

文章编号 1004-924X(2013)03-0680-07

# 光学材料磨削的亚表面损伤预测

吕东喜<sup>1\*</sup>, 王洪祥<sup>1</sup>, 黄燕华<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**基于压痕断裂力学理论,建立了工件表面粗糙度与亚表层损伤深度的理论关系模型,用于预测磨削加工脆性光学材料引起的亚表层损伤深度。利用磁流变角度抛光技术检测了不同磨削加工工艺条件下亚表层的损伤深度,验证了理论模型的正确性。分析了加工工艺参数对工件表面粗糙度及亚表层损伤深度的影响规律,提出了提高材料去除率的磨削加工工艺方案。分析结果表明:脆性材料工件的亚表层损伤深度与工件的表面粗糙度呈非线性单调递增关系。工件亚表层损伤深度及工件表面粗糙度均随着切削深度和进给速度的增加而增加,随着主轴转速的增加而减小。对比实验结果与理论模型预测结果表明,提出的模型可以准确、无损地预测磨削加工引起的工件亚表层损伤深度。

**关键词:**脆性材料;磨削;压痕;磁流变抛光;表面粗糙度;亚表层损伤

**中图分类号:** TN305.2; TQ171.68 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132103.0680

## Prediction of grinding induced subsurface damage of optical materials

LÜ Dong-xi<sup>1\*</sup>, WANG Hong-xiang<sup>1</sup>, HUANG Yan-hua<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of  
Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

\* Corresponding author, E-mail: dongxi\_lv@yahoo.com

**Abstract:** On the basis of indentation fracture mechanics, a theoretical model was developed to evaluate the relationship between surface roughnesses (SRs) and Subsurface Damage Depths (SSDs) of brittle optical materials and to predict their grinding induced SSDs. For validating the feasibility of this method, the SSDs generated with various process parameters were measured by Magnetorheological Finishing (MRF) wedge technique. The influences of processing parameters on the SRs and SSDs were investigated, and a process strategy was also proposed to improve the material removal rate. The prediction results of this theoretical model show that the SSDs are nonlinear monotone increasing with the square of SR values during grinding processes. The SSDs and SRs increase with the increasing of cutting depth and feed rate, while reduce with the increasing of spindle speed. The measurement re-

收稿日期:2012-10-29;修订日期:2013-01-30.

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金资助项目(No. U1230110)

sults of SSDs are consistent with the prediction values of the model, which demonstrates the feasibility of utilizing this model to accurately and non-destructively predict the SSDs.

**Key words:** brittle optical material; grinding; indentation; Magnetorheological Finishing (MRF); surface roughness; subsurface damage

## 1 引言

磨削加工脆性材料工件引起的亚表层裂纹会影响光学元件的稳定性和镀膜光洁度,缩短其使用寿命并降低投射率及成像质量<sup>[1]</sup>。在后续的研磨、抛光过程中需要将这些亚表层裂纹去除。如果能够快速、准确地预测亚表层裂纹的扩展深度,就可以通过优化加工工艺参数达到降低加工成本、缩短后续加工时间的目的。

为了准确、快速地预测亚表层裂纹的扩展深度,人们提出了大量的破坏性及非破坏性检测方法,极大地方便了光学零件的加工。破坏性检测方法的本质是利用角度抛光法、抛光蚀刻法、截面显微法及磁流变抛光等物理方法揭示亚表层损伤的形貌,通过检测最深处裂纹出现的位置到工件表面的距离直接获得亚表层裂纹的扩展深度<sup>[2]</sup>。破坏性检测方法不仅费时费力而且不可避免地会破坏工件表面,容易引起工件的失效。另外,破坏性检测方法只能测得特定加工工艺参数下亚表层损伤的深度,效率比较低,不具有普遍意义。非破坏性检测方法主要有基于强度检测的全内反射显微法、共焦扫描激光显微法和准偏振光技术等,这些方法虽然可以快速检测亚表层裂纹的深度,但测量结果不直观、精度较低,而且测试设备的成本很高<sup>[3]</sup>。由于上述破坏性及非破坏性检测方法的缺点,人们试图建立工件表面粗糙度(SR)和亚表层损伤深度(SSD)的线性或非线性关系模型<sup>[4-5]</sup>,通过测量工件表面粗糙度达到间接预测亚表层损伤深度的目的。但是,这些经验或半经验模型预测精度相对较低,预测值和实际值存在较大偏差,无法满足实际生产的需求。因此,有必要开发一种成本低廉,并且可以快速、准确、无损地预测亚表层损伤深度的方法。

