

文章编号 1004-924X(2017)11-2895-09

光子晶体光纤端面研磨损伤的分析

冯迪*, 赵正琪, 房启蒙, 宋凝芳

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要:对光子晶体光纤的端面研磨过程进行研究, 讨论了光子晶体光纤端面研磨损伤的特点。针对光子晶体光纤的结构特点, 应用有限元法建立了数值仿真模型。通过单一磨粒切削孔壁的仿真实验, 分析了不同切削深度下裂纹损伤的产生情况以及不同磨粒直径对光纤孔壁结构造成的损伤。最后通过实际研磨实验验证了分析结果。结果表明: 有限元法能够很好地模拟光子晶体光纤的端面研磨过程; 研磨过程中, 相对于非孔洞区域, 孔壁边缘更容易出现损伤, 呈现出沿圆周分布的崩塌区域; 边缘崩塌区域尺寸随磨粒直径的增加而增加。实验用光子晶体光纤孔壁边缘无崩塌的最大切削深度低于普通光纤脆塑转变的临界切削深度, 使用 $0.02\ \mu\text{m}$ 的砂纸进行抛光可以有效地避免对光子晶体光纤孔壁造成损伤。

关键词:光子晶体光纤; 光纤端面; 研磨损伤; 有限元分析

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172511.2895

Analysis of end face damage in lapping for photonic crystal fiber

FENG Di*, ZHAO Zheng-qi, FANG Qi-meng, SONG Ning-fang

(*Institute of Instrument Science and Optical Electronics Engineering,
Beihang University, Beijing 100191, China*)

* *Corresponding author, E-mail: fengdi@buaa.edu.cn*

Abstract: The lapping process for photonic crystal fibers (PCFs) was studied, and the end face damage of the PCFs was discussed. Based on the structure characteristics of the PCFs, a digital simulation model was established by finite element method. Through the simulation of a single grinding hole wall, the occurrence of crack damage under different cutting depths and the effect of damage caused by different grinding grain diameters on the structure of fiber hole wall were analyzed. Finally, the analysis results were verified by the PCF end face lapping experiments. The results show that FEM can effectively simulate the end face lapping process of PCF. As compared to the non hole region, the edge of hole wall is more prone to damage in the lapping process, showing a collapse area distributed along the circumference. The size of collapse area increases with the grit diameter. For no collapse area generation, the maximum cutting depth of this PCF is less than the critical cutting depth of brittle plastic transition of ordinary fiber and the abrasive paper with a thickness of $0.02\ \mu\text{m}$ can be used to polish to avoid the damage on the PCF hole wall.

Key words: photonic crystal fiber; fiber end face; lap damage; FEA

收稿日期: 2016-11-17; 修订日期: 2017-01-10.

基金项目: 国家重大科学仪器专项基金资助项目 (No. 2013YQ040877)

1 引言

光子晶体光纤具备很多优异的特性,在通信、传感和生物医药等众多领域都有着广阔的应用前景^[1-2]。光子晶体光纤在与其他光学器件直接耦合时,对端面进行加工的常用方法为固结磨料进行端面研磨^[3-4]。由于光纤的原材料石英玻璃属于硬脆材料,加工过程中如果处理不当,极易产生大量的裂纹损伤,同时,光子晶体光纤的多孔洞结构使其比普通光纤更容易产生损伤。这些损伤会大大增加光子晶体光纤在耦合处的损耗,不利于实际应用。

目前,针对石英玻璃等硬脆材料的加工已经有了广泛研究,研究表明,在某些特定加工环境下,硬脆材料也能够表现出如塑性材料一样的特征,此时,硬脆材料以塑性域模式被去除。Bifano 等人^[5]通过实验发现,当石英玻璃等硬脆材料加工的切削深度在一定范围内时,可以实现没有裂纹损伤的塑性域加工,这一特定切削深度被称为临界切削深度。后续学者^[6-7]在此基础上,研究了磨粒大小、载荷和速度等影响石英玻璃塑性域加工的因素。除了常规实验的方法,仿真模拟也常被用来研究硬脆材料的加工,有限元法作为一种有效而简便的仿真模拟方法,被广泛应用于硬脆材料加工的研究中^[8-9]。然而目前对于硬脆材料加工的研究还集中于不同材料,不同加工参数等方面,针对光子晶体光纤这种非连续性结构硬脆材料加工的研究还鲜有报道。

本文研究了磨粒直径在光子晶体光纤端面研磨过程所起到的作用。针对光子晶体光纤的结构特点,使用有限元软件 LS-DYNA,进行了单孔壁单磨粒切削过程的仿真模拟,对不同直径的磨粒进行研磨抛光实验,并通过扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)对光子晶体光纤端面进行观察,研究了该光纤端面加工时的损伤特点,为光子晶体光纤的端面抛磨加工研究提供了帮助。

