

脉冲激光修整青铜金刚石砂轮温度场的模拟与试验

陈根余^{1,2} 余春荣^{2*} 李时春² 孙康健² 卜 纯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 基于激光与物质的相互作用, 针对声光调 Q YAG 脉冲激光修整青铜金刚石砂轮开展研究。建立了单脉冲激光烧蚀青铜和金刚石温度场的有限元模型, 模拟了不同激光功率密度作用下青铜和金刚石的温度分布。借助温度场云图得到了可供修整试验参考的激光参数: 适用于修锐的脉冲激光功率密度范围为 $1.66 \times 10^7 \sim 7.5 \times 10^7$ W/cm²; 适用于整形的脉冲激光功率密度范围为 $9.95 \times 10^7 \sim 3.52 \times 10^8$ W/cm², 并从中选取典型参数进行修整试验, 获得了良好的砂轮表面形貌。在仿真和试验的基础上, 进一步分析了脉冲激光修整青铜金刚石砂轮的机理。

关键词 激光技术; 激光修整; 温度场模拟; 青铜金刚石砂轮; 脉冲激光

中图分类号 TG74+3; TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0703002

Temperature Field Simulation and Experiment for Truing and Dressing of Bronze-Bonded Diamond Grinding Wheel with Pulsed Laser

Chen Genyu^{1,2} Yu Chunrong² Li Shichun² Sun Kangjian² Bu Chun²

(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 Based on interaction between laser and matter, the research on truing and dressing bronze-bonded diamond grinding wheel by acoustic-optic Q-switched YAG pulsed laser is carried out. Simulation models of single pulsed laser ablating bronze and diamond temperature field are established by finite element method, which shows the temperature distribution of bronze and diamond under different laser power densities. Reasonable laser parameters are obtained from the temperature distribution contours; the pulsed laser power density ranging of $1.66 \times 10^7 \sim 7.5 \times 10^7$ W/cm² is suitable for dressing; the value ranging of $9.95 \times 10^7 \sim 3.52 \times 10^8$ W/cm² is suitable for truing, which can be used as reference values for practical dressing and truing experiment. Typical parameters are applied to actual truing and dressing experiment, and the surface topography of the grinding wheel becomes favorable. Through simulation and experiment, the mechanism of pulsed laser truing and dressing bronze-bond and diamond grinding wheel is further analyzed.

Key words laser technique; laser truing and dressing; temperature field simulation; bronze-bonded diamond grinding wheel; pulsed laser

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 320.5540

1 引 言

激光修整超硬磨料砂轮是一种新的修整方法, 其机理是基于激光与物质的相互作用——热效应。

脉冲激光作用于砂轮表面是一个复杂的瞬态加热过程, 既与激光参数有关, 又与作用材料的热物理性质有关。激光参数主要是指激光功率密度、脉宽、占空

收稿日期: 2011-01-28; 收到修改稿日期: 2011-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(5050005)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, 主要从事激光微细加工技术方面的研究。

E-mail: hdgychen@163.com(中国光学学会会员号: S04011719)

* 通信联系人。E-mail: ycr8797@163.com

比、波长等,而作用材料的热物理性质主要包括磨料和结合剂的密度、热导率、比热容及两者对激光的吸收率等。

激光修整青铜金刚石砂轮通过激光辐照砂轮表面,使材料发生质量迁移(即烧蚀),包括整形和修锐两个工序。整形是指由于砂轮表面某些金刚石磨粒凸出于结合剂的高度较其他大部分磨粒要高,影响砂轮的整体形状精度(圆度),需对这些磨粒进行选择性的烧蚀;修锐是指去除某些磨粒间过多的结合剂,使磨粒突出形成切削刃和容屑空间。激光修整的目的是提高砂轮表面有效磨粒的数量,从而提高砂轮的磨削精度和效率。