本文基于脆性材料的压痕断裂力学理论,在

综合考虑工件材料内部弹性应力场与残余应力场共同作用的基础上,揭示了亚表层裂纹扩展深度与工件表面粗糙度的本质联系,建立了快速、准确、无损的预测亚表层损伤深度的理论模型。并结合磨削加工实验结果分析了加工工艺参数对工件表面粗糙度及亚表层损伤深度的影响,提出了抑制工件表面粗糙度及亚表层损伤深度的加工策略。

## 2 亚表层损伤深度的预测模型

脆性材料在精密磨削加工过程中的受力状态非常复杂,对其裂纹形成及扩展的机理研究存在一定的困难。由于磨削加工过程可以近似认为是大规模尖锐压头的印压过程<sup>[6]</sup>,人们对于磨削加工过程中材料受力状态的研究就是由此开始的。

在压痕过程中,工件材料内部形成了复杂的弹/塑性应力场,如图1所示。随着载荷 $P$ 的增加,在弹/塑性应力场的共同作用下,材料内部形成了两类基本的裂纹构型:径向/中位裂纹和侧向裂纹<sup>[7]</sup>。其中,中位裂纹形成于压头的加载过程中,其扩展方向垂直于工件表面,可以认为中位裂纹的扩展深度即为磨削加工过程中形成的亚表层损伤的深度(SSD)。在卸载过程中,弹性应力场逐渐恢复,而表面上的残余应力场则保持张开状态,促使在塑性变形区底部形成平行于工件表面

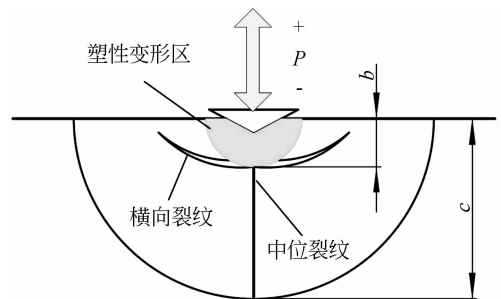


图1 尖锐压头作用下引起的裂纹系统

Fig. 1 Crack systems induced by a sharp indenter

方向的侧向裂纹系统<sup>[8]</sup>。当侧向裂纹扩展到工件表面时,材料以贝壳状碎片的形式去除。因此,可以近似认为侧向裂纹的深度即为工件表面粗糙度  $P$ - $v$  值(SR)。如果能建立中位裂纹和侧向裂纹的关系模型,就可以在已知工件表面粗糙度 SR 的基础上,通过此模型间接地预测亚表层裂纹的扩展深度 SSD。

设作用于尖锐压头上的垂向点载荷大小为  $P$ ,则弹性半空间内任一点  $(r, \theta, \varphi)$  处材料的应力状态可以表示为<sup>[9]</sup>:

$$\sigma_{ij}^P = \frac{P}{2\pi r^2} [p_{ij}(\theta, \varphi)], \quad (1)$$

其中: $r$  为弹性应力场中任一点到载荷作用点的距离。

由式(1)可知,材料内部任一点处的应力值与该点到载荷作用点的距离  $r$  的平方成反比。此时,在该点 3 个方向上的主应力可以分别表示为  $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$  ( $\sigma_{11} \geq \sigma_{22} \geq \sigma_{33}$ )<sup>[9]</sup>。随着载荷  $P$  的不断增长,材料所受的拉应力不断增长。当材料的应力强度因子  $K_I$  达到其断裂韧性  $K_{Ic}$  时,材料发生脆性断裂。此时材料的断裂韧性  $K_{Ic}$  可以表示为<sup>[9]</sup>:

$$K_{Ic} = \frac{2^{1/2}}{\pi} \left[ 2 \left( \frac{c}{\pi} \right)^{1/2} \int_0^c \frac{\sigma_{22}(r) dr}{(c^2 - r^2)^{1/2}} \right], \quad (2)$$

