

脉冲激光切向整形径向修锐青铜金刚石砂轮

邓 辉^{1,2} 陈根余^{1,2} 周 聪^{1,2} 周兴才^{1,2}

(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 对脉冲光纤激光切向整形和径向修锐青铜结合剂金刚石砂轮技术进行了理论分析和试验研究。理论分析了激光切向整形和径向修锐青铜结合剂金刚石砂轮的机理, 总结提出了决定脉冲激光修整效果的 4 个关键工艺参数: 激光功率密度、激光光斑重叠率、激光扫描轨迹线重叠率及激光循环扫描次数。试验研究了这 4 个工艺参数对修整后砂轮表面磨粒石墨化变质层、磨粒磨削刃锋利程度、结合剂表面平整度及磨粒出刃高度的影响规律, 并分别找到了在本试验条件下的理想值。

关键词 光学制造; 激光整形; 激光修锐; 青铜结合剂金刚石砂轮; 地形地貌

中图分类号 TG74+3 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.1103003

Pulsed Laser Tangential Profiling and Radial Sharpening of Bronze-Bonded Diamond Grinding Wheels

Deng Hui^{1,2} Chen Genyu^{1,2} Zhou Cong^{1,2} Zhou Xingcai^{1,2}

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

Abstract The technique of pulsed fiber-laser tangential profiling and radial sharpening of bronze-bonded diamond grinding wheels is studied theoretically and experimentally. The mechanisms for laser tangential profiling and radial sharpening of bronze-bonded diamond wheels are theoretically analyzed, and the four key processing parameters that determine the results of laser truing and dressing, including laser power density, overlap ratio of laser spot, laser scanning track line overlap ratio, and number of laser scanning cycles, are summarized and proposed. Furthermore, the effects of these four key parameters on graphitization-damaged layer of grains, sharpness of cutting edge grains, surface smoothness of bond, and mean protrusion height of the diamond grains after laser processing are experimentally studied. The ideal values of the laser power density, overlap ratio of laser spot overlap ratio, laser scanning track line, and number of laser scanning cycles are found under current experimental conditions.

Key words optical fabrication; laser profiling; laser sharpening; bronze-bonded diamond grinding wheel; topography

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 320.5540

1 引言

超硬磨料砂轮具有优良的磨削性能, 抗磨损能力强, 不需要经常修整, 但在初始安装或使用磨钝后的修整却比较困难^[1]。尤其是近年来, 超硬材料在

生产工程和科学技术领域的使用日益广泛, 使得超硬磨料砂轮的应用也急剧增加, 砂轮的修整问题因此而变得日益重要。针对超硬磨料砂轮修整难的问题, 各国学者不仅对传统机械修整法进行了改进, 而

收稿日期: 2014-05-07; 收到修改稿日期: 2014-06-09
基金项目: 国家重大科技专项(2012ZX04003101)
作者简介: 邓 辉(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事激光微细加工技术方面的研究。E-mail: denghnu@163.com
导师简介: 陈根余(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光制造及激光微细加工等方面的研究。
E-mail: hdgychen@163.com(通信联系人)
本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

且还通过大量探索性试验提出了一些新的特种修整方法,如电火花修整法和激光修整法等。虽然这些特种加工方法目前已经取得了一定的效果和应用,但在使用过程中仍然存在一些问题和局限性:电火花修整法目前只适用于金属基细粒度砂轮,且不能直接去除砂轮磨粒,另外还需要专门的高频率、高精度的电源装置和高导电、高散热、低损耗的电极材料,因此设备成本较高;激光修整法最早是由 Babu 等^[2-3]率先提出来的,作为一种非接触式的修整方法,它完全避免了“硬碰硬”接触和磨具损耗,且可同时去除磨粒和结合剂材料,因此是一种极具发展潜力和广阔应用前景的先进修整技术。

历经二十余年的发展,国内外已有百余篇文献对超硬磨料砂轮激光修整技术进行了报道,目前当属湖南大学激光研究所、苏黎世联邦理工学院和汉诺威激光加工中心等单位的研究工作较具代表性。陈根余等^[4-5]开展了声光调 Q Nd:YAG 激光在线径向修整超硬磨料砂轮的试验,研究了激光平均功率、脉冲重复频率、脉冲宽度和离焦量等工艺参数对修整后的砂轮表面地形地貌、砂轮磨削工件时磨削力的影响规律。Walter 等^[6-7]对脉冲光纤激光切向整形金属和陶瓷复合结合剂 CBN 成型磨具进行了研究,总结了激光平均功率、脉冲重叠率和线重叠率等工艺参数对整形时砂轮材料去除效率的影响规律。Dold 等^[8-9]采用皮秒级 Yb:YAG 脉冲激光进行了单层电镀金刚石砂轮的切向整形试验,对单脉冲能量、脉冲重复频率和激光束扫描速度等工艺参数进行了优化。Witzendorff 等^[10-11]开展了纳秒和皮秒级脉冲激光径向修锐金属结合剂金刚石刀片的

试验,分析了激光波长、激光能量密度和脉冲宽度等工艺参数对修锐后刀片表面磨粒出刃高度的影响。从国内外的研究情况来看,目前仅是从各自的角度研究单一或某几个工艺参数对脉冲激光切向整形或径向修锐效果的影响,而没有总结影响脉冲激光修整效果的关键工艺参数及其相互之间的联系,因此目前的研究结论存在一定的片面性和主观性。此外,在修整过程中因脉冲激光烧蚀热效应而产生的磨粒石墨化变质层、因激光束没有明确“刀尖”导致径向修整后砂轮的轮廓精度较低等关键性问题仍然没有得到很好的解决,这已经成为阻碍激光修整技术走向实用化进程的瓶颈问题。

