

激光-机械复合修整超硬磨料砂轮研究

陈根余^{1,2} 卜 纯² 邓 辉² 贾天阳² 李时春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 为了解决超硬磨料砂轮修整困难的难题,采用激光-机械复合修整法,通过对青铜结合剂的去除过程进行多脉冲有限元仿真,优化激光粗修工艺的激光参数及确定激光粗修工艺过程砂轮圆跳动所能达到的范围。根据仿真结果选择了修整实验条件下激光粗修的激光参数,并对烧结成型的青铜金刚石砂轮进行了激光-机械复合修整实验。结果表明在合适的工艺参数下,激光-机械复合修整法是一种有效的修整方法。

关键词 激光技术;激光-机械复合修整;有限元仿真;参数优化;青铜结合剂

中图分类号 TG74⁺3;TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0703002

Research on Laser and Mechanical Compound Truing and Dressing of Superabrasive Grinding Wheels

Chen Genyu^{1,2} Bu Chun² Deng Hui² Jia Tianyang² Li Shichun²

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

Abstract To solve the problem that truing and dressing of superabrasive grinding wheels are very hard, a method which is called "laser and mechanical compound truing and dressing" is used. Multiple-pulse finite element simulation is done to optimize laser parameters during laser rough trimming and reach a certain circular runout range of grinding wheels after laser rough trimming. Through simulation results, laser parameters of laser rough trimming are selected. Then, laser and mechanical compound truing and dressing experiments are done for bronze-bonded diamond grinding wheel which is just die-casting molding. Results show that if appropriate technological parameters are selected, laser and mechanical compound truing and dressing is an effective method.

Key words laser technique; laser and mechanical compound truing and dressing; finite element simulation; parameters optimization; bronze bond

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 320.5540

1 引 言

超硬磨料砂轮具有异常优异的磨削性能,在精密和超精密磨削、难加工材料磨削、成型和高效磨削及磨削自动化中应用十分广泛。然而,在实际生产中,其优异的磨削性能并未得到充分发挥,原因在于超硬磨料的高硬度导致其修整非常困难,特别是烧结成型的超硬磨料砂轮,其表面无任何磨粒凸出、圆跳动很大且偏心严重。激光修整作为一种新型的修整技术,具有效率高、不存在修整工具磨损等优点,但是

以实时控制为基础的在线修整系统,不适合于圆跳动大的粗修整^[1~5]。为了发挥激光修整的优势,目前国内外已有部分学者将激光修整与其他修整方法结合起来进行研究,如:德国学者 Westkämper^[6]将 Nd:YAG 激光用于辅助树脂结合剂 CBN 砂轮磨削金属和陶瓷试件;美国 Purdue 大学机械工程系的 Zhang 等^[7,8]提出了用 CO₂ 激光辅助机械法修整陶瓷结合剂 CBN 砂轮,可减小金刚石修整工具的磨损和修整产生的磨削力;国内上海交通大学的王艳

收稿日期: 2012-01-12; 收到修改稿日期: 2012-03-13

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX04003101)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

等^[9]将 CO₂ 激光用于辅助机械修整金刚石砂轮,利用激光束加热砂轮表面使得金刚石修整笔修整材料从脆性断裂变为塑性流动,从而提高砂轮表面修整质量,降低金刚笔的磨损。可以看出,这些方法均是基于激光的热效应来改变材料的性质,使得材料往有利于加工的方向发展,而并不是利用激光的热效应来去除材料以达到加工要求。利用激光的热效应直接去除材料并与其他修整方法结合起来的复合修整目前尚未见报道。本文通过前期的多脉冲烧蚀青铜结合剂有限元仿真及后期的修整实验,将不加控制信号的激光修整与机械法修整有效地整合在一起,发挥各自的长处,实现了对烧结成型圆跳动非常大的青铜金刚石超硬磨料砂轮的高精度、高效率修整。

2 激光-机械复合修整原理

砂轮修整的实质即对砂轮进行深度的整形或轻度的修锐^[10,11],将激光-机械复合修整的工艺流程分为激光粗修、机械法精修及激光修锐三步,前两步先对砂轮进行整形,使砂轮达到所要求的几何形状误差,最后一步再对其进行修锐,以形成良好的地形地貌,具体如下:

