

刀刻 V 形槽法制备塑料光纤阵列背光板

李梓润, 林宝卿, 林青, 郜飞飞, 何涌, 庄其仁*

华侨大学信息科学与工程学院福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021

摘要 研究了一种用于塑料光纤阵列等距 V 形槽散射点加工方法。提出一种重力微压刀刻技术, 理论分析了散射点光散射率与提供重力的砝码质量的关系。结果表明: V 形槽散射点的光散射率随砝码质量的增大呈 $3/2$ 幂指数增加。通过建立等距散射点均匀发光模型, 理论推导了加工时各散射点所需的砝码质量计算公式。实验验证了 V 形槽散射点的光散射率与砝码质量的关系并得到了它们的关系曲线。采用通过砝码质量计算公式得到的参数, 制作了亮度均匀度高于 85% 的单根等距散射点侧面发光塑料光纤, 以及尺寸为 $180\text{ mm} \times 101\text{ mm}$ 的等距散射点塑料光纤阵列背光板, 亮度均匀度为 90.9%。实验结果证明了重力微压刀刻技术制备塑料光纤阵列等距 V 形槽散射点的可行性。

关键词 几何光学; 塑料光纤; 均匀侧发光; 背光板; 等距散射点; V 形槽; 发光均匀度

中图分类号 TN873

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.050801

Preparation of Backlight Plate with Plastic Fiber Array by Blade Carving V-Groove Method

Li Zirun, Lin Baoqing, Lin Qing, Gao Feifei, He Yong, Zhuang Qiren*

Fujian Provincial Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract A processing method of scattering points with the equidistant V-shaped grooves is studied, which is used for the plastic fiber array. A blade carving technique is presented using gravity micro-pressure. The relationship between the light scattering rate of the scattering point and the weight mass providing gravity is analyzed theoretically. The results show that the light scattering rate of V-groove scattering points increases with the increase of the weight mass, in the form of $3/2$ power exponent. The uniform luminescence model with isometric scattering points is established. According to the condition of each scattering point in machining, the formula of weight mass for machining is deduced theoretically. Experiments verify the relationship between the light scattering rate of V-groove scattering points and weight quality, and the relation curve between them is obtained. Using the parameters obtained from the formula of weight mass, a single side luminescent plastic fiber with equidistant scattering points is fabricated, and its luminance uniformity is higher than 85%. The $180\text{ mm} \times 101\text{ mm}$ backlight plate of plastic fiber array with isometric scattering points is fabricated, and its brightness uniformity is 90.9%. The experimental results show the feasibility of preparing the V-groove scattering points for plastic fiber array by gravity micro-pressure blade carving.

Key words geometric optics; plastic optical fiber; uniform side illumination; backlight plate; isometric scattering points; V-groove; luminous uniformity

OCIS codes 080.4298; 120.2040; 160.5470

收稿日期: 2019-08-21; 修回日期: 2019-08-27; 录用日期: 2019-09-02

基金项目: 福建省科技计划(高校产学研合作)重大项目(2016H6016)、华侨大学研究生科研创新能力培育项目(17013082007)

* E-mail: qrzhuang@hqu.edu.cn

1 引言

液晶显示器(LCD)属于被动发光显示器件,其本身并不能辐射光能,因此需要一个特殊设计的导光板背光源模组(BLM)^[1-2],即背光板。背光板性能的好坏直接影响着LCD的颜色、均匀性、功耗等性能指标^[3]。近年来,为了满足不同场合的应用需求,越来越多种类的背光板应运而生。随着光纤应用技术的发展,不断有将侧面发光光纤应用于背光单元的研究报道。Fujieda等^[4]研究了一种从弯曲光纤中提取光的背光单元,利用光纤弯曲损耗随弯曲半径的变化特性设计了两种不同结构的直下式激光背光源。赵致童等^[5]设计并研究了液晶显示器激光背光源侧体发光光纤,建立侧端开孔和环形开孔光纤侧体发光两种模型,使一个光纤耦合模块具有多个发光点,分析了光纤侧面加工的不同孔深、孔面积、孔几何结构等参数对出光光场的影响,得到了各个出光点对应照度最大值在5%变化范围内的均匀光场。何涌等^[6]利用激光打标机在塑料光纤(POF)表面雕刻散射点以形成侧面均匀发光光纤,得到单根塑料光纤的侧面发光亮度均匀度为80.90%,将多根侧面发光塑料光纤紧密排布成面光源,得到面光源发光亮度均匀度为88.91%。

实现侧发光光纤的方式有很多,如锥形光纤法^[7]、损伤芯皮结构法^[8]、光纤编织法^[9]、空芯光纤法^[10]、光纤多包层法、改变芯皮折射率结构法、改变芯径法和皮层结晶法等^[11]。其中损伤芯皮结构法最容易实现光纤长度方向上的均匀发光,其通常是通过光纤侧表面进行微加工实现的。常用的光纤表面微加工技术包括光纤研磨微加工、化学腐蚀^[12-13]和激光雕刻技术^[14-16]等。光纤研磨微加工和化学腐蚀法难以实现光纤侧面亮度均匀性控制,激光雕刻技术存在加工设备昂贵和加工工艺要求较高的缺点。

为了降低侧面均匀发光塑料光纤背光板的制作成本以及改善其复杂的加工工艺,本文研究刀刻V形槽散射点的方法并提出一种重力微压刀刻技术,将砝码重力施加于具有弹性装置的刀片上,通过移动刀片在塑料光纤表面刻划出等距变深度V形槽散射点,使之成为侧面均匀发光光纤,密集排列的侧面均匀发光光纤组成面光源,可作为液晶显示屏的背光板。而且,这种密集排列的塑料光纤面光源特别适合作自由立体显示器的背光板^[17],用于减小自由立体显示器的串扰问题^[18]。根据液晶显示屏