2 模型建立

2.1 理论分析

针对硬脆材料塑性域加工的相关研究表明,

切削深度作为一个极为重要的影响因素常常被用作硬脆材料加工的脆塑转变临界条件。Bifano 通过 SEM 观察玻璃经精密加工后的表面形貌时发现,当工件表面裂纹所占面积小于 10% 时,可认为工件材料以塑性模式去除,此时加工硬脆材料实现脆塑转变的临界切削深度为^[5]:

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

其中: d_c 为临界切削深度, E 为硬脆材料的弹性模量, H 为材料的硬度, K_{IC} 为材料的断裂韧性。

与普通的切削加工不同,研磨是由大量磨粒共同切削工件表面的过程。这些磨粒切削过程的加工参数各不相同,使得对研磨过程进行理论分析的难度大大增加。刘德福等人在前人研究的基础上,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,并联系砂纸上实际参与研磨的磨粒数量,得到了单颗磨粒的最大切削深度^[10]:

$$d = \left(\frac{9PH}{8\zeta^2 E^{*2} A_0} \right)^{\frac{1}{3}} D_m, \quad (2)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_a^2}{E_a} + \frac{1-\nu_f^2}{E_f}, \quad (3)$$

其中: d 为磨粒切削深度,单位为 mm; P 为施加的研磨压力,单位为 N; H 为被研磨材料的硬度,单位为 MPa; ζ 为系数,取值 0.62; E^* 为等效弹性模量,单位为 MPa; E_f 为光纤材料的弹性模量,单位为 MPa; E_a 为磨粒的弹性模量,单位为 MPa; ν_a 为工件材料的泊松比; ν_f 为磨粒的泊松比; A_0 为名义研磨面积,单位为 mm^2 ; D_m 为砂纸磨粒粒度的标称尺寸,实际上是磨粒直径的平均值,单位为 μm 。

研磨实验使用的光子晶体光纤为烽火公司控制的工作波长为 1 550 nm 的实心保偏光子晶体光纤,材料为石英玻璃二氧化硅,砂纸磨粒材料为碳化硅,固定光纤用的是外径为 1.8 mm 的石英玻璃套管,因此,名义研磨面积 A_0 为 2.54 mm^2 ,表 1 列出了相应的材料参数。

表 1 碳化硅和石英玻璃的材料参数

Tab. 1 Material parameters of silicon carbide and quartz glass

材料	弹性模量	泊松比	硬度	断裂韧性
	E/GPa	ν	H/GPa	$K_{IC}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-\frac{1}{2}})$
碳化硅	480	0.142		
石英玻璃	72.5	0.17	6.654	0.794

将表 1 的材料参数带入式(1)中,可以得到完整结构的石英玻璃临界切削深度 d_c ,约为 23 nm。

将表 1 的材料参数与接触面积 A_0 代入式(2),得到研磨深度与磨粒直径和研磨压力的关系:

$$d=17.64P^{\frac{1}{3}}D_m, \quad (4)$$

其中:研磨压力 P 取单位为 N 时的值,磨粒直径 D_m 取单位为 μm 时的值,最后得到研磨深度 d 的单位为 nm 。研磨采用的砂纸磨粒直径分别为 1、3 和 9 μm ,图 1 为对应磨粒直径下的研磨深度与研磨压力的变化关系,抛光实验中选用了 0.02 μm 的二氧化硅磨粒,由于此时的抛光深度太小,难以进行仿真分析,因此图 1 中未列出该组数据,后面也未进行相应的仿真实验。

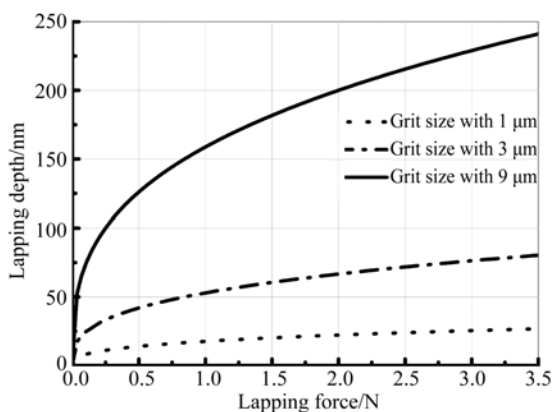
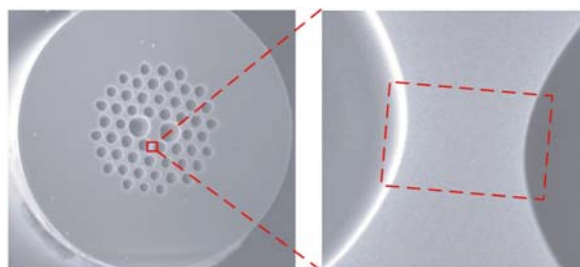


