

# 多脉冲激光修整青铜金刚石砂轮的表面变质层

蔡颂<sup>1,2</sup>, 陈根余<sup>1</sup>, 周聪<sup>1</sup>, 明兴祖<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>湖南工业大学机械工程学院, 湖南 株洲 412000

**摘要** 对脉冲激光修整青铜金刚石砂轮石墨变质层进行了理论研究,当激光功率密度为  $1.68 \times 10^8 \sim 3.359 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,对金刚石表面的温度演化进行了数值仿真。研究表明,金刚石达到石墨化温度的时间约为 435~440 ns,金刚石的石墨化程度较低。提出了水柱流辅助脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮的新方法,降低了金刚石的石墨化程度。

**关键词** 激光技术; 激光烧蚀; 青铜金刚石砂轮; 变质层; 水柱流

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1202001

## Multi-Pulsed Laser Truing and Dressing of Deterioration Layer on Bronze-Bonded Diamond Grinding Wheel Surface

Cai Song<sup>1,2</sup>, Chen Genyu<sup>1</sup>, Zhou Cong<sup>1</sup>, Ming Xingzu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412000, China

**Abstract** After the pulsed laser truing and dressing, the graphitized deterioration layers of bronze-bonded diamond grinding wheels are investigated theoretically. When the laser power density is  $1.68 \times 10^8 \sim 3.359 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ , the temperature evolution on the diamond surface is numerically simulated. The study results show that the time for which the diamond temperature reaches the graphitization temperature is 435-440 ns, and the graphitization degree is low. A new method for pulsed fiber laser truing and dressing of bronze-bonded diamond grinding wheels assisted by liquid column flows is proposed, which clearly reduces the graphitization degree.

**Key words** laser technique; laser ablation; bronze-bonded diamond grinding wheel; deterioration layers; liquid column flow

**OCIS codes** 140.3390; 310.3840; 350.3390

## 1 引言

青铜金刚石砂轮具有极高的硬度,抗磨损能力强,但磨钝后的修整非常困难<sup>[1-3]</sup>。在实际使用过程中,需要对其进行定期修整才能保持其几何形状和磨粒的锐利性。在热效应作用下,激光(毫秒、纳秒)修整使青铜与金刚石材料发生相变以达到修整的目的。但在修整过程中,金刚石磨粒表面会出现石墨变质层等缺陷,降低修整后的磨削功能<sup>[2-3]</sup>。为克服以上缺陷,主要采用辅助吹气激光修整工艺法。2006年, Hosokawa 等<sup>[4]</sup>采用激光辅助侧向吹气法,修整了青铜金刚石砂轮,证实若激光功率较低时,修整后可得到表面质量良好的青铜金刚石砂轮;但激光功率较高时,激光辅助侧向吹气法无法避免金刚石表面出现石墨变质层等缺陷。2014年,研究人员开展了侧吹气辅助脉冲光纤激光修锐青铜金刚石砂轮试验<sup>[5]</sup>,结果表明,辅助侧吹气法在

收稿日期: 2017-05-02; 收到修改稿日期: 2017-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(51705141)、国家科技重大专项(2012ZX04003101)、湖南省教育厅科研项目(17C0472)

作者简介: 蔡颂(1982—),男,博士,讲师,主要从事激光微细加工技术方面的研究。E-mail: happy9918@sina.com

\* 通信联系人。E-mail: mxz9036@126.com

激光功率较低时能在一定程度上抑制石墨化的发生。

针对上述问题,本文对脉冲激光修整青铜金刚石砂轮磨粒表面石墨变质层进行了理论研究,建立了多脉冲激光修整青铜金刚石砂轮的传热物理模型,对相关条件下不同激光功率密度与金刚石磨粒表面温度的关系进行了数值仿真;开展了脉冲激光修整青铜金刚石砂轮试验,对修整后的磨粒表面进行了拉曼光谱检测;为克服激光修整技术的不足和缺陷,提出了一种新型水柱流辅助脉冲激光修整青铜金刚石砂轮的工艺方法,运用水柱流在砂轮表面形成液态薄膜,减少了金刚石达到石墨化温度的时间从而抑制了石墨化程度,达到了修整青铜金刚石砂轮的目的。

## 2 脉冲激光修整青铜金刚石砂轮的传热数值分析

### 2.1 石墨变质层的理论研究

在激光修整过程中,金刚石受到热作用会形成石墨变质层。图1所示为金刚石石墨化的示意图。激光能量辐照在砂轮表面上,金刚石吸收能量后,温度逐渐升高,当其温度达到1000 K以上时,金刚石表面出现一层有明显变化的表层组织,该层组织是变质层,是金刚石向石墨转变的结果<sup>[6]</sup>。石墨层厚度与激光工艺参数相关。

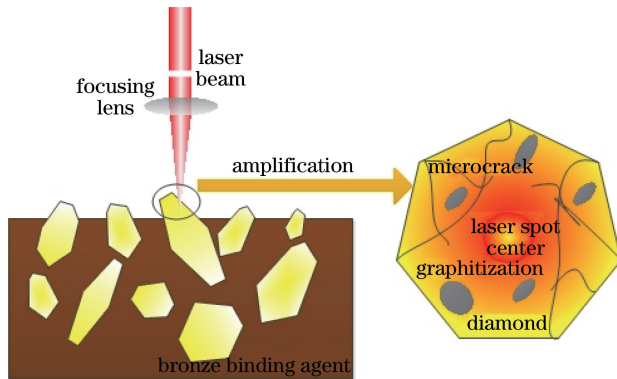


图1 青铜金刚石砂轮石墨化示意图

Fig. 1 Schematic of graphitizing bronze-bonded diamond grinding wheels

相关研究表明,随着激光功率密度的增大,石墨层厚度迅速增加<sup>[7]</sup>。图2所示为激光功率密度分别为 $4.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 和 $6.2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,修整后金刚石表面的扫描电子显微镜(SEM)图像<sup>[7]</sup>和拉曼光谱图。金刚石属于碳物质,可使用拉曼光谱表征碳物质形态,对于不同结构和不同价态的碳物质,拉曼光谱有明显的差别。一般采用晶格网面内键的伸缩振动对应的位于 $1580 \text{ cm}^{-1}$ 的拉曼谱线作为石墨的特征谱线,拉曼谱线峰强度可以表示石墨总量的多少。从图2可以看出,当激光功率密度逐渐增大时,石墨层厚度逐渐增加。因此,在脉冲激光修整青铜金刚石砂轮过程中会形成石墨变质层等缺陷。

