旋转超声锯切光学玻璃的表面形成机理研究

沈剑云，朱旭，宋伟，陈剑彬，吴海融，吴贤

（华侨大学 机电及自动化学院，福建 厦门 361021）

摘 要：目的 探究不同物理性能光学玻璃锯切加工的表面形成机理，以及旋转超声锯切过程中径向振动冲击对其表面特性的影响。**方法** 首先通过显微压痕实验，对比 K9 与石英两种光学玻璃的硬度与断裂韧性，计算其各自的临界切削深度，并用 LS-DYNA 进行单颗磨粒切削的有限元仿真，分析不同物理性能光学玻璃的表面形成机理。然后对其进行旋转超声锯切（Rotary ultrasonic sawing RUS）和普通锯切（Conventional sawing CS）实验，分析径向超声振动对不同物理性能的光学玻璃表面特性的影响。**结果** K9、石英玻璃的断裂韧性分别为 5.232 MPa·$m^{0.5}$ 和 1.644 MPa·$m^{0.5}$，临界切削深度为 4.288 μm 和 0.012 μm。仿真结果表明，加工过程中，超声振动将单颗磨粒的最大切削厚度由 1.1767 μm 提高为 8.001 μm。对石英与 K9 玻璃进行锯切试验的结果显示，对于 K9 玻璃，旋转超声锯切后，沟槽底部粗糙度 P_a 与峰谷值 P_v 相对普通锯切大幅降低，但石英玻璃下降幅度不大。**结论** 超声振动增大了单颗磨粒切削厚度，使得 K9 玻璃的材料去除方式由部分塑性去除转变为完全脆性断裂去除，致使表面层产生微破碎，避免了传统加工过程中产生的大面积破碎和裂纹，进而提高表面粗糙度。石英玻璃因为临界切深小，在普通锯切中即为脆性去除，超声振动的影响效果稍小，对加工后表面粗糙度的影响不大。

关键词：旋转超声锯切；光学玻璃；表面形成机理；显微压痕；单颗磨粒切削

中图分类号：TB559 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2019)02-0281-09

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.02.040

Surface Formation Mechanism of Optical Glass by Rotary Ultrasonic Sawing

SHEN Jian-yun*, *ZHU Xu*, *SONG Wei*, *CHEN Jian-bin*, *WU Hai-rong*, *WU Xian

(School of Mechanical Engineering & Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the surface formation mechanism of optical glass with different physical properties by cutting process and the effects of radial ultrasonic impact on the surface characteristics during rotary ultrasonic sawing (RUS). Firstly, the hardness and fracture toughness of two optical glasses, K9 and quartz, were compared through micro-indentation experiment, and the respective critical cutting depth were calculated simultaneously. Secondly, the finite element simulation of single grain cutting was carried out by LS-DYNA to figure out surface formation mechanism of optical glass with different physical qualities. Then, the influence of radial ultrasonic vibration on the surface characteristics of optical glass with different physical properties was analyzed by RUS and conditional sawing (CS) experiments. The fracture toughness of K9 and quartz

收稿日期：2018-07-15；修订日期：2018-10-02

Received：2018-07-15；**Revised**：2018-10-02

基金项目：国家自然科学基金项目（51275181）；福建省高校产学合作科技重大项目（2018H6013）

Fund：Supported by the National Nature Science Foundation of China (51275181) and the Key Projects of Science and Technology Cooperation in Universities and Colleges of Fujian Province (2018H6013)

作者简介：沈剑云（1972—），男，博士，研究员，主要研究方向为硬脆性材料的高效精密加工。邮箱：68755226@qq.com

Biography：SHEN Jian-yun (1972—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision machining of hard and brittle materials. E-mail: 68755226@qq.com

glass was 5.232 MPa·m$^{0.5}$ and 1.644 MPa·m$^{0.5}$ respectively and the critical cutting depth was 4.288 μm and 0.012 μm respectively. The simulation results demonstrated that the maximum cutting depth of single grain was increased from 1.1767 μm to 8.001 μm by ultrasonic frequency impact in processing. From the cutting experiment results of quartz and K9 glass, for K9 glass, the roughness and peak-to-valley of the bottom of groove after RUS were significantly lower than that by conditional sawing, while for quartz glass, the decreasing was not obvious. Owing to the higher cutting depth of single grain by ultrasonic vibration, the material removal mode of K9 glass could be transformed into brittle fracture removal mode from partial plastic removal, which makes micro-chipping of surface. The surface roughness is improved by avoiding large area cracking and cracks in conditional machining. Attributed to the lower critical cutting depth of the quartz glass, the removal mode of the quartz glass in conventional sawing is brittle removal. Therefore, the effect of ultrasonic vibration is smaller, does not affect the surface roughness significantly.

