

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0245-05

脉冲激光修锐青铜金刚石砂轮烧蚀机制研究

陈根余, 朱定军, 彭 凯, 尤卫民, 李力钧, 梅丽芳

(湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心, 湖南 长沙 410082)

摘要 青铜金刚石砂轮具有优良的磨削性能, 在初次使用和磨损后必须对其修锐。由于青铜结合剂和金刚石磨粒之间存在热物理、光学性质的差异, 可通过选择合适的脉冲激光功率密度去除结合剂, 凸出磨粒, 实现选择性去除。针对声光调 Q YAG 脉冲激光修锐青铜金刚石砂轮, 建立了适合激光烧蚀青铜结合剂的实际过程的传热与气化动力学模型, 运用数值计算模拟出各种激光功率密度下的熔层温度、熔层厚度和烧蚀速率, 进而获得激光功率密度与激光烧蚀凹坑深度的关系, 并与实验结果进行比较。通过验证表明所建立的模型可以正确描述实际物理过程。

关键词 光学设计与制造; 激光烧蚀; 传热与气化动力学模型; 数值模拟; 砂轮修锐

中图分类号 TG74; TN249 **文献标识码** A

Ablation Mechanism of Bronze-Bonded Diamond Wheels Dressing by Pulsed Laser

CHEN Gen-yu, ZHU Ding-jun, PENG Kai, YOU Wei-min, LI Li-jun, MEI Li-fang

(National Engineering Research Center for High Efficiency Grinding, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract Bronze bonded diamond wheel is superior grinding performances. It has to be brought into dressing for grinding before its first use or when reaching the service life criterion. Due to the thermal physical and optical differences between bronze bond and diamond abrasive, suitable pulse power density is selected to remove bonds and protrude thus realizing the selective removal. A heat transfer and gas dynamic model was created to describe single pulsed laser ablation which was occurred in the experiments of dressing bronze-bonded diamond wheel by acoustic-optic Q-switched YAG pulsed laser. The average temperature and thickness of melted layer, ablation velocity and depth by different laser power densities was calculated with numerical method. The model is proved to be correct by contrast with the experiment result.

Key words optical design and fabrication; laser ablation; heat transfer and gas dynamic model; numerical simulation; wheel dressing

1 引 言

青铜金刚石砂轮是密实型结合剂超硬磨料砂轮, 结合强度高, 耐热和导热性能好, 是精密和超精密磨削、难加工材料磨削等技术的主要加工工具。激光修锐砂轮作为一种基于热的新的修锐方法引起了各国学者的关注^[1~6]。声光调 Q YAG 脉冲激光烧蚀超硬磨料砂轮, 每个脉冲烧蚀深度都在微米数量级, 热影响区小, 适合修锐超硬磨料砂轮。

砂轮表层的结合剂在激光作用下的去除过程极其复杂, 其中包括材料的熔融、溅射和气化等过程, 只有掌握材料在激光作用下的去除变化规律, 优化激光修锐参数, 才能得到良好的修锐效果。本文运用传热与气化动力学模型对激光烧蚀过程进行数值模拟分析, 并与实验结果相比较, 证明了所建模型的正确性。

2 单脉冲激光烧蚀青铜结合剂的气化动力学模型

由于声光调 Q 脉冲激光占空比小, 前后脉冲在工件上产生的热积累影响很小, 可以忽略不计^[7], 故可将整个修整过程视为单脉冲激光烧蚀凹坑的叠加。通过对单脉冲激光烧蚀凹坑的深度进行模拟计算, 可确定修整后磨粒的突出高度和地形地貌。

2.1 单脉冲激光烧蚀青铜模型的基本假设

所用的声光调 Q 激光脉冲的最大脉宽 $t_{0\max}$ 为 560 ns。在一个脉宽时间内的最大热穿透深度 $\sqrt{4\alpha t_{0\max}}$ 约为 8.45×10^{-3} mm, 远远小于聚焦光斑直径 0.3 mm, 因而激光脉冲的加热可近似处理为一维模型。