### 2.2 传热物理模型

脉冲激光修整青铜金刚石砂轮的热传导实际是一个三维热传导物理过程。采用纳秒脉冲激光辐照砂轮表面,能量的热扩散距离小,约为微米级。图3所示为激光修整砂轮示意图。在垂直于激光束方向上,砂轮的熔融面积约为毫米级;在平行于激光束方向,砂轮表面熔融深度为微米级。因此,将脉冲激光修整砂轮的传热看作一维热传导问题进行研究<sup>[8-9]</sup>。

#### 2.2.1 脉冲激光修整青铜金刚石砂轮的传热物理模型

建立脉冲激光修整青铜金刚石砂轮的辐照区域传热模型,主要假设如下:1)激光热源为静止热源,光斑面积内激光能量均匀分布;2)青铜的热物性参数(比热容、导热系数等)不随温度变化,可近似为常数;3)青铜金刚石砂轮内部磨粒分布均匀,各向同性,无气孔;4)青铜金刚石砂轮为一种复合材料。实际脉冲激光修整青铜金刚石砂轮的过程是在单脉冲激光基础上叠加修整完成的,需要考虑脉冲与脉冲间的能量累积效应。相关文献表明,建立传热模型需要考虑蒸发效应,而不需要考虑等离子体屏蔽效应<sup>[8]</sup>。模型表达式为

$$\rho_1 c_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial t} - \mu_r \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + b \beta \exp(-bx) I_0(t) \frac{s(1-s^a)}{(1-s)}, \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad (1)$$

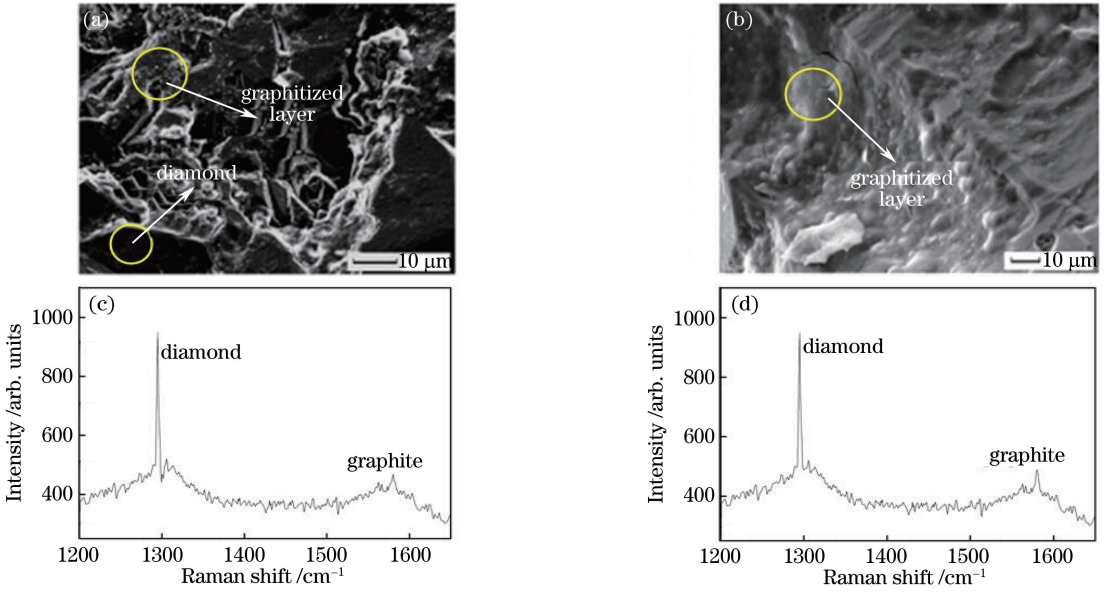


图 2 不同激光功率密度下的金刚石颗粒 SEM 图像和拉曼光谱图。(a)  $4.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ ; (b)  $6.2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$   
 Fig. 2 SEM images and Raman spectra of diamond particles at different laser power densities.

(a)  $4.5 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ; (b)  $6.2 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$

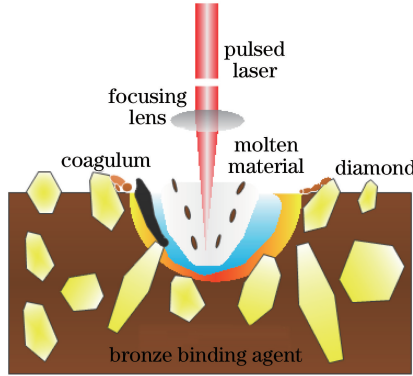


图 3 脉冲激光修整砂轮示意图

Fig. 3 Schematic of pulsed laser truing and dressing of grinding wheels

式中  $b$  为吸收系数,  $\mu_r$  为青铜的蒸发速度,  $s$  为脉冲间的能量累积系数,  $a$  为脉冲次数,  $c_1$  和  $\rho_1$  为液态结合剂的热容和密度,  $T_1$  为青铜液相温度,  $t$  为脉冲烧蚀时间,  $x$  为烧蚀深度,  $k_1$  为热导率;  $\beta$  为青铜材料的吸收速率,  $I_0$  为最大脉冲激光能量密度,  $\tau$  为脉冲时间。其初始条件设定为环境温度 300 K。脉冲激光的作用时间短, 对材料底部采用绝热条件, 即热量没有任何损失。考虑能量平衡, 绝热条件下的边界条件为

$$-k_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=0} = -L\rho_1 u_r, \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad (2)$$

$$-k_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=d} = 0, \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad (3)$$