关于激光修整超硬磨料砂轮,已有学者进行了研究,研究方向主要集中在两个方面:1)使用不同的激光器或不同的激光参数进行修整试验,分析修整后砂轮的表面形貌和磨削性能;2)从理论上分析烧蚀过程中去除材料所需的激光功率密度阈值和材料的去除量^[1~6]。目前,大多数学者只进行了修锐方面的研究,涉及整形方面的研究很少,而且在研究激光与材料作用机理时,仅考虑结合剂和磨料的气化或相变点,没有结合材料在不同介质中的热稳定性,从而影响了结论的准确性。本文建立了单脉冲激光烧蚀青铜和金刚石的有限元模型,对烧蚀过程进行温度场模拟,试图通过模拟、试验、理论分析研究,给实际修整试验选取激光参数和分析砂轮表面变质层等提供了一定的指导。

2 单脉冲激光烧蚀青铜和金刚石温度场仿真的数理模型

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(约为几百纳秒),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。然而,激光烧蚀过程机理复杂,在模拟烧蚀温度场时,为简化有限元分析计算,可把单脉冲烧蚀金刚石和青铜看成面热源对物体的瞬态传热过程,并做如下假设:1)青铜和金刚石均为各向同性材料,其热物理性质随温度变化很小;2)入射激光束具有确定的时间和空间分布,可将声光调Q YAG 激光器的输出脉冲近似等效为矩形脉冲分布;3)忽略材料表面的对流损失和热辐射,忽略加工过程中等离子体对激光吸收的影响。

2.1 传热学控制方程

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^[7]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Phi, \quad (1)$$

式中 T 为计算区域内各点的实时温度, ρ 为材料的密度, c 为材料的定压比热, λ 为材料的导热系数, t 为作用时间变量, Φ 为单位时间单位体积内热源的生成热。对激光修整青铜金刚石砂轮而言,无内热源即 $\Phi = 0$, 因此, (1)式可简化为

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

式中 $\alpha = \lambda / (\rho c)$, 称为热扩散率。

2.2 边界条件及初始条件

由于材料表面的对流损失和热辐射忽略不计,不受激光辐照的表面可视作绝热边界,只有被辐照的表面才有稳定的热流输入。因此,可按导热问题第二类边界条件进行处理,即满足

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = q_w \quad (t > 0), \quad (3)$$

式中 \mathbf{n} 为被辐照表面外法线方向, q_w 为输入热流密度,可表示为

$$q_w = AI, \quad (4)$$

式中 A 为材料对激光的吸收率, I 为单脉冲激光功率密度,可表示为

$$I = \frac{4P_m}{\pi\tau fd^2}, \quad (5)$$

式中 P_m 为激光器平均输出功率, τ 为声光调Q脉冲激光的脉宽, f 为脉冲重复频率, d 为激光经聚焦透镜后的焦斑直径。

由于不考虑脉冲激光的热积累效应,可认为砂轮内部各点的初始温度一样,取初始温度 $T_0 = 20^\circ\text{C}$, 即 293K 。青铜和金刚石的主要热物理性质如表1所示^[8]。

表1 青铜和金刚石的主要热学性质

Table 1 Thermal properties of bronze and diamond

Property	Bronze	Diamond
Density $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	8620	3515
Thermal conductivity $\lambda / [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	41.9	2000
Specific heat $C / [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	352	1827
Thermal diffusivity $\alpha / (10^{-4} \text{m}^2/\text{s})$	0.14	3.114
Vaporization temperature T_1/K	2770	3973
Absorptivity A (YAG laser)	0.38	0.20

2.3 有限元几何模型

在建立单脉冲烧蚀几何模型时,定义了两种分别代表青铜结合剂和金刚石磨粒的材料,取纯青铜结合剂模型为 $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 的立方体,单晶金刚石颗粒的形状近似为正六面体,磨粒凸出结合剂的高度为其粒度的 30%。由于模型形状

