

# 激光热辅助磨削石英玻璃的实验研究

于天彪, 刘传蒙, 于奎东, 王宛山  
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 采用正交实验研究了工艺参数对石英玻璃激光热辅助磨削后的表面粗糙度、表面形貌和砂轮磨损情况的影响。结果表明:激光热辅助磨削可以提高临界磨削深度、石英玻璃的表面磨削质量及效率。激光功率对激光热辅助磨削表面粗糙度影响最大,但不呈线性关系,最优激光功率为 175 W,对应粗糙度为 0.262。通过激光辅助,实验过程中玻璃脆性下降,塑性提高,实现了石英玻璃的塑性域磨削,减轻砂轮磨损,降低了磨削表面的剥落坑。

**关 键 词:** 激光热辅助;石英玻璃;表面磨削质量;塑性域磨削;砂轮磨损

**中图分类号:** TH 161+.14      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2019)10-1467-07

## Experimental Study on Laser Heat-Assisted Grinding Quartz Glass

YU Tian-biao, LIU Chuan-meng, YU Kui-dong, WANG Wan-shan  
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: YU Tian-biao, E-mail: tbyu@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The effects of process parameters on the surface roughness, surface morphology and wear of the grinding wheel were studied by the orthogonal test after quartz glass was treated by laser heat assisted grinding. The results showed that laser heat-assisted grinding can improve the critical grinding depth, the surface grinding quality and work efficiency of quartz glass. The laser power has the greatest influence on the roughness of laser-assisted grinding, but there is no linear relationship. The optimal laser power is 175 W, and the corresponding roughness is 0.262. With the aid of laser, the brittleness of glass decreases and the plasticity increases during the experiment, which realizes the plastic domain grinding of quartz glass, reduces the wear of the grinding wheel and decreases the peeling pit of the grinding surface.

**Key words:** laser heat-assistance; quartz glass; surface grinding quality; plastic zone grinding; grinding wheel wear

石英玻璃是一种典型的非金属硬脆材料,指的是高纯度的二氧化硅非晶体,被称之为“玻璃王”<sup>[1]</sup>。石英玻璃具有各向同性、结构均匀、化学性质稳定(不耐氢氟酸)、热膨胀系数小及抗热震性好等优点,但其硬度高、脆性大,属于难加工材料。石英玻璃常被用作太空望远镜等光学系统的光学元件,而光学元件对加工质量的要求相当高。

传统的磨削极易产生崩碎、凹坑、裂纹等损伤,严重影响了石英玻璃作为光学元件的光学性能,所以光学玻璃的冷加工严重依赖于后续的研磨抛光,但研磨抛光耗时长,基本占整个生产周期的 60%<sup>[2-3]</sup>,难以满足光学行业对高精度石英玻璃的大量需求。研磨抛光存在不确定性,可能会降低石英玻璃的几何精度。Ngoi 等<sup>[4]</sup>认为塑性域磨削相比抛光,加工效率和面型精度的保持性都会有所提高。因此,为了实现硬脆材料的塑性域磨削,本文将通过激光热辅助磨削的方法进行试验研究。焦俊科等<sup>[5]</sup>做了石英玻璃在激光扫描作用

下温度分布的大量研究,得到了激光参数对石英玻璃表面温度分布的影响规律,并发现石英玻璃在激光的扫描作用下表面温度升高迅速,极易达到 1 200 ℃ 以上,因此激光热辅助能够达到石英玻璃最佳的软化磨削温度,可以较好地改善其磨削性能.德国斯图加特大学使用 YAG 激光对玻璃进行了加热辅助切削试验研究<sup>[6-7]</sup>.这些研究对激光热辅助磨削石英玻璃提供了较好的理论依据.本文试图通过反复的磨削实验,验证激光热辅助磨削石英玻璃的可行性并找到最适宜的磨削加工参数和激光参数.

