

文章编号 1004-924X(2016)01-0083-11

石英玻璃的热辅助高效塑性域干磨削

王 伟,姚 鹏*,王 军,黄传真,朱洪涛

(1. 山东大学 机械工程学院 先进射流工程技术研究中心,山东 济南 250061;

2. 高效洁净机械制造教育部重点实验室,山东 济南 250061)

摘要: 为了提高大口径石英玻璃光学元件的加工效率,提出了热辅助塑性域超精密磨削石英玻璃的新方法。分析了石英玻璃的热辅助塑性域磨削机理,通过理论推导得出磨削深度对磨削区表面最高温升的影响规律。采用陶瓷结合剂立方氮化硼(CBN)砂轮对石英玻璃进行干磨削,利用磨削热改善磨削区石英玻璃的力学性能,实现了石英玻璃的高效塑性域磨削。通过磨削实验研究了不同磨削深度对石英玻璃表面粗糙度(R_a)和亚表面损伤深度的影响。实验结果表明,随着磨削深度的增加, R_a 和亚表面损伤深度反而降低。当磨削深度为 $5\ \mu\text{m}$,大于粗磨表面的裂纹深度时,获得了 R_a 值为 $0.07\ \mu\text{m}$ 的光滑无裂纹的塑性域磨削表面。通过扫描电镜观察研究了砂轮的磨损机理,结果显示陶瓷结合剂 CBN 砂轮塑性域干磨削石英玻璃时,砂轮以磨耗磨损为主,该结果为研究新型的陶瓷结合剂 CBN 砂轮提供了依据。

关键词: 石英玻璃;塑性域磨削;热辅助磨削;磨削温度

中图分类号: TQ171.731; TN305.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162401.0083

Heat-assisted high efficiency ductile dry grinding of fused silica

WANG Wei, YAO Peng*, WANG Jun, HUANG Chuan-zhen, ZHU Hong-tao

(1. Center for Advanced Jet Engineering Technologies,

School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of the
Ministry of Education, Jinan 250061, China)

* Corresponding author, E-mail: yaopeng@sdu.edu.cn

Abstract: To improve the machining efficiency of fused silica optical elements with large diameters, this paper presents a method for heat-assisted ductile ultra-precision grinding of the fused silica. The mechanism of heat-assisted ductile grinding for the fused silica was analyzed, and the effect of different grinding depths on the highest temperature rise on the surface of the grinding zone was investigated by theoretical inference. The fused silica was ground in dry method by a high temperature resistant ceramic bond Cubic Boron Nitride(CBN) wheel and the high efficiency ductile grinding of fused silica was realized by using grinding heat to improve the mechanical properties of fused silica in the grinding zone. Through the grinding experiment, the effect of different grinding depths on the surface roughness(R_a) and sub-surface damage depth of fused silica was investigated. The experiment results show that the R_a and sub-surface damage depth are reduced with the increase of grinding

收稿日期:2015-05-15;修订日期:2015-06-20.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 51305237)

depth. When the grinding depth is greater than the crack depth ($5 \mu\text{m}$) by coarse grinding, smooth and no crack surface of ductile grinding with the $R_a 0.07 \mu\text{m}$ can be achieved. The mechanism of wheel wear was studied by a scanning electron microscope. The results show that the wear mechanism of ceramic bond CBN wheel ductile grinding of the fused silica is grain flattened, which provides the basis for researching a new type of ceramic bond CBN grinding wheel for dry grinding of the fused silica.

Key words: fused silica; ductile grinding; heat-assisted grinding; grinding temperature

1 引言

石英玻璃是指高纯度的二氧化硅非晶体,具有结构均匀、透光性好、可透射的光谱频带宽、热膨胀系数小、抗热震性好、化学性质稳定和抗激光损伤能力强等优点,被广泛应用于半导体光刻设备、大功率激光器和太空望远镜等透射和反射型光学系统^[1]。但是,石英玻璃的断裂韧性差,硬度高,属于难加工材料。

为获得超精密石英玻璃光学元件,一般采用先铣磨成型后研磨抛光的方法。铣磨成型后的石英玻璃表面存在微裂纹,需要通过后续的抛光加工对微裂纹进行去除,但是抛光加工的材料去除量小,加工效率低,抛光时间要占整个生产周期的 60%^[2-3]。如可以通过塑性域磨削加工获得光滑无损伤的石英玻璃表面,则可有效减小抛光时间,大幅度提高生产效率。

理论上,当磨削时的未变形切屑厚度小于材料的脆塑转变临界深度时,可以实现塑性域磨削。利用斜面磨削的方法在无损伤的石英玻璃表面进行塑性域磨削实验,发现脆塑转变临界磨削深度为 $0.2 \mu\text{m}$,对应的未变形切屑厚度为 24 nm ^[4]。但是,对于经过脆性域粗磨的石英玻璃,表面存在微观裂纹,在潮湿环境中裂纹极易扩展^[5],常温下即使未变形切屑厚度小于脆塑转变临界深度,也难以实现塑性域磨削。

众多学者尝试多种方法研究石英玻璃的塑性域磨削,如采用超细磨料砂轮磨削^[6]、在线电解修锐(ELID)磨削^[7]、采用大颗粒磨钝磨粒砂轮磨削^[8]、采用化学机械磨削提高石英玻璃脆塑转变临界深度^[9]等方法。这些方法都通过塑性域材料去除模式对石英玻璃进行磨削,有效降低了石英

