

激光修整青铜金刚石砂轮石墨变质层的研究

陈根余^{1,2} 陈冲^{1,2*} 卜纯² 贾天阳² 余春荣²

(¹湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南长沙 410082)
²湖南大学激光研究所, 湖南长沙 410082)

摘要 针对声光调 Q YAG 脉冲激光修整青铜结合剂金刚石砂轮, 运用 ANSYS 有限元软件建立了三维脉冲激光烧蚀金刚石磨粒的数学模型和传热模型, 得到了激光烧蚀金刚石磨粒后的温度分布。利用所建立的模型可获得不同激光参数下的变质层厚度, 并通过实验对该模型进行了验证。针对脉冲激光修锐与整形的两个不同方面, 从实验和数值模拟两方面研究脉冲激光参数对变质层厚度的影响规律, 得到在修锐时脉宽与激光功率对变质层厚度影响程度相差不大, 而在整形时脉宽则起到了绝对的主导作用; 经过多脉冲激光烧蚀后变质层厚度有所减小; 只有在砂轮修锐时石墨变质层厚度随脉宽的增加而减少。

关键词 激光技术; 脉冲激光修整; ANSYS 仿真; 石墨变质层; 激光参数

中图分类号 TG74; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0303006

Research on Carbonized Layer for Truing and Dressing of Bronze-Bonded Diamond Grinding Wheels with Laser

Chen Genyu^{1,2} Chen Chong^{1,2} Bu Chun² Jia Tianyang² Yu Chunrong²

(¹ State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)
² Laser Research Institute, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract For the truing and dressing bronze-bonded diamond grinding wheel by acoustic-optic Q-switched YAG pulsed laser, a three-dimensional (3D) mathematical simulation model and a heat transfer model of single pulsed laser ablating the diamond abrasive are established by ANSYS finite element software. The models show the temperature distribution of diamond under different laser parameters, and they are proved to be correct through experiments. According to the two different procedures of dressing and shaping of bronze-bonded diamond grinding wheels, from both experiment and numerical simulation much research work is done on the relationship of pulsed laser parameters and the depth of carbonized layer. The results show that there is not much difference between the influences of pulse width and laser power on the depth of carbonized layer in dressing, but pulse width plays a dominant role on the depth of carbonized layer in shaping; and the depth of carbonized layer will decrease after multi-pulse ablation; only in dressing will the depth of carbonized layer decrease with the increase of pulse width.

Key words laser technique; pulsed laser truing and dressing; ANSYS simulation; carbonized layer; laser parameter

OCIS codes 140.3390; 140.3540; 000.2658

1 引言

青铜结合剂金刚石砂轮是磨削硬质合金、陶瓷等材料的理想工具,但同时由于具有极高的硬度,用

传统的方法很难修整,这严重阻碍了砂轮的应用与推广。利用调 Q YAG 脉冲激光的高能量密度输入,可以在极短的时间内使金刚石磨粒温度迅速升

收稿日期: 2011-11-11; 收到修改稿日期: 2011-12-05

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX04003101)和湖南大学汽车车身先进制造国家重点实验室自主课题(61075005)资助课题。

作者简介: 陈根余(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事汽车激光制造研究和激光微细加工技术方面的研究。

E-mail: hdgychen@163.com

* 通信联系人。E-mail: chongchen429@163.com

高到升华温度,从而达到修整金刚石砂轮的目的。脉冲激光修整青铜金刚石砂轮包括修锐与整形两个方面:修锐是指通过选择合适的激光参数(脉宽与激光功率),选择性地去除青铜结合剂,而不损伤金刚石磨粒,最终使磨粒凸出、砂轮表面形成一定的容屑空间;整形是指使用高功率密度激光输入,同时去除金刚石磨粒和青铜结合剂,最终获得精确的砂轮几何形貌^[1~4]。