1) 激光粗修:在不考虑砂轮表面地形地貌的情况下,采用一定频率的脉冲激光直接对砂轮进行圆度整形,激光功率密度范围位于青铜结合剂气化去除阈值与超硬磨粒功率密度气化去除阈值之间。采用正离焦的激光布置形式,使砂轮表面高点接受较高的激光功率密度而低点接受较低的激光功率密度辐照,那么砂轮高点的去除量大于低点的去除量,从而达到降低砂轮圆跳动的目的。

2) 机械法精修:当砂轮的圆跳动降低到一定程度时,单纯通过改变离焦量无法继续高效地降低圆跳动,采用机械法进行精修,将凸出高度不一致的磨粒去除或磨平,使砂轮表面磨粒趋于一致。

3) 激光修锐:为获得良好的砂轮表面地形地貌、节约砂轮材料及延长砂轮的使用寿命,采用低功率、低脉冲能量、高重复频率的激光对砂轮进行最后的修锐。

3 激光粗修参数选择仿真研究

3.1 仿真研究的目的

激光粗修过程中,选择合适的激光参数(激光功率密度、离焦量)是非常重要的,如果参数选择不当

将导致砂轮的有效磨料层去除太多或是修整效率太低等情况的出现。因此,为达到在砂轮有效磨料层去除尽可能少的情况下尽可能快地降低砂轮圆跳动的目的,对激光粗修参数的选取进行前期的仿真实验以及确定激光粗修所能达到的砂轮圆跳动范围是非常必要的。

3.2 多脉冲烧蚀青铜结合剂仿真的数理模型

3.2.1 传热学控制方程

简化假设多脉冲烧蚀青铜结合剂的数理模型,描述如下:

1) 激光烧蚀过程关于深度方向 z 轴旋转对称,因此可以将该模型简化为沿光轴 xoz 截面的二维模型。

2) 青铜为各向同性材料,其热物理性质不随温度变化,主要热物理性质如表 1 所示^[14]。

表 1 青铜的主要热学性质

Table 1 Thermal properties of bronze

Property	Value
Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	8620
Thermal conductivity $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	41.9
Specific heat $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	352
Thermal diffusivity $\alpha / (10^{-4} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	0.14
Vaporization temperature T_1 / K	2770
Absorptivity A (YAG laser)	0.38

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。

4) 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,故每一个脉冲加载时的初始条件一致。

5) 实验用激光为多模激光,激光功率密度平均分布在光斑半径内,激光轮廓线近似为直线,激光功率密度分布函数可描述为

$$I(z) = \frac{I_0 \omega_0^2}{\omega(z)^2}, \quad (1)$$

式中 $I(z)$ 为沿光轴方向与焦点距离为 z 处激光功率密度的大小, I_0 为聚焦透镜焦点处的激光功率密度, ω_0 为聚焦透镜焦点处的光斑半径, $\omega(z)$ 为沿光轴方向与焦点距离为 z 处的光斑半径,

$$\omega(z) = \frac{\omega_m}{(1 - z/f)}, \quad (2)$$

f 为聚焦透镜的焦距, ω_m 为聚焦透镜处激光光束的光斑半径。

基于以上假设,激光烧蚀青铜结合剂过程热传导的数学模型描述为^[12,13]

$$c(T)\rho(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad (3)$$

式中 T 为温度, $k(T)$ 为材料的热传导系数, $\rho(T)$ 为材料的密度; $c(T)$ 为材料的比热容。

3.2.2 边界条件

设模型初始温度为室温 T_0 (293 K), 由于采用半无限体传热模型, 因此 x 和 z 趋于无穷大时, 边界温度为初始温度 T_0 , 且边界处无热流量, 即: 当 $x \rightarrow \infty$ 或 $z \rightarrow \infty$, $T = T_0$, 且 $dT/dx = 0, dT/dz = 0$ 。