KEY WORDS: rotary ultrasonic sawing; optical glass; surface formation mechanism; micro-indentation; single grain cutting

光学玻璃被用来制造光学仪器中的透镜、棱镜、反射镜及窗口等，由光学玻璃构成的部件是光学仪器中的关键性元件，在天文、航天航空、军事及医疗等高尖端领域，起着至关重要的作用[1-3]，而这些领域的特殊性对光学玻璃切割后的表面质量有更高的要求。光学玻璃作为典型的硬脆材料，使用传统锯切方法对其加工时，极易在加工过程中产生大量的崩边和裂纹，严重影响表面质量，从而直接导致其性能的降低[4]。目前使用旋转超声技术加工硬脆性材料已经被证实是一种高效可行的方法，可以有效地降低加工过程的切削力和切削热，减少刀具磨损，延长刀具使用寿命，提高加工效率，相比传统加工方法，具有巨大的优势[5]。但在以往的研究中，由于工具条件的限制，超声辅助振动往往通过施加在工件上来实现，这种方式虽能发挥超声辅助加工的优势，但在一定程度上限制了加工工件尺寸的大小，不利于推广到实际生产应用中[6-8]。针对这一问题，可以采用设计二级变幅杆的方式放大振幅，并改变振动模态，将原有的轴向超声频振动转变为径向振动，以实现锯片边旋转边振动的加工方式，即旋转超声锯切技术[9]。

本文选用 K9 玻璃和石英玻璃，通过维氏显微硬度计进行压痕实验，得到两种玻璃的硬度，并计算断裂韧性，引入临界切削深度与单颗磨粒最大切削厚度来分析两种玻璃的表面形成机理，并利用 LS-DYNA 模拟了单颗磨粒切削两种不同材料时的材料去除方式。之后进行旋转超声锯切光学玻璃的实验，通过对加工表面形貌与沟槽粗糙度的对比，探究超声振动辅助加工对不同光学玻璃加工后表面形成机理与表面粗糙度的影响。

1 显微压痕实验

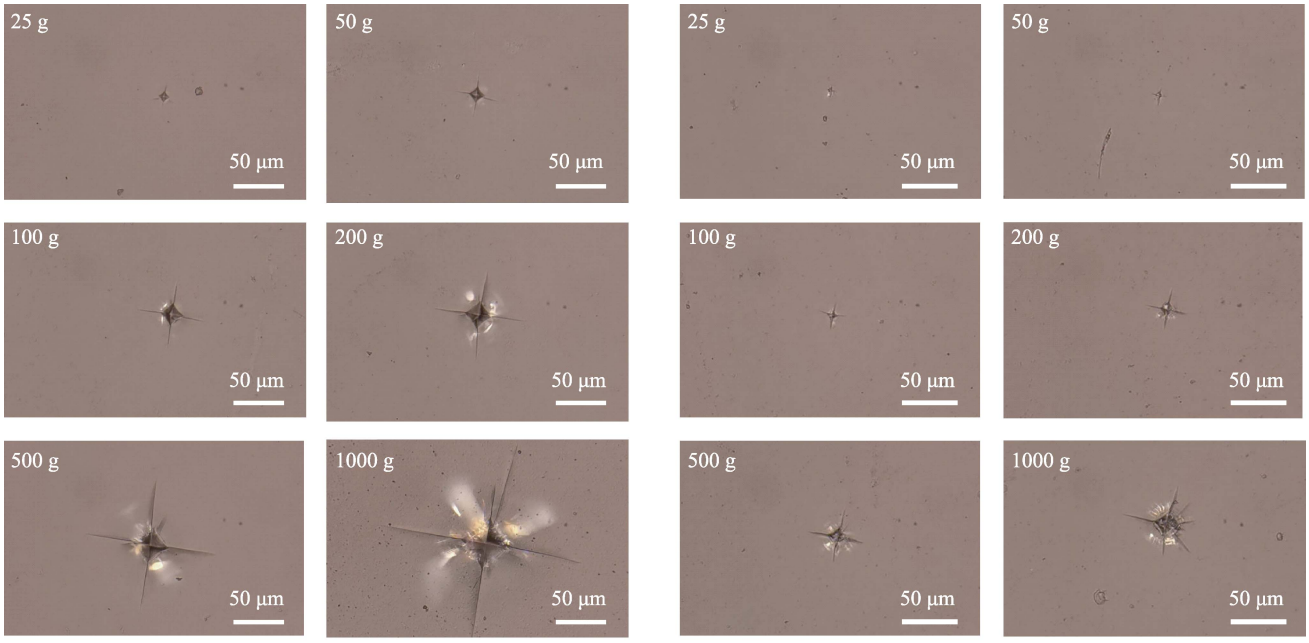
1.1 实验内容

采用带有金刚石维氏压头的数显显微硬度计对两种光学玻璃进行显微压痕实验，计算求解两种材料的显微硬度、断裂韧性以及临界切削深度参考值，探索两种光学玻璃在物理力学性能上的区别。采用硬度仪对石英玻璃与 K9 玻璃进行了不同载荷下压痕的压制，实验过程中，选择载荷的档位为 25、50、100、200、300、500、1000 g 级别，其保载时间为 10 s，为了保证实验结果的准确性，两种材料的试样均抛光至镜面水平，并在每一种载荷下压制三个压痕，然后在显微镜头下对压痕进行测量，并求其硬度平均值。

1.2 压痕形貌分析

采用超景深显微镜对压痕形貌进行观察，如图 1 所示。图 1a 是 K9 玻璃上不同载荷下的压痕形貌，在小载荷 25 g 下，K9 玻璃压痕为塑性变形以及较少裂纹，说明该种材料除了塑性变形外还有脆性断裂。从 50 g 时开始，压痕的每个对角线上都产生了对称裂纹，在压痕四边均有塑性隆起的现象，并随着载荷的加大，裂纹沿着压痕对角线方向延伸，说明 K9 玻璃各向同性的力学性能较好。当载荷为 50 g 时，在压痕周围出现了白色区域，主要由维氏金刚石压头对工件施加的高静压力所致，从而引起工件内部塑性扩展区域产生线性排列的位错带[10]。当载荷达到最大值 1000 g 时，发现压痕较完整，没有出现大量的破碎现象，说明该种材料的塑性加工区域相对较广。