图 1 研磨深度与研磨压力在不同磨粒直径下的关系图
Fig. 1 Relationship between lapping depth and lapping force with different grit diameter

从图 1 中的曲线可以看出,当研磨压力较小时,研磨压力的小幅变化会引起研磨深度的较大变化,随着研磨压力的继续增加,研磨深度的变化幅度逐渐减缓,相对于研磨压力而言,磨粒直径对研磨深度的影响更大。研磨压力过大会导致光纤端面过度受压后出现崩碎,而研磨压力过小会导致光纤与砂纸接触不够充分,在规定时间内不能达到材料有效去除的目的,因此实际研磨压力的变化范围不会太大。光纤研磨机的研磨压力约为 1 N,对应的研磨深度分别大致为 20、50 和 150 nm,研磨速度基本不变,保持 0.2 m/s。

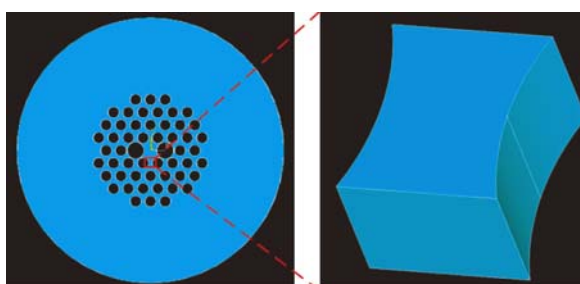
2.2 几何模型

为了减少计算工作量,缩短计算时间,选取单个磨粒切削光子晶体光纤孔壁进行建模,光纤端面电镜照片和对应的几何模型如图 2 所示,模型高度为 1 μm ,厚度为 1.6 μm ,两段圆弧间距为 1.2 μm 。



(a)光子晶体光纤端面及孔壁

(a)PCF end face and hole wall



(b)端面与孔壁的几何模型

(b)Geometric model of PCF end face and hole wall

图 2 光子晶体光纤实物与几何模型

Fig. 2 Real model and geometric model of PCF

由于光纤孔壁和磨粒的几何模型均为对称结构,因此可以选取一半进行计算。在对有限元模型进行网格划分时,着重对磨粒与孔壁端面接触的区域进行网格细化,其他区域网格尺寸相对较大,得到如图 3 所示的光子晶体光纤单磨粒切削的有限元网格模型。其中,磨粒的锥角为 90°,尖端钝圆半径为 50 nm,光纤细化部分的网格单元长度为 10 nm,粗糙部分网格单元长度为 20 nm,单元数量为 540 000,仿真过程中,磨粒以 0.2 m/s 的速度沿 X 轴负方向切削光纤端面,整个仿真模型的对称平面法向与 Y 轴平行,磨粒切削深度方向与 Z 轴平行。

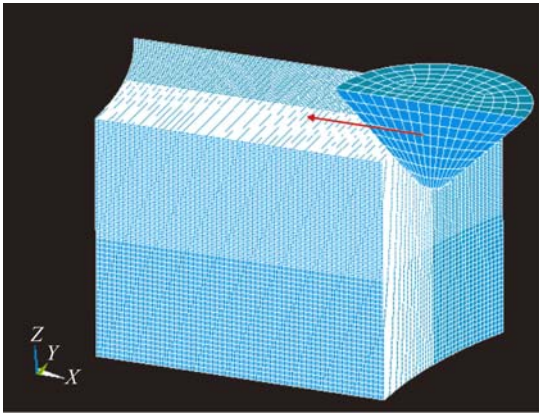


图 3 单磨粒切削有限元网格模型

Fig. 3 PCF lapping finite element mesh model

2.3 材料模型

材料模型即材料的本构关系,反映了材料物质在不同情况下的应力应变关系,是有限元建模仿真过程的关键。光纤材料为石英玻璃,是一种典型的硬脆材料。为了能够准确反映玻璃在切削过程中的动态响应问题,本文选用 LS-DYNA 中的 Johnson Holmquist Ceramics(JH-2)材料模型,这一模型被广泛应用于硬脆材料的动力学仿真中^[11-12]。

JH-2 模型中,材料的等效应力强度为:

$$\sigma^* = \alpha^* - D(\alpha^* - \alpha_f^*), \quad (5)$$

其中: D 是损伤系数($0 \leq D \leq 1$), α^* 是归一化的完整材料等效应力强度, α_f^* 是归一化的断裂材料等效应力强度,有:

$$\alpha^* = A(P^* + T^*)^N(1 + C \cdot \ln \dot{\epsilon}^*), \quad (6)$$

$$\begin{cases} \alpha_f^* = B(P^*)^M(1 + C \cdot \ln \dot{\epsilon}^*) \\ \alpha_f^* \leq \text{SFMAX} \end{cases} \quad (7)$$

