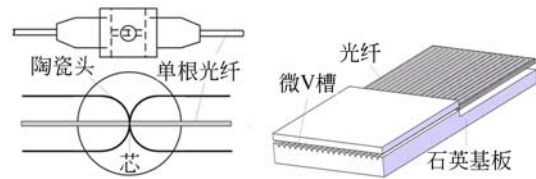
蚀刻加工可用来加工石英玻璃微V槽^[1],但难以控制形状精度,且加工效率低。虽然单晶金刚石刀具可加工纳米尺度的玻璃微V槽^[10],但当加工至微米深度时,会因微尖端磨损而无法保证微V槽的形状精度和表面质量^[11,12]。微磨削可以加工出微V槽透镜结构^[13],但形状精度尚未做详细的研究。

本文在自主开发的超硬金刚石砂轮微尖端修整技术的基础上^[14],研发光纤阵列石英玻璃基板的微V槽阵列精密磨削技术。首先,构建微V槽形状偏差对光纤耦合损耗的作用模型;然后,优化金刚石砂轮微尖端的修锐修整工艺;最后,开发微V槽阵列磨削技术,并分析了微加工精度及其影响。

2 光纤阵列对接的工作原理

图1所示为光纤对接示意图。通常,以单陶

瓷头进行单根光纤对接(图1a),其球头芯须抛光成镜面^[15]。为了实现光纤阵列对接,采用微V槽阵列的石英玻璃基板(图1b),光纤阵列通过微V槽进行定位,盖板固定,以确保微V槽的形状精度。



(a)单根光纤 (b)微V槽阵列的石英玻璃基板
(a)Single fiber (b)Quartz glass substrate using micro V groove

图1 光纤阵列对接的工作原理

Fig. 1 Connection theory of optical fiber array

3 微V槽阵列的形状偏差

3.1 微V槽的定位

图2所示为光纤阵列的定位偏差模型图。光

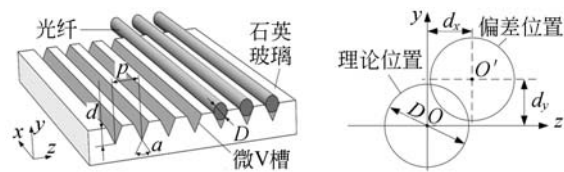


图2 光纤阵列的定位偏差

Fig. 2 Positioning offset of optical fiber array

纤定位精度依赖于微V槽结构形状,其参数为:深度 d 、间距 p 和角度 α 。光纤及微V槽结构参数如表1所示。定位偏差 d_0 包括 d_x 和 d_y 两个方向的偏移量:

$$d_0 = \sqrt{(d_x^2 + d_y^2)}, \quad (1)$$

定位偏差 d_0 引起的耦合损耗 $l^{[12]}$ 为:

$$l = -101\text{g}[\exp - (2d_0/D_0)^2]. \quad (2)$$

表 1 光纤微 V 槽的形状参数

Tab. 1 Shape variables of optical fiber micro V-groove

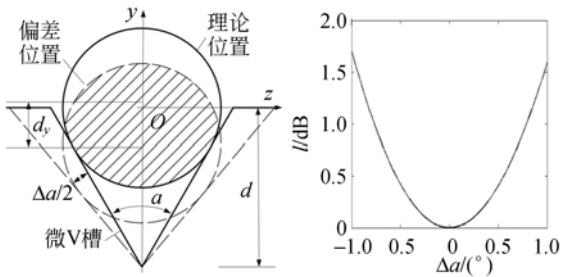
光纤直径 $D/\mu\text{m}$	纤芯直径 $D_0/\mu\text{m}$	微 V 槽深 度 $d/\mu\text{m}$	微 V 槽 夹角 $\alpha/(\text{°})$	微 V 槽 间距 $p/\mu\text{m}$
125	9.3	100	60	250

3.2 微 V 槽的角度 α

图 3 所示为微 V 槽角度偏差 $\Delta\alpha$ 与耦合损耗 l 的关系。角度偏差 $\Delta\alpha$ 导致竖直偏移量 d_y ：

$$d_y = \left| \frac{D}{2\sin \frac{\Delta\alpha + \alpha}{2}} - \frac{D}{2\sin \frac{\alpha}{2}} \right|. \quad (3)$$