从图 1b 可以看出，在载荷较小（25 g）时，石英玻璃表面压痕出现了较长的裂纹，没有明显的塑性变形，并伴有细微的崩碎，说明石英玻璃难以实现在塑性区域的加工。随着载荷的增大，裂纹沿着对角线的方向延伸，崩碎及剥落现象也随着载荷的增大而逐渐明显，说明石英玻璃主要偏向于脆性断裂。因为在载荷增大的过程中，横向裂纹的扩展方向一般平行于试样表面；在卸载过程中，试样内部横向裂纹将会扩展到试样表面，引起试样表面材料脆性断裂的现象，当载荷为 200 g 时，石英玻璃表面发生了严重的崩碎与破损，说明石英玻璃在加工过程中受到较小的载荷时，会产生裂纹以及脆性破碎而被去除。



a K9玻璃　　b 石英玻璃

图 1　两种光学玻璃在不同载荷下压痕形貌

Fig.1 Indentation morphology of two kinds of optical glasses under different loads: a) K9 glass; b) quartz glass

1.3　K9 玻璃与石英玻璃的硬度

在本实验中，采用维氏金刚石压头压制后所测量的显微硬度为维氏硬度（HV），主要是为了满足其他物理力学性能参数的计算。维氏硬度的计算公式如下[11]：

$$HV=0.1891F/d^2 \quad (1)$$

式中：F 为载荷（N）；d 为压痕平均对角线长度（mm）。

在本次显微压痕实验过程中，主要通过选取压痕上的对角点以及裂纹测量对角线长度及裂纹长度，然后通过设备本身自带处理器，计算得到本实验中测量的 K9 玻璃与石英玻璃的显微硬度值，其中计算数据如表 1—2 所示。

表 1　K9 玻璃维氏硬度计算结果

Tab.1 Calculation results of K9 glass Vickers hardness (HV)

Pressure/g	25	50	100	200	500	1000	Average hardness
Diagonal length of indentation/μm	11.86	16.68	25.00	30.37	39.12	55.62	
	11.60	16.21	24.90	30.87	39.58	56.11	
HV	337.0	342.9	297.99	395.6	598.8	594.2	427.7

表 2　石英玻璃维氏硬度计算结果

Tab.2 Calculation results of quartz glass Vickers hardness (HV)

Pressure/g	25	50	100	200	500	Average hardness
Diagonal length of indentation/μm	6.21	7.62	11.23	16.68	21.42	
	5.92	8.79	10.95	16.77	20.80	
HV	1260.4	1377.3	1507.9	1325.9	1248.4	1344.0

1.4　K9 玻璃与石英玻璃的断裂韧性计算

断裂韧性是材料在加工过程中影响材料去除难易程度的重要参数。目前，Vickers 压痕测量技术是被认为最有效、最简单的测量材料断裂韧性的方法。采用 Laugier 公式如下[12]：

$$K_{1C}=0.0098\left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{2}{3}}PC^{-\frac{3}{2}},\frac{L}{a}>2.5 \quad (2)$$

$$K_{1C}=0.015\left(\frac{L}{a}\right)^{-\frac{1}{2}}\left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{2}{3}}PC^{-\frac{3}{2}},\frac{L}{a}<2.5 \quad (3)$$

式中：H 为试样材料的硬度（GPa）；E 为弹性模量（GPa）；P 为载荷（N）；L 为压痕裂纹长度（μm）；a 为压痕半径（μm）；$C=L+a$（μm）。具体计算数据如表 3—4 所示。得到 K9 玻璃的材料断裂韧性为 K_{1C}= 5.232 MPa·m$^{0.5}$，石英玻璃的材料断裂韧性为 K_{1C}=

1.644 MPa·m$^{0.5}$，明显可以看出 K9 玻璃的断裂韧性大于石英玻璃的断裂韧性，这也说明了裂纹在石英玻璃中的扩展能力大于 K9 玻璃的，即石英玻璃在压痕实验中更容易出现裂纹。从显微压痕实验中也可以看出，石英玻璃在较小载荷下便出现了裂纹，以及较早地出现了崩碎现象。

表 3 K9 玻璃的断裂韧性计算结果

Tab.3 Calculation results of fracture toughness of K9 glass

Parameters	Value					
Pressure/g	25	50	100	200	500	1000
Average diagonal length of indentation/μm	11.60	16.45	24.95	30.62	39.35	55.87
Average radius of indentation/μm	5.80	8.22	12.48	15.31	19.68	27.93
Average length of crack/μm	6.62	16.00	26.43	36.18	55.46	84.97
L/*a*	1.14	1.95	2.12	2.36	2.82	3.01
HV/GPa	3.305	3.363	2.922	3.880	5.873	5.828
Average static fracture toughness/(MPa·m$^{0.5}$)	5.232					

表 4 石英玻璃的断裂韧性计算结果

Tab.4 Calculation results of fracture toughness of quartz glass

Parameters	Value				
Pressure/g	25	50	100	200	300
Average diagonal length of indentation/μm	6.06	8.21	11.09	16.73	21.11
Average radius of indentation/μm	3.03	4.10	5.55	8.36	10.56
Average length of crack/μm	4.94	5.90	10.61	16.14	21.41
L/*a*	1.63	1.44	1.91	1.93	2.02
HV/GPa	12.361	13.508	14.788	13.004	12.244
Average static fracture toughness/(MPa·m$^{0.5}$)	1.644				