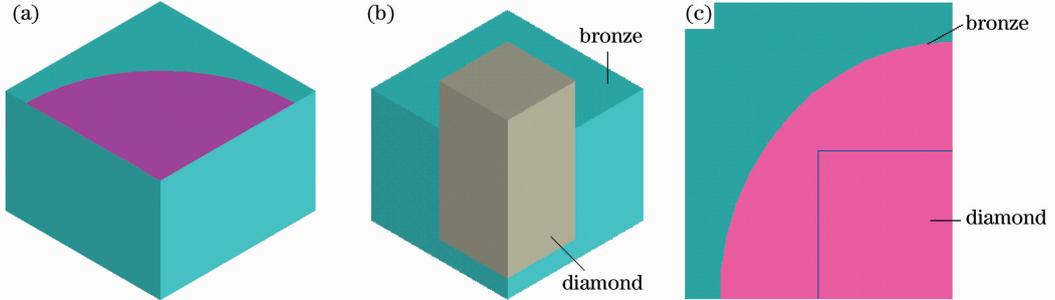


图1 激光修整青铜金刚石砂轮有限元几何模型(注:1/4圆面积为激光束作用区域)。(a)激光烧蚀纯青铜几何模型; (b)金刚石磨粒凸出青铜结合剂几何模型;(c)激光烧蚀金刚石加载示意图

Fig.1 Finite element geometrical models of laser truing and dressing bronze-bonded diamond grinding wheel (The quarter of circular area is the region of laser radiation). (a) Geometrical model of laser ablating bronze; (b) geometrical model of diamond protruding bronze-bond; (c) load scheme of laser ablating diamond

3 单脉冲激光烧蚀青铜和金刚石温度场仿真结果

基于上述分析,利用 ANSYS 对单脉冲激光烧蚀青铜和金刚石进行温度场计算求解。如(3)式, q_w 作为热流密度施加到模型上,而 q_w 是单脉冲激光功率密度 I 和材料对激光吸收率 A 的乘积,说明单脉冲激光功率密度 I 是影响烧蚀过程的直接参数。因

表2 YAG 激光的输出参数($f=5\ \text{kHz}$, $d=260\ \mu\text{m}$)

Table 2 Output parameters of YAG laser ($f=5\ \text{kHz}$, $d=260\ \mu\text{m}$)

i/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	20($f=2\ \text{kHz}$)
P_m/W	30.9	43.9	51.5	61.2	66	66	78	92.5	114	118.6	56
τ/ns	700	500	400	300	250	300	200	200	180	150	150
$I/(10^8\ \text{W}/\text{cm}^2)$	0.166	0.331	0.485	0.769	0.995	0.829	1.470	1.743	2.387	2.978	3.518

3.1 单脉冲激光烧蚀青铜温度场

图2为模拟单脉冲激光烧蚀青铜结合剂的温度场云图(彩图见电子版),当声光调Q YAG 脉冲激光器输出的脉冲功率密度接近 $10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时,青铜表面温度可达到沸点,青铜开始气化,但基本没有烧蚀凹坑。当脉冲功率密度达到 $1.66 \times 10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时,烧蚀凹坑深度为 $3\ \mu\text{m}$ [图2(a)],当脉冲功率密度增加到 $3.31 \times 10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时,烧蚀凹坑深度为 $5\ \mu\text{m}$ [图2(b)]。继续增加脉冲功率密度,青铜结合剂表层温度迅速升高,当脉冲功率密度达到 $7.5 \times 10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时,烧蚀凹坑深度基本维持在 $6\ \mu\text{m}$ 不

和载荷分布(激光束)都具有对称性,为简化计算,均取 1/4 模型进行计算,如图1所示。另外,由于激光束经聚焦透镜后的焦斑直径($260\ \mu\text{m}$)比试验用砂轮的金刚石粒度 MBD100/120($150\ \mu\text{m}$)大,使得脉冲激光烧蚀金刚石时还有一部分激光辐照在周围的青铜表面[图1(c)]。