本文从脉冲激光切向整形和径向修锐的原理出发,总结了决定激光修整效果的关键工艺参数;以青铜结合剂金刚石砂轮为对象,先后开展了脉冲光纤激光切向整形和径向修锐试验,并采用超景深三维显微镜和 CCD 激光位移传感器分别对修整后砂轮的表面地形地貌和表面圆跳动进行测量;研究了关键工艺参数对激光修整砂轮的质量、精度、效率的影响规律,并分别找到了它们在试验条件下的最佳值。

2 激光修整参数定义

修整的实质就是对砂轮进行整形和修锐。对于普通磨料砂轮来说,整形和修锐可以同时进行,但对于超硬磨料砂轮,尤其是金属基超硬磨料砂轮,整形和修锐一般分为两个过程先后进行^[12]。图 1 为脉冲激光切向整形和径向修锐青铜结合剂金刚石砂轮的原理图。

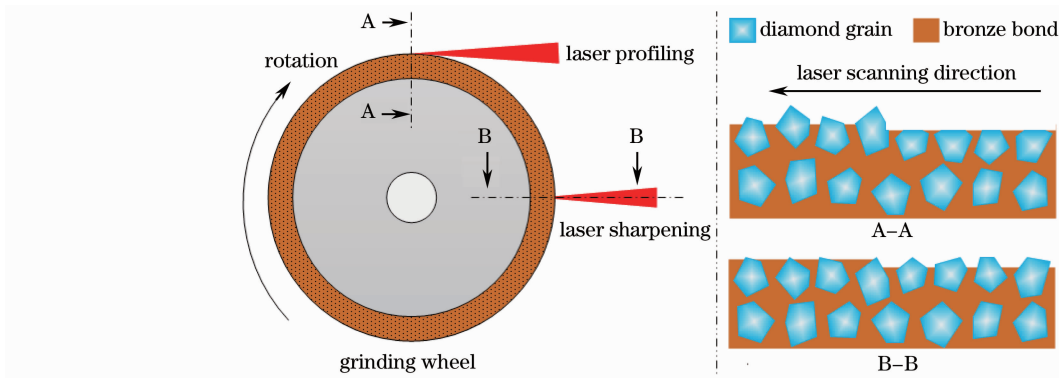


图 1 脉冲激光修整原理图

Fig. 1 Schematic of pulsed laser dressing

激光切向整形是将聚焦脉冲激光束沿着砂轮工作表面的切向方向入射,然后使砂轮向上移动合适的距离 a_r (即激光束的切削深度),通过采用多轴联

动数控系统精密控制激光束,使其沿砂轮轮廓母线循环扫描,将与激光束发生干涉的砂轮偏心部分的金

直到激光烧蚀效率较低时,即说明此时大部分的激光能量已穿过砂轮表面而未与砂轮材料发生接触,这时再将砂轮向上移动同样的距离 a_r 继续切向整形,如此周而复始一段时间,直至使砂轮达到所需的轮廓精度。可以看到,激光切向整形的实质就是采用激光切削加工方法,将砂轮偏心部分的多余材料逐层加热、气化去除,最后形成高精度、高质量的砂轮圆周表面。与传统刀具的切削加工过程完全不同,激光切削时既不存在切削力和刀具磨损,也不存在与切削力和刀具磨损有关的误差。但是在切削过程中,若激光功率密度过高,则会在砂轮表面形成较厚的变质层,影响砂轮的磨削性能;而若激光功率密度太低,激光束则无法对金刚石磨粒进行切削去除。因此,激光切向整形后砂轮的轮廓精度和磨削性能主要就取决于激光功率密度 I_p 这个关键工艺参数,而激光束扫描速度 v 、砂轮转速 n 、切削深度 a_r 等参数对整形精度和磨削性能的影响较小,但是对激光整形的效率有一定的影响。

激光径向修锐是利用聚焦脉冲激光束沿砂轮径向方向辐照砂轮工作表面,通过采用多轴联动数控系统精密控制激光束,使其沿砂轮轮廓母线循环扫描,将整个砂轮表面金刚石磨粒周围的青铜结合剂均匀烧蚀去除,而对磨粒不造成热损伤(图 1 中 B-B),直到使磨粒突出于结合剂之外合适的高度,形成锋利的磨削刃。激光径向修锐过程可以看作是将沿砂轮轮廓母线循环扫描的连续激光脉冲,离散地辐照于匀速旋转的砂轮表面,利用脉冲激光烧蚀的热力学效应将砂轮材料进行选择性微量去除,最后在砂轮表面形成大量呈圆柱螺旋线状排列的微米级激光烧蚀凹坑。对于同一型号的激光器而言,脉冲激光修锐最终所能获得的砂轮表面地形地貌,就取决于这些凹坑的微观形貌和分布规律及激光烧蚀去除深度值的合适与否,而激光功率密度 I_p 、激光光斑重叠率 U_p (位于同一条激光扫描轨迹上的两个相

邻激光光斑的重叠率)、激光扫描轨迹线重叠率 U_D (位于砂轮圆周表面上两条相邻激光扫描轨迹的重叠率)、激光循环扫描次数 N 又是决定砂轮圆周表面上烧蚀凹坑微观形貌和分布规律及激光烧蚀去除深度值的 4 个关键工艺参数,前三者可分别表示为