的亮度均匀性要求,刀刻等距变深度V形槽散射点面光源的发光均匀度应达到80%以上。

2 V形槽散射点原理及均匀发光设计方法

2.1 V形槽散射点原理

当塑料光纤纤芯局部受到刀片刻划损伤时会形成散射点,如图1(a)所示。散射光主要来自于塑料光纤在损伤后所形成的V形凹坑。实验采用刀片雕刻V形槽加工方式,按等距变深度分布对塑料光纤侧面进行刻划加工,使之形成散射点阵列结构,实现侧面均匀发光。相同长度的塑料光纤密集排布且满足侧面均匀发光时,就成为一块塑料光纤阵列背光板,如图1(b)所示。

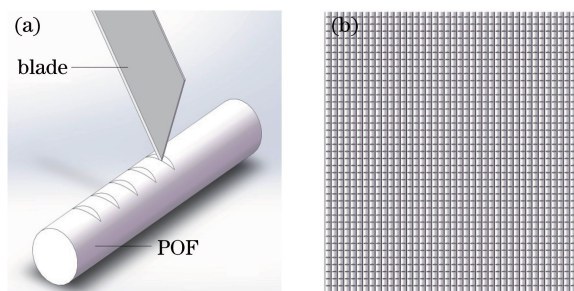


图1 通过加工V形槽制备塑料光纤阵列散射点背光板示意图。(a)通过加工V形槽形成塑料光纤散射点;(b)塑料光纤阵列背光板

Fig. 1 Diagrams of fabricating V-groove for scattering point backlight plate of plastic optical fiber array. (a) Fabricating V-groove to form plastic fiber scattering point; (b) backlight plate of plastic fiber optic array

V形槽凹坑的大小和排布决定了侧发光塑料光纤阵列背光板的表面亮度以及均匀性。虽然除了侧面V形槽的散射损耗外,塑料光纤自身也存在材料光吸收等固有损耗,但是塑料光纤固有损耗远小于加工后的侧向散射损耗,可认为侧发光塑料光纤的传输衰减特性只与塑料光纤表面被加工后的侧面散射有关。设光源从塑料光纤单端口耦合,纤芯内的光线遇到一个V形槽散射点时,如图2所示,散射点表面的散射光功率大小由V形槽凹坑界面折射出来的散射光线决定。若假定纤芯内光场分布是均匀的,且V形槽的顶角很小时,则散射光功率与V形槽凹坑侧面面积对光纤横截面面积的比值成正比,即

$$P_{mi} \approx P_{si} \frac{S_i}{\pi a^2}, \quad (1)$$

式中: P_{mi} 为 V 形槽散射点 i 的散射光功率; a 为光纤纤芯半径; P_{si} 为散射点 i 处纤芯内部传输光功率; S_i 为散射点 i 的 V 形槽凹坑的一个侧面面积。当塑料光纤半径 $r \gg h$, 凹坑的一个侧面面积与 V 形槽深度 h 的关系约为

$$S_i \approx \pi a^2 \arcsin \left[\frac{(2rh - h^2)^{1/2}}{a} \right] -$$

$$(a - h)(2ah - h^2)^{1/2} \approx (2a)^{1/2} h^{3/2}. \quad (2)$$

(2) 式说明 V 形槽凹坑的一个侧面面积与 V 形槽深度成 3/2 幂指数比例增长关系, 即 V 形槽散射点 i 的散射光功率与 V 形槽深度呈 3/2 幂指数比例增长关系, 即

$$P_{mi} \approx \sqrt{2} a^{-3/2} h^{3/2} P_{si}, \quad (3)$$

式中: h_i 为 V 形槽第 i 个散射点的深度。(3) 式可表示为

$$P_{mi} \approx \lambda_i P_{si}, \quad (4)$$

式中: $\lambda_i = \sqrt{2} \cdot a^{-3/2} h_i^{3/2}$ 称为 V 形槽散射点的散射

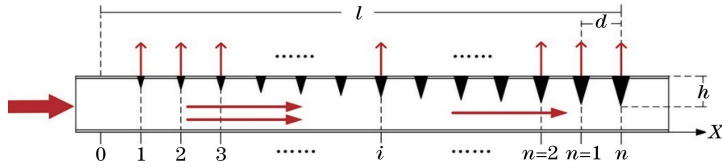


图 3 塑料光纤侧面等距散射点设计原理图

Fig. 3 Design schematic of isometric scattering points on the side of POF

为使塑料光纤侧面均匀发光, 需要使均匀分布的每个散射点的发光功率相等, 令每个散射点的发光功率都为 P_0 。若入射光纤的总光功率为 P_s , 经过 $i-1$ 次散射后, 经过第 i 个散射点的传输光功率 $P_{si} = P_s - (i-1)P_0$, 代入(4)式可得

$$P_0 \approx \frac{\lambda_i P_s}{1 + (i-1)\lambda_i}, \quad (5)$$

P_0 决定了塑料光纤侧面发光的表面亮度, P_0 越大表面亮度就越高。理想情况下, 当 $P_s = nP_0$ 时, 可认为塑料光纤侧面发光的表面亮度达到最大值, 其中 n 为塑料光纤侧面散射点的总个数, 其值与散射点阵列在 X 方向的长度 l 和散射点之间的间距 d 有关, 关系表达式为

