

激光诱导氧化铝陶瓷刀具的表面浸润性

杨奇彪, 肖晨光, 陈中培, 陈 列, 娄德元, 陶 青, 郑 重, 翟中生, 刘 顿, Bennett Peter*

湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068

摘要 利用飞秒激光处理陶瓷刀具表面,研究了脉冲能量和光斑重合度对其表面浸润性的影响。通过测定激光处理后的氧化铝陶瓷刀片表面的接触角来观察其浸润性。实验结果表明,飞秒激光可以改变陶瓷材料表面的润湿性能,通过选择合适的激光能量密度和光斑重合度,可以制备出超亲水表面和超亲水基切削液表面。水基切削液在激光处理过的表面上的润湿速度与接触角呈指数衰减关系。

关键词 激光技术; 浸润性; 飞秒激光; 陶瓷刀具

中图分类号 TG665 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.101401

Surface Wettability of Laser-Induced Al₂O₃ Ceramic Tools

Yang Qibiao, Xiao Chenguang, Chen Zhongpei, Chen Lie, Lou Deyuan, Tao Qing,
Zhen Zhong, Zhai Zhongsheng, Liu Dun, Bennett Peter

School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China

Abstract The effects of pulse energy and spot overlap ratio on the wettability of ceramic tools processed by femtosecond lasers are investigated. The wettability of the alumina ceramic tools after laser treatment is investigated by measuring the contact angles. The experimental results show that the femtosecond laser can change the wettability of ceramic material surfaces. The superhydrophilic surfaces and the superhydrophilic-based cutting fluid surfaces can be prepared if suitable laser energy density and spot overlap ratio are chosen. The wetting speed of water based cutting fluid on the laser-processed surfaces is exponentially decaying with the contact angle.

Key words laser technique; wettability; femtosecond laser; ceramic tool

OCIS codes 140.3390; 140.3900; 220.4000

1 引 言

陶瓷刀具具有硬度和耐磨性高、高温性能好、抗粘结性能和化学稳定性优良、摩擦系数低等优点,在一定切削条件下是一种比硬质合金切削性能更好的刀具材料^[1-2]。因此,陶瓷刀具可以加工传统刀具难以加工或根本不能加工的超硬材料,实现以车代磨,从而简化工艺。陶瓷刀具的最佳切削速度比硬质合金刀具的高3~10倍,且刀具寿命长,换刀次数减少,从而大大提高了切削加工效率^[3]。陶瓷刀具的主要原料氧化铝、氧化硅等是地壳中最丰富的元素,因此,开发和利用陶瓷刀具对节省战略性贵金属具有十分重要的意义。陶瓷刀具的推广应用将极大促进先进制造技术的发展^[4]。

然而,由于陶瓷刀具材料的导热性和韧性差,其应用受到较大限制。近年来,改善陶瓷刀具切削性能的研究主要集中在新型陶瓷刀具材料^[5-6]和涂层技术^[7-8]上,而刀具的表面形貌往往被忽视。理论研究和切削试验表明,刀具表面的形貌对刀具切削过程中的摩擦磨损有着重要的影响^[9-10]。改善材料表面润湿性能可

收稿日期: 2017-03-16; **收到修改稿日期:** 2017-05-08

基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAF20B03)、国家级重点实验室项目(2016001)、湖北省教育厅项目(B2016051)、武汉青年科技项目(2016070204010123)

作者简介: 杨奇彪(1985—),男,博士,讲师,主要从事激光加工、高速加工方面的研究。

E-mail: yangqibiao@mail.hbut.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: peter@mail.hbut.edu.cn

有效改进刀具摩擦性能,降低刀具前刀面的温度,加快热量传递,减少刀尖应力集中,提高刀屑接触面的抗粘结磨损能力,从而减缓刀具磨损^[11-12]。

激光微纳加工作为一种具有广阔应用前景的制备技术,加工过程简单、制备精度高、可加工材料广泛、可实现复杂结构的微纳制备^[13]。飞秒激光凭借其固有的超短和超强特性,具有传统激光加工不可比拟的独特优势^[14-17]。因此,本文采用飞秒激光加工陶瓷刀具表面,研究了激光加工参数对陶瓷刀具表面润湿性的影响规律,揭示了激光加工陶瓷刀具的润湿性机理,为制备新型陶瓷刀具提供了参考。

2 实验方案

实验采用珠海市佳一陶瓷有限公司生产的氧化铝陶瓷刀片材料,其规格为 50 mm×50 mm×1 mm,详细参数见表 1。

表 1 实验所用氧化铝陶瓷的参数
Table 1 Parameters of alumina ceramics used in experiment

Parameter	Value
Thermal conductivity / [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	27.3
Density / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	3.6
Limit working temperature / $^{\circ}\text{C}$	1600
Thermal expansion coefficient	3×10^{-6}
Mass fraction of Al_2O_3 / %	96