$$I_p = \frac{4P_{avg}}{\pi d^2 f \tau}, \tag{1}$$

$$U_p = \frac{df - \pi D n}{df} \times 100\%, \tag{2}$$

$$U_D = \frac{dn - v}{dn} \times 100\%, \tag{3}$$

式中 P_{avg} 为脉冲激光平均功率, π 为圆周率, d 为位于砂轮表面的光斑直径, f 为脉冲重复频率, τ 为脉冲宽度, D 为砂轮外径。

3 试验条件和方法

3.1 试验设备和材料

图 2 为脉冲激光切向整形和径向修锐青铜结合剂金刚石砂轮的装置示意图。激光器采用紧凑型脉冲掺镱光纤激光器(YLP-1/120/50/50-HC),其平均功率 $P_{avg} = 5 \sim 50 \text{ W}$,脉冲重复频率 $f = 50 \sim 150 \text{ kHz}$,脉冲宽度 $\tau = 210 \text{ ns}$,波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$,输出激光能量近似呈现高斯分布。激光束由单模光纤传输到固定在二维电动位移平台(7STA01A)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 的双凸透镜聚焦后入射到砂轮表面,离焦量 Δ 为 2 mm,位于砂轮表面的光斑直径 d 约为 $64 \mu\text{m}$ 。激光修整时,将青铜结合剂金刚石砂轮安装在精密平面磨床(MGS-250AH)的主轴上,磨床主轴转速可通过其控制面板精确调节,砂轮的规格参数如表 1 所示。在试验过程中,采用内径为 4 mm 的喷嘴辅助侧吹空气,气体压强为 0.1 MPa,以便去除激光烧蚀区域的结合剂熔融物,同时达到冷却烧蚀区域的目的,从而尽可能减少砂轮表层金刚石磨粒变质层的产生。

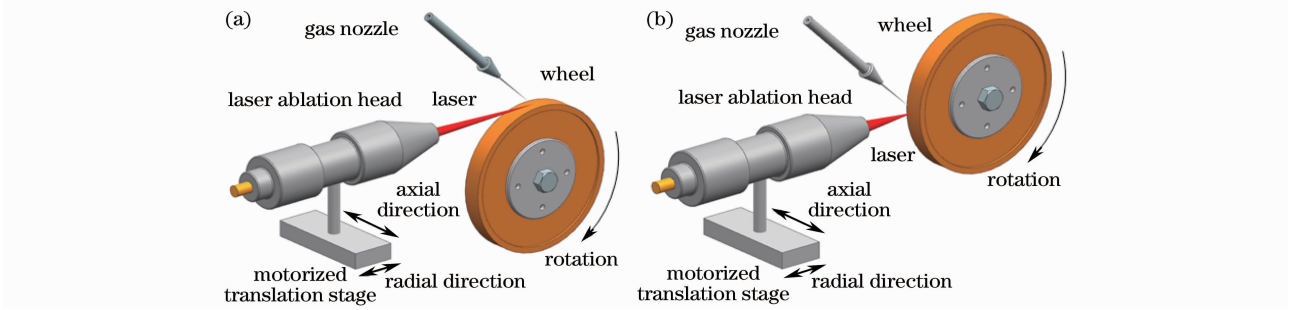


图 2 (a) 激光切向整形和(b)径向修锐装置示意图
Fig. 2 Schematic of apparatus used for (a) laser tangential profiling and (b) laser radial sharpening

表 1 青铜结合剂金刚石砂轮规格参数
Table 1 Specifications of bronze-bonded diamond grinding wheels

Model	Diameter	Width	Grain size	Abrasive thickness
100D×10T×5X×31.75H	100 mm	10 mm	120 μm	5 mm

3.2 试验方法

整个试验分为两个阶段依次开展。第一阶段进行的是脉冲激光切向整形青铜结合剂金刚石砂轮的试验,试验参数如表 2 所示,借助超景深三维显微镜(VHX-S1000)和高速、高精度 CCD 激光位移传感器(LK-G80)对整形后砂轮的表面微观形貌和圆跳动误差进行检测,确定在本试验条件下的最佳整形工艺参数。以整形好的青铜结合剂金刚石砂轮为对象,采用表 3 中的工艺参数开展第二阶段的脉冲激光径向修锐试验,采用超景深三维显微镜对修锐后砂轮表面的金刚石磨粒石墨变质层、磨粒出刃高度、磨粒磨削刃锋利程度和结合剂表面平整度等进行观测,确定本试验的最佳修锐工艺参数。

表 2 激光切向整形试验参数
Table 2 Experimental parameters of laser tangential profiling

Pulse frequency f	50 kHz
Average laser power P_{avg}	20~50 W
Wheel revolution n	300 r/min
Laser scanning speed v	115 μm/s
Cutting depth a_r	50 μm

表 3 激光径向修锐试验参数
Table 3 Experimental parameters of laser radial sharpening

Pulse frequency f	70 kHz
Average laser power P_{avg}	5~30 W
Laser spot overlap ratio U_p	10%~70%
Track line overlap ratio U_D	10%~70%
Number of scanning cycles N	5~25

4 结果和讨论

4.1 整形试验

在脉冲激光切向整形青铜结合剂金刚石砂轮过程中,激光功率密度 I_p 是最重要的工艺参数,它与整形后砂轮的轮廓精度和磨削性能密切相关,其值的确定原则应该是在保证磨粒和结合剂能够被高效切削去除的同时,还要尽可能避免整形后金刚石磨粒表面形成过厚的石墨化变质层。由(1)式可知,激光功率密度 I_p 与激光平均功率 P_{avg} 、光斑直径 d 、脉冲重复频率 f 及脉冲宽度 τ 这 4 个参数有关,但由