在脉冲激光修整砂轮时,最终所获得的修整后的砂轮形貌可以认为是单个激光脉冲烧蚀凹坑的组合与叠加,因此对单脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮进行研究非常有意义。激光修整砂轮时由于金刚石磨粒高温氧化后会产生石墨变质层,其金相组织、力学性能等发生了变化,这会影响到砂轮寿命和磨削质量。目前大部分研究方向主要集中在两个方面:1) 石墨变质层的形成机理;2) 通过磨削实验研究变质层对砂轮磨削性能的影响;而对激光修整参数与变质层厚度的影响规律研究得却很少^[5~8]。本文在考虑金刚石磨粒石墨化过程的基础上,采用ANSYS有限元法建立了三维单脉冲激光烧蚀金刚石砂轮的数学模型和传热模型,并针对脉冲激光修锐与整形的两个不同方面,通过数值仿真与实验相结合的方法找到了脉冲激光参数对变质层厚度的影响规律,以达到优化选取脉冲激光参数、减少石墨变质层厚度的目的。

2 脉冲激光烧蚀金刚石磨粒仿真研究

2.1 传热模型的建立

实验所采用声光调 Q YAG 脉冲激光脉宽窄,占空比小(占空比即脉宽与脉冲周期的比值,本实验最大值约为 0.001),说明激光与材料的作用时间极短。由于磨粒与结合剂具有高热导率,产生的热积累很小,所以可将激光修整过程看作为单脉冲激光烧蚀效果的叠加。为简化计算,对修整过程做如下简化^[9]:

- 1) 金刚石和石墨物理属性各向同性且恒定;
- 2) 金刚石磨粒形状为六面体或者八面体,本文近似认为磨粒为规则的立方体;
- 3) 在脉宽时间内,砂轮周向移动量为几十微米,远小于激光的光斑半径 0.13 mm,烧蚀过程可以简化为静止热源问题;
- 4) 实验所用的 YAG 激光器输出虽为多模激光,但在焦点附近却非常接近基模高斯光束,激光修整砂轮时采用的激光光斑都在焦点附近,可以认为

光束在空间呈基模高斯分布^[10]:

$$I(x, y) = AI_0 \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{R^2}\right], \quad (1)$$

式中 $I(x, y)$ 和 I_0 为激光功率密度和光斑的峰值功率密度, A 为材料对激光的吸收率, R 为光束照射工件表面形成的光斑半径,本实验中测得 $R=0.13$ mm。

在直角坐标系中,传热控制方程的一般形式为^[11]

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + q = \rho c \frac{\partial T(r, t)}{\partial t}, \quad (2)$$

式中 T 为计算区域内实时温度(K), ρ 为材料密度, c 为材料的定压比热, $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 分别为材料在 x, y 和 z 方向导热系数, t 为时间变量, q 为内热源生成热。

在激光修整砂轮过程中无内热源生成热,并根据上述简化,传热控制方程可简化为

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (3)$$

激光修整砂轮过程中有激光热流密度输入和空气对流换热,因此存在着第二类和第三类边界条件。第二类边界条件可表示为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = AI, \quad (4)$$

式中 A 为材料对激光的吸收率, $\partial T/\partial n$ 为法线方向上的温度梯度, I 为单脉冲激光功率密度,其值由激光器平均功率 P 、脉宽 t_0 、脉冲重复频率 f 和光斑半径 R 来决定。第三类边界条件可表示为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T_s - T_\infty), \quad (5)$$

式中 h_c 为对流换热系数,本文为 $200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $\partial T/\partial n$ 为法线方向上的温度梯度, T_s 为材料表面温度, T_∞ 为初始温度 298 K 。

2.2 几何模型的建立及数值求解

本实验所用青铜金刚石砂轮的粒度为 190,磨粒平均直径公式为^[12]

$$d = \frac{0.75 \times 25.4}{h}, \quad (6)$$

式中 d 为磨粒的平均直径(单位:mm), h 为磨粒的粒度号。

经计算得磨粒平均直径为 $100 \mu\text{m}$,所以取磨粒尺寸为 $100 \mu\text{m}$ 建立金刚石磨粒正六面体单脉冲激光烧蚀模型,由于模型和激光载荷都具有对称性,可以取 1/4 模型进行计算。由于激光束作用区域内温度梯度很大,为保证计算精度与效率,要对模型进行映射网格划分,即在靠近激光辐射的单元采用较大