基金项目: 湖南省重点科技攻关项目(04GK2004)和湖南省自然科学基金(05JJ300991)资助课题。

作者简介: 陈根余(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事激光加工新技术和高效磨削技术的研究。E-mail: hdgychen@163.com

2.2 一维传热与气化动力学模型的建立

当聚焦的脉冲激光辐照在试件表面后,整个烧蚀过程分为加热和去除两个阶段。

加热阶段,传热控制方程和边界条件如下

$$\frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = 0, \quad 0 \leq z \leq \infty \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} = AI, \quad z = 0 \quad (2)$$

$$T(z,t) = T_0, \quad z \rightarrow \infty \quad (3)$$

$$T(z,t) = T_0, \quad t = 0 \quad (4)$$

方程的解为

$$T(z,t) = T_0 + \frac{2AI\sqrt{\alpha t}}{\lambda} \text{ierfc}\left(\frac{z}{\sqrt{4\alpha t}}\right), \quad (5)$$

表面温度

$$T(0,t) = T_0 + \frac{2AI}{\lambda} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}}, \quad (6)$$

加热阶段的时间

$$t_h = \frac{\pi}{\alpha} \left[\frac{\lambda(T_m - T_0)}{2AI} \right]^2, \quad (7)$$

烧蚀阈值功率密度

$$I_{th} = \frac{\lambda}{A} \left(\frac{\pi}{4\alpha t_0} \right)^{1/2} (T_m - T_0), \quad (8)$$

式中 I 为入射激光的功率密度, A 为青铜对激光的吸收率, T_0 为初始温度, T_m 为材料的熔点, λ, α 分别为青铜的导热系数、热扩散率, 其中 $\alpha = \lambda / (c\rho)$, c 为比热, ρ 为密度。

去除阶段, 由于后退压力在激光烧蚀过程中起到非常重要的作用, 因而必须建立一个符合该机制的气化动力学模型, 如图 1。

当熔体溅射和气化达到稳定状态时, 熔化前沿和汽化前沿将会以一个衡定的速度 v_d 沿 z 轴方向推进, v_d 称为烧蚀速度。

由于质量守恒, 熔体的质量应该等于溅射的熔体质量与气化的熔体质量之和, 在相同的时间内则有

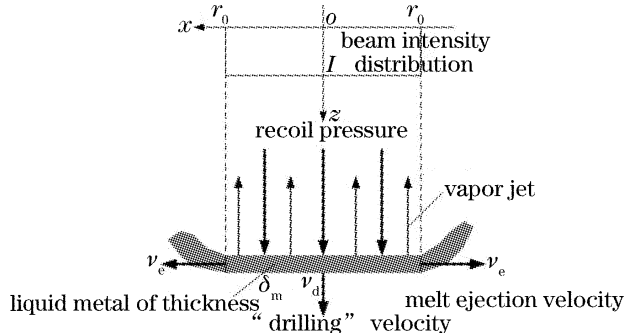


图 1 熔体材料去除的物理模型

Fig. 1 Physical model of melt removal from the interaction zone

$$\frac{dm_s}{dt} = \frac{dm_e}{dt} + \frac{dm_v}{dt}, \quad (9)$$

上式可以改写为

$$2r_0\rho_s v_d = 2\delta_m\rho_m v_e + 2r_0\rho_m v_v, \quad (10)$$

其中 ρ_s 和 ρ_m 分别表示材料在固相和液相的密度, δ_m 为熔层厚度, v_e 为熔体沿 x 方向的溅射速度, v_v 为熔体沿 z 方向汽化前沿速度。

(10)式可改写为

$$v_d = \frac{\rho_m}{\rho_s} \frac{\delta_m}{r_0} v_e + \frac{\rho_m}{\rho_s} v_v, \quad (11)$$

(11)式右边第一项为烧蚀速度 v_d 中由于熔体溅射所引起的分量 v_{de} , 第二项为烧蚀速度 v_d 中由于汽化所引起的分量 v_{dv} 。

在稳态条件下, 烧蚀速度 v_d 保持恒定, 熔层厚度

$$\delta_m \approx \alpha_m / v_d, \quad (12)$$

其中 α_m 为材料在液相时的热扩散系数。

由(11)式和(12)式得

$$v_d^2 - \frac{\rho_m}{\rho_s} v_a v_v - \frac{\alpha_m}{r_0} \frac{\rho_m}{\rho_s} v_e = 0. \quad (13)$$

