DOI: 10.3901/JME.2019.05.186

石英玻璃超精密磨削加工的表面完整性研究*

高 尚¹ 耿宗超¹ 吴跃勤² 王紫光¹ 康仁科¹

(1. 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116024;

2. 昆士兰大学机械与采矿工程学院 布里斯班 QLD4072 澳大利亚)

摘要: 为了实现石英玻璃的高效低损伤超精密磨削加工, 研究不同粒度金刚石砂轮磨削石英玻璃的表面和亚表面质量, 建立表面粗糙度与亚表面损伤深度之间的关系模型。通过石英玻璃磨削试验研究 400#、1 500#、2 000#和 5 000#金刚石砂轮磨削石英玻璃的表面微观形貌、表面粗糙度及其亚表面损伤深度, 分析相应的材料去除方式; 基于压痕断裂力学理论分析脆性域磨削石英玻璃时工件表面微观形貌和亚表面微裂纹的形成机理, 建立表面粗糙度 PV 值和亚表面损伤深度 SSD 之间的定量关系。研究结果表明: 随着砂轮粒度的减小, 石英玻璃磨削表面的凹坑、微裂纹、深划痕等缺陷逐渐减少, 表面粗糙度 R_a 和 PV 以及亚表面损伤深度 SSD 均随之明显减小, 从 400#砂轮磨削表面的 R_a 274.0 nm、 PV 5.35 μm 和 SSD 5.73 μm 降低至 5 000#砂轮磨削表面的 R_a 1.4 nm、 PV 0.02 μm 和 SSD 0.004 μm 。500#和 1 500#砂轮磨削表面的材料去除方式为脆性断裂去除, 2 000#砂轮磨削表面的材料去除方式同时包括脆性断裂去除和塑性流动去除, 但以塑性流动去除为主, 5 000#砂轮磨削表面的材料去除方式为塑性流动去除; 脆性域磨削石英玻璃的表面粗糙度 PV 与亚表面损伤深度 SSD 之间满足 $SSD=(0.627\sim 1.356) PV^{4/3}$ 的数学关系。

关键词: 石英玻璃; 磨削; 表面粗糙度; 亚表面损伤; 材料去除机理

中图分类号: TH706

Surface Integrity of Quartz Glass Induced by Ultra-precision Grinding

GAO Shang¹ GENG Zongchao¹ WU Yueqin² WANG Ziguang¹ KANG Renke¹

(1. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2. School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland, Brisbane QLD4072, Australia)

Abstract: In order to achieve high efficiency and low damage grinding for quartz glass, surface and subsurface qualities of ground quartz glasses using diamond wheels of various grit sizes are systematically investigated, and a mathematic relationship between the surface roughness and the subsurface damage depth is established. Grinding performance and surface integrity of quartz glass under diamond grinding using grit size of 400#, 1 500 #, 2 000# and 5 000#, respectively, are characterized in terms of surface topography, surface roughness and subsurface defect depth. The material removal mode of quartz glass for such diamond wheels is presented as well. The mechanism of surface morphology and subsurface microcrack produced in brittle removal mode is analyzed using indentation fracture mechanics, and the relationship between roughness value PV and subsurface damage depth SSD is established. The experiment results showed that with the decrease in wheel grit size, the quality of defects including pits, microcracks and deep scratches generated on the surface decreased, resulting in the decreased surface roughness and subsurface damage depth from R_a 274.0 nm, PV 5.35 μm and SSD 5.73 μm for 400# wheel to R_a 1.4 nm, PV 0.02 μm and SSD 0.004 μm for 5 000# wheel. The dominant removal mode in grinding quartz glass for 400# and 1 500# wheel is brittle fracture, that for 2 000# wheel included both brittle fracture and ductile cutting but ductile removal is more prevalent, and that for 5 000# wheel is ductile cutting removal. In the brittle mode grinding process, the relationship between subsurface roughness value PV and subsurface damage depth SSD is in accord with the formula $SSD=(0.627\sim 1.356) PV^{4/3}$.