的网格密度,而较远的单元则采用较小的网格密度。

在激光辐照磨粒表层的单元既有激光热流输入又有空气对流换热,属于混合边界条件。在 ANSYS 加载过程中,为了避免发生载荷覆盖效应而采用了表面效应单元,即将激光以热流输入加载到实体模型表面,而将空气对流加载到表面效应单元。具体而言,在加载的过程中将热流密度施加到实体单元 SOLID90 上,将空气对流加载到表面效应单元 SURF152 上。模拟中采用的金刚石和石墨的物理属性如表 1 所示^[5,13]

表 1 金刚石和石墨物理属性

Table 1 Thermal properties of diamond and graphite

Property	Diamond	Graphite
Thermal conductivity $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	20	134
Density $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	3.52	1.7
Thermal diffusivity $\alpha / (10^{-4} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	3.114	0.58
Absorptivity A (YAG laser)	0.2	0.6
Sublimation temperature /K	—	3652
Graphitization temperature /K	1273	—

激光烧蚀金刚石磨粒机理为:金刚石磨粒受热温度升高,当达到石墨化温度时便氧化产生石墨变

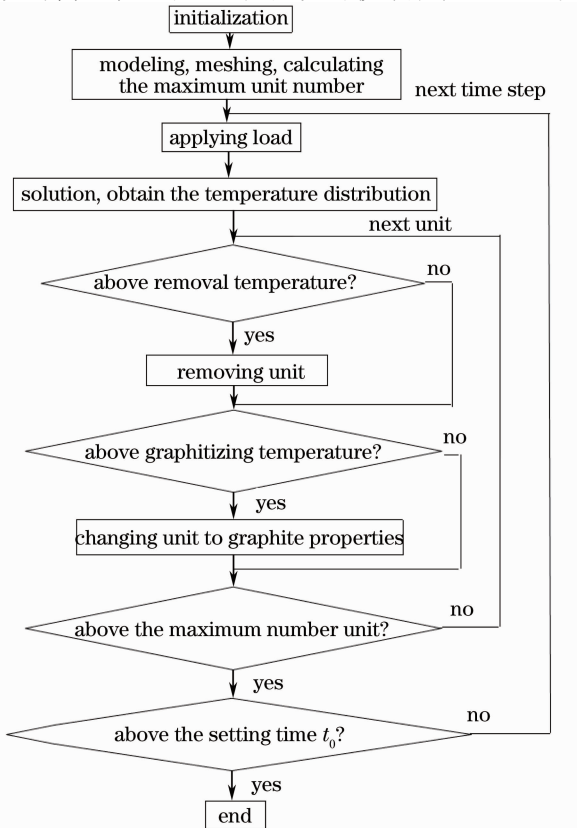


图 1 程序流程图

Fig.1 Flow chart of simulation process

质层;然后变质层受到激光辐照温度继续升高,当温度达到石墨升华温度时去除材料。在实际 ANSYS 仿真过程中,首先设定时间步长 $\Delta t = 10 \text{ ns}$,从 $t = 0$ 开始,将每一时间步的温度计算结果读入到后处理器中,判断哪些单元达到了去除温度(石墨升华温度)、哪些单元达到了石墨化温度;然后再进入求解器中,将达到升华温度的单元去除掉,将达到石墨化温度的单元改变为石墨属性,逐步循环继续求解。本实验采用 ANSYS 参数化编程语言 (APDL) 对整个计算过程进行编程,其程序流程如图 1 所示。

2.3 仿真结果

本实验所采用的调 Q YAG 激光器的最大平均功率为 100 W,其稳定工作范围为 10~50 W。

如表 2 所示,激光功率密度 I 与脉宽 t_0 、激光功率 P 有一一对应关系,仿真过程中可以依据表 2,选取合适的激光参数进行仿真(黑体数据为砂轮修锐时的选取标准)。