此,根据试验用声光调Q YAG 脉冲激光器的特性,对青铜结合剂和金刚石磨粒加载不同的单脉冲激光功率密度,可以得到相应参数下的温度场分布。

试验使用的 YAG 激光器最大平均功率不到 200 W,通过声光调Q的方式来获得脉冲激光,从而得到高数量级的激光功率密度。表2列出了试验用 YAG 激光器在不同抽运电流 i 下的具体参数。

变,这是因为随着脉冲功率密度的增加,脉宽减小即激光与材料作用时间减小。因此,可取去除青铜结合剂的脉冲激光功率范围为 $1.66 \times 10^7 \sim 7.5 \times 10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。

3.2 单脉冲激光烧蚀金刚石磨粒温度场

由于金刚石的比热容比青铜高很多,对 YAG 激光的吸收率比青铜小很多,导致去除金刚石所需要的激光功率密度要相对高很多。然而,金刚石在高温下不是很稳定,表3归纳了金刚石在高温下不同介质中的热稳定性^[9,10],本试验是在空气介质中进行的。

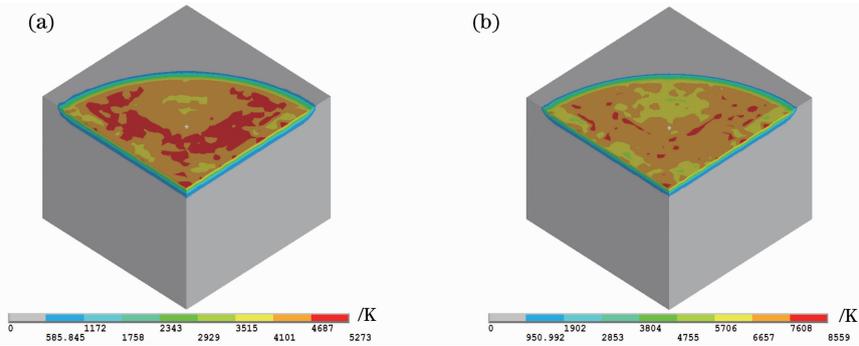


图 2 脉冲激光烧蚀纯青铜温度场云图。(a) $I=1.66 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$; (b) $I=3.31 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$

Fig. 2 Temperature distribution contours of pulsed laser ablating bronze. (a) $I=1.66 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$; (b) $I=3.31 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$

表 3 金刚石在高温下不同介质中的热稳定性

Table 3 Thermal stability of diamond in different mediums at higher temperature

Medium	Temperature T / K	Thermal stability
Oxygen	≥ 873	Epidermis turns black
	973~1053	Start burning
Air	1013~1113	Being oxidized
	1123~1273	Start burning
Little oxygen	≥ 1273	Graphitizing
Vacuum	≥ 1773	Graphitizing

图 3 为模拟脉冲激光烧蚀金刚石温度场云图(彩图见电子版)。由图可看出,由于物理性能不同,

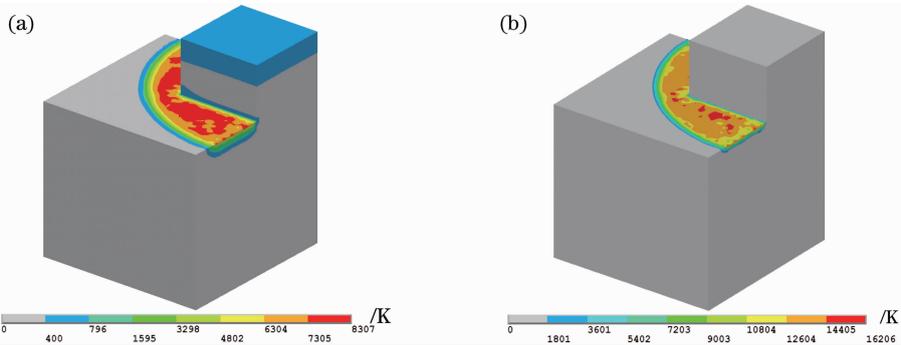


图 3 脉冲激光烧蚀金刚石温度场云图一。(a) $I=3.31 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$; (b) $I=9.95 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$