式中  $L$  为蒸发焓,  $d$  为材料的厚度。青铜蒸发速度的计算公式<sup>[10]</sup>为

$$\mu_r = \frac{p_z C_s}{\rho_1 (2\pi k_b T_1 / m_1)^{1/2}}, \quad (4)$$

式中  $p_z$  为饱和蒸气压,  $C_s$  为黏滞系数(约为 1)<sup>[11]</sup>,  $m_1$  为材料粒子质量,  $k_b$  为玻尔兹曼常数。在材料液相摩尔体积  $V_{liq}$  远小于其气相摩尔体积的条件下,  $p_z$  与温度的关系可以用 Clausius-Clapeyron 方程<sup>[12]</sup>计算:

$$p_z = p_b \exp \left[ \frac{\Delta H_v(T_b) m_1}{k_b} \left( \frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_1} \right) \right], \quad (5)$$

式中  $p_b$  为一个标准大气压,  $\Delta H_v(T_b)$  是材料温度为  $T_b$  时的材料气化热。通过(1)~(5)式可以计算出一定温度下的饱和蒸气压。

最大激光能量密度  $I_0(t)$  的表达式<sup>[13-14]</sup> 为

$$I_0(t) = I_0 \exp\left[-\frac{(t - \tau/2)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (6)$$

式中  $\sigma$  为光斑的半径。

### 2.2.2 降温传热物理模型

脉冲激光修整青铜金刚石砂轮结束后,青铜金刚石砂轮处于降温过程。图4所示为青铜金刚石砂轮的散热过程,由于大部分热量都只在砂轮的表面流出,将该过程看作一维降温热传导问题进行处理。实际上处于高温的金刚石表面、端面和内部热量可以通过电磁辐射的方式释放出来,辐射换热相对比较均匀,仅影响降温速率,不影响最终的温度分布。文献[15]不考虑热辐射情况,理论计算得到的硫系玻璃出炉后温度下降一半时所需的时间高于实际测量得到的时间。由此可知,当考虑辐照散热情况时,实际降温速率更快。

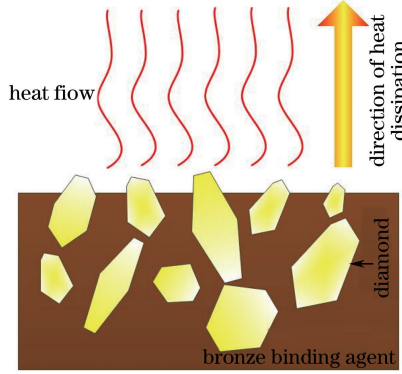


图4 脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮的表面散热示意图

Fig. 4 Schematic of surface heat dissipation for pulsed laser truing and dressing of bronze-bonded diamond grinding wheels

在不考虑辐照散热、旋转速度的情况下,采用的一维传热模型为

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right), \quad 0 \leq t \leq \tau. \quad (7)$$

初始条件为修整后金刚石的表面温度;材料的底部无热流散出,采用绝热条件。为了方便计算,设定环境温度为 300 K,因此,牛顿冷却定律和绝热条件下边界条件为

$$-\frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = -H[T_1(0,t) - T_h], \quad t \geq \tau, \quad (8)$$

$$-k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=d} = 0, \quad t \geq \tau, \quad (9)$$

式中表面热交换系数  $H = q/k_s$ ,  $q$  为表面对流热交换系数,  $k_s$  为热传导系数;  $d$  为砂轮的厚度,  $T_h$  为环境温度。

### 2.2.3 激光修整金刚石的数值仿真

#### 2.2.3.1 激光辐照数值仿真

在激光修整砂轮的数值分析过程中,采用有限差分法进行求解。令网格傅里叶数  $F_1 = k_1 \Delta t / [\rho_1 c_1 (\Delta x)^2]$ , 利用(1)式和边界条件建立差分方程:

$$T_i^{j+1} = \left( \frac{\Delta t \mu_r}{\Delta x} + F_1 \right) T_{i+1}^j + \left( 1 - \frac{\Delta t \mu_r}{\Delta x} - 2F_1 \right) T_i^j + F_1 T_{i-1}^j + \frac{\Delta t}{\rho c} b \beta \exp(-bi \Delta x) I_0 \exp\left[-\frac{(j \Delta t - \tau/2)^2}{2\sigma^2}\right] \frac{s(1-s^a)}{1-s}, \quad (10)$$

$$-k \frac{T_1^j - T_0^j}{\Delta x} = -L \rho_1 \mu_r, \quad (11)$$

式中  $i$  为空间网格的坐标值,  $j$  为时间网格的坐标值,  $T_i^{j+1}$  为  $i$  空间网格坐标在时间网格坐标  $(j+1)$  的温度。边界条件为  $T_d^j = 0$  K, 初始条件为  $T_i^0 = 300$  K。

金刚石的热物理参数<sup>[8]</sup>见表 1, 计算参数见表 2。结合表 1, 2, 设定脉冲激光功率密度为  $1.68 \times 10^8 \sim 3.36 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup>, 激光辐照脉冲数为 2, 频率  $f$  为 50 kHz, 脉宽为 210 ns, 激光烧蚀深度在  $x$  方向距离取为 6  $\mu\text{m}$ ; 时间步长为 0.021 ns, 空间步长为 0.12  $\mu\text{m}$ 。由于  $F_1 = 0.4541 \leq 0.5$ , 因此数值解是稳定、收敛的。

表 1 金刚石热物理参数<sup>[8]</sup>

Table 1 Thermal physical parameters of diamond<sup>[8]</sup>

| Parameter                | Value                             | Parameter              | Value                                    |
|--------------------------|-----------------------------------|------------------------|--|
| Melting temperature      | 3550 K                            | Lattice energy         | 39.4 MJ·mol <sup>-1</sup>                |
| Gasification temperature | 4830 K                            | Density                | 3515 kg·m <sup>-3</sup>                  |
| Absorptivity             | 0.25                              | Thermal diffusivity    | 3.114 cm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>   |
| Refractive index         | 2.417                             | Thermal conductivity   | 2000 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>  |
| Absorption coefficient   | $2.8 \times 10^6$ m <sup>-1</sup> | Specific heat capacity | 1827 J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> |

