

## 青铜金刚石砂轮的激光整形与修锐

蔡 颂<sup>1,2</sup>, 熊 彪<sup>2</sup>, 陈根余<sup>2</sup>, 吴吉平<sup>1\*</sup>

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412000;

2. 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)

**摘要:** 考虑蒸发效应、等离子体屏蔽效应与脉冲间能量累积效应基础上, 建立脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮传热物理模型, 应用模型对脉冲光纤激光修锐青铜和整形金刚石分别进行传热数值计算, 依据数值仿真结果, 开展脉冲光纤激光烧蚀青铜轮和青铜金刚石砂轮的实验。理论研究和实验研究表明: 相关条件下, 当激光功率密度小于  $2.10 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 只能对青铜金刚石砂轮修锐; 当激光功率密度大于  $2.10 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  小于  $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 能对青铜金刚石砂轮实现整形和修锐的合二为一; 当激光功率密度大于  $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 能对青铜金刚石砂轮实现大深度修锐, 但影响磨粒突出结合剂的高度和磨削性能, 以上研究为脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮研究提供理论指导与工艺优化, 同时实验结果与数值模拟结果一致, 也验证了传热模型的正确性。

**关键词:** 激光烧蚀; 传热方程; 数值模拟; 青铜金刚石砂轮

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0406008

## Laser truing and sharpening of bronze-bond diamond grinding wheel

Cai Song<sup>1,2</sup>, Xiong Biao<sup>2</sup>, Chen Genyu<sup>2</sup>, Wu Jiping<sup>1\*</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412000, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** A heat transfer model for pulse laser ablation of a bronze-bond diamond grinding wheel was built by considering the effects of evaporation, plasma shielding, and energy accumulation under the pulse interval. The model was applied for numerical simulation of the heat transfer characteristics in the pulse laser ablation of bronze and diamond. According to the results of numerical simulation, experiments were conducted for pulse laser ablation of a bronze wheel and bronze-bonded diamond grinding wheel. The theoretical analysis and experimental results showed that under the indicated conditions, the laser of  $2.10 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  could only perform dressing on a bronze-bonded diamond grinding wheel; the laser of  $2.10 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ – $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  merged the truing and dressing of the grinding wheel; and the laser of greater than  $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  realized great-depth dressing but seriously affected the projection height of grits from the bond and their grinding performance. These researches provide theoretical guidance for

收稿日期: 2016-08-10; 修订日期: 2016-09-20

基金项目: 湖南省自然科学基金(14JJ5023); 国家科技重大专项(2012ZX04003101)

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

通讯作者: 吴吉平(1968-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事机电控制的研究。Email: wjp0918@163.com

optimizing the process parameters associated with laser ablation of a bronze-bonded diamond grinding wheel and the experimental data is in good agreement with the numerical solution to the model, thus verifying the correctness and feasibility of the heat transfer model.

**Key words:** laser ablation; heat transfer equations; numerical simulation; bronze-bonded diamond grinding wheel

## 0 引言

脉冲激光烧蚀技术使用广泛<sup>[1-3]</sup>,烧蚀青铜金刚石砂轮的实质是将聚焦脉冲激光束辐照于匀速转动的砂轮表面,通过控制激光(能量密度、脉冲重复频率、脉冲宽度、砂轮转速)工艺参数,用于去除砂轮表层局部微小区域的青铜结合剂材料,并在金刚石磨粒周围生成一定的容屑空间,使磨削刃突出在结合剂之外,形成锋利的切削刃,最终达到激光修整砂轮的目的。

激光烧蚀青铜金刚石砂轮通常可分为修锐和整形两个过程。修锐是指在修整过程中,去除金刚石磨粒间的青铜结合剂,达到降低结合剂高度,使得磨粒突出结合剂之外,形成切削刃,同时产生足够的容屑空间;整形是对青铜金刚石砂轮的工作表面进行微量“切削”,使砂轮达到所要求的几何形状误差,并使金刚石磨粒尖端微细破碎,形成锋利磨刃。现有文献中,Chen<sup>[4-5]</sup>团队对激光烧蚀青铜金刚石砂轮进行一系列理论研究,模拟计算单脉冲激光烧蚀凹坑深度值,得出脉冲光纤激光可以对青铜金刚石砂轮进行修锐和整形。脉冲光纤激光实际烧蚀过程是在单脉冲激光烧蚀基础上叠加进行的多脉冲激光烧蚀,与其单脉冲激光烧蚀机理下建立的传热物理模型有着本质区别,需要考虑烧蚀过程中出现的蒸发效应、等离子体屏蔽效应以及脉冲能量累积效应对热能量的影响;同时对青铜金刚石砂轮修锐与整形的合二为一研究更是鲜有报道。

文中考虑蒸发效应、等离子体屏蔽效应以及脉冲能量累积效应影响下,建立脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮传热物理模型。应用传热模型,对修整青铜和金刚石分别进行传热数值计算,得出相关条件下修锐青铜和整形金刚石各自激光功率范围。依据传热数值结果,开展相关实验,观察脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮地形地貌并且测量了烧蚀后青铜轮表面凹坑深度值。理论研究和实验研究表明,脉冲光纤激光能对青铜

金刚石砂轮实现整形和修锐的合二为一,实验结果不仅验证数值计算的正确性,也为脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮工艺参数优化提供理论指导。

## 1 脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮传热模型

实际激光烧蚀砂轮过程中的热传导是一个三维物理问题,如图 1 所示。但是,由于脉冲持续的时间很短,大致纳秒,其宏观热扩散距离小。一般来说,脉冲激光辐照青铜金刚石砂轮表面的线度在毫米级以上,辐照的砂轮熔融面积也在毫米级别以

