

文章编号: 1001-3806(2012)04-0433-05

## 激光在线修整青铜金刚石砂轮数值仿真与试验

陈根余<sup>1,2</sup> 陈冲<sup>1,2</sup>, 卜纯<sup>2</sup> 贾天阳<sup>2</sup>

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

**摘要:** 为了研究声光调  $Q$  YAG 脉冲激光在线修整青铜结合剂金刚石砂轮, 采用数值仿真和试验相结合的方法, 在考虑金刚石石墨化过程的基础上, 通过有限元数值模拟的方法建立了 3 维单脉冲激光烧蚀金刚石磨粒的数学模型和传热模型, 研究了脉冲激光参量(离焦量、脉宽和激光功率)对金刚石磨粒去除厚度的影响规律, 为激光修整参量选择提供了指导。结果表明, 激光功率、脉宽和离焦量是影响脉冲激光金刚石磨粒去除厚度的最直接的因素, 金刚石磨粒去除厚度随着激光功率的增加而变大; 随着脉宽的增加而减少; 随着离焦量的增加而减少。借助 CCD 和激光三角位移测量仪对砂轮表面跳动进行在线监测、采用闭环控制系统控制  $Q$  开关, 实现了砂轮的在线修整, 获得了良好的地形地貌, 降低了砂轮圆跳动度误差, 达到良好的修整效果。

**关键词:** 激光技术; 在线修整; 数值仿真; 青铜金刚石砂轮; 激光参量

中图分类号: TN249; TP156.99 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.04.001

## Numerical simulation and experiment for on-line truing and dressing of bronze-bonded diamond grinding wheels with laser

CHEN Gen-yu<sup>1,2</sup>, CHEN Chong<sup>1,2</sup>, BU Chun<sup>2</sup>, JIA Tian-yang<sup>2</sup>

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

**Abstract:** Based on both numerical simulation and experimental investigation, much research work has been done on on-line truing and dressing bronze-bonded diamond grinding wheel by acoustic-optic  $Q$ -switched YAG pulsed laser. A 3-D mathematical simulation model and a heat transfer model of single pulsed laser ablating the diamond abrasive was established by means of finite element method, where the process of diamond graphitization was taken into account. The removal depth of the diamond abrasive in different laser parameters (such as focal position, pulse width and laser power) was measured, and the relationship between them was analysed, which helped us to select optimal parameters. The results show that: the laser power, pulse width and the focal position are the direct effects of the removal depth of the diamond abrasive; it will increase along with the increase of laser power, and decrease along with the increase of pulse width and the focal position. The on-line grinding wheel dressing was achieved with closed-loop control, CCD and laser triangulation displacement measuring instrument which were used in control of  $Q$ -switch and the on-line monitoring of the circular run-out of the grinding wheel. After laser truing and dressing, the accuracy was further improved, the circular run-out error was reduced and the surface topography was improved too.

**Key words:** laser technique; on-line truing and dressing; numerical simulation; bronze-bonded diamond grinding wheel; laser parameters

## 引言

金刚石砂轮具有极高的硬度, 修整非常困难, 在一定程度上限制了金刚石砂轮的应用。激光加工具有高功率

基金项目: 国家八六三高技术研究发展计划资助项目(2007AA042006); 国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项课题资助项目(2009ZX04007\_021)

作者简介: 陈根余(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光微细加工技术方面的研究。

E-mail: hdgycchen@163.com

收稿日期: 2011-11-07; 收到修改稿日期: 2011-11-22

密度, 从而能在瞬间熔化或者气化材料, 以达到去除材料的目的<sup>[1-2]</sup>。声光调  $Q$  YAG 脉冲激光器修整青铜金刚石砂轮时, 最终所获得的磨粒凸出高度和砂轮表面形貌可以看作是单个脉冲激光烧蚀凹坑的依次排列或部分重叠的结果, 所以对单脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮进行研究非常有意义。通过对单个脉冲激光烧蚀砂轮的研究, 可以搞清楚各个激光参量对结合剂和磨粒烧蚀凹坑深度的影响, 获得优良的激光参量组合, 再结合各种加工工艺参量, 实现单个脉冲激光烧蚀凹坑的叠加, 对砂轮进行修整试验, 从而获得修锐和整形的合二为一<sup>[3-4]</sup>。