$$n = \frac{l}{d} (d \leq l), \quad (6)$$

(6) 式中 d 的值决定了塑料光纤侧面散射点的加工密度, 一般由人眼在一定视区内能清楚分辨出两点之间的最小间隔决定, 即由人眼极限分辨率决定。

综合(3)~(6)式, 可得侧面发光塑料光纤均匀发光时, V 形槽散射点加工深度为

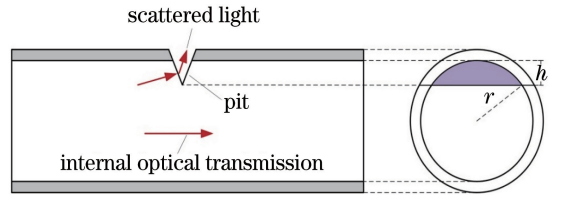


图 2 光通过散射点示意图

Fig. 2 Diagram of light passing through scattering point

率, 表示散射点散射光功率与入射光功率的比值。

2.2 V 形槽点阵均匀发光设计方法

由于 V 形槽散射点的散射损耗, 光纤内传输光功率 P_{si} 随着传输长度的增加而减小。为了使塑料光纤侧面发光均匀, 当 V 形槽散射点的排布间距固定不变时, 由(3)式可知, V 形槽的加工深度需要随着纤芯内传输光功率的减小而增大。侧面发光塑料光纤 V 形槽散射点分布示意图如图 3 所示。图 3 中, 光线从光纤左侧入射, 所有散射点之间的间距都相同。

$$h_i \approx \left\{ \frac{d}{\sqrt{2} \cdot a^{-3/2} [l - (i-1)d]} \right\}^{2/3}. \quad (7)$$

3 V 形槽重力微压刀刻技术

3.1 技术方案

V 形槽的加工采用弹性刀刻方法, 刀片固定在弹簧上, 弹簧的变形量决定 V 形槽散射点的加工深度 h , 同时加工深度 h 与弹簧的变形量数值相等。实验通过加载砝码使弹簧产生所需的变形量, 根据胡克定律, 可认为加工深度 h 与加载砝码的质量 M 成正比, 即 $h \approx kM$, k 为比例系数。则由(3)、(4)式可得第 i 个散射点的散射光功率与刀片上加载的砝码质量的关系可写为

$$P_{mi} \approx \sqrt{2} k^{3/2} a^{-3/2} M_i^3 P_{si}. \quad (8)$$

式中: M_i 为第 i 个散射点对应的加载砝码质量。

比较(4)式和(8)式, 可得 $\lambda_i = \sqrt{2} k^{3/2} a^{-3/2} M_i^3$, 令 $k_1 = \sqrt{2} k^{3/2} a^{-3/2}$, 则有

$$\lambda_i = k_1 M_i^3. \quad (9)$$

(9) 式说明采用砝码质量加载刀片刻划的塑料

光纤 V 形槽的光散射率与砝码质量呈 3/2 幂指数比例增长关系。

为使塑料光纤侧面均匀发光,需使均匀分布的每个散射点的发光功率相等,令每个散射点的发光功率都为 P_0 。当 $P_s = nP_0$ 时,由(7)式可得加工第 i 个散射点时的加工重力为

$$M_i \approx \left[\frac{d}{k_1 [l - (i - 1)d]} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (10)$$

3.2 散射率与砝码质量关系分析

实验采用刀头平移刻划法,并保持刀片平面与塑料光纤轴线互相垂直,这样就能保证 V 形槽与光纤垂直。如图 4 所示,刀片刻划塑料光纤时最初会形成 V 字形切口,由于光纤具有弹性,最初形成的 V 字形切口会变小,因此塑料光纤经刀片刻划后的 V 形槽的顶角都很小,满足上述模型假设。

实验加工对象为日本 ESKA 三菱化学控股株式会社 SK-20 型塑料光纤,表 1^[19] 为其材料及性能

表 1 实验所用 SK-20 聚合物光纤的参数与材料

Table 1 Parameters and materials of SK-20 polymer optical fiber used in experiment

Core material	Cladding material	Core refractive index	Refractive index profile	Numerical aperture	Core diameter / μm	Cladding diameter / μm
Polymethyl-Methacrylate Resin	Fluorinated Polymer	1.496	Step index	0.5	486	500

图 5 所示为塑料光纤散射点的散射光功率检测装置示意图,光源通过耦合器将激光入射至塑料光纤一端,耦合器可使光源更有效地被利用。塑料光纤被加工成单一 V 形槽,此时由光功率计记录从塑料光纤侧面 V 形槽出来的光功率 P_{m1} 和塑料光纤出射端面出来的光功率 P_{s1} ,由于单一散射点引起的光纤传输损耗很小,所以采用光纤出射端面的输出光功率代替经过散射点的光纤传输光功率,然后由(4)式就可得到该散射点的散射率 λ 。图 6(a) 所示为塑料光纤 V 形槽散射点的散射率 λ 与加工用砝码质量 M 的关系曲线图。

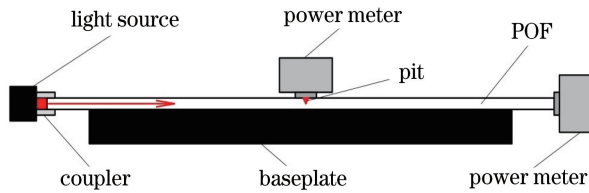


图 5 塑料光纤散射点散射光功率检测装置示意图

Fig. 5 Testing setup diagram of scattering light power of scattering points of POF