其中: $c$  为中位裂纹的扩展长度。

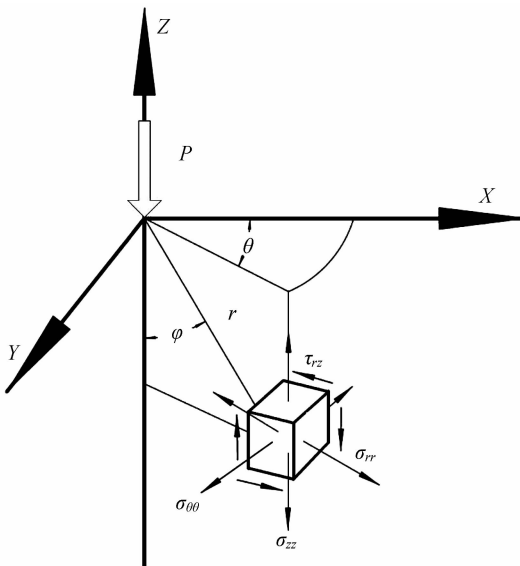


图 2 尖锐压头作用下脆性材料内部任一点的受力状态  
Fig. 2 Stress state of material induced by sharp indenter at arbitrary point

由式(1)和(2)可知,随着  $r$  的不断减小,  $\sigma_{ij}^P$  和  $\sigma_{22}(r)$  不断增加。当  $r$  趋近于 0 时,  $\sigma_{ij}^P$  和  $\sigma_{22}(r)$  出现应力奇异现象。而在实际压痕过程中,中位裂纹并非从  $r=0$  处开始扩展,而是从塑性变形区域底部(即  $r=b$  处,如图 1 所示)开始扩展。因此,式(2)可以表示为:

$$K_{Ic} = \frac{2^{1/2}}{\pi} \left[ 2 \left( \frac{c}{\pi} \right)^{1/2} \int_b^c \frac{\sigma_{22}(r) dr}{(c^2 - r^2)^{1/2}} \right], \quad (3)$$

对式(3)进行积分可得:

$$K_{Ic} = \frac{(1-2\nu)P}{2^{1/2} \pi^{5/2} b c^{1/2}}, \quad (4)$$

其中: $\nu$  为材料的泊松比。

上式为在点载荷  $P$  的作用下,材料内部的弹性应力场引起的中位裂纹扩展深度与材料断裂韧性之间的关系。而在实际加载过程中材料内部应力场由弹性应力场和塑性应力场两部分组成。中位裂纹形成过程中弹性应力场和塑性应力场的压痕系数分别为  $X_r^M = 0.032$  和  $X_r^M = 0.026$ <sup>[10]</sup>。设  $k = 1 + X_r^M / X_r^M = 1.813$ ,则在弹/塑性应力场的共同作用下,式(4)可以表示为:

$$K_{Ic} = \frac{(1-2\nu)P}{2^{1/2} \pi^{5/2} b \sqrt{k c}}. \quad (5)$$

在卸载过程中,塑性应力场引起的侧向裂纹的扩展深度  $b$  可以表示为:

$$b = 0.43 (\sin\psi)^{1/2} (\cot\psi)^{1/3} \left( \frac{E}{H} \right)^m \left( \frac{P}{H} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

其中: $\psi$  为压头的锥角; $E$  为材料弹性模量; $H$  为材料硬度; $m$  为无量纲常数,其取值为  $1/3 \sim 1/2$ <sup>[11]</sup>。

将式(6)代入式(5)并化简得:

$$\frac{SSD}{SR^2} = \frac{c}{b^2} = \frac{(1-2\nu)^2 H^{4m+2}}{(0.43)^4 \times 2 \times \pi^5 k (\sin\psi)^2 (\cot\psi)^{4/3} E^{4m} K_{Ic}^2}. \quad (7)$$

从上式可以看出材料的亚表层裂纹扩展深度 SSD 与表面粗糙度 SR 成非线性单调递增关系。由于式(7)消除了单个磨粒上的载荷  $P$ ,因此,在已知工件表面粗糙度 SR、磨粒形状及工件材料属性的基础上,运用式(7)可以方便地预测磨削加工过程中形成的亚表层损伤深度 SSD。但是,当材料处于塑-脆转变阶段时,工件的 SR 和 SSD 并非连续变化,即上式并不适合于预测处于塑-脆转变阶段的工件的 SSD。为了消除这种影响,本文在