2 临界切深与单颗磨粒最大切削厚度

2.1 K9 玻璃与石英玻璃的临界切削深度

在磨粒加工过程中，材料脆塑性转变的临界切削深度与单颗磨粒最大切削厚度是影响材料去除方式的重要参量。当锯切过程中锯切弧区内单颗磨粒的最大切削深度小于材料的临界切削厚度时，主要发生塑性变形的延性去除；当单颗磨粒的最大切削厚度大于材料的临界切削深度时，材料在磨粒划擦过程中将出现脆性破碎而被去除。实际上，临界切削深度只是一个大约的参考值，因为它与加工过程中的磨粒切削速度、被切工件材料、磨粒出刃状态以及切削设备的振动等状态有密切联系。通过查找相关文献可知，临界切削深度应满足的公式如下[13]：

$$a_c = 0.15\left(\frac{E}{H}\right)\left(\frac{K_{1C}}{H}\right)^2 \tag{4}$$

式中：a_c 为临界切削深度（μm）；E 为材料弹性模量（GPa）；H 为材料硬度（GPa）；K_{1C} 为材料断裂韧性（MPa·m$^{0.5}$）。

由前面部分计算结果及式（4）可得到，K9 玻璃的临界切削深度的参考值为 4.288 μm，石英玻璃的临界切削深度的参考值为 0.012 μm。通过对比两种材料的临界切削深度参考值可知，石英玻璃的临界切削深度远小于 K9 玻璃的临界切削深度，说明在加工过程中，石英玻璃更容易发生脆性断裂。通过显微压痕实验中两种材料的压痕形貌可以看出，在较小的载荷下，石英玻璃的压痕出现了裂纹及崩碎情况，但 K9 玻璃在 1000 g 载荷下的压痕表面形貌仍然非常完整，这将为后面加工过程中表面形成机理的探究提供了很好的理论依据。

2.2 K9 玻璃与石英玻璃的单颗磨粒最大切削厚度 h_{max}

在普通锯切过程中，单颗磨粒最大切削厚度的计算公式为[14]：

$$h_{max} = \sqrt{\frac{3}{C\tan\theta}\left(\frac{v_w}{v_s}\right)\sqrt{\frac{a_p}{d_s}}} \tag{5}$$

式中：C 为单位锯片圆周面积上的有效磨粒数；θ 为磨屑底部夹角的 1/2（磨粒顶锥角的一半），通常取 θ=60°；v_s 为锯片圆周上的线速度；a_p 为锯切深度；v_w 为工件速度；d_s 为金刚石锯片的直径。

在径向超声振动辅助磨削过程中，单颗磨粒切削厚度的推导公式如下[15]：

$$h = O_1O_2\sin(\omega_s t + \alpha) \tag{6}$$

$$\alpha = \arctan \frac{2Av_s \cos\left(\omega t + \frac{a\omega}{2v_s}\right)\sin\frac{a\omega}{2v_s}}{av_w} \tag{7}$$

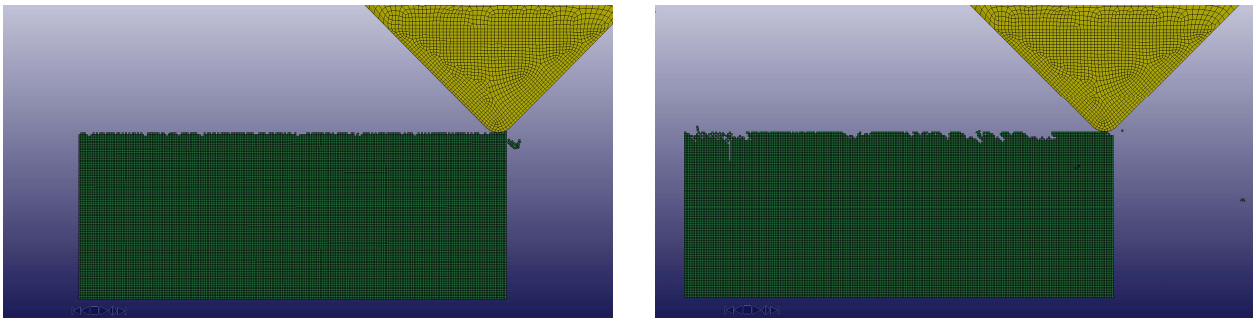
$$O_1O_2 = \sqrt{\left(2A\cos\left(\omega t + \frac{a\omega}{2v_s}\right)\sin\frac{a\omega}{2v_s}\right)^2 + \left(\frac{a\omega}{v_s}\right)^2} \tag{8}$$

式中：A 为振幅；ω 为转动角速度；a 为锯切深度。

通过计算得到，在普通锯切中，单颗磨粒的最大切削厚度为 1.1767 μm，而在超声振动辅助磨削中，单颗磨粒的最大切削厚度约为 8.001 μm。超声振动中，单颗磨粒最大切削厚度远大于普通锯切，因此超声振动在一定程度上能够改变材料的去除方式，进而改变工件加工后表面的形成机理。