表 2 $R = 0.13 \text{ mm}$ 时单脉冲激光功率密度 $I (10^7 \text{ W}/\text{cm}^2)$

Table 2 Single-pulse laser power density

$I (10^7 \text{ W}/\text{cm}^2)$ when $R = 0.13 \text{ mm}$

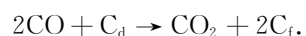
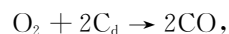
P / W	t_0 / ns				
	170	210	260	310	350
10	22.17	8.97	3.62	2.03	1.35
20	44.34	17.95	7.25	4.05	2.69
30	66.51	26.92	10.87	6.08	4.04
40	88.68	35.89	14.50	8.11	5.38

图 2(a)为脉冲激光烧蚀后的金刚石磨粒形貌,图 2(b)为脉冲激光烧蚀磨粒的温度分布,图 2(c)为变质层厚度的观测图。

图 3(a)为 $P = 20 \text{ W}$, $t_0 = 260 \text{ ns}$, $I = 7.25 \times 10^7 \text{ W}/\text{cm}^2$ 砂轮修锐时脉冲激光烧蚀磨粒的温度分布,其激光功率密度 I 接近去除金刚石磨粒的功率密度阈值,图 3(a)中最高温度为 3450 K;图 3(b)为 $P = 30 \text{ W}$, $t_0 = 260 \text{ ns}$, $I = 10.87 \times 10^7 \text{ W}/\text{cm}^2$ 砂轮整形时脉冲激光烧蚀金刚石磨粒的温度分布。

3 激光修整金刚石砂轮的石墨变质层

在激光修整砂轮实验中,当烧蚀瞬间的温度超过石墨的转变温度时,将产生变质层^[5],变质层就是金刚石磨粒在高温下氧化而形成的石墨层,这主要是由于常温常压下处于亚稳态的金刚石碳 (C_d) 转变为石墨 (C_f) 以及碳和空气中的氧生成 CO 和 CO_2 造成的^[6,7],化学反应式如下:



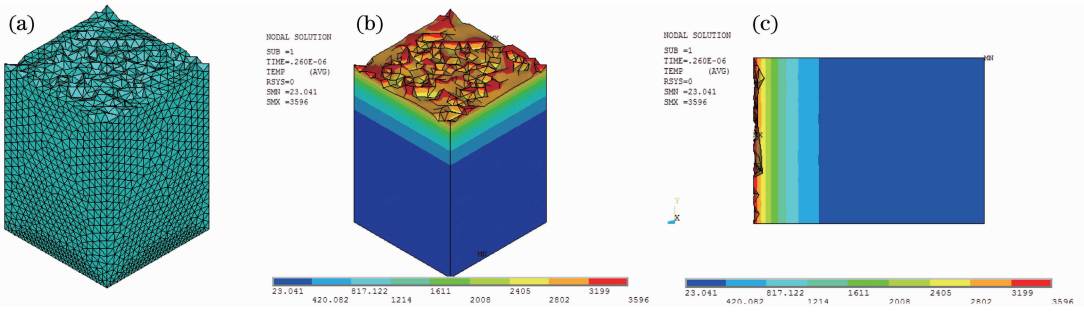


图 2 激光烧蚀金刚石磨粒 ANSYS 温度场云图, 激光参数为 $P=30\text{ W}$, $t_0=260\text{ ns}$, $I=10.87\times 10^7\text{ W/cm}^2$ 。

(a) 激光烧蚀后的金刚石磨粒形貌; (b) 烧蚀磨粒的温度分布; (c) 变质层厚度

Fig. 2 Nephogram of temperature distribution in laser ablating diamond with laser parameters as $P=30\text{ W}$, $t_0=260\text{ ns}$, $I=10.87\times 10^7\text{ W/cm}^2$. (a) Diamonal profile after ablation; (b) temperature distribution; (c) thickness of the ablated layer

