

文章编号 1004-924X(2016)增-0493-10

## 超声椭圆振动辅助化学机械抛光 光纤端面的材料去除机理研究

陈 涛<sup>1,2</sup>, 刘德福<sup>1,2\*</sup>, 严日明<sup>1</sup>, 余 青<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083;

2. 高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 为了描述超声振动辅助化学机械抛光光纤端面过程中材料的去除机理, 建立了超声振动辅助化学机械抛光过程中光纤材料去除模型。根据实验观察的抛光垫的表面形貌合理地建立抛光垫表面形貌的数学模型; 接着, 分析抛光过程中的两体三体接触的抛光粒子数目; 分析不同方向的超声振动在化学机械抛光过程中去除光纤材料的机理, 综合考虑抛光粒子及工件的材料特性、超声振动特性, 分别建立了不同工艺下的材料去除模型; 对比光纤端面的超声振动辅助化学机械抛光实验结果与理论计算结果, 以验证模型的可靠性。实验结果表明: UHV-CMP、UVV-CMP、UEV-CMP 相较于普通 CMP 对光纤的材料去除率分别提升 60%、85.6% 和 145%。结论: 超声振动有利于提高光纤端面的化学机械抛光材料去除率, 且理论与实验对比结果较为吻合, 验证了材料去除模型的可靠性。

**关键词:** 超声椭圆振动; 化学机械抛光; 材料去除机理; 光纤端面

中图分类号: TG356.28; TB559 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20162413.0493

## Material removal mechanism study of ultrasonic elliptical vibration assisted chemical mechanical polishing for fiber end-face

CHEN Tao<sup>1,2</sup>, LIU De-fu<sup>1,2\*</sup>, YAN Ri-ming<sup>1</sup>, YU Qing<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanic and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. State Key Laboratory of high performance complex manufacturing, Changsha 410083, China)

\* Corresponding author, Email: liudefu@cus.edu.cn

**Abstract:** To describe material removal mechanism in the process of auxiliary chemico-mechanical polishing fiber end face of ultrasonic vibration, Fiber material removal model in the auxiliary chemico-mechanical polishing process of ultrasonic vibration is established; Reasonably establish mathematical model of surface appearance of polishing pad according to surface appearance of polishing pad of experimental observation; Analyze polishing particle number of two-body and three-body contact in the process of polishing and analyze fiber material removal mechanism of ultrasonic vibration of different directions in the chemico-mechanical polishing process; Respectively establish material removal model under different process after overall consideration of polishing particle, workpiece material characteris-

收稿日期: 2016-04-20; 修订日期: 2016-05-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51275534); 湖南省自然科学基金资助项目 (No. 2015JJ2153)

tic and ultrasonic vibration characteristic; Compare experimental result of auxiliary chemico-mechanical polishing of ultrasonic vibration on fiber end face and theoretical calculation result to verify reliability of model. Result: experimental result shows that compared with ordinary CMP, fiber material removal rate of UHV-CMP, UVV-CMP and UEV-CMP respectively increases by 60%, 85.6% and 145%. Conclusion: ultrasonic vibration helps to improve material removal rate of chemico-mechanical polishing on fiber end face, and theoretical and experimental comparison results are relatively identical, which verifies reliability of material removal model.

**Key words:** ultrasonic ellipse vibration; chemico-mechanical polishing; material removal mechanism; fiber end face

## 1 引言

光纤阵列(Fiber Array, FA)是光纤通信的基础元件,高平坦化、超光滑的端面是减小信号损耗,实现稳定连接的保证。光纤阵列主要由光纤及盖板(石英玻璃)、V型槽(单晶硅)、UV固化胶等结构组成<sup>[1-2]</sup>。在对光纤阵列端面进行抛光时,三种材料的物理及化学性质均存在着明显差异,尤其石英玻璃和单晶硅皆为脆硬性材料,导致光纤阵列端面的这两种材料去除效果有明显不同,从而影响整个光纤阵列端面抛光的效果,最终导致波导器件的对接质量低下。

光纤阵列端面的平坦化主要采用化学机械抛光(Chemical Mechanical Polishing, CMP)技术。化学机械抛光是一种广泛应用的获得光整表面的工艺,但面对脆硬性材料的加工时,常规化学机械抛光工艺的抛光效率仍不能满足要求。超声振动辅助加工在提高脆硬性材料的生产效率、降低表面粗糙度等方面表现出了巨大的优越性<sup>[3-4]</sup>,若将超声椭圆振动用于化学机械抛光过程,抛光效果可得到明显的改善<sup>[5]</sup>。

目前,化学机械抛光中常用的抛光液有 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CeO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 抛光液等,其中 $\text{SiO}_2$ 抛光液对光纤阵列整体抛光效果较好<sup>[6]</sup>,因此选用 $\text{SiO}_2$ 抛光液。对于单晶硅材料的V型槽, $\text{SiO}_2$ 纳米粒子为硬质粒子,而对于石英玻璃材料的光纤端面而言, $\text{SiO}_2$ 纳米粒子的硬度更低,为软质粒子。因此在抛光光纤阵列时,由于材料性质的不同必然引起同一种粒子对两种不同材料去除机理的差异,而超声振动施加于不同方向上时,材料去除机理也不同。国内外众多研究学者对 $\text{SiO}_2$ 抛光液抛光单晶硅的材料去除机理研究较多<sup>[7-8]</sup>,而基于

超声振动的 $\text{SiO}_2$ 抛光液抛光石英玻璃的材料去除机理还需要深入研究,因此研究了光纤端面在超声辅助化学机械抛光的材料去除机理很有必要。

本文通过弹性与超弹性接触力学理论,从抛光垫形貌及抛光过程中的粒子数目出发,以光纤阵列为对象,着重研究不同超声振动方向上软质抛光粒子对光纤端面材料的去除机理,从而建立一种新的关于软质粒子抛光光纤端面的材料去除率模型。