玻璃的表面粗糙度和亚表面损伤深度,但加工表面仍存在裂纹。

Marshall 应用压痕实验法研究表明^[10],材料的脆塑转变临界切深与材料的杨氏模量 E 、临界断裂韧性的平方 K_{IC}^2 成正比,与硬度的三次方 H^3 成反比。Michel 通过高温纳米压痕实验研究表明^[11],温度从 20°C 上升至 400°C 时,石英玻璃的维氏硬度从 7.3 GPa 降低为 4.2 GPa ,降低 42%。而弹性模量和断裂韧性随温度变化不大。由于实验条件的限制,该学者没有研究更高温度下石英玻璃力学性能的变化。但是由此推测,石英玻璃的硬度随温度升高有显著下降的趋势。因此在高温环境下,石英玻璃的脆塑转变临界深度应该比常温时有显著提高。石英玻璃的高温物理和化学性质稳定,退火点为 1200°C ,软化点高达 1600°C ;高温下不会发生氧化反应,即使在很高的磨削温度下也不会发生烧伤。

本文提出采用陶瓷结合剂 CBN 砂轮对石英玻璃进行干磨削,避免了水基磨削液促进裂纹扩展,同时利用磨削热使石英玻璃表面温度升高,改善石英玻璃的力学性能,使石英玻璃的脆塑转变临界磨削深度从亚微米增大至数微米,在微米级的磨削深度对石英玻璃进行磨削加工,大幅提高磨削效率的同时,获得光滑无裂纹的石英玻璃表面,实现了石英玻璃的高效塑性域超精密加工。

2 热辅助塑性域磨削温度的理论分析

为了分析 CBN 砂轮干磨削石英玻璃时磨削参数对磨削区温度的影响,采用贝季瑶^[12]提出的三角形分布热源模型对磨削温度场进行分析。磨削过程中,将砂轮与石英玻璃接触区看作是平均发热功率为的带状热源,热源长度为砂轮与工件的接触弧长 l 。带状热源以速度 v_w (m/s) (工作台进给速度) 在 y 轴运动,磨削区任意位置处的热

源功率为:

$$q(y') = 2\bar{q}\left[1 - \frac{y'}{l}\right]. \quad (1)$$

任一点的磨削温升为:

$$\theta_{(y,z)} = \frac{\bar{q}\sqrt{y}}{\sqrt{k_w(c\rho)_w}\sqrt{\pi}\sqrt{v_w}} \cdot \left[4 - \frac{8}{3} \cdot \frac{y}{l} - \frac{2}{3} \cdot \frac{v_w z^2}{k_w l}\right] e^{\frac{z^2 v_w}{4k_w y}} + \frac{\bar{q}z}{k_w(c\rho)_w} \left[\frac{v_w z^2}{3k_w l} - 2\left(1 - \frac{y}{l}\right)\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{z\sqrt{v_w}}{\sqrt{4k_w y}}\right], \quad (2)$$

式中: c 为比热容; ρ 为密度; k 为导热系数, $k = \frac{\lambda}{c\rho}$, λ 为导热系数。 w 表示工件, 即石英玻璃。

$\operatorname{erfc}(s)$ 为误差补偿函数。

在 $z=0, y=\frac{l}{2}$ 处得到磨削区最高温升:

$$\theta_{\max} = \frac{4\sqrt{2}\bar{q}}{3(\sqrt{k\rho})_w\sqrt{\pi}\sqrt{v_w}} \sqrt{\frac{l}{v_w}}. \quad (3)$$

砂轮与工件接触弧长 l 为:

$$l = \sqrt{\Delta \cdot D}, \quad (4)$$

式中: Δ 为磨削深度; D 为砂轮直径。代入式(3)得:

$$\theta_{\max} = 1.06 \frac{\bar{q}\Delta^{\frac{1}{4}} D^{\frac{1}{4}}}{(k^{\frac{1}{2}} c\rho)_w v_w^{\frac{1}{4}}}. \quad (5)$$

在磨削加工中, 认为切向磨削力 F_t 由两部分组成^[14]:

$$F_t = F_{tc} + F_{ts}, \quad (6)$$

式中: F_{tc} 为切屑变形引起的切向力; F_{ts} 为摩擦引起的切向力。对于磨削热的产生, 大部分作用来源于 F_{ts} 。

谢桂芝等人^[15]建立了基于单颗磨粒的塑性域磨削硬脆材料的单位宽度磨削力模型, 单位宽度由摩擦引起的切向磨削力 F'_{ts} 为:

$$F'_{ts} = 4\mu N S \bar{p} a \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{\Delta}{D}}, \quad (7)$$

式中: s 表示砂轮; N 为砂轮单位体积磨粒数; μ 为磨粒顶部与工件之间的摩擦系数; S 为单颗工作磨粒的顶面积; a 为连续切削磨刃间距; \bar{p} 为磨粒磨钝平面与工件表面间的平均接触压强, 等于单颗磨粒法向力 F_{gnc} 与单颗磨粒面积 S 的比值^[16], 即:

$$\bar{p} = \frac{F_{gnc}}{S} = \frac{4\eta\xi\tan^2\alpha H\alpha^2 \frac{v_w^2 \Delta}{v_s^2 D}}{S}, \quad (8)$$

式中: η 为介于 0~1 之间的常数, 可由压痕实验确定; ξ 为压头的几何形状系数, 对于维氏压头 $\xi=2$; H 为工件的硬度; α 为磨粒顶半角。代入式(7), 可得:

$$F'_{ts} = 16\mu N \eta \xi \tan^2 \alpha H \alpha^3 \frac{v_w^2 \Delta^2}{v_s^3 D}. \quad (9)$$

磨削区总热流密度 q_t 为^[17]:

$$q_t = \frac{F'_{ts} v_s}{l}. \quad (10)$$

干磨削条件下, 流入工件的热流密度比例为 ϵ , 采用 Rowe 的热流分配模型计算^[18]:

$$\epsilon = \left[1 + \sqrt{\frac{v_s'(k\rho c)_s}{v_w'(k\rho c)_w}}\right]^{-1}. \quad (11)$$

可计算出平均热流密度:

$$\bar{q} = \epsilon q_t = \left[1 + \sqrt{\frac{v_s'(k\rho c)_s}{v_w'(k\rho c)_w}}\right]^{-1} \cdot \mu N \eta \xi \tan^2 \alpha H \alpha^3 \frac{v_w^3 \Delta^{\frac{3}{2}}}{v_s^2 D^{\frac{3}{2}}}. \quad (12)$$