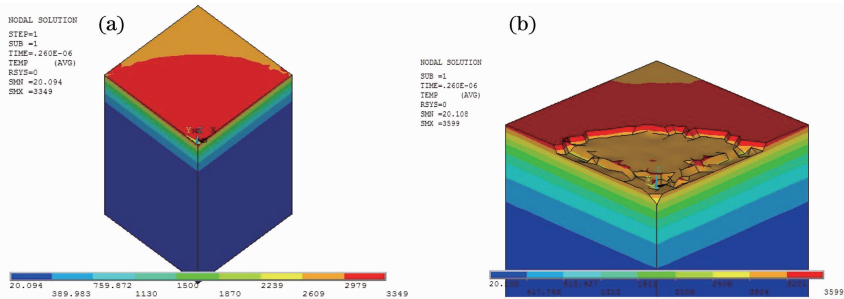


图 3 激光烧蚀金刚石磨粒 ANSYS 温度场云图。(a) 砂轮修整时烧蚀磨粒的温度分布; (b) 砂轮整形时磨粒的温度分布

Fig. 3 Nephogram of temperature distribution in laser ablating diamond. (a) Temperature distribution of dressed diamond; (b) temperature distribution of shaped diamond

3.1 石墨变质层厚度的检测

用仿真法检测金刚石磨粒石墨变质层厚度的方法是,选择合适的激光参数(脉宽与激光功率),利用 ANSYS 软件仿真脉冲激光烧蚀金刚石颗粒,得到烧蚀后的温度分布,当温度超过材料去除温度时(3652 K),利用 ANSYS 的杀死功能(EKILL)去除单元,脉冲结束后,温度在 1273~3652 K 的单元认为是石墨层单元,然后获取单元的坐标值,便可以获得变质层的厚度。

实验检测金刚石磨粒石墨变质层厚度的方法是,选择合适的激光参数(使脉冲激光离散地辐照在磨粒上)烧蚀单颗粒金刚石,获得烧蚀后磨粒的形貌,采用扫描电子显微镜(SEM)对磨粒的正面和侧面进行检测,利用石墨变质层与金刚石基体的形貌与组织的不同,便可获得石墨变质层的厚度,如图 4 所示,图中白色部分为变质层。

脉冲激光去除材料功率密度阈值的计算公式为^[4]

$$I_{th} = \frac{\lambda(T_m - T_0)}{2A} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha t_0}}, \quad (7)$$

式中 A, λ, α 分别为金刚石对激光的吸收率、导热系数和热扩散率, T_m 为材料温度, T_0 为初始温度

298 K。

在不同的脉宽 t_0 下,将磨粒石墨化温度 1273 K 代入(7)式可以得到磨粒石墨化的激光功率密度阈值,其值介于去除青铜结合剂的功率密度阈值与去除金刚石磨粒的功率密度阈值之间,所以在砂轮修整与整形时都会产生石墨变质层。为研究脉宽和激光功率(脉宽与脉冲重复频率有一一对应关系)对变质层厚度的影响规律,在仿真与实验测量变质层厚度时,采用单一变量法进行研究。

3.2 脉冲激光参数对石墨变质层的影响

采用正交实验与正交分析相结合的方法对单脉冲激光修整参数与变质层厚度的影响规律进行研究,如表 3 所示。

由表 3 极差值的大小可以看出在砂轮修整时,脉宽对变质层厚度的影响略大于激光功率对变质层厚度的影响;而在砂轮整形时,脉宽则起到主导作用,激光功率对变质层厚度的影响很小。因为在砂轮修整时(激光功率密度较低),产生的热量相对较少,金刚石高的热导率使得热积累效果很小,因此变质层厚度变化幅度不会很大;而在砂轮整形时,由表 2 可以看出脉宽对单脉冲激光功率密度的影响程度远大于激光功率,脉宽的变化剧烈影响着功率密

