

# 树脂结合剂 CBN 砂轮光纤激光径向修锐及磨削 实验研究

陈根余<sup>1,2</sup> 周兴才<sup>2</sup> 周聪<sup>1,2</sup> 邓辉<sup>2</sup> 张勇<sup>2</sup> 陈俊<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>湖南大学激光研究所, 湖南长沙 410082

**摘要** 采用脉冲光纤激光器,探索激光径向修锐树脂立方氮化硼(CBN)砂轮关键工艺参数,开展了激光烧蚀树脂结合剂脉冲重叠率实验、激光烧蚀纯树脂结合剂砂轮实验和激光修锐树脂 CBN 砂轮实验,并进行了磨削实验验证。结果表明,光纤激光径向修锐树脂 CBN 砂轮最佳脉冲重叠为 30%~50%,最佳单脉冲激光功率密度分布于  $5 \times 10^7 \sim 7.5 \times 10^7$  W/cm<sup>2</sup> 区间内,修锐深度可达到 39 μm,磨削工件的表面粗糙度为 0.789 μm,磨痕窄而浅,修锐效果良好。

**关键词** 激光技术; 参数优化; 径向修锐; 树脂 CBN 砂轮; 光纤激光

中图分类号 TG665; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0203008

## Experimental Research on Fiber Laser Radial Sharpening of Resin-Bonded CBN Grinding Wheels and Grinding Characteristics

Chen Genyu<sup>1,2</sup> Zhou Xingcai<sup>2</sup> Zhou Cong<sup>1,2</sup> Deng Hui<sup>2</sup> Zhang Yong<sup>2</sup> Chen Jun<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>Laser Research Institute, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

**Abstract** Using a fiber laser to explore the key parameters of laser radial sharpening the resin-bonded cubic boron nitride (CBN) grinding wheels, a systematic research is carried out, which consists of the test of pulse overlap rate of optical fiber laser ablating resin-bonded wheels, optical fiber laser ablating resin-bonded wheels and optical fiber laser ablating resin-bonded CBN grinding wheels. The results, which have been testified by grinding experiments, show that the best pulse overlap rate is 30%~50%, the best single pulse laser power density is distributed in the range of  $5 \times 10^7 \sim 7.5 \times 10^7$  W/cm<sup>2</sup>, the sharpening depth with a good performance is 39 μm, surface roughness of workpiece is 0.789 μm. The narrow and shallow traces of grinding are obtained.

**Key words** laser technique; parameter optimization; radial sharpening; resin-bonded CBN grinding wheel; fiber laser

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 320.5540

## 1 引 言

由硬度仅次于金刚石的立方氮化硼(CBN)材料制备的树脂结合剂 CBN 砂轮在使用之初或磨钝之后的修整难度较高,修整精度难以保证。基于“硬碰硬”接触的传统机械式修整法存在效率和精度偏低、修整工具损耗严重等缺陷。激光修整技术作为一种非接触式的修整方法,避免了机械力的直接作用和硬接触,具有效率高、适用性广、无环境污染等优势,是一种极具发展潜力和广阔应用前景的先进修整技术。正是基于这些优点,激光修整技术自从诞生起,就一直受到广泛关注。

收稿日期: 2014-08-04; 收到修改稿日期: 2014-09-29

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX04003101)、湖南省研究生科研创新项目(CX2014B143)

作者简介: 陈根余(1965—),男,博士,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

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

激光修整砂轮包括整形和修锐两个步骤,是由印度的学者 Babu<sup>[1-2]</sup>在 20 世纪 90 年代提出的一种可行的高效先进修整技术。21 世纪以来,激光器发展迅猛,从最早的 YAG 激光器、CO<sub>2</sub> 激光器,逐步发展为短波长的光纤激光器。光纤激光器作为新一代激光器,相比 YAG 激光器,具有光束质量好,光电转换效率高,功率高,稳定性可靠性高,设备紧凑,使用方便,可实现远距离的柔性传输等优点,因此激光器的每一次进步和发展对激光修整砂轮都能带来革命性的变化,寻找新型激光条件下激光修整砂轮最佳工艺参数显得尤为重要。

