

熔石英磨削的残余应力层深度预测研究

宗傲¹, 王科荣^{1,2}, 彭凯³, 唐超¹, 周大庆¹, 范永见¹,
侯天逸¹, 朱永伟¹, 李军^{1*}

(1.南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016; 2.金华职业技术学院 机电工程学院,
浙江 金华 321000; 3.中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘要: 目的 磨削后工件表面残余应力处于裂纹层下方其位置隐蔽、不易检测, 使用过程中受到应力作用易扩展成裂纹, 影响后续工艺参数设计和工件使用寿命。因此, 研究磨削后表面残余应力层深度有助于确定后续工艺加工余量, 提高工件使用性能。方法 本文采用离散元法建立单颗磨粒磨削熔石英的离散元模型, 研究磨粒粒径对工件亚表面损伤深度的影响。采用角度抛光法和差动腐蚀法测量熔石英亚表面裂纹层和损伤层深度, 计算残余应力层深度并验证模型。结果 当磨粒粒径分别为 7、14、28、40 μm 时, 仿真得到的裂纹层深度分别为 2.53、3.02、4.07、7.39 μm , 残余应力层深度分别为 0.75、1.00、1.34、2.33 μm ; 实验测得的裂纹层深度分别为 2.51、3.14、4.65、8.16 μm , 残余应力层深度分别为 0.86、0.93、1.31、1.87 μm 。由此可见, 随着磨粒粒径的增大, 工件表面的脆性去除愈加明显, 表面质量变差, 亚表面裂纹层深度和残余应力层深度增大。仿真预测裂纹层深度与实验值偏差小于 15%, 残余应力层深度偏差小于 25%, 残余应力层深度约为裂纹层深度的 1/4~1/3, 随磨粒粒径增大, 比例逐渐减小。结论 离散元仿真可有效预测熔石英磨削后的残余应力层深度, 为其磨削工艺的制定提供参考。

关键词: 熔石英; 离散元仿真; 亚表面损伤; 裂纹层; 残余应力层

中图分类号: TG580 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)12-0074-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.12.006

Prediction of Residual Stress Layer Depth in Grinding Fused Quartz

ZONG Ao¹, WANG Ke-rong^{1,2}, PENG Kai³, TANG Chao¹, ZHOU Da-qing¹,
FAN Yong-jian¹, HOU Tian-yi¹, ZHU Yong-wei¹, LI Jun^{1*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Mechanical & Electrical Engineering College, Jinhua Polytechnic, Zhejiang Jinhua 321000, China;
3. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

ABSTRACT: Fused quartz has excellent physical and chemical properties, and is widely used in manufacture of optical components and other industries and many fields of modern science and technology. However, fused quartz glass is a high hard

收稿日期: 2023-08-28; 修订日期: 2023-11-10

Received: 2023-08-28; Revised: 2023-11-10

基金项目: 装备预研共用技术项目 (50923021502); 国家自然科学基金面上项目 (52375439); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目 (JXQC-010)

Fund: The Equipment Pre-research Common Technology Project (50923021502); National Natural Science Foundation of China (52375439); "Six Talent Peak" High-level Talent Project of Jiangsu (JXQC-010)

引文格式: 宗傲, 王科荣, 彭凯, 等. 熔石英磨削的残余应力层深度预测研究[J]. 表面技术, 2023, 52(12): 74-82.

ZONG Ao, WANG Ke-rong, PENG Kai, et al. Prediction of Residual Stress Layer Depth in Grinding Fused Quartz[J]. Surface Technology, 2023, 52(12): 74-82.

*通信作者 (Corresponding author)

and brittle material. Cracks, residual stress and other damage are likely to occur during processing. The surface residual stress layer of the workpiece after grinding is under the crack layer, its position is hidden and difficult to observe. During the use of the workpiece, it is easy to expand into cracks under the action of external load, which affects the design of subsequent process parameters and the service life of the workpiece. Therefore, researching on the depth of surface residual stress layer after grinding is helpful to determine the residual processing allowance and improve the working performance of the workpiece.

In this paper, the discrete element model of single particle grinding fused quartz was established by the discrete element method. By changing the cutting depth corresponding to different particle sizes in the simulation process, the influence of diamond particle size on the subsurface damage depth of the workpiece was studied. In the experiment, the fused quartz workpiece was ground with resin-based corundum grinding wheel. The grinding process only changed the particle size of the grinding wheel, and the other process parameters were fixed. Angle polishing method and differential corrosion method were used to measure the depth of the subsurface crack layer and the damaged layer, and the depth of the residual stress layer was calculated and the discrete element simulation results were verified.

The results showed that when the particle size was 7, 14, 28, 40 μm , the simulated crack layer depth was 2.53, 3.02, 4.07, 7.39 μm , and the residual stress layer depth was 0.75, 1.00, 1.34, 2.33 μm , respectively. The depth of crack layer was 2.51, 3.14, 4.65, 8.16 μm , and the depth of residual stress layer was 0.86, 0.93, 1.31, 1.87 μm . It could be seen that with the increase of particle size, the removal of brittleness on the workpiece surface became more obvious, the surface quality deteriorated, and the depth of subsurface crack layer and residual stress layer increased. The residual stress layer was distributed below the crack layer, and there would be stress concentration at the crack tip. When the particle size was large, the stress at the tip would also increase as the subsurface crack of the workpiece expanded to the inside of the material after grinding. The depth of the residual stress layer also increased. The deviation between the crack depth and the experimental value was less than 15%, and the residual stress depth was less than 25%. The depth of the residual stress layer was about 1/4~1/3 of the depth of the crack layer. The proportion decreased gradually with the increase of the particle size. Therefore, the depth of residual stress layer can be predicted by obtaining the crack layer depth. The discrete element method can be used to simulate the grinding process of a single abrasive particle, so as to obtain the crack layer depth, and then predict the residual stress layer depth after grinding of fused quartz. The reference is provided for the grinding process parameters.