## 2 抛光垫及其与抛光试件、抛光粒子之间的接触

### 2.1 抛光垫的形貌模型

建立抛光垫表面形貌的计算模型对建立化学机械抛光的材料去除率模型至关重要。目前,研究者提出的抛光垫表面形貌模型主要包括等半径的半球模型、等曲率半径的粗糙峰模型<sup>[9]</sup>和半球接触模型<sup>[1]</sup>,这三种模型都能部分解释CMP工艺过程中的接触问题。等半径的半球模型可解释抛光压力对抛光垫与抛光试件的实际接触面积的影响,而无法描述单个抛光粒子与抛光试件的接触;等曲率半径的粗糙峰模型能描述单个粒子与抛光试件的接触,但无法解释抛光压力对抛光试件与抛光垫实际接触面积的影响;半球接触模型虽然能部分解释抛光压力对抛光垫与抛光试件的实际接触面积的影响以及单个粒子与抛光试件的接触,但是抛光垫表面微凸体半径的大小不可能为负值,而且微凸峰高度与半径之间并没有必然的联系,假设成两个独立的分布分开讨论更能合理地描述抛光垫表面形貌。

试验采用多孔聚氨酯材料的抛光垫,通过扫描电子显微镜观察其表面形貌如图1所示。

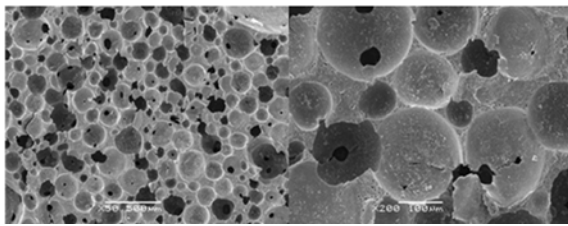


图 1 聚氨酯抛光垫表面形貌 SEM 图

Fig. 1 Surface morphology of polishing pad observed by SEM

由概率统计理论,对抛光垫凹凸体投影圆的直径大小分布,可根据随机抛光垫样本的分布来估计总体的分布。对抛光垫形貌中凹凸体投影圆直径的测试结果绘制直方图如图 2(a)所示,可知抛光垫上凹凸体投影圆直径的分布并非为正态分布,而是近似服从伽马分布。

结合图 2,可假设凸峰和凹谷在  $xoy$  平面上投影圆的直径  $d$  服从特征参数为  $\lambda$  和  $\gamma$  的  $\gamma$  分布:

$$\varphi(d_p) = \frac{\lambda^\gamma d_p^{\gamma-1}}{\Gamma(\gamma)} e^{-\lambda d_p}, \quad (1)$$

基于伽马函数对上述样本进行参数估计,得到伽马分布的参数为(2.8, 0.027 5),即:

$$\varphi(d_p) = \frac{0.027\ 5^{2.8} d_p^{1.8}}{\Gamma(2.8)} e^{-0.027\ 5 d_p}. \quad (2)$$

假设检验是验证所假设的分布的合理性的有效方法。在众多假设检验方法中,Kolmogorov-Smirnov 检验是一种稳定而且适用性强的假设检验方法。基于该假设检验方法所得假设检验结果如表 1 所示。凹凸体投影圆直径样本和所估计的伽马分布的累积分布曲线如图 2(b)所示。结果表明对凹凸体投影圆直径进行伽马分布的假设合理。

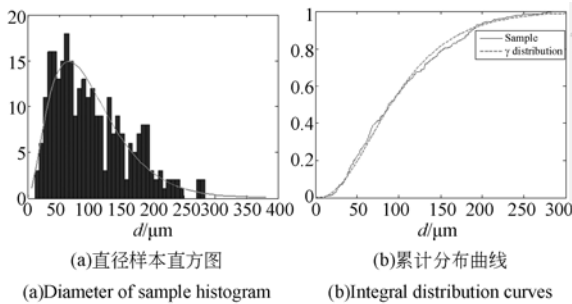


图 2 凹凸体投影圆

Fig. 2 Projection circle of concave and convex bodies

表 1 Kolmogorov-Smirnov 假设检验结果

Tab. 1 Kolmogorov-Smirnov test results

变量名称	变量描述	变量解释	检验结果
$h$	检验结果判定	0:接收原假设 1:拒绝原假设	0
$p$	原 0 假设发生的概率	$p > 0.05$ 接受原假设	0.572 1
$\alpha$	显著性水平	—	0.05
$k_s$	检验所用的统计量的值	$c_v > k_s$ 时,接受原假设	0.046 1
$c_v$	临界值	—	0.080 4

于是,根据  $\gamma$  分布的特征,可得抛光垫凹凸体投影圆的平均直径为:

$$E(d_p) = \frac{\lambda}{\gamma}. \quad (3)$$

两个粗糙表面的接触可以等效为一个粗糙表面和一个理想光滑表面的接触,并可用赫兹接触力学理论描述两个表面的接触。抛光垫的表面粗糙度一般在微米级,而光纤阵列端面精抛时表面粗糙度为纳米级,抛光粒子直径在  $10^2$  nm 级。在考虑抛光垫、抛光试件和抛光粒子之间的接触问题时,抛光试件表面粗糙度相对于其他二者而言较小,可将其表面视为理想光滑平面。为全面地描述抛光垫表面的形貌和抛光试件表面、抛光粒子三者之间的接触,提出微凸峰和高度独立分布的正弦波形凸体模型,如图 3 所示。首先给出如下假设:1. 假设抛光垫表面由一系列截面为正弦波形的回转体凸起与凹坑组成,凸起与凹坑的 0 平面位于平均平面上;2. 微凸体的高度  $z$  服从正态分布。微凸体在 0 平面上的投影近似为圆形,其直径服从  $\gamma$  分布,如图 2 所示。