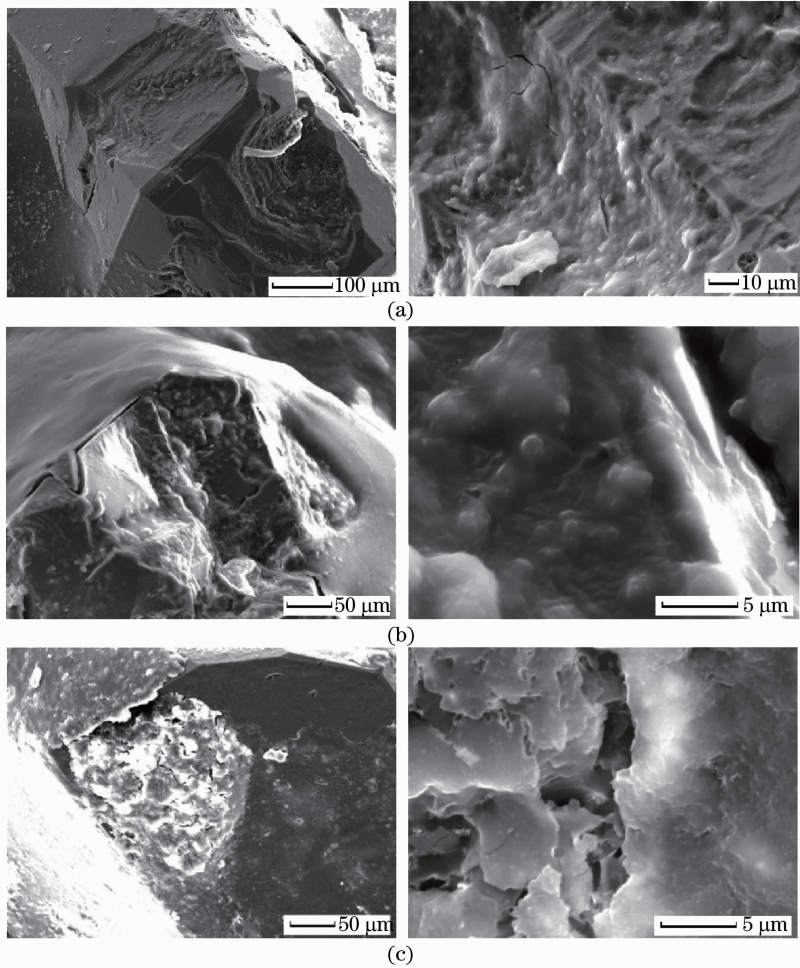


图 4 单脉冲烧蚀金刚石磨粒 SEM 图。(a) $P=20\text{ W}, t_0=210\text{ ns}, I=17.95\times 10^7\text{ W/cm}^2$; (b) $P=30\text{ W}, t_0=210\text{ ns}, I=26.92\times 10^7\text{ W/cm}^2$; (c) $P=10\text{ W}, t_0=210\text{ ns}, I=8.97\times 10^7\text{ W/cm}^2$

Fig. 4 SEM pictures of surface craters ablated by single laser pulse. (a) $P=20\text{ W}, t_0=210\text{ ns}, I=17.95\times 10^7\text{ W/cm}^2$; (b) $P=30\text{ W}, t_0=210\text{ ns}, I=26.92\times 10^7\text{ W/cm}^2$; (c) $P=10\text{ W}, t_0=210\text{ ns}, I=8.97\times 10^7\text{ W/cm}^2$

表 3 单脉冲激光参数与石墨变质层厚度的正交实验表

Table 3 Orthogonal test between single-pulse laser parameters and depth of the carbonized layer

Laser dressing				Laser shaping			
Test number	Pulse width /ns	Laser power /W	Depth of carbonized layer / μm	Test number	Pulse width /ns	Laser power /W	Depth of carbonized layer / μm
1	310	10	4.37	5	170	30	2.53
2	310	20	5.15	6	170	40	2.87
3	350	10	3.21	7	210	30	5.27
4	350	20	3.85	8	210	40	5.91
Range R_i	1.21	0.72		Range R_i	2.89	0.48	

度值,从而导致单个脉冲热积累效果的迅速变化,进而会引起变质层厚度的急剧变化,所以在砂轮整形时脉宽会对变质层厚度起到主导作用。

石墨变质层厚度随着激光功率和脉宽的增大而增加,只有在砂轮修锐时,变质层厚度随着脉宽增大而减少。这主要是因为,在砂轮修锐时激光峰值功率本身就很小,脉宽的增加会引起激光峰值功率锐减,