KEY WORDS: fused quartz; discrete element method; subsurface damage; crack layer; residual stress layer

熔石英具有透射性高、耐高温、耐腐蚀、高硬度, 以及耐射线辐照等优越的物化性能, 被广泛应用于光学、冶金、化工、核能等近代科学技术的诸多领域^[1-2]。目前, 熔石英光学元器件的应用对其加工精度和加工质量都具有较高的要求^[3]。然而, 熔融石英玻璃属于高硬脆材料, 断裂韧性低, 在磨削过程中易产生断裂和破碎, 同时易产生亚表面裂纹、残余应力等损伤^[4-6]。工件的亚表面损伤由裂纹层和残余应力层组成, 其中裂纹层处于残余应力层上方。裂纹是裂纹层中最常见的损伤形式, 损伤明显易于检测, 以往的亚表面损伤研究大都针对裂纹层, 裂纹会导致作为光学器件使用的熔石英的激光损伤敏感性明显降低, 随着激光照射数量的增加, 裂纹也会向器件内部扩展, 严重降低了材料结构强度和激光损伤阈值, 影响器件的使用性能^[7-8]。而相比于亚表面损伤中的裂纹, 残余应力处于更深的位置且不易观测, 目前针对残余应力层深度的研究也鲜有涉及。由于残余应力的存在, 工件在使用过程中会因外部载荷的作用使得内部应力增大, 易扩展为裂纹, 降低工件的疲劳强度, 进而影响工件的性能和使用寿命^[9-11]。同时, 后续工艺也需

要参考工件磨削后的裂纹层深度及残余应力层深度, 从而确定加工余量, 以去除上一道工艺引起的亚表面损伤。因此, 针对熔石英磨削的亚表面损伤尤其是损伤中残余应力研究就显得格外重要。

目前, 针对加工后工件的残余应力研究, 主要有测量法和计算法两种^[12]。测量法主要是利用光学测量仪器检测工件的表面分子结构状态, 结合逐步腐蚀检测不同深度上的残余应力。计算法则是从残余应力产生的机理入手, 通过数值模拟或者建立数学模型来计算获取残余应力的信息。孙敬龙^[13]采用显微拉曼光谱法检测了磨削后的硅片表面残余应力, 以此表征硅片的亚表面损伤。邓亚等^[14]结合 X 射线衍射法与多重线性回归方法检测了碳化硅不同晶向上的残余应力状态。Weber 等^[15]研究了 AA7050-T74 铝合金铣削后的残余应力随工艺参数的变化规律, 通过重复试验和统计分析, 确定了对残余应力影响最大的工艺参数。Köhler 等^[16]采用剥层法对铣削后的 Ti-6Al-4V 材料进行残余应力测试, 研究了材料加工后的残余应力值与亚表面最大深度值之间的规律性。李运涛^[17]建立单晶硅的离散元模型, 分析了精密切削加工的裂纹扩展过

程及残余应力的分布规律。Liu 等^[18]采用分子动力学方法模拟硅片旋转磨削过程,研究了硅片局部残余应力在厚度方向的变化规律,得到了硅片表面的残余应力分布云图。Torrano 等^[19]利用有限元仿真技术对单颗磨粒切削材料模型的残余应力进行了研究并发现,仿真过程中不同工艺参数对残余应力的影响与实验结果保持了良好的一致性。尹韶辉等^[20]使用有限元方法通过对高温下的圆柱玻璃变形及非球面玻璃透镜模压成型的模拟,得到了镜片残余应力场的分布规律。

表面残余应力对后续工艺制定和工件使用寿命有重要影响,因此建立残余应力层深度与裂纹层深度之间的关系,以此预测残余应力层深度具有重要意义。本文首先根据熔石英的特性建立磨削过程的离散元模型,研究磨粒粒径对工件亚表面裂纹层和残余应力层深度的影响;然后采用角度抛光法和差动腐蚀法测量磨削后熔石英工件的裂纹层和亚表面损伤层深度,计算残余应力层深度;最后,将仿真结果与实验结果进行分析,得到残余应力层深度与裂纹层深度的比例关系,为后续工艺的制定提供参考。

1 离散元仿真与实验设置

1.1 熔石英二维离散元模型建立

本文借助 PDF2D 建立熔石英的二维 BPM (Bonded-Particle Model) 模型。该模型由大量离散颗粒构成,颗粒之间的力和力矩通过连接键传递。在仿真过程中,磨粒划过工件表面造成的亚表面裂纹会以颗粒间连接键的断裂来呈现,而模型内部的残余应力则通过遍历构成模型的所有颗粒的应力大小来获取。建立的熔石英离散元模型如图 1 所示。

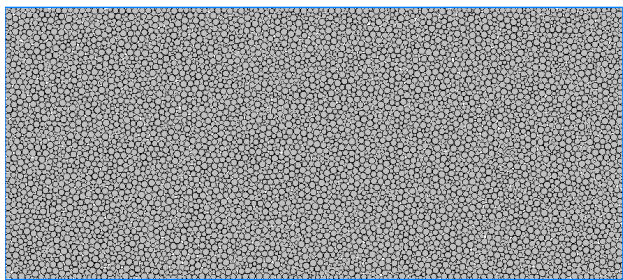


图 1 熔石英离散元模型
Fig.1 Discrete element model of fused quartz

在 BPM 模型中,材料宏观物理力学参数无法直接赋予,需要标定颗粒间接触模型的微观参数使材料模型的性能与实际材料一致。因此,通过设计标定试验,校核模型的杨氏模量 E 、泊松比 ν 、拉伸强度 σ_t ,以及抗弯强度 σ_b 与实际材料性能接近。材料的真实力学参数与校核后的 BPM 模型的力学参数如表 1 所示。

表 1 熔石英力学性能参数真实值与模型值
Tab.1 Real value and model value of mechanical property parameters of fused quartz

Category	E/GPa	ν	σ_t/MPa	σ_b/MPa
Real parameters	72.5	0.17	50	67
Model parameters	72.9	0.17	52.7	69

1.2 离散元仿真方案设置

在上述标定模型的基础上,建立单颗磨粒磨削仿真的二维离散元模型。模型由熔石英的颗粒集合体和模拟单颗磨粒的正方形墙体构成。在实际磨削过程中,单颗磨粒的切入深度通常表示为单颗磨粒最大未变形切屑厚度,将磨削过程中磨粒粒径的影响转化成仿真过程中单颗磨粒切深的影响,单颗磨粒切入深度计算方法见式(1)^[21-22]。

$$h_{\max} = \left[\frac{4}{Cr} \left(\frac{v_w}{v_s} \right) \left(\frac{a_p}{d_s} \right)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中: C 为单位面积有效磨粒数; r 为切屑宽厚比; v_w 为工件进给速度,其单位为 mm/s ; v_s 为砂轮线速度,其单位为 m/s ; a_p 为切削深度,其单位为 μm ; d_s 为砂轮直径,且 $d_s=10\text{ mm}$ 。