表 2 计算参数

Table 2 Calculation parameters

| Parameter                       | Value                    | Parameter                 | Value   |
|---------------------------------|--------------------------|---------------------------|---|
| Laser wavelength                | $1.064 \times 10^{-6}$ m | Spot diameter             | 38 $\mu\text{m}$  |
| Electron mass                   | $9.1 \times 10^{-31}$ kg | Pulse width               | $2.1 \times 10^{-7}$ s                                  |
| Average ionization energy       | 7.6305 eV                | Evaporation rate          | $0.065 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$                 |
| Grinding machine speed          | 300 r·min <sup>-1</sup>  | Planck constant           | $6.6261 \times 10^{-34}$ J·s                            |
| Energy accumulation coefficient | 0.85                     | Boltzmann constant        | $1.38 \times 10^{-23}$ J·K <sup>-1</sup>                |
| Evaporation enthalpy            | 300 kJ·mol <sup>-1</sup> | Heat transfer coefficient | $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ |

求解传热差分方程, 得到脉冲光纤激光修整金刚石的温度演化规律, 如图 5 所示。可以看出, 金刚石表面温度随激光功率密度的增加而逐渐增大, 当激光功率密度为  $1.68 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup> 时, 修整后的最高温度约为 1800 K, 达到金刚石石墨化温度; 当激光功率密度分别为  $2.52 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup> 和  $3.36 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup> 时, 修整后表面的最高温度分别为 2000 K 和 2700 K, 均达到金刚石石墨化温度。如图 5(a)~(c) 所示, 在 0~100 ns 范围内, 当时间固定时, 金刚石温度随烧蚀深度的增加而逐渐降低。在 100~210 ns 时间段内, 当时间固定时, 金刚石温度随烧蚀深度的增加先升高, 达到最大值后逐渐降低, 这种现象称为次表面超热, 与文献[10]的研究结果一致。当烧蚀深度固定时, 由于入射激光为高斯型能量分布, 靶材的温度呈现高斯型演化规律。从图 5(d) 可以看出, 当烧蚀深度固定、时间固定时, 激光功率越大, 材料温度上升越快, 达到石墨化温度所需的时间越短。

综上所述, 脉冲光纤激光修整金刚石的数值分析结果表明, 在相关条件下, 当激光功率密度从  $1.68 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup> 增加至  $3.36 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup> 时, 修整后的金刚石温度逐渐增高, 超过金刚石石墨化温度, 金刚石发生石墨化转变成变质层, 并且激光功率越大, 达到石墨化温度所需的时间越短。

### 2.2.3.2 激光停止辐照的数值仿真

激光停止辐照, 在砂轮降温数值分析过程中, 采用有限差分法进行求解, 利用(7)、(8)式建立传热差分方程:

$$\rho_1 c_1 \left( \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} \right) = k_1 \frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{\Delta x^2}, \quad (12)$$

$$-\frac{T_1^j - T_0^j}{\Delta x} = -H(T_0^j - 300), \quad (13)$$

$$T_d^j = 0. \quad (14)$$

结合表 1, 2, 设定初始温度分别为 2700, 2000, 1800 K, 时间为 48 ns, 时间步长为 0.021 ns, 激光烧蚀深度在  $x$  方向距离取为 4.8  $\mu\text{m}$ , 空间步长为 0.12  $\mu\text{m}$ 。由于  $F_1 = 0.4541 \leq 0.5$ , 数值解是稳定、收敛的。求解传热方程, 得到青铜金刚石砂轮的降温演化规律, 如图 6 所示。由图 6(a)~(c) 可知, 金刚石表面降温时间随

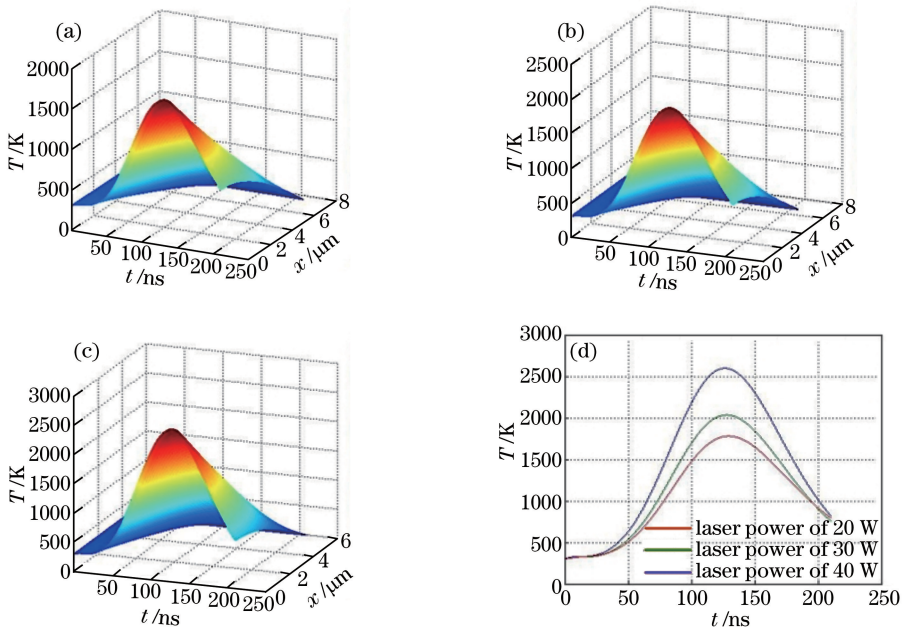


图 5 脉冲光纤激光修整中金刚石表面温度变化曲线。(a)功率密度为  $1.68 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ ; (b)功率密度为  $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ ; (c)功率密度为  $3.36 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ ; (d)不同功率下金刚石表面温度变化

Fig. 5 Diamond surface temperature change curves in pulsed fiber laser truing and dressing.