归一化等效应力强度(σ^* , α^* , α_f^*)有着相同的形式:

$$\sigma^* = \sigma / \sigma_{\text{HEL}}, \quad (8)$$

其中: σ 是实际等效应力, σ_{HEL} 是 Hugoniot 弹性极限时的等效应力。

式(6)和(7)中, P^* 为无量纲静水压力, $P^* = P / P_{\text{HEL}}$, P 为材料所承受的静水压力, P_{HEL} 为材料在 Hugoniot 弹性极限处的静水压力; T^* 为无量纲最大静水拉伸强度, $T^* = T / P_{\text{HEL}}$, T 为材料所承受的最大静水拉伸强度; $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲应变率, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$, $\dot{\epsilon}$ 是真实应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率,值为 1.0 s^{-1} ;SFMAX 为材料的最大破坏强度; A 、 B 、 C 、 M 和 N 为材料常数。

材料的损伤系数 D 表示为:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_p^f}, \quad (9)$$

其中: $\Delta \epsilon_p$ 是塑性应变的一个累积积分, ϵ_p^f 是在静水压力 P 下的断裂塑性应变,表达式为:

$$\epsilon_p^f = D_1(P^* + T^*)^{D_2}, \quad (10)$$

其中 D_1 , D_2 为常数。

动态加载下硬脆材料的强度很大程度上受静水压力的影响。JH-2 模型的状态方程中,静水压力 P 表示为:

$$P = K_1 \mu + K_2 \mu^2 + K_3 \mu^3 + \Delta P, \quad (11)$$

其中: K_1 为材料的体积模量, K_2 、 K_3 为材料常数, $\mu = \rho / \rho_0 - 1$, ρ 为当前的材料密度, ρ_0 为材料的初始密度, ΔP 为损伤引起的压力增量。

查阅文献^[13]得石英玻璃材料的 JH-2 模型参数,如表 2 所示。

表 2 石英玻璃的 JH-2 模型参数

Tab. 2 JH-2 model parameters of quartz glass

参数	数值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 530
剪切模量/GPa	30.4
A	0.93
B	0.088
C	0.003
M	0.35
N	0.77
T/GPa	0.15
SFMAX	1.0
HEL/GPa	5.95
PHL/GPa	2.92
β	1.0
D_1	0.053
D_2	0.85
K_1 /GPa	45.4
K_2 /GPa	-138
K_3 /GPa	290

光纤研磨所用的砂纸磨粒材料为碳化硅,在研磨过程中不会发生较大的变形,因此假设磨粒

为刚体,其材料参数如表 3 所示。

表 3 碳化硅的刚体模型材料参数

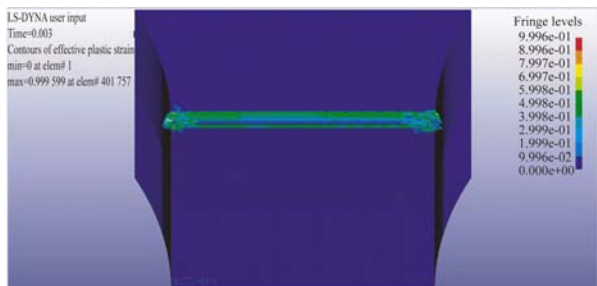
Tab. 3 Rigid body material parameters of Silicon carbide

材料	密度 /(kg · m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松比
碳化硅	3 210	480	0.142

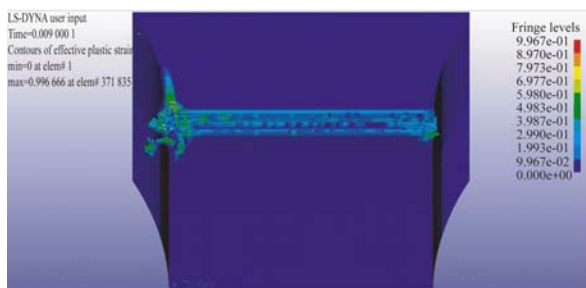
3 仿真结果

JH-2 模型使用损伤系数 D 来表示脆性材料受到的累积损伤,损伤系数 D 通过计算累积塑性应变与当前条件下断裂塑性应变的比值得到,即有塑性应变的区域已经存在损伤。研究表明,脆性材料的裂纹通常发生在有初始缺陷损伤和不易观察到的微小裂纹区域,因此,可以将 JH-2 模型中的塑性应变区域作为裂纹的产生发展区域。