随着激光器的发展,国内外激光修整技术也获得了长足进展。在国外,Zhang 等<sup>[3-4]</sup>使用 CO<sub>2</sub> 激光器对陶瓷基 CBN 砂轮进行了激光辅助修整实验研究,他们利用激光辅助辐照待修整区域,然后用金刚石刀具继续修整。Walter 等<sup>[5]</sup>采用脉冲光纤激光切向修整复合结合剂 CBN 成型磨具,研究了激光参数对砂轮磨损特性的影响,借助三维光学显微镜对工件的表面组织结构进行了检测。在国内,左敦稳等<sup>[6]</sup>也利用 1064 nm 波长的 CO<sub>2</sub> 激光器对树脂结合剂金刚石砂轮圆锯片进行辐照实验,并提出了一种刻划的实验方法来验证砂轮修锐效果。陈根余等<sup>[7-12]</sup>采用声光调 Q Nd:YAG 激光器进行了超硬磨料砂轮修整的温度场的模拟与试验、精度研究及工艺参数优化等,并采用光纤激光修整青铜金刚石砂轮,也取得了一定进展。从目前国内外的研究情况来看,各国学者都是从自己现有状况采用非光纤激光器修整,或者光纤激光器切向修整,还未见报道采用光纤激光径向修锐树脂 CBN 砂轮。也没有从激光与复合材料的作用角度开展工艺实验,总结各个参数之间的实质关系,提炼其关键影响参数。因此目前的很多研究结论都存在一定的局限性。

本文采用光纤激光器对树脂 CBN 砂轮进行径向修锐实验,逐步开展了激光烧蚀树脂结合剂轮脉冲重叠率实验、激光烧蚀纯树脂结合剂轮实验和激光修锐树脂 CBN 砂轮实验,总结了实质影响树脂 CBN 砂轮修锐效果的关键工艺参数,并采用超景深三维显微镜和磨削对比实验分别对激光修锐效果进行观测和评估。

## 2 实验设备与方法

### 2.1 实验设备和材料

图 1 为激光修锐树脂结合剂 CBN 砂轮的实验装置示意图。实验所采用的脉冲光纤激光器(YLP-1-120-50-50-HC)的平均功率  $P=5\sim 50$  W,脉冲重复频率  $f=50\sim 150$  kHz,脉冲宽度为 210 ns,波长为 1064 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)的激光烧蚀头内部,再经烧蚀头内部焦距为 180 mm 的双凸透镜聚焦后,入射到安装在普通平面磨床(MGS-250AH)主轴上的砂轮(100D×10T×5X×31.75H/100)工作表面,位于砂轮表面的激光光斑直径约为 64  $\mu\text{m}$ 。实验时,采用直径为 2 mm 的喷嘴辅助侧吹空气,气体压力为 0.4 MPa。

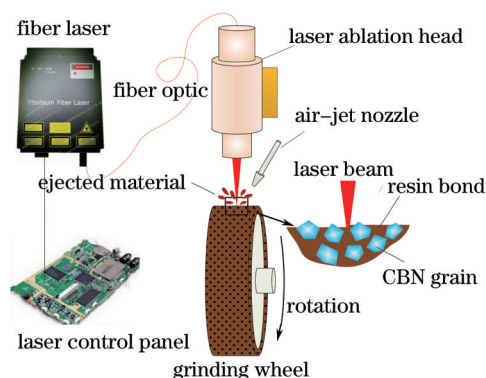


图 1 光纤激光修锐砂轮装置

Fig.1 Device for sharpening grinding wheels with fiber laser

### 2.2 实验方法

实验主要分为 4 个部分依次进行。首先,在不同脉冲重叠率条件下,采用单因子控制变量法开展脉冲光纤激光烧蚀树脂结合剂轮的实验,借助超景深三维显微镜观察得到数据,总结脉冲重叠率对激光烧蚀凹坑的影响规律。然后,在优化了的重叠率基础上进行纯树脂结合剂轮烧蚀实验,由超景深显微镜得到凹坑深度数据,总结提炼出关键的激光烧蚀工艺参数。再次,在前两部分基础上进行树脂 CBN 砂轮实验,采用超景

深三维显微镜对树脂CBN砂轮表面形貌进行观察,从地形地貌的角度进一步优化激光修锐参数。最后,采用机械法整形后光纤激光修锐的树脂CBN砂轮对45#钢试件进行磨削测试,通过对工件表面形貌、表面粗糙度、砂轮形貌等进行观察对比,验证修锐效果。激光修锐实验参数如表1所示。