作者在考虑金刚石石墨化过程的基础上, 采用数值

仿真的方法建立了3维单脉冲激光烧蚀金刚石砂轮的数学模型，并试图通过仿真、理论分析与试验相结合的方法找到激光参数对金刚石磨粒去除厚度的影响规律，为修整青铜金刚石砂轮激光参数的选择提供指导；采用图像传感器（charge-coupled device, CCD）和激光三角位移测量仪在线测量砂轮的圆跳动度，采用闭环控制系统控制Q开关进而控制脉冲激光的输出进行砂轮在线选择性修整，消除砂轮圆跳动误差，达到了良好的修整效果。

## 1 单脉冲激光烧蚀金刚石磨粒仿真试验

由于声光调Q脉冲激光占空比小，反映到修整过程中即单个激光脉冲与材料相互作用时间很短，对材料产生的热积累影响很小，故可将修整过程视为单脉冲激光烧蚀效应。为简化计算过程，本文中对激光烧蚀过程作出如下简化和假设<sup>[5]</sup>：(1) 金刚石磨粒的形状为六面体或者八面体，为简化计算，近似认为磨粒为规则的立方体；(2) 声光调Q Nd:YAG 脉冲激光辐照砂轮时，砂轮在最大脉宽时间内的周向位移为0.1 μm ~ 0.35 μm，远小于激光的焦斑直径0.26 mm，可将所考虑的问题简化为静止热源问题；(3) 金刚石和石墨热物理及光学性质参数恒定；(4) 试验中所用的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：

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

式中  $I(x, y)$  为激光功率密度， $I_0$  为光斑的峰值功率密度， $A$  为材料对激光的吸收率， $R$  为激光经聚焦透镜后的光斑半径。

### 1.1 传热模型的建立

在直角坐标系中，传热控制方程的一般形式为<sup>[6]</sup>：

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

式中  $T$  为计算区域内实时温度 (K)， $\rho$  为材料密度， $c_p$  为材料的比定压热容， $\lambda_x$ ， $\lambda_y$  和  $\lambda_z$  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。

针对激光烧蚀金刚石磨粒过程的实际情况，建立导热控制方程。在直角坐标系下，被加热材料表面的温度  $T(x, y, z, t)$  满足导热控制方程：

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

式中  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$  称为热扩散率。

激光烧蚀过程中存在着第2类和第3类边界条件：热流密度输入和对流换热，可表示成为如下形式：

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_w \quad (t > 0) \quad (4)$$

$$q_w = AI = A \frac{P_m}{t_0 \cdot f \cdot S} = A \frac{P_m}{\pi \cdot t_0 \cdot f \cdot R^2} \quad (5)$$

式中  $q_w$  为输入热流密度， $S$  为光斑面积， $A$  为材料对激光的吸收率， $I$  为单脉冲激光功率密度， $P_m$  为激光器平均输出功率， $t_0$  为声光调Q脉冲激光的脉宽， $f$  为脉冲重复频率。

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_s - T_\infty) \quad (6)$$

式中  $h$  为对流换热系数， $T_s$  为材料表面温度， $T_\infty$  为周围环境温度298 K。

### 1.2 有限元模型的建立及数值求解

在建立单脉冲烧蚀几何模型时，参照试验用声光调Q YAG 脉冲激光器的特性和金刚石砂轮的规格建立模型。本试验中所用青铜金刚石砂轮的粒度为190，经计算可得磨粒平均直径为100 μm<sup>[7]</sup>，单晶金刚石颗粒的形状近似为正六面体，由于模型形状和载荷分布（激光束）都具对称性，为简化计算，均取1/4模型进行计算。在网格划分时，采用自由网格划分方法。在激光束照射的区域及与相邻近的区域内，采用细密的有限元网格，在离激光束照射作用区较远的区域，则采用较粗的有限元网格，这样在保证计算精度的同时，减少生成节点和单元的数量，降低计算量。

Table 1 Thermal properties of diamond and graphite<sup>[8-9]</sup>

| property   | diamond | graphite |
|--|---------|----------|
| thermal conductivity $\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ | 20      | 134      |
| density $\rho/(g \cdot cm^{-3})$                             | 3.52    | 1.7      |
| thermal diffusivity $\alpha/(10^{-4} m^2 \cdot s^{-1})$      | 3.114   | 0.58     |
| absorptivity $A$ (YAG laser)                                 | 0.2     | 0.6      |
| sublimation temperature /K                                   | —       | 3652     |
| graphitization temperature/K                                 | 1273    | —        |