于在本试验条件下后三个参数都为定值,因此激光功率密度 I_p 由激光平均功率 P_{avg} 唯一确定。

图 3 为采用不同激光平均功率 P_{avg} 进行约 10 min 的脉冲激光切向整形后,青铜结合剂金刚石砂轮的表面微观形貌图。在图 3(a)中,当激光平均功率 P_{avg} 为 20 W 时,经激光切削后砂轮表面的绝大多数金刚石磨粒均突出于青铜结合剂之外,因此没有达到整形的目的。这是因为此时激光平均功率较低,使得烧蚀区域的激光功率密度值仅达到青铜结合剂的去除阈值,而低于金刚石磨粒的去除阈值,因此在切向整形过程中,激光束不断切削去除砂轮表面的结合剂材料,而不能对磨粒造成损伤,最终导致金刚石磨粒从结合剂表面裸露出来。在图 3(b)中,当激光平均功率 P_{avg} 达到 30 W 时,金刚石磨粒表面已经可以看到较为明显的激光切削痕迹,但是仍有部分磨粒因被切削去除量不够而突出于结合剂之外,这是因为此时的激光功率密度刚好接近金刚石磨粒的去除阈值,因此只能微量切削去除金刚石磨粒,但切削去除结合剂材料的效率较高,从而造成磨粒和结合剂表面的高度差异,因此整形精度较差。当激光平均功率进一步增大甚至超过 40 W(对应激光功率密度 $I_p \geq 1.2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$)后,如图 3(c)和(d)所示,可以观察到砂轮偏心部分多余的金刚石磨粒和青铜结合剂已经被激光束完全削平,磨粒和结合剂几乎处于同一高度平面,砂轮表面较为平整,因此整形精度比较理想。但也可发现,经激光切削后,金刚石磨粒表面逐渐失去光泽,并出现黑色表皮,且随着激光平均功率的增大,磨粒表面的颜色加深。这是因为金刚石在空气中的热稳定性较差(热稳定温度小于 1000 ℃),过高的激光功率密度(大于 10^8 W/cm^2)使激光束切削区域温度过高,导致金刚石磨粒的石墨化和氧化程度加剧所引起的,其变化过程可表示为 $\text{C}_{\text{金刚石}} + \text{O}_2 \rightarrow \text{C}_{\text{石墨}} + \text{CO} + \text{CO}_2$,这对激光整形后砂轮表面磨粒的磨削性能有较大影响。因此,在本试验条件下,选择功率 P_{avg} 为 40 W 的脉冲激光进行切向整形青铜结合剂金刚石砂轮较为合适。

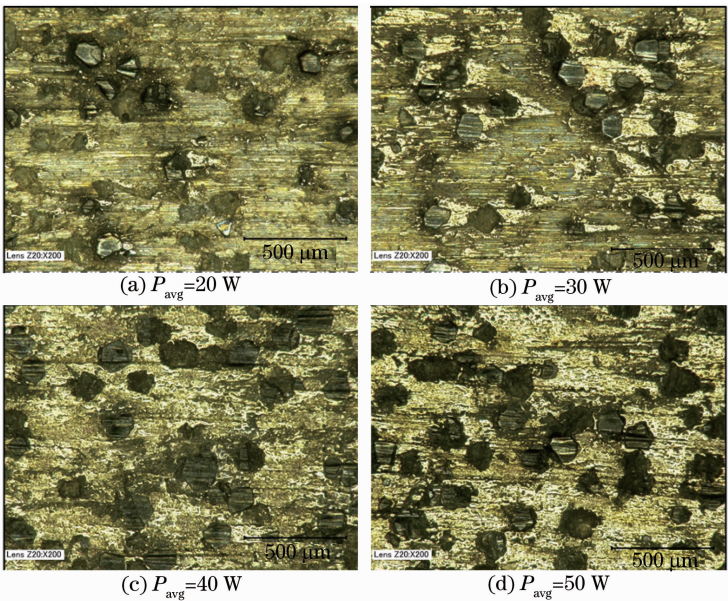


图 3 激光切向整形后砂轮表面微观形貌图

Fig. 3 Surface topographies of the grinding wheel after laser tangential profiling

在开始正式的激光切向整形试验之前，先分别通过超景深三维(3D)显微镜和 CCD 激光位移传感器对磨钝的青铜结合剂金刚石砂轮的初始表面形貌和圆跳动误差进行观测，结果如图 4(a)和(b)所示。从图 4(a)可以发现，砂轮表面分布有很多磨粒脱落后形成的凹坑，少许残留的金刚石磨粒的出刃高度值也较小。由图 4(b)可知，砂轮的初始圆跳动误差达到了 160 μm，这主要是由于磨粒和结合剂分布不均匀导致砂轮存在较大偏心量所引起的。图 4(c)和(d)分别为采用功率 P_{avg} 为 40 W 的脉冲激光进

行切向整形后，青铜结合剂金刚石砂轮表面的微观形貌图和砂轮轴向三个不同截面位置处的圆跳动曲线图。从图 4(c)可以看到，砂轮偏心部分多余的金 刚石磨粒和青铜结合剂已经被激光束完全削平，砂轮表面较为平整。从图 4(d)可以发现，砂轮的圆跳动误差分别为 15.2、14.7、14.9 μm，砂轮的圆跳动误差和圆柱度误差均已经变得较小，这说明经激光整形后的青铜结合剂金刚石砂轮的轮廓精度较高，基本可以满足粗粒度砂轮的使用要求。

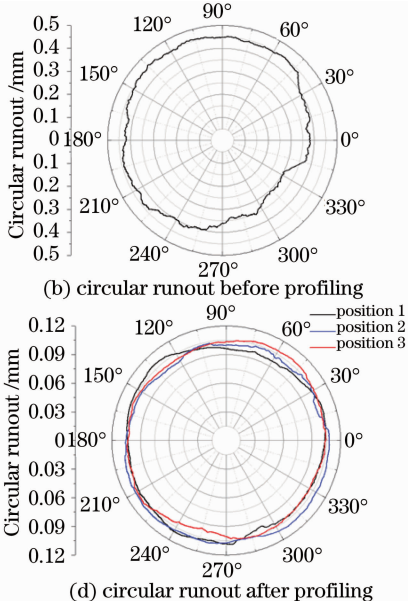
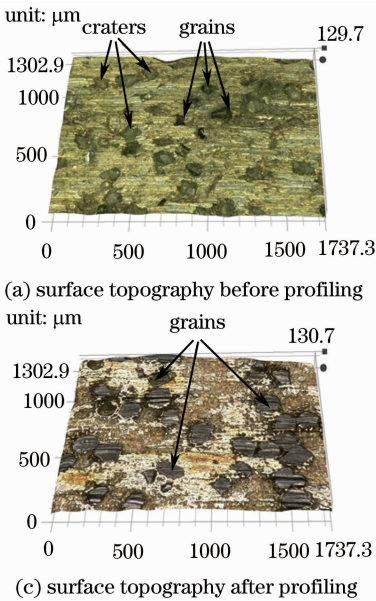