表1 激光修锐实验参数

Table 1 Laser sharpening experiment parameters

Average laser power $P/W$	Pulse frequency $f/kHz$	Pulse overlap rate $r/\%$	Number of scanning cycles $N$
5~35	50, 80, 120	10~80	3

### 3 实验与结果分析

#### 3.1 树脂结合剂砂轮脉冲重叠率实验

如图2所示,修锐后的砂轮表面形貌由多个烧蚀凹坑排列构成,这些烧蚀凹坑会在随砂轮旋转的方向和激光扫描方向产生重叠。为了使修锐后的砂轮的表面平整度较高,磨粒比较锋利,同时避免磨粒烧伤,必须选择合适的激光脉冲重叠率,使大量激光脉冲均匀地辐照在砂轮表面上,从而保证砂轮表面平整,磨粒相对突出,且不因重叠率过高造成热积累损伤磨粒,影响砂轮的磨削性能。

采用单因子控制变量法保持激光功率 $P=30\text{ W}$ ,脉冲重复频率 $f=50\text{ kHz}$ 条件下,进行实验得到如图3所示的烧蚀凹坑深度随着脉冲重叠率变化图,从图3可以看出,当激光功率密度保持不变的情况下,随着脉冲重叠率的提高,烧蚀凹坑深度非线性递增,并在脉冲重叠率70%时出现小幅下降波动趋势。当脉冲重叠率 $r$ 在10%~50%范围内,烧蚀凹坑深度基本在 $24\sim 27\ \mu\text{m}$ 范围内浮动变化;当脉冲重叠率 $r$ 超过50%后,烧蚀凹坑深度陡增,脉冲重叠率 $r$ 达到80%时,凹坑深度接近 $50\ \mu\text{m}$ 。可见,过高的脉冲重叠率对砂轮表面造成剧烈烧蚀影响。这是由于激光烧蚀砂轮时,聚焦后的脉冲激光束入射到砂轮工作表面,结合剂靶材吸收光束能量后,转化为热能,并快速升温,从固态熔融为液态,并向气相转变。当重叠率过高,激光能量在砂轮砂轮表面重叠区域累积过大,树脂结合剂材料大量融化、气化,凹坑深度显著增加。

图4为在500倍超景深显微镜下测得不同脉冲重叠率烧蚀凹坑三维深度检测分层设色图,红褐色表示

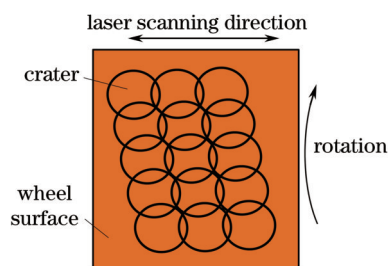


图2 烧蚀凹坑重叠示意图

Fig.2 Schematic diagram of ablation crater overlap

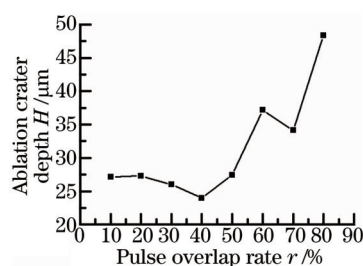


图3 烧蚀凹坑深度随着脉冲重叠率变化

Fig.3 Ablation crater depth versus pulse overlap rate

较浅的位置,蓝色表示较深的位置。从图4(a)和(b)中可以看出,脉冲重叠率在10%~20%时,激光烧蚀凹坑深度分布不均匀,深浅不一,由于重叠率较低,各个聚焦光斑只有不到20%重叠部分,凹槽不连续,部分地方甚至出现断层。从图4(c)~(e)可以看出,脉冲重叠率提高,烧蚀凹坑最深的蓝色部分逐渐趋向于连续,这是因为随着脉冲重叠率提高,相邻两个脉冲重叠部分增多,而且烧蚀凹坑深度也相对比较均匀,烧蚀凹坑开始趋向于连续,因此极易获得较平整的地形地貌。从图4(f)~(h)可知,当 $r$ 超过50%时,随着脉冲重叠率继续增加,烧蚀凹坑深度递增速率加快,蓝色部分烧蚀区域深度普遍超过 $35\ \mu\text{m}$ ,而局部较浅的烧蚀凹坑深度不到 $15\ \mu\text{m}$ 。较高的重叠率导致树脂复合材料不同成分局部碳化形成抗烧蚀层,暂时阻挡了激光的直接作用,但是由于激光能量的积累,激光脉冲结束后,某些区域温度还较高可以继续分解,因此差异化复合材料成分在较高的重叠率下烧蚀凹坑深度局部差异过大,进而造成修锐后树脂CBN砂轮极不平整。综合对比图4(a)~(h),脉冲重叠率 $r$ 在30%~50%时,烧蚀凹坑排列后获得的凹槽较为规整,且深度分布较均匀,最大深度不超过 $27\ \mu\text{m}$ ,所以光纤激光修锐树脂CBN砂轮脉冲重叠率选取为30%~50%之间比较合适。