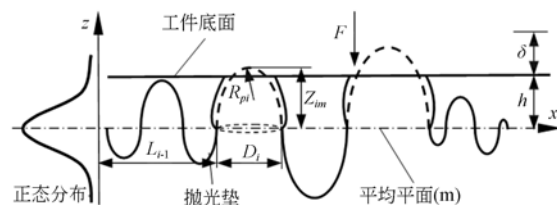


图 3 粗糙抛光垫表面与光滑试件表面的接触模型

Fig. 3 Contact model of morphology model of polishing pad and specimen surface

如图 3 所示,假设单个微凸体  $i$  的高度为正弦形,故有:

$$z_i = z_{im} \sin \left[ \frac{\pi}{D_i} x + L_{i-1} \right], x \in (0, D_i), \quad (4)$$

其中:  $z_i(x)$  为抛光垫椭圆轮廓曲线函数 ( $\mu\text{m}$ ),  $L_{i-1}$  为第  $i$  个微凸体距原点的距离 ( $\mu\text{m}$ ),  $z_{im}$  为单个凹凸体幅值,  $z_{im} > 0$  时为凸体,  $z_{im} < 0$  时为凹坑,  $D_i$  为微凸体投影在平均平面上的圆的直径 ( $\mu\text{m}$ ).

在接触时,可将接触部分视为小尺寸的球面体,其半径为凸体顶端的曲率半径,则接触的单个微凸体  $i$  的顶端曲率半径  $R_{pi}$  为:

$$R_{pi} = \frac{[1 + z_i'(x)^2]^{3/2}}{|z_i''(x)|} \Big|_{x=0.5D_i} = \frac{D_i^2}{\pi^2 |z_{im}|}, \quad (5)$$

在  $xoz$  截面上,抛光垫粗糙峰凹凸体的高度幅值  $z_{im}$  服从正态分布  $N(m, \sigma)$ :

$$p(z_{im}) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(z_{im} - m)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (6)$$

其中:  $p$  为抛光垫椭圆轮廓高度分布概率密度函数,  $m$  为抛光垫椭圆轮廓平均平面 ( $\mu\text{m}$ ),  $\sigma$  为峰(谷)值分布的标准差 ( $\mu\text{m}$ ).

假设凹凸体个数相等,对于高斯表面,有:

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{\pi}{2}} R_a. \quad (7)$$

因此,根据抛光垫表面粗糙度值可算得抛光垫粗糙峰凹凸体的高度幅值分布  $N(m, \sigma)$ .

在 CMP 过程中,抛光液流动所产生的压力比较小,因此流体压力对抛光盘的作用可忽略,认为工作压力全部由抛光盘的粗糙接触峰承担<sup>[10]</sup>. 当两个表面接近至平均平面  $m$  的距离为  $h$ ,即光纤阵列端面被压到距离平均平面  $h$  的位置时,与抛光垫粗糙表面上高度大于  $h$  的所有微凸体发生接触.因此,对于高度为  $z$  的微凸体,其发生接触的概率  $P_c$  为:

$$P_c(z > h) = \int_h^\infty p(z) dz, \quad (8)$$

则能发生接触的微凸体的数量为:

$$N \int_h^\infty p(z) dz = \frac{4\alpha A_0}{\pi E^2(d_p)} \int_h^\infty p(z) dz, \quad (9)$$

其中:  $N$  为微凸体总数,  $\alpha$  为凹凸体面积对光纤阵列端面面积的占比,  $A_0$  为光纤阵列端面总面积 ( $\text{m}^2$ ),  $E(d_p)$  为微凸体投影圆的平均直径 ( $\text{m}$ ).

由于  $\delta = z - h$ ,则总的实际弹性接触面积为:

$$A_{re} = \pi N \int_h^\infty \int_0^{+\infty} R_p(z-h) p(z) p(R_p) dz dR_p, \quad (10)$$

总的承载载荷为:

$$F =$$

$$\frac{4}{3} NE_{pw} \int_h^{+\infty} \int_0^{+\infty} R_p^{\frac{1}{2}} (z-h)^{\frac{3}{2}} p(z) p(R_p) dz dR_p, \quad (11)$$

其中,  $F$  为抛光试件承受的载荷 ( $\text{N}$ );  $E_{pw} = \left( \frac{1 - \nu_p^2}{E_p} + \frac{1 - \nu_w^2}{E_w} \right)$ ,  $E_p$ 、 $E_w$  和  $\nu_p$ 、 $\nu_w$  分别抛光垫和抛光试件为两个接触体的弹性模量和泊松比.从而光纤阵列端面承受的平均压力可表示为:

$$P = \frac{F}{A_0} =$$

$$\frac{4}{3A_0} NE_{pw} \int_h^{+\infty} \int_0^{+\infty} R_p^{\frac{1}{2}} (z-h)^{\frac{3}{2}} p(z) p(R_p) dz dR_p. \quad (12)$$

聚氨酯抛光垫材料和光纤端面的参数如表 2 所示.