Key words: quartz glass; grinding; surface roughness; subsurface damage; material removal mechanism

* 国家自然科学基金青年(51505063)、国家自然科学基金创新研究群体(51621064)、国家自然科学基金重点(51735004)、国家科技重大专项(02专项)(2014ZX02504001)、国家重点研发计划(2016YFB1102205)和国家自然科学基金面上(51575083)资助项目。20180309 收到初稿, 20180924 收到修改稿

0 前言

石英玻璃是由二氧化硅单一成分构成的特种玻璃，具有化学性能稳定、透光性好、耐高温、耐辐射和抗激光损伤能力强等特点^[1]，被广泛用于半导体、光通讯、太阳能、航空航天和军事设备等领域光学元器件的制造^[2-4]。随着元器件制造水平的不断发展，对石英玻璃的表面/亚表面质量要求也越来越高，但石英玻璃的硬度高、脆性大，属于典型的硬脆难加工材料，如何实现石英玻璃的高效率高质量加工成为先进制造技术领域的重要研究方向^[5]。在石英玻璃高精度高质量表面的超精密加工中，超精密磨削技术由于其磨粒利用率高、加工成本低、加工精度高等优点成为石英玻璃的重要加工方法之一^[6-8]。然而，超精密磨削是利用硬质磨粒的微切削作用去除工件表面的材料，磨削过程中的力、热作用不可避免地会在工件的表面/亚表面形成损伤，进而影响器件的使用性能，必须进一步使用抛光工艺去除磨削产生的损伤层，磨削工件的表面/亚表面质量极大地影响后续抛光工艺的加工效率^[9-12]。因此，研究石英玻璃超精密磨削的表面完整性对于分析其材料去除机理、优化磨削工艺和确定后续抛光工艺的材料去除量都具有重要的指导意义。

为了实现石英玻璃的高效低损伤超精密磨削加工，国内外学者针对石英玻璃的超精密磨削工艺及其相关技术进行了研究。赵清亮等^[13]采用粗粒度电镀金刚石砂轮，结合特殊的精密修整技术，实现了粗磨粒金刚石砂轮对石英玻璃的低损伤磨削，表面粗糙度 R_a 达到 19.6 nm，但表面/亚表面仍存在脆性破碎去除引起的凹坑、微裂纹等损伤；王伟等^[6]采用陶瓷结合剂 CBN 砂轮干磨削石英玻璃，利用磨削过程中的磨削热改善石英玻璃的力学性能，获得表面粗糙度 R_a 为 70 nm 的磨削表面，但干磨时砂轮的自锐性差、磨损严重；SURATWALA 等^[14-15]和 MILLER 等^[16]等对比了磨削和研磨石英玻璃的表面微观形貌、表面损伤特征、亚表面微裂纹深度及其分布特征，但该研究只针对于粗磨粒脆性域加工的石英玻璃表面，对于细磨粒延性域加工的表面/亚表面特性未进行研究；LI 等^[17]研究了磨削参数对石英玻璃亚表面损伤深度的影响以及亚表面微裂纹密度随深度的变化规律，指出砂轮粒度是磨削参数中影响亚表面质量的最主要因素，但仅对石英玻璃亚表面的损伤特性进行了分析，对其表面特性及其相应的材料去除机理未提及。鉴于上述情况，有必要进一步全面深入地研究石英玻璃超精密磨削表面和亚表面特

性。为此，本文通过磨削试验研究了不同粒度金刚石砂轮磨削石英玻璃的表面粗糙度、表面缺陷和微观形貌、亚表面损伤特性及其相应的材料去除机理，并建立了亚表面损伤预测模型。

1 试验研究方案

1.1 磨削试验

磨削试验在基于工件旋转磨削原理的 VG401MKII 型超精密磨床(Okamoto, 日本)上进行，如图 1 所示，工件通过真空吸盘固定在工作台上，磨削过程中，砂轮和工件分别绕各自的轴线旋转，同时砂轮沿轴向匀速进给。加工的试件为 $\Phi 100 \times 5$ mm 的 ZS1 型高纯度石英玻璃基片，其弹性模量 $E=72.5$ GPa，断裂韧性 $K_{IC}=0.633$ MPa·m^{1/2}，硬度 $H=9.48$ GPa。使用的砂轮为 400#、1 500#、2 000# 和 5 000#陶瓷结合剂金刚石砂轮。磨削过程中，采用去离子水作为冷却液。由于工件旋转法磨削时，随着砂轮转速的增大、砂轮轴向进给速度和工件转速的减小，磨削工件的表面/亚表面质量越好^[18-19]，因此，为了获得最好的石英玻璃磨削表面/亚表面质量，试验采用的砂轮转速和工件转速分别为各自轴能够稳定工作的最高转速和最低转速，砂轮轴向进给速度为砂轮能够稳定切削工件的最小进给速度，具体加工参数如表 1 所示。

图 1 磨削原理与试验装置

表 1 磨削试验参数

磨削参数	数值
砂轮转速 $n_s/(r/min)$	2 400
工件转速 $n_w/(r/min)$	120
砂轮进给速度 $f/(\mu m/min)$	3
冷却液流量 $q_v/(L/min)$	7