(a) Power density of  $1.68 \times 10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (b) power density of  $2.52 \times 10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;

(c) power density of  $3.36 \times 10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (d) diamond surface temperature versus time at different laser powers

初始温度的增加而逐渐增大。当烧蚀深度固定时,金刚石温度随时间的增加而逐渐减小。如图 6(d)所示,当激光功率密度为  $1.68 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,修整后的最高温度约为 1800 K,金刚石表面降温到 500 K 的时间约为 15 ns;当激光功率密度分别为  $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  和  $3.36 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,金刚石表面修整后的最高温度分别为 2000 K 和 2700 K,表面温度降低到 500 K 的时间分别约为 17 ns 和 20 ns。

综上所述,在相关条件下,当激光功率密度从  $1.68 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  增加至  $3.36 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,修整后金刚石表面温度逐渐增高,超过金刚石石墨化温度,金刚石发生石墨化,转变形成变质层;当激光功率密度为  $1.68 \times 10^8 \sim 3.36 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,金刚石表面温度为 1800~2700 K,金刚石表面降温到 500 K 的时间为 15~20 ns。修整过程中金刚石砂轮达到石墨化温度所经历的时间为 435~440 ns,此时间段内金刚石会发生石墨化,但由于时间短,石墨化程度低。通过以上分析可知,在考虑辐照散热、旋转速度的情况下,达到石墨化温度的时间更短,形成的石墨化层更少。

### 3 试验研究

#### 3.1 脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮试验

##### 3.1.1 试验平台

脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮后,需对青铜金刚石砂轮表面磨粒的化学成分进行检测。激光修整试验采用波长为 1064 nm、平均输出功率为 0~48 W、脉冲宽度为 210 ns、脉冲重复频率为 50~150 kHz、光斑直径为  $38 \mu\text{m}$  的激光器。在修整过程中,将青铜金刚石砂轮安装在精密平面磨床的主轴上,磨床主轴的转速可通过其控制面板进行精确调节。激光束由单模光纤传输到带有标准隔离器的激光修整头,再经修整头内部焦距为 180 mm 的双凸透镜聚焦后沿砂轮径向方向垂直入射到材料表面上。

##### 3.1.2 试验材料与参数

试验材料为带金刚石磨粒的青铜结合剂砂轮。试验中为了节约材料,特别制作金属圆圈箍在砂轮上,圆圈中间开一个直径为 6 mm 的圆形通孔,脉冲激光束通过该圆孔入射到裸露在外的砂轮表面上,每组修整后的试验结果数据只需从圆孔内露出的砂轮表面获取,如图 7 所示。

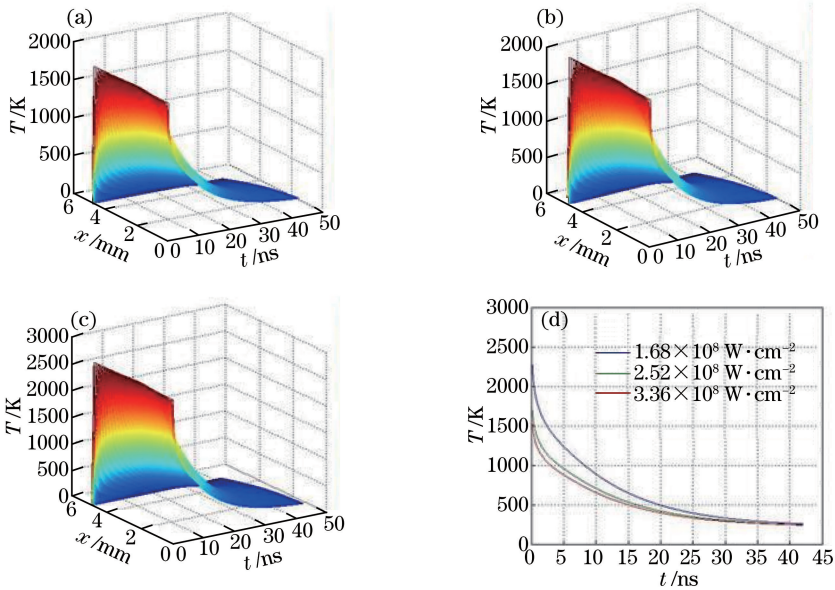


图 6 金刚石表面温度变化曲线。(a)功率密度为  $1.68 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  ;(b)功率密度为  $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  ;  
 (c)功率密度为  $3.36 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  ;(d)不同功率密度下金刚石表面温度变化  
 Fig. 6 Diamond surface temperature change curves. (a) Power density of  $1.68 \times 10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$  ;  
 (b) power density of  $2.52 \times 10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$  ; (c) power density of  $3.36 \times 10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$  ;  
 (d) diamond surface temperature versus time at different laser power densities

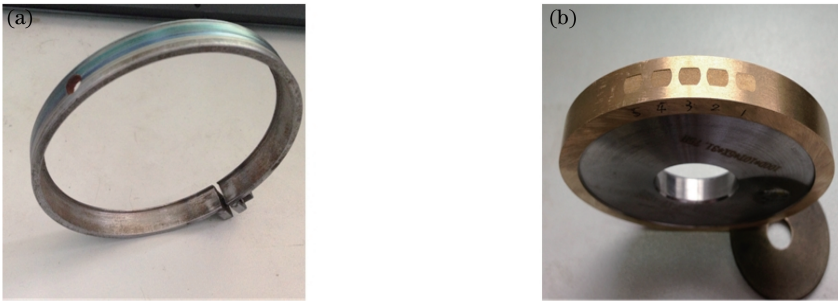


图 7 (a)金属圆环;(b)砂轮  
 Fig. 7 (a) Metal loop; (b) grinding wheel

试验完成后采用法国 Jobin Yvon 公司生产的型号为 RamLab-010 的激光共焦拉曼分析系统,测定经脉冲激光修整后的砂轮表面金刚石磨粒的拉曼光谱,比较不同激光功率下的谱峰位置和相对强度,进而分析金刚石磨粒的石墨化程度。脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮的试验参数见表 3。