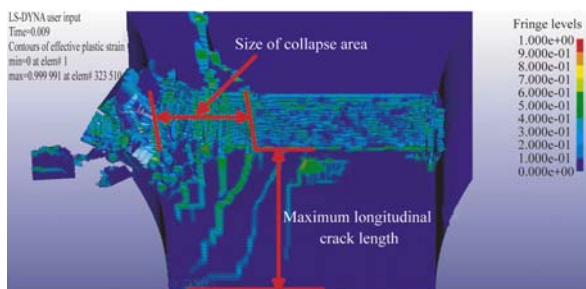
切削深度分别为 20、50 和 150 nm 时,切削后孔壁端面的塑性形变分别如图 4(a)、(b)和(c)所示。可以看出,切削深度为 20 nm 时,孔壁结构端面留下了明显的塑性划痕,划痕表面十分平整,没有明显的裂纹产生,只在靠近孔壁边缘处光纤材料有略微的凸出不平整。切削深度达到 50 nm 开始,磨粒划出的那一端光纤孔壁边缘出现崩塌,伴随有光纤材料的大块崩碎断裂去除,并有纵深和表面横向的损伤裂纹出现,裂纹沿纵向和横向发展,并有向空气孔与光纤交界面延伸的趋势。当切削深度达到 150 nm 时,孔壁边缘出现严重破坏,纵向裂纹向下发展的同时几乎已经侧向延伸至孔壁侧面,横向裂纹沿孔壁圆周方向扩展,孔壁边缘玻璃材料呈长条状被大量剥离。



(a) 切削深度 20 nm
(a) Cutting depth of 20 nm



(b) 切削深度 50 nm
(b) Cutting depth of 50 nm



(c) 切削深度 150 nm
(c) Cutting depth of 150 nm

图 4 不同切削深度下,孔壁端面的塑性形变

Fig. 4 Plastic deformation of hole wall under different cutting depths

如图 4(c)所示,为了便于对损伤进行量化,选取最大纵向裂纹长度和崩塌区域(同时有横向和纵向裂纹产生的区域)的尺寸大小进行分析,得到切削深度与崩塌区域尺寸(如图 5)以及最大纵向裂纹长度(如图 6)的关系。

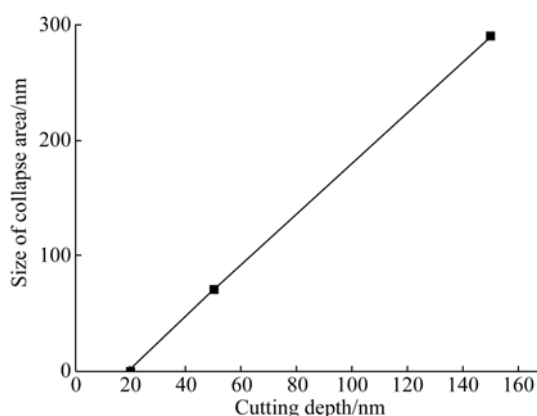


图 5 切削深度与崩塌区域尺寸的关系

Fig. 5 Relationship between cutting depth and size of collapse area

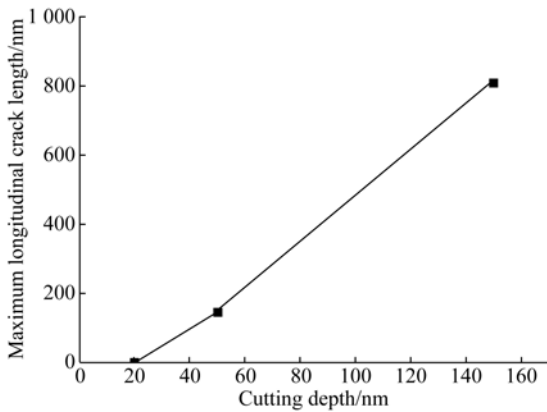


图 6 切削深度与最大纵向裂纹长度的关系

Fig. 6 Relationship between cutting depth and maximum longitudinal crack length

从图 5 和图 6 中可以看出,崩塌区域尺寸与最大纵向裂纹长度均随切削深度的增加而增加,当切削深度为 20 nm 时,孔壁的边缘基本没有崩塌和裂纹产生。

图 7 和图 8 分别表示切向力和法向力在不同切削深度下随时间的变化关系。可以看出,虽然研磨抛光速度较慢,为 0.2 m/s,但由于孔壁厚度仅为 1.2 μm ,因此磨粒切削通过单个孔壁的时长小于 10 μs ,这一过程非常短暂。切削力初始值为零,然后突然开始增大,表明磨粒开始与光纤孔壁接触,切削力在增大到一定值后开始进入相对稳定的状态,表明磨粒完全进入孔壁表面,随后,切削力开始逐步下降至零,表明磨粒划出孔壁表面。观察切削力的相对稳定阶段,可以发现当切削深度为 20 nm 时,切削力基本保持恒定,当切削深度为 50 nm 时,切削力出现小幅波动,当切削深度为 150 nm 时,切削力有着剧烈的波动。稳定的切削力表明材料是在塑性域去除,而波动的切削力表明材料发生了脆性断裂,波动越剧烈,材料的脆性断裂越严重。