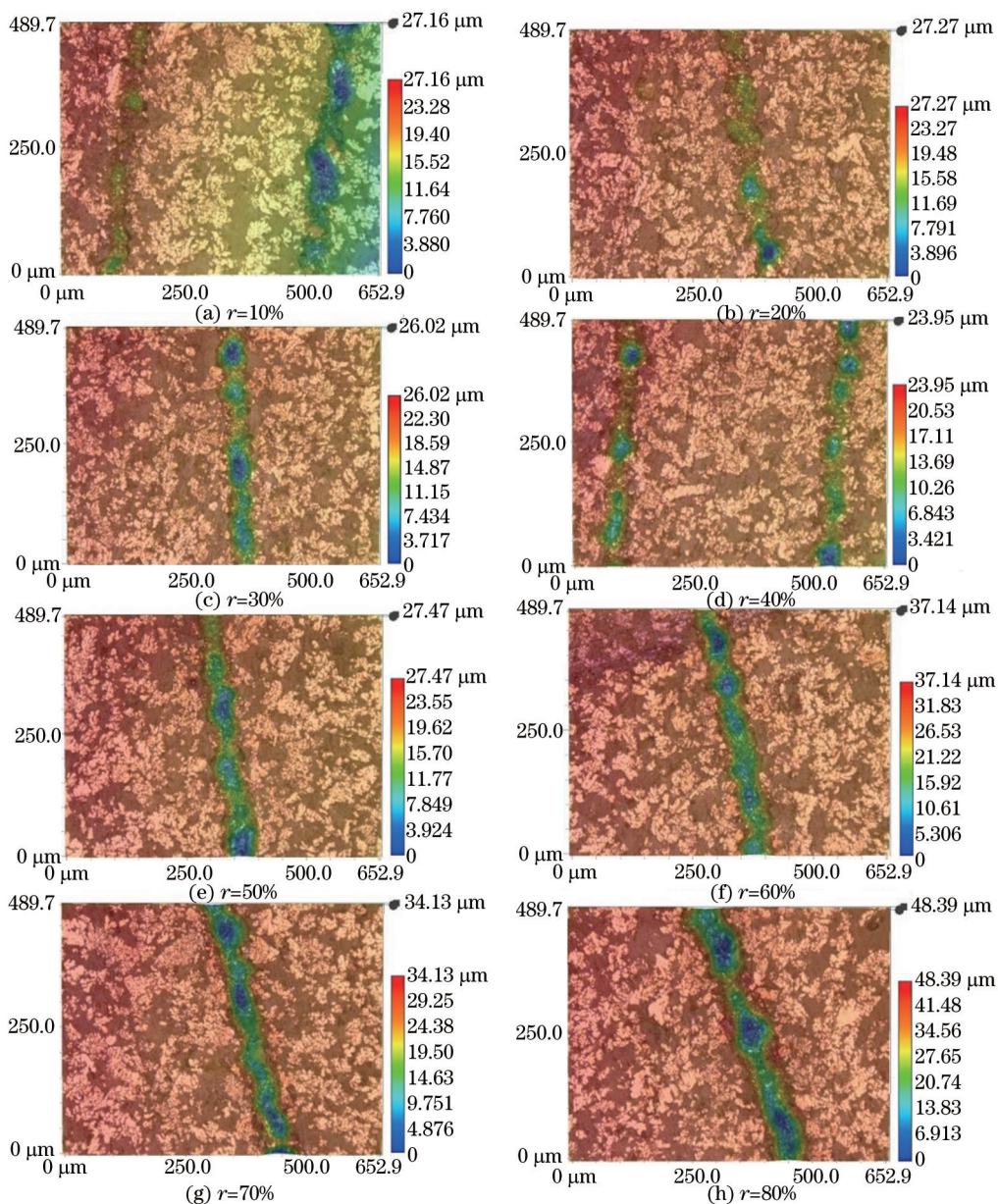


图4 脉冲重叠率对烧蚀凹坑的影响

Fig.4 Influence of pulse overlap rate on ablation crater

### 3.2 树脂结合剂轮烧蚀实验

由上述实验的分析结果可知,脉冲重叠率为30%~50%时,烧蚀凹坑深度分布较均匀,采用表1所选择的实验参数,保持脉冲重叠率为40%时对树脂结合剂轮进行光纤激光烧蚀实验,然后采用超景深显微镜设备对烧蚀凹坑进行观测。

