

文章编号 1004-924X(2017)02-0367-08

# 光学硬脆材料固结磨料研磨中的亚表面损伤预测

朱永伟\*, 李信路, 王占奎, 凌顺志

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 研磨过程中亚表面损伤层深度的正确预测是研磨工艺参数制定的重要依据。针对固结磨料的研磨特点, 选择两种典型光学硬脆材料(镁铝尖晶石和石英玻璃), 采用离散元仿真技术, 分别建立了两种材料的二维离散元模型, 分析了工艺参数对光学硬脆材料亚表面损伤(裂纹)层深度的影响。而后, 采用角度抛光法测量了镁铝尖晶石和石英玻璃的亚表面损伤层深度, 进行了实验验证。结果表明: 采用固结磨料研磨时, 磨粒粒径对光学硬脆材料亚表面损伤的影响相当显著, 在相同研磨工艺条件下, 随着磨粒粒径的增大, 亚表面损伤层深度和微裂纹密集程度明显增加。离散元仿真结果与实验结果的对比表明: 采用离散元技术可以对光学硬脆材料的亚表面损伤深度进行快速有效的预测, 从而为后续的研磨抛光工艺提供参考与指导。

**关键词:** 光学硬脆材料; 固结磨料研磨; 离散元法; 亚表面损伤

**中图分类号:** TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172402.0367

## Subsurface damage prediction for optical Hard-brittle material in fixed abrasive lapping

ZHU Yong-wei\*, LI Xin-lu, WANG Zhan-kui, LING Shun-zhi

(*Jiangsu Province Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology,  
College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of  
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: meeywzhu@nuaa.edu.cn*

**Abstract:** The correct prediction of subsurface damage (SSD) depth in lapping is an important basis for setting processing parameters. According to the lapping features of fixed abrasive, two typical optical hard-brittle materials (MgAl spinel and quartz glass) were selected to establish their respective two-dimensional discrete element models by using the discrete element method (DEM) and to analyze the impact on SSD (crack) depth of optical hard-brittle materials by above processing parameters. After that, an angle polishing method was used to measure the SSD depth of lapped MgAl spinel and quartz glass and to have it verified by experiment. The results show that when applying fixed abrasive for lapping, the abrasive particle size will have a significant impact on the SSDs of optical hard-brittle materials, which means under same lapping processing, the greater the abrasive particle size is, the deeper of SSD and the denser the micro cracks will be. The comparison between experimental results

**收稿日期:** 2016-09-15; **修订日期:** 2016-11-28.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(No. 51675276); 航空科学基金(2014ZE52055); 江苏省精密与微细制造技术重点实验开放基金资助项目

and DEM simulation results indicates that DEM is able to make quick and effective prediction on SSD depth of optical hard-brittle materials and to provide reference and guidance for subsequent lapping and polishing processing.

**Key words:** optical hard brittle material; fixed abrasive lapping; discrete element method; subsurface damage

## 1 引言

随着科技的发展,对硬脆材料(如陶瓷、光学玻璃等)的应用日益广泛,同时对其表面质量也提出了更高要求。在研磨抛光过程中,光学硬脆材料极易出现亚表面损伤(Sub Surface Damage, SSD),从而降低光学元件的强度、长期稳定性、成像质量、镀膜质量和抗激光损伤阈值等重要性能指标<sup>[1-2]</sup>。镁铝尖晶石作为一种耐热、耐磨和耐腐蚀的硬脆材料,具有从红外光到紫外光波段的良好光学透过率、抗弯强度高优点,常被用作电子元器件、高温超导薄膜器件、导弹整流罩、透明装甲等民用和军用器件<sup>[3]</sup>。石英玻璃在紫外光、可见光、近红外光谱区域(185~3 500 nm)具有优良的透过性,且具有耐高温、抗热冲击、热膨胀系数小、化学性能稳定、耐射线辐照等优点,被广泛应用于空间技术、探测技术、光导通讯等领域<sup>[4]</sup>。这两种材料硬度高、脆性大,要获得高质量、超光滑的表面较为困难,因而针对其超精密研磨加工中亚表面损伤的研究具有重要意义。