2.3　单颗磨粒切削的有限元仿真

通过 LS-DYNA 软件进行单颗磨粒切削光学玻璃的有限元仿真。磨粒材质为金刚石，普通锯切中，单颗磨粒的最大切深为 1.1767 μm。仿真结果如图 2 所示。由图 2 可以看出，在相同的切削深度下，K9 玻璃的加工表面微破碎较少，材料去除方式主要是塑性变形；而石英玻璃则产生了很多细小的破碎与裂纹，说明材料去除方式为脆性破坏。这证明了由于临界切削深度的不同，不同光学玻璃材料的去除方式不同，因而表面形成机理也不同。K9 玻璃的临界切削深度比较大，为 4.288 μm，大于普通锯切时单颗磨粒的最大切削厚度 1.1767 μm，因此 K9 玻璃在普通锯切过程中主要为塑性去除。而石英玻璃的临界切削深度非常小，为 0.012 μm，因此在普通锯切中，石英玻璃为脆性去除。由于超声振动能够极大地提高单颗磨粒的切削深度，变为 8.001 μm，超过 K9 玻璃的临界切削深度。可以预见，在旋转超声锯切中，K9 玻璃的去除方式由延性去除转变为脆性破坏。而石英玻璃在普通锯切中即为脆性去除，因此超声振动对于加工石英玻璃表面形成机理的影响可能不大，该预测分析随后将通过试验进行验证。



a　K9 玻璃　　b　石英玻璃

图 2　单颗磨粒切削的有限元仿真结果

Fig.2 Finite element simulation results of single abrasive cutting: a) K9 glass; b) Quartz glass

3　旋转超声锯切实验

3.1　实验装置与实验过程

旋转超声锯切实验中，石英玻璃与 K9 玻璃工件被固定在夹具上，金刚石锯片在整个旋转超声锯切系统中，在主轴与刀柄配合下，由主轴带动锯片做旋转运动，并切入工件。锯切实验的平台示意图如图 3 所示。主轴提供 Z 轴方向的旋转运动外，工件的进给速度 v_w 沿 Y 轴方向的运动与切削深度 a_p 沿 X 轴方向的进给都由机床的工作台提供，锯片由径向超声振动锯切系统提供径向振动。当超声振动系统电源打开时，为工具径向超声振动锯切过程；当电源处于关闭状态时，则为普通的锯切方式。加工参数如表 5 所示。锯切实验完成后，采用扫描电镜观测加工表面的形貌，沟槽底部粗糙度则采用激光共聚焦显微镜进行观测。

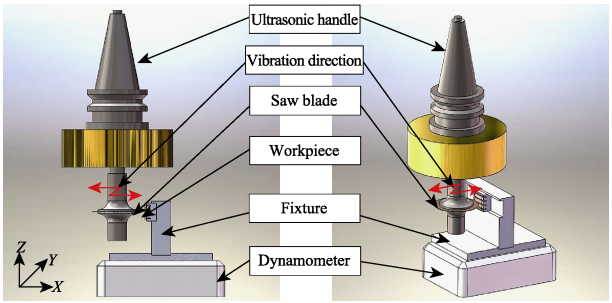


图 3　锯切实验平台示意图

Fig.3 Setup for sawing experiment platform

3.2　有无超声振动对不同材料加工形貌影响对比

由图 4 可以看出，无超声振动时，光学玻璃的表面形貌与仿真结果相符，K9 玻璃的加工表面为块状剥落去除，而石英玻璃为脆性断裂去除，表面以粉末状破碎为主。验证了在普通锯切中两种光学玻璃具有

不同的表面形成机理。而在旋转超声锯切中，与预想的结果一致，超声振动会增大锯切过程中磨粒的最大切深，超过了 K9 玻璃的临界切深，使得材料去除方式由塑性变形转变为脆性破坏，同时超声振动使 K9 玻璃过早失效，抑制了表面裂纹的扩展，从而使大面积的剥落转变为微破碎，能够减少加工表面上的深裂纹，提高加工表面质量。石英玻璃由粉末状破碎转变为微破碎，由于石英玻璃的断裂韧性较小，裂纹扩展短，残留的块状剥落破碎较少，导致超声振动对石英玻璃表面形貌的细化及脆塑性转变的影响不大。因此，超声振动对断裂韧性大、临界切削深度大的光学玻璃的表面形成机理的影响较大。

表 5　试验参数

Tab.5 Parameters of sawing experiments

Sawing method	Sawing tests with and without ultrasonic assisted, with coolant liquid
Rotary speed/(r·min^{-1})	900、1300、1700、2100
Workpiece feed rate v_w/(mm·min^{-1})	100、200、300、400
Sawing depth a_p/μm	30、60、90、120
Amplitude A/μm	1~3
Frequency f/kHz	28