## 1 硬脆材料加工理论

硬脆材料磨削时,只要载荷和磨削深度足够小,磨削表面就会很光滑,接近塑性材料磨削时的形貌.理论上认为当未变形切屑厚度小于材料的临界切削层深度时,材料发生塑性流动所需能量低于材料发生脆性断裂所需能量,这时材料会通过能量较低的方式被去除,即以塑性流动方式进行去除,从而实现硬脆材料的塑性去除. Bifano 等<sup>[8]</sup>首次给出了临界磨削深度的计算公式,见式(1).材料的临界磨削深度  $D_c$  与材料的弹性模量  $E$ 、断裂韧度的平方  $K_c^2$  成正比,与材料的硬度的三次方  $H^3$  成反比:

$$D_c=0.15\frac{E\cdot K_c^2}{H^3}.$$

(1)

Michel 等<sup>[9]</sup>研究发现,硬脆材料的硬度随温度的升高会明显下降,而弹性模量和断裂韧度随温度的升高变化不大.由式(1)可知,在热辅助作用下,硬脆材料的临界磨削深度较常温时会有所增大,磨削效果会有明显改善,磨削效率会有显著提高.

当在维氏压头上所施加的法向载荷  $F$  低于临界载荷  $F_c$  时,材料不会出现脆性裂纹;一旦压头所施加的法向载荷  $F$  超过临界载荷  $F_c$  时,材料将发生脆性断裂. Lee 等<sup>[10]</sup>给出了临界载荷  $F_c$  的表达式:

$$F_c=\frac{a_yK_c^4}{H^3}.$$

(2)

式中,  $a_y$  为压头几何因子.

## 2 石英玻璃的正交实验及对比实验

为了验证激光热辅助磨削石英玻璃的可行性,设计了四因素三水平的正交实验及对应的对

比实验.在进行正交实验时,同时也进行了对应的无激光热辅助的对比实验.为了保证其他变量的一致性,本实验在同一条被磨削棱线上进行,以工件被磨削棱线的中点作为分界点,将被磨削棱线分为两部分:前半部分为激光热辅助磨削区,当到达中点时停止激光;后半部分为无激光热辅助磨削区.这样便保证了每一组实验:其他变量一致,只有有无激光的区别.

本实验使用 YLR-500 型光纤激光器,该激光器技术参数见表 1.

表 1 激光器技术参数

Table 1 Laser technical parameters

名称	参数
工作温度/℃	-40 ~ 75
工作湿度/% RH	20 ~ 80
操作电压/V	220 ~ 380
激光波长/nm	1 020
最大输出功率/W	500
功率不稳定率/%	≤ ± 5
额定连续运行时间/h	24

砂轮选用电镀金属结合剂立方氮化硼 CBN 平面磨棒,砂轮参数为 D8-10T-6B-80L-CBN400#.

加工实况如图 1 所示.激光头垂直照射,入射角  $\alpha=90^\circ$ ,激光头与工件的垂直距离  $h=16\text{ mm}$ ,光斑与砂轮磨削点的距离  $L=D/2+2$ ,其中  $D$  为砂轮直径,中点附近为激光热辅助磨削与无激光热辅助磨削的过渡区,后期检测时应避免在标记点附近取样.