表 2 抛光垫和光纤阵列基本参数

Tab. 2 Parameters for pad model calculation

变量	描述	值	单位
$A_0$	光纤阵列端面面积	6.25	$\text{mm}^2$
$E_p$	抛光垫的弹性模量	0.01	GPa
$\nu_p$	抛光垫的泊松比	0.5	—
$R_a$	抛光垫的表面粗糙度	6	$\mu\text{m}$
$E(d_p)$	抛光垫凹凸峰投影圆平均面积	36.35	$\mu\text{m}$
$E^*$	等效弹性模量	$1.33 \times 10^7$	Pa

令抛光垫变形量为抛光试件相对于抛光垫最高粗糙峰的压入量(变形量):

$$\delta_{asp} = h_0 - h, \quad (13)$$

其中:  $\delta_{asp}$  为抛光垫变形量 ( $\mu\text{m}$ ),  $h_0$  为抛光垫最高粗糙峰 ( $\mu\text{m}$ ), 令  $h_0 \approx 3\sigma$ .

根据上述模型和参数计算得到平均抛光压力与抛光试件相对于平均平面高度  $h$ 、抛光垫变形量  $\delta_{asp}$  之间的关系如图 4 所示.随着抛光压力增大,抛光垫的接触高度成非线性降低.在一般抛光工艺下,抛光压力在 50 kPa 左右,抛光垫粗糙度为 6  $\mu\text{m}$  时,计算得到光纤阵列端面距平均平面高度约为 5.95  $\mu\text{m}$ ,聚氨酯抛光垫变形量约为 16.61  $\mu\text{m}$ .

## 2.2 软质抛光粒子与抛光垫、光纤端面的微观接触

在化学机械抛光工艺中,抛光试件端面材料由嵌入在抛光垫上的抛光粒子(抛光垫/抛光粒

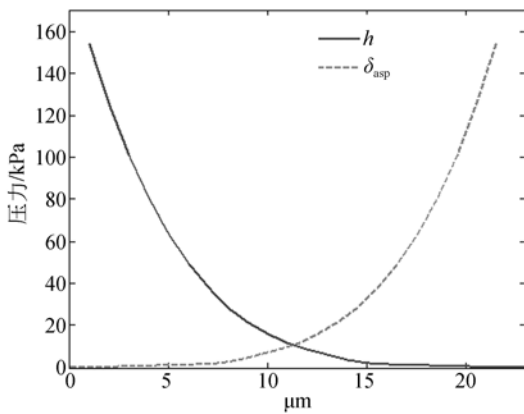


图 4 平均抛光压力与抛光试件高度  $h$  和抛光垫变形量  $\delta_{asp}$  的关系

Fig. 4 Relationship between polishing pressure  $P$  and the workpiece position  $h$ , and polishing pad deformation  $\delta_{asp}$

子/工件三体接触区的粒子)和游离在抛光液中的抛光粒子(抛光粒子/工件两体接触区的粒子)去除,而且抛光粒子的数量以及抛光粒子的粒径都将影响抛光试件表面的材料去除率<sup>[11]</sup>。

Jeng 的研究表明,试件与抛光垫在抛光压力作用下发生接触,在试件端面的总抛光粒子数  $N_r$  与抛光试件的名义面积  $A_0$  的关系为<sup>[12]</sup>:

$$N_r = \frac{6A_0(3\sigma - h)\rho_s c}{\pi\rho_a \bar{D}^3}, \quad (14)$$

其中: $A_0$ 为名义接触面积( $m^2$ ), $\rho_s$ 为抛光液的密度( $kg/m^3$ ), $c$ 为抛光粒子的质量浓度, $\rho_a$ 为抛光粒子的密度( $kg/m^3$ ), $\bar{D}$ 为抛光粒子的平均直径( $m$ )。

三体接触区的抛光粒子存在于抛光垫与工件的实际接触区域,根据上式计算三体接触区的抛光粒子数  $N_a$ 为:

$$N_a = n_r A_{re} = \frac{N_r}{A_0} A_{re} = \frac{6(3\sigma - h)\rho_s c}{\pi\rho_a \bar{D}^3} A_{re}, \quad (15)$$

其中: $n_r$ 为单位面积上的抛光粒子数; $A_{re}$ 为实际接触面积( $m^2$ )。

该模型表明,随着抛光垫下压高度  $h$  减小,与抛光试件接触的抛光粒子数增加,也就意味着抛光压力越大,参与抛光过程的抛光粒子数目越多。

### 3 超声辅助软质粒子去除硬性材料的去除率模型

超声振动的基本振动模式包括纵向振动、弯曲振动和扭转振动。单一振动模式的超声振动技术的应用非常广泛,而复合振动在加工制造中的优势正日渐凸显<sup>[13]</sup>。通过复合两种振动于一套超声振动系统,即可实现工具或工件的二维超声振动。在复合振动的研究中,一般复合两种振动模式,即:纵弯复合、纵扭复合和弯扭复合超声振动<sup>[14]</sup>。本文采用杆件的纵弯复合振动方式,以期获得工件的超声椭圆振动并将用于光纤阵列端面的化学机械抛光加工。超声椭圆振动辅助化学机械抛光是一个复杂的工艺过程,涉及到很多工艺参数,从而导致超声椭圆振动辅助化学机械抛光的材料去除机理分析及模型建立非常复杂。在文中建模计算过程中涉及到的材料的主要性能参数如表 3 所示。

表 3 材料参数

Tab. 3 Material parameters

物理参量	石英玻璃	单晶硅	SiO <sub>2</sub> 纳米粒子
硬度(GPa)	12	9.8	11
密度( $g \cdot cm^{-3}$ )	2.4	2.329	2.2
弹性模量(GPa)	60~64	190	73
泊松比	0.19	0.28	0.17

在超声椭圆振动辅助作用下,抛光试件、抛光垫和抛光粒子之间的接触如图 5 所示,抛光试件在水平和垂直方向分别做速度为  $v_1$  和  $v_2$  的超声振动,抛光垫在抛光机的带动下作线速度为  $v_0$  的离心式回转运动,抛光粒子在抛光液中均匀分布。