耦合损耗 l 可以采用式(2)计算得到,其结果如图 3(b)所示。可以发现,当角度偏差 $\Delta\alpha$ 的绝对值增加到 0.5° 后,耦合损耗 l 快速增加。且角度偏差在 $\pm 0.42^\circ$ 以内时,耦合损耗 l 小于 0.5 dB 。



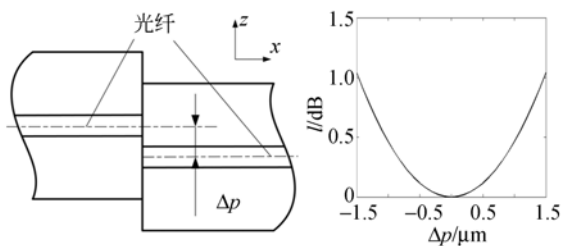
(a) 角度偏差 $\Delta\alpha$ (b) 耦合损耗 l
(a) Angle error $\Delta\alpha$ (b) Coupling loss l

图 3 角度偏差 $\Delta\alpha$ 与耦合损耗 l 的关系

Fig. 3 Angle error $\Delta\alpha$ versus coupling loss l

3.3 微 V 槽的间距 p

图 4 所示为微 V 槽间距偏差 Δp 与耦合损耗 l 的关系模型。间距偏差 Δp 使得光纤对接产生水平方向的偏移量 $d_x = \Delta p$ (图 4a)。耦合损耗可



(a) 间距偏差 Δp (b) 耦合损耗 l
(a) Interval error Δp (b) Coupling loss l

图 4 间距偏差 Δp 与耦合损耗 l

Fig. 4 Interval error Δp versus coupling loss l

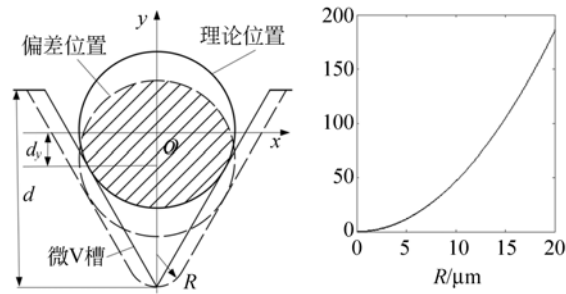
以采用式(2)计算得到,其结果如图 4(b)所示。可以发现,微 V 槽间距偏差 Δp 的绝对值增加到 $0.5 \mu\text{m}$ 后,耦合损耗快速增加。当 V 型槽间距偏差控制在 $\pm 1.04 \mu\text{m}$ 以内时,耦合损耗小于 0.5 dB (图 4b)。

3.4 微 V 槽的尖端半径 R

图 5 所示为微 V 槽的尖端半径 R 与耦合损耗 l 的关系模型。当微 V 槽加工中,其尖端因磨钝显现圆弧形,尖端半径为 R 。在进刀深度 d 不变的条件下,加工每个微 V 槽时以磨钝的砂轮尖端定位,尖端半径为 R 引起光纤产生竖直方向的偏移量 d_y ,可计算为:

$$d_y = \left| \frac{R}{\sin \frac{\alpha}{2}} - R \right|. \quad (4)$$

用公式(2)计算耦合损耗,其结果如图 5(b)所示。可以发现,耦合损耗 l 随着尖端半径 R 增加而增加。当尖端半径 R 大于 $10 \mu\text{m}$ 时,耦合损耗 l 达到 46 dB 。