目前,工件亚表面损伤检测方法可分为破坏性和非破坏性,其中常用的破坏性检测方法有角度抛光法<sup>[5]</sup>、Ball Dimpling 法<sup>[6]</sup>和磁流变抛光斑点技术<sup>[7]</sup>等。破坏性测试方法测试结果较为精确,但会导致光学硬脆材料的破坏或失效。非破坏性的方法有激光调制散射(LMS)技术、全内反射检测(TIRM)技术、光学相干层析(OCT)技术、高频扫描声学显微(HFSAM)技术和共焦激光扫描显微(CLSM)技术等<sup>[8]</sup>。与破坏性测试方法相比,非破坏性测试方法测量精度低、测试系统成本高且测试结果并不直观。

20 世纪 70 年代初,Cundall 和 Stack 奠定了离散元法的基础,其目的主要是研究分析岩土力学问题<sup>[9]</sup>。离散元法以颗粒集合系统模拟岩土等试样,通过设定系统中颗粒的形状、尺寸、材料属性以及颗粒之间的连接性质等微观参数,生成材

料仿真样本,并通过数值模拟试验获得颗粒集合体微观参数和材料宏观性能参数之间的关系。离散元法基于牛顿运动定律,是一种动力学研究方法,所以颗粒集合体的非线性行为可以直接进行仿真模拟。刘凯欣<sup>[10]</sup>对离散元法进行了全面的评述;谭援强等<sup>[11-14]</sup>运用离散元法建模并分析了多晶 SiC、多晶 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和单晶硅等硬脆材料的加工裂纹,以及化学机械抛光中磨粒的运动特性;徐松林<sup>[15]</sup>等采用了三维离散元法模拟了脆性孔洞材料在冲击载荷作用下的崩塌问题。

但是,离散元法在光学硬脆材料的研磨抛光方面的应用研究较少,在固结磨料研磨抛光硬脆材料时工件的亚表面损伤层预测方面目前空白。如果能将离散元技术运用至光学硬脆材料亚表面损伤层深度的精确预测,可以大大降低亚表面损伤层测量的成本,将事后检测转化为事先预测,提高工艺的可控性。

本文首先对两种典型光学硬脆材料镁铝尖晶石和石英玻璃的实际材料性能进行检测;借助离散元软件 PFC 建立起镁铝尖晶石和石英玻璃的离散元模型,根据固结磨料研抛工件时的磨粒切入深度数据,仿真研究磨粒粒径对工件亚表面损伤深度的影响规律;然后,采用角度抛光法测量了固结磨料研磨后工件的亚表面损伤深度;最后,将仿真结果与实验结果进行对比,为光学硬脆材料的研磨抛光工艺参数的制订提供了参考。

## 2 试样制备及参数设置

### 2.1 材料性能测试

为了使离散元模型与工件材料的实际性能更加接近,采用 MTS 322 电液伺服控制材料试验机以及 MTS Insight 30 电力试验机对镁铝尖晶石和石英玻璃进行单轴压缩、巴西拉伸及三点弯曲等力学试验,以获得材料相应的弹性模量、泊松比、压缩强度、拉伸强度和弯曲强度等力学性能实测值,如表 1 所示。

表 1 材料性能参数值

Tab.1 Values of material performance parameters

性能参数	镁铝尖晶石	石英玻璃		
# 密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	3.58	2.20		
# 孔隙率	0.02	无孔隙		
# 维氏硬度 $H/\text{GPa}$	15.72	9.80		
# 临界切深/ $\text{nm}$	50	201		
力学性能	实测值	模拟值	实测值	模拟值
# 弹性模量 $E/\text{GPa}$	275	267	77	75
# 泊松比 $\nu$	0.26	0.27	0.17	0.17
* 抗压强度/ $\text{MPa}$	1 360	1 270	980	950
* 抗拉强度/ $\text{MPa}$	134	123	72	67
* 抗弯强度/ $\text{MPa}$	196	187	89	81

注:前缀为#的参数为参考值,而前缀为\*的参数为测试值。

## 2.2 试样制备

在相同的固结磨料研磨工艺条件下,探索磨粒粒径对镁铝尖晶石和石英玻璃亚表面损伤的影响规律。镁铝尖晶石和石英玻璃工件直径分别为 50 mm 和 25.4 mm,厚度分别为 3 mm 和 10 mm,研磨和抛光实验过程在智能型纳米级抛光机上进行。分别将不同粒径的金刚石微粉固结到树脂基体中,制成固结磨料研磨垫,研磨液以去离子水为基,并添加 3% 的三乙醇胺和 0.3% 的 OP-10 乳化剂,以提高研磨垫的自修正性和湿润性。研磨实验之前,首先用油石对研磨垫进行修整,去除研磨垫表层的树脂,将金刚石磨粒显露出来;然后,按照粗研、精研、粗抛的顺序,依次利用不同磨粒粒径的研磨垫分别对镁铝尖晶石和石英玻璃进行研磨实验,研磨工艺参数如表 2 所示。最后,使用 NanoMap-500LS 三维形貌仪测量研磨后的表面粗糙度  $R_a$  值,每个工件测量 4~5 个点取平均值。材料去除率计算方法为:

$$\text{MRR}=1\ 000\times\frac{\Delta m\times H}{M\times t}, \quad (1)$$

式中: MRR 为材料的去除率,单位为  $\mu\text{m}/\text{min}$ ;  $\Delta m$  为每次研磨前后的质量差,单位为 g;  $H$  为工件的初始厚度,单位为 mm;  $M$  为工件的原始质量,单位为 g;  $t$  为研磨时间,单位 min。

表 2 材料研磨工艺参数

Tab.2 Parameters of material lapping process

研磨压力	研磨转速	工件转速	偏心距	研磨时间
10.37 kPa	85 r/min	80 r/min	120 mm	15 min

表 3 角度抛光工艺参数

Tab.3 Parameters of angle polishing

材料	抛光转速	抛光液流量	抛光时间
镁铝尖晶石	80 r/min	50 ml/min	2~4 h
石英玻璃	60 r/min		20 min

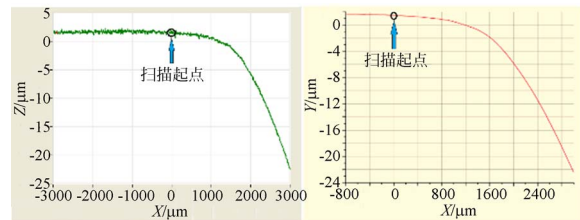


图 1 NanoMap 扫描轮廓线与平滑处理轮廓线

Fig.1 NanoMap scanning curve and smoothing curve

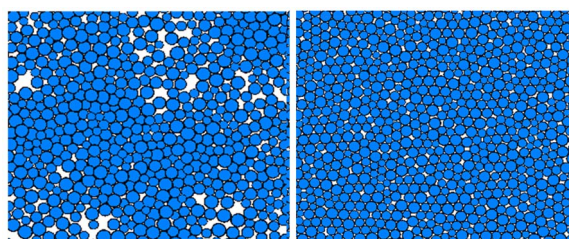
## 2.3 亚表面损伤检测方法

采用角度抛光法来检测镁铝尖晶石和石英玻璃的亚表面损伤,角度抛光法检测 SSD 的流程图见文献[5]。1)先将工件粘在已加工出小角度斜面(角度小于  $3^\circ$ )的承载器上,并进行角度抛光,抛光液为 90~10 nm 的硅溶胶,抛光工艺参数如表 3 所示;2)对抛光后的斜面进行腐蚀处理,使微裂纹扩展,便于观测;3)在处理好的斜面上标记扫描起点(扫描终点由抛光区域来决定),再利用 NanoMap 三维形貌仪扫描得到抛光斜面的轮廓线,如图 1 所示;4)将工件置于显微镜观察台上,利用光学显微镜观测并记录亚表面裂纹的类型与分布情况。最后,利用裂纹的终点位置及对应的基准线坐标得到亚表面损伤层深度。

## 3 亚表面裂纹的离散元仿真

### 3.1 离散元模型的建立

为了通过离散元法对光学硬脆材料研磨后的亚表面损伤进行预测,选定材料模型为平行黏结模型,并通过 PFC2D 分别生成颗粒紧密排列的二维离散元模型,如图 2 所示。为了能够准确模拟镁铝尖晶石和石英玻璃研磨后的亚表面损伤,必须先进行参数标定,使得离散元模型输出的弹性模量、泊松比、抗压强度、拉伸强度和弯曲强度等力学性能与材料实际测试的力学性能一致,如表 1 所示。



