

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0254-03

# Nd:YAG 单脉冲激光烧蚀超硬磨料砂轮的试验研究

谢小柱, 李力钧, 陈根余

(湖南大学机械与汽车工程学院激光研究所, 湖南 长沙 410082)

**摘要** 采用声光调 Q Nd: YAG 单脉冲激光径向烧蚀树脂结合剂超硬磨料砂轮, 通过 Taly 表面粗糙度仪测量烧蚀凹坑深度, 光学显微镜观察凹坑微观形态。理论分析了烧蚀凹坑的形成机理, 试验建立起了凹坑深度与脉冲功率密度之间的关系曲线, 研究了激光参量(平均功率、脉冲重复频率和离焦量)对烧蚀凹坑深度的影响。试验证明, 以单脉冲烧蚀砂轮试验为指导, 结合具体试验条件选择激光参量进行修锐, 可得到满意的地形地貌。

**关键词** 激光技术; 单脉冲烧蚀; 激光修锐; 超硬磨料砂轮; 声光调 Q; 选择性去除

中图分类号 TG665

文献标识码 A

## Single Pulse Laser Ablation on Superabrasives Grinding Wheels by Nd: YAG Lasers

XIE Xiao-zhu, LI Li-jun, CHEN Gen-yu

(Laser Institute of Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract** Acousto-optic Q-switched Nd: YAG pulse laser is employed to dress resin bonded superabrasives wheels in orthogonal direction. The crater depth of single pulse is measured by Taly surface roughness instrument and the surface morphology of ablated crater is observed by light microscope (LM). This paper theoretically analyzed the formation of ablated crater, experimentally established the relation between the crater depth and pulse laser intensity, and studied on the crater depth influenced by laser parameters: average power, pulse repetition frequency and defocus distance. Experiment indicates that, on the basis of single pulse ablation on the wheels, a favorable topography is obtained by selecting suitable laser parameters.

**Key words** laser technique; single pulse ablation; laser dressing; superabrasives grinding wheels; acousto-optic Q-switched; selective removal

### 1 引言

金刚石和立方氮化硼(CBN)砂轮统称为超硬磨料砂轮, 两者都具有优良的磨削性能。按结合剂可分为树脂结合剂、金属结合剂和陶瓷结合剂超硬磨料砂轮。机械法可用于修锐树脂结合剂超硬磨料砂轮, 但容易造成根切, 使磨粒松动而引起有效磨粒减少。为了解决这个问题, 近年来开展了一系列的研究。激光修锐具有适应性广、热作用区域小、非接触加工、没有修整工具的磨损, 对环境友好等特点, 是一种很有前途的修锐方式。近年来, 众多学者对此开展了一系列的研究<sup>[1-4]</sup>, 主要侧重于在激光修锐的机理、修锐形貌的分析、磨削试验等方面的研究。众所周知, 影响激光修锐的因素很多, 而激光功率密度是直接的影响因素, 如何选择功率密度是影响修锐好坏的关键所在。影响功率密度的因素也有很多, 所以如何选择这些参量也是非常重要的。为此, 本文采用单脉冲激光烧蚀树脂结合剂超硬磨料砂轮,

试验建立起了烧蚀凹坑深度与脉冲功率密度之间的关系曲线, 研究了激光参量(平均功率、脉冲重复频率和离焦量)对烧蚀凹坑深度的影响, 结合具体试验条件验证参量选择的合理性。

### 2 试验装置

图 1 为声光调 Q Nd:YAG 单脉冲激光烧蚀树脂结合剂超硬磨料砂轮的示意图, 单脉冲是通过调节机床转速和进给量而获得的。最大连续输出功率 30 W, 脉宽 150~500 ns, 重复频率 1~10kHz。输出波长 1.06  $\mu\text{m}$ , 径向从三个位置( $Z=0.0, 1.5, 3.0 \text{ mm}$ )辐射到砂轮表面。聚焦后光斑直径 0.2 mm, 发散全角 20 mrad。连续激光的输出功率通过功率计(型号: PC-1000, Made in Canada)测量, 单脉冲烧蚀凹坑深度通过 Taly 粗糙度仪(型号: Roughness Talysurf Series 2)测量, 凹坑剖面通过 Taly 轮廓仪(型号: Form Talysurf Series 2)测量, 修锐后的地形地貌通