由图 6(a) 可以看出,随着砝码质量 M 的增大,塑料光纤散射点的散射率呈增大趋势,图中点线为

参数表,其光纤直径为 0.5 mm。利用刀片刻划加工时,每次加工时的重力增量为 3 g,每增加一次砝码质量就更换一根光纤,刀片移动速度为 2 mm/s。

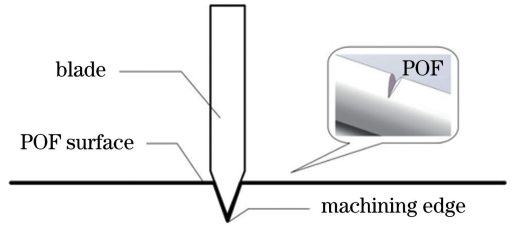


图 4 V 形槽加工示意图

Fig. 4 Diagram of V-groove processing

塑料光纤 V 形槽散射点的散射率可以体现散射点的散射能力,根据(4)式散射率定义,当塑料光纤上只有一个散射点时,V 形槽散射点的散射率就可以通过测量散射点的散射光功率与经过散射点的光纤传输光功率的比值来计算。

散射率与砝码质量关系的线性拟合直线,方程为 $\lambda = 0.00626M + 0.01682$,残差平方和 $R_{SS} = 0.00776$ 。图中实线为散射率与砝码质量关系的 3/2 幂指数拟合曲线,方程为 $\lambda = 0.000798M^{\frac{3}{2}} + 0.0223$,残差平方和 $R_{SS} = 0.00154$ 。结果表明:3/2 幂指数拟合曲线的残差平方和小于线性拟合直线,可见采用将砝码加载于刀片刻划塑料光纤得到的 V 形槽的光散射率与砝码质量呈 3/2 幂指数比例增长关系,实验结果与理论公式[(9)式]相符,并由此得出 $k_1 \approx 0.000798 \text{ g}^{-3/2}$ 。单根塑料光纤加工后的散射点形貌如图 1(a) 所示,加工过程中砝码托盘内放入的砝码质量可根据(10)式计算,图 6(b) 所示为第 i 个散射点被加工时所需的加工重力 M_i 的关系曲线图。

4 塑料光纤阵列背光板实验

4.1 实验装置

实验采用常规美工刀片对塑料光纤进行加工,刀片宽度为 18 mm,厚度为 0.5 mm。加工装置刀头组件示意图如图 7 所示,在 V 形槽加工装置刀头组件上,砝码托盘下边与刀片支架刚性连接,刀片的加工角度与底板成 60° ,并固定于刀片支架

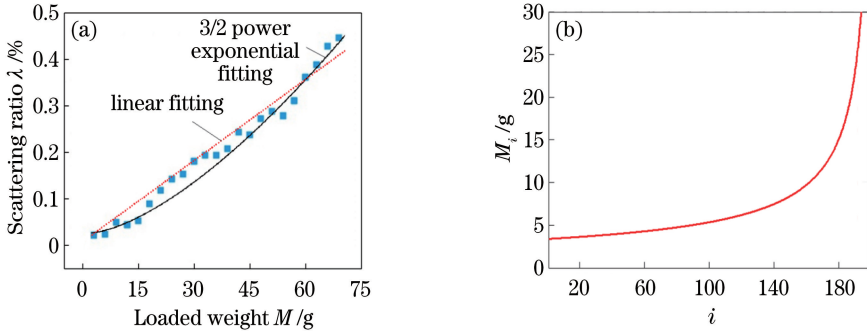


图 6 散射率、砝码质量和散射点序号的关系曲线。(a) 散射率与砝码质量的关系示意图；(b) 砝码质量 M_i 与散射点序号 i 的关系曲线图

Fig. 6 Relationship among scattering rate, weight mass, and scattering point number. (a) Relationship between scattering rate and weight mass; (b) relationship between weight mass M_i and scattering point number i

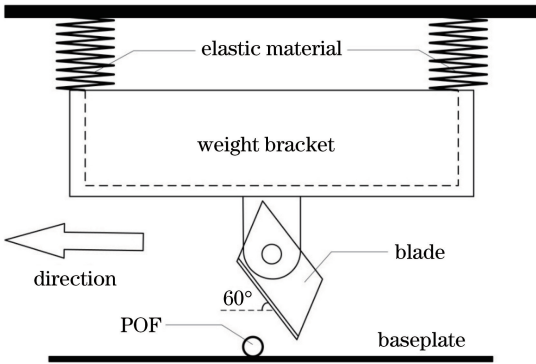


图 7 塑料光纤加工装置刀头组件示意图

Fig. 7 Diagram of knife head assembly of POF processing device

上。为了实现弹性刻划，砝码托盘上方用弹簧连接到主结构架上。为了保证塑料光纤表面 V 形槽的加工精度，加工装置刀头组件放置在一个精密导轨上，通过电机带动匀速移动。

为了得到塑料光纤阵列等距散射点背光板，实验设计了一个阵列加工装置，如图 8 所示。装置由刀头组件、刀头组件固定支架、X 平移传动机构和 Y 平移传动机构等组成。刀头组件上的螺旋微调结构可使刀头垂直移动，用于调整刀头的初始高度。刀头上方的弹簧使刀头具有高度自适应功能，达到弹性刻划的目的。刀头的最低位置即 V 形槽加工深度只与托盘内砝码质量(重力)有关。刀头组件被固定于支架后，可随 X 平移传动机构和 Y 平移传动机构进行两轴平移运动，两个平移传动机构各由一个电机、限位螺杆、导轨和滑块组成，其中 X 平移传动机构的移动方向与刀片的刻划方向一致，Y 平移传动机构则在完成一次 X 平移周期后，以散射点间隔为步长将刀头组件平移至下一个刻划位置，并根据