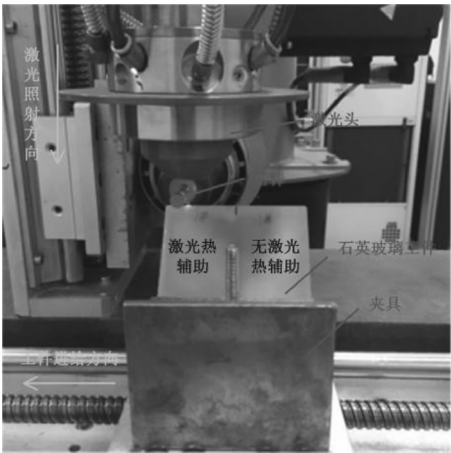


图 1 石英玻璃加工实况

Fig. 1 Processing live of quartz glass

在用 OLS4100 3D 激光显微镜测量粗糙度值时,为了避免测量误差,对同一组实验参数下磨削面的不同位置测量 3 次,取平均值,记录到表 2 和

表 3 中。

由表 2 和表 3 可知,条件相同时,激光热辅助磨削时的表面粗糙度值明显低于同等情况下无激光热辅助磨削时的表面粗糙度值. 激光热辅助磨削实验获得表面粗糙度  $R_a$  为  $0.469 \sim 1.096 \mu\text{m}$ , 非激光热辅助磨削实验获得表面粗糙度  $R_a$  为  $0.863 \sim 1.961 \mu\text{m}$ . 在本实验中,激光热辅助磨削情况下表面粗糙度的均值为  $0.745 \mu\text{m}$ , 小于非激光热辅助磨削情况下表面粗糙度的均值  $1.277 \mu\text{m}$ , 在一定程度上证明了激光热辅助磨削可以在一定程度上改善石英玻璃的表面磨削质量.

表 2 正交实验所得表面粗糙度(激光热辅助)									
Table 2 Surface roughness obtained from orthogonal experiments									$\mu\text{m}$
1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	均值
0.807	0.832	1.096	0.672	0.583	1.037	0.469	0.618	0.594	0.745

表 3 对比实验所得表面粗糙度(无激光热辅助)									
Table 3 Surface roughness obtained from comparative experiments									$\mu\text{m}$
1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	均值
1.290	1.586	1.961	0.980	0.888	1.712	0.863	1.276	0.940	1.277

2.1 极差分析

1) 石英玻璃正交实验的极差分析:

通过比较极差  $R$  值,  $R_p > R_v > R_{a_p} > R_n$ , 可得实验因素对实验指标——表面粗糙度影响的主次顺序为激光功率→工件进给速度→磨削深度→砂轮转速, 见表 4. 其中, 激光功率对表面粗糙度的

影响最大. 本实验中, 在某因素下对应的 3 个均值中, 均值最小的那个代表此因素在此水平下得到的表面粗糙度最小, 是此因素的优水平, 因此因素的最佳搭配为  $175 \text{ W}$ ,  $2 \text{ mm/s}$ ,  $10 \mu\text{m}$ ,  $120 \text{ r/s}$ , 其中最佳搭配不在实验组内.

表 4 正交实验结果					
Table 4 Orthogonal experiment results					
实验编号	激光功率 $P$ W	工件进给速度 $v$ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	砂轮转速 $n$ $\text{r} \cdot \text{s}^{-1}$	磨削深度 $a_p$ $\mu\text{m}$	表面粗糙度 $R_a$ $\mu\text{m}$
1#	125	2	100	10	0.807
2#	125	3	120	20	0.832
3#	125	4	140	30	1.096
4#	150	2	120	30	0.672
5#	150	3	140	10	0.583
6#	150	4	100	20	1.037
7#	175	2	140	20	0.469
8#	175	3	100	30	0.618
9#	175	4	120	10	0.594
均值 1	0.911 7	0.649 3	0.820 7	0.661 3	
均值 2	0.764 0	0.677 7	0.699 3	0.779 3	
均值 3	0.560 3	0.909 0	0.716 0	0.795 3	
极差 $R$	0.351 3	0.259 7	0.121 3	0.134 0	

2) 石英玻璃对比实验的极差分析:

通过比较  $R$  值,  $R_v > R_{a_p} > R_n$ , 可得实验因素对实验指标——表面粗糙度影响的主次顺序为工件进给速度→磨削深度→砂轮转速, 见表 5. 因素的最佳搭配为  $2 \text{ mm/s}$ ,  $10 \mu\text{m}$ ,  $120 \text{ r/s}$ , 其中最佳搭配不在实验组内.

3) 四因素对表面粗糙度的影响趋势:

为了更加直观地反映实验因素对实验指标的影响规律, 分别绘制了激光功率、工件进给速度、砂轮转速和磨削深度对表面粗糙度的影响趋势图, 见图 2 ~ 图 5.