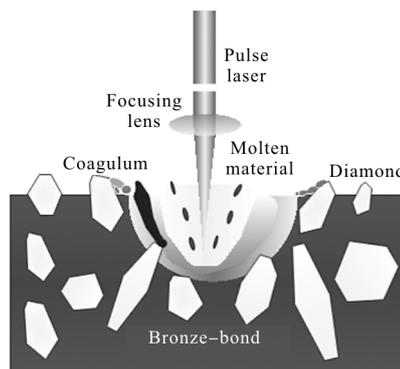


图 1 激光烧蚀砂轮示意图

Fig.1 Sketch of laser ablation of a grinding wheel

上。因此垂直于砂轮表面方向的熔融深度比平行于砂轮表面的熔融面积要小几个数量级,可将激光烧蚀砂轮看成是一维问题进行处理<sup>[6]</sup>。整个烧蚀过程中涉及多种复杂的物理现象<sup>[7-8]</sup>,主要为蒸发效应、等离子体屏蔽效应以及脉冲能量累积效应,会影响青铜材料吸收的热能量,如图 2 所示。因此,建立传热模型的假设如下:(1) 将脉冲激光热源简化为静止热源,输出的能量在光斑面积内均匀分布,输出为高斯型的激光。(2) 假设青铜的热物性参数均不随环境和温度变化。实际上青铜的热物性参数(比热容、导热系数等),随温度变化不大,可近似为常数。(3) 修整的青铜金刚石砂轮内部分布各向同性,其中砂轮内部无气孔,各金刚石磨粒在结合剂中分布均

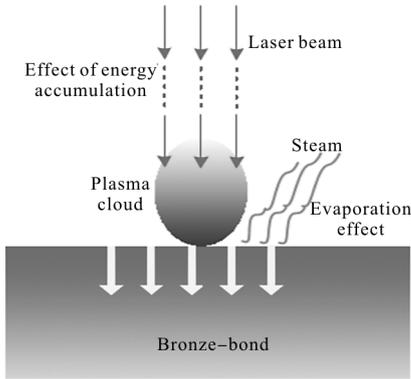


图 2 烧蚀过程物理现象示意图

Fig.2 Sketch of the physical phenomena

匀。(4) 假设青铜金刚石砂轮是一种复合材料, 即由两种或两种以上不同性质的材料, 通过物理或化学的方法组合, 在宏观上是一种具有新性能的材料。

### 1.1 脉冲能量累积效应

脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮过程中, 采用高斯型的入射激光<sup>[9]</sup>, 其中设定  $I_0$  为最大脉冲激光能量密度:

$$I_0(t) = I_0 \exp\left(-\frac{(t - \tau/2)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

激光能量被吸收后在砂轮内部传播过程中, 能量按照指数规律衰减, 即激光入射到距表面  $x$  处的脉冲激光能量密度为<sup>[10]</sup>:

$$I_0(x, t) = \beta b I_0(t) \exp(-bx) \quad (2)$$

式中:  $\beta$  为青铜材料的吸收速率。脉冲能量累积效应是指前一个脉冲激光结束后一部分热量损失在外部环境中, 而大部分热量被吸收后传递并积累于砂轮内部, 成为下一个脉冲入射的能量, 并最终影响青铜金刚石砂轮的烧蚀阈值。如图 3 所示。

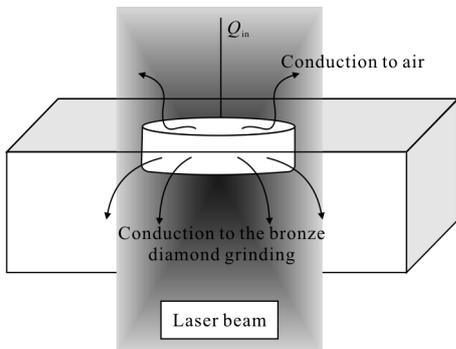


图 3 青铜金刚石砂轮的能量累积效应

Fig.3 Energy cumulative effect of the bronze diamond grinding

设定  $s$  为脉冲激光修整过程中, 青铜材料的能量累积系数。当每个激光脉冲辐照后, 将材料内部吸收累积的能量等价转换为入射的脉冲激光能量, 可以获得在青铜材料内部距离表面  $x$  处, 第  $a$  个激光脉冲辐照后的能量密度为:

$$Q = b\beta e^{-bx} I_0(t) \frac{s(1-s)^a}{(1-s)} \quad (3)$$

式中:  $a$  为脉冲激光辐照青铜材料的次数;  $b$  是青铜材料吸收系数。公式(3)关系表明, 前  $a-1$  个激光脉冲辐照后, 青铜材料表面累积的能量全部转化为第  $a$  个脉冲辐照的入射激光能量, 通过此式便可计算出  $a$  个脉冲激光辐照后, 材料最终吸收的激光总能量, 同时上式也是收敛的。

### 1.2 传热物理模型

基于以上分析, 建立脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮传热物理模型需要考虑蒸发效应、等离子体屏蔽效应以及脉冲能量累积效应, 传热模型为:

$$\rho_l c_l \left( \frac{\partial T_l}{\partial t} - \mu_r \frac{\partial T_l}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_l \frac{\partial T_l}{\partial x} \right) + b\beta e^{-bx} \exp[(-\alpha_{IB} + W_{PI} N_x) H] I_0(t) \frac{s(1-s)^a}{(1-s)} \quad (0 \leq t \leq \tau, 0 \leq x \leq S(t)) \quad (4)$$

初始条件为室温下约 300 K, 边界条件为<sup>[10]</sup>:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -L\rho_l \mu_r + \beta I_0(t) \frac{s(1-s)^a}{(1-s)} \quad (0 \leq t \leq \tau) \quad (5)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=d} = 0 \quad (0 \leq t \leq \tau) \quad (6)$$