图 4 整形前后砂轮表面三维微观形貌和圆跳动曲线图

Fig. 4 3D surface topographies and circular runout curves of the grinding wheel before and after profiling

4.2 修锐试验

4.2.1 激光功率密度对修锐效果的影响

在脉冲激光修锐青铜结合剂金刚石砂轮过程中,激光功率密度 I_p 是一个至关重要的加工参数,它不仅决定了青铜结合剂的去除效率,而且还与磨粒磨削刃锋利程度和磨粒石墨化程度相关,其值的确定原则应该是在保证较高结合剂去除效率的同时,还要使得金刚石磨粒表面发生微细破碎,形成锋利的磨削刃,并且能够尽可能地降低修锐后砂轮表面磨粒的石墨化程度。

图 5 为在不同激光平均功率 P_{avg} 条件下,脉冲激光修锐后青铜结合剂金刚石砂轮表面的地形地貌图。在图 5(a)中,激光平均功率 P_{avg} 为 5 W,对应的激光功率密度 I_p 约为 $1.06 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$,修锐后的砂轮表面仅有极少量的青铜结合剂被气化去除,且金刚石磨粒没有被破碎去除,因此磨粒出刃高度很小,也没有锋利的磨削刃形成。在图 5(b)中,当激光平均功率 P_{avg} 为 10 W 时,对应的激光功率密度 I_p 约为 $2.12 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$,经激光修锐后,砂轮表面

的青铜结合剂被有效去除,金刚石磨粒逐渐突出于结合剂表面;同时也可发现,激光辐照后的金刚石磨粒表面出现了规则排列的微小烧蚀凹坑,即磨粒表面开始产生微小破碎,逐渐形成了不同方向的磨削微刃。在图 5(c)中,当激光平均功率 P_{avg} 增大至 15 W 时,对应的激光功率密度 I_p 达到 $3.17 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$,经激光修锐后,砂轮表面青铜结合剂的去除深度增加,金刚石磨粒的突出效果更为明显,同时磨粒表面的烧蚀凹坑尺寸增大,形成的磨削刃更为锋利,激光修整后的砂轮具备了一定的磨削性能。如图 5(d)和(f)所示,随着激光平均功率 P_{avg} 在 20~30 W ($4.23 \times 10^7 \text{ W/cm}^2 \leq I_p \leq 6.34 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$) 范围内逐步增大,激光修锐后砂轮表面青铜结合剂的去除深度进一步增加,因此金刚石磨粒的出刃高度值也同步增加,但同时由于激光功率密度 I_p 的增大,使得磨粒表面烧蚀凹坑的尺寸(深度和口径)不断增大,排列分布趋于紧密,最终导致金刚石磨粒的整个表层被激光烧蚀去除,没有锋利的磨削刃形