由图 2 可知, 石英玻璃激光热辅助磨削后表面粗糙度随着激光功率的增大而减小. 这可能是因为石英玻璃在激光热辅助的作用下, 脆性有所变小, 韧性有所增大, 部分脆性去除的凹坑特征转变成塑性去除的微细纹理, 使得石英玻璃在激光热辅助下表面粗糙度明显减小. 但是物极必反, 激光功率并非越大越好.

表 5 对比实验结果  
Table 5 Comparative experiment results

实验编号	工件进给速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	砂轮转速 $n/(\text{r}\cdot\text{s}^{-1})$	磨削深度 $a_p/\mu\text{m}$	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
1#	2	100	10	1.290
2#	3	120	20	1.586
3#	4	140	30	1.961
4#	2	120	30	0.980
5#	3	140	10	0.888
6#	4	100	20	1.712
7#	2	140	20	0.863
8#	3	100	30	1.276
9#	4	120	10	0.940
均值 1	1.044 3	1.426 0	1.039 3	
均值 2	1.250 0	1.168 7	1.387 0	
均值 3	1.537 7	1.237 3	1.405 7	
极差 R	0.493 3	0.257 3	0.366 3	

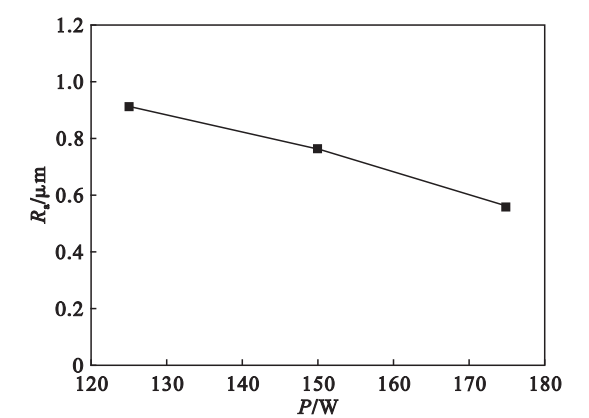


图 2 激光功率对石英玻璃表面粗糙度的影响  
Fig. 2 Effect of laser power on surface roughness of quartz glass

由图 3 可知,无论是有激光热辅助磨削还是无激光热辅助磨削,石英玻璃加工后表面粗糙度都随着工件进给速度的增加而增大.这是因为工件进给速度越快,在单位时间内投入的材料切削量越多,磨削力随之增大,磨削长度加长,不利于获得较好的表面加工质量.

有激光热辅助磨削的表面粗糙度要比无激光热辅助磨削的小.这是因为石英玻璃在激光热辅助下,磨削性能可以得到较好改善.对于有激光热辅助磨削,本实验中的工件进给速度即为激光扫描速度.工件进给速度直接影响着激光作用在石英玻璃上的时间,工件进给速度越快,激光作用时间就会越短,可能达不到石英玻璃磨削性能改善的最佳温度.工件进给速度越快,由于在单位时间内投入的材料切削量越多且激光作用时间越短,所以在有激光热辅助下,当  $v>3.0\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  时,随

工件进给速度的增加,表面粗糙度变化得更快.

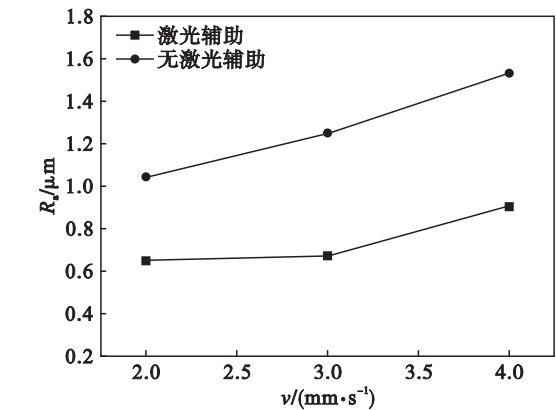


图 3 工件进给速度对石英玻璃表面粗糙度的影响  
Fig. 3 Effect of workpiece feed rate on the surface roughness of quartz glass