Fig. 3 Temperature distribution contours of pulsed laser ablating diamond I. (a) $I=3.31 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$; (b) $I=9.95 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$

当激光功率密度为 $3.31 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时,金刚石表面最高温度只有 740 K 左右,还未达到起始氧化温度[图 4(a)];当激光功率密度为 $9.95 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时,金刚石表层开始氧化并燃烧,但金刚石去除量很少[约为 $2 \mu\text{m}$ 厚,图 4(b)];当激光功率密度为 $1.74 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,金刚石去除量约为 $4 \mu\text{m}$ 厚[图 4(c)];当激光功率密度为 $2.98 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,金刚石去除量约为 $6 \mu\text{m}$ 厚[图 4(d)].当脉冲激光功率密度达到 $3.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,金刚石去除量达到最大值,约为 $7 \mu\text{m}$

在相同的热流输入下,金刚石磨粒和周围青铜结合剂的表面温度变化差异很大,青铜表面温度远远高出气化温度,而金刚石表面温升相对缓慢。由于温度相差太大,图 3 不能同时清晰呈现青铜和金刚石的温度分布,且对比图 3(a)和图 2(b)可知,当加载的热流密度相同时,两图中青铜结合剂的温度分布基本一样。因此,为能清晰表达烧蚀过程中金刚石的温度场,在求解时,仅对图示模型中的金刚石磨粒表面加载热流密度,周围青铜结合剂的温度分布可参照单脉冲激光烧蚀纯青铜的温度场,该条件下的温度分布如图 4 所示(彩图见电子版)。

此外,如图 3 所示,在金刚石去除的同时,其周围的青铜结合剂也有一定的去除,但去除量相对整颗金刚石高度很小,不会影响其对金刚石的把持力,不会造成金刚石的整颗脱落。

由模拟结果可得到激光修整青铜金刚石砂轮的最佳参数,即:修锐时,旨在去除青铜结合剂但不损伤金刚石,可选择的脉冲激光功率密度范围为 $1.66 \times 10^7 \sim 7.5 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$;整形时,最合适的脉冲激光功率密度范围为 $9.95 \times 10^7 \sim 3.52 \times$