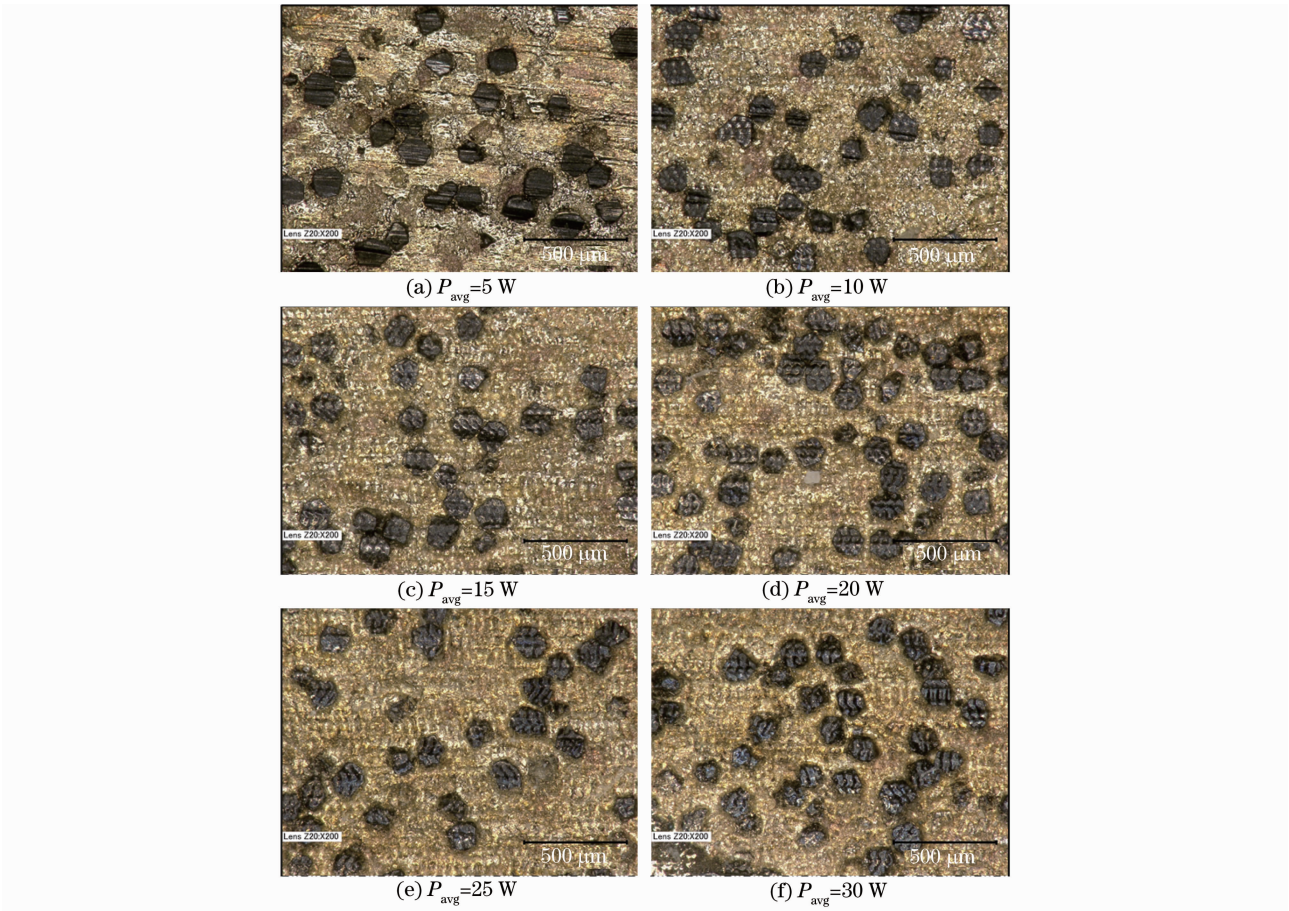


图 5 不同激光平均功率条件下激光修锐后砂轮表面地形地貌图

Fig. 5 Surface topographies of the grinding wheel after laser sharpening with different average powers

成[图 5(f)],因此修锐后金刚石磨粒的磨削性能较差。此外,金刚石磨粒表面的颜色也随着激光平均功率的增加而逐渐加深,并有部分磨粒开始出现蓝色表皮,这是由于过高的激光功率密度,导致金刚石磨粒石墨化和氧化反应加剧所导致的,这也使得激光修锐后的砂轮磨削性能进一步恶化。综上所述,当激光平均功率 P_{avg} 为 15 W 时,脉冲激光修锐后可以获得地形地貌较为良好的青铜结合剂金刚石砂轮工作表面。

4.2.2 重叠率对修锐效果的影响

在脉冲激光修锐青铜结合剂金刚石砂轮过程中,激光输出的是一连串激光脉冲序列,为了使修锐后砂轮的结合剂表面较为平整、磨粒磨削刃较为锋利和磨粒石墨化程度较低,就必须选择合适的激光光斑重叠率 U_P 和激光扫描轨迹线重叠率 U_D ,使得激光脉冲产生的烧蚀凹坑均匀地覆盖在整个砂轮圆周表面上,确保结合剂材料被均匀去除,同时避免因重叠率过高导致激光烧蚀热积累效应加剧,最终使得修锐后的金刚石磨粒表面情况恶化,甚至完全失去切削性能。

图 6 是当激光平均功率 P_{avg} 为 15 W,在不同光斑重叠率 U_P 和轨迹线重叠率 U_D 条件下,经激光修锐后的青铜结合剂金刚石砂轮表面的地形地貌图。其中,每幅子图的右半部分均为砂轮表面的分层设色地形图,图中采用蓝色表示地势较低的区域(即磨粒脱落后形成的凹坑所在位置),而红色则表示地势较高的区域(即突出于结合剂表面的磨粒所在位置),且随着地势高度的增加,图形颜色由蓝色逐渐

向红色过渡,以表征砂轮结合剂表面地形的高低起伏情况。在图 6(a)中,当光斑重叠率 U_P 和轨迹线重叠率 U_D 均为 10% 时,分层设色地形图中结合剂表面的颜色比较混乱,表明激光修锐后的砂轮结合剂表面凹凸不平。这是因为当重叠率较低时,激光烧蚀凹坑在砂轮表层的分布排列较为稀疏,造成砂轮表面各处的结合剂材料去除量不均匀,从而导致砂轮结合剂表面的高低起伏较大。在图 6(b)中,当光斑重叠率 U_P 和轨迹线重叠率 U_D 同步增大至 30% 时,分层设色地形图的颜色趋于统一,这说明烧蚀后的砂轮结合剂表面较为平整。同时也可看到,经激光修锐后,砂轮表面青铜结合剂的去除深度增加,金刚石磨粒出刃高度和磨粒磨削刃锋利程度明显增加。在图 6(c)中,当光斑重叠率 U_P 和轨迹线重叠率 U_D 均达到 50% 时,分层设色地形图的颜色在局部区域发生激变(由橙红色突变为蓝绿色),这表明激光修锐后的砂轮表面在这些区域出现了类似于“盆地”的局部塌陷,这是由于过高的重叠率使得热积累效应增强,导致结合剂材料去除量增加,以至于部分金刚石磨粒从砂轮表面脱落(箭头所示位置),从而造成表面塌陷的形成;此外也可观察到,经激光修锐后的部分金刚石磨粒表面开始出现蓝色表皮,即说明此时磨粒石墨化程度和氧化程度增加。当光斑重叠率 U_P 和轨迹线重叠率 U_D 进一步增大至 70% 时,因金刚石磨粒脱落而导致的表面塌陷区域增多(箭头所示位置),砂轮表面金刚石磨粒的整个表层被激光烧蚀去除,没有锋利的磨削刃形成,这对激光