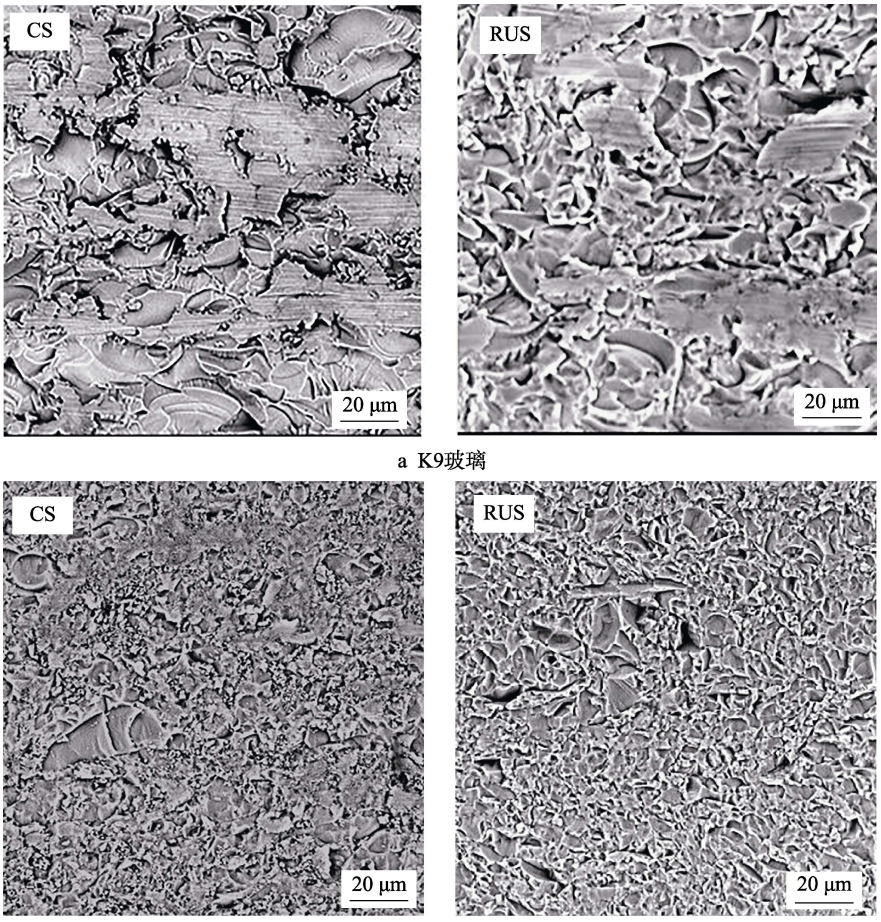


图 4　有无超声振动对 K9 玻璃与石英玻璃加工形貌影响对比

Fig.4 Comparison of effects on the surface morphology of K9 glass (a) and quartz glass (b) with and without ultrasonic vibration

3.3　径向超声锯切对石英玻璃与 K9 玻璃沟槽底部粗糙度的影响

采用激光共聚焦检测锯切后沟槽底部的形貌，为了充分保证测量数据的准确性，每道沟槽底部测量 5 次，并求其平均值，测量所得数据主要由沟槽底部的算术平均粗糙度 P_a、峰谷值 P_v 所组成。从图 5 可看出，K9 玻璃的 P_a、P_v 值随锯切深度的增大而逐渐递增，但是石英玻璃的 P_a、P_v 值则变化非常小。从形貌分析可知，K9 玻璃脆性断裂而剥落破碎，残留凹坑也随锯切深度的增大而递增，从而引起沟槽底部算术平均粗糙度 P_a、峰谷值 P_v 均有明显上升的趋势。但石英玻璃在锯切过程中几乎完全通过脆性断 裂的方式（呈微破碎）被去除，并且破碎幅度较小，使得沟槽底部算术平均粗糙度 P_a、峰谷值 P_v 的变化较小。

超声振动使光学玻璃材料的沟槽底部算术平均粗糙度 P_a、峰谷值 P_v 均有降低，但对 K9 玻璃的影响大于石英玻璃，因为径向超声振动使磨粒以极高加

速度撞击 K9 玻璃表面，从而产生大量的微裂纹而引起微破碎，在工件表面留下的凹坑较浅，也抑制了 K9 玻璃表面的裂纹扩展，降低了工件表面的算术平均粗糙度 P_a、峰谷值 P_v。由于石英玻璃无超声锯切时已处于脆性微破碎去除，则超声振动对其表面粗糙度的影响不大。