式中:  $\mu_r$  为蒸发速度<sup>[7]</sup>,

$$\mu_r = \frac{p_s C_s}{\rho_l (2\pi k_b T / m_l)^{1/2}} \quad (7)$$

式中:  $p_s$  为饱和蒸汽气压, Pa;  $C_s$  为黏滞系数<sup>[8]</sup>(约为 1), Ns/cm<sup>2</sup>;  $m_l$  为靶材粒子质量, kg;  $\alpha_{IB}$  为逆韧致吸收长度表示为<sup>[11-12]</sup>:

$$\alpha_{IB} = \frac{3.69 \times 10^8 Z^3 n_i^2}{T_i^{1/2} v_o^3} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h\nu_0}{k_b T_i}\right) \right] \quad (8)$$

式中:  $Z$  为平均电荷,  $C$ ;  $n_i$  为离子数密度, cm<sup>-3</sup>;  $v_o$  为入射光频率, Hz;  $T_i$  为粒子温度, K;  $W_{PI}$  为光致电离的截面积, 表示为<sup>[11,13]</sup>:

$$W_{PI} = 7.9 \times 10^{-18} \frac{(E_I - E)^{2.5} I_H^{0.5}}{(h\nu)^3} \quad (9)$$

式中:  $I_H$  为氢的离化势能;  $E_I$  为原子的离化势能;  $E$

为被光致电离的激发态的能量;  $H$  为等离子体膨胀线度, 可以从等离子体动力学方程求出<sup>[14]</sup>:

$$X(t) \left[ \frac{1}{\tau} \frac{dX}{dt} + \frac{d^2 X(t)}{dt^2} \right] = \frac{k_b T}{m} \quad (10)$$

初始条件<sup>[14]</sup>:  $v_0 = \sqrt{8k_b T_i / \pi m}$ ; 式中,  $k_b$  为玻耳兹曼常数;  $T_i$  为靶材气化温度;  $m$  为粒子的质量。

## 2 脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮传热分析

### 2.1 脉冲辐照次数

参考文献[7]表明: 脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮功率密度为  $3.359 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ , 频率为  $50 \text{ kHz}$  时产生等离子体的温度低和浓度数低, 不需要考虑等离子体屏蔽效应。脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮过程中, 砂轮在磨床带动下旋转。将修整运动过程分为两个部分分开讨论, 即图 4 所示砂轮的横向运动和纵向运动。

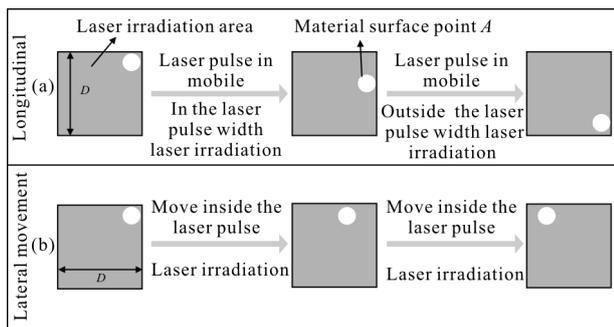


图 4 激光辐照脉冲数

Fig.4 Pulse number of laser irradiation

如图所示通过辐照纵向距离时间  $D/2\pi r v_r$  ( $D$

实验值  $38 \mu\text{m}$ ;  $r$  青铜砂轮半径  $\mu\text{m}$ ;  $v_r$  磨床的转速  $r \cdot \text{min}^{-1}$ ) 小于激光脉冲时间  $1/f$ , 也即旋转一圈经过辐照区域只有一个脉冲辐照; 设横向移动速度  $v_h = 76 \mu\text{m/s}$  (实验值), 通过横向辐照距离的时间为:  $D/76 = 0.5 \text{ s}$ , 材料旋转一周时间  $t_c$  为:  $0.2 \text{ s}$ , 横向移动通过辐照区域时, 材料旋转的圈数取整为:  $[D/(v_h t)] = 2$ , 结合纵向运动分析, 当通过辐照时有 2 个脉冲辐照材料, 循环 3 次后有 12 个脉冲辐照材料。

### 2.2 脉冲激光修整青铜和整形金刚石传热数值分析

仅考虑蒸发效应和脉冲能量累积效应, 传热模型化简后为:

$$\rho_l c_l \left( \frac{\partial T_l}{\partial t} - \mu_r \frac{\partial T_l}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_l \frac{\partial T_l}{\partial x} \right) + b\beta e^{-bx} I_0(t) \frac{s(1-s^a)}{(1-s)} \quad (0 \leq t \leq \tau, 0 \leq x \leq S(t)) \quad (11)$$

令  $F0_1 = k\Delta t / (\rho c (\Delta x)^2)$  为网格傅立叶数, 方程解的差分表述如下:

$$T_i^{i+1} = \left( \frac{\Delta t \mu_r}{\Delta x} + F0_1 \right) T_{i+1}^i + \left( 1 - \frac{\Delta t \mu_r}{\Delta x} - 2F0_1 \right) T_i^i + F0_1 T_{i-1}^i + \frac{\Delta t}{\rho c} b\beta e^{-bi\Delta x} I_0 \exp \left( -\frac{(j\Delta t - \tau/2)^2}{2\sigma^2} \right) \frac{s(1-s^a)}{(1-s)} \quad (12)$$