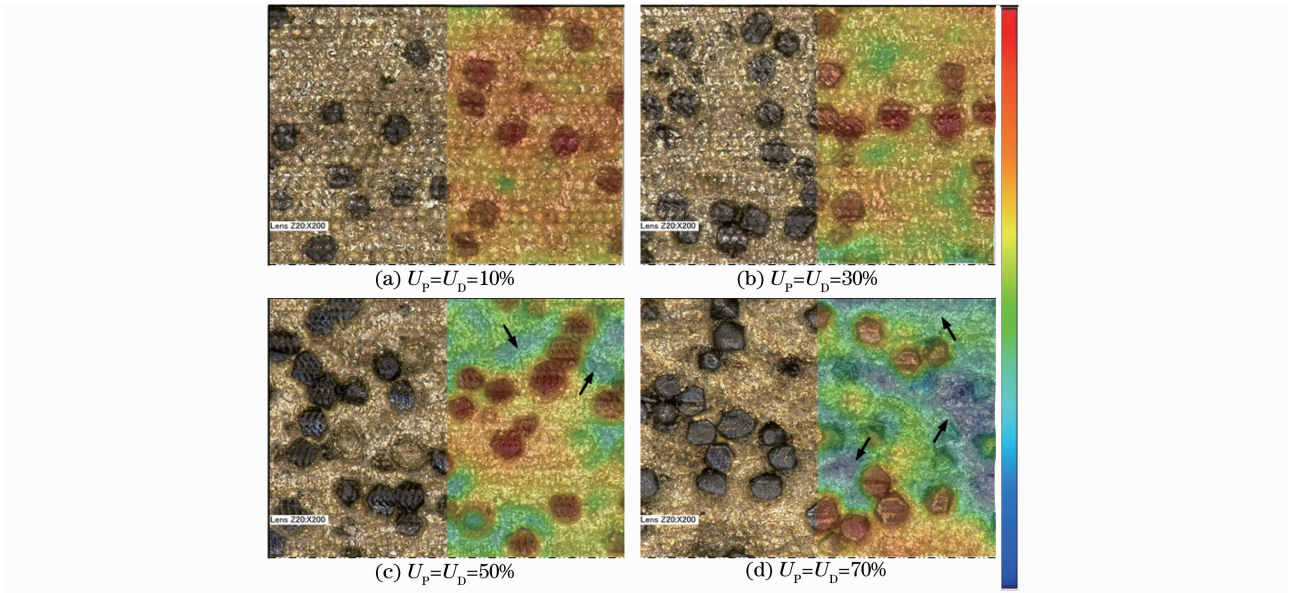


图 6 不同重叠率条件下激光修锐后砂轮表面地形地貌图

Fig. 6 Topographic maps of the laser-sharpened grinding wheel surface under different overlap ratios

修锐后砂轮的磨削性能有较为恶劣的影响。综上所述,当激光光斑重叠率 U_p 和激光扫描轨迹线重叠率 U_D 均为 30% 时,脉冲激光修锐后可以获得地形地貌较为良好的青铜结合剂金刚石砂轮工作表面。

4.2.3 循环扫描次数对修锐效果的影响

激光循环扫描次数 N 主要与修锐后金刚石磨粒的出刃高度值有关,其值的确定原则是要使激光修锐后砂轮的磨粒出刃高度值约为磨粒直径的 1/3,使得磨粒具备良好的磨削性能,同时确保结合剂对磨粒具有足够的把持能力。

图 7 是当激光平均功率 P_{avg} 为 15 W,激光光斑重叠率 U_p 和激光扫描轨迹线重叠率 U_D 均为 30% 时,在不同激光循环扫描次数 N 的条件下,经脉冲激光修锐后青铜结合剂金刚石砂轮表面的地形地貌三维图。由图 7(a)~(e) 可知,随着循环扫描次数 N 的增加,脉冲激光烧蚀去除的青铜结合剂越多,使得结合剂内部的金刚石磨粒逐步突显出来。修锐

后砂轮表面的磨粒出刃高度值将极大地影响砂轮的磨削性能,若磨粒出刃高度值太小,容易导致砂轮堵塞从而使磨削力增大,而当磨粒出刃高度值太大时,则容易导致磨粒脱落从而使砂轮磨损加快。然而,直接测量砂轮表层所有金刚石磨粒的出刃高度非常困难,故本试验采用通过测量激光修锐前后砂轮结合剂表面高度差值的方法,来初步估计修锐区域所有磨粒的平均出刃高度值 H ,并以此结果来初步衡量脉冲激光修锐质量的优劣。图 7(f) 为金刚石磨粒出刃高度值 H 随循环扫描次数 N 变化的关系图。研究表明^[5],当金刚石磨粒出刃高度值约为其直径的 30% 时,砂轮具备较好的磨削性能,因本试验所用砂轮的磨粒尺寸约为 120 μm ,即磨粒突出高度在 40 μm 左右较为适宜。由图 7(f) 可知,当循环扫描次数 N 为 15 次时,金刚石磨粒的平均出刃高度值 H 约为 38 μm ,此时砂轮具备较好的磨削性能。