根据砂轮几何关系可以获得单位面积有效磨粒数 C 的计算见式(2)^[23]。

$$C = 4\lambda / \{d_g^2 (4\pi/3\nu)^{2/3}\} \quad (2)$$

式中: λ 为有效磨粒百分比,且 $\lambda=0.3$; d_g 为磨粒粒径; ν 为砂轮的体积分数,且 $\nu=0.375$ 。磨削过程的工艺参数如表 2 所示。

表 2 熔石英磨削工艺参数
Tab.2 Grinding process parameters of fused quartz

$v_s/\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_w/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$a_p/\mu\text{m}$
4.2	4	4

将磨削的工艺参数带入到公式(1)中,得到磨粒粒径与单颗磨粒切入深度的关系,磨粒粒径分别为 7、14、28、40 μm 时,单颗磨粒切入深度如表 3 所示。

表 3 不同粒径磨粒对应切入深度
Tab.3 Different particle sizes correspond to cutting depth

Particle size/ μm	Cutting depth/ nm
7	45.7
14	91.4
28	182.8
40	261.2

在诸多因素中,磨粒粒径对磨削亚表面损伤程度的影响最大。本文固定其他加工参数,探究磨粒粒径对残余应力层深度的影响。单颗磨粒模拟磨削熔石英

的二维离散元模型如图 2 所示, 仿真过程中利用墙体固定工件颗粒模型, 磨粒以恒定切深对工件进行磨削, 磨粒磨削速度恒定。磨削结束后, 充分松弛材料模型, 得到亚表面裂纹和残余应力分布情况。

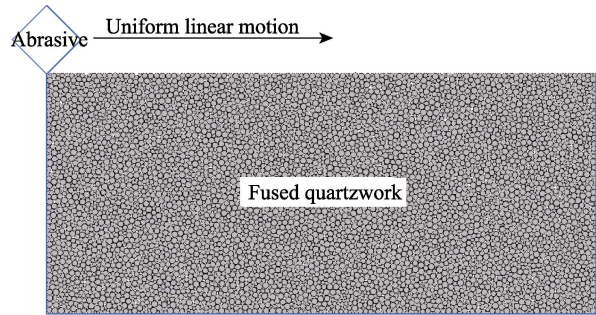


图 2 单颗磨粒磨削熔石英的离散元模型
Fig.2 Discrete element model for grinding fused quartz with a single particle

1.3 亚表面损伤测量实验

实验检测亚表面损伤的熔石英试件尺寸为 25 mm×25 mm×5 mm。磨削实验在 XK7124 三轴数控铣床上进行。磨削工具为树脂基金刚石砂轮, 砂轮由粒径分别为 7、14、28、40 μm 的单晶金刚石磨粒固结在树脂基中制成, 砂轮形状为圆柱形, 底面直径 10 mm, 如图 3 所示。利用三轴数控铣床将工具砂轮加持在刀柄上对工件进行磨削加工, 熔石英工件黏结在承载器上, 下方放置测力仪用来监测磨削力(如图 4 所示), 磨削液为去离子水。整个磨削时长依据工件进给速度和工件加工区域尺寸决定, 一次走刀约 6 min。磨削工艺参数如表 2 所示。探究小直径砂轮磨削下的熔石英工件亚表面损伤, 为后续复杂曲面磨削提供参考。

采用角度抛光法和差动腐蚀法测量磨削后工件的亚表面损伤^[24-26]。其中, 角度抛光的具体参数如表 4 所示。腐蚀液选择 1:20 的质量分数为 20 %HF 和 16 %NH₄F, 腐蚀时间为 20 min。采用 NanoMap-500LS 三维形貌仪扫描腐蚀后的抛光斜面得到抛光斜面的轮廓线, 利用光学显微镜观测斜面裂纹分布信息, 计算亚表面裂纹层深度。



图 3 砂轮实物
Fig.3 Grinding wheel

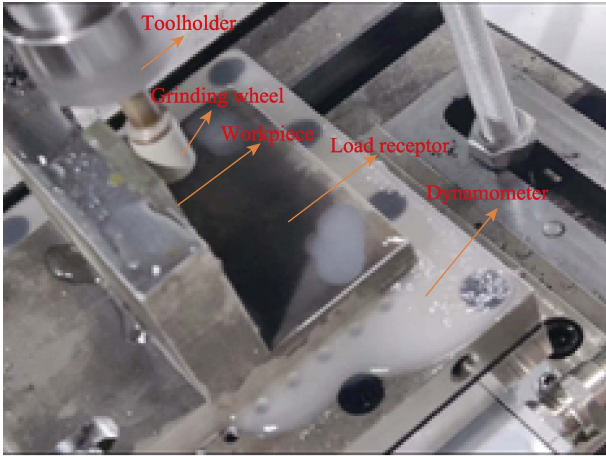


图 4 工件磨削过程
Fig.4 Grinding process of workpiece

表 4 角度抛光工艺参数
Tab.4 Process parameters of angle polishing

Pressure/ kPa	Speed of pad/r·min ⁻¹	Speed of workpiece/r·min ⁻¹	Polishing time/min
10	85	80	60

差动腐蚀法测量熔石英工件的亚表面损伤深度, 腐蚀液为 40%HF 和 16%NH₄F, 按照 1 : 20 的质量分数比配置, 每次腐蚀时间间隔为 10 min, 根据每次腐蚀时间间隔内基体和工件的腐蚀速率, 绘制差动腐蚀速率及加速度曲线。观察曲线找到腐蚀拐点, 计算亚表面损伤深度。

2 结果与讨论

2.1 离散元仿真预测结果

采用不同粒径的单颗磨粒模拟磨削熔石英模型, 磨削后的亚表面裂纹分布情况如图 5 所示。结果表明, 随着磨粒粒径的增大, 磨削后的亚表面裂纹深度越大, 磨粒对材料模型的去除效果也越明显。当粒径分别为 7、14、28、40 μm 时, 工件的亚表面裂纹层深度分别为 2.53、3.02、4.07、7.39 μm。从图 5 中可以看出, 当磨粒粒径较小时, 工件亚表面存在少量裂纹, 且裂纹大多为横向裂纹, 纵向裂纹并不明显。随着磨粒粒径的增大, 工件亚表面开始出现纵向裂纹且逐渐向内部扩展, 同时工件表面出现大的凹坑, 表面质量变差。磨粒粒径对磨削过程及磨削后亚表面裂纹层深度有显著影响。