设定脉冲光纤激光修整青铜的总时间为  $6 \text{ min}$ , 磨床带动砂轮来回循环次数为 6 次, 激光功率密度为  $1.68 \times 10^8 \sim 3.359 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ , 脉冲宽度为  $210 \text{ ns}$ , 垂直青铜砂轮方向, 即  $X$  方向深度取为  $16 \mu\text{m}$ ; 时间步长  $\Delta t$  为  $0.21 \text{ ns}$ , 空间步长  $\Delta x$  为  $1 \mu\text{m}$ , 由于  $k\Delta t / (\rho c (\Delta t)^2) = 0.0029 \leq 0.5$ , 数值解是稳定和收敛的, 结合表 1 和

表 1 青铜和金刚石热物理参数

Tab.1 Thermophysical parameters of the bronze and diamond

Bronze			Diamond		
Name	Symbol	Numerical	Name	Symbol	Numerical
Atomic mass	$m/\text{kg}$	$1.0382 \times 10^{-25}$	Lattice energy	$P_j/\text{MJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	39.4
Density	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	8 620	Density	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	3 515
Thermal diffusivity	$k/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	0.14	Thermal diffusivity	$k/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	3.114
Thermal conductivity	$k_s/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	41.9	Thermal conductivity	$k_s/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	2 000
Specific heat capacity	$c_s/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	352	Specific heat capacity	$c_s/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	1 827
Melting temperature	$T_m/\text{K}$	1 173	Melting temperature	$T_m/\text{K}$	3 550
Gasification temperature	$T_i/\text{K}$	2 770	Gasification temperature	$T_i/\text{K}$	4 830
Absorption rate	$\beta$	0.38	Absorption rate	$\beta$	0.25
Evaporation enthalpy	$L/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	300	Refractive index	$n$	2.417

表 2 的相关参数, 得到图 5 所示脉冲光纤激光修锐青铜的温度演化规律。

脉冲激光烧蚀青铜温度变化如图 5(a)所示, 当激光功率密度为  $1.68 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 烧蚀后青铜最

表 2 计算参数

Tab.2 Calculation parameters

Name	Symbol	Numerical	Name	Symbol	Numerical
Laser wavelength	$\lambda/\text{m}$	$1.064 \times 10^{-6}$	Spot diameter	$D/\mu\text{m}$	38
Electron mass	$m_e/\text{kg}$	$9.1 \times 10^{-31}$	Pulse width	$\tau/\text{s}$	$2.1 \times 10^{-7}$
Average ionization energy	$U/\text{eV}$	7.630 5	Evaporation rate	$\mu_e/\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.065
Pulse repetition rate	$f/\text{kHz}$	50	Laser power	$P/\text{W}$	40
Energy accumulation coefficient	$s$	0.85	Absorption coefficient	$b/\text{m}^{-1}$	4.761 06
Grinding machine speed	$r_s/r \cdot \text{min}^{-1}$	300	Boltzmann constant	$k_B/\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	$1.38 \times 10^{-23}$

高温度约为 4 000 K, 达到气化温度; 图 5(b)为当激光功率密度为  $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 青铜最高温度约为 5 800 K, 相比于  $1.68 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ , 去除效率增加; 特别是激光功率密度为图 5(c)  $3.359 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 最高温度为 7 800 K, 相比于气化温度 2 770 K, 同样时间内去除材料效率更高更快。结合图 5(d) 青铜表面变化温度曲线, 随激光功率密度增大, 表

面温度达到气化温度时间越短, 如  $1.68 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  和  $3.359 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 青铜气化时间  $t_{20}$  小于  $t_{40}$ , 材料气化时间越长, 材料去除效率越高, 烧蚀后形成的凹坑越深。综上所述, 数值计算表明, 在脉冲激光辐照下, 青铜材料在激光功率密度为  $1.68 \times 10^8 \sim 3.359 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时能被气化去除, 可以实现激光修锐青铜目的。

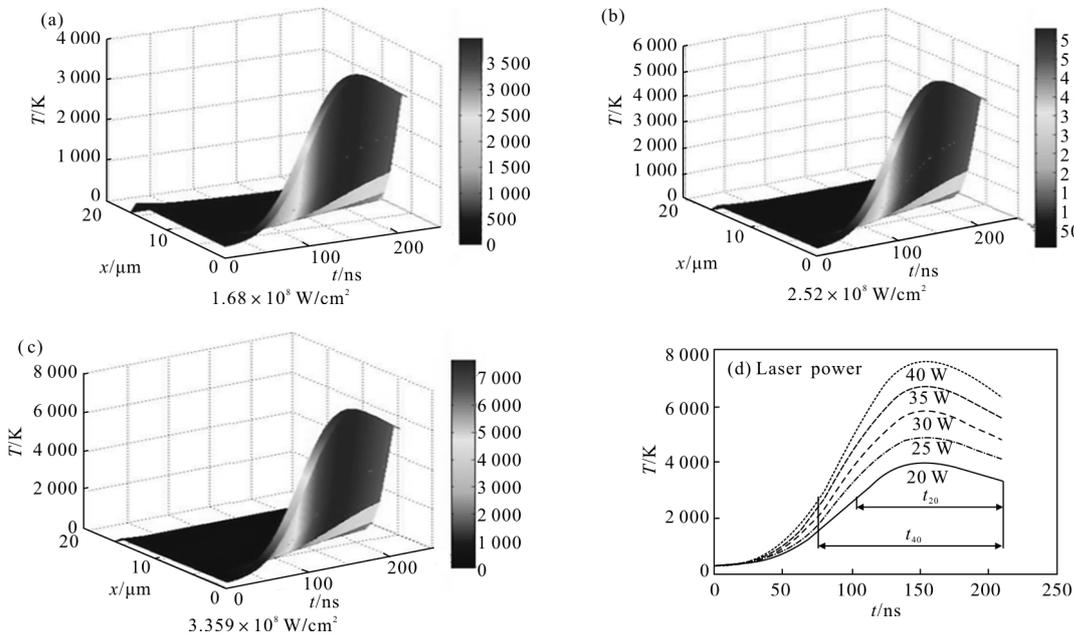


图 5 脉冲激光烧蚀青铜轮温度变化图

Fig.5 Temperature changes in the pulse laser ablation of bronze

设定激光烧蚀时间为 6 min, 激光功率密度为  $1.68 \times 10^8 \sim 3.359 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ , 取脉宽为 210 ns; X 方向距离取为  $4.8 \mu\text{m}$ ; 时间步长  $\Delta t$  为 0.021 ns, 空间步长  $\Delta x$  为  $0.12 \mu\text{m}$ , 由于  $k\Delta t/(\rho c(\Delta x)^2) = 0.454 \leq 0.5$ , 数