由图 4 可知,无论是有激光热辅助的磨削还是无激光热辅助的磨削,随着砂轮转速的增加,石

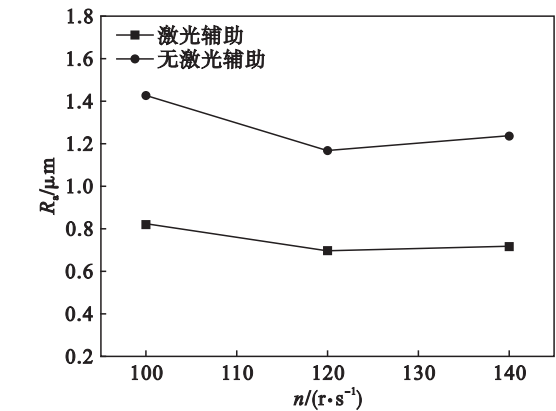


图 4 砂轮转速对石英玻璃表面粗糙度的影响  
Fig. 4 Effect of grinding wheel speed on the surface roughness of quartz glass



英玻璃加工后表面粗糙度都是先减小后增大, 总体呈下降趋势, 在砂轮转速为 120 r/s 时表面粗糙度最小. 有激光热辅助磨削的表面粗糙度值总比无激光热辅助磨削时的小. 这是因为砂轮转速越快, 单位时间内参与工件加工的磨粒越多, 各刀刃的切削层相对越低, 增加了磨粒的磨削作用, 得到的表面粗糙度也就越小. 但此磨削实验台是自行搭建的, 达不到磨削加工中心的刚度, 当砂轮转速过高时, 会造成机床振颤, 影响加工表面质量.

由图 5 可知, 无论是有激光热辅助的磨削还是无激光热辅助的磨削, 石英玻璃加工后表面粗糙度都随着磨削深度的加深而增大. 这是因为磨削深度加深, 单颗磨粒切削刃的切削厚度增加, 单元磨屑的体积增加, 被磨表面塑性变形将随之增大, 磨粒与工件的摩擦加剧, 所以被磨表面的粗糙度也会增大.

有激光热辅助磨削的表面粗糙度要比无激光热辅助磨削的低. 这是因为在激光热辅助作用下, 材料脆性下降, 有利于磨削加工. 虽然磨削深度增大, 但相对无激光热辅助, 表面粗糙度会有明显降

低. 在表 4 的正交实验中, 7#样石英玻璃表面粗糙度最小, 其表面显微结构如图 6a 所示, 延性去除和脆性去除共存, 但以延性去除为主, 属于准塑性模式磨削. 在表 5 的对比实验中, 3#样石英玻璃表面粗糙度最大, 其表面显微结构如图 6b 所示, 因脆性去除而产生的凹坑比较明显, 属于脆性模式磨削.

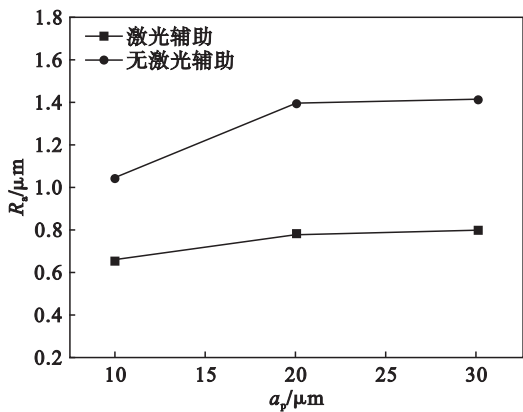


图 5 磨削深度对石英玻璃表面粗糙度的影响  
Fig. 5 Effect of grinding depth on the surface roughness of quartz glass