式(7)后面加一个修正系数  $l$ , 其值可以通过拟合一系列实验数据点获得。此时, 式(7)可以表示为:

$$SSD = \frac{(1-2\nu)^2 H_{Am+2}}{(0.43)^4 \times 2 \times \pi^5 k(\sin\phi)^2 (\cot\phi)^{4/3} E^{4m} K_{Ic}^2} SR^2 + l, \quad (8)$$

上式可以简化为:

$$SSD = \chi SR^2 + l, \quad (9)$$

其中:

$$\chi = \frac{(1-2\nu)^2 H_{Am+2}}{(0.43)^4 \times 2 \times \pi^5 k(\sin\phi)^2 (\cot\phi)^{4/3} E^{4m} K_{Ic}^2}。$$

### 3 实验

#### 3.1 试样制备

试验在德国 DMG 公司生产的五轴数控精密铣/磨床 HSC-20 上进行, 该机床的主轴系统的最大转速为 42 000 r/min, 砂轮垂直进给分辨率为 0.1  $\mu\text{m}$ , 可实现 0.1  $\mu\text{m}$  的微量进给。

表 2 磨削加工试验参数

Tab. 2 Specifications of grinding process

试验号	主轴转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	进给速度/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	切削深度/ $\mu\text{m}$	SR/ $\mu\text{m}$	SSD/ $\mu\text{m}$
1	3 000/4 500/6 000	400	15	14.05/12.49/11.45	46.56/43.33/40
	/7 500/9 000/10 500			/10.9/10.4/9.6	/37/34.47/31.63
2	6 000	100/200/300	15	8.17/10.13/11.05	25.43/28.5/33.27
		/400/500/600		/12.12/12.63/12.88	/38.47/43.23/45.03
3	6 000	400	5/10/15	11.97/13.07/12.3	36.9/40.17/45.12
			/20/25/30	/15.05/16.15/15.68	/52.33/62.17/69.6

#### 3.2 表面粗糙度及亚表面损伤深度检测

磨削加工实验后, 首先对加工工件进行超声清洗, 然后采用接触探针式轮廓仪 Alpha-Step xp-200 (KLA Tencor, USA) 在加工沟槽中部的 7 个不同位置, 沿砂轮进给方向测量工件表面粗糙度, 测量结果的平均值即为该加工工艺参数下的表面粗糙度。测量时为了消除探针半径对测量结果的影响, 采用直径为 2  $\mu\text{m}$  的超细探针。

为了减小抛光过程引起的附加损伤, 本文采用磁流变角度抛光技术准确检测亚表面损伤深度, 该

表 1 BK7 玻璃的材料属性<sup>[1,7]</sup>

Tab. 1 Material properties of optical glass BK7<sup>[1,7]</sup>

密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$	维氏硬度 $H/\text{GPa}$	断裂韧性 $K_{Ic}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
2.52	82	0.203	7.2	0.82

砂轮选用 DMG 公司的杯形镍基金刚石砂轮, 其外径为 4 mm、内径为 2.4 mm, 砂轮粒度为 D91H, 浓度为 100%。以 8% 的水基乳化液作为磨削液, 采用机床主轴贯通型冷却液轴心供给方式(冷却液通过空心砂轮主轴引入到砂轮基体中心孔, 在离心力作用下流经磨粒磨削区域并一定程度地雾化加强冷却效果), 供给压力为 2 bar。

选用 20 mm×20 mm×5 mm 的 BK7 玻璃作为实验材料, 其材料属性如表 1 所示。为了考察不同砂轮线速度、磨削深度和进给量对工件表面粗糙度及亚表层裂纹扩展深度的影响, 实验中所采用的磨削参数及所得表面粗糙度/亚表层损伤深度如表 2 所示。

方法具有测量面积大、便于观测等优点。具体实验步骤为: 使用磁流变抛光机床在磨削工件表面抛出 5° 的斜角; 然后将试件在 HF 溶液(2% HF, 15%  $\text{NH}_4\text{F}$ , 质量分数)中浸泡 10 min, 以使裂纹张开便于观测。工件经超声波清洗后, 使用测量显微镜 STM6 (OLYMPUS, Japan) 从工件表面开始沿刀具进给方向进行观测, 记录裂纹消失时的 Z 轴移动距离, 此距离即为亚表层损伤深度。按照同样的方法对工件进行 5 次抛光并分别测量 5 次亚表层损伤层深度, 取其平均值作为该加工条件下的亚表层损伤深度。