将激光以热流密度的方式加载到实体模型上表面，而将对流加载到表面效应单元上。为了避免空气对流载荷取代热流密度载荷独自作用于超硬磨料上（即发生覆盖效应），在加载的过程中采用表面效应单元 SURF152 将热对流边界施加到表面效应单元，而将热流密度施加到实体单元 SOLID90 上<sup>[10]</sup>。加载过程的载荷分为3步：(1) 初始温度20℃（室温）；(2) 热流密度和空气对流，作用时间为  $t_0$ ；(3) 关闭激光，作用时间为  $T - t_0$  ( $T$  为激光脉冲周期)。

金刚石在高温下易氧化而产生石墨化，会由金刚石碳( $C_d$ )转变为石墨( $C_f$ )<sup>[9]</sup>。根据金刚石的去除机理，磨粒上超过金刚石石墨化温度的部分就会发生变质，形成石墨层，石墨层进一步受到激光的辐照达到升华点进而实现去除。在计算的过程中，从  $t=0$  开始，

给定一个时间增量  $\Delta t$ , 将每一步计算的结果从求解器中读入到后处理器中, 判断哪些单元的温度达到了材料的去除温度点, 哪些材料达到了石墨化温度点, 然后再进入求解器中, 将温度达到材料气化点的单元 EKILL 掉, 将达到石墨化温度点的单元改变为石墨物理属性。然后再继续求解, 逐步循环。整个计算分析过程需要采用 ANSYS 中的参量化编程语言( APDL) 进行编程来完成具体的程序流程图如图 1 所示。

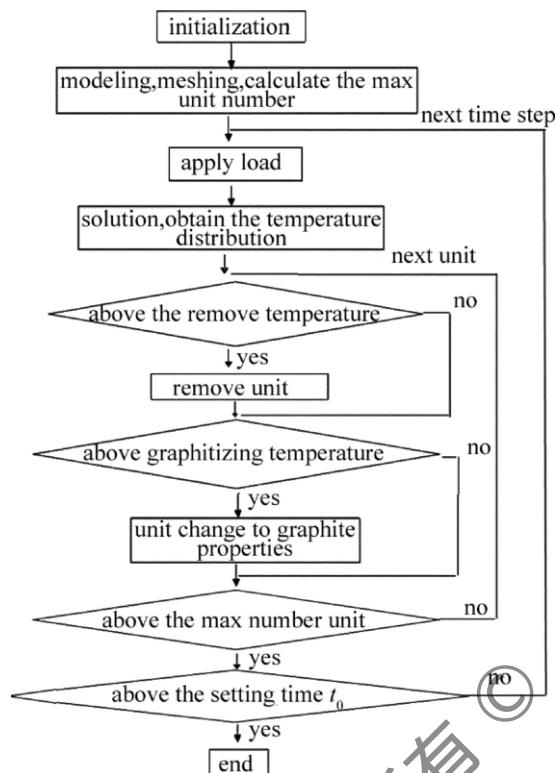


Fig. 1 Flow chart of simulation process

图 2 为经 YAG 单脉冲激光烧蚀后, 金刚石磨粒

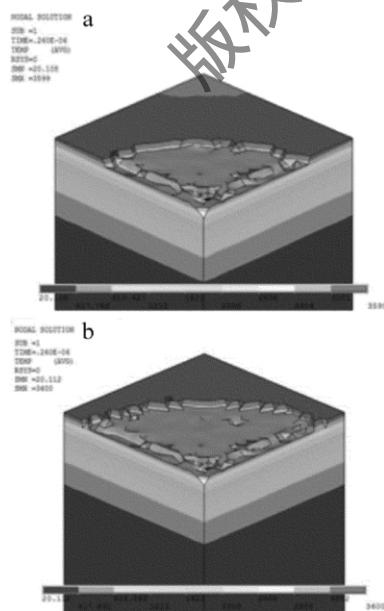


Fig. 2 Temperature distribution contour of pulsed laser ablating abrasive  
a— $t_0 = 260\text{ns}$   $P_m = 30\text{W}$   $\Delta = 0\text{mm}$  b— $t_0 = 260\text{ns}$   $P_m = 40\text{W}$   $\Delta = 3\text{mm}$