(a)随机生成的颗粒 (b)最终的黏结模型  
(a)Random particles (b)Final bond model

图 2 材料样本的生成

Fig. 2 Generation of material samples

### 3.2 亚表面裂纹层深度仿真

为了便于亚表面损伤的分析,将三维研磨问题简化为二维单颗磨粒的研磨仿真。在上述标定完成的离散元模型基础上,建立用于单颗磨粒研

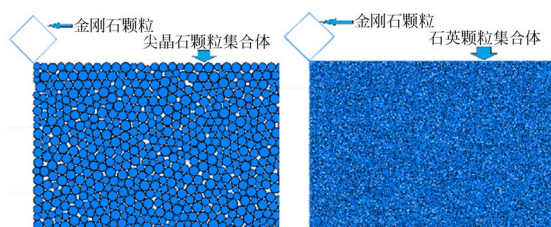


图 3 离散元仿真模型

Fig. 3 Discrete element simulation models

磨仿真的二维离散元模型。模型包括两部分,即仿真磨粒的正方形墙体和仿真光学硬脆材料的颗粒集合体,如图 3 所示。为贴合实际的加工过程,利用单颗磨粒切入工件表面深度的数学模型<sup>[16]</sup>,将磨粒粒径对研磨过程的影响转化为研磨过程中磨粒切入工件深度的影响,并利用切入深度代入离散元模型进行二维单颗磨粒的仿真研究;单颗磨粒切入深度计算方法为:

$$\delta = \frac{1}{2^2} \sqrt{\frac{3PD}{6.77\eta H_w \left[ \frac{1}{0.72 \frac{1}{\rho^3 C} - \frac{1}{3}} + \frac{1}{b} \right]}}, \quad (2)$$

式中:  $P$  为工件表面承受的单位面积载荷,单位 kPa;  $D$  为金刚石磨粒粒径,单位为  $\mu\text{m}$ ;  $\eta$  为磨粒体积浓度;  $H_w$  为工件的维氏硬度,单位为 GPa;  $\rho$  为金刚石磨粒密度,单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $C$  为研磨垫中磨粒的质量浓度;  $b$  为凸起宽度,单位为 mm。

为了提高仿真结果的准确性,仿真条件需与实际的研磨加工条件一致。在研磨垫属性、研磨转速及研磨压力相同的条件下,结合工件硬度与

磨粒粒径,利用切入深度模型计算与工件材料、磨粒粒径相对应的切深,如表 4 所示;其次,给定材料密度、颗粒半径及孔隙率等必要的材料属性,如表 1 所示。

表 4 单颗磨粒的切入深度

Tab. 4 Cutting depths of single abrasive particle

磨粒粒径/ $\mu\text{m}$	切入深度/nm	
	镁铝尖晶石	石英玻璃
W5	14.5	18.2
W14	49.3	62.1
W30	86.9	109.5
W50	144.9	182.4
W70	202.8	255.4

## 4 结果与讨论

### 4.1 裂纹层深度的仿真结果

利用磨粒切入工件的深度数据,代入二维单颗磨粒离散元模型,即可进行裂纹仿真预测,得到与不同磨粒粒径相对应的切入深度所产生的裂纹层深度。同时,为了完整地显示裂纹形貌,磨粒粒径越大,相应仿真图片的截取面积也越大,在比例缩放后,所显示的材料颗粒粒径就越小,如图 4 与图 5 所示。可以看出,对于镁铝尖晶石和石英玻璃,磨粒切入工件的深度对仿真结果中裂纹深度的影响都较为显著,随着磨粒切入深度的增大,产生裂纹层深度也随之增加,且变化程度越来越显著。

### 4.2 裂纹层深度的实验分析

无论是对于镁铝尖晶石,还是石英玻璃,磨粒粒径对裂纹层深度的影响都较为显著。一方面,相同的研磨压力下,随着磨粒粒径的增大,单位面积上承担研磨压力的颗粒数随之减小,单颗磨粒所承担的压力增大;另一方面,在固结磨料研磨垫中,树脂基体吸水膨胀后对磨粒的把持力下降,从而存在“弹性退让”现象。随着磨粒粒径的减小,研磨垫表面的树脂微凸起逐渐承担起部分研磨压力。综上所述,由于磨粒粒径的改变,所带来的磨粒压入深度的差异,及对磨粒在树脂基体中弹性退让程度的影响,使得研磨过程中有效磨粒所承受的力的大小和方向各不相同,故产生的亚表面损伤层深度和微裂纹分布也各不相同,如图 6 所