3.2.3 计算过程

实验用 YAG 激光器在不同抽运电流下的参数如表 2 所示, 有限元计算过程中的激光参数选取如下:

1) 对单脉冲的烧蚀凹坑深度进行仿真, 结果显示当电流 i 为 10 A 时, 激光功率密度达不到青铜气

表 2 YAG 激光的输出参数 ($f=5$ kHz, $d=0.26$ mm)

Table 2 Output parameters of YAG laser ($f=5$ kHz, $d=0.26$ mm)

i / A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
P_m / W	30.9	43.9	51.5	61.2	66	66	78	92.5	114	118.6
τ / ns	700	500	400	300	250	300	200	200	180	150
$I / (10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})$	0.166	0.331	0.485	0.769	0.985	0.829	1.470	1.743	2.387	2.978

表 3 功率密度为 $1.66 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时的激光参数及结果

Table 3 Simulation parameters and results for power density of $1.66 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$

Defocusing amount / mm	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
Dent depth / μm	172.4	141.4	112.8	86	58.6	31.4	0

化去除阈值。而当电流大于 14 A 时, 随着脉冲宽度的减小, 结合剂的单脉冲烧蚀凹坑深度并不会随着激光功率密度的增加而增加。因此, 该仿真实验所取的激光功率密度为激光电源电流调至 11、12、13、14、15 A 所对应的激光功率密度值, 表 3 为其中一组参数及仿真结果。

2) 激光离焦量变化从 $0 \mu\text{m}$ 开始, 以 $100 \mu\text{m}$ 的步长向正离焦递增, 离焦量的增加使功率密度降低。离焦量一直增加到无法实现青铜气化去除、烧蚀凹坑深度为 0 为止。