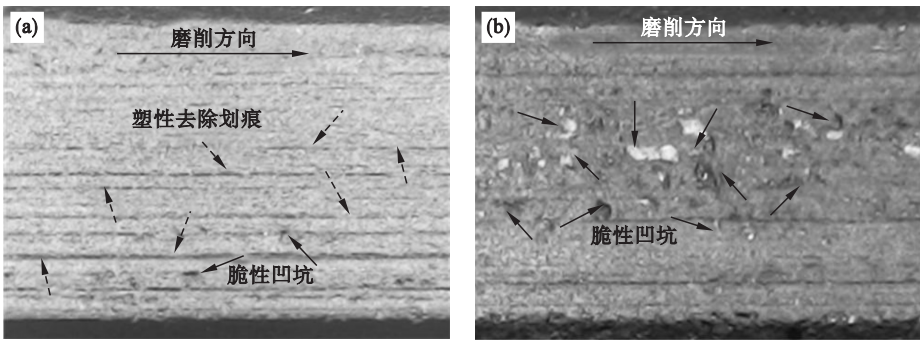


图 6 磨削表面形貌对比  
Fig. 6 Comparison of grinding surface morphology  
(a)—7#样准塑性磨削; (b)—3#样脆性磨削.

## 2.2 石英玻璃的表面特征形貌分析

正交实验因素的最佳搭配为激光功率 175 W、工件进给速度 2 mm/s、磨削深度 10  $\mu\text{m}$ 、砂轮转速 120 r/s. 对比实验因素的最佳搭配为工件进给速度 2 mm/s、磨削深度 10  $\mu\text{m}$ 、砂轮转速 120 r/s, 均不在之前的实验组内. 分别针对这两组因素的最佳搭配再次做实验, 进行表面特征形貌的对比分析.

经检测, 激光功率为 175 W、工件进给速度为 2 mm/s、磨削深度为 10  $\mu\text{m}$ 、砂轮转速为 120 r/s 时, 对此实验参数下磨削面的不同位置各测量 3 次表面粗糙度, 取平均值为 0.262  $\mu\text{m}$ . 工件进给速度为 2 mm/s、磨削深度为 10  $\mu\text{m}$ 、砂轮转速为

120 r/s 时, 对此实验参数下磨削面的不同位置各测量 3 次表面粗糙度, 取平均值为 0.701  $\mu\text{m}$ . 表面粗糙度从传统磨削时的 0.701  $\mu\text{m}$  降低到激光热辅助磨削时的 0.262  $\mu\text{m}$ , 从而也在一定程度上说明极差分析选出的因素最佳搭配的正确性. 这两组参数下即激光热辅助磨削与非激光热辅助磨削表面形貌对比如图 7 所示. 容易看出图 7a 为塑性模式磨削, 图 7b 为脆塑混合模式磨削.

## 2.3 激光功率较大时石英玻璃的表面状况

当激光功率  $P = 250 \text{ W}$  时, 其磨削表面形貌如图 8 所示, 石英玻璃表面过于软化, 出现烧伤氧化现象, 表面质量较差. 所以激光热辅助磨削石英玻璃时, 激光功率不要超过 250 W.

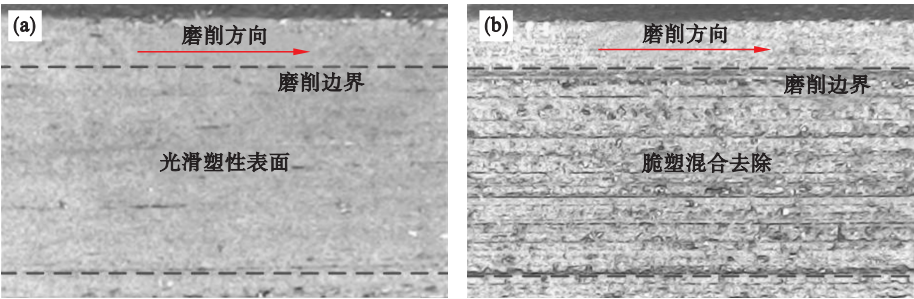


图 7 最佳因素搭配时的磨削表面形貌对比  
Fig. 7 Comparison of surface morphology with the best factors  
(a)— $P = 175\text{ W}$ , 塑性磨削; (b)— $P = 0$ , 脆塑混合磨削.