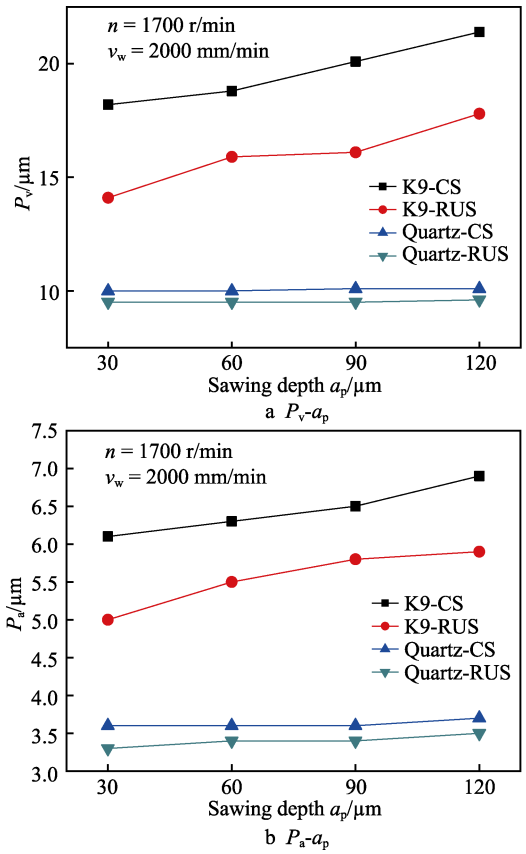


图 5　锯切深度对沟槽底部粗糙度的影响对比

Fig.5 Comparison of influence of sawing depth on groove bottom roughness

图 6 给出了沟槽底部算术平均粗糙度 P_a 与峰谷值 P_v 随工件进给速度变化的关系曲线，可看出两种材料的 P_a、P_v 值均随工件进给速度的升高而增大，当工件进给速度增大时，工件表面破碎更严重，导致 P_a、P_v 值增大，但石英玻璃的 P_a、P_v 值变化不明显，具体原因如上分析所述。超声振动使 K9 玻璃锯切后沟槽底部的 P_a、P_v 值得到大幅度降低，但石英玻璃的变化不大。由图 7 可知，锯切沟槽底部算术平均粗糙度 P_a 与峰谷值 P_v 随锯片转速的变化趋势，随着锯片转速的提高，P_a、P_v 值都呈下降趋势，但变化幅度不同。因为随着锯片转速的提高，降低了锯切力，使材料的破碎幅度减小，从而降低了表面粗糙度。随锯片转速的提高，K9 玻璃表面形貌主要由大面积破碎逐渐变为大塑性变形去除，从而大大降低了锯切后表面的 P_a、P_v 值。但石英玻璃随转速的提高，其表面形貌变化不大，则其 P_a、P_v 值随锯片转速的变化无明显变化。

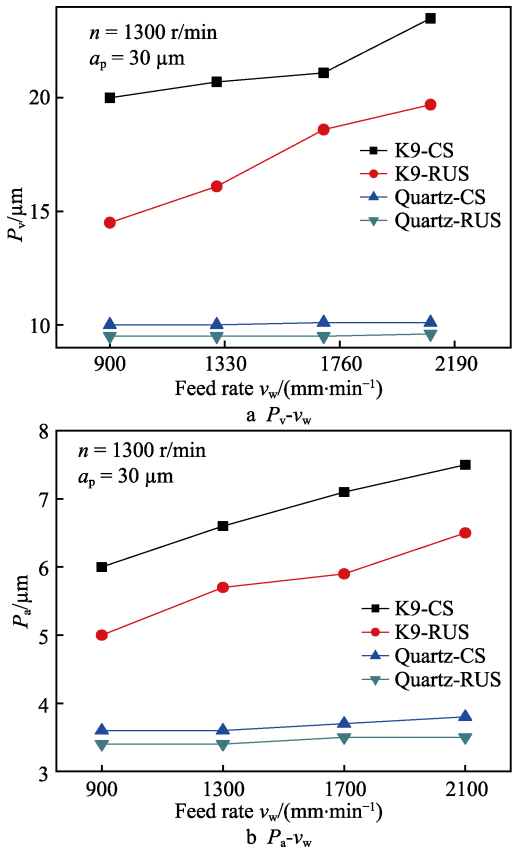


图 6　进给速度对沟槽底部粗糙度的影响对比

Fig.6 Comparison of influence of feed rate on groove bottom roughness

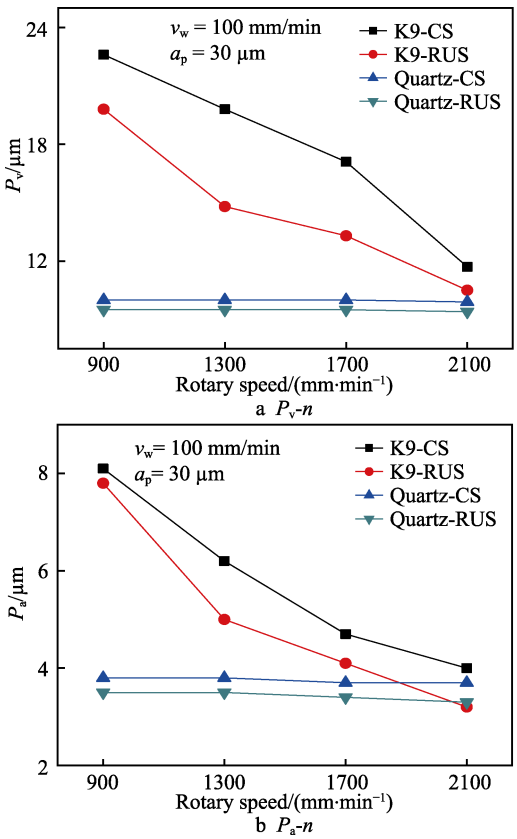


图 7　锯片转速对沟槽底部粗糙度的影响对比

Fig.7 Comparison of influence of rotary speed on groove bottom roughness

对比图 5、图 6、图 7 可知，超声振动降低了两种材料的沟槽底部算术平均粗糙度 P_a 与峰谷值 P_v 值。超声振动抑制了光学玻璃工件裂纹在断裂过程中大幅扩展，使材料在脆性破碎去除时留下的凹坑的直径与深度都减小，这种微破碎降低了锯切过程中算术平均粗糙度 P_a、峰谷值 P_v。所以，在超声振动下可获得粗糙度更低的表面，工件的加工质量更高。从上述分析中可知，光学玻璃的沟槽底部粗糙度与其锯切过程中形成的表面形貌密不可分，锯切表面形貌将直接反应到 P_a、P_v 值上，说明在超声振动锯切光学玻璃中，超声振动对断裂韧性大、临界切深大的光学玻璃的锯切表面算术平均粗糙度 P_a 与峰谷值 P_v 的影响较大。