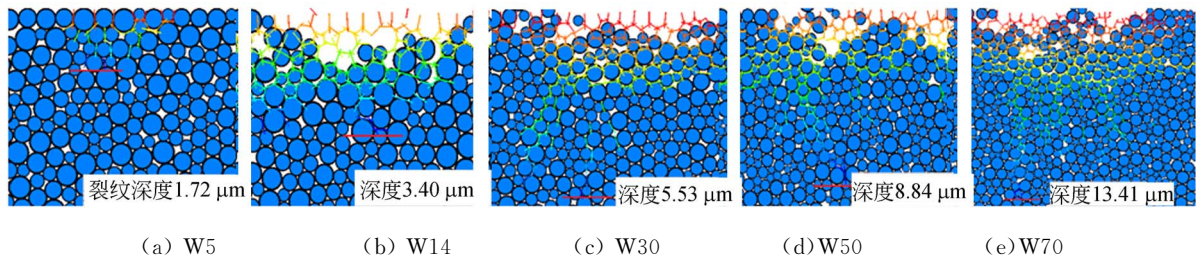


图 4 镁铝尖晶石仿真裂纹微观图

Fig. 4 Simulative microcosmic figures of cracks in spinel

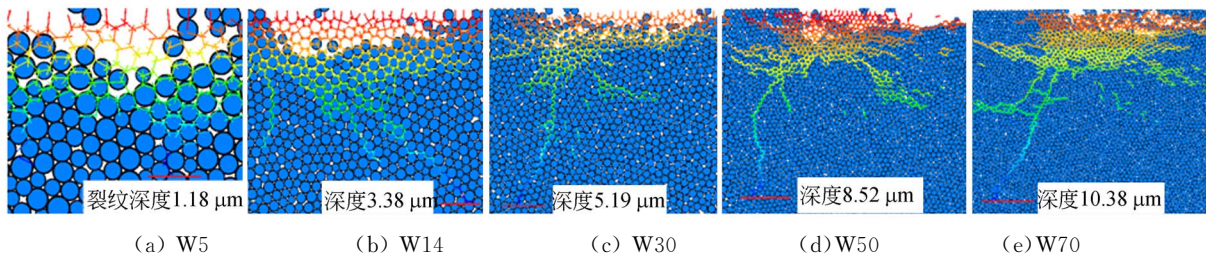


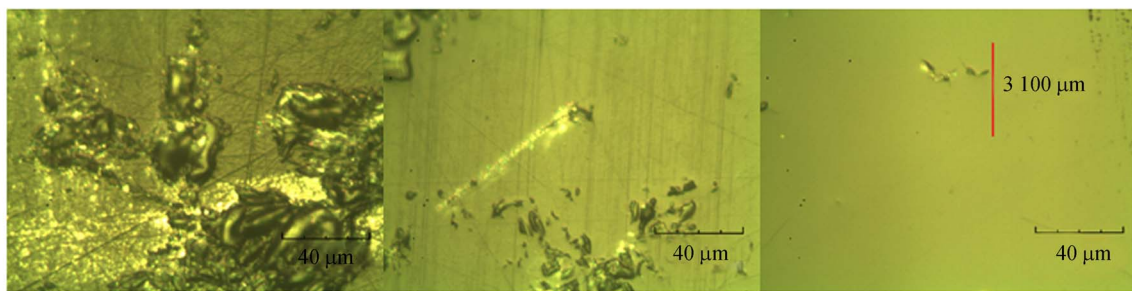
图 5 石英玻璃仿真裂纹微观图

Fig. 5 Simulative microcosmic figures of cracks in quartz glass

示。横向排列的 3 张图依次是抛光斜面在光学显微镜下观测的起点、中间点及终点图片,第三张图片中标注的数值便是观测到的裂纹终点位置。最后,利用终点位置作为横坐标,根据 NanoMap 三维形貌仪扫描的抛光斜面轮廓曲线,求出相对应的纵坐标值,即为相应的裂纹层深度。