当抛光粒子的硬度小于抛光试件材料的硬度时,采用超声椭圆振动辅助化学机械抛光工艺,试件表面材料的去除主要通过黏附作用实现。超声辅助抛光过程中,水平方向的相对运动表现出弹性黏附去除,而垂直方向的相对运动则表现为撞击黏附去除。

#### 3.1 水平方向超声振动下的弹性黏附去除

在水平方向的相对运动中,二体接触区和三体接触区的抛光粒子均对试件表面的材料有黏除效果,因两种区域的粒子与试件接触载荷不同,需分别计算。超声抛光过程中,抛光试件沿水平方

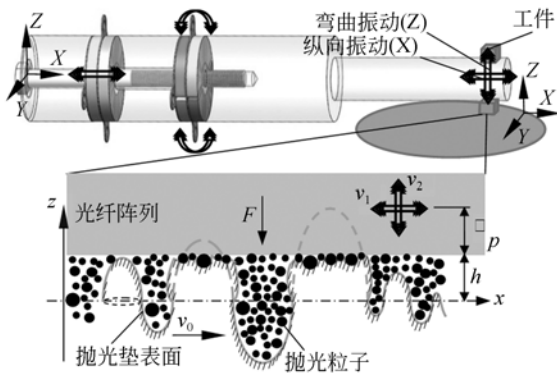


图 5 抛光试件、抛光垫、抛光粒子接触示意图

Fig. 5 Schematic of contact among workpiece, pad and particles

向做超声振动,其运动速度为  $u$ 。在正压力的作用下,抛光粒子在抛光试件表面来回运动,如图 6 所示。

软质的抛光粒子在正压力作用下与抛光试件表面发生弹性黏着接触,此时抛光试件表面的材料主要由软质抛光粒子的弹性黏附作用去除。对于半径为  $R$  的抛光粒子和抛光试件表面的接触模型,根据 Tabor 无量纲判据:

$$\lambda = \left( \frac{R\gamma^2}{E_{sw}^2 \epsilon^3} \right)^{1/3}, \quad (16)$$

其中:  $\gamma$  为表面能(erg/m<sup>2</sup>),  $\epsilon$  为平衡间距(m)。

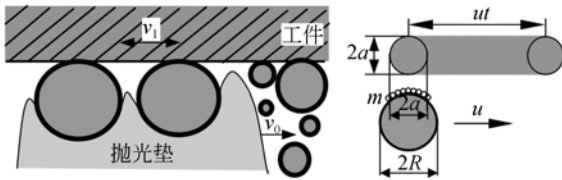


图 6 水平方向超声振动时软质粒子与工件表面的接触与去除

Fig. 6 Schematic of elastic contact and removal between soft particles and workpiece surface under ultrasonic horizontal vibration

计算结果表明二者的接触可用 JKR 接触模型来描述。假设抛光粒子为球体,接触弧的圆心角为  $\theta$ ,微凸体在单个粒子载荷  $F_{swi}$  作用下产生屈服。对于三体接触区域的抛光粒子,所受该载荷为:

$$F_{swi} = \frac{4E_{sw}a_i^3}{3R_i} - (8\pi\gamma E_{sw}a_i^3)^{1/2}. \quad (17)$$

对于处于二体接触区域的抛光粒子,其所受

载荷为 0。但是,由于表面黏着力的作用,接触半径并不为零:

$$a_2 = (9\pi\gamma R_i^2 / 2E_{sw})^{1/3}. \quad (18)$$

在三体接触区,单个抛光粒子基于弹性接触,滑行距离  $x$  时,吸附黏除抛光试件表面的分子层,故对抛光试件材料的去除量:

$$V_{iH} = k_s k_c ut \widehat{mnd} = 2k_s k_c utdR_i \arcsin \frac{a_i}{R_i}, \quad (19)$$

其中:  $d$  为被去除表面材料的平均直径(m),  $\widehat{m}$  为抛光粒子与试件的接触弧长(m)。

从而单个粒子材料去除速率为:

$$V_{iHT} = \frac{1}{A_0} \frac{dV_i}{dt} = \frac{2}{A_0} k_s k_c utdR_i \arcsin \frac{a_i}{R_i}. \quad (20)$$

分别基于二体和三体 JKR 接触理论,计入二体和三体接触区域的抛光粒子数计算,可得到总的材料去除率为:

$$\begin{aligned} MRR_x &= \frac{2udk_s k_c}{A_0} \left[ \int_0^{+\infty} R \arcsin \frac{a}{R} N_a p(R) dR + \int_0^{+\infty} R \arcsin \frac{a_0}{R} (N_r - N_a) p(R) dR \right] \\ &= \frac{2udk_s k_c}{A_0} \left\{ \int_0^{+\infty} \left[ R \arcsin \frac{a}{R} N_a + R \arcsin \frac{a_0}{R} (N_r - N_a) \right] p(R) dR \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

### 3.2 竖直方向超声振动下的撞击黏附去除

当试件在超声振动作用下沿着竖直方向与抛光粒子接触时,二体接触区和三体接触区的所有抛光粒子都对试件形成撞击黏附作用去除抛光试件表面材料。

在该过程中,抛光试件的竖直超声振动可以视为抛光试件静止不动,而抛光粒子以抛光试件的运动速度撞击试件。假设一个半径为  $R$  的球形抛光粒子以竖直方向超声振动速度  $v_2$  垂直撞击抛光试件,如图 7 所示。