(a) 尖端半径 R (b) 耦合损耗 l
(a) Tip radius R (b) Coupling loss l

图 5 尖端半径 R 与耦合损耗 l

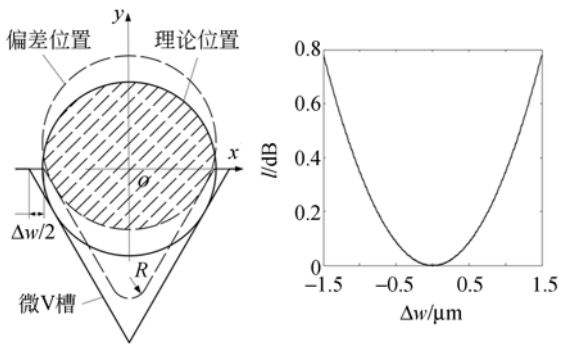
Fig. 5 Tip radius R versus coupling loss l

若以未磨损的砂轮尖端定位对刀,即使磨钝其宽度 w 不变,当尖端半径 R 小于光纤半径 ($62.5 \mu\text{m}$) 时,无耦合损耗。生产中建议以未磨损的初始砂轮尖端对刀,考虑到宽度磨损影响,实际推荐尖端半径 R 小于 $20 \mu\text{m}$ 。

3.5 微 V 槽的宽度 w

图 6 所示为微 V 槽宽度偏差 Δw 与耦合损耗的关系图。宽度偏差 Δw 导致光纤产生竖直方向的偏移量 d_y (图 6a),可计算为:

$$d_y = \left| \frac{\Delta w}{2\tan \frac{\alpha}{2}} \right|. \quad (5)$$



(a) 宽度偏差 Δw (b) 耦合损耗 l
 (a) Width error Δw (b) Coupling loss l

图 6 宽度偏差 Δw 和耦合损耗 l 的关系

Fig. 6 Width error Δw versus coupling loss l

耦合损耗可以采用式(2)计算得到,其结果如图 6(b)所示。可以发现,微 V 槽宽度偏差 Δw 的绝对值增加到 $0.5 \mu\text{m}$ 后,耦合损耗快速增加。微 V 槽宽度偏差在 $\pm 1.2 \mu\text{m}$ 时,耦合损耗小于 0.5 dB (图 6b)。

4 砂轮微尖端形状的补偿修整

图 7 所示为金刚石砂轮微尖端的修锐修整。转速为 N 的金刚石砂轮在通过砂轮轴心线的垂直截面上,沿着角度为 α_i 的交叉行走轨迹,以进给速度 v_f 进行直线插补运动,且不断向下进给 a ,逐渐与修整工具对磨,最后进行零修整 n_s 次,形成角度为 α_i 的砂轮微尖端^[16]。在修整中,先采用粗修整工艺,将金刚石磨粒从金属结合剂中修锐出来,然后,进行细修整,确保微尖端的形状精度。修整角度 $\alpha_i = 60^\circ$,修整条件如表 2 所示。

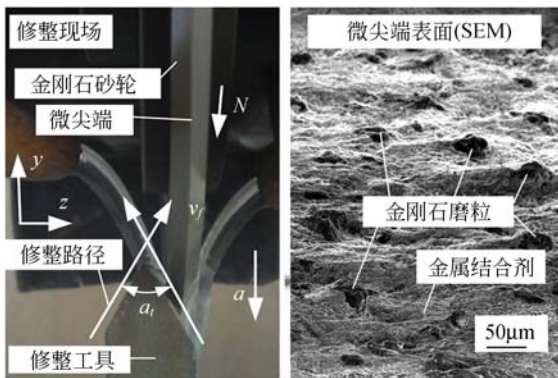


图 7 轮微尖端的修锐修整

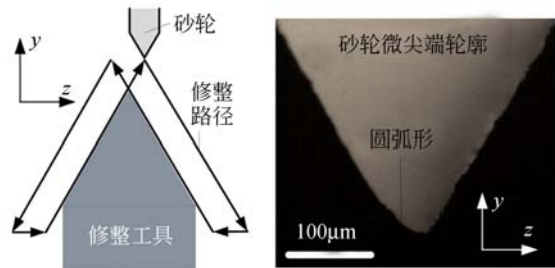
Fig. 7 Dressing and truing of wheel micro-tip