从上述分析可以认为,对于该光子晶体光纤,研磨压力为 1 N、研磨速度为 0.2 m/s 时,直径为 9 μm 的磨粒,对应研磨深度约为 150 nm,会对光纤孔洞边缘造成比较严重的损伤;直径 3 μm 的磨粒,对应研磨深度约为 50 nm,会在光纤孔洞边

缘形成可见的划痕和崩塌;直径 1 μm 的磨粒,对应研磨深度约为 20 nm,只会在光纤孔洞边缘造成轻微的形变。

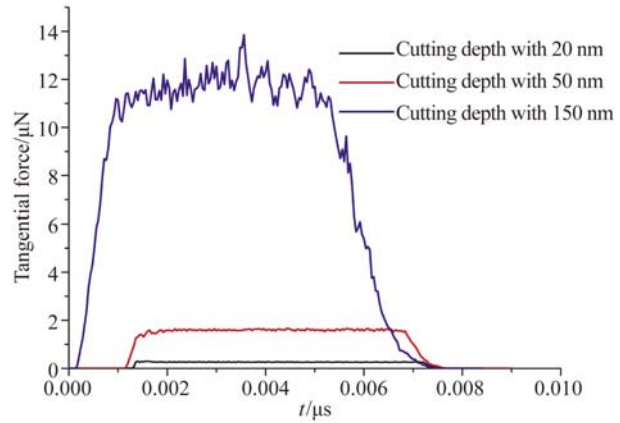


图 7 不同切削深度下,切向力随时间变化关系

Fig. 7 Tangential force versus time with different cutting depths

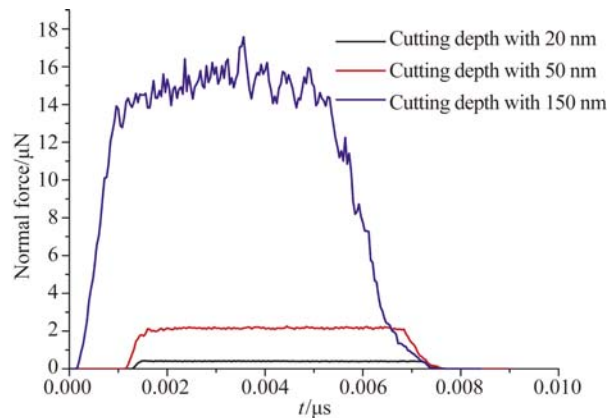


图 8 不同切削深度下,法向力随时间变化关系

Fig. 8 Normal force versus time with different cutting depths

4 验证实验

研磨实验选用日本精工公司的 SFP-510 型光纤研磨机,再分别用 9、3、1 和 0.02 μm 的砂纸对实心保偏光子晶体光纤进行端面研磨抛光,并将研磨抛光后的光纤依次进行超声清洗和烘干,最后使用扫描电子显微镜进行观察,得到的照片如图 9 所示。

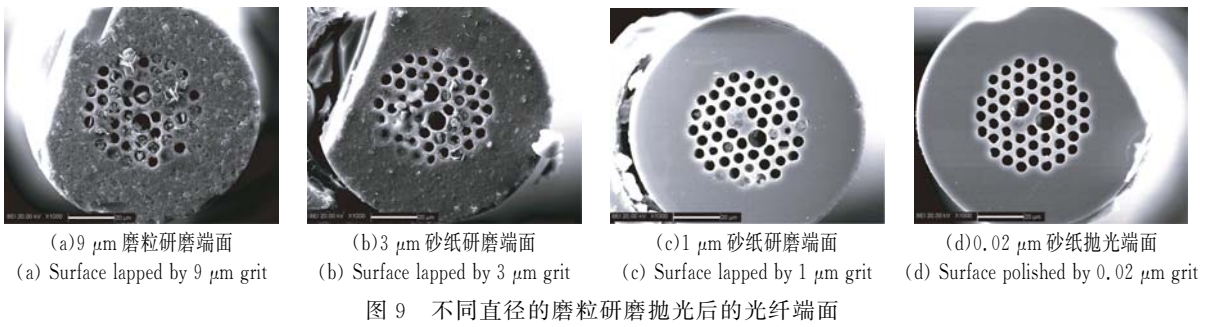


Fig. 9 Fiber end surface lapped or polished by grits with different diameters

从图 9 中可以看出,用 9 μm 砂纸研磨后,光纤端面的非孔洞区域能看到大量凹坑存在,呈现出片状剥落形式,这是 9 μm 碳化硅磨粒划过光纤表面后的裂纹扩展连通后,表面材料脆性断裂剥落的结果;3 μm 砂纸研磨后光纤端面的非孔洞区域依然能看出有部分脆性剥落的痕迹,但已经