1.2 表面/亚表面质量检测

石英玻璃样件完成磨削后，采用 VHX-600E 超景深光学显微镜(KEYENCE, 日本)和 Q45 型扫描电镜(FEI, 美国)观测石英玻璃的表面微观缺陷，使用 Newview5022 型白光干涉 3D 表面轮廓仪(ZYGO, 美国)检测石英玻璃的表面微观形貌和表面粗糙度。

磨削石英玻璃的亚表面损伤主要采用角度截面显微观测法检测,原理如图2所示。首先用线切割机将磨削的石英玻璃基片切割成8 mm×12 mm的样件,并切割同样大小的抛光硅片作陪片,将陪片的抛光表面粘在石英玻璃样件的磨削表面上;然后,将粘好的样件固定在角度夹具上,使用研磨/抛光机对其进行角度截面的研磨和抛光加工,本试验中加工截面的角度为5.7°,亚表面损伤放大倍数为10倍;最后,使用浓度20%的氢氟酸溶液对角度截面进行腐蚀,使样品亚表面的微裂纹显露出来,并借助于超景深显微镜对其进行观察和测量。此外,对于角度截面显微观测法难以观测到的具有极小亚表面损伤的磨削样品,本文将进一步借助于透射电子显微镜观测其亚表面损伤。

图2 角度截面显微观测法原理图

1.3 亚表面损伤预测模型

磨削过程中砂轮表面磨粒切削工件材料的过程可以看成是大量尖锐的压头对工件表面的划擦过程。根据压痕断裂力学的理论可知,当尖锐压头以较大的载荷印压脆性材料的表面时,会在其亚表面产生中位裂纹(也称为径向裂纹)和横向裂纹^[20-21],如图3所示。中位裂纹产生于压头印压脆性材料的加载阶段,并随着压头载荷的增加向材料基体延伸,造成亚表面损伤,因此中位裂纹扩展的深度对应的就是亚表面损伤的深度。横向裂纹一般出现在卸载阶段,产生于弹塑性变形区底部,沿着近乎平行于材料表面的方向延伸,当横向裂纹延伸至工件表面或与其它裂纹相交时,使工件表面材料以崩碎的脆性断裂方式被去除,并在工件表面留下不同程度的凹坑,形成表面微观轮廓,因此横向裂纹的深度对

图3 尖锐压头在工件亚表面形成的中位和横向裂纹

应的就是工件表面微观轮廓的最大高度,即表面粗糙度PV值^[9,22]。根据上述分析可知,如果能够找到中位裂纹扩展深度与横向裂纹深度之间的数学关系,就能够建立起亚表面裂纹深度与表面粗糙度PV之间的关系。

根据Lambropoulos的印压断裂力学理论和理想塑性材料孔洞扩张的Hill模型,中位裂纹深度c和横向裂纹深度b的计算公式为^[23-24]

$$c = \alpha_k^{2/3} \left(\frac{E}{H} \right)^{2(1-m)/3} (\cot \psi)^{4/9} \left(\frac{P}{K_c} \right)^{2/3} \quad (1)$$

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

式中,P为压头载荷,ψ为压头锥度角,E、H、K_c分别为工件材料的弹性模量、硬度和断裂韧性,m为介于1/3~1/2之间的量纲一常数,α_k为与m有关的系数,其大小为

$$\alpha_k = 0.27 + 0.09 \left(m - \frac{1}{3} \right) \quad (3)$$

联立上述三式,消去压头载荷P,即可得到中位裂纹深度c和横向裂纹深度b之间的关系式,同时也是亚表面裂纹深度SSD与表面粗糙度PV之间的关系式,具体如下所示

$$\frac{SSD}{PV^{4/3}} = \frac{c}{b^{4/3}} = \frac{3.08 \alpha_k^{2/3} H^{2m} E^{2/3-2m}}{K_c^{2/3} (\sin \psi)^{2/3}} \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 石英玻璃磨削加工的表面特性

图4采用超景深光学显微镜观测的不同粒度金刚石砂轮磨削石英玻璃的表面。从图4可以明显地看出,随着砂轮粒度的减小,石英玻璃磨削表面的缺陷也随之得到改善,400#金刚石砂轮磨削表面可以观测到大量的破碎坑和深划痕,1500#砂轮磨削表面的破碎坑变小,划痕也相应地变浅变细,2000#砂轮磨削表面开始变得光滑,但仍然能够观测到较小的破碎坑和磨痕,5000#砂轮磨削表面变得非常光滑,已看不到类似于400#、1500#和2000#砂轮磨削表面上的破碎坑,只能观测到非常细的磨痕。