代入式(5), 得到磨削表面最大温升与磨削参数之间的关系:

$$\theta_{\max} = 16.96 \left[1 + \sqrt{\frac{v_s'(k\rho c)_s}{v_w'(k\rho c)_w}}\right]^{-1} \cdot \frac{\mu N \eta \xi \tan^2 \alpha H \alpha^3 v_w^{\frac{5}{4}} \Delta^{\frac{7}{4}}}{(k^{\frac{1}{2}} c\rho)_w D^{\frac{5}{4}} v_s^2}. \quad (13)$$

为了在高温状态下将粗磨阶段形成的裂纹一次性去除, 需要采用大磨削深度对石英玻璃进行磨削, 同时可以大幅度提高加工效率。因此, 主要研究磨削深度对石英玻璃磨削区表面最高温升的影响。在确定的工作台进给速度 v_w 和砂轮线速度 v_s 下, 设:

$$\theta = \left[1 + \sqrt{\frac{v_s'(k\rho c)_s}{v_w'(k\rho c)_w}}\right]^{-1} \cdot \frac{\mu N \eta \xi \tan^2 \alpha H \alpha^3 v_w^{\frac{5}{4}}}{(k^{\frac{1}{2}} c\rho)_w D^{\frac{5}{4}} v_s^2}.$$

则式(13)可以写成:

$$\theta_{\max} = 16.96 \Theta \cdot \Delta^{\frac{7}{4}}. \quad (14)$$

式中所有参数采用国际制单位。图 1 是由式(14)做出的 CBN 砂轮干磨削石英玻璃时, 工件表面最高温升随磨削深度变化趋势, 其中纵坐标表示参数 Θ 的倍数。当砂轮线速度、工件进给速

度固定时,工件表层最高温升随磨削深度呈指数上升。随着磨削深度的增加,石英玻璃表面温度显著增大。采用大磨削深度对石英玻璃进行干磨削,可以利用磨削热使工件表面温度升高,从而改善力学性能,使脆塑转变临界深度增加,同时可以大幅度地提高材料去除效率,实现石英玻璃的高效塑性域磨削。

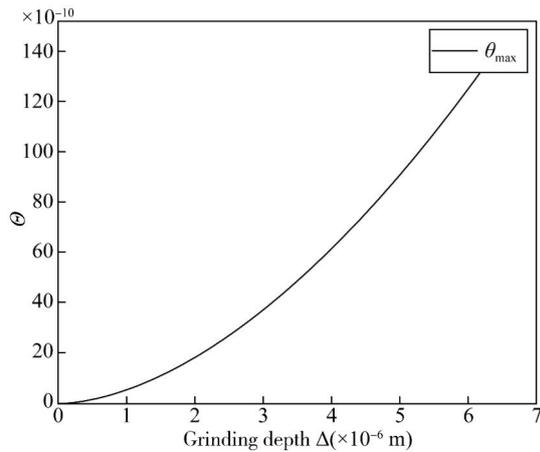


图 1 磨削区表层最高温升随磨削深度变化趋势图

Fig. 1 Highest temperature rise of surface in grinding zone with the grinding depth

3 石英玻璃的磨削实验

实验所用试样为 ZS1 型高纯度合成石英玻璃,应用的波长为 $0.175 \sim 2.5 \mu\text{m}$,尤其适合应用于紫外光投射,常温下主要力学热学性能如表 1 所示。实验前对石英玻璃试样进行抛光处理,保证试样表面粗糙度 R_a 小于 1 nm ,表面和亚表面无损伤。

表 1 ZS1 型高纯度合成石英玻璃常温力学热学性能表

Tab. 1 Mechanical and thermal properties of ZS1

密度 g/cm^3	杨氏模量		努氏硬度		断裂韧性	热传导率	热膨胀系数
	/GPa	泊松比	/GPa		$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$	$1/\text{K}$
2.201	70	0.17	6.1		0.79	1.4	5×10^{-7}

实验在美国摩尔公司的 Nanotech 350 超精密加工中心上完成,磨头使用高速空气静压主轴,最高转速为 $60\,000 \text{ rpm}$,轴向和径向跳动小于

25 nm 。磨削实验所用砂轮为磨粒平均粒径为 $10 \mu\text{m}$ 的陶瓷结合剂 CBN 砂轮,砂轮直径为 20 mm ,有效磨削宽度为 3 mm 。实验前用平均磨粒粒径为 $5 \mu\text{m}$ 的氧化铝修整块对实验用砂轮进行精密修整,修整装置如图 2 所示,修整参数如表 2 所示。修整后砂轮的外圆跳动误差小于 $1 \mu\text{m}$,截面形状误差小于 $2 \mu\text{m}$ 。修整后调节砂轮动平衡,保证在实验要求转速下砂轮振幅小于 2 nm 。