表 2 金刚石砂轮微尖端修整条件

Tab. 2 Truing conditions of diamond wheel micro-tip

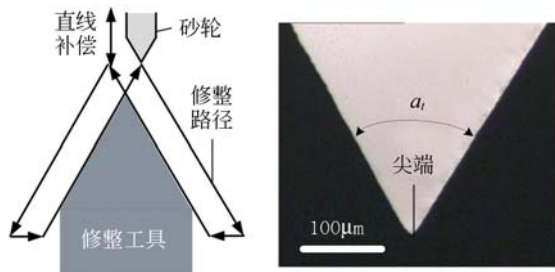
	N	Σa	a	v_f	n_s
	$/(r \cdot \text{min}^{-1})$	/mm	/mm	$/(mm \cdot \text{min}^{-1})$	
粗修整	1990	2.970	0.010	1500	0
精修整	1990	0.030	0.001	200	2

图 8 所示为修整路径对砂轮微尖端精度的影响。砂轮微尖端通过石墨板复制后检测。在插补行走中,因机床惯性使得砂轮微尖端修整成弯曲变形的较大圆弧(图 8a)。因此,采用垂直轨迹补偿修整后发现,微尖端半径可小于 $10 \mu\text{m}$ (图 8b)。研究中采用垂直轨迹补偿的修整方法。



(a) 补偿修整前

(a) Before compensation truing



(b) 补偿修整后

(b) After compensation truing

图 8 补偿修整的砂轮微尖端轮廓

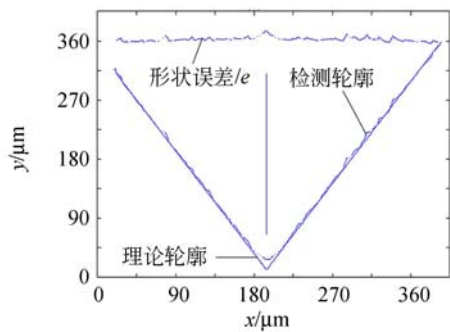
Fig. 8 Compensation trued wheel micro-tip profile

图 9 所示为修整中的金刚石砂轮微尖端轮廓参数变化图。修整后的尖端形状偏差 e 定义为砂轮微尖端轮廓检测点与理想轮廓点的垂直偏差。砂轮微尖端轮廓误差 PV 值定义为形状偏差 e 的峰谷差值的绝对值(图 9a)。可以发现,随着累计修整量 Σa 的增加,砂轮微尖端轮廓误差 PV 值、尖端半径 r 和角度 α_i 不断减小(图 9b~d)。最终,轮廓误差 PV 值稳定在 $20 \mu\text{m}$ 左右(图 9b);尖端半径 r 稳定在 $10 \sim 16 \mu\text{m}$ (图 9c),平均值为

13.8 μm ;砂轮微尖端角度 α_t 稳定在 $60\sim 61^\circ$ (图 9d),角度的平均偏差为 0.7° 。因此,该微修整工艺是可行的。

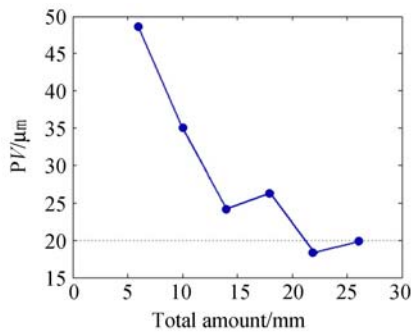
为了补偿机械运动误差,通过补偿角度重新设计了修整轨迹,角度补偿修整后的砂轮微尖端形状的检测结果如表 3 所示。可以发现,补偿修正后的砂轮微尖端角度 α_t 可控制在 $\pm 0.22^\circ$ 以内,远小于 $(60\pm 0.42)^\circ$ 的加工角度精度的要求。

此外,砂轮微尖端角度偏差的绝对平均值为 0.11° ,减少了 84%;尖端半径 r 小于 $11.5\ \mu\text{m}$,平均值为 $10.46\ \mu\text{m}$,减少了 24%;轮廓误差 PV 值平均达到 $18.6\ \mu\text{m}$,减少了 7%。结果表明误差