基金项目: 国家自然科学基金(50005005)资助项目。

作者简介: 谢小柱(1975-), 男, 湖南大学激光研究所博士研究生, 主要从事激光加工研究。E-mail: xiaozhuxie@yahoo.com.cn

过光学显微镜观察。

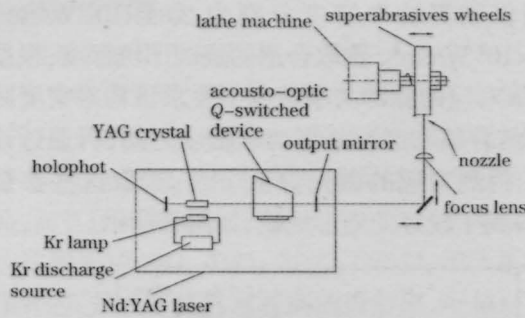


图1 声光调 Q Nd:YAG 单脉冲激光烧蚀树脂结合剂超硬磨料砂轮的示意图

Fig.1 Schematic illustration of single pulse ablation on superabrasives grinding wheels by acousto-optic Q-switched pulsed YAG lasers

### 3 结果和讨论

因为对每个烧蚀凹坑的体积定量衡量有一定困难,所以用烧蚀凹坑的深度(H)来衡量去除量的大小,影响凹坑深度总的激光参量为脉冲激光功率密度( $P_p$ ),假设脉冲激光为矩形脉冲,且能量平均分布

在圆形光斑内,聚焦时的光斑直径为  $d_b$ ,此时脉冲功率密度为

$$P_p = \frac{E}{S \cdot t_0} = \frac{P_m \cdot f}{(\pi d_b^2 / 4) \cdot t_0} = \frac{4P_m}{\pi \cdot t_0 \cdot f \cdot d_b^2} \quad (1)$$

式中  $E$  为单脉冲能量,  $S$  为光斑面积,  $P_m$  为平均功率,  $f$  为脉冲重复频率,  $t_0$  为脉宽, 可以看出,  $P_p \propto P_m$ ,  $P_p \propto 1/d_b^2$ ,  $P_p \propto 1/(t_0 \cdot f)$ , 即随着平均功率的增加, 脉冲功率密度增加; 离焦时, 光斑直径增加, 脉冲功率密度减小; 脉宽在整个调 Q 频率范围内不是固定不变的, 它随着频率的增高而增加, 所以频率增加, 脉宽增加, 脉冲功率密度减小。可以看出, 脉冲功率密度主要受激光平均功率( $P_m$ )、脉冲重复频率( $f$ )、离焦量这三个参量的影响, 从而引起对烧蚀凹坑深度的变化。

从图 2 的表面形态图和剖面图可看出, 树脂结合剂以气化形式排出凹坑, 凹坑边缘没有熔凝物, 没有重凝的迹象, 这是因为树脂材料具有较低的熔点和导热系数, 温度超过一定范围, 则发生分解, 具有升华特性。凹坑直径随着深度的增加而减小, 呈锥形。结合剂中填料(铜粉)熔化临界功率密度较高, 不易去除, 由于表面张力, 部分溅射。

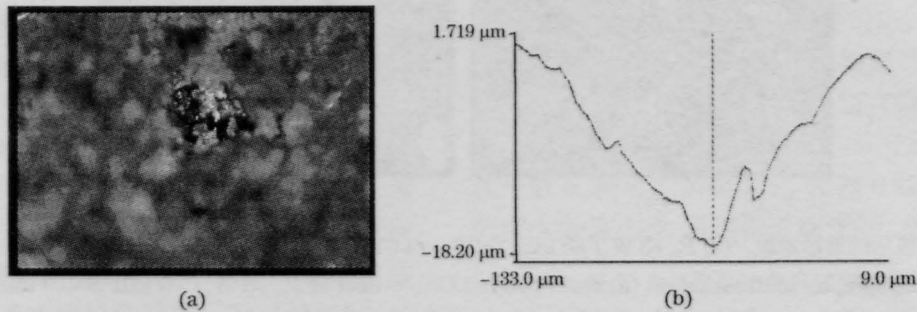


图2 树脂结合剂 CBN 砂轮烧蚀凹坑的(a)表面形态和(b)剖面图,  $P_m=3$  W,  $f=3$  kHz,  $Z=0.0$  mm

Fig.2 (a) Surface morphology and (b) section chart of ablated crater on resin bonded CBN wheel at  $P_m=3$  W,  $f=3$  kHz,  $Z=0.0$  mm