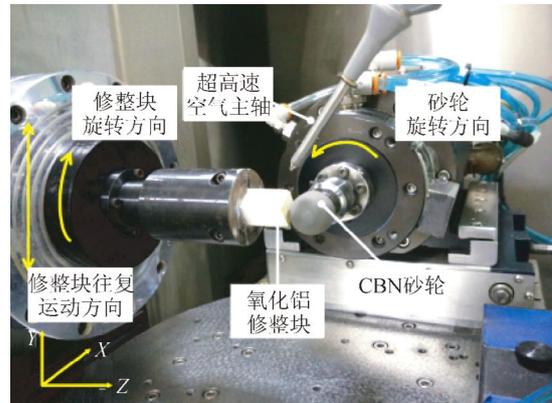


图 2 CBN 砂轮精密修整装置图

Fig. 2 Setup of precision dressing CBN wheel

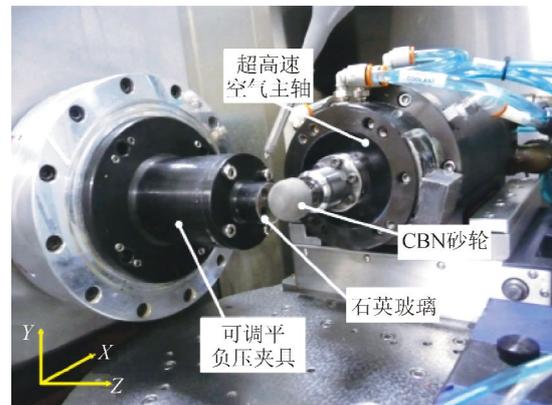


图 3 磨削实验装置

Fig. 3 Setup of grinding experiments

表 2 CBN 砂轮精密修整参数

Tab. 2 Experimental parameters of precision dressing

砂轮线速度 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	修整块最大线速度 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	修整磨削深度 $/\mu\text{m}$	工作台 Y 轴进给速度 $/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
5	1.57	1	200

表 3 磨削实验参数

Tab. 3 Parameters of grinding experiments

序号	冷却方式	磨削深度 / μm	砂轮线速度 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	进给速度 / $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
粗磨	油冷	1	21	400
1	干磨	$0.1 \times 30 = 3$	21	200
2	干磨	2	21	200
3	干磨	3	21	200
4	干磨	5	21	200

砂轮修整达到实验要求后,首先对石英玻璃进行粗磨,磨削过程中使用异构烷烃溶剂微量冷却,然后在粗磨后的表面上进行热辅助干磨削实验。实验装置如图 3 所示。具体实验参数如表 3 所示。

磨削实验结束后用扫描电镜(SEM)对石英玻璃表面进行观察,并用 3D 激光共焦显微镜测量表面粗糙度。为了测量石英玻璃的亚表面损伤深度,用抛光工具在石英玻璃表面加工出一道沟痕,直到暴露出完全光滑无损的表面。如图 4 所示,通过用 3D 激光共焦显微镜测量存在裂纹的抛光过渡面深度来确定石英玻璃亚表面损伤深度(SSD)。

为了研究陶瓷结合剂 CBN 砂轮塑性域干磨削石英玻璃的磨损机理,对修整后和磨削后砂轮的地貌进行了扫描电镜观察。

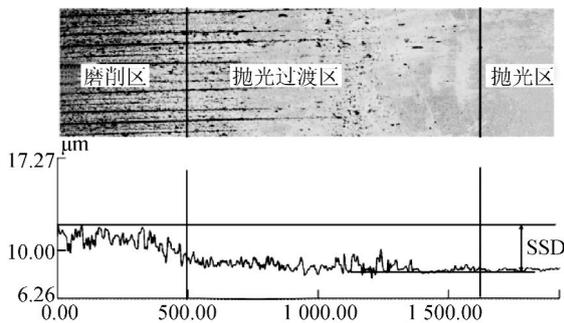


图 4 抛光法测量亚表面损伤深度示意图

Fig. 4 Depth of SSD measured by polishing method

4 实验结果与分析

4.1 热辅助干磨削石英玻璃结果分析

在磨削过程中,实际影响材料脆塑转变的直

接参数是未变形切屑厚度。当未变形切屑厚度小于材料的脆塑转变临界深度时才可以进行塑性域磨削。在平面磨削中,砂轮的磨削深度和未变形切屑厚度存在以下关系^[15]:

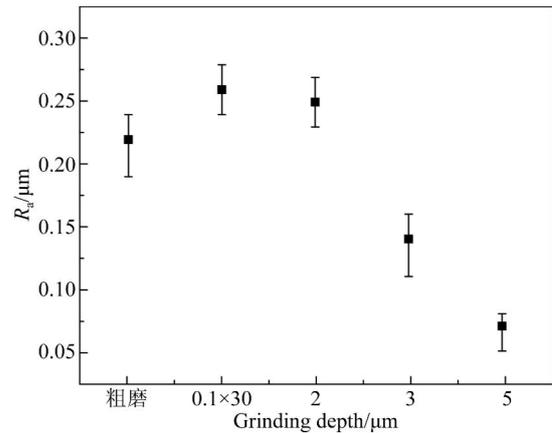
$$g_m = 2a \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{\Delta}{D}}, \quad (15)$$

式中: g_m 为未变形切屑厚度; Δ 为磨削深度; a 为连续切削磨刃间距; v_w 为工作台进给速度; v_s 为砂轮线速度。可计算出本实验磨削深度所对应的未变形切屑厚度,如表 4 所示。

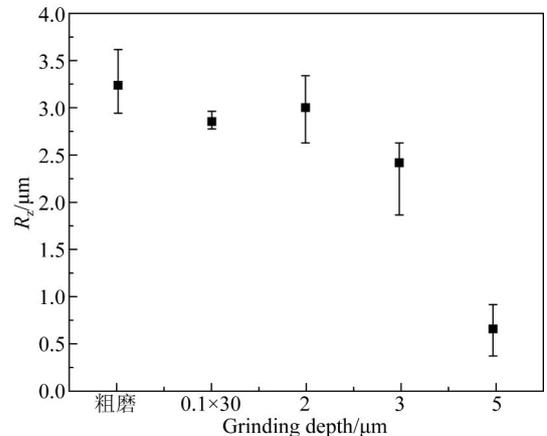
表 4 磨削实验未变形切屑厚度

Tab. 4 Undeformed chip thickness of grinding experiments

	粗磨	1	2	3	4
磨削深度 $\Delta/\mu\text{m}$	1	0.1	2	3	5
未变形切屑厚度/nm	45	7	31	39	50



(a) R_a



(b) R_q

图 5 磨削实验后石英玻璃表面粗糙度

Fig. 5 Roughness of fused silica surface after grinding

图 5 所示为通过 3D 激光共焦显微镜测量的磨削表面粗糙度分布图。图 6 所示为通过抛光法测量的磨削表面亚表面损伤深度分布图。表面粗糙度随机测量 3 次后取平均值。亚表面损伤深度值随机测量 3 次,取最大值。从图中可以看出,干磨削时,随着磨削深度的增加,石英玻璃表面粗糙度和亚表面损伤深度反而减小;和粗磨表面相比,当磨削深度小于或等于 $2\ \mu\text{m}$ 时,表面粗糙度值和亚表面损伤深度变化不大,当磨削深度超过 $3\ \mu\text{m}$ 时显著减小。