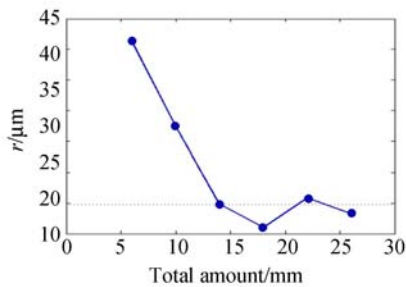
(a) 砂轮微尖端轮廓

(a) Wheel micro-tip profile



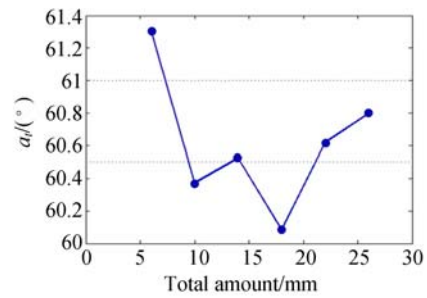
(b) 砂轮微尖端轮廓误差 PV 值

(b) Wheel micro-tip profile error PV



(c) 砂轮微尖端半径 r

(c) Wheel micro-tip radius r



(d) 砂轮微尖端角度 α_t

(d) Wheel micro-tip angle α_t

图 9 修整中的砂轮微尖端轮廓参数

Fig. 9 Trued wheel micro V-tip profile variables

补偿的数控对磨修整可以获得高精度的超硬金刚石砂轮微尖端。

表 3 补偿后的砂轮微尖端参数

Tab. 3 Compensated wheel micro V-tip variables

序号	$r/\mu\text{m}$	$\alpha_t/^\circ$	PV/ μm
微尖端 1	11.46	60.07	22.45
微尖端 2	9.12	60.04	16.64
微尖端 3	10.79	59.78	16.82

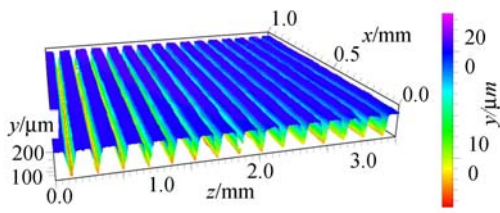
5 微 V 槽阵列的磨削加工

图 10 所示为石英玻璃基板微 V 槽阵列的磨削结果。利用精密修整的金刚石砂轮微尖端(图 8b)及其尖端表面分布的微磨粒切削刃(图 7b),以砂轮转速 N 带动微尖端上的微金刚石切削刃,对硬脆性材料进行亚微米尺度的塑性域切削^[17]。通过进给速度 v_f 的往复运动和微米尺度的进给 a ,逐渐将高精度的砂轮微尖端轮廓精密复制到石英玻璃上(图 10a)。因此,砂轮微尖端角度 α_t 与微 V 槽角度 α 一致。实验优化的微磨削工艺参数如表 4 所示。



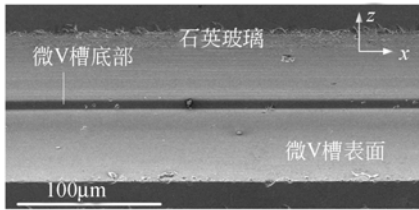
(a) 微 V 槽阵列的磨削

(a) Grinding of micro V-groove array



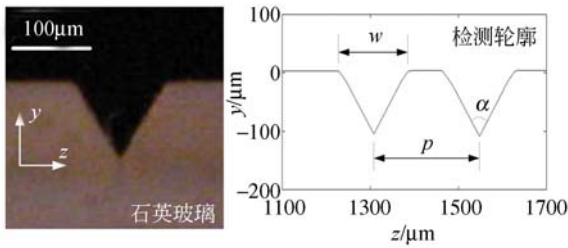
(b)基板微 V 槽检测的三维形貌

(b)Measured topography of micro V-grooves



(c)微 V 槽的 SEM 照片

(c)SEM photo of micro V-groove



(d)石英玻璃的微 V 槽轮廓

(d)Profile of micro V-groove on quartz glass

图 10 石英玻璃基板微 V 槽阵列的磨削效果

Fig. 10 Grinding results of micro V-groove array on quartz glass substrate

表 4 微 V 槽阵列的磨削条件

Tab. 4 Grinding conditions of micro V-groove array

	N	a	Σa	v_f	n_s
	$/(r \cdot \text{min}^{-1})$	$/\mu\text{m}$	$/\mu\text{m}$	$/(mm \cdot \text{min}^{-1})$	
粗加工	1990	5	90	500	0
精加工	1990	1	10	200	3