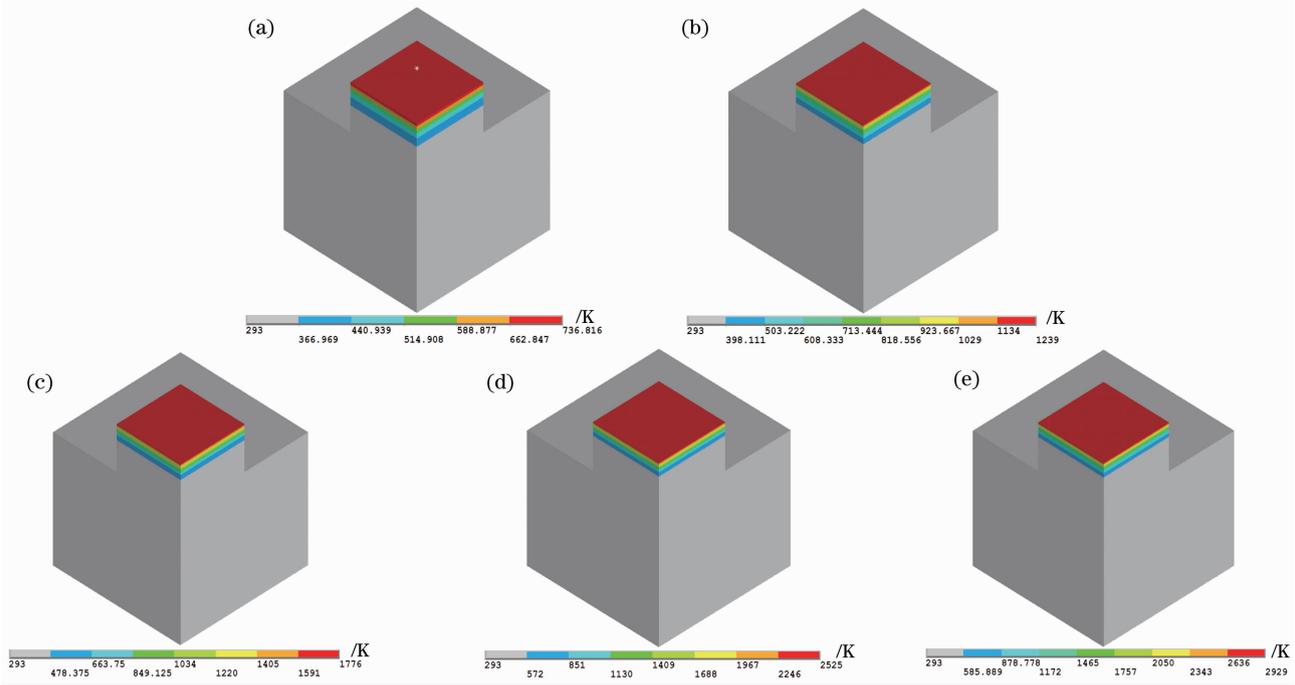


图4 脉冲激光烧蚀金刚石温度场云图二。(a) $I=3.31 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$; (b) $I=9.95 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$; (c) $I=1.74 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$; (d) $I=2.98 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$; (e) $I=3.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$

Fig. 4 Temperature distribution contours of pulsed laser ablating diamond II. (a) $I=3.31 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$;

(b) $I=9.95 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$; (c) $I=1.74 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$; (d) $I=2.98 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$; (e) $I=3.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$

10^8 W/cm^2 ,既可适量去除金刚石,也可去除金刚石周围部分青铜结合剂。

4 脉冲激光修整青铜金刚石砂轮试验

试验使用声光调Q YAG激光器对青铜金刚石砂轮进行修整,具体试验原理如下:将待修整砂轮安装在磨床上并给定合适转速,激光束经聚焦后沿径向辐照砂轮表面。整形时,砂轮表面位置高度变化经位移传感器转换成电压信号,该信号通过电压比较电路与参考电压比较输出一高低电平,该电平经驱动电路产生相应的晶体管-晶体管逻辑电平(TTL)控制脉冲,由TTL信号控制Q驱动源输出脉冲。参考电压是在修整前根据砂轮表面形貌设定

的,只有当电压信号大于参考电压时,即砂轮表面位置较高(如部分金刚石磨粒)时,输出一高电平,控制Q驱动源输出脉冲,获得脉冲激光进行烧蚀。为了获得容屑空间,增加有效磨粒数量,整形后还需选择合适的激光功率密度进行修锐。

选择激光修整参数时,若激光功率密度太低,则修整效率太低;若激光功率密度太高,则导致深层金刚石组织石墨化。试验时,参考有限元模拟得到的温度场云图,先根据激光功率密度 $I=2.98 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 选择参数进行整形,然后根据 $I=3.31 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 选择参数进行激光修锐。

图5为激光修整前后的砂轮表面形貌,从图中可以看出,修整后青铜结合剂被明显去除,金刚石磨

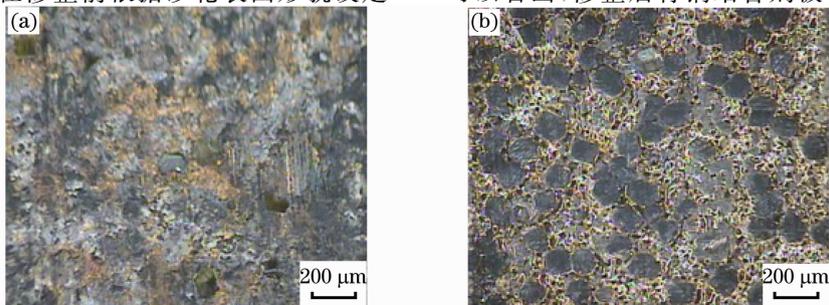


图5 光学显微镜下的砂轮表面形貌。(a)修整前;(b)修整后

Fig. 5 Surface topography of grinding wheel under optical microscope. (a) Before laser truing and dressing; (b) after laser truing and dressing