图 3 所示为实验 3 中,当刀具的切削深度为  $25\ \mu\text{m}$  时磨削加工过程产生的亚表面损伤图。可以看出,随着深度的增加,亚表层损伤的密度逐渐减小。亚表层损伤的形式也由横向裂纹扩展形成的弹坑状缺陷逐渐转变为亚表层裂纹。成片出现的弹坑状缺陷延伸至距表面  $9.03\ \mu\text{m}$  处,然后弹坑状缺陷逐渐减少,亚表层裂纹的密度逐渐增加。在距表面  $16.91\ \mu\text{m}$  处,弹坑状缺陷完全消失,损伤形式转变为亚表层裂纹。当距离表面超过  $65.09\ \mu\text{m}$  以后,亚表层裂纹完全消失。

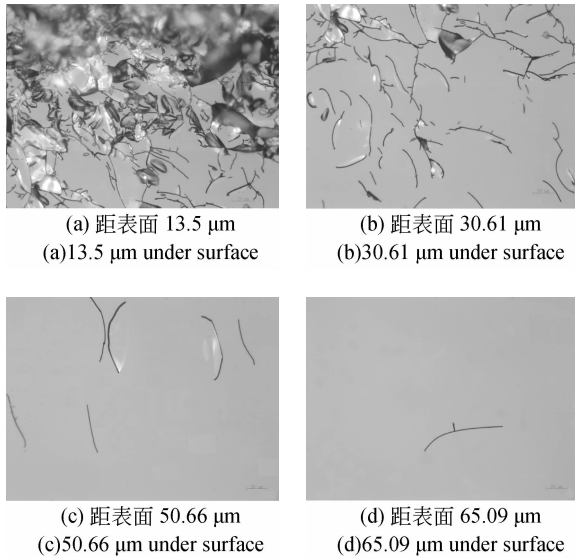


图 3 磨削加工后工件典型的亚表面损伤图(放大倍数 500)

Fig. 3 Typical SSD micrographs(500× magnification) of specimen after grinding process

## 4 结果与讨论

### 4.1 表面粗糙度与亚表面损伤深度的关系

要想利用式(8)和(9)预测亚表面损伤深度还需要确定磨粒的锥角  $\psi$ 。Mahmoud 等人<sup>[12]</sup>用扫描激光显微镜对磨粒的形状进行观测时,发现磨粒的锥角  $\psi$  为  $46\sim 89^\circ$ 。在本文中取磨粒的锥角为  $50\sim 55^\circ$ 。Lambropoulos<sup>[11]</sup>通过数据分析发现式(8)中的  $m$  取  $1/3$  更合适。将  $\psi$  和  $m$  及工件的材料参数带入式(8)可得  $\chi$  的取值为  $0.19\sim 0.22$ 。

不同磨削加工工艺条件下,工件的表面粗糙度 SR 和亚表层损伤深度 SSD 如表 2 及图 4 所示,从图 4 中可以看出,随着表面粗糙度的增加,亚表层损伤深度也随之增加。通过对实验结果进行曲线拟合可得  $l=11.01$ ,并且表面粗糙度与亚表面面