3) 单步加载激光热源的时间步长为实验用 YAG 激光器对应功率密度下的脉冲宽度, 每个参数都计算出 100 个脉冲的结果。

瞬态有限元热分析的模拟仿真计算流程如图 1 所示。

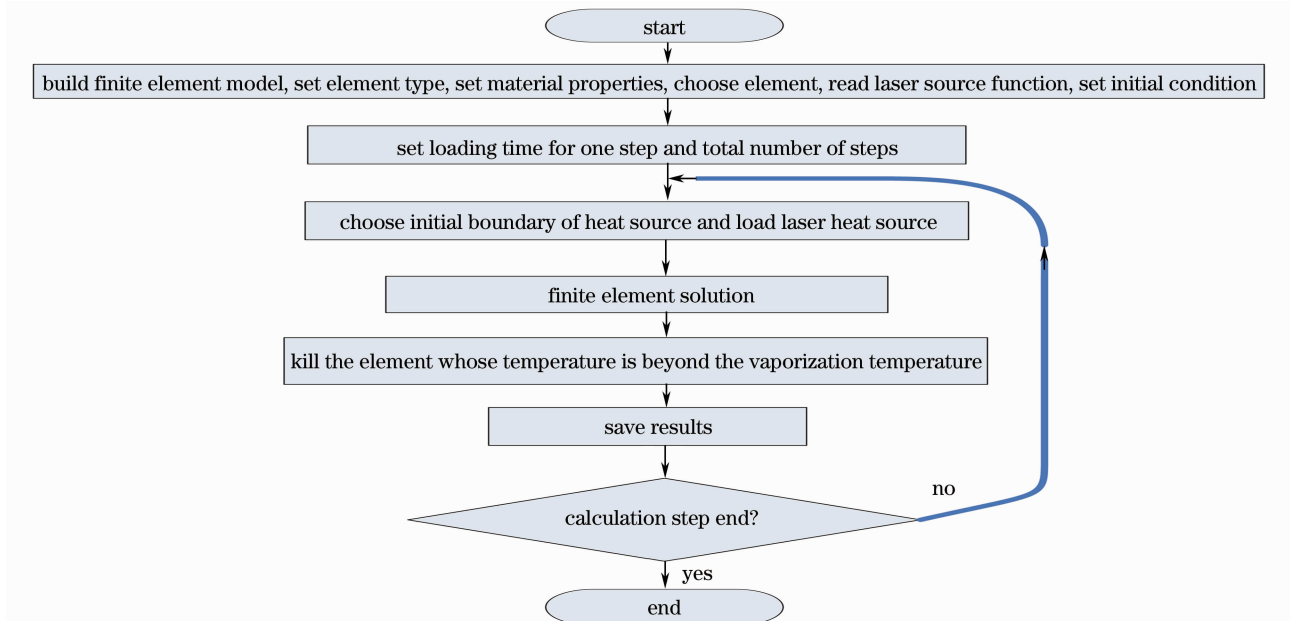


图 1 模拟计算流程图

Fig. 1 Simulation flow chart

3.3 仿真结果与分析

3.3.1 变量的定义

1) 圆跳动减少量: 离焦量的差值与圆跳动大小相等时的两烧蚀凹坑深度之差, 即为在 100 个脉冲作用下, 砂轮圆跳动的减少量。

2) 低点去除量: 两烧蚀凹坑中离焦量较大的激光所烧蚀的凹坑深度。

3) 离焦量: 激光焦点位置与砂轮圆跳动最高点之间的距离。

3.3.2 仿真结果

图 2 为砂轮圆跳动为 100、200、300、400 μm 时, 通过改变激光参数对砂轮进行粗修整, 在不同激光功率密度 I_0 时 100 个脉冲作用后砂轮的低点去除量。由图可知, 离焦量相同时, 随着激光功率密度

的增加, 低点去除量逐渐增加; 功率密度相同时, 随着离焦量的增加, 低点去除量逐渐减少。图 3 为与图 2 同样的实验中得到的 100 个脉冲作用后的砂轮圆跳动减少量。由图可知, 功率密度相同时, 随着离焦量的增大, 砂轮的圆跳动减少量逐渐减少; 离焦量相同时, 随着功率密度的降低, 砂轮的圆跳动减少量逐渐增加。因此, 结合图 2、图 3 的仿真结果分析, 为了能够达到快速减少圆跳动且尽可能去除低点的目的, 对于本实验用的激光器, 应当选用低平均功率的激光, 粗修时将电流调至 11 A 左右, 对应的功率密度为 $1.66 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。但考虑到修整过程中由于等离子体等因素的影响导致的功率损失, 因此实际修整过程可以将电流调至略大于 11 A。