(10)式计算砝码托盘内放入的砝码质量，其中 $k_1 = 0.000798 \text{ g}^{-\frac{3}{2}}$ 。

4.2 刻划 V 形槽实验

理论上，砝码质量越大，V 形槽加工深度和宽度就越大。将塑料光纤固定在装置加工区域内，通过改变如图 7 所示砝码托盘内的砝码质量，就能在塑料光纤上得到不同程度的加工痕迹。实验采用波长为 650 nm 的红色半导体激光作为入射光源，图 9 所示为加工后的塑料光纤侧面 V 形槽散射点的显微照片，可见光纤通光后的侧面散射光来自表面 V 型凹坑。

设定装置加工参数为：刀片刻划次数为 1 次，刀片刻划角度为 60° ，刀片移动速度为 2 mm/s。手动更换砝码托盘里的砝码质量，每个砝码质量为 3 g，以增量投放方法改变托盘里的砝码质量。实验结果如图 10 所示，图 10(a)~(i) 分别为砝码质量为 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54 g 条件下刀片刻划塑料光纤得到的散射点照片。由图 10(a)~(i) 可以看到，散射点形状较稳定，随着砝码质量增大，散射点尺寸增大，同时发光亮度也增大。

4.3 单根塑料光纤实验

采用 0.5 mm 直径的 SK-20 型塑料光纤，设定加工参数为：每个散射点的刻划次数为 1 次，刀刀相对底板的角度为 60° ，刀头移动速度为 2 mm/s，散射点加工间隔为 0.5 mm，光纤加工长度为 100 mm，加工过程中砝码托盘内放入的砝码质量根据(10)式计算，如图 6(b) 所示，实际操作中砝码质量取整数(单位为 g)。单根塑料光纤加工后的散射点形貌及亮度均匀性如图 11 所示，可见其具有很好的散射点均匀性和亮度均匀性。

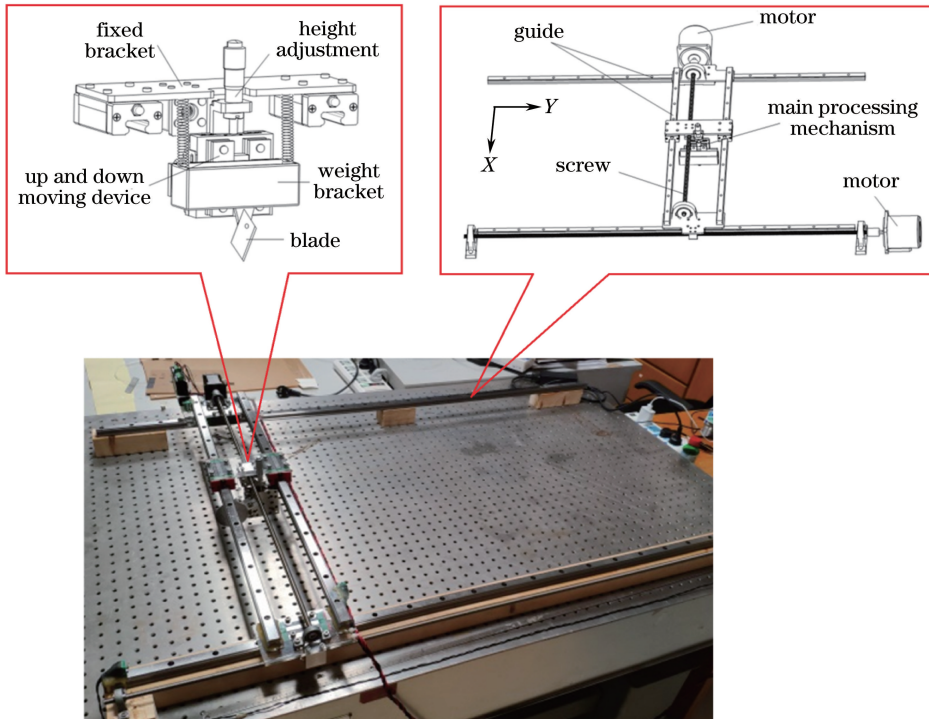


图 8 塑料光纤阵列等距散射点加工装置示意图

Fig. 8 Diagram of processing equipment for isometric scattering point of POF array

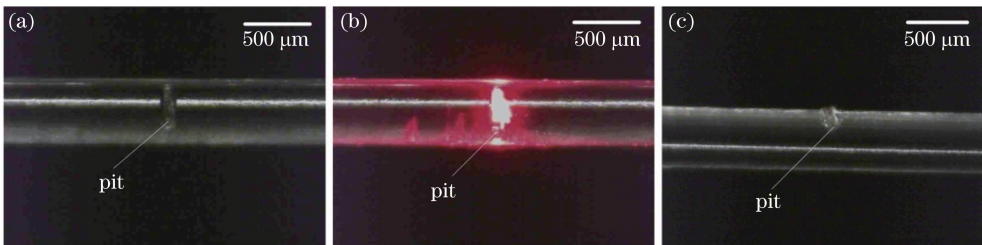


图 9 塑料光纤侧面散射点的显微照片。(a) 散射点正视图(不通光);(b) 散射点正视图(通光);(c) 散射点侧视图
Fig. 9 Microscopic photographs of scattering point on POF side. (a) Front view of scattering point without light; (b) front view of scattering point with light; (c) side view of scattering point