的温度场云图。

## 2 金刚石磨粒去除厚度的研究

仿真法测量金刚石磨粒去除厚度: 选择合适的激光参量, 利用 ANSYS 软件仿真单脉冲激光烧蚀金刚石颗粒得到烧蚀后的温度场, 当温度超过气化温度时(即去除温度 3652K), 利用 ANSYS 的杀死功能( EKILL) 去除掉单元, 脉冲结束后, 获取单元的坐标值, 便可以得到单脉冲烧蚀凹坑深度( 金刚石磨粒的去除厚度值)。

试验法测量金刚石磨粒去除厚度: 选择合适的砂轮转速和进给速度, 使声光调  $Q$  激光脉冲离散的辐照在砂轮的表面上, 然后选择合适的激光参量, 对单个金刚石磨粒进行烧蚀, 烧蚀后的金刚石晶体浸泡在无水酒精中, 用超声波振荡清洗仪进行清洗, 去除试件表面的油污和杂质, 为防止在扫描时放电, 对试样做喷金处理, 再借助扫描电子显微镜( scanning electron microscope, SEM) 测量单脉冲烧蚀凹坑深度( 金刚石磨粒的去除厚度)。图 3 为经过单脉冲激光烧蚀后, 测量金刚石磨粒烧蚀凹坑深度的 SEM 图。

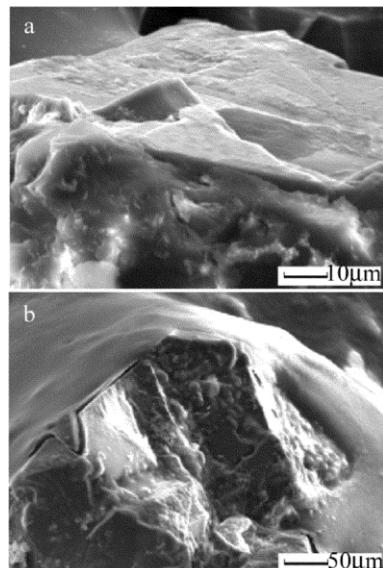


Fig. 3 SEM pictures of surface craters ablated by single pulsed laser  
a— $t_0 = 260\text{ns}$   $P_m = 20\text{W}$   $\Delta = 0\text{mm}$  b— $t_0 = 260\text{ns}$   $P_m = 40\text{W}$   $\Delta = 3\text{mm}$

影响金刚石磨粒烧蚀凹坑深度的主要因素是脉冲激光的功率密度  $I$ , 功率密度的大小又有激光器平均输出功率  $P_m$ 、脉宽  $t_0$ 、脉冲重复频率  $f$  和光斑半径  $R$  来控制, 参见(5)式, 其中脉宽与脉冲重复频率有一一对应关系, 光斑半径因素在试验中用离焦量  $\Delta$  来替代, 离焦量  $\Delta$  是指激光束的焦点与砂轮表面之间的距离。本试验中测得在离焦量  $\Delta = 0\text{mm}$  时,  $R = 0.13\text{mm}$ ; 在离焦量  $\Delta = 3\text{mm}$  时, 测得  $R = 0.17\text{mm}$ 。为研究激光参量( 脉宽、激光功率、离焦量) 对磨粒去处厚度的影

响规律。在仿真法与试验法测量金刚石磨粒去除厚度时，采用单一变量法进行研究。

由图4可以看出：(1)单脉冲激光去除金刚石磨粒的厚度随着激光功率的增加而变大；随着脉宽的增加而减少；随着离焦量的增加而减少；通过正交分析得到三者的影响程度依次为：脉宽、离焦量、激光功率，三者的影响程度相差不大；(2)金刚石磨粒去除厚度仿真数值总比试验数据偏小，其主要原因是在峰值功率较高的条件下，由于温度的急剧升高，金刚石颗粒局部由于热应力的作用，会从金刚石颗粒基体上崩离。