对模拟磨削后的熔石英模型进行应力遍历, 得到模型中每个颗粒单元的残余应力值, 工件的残余应力分布情况如图 6 所示。在工件表面附近存在有残余压应力, 随着深度的增加, 压应力逐渐减小并转化为残余拉应力, 残余拉应力在裂纹尖端有较大的应力值, 直至一定深度后应力值趋向于零并保持平稳。从图中可以看出, 随着磨粒粒径增大, 模型的残余应力的最

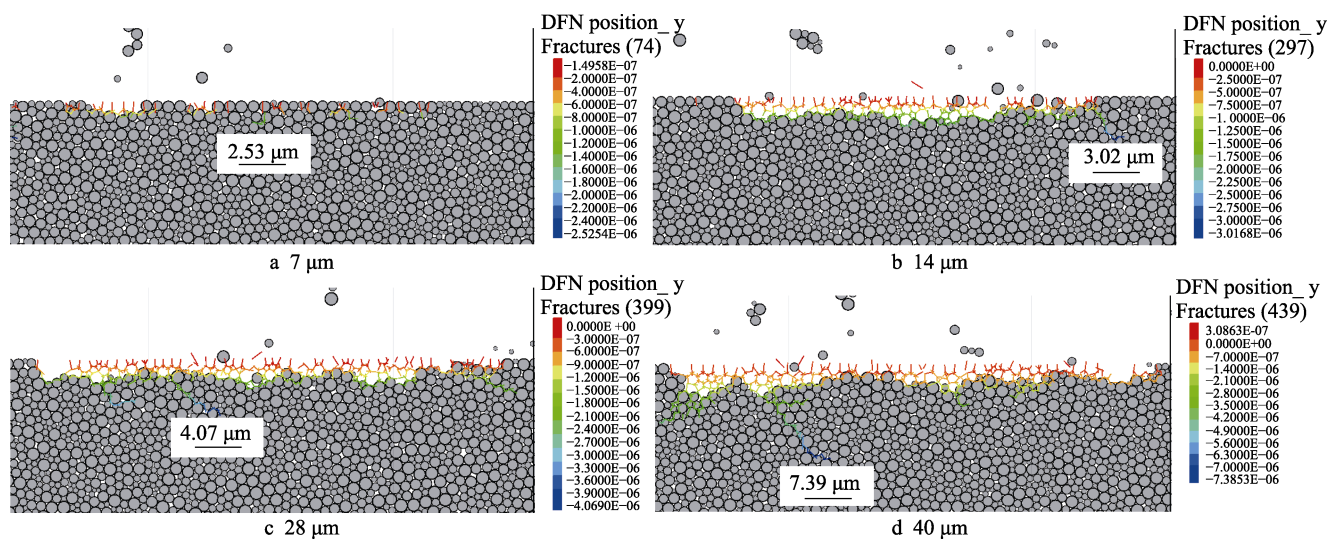


图5 不同粒径磨粒模拟磨削后工件表面的裂纹分布情况
Fig.5 Crack distribution of workpiece surface after simulated grinding of different particle sizes: a) 7 μm ; b) 14 μm ; c) 28 μm ; d) 40 μm

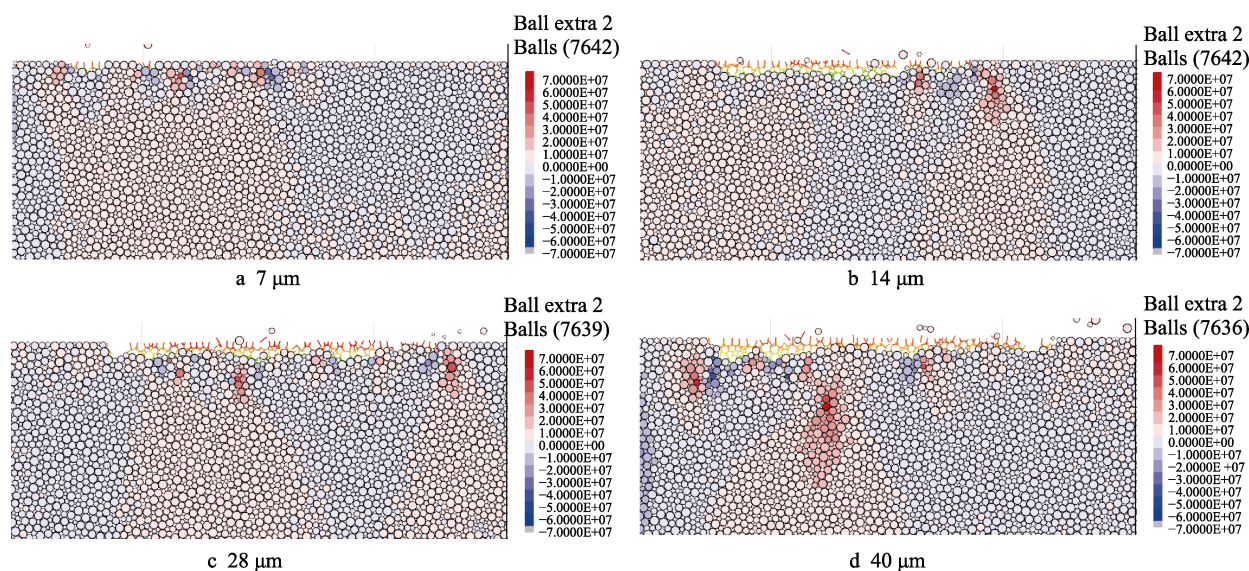


图6 不同粒径磨粒模拟磨削后工件的亚表面损伤分布情况
Fig.6 Subsurface damage distribution of workpiece after simulated grinding of different particle sizes: a) 7 μm ; b) 14 μm ; c) 28 μm ; d) 40 μm

大值逐渐增加。在深度方向上,残余应力层位于裂纹层的下方,两者共同组成亚表面损伤。统计模型深度方向上颗粒的残余应力值大小,以 10 MPa 作为亚表面损伤存在的标准^[26],得到不同粒径下工件的亚表面损伤深度,如图 7 所示。当粒径为 7、14、28、40 μm 时,工件的亚表面损伤深度分别为 3.28、4.02、5.41、9.72 μm 。从图 6 中可以看出,随着磨粒粒径的增大,向工件内部扩展的纵向裂纹增加,裂纹尖端产生的残余拉应力更深,亚表面损伤深度也越大。