实验采用美国 Coherent 公司生产的 Libra-HE 型飞秒激光器系统,波长为 800 nm,脉宽为 100 fs,平均功率约为 4 W,脉冲频率为 10 kHz,最大脉冲能量为 0.4 mJ,光束质量因子 $M^2 < 1.3$ 。在进行激光加工之前,将陶瓷片在丙酮溶液中超声清洗 5 min,以去除其表面可能存在的污染杂质,然后取出吹干。飞秒激光器的光束经过振镜聚焦后的理论光斑直径为 14.7 μm ,聚焦后的光束垂直照射到固定在二维移动平台上的陶瓷材料表面并进行扫描,图 1 所示为加工示意图。

在利用激光扫描样品的过程中,通过改变光斑的重合度和激光的单脉冲能量得到一系列不同的扫描区域,光斑重合度的变化范围为 80%~100%,飞秒激光单脉冲能量的变化范围为 10~80 μJ ,材料加工后表面区域的示意图如图 2 所示。

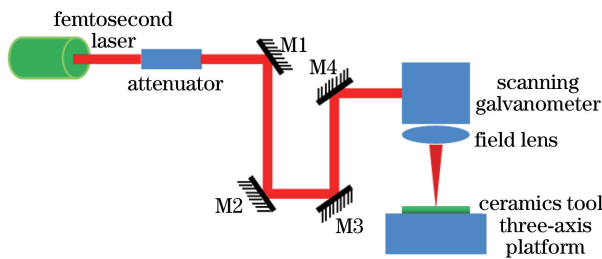


图 1 飞秒激光加工示意图

Fig. 1 Schematic of femtosecond laser processing

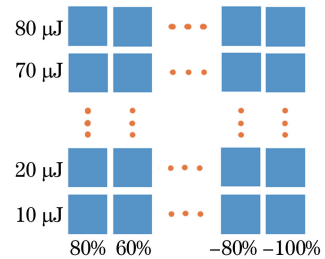


图 2 加工后材料表面区域示意图

Fig. 2 Schematic of material surface area after processing

将激光处理后的陶瓷片在上海培因实验仪器有限公司 DHG-9023A 电热恒温鼓风干燥箱中以 100 $^{\circ}\text{C}$ 保温处理 12 h。然后利用美国布鲁克科技有限公司的 Contour GT-K0 表面轮廓仪对上述激光处理前后样品的表面粗糙度进行测量。为了保证测量的准确性,对每件样品的表面粗糙度测量三次取平均值。用宁波海曙迈时检测科技有限公司的 A300 Drop-meter 接触角测量仪测量上述激光处理前后样品的接触角,测量时用 3 μL 水滴,温度为 21 $^{\circ}\text{C}$,湿度为 35%。为了保证测量的准确性,对每件样品的接触角测量三次取平均值。

为了提高表面加工的效率,激光扫描表面的次数为一次。激光的扫描速度在 29.4~294 mm/s 范围内变化,可以使光斑的重合度从 80%~100%变化。通过调节能量衰减器来控制激光的能量。光斑的布局如图 3 所示,其中 S 为两个聚焦光斑之间的距离。光斑的重合度 δ 的计算公式^[18]为

$$\delta = \left(1 - \frac{v}{fD}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中 v 为扫描速度, f 为表示脉冲的频率, D 为聚焦后光斑的直径。填充间距 h 的计算公式为

$$h = \frac{v}{f}。 \quad (2)$$

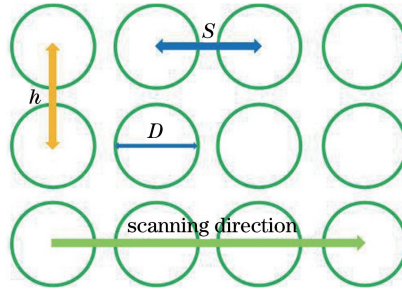


图 3 光斑布局原理图

Fig. 3 Layout diagram of laser spot

3 实验结果与分析

分别研究了单脉冲能量、光斑重合度和在空气中放置时间对材料表面浸润性的影响。经过激光扫描和恒温处理后,单脉冲能量对陶瓷片接触角 θ 的影响规律如图 4,5 所示,对陶瓷片表面粗糙度 R_a 的影响规律如图 6 所示。