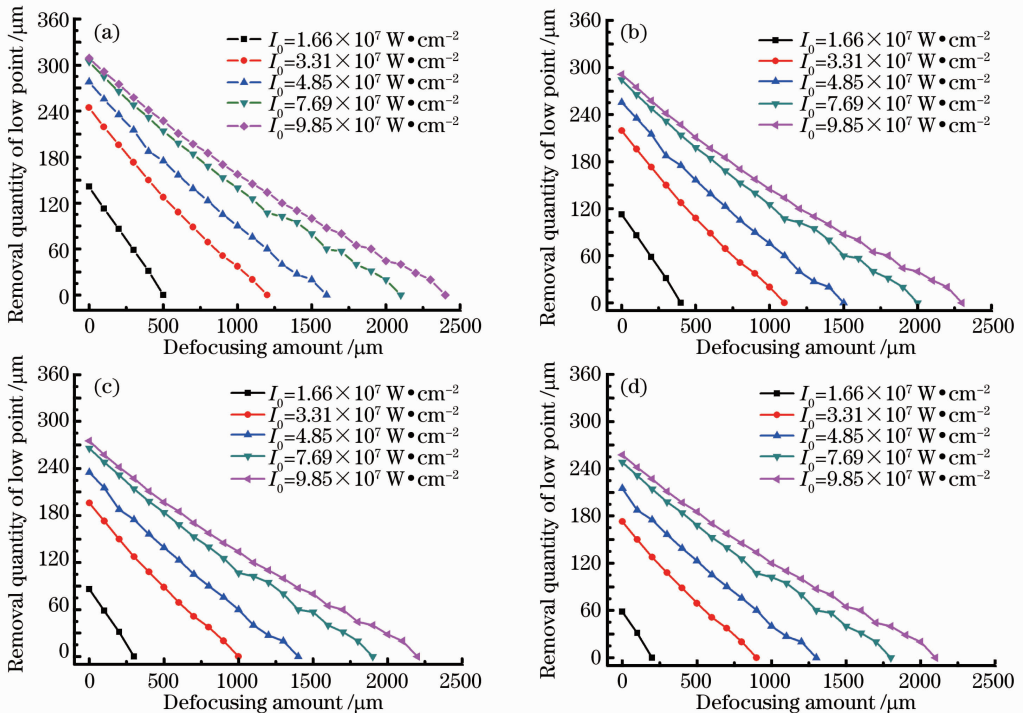


图 2 低点去除量。(a)圆跳动为 100 μm ; (b)圆跳动为 200 μm ; (c)圆跳动为 300 μm ; (d)圆跳动为 400 μm
 Fig. 2 Removal quantity of low point. (a) Circular runout is 100 μm ; (b) circular runout is 200 μm ;
 (c) circular runout is 300 μm ; (d) circular runout is 400 μm

由图 2、图 3 中功率密度为 $1.66 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 所对应的曲线变化进行分析可知, 当砂轮的圆跳动分别为 400、300、200 μm 左右时, 经 100 个脉冲作用后, 砂轮在低点去除低于 30 μm 的情况下, 砂轮圆跳动分别减少了 112、85、60 μm 左右; 而当砂轮的圆跳动为 100 μm 左右时, 经 100 个脉冲作用后, 砂轮在低点去除低于 30 μm 的情况下, 砂轮圆跳动只减少了 30 μm 。根据以上的仿真结果, 考虑到激

光的不稳定性、没有明确的刀尖、传热过程中边界条件的复杂性等各方面原因, 且随着砂轮圆跳动的进一步减小, 在同样数量的脉冲作用下, 砂轮低点在去除更多的情况下圆跳动减少得更少。因此, 激光粗修过程中, 砂轮圆跳动所能达到的参考值定于 100~150 μm 之间, 即当砂轮圆跳动减少至这个范围时, 停止激光粗修, 进入下一道工序。