解上面的一元二次方程得

$$v_d = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\rho_m}{\rho_s} v_v + \left[\left(\frac{\rho_m}{\rho_s} v_v \right)^2 + 4 \frac{\alpha_m}{r_0} \frac{\rho_m}{\rho_s} v_e \right]^{1/2} \right\}, \quad (14)$$

汽化速度

$$v_v = V_0 \exp\left(-\frac{M_a L_v}{N_a k_b T_s}\right), \quad (15)$$

式中 M_a 为原子量, L_v 为汽化潜热, N_a 为阿伏加德罗常数, k_b 为玻尔兹曼常数, V_0 为凝聚态中的声速, T_s 为熔层上表面温度。

由汽化引起的后退压力导致熔体溅射, 假定在稳态条件下, 后退压力沿 x 方向传播, 并且趋于一致。熔体沿 x 方向则可视为一维定常流动, 由伯努力方程

$$p_r = \frac{\rho_m v_e^2}{2}, \quad (16)$$

由克劳修斯-克拉珀龙 (Clausius-Clapeyron) 方程, 以大气压下汽化点 (标准沸点) T_b 为参考点, 得到

$$p_r = p_0 \exp\left(-\frac{M_a L_v}{N_a k_b T_s}\right) / \exp\left(-\frac{M_a L_v}{N_a k_b T_b}\right), \quad (17)$$

式中 p_0 为标准大气压。

单位长度熔层的输入能量

$$P_{in} = I_{abs} 2r_0 + \rho_s c_s T_m v_d 2r_0, \quad (18)$$

其中 I_{abs} 为材料所吸收的激光功率密度, ρ_s 和 c_s 分别为材料在固相时的密度和比热, r_0 为光斑半径。单位长度熔层的输出能量包括由于热传导所损失的

一部分 P_{cond} , 溅射熔体带走的一部分 P_{conv} , 气化带走的一部分 P_{evap} , 以及由于辐射所损失的一部分 P_{rad} 。而辐射损失的能量相对于整个能量损失而言非常小, 可以忽略不计。

由于热传导所损失的能量包括沿激光入射方向和沿熔层流动方向两个分量

$$P_{\text{cond}} = P_{\text{forw}} + P_{\text{side}}, \quad (19)$$

沿激光入射方向分量

$$P_{\text{forw}} = k_s \frac{T_m - T_0}{\alpha_s / v_d} 2r_0 = \rho_s c_s (T_m - T_0) v_d 2r_0, \quad (20)$$

其中 α_s 为材料在固相时的热扩散系数。

沿熔层流动方向分量

$$P_{\text{side}} = k_s \frac{T_m - T_0}{[(\alpha_s / v_d)(r_0 + a_m / v_d)]^{1/2}} 2r_0 = \frac{\rho_s c_s (T_m - T_0) v_d}{[\alpha_m / \alpha_s + (v_d / \alpha_s) r_0]^{1/2}} 2r_0, \quad (21)$$

熔体溅射所损失的能量

$$P_{\text{conv}} = 2\rho_m (c_m T^* + L_m) v_e \delta_m \approx 2\rho_m (c_m T^* + L_m) v_e a_m / v_d, \quad (22)$$