3 砂轮磨损实验及结果

磨削加工时,砂轮在磨削去除材料的同时,自身也会受到磨损,当砂轮磨损到一定程度时,就不能保持良好的磨削性能,会降低工件的加工质量和精度,这时需要对砂轮进行修锐或更换砂轮.为了探究激光热辅助磨削能否减小砂轮磨损,提高砂轮使用寿命,针对石英玻璃,设计了如下两组实验,这两组实验的工件进给速度  $v$ 、砂轮转速  $n$ 、磨削深度  $a_p$ 、磨削次数均相同.实验 1 为无激光热辅助磨削( $P = 0$ ),实验 2 为激光热辅助磨削( $P = 175\text{ W}$ ),实验安排见表 6.实验后,用 LEXT OLS

4100 3D 激光测量显微镜对砂轮表面的 3D 形貌进行观测.砂轮的磨损状况见图 9.

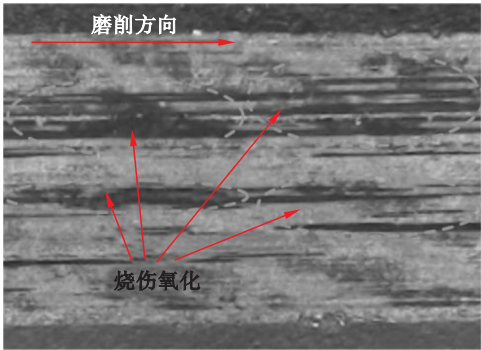


图 8  $P = 250\text{ W}$  时磨削表面形貌  
Fig. 8 Grinding surface morphology at  $P = 250\text{ W}$

表 6 砂轮磨损实验  
Table 6 Grinding wheel wear test

实验	激光功率 $P/\text{W}$	工件进给速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	砂轮转速 $n/(\text{r}\cdot\text{s}^{-1})$	磨削深度 $a_p/\mu\text{m}$	磨削次数
1	0	2	120	10	20
2	175	2	120	10	20

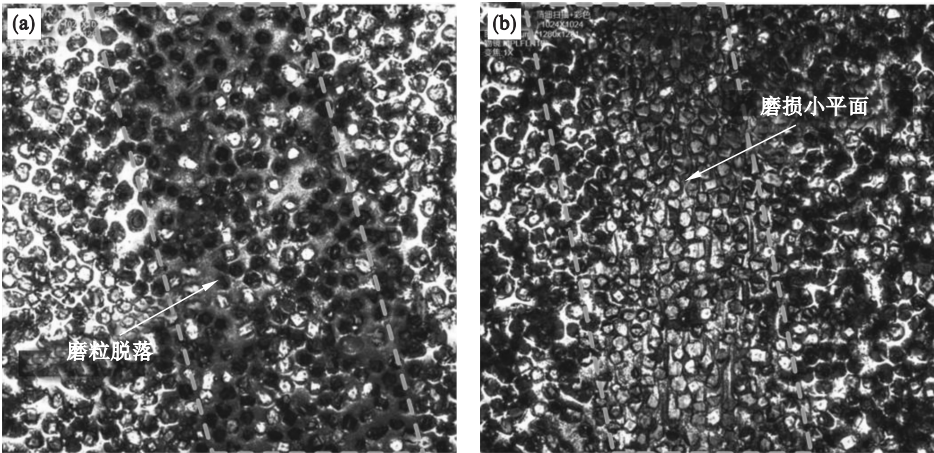


图 9 不同加工条件下砂轮的磨损状况  
Fig. 9 Grinding wheel wear under different processing conditions  
(a)— $P = 0$ ; (b)— $P = 175\text{ W}$ .