图5和图6分别为采用白光干涉三维表面轮廓仪检测的不同粒度金刚石砂轮磨削石英玻璃表面的微观形貌及其表面粗糙度值。从图5a和5b所示的石英玻璃磨削表面的微观形貌也可以看出,400#和1500#金刚石砂轮磨削表面的微观形貌主要是由破碎坑构成,导致整个表面微观形貌的PV值非常大,分别达到了5.35 μm和3.93 μm,对应的表面粗糙度

图 4 不同粒度金刚石砂轮磨削石英玻璃表面的光学显微镜观测图像

R_a 值也非常大, 分别为 274.0 nm 和 69.6 nm, 如图 6 所示。然而, 从图 5c 和 5d 可以明显看出, 2 000#和 5 000#砂轮磨削表面的微观形貌主要由磨痕构成, 整个表面微观形貌的 PV 值非常小, 分别仅为 0.04 μm 和 0.02 μm , 对应的表面粗糙度 R_a 值也非常低, 分别

达到了 3.4 nm 和 1.4 nm, 远好于 400#和 1 500#砂轮磨削表面, 但 2 000#砂轮磨削表面仍然可以观测到由于较小破碎坑的存在而形成的凹凸不平的形貌特点。

图 5 不同粒度金刚石砂轮磨削石英玻璃表面的微观形貌

图 6 不同粒度金刚石砂轮磨削石英玻璃的表面粗糙度

由于光学显微镜的最大放大倍数有限,难以观测到石英玻璃磨削表面缺陷的微观细节,为了仔细观测不同粒度砂轮磨削石英玻璃产生的表面损伤特征,进而分析不同粒度砂轮磨削石英玻璃时的材料去除方式,进一步采用扫描电子显微镜观测不同粒度砂轮磨削的石英玻璃表面,观测结果如图7所示,放大倍数为10 000倍。从图中可以明显看出,400#和1 500#金刚石砂轮磨削表面存在大量的破碎、凹坑、微裂纹、划痕等缺陷,表明工件表面材料主要是以脆性断裂的方式被去除。2 000#砂轮磨削表面主要以砂轮磨粒在工件表面的划擦作用而形成的磨痕为主,并伴有少量微小的破碎和凹坑,表明工件表面材料的去除方式同时包括脆性断裂去除和塑性域去除,但以塑性域去除方式为主。5 000#金刚石砂轮磨削石英玻璃的表面非常光滑,已经完全观测

图7 不同粒度金刚石砂轮磨削石英玻璃表面的SEM图像

不到类似于400#、1 500#和2 000#砂轮磨削时,由于脆性断裂去除方式而在工件表面产生的破碎、凹坑、微裂纹等缺陷,表明工件表面材料是完全以塑性流动的方式被去除的。

2.2 石英玻璃磨削加工的亚表面损伤

图8为采用超景深光学显微镜观测的不同粒度金刚石砂轮磨削石英玻璃亚表面的角度截面图。从图中可以看出,与表面质量的变化规律相同,随着磨粒粒径的减小,磨削石英玻璃的亚表面损伤深度也随之明显地减小,400#、1 500#和2 000#金刚石砂轮磨削石英玻璃的亚表面损伤深度分别为5.73 μm、3.64 μm和0.98 μm,如图8a、8b和8c所示。5 000#砂轮磨削石英玻璃的亚表面损伤最小,以至于本试验中采用的角度截面显微观测法已经不能够观测到5 000#砂轮磨削石英玻璃的亚表面损伤情况,如图8d所示。需要注意的是,试验中采用超景深光学显微镜观测1 500#、2 000#和5 000#砂轮磨削石英玻璃的亚表面损伤时,显微镜的放大倍数为2 000倍,而观测400#砂轮磨削石英玻璃的亚表面损伤时,显微镜的放大倍数为1 000倍。这是由于400#砂轮磨削石英玻璃的亚表面损伤深度过大,当显微镜的放大倍数为2 000倍时,观测的视场范围过小,难以观测到亚表面损伤微裂纹的最大深度,因此,为了能够在视场范围内观测到整个亚表面微裂纹,显微镜的放大倍数选择1 000倍。