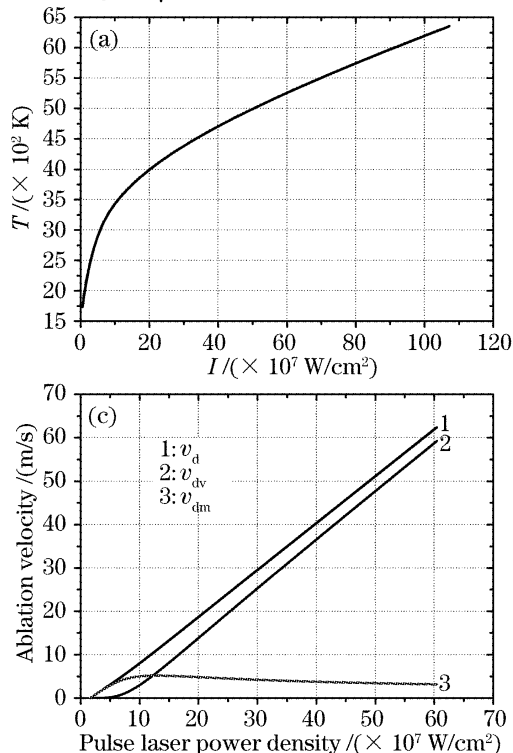
其中 T^* 表示熔层的平均温度。

$$T^* = T_m + \beta(T_s - T_m), \quad (23)$$

其中 β 为介于 0 到 1 之间的常数。

气化所损失的能量

$$P_{\text{evap}} = \rho_m v_v L_v 2r_0, \quad (24)$$



将(18)式~(24)式联立起来, 由能量守恒

$$P_{\text{in}} = P_{\text{cond}} + P_{\text{conv}} + P_{\text{evap}}, \quad (25)$$

则有

$$I_{\text{abs}} = \left[\rho_m (c_m T^* + L_m) \frac{v_e \alpha_m}{v_d r_0} - \rho_s c_s T_0 v_d \right] + \frac{\rho_s c_s (T_m - T_0) v_d}{[\alpha_m / \alpha_s + (v_d / \alpha_s) r_0]^{1/2}} + \rho_m v_d L_v, \quad (26)$$

式中烧蚀速度 v_d 和熔体溅射速度 v_e 可通过(15)式~(17)式由熔层上表面温度 T_s 表示; 熔层平均温度 T^* 可通过(23)式由熔层上表面温度 T_s 和熔点 T_m 表示。这样就可以通过熔层上表面温度 T_s 求出烧蚀速度 v_d 与吸收的激光功率密度 I_{abs} 之间的关系, 继而得到烧蚀深度 H 与入射激光的功率密度 I 之间的关系。

3 计算结果分析

运用 matlab 仿真软件对模型进行求解, 可以得出烧蚀速度 v 与入射激光的功率密度 I 之间的关系曲线。表 1 为青铜结合剂的物理性能参数。图 2(a)~(c)分别为入射激光功率密度与烧蚀凹坑内熔层平均温度、熔层厚度和烧蚀速率之间的关系图。当激光烧蚀功率密度低于 10^8 W/cm^2 时, 熔层温度较低, 不足以使熔体大量气化, 熔层厚度较大, 青铜材料的去除形式是以熔体溅射为主。激光功率密度增大后, 凹坑

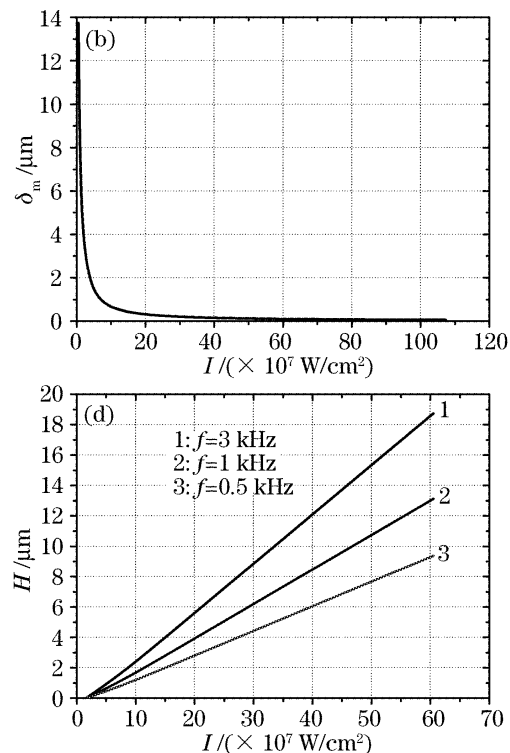


图 2 入射激光功率密度与凹坑内平均温度(a), 熔层厚度(b), 烧蚀速率(c)的关系和烧蚀深度的理论计算图(d)