大大减少,可以看做是脆性断裂到塑性加工的转变点;1 μm 和 0.02 μm 砂纸研磨抛光后,光纤端面基本没有脆性剥落后的凹坑,较为光滑平整,是典型的塑性加工结果,这些特点与刘德福等人^[10]的研究结果相符。对孔壁区域经行局部放大后的照片如图 10 所示。

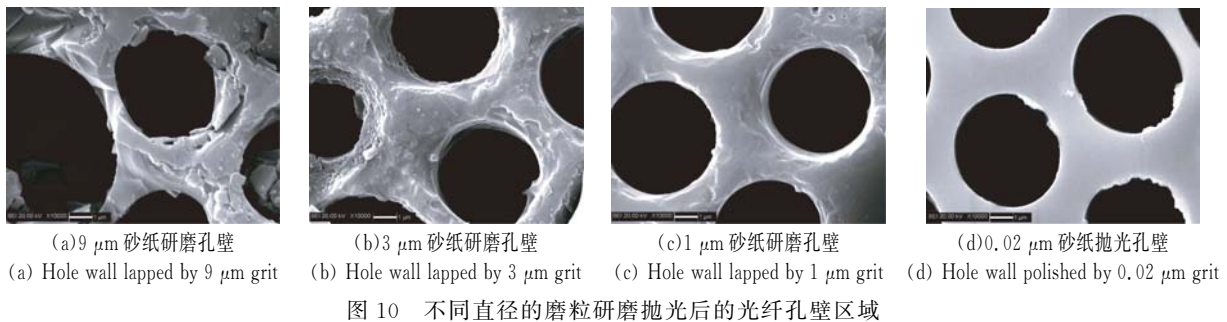


Fig. 10 Fiber hole wall lapped or polished by grits with different diameters

从图 10 可以看出,孔洞边缘的结构破坏情况较端面非孔洞区域更为严重,破坏形式主要以裂纹的扩展延伸造成的边缘崩塌为主,观察崩塌区域的形状,可以认为崩塌区域主要是由横向表面裂纹沿孔洞圆周方向延伸、纵向裂纹向下延伸至孔洞边缘形成的,这与仿真分析的结果一致。磨粒直径为 9 μm 时,孔洞边缘有着非常严重的崩塌现象,随着磨粒直径的减小,边缘崩塌的区域越来越小,直至磨粒直径为 0.02 μm 时,孔洞边缘除了少量残留的碎屑外,基本没有可见的损伤出现。将实验结果与仿真结果对比可以发现,两个结果中,孔壁边缘损伤程度随研磨深度的变化趋势相一致,但在同一研磨深度下,研磨实验结果中孔壁的损伤要比仿真结果的更加严重。这是因为仿真中只有单一磨粒切削过孔壁端面,而实际研磨过程中存在大量磨粒反复切削孔壁,每一次切

削造成的损伤都会相互影响并累积下来,最终得到的孔壁边缘损伤会比单一磨粒切削造成的损伤更加严重。

实验表明:研磨深度约为 150 nm 和 50 nm 时,光纤端面非孔洞区域材料以脆性形式去除为主,研磨深度约为 20 nm 时,光纤端面非孔洞区域材料以塑性形式去除为主,这与理论计算所得的临界切削深度 23 nm 相符。而在孔壁区域,当研磨深度为 20 nm 时,依然会在孔壁边缘造成一定的损伤,这是因为连续性结构在研磨过程中,磨粒前方会形成静水压力,能抑制裂纹的形成与扩展^[14],而孔壁区域为非连续性结构,孔壁侧面缺少约束,导致完整结构的材料加工时所处的高静水压力环境不复存在,所以即使实际研磨深度低于理论临界切削深度,依然会对光纤孔壁造成损伤。

采用越小磨粒直径的砂纸抛光,最终得到的表面质量越好。实际上,光纤的研磨抛光需要不同磨粒的砂纸配合使用,逐步加工。每一步的磨粒大小需要结合上一步来进行选择,过大的磨粒会引起较大的划痕,导致下一步的研磨过程难以去除掉这些划痕;过小的磨粒会使得上一步研磨留下的划痕无法去除,这些情况都会导致无法得到理想的端面。从实验结果可以看出,0.02 μm 砂纸可以有效地消除 1 μm 砂纸留下的痕迹且能够避免对孔壁造成损伤。如果最终抛光选用更小磨粒直径的砂纸,理论上可以获得更好的表面,但是否需要在它和 1 μm 砂纸之间加入中间磨粒进行过渡有待实验验证,由于时间有限,本文没有对此做详细研究。