从图8还可以看出,500#和1 500#砂轮磨削石英玻璃的亚表面损伤形式主要为微裂纹,2 000#砂轮磨削石英玻璃的亚表面损伤形式主要为微腐蚀坑,进一步证明了500#和1 500#砂轮磨削石英玻璃时主要为脆性断裂方式去除表面材料,2 000#砂轮磨削时主要以塑性域方式去除材料。此外,500#和1 500#砂轮磨削石英玻璃表面不同位置下方的微裂纹深度也不相同,这主要是由砂轮表面磨粒分布的随机性、磨粒出刃高度的差异性以及工件表面不同

(a) 400#

(b) 1 500#

(c) 2 000#

位置微观形貌的不同造成的, 这些因素会使砂轮表面参与切削的磨粒在磨削过程中承受的磨削力不同, 承受较大载荷的磨粒在去除石英玻璃表面材料时, 产生的亚表面微裂纹深度也越大, 反之则越小,

(a) 400#

(b) 1 500#

(c) 2 000#

(d) 5 000#

图 8 不同粒度金刚石砂轮磨削石英玻璃亚表面的角度截面观测图($SSD=L \times \sin 5.7^\circ$)

进而导致石英玻璃磨削表面不同位置处亚表面裂纹深度的不同, 砂轮粒度越大, 这种现象越明显, 如图 8a 所示。

由于 5 000#金刚石砂轮磨削石英玻璃的亚表面损伤太小, 采用角度截面显微观测法观测不到, 如图 8d 所示, 因此, 为了检测 5 000#砂轮磨削石英玻璃的亚表面损伤特征及其深度, 本文进一步采用截面 TEM 法检测其亚表面损伤情况, 检测结果如图 9 所示。从图中可以明显看出, 5 000#砂轮磨削石英玻璃的亚表面没有微裂纹产生, 进一步证明了 5 000#砂轮磨削石英玻璃的材料去除方式为塑性域去除。然而, 在靠近石英玻璃磨削表面区域仍然可以观测到一层厚度约为 40 nm, 与下方的石英玻璃基体材料微观结构明显不同的塑性变形层。

图 9 5 000#金刚石砂轮磨削石英玻璃的截面 TEM 图像

2.3 材料去除机理分析

石英玻璃是典型的脆性材料, 其磨削加工的材料去除方式包括脆性断裂去除和塑性流动去除两种, 主要与砂轮表面参与切削的有效磨粒的切削深度有关^[25-26]。当磨粒切削深度较大时, 工件表面材料主要以脆性断裂的方式被去除, 加工表面损伤严重, 会形成破碎、凹坑、微裂纹、划痕等缺陷, 亚表面也会产生一定深度的微裂纹; 当砂轮表面磨粒的切削深度均小于某一临界切削深度时, 工件表面

材料会发生脆—塑性转变,以塑性流动的方式被去除,获得光滑的塑性域加工表面,表面/亚表面均没有微裂纹产生^[27]。根据图 4~8 所示的不同粒度金刚石砂轮磨削石英玻璃的表面缺陷、表面微观形貌以及亚表面损伤的特征可推断,400#和 1 500#金刚石砂轮磨削石英玻璃的材料去除方式为脆性域去除,2 000#金刚石砂轮磨削的材料去除方式同时包括脆性域去除和塑性域去除,但主要为塑性域去除,5 000#金刚石砂轮磨削石英玻璃的材料去除方式为塑性域去除,但仅根据石英玻璃的表面/亚表面特性分析不同粒度砂轮磨削时的材料去除方式还不完全准确,为了揭示磨削石英玻璃时的材料去除方式,还需要进一步计算不同粒度金刚石砂轮磨削时的磨粒切削深度,并与石英玻璃塑性域磨削的临界切削深度相比较。

对于本试验中采用的基于工件旋转磨削原理的加工方式,砂轮表面参与切削的有效磨粒的切削深度 d_g 为^[18-19]

$$d_g = 3.71R \left(\frac{f r_w n_w}{L W V_g n_s} \right)^{0.4} \quad (5)$$

式中, R 为砂轮磨粒半径; f 为砂轮进给速度; r_w 为工件半径; n_w 为工件转速; n_s 为砂轮转速; L 为砂轮周长; W 为砂轮齿宽; V_g 为磨粒含量。对于本试验中采用的 400#、1 500#、2 000#和 5 000#金刚石砂轮,其对应的磨粒平均半径 R 分别为 20 μm 、7 μm 、3 μm 和 1 μm ,磨粒含量 V_g 为 0.25,砂轮周长 L 和齿宽分别为 1100 mm 和 3 mm,其他磨削参数的具体值如表 1 所示。