在竖直方向超声振动时,撞击黏除的最大作用发生在抛光试件运动到竖直方向向下运动的最大位移处。在二体接触区,设某单个抛光粒子的质量为  $m_i$ ,接触瞬间时间为 0,此时撞击力最大,经历时间  $t_s$  后,粒子与抛光试件同步运动,直至撞击力减小至 0,随后粒子与抛光试件分开,被流动的抛光液带走。撞击发生在抛光试件向着粒子运

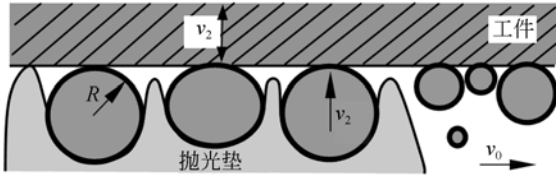


图 7 竖直方向超声振动时软质粒子与工件表面的接触与去除

Fig. 7 Schematic of elastic contact and removal between soft particles and workpiece surface under ultrasonic vertical vibration

动期间,背离粒子运动期间没有撞击作用,且冲击力满足正弦关系,即:

$$F_{swi}(t) = F_{swm} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right), t \in \left(0, \frac{T}{2}\right), \quad (22)$$

其中:  $T$  为超声振动周期 (s),  $F_{swm}$  为最大冲击力 (N)。取决于几何形状,材料和法向冲击参数,对于抛光粒子与刚性抛光试件之间的弹性接触,其最大冲击力为:

$$F_{swm} = \left(\frac{5m_i v_s^2}{3}\right)^{3/5} \left[\frac{4E_s \sqrt{R_i}}{3(1-\nu_s^2)}\right]^{2/5} = \left(\frac{20\pi\alpha_s v_s^2}{9}\right)^{3/5} \left[\frac{4\sqrt{R_i}}{3(1-\nu_s^2)}\right]^{2/5} R_i^2, \quad (23)$$

其接触区域半径:

$$a_{2i}^3 = \frac{3R_i}{4E_{sw}} \left[ \frac{F_{swm} + 3\pi R_i \gamma + \sqrt{6\pi R_i \gamma F_{swm} + (3\pi R_i \gamma)^2}}{3(1-\nu_s^2)} \right]. \quad (24)$$

对于三体接触区,其载荷  $F_{spwi}$ :

$$F_{spwi}(t) = f + f_{swm} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right), t \in \left[0, \frac{T}{2}\right]. \quad (25)$$

故其最大冲击力为:

$$F_{spwm} = F + F_{swm} = F + \left(\frac{20\pi\alpha_s v_s^2}{9}\right)^{3/5} \left[\frac{4E_s}{3(1-\nu_s^2)}\right]^{2/5} R_i^2, \quad (26)$$

其接触区域半径:

$$a_{3i}^3 = \frac{3R_i}{4E_{sw}} \left[ \frac{F_{spwm} + 3\pi R_i \gamma + \sqrt{6\pi R_i \gamma F_{spwm} + (3\pi R_i \gamma)^2}}{3(1-\nu_s^2)} \right]. \quad (27)$$

从而可计算竖直方向超声振动作用下的材料去除率为:

$$MRR_z = \frac{2udk_s k_c}{A_0} \left\{ \int_0^{+\infty} \left[ \text{Rarcsin} \frac{a_2}{R} N_a + \text{Rarcsin} \frac{a_3}{R} (N_r - N_a) \right] p(R) dR \right\}. \quad (28)$$

同理,在纵弯复合型超声椭圆振动辅助化学机械抛光工艺中,总材料去除率为:

$$MRR_C = k \sqrt{MRR_x^2 + MRR_z^2}, \quad (29)$$

## 4 试验与讨论

### 4.1 超声振动辅助化学机械抛光装置

以纵弯复合式超声椭圆振动装置为基础,设计了一套光纤阵列组件端面的超声椭圆振动辅助化学机械抛光系统,其结构示意图如图 8 所示。

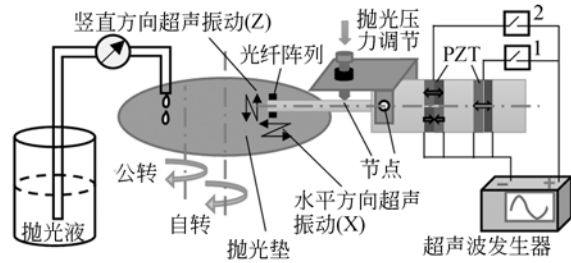


图 8 超声椭圆振动辅助 CMP 抛光系统示意图

Fig. 8 Schematic of ultrasonic elliptical vibration assisted CMP experimental setup

通过分别控制开关 1、2 的开闭,可分别实现水平超声振动辅助化学机械抛光 (Ultrasonic horizontal vibration Assisted Chemical Mechanical Polishing, UHV-CMP)、竖直方向超声振动辅助化学机械抛光 (Ultrasonic vertical vibration Assisted Chemical Mechanical Polishing, 简写 UVV-CMP) 和超声椭圆振动辅助化学机械抛光 (Ultrasonic elliptical vibration Assisted Chemical Mechanical Polishing, UEV-CMP)。

### 4.2 抛光压力对材料去除率的影响

在为验证建立的材料去除率模型是否可靠正确,采用抛光压力单因素变化,其它抛光参数如表 4 所示。在该实验条件下,水平方向和竖直方向超声振幅分别为  $3 \mu\text{m}$  和  $2.5 \mu\text{m}$ 。

不同抛光压力对光纤端面的抛光实验结果和由式(29)得到的计算结果对比如图 9 所示。随着抛光压力的增加,不同抛光工艺下的材料去除率随之增加。结果表明,本文提出的软质粒子抛光硬性材料的去除率模型与实验结果吻合。水平方向超声 CMP 相较于传统 CMP 工艺的材料去除