采用 CX-2B 成像亮度计测量整条光纤加工区域(长度为 100 mm),得到局部平均亮度的最小值和最大值之比(定义为亮度均匀度)大于 85%,表 2 为 CX-2B 成像亮度计的性能参数。

4.4 等距散射点背光板实验

制作塑料光纤阵列等距散射点背光板前,先将多根塑料光纤紧密排列在一起,并在表面覆盖一层只改变出射光线角度分布而不影响其照度分布的散射膜,用于消除光纤散射点的影响,完成以上准备后再对塑料光纤阵列进行加工。由于事先已在单根塑料光纤实验中得到亮度均匀的单根塑料光纤等距散射点,所以制作背光板就可使用相同的加工参数。如图 12 所示,实验制作的面光源模块尺寸为 180 mm×101 mm,由 2020 根直径为 0.5 mm、加工长度为

101 mm 的光纤排布而成,面光源模块长宽比为 16:9,此比例适用于大部分显示屏,符合人体工程学。

由于塑料光纤阵列等距散射点背光板的尾端光纤束直径较大,有利于采用白光 LED 作为光源。实验通过能量均匀耦合器^[20]将白光 LED 光束耦合进入光纤束中,白光 LED 功率为 10 W。

采用 CX-2B 成像亮度计对加工好的侧面发光塑料光纤面光源进行亮度均匀性检测,检测装置实物图如图 13(a)所示。根据 13(b)所示参数,侧面发光塑料光纤面光源与成像亮度计的距离为 35 cm,分别取图 13(c)中 $Q_1 \sim Q_9$ 点位置的亮度值,采用 9 点法测量背光板面光源的亮度均匀度。检测前先将白光 LED 光源预热 30 min,使光源发光稳定。同时为了减小测量误差,在每个测量点重复测量 3 次,

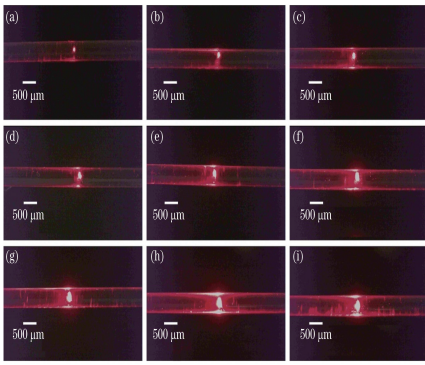


图 10 不同砝码质量下加工的塑料光纤散射点照片。
(a) $M=6\text{ g}$; (b) $M=12\text{ g}$; (c) $M=18\text{ g}$; (d) $M=24\text{ g}$; (e) $M=30\text{ g}$; (f) $M=36\text{ g}$; (g) $M=42\text{ g}$;
(h) $M=48\text{ g}$; (i) $M=54\text{ g}$

Fig. 10 Photos of scattered points of plastic fiber under different weight mass. (a) $M=6\text{ g}$; (b) $M=12\text{ g}$; (c) $M=18\text{ g}$; (d) $M=24\text{ g}$; (e) $M=30\text{ g}$; (f) $M=36\text{ g}$; (g) $M=42\text{ g}$; (h) $M=48\text{ g}$; (i) $M=54\text{ g}$

测量结果如表 3 所示。

取 3 次实验测量数据的平均值,最后得到侧面发光塑料光纤面光源的亮度均匀度(定义为 9 点测量的最小亮度值与最大亮度值的比值)为 85.2%。从表 3 中可以看到 Q_1 和 Q_4 的亮度值偏小,分析发现这是由光纤粘贴胶的厚度不均匀引起的。通过优化涂胶工艺,重新制作和测试侧面发光塑料光纤面光源的亮度均匀度,结果如表 4 所示,优化工艺后的

表 2 实验所用 CX-2B 成像亮度计的性能参数

Table 2 Performance parameters of CX-2B imaging luminance meter used in experiment

Brightness range / ($10^3\text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	Brightness accuracy / %	Brightness repeatability / %	Integration time / ms	Focal length of lens / mm	Field of view of lens
$1 \times 10^{-5} - 15$	± 5	± 1	5-10000	56	9.1° (horizontal) \times 6.7° (vertical)

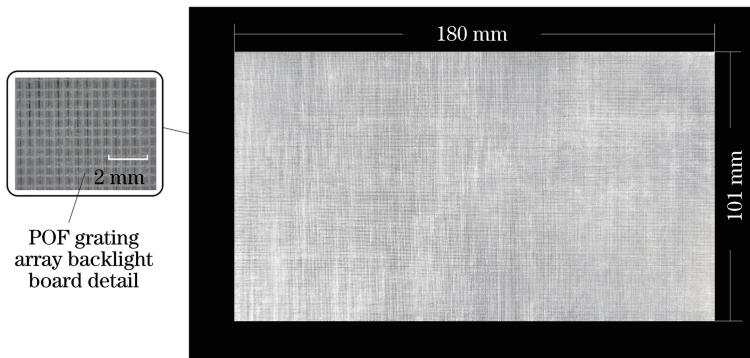


图 12 实验制作的塑料光纤阵列等距散射点背光板照片

Fig. 12 Photograph of POF array backlight plate with isometric scattering point fabricated in experiment