根据 BIFANO 等建立的脆性材料塑性域磨削的临界切削深度经典模型,可以得到石英玻璃发生脆—塑性转变的临界切削深度 h_c ,其计算公式为^[25]

$$h_c = 0.15 \left(\frac{E}{H} \right) \left(\frac{K_c}{H} \right)^2 \quad (6)$$

式中, E 、 H 、 K_c 分别为被加工材料的弹性模量、硬度和断裂韧性,对于本试验加工的石英玻璃,其 E 、 H 、 K_c 分别为 72.5 GPa、9.48 GPa 和 0.633 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

根据上述式(5)和式(6)的计算可知,400#、1 500#、2 000#和 5 000#金刚石砂轮磨削石英玻璃的磨粒切削深度 d_g 分别为 31.8 nm、11.1 nm、4.8 nm 和 1.6 nm,石英玻璃发生脆—塑性转变的临界切削深度 h_c 为 5.1 nm。对比不同粒度金刚石砂轮的磨粒切削深度和石英玻璃塑性域磨削的临界切削深度可知,400#和 1 500#砂轮的磨粒切削深度 d_g 均远大于

石英玻璃的临界切削深度 h_c ,则这两个砂轮磨削石英玻璃的材料去除方式应为脆性断裂去除,这与图 4~图 8 所示的 400#和 1 500#砂轮磨削石英玻璃的表面/亚表面损伤特性相一致。2 000#砂轮的磨粒切削深度 d_g 与石英玻璃脆—塑性转变的临界切削深度 h_c 非常接近,仅略小于 h_c ,但由于式(5)所示的磨粒切削深度 d_g 是砂轮表面参与切削的所有磨粒的平均切削深度^[16],因此 2 000#砂轮表面会有部分磨粒的实际切削深度大于石英玻璃塑性域加工的临界切削深度 h_c ,导致 2 000#砂轮磨削石英玻璃时,表面材料虽然以塑性域去除为主,但仍会少部分的脆性域去除,形成图 4~8 所示的 2 000#砂轮磨削石英玻璃的表面/亚表面损伤特征。5 000#砂轮的磨粒切削深度 d_g 远小于石英玻璃的临界切削深度 h_c ,因此其磨削石英玻璃时的材料去除方式为塑性域去除,能够加工出表面/亚表面无微裂纹的光滑磨削表面,如图 4~8 所示。

2.4 亚表面损伤深度与表面粗糙度的定量关系

根据 2.3 节 Lambropoulos 的印压断裂力学理论可知^[23-24],石英玻璃在脆性域材料去除方式下磨削时,其亚表面微裂纹深度 SSD 和表面粗糙度 PV 之间存在式(4)所示的数学关系,其中,式(4)中的 Ψ 为砂轮磨粒的锥度角,其大小一般介于 $45^\circ \sim 90^\circ$ 之间^[28], m 为介于 $1/3 \sim 1/2$ 之间的无量纲一常数, α_k 是与 m 有关的系数,其大小为 $0.27+0.09(m-1/3)^{[7, 25]}$ 。根据式(4)可知, SSD 与 $PV^{4/3}$ 的比例系数随着 Ψ 和 m 的增大而减小,当 m 和 Ψ 分别取 $1/2$ 和 90° 时, SSD 与 $PV^{4/3}$ 的比例系数最小,当 m 和 Ψ 分别取 $1/3$ 和 45° 时, SSD 与 $PV^{4/3}$ 的比例系数最大。根据上述系数的选取和石英玻璃的材料特性,利用式(4)就能够得到石英玻璃脆性域磨削亚表面微裂纹深度 SSD 的预测模型为

$$SSD = (0.627 \sim 1.356) PV^{4/3} \quad (7)$$

根据第 3.3 节可知,500#和 1 500#金刚石砂轮磨削石英玻璃的材料去除方式为脆性断裂去除,符合式(7)所示的亚表面损伤预测模型的应用条件。为了验证预测模型是否正确,采用 400#和 1 500#砂轮分别以 3 $\mu\text{m}/\text{min}$ 、10 $\mu\text{m}/\text{min}$ 和 20 $\mu\text{m}/\text{min}$ 的进给速度磨削石英玻璃,其他磨削参数如表 1 所示,然后检测石英玻璃磨削表面的粗糙度和亚表面损伤深度,结果如表 2 所示。将检测结果和亚表面损伤深度预测模型式(7)同时绘制在图 9 中,可以看出,检测结果均落在理论模型预测范围内,进一步对测量结果进行曲线拟合,得到亚表面损伤深度亚表面微裂纹深度和表面粗糙度之间的数学关系为