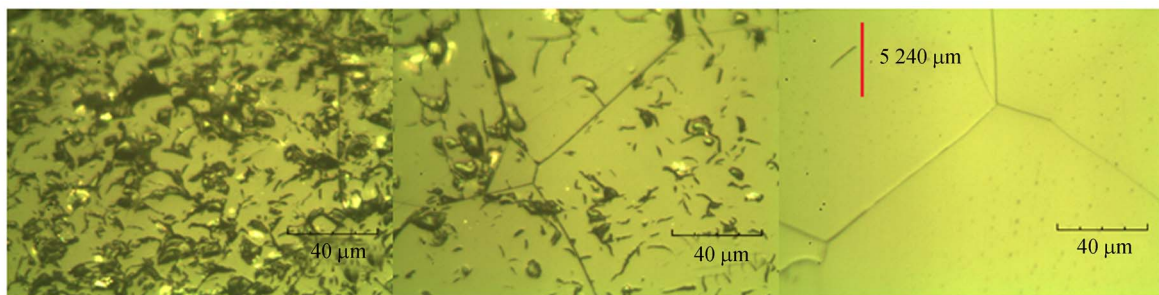
在相同的研磨工艺条件下,考虑到不同类型

的光学硬脆材料本身的特性,对于镁铝尖晶石和石英玻璃,由表 1 所示,因为镁铝尖晶石的临界切深小于石英玻璃的临界切深,故而镁铝尖晶石具有更大的脆性,所以,相同磨粒粒径下,尽管研磨尖晶石时磨粒切入工件的深度比石英玻璃略小,也能够产生和石英玻璃相近,甚至更深的亚表面损伤层。



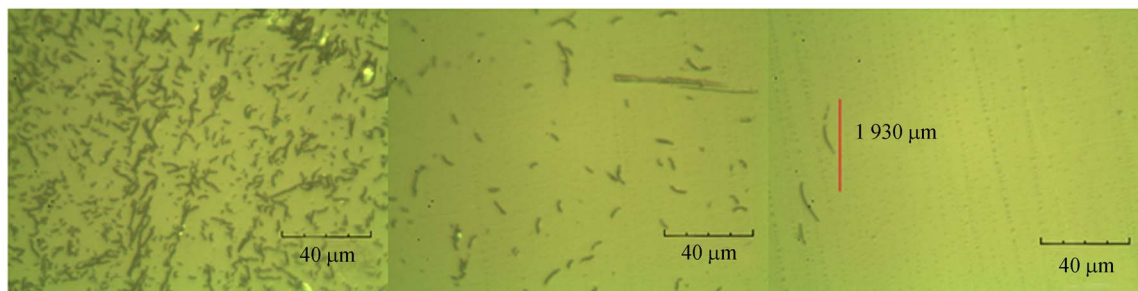
(a) 镁铝尖晶石, W5, 亚表面裂纹层

(a) Spinel, W5, SSD



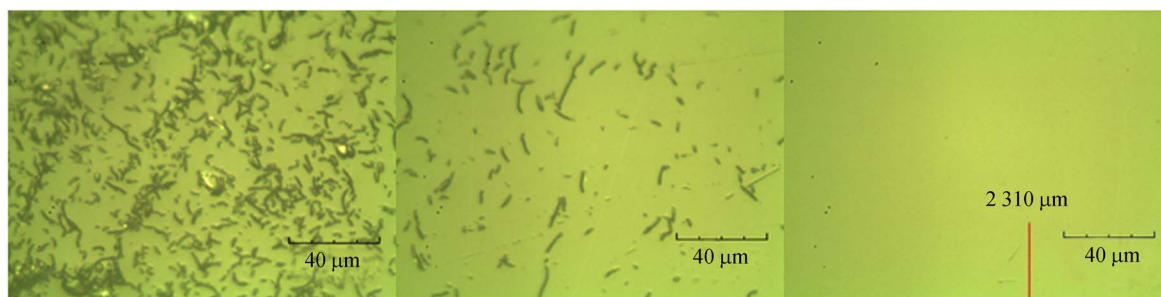
(b) 镁铝尖晶石, W50, 亚表面裂纹层

(b) Spinel, W50, SSD



(c) 石英玻璃, W14, 亚表面裂纹层

(c) Quartz glass, W14, SSD



(d) 石英玻璃, W50, 亚表面损伤层

(d) Quartz glass, W50, SSD

图 6 镁铝尖晶石和石英玻璃的亚表面裂纹层显微观察图片

Fig. 6 Microscopic figures of SSD for spinel and quartz glass

### 4.3 仿真与实验结果间的对比及误差分析

研磨仿真中,随着磨粒粒径的增大,切入深度随之增大,仿真得到的裂纹层深度也相应增加,与实际研磨加工过程中磨粒粒径对亚表面损伤深度的影响规律相一致,如表 5 所示。

仔细分析可发现,无论是镁铝尖晶石,还是石英玻璃,其亚表面裂纹层的仿真结果均小于其实验结果。这是由于仿真过程与实验过程存在着一定的差异:首先,在材料的二维离散元模型中,材料组成颗粒的排布和研磨仿真中的受力情况过于理想,使得裂纹产生后的延伸情况与实际存在一