伤深度成非线性单调递增关系,即:  $SSD=0.2007 \times SR^2+11.01$ ,从而验证了理论模型的正确性。

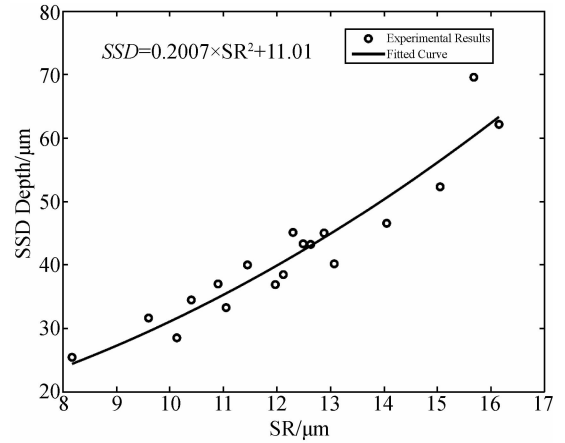


图 4 亚表面损伤深度与表面粗糙度间关系曲线

Fig. 4 Relationship between SSD and SR

### 4.2 磨削参数对表面粗糙度/亚表面损伤深度的影响规律

为了在不影响工件表面质量的前提下,尽可能地提高材料去除率,需要研究磨削加工工艺参数对工件表面粗糙度及亚表层损伤深度的影响规律。

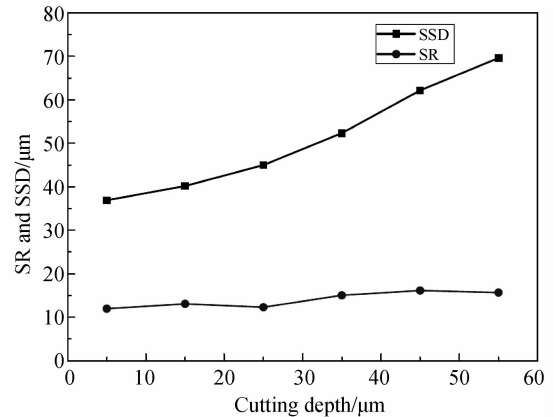


图 5 切削深度对工件 SR 及 SSD 的影响规律

Fig. 5 Influences of cutting depth on SR and SSD

切削深度对亚表层损伤深度及表面粗糙度的影响规律如图 4 所示(试验 1)。从图中可以看出,随着切削深度的增加,SR 和 SSD 都随之增加。这是由于切削深度的增加,导致单个磨粒的切削深度和切削力  $P$  增加,由式(5)和(6)可知,横向裂纹和中位裂纹的扩展深度也随着切削力  $P$  的增加而增加,引起相对较大的材料碎片崩碎,最终导致 SR 和 SSD 的增加。

图5所示为主轴转速对工件表面粗糙度及亚表面损伤深度的影响规律(试验2)。可以看出随着主轴转速的增加,SR和SSD呈现递减趋势。这是由于在相同的进给速度下,主轴转速的增加,导致单个磨粒在进给方向上的切削深度减小,切削力也随之减小。由式(5)和(6)可知,工件表面的SR和SSD均随之减小。

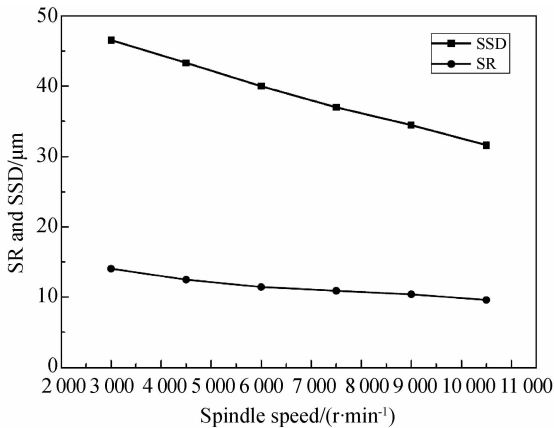


图6 主轴转速对工件SR及SSD的影响规律

Fig. 6 Influences of spindle speed on SR and SSD

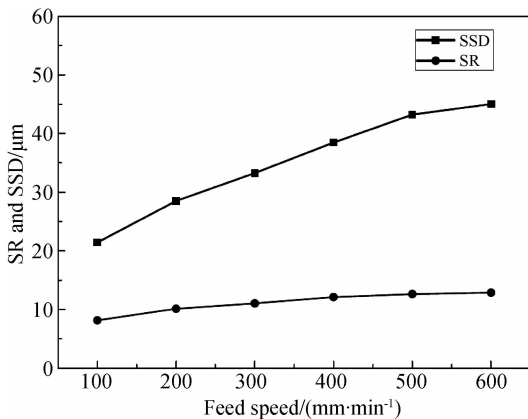


图7 进给速度对工件SR及SSD的影响规律

Fig. 7 Influences of feed speed on SR and SSD

进给速度对工件表面有非常重要的影响,进给速度的增加导致同一磨粒在进给方向上的划痕间距增加,最终引起单个磨粒的横向切削深度及切削力 $P$ 的增加,发生相对较大的材料崩碎现象,因此SR和SSD均随之增加。图6所示为进给速度对亚表面损伤深度和表面粗糙度的影响规律(试验3)。