由于金刚石高的热导率(修锐时金刚石磨粒没有被去除),热积累效果会变小,变质层厚度会略有降低;而在砂轮整形时,随着脉宽的增大(占空比增加)、激光功率增大(产生热量增多),而且磨粒高温产生的石墨变质层热导率相对较小,单个脉冲产生的热积累效果会不断增加,导致变质层厚度的增加。

多脉冲实验(本实验取 100 个脉冲)与单脉冲实

验对比可以发现,经过多脉冲激光烧蚀后变质层厚度有所减少,而且减少的幅度与单脉冲烧蚀后产生

的变质层厚度成正比。这是因为经过单脉冲烧蚀后,磨粒的物理属性发生了变化(金刚石→石墨),材料热导率和热扩散率的不同。

在实际修整砂轮实验中所得到的变质层厚度要比仿真计算的小,这是因为金刚石磨粒有很大的温度梯度会产生热裂纹,当裂纹破碎时,变质层厚度会减少。

4 结 论

运用 ANSYS 有限元法在考虑金刚石石墨化的基础上,建立了更为真实的三维声光调 Q YAG 单脉冲激光烧蚀金刚石磨粒的数学模型和传热模型,得到了激光烧蚀金刚石磨粒后的温度分布。

针对脉冲激光修锐与整形砂轮的两个不同方面,通过仿真模拟和实验得到石墨变质层厚度,并研究了脉冲激光参数对变质层厚度的影响规律,发现在砂轮修锐时,脉宽对变质层厚度的影响略大于激光功率对变质层厚度的影响;而在砂轮整形时,脉宽起绝对主导作用,激光功率对变质层厚度的影响甚微。经过多脉冲激光烧蚀后变质层厚度有所减少;只有在砂轮修锐时石墨变质层厚度才会随脉宽的增加而减少。

参 考 文 献

- 1 Kang Renke, Yuan Jingting, Shi Xingkuan *et al.*. Study on laser dressing of superabrasive grinding [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
- 2 Genyu Chen, Lifang Mei, Bi Zhang *et al.*. Experiment and numerical simulation study on laser truing and dressing of bronze-bonded diamond wheel [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, **48**(3): 295~304
- 3 Chen Genyu, Zhu Dingjun, Peng Kai *et al.*. Ablation mechanism of bronze-bonded diamond wheels dressing by pulsed laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 245~249
陈根余, 朱定军, 彭凯等. 脉冲激光修锐青铜金刚石砂轮烧蚀机制研究 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 245~249
- 4 Chen Genyu. The Research on Mechanism and Technology for Laser Truing and Dressing of Bronze-Bonded Diamond Grinding Wheels by Acoustic-Optic Q-Switched Nd:YAG Pulsed Laser [D]. Changsha: Hunan University, 2006. 15~34
陈根余. 声光调 Q Nd:YAG 脉冲激光修整青铜金刚石砂轮机理及技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006. 15~34
- 5 Chen Genyu, Yu Junyong, Li Lijun *et al.*. Ablation of diamond grain by laser and analysis of its affected layer and micro-crack [J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, **17** (supplement): 317~320
陈根余, 于俊勇, 李力钧等. 激光烧蚀金刚石磨粒及其变质层与微裂纹分析 [J]. *中国机械工程*, 2006, **17**(增刊): 317~320
- 6 Wang Shi, Sun Baoyuan, Wang Yuchang *et al.*. Study on graphitization temperature of polycrystalline diamond [J]. *Superhard Material Engineering*, 2005, **17**(5): 32~35