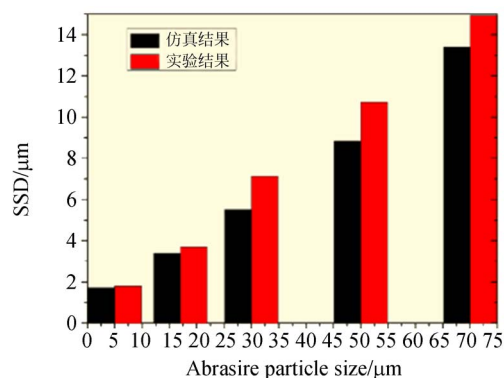
定的偏差;其次,在单颗磨粒研磨仿真中,磨粒的运动为匀速直线运动,与实际研磨加工中复杂的曲线运动有所不同;同时实际加工中,磨粒粒径有一定分布范围,不可避免地会混入大颗粒,导致工作局部裂纹层较大;最后,仿真模型中颗粒间的粘结是无形的,忽略了颗粒之间孔隙的存在。

由图 6 可知,在相同的研磨工艺条件下,研磨相同工件时,磨粒粒径越大,亚表面损伤层中微裂纹越密集,又因为镁铝尖晶石的脆性大于石英玻

表 5 亚表面裂纹层深度的实验与仿真结果

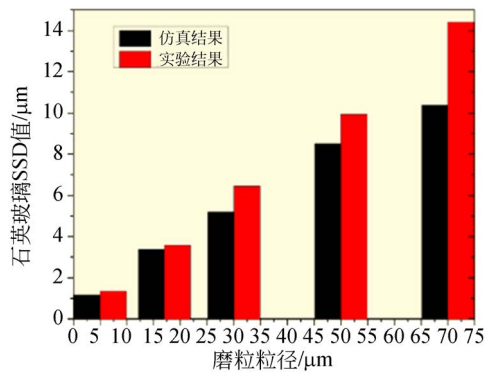
Tab. 5 Subsurface crack depth in experiment and simulation

磨粒粒径/ $\mu\text{m}$	实验结果中 SSD 值/ $\mu\text{m}$		仿真结果中裂纹层深度/ $\mu\text{m}$	
	镁铝尖晶石	石英玻璃	镁铝尖晶石	石英玻璃
W5	1.81	1.36	1.72	1.18
W14	3.71	3.59	3.40	3.38
W30	7.12	6.45	5.53	5.19
W50	10.73	9.94	8.84	8.52
W70	14.95	14.42	13.41	10.38



(a) 镁铝尖晶石

(a) Spinel



(b) 石英玻璃

(b) Quartz glass

图7 仿真结果与实验结果间的差异

Fig. 7 Different results between simulation and experiment

璃,故密集程度变化更加显著。总的来说,相对应的仿真结果与实验结果之间存在一定的误差,基本稳定在10%~20%,且石英玻璃的误差范围

#### 参考文献:

- [1] 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 detection of subsurface damage of optical materials in lapping process and its influence regularity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):16-21. (in Chinese)
- [2] 郭晓光,翟昌恒,张亮,等. 光学石英玻璃纳米级加工性能[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11):2959-2966.  
GUO X G, ZHAI CH H, ZHANG L, *et al.*. Nano-processing performance of optical glass[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11):2959-2966. (in Chinese)
- [3] 王占奎,朱永伟,朱琳,等. 三乙醇胺在镁铝尖晶石固结磨料研磨中的作用[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4):1034-1043.  
WANG ZH K, ZHU Y W, ZHU L, *et al.*. Effect of triethanolamine in lapping spinel using fixed abrasive pad [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1034-1043. (in Chinese)
- [4] 贺行洋,苏英. 光学石英玻璃加工表面微结构特征[J]. 武汉理工大学学报, 2010(13):34-37.  
HE X Y, SU Y. Machined surface microstructure of