图 3 可以看出, 随着脉冲功率密度的增加, 凹坑深度增加。在功率密度小于  $6 \times 10^5$  W/cm<sup>2</sup> 时, 凹坑深

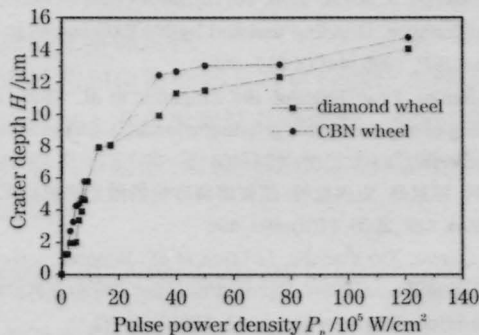


图3 脉冲功率密度对树脂结合剂超硬磨料砂轮烧蚀凹坑深度的影响

Fig.3 Crater depth of superabrasives wheels vs pulse power density

度很小, 只有 1~2 μm, 此时已经接近于树脂分解点的临界功率密度  $5 \times 10^5$  W/cm<sup>2</sup>, 两个数值比较接近, 可以认为此时的功率密度为临界功率密度。对于金刚石和 CBN 砂轮来说, 凹坑深度相差不大, 凹坑的形成主要是树脂结合剂的去除。图 4 可以看出, 随着平均功率的增加, 脉冲重复频率和离焦量不变, 凹坑深度逐步增大, 同由式(1)分析得出脉冲功率密度增加, 凹坑深度增加的结果是一致的。随着脉冲重复频率的增加, 平均功率和离焦量不变, 脉冲功率密度减小, 凹坑深度减小, 且在 7 kHz 以上凹坑深度比较接近, 这是因为脉冲功率密度接近的缘故。随着离焦量的增加, 平均功率和脉冲重复频率不变, 脉冲功率密度减小, 凹坑深度逐渐变小。通过选择不同的脉冲功率密度可以得到不同深度的凹坑, 而脉

冲功率密度又由平均功率、脉冲重复频率、离焦量这三个参量决定,选择这些参量修锐就可以决定修锐后的地形地貌。在本试验条件下,砂轮的粒度皆为180#,为得到良好的磨削性能,以磨粒凸出高度为直径的20~30%为佳,若一次走刀完成,脉冲功率密度过高,则会损伤磨粒,因此试验采用两次走刀,即一个烧蚀行程,脉冲重叠率为0~50%,树脂结合剂去

除的临界功率密度 $5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ ,CBN和金刚石磨粒损伤临界功率密度分别为 $2.94 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 和 $2.02 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 。选取合适的烧蚀凹坑深度,根据图3选取对应的脉冲功率密度,要求该功率密度必须介于结合剂和磨粒临界功率密度之间,再通过计算式(1)得到对应的激光参量组合,选取这些参量修锐,得到了较好的地形地貌,如图5所示。