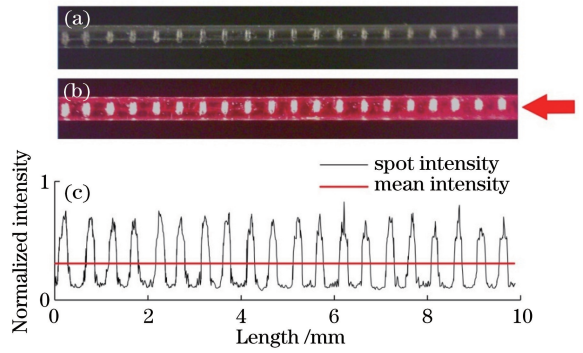


图 11 单根塑料光纤等距散射点效果图。(a) 散射点形貌;
(b) 散射点散射光效果;(c) 光强分布曲线

Fig. 11 Effect pictures of isometric scattering points of single plastic fiber. (a) Morphology of scattered points; (b) effect of scattering light at scattering point; (c) light intensity distribution curve

侧面发光塑料光纤面光源的亮度均匀度为 90.9%,能满足 LCD 亮度均匀度的背光要求。另外,塑料光纤阵列等距散射点背光板的亮度均匀度影响因素包括 V 形槽加工过程中受到机械抖动、砝码质量变化不连续和塑料光纤表面洁净度等。从上述实验结果可以看到,塑料光纤阵列等距散射点背光板面光源的发光亮度均匀度优于单根塑料光纤等距散射点的亮度均匀度,这是由于面光源由多根塑料光纤组成,散射点亮度的平均效应使背光板面光源的亮度均匀度得到提高,侧面发光塑料光纤阵列背光板面光源发光效果如图 12 所示。

表3 侧面发光塑料光纤面光源的亮度均匀度9点法测量结果

Table 3 Measurement results of nine-point method for luminance uniformity of side-glowing POF surface light source

No.	Measurement result / (cd · m ⁻²)								
	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉
1	475.2	526.3	546.9	499.1	540.1	532.4	543.2	562.5	555.5
2	482.5	511.1	534.5	491.6	543.1	552.4	532.9	553.3	549.3
3	469.8	510.0	544.5	504.5	525.1	546.6	536.8	559.8	552.1
Average	475.8	515.8	542.0	498.4	536.1	543.8	537.6	558.5	552.3

表4 优化工艺后的侧面发光塑料光纤面光源的亮度均匀度9点法测量结果

Table 4 Measurement results of nine-point method for luminance uniformity of side-glowing POF surface light source with optimized processing

No.	Measurement result / (cd · m ⁻²)								
	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉
1	529.6	524.3	551.7	559.4	543.1	561.3	575.2	564.2	586.5
2	538.8	519.4	562.3	552.3	538.6	554.5	561.3	561.1	567.8
3	533.9	527.1	557.6	553.6	545.5	566.6	568.1	549.9	574.3
Average	534.1	523.6	557.6	555.1	542.4	560.8	568.	558.4	576.2

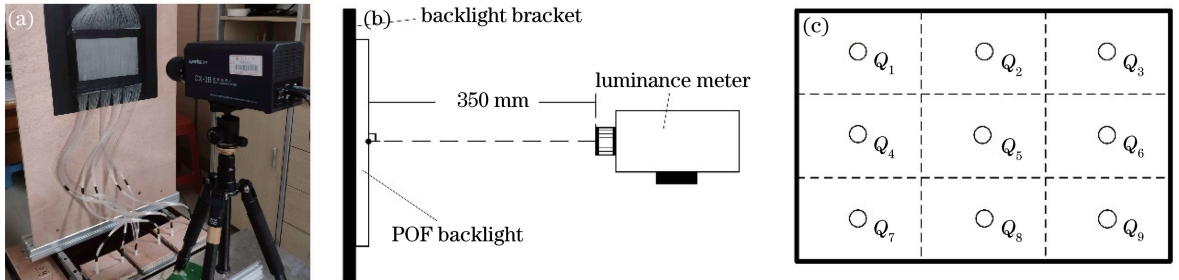


图13 塑料光纤阵列等距散射点背光板侧面发光亮度均匀度检测系统。(a)检测装置实物图;

(b)亮度计检测装置;(c)9点采样位置图

Fig. 13 System for measuring luminance uniformity on side of backlight plate of POF array with isometric scattering points. (a) Picture of detection device; (b) detection device of luminance meter; (c) nine-point sampling position map

5 结 论

研究刀刻法加工塑料光纤阵列侧面V形槽散射点的原理与技术,获得均匀侧发光塑料光纤阵列背光板。理论分析和实验结果表明,采用重力微压刀刻技术进行塑料光纤表面V形槽刻划时,随着砝码质量的增大,V形槽散射点的光散射率呈 $3/2$ 幂指数增长。实验得到了散射率与砝码质量的对应关系曲线,该结果可用于指导加工单根塑料光纤等距散射点和塑料光纤阵列等距散射点背光板。实验得到塑料光纤阵列等距散射点背光板亮度均匀度高于85%的单根侧面发光塑料光纤。将2020根直径为0.5 mm、加工长度为101 mm的塑料光纤紧密排布后进行砝码重力弹性刀刻加工,得到发光面积为 $180\text{ mm} \times 101\text{ mm}$ 的等距散射点背光板,采用成像亮度计测量得到的结果表明背光板亮度均匀度为90.9%,可满足液晶显示器背光板亮度均匀性要求。

参 考 文 献

- [1] Huang B L, Guo T L, Chen E G, et al. Study on optimal scale of average netted dot density for light guide plate[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0522002.
黄炳乐, 郭太良, 陈恩果, 等. 导光板网点平均密度范围的最优化研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0522002.
- [2] Zhang H, Zhu J, Zhao Y, et al. A design of light guide plate for direct illumination of large-sided liquid crystal panel[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2668-2673.
张鹤, 朱钧, 赵燕, 等. 一种用于大尺寸液晶照明的直下式导光板模块设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2668-2673.
- [3] Lin S X, Guo T L, Lin Z X. New development of LCD backlight[J]. Foreign Electronic Measurement