粒被微量去除,几乎没有整颗脱落现象,并且凸出结合剂一定高度,在砂轮表面形成充足的容屑空间。另外,金刚石表面略呈炭黑色,这是烧蚀过程中少量组织石墨化的结果,但这不会影响金刚石磨粒的整体形状特征和磨削性能。

5 激光修整青铜金刚石砂轮机理

脉冲激光沿径向作用于青铜金刚石砂轮表面,到达材料表面的激光功率密度很高($10^7 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$)。青铜结合剂首先熔化,随后表面温度迅速升至青铜的沸点,青铜很快被气化同时产生金属蒸气,金属蒸气的存在有利于材料吸收更多的激光能量,材料继续被强烈加热,使热作用区底部形成更强烈的金属喷射和飞溅。一个激光脉冲作用后,熔融的青铜再结晶附着在烧蚀凹坑和金刚石磨粒周围。

对金刚石磨料而言,在空气中金刚石与 YAG 激光的相互作用过程可描述如下:脉冲激光被金刚石吸收,经过极短的能量弛豫时间,金刚石表面温度开始升高。当温度到达 1000 K 左右时,金刚石开始被氧化。在脉冲激光的持续作用下,温度继续攀升,到达 1200 K 以上时,金刚石开始燃烧($\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$),同时,在热传导的作用下,更深层的金刚石组织也达到燃烧温度,但由于深层氧气不足,少量组织会发生石墨化现象。如果入射激光功率密度足够高,深层的金刚石组织会大量石墨化,当温度到达石墨的分解点时,材料会发生破裂而飞溅出去。

综上所述,由于青铜结合剂和金刚石磨料的热物理性质差别较大,导致激光修整时整形和修锐的烧蚀机理不同,两者所需要的激光工艺参数也不一样,选择合适的激光工艺参数是修整青铜金刚石砂轮的关键。

6 结 论

1) 模拟了脉冲激光烧蚀青铜结合剂和金刚石磨粒的温度分布,通过模拟得到了不同参数下的材料去除量,得到了可供参考的适合于激光修整的工艺参数:适用于修锐的脉冲激光功率密度范围为 $1.66 \times 10^7 \sim 7.5 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$;适用于整形的脉冲激光功率密度范围为 $9.95 \times 10^7 \sim 3.52 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$,并在该范围内选择激光参数进行修整

试验,获得了较为理想的表面形貌。

2) 通过仿真和试验,进一步分析了脉冲激光修整青铜金刚石砂轮的机理为:在空气介质中和合适的激光功率密度下,青铜结合剂被气化去除,金刚石被氧化燃烧去除,且不会整颗脱落。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Wang Xuyue, Xu Yunfei, Xu Wenji *et al.*. Experiment and evaluation of laser dressing diamond grinding wheel by side blowing[J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, **19**(6): 725~728
王续跃,徐云飞,徐文骥等. 辅助侧向吹气法金刚石砂轮激光修锐试验与评价[J]. *中国机械工程*, 2008, **19**(6): 725~728
- 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 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): 174~179
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): 174~179
- 6 X. Z. Xie, G. Y. Chen, L. J. Li. 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
- 7 Yang Shiming, Tao Wequan. Heat Transfer [M]. 4th edition. Beijing: High Education Press, 2006
杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2006
- 8 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
- 9 Wang Qinsheng. Superhard Material Manufacture[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2002. 19~29
王秦生. 超硬材料制造[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002. 19~29
- 10 Zhang 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