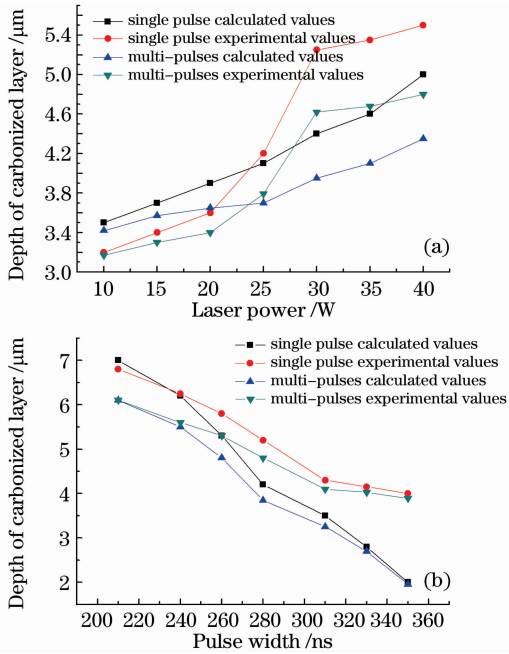


图 5 砂轮修锐时脉冲激光参数对石墨变质层厚度的影响。(a) $t_0 = 350$ ns; (b) $P = 10$ W
Fig. 5 Effects of laser parameters on depth of carbonized layer by pulsed laser in dressing. (a) $t_0 = 350$ ns; (b) $P = 10$ W

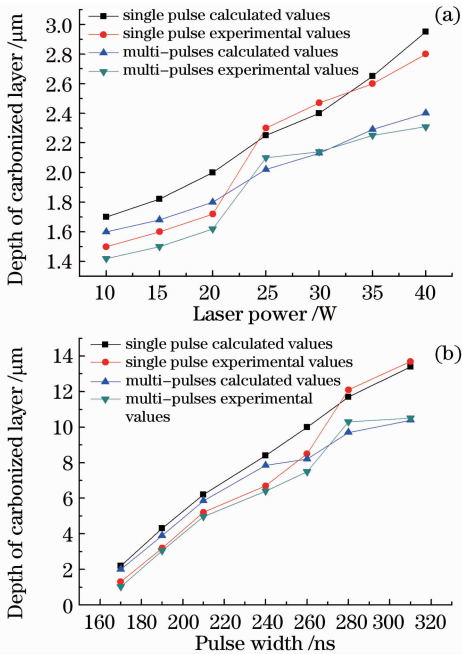


图 6 砂轮整形时脉冲激光参数对石墨变质层厚度的影响。(a) $t_0 = 170$ ns; (b) $P = 30$ W
Fig. 6 Effects of laser parameters on depth of carbonized layer by pulsed laser in shaping. (a) $t_0 = 170$ ns; (b) $P = 30$ W

- 王 适, 孙宝元, 王裕昌 等. 聚晶金刚石石墨化温度的研究[J]. 超硬材料工程, 2005, **17**(5): 32~35
- 7 Sun Shuda, Sun Jing. Observation of oxidation process of diamond with high temperature microscope [J]. *Superhard Material Engineering*, 2006, **18**(6): 23~25
- 孙书达, 孙 景. 用高温显微镜直接观测金刚石的氧化过程[J]. 超硬材料工程, 2006, **18**(6): 23~25
- 8 Chen Genyu, Chen Guogui, Huang Kong *et al.*. Study on the accuracy for laser truing and dressing of bronze-bonded diamond wheels[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1278~1281
- 陈根余, 陈国桂, 黄 孔 等. 激光修整青铜金刚石砂轮精度研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1278~1281
- 9 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
- 10 Wu Xiaojun, Zuo Dunwen, Xu Feng *et al.*. FEM analysis on the temperature field of CVD diamond film laser drilling[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2010, **29**(1): 83~85
- 吴小军, 左敦稳, 徐 锋 等. CVD金刚石膜激光打孔温度场有限元仿真[J]. 硅酸盐通报, 2010, **29**(1): 83~85
- 11 Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer[M]. Beijing: High Education Press, 2006. 13~25
- 杨世铭, 陶文铨 编著. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 13~25
- 12 Yang Yongsheng, Wang Min. Estimation and rational matching of grinding wheel topography[J]. *Machinery*, 1999, **26**(2): 14~16
- 杨勇生, 王 珉. 砂轮形貌特征的评定及其合理匹配[J]. 机械, 1999, **26**(2): 14~16
- 13 Wang Qinsheng. Superhard Material Manufacture[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2002. 57~78
- 王秦生. 超硬材料制造[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002. 57~78

栏目编辑: 宋梅梅