如图5所示的是激光平均功率分别为5 W和30 W时树脂结合剂轮的表面形貌。从图5(a)可以看出,5 W的激光平均功率已经对树脂结合剂轮造成比较剧烈的烧蚀影响,此时烧蚀深度已达到19.62 μm。而从图5(b)可知,30 W激光平均功率时,烧蚀部分表面极不平整,表面存在大量黑色或者暗黄色铜粉金属熔融物,对应烧蚀深度达到118.72 μm。由于实验所用的CBN砂轮目数为100目,即磨粒大小为149 μm左右,显然118.72 μm的烧蚀深度足以造成部分磨粒的脱落,烧蚀效果较差。因此,图5(a)和(b)对比说明,单因素条件下,随着激光输出平均功率的提高,烧蚀凹坑深度显著增大。而当激光功率过高时,材料表面的熔融物覆盖增多,大量熔融物堆积,表面凹凸不平,凹坑深度差异过大,砂轮地形地貌较差,此时树脂结合剂材料可能已发生变质。

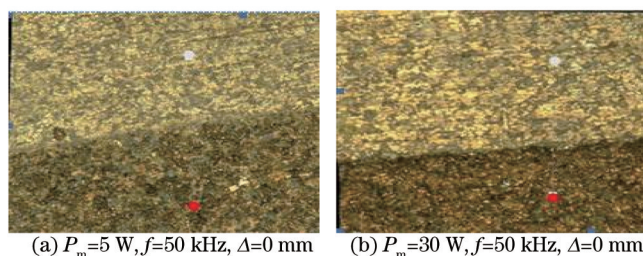


图5 激光功率对树脂结合剂轮的影响

Fig.5 Influence of laser power on resin-bonded grinding wheel

如图6所示的是树脂结合剂轮烧蚀凹坑深度与激光平均功率和脉冲重复频率的关系。从图6可以看出,当脉冲重复频率保持不变的情况下,随着激光输出平均功率的不断提高,光纤激光烧蚀树脂结合剂轮的凹坑深度显著增加;而当平均功率保持不变的前提下时,脉冲重复频率增加,光纤激光器烧蚀树脂结合剂轮的凹坑深度随之不断减小。激光烧蚀树脂CBN砂轮本质是基于脉冲激光烧蚀机理,即当高能量脉冲激光束辐照于被修整砂轮表面,激光能量在极短时间内被吸收并转化为热量沉积在微小区域,使烧蚀区的砂轮材料瞬间加热熔化、气化,从而对砂轮表层材料进行“精密微细切削”。激光平均功率的提高,单位面积烧蚀区域的激光能量相应会增大,因此烧蚀区的砂轮材料熔化、气化速度加快,凹坑深度增加。而当脉冲重复频率增加时,对应单脉冲能量减少,砂轮材料熔化、气化速度减慢,凹坑深度减小。

为了探求光纤激光烧蚀树脂CBN砂轮各个激光参数间的实质关系,将图6中的数据经过参数转换数据处理,按单脉冲激光功率密度  $I$  实验数据重新排列分组,并绘制如图7所示的树脂结合剂轮烧蚀深度随单脉冲激光功率密度的变化图。从图7可以看出,随着单脉冲激光功率密度值的不断增大,光纤激光烧蚀树脂结合剂轮的烧蚀深度基本处于上升趋势。因此,单脉冲激光功率密度才是决定光纤激光修锐树脂CBN砂轮烧蚀深度的关键变量。

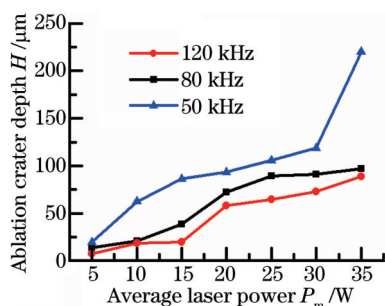


图6 不同重复频率条件下树脂结合剂轮烧蚀凹坑深度随平均功率的变化

Fig.6 Resin-bonded grinding wheel's ablation crater depth versus average laser power under various laser repetition frequencies