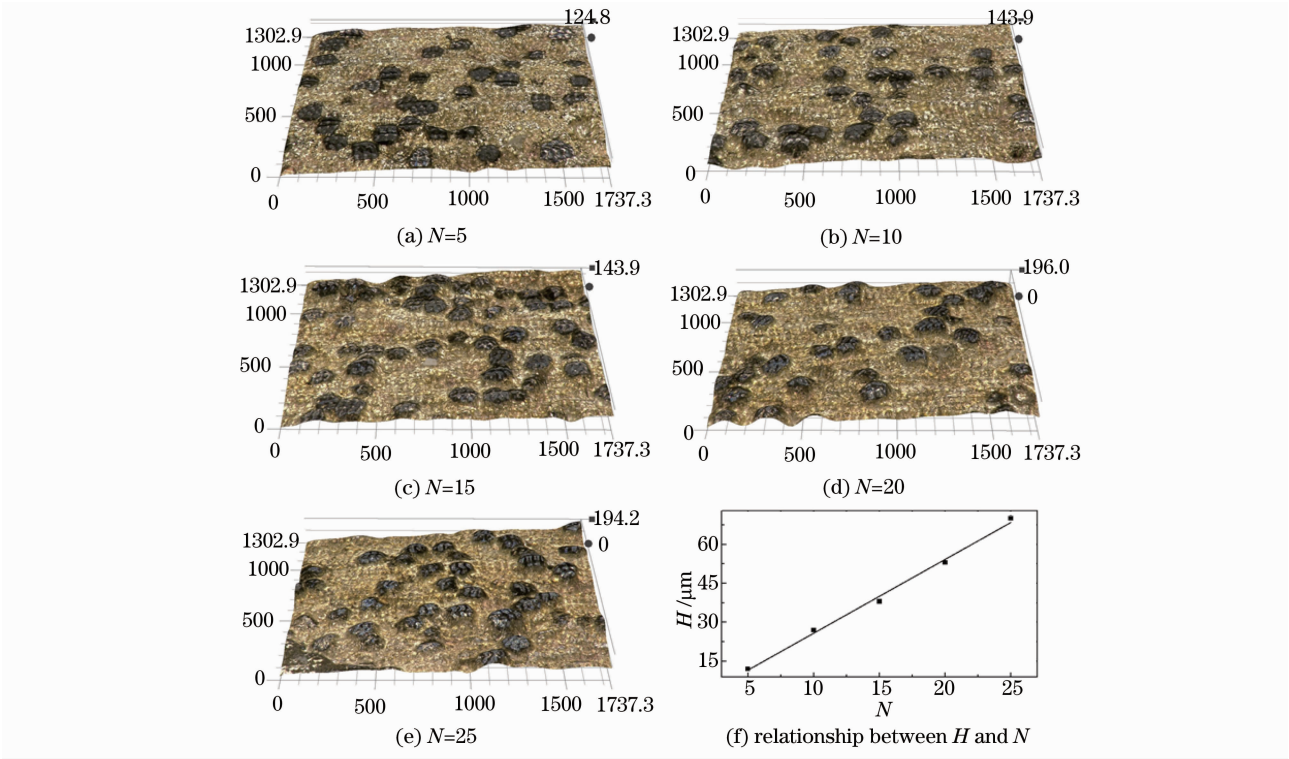


图 7 (a)~(e) 不同循环扫描次数条件下激光修锐后砂轮表面地形地貌图和 (f) H 与 N 的关系曲线(单位: μm)
Fig. 7 (a)~(e) Topographies of the laser-sharpened grinding wheel with different numbers of scanning cycles and (f) curve of H versus N (unit: μm)

5 结 论

理论分析了脉冲激光切向整形和径向修锐青铜结合剂金刚石砂轮的机理,总结决定了脉冲激光修整效果的关键工艺参数,并通过一系列激光修整试

验对这些工艺参数逐一进行优化,得出的主要结论如下:

- 1) 激光功率密度 I_p 、激光光斑重叠率 U_p 、激光扫描轨迹线重叠率 U_D 及激光循环扫描次数 N 是决

定脉冲激光修整青铜结合剂金刚石砂轮质量、精度和效率的 4 个关键工艺参数。

2) 采用超景深三维显微镜和 CCD 激光位移传感器,对整形后青铜结合剂金刚石砂轮表面微观形貌和不同截面处的圆跳动误差进行了观测,发现当激光平均功率 P_{avg} 为 40 W,即激光功率密度 I_p 约为 $1.2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,脉冲激光切向整形的质量、精度和效率较高。

3) 采用超景深三维显微镜观测了修锐后砂轮磨粒出刃高度、磨粒磨削刃锋利程度、磨粒石墨化程度及结合剂表面平整度。结果表明当激光功率密度 I_p 、激光光斑重叠率 U_p 、激光扫描轨迹线重叠率 U_D 及激光循环扫描次数 N 分别为 $3.17 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$, 30%, 30% 和 15 时,脉冲激光修锐能够在保证较高结合剂去除效率的同时,又可以获得地形地貌较为理想的青铜结合剂金刚石砂轮工作表面。

参 考 文 献

- 1 Deng H, Chen G Y, Zhou C, *et al.*. Processing parameter optimization for the laser dressing of bronze-bonded diamond wheels[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 290: 475—481.
- 2 Babu N R, Radhakrishnan V, Murti Y V G S. Investigations on laser dressing of grinding wheels—part I: preliminary study[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering for Industry*, 1989, 111(3): 244—252.
- 3 Babu N R, Radhakrishnan V. Investigations on laser dressing of grinding wheels—part II: grinding performance of a laser dressed aluminum oxide wheel[J]. *Journal of Manufacturing Science on*

- Engineering for Industry*, 1989, 111(3): 253—261.
- 4 Chen Genyu, Deng Hui, Li Zonggen, *et al.*. Dressing of bronze-bonded diamond grinding wheels using a 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.
- 5 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.
- 6 Walter C, Rabiey M, Warhanek M, *et al.*. Dressing and truing of hybrid bonded CBN grinding tools using a short-pulsed fibre laser[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2012, 61(1): 279—282.
- 7 Rabiey M, Walter C, Kuster F, *et al.*. Dressing of hybrid bond CBN wheels using short-pulse fiber laser[J]. *Strojniški Vestnik—Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 58(7-8): 462—469.
- 8 Dold C, Transchel R, Rabiey M, *et al.*. A study on laser touch dressing of electroplated diamond wheels using pulsed picosecond laser sources [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2011, 60(1): 363—366.
- 9 Rabiey M, Dold C, Transchel R, *et al.*. Influence of picosecond laser touch dressing of electroplated diamond wheels on the dressing of SiC vitrified bond wheel[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 325: 189—194.
- 10 Witzendorff P V, Moalem A, Kling R, *et al.*. Laser dressing of metal bonded diamond blades for cutting of hard brittle materials [J]. *Journal of Laser Applications*, 2012, 24(2): 022002.
- 11 Witzendorff P V, Stompe M, Moalem A, *et al.*. Dicing of hard and brittle materials with on-machine laser-dressed metal-bonded diamond blades[J]. *Precision Engineering*, 2014, 38(1): 162—167.
- 12 Wegener K, Hoffmeister H W, Karpuschewski B, *et al.*. Conditioning and monitoring of grinding wheels [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2011, 60(2): 757—777.

栏目编辑:史 敏