表 3 脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮的试验参数

Table 3 Experimental parameters for pulsed fiber laser truing and dressing of bronze-bonded diamond grinding wheels

| Laser power density / ( $10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) | Repetition rate / kHz | Defocusing distance / mm | Number of laser pulses | Rotation rate / ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) |
|---|-----------------------|--------------------------|------------------------|--|
| 1.68  | 50                    | 0                        | 2                      | 300  |
| 2.52  | 50                    | 0                        | 2                      | 300  |
| 3.36  | 50                    | 0                        | 2                      | 300  |

### 3.1.3 试验结果与分析

依据表 3 的试验参数,对青铜金刚石进行修整,并对金刚石磨粒进行拉曼光谱分析。图 8 所示为修整后青铜金刚石砂轮的形貌图与金刚石磨粒的拉曼光谱。如图 8(a)所示,修整后金刚石磨粒明显变黑,形成石墨层。由图 8(b)~(d)可以看出,金刚石整形后出现不同程度的石墨化现象。这是因为在空气环境中,金刚石热稳定性较差(热稳定温度低于 1000 K),激光辐照后激光束修整区域温度升高,使金刚石磨粒的石墨化

和氧化程度加剧,变化过程可表示为  $C_{\text{diamond}} + O_2 \rightarrow C_{\text{graphite}} + (CO + CO_2)_{\text{gas}}$  [16], 修整后金刚石磨粒石墨化对其磨削功能有较大影响。如图 8(b)~(d)所示,峰值位于  $1332\text{ cm}^{-1}$  的拉曼谱线属于单晶金刚石碳,峰值位于  $1580\text{ cm}^{-1}$  的拉曼谱线属于石墨碳。随着激光功率密度从  $1.68 \times 10^8\text{ W/cm}^2$  增大至  $3.36 \times 10^8\text{ W/cm}^2$ , 突出的峰值逐渐增强,特别是激光功率密度为  $3.36 \times 10^8\text{ W/cm}^2$  时[图 8(d)],  $1580\text{ cm}^{-1}$  处的拉曼谱线突起的峰值最大,此时石墨碳物质总量最多。

在脉冲激光修整青铜金刚石砂轮过程中,青铜金刚石砂轮磨粒表面会形成石墨变质层,并且随着激光功率的增加,青铜金刚石砂轮磨粒表面石墨变质层逐渐增多,试验结果与数值分析结果一致,验证了数值仿真的正确性和可行性。

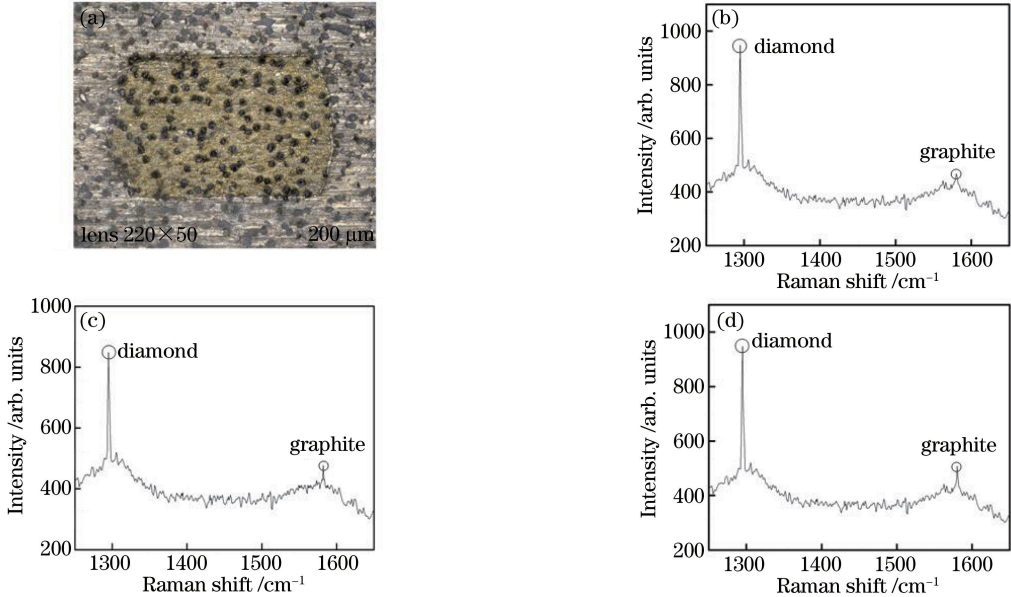


图 8 (a)激光修整后砂轮的形貌;功率密度分别为(b)  $1.68 \times 10^8\text{ W/cm}^2$ , (c)  $2.52 \times 10^8\text{ W/cm}^2$  和 (d)  $3.36 \times 10^8\text{ W/cm}^2$  时激光修整后的金刚石拉曼光谱

Fig. 8 (a) Topography of grinding wheel after laser truing and dressing; Raman spectra of diamond after laser truing and dressing when laser power densities are (b)  $1.68 \times 10^8\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , (c)  $2.52 \times 10^8\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , (d)  $3.36 \times 10^8\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , respectively

### 3.2 水柱流辅助脉冲激光修整青铜金刚石砂轮试验

为避免激光修整青铜金刚石砂轮发生石墨化现象,采用水柱流辅助激光修整砂轮工艺方法。图 9 所示为液膜下脉冲激光修整青铜金刚石砂轮的无石墨化示意图。在青铜金刚石砂轮修整过程中,运用水柱流形成液膜,吸收多余的沉积能量,达到快速冷却效果,使得整个过程中金刚石砂轮达到石墨化温度的时间显著减少,从而抑制石墨化。