2.2 亚表面损伤测量结果

图 8 为不同磨粒粒径砂轮磨削后熔石英的表面形貌。随着磨粒粒径增大,工件表面的脆性断裂愈发严重,表面质量变差并出现深且宽大的划痕。因此,

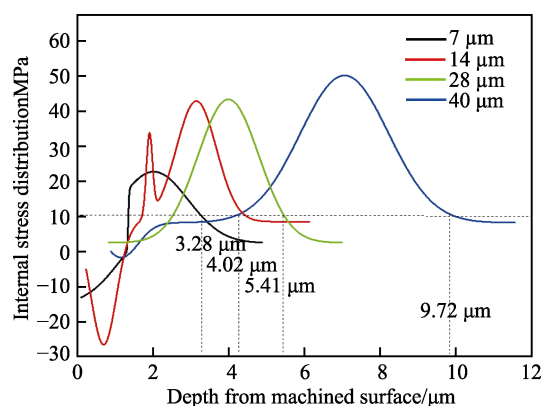


图7 不同粒径磨粒模拟磨削后工件内部应力分布曲线
Fig.7 Internal stress distribution curve of workpiece after simulated grinding of different particle sizes

磨削过程中磨粒粒径对工件的表面质量具有显著影响。

采用角度抛光法测得磨削后熔石英工件的亚表面裂纹层深度, 图 9 为磨粒粒径在 $28\text{ }\mu\text{m}$ 时, 砂轮磨削后工件亚表面裂纹随显微平台移动距离的分布情况。利用光学显微镜从起点开始观测, 移动显微平台, 直至观测到工件表面最后一条裂纹消失, 记录平台移动距离。由图 9a 可见, 工件起始点存在大量分布于划痕周围的竖形裂纹; 一段距离后, 裂纹的数量明显减少; 最终在平台移动至 $2\ 370\text{ }\mu\text{m}$ 时, 裂纹消失。Nanomap-500LS 三维形貌仪扫描抛光区域, 固定扫描的起点与光学显微镜观测的起点相同, 得到如图 10 所示的抛光斜面的轮廓曲线, 将显微观察得到的平台移动距离对应于曲线的横坐标的距离, 则纵向的距离

变化即为工件亚表面裂纹层深度。因此 $28\text{ }\mu\text{m}$ 磨粒磨削后工件亚表面裂纹层深度为 $4.65\text{ }\mu\text{m}$ 。当磨粒粒径分别为 40 、 14 、 $7\text{ }\mu\text{m}$ 时, 计算出的亚表面裂纹层深度分别为 8.16 、 3.14 、 $2.51\text{ }\mu\text{m}$ 。对比不同粒径磨粒砂轮磨削下工件亚表面的裂纹深度可得, 磨粒粒径越大, 亚表面裂纹层深度越大且分布越明显。

采用差动腐蚀法测得磨削后熔石英工件的亚表面损伤层深度, 图 11~12 分别是磨粒粒径 $28\text{ }\mu\text{m}$ 的砂轮磨削后工件与基体的差动腐蚀速率和差动腐蚀加速度曲线图。在腐蚀开始阶段, 由于工件表面有大量划痕、凹坑等缺陷, 腐蚀面积相对较大, 因此腐蚀速率较大。随着腐蚀深度的增加, 亚表面裂纹的密集程度逐渐减小, 腐蚀速率减缓, 直至差动腐蚀加速度为

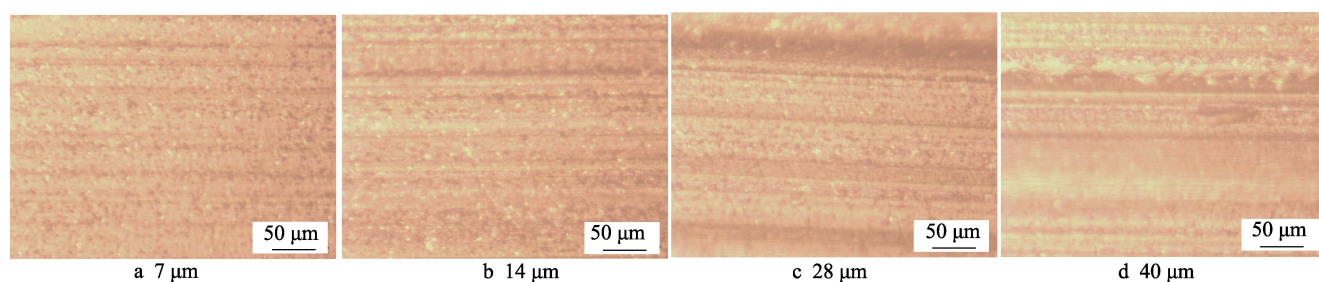


图 8 不同粒径砂轮磨削后熔石英表面形貌

Fig.8 Surface morphology of fused quartz after grinding with grinding wheels of different particle size: a) $7\text{ }\mu\text{m}$; b) $14\text{ }\mu\text{m}$; c) $28\text{ }\mu\text{m}$; d) $40\text{ }\mu\text{m}$

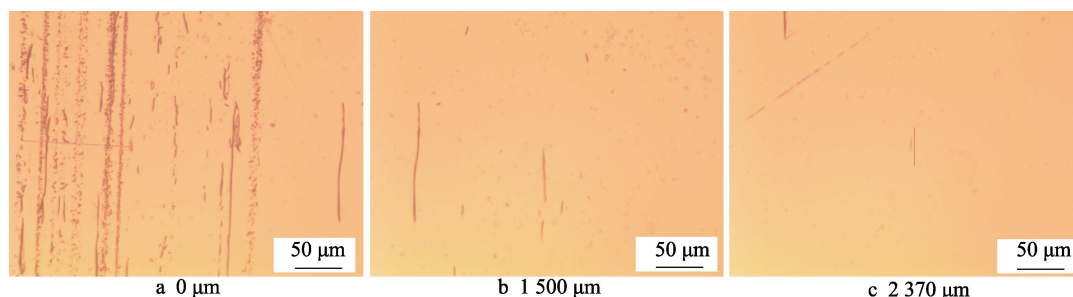


图 9 $28\text{ }\mu\text{m}$ 磨粒砂轮磨削后工件亚表面裂纹随平台移动距离分布情况

Fig.9 Subsurface crack distribution of workpiece with moving distance of platform after grinding with $28\text{ }\mu\text{m}$ grinding wheel: a) $0\text{ }\mu\text{m}$; b) $1\ 500\text{ }\mu\text{m}$; c) $2\ 370\text{ }\mu\text{m}$