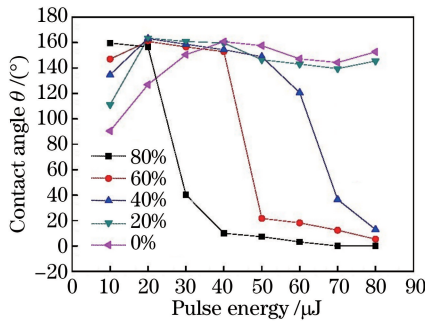


图 4 光斑重合度为正值时接触角随脉冲能量的变化

Fig. 4 Contact angle versus pulse energy with positive spot overlap ratio

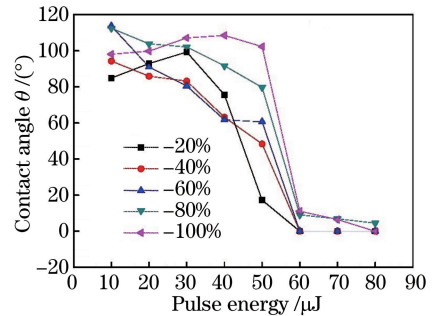


图 5 光斑重合度为负值时接触角随脉冲能量的变化

Fig. 5 Contact angle versus pulse energy with negative spot overlap ratio

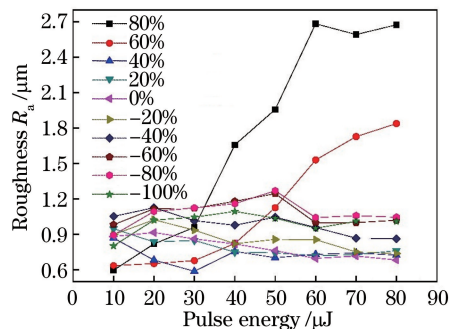


图 6 不同光斑重合度下脉冲能量对陶瓷片粗糙度 R_a 的影响

Fig. 6 Roughness R_a of ceramic tool versus pulse energy under different spot overlap ratios

由图 4,5 可见,所得的数据很分散,曲线相互交叉重叠。接触角的变化与激光的单脉冲能量及光斑的重合度紧密相连:当光斑重合度不同时,接触角随能量的变化趋势也不同;当能量不同时,接触角随光斑重合度

的变化趋势也不相同。

单脉冲能量对陶瓷片接触角的影响可分为两种情况:当光斑重合度为正值时,光斑之间有重叠;当光斑重合度为负值时,光斑之间没有重叠部分。由图4可知,当光斑重合度 δ 为80%时,接触角 θ 随着脉冲能量的增加而单调减小,且陶瓷材料表面粗糙度 R_a 随脉冲能量的增加而增大;当光斑重合度为正值时,接触角 θ 随脉冲能量变化的曲线会出现一个转折点,这个转折点的位置会随着光斑重合度 δ 的减小而往后推移,直到消失。从图5可以看出,当光斑重合度为负值时,接触角 θ 会随着脉冲能量的减小先维持不变后减小。从图6可以看出,表面粗糙度 R_a 与单脉冲能量之间的关系不明显,只是在某些特定光斑重合度下,粗糙度会随着表面粗糙度 R_a 的增大而增大,最终趋于不变。结合图4~6可知,当粗糙度 R_a 相同时,对应接触角却相差很大,故仅仅用粗糙度的大小来预测飞秒激光加工后陶瓷刀具表面的浸润性不太合适。

从图4,5可以看出,在较大的光斑重合度范围内,单脉冲能量对接触角的影响较大。仅当光斑重合度为0%~20%时,脉冲对接触角的影响很小,而在其他的范围时,随着脉冲能量的持续增大,接触角趋向减小。当光斑重合度为60%~80%、脉冲能量大于50 μJ 、光斑重合度为-20%~-100%、脉冲能量大于60 μJ 时,可以获得接触角较小的亲水表面。