参考文献:

[1] 袁菁, 罗风光, 曹明翠. 一种新型的 I/O 光纤阵列接口制作方法[J]. 光通信技术, 2004(10):53-55. YUAN J, LUO F G, CAO M C. I/O fiber bundle arrays access device and its application in optical connection network [J]. *Optical Communication Technology*, 2004(10):53-55. (in Chinese)

[2] 梁静秋, 侯凤杰. 采用硅 V 型槽的一维光纤阵列的研制[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1):89-94. LIANG J Q, HOU F J. One-dimension optical fiber

白光干涉仪检测的微 V 槽阵列的微形貌如图 10(b) 所示, 可以发现微结构整齐光滑(图 10c)。用接触式泰勒轮廓仪检测后发现, 微 V 槽角度 α 为 60.4° , 偏差为 0.4° ; 尖端半径 R 为 $10.5 \mu\text{m}$; 宽度 w 为 $115.8 \mu\text{m}$, 偏差为 $0.3 \mu\text{m}$; 间距 p 为 $250.5 \mu\text{m}$, 偏差为 $0.5 \mu\text{m}$ (图 10d)。但是, 单点金刚石切削的微 V 槽有破碎, 且形状误差大^[12]。

因此, 微磨削技术可加工石英玻璃基板的微 V 槽阵列, 微 V 槽角度 α 达到 $(60 \pm 0.42)^\circ$, 槽间距为 $(250 \pm 1.04) \mu\text{m}$, 槽宽为 $(115.5 \pm 1.2) \mu\text{m}$ 。由此可保证光纤阵列对接的耦合损耗小于 0.5 dB 。

6 结 论

本文建立了光纤集成对接定位微 V 槽阵列的几何形状参数与光纤耦合损耗之间的理论模型。理论分析表明, 加工的微 V 槽角度、间距和宽度的偏差被分别控制在 $\pm 0.42^\circ$ 、 $\pm 1.04 \mu\text{m}$ 和 $\pm 1.2 \mu\text{m}$ 以内, 光纤阵列对接的耦合损耗小于 0.5 dB 。开发的数控对磨修锐修整工艺可以保证 60° 金刚石砂轮微尖端的形状精度。而且, 采用轨迹和角度的补偿修整后, 砂轮微尖端角度偏差、尖端半径和轮廓误差 PV 值可分别减小 84% 、 24% 和 7% , 分别达到 0.11° 、 $10.46 \mu\text{m}$ 和 $18.6 \mu\text{m}$ 。利用修锐修整的金刚石砂轮微尖端对石英玻璃基板进行微磨削, 可加工高精度的 60° 微 V 槽阵列。微 V 槽的角度偏差可达到 0.4° , 尖端半径为 $10.5 \mu\text{m}$, 宽度偏差为 $0.3 \mu\text{m}$, 间距偏差为 $0.5 \mu\text{m}$, 能够保证光纤阵列精密对接的性能要求。

array with silicon V-grooves [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 89-94. (in Chinese)

[3] 杨利. FA 光纤定位技术之流派浅析[J]. 信息通信, 2012(3):68-69. YANG L. Study on the location technology of optical fiber array [J]. *Information & Communications*, 2012(3):68-69. (in Chinese)

[4] 吴勇, 杨鹏翔, 陈绍武, 等. 基于光纤阵列的激光光斑测量方法[J]. 激光与粒子束, 2013, 25(2): 276-280. WU Y, YANG P X, CHEN SH W, et al.. Laser