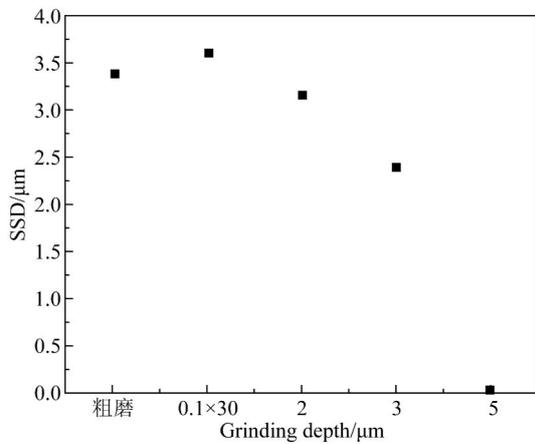
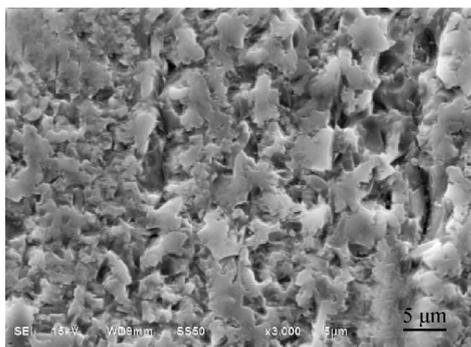
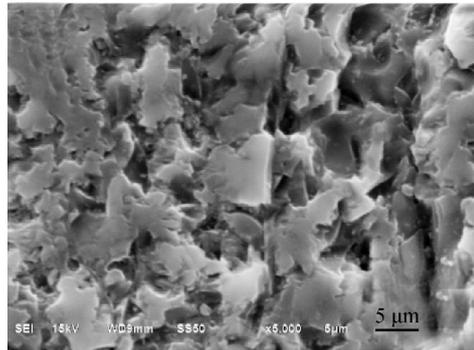


图 6 磨削实验后石英玻璃亚表面损伤深度 SSD
Fig. 6 SSD of fused silica surface after grinding

图 7 所示为加异构烷烃溶剂微量辅助冷却对石英玻璃进行粗磨后获得表面的 SEM 照片。在此磨削参数下,对应的未变形切屑厚度为 $45\ \text{nm}$ 。从图中可以看出,表面存在大量的微裂纹,裂纹分布均匀,看不出明显的磨削纹理,呈典型的脆性域磨削特征。表面粗糙度 R_a 为 $0.22\ \mu\text{m}$, R_z 为 $3.27\ \mu\text{m}$,亚表面损伤深度为 $3.38\ \mu\text{m}$ 。



(a)放大 3 000 倍
(a)Magnification of 3 000

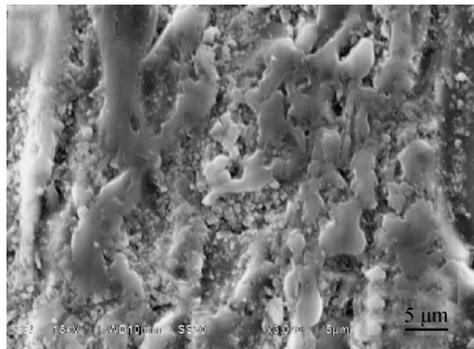


(b)放大 5 000 倍
(b)Magnification of 5 000

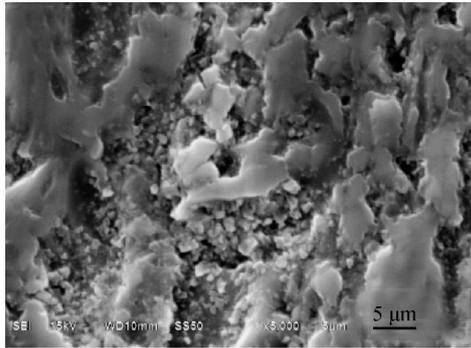
图 7 微量冷却粗磨后石英玻璃表面 SEM 照片(磨削深度 $1\ \mu\text{m}$)

Fig. 7 SEM photographs of fused silica after coarse grinding (grinding depth $1\ \mu\text{m}$)

图 8 所示为干磨削石英玻璃,每次磨削深度 $0.1\ \mu\text{m}$ 累计磨削 $3\ \mu\text{m}$ 后获得表面的 SEM 扫描照片。从图中虽然可以观察到不太明显的磨削纹理,但是仍然存在大量的微裂纹损伤,属于脆性域磨削区。表面粗糙度 R_a 为 $0.26\ \mu\text{m}$, R_z 为 $2.88\ \mu\text{m}$,亚表面损伤深度为 $3.60\ \mu\text{m}$ 。本实验中磨削深度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 时,对应的未变形切屑厚度为 $7\ \text{nm}$,远小于引文 4 中实验得到的石英玻璃脆塑转变临界未变形切屑厚度,但是仍然没有实现塑性域磨削。通过理论分析,磨削深度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 时磨削区温升较小。另外, $0.1\ \mu\text{m}$ 的磨削深度远小于粗磨在石英玻璃表面造成的亚表面损伤深度,无法将已经存在的微裂纹一次完全去除,磨削力的作用反而促进了微裂纹进一步扩展。所以,累计磨削 $3\ \mu\text{m}$ 后,亚表面损伤深度不但没有减小反而有所增大。