取重合度为-60%的光斑,测量陶瓷刀烘烤后的接触角和放置空气中90 d后接触角变化情况,结果如图7所示,可以看出,超亲水表面的接触角随着时间的延长有所增加。

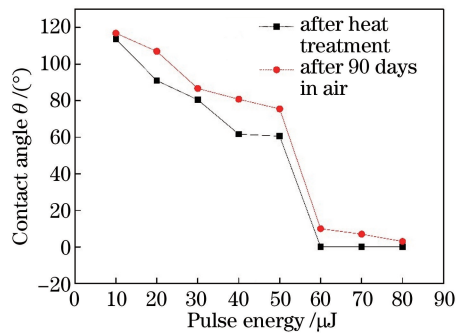


图7 光斑重合度为-60%时的陶瓷片接触角

Fig. 7 Contact angles of ceramic tool under spot overlap ratio of -60%

陶瓷片经过飞秒脉冲激光扫描和恒温箱处理后,其接触角可以达到 164° 和 0° ,实现了超疏水特性和超亲水特性。合适的超短脉冲激光加工参数和恒温处理可以使陶瓷表面由亲水特性转变为超亲水或超疏水特性。材料表面的润湿性取决于材料的表面形貌和表面能^[19-20],因此通过改变材料表面的形貌或者表面能,可以实现润湿性的改变。陶瓷刀片加工之前的粗糙度 $R_a=0.6 \mu\text{m}$,使用较低的能量加工时,原始表面的粗糙度会影响加工后的粗糙度,但是随着能量的增加,原始的表面粗糙度对加工后的表面几乎没有影响。激光处理后陶瓷刀片表面的接触角可以用Cassie方程式^[21]来表达:

$$\cos \theta = f_1 \cos \theta_1 + f_1 - 1, \quad (3)$$

式中 θ_1 为陶瓷刀片的本征接触角, f_1 为固-液接触面积分数。测得 θ_1 为 72° ,故(3)式可以简化为

$$\cos \theta = 1.3f_1 - 1. \quad (4)$$

从(4)式可以看出,由于不同的激光脉冲能量所产生的凹坑直径和深度不同,不同的光斑重合度也会影响单位面积内凹坑的数量,即影响固-液接触面积分数 f_1 ,进而影响接触角 θ 的大小和润湿性能。当光斑重合度为负值且脉冲能量足够大,可以克服材料表面原始形貌的影响时,随着光斑重合度的减小,单位面积内凹坑的数目会减小,从而导致固-液接触面积分数 f_1 增大,由(4)式可知, f_1 的增大会导致接触角的变化,从而改变亲水和疏水特性。

因为可以采用水基切削液润滑陶瓷刀具,而使用水基切削液的测量结果与使用去离子水的测量结果存在一定的差异,所以使用水基切削液来进行测量和对比。

水与初始陶瓷片的接触角为 72° ,稀释后水基切削液与陶瓷片的接触角为 56° 。当脉冲能量为50 μJ 、光斑重合度为0时,加工后水与陶瓷片的接触角达到 157° ,而切削液与陶瓷的接触角却是 0° 。通过比较两者可

知,水基切削液对陶瓷片的润湿效果更好。实验发现,激光加工后切削液在表面的润湿速度有明显差别。故用润湿速度来表征切削液对陶瓷片表面润湿性的影响更加合理,设定润湿速度为 v ,则

$$v = \frac{s}{t}, \quad (5)$$

式中 s 为润湿的面积, t 为完全润湿所用的时间。图 8 所示为 $3 \mu\text{L}$ 切削液在 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 样品表面的润湿速度,可以看出,激光加工后切削液润湿速度和接触角之间呈现近似的指数衰减关系:

$$v = 225.5 \exp\left(-\frac{\theta}{36.1}\right) + 3.3. \quad (6)$$

由(6)式可以看出,在刀具表面制备出亲水结构更有利于提高其对切削液的浸润性。用水的接触角来表征切削液对陶瓷刀具的润湿性更加方便,根据所测接触角的大小可以估算出润湿速度的大小。

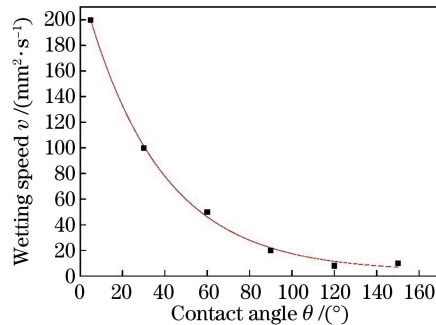


图 8 切削液润湿速度与接触角的关系

Fig. 8 Wetting speed of cutting fluid versus contact angle

4 结 论

利用飞秒激光改变氧化铝陶瓷刀片表面的浸润性,考虑了脉冲能量和光斑重合度的影响。通过接触角和粗糙度的测量和分析,获得如下结论。

- 1) 经过脉冲能量为 $10 \sim 80 \mu\text{J}$ 、光斑重合度为 $80\% \sim 100\%$ 的飞秒激光处理后,陶瓷刀片表面均呈现出超亲切削液的特性。
- 2) 接触角 θ 与表面粗糙度 R_a 之间的关系不明显,只是在某些特定光斑重合度下,接触角会随着表面粗糙度 R_a 的增大而增大。
- 3) 当光斑重合度为 $60\% \sim 80\%$ 、脉冲能量大于 $50 \mu\text{J}$ 、光斑重合度为 $-20\% \sim -100\%$ 、脉冲能量大于 $60 \mu\text{J}$ 时,可以获得接触角较小的亲水表面,即这些表面对切削液的润湿速度更快。
- 4) 在刀具表面制备出超亲水结构更有利于提高其对切削液的浸润性,用水的接触角来表征切削液对陶瓷刀具的润湿性更加方便,同时根据所测接触角的大小可以计算出润湿速度的大小。