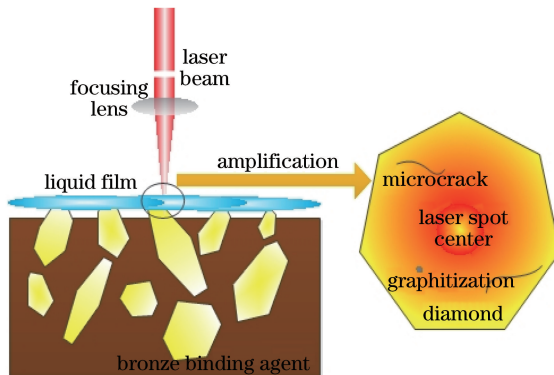


图 9 青铜金刚石砂轮无石墨化示意图

Fig. 9 Schematic of non-graphitizing of bronze-bonded diamond grinding wheels



### 3.2.1 试验平台与方案

图 10 所示为水柱流辅助脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮的装置示意图。试验装置包括计算机控制设备、控制操作平台、光纤激光器、激光烧蚀头、二维移动平台、青铜金刚石砂轮、磨床、切向水柱压力控制器、聚焦透镜等。

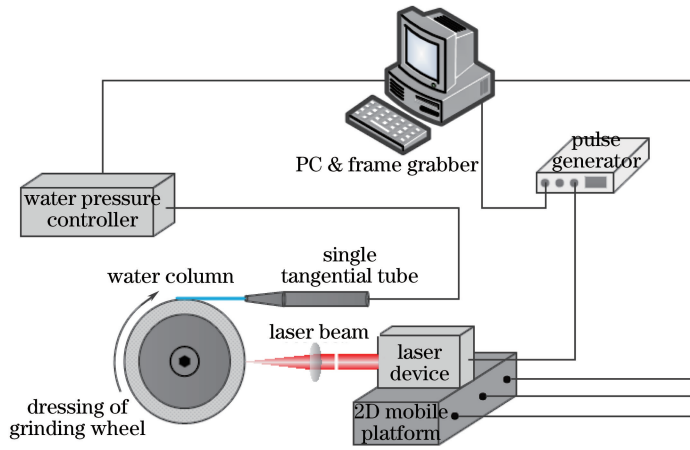


图 10 水柱流辅助激光修整砂轮的装置示意图

Fig. 10 Device schematic of laser truing and dressing of grinding wheels assisted by water column flow

试验时将青铜金刚石砂轮安装在可控磨床上,通过磨床带动砂轮转动,激光修整头固定在二维移动平台上,并按径向方向水平放在砂轮左边,聚焦透镜安放在激光修整头与青铜金刚石砂轮之间,二维移动平台由计算机控制设备控制,可在  $x$ 、 $y$  二维方向移动。在修整过程中,切向水柱流冲击砂轮,在砂轮表面形成液膜,吸收多余热量实现快速降温,避免了激光修整青铜金刚石砂轮磨粒出现石墨变质层等缺陷。

脉冲激光修整青铜金刚石砂轮试验完成后,采用激光共焦拉曼分析系统,测定金刚石磨粒的拉曼光谱,进而分析金刚石磨粒的石墨化程度。

### 3.2.2 试验结果与分析

图 11 所示为水柱流辅助脉冲光纤激光修整后青铜金刚石砂轮形貌与不同激光功率密度下砂轮表面金

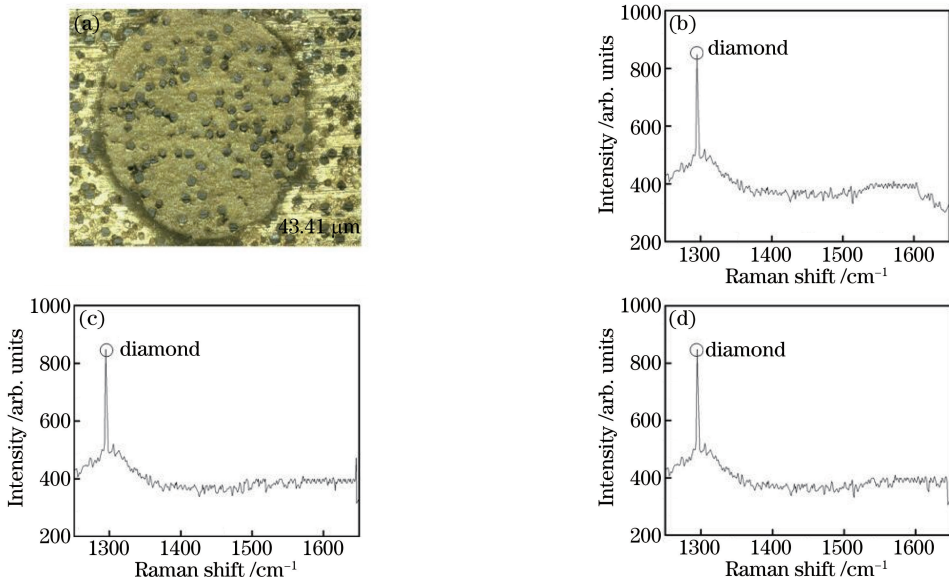


图 11 (a)水柱流辅助下激光修整后青铜金刚石砂轮形貌;功率密度分别为(b)  $1.68 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ , (c)  $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  和 (d)  $3.36 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,激光修整后的金刚石拉曼光谱

Fig. 11 (a) Topography of bronze-bonded diamond grinding wheel after laser truing and dressing assisted by liquid column flow; Raman spectra of diamond after laser truing and dressing assisted by liquid column flow when laser power densities are (b)  $1.68 \times 10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , (c)  $2.52 \times 10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , (d)  $3.36 \times 10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , respectively

刚石磨粒的拉曼光谱。如图 11(a) 所示, 修整后砂轮表面金刚石磨粒没有变黑, 形貌清晰。如图 11(b)~(d) 所示, 当激光功率密度从  $1.68 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  增加至  $3.36 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 峰值位于  $1580 \text{ cm}^{-1}$  的拉曼谱线作为石墨的特征谱线没有凸出能峰, 表明脉冲激光修整青铜金刚石砂轮磨粒表面石墨化程度很弱或无石墨变质层。