(a)放大 3 000 倍
(a)Magnification of 3 000



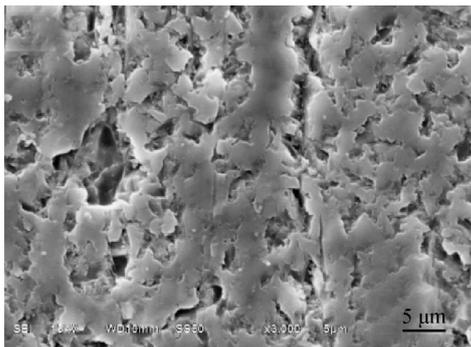
(b)放大 5 000 倍

(b)Magnification of 5 000

图 8 热辅助干磨削后石英玻璃表面 SEM 照片(磨削深度 0.1 μm, 累计磨削 3 μm)

Fig. 8 SEM photographs of fused silica after dry grinding (grinding depth 0.1 μm)

削石英玻璃获得表面的 SEM 扫描照片。此磨削参数下的未变形切屑厚度为 31 nm。从图中可以分辨出磨削纹理,和使用异构烷烃溶剂冷却的磨削表面相比,裂纹数量明显减少。通过测量,表面粗糙度 R_a 为 $0.25 \mu\text{m}$, R_z 为 $3.03 \mu\text{m}$,亚表面损伤深度为 $3.15 \mu\text{m}$ 。通过理论分析,磨削深度为 $2 \mu\text{m}$ 时磨削热对石英玻璃的力学性能起到了一定的改善作用,所以表面微裂纹数量显著减少。但是由于磨削深度仍然小于粗磨阶段形成的亚表面损伤深度,无法将已经存在的裂纹全部去除,磨削力仍会促进裂纹的扩展。所以表面质量和亚表面损伤没有得到显著改善,仍然呈脆性域磨削表面。

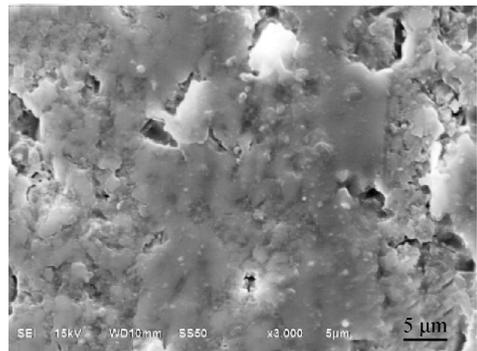


(a)放大 3 000 倍

(a)Magnification of 3 000

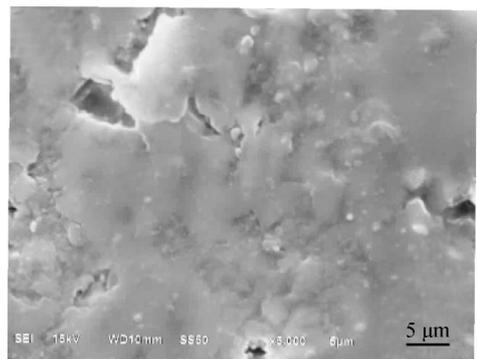
图 9 热辅助干磨削后石英玻璃表面 SEM 照片(磨削深度 2 μm)

Fig. 9 SEM photographs of fused silica after dry grinding (grinding depth 2 μm)



(a)放大 3 000 倍

(a)Magnification of 3 000



(b)放大 5 000 倍

(b)Magnification of 5 000

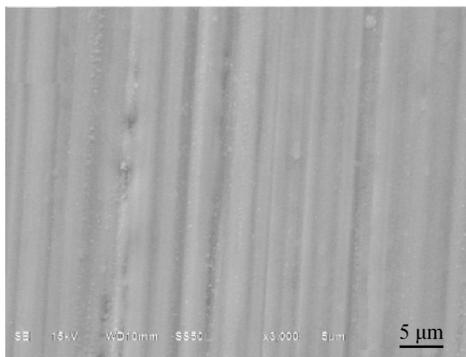
图 10 热辅助干磨削后石英玻璃表面 SEM 照片(磨削深度 3 μm)

Fig. 10 SEM photographs of fused silica after dry grinding (grinding depth 3 μm)

图 9 所示为磨削深度为 2 μm 时热辅助干磨

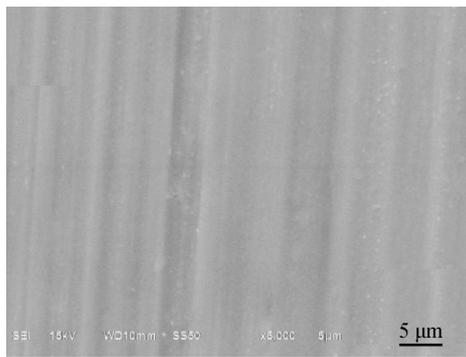
图 10 所示为磨削深度为 3 μm 时热辅助干磨削石英玻璃获得表面的 SEM 扫描照片。此磨

削参数下的未变形切屑厚度为 39 nm。从图中可以看出,表面裂纹数量明显减少,大部分区域出现了无裂纹的光滑区域,中间夹杂着少量的裂纹损伤区。通过测量,表面粗糙度 R_a 为 $0.14 \mu\text{m}$, R_z 为 $2.45 \mu\text{m}$,亚表面损伤深度为 $2.38 \mu\text{m}$ 。通过理论分析,磨削深度为 $3 \mu\text{m}$ 时,磨削热对石英玻璃的力学性产生了明显的改善。磨削深度已接近粗磨阶段形成的亚表面损伤深度。虽然表面仍然存在裂纹损伤,但是已经开始呈现出明显的塑性域磨削特征,表面粗糙度和亚表面损伤深度也明显降低。



(a)放大 3 000 倍

(a) Magnification of 3 000



(b)放大 5 000 倍

(b) Magnification of 5 000

图 11 热辅助干磨削后石英玻璃表面 SEM 照片(磨削深度 $5 \mu\text{m}$)

Fig. 11 SEM photographs of fused silica after dry grinding (grinding depth $5 \mu\text{m}$)