值解是稳定和收敛的, 结合表 1 和表 2 的计算参数, 得到图 6 所示脉冲光纤激光烧蚀金刚石温度演化规律。

脉冲激光修整金刚石温度变化如图 6(a)所示, 当激光功率密度为  $1.68 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 烧蚀后金刚

石表面的最高温度约为 3 500 K, 温度达不到金刚石熔化温度 3 550 K, 此时不能修整金刚石; 当激光功率密度为  $2.1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 如图 6(b) 所示, 金刚石表面最高温度约为 4 500 K 高于 3 550 K 的熔化温度低于 4 830 K 的气化温度, 金刚石表面能被微弱去除, 但去除效率非常低; 当激光功率密度达到图 6(c) 和图 6(d) 所示  $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  和  $2.94 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 金刚石表面最高温度分别达到 5 300 K 和 6 200 K, 高于金刚石气化温度, 金刚石能被快速气化同时修整去除效率高; 特别当激光功率密度为  $3.359 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 金刚石表面最高温度达到 7 200 K, 远远高于其气化温度, 此时能够快速修整金刚石; 图 6(e) 金刚石表面变化温度表明随激光功率密度增大, 金刚石表面温度上升时间越快, 达到气化时间越短, 图中激光功率密度为  $2.10 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时达到金刚石的熔化时间  $t_{25}$  小于激光功率密度  $3.359 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时的熔化时间  $t_{40}$ , 烧蚀时间越长, 金刚石表面去除效率越高。综上所述, 在相关条件下, 激光功率密度为  $1.68 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 金刚石不能被修整; 当激光功率密度高于  $1.68 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  低于  $2.10 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ , 金刚石表面温度能达到其熔化值但低于其气化值, 修整效果不明显, 随激光功率密度增加到  $2.52 \sim 3.359 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ , 可以达到其气化值, 并随脉冲激光烧蚀时间增长, 去除效率增大, 可以达到修整金刚石的要求。

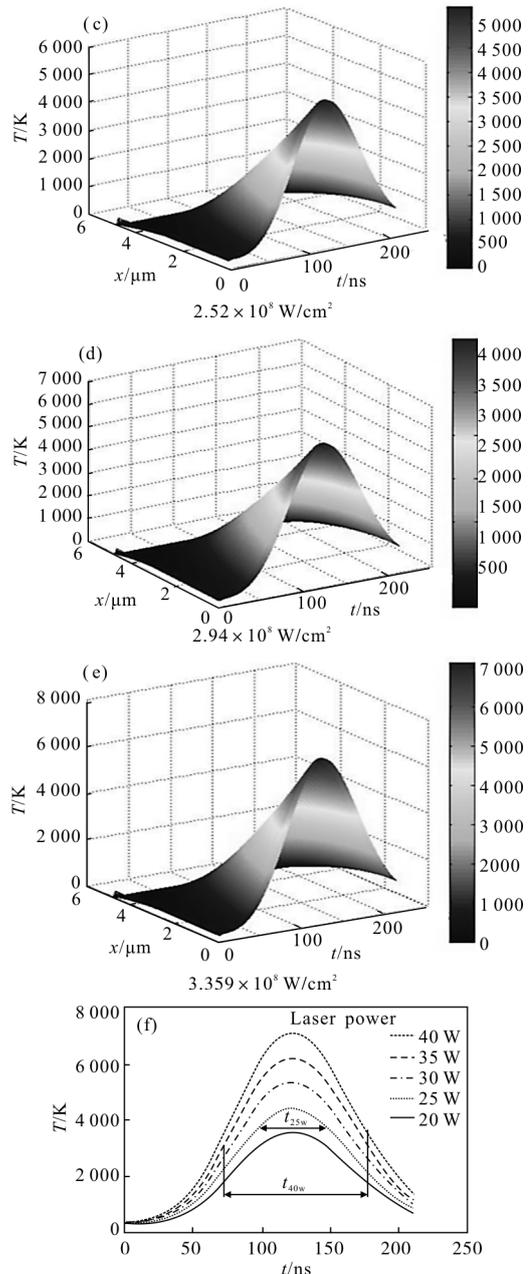
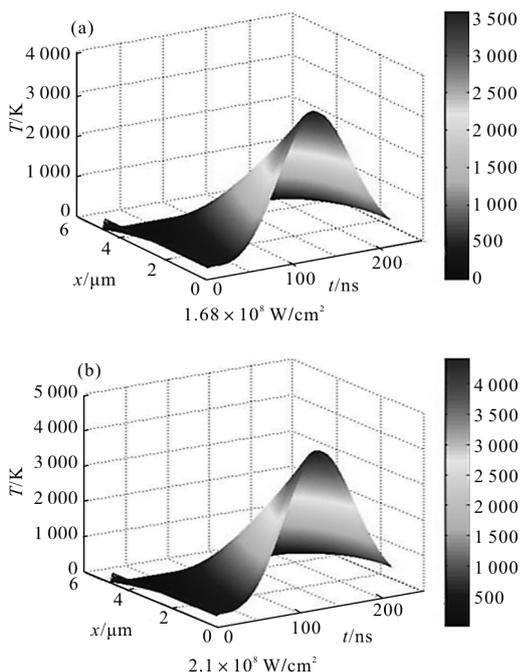