4 结语

1）通过显微压痕实验以及相关公式计算可知，K9 玻璃的各项同性力学性能较好，塑性加工区域较广，维氏硬度约为 4.275 GPa，断裂韧性为 5.232 $MPa·m^{0.5}$；石英玻璃的维氏硬度则为 13.433 GPa，断裂韧性为 1.644 $MPa·m^{0.5}$，并且由于石英玻璃的临界切削深度远远小于 K9 玻璃的临界切削深度，因此在加工过程中更容易发生脆性断裂崩碎。

2）在无超声振动锯切过程中，单颗磨粒的最大切削深度为 1.1767 μm，小于 K9 玻璃而大于石英玻璃的临界切削深度，故 K9 玻璃为塑性变形，而石英玻璃为脆性断裂。在旋转超声锯切过程中，超声高频撞击将单颗磨粒的最大切削深度提高为 8.001 μm，大于 K9 玻璃的临界切削深度，使 K9 玻璃从塑性变形转变为脆性断裂，而对石英玻璃的脆塑性转变影响不大，说明超声振动对于断裂韧性大的光学玻璃表面形成机理和锯切形貌的影响较大。

3）沟槽底部粗糙度与光学玻璃的脆塑性去除方式有关，由于超声振动对断裂韧性较大的 K9 玻璃的影响较大，使其趋于脆性去除，通过使表层产生微破碎的方式避免了传统加工方式产生的大面积破碎，有利于降低表面粗糙度，而对石英玻璃的表面粗糙度的影响不大。

参考文献：

[1] 陈晓苹, 王朋, 李俊峰, 等. 玻璃质光学元件表面微裂纹的研究[J]. 中国光学, 2010(4): 318-324.
CHEN Xiao-ping, WANG Peng, LI Jun-feng, et al. Study on surface micro-cracks of vitreous optics[J]. Chinese optics, 2010(4): 318-324.

[2] ZHAO Pei-yi, ZHOU Ming, ZHANG Yuan-Jing, et al. Surface roughness prediction model in ultrasonic vibration assisted grinding of BK7 optical glass[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(2): 277-286.

[3] 郭兵, 赵清亮, 陈冰, 等. 光学玻璃的激光微结构化砂轮精密磨削[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2659-2666.
GUO Bing, ZHAO Qing-liang, CHEN Bing, et al. Precision grinding of optical glasses by laser micro-structured grinding wheels[J]. Optics and precision engineering, 2014, 22(10): 2659-2666.

[4] 马超, 张建华, 陶国灿. 超声振动辅助铣削加工钛合金表面摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 115-119.
MA Chao, ZHANG Jian-hua, TAO Guo-can. Wear and friction properties of titanium alloy surface subject to ultrasonic vibration assisted milling[J]. Surface technology, 2017, 46(8): 115-119.

[5] 曹凤国. 超声加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
CAO Feng-guo. Ultrasonic machining technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[6] 张洁, 杨润, 李淑娟, 等. 金刚石线锯超声振动切割 SiC 锯切力的实验研究[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(1): 85-89.
ZHANG Jie, YANG Run, LI Shu-juan, et al. Experimental study of diamond scroll saw ultrasonic cutting SiC[J]. Journal of Xi′an University of Technology, 2012, 28(1): 85-89.

[7] QIU Xiao-ming, KUMAGAI S, TASHINO F, et al. Dicing process with ultrasonic vibration [C]//Proceedings of the JSPE semestrial meeting. Japan: The Japan Society for Precision Engineering, 2009: 997-998.

[8] 向鑫. 超声振动辅助锯切氧化铝陶瓷机理的研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2014.
XIANG Xin. Study on ultrasonic vibration assistant sawing mechanism for alumina ceramics[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2014.

[9] 沈剑云, 陈建彬, 王江全, 等. 径向超声锯切系统的实现及其应用探索[J]. 机械工程学报, 2017, 53(17): 202-208.
SHEN Jian-yun, CHEN Jian-bin, WANG Jiang-quan, et al. Study on manufacturing of radial ultrasonic sawing system and its application[J]. Journal of mechanical engineering, 2017, 53(17): 202-208.

[10] ZARUDI I, ZHANG Liang-chi, SWAIN M. Behavior of monocrystalline silicon under cyclic microindentations with a spherical indenter[J]. Applied physics letters, 2003, 82(7): 1027-1029.

[11] 佟富强. TN85 金属陶瓷球面偶件 ELID 超精密磨削技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
TONG Fu-qiang. Research on ultra-precision ELID grinding

technology of TN85 cermet spherical coupling[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

[12] LQUGIER M T. New formula for indentation toughness in ceramics[J]. Journal of materials science letters, 1987, 6(3): 355-356.

[13] 张坤领. 光学玻璃非球面延性域磨削研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(9): 28-33.
ZHANG Kun-ling. Research on ductile-regime grinding to aspheric profile of optical glass[J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2011(9): 28-33.

[14] 马尔金 S. 磨削技术理论与应用[M]. 蔡光起译. 沈阳: 东北大学出版社, 2002.
MALKIN S. Grinding technology theory and applications of machining with abrasives[M]. CAI Guang-qi translated. Shenyang: Northeastern University Press, 2002.

[15] 张洪丽. 超声振动辅助磨削技术及机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
ZHANG Hong-li. Study on the technology and mechanism of ultrasonic vibration assisted grinding[D]. Jinan: Shandong University, 2007.