由上述的分析可见:工件的表面粗糙度和亚表层损伤深度均随着切削深度和进给量的增加而增加,但随着主轴转速的增加而减小。因此,在粗磨阶段,在保证工件表面质量的前提下尽可能地提高材料去除率,宜采用较高的主轴转速及较大的进给速度和切削深度。而在精磨过程中,为了提高工件表面质量,应该采用较高的主轴转速以及较小的切削深度和进给速度。

## 5 结论

本文以脆性材料的压痕断裂力学理论为基础,通过对材料受力状态的分析,研究了工件表面粗糙度和亚表层损伤深度的本质联系,并借助于磁流变角度抛光法分析了磨削加工工艺参数对表面粗糙度及亚表层损伤深度的影响规律。

建立了预测脆性材料工件亚表层损伤深度的理论模型。借助于该模型,在已知工件表面粗糙度、材料的力学性能及磨粒形状的基础上可以快速准确地预测工件的亚表层损伤深度。通过亚表层损伤深度的预测值与实验所得值的对比发现两者基本一致,由此证明了预测模型的正确性。同时,工件SSD随SR呈非线性单调递增关系。工件的亚表层损伤深度和表面粗糙度均随着刀具切削深度和刀具进给速度的增加而增加,而随着主轴转速的增加而减小。

## 参考文献:

[1] LI S, WANG Z, WU Y. Relationship between sub-surface damage and surface roughness of optical materials in grinding and lapping processes [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 205: 34-41.

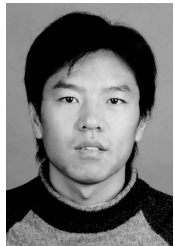
[2] LI Y, ZHENG N, LI H, *et al.*. Morphology and distribution of subsurface damage in optical fused silica parts; Bound-abrasive grinding [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257: 2066-2073.

[3] 王卓, 吴宇列, 戴一帆, 等. 光学材料研磨亚表面损伤的快速检测及其影响规律[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1): 16-21.

WANG ZH, WU Y L, DAI Y F, *et al.*. Rapid de-

- tection of subsurface damage of optical materials in lapping process and its influence regularity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 16-21. (in Chinese)
- [4] WANG J, LI Y, HAN J, *et al.*. Evaluating subsurface damage in optical glasses [J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2011, 6:1-16.
- [5] NEAUPORT J, AMBARD C, CORMONT P, *et al.*. Subsurface damage measurement of ground fused silica parts by HF etching techniques [J]. *Optical Express*, 2009, 17: 20448-20456.
- [6] MALKLN S, HWANG T W, Grinding mechanisms for ceramics [J]. *Annals of the CIRP*, 1996, 45 (1):569-580.
- [7] LIU D F, CONG W L, PEI Z J, *et al.*. A cutting force model for rotary ultrasonic machining of brittle materials [J]. *Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, 52: 77-84.
- [8] GU W, YAO Z. Evaluation of surface cracking in micron and sub-micron scale scratch tests for optical glass BK7 [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25(5): 1167-1174.
- [9] LAWN B R, SWAIN M V. Microfracture beneath point indentations in brittle solids [J]. *Journal of Materials Science*, 1975, 10(1): 113-122.
- [10] LAWN B R, EVANS A G, MARSHALL D B. Elastic/plastic indentation damage in ceramics: the median/radial crack system [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1982, 63(9-10): 574-581.
- [11] LAMBROPOULOS J C, JACOBS S D, RUCKMAN J. Material removal mechanisms from grinding to polishing [J]. *Journal of American Ceramic Society*, 1999, 102: 113-128.
- [12] MAHMOUD T, TAMAKI J, YAN J. Three-dimensional shape modeling of diamond abrasive grains measured by a scanning laser microscope [J]. *Key Engineering Materials*, 2003, 238/239: 131-136.

#### 作者简介:



吕东喜(1983—),男,河北沧州人,博士研究生,2007年于燕山大学获得学士学位,2009年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事精密磨削及超声加工方面的研究。E-mail: dongxi\_lv@yahoo.com



黄燕华(1965—),男,浙江东阳人,高级工程师,1995年于电子科技大学获得学士学位,2003年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事超精密加工及微细加工等方面的研究。E-mail: huangyanhua113@163.com

#### 导师简介:



王洪祥(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,1989年于佳木斯工学院获得学士学位,1996年、2002年于哈尔滨工业大学分别获硕士、博士学位,主要从事现代机械设计理论与方法、超精密加工及检测等方面的研究。E-mail: whxhit@yahoo.com.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)