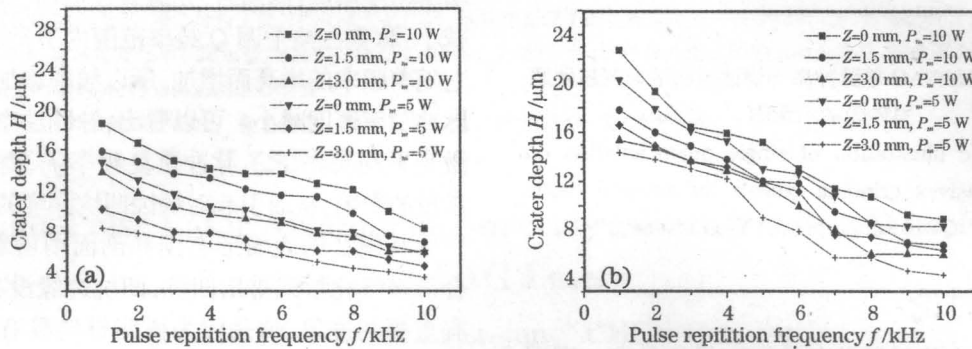


图4 平均功率、脉冲重复频率、离焦量对(a) CBN和(b)金刚石砂轮烧蚀凹坑深度的影响

Fig.4 Crater depth on (a) CBN and (b) diamond wheel vs average power, pulse repetition frequency and defocus distance

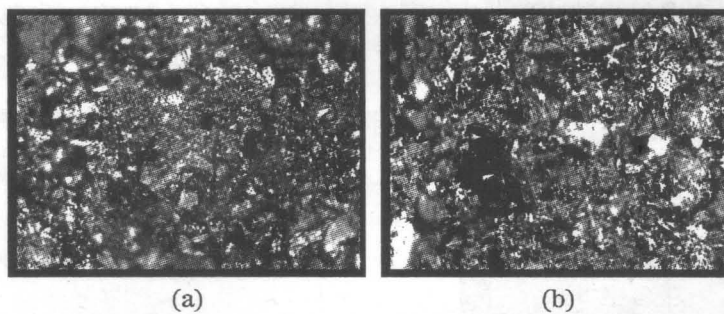


图5 脉冲激光修锐后的地形地貌。(a)  $P_m=3 \text{ W}$ ,  $f=5 \text{ kHz}$ ,  $Z=0.0 \text{ mm}$  CBN砂轮; (b)  $P_m=8 \text{ W}$ ,  $f=3 \text{ kHz}$ ,  $Z=1.5 \text{ mm}$  金刚石砂轮

Fig.5 Surface topography of dressing on (a) resin bonded CBN wheel at  $P_m=3 \text{ W}$ ,  $f=5 \text{ kHz}$ ,  $Z=0.0 \text{ mm}$  and (b) resin bonded diamond wheel at  $P_m=8 \text{ W}$ ,  $f=3 \text{ kHz}$ ,  $Z=1.5 \text{ mm}$

## 4 结论

1) 凹坑的形成主要基于树脂材料的气化,凹坑瞬间形成,铜粉(填料)部分溅射,凹坑边缘不规则,没有重凝的迹象。

2) 脉冲功率密度直接影响烧蚀凹坑深度。激光平均功率增加、脉冲重复频率减小、离焦量减小,则脉冲功率密度增加,凹坑深度增加。

3) 试验建立起了凹坑深度与脉冲功率密度、激光平均功率、脉冲重复频率和离焦量之间的关系曲线,为激光修锐超硬磨料砂轮提供必须的理论支持和必要的工艺过程优化参考。

## 参考文献

1 N. Ramesh Babu, V. Radhakrishnan, Y. V. G. S. Murti. Investigation on laser dressing of grinding wheels -Part I :

preliminary study[J]. *Transaction of ASME, J. Engineering for Industry*, 1989, 111(8): 244~252

2 Toshikatsu Nakajima, Kazuhito, Ohashi et al.. Dressing of resinoid bond wheel with moving heat source (1st report) - transaction of wheel source with a single pulse irradiation of YAG laser[J]. *J. JSPE*, 1993, 59(12): 1967~1972

3 E. Westkamper. Grinding assisted by Nd:YAG lasers[J]. *Annals of the CIRP*, 1995, 44(1): 317~320

4 Kang Renke, Yuan Jingting, Shi Xingkuan et al.. Study on laser dressing of superabrasive grinding wheels[J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, 11(5): 493~496

康仁科,原京庭,史兴宽等.超硬磨料砂轮的激光修锐技术研究[J]. *中国机械工程*, 2000, 11(5): 493~496

5 Chen Genyu, Xie Xiaozhu, Li Lijun et al.. Superabrasive wheels dressing and newly development of laser dressing[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2002, 128(2): 8~12

陈根余,谢小柱,李力钧等.超硬磨料砂轮修整与激光修整新进展[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2002, 128(2): 8~12