- Technology, 2006, 25(5):1-3.
- 林世宪, 郭太良, 林志贤. LCD 背光源的最新进展[J]. 国外电子测量技术, 2006, 25(5): 1-3.
- [4] Fujieda I, Arizono K, Nishida K, et al. Backlight units based on light extraction from a curved optical fiber [J]. Optical Engineering, 2014, 53 (6): 065104.
- [5] Zhao Z T, Zhang H, Zou Y G, et al. Design and research of side lighted fiber of laser backlight source in liquid crystal display [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0301004.
- 赵致童, 张贺, 邹永刚, 等. 液晶显示器激光背光源侧体发光光纤的设计与研究[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0301004.
- [6] He Y, Li Z R, Gao F F, et al. Side-glowing optical fiber as directional backlight in autostereoscopic display [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45 (11): 1106003.
- 何涌, 李梓润, 郜飞飞, 等. 自由立体显示器定向背光侧面发光光纤[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1106003.
- [7] Liu L H. Study of the long tapered fiber optic light [D]. Henan: Henan Normal University, 2015.
- 刘凌辉. 长距离锥形光纤灯的研究[D]. 河南: 河南师范大学, 2015.
- [8] Jin R P, Jin Z M, Yang B, et al. Preparation of side-glowing optical fiber by friction method and study on luminance change[J]. Journal of Silk, 2015, 52(2): 31-35.
- 金瑞鹏, 金子敏, 杨斌, 等. 摩擦法制备侧发光光纤及亮度变化研究[J]. 丝绸, 2015, 52(2): 31-35.
- [9] Huang J B. Preparation method of optical fiber decorative cloth, article and luminous decoration device: 201310539584.5[P]. 2014-02-05.
- 黄进宝. 一种光纤装饰布的制备方法、制品及发光装饰装置: 201310539584.5[P]. 2014-02-05.
- [10] Liao Q, Zhong N B, Wang Y Z, et al. Enhanced luminescence intensity, homogeneity and microbial adsorption of hollow luminescent fiber: 201310191878.3[P]. 2013-08-14.
- 廖强, 钟年丙, 王永忠, 等. 增强发光强度、均匀性及微生物吸附的空心发光光纤: 201310191878.3 [P]. 2013-08-14.
- [11] Jiang Y, Ling G H, Yin Z D. Preparing principle and applications of side-glowing optical fiber[J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2000(4):10-16.
- 江源, 凌根华, 殷志东. 侧发光光纤的制备原理及其应用[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2000(4):10-16.
- [12] Li H D, Fu H W, Shao M, et al. In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on cascading fiber air bubble for high sensitivity liquid refractive index measurement[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45 (7): 0706006.
- 李辉栋, 傅海威, 邵敏, 等. 基于光纤气泡级联的高灵敏度马赫曾德干涉液体折射率传感器[J]. 光子学报, 2016, 45(7): 0706006.
- [13] Yang B, Chen Y Y, Gai G P. Preparation and characterization of PMMA side-glowing optical fiber [J]. Journal of Materials Engineering, 2007(S1): 36-41.
- 杨斌, 陈园园, 盖国平. PMMA 芯光纤侧面发光的制备及表征[J]. 材料工程, 2007(S1): 36-41.
- [14] You J J, Wang M, Rong H, et al. Fiber Fabry-Perot accelerometer based on SU-8 photoresist [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0806002.
- 尤晶晶, 王鸣, 戎华, 等. 基于 SU-8 光刻胶光纤法布里-珀罗加速度传感器[J]. 光学学报, 2013, 33 (8): 0806002.
- [15] Roufael H S G, Castrellon-Urbe J, Lomer M, et al. Fast laser POF side long period gratings fabrication[C]// Workshop on Specialty Optical Fibers and their Applications, August 28-30, 2013, Sigtuna, Sweden. Washington, D.C.: OSA, 2013: F2.29.
- [16] Jin R P. Research on chromaticity of optical fiber emission and product design based on mixed light modes[D]. Zhejiang: Zhejiang Sci-Tech University, 2014.
- 金瑞鹏. 光纤侧发光色度研究及混色模式产品开发[D]. 浙江: 浙江理工大学, 2014.
- [17] Zhuang Q R, He Y, Zhang X T, et al. Side luminous fiber directional backlight naked eye 3D display: 201820516580.3[P]. 2018-12-14.
- 庄其仁, 何涌, 张晓婷, 等. 侧面发光光纤定向背光裸眼 3D 显示屏: 201820516580.3[P]. 2018-12-14.
- [18] Chen F P, Zhang X T, Wang X Y, et al. Design of autostereoscopic 3D display with no crosstalk and full resolution [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 041201.
- 陈芳萍, 张晓婷, 王孝艳, 等. 无串扰和无分辨率损失的自由 3D 显示器设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041201.
- [19] Mitsubishi chemical. Product [EB/OL]. [2019-08-20]. <http://www.pofeska.com/product/01/index.html>.

[20] Zhang X T, Liu C J, Qi Y, et al. Design of lens coupler with uniform energy distribution based on LED source and polymer optical fiber bundle [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0208001.

张晓婷, 刘楚嘉, 漆宇, 等. 基于LED光源与聚合物光纤束的能量均匀透镜耦合器设计[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0208001.