5 结 论

本文通过单一磨粒切削孔壁的仿真实验分析

了实心保偏光子晶体光纤的端面研磨过程,研究了不同磨粒对光纤孔壁结构造成的损伤并通过实际研磨实验进行了验证。仿真结果与实验结果能够比较好地吻合,可以得出以下结论:

(1)有限元方法可以有效地模拟光子晶体光纤孔壁在研磨过程中裂纹的产生与边缘崩塌的形成,这对光子晶体光纤端面加工的研究具有很大帮助作用;

(2)光子晶体光纤研磨过程中,孔洞边缘比非孔洞区域更容易产生损伤,损伤主要出现在孔壁附近,由裂纹延伸造成的边缘崩塌为主,崩塌区域沿孔壁圆周方向分布;

(3)该光子晶体光纤孔壁边缘无崩塌的临界切削深度应低于普通光纤脆塑转变的临界深度 23 nm,应使用小于 1 μm 的磨粒进行抛光,即最终使用磨粒直径 0.02 μm 的砂纸进行抛光可以避免对孔壁造成损伤。

参考文献:

- [1] 陈鹤鸣,吴唯冉,汪静丽. 填充液体与方式对光子晶体光纤温敏特性的影响[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10Z):120-126.
CHEN H M, WU W R, WANG J L. Effect of different liquid and filling modes on thermo sensitive characteristics of photonic crystal fibers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10Z):120-126. (in Chinese)
- [2] 高静,于峰,匡鸿深,等. 纳秒声光调 Q 光纤激光器产生超连续谱[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5):1138-1142.
GAO J, YU F, KUANG H SH, *et al.*. Generation of supercontinuum spectra from acousto-optic Q-switched nanosecond fiber lasers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5):1138-1142. (in Chinese)
- [3] SU H X, LI Y G, LU K CH, *et al.*. Wavelength tunable Yb^{3+} -doped double-clad photonic crystal fiber laser [J]. *SPIE*, 2008, 6823:18-19.
- [4] 刘德福,段吉安,钟振. 光纤端面研磨加工的表面质量[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2):187-191.
LIU D F, DUAN J A, ZHONG J. Surface quality in end-face lapping of optical fiber [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(2):187-191. (in Chinese)
- [5] 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(2):184-189.
- [6] DONG Z C, CHENG H B. Study on removal mechanism and removal characters for SiC and fused silica by fixed abrasive diamond pellets [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 85:1-13.
- [7] BLAINEAU P, ANDRÉ D, LAHEURTE R, *et al.*. Subsurface mechanical damage during bound abrasive grinding of fused silica glass [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 353:764-773.
- [8] 刘伟,邓朝晖,万林林,等. 单颗金刚石磨粒切削氮化硅陶瓷仿真与试验研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21):191-198.
LIU W, DENG CH H, WAN L L. Simulation and experiment study for silicon nitride cutting with single diamond grain [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(21):191-198. (in Chinese)
- [9] LAURO C H, BRANDÃO L C, FILHO S L M R, *et al.*. *Finite Element Method in Machining Processes: A Review* [M]. Berlin:Springer International Publishing, 2015.
- [10] 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)
- [11] NAM J, KIM T, CHO S W. A numerical cutting model for brittle materials using smooth particle hydrodynamics [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82(1-4):133-141.
- [12] LV Z, HUANG CH ZH, ZHU H T, *et al.*. FEM analysis on the abrasive erosion process in ultrasonic-assisted abrasive waterjet machining [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(9-12):1641-1649.
- [13] CRONIN D S, BUI K, KAUFMANN C, *et al.*. Implementation and validation of the Johnson-Holmquist ceramic material model in LS-Dyna [C]. *Proceedings of the 4th European LS-DYNA Users Conference, Livermore Software Technology Corporation (LSTC) and Engineering Technology Associates, Inc. (ETA)*, 2003, 1:47-60.
- [14] 张壁, 孟鉴. 工程陶瓷磨削加工损伤的探讨[J]. *纳米技术与精密工程*, 2003, 1(1):48-56.
- ZHANG B, MENG J. Grinding damage in fine ceramics [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2003, 1(1):48-56. (in Chinese)

作者简介:



冯 迪(1972—),男,陕西西安人,博士,副教授,硕士生导师,1994年于浙江大学获得学士学位,2000年于北京机械工业学院获得硕士学位,2003年于清华大学获得博士学位,主要从事衍射微纳光学器件方面的研究。E-mail: fengdi@buaa.edu.cn



赵正琪(1992—),男,四川南充人,硕士研究生,2014年于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事光子晶体光纤端面研磨方面的研究。E-mail: sy1417109@buaa.edu.cn