试验结果表明, 当激光功率密度从  $1.68 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  增加到  $3.36 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 石墨碳的拉曼谱线相对谱峰强度越来越大, 可见磨粒表面石墨化程度越来越大。石墨化现象会降低金刚石微磨削刃的强度, 从而降低修整后青铜金刚石砂轮的磨削性能。在实际激光加工中, 需要避免石墨变质层等缺陷的形成, 提高修整后砂轮表面质量; 采用水柱流辅助激光修整法, 在砂轮表面形成液膜, 加强砂轮表面液体的表面蒸发, 提高接触散热效率, 促进辐射热交换作用, 降低残余热量影响, 达到快速降低砂轮表面温度的效果, 从而避免脉冲激光修整青铜金刚石砂轮石墨变质层等缺陷。修整后砂轮表面质量高, 形貌好, 金刚石石墨化程度降低。

## 4 结 论

对脉冲激光修整青铜金刚石砂轮石墨变质层进行了研究, 建立了多脉冲激光修整青铜金刚石砂轮的传热物理模型与降温传热物理模型。对金刚石表面进行了拉曼光谱检测, 提出了水柱流辅助脉冲激光修整的工艺方法, 得到如下结论。

1) 随着激光能量密度的增大, 金刚石的石墨变质层逐渐增厚。

2) 当激光功率密度从  $1.68 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  增加至  $3.36 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 金刚石磨粒的表面温度逐渐升高, 超过金刚石石墨化温度的时间约为  $435 \sim 440 \text{ ns}$ , 金刚石磨粒会形成石墨变质层, 但石墨化程度较低; 拉曼光谱检测结果与数值分析结果一致。

3) 在相关条件下, 采用水柱流辅助脉冲激光修整法, 修整后砂轮表面质量高, 形貌好, 石墨化程度降低。

## 参 考 文 献

- [1] Chen Genyu, Deng Hui, Li Zonggen, *et al.* Dressing of bronze-bonded diamond rinding wheels using pulsed fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0703002.  
陈根余, 邓辉, 李宗根, 等. 脉冲光纤激光修锐青铜金刚石砂轮[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0703002.
- [2] Chen Genyu, Chen Chong, Bu Chun, *et al.* Research on carbonized layer for truing and dressing of bronze-bonded diamond grinding wheels with laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0303006.  
陈根余, 陈冲, 卜纯, 等. 激光修整青铜金刚石砂轮石墨变质层的研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0303006.
- [3] Chen G Y, Cai S, Zhou C. On the laser-driven integrated dressing and truing of bronze-bonded grinding wheels[J]. Diamond and Related Materials, 2015, 60: 99-110.
- [4] Hosokawa A, Yunoki T. Laser dressing of metal bonded diamond wheel[J]. CIRP Annals, 2006, 55: 329-332.
- [5] Wang Dawei, Zhou Cong, Zhang Yong, *et al.* Experiment investigation on optical fiber laser dressing bronze-bonded diamond grinding wheel assisted side-blown gas[J]. Applied Laser, 2014, 34(5): 404-410.  
王大伟, 周聪, 张勇, 等. 青铜金刚石砂轮光纤激光辅助侧吹修锐试验研究[J]. 应用激光, 2014, 34(5): 404-410.
- [6] Zhang Yong, Chen Genyu, Zhou Cong, *et al.* Influence of slide-blown on plasma characterization of laser dressing for bronze-bonded diamond wheel by a fiber laser[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(5): 1153-1157.  
张勇, 陈根余, 周聪, 等. 侧吹气体对光纤激光修锐青铜金刚石砂轮等离子体特性影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(5): 1153-1157.
- [7] 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: 31-32.  
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: 31-32.
- [8] Cai S, Chen G Y, Zhou C. Research and application of surface heat treatment for multipulse laser ablation of materials [J]. Applied Surface Science, 2015, 355: 461-472.
- [9] Marla D, Bhandarkar U V, Joshi S S. A model of laser ablation with temperature-dependent material properties, vaporization, phase explosion and plasma shielding[J]. Applied Physics A, 2014, 116(1): 273-285.
- [10] Zhang Duanming, Li Zhihua, Zhong Zhicheng, *et al.* Dynamics principle of pulsed laser deposition[M]. Beijing: Science Press, 2011.

- 张端明, 李志华, 钟志成, 等. 脉冲激光沉积动力学原理[M]: 北京: 科学出版社, 2011.
- [11] Zhang Duanming, Hou Sipu, Guan Li, *et al.* Target ablation characteristics during pulsed laser deposition of thin films [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(7): 2237-2243.  
张端明, 侯思普, 关丽, 等. 脉冲激光制备薄膜材料的烧蚀机理[J]. *物理学报*, 2004, 53(7): 2237-2243.
- [12] Xu X F, Willis D A. Non-equilibrium phase change in metal induced by nanosecond pulsed laser irradiation[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2001, 124: 293-298.
- [13] Kuzman R. Handbook of thermodynamic tables and charts[M]. Washington: Hemisphere Publisher, 1976: 24-27.
- [14] Chen Genyu, Deng Hui, Xu Jianbo, *et al.* Plasma characterization studies of laser dressing for bronze-bonded diamond wheel[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(14): 144204.  
陈根余, 邓辉, 徐建波, 等. 脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮等离子体特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(14): 144204.
- [15] Song Baoan, Dai Shixun, Xu Tiefeng, *et al.* Model of quench cooling and experimental analysis of cylindrical infrared chalcogenide glass[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(8): 084217.  
宋宝安, 戴世勋, 徐铁峰, 等. 圆柱形红外硫系玻璃淬冷降温模型与实验分析[J]. *物理学报*, 2011, 60(8): 084217.
- [16] Chen Genyu, Yu Chunrong, Li Shichun, *et al.* Temperature field simulation and experiment for truing and dressing of bronze-bonded diamond grinding wheel with pulsed laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(7): 0703002.  
陈根余, 余春荣, 李时春, 等. 脉冲激光修整青铜金刚石砂轮温度场的模拟与试验. *中国激光*, 2011, 38(7): 0703002.