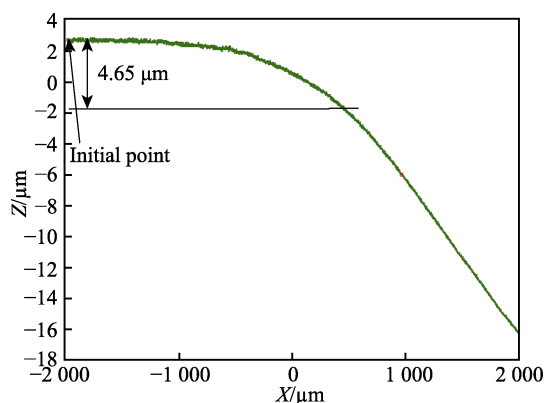


图 10 $28\text{ }\mu\text{m}$ 磨粒砂轮磨削后工件的抛光斜面轮廓曲线

Fig.10 Polishing bevel contour curve of workpiece after grinding with $28\text{ }\mu\text{m}$ grinding wheel

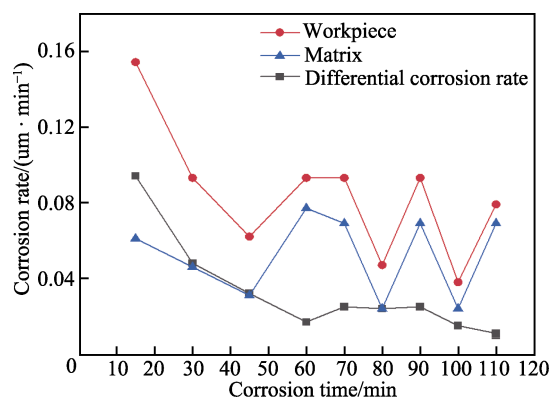


图 11 $28\text{ }\mu\text{m}$ 粒径砂轮磨削后工件及基体的腐蚀速率、差动腐蚀速率曲线

Fig.11 Corrosion rate and differential corrosion rate of workpiece and matrix after grinding with $28\text{ }\mu\text{m}$ grinding wheel

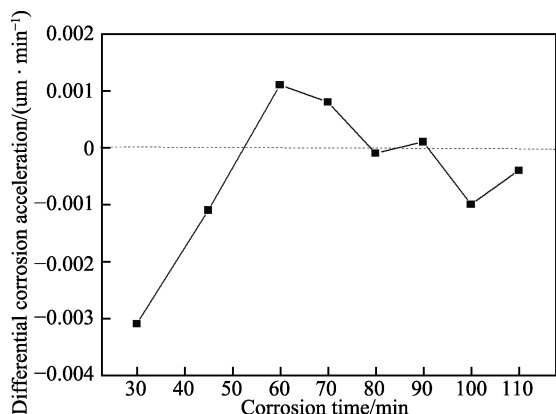


图 12 差动腐蚀加速度曲线

Fig.12 Differential corrosion acceleration curve

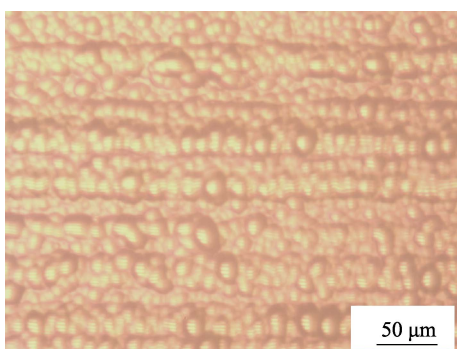


图 13 熔石英充分腐蚀后的形貌

Fig.13 Morphology of fused quartz after full corrosion

0 时, 此时试件的亚表面损伤层被腐蚀完全, 腐蚀加速度曲线出现拐点, 其对应的腐蚀深度即为亚表面损伤深度。根据图 12 可以看到, 腐蚀拐点为 53 min, 计算亚表面损伤深度为 5.96 μm 。因此, 磨粒粒径为 28 μm 时工件的亚表面损伤深度为 5.96 μm 。从图 8c 和图 13 可以看出 28 μm 磨粒砂轮磨削后的工件表面有明显的磨削划痕和脆性断裂, 腐蚀至拐点后, 表面划痕变浅直至消失, 结合图 12 的腐蚀加速度曲线图可知此时工件已腐蚀至基体。通过差动腐蚀法得到其余磨粒粒径分别为 40、14、7 μm 时, 其对应的工件亚表面损伤层深度分别为 10.03、4.07、3.37 μm 。

2.3 仿真预测与实验结果对比分析

亚表面损伤深度减去裂纹层深度得到残余应力层深度。如图 14 所示, 将仿真结果与实验结果对比后发现, 裂纹层、亚表面损伤及残余应力层深度随粒径变化的规律相同, 都是随粒径的增大而增大, 但也都存在偏差, 其中裂纹层的仿真偏差小于 15%, 且当磨粒粒径大于 14 μm 时, 仿真结果都要小于实验值。亚表面损伤深度的仿真值与实验值偏差小于 10%。由于残余应力层深度受亚表面损伤深度和裂纹层深度值的影响, 其仿真与实验的误差是亚表面损伤深度和裂纹层深度误差的叠加, 尤其是当磨粒粒径为 40 μm 时, 裂纹层深度的仿真结果相较实验值偏差较大, 而亚表面损伤深度相近, 因此会出现较大的残余应力层深度偏差, 但总的来看偏差小于 25%, 且磨粒粒径较小时, 仿真结果更加贴合实验值。因此认为离散元仿真可以对熔石英磨削后的亚表面裂纹层深度和残余应力层深度进行有效预测。

仿真与实验的偏差由多种因素导致, 其中在离散元仿真中, 将材料简化为二维颗粒的聚合体, 通过颗粒间的连接键来模拟材料的力学性能, 与熔石英内部真实的微观结构有一定的区别。其次仿真中磨粒切入深度采用平均化的单颗磨粒最大未变形切屑厚度, 而实际磨削过程中磨粒的出露高度并不平均, 这就导致实际磨削的磨粒切深与仿真不同。特别是当磨粒粒径大于平均粒径时, 实际造成的切深会更大, 磨削过后也会产生更大的裂纹和损伤深度。此外, 差动腐蚀法测量工件亚表面损伤深度时, 通常对腐蚀拐点的判断相对延后, 此时工件已腐蚀至基体, 这就导致实验测得的亚表面损伤深度会更大。因此, 在磨粒粒径较大时, 实验得到的裂纹层和亚表面损伤深度都会比仿真值大。