图 6 脉冲光纤激光修整金刚石温度变化与曲线变化图  
Fig.6 Temperature and curve changes in the laser ablation of diamond

通过图 5 和图 6 的传热数值仿真表明, 相关条件下, 脉冲激光功率密度小于  $2.10 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 能对青铜金刚石砂轮进行修整; 脉冲激光功率密度大于  $2.10 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  小于  $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 能对青铜金刚石砂轮实现整形和修整的合二为一; 脉冲激光功率密度大于  $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 能对青铜金刚石砂轮实现大深度修整和快速整形, 为脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮工艺参数优化提供了理论指导。

### 3 实验设备与方法

图 7 为激光烧蚀实验部分设备。脉冲光纤激光器的平均功率为 5~50 W, 脉冲频率为 50~150 kHz, 脉冲宽度为 210 ns, 波长为 1 064 nm。图中表明激光束由单模光纤传输到固定在二维电动位移平台上带有标准隔离器的激光烧蚀头, 再经烧蚀头内部焦距为 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。激光烧蚀时, 将材料安装在精密平面磨床的主轴上, 在主轴带动下旋转。



图 7 激光烧蚀实验部分设备

Fig.7 Devices and equipment used for laser ablation

脉冲激光烧蚀砂轮实验参数如表 3 所示, 该部分实验选用的材料为不带金刚石磨粒的青铜结合剂光滑圆柱轮其型号为(100D×10T×5X×31.75H)与带金刚石磨粒的青铜结合剂砂轮 (100D×10T×5X×31.75H×80 #), 采用超景深三维显微系统观测烧蚀后青铜砂轮表面地形形貌特征。

表 3 激光烧蚀实验参数

Tab.3 Experimental parameters used for laser ablation

Laser power density/Wcm <sup>2</sup>	Repeat frequency rate/kHz	Defocusing amount/mm	Cycle index	Rotation rate/rmin
1.68×10 <sup>8</sup>				
2.10×10 <sup>8</sup>				
2.52×10 <sup>8</sup>	50	0	3	300
2.94×10 <sup>8</sup>				
3.359 1×10 <sup>8</sup>				

### 4 结果与讨论

依据表 3 的实验参数对青铜轮烧蚀后, 采用超景深三维显微系统观察修整后青铜轮表面的地形形貌特征, 并测量凹坑深度值。图 8(a)为激光功率密度 1.68×10<sup>8</sup> W/cm<sup>2</sup> 时修整后青铜轮表面地形形貌图, 青铜轮表面被微量去除, 检测的表面凹坑深度为 14.56 μm, 材料去除率较低; 当激光功率密度为 2.10×10<sup>8</sup> W/cm<sup>2</sup> 如图 8(b)所示时, 青铜表面去除效率增加, 检测修整后的凹坑深度值为 17.34 μm; 继续增加激光功率密度达到图 8(c)、图 8(d)和图 8(e)的 2.52×10<sup>8</sup> ~3.359×10<sup>8</sup> W/cm<sup>2</sup>, 修整后的青铜表面凹坑深度值逐渐增加, 达到最大值 83.27 μm。综上所述, 随着激光功率密度的增加, 修整后青铜轮表面凹坑深度逐渐增加, 在激光功率密度为 1.68×10<sup>8</sup> W/cm<sup>2</sup>

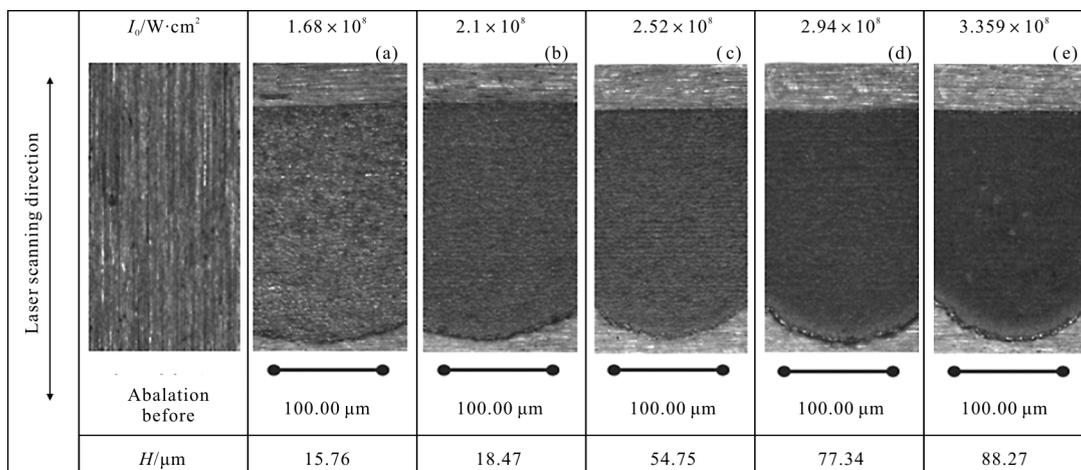


图 8 脉冲光纤激光烧蚀后青铜轮地形地貌

Fig.8 Topography of the bronze wheel after pulse laser ablation

和  $2.1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,青铜材料去除率较低,适合于激光微修整青铜砂轮。根据参考文献[8],磨粒直径约  $106 \sim 150 \mu\text{m}$ ,当磨粒凸出高度为直径的 20%~30%时,修整后砂轮有良好的磨削性能,即磨粒凸出高度  $20 \sim 45 \mu\text{m}$ 。在激光功率密度为  $2.52 \times 10^8 \sim 3.359 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时青铜材料去除率高,适合大深度修整青铜砂轮,但是大深度修整后,会严重影响磨粒突出结合剂的高度和磨削性能,实际中应该避免出现这种情况。

脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮的凹坑深度为:  $h=h(t,T)$ ,其关系式表明影响凹坑深度的参数为修整时间和材料的温度。最终凹坑深度值是在修整时间  $t$  趋于无限大下求解的。在此,输入激光平均功率为  $20 \sim 40 \text{ W}$ 、脉冲重复频率为  $50 \text{ kHz}$ 、脉冲宽度为  $210 \text{ ns}$ ,采用有限差分法对脉冲光纤激光修整青铜金刚石传热方程进行求解,得出最终的凹坑深度值,并与实验值进行比较分析。图 9 可以表明脉冲光纤激光传热物理模型求出的数值与实验值符合得更加好。因此,脉冲光纤激光修整中需要考虑蒸发效应、等离子体屏蔽效应以及脉冲间的能量累积效应,才能更加符合实际烧蚀物理情况。

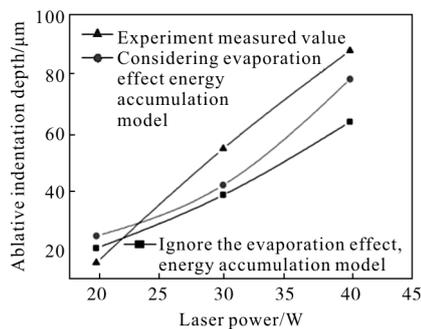


图 9 激光平均功率与凹坑深度值的关系

Fig.9 Relationship between the laser power and ablation pit depth

依据表 3 的实验参数采用超景深三维显微系统,分别在扩大 50 倍和 200 倍下,观察脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮表面地形地貌特征。图 10(a)所示激光功率密度为  $1.68 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,放大 50 倍数下,青铜结合剂被烧蚀掉后,部分金刚石磨粒表面裸露在外面,在 200 倍数下观察磨粒形貌,磨粒表面没有明显凹坑,保持了原本的形貌特征,表明激光功率密度能量值达不到金刚石去除阈值,整形效果不明显,并且标记 A 的个别磨粒表面刃没有完全裸露出来,此时青铜结合剂去除效率低;当激光功率密度

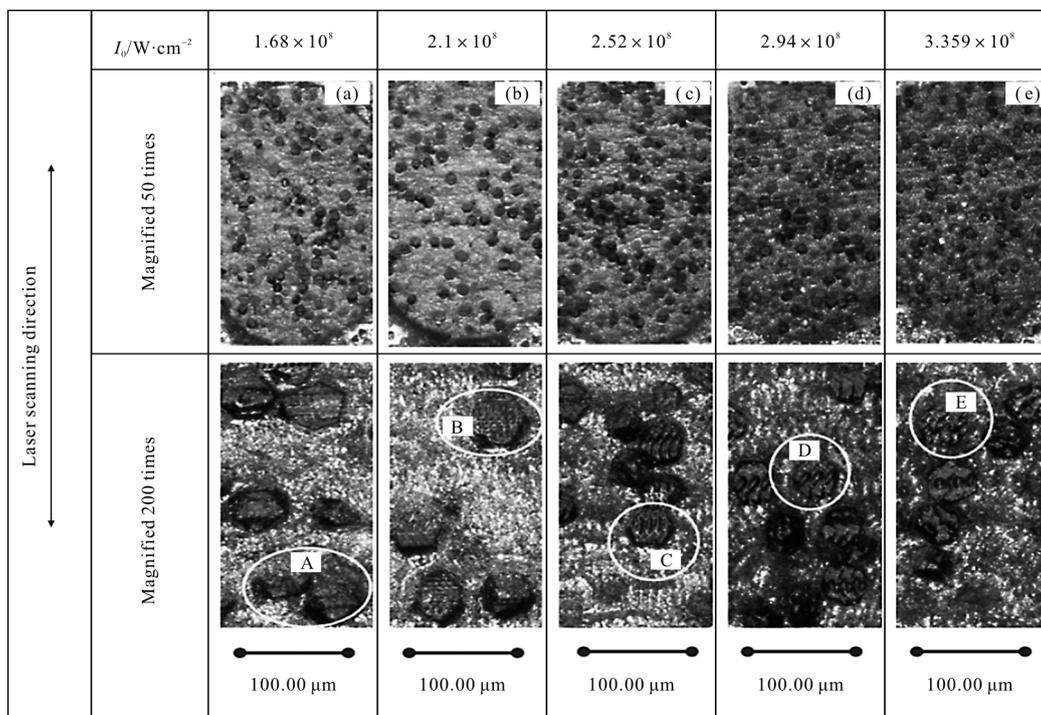


图 10 脉冲光纤激光修整后青铜金刚石砂轮地形地貌

Fig.10 Topography of the bronze-bonded diamond grinding wheel after pulse laser ablation