图 9a 为实验 1: $P=0$  时,磨削工件棱线后砂轮表面的 3D 形貌,可知砂轮磨粒脱落严重.这是因为无激光热辅助磨削时,受工件材料高硬度的影响,砂轮与工件摩擦剧烈,造成砂轮磨损较快.图 9b 为实验 2: $P=175\text{ W}$  时,磨削工件棱线后砂轮表面的 3D 形貌,可知磨粒的出刃高度明显减小,磨粒上形成了磨损小平面,磨粒磨钝但并未脱落,磨损程度相对常规磨削有所减小,砂轮磨损的减少从侧面反映了磨削力的减小.通过上述两组实验砂轮磨损状况的比较,说明激光热辅助在一定程度上降低了工件材料的硬度,材料发生了软化,塑性增强,脆性减弱,改善了工件材料的磨削性能,使磨削力减小,砂轮磨损减少,在一定程度上改善了砂轮的磨损状况,延长了砂轮的使用寿命.

## 4 结 论

1) 在热辅助作用下,硬脆材料的临界磨削深度较常温时会有所增大,材料所能承受的压力也增大,因此从理论上说明了在激光热辅助作用下硬脆材料的磨削效果会有所改善,磨削效率会有所提高.

2) 影响石英玻璃表面粗糙度因素的主次顺序为激光功率→工件进给速度→磨削深度→砂轮转速.其中,激光功率对表面粗糙度的影响最大.因素的最佳搭配为  $175\text{ W}$ ,  $2\text{ mm/s}$ ,  $10\text{ }\mu\text{m}$ ,  $120\text{ r/s}$ ,此时石英玻璃的表面粗糙度为  $0.262$ .激光热辅助磨削可以改善石英玻璃的表面磨削质量,实现石英玻璃的塑性域磨削,减轻砂轮磨损.

## 参考文献:

- [ 1 ] Arora A, Marshall D B, Lawn B R, et al. Indentation deformation/fracture of normal and anomalous glasses[ J ]. *Journal of Non-Crystalline Solids*,1979,31( 3 ):415 – 428.
- [ 2 ] 周林,戴一帆,解旭辉,等. 光学镜面离子束加工的可达性[ J ]. 光学精密工程,2007,15( 2 ):160 – 166.  
( Zhou Lin, Dai Yi-fan , Xie Xu-hui H, et al. Machining reachability in ion beam figuring[ J ]. *Optics and Precision Engineering*,2007,15( 2 ):160 – 166. )
- [ 3 ] 张峰,张斌智. 磁流体辅助抛光工件表面粗糙度研究[ J ]. 光学精密工程,2005,13( 1 ):34 – 39.  
( Zhang Feng, Zhang Bin-zhi. Surface roughness of optical elements fabricated by magnetic fluid assisted polishing[ J ]. *Optics and Precision Engineering*,2005,13( 1 ):34 – 39. )
- [ 4 ] Ngoi B K A, Sreejith P S. Ductile regime finish machining—a review [ J ]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2000,16:547 – 550.
- [ 5 ] 焦俊科,王新兵.  $\text{CO}_2$  激光作用下运动石英玻璃的温度分布[ J ]. 强激光与粒子束,2007,19( 1 ):1 – 4.  
( Jiao Jun-ke, Wang Xin-bing. Temperature distribution of moving quartz glass heated by  $\text{CO}_2$  laser[ J ]. *High Power Laser and Particle Beams*,2007,19( 1 ):1 – 4. )
- [ 6 ] Konig W, Zaboklicki A K. Laser-assisted hot machining of ceramics and composite materials [ C ]// Proceeding of Conference on Machining of Advanced Materials. Beijing, 1993 :455 – 463.
- [ 7 ] Jau B M. Laser assisted machining[ J ]. *American Society of Manufacturing Engineers*,1993( 6 ):80 – 86.
- [ 8 ] Bifano T G, Dow T A, Scattergood R O. Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials [ J ]. *Transactions of the ASME: Journal of Engineering for Industry*,1991,113:184 – 189.
- [ 9 ] Michel M D, Serbena F C, Lepienski C M. Effect of temperature on hardness and indentation cracking of fused silica [ J ]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, 352: 3550 – 3555.
- [ 10 ] Lee T C, Chan C W. Mechanism of the ultrasonic machining of ceramic composites[ J ]. *Journal of Materials Processing Technology*,1997,71( 2 ):195 – 201.