Fig. 2 Average temperature (a), limit metal of thickness (b), ablation velocity (c) and ablation crater depth in theory by pulse power density (d)

表 1 青铜结合剂的物理性能参数

Table 1 Thermal physical properties of bronze bond

| Property | Bronze bond |
|--|-------------|
| Thermal conductivity λ / [W/(m · K)] | 41.9 |
| Specific heat c / [J/(kg · K)] | 352 |
| Thermal diffusivity a / (10^{-4} m ² /s) | 0.083 |
| Melting temperature T_m /K | 1173 |
| Vaporization temperature T_v /K | 2770 |
| Latent heat of melting L_m /(kJ/kg) | 164.1 |
| Latent heat of vaporization L_v /(kJ/kg) | 4031.9 |
| Absorptivity A | 0.38 |
| Relative atomic mass M_a /(amu) | 80.1 |
| Density ρ / (kg/m ³) | 8620 |

内平均温度已明显超过青铜材料的气化温度,气化成为主要去除方式,熔层厚度亦随之减小。图 2(d)中,相同激光功率密度情况下,烧蚀凹坑深度随着脉

冲重复频率的增加而增加。这是因为激光脉宽是随重复频率的增加而增加的,脉宽越宽,单个脉冲作用时间越长,材料去除就越多。

4 实验结果与对比分析

采用光切法显微镜对单脉冲激光烧蚀青铜结合剂凹坑深度进行测量。从图 3 中看出烧蚀深度计算曲线与实验结果吻合较好,说明在实验功率密度范围内可以用上面所建模型来描述,即青铜材料去除过程是熔体溅射和气化共同作用的结果,气化后退压力是熔体溅射的主要因素。当功率密度大于 10^8 W/cm² 时,计算值和实验结果相差较大,计算值明显高于实验值,这可能是因为功率密度较高时产生了等离子体阻隔了材料对激光的吸收,这时需要对模型进行修正。

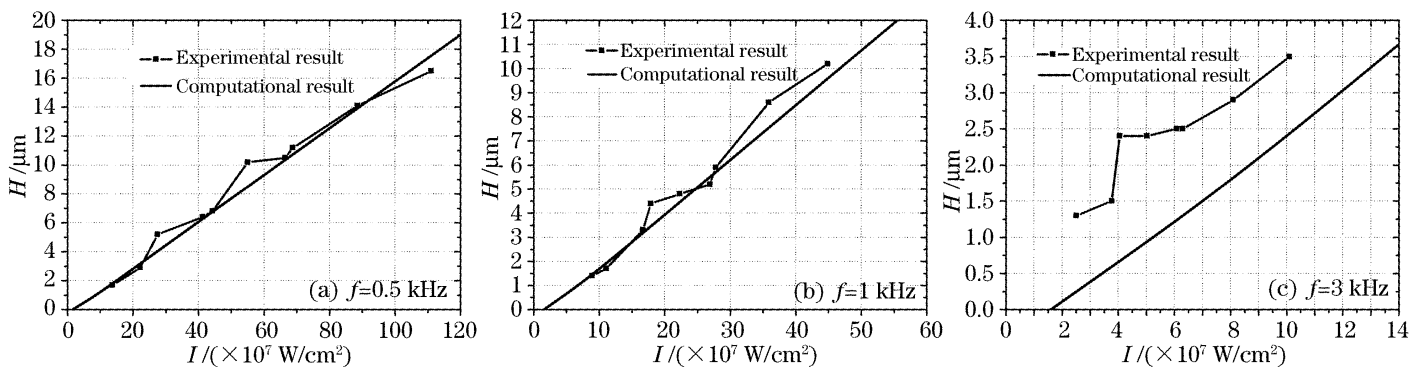


图 3 入射激光功率密度与烧蚀深度的关系

Fig. 3 Ablation crater depth contrast computational result with experimental result