- intensity distribution measuring method based on fiber array [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(2):276-280. (in Chinese)
- [5] 王润兰,陈青山. 基于显微视觉的光纤阵列精密测量研究[J]. *激光与红外*, 2014, 44(3): 288-292.
WANG R L, CHEN Q SH. Precision measurement of fiber array based on micro-vision [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(3): 288-292. (in Chinese)
- [6] YIN Z, GENG Y F, LI X J, *et al.*. V-groove all-fiber intermodal Mach-Zehnder interferometer and its high-temperature sensing application [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9157: 915720-1.
- [7] HAN N, PARK Y J, HAN M, *et al.*. Threading dislocation reduction in epitaxial GaN using V-groove patterned sapphire substrate with embedded silica nanospheres [J]. *Materials Letters*, 2014, 123:97-100.
- [8] 贾翠萍,董伟,周敬然,等. 硅基 MEMS 光开关光纤定位槽的设计[J]. *微细加工技术*, 2006(2):45-48.
JIA C P, DONG W, ZHOU J R, *et al.*. Influence of air plasma treatment on the performance of diamond films [J]. *Microfabrication Technology*, 2006(2):45-48. (in Chinese)
- [9] 侯凤杰,梁静秋,郭鹏,等. 高精度长线列密排光纤阵列的制作研究[J]. *微细加工技术*, 2007(1): 15-18.
HOU F J, LIANG J Q, GUO P, *et al.*. Fabrication of long-term high-precision optical fiber array of closely spaced columns [J]. *Microfabrication Technology*, 2007(1): 15-18. (in Chinese)
- [10] 谢晋,韦凤,田牧纯. 微纳 V 槽脆/塑性域切削的 3D 激光检测及评价[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2771-2778.
XIE J, WEI F, TAMAKI J. Laser measurement and evaluation for brittle / ductile cutting of micro / nano scale V-shaped groove [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2771-2778. (in Chinese)
- [11] 赵清亮,郭兵,杨辉,等. 金刚石飞切加工微结构表面的工艺参数优化[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10): 2512-2520.
ZHAO Q L, GUO B, YANG H, *et al.*. Technological parameter optimization of micro-structured surfaces by diamond fly-cutting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2512-2520. (in Chinese)
- [12] LEE J H, PARK S R, YANG SH, *et al.*. Fabrication of a V-groove on the optical Fiber connector using a miniaturized machine tool [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004 (155-156):1716-1722.
- [13] 谢晋,李萍,吴可可,等. 微结构表面精密磨削技术及其功能特性开发[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(23): 182-190.
XIE J, LI P, WU K K, *et al.*. Micro and precision grinding technique and functional behavior development of micro-structured surfaces [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(23): 182-190. (in Chinese)
- [14] 谢晋. 基于数控对磨成型的全金刚石砂轮 V 形尖角精密修整方法[P]. 中国, 201010503213.8, 2012-07-18.
XIE J. *The precision truing method of diamond wheel V-tip through NC mutual-wear* [P]. China, 201010503213.8, 2012-07-18.
- [15] 刘德福,段吉安. 光纤端面研磨加工机理研究[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(6): 570-575.
LIU D F, DUAN J A. Mechanism research on lapping of optical fiber end-face [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 570-575. (in Chinese)
- [16] 谢晋,谭廷武,郑佳华,等. 金刚石砂轮 V 形尖角的数控对磨微细修整技术研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2010, 30(5): 1-5.
XIE J, TAN T W, ZHENG J H, *et al.*. CNC mutual-wear micro truing technique of diamond wheel V-tip [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2010, 30(5): 1-5. (in Chinese)
- [17] XIE J, XIE H F, LIU X R, *et al.*. Dry micro-grooving on Si wafer using a coarse diamond grinding [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012(61):1-8.

作者简介:



谢晋(1963—),男,山西榆次人,博士,教授,1984年于华中农学院取得学士学位,1989年于武汉工业大学取得硕士学位,2003年于日本国立法人北见工业大学取得博士学位,主要从事磨削加工、微细加工和精密加工方面的研究。E-mail: jinxie@scut.edu.cn



冯彦科(1992—),男,河南驻马店人,硕士研究生,2014年于天津工业大学获得学士学位,主要从事机械制造及其自动化方面的研究。E-mail: yankefeng92@163.com