图 11 所示为热辅助干磨削石英玻璃,磨削深度为 $5 \mu\text{m}$ 时的 SEM 扫描照片。在此磨削深度下对应的未变形切屑厚度为 50 nm。表面光滑无裂纹,存在明显的磨削纹理,呈典型的延性域磨削

特征。石英玻璃脆性域-塑性域转变的研究结果表明,利用氢氟酸腐蚀延性域磨削后的石英玻璃,通过延性域磨削获得的无表面损伤的石英玻璃,也不存在亚表面损伤^[4]。通过测量,表面粗糙度 R_a 为 $0.07 \mu\text{m}$, R_z 为 $0.66 \mu\text{m}$ 。通过理论分析,磨削深度为 $5 \mu\text{m}$ 时,磨削热对石英玻璃的力学性有明显的改善,且磨削深度大于粗磨阶段形成的亚表面损伤深度,在高温状态下一次将已经存在的裂纹损伤完全去除,获得光滑无裂纹的延性域磨削表面。

由此可见,利用磨削热辅助干磨削石英玻璃,可以将石英玻璃的塑性域磨削深度从 $0.2 \mu\text{m}$ 提高到 $5 \mu\text{m}$,磨削效率提高 25 倍。

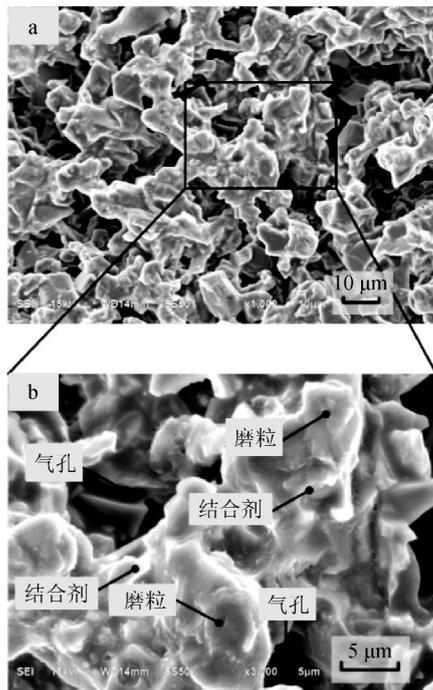
根据以上的实验结果与分析,总结石英玻璃的热辅助塑性域磨削,需要满足两个必要条件:磨削区温度显著升高且未变形切屑厚度小于对于磨削温度下的脆塑转变临界深度;磨削深度大于前一道工序形成的亚表面损伤深度。

4.2 CBN 砂轮塑性域干磨削石英玻璃磨损机理研究

采用耐高温的陶瓷结合剂 CBN 砂轮对石英玻璃进行热辅助干磨削实验。金刚石和 CBN 是常用的超硬砂轮磨粒材料,金刚石砂轮常用于光学玻璃的磨削,但金刚石的性质受温度影响较大,从 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 开始硬度快速下降,温度高于 $650 \text{ }^\circ\text{C}$ 容易发生氧化反应,在 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 时硬度已经低于 CBN。CBN 常温下硬度仅次于金刚石,其化学稳定性和耐高温性都要优于金刚石,研究表明可以在 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温下仍然保持很高的硬度^[18]。本实验采用的陶瓷结合剂,主要成分为 Al-O-Si 微晶玻璃,同时添加了少量 Na、B 等降低软化点的辅料。

为了研究塑性域干磨削石英玻璃后 CBN 砂轮的磨损机理,对磨削前后砂轮的地貌进行了扫描电镜观察。观察前将砂轮放入酒精中超声清洗 30 min,去除磨削后附着在砂轮上的磨屑。

图 12 所示为精密修整后陶瓷结合剂 CBN 砂轮表面地貌的 SEM 照片。陶瓷结合剂砂轮具有较高的气孔率。砂轮表面磨粒突出数量多并且具有一定的出刃高度,突出磨粒的形状锋利。



(a. 放大 1 000 倍 b. 放大 3 000 倍)

(a. Magnification of 1 000 b. Magnification of 3 000)

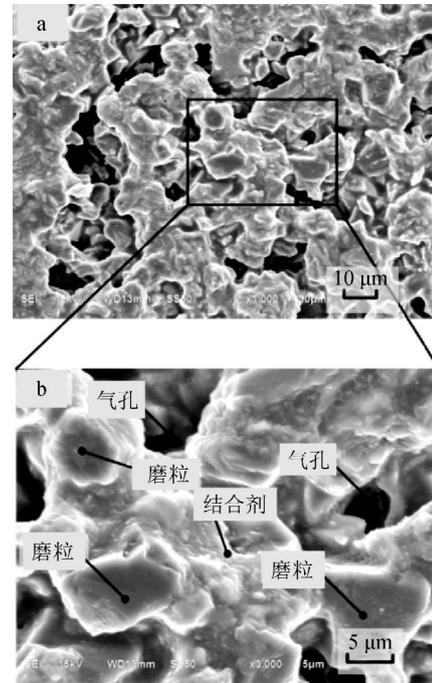
图 12 精密修整后 CBN 砂轮地貌 SEM 照片

Fig. 12 CBN wheel topographies after precision dressing

图 13 所示为 CBN 砂轮塑性域干磨削石英玻璃,磨削深度为 $5\ \mu\text{m}$,材料去除量为 $2\ \text{mm}^3$ 后砂轮表面地貌的 SEM 照片。图中砂轮气孔率显著下降。由图 5 可知,干磨时磨削区温度高,虽然石英玻璃的力学性能得到改善,但由于石英玻璃软化点高($1\ 200\ ^\circ\text{C}$),化学性质稳定,所以并未发生黏塑性变形和烧伤现象。砂轮观察前经过超声清洗,去除了磨削后砂轮上附着的石英玻璃磨屑。所以判断是由于磨削区温度升高,使结合剂中的低软化点材料发生软化,导致了砂轮表面气孔率降低。图中没有发现明显的结合剂断裂、磨粒脱落现象,磨粒出现磨钝平面,以磨耗磨损为主。由于陶瓷结合剂结合强度高,在塑性域磨削石英玻璃时,砂轮没有表现出明显的自锐性。