$SSD=0.683 PV^{4/3}$, 表明理论模型是正确性的。此外, 从图 9 中还可以看出, 根据试验结果得到的拟合曲线靠近理论预测模型式(7)的下限曲线, 这可能是采用角度截面显微镜观测法检测石英玻璃磨削亚表面损伤微裂纹深度时, 由于检测方法的局限性, 仅能够测量极小磨削区域的亚表面损伤深度, 而不是整个磨削区域的亚表面损伤深度最大值, 从而导致拟合曲线的系数偏小。

表 2 磨削石英玻璃的表面粗糙度和亚表面损伤深度

砂轮 粒度	砂轮进给速度 $f/(\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	表面粗糙度 $PV/\mu\text{m}$	亚表面损伤深度 $SSD/\mu\text{m}$
400#	3	5.3	5.73
	10	7.9	9.80
	20	9.4	13.43
1 500#	3	3.9	3.74
	10	4.9	5.81
	20	6.2	8.82

图 9 石英玻璃磨削亚表面损伤深度和表面粗糙度的关系

3 结论

(1) 随着磨粒粒径的减小, 石英玻璃磨削表面/亚表面质量随之变好, 400#、1 500#、2 000#和 5 000#砂轮磨削石英玻璃的表面粗糙度 R_a 分别为 274.0 nm、69.6 nm、3.4 nm 和 1.4 nm, 亚表面损伤深度分别为 5.73 μm 、3.64 μm 、0.98 μm 和 0.004 μm 。

(2) 400#和 1 500#砂轮磨削石英玻璃的材料去除方式为脆性断裂去除, 2 000#砂轮磨削石英玻璃的材料去除方式同时包括脆性断裂去除和塑性流动去除, 但以塑性流动去除为主, 5 000#砂轮磨削石英玻璃的材料去除方式为塑性流动去除。

(3) 脆性域磨削石英玻璃的表面损伤形式为脆性崩碎产生的凹坑、微裂纹、深磨痕, 亚表面损伤形式为微裂纹; 塑性域磨削石英玻璃的表面损伤形

式为微磨痕, 亚表面损伤形式为靠近加工表面的材料的塑性变形。

(4) 脆性域磨削石英玻璃的表面粗糙度 PV 和亚表面损伤深度 SSD 之间满足 $SSD=(0.627\sim1.356)PV^{4/3}$ 的数学关系, 在本文 400#和 1 500#砂轮磨削试验中, $SSD=0.638 PV^{4/3}$ 。

参 考 文 献

- [1] 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 Xiaoguang, ZHAI Changheng, ZHANG Liang, et al. Nano-processing performance of optical glass[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(11): 2959-2966.
- [2] 仇中军, 周立波, 房丰洲, 等. 石英玻璃的化学机械磨削加工[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1554-1561.
QIU Zhongjun, ZHOU Libo, FANG Fengzhou, et al. Chemical mechanical grinding for quartz glass[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(7): 1554-1561.
- [3] 仇中军, 伊萍, 卢翠, 等. 石英玻璃表面改性后的力学特性分析[J]. 材料科学与工程学报, 2013, 31(1): 6-10.
QIU Zhongjun, YI Ping, LU Cui, et al. Mechanical property analysis of modified quartz glass[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2013, 31(1): 6-10.
- [4] SUMITOMO Taro, HUANG Han, ZHOU Libo. Deformation and material removal in a nanoscale multi-layer thin film solar panel using nanoscratch[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(3): 182-189.
- [5] 袁巨龙, 王志伟, 文东辉, 等. 超精密加工现状综述[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 35-48.
YUAN Julong, WANG Zhiwei, WEN Donghui, et al. Review of the current situation of ultra-precision machining[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(1): 35-48.
- [6] 王伟, 姚鹏, 王军, 等. 石英玻璃的热辅助高效塑性域干磨削[J]. 光学精密工程, 2016, 24(1): 83-93.
WANG Wei, YAO Peng, WANG Jun, et al. Heat-assisted high efficiency ductile dry grinding of fused silica[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(1): 83-93.
- [7] ZENG X, GAN Y X. A review of grinding technologies for glass machining[J]. International Journal of Abrasive Technology, 2011, 4(3): 223-239.
- [8] HUANG H, CHEN W K, YIN L, et al. Micro/meso ultra precision grinding of fibre optic connectors[J]. Precision Engineering, 2004, 28(1): 95-105.