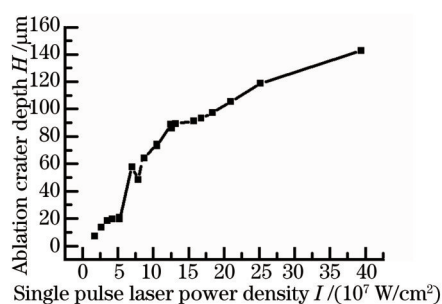


图7 树脂结合剂轮烧蚀凹坑深度随单脉冲激光功率密度的变化

Fig.7 Resin-bonded grinding wheel's ablation crater depth versus single pulse laser power density

砂轮修锐原则上是磨粒突出高度约为磨粒直径的30%,此时不仅砂轮具有足够的容屑空间,树脂结合剂对CBN磨粒拥有足够的把持力,同时确保砂轮磨粒具备较强的磨削性能。以100目(149 μm)计算,即磨粒突出高度约为44.7 μm最合适,也就是激光修锐深度44.7 μm为最佳,从图7可知,此时激光单脉冲激光功率密度分布于 $5 \times 10^7 \sim 7.5 \times 10^7$  W/cm<sup>2</sup>区间内。

### 3.3 树脂CBN砂轮修锐实验

从3.1节的激光脉冲重叠率实验和3.2节激光烧蚀树脂结合剂轮实验的结果分析可知,脉冲重叠率为30%~50%,单脉冲激光功率密度分布于 $5 \times 10^7 \sim 7.5 \times 10^7$  W/cm<sup>2</sup>之间时,激光烧蚀树脂结合剂材料的去除量合适,且烧蚀后的材料表面形貌较为理想,故选用此工艺参数开展树脂CBN砂轮径向修锐实验。

图8所示的是采用超景深三维显微镜观察到的树脂CBN砂轮同一区域修锐前后表面形貌分层设色图。由图8(a)、(b)对比可见,磨粒与结合剂凹坑极值差由71.8 μm增加到112.7 μm,突出磨粒数量增加,磨粒轮廓