图 4 和图 5 分别为单脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮的表面形貌(SEM)图和脉冲激光修整砂轮实物图。从图中可以清晰地看到修整后的砂轮结合剂被均匀去除,金刚石磨粒凸出明显,磨粒完整,表面没有微裂纹和变质层产生,砂轮表面有足够的容屑空间,同时脉冲激光烧蚀青铜结合剂过程中不仅发出剧烈的气化声音,而且还伴有很长的等离子体尾

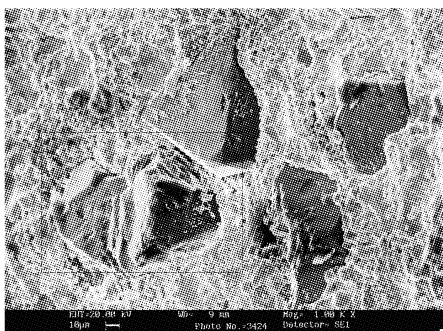


图 4 单脉冲烧蚀青铜金刚石砂轮 SEM 图

Fig. 4 Microscope photo of surface morphology on bronze-bonded diamond wheel ablation by pulse laser

翼,并有部分熔体溅射,表明后退压力在激光烧蚀过程中起到非常重要的作用。

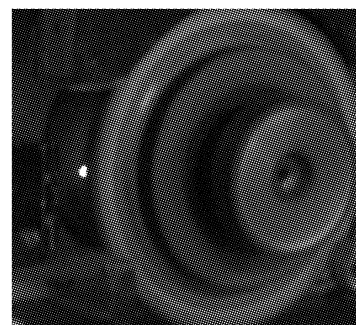


图 5 脉冲激光修整砂轮实物图

Fig. 5 Practical photo of dressing and truing grinding by pulsed laser

5 结 论

声光调 Q 脉冲激光占空比小,前后脉冲在工件上产生的热积累影响很小,可将脉冲激光修整青铜金刚石砂轮的整个过程视为单脉冲激光烧蚀凹坑的

叠加;建立了基于气化动力学原理的适合激光修锐砂轮机制的一维数学物理模型。通过模拟计算,得出了激光参数对烧蚀速度和烧蚀凹坑深度的影响规律;通过数值模拟得出的结果与实验结果对比,并通过实验测试、观察发现,后退压力在激光烧蚀过程中起到非常重要的作用,从而验证了模型的正确性;实验证明合理地控制激光修锐参数可以得到合适的砂轮表面地形地貌。

参 考 文 献

- 1 N. Ramesh Babu, V. Radhakrishnan. Influence of dressing feed on the performance of laser dressed Al_2O_3 wheel in wet grinding [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1995, **35**(5): 661~671
- 2 C. Zhang, Y. C. Shin. A novel laser-assisted truing and dressing technique for vitrified CBN wheels[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, **42**: 825~835
- 3 E. Westkämper. Grinding assisted by Nd:YAG laser[J]. *Annals of the CIRP*, 1995, **44**(1): 317~320
- 4 Wang Yan, Hu Dejin, Deng Qilin *et al.*. Analysis of temperature field for laser assisted mechanical dressing and truing of diamond grinding wheel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 431~435
王 艳,胡德金,邓琦林 等. 激光辅助机械修整金刚石砂轮的温度场分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 431~435
- 5 Chen Genyu, Li Lijun, Ma Honglu *et al.*. Laser truing and dressing of bronze-bonded diamond wheels by a Q-switched YAG pulse laser [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2005, **41**(4): 174~178
陈根余,李力钧,马宏路 等. 声光调 Q YAG 脉冲激光修锐和整形青铜金刚石砂轮[J]. *机械工程学报*, 2005, **41**(4): 174~178
- 6 Kan Renke, Yuan Jingting, Shi Xingkuan *et al.*. Study on laser dressing of super abrasive 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
- 7 Liu Jingshong, Li Menqiu. A model and its application of Q-switched laser ablation sublimable materials [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, **4**(4): 75~79
刘劲松,李孟秋. 调 Q 激光烧蚀具有升华特性物质的模型及应用[J]. *光学精密工程*, 1996, **4**(4): 75~79