- [9] LI S, WANG Z, WU Y. Relationship between subsurface damage and surface roughness of optical materials in grinding and lapping processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(1): 34-41.
- [10] LIN X H, ZHANG J B, TANG H H, et al. Analysis of surface errors and subsurface damage in flexible grinding of optical fused silica[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(1-4): 643-649.
- [11] ZHOU L, SHIINA T, QIU Z, et al. Research on chemo-mechanical grinding of large size quartz glass substrate[J]. Precision Engineering, 2009, 33(4): 499-504.
- [12] 高尚, 朱祥龙, 康仁科, 等. 微晶玻璃超精密磨削的表面/亚表面损伤及其材料去除机理研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(7): 180-188.
- GAO Shang, ZHU Xianglong, KANG Renke, et al. Surface/subsurface damage and material removal mechanism of glass-ceramics induced by ultra-precision grinding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 180-188.
- [13] 赵清亮, 赵玲玲, 王宇, 等. 电镀金刚石砂轮高效精密修整及熔融石英磨削试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 174-181.
- ZHAO Qinglinag, ZHAO Lingling, WANG Yu, et al. High efficient precision conditioning of the electroplated diamond wheel and grinding of fused silica glasses[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(23): 174-181.
- [14] SURATWALA T, WONG L, MILLER P, et al. Sub-surface mechanical damage distributions during grinding of fused silica[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2006, 352(52-54): 5601-5617.
- [15] SURATWALA T, STEELE R, FEIT M D, et al. Effect of rogue particles on the sub-surface damage of fused silica during grinding/polishing[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2008, 354(18): 2023-2037.
- [16] MILLER P E, SURATWALA T I, WONG L L, et al. The distribution of subsurface damage in fused silica[C]// Laser-Induced Damage in Optical Materials. Boulder, CO, United States. 2005. International Society for Optics and Photonics, 2006, 5991: 599101.
- [17] 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(6): 2066-2073.
- [18] 高尚, 王紫光, 康仁科, 等. 工件旋转法磨削硅片的磨粒切削深度模型[J]. 机械工程学报, 2016, 52(17): 86-93.
- GAO Shang, WANG Ziguang, KANG Renke, et al. Model of grain depth of cut in wafer rotation grinding method for silicon wafers[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(17): 86-93.
- [19] ZHOU L, TIAN Y B, HUANG H, et al. A study on the diamond grinding of ultra-thin silicon wafers[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2012, 226(1): 66-75.
- [20] MARSHALL D B, LAWN B R, EVANS A G. Elastic/Plastic indentation damage in ceramics: the lateral crack system[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1982, 65(11): 561-566.
- [21] MARSHALL D B. Geometrical effects in elastic/plastic indentation[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1984, 67(1): 57-60.
- [22] 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 Zhuo, WU Yulie, DAI Yifan, et al. Rapid detection of subsurface damage of optical materials in lapping process and its influence regularity[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(1): 16-21.
- [23] LAMBROPOULOS J C, JACOBS S D, RUCKMAN J. Material removal mechanisms from grinding to polishing[J]. Ceramics Transactions, 1999, 102: 113-128.
- [24] LAMBROPOULOS J C, LI Y, FUNKENBUSCH P D, et al. Noncontact estimate of grinding-induced subsurface damage[C]// Optical manufacturing and testing III. Denver, CO, United States: International Society for Optics and Photonics, 2005: 3782: 41-51.
- [25] 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.
- [26] JIANG C, XU J, WANG C. Experimental investigation of subsurface damage of optical glass in precision grinding using a brittle material removal fraction[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(1-4): 725-730.
- [27] JIANG C, XU J, WANG C. Experimental investigations of machining characteristics and removal mechanisms of advanced ceramics in high speed deep grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,

2003, 43(8): 811-823.

- [28] MAHMOUD T A , TAMAKI J , YAN J W.
Three-dimensional shape modeling of diamond abrasive
grains measured by a scanning laser microscope[J]. Key
Engineering Materials, 2003, 238: 131-136.

作者简介: 高尚, 男, 1982 年出生, 博士, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向为精密与超精密加工技术。

E-mail: gaoshang@dlut.edu.cn

耿宗超, 男, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为硬脆材料超精

密磨削技术。

E-mail: gengzongchao@outlook.com

吴跃勤, 男, 1980 年出生, 博士, 博士后研究员。主要研究方向为微纳结构和新型材料的特性表征。

E-mail: y.wu4@uq.edu.au

王紫光, 男, 1984 年出生, 博士研究生。主要研究方向为硬脆材料超精密磨削技术。

E-mail: wzg795073@foxmail.com

康仁科(通信作者), 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向为超精密加工与特种加工技术、难加工材料高效加工技术、半导体制造技术与设备。

E-mail: kangrk@dlut.edu.cn