所以,陶瓷结合剂 CBN 砂轮塑性域干磨削石英玻璃时砂轮以磨耗磨损为主。为减少砂轮修整次数,保证塑性域磨削持续进行,还需通过提高气孔率、升高结合剂熔点以及提高自锐性来改善陶

瓷结合剂 CBN 砂轮的耐高温性能。



(a. 放大 1 000 倍 b. 放大 3 000 倍)

(a. Magnification of 1 000 b. Magnification of 3 000)

图 13 塑性域磨削石英玻璃后 CBN 砂轮磨损地貌 SEM 照片

Fig. 13 CBN wheel topographies after ductile dry grinding

5 结 论

本文采用陶瓷结合剂 CBN 砂轮干磨削石英玻璃,利用磨削热改善石英玻璃的力学性能,将石英玻璃的塑性域磨削深度从 $0.2\ \mu\text{m}$ 提高到 $5\ \mu\text{m}$,获得表面粗糙度 R_a 为 $0.07\ \mu\text{m}$ 的光滑无裂纹塑性域磨削表面,磨削效率提高了 25 倍。

石英玻璃的热辅助塑性域磨削,要满足两个必要条件:磨削区温度显著升高且未变形切屑厚度小于所处磨削温度下的脆塑转变临界深度;磨削深度大于前一道工序形成的亚表面损伤深度。

陶瓷结合剂 CBN 砂轮对石英玻璃进行塑性域干磨削时,砂轮磨损以磨耗磨损为主,结合剂的软化导致气孔率降低。因此,还需进一步改善 CBN 砂轮的自锐性和耐高温性能。

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 X G, ZHAI C H, ZHANG L, *et al.*. Nano-processing performance of optical glass [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2959-2966. (in Chinese)
- [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 L, DAI Y F, XIE X H, *et al.*. Material removal property in ion figuring process for optical component [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 160-166. (in Chinese)
- [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 F, ZHANG B ZH. Nano-processing performance of optical glass [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2959-2966. (in Chinese)
- [4] YAO P, YOSHIHARA N, HITOMI N, *et al.*. Ductile and brittle mode grinding of fused silica[J]. *Key Engineering Materials*, 2010, 447-448:21-25.
- [5] GROSS T M, TOMOZAWA M. Crack-free high load Vickers indentation of silica glass[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008, 354(354): 5567-5569.
- [6] 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.
- [7] ZHAO Q, LIANG Y, STEPHENSON D, *et al.*. Surface and subsurface integrity in diamond grinding of optical glasses on Tetraform 'C'[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, 2007, 47(14):2091-2097.
- [8] 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 Q L, ZHAO L L, WANG Y, *et al.*. High efficient precision conditioning of the electroplated diamond wheel and grinding of fused silica glasses [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(23): 174-181. (in Chinese)
- [9] 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, 26(5): 982-987.
QIU ZH J, YI P, LU C, *et al.*. Mechanical property analysis of modified auartz glass[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2013, 26(5): 982-987. (in Chinese)
- [10] DAVID B M, BRIAN R L, ROBERT F C. Microstructural effects on grinding of alumina and glass-ceramics [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, 70(6):C-139-C-140.
- [11] 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(s 32-35): 3550-3555.
- [12] 贝季瑶. 磨削温度的分析与研究[J]. 上海交通大学学报, 1964, 9: 55-71.
BEI J Y. Analysis and investigation of the grinding temperature [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1964, 9: 55-71. (in Chinese)
- [13] LI L, FU J, PEKLENIK J. A study of grinding force mathematical model [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1980, 29(1):245-249.
- [14] 谢桂芝, 尚振涛, 盛晓敏, 等. 工程陶瓷高速深磨磨削力模型的研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11):169-176.
XIE G ZH, SHANG ZH T, SHENG X M, *et al.*. Grinding force modeling for high-speed deep grinding of engineering ceramics [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(11): 169-176. (In Chinese)
- [15] 任敬心, 华安定, 等. 磨削原理[M]. 第1版, 西安: 西北工业大学出版社, 1988: 39.
REN J X, HUA A D, *et al.*. *Grinding Theory* [M]. Version 2, Xian: Northwestern Polytechnic University Press, 1988: 39. (in Chinese)
- [16] GUO C, MALKIN S. Analysis of transient temperatures in grinding [J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1995, 117(4):571-577.
- [17] ROWE W B, PETTIT J A, BOYLE A, *et al.*. Avoidance of Thermal Damage in Grinding and Prediction of the Damage Threshold [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1988, 37(1): 327-330.
- [18] 张旺玺, 卢金斌. 立方氮化硼材料的制备、性能及应用[J]. 中原工学院学报, 2011, 22(2): 25-28.

ZHANG W X, LU J B. Review on synthesis, properties and application of CBN based materials

[J]. *Journal of Zhongyuan University of Technology*, 2011, 22(2): 25-28. (in Chinese)

作者简介:



王伟(1988—),女,河北廊坊人,博士研究生,2011年于山东大学获得学士学位,主要研究方向为超精密磨削技术。E-mail: wangwei07@mail.sdu.edu.cn



姚鹏(1979—),男,辽宁大连人,博士,副教授,2005年于东北大学获得硕士学位,2011年于日本东北大学获得博士学位,主要研究领域为磨削与超精密加工技术。E-mail: yaopeng@sdu.edu.cn

导师简介:



王军(1961—),男,辽宁大连人,博士,国家“千人计划”特聘教授,1982年于大连工学院(现大连理工大学)获得学士学位,1993年于澳大利亚墨尔本大学获得博士学位,主要研究领域为精密、超精密及微纳加工技术。E-mail: jun.unsw@gmail.com