速率提升约 60%。竖直方向超声振动辅助 CMP 工艺相较于传统 CMP 工艺在材料去除率上提升约 85.6%。椭圆复合超声振动 CMP 工艺综合了

水平方向和竖直方向超声 CMP 工艺对材料表面的去除作用,相较于普通 CMP 工艺的去除速率提升约 145%。

表 4 超声振动辅助化学机械抛光光纤阵列组件的试验参数

Tab. 4 Polishing parameters to verify model

工艺参数	值	工艺参数	值
抛光粒子	SiO <sub>2</sub>	抛光液流量(ml·min <sup>-1</sup> )	15
抛光液密度(g·cm <sup>-3</sup> )	0.96	抛光时间(min)	30
抛光粒子粒径(nm)	50	抛光盘自转转速(r·min <sup>-1</sup> )	3
抛光粒子浓度/%	2	抛光盘公转转速(r·min <sup>-1</sup> )	30
抛光液 pH	9	超声振动功率(W)	480
抛光压力(kPa)	22.85, 37.14, 51.43, 65.72, 80.01	超声振动频率(kHz)	35.3

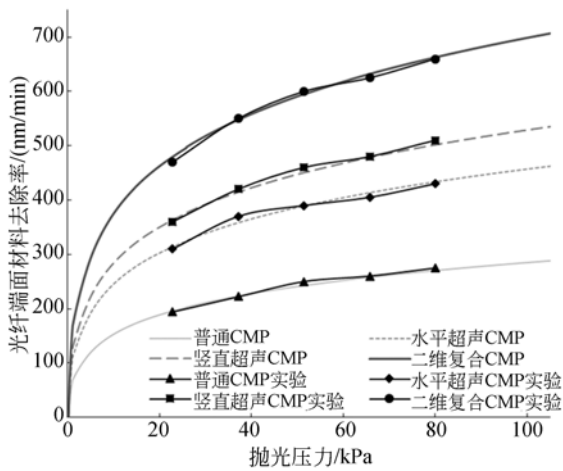


图 9 抛光压力与光纤端面在不同 CMP 工艺下材料去除率的关系

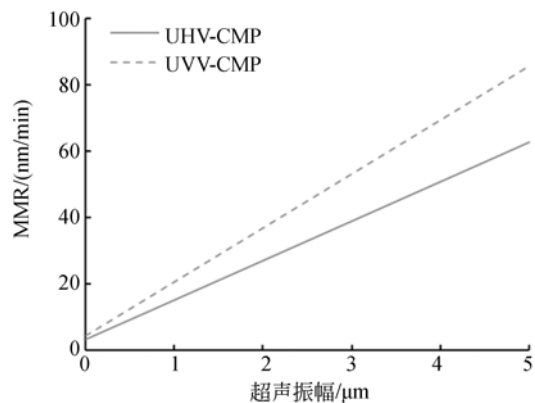
Fig. 9 MRR versus polishing pressure under different CMP process

从整体上来看,无论是常规 CMP 还是超声振动辅助 CMP,随着抛光压力的增大,抛光垫与试件之间的接触面积增大,接触区域的抛光粒子增多,从而导致光纤端面的材料去除速率增加。在同一抛光压力下比较 4 种抛光工艺,超声椭圆振动辅助 CMP 的材料去除速率最高,其原因在于:在超声椭圆振动过程中,超声振动相较于常规 CMP 工艺,极大地加快了化学反应速率;水平方向的振动可以提高抛光粒子在材料表面的运动速度且有利于材料去除后及时脱离接触面;竖直方向的振动对抛光液可以对抛光液产生搅动作用,从而不断排走被去除的材料,使得抛光试件表

面和抛光液始终保持新鲜状态,同时增加了抛光粒子对材料表面的弹性撞击作用,从而提高材料的去除速率;超声椭圆振动综合了水平振动和竖直振动各自的优势,从而大幅提高材料去除速率。

### 4.3 超声振幅对材料去除率的影响

根据式(21)、(28)和(29),利用表 4 所示参数,计算得到超声振动的振幅与光纤端面材料去除率定量关系,如图 10 所示。运用 UHV-CMP、UVV-CMP 和 UEV-CMP 三种工艺抛光,其材料去除率均随着超声振幅的增加而增加。其原因在于:在超声振动作用下,随着振幅增大,其超声振动能量增加,根据 Arrhenius 定理,增加的动能使得反应物的化学反应活化能降低,从而加剧抛光液与试件之间的化学作用。而在相同的超声振动频率情况下,超声振幅增加,超声振动速度相应加



(a)UHV-CMP和UVV-CMP工艺  
(a)UHV-CMP, UVV-CMP

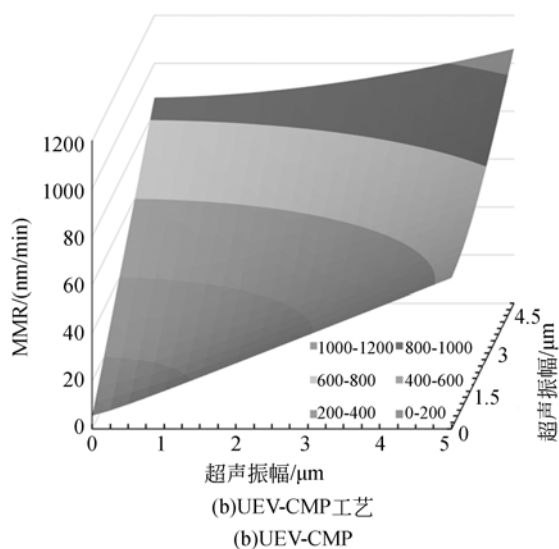


图 10 SiO<sub>2</sub> 的超声辅助化学机械抛光中超声振幅与材料去除率之间的关系

Fig. 10 MRR versus vibrating amplitude under (a) UHV-CMP, UVV-CMP and (b) UEV-CMP