不同磨粒粒径下实验得到的残余应力层及裂纹的层深度比例与仿真得到比例如图 15 所示。从图 15 的结果表明, 随着粒径的增大, 实验的比例从 7 μm 时的 34.2%降低至 40 μm 时的 22.9%, 但总体比例相差不多。而仿真的比例则先从 7 μm 时的 29.6%上升

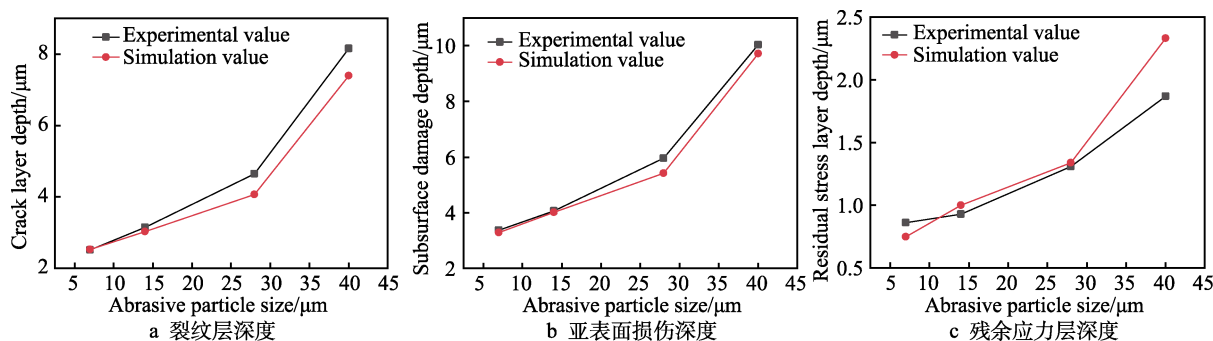


图 14 亚表面损伤深度仿真值与实验结果对比

Fig.14 Comparison of simulated subsurface damage depth with experimental results: a) crack layer depth; b) subsurface damage depth; c) residual stress layer depth

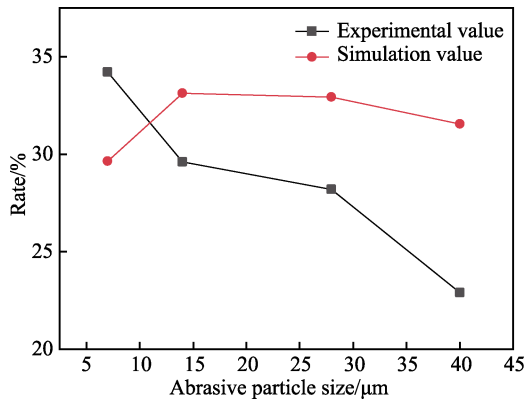


图 15 实验和仿真得到的残余应力层深度与裂纹层深度的比例

Fig.15 Ratio of residual stress layer depth to crack layer depth obtained by experiment and simulation

至 $14\ \mu\text{m}$ 时的 33.1%，接着当粒径大于 $14\ \mu\text{m}$ 时，随着磨粒粒径增大，比例逐渐降低。这是因为当磨粒粒径较小时，磨削深度小，磨削过后材料内部已形成较大的残余应力，但亚表面裂纹的扩展并不明显，此时裂纹深度占整个亚表面损伤的比例较小。随着磨粒粒径增大，刀具与工件的接触面积增大，磨削过程中克服材料晶格阻力而产生更大的能量，从而使得切削力大幅提高，此时材料内部产生更大的残余应力并促使裂纹向内部急剧扩展，裂纹尖端也产生更大的残余应力，裂纹层和残余应力层都会增大，但由于残余应力在裂纹终点后延伸至消失的这段深度内的下降速率很快，残余应力层深度的变化相较而言不如裂纹层深度的变化明显，因此随着磨粒粒径增大，残余应力层深度与裂纹层深度的比值会有下降的趋势。由于磨粒粒径为 $7\ \mu\text{m}$ 时仿真得到的残余应力层深度相较实验值要低，而裂纹层深度相近，所以粒径为 $7\ \mu\text{m}$ 时的仿真得到的比例较低，但从总体的实验与仿真结果来看，残余应力层的深度与裂纹层深度的比例约为 $1/4\sim 1/3$ ，且随着磨粒粒径增大，比例都逐渐减小。

3 结论

本文采用离散元法模拟单颗磨粒磨削熔石英的亚表面损伤深度，探索了磨粒粒径对熔石英磨削后裂纹层和残余应力层的影响规律，采用角度抛光法和差动腐蚀法对仿真结果进行验证，得到如下结论。

1) 随着磨粒粒径的增大，工件表面的脆性断裂严重，表面质量变差，亚表面裂纹层深度和残余应力层深度增大。

2) 离散元法模拟磨削熔石英得到的亚表面裂纹层深度与实验结果的偏差小于 15%，残余应力层深度仿真与实验结果的误差受裂纹层深度和整体损伤深度的影响，偏差小于 25%，离散元法可以较为准确地预测裂纹层和残余应力层深度，为工件后续使用提供保障。

3) 残余应力层深度与裂纹层深度比例约为 $1/4\sim 1/3$ ，且随粒径的增大，比例逐渐减小；因此可以通过仿真或测量试件的裂纹层深度来推测残余应力层深度，为后续磨削工艺参数的选取提供指导。

参考文献:

- [1] ALEXANDRE B, FRANK R, WAGNER J N, et al. Using NBOHC Fluorescence to Predict Multi-pulse Laser-induced Damage in Fused Silica[J]. Optics Communications, 2017, 402: 535-539.
- [2] 戴一帆, 钟曜宇, 石峰, 等. 强光光学元件加工技术发展[J]. 中国机械工程, 2020, 31(23): 2788-2797.
DAI Yi-fan, ZHONG Yao-yu, SHI Feng, et al. Development of High-light Optical Element Processing Technology[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(23): 2788-2797.
- [3] 王占奎, 朱永伟, 李信路, 等. 固结磨料研磨镁铝尖晶石的平均切深和亚表面损伤行为[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(3): 402-409.
WANG Zhan-kui, ZHU Yong-wei, LI Xin-lu, et al. Average Cutting Depth and Subsurface Damage of Spinel Induced by Lapping with Fixed Abrasive Pad[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(3): 402-409.
- [4] 何祥, 谢磊, 赵恒, 等. 熔石英元件抛光表面的亚表面损伤研究[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(10): 39-43.
HE Xiang, XIE Lei, ZHAO Heng, et al. Characterization of Polishing Induced Subsurface Damages in Fused Silica Optics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(10): 39-43.
- [5] 张羽斐, 王子琨, 胡伟栋, 等. 固结磨料研磨硫化锌的亚表面损伤预测分析[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 1-9.
ZHANG Yu-fei, WANG Zi-kun, HU Wei-dong, et al. Prediction Analysis of Subsurface Damage of Work-part ZnS in Fixed Abrasive Lapping[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(5): 1-9.
- [6] 王华东, 蒋伟峰, 彭光健, 等. 基于化学蚀刻检测光学玻璃亚表面损伤深度[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 326-333.
WANG Hua-dong, JIANG Wei-feng, PENG Guang-jian, et al. Detection of Subsurface Damage Depth of Optical Glass via Chemical Etching Technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(11): 326-333.
- [7] FEIT M D, RUBENCHIK A M. Influence of Subsurface Cracks on Laser-induced Surface Damage[C]// XXXV Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers: Boulder Damage Symposium. Washington D.C: International Society for Optics and Photonics, 2004: 264-272.
- [8] 曹厚华, 余江. 光学晶体精密加工亚表面损伤缺陷的检测方法[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 313(12): 155-157.

- CAO Hou-hua, YU Jiang. Detection of Subsurface Damage Defects in Precision Machining of Optical Crystals[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2022, 313(12): 155-157.
- [9] 李军, 王健杰, 郭太煜, 等. 侧面逐层抛光腐蚀法研究亚表面损伤[J]. 表面技术, 2019, 48(8): 309-315.
LI Jun, WANG Jian-jie, GUO Tai-yu, et al. Subsurface Damage Studied by Side Layer-by-layer Polishing and Etching Method[J]. Surface Technology, 2019, 48(8): 309-315.
- [10] 王洪祥, 李成福, 朱本温, 等. 光学元件亚表面缺陷的损伤性检测方法[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(12): 129-133.
WANG Hong-xiang, LI Cheng-fu, ZHU Ben-wen, et al. Destructive Methods for Detecting Subsurface Defects of Fused Silica Optics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(12): 129-133.
- [11] 陈明君, 王会尧, 程健, 等. 熔石英光学元件加工亚表面缺陷检测及抑制技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(20): 1-19.
CHEN Ming-jun, WANG Hui-yao, CHENG Jian, et al. Progress in Detection and Suppression Techniques for Processing-induced Sub-surface Defects of Fused Silica Optical Elements[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(20): 1-19.
- [12] 周静. 基于分子动力学的旋转磨削硅片残余应力分布研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
ZHOU Jing. Residual Stress Distribution of Silicon Wafer Machined by Rotational Grinding Based on Molecular Dynamics[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.
- [13] SUN J L, QIN F, REN C, et al. Residual Stress Measurement of the Ground Wafer by Stepwise Corrosion and Raman Spectroscopy[C]// 16th International Conference on Electronic Packaging Technology(IEEE). Changsha: IEEE, 2015: 891-894.
- [14] 邓亚, 张宇民, 周玉锋, 等. X 射线衍射法测量碳化硅单晶的残余应力[J]. 力学学报, 2022, 54(1): 147-153.
DENG Ya, ZHANG Yu-min, Zhou Yu-feng, et al. Measurement of Residual Stress in Single-crystal SiC by X-ray Diffraction Method[J]. Chinese Journal of Mechanics, 2022, 54(1): 147-153.
- [15] WEBER D, KIRSCH B, CHIGHIZOLA C R, et al. Analysis of Machining-induced Residual Stresses of Milled Aluminum Workpieces, Their Repeatability, and Their Resulting Distortion[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021(1-4): 1-22.
- [16] Köhler J, GROVE T, MAI O, et al. Residual Stresses in Milled Titanium Parts[J]. Procedia CIRP, 2012, 2(1): 79-82.
- [17] 李运涛. 单晶硅超精密切削裂纹扩展过程离散元仿真[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
LI Yun-tao. Discrete Element Simulation of Crack Propagation in Ultra Precision Cutting of Single Crystal Silicon [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [18] LIU H J, ZHOU J, HAN J, et al. Evaluation of Polishing-induced Subsurface Damage Based on Residual Stress Distribution via Measured Global Surface Deformation for Thinned Silicon Wafers[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2021, 9(3): 127-135.
- [19] TORRANO I, BARBERO O, KORTABARRIA A, et al. Prediction of Residual Stresses in Turning of Inconel 718[J]. Advanced Materials Research, 2011, 223: 421-430.
- [20] 尹韶辉, 靳松, 朱科军, 等. 非球面玻璃透镜模压成型的有限元应力分析[J]. 光电工程, 2010, 37(10): 111-115.
YIN Shao-hui, Jin Song, Zhu Ke-jun, et al. Stress Analysis of Compression Molding of Aspherical Glass Lenses Using Finite Element Method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(10): 111-115.
- [21] MALKIN S. Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives[M]. New York: Industrial Press Inc, 1989.
- [22] ZHANG Y Z, FANG C F, HUANG G Q, et al. Modeling and Simulation of the Distribution of Undeformed Chip Thicknesses in Surface Grinding[J]. International Journal of Machine Tool and Manufacture, 2018, 127: 14-27.
- [23] WU C J, LI B Z, YANG J G, et al. Prediction of Grinding Force for Brittle Materials Considering Co-existing of Ductility and Brittleness[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(5-8): 1967-1975.
- [24] 朱永伟, 李信路, 王占奎, 等. 光学硬脆材料固结磨料研磨中的亚表面损伤预测[J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 367-374.
ZHU Yong-wei, LI Xin-lu, WANG Zhan-kui, et al. Subsurface Damage Prediction for Optical Hard-brittle Material in Fixed Abrasive Lapping[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(2): 367-374.
- [25] GAO P, LI J, ZHU Y W, et al. Study on Subsurface Damage After Fixed-abrasive Lapping with Different Particle Size[J]. Solid State Phenom, 2011, 175: 112-115.
- [26] 张雨斐. 固结磨料研磨硫化锌亚表面损伤的评价与预测[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
ZHANG Yu-fei. Evaluation and Prediction of Subsurface Damage of Zinc Sulfide Lapped with Fixed Abrasive Pad[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.

责任编辑: 蓝英侨