增大到 $2.1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  图 10(b)时,在 50 倍数下,观察发现青铜结合剂去除效率加大,凹坑深度增大,在 200 倍数下,发现金刚石磨粒表面基本完全裸露,突出结合剂高度明显,标记 B 的金刚石被微微去除导致表面有细小的凹坑,与数值分析的结果表明,激光功率密度为  $2.10 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,修整后的表面温度达到金刚石熔化温度达不到其气化温度,磨粒表面材料去除率低,整形效果不明显;提高激光功率密度在  $2.52 \sim 3.359 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  如图 10(c)~图 10(e)所示,在 50 倍数下,青铜结合剂去除效率增大后,相比于图 10(a)和图 10(b),磨粒突出结合剂数量也随之增加,在 200 倍数下观察,图 10(c)所示激光功率密度  $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  下,磨粒表面去除后留下一条条深深划痕如标记 C 所示,形成蜂窝状的细小凹坑,对于需要细微修整的磨粒能进行微整形;图 10(d)示出当激光功率密度  $2.94 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,磨粒表面整形后只留下了少量没有去除的凸点如图标记 D 所示;相比于 30 W 时整形效果,磨粒表面由凹坑变成凸点;特别是激光功率密度  $3.359 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,金刚石磨粒材料去除量增大,表面被大面积修整后留下微小的凸点,甚至有些形状完全发生了根本转变如标记 E 所示,在实际中希望对金刚石刃进行基本整形,并不希望形成凸点并改变其原本形状,不然会影响其性能与使用。

综上所述,当激光功率密度为  $1.68 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,青铜金刚石砂轮不能被整形,青铜结合剂去除效率低;增大激光功率密度到  $2.10 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,青铜金刚石砂轮修整效果明显,但整形效果不明显;进一步增大激光功率密度到  $2.52 \sim 3.359 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  后,青铜金刚石砂轮修整后磨粒突出结合剂数量增多,并在激光功率密度  $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时形成整形凹坑,在激光功率密度  $2.94 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时磨粒表面凹坑变为凸点,在激光功率密度  $3.359 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时磨粒表面被大面积修整,并部分发生形状改变。

通过图 8 和图 10 实验分析后,相关条件下,激光功率密度小于  $2.10 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,能对青铜金刚石砂轮进行修整;激光功率密度大于  $2.10 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  小于  $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,能对青铜金刚石砂轮实现整形和修整的合二为一;激光功率密度大于  $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,能对青铜金刚石砂轮实现大深度修

锐,但影响磨粒突出结合剂的高度和磨削性能,整形后会改变磨粒原本形状影响其性能与使用,此结果与数值分析一致,也证实数值分析的正确性。

## 5 结 论

文中建立脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮传热物理模型,模型考虑蒸发效应、等离子体屏蔽效应以及能量累积效应,具有一定通用性,对于脉冲激光烧蚀其他金属材料的传热属于研究具有一定价值。利用模型数值分析脉冲激光修整青铜与整形金刚石的激光功率密度阈值,开展相关实验研究。理论研究与实际研究相结合表明相关条件下,激光功率密度大于  $2.10 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  小于  $2.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,能实现理想的修整和整形的合二为一,也为脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮研究提供理论指导与工艺优化。

## 参考文献:

- [1] Ye Jifei, Hong Yanji, Li Nanlei. Impulse coupling performance of liquid propellant with ns laser micro ablation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 102-106. (in Chinese)  
叶继飞,洪延姬,李南雷.纳秒激光烧蚀液态工质冲量耦合特性研究[J].红外与激光工程,2015,44(1):102-106.
- [2] Wu Dongjiang, Zhou Siyu, Yao Longyuan, et al. Simulation of micro-groove cross-section in femtosecond laser ablation of quartz glass [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2243-2249. (in Chinese)  
吴东江,周思雨,姚龙元,等.飞秒激光烧蚀石英玻璃微槽截面形状仿真[J].红外与激光工程,2015,44(8):2243-2249.
- [3] Wang Zhenbao, Wu Yong, Yang Pengling, et al. Numerical simulation and experiment on temperature fields distribution of aluminum target under intensive [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2061-2065. (in Chinese)  
王振宝,吴勇,杨鹏翎,等.强激光辐照铝靶温度分布数值模拟及实验研究[J].红外与激光工程,2014,43(7):2061-2065.
- [4] 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: 295-304.
- [5] Deng H, Chen G Y, Zhou C, et al. Processing parameter

- optimization for the laser dressing of bronze -bonded diamond wheel [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 290: 475-481.
- [6] Singh R K, Narayan J. Pulsed-laser evaporation technique for deposition of thin films: Physics and theoretical model [J]. *Physics Review B*, 1990, 41: 8843-8859.
- [7] 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.
- [8] Cai Song, Chen Genyu, He Jie. The phase explosion studies of laser dressing bronze -bond diamond grinding wheel by a pulsed fiber laser[J]. *Chinese J Laser*, 2015, 42 (9): 0906002. (in Chinese)  
蔡颂, 陈根余, 何杰. 脉冲光纤激光修锐青铜金刚石砂轮相爆炸研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0906002.
- [9] Savchuka A I, Perroneb A, Lorusso A, et al. ZnMnO diluted magnetic semiconductor nanoparticles: synthesis by laser ablation in liquids, optical and magneto -optical properties[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 302: 205-208.
- [10] Li L, Zhang D M, Zhi hua Li, et al. The investigation of optical characteristics of metal target in high power laser ablation [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2006, 383: 194-201.
- [11] Chen G Y, Cai S, Zhou C. On the laser-driven integrated dressing and truing of bronze -bonded grinding wheels [J]. *Diamond & Related Materials*, 2015, 60: 99-110
- [12] Garrelie F, Aubreton J, Catheriont A. Monte carlo simulation of the laser-induced plasma plume expansion under vacuum: comparison with experiments[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83: 5075.
- [13] Ya B Zeldovich, Yu P Raizer. Physics of Shock Waves and High -Temperature Hydrodynamic Phenomena [M]. New York: Academic Press, 1996.
- [14] Zhang Duanming, Li Zhihua, Zhong Zhicheng, et al. Dynamics Principle of Pulsed Laser Deposition [M]. Beijing: Science Press. 2011. (in Chinese)  
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.