稍大于镁铝尖晶石的误差范围,如图7所示。

## 5 结论

本文引入离散元法对光学硬脆材料镁铝尖晶石和石英玻璃进行单颗磨粒的研磨仿真,利用角度抛光法测量其实际研磨加工后的亚表面损伤,分析了磨粒粒径对亚表面损伤的影响规律、不同材料之间亚表面损伤层的差异,并进行了仿真结果与实验结果的对比。结果表明:磨粒粒径对镁铝尖晶石和石英玻璃 SSD 的影响都较为显著,随着粒径的增大,亚表面损伤层深度和微裂纹密集程度都随之增加。仿真与实验结果的对比表明:通过离散元法可以快速有效的对镁铝尖晶石和石英玻璃等光学硬脆材料的亚表面损伤层深度进行仿真预测,从而提高效率,并为后续的研磨抛光工艺提供参考和指导。

- optical silica glass [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010(13):34-37. (in Chinese)
- [5] 朱楠楠,朱永伟,李军,等. 铌酸锂晶体的研磨亚表面损伤深度[J]. 光学精密工程, 2015, 23(12): 3387-3394.  
ZHU N N, ZHU Y W, LI J, *et al.*. Subsurface damage depth of lithium niobate crystal in lapping [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12): 3387-3394. (in Chinese)
- [6] YI Y Z, FUNKENBUSCH P D, QUESNEL D J, *et al.*. Effect of etching and Imaging mode on the measurement of subsurface damage in microground optical glasses[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1994, 77(12):3277-3280.
- [7] RANDI J A, LAMBROPOULOS J C, JACOBS S D. Subsurface damage in some single crystalline optical materials [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(12): 2241-9.
- [8] 刘健,马占龙,王君林. 光学元件亚表面损伤检测技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2011(8): 15-21.  
LIU J, MA ZH L, WANG J L. Research status of subsurface damage detection technology of optical elements [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011(8):15-21. (in Chinese)
- [9] STRACK O D L, CUNDALL P A. *The Distinct*

- Element Method as a Tool for Research in Granular Media* [M]. Department of Civil and Mineral Engineering, University of Minnesota, 1978.
- [10] 刘凯欣, 高凌天. 离散元法研究的评述[J]. 力学进展, 2003, 33(4):483-490.  
LIU K X, GAO L T. Discrete element method research review[J]. *Advances in Mechanics*, 2003, 33(4):483-490. (in Chinese)
- [11] TAN Y Q, YANG D, SHENG Y. Study of polycrystalline  $Al_2O_3$ , machining cracks using discrete element method [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48(9):975-982.
- [12] TAN Y Q, YANG D, SHENG Y. Discrete element method (DEM) modeling of fracture and damage in the machining process of polycrystalline SiC [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2009, 29(6):1029-1037.
- [13] 谭援强, 杨冬民, 李才, 等. 单晶硅加工裂纹的离散元仿真研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(21):2545-2548.  
TAN Y Q, YANG D M, LI C, *et al.*. Discrete element method simulation of cracks in monocrystalline silicon machining process[J]. *China Machinery Process*, 2008, 19(21):2545-2548. (in Chinese)
- nese)
- [14] 谭援强, 张浩, 李明军. 化学机械抛光中磨粒运动特性离散元仿真研究[J]. 中国机械工程, 2011(5):597-603.  
TAN Y Q, ZHANG H, LI M J. Modeling and simulation of abrasive flow in chemical mechanical polishing using discrete element method [J]. *China Machinery Process*, 2011(5):597-603. (in Chinese)
- [15] 徐松林, 郭庆海, 唐志平, 等. 冲击荷载作用下脆性孔洞材料崩塌数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6):955-962.  
XU S L, GUO Q H, TANG ZH P, *et al.*. Numerical investigation on void collapse for brittle porous materials subjected to shock loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(6):955-962. (in Chinese)
- [16] 李军, 王慧敏, 王文泽, 等. 固结磨料研磨 K9 玻璃表面粗糙度模型[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21):199-205.  
LI J, WANG H M, WANG W Z, *et al.*. Model of surface roughness in fixed abrasive lapping of K9 glass[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(21):199-205. (in Chinese)

#### 作者简介:



李信路(1991—),男,江苏东台人,硕士研究生,主要从事光学硬脆材料精密超精密加工方面的研究。E-mail: nu-aalixinlu@126.com

#### 导师简介:



朱永伟(1967—),男,浙江平湖人,教授,博士生导师,2002年于中南大学获得博士学位,主要从事纳米材料的制备与应用、精密超精密加工、表面工程等方面研究。E-mail: meeywzhu@nuaa.edu.cn。