快,从而引起工件与抛光粒子之间的相对运动速度加快,使得抛光粒子更快地去除试件表面材料。最终,在化学和机械共同加快的情况下,材料去除

速率得到大幅提升。

## 5 结 论

建立了基于软质粒子的超声椭圆振动辅助化学机械抛光光纤端面的材料去除率模型,并通过常规 CMP、水平超声振动 CMP、竖直超声振动 CMP、椭圆超声振动 CMP 实验进行了验证。根据抛光垫表面扫描电子显微镜观察结果,提出了“微凸峰和高度独立分布”的抛光垫表面形貌模型,其中正弦波形微凸峰的高度满足正态分布,而微凸峰的投影圆大小满足  $\gamma$  分布。该表面形貌模型使得建立的材料去除率模型更为合理。依据抛光垫表面形貌模型,分别建立了软质粒子抛光硬质材料的水平方向和竖直方向的超声振动下的黏附去除模型。光纤端面材料去除速率随抛光压力的增加呈非线性增加。对比常规 CMP 过程,超声振动辅助 CMP 工艺能加快材料的去除速率,且超声椭圆振动对 CMP 过程中的材料去除速率的提升效果最为明显。其中,UHV-CMP、UVV-CMP、UEV-CMP 相较于普通 CMP 对光纤的材料去除率分别提升 60%、85.6% 和 145%。

## 参考文献:

- [1] HU Q, LIU D F, ZOU W B. Material removal model and experimental analysis in the CMP of Si-based fiber array [C]. *The 5<sup>th</sup> International Conference on Manufacturing Science and Engineering*, Shanghai, P. R. China; ICMSE, 2014, 2345-2365.
- [2] 谢晋,冯彦科,程剑,等. 光纤石英玻璃基板微 V 槽阵列的精密磨削 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(8):2243-2249.  
XIE J, FENG Y K, CHENG J, et al.. Precision grinding of micro V-groove array on optical fiber quartz glass substrate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2243-2249. (in Chinese)
- [3] 曹凤国. 超声加工 [M]. 北京:化学工业出版社, 2014.  
CAO F G. *Ultrasonic Machining* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [4] 刘立飞,张飞虎,刘民. 碳化硅陶瓷的超声振动辅助磨削 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(8): 2229-2235.
- [5] LIU L F, ZHANG F H, LIU M. Ultrasonic assisted grinding for silicon carbide [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2229-2235. (in Chinese)
- [6] YANG W P, WU Y B, KATO M. A new approach to silicon wafer edge treatment by ultrasonically assisted Polishing (UAP) [J]. *International Journal of Materials & Product Technology*. 2008, 31(2-4): 159-175.
- [7] 余亦曦. 光纤阵列超声振动辅助化学机械抛光工艺研究 [D]. 长沙:中南大学, 2016.  
SHE Y X. *Technology Study on Ultrasonic Vibration Assisted Chemical Mechanical Polishing of Fiber Array* [D]. Changsha: Central South University, 2016. (in Chinese)
- [8] WANG Y G, CHEN Y, QI F, et al.. A molecular-scale analytic model to evaluate material removal rate in chemical mechanical planarization considering the abrasive shape [J]. *Microelectronic Engineering*. 2015, 134: 54-59.
- [9] ZHAO Y W, CHANG L, KIM S H. A mathemati-

- cal model for chemical-mechanical polishing based on formation and removal of weakly bonded molecular species [J]. *Wear*. 2003, 254(3-4): 332-339.
- [9] BHUSHAN Bharat. 摩擦学导论 [M]. 北京:机械工业出版社, 2007.  
BHUSHAN Bharat. *Introduction to Tribology* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. (in Chinese)
- [10] 蒋建忠. 芯片化学机械抛光过程中材料吸附去除机理的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2009.  
JIANG J ZH. *Study on the Material Adhesion Removal Mechanism in Chemical Mechanical Polishing* [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009. (in Chinese)
- [11] JENG Y R, HUANG P Y. A material removal rate model considering interfacial micro-contact wear behavior for chemical mechanical polishing [J]. *Journal of Tribology*. 2005, 127(1): 190-197.
- [12] ZHAO Y, CHANG L. A micro-contact and wear model for chemical-mechanical polishing of silicon wafers [J]. *Wear*. 2002, 252(3): 220-226.
- [13] 唐军, 赵波. 单激励纵扭复合超声铣削系统研究 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(6): 57-61.  
TANG J, ZHAO B. A new longitudinal-torsional composite ultrasonic milling system with a single excitation [J]. *Journal of Vibration and Shock*. 2015, 34(6): 57-61. (in Chinese)
- [14] SUZUKI H, HAMADA S, OKINO T, et al.. Ultraprecision finishing of micro-aspheric surface by ultrasonic two-axis vibration assisted polishing [J]. *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, 2010, 59(1): 347-350.

#### 作者简介:



陈 涛(1986—),男,甘肃山丹人,在读博士研究生,2011年、2014年于兰州理工大学分别获得学士、硕士学位,现为中南大学机电工程学院博士研究生,主要从事激光表面处理及精密制造方面的研究。E-mail: ctxy999@126.com

#### 导师简介:



刘德福(1971—),男,湖南株洲人,博士,教授、博士生导师,1999年于北京理工大学获得硕士学位,2008年于中南大学获得博士学位,主要从事精密制造方面的研究。E-mail: liudefu@csu.edu.cn