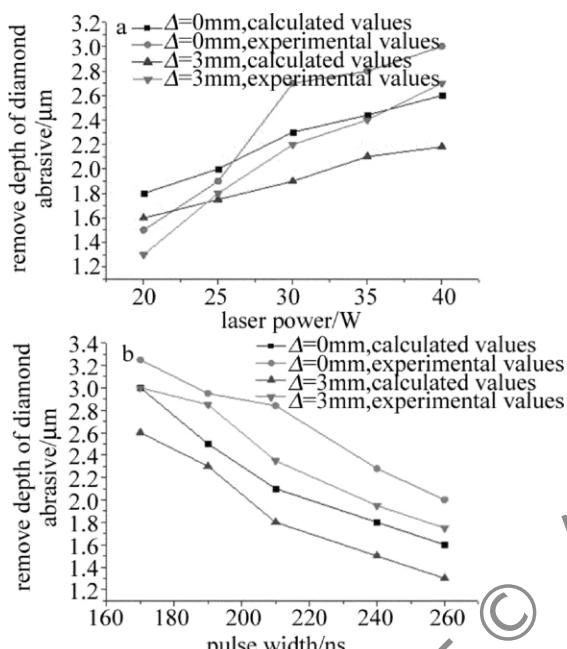


Fig. 4 Effect of laser parameters on remove thickness of diamond abrasive by single pulsed laser  
a— $t_0 = 170\text{ns}$  b— $P_m = 40\text{W}$

### 3 脉冲激光在线修整青铜结合剂金刚石砂轮试验

试验中所用砂轮的型号为：1A1 200×4×12×3 190 M 100。其中1A1表示砂轮的形状代号，代表平形砂轮，砂轮外径为200mm，宽度为4mm，有效磨削层厚度为3mm；砂轮的磨粒为单晶人造金刚石，190表示磨粒的粒度，M代表了砂轮的结合剂为金属，100表示砂轮的磨粒的质量分数为100%。

#### 3.1 试验原理

本试验系统由控制板、CCD、激光三角位移测量仪、激光功率电源、声光调Q开关、电脑、YAG激光器和外光路等组成，见图5。试验过程如下：(1)采用CCD和激光三角位移测量仪对砂轮表面跳动进行离线监测，得到砂轮表面各点的跳动值，并通过控制系统将其转化成对应的电压值，确定要修整的余量，并设定参考电压值；(2)通过CCD和激光三角位移测量仪对

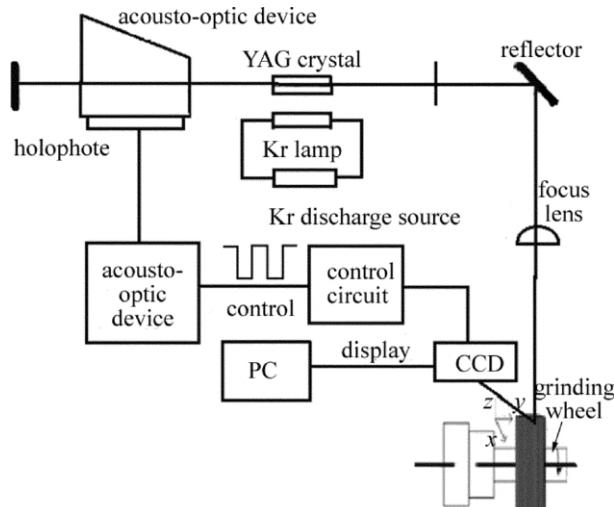


Fig. 5 On-line truing and dressing system of a grinding wheel by pulsed laser  
砂轮表面跳动进行在线监测，进行砂轮在线修整。CCD测得跳动值通过控制系统将其转化为对应的电压值，并与预先设定好的参考电压值进行比较。若转化所得的电压值大于预先设定好的参考电压值，说明该点为高点，应去除掉，此时控制系统发出指令打开Q开关输出巨脉冲激光，对砂轮表面进行烧蚀；若转化所得的电压值小于预先设定好的参考电压值，则说明该点为低点，不需要去除，此时控制系统不发出指令，Q开关关闭，不进行烧蚀加工。

#### 3.2 试验结果

图6为激光修整前后的砂轮表面形貌，从图中可以看出，金刚石磨粒被微量去除，砂轮表面具有一定的磨粒突出高度和容屑空间，砂轮表面的地形地貌较为理想，达到了良好的修整效果。

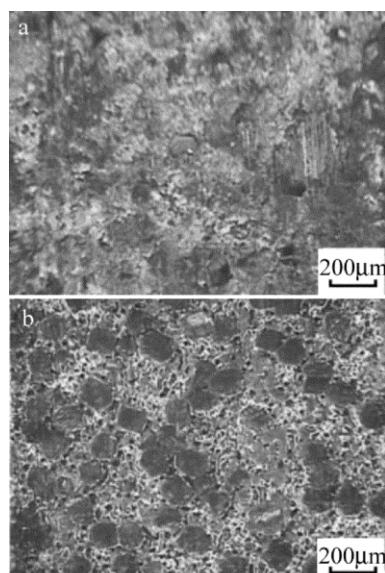


Fig. 6 Surface topography of a grinding wheel under optical microscope  
a—before laser truing and dressing b—after laser truing and dressing