参 考 文 献

- [1] Tian X, Zhao J, Wang Z, *et al.* Design and fabrication of $\text{Si}_3\text{N}_4/(\text{W}, \text{Ti})\text{C}$ graded nano-composite ceramic tool materials[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(12):13497-13506.
- [2] Li Jian, Ji Lingfei, Hu Yan, *et al.* Experimental study on milling of Y-TZP ceramic by 532 nm laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0806002.
李健, 季凌飞, 胡炎, 等. 532 nm 激光铣削 Y-TZP 陶瓷实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0806002.
- [3] Wang B, Liu Z. Cutting performance of solid ceramic end milling tools in machining hardened AISI H13 steel[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2016, 55: 24-32.
- [4] Cheng Y, Hu H, Sun S, *et al.* Experimental study on the cutting performance of microwave sintered $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ ceramic tool in the machining of hardened steel[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2015, 55: 39-46.

- [5] Yin Z, Yuan J, Wang Z, *et al.* Preparation and properties of an $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ micro-nano-composite ceramic tool material by microwave sintering[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(3): 4099-4106.
- [6] Zhao G, Huang C, He N, *et al.* Preparation and cutting performance of reactively hot pressed $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ ceramic tool when machining Invar36 alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(9/10/11/12): 2679-2688.
- [7] Liu W, Li A, Wu H, *et al.* Effects of bias voltage on microstructure, mechanical properties, and wear mechanism of novel quaternary (Ti, Al, Zr) N coating on the surface of silicon nitride ceramic cutting tool [J]. *Ceramics International*, 2016, 42(15): 17693-17697.
- [8] Chen H, Xu C, Xiao G, *et al.* Investigation of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ ceramic cutting tool materials with the addition of SiC-coated h-BN: preparation, mechanical properties, microstructure and wear resistance[J]. *International Journal of Materials Research*, 2016, 107(8): 735-740.
- [9] Xing Y, Deng J, Feng X, *et al.* Effect of laser surface texturing on $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ ceramic sliding against steel under dry friction[J]. *Materials & Design*, 2013, 52(24): 234-245.
- [10] Tshabalala L C, Pityana S. Surface texturing of $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}$ ceramic tool components by pulsed laser machining [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 289: 52-60.
- [11] Etsion I. State of the art in laser surface texturing[J]. *Journal of Tribology*, 2004, 127(1): 761-762.
- [12] Kümme J, Braun D, Gibmeier J, *et al.* Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilisation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 215: 62-70.
- [13] Gaković B, Petrović S, Albu C, *et al.* Precise femtosecond laser crater fabrication in hard nanolayered AlTiN/TiN coating on steel substrate[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 89: 200-207.
- [14] Li L, Hong M, Schmidt M, *et al.* Laser nano-manufacturing-state of the art and challenges[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2011, 60(2): 735-755.
- [15] Perrie Walter, Edwardson S P, Fearon E, *et al.* Diffractive multi-beam ultra-fast laser micro-processing using a spatial light modulator(invited paper)[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(12): 3093-3115.
- [16] Wu Dongjiang, Zhou Siyu, Ma Guangyi, *et al.* Experiment of quartz glass flute precise thinning by femtosecond laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0303009.
吴东江, 周思雨, 马广义, 等. 秒激光精密减薄石英玻璃凹槽实验[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0303009.
- [17] He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(5): 595-622.
何飞, 程亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿[J]. *中国激光*, 2007, 34(5): 595-622.
- [18] Dunn A, Carstensen J V, Wlodarczyk K L, *et al.* Nanosecond laser texturing for high friction applications[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2014, 62(6): 9-16.
- [19] Su B, Ye T, Lei J. Bioinspired Interfaces with superwettability: from materials to chemistry [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2016, 138(6): 1727-1748.
- [20] Liu Dun, Wu Yigang, Hu Yongtao, *et al.* Fabrication of super-hydrophobic aluminum surface by picosecond laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 101408.
刘顿, 伍义刚, 胡勇涛, 等. 皮秒激光制备铝基超疏水表面[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 101408.
- [21] Cassie A B D. Wettability of porous surfaces[J]. *Trans Faraday Soc*, 1944, 40: 546-551.