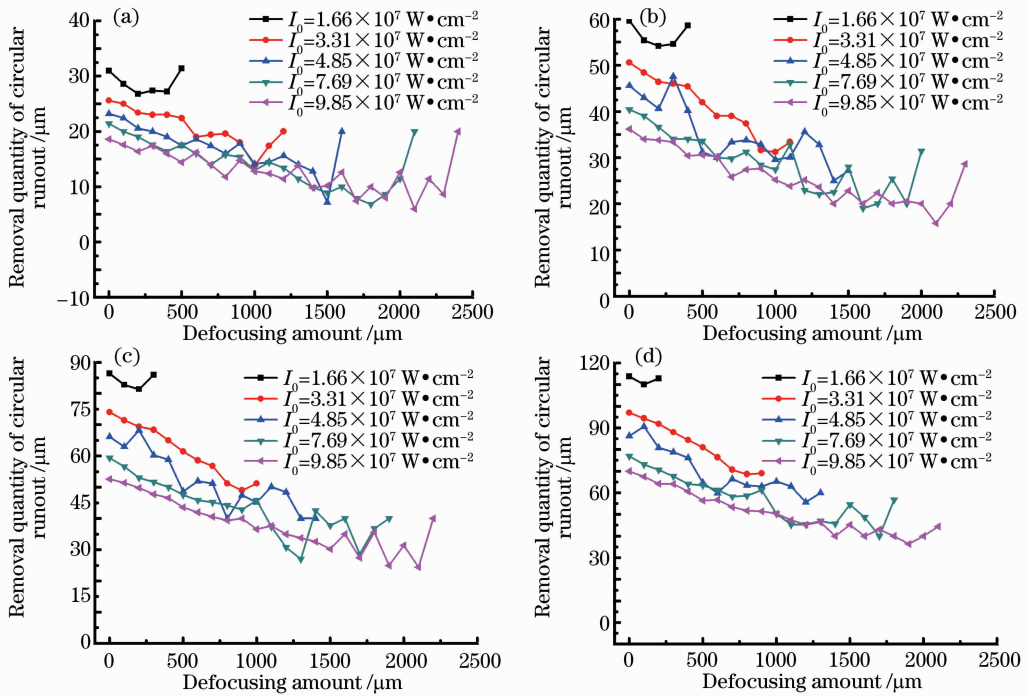


图3 圆跳动减少量。(a)圆跳动为100 μm;(b)圆跳动为200 μm;(c)圆跳动为300 μm;(d)圆跳动为400 μm
Fig. 3 Removal quantity of circular runout. (a) Circular runout is 100 μm; (b) circular runout is 200 μm; (c) circular runout is 300 μm; (d) circular runout is 400 μm

4 青铜金刚石砂轮激光-机械复合修整实验

4.1 修整实验步骤

1) 激光粗修:根据之前的仿真结果,采用如表4所示修整参数,对砂轮进行粗修整直至砂轮的圆跳动减少到100~150 μm范围内时,停止激光粗修,进入下一道工序。

2) SiC滚轮机械法精修:将SiC滚轮修整器固定于磨床磁力座上, SiC滚轮与砂轮相向转动,线速

度比为1:10。修整一段后,测量砂轮的圆跳动。

3) 激光精修:采用较低功率、低脉冲能量、高重复频率激光进行修锐,功率参数如表5所示。激光精修结束后,测量砂轮的圆跳动并观察砂轮的表面形貌。

4) 测量修整后的青铜金刚石砂轮的圆跳动并观察其表面形貌,并对只经过单一机械法修整与经过激光-机械复合修整的实验结果进行对比分析。

表4 激光粗修参数

Table 4 Parameters of laser rough trimming

Circular runout / μm	Defocusing amount / mm	Current / A	Frequency / kHz	Revolving speed / (r/min)	Load / (mm/r)
400	0.2	11.5	5	500	0.4
300	0.3	11.5	5	500	0.4
200	0.4	11.5	5	500	0.4
150	0.5	11.5	5	500	0.4

表5 激光修锐功率参数

Table 5 Power parameters of laser dressing

Current / A	Frequency / kHz	Defocusing amount / mm	Revolving speed / (r/min)	Load / (mm/r)
11	6	0	500	0.4

4.2 实验结果分析

图4为烧结成型的青铜金刚石砂轮的表面形貌。经激光三角位移测量仪测得烧结成型的青铜金

刚石砂轮圆跳动接近450 μm,且偏心十分严重,砂轮表面非常不平整且无任何磨粒突出。若采用机械法直接进行修整,将会对修整工具造成极大的磨损

且修整效率将会很低。

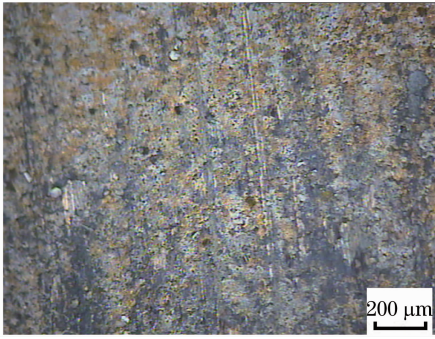


图 4 烧结成型的青铜金刚石砂轮表面形貌
Fig. 4 Surface of grinding wheel without truing and dressing

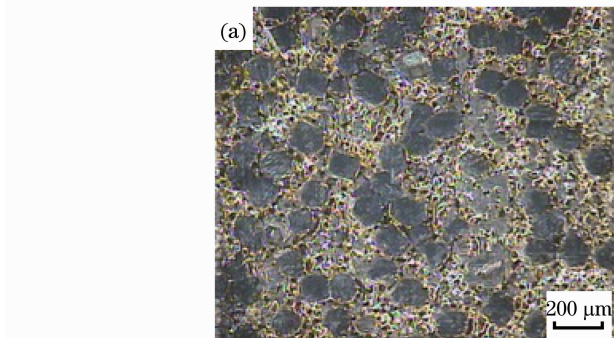


图 5(a),(b)分别为经激光-机械复合修整后和经金刚石滚轮修整后砂轮的表面形貌,结合修整后所测的砂轮表面圆跳动可知:

1) 经激光-机械复合修整后砂轮的圆跳动达到了 $30\ \mu\text{m}$, 偏心基本被去除, 而经金刚石滚轮修整后砂轮的圆跳动还有约 $100\ \mu\text{m}$, 且仍存在较大的偏心。砂轮的表面跳动和偏心量过大将严重影响砂轮的磨削效率和使用寿命。

2) 经激光-机械法复合修整后的砂轮表面结合剂凹凸不平, 且有很多小孔, 而完全用金刚石滚轮修整的砂轮表面结合剂非常平整。凹凸不平的结合剂表面和小孔将使砂轮在磨削时有更多的容屑空间和储存磨削液的空间, 这有助于砂轮长时间保持锋利。

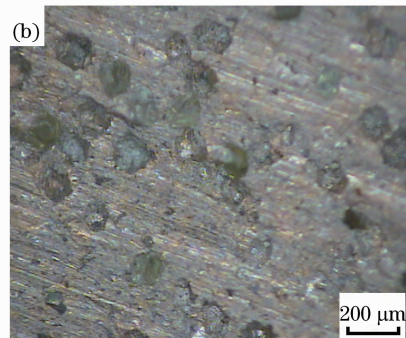


图 5 砂轮表面形貌。(a)激光-机械复合修整;(b)金刚石滚轮修整

Fig. 5 Surface of grinding wheel. (a) Laser and mechanical compound truing and dressing; (b) mechanical truing and dressing

经过一段激光粗修后砂轮的圆跳动从 $450\ \mu\text{m}$ 下降到 $120\ \mu\text{m}$, 因此可以看出, 选择合适的激光参数(激光功率密度、离焦量)后, 激光粗修能实现快速的整形。继续激光粗修一段时间后砂轮的圆跳动仍有 $110\ \mu\text{m}$ 左右, 减少量很小, 原因在于: $100\ \mu\text{m}$ 的离焦量所产生的功率密度变化不大, 高点和低点的烧蚀去除量差别并不大, 而考虑到激光的不稳定性以及没有明确的刀尖、传热过程中边界条件的复杂性等各方面原因, 继续修整下去, 砂轮圆跳动的减小将会越来越慢, 最终趋向于在砂轮表面均匀地去掉一层, 不能实现快速减小高点与低点高度差的目的, 失去了进一步修整的意义。因此, 将激光粗修所能达到的圆跳动参考值定于 $100\sim 150\ \mu\text{m}$ 之间比较合适, 此范围与仿真分析结果一致。

(离焦量、功率密度), 得到了激光粗修整时砂轮所能达到的合适的圆跳动范围为 $100\sim 150\ \mu\text{m}$ 。仿真实验所确定的激光粗修所能达到的圆跳动范围符合实际的修整过程。在此基础上采用 SiC 滚轮修整, 砂轮圆跳动从 $110\ \mu\text{m}$ 下降到了 $30\ \mu\text{m}$, 进一步提高了修整精度。

参 考 文 献

- 1 Kang Renke, Yuan Jingting, Shi Xingquan *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 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
- 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**(s1): 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**(s1): 245~249
- 4 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 Journal of Mechanical Engineering*,

5 结 论

激光-机械复合修整法是一种有效的修整方法。通过对青铜结合剂的多脉冲仿真实验, 确定了在本修整实验条件下激光粗修工艺过程中的激光参数

- 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
- 5 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
- 6 E. Westkämper. Grinding assisted by Nd:YAG laser[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1995, **44**(1): 317~320
- 7 C. Zhang, Y. C. Shin. A novel laser-assisted truing and dressing technique for vitrified CBN wheels[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, **42**(7): 825~835
- 8 C. Zhang, Y. C. Shin. Wear of diamond dresser in laser assisted truing and dressing of vitrified CBN wheels[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, **43**(1): 41~49
- 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 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
- 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
- 11 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
- 12 Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer[M]. 4th edition. Beijing: Higher 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
- 13 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[J]. 中国激光, 2011, **38**(7): 0703002
- 14 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

栏目编辑: 宋梅梅