本试验中采用激光位移传感器采集砂轮表面的圆跳动度，图7所示砂轮在修整前圆跳动量为几百微米，

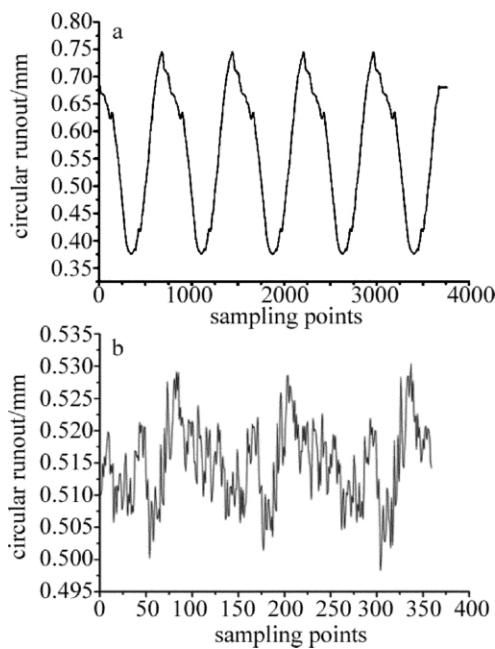


Fig. 7 Surface circular runout of a grinding wheel

a—before laser truing and dressing b—after laser truing and dressing  
经过激光修整后砂轮的整体偏心很小,圆跳动量下降至 $20\mu\text{m}$ ,且金刚石磨粒凸出结合剂高度较为均匀。

## 4 结 论

(1) 运用 ANSYS 有限元法在考虑金刚石石墨化的基础上,建立了3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。

(2) 通过仿真计算得到金刚石磨粒的去除厚度,并通过蚀验实烧进行验证后得到:激光功率、脉宽和离焦量是影响脉冲激光金刚石磨粒去除厚度的最直接的因素,金刚石磨粒去除厚度随着激光功率的增加而变大;

随着脉宽的增加而减少;随着离焦量的增加而减少。

(3) 通过脉冲激光在线修整青铜结合剂金刚石砂轮试验,得到修整后的砂轮圆跳动量为 $20\mu\text{m}$ ,砂轮表面具有良好的地形地貌。

## 参 考 文 献

- [1] CHEN G Y , MEI L F , ZHANG B , 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.
- [2] SUN K J , CHEN G Y , YU Ch R , et al. Selection of equipment and parameters used in laser turing and dressing grinding wheels [J]. Laser Technology , 2011 , 35( 6 ) : 721-724( in Chinese) .
- [3] XIE X Zh , CHEN G Y , LI L J. Dressing of resin-bonded super-abrasive grinding wheels by means of acousto-optic Q-switched pulsed Nd:YAG laser [J]. Optics & Laser Technology , 2004 , 36( 5 ) : 409-419.
- [4] CHEN G Y , ZHU D J , PENG K , et al. Ablation mechanism of bronze-bonded diamond wheels dressing by pulsed laser [J]. Chinese Journal of Lasers , 2007 , 34( 4 ) : 245-249( in Chinese) .
- [5] YAN H G , CHENG Q , CHEN J H , et al. FEM analysis on the temperature field of CVD diamond film laser drilling [J]. Bulletin of the Chinese Society , 2010 , 29( 1 ) : 83-85( in Chinese) .
- [6] YANG Sh M , TAO W Q. Heat transfer [M]. 4th ed. Beijing: High Education Press 2006: 55-85( in Chinese) .
- [7] YANG Y Sh , WANG M. Estimation and rational matching of grinding wheel topography [J]. Machinery , 1999 , 26( 2 ) : 14-16( in Chinese) .
- [8] WANG Q Sh. Superhard material manufacture [M]. Beijing: China Metrology Publishing House 2002: 19-29( in Chinese) .
- [9] ZHANG Sh D , SUN J. Observation of oxidation process of diamond with high temperature microscope [J]. Superhard Material Engineering , 2006 , 18( 6 ) : 23-25( in Chinese) .
- [10] WANG Y , HU D J , DENG Q L , et al. Analysis of temperature field for laser assisted mechanical dressing and truing of diamond grinding wheel [J]. Chinese Journal of Lasers , 2005 , 32( 3 ) : 431-435( in Chinese) .