更加清晰,表面形貌基本上没有发生热损伤变化,也没有出现大量脱落。可见,光纤激光修锐后磨粒突出高度和容屑空间深度显著增加,修锐效果显著。

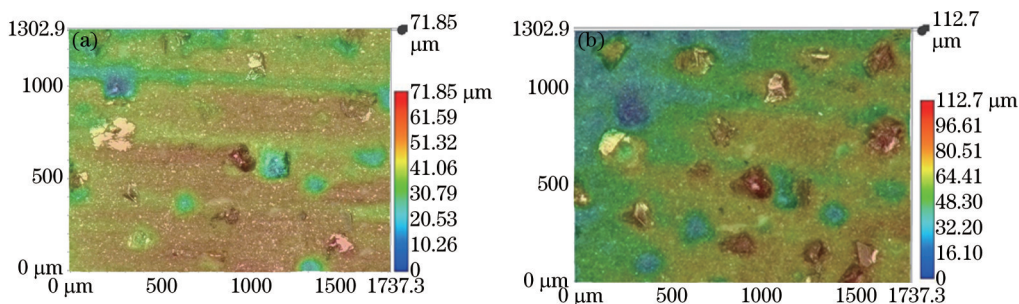


图8 激光修锐前后磨粒突出对比

Fig.8 Grinding grain contrast before and after laser sharpening

为了更加直观地对比,采用砂轮局部保护装置使砂轮局部被烧蚀,选取上述激光工艺参数进行修锐实验,得到修锐与未修锐后的砂轮断层处表面形貌对比,如图9所示。从图9可以看出,激光修锐前树脂CBN砂轮表面结合剂为浅松花色,经过激光辐照后变为棕绿色,除了结合剂颜色发生轻微变化,修锐后的结合剂表面仍然较为平整,良好的地形地貌对树脂CBN砂轮的磨削性能提供了保障。黑色圈住的部分为修锐断层处的磨粒,可见在未修锐区域掩埋较深,修锐区域磨粒突出明显,同时对比上下断层处可见,修锐层有大量磨粒突出,而未修锐部分突出的磨粒分布稀疏。激光修锐树脂CBN砂轮是一个选择性烧蚀过程,由于CBN砂轮结合剂与磨料热物理性质和光学性质(如:导热率、比热容、热扩散率、气化温度、吸收率)的差异较大,导致砂轮结合剂和CBN磨料无论是在对激光吸收,还是在将吸收的激光能量转化为热能并进行热传导的过程中都存在着较大差别,因此选择合理的激光修锐功率等参数可以使砂轮表面的结合剂材料得到均匀的去掉,而磨粒基本上没有损伤,并且磨粒间形成一定的容屑空间。图9中,白色和红色圆点为超景深三维两点深度检测点,检测的修锐深度达到了39 μm,实验结果与树脂结合剂轮修锐实验结果基本一致,可见砂轮取得了良好的修锐效果。



图9 激光修锐前与修锐后断层面的对比

Fig.9 Transform fault contrast before and after laser sharpening

### 3.4 树脂结合剂CBN磨削性能试验

树脂结合剂CBN砂轮光纤激光径向修锐效果的好坏,最终要通过磨削实验来验证,采用机械法整形后光纤激光修锐的树脂CBN砂轮对45#钢试件进行磨削测试,磨削过程中,砂轮线速度 $V_s=40$  m/s、工作台速度 $V_w=300$  mm/min和切削深度 $V_p=0.09$  mm,通过对激光修锐前后工件表面形貌、表面粗糙度、砂轮形貌等进行观察对比,可以很好地评估光纤激光径向修锐效果。

#### 3.4.1 工件表面粗糙度检测

图10(a)和(b)显示的是采用JB—4C型精密粗糙度测试仪(取样长度 $L=0.8$  mm)对经过机械法整形后光纤激光修锐前后的树脂CBN砂轮磨削45#钢后的表面粗糙度测量结果对比。从图10可得知,光纤激光修锐后的树脂CBN砂轮磨削45#钢工件的表面粗糙度 $R_a$ 为0.789 μm,而只是机械法整形没有光纤激光修锐的树脂CBN砂轮磨削45#钢工件的表面粗糙度 $R_a$ 为0.844 μm。可见,光纤激光修锐后的树脂CBN砂轮磨削45#钢,

工件的表面粗糙度优于激光修锐前的树脂CBN砂轮。

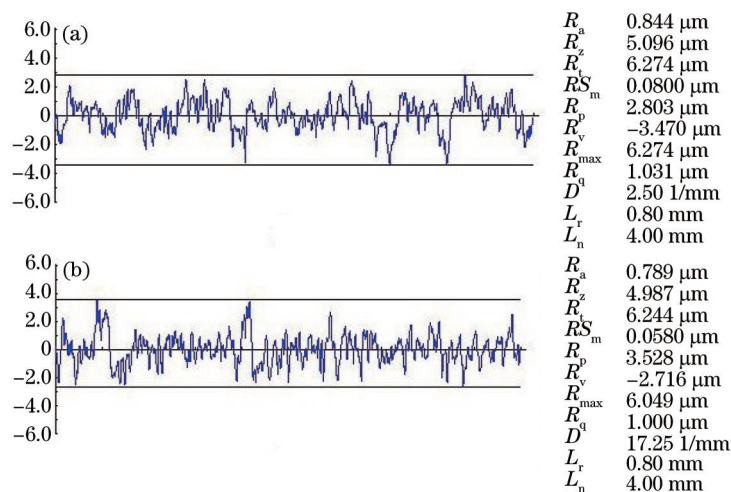


图 10 树脂 CBN 砂轮磨削 45# 钢后的表面粗糙度。(a) 机械法整形; (b) 泊光修锐后

Fig.10 Surface roughness of 45# steel grinded with resin-bonded CBN grinding wheel. (a) Mechanical method profiling; (b) after laser sharpening

### 3.4.2 工件表面质量观察

在超景深三维显微镜下,分别对采用光纤激光修锐前后的树脂 CBN 砂轮磨削 45# 钢工件表面进行对比观测,图 11 为 45# 钢工件表面形貌图。对比可以看出,图 11(a)只是机械法整形的砂轮加工的工件表面存在大量凹槽磨痕,磨痕宽且深,底部和两侧粗糙有鳞状破裂组织。而图 11(b)经过光纤激光修锐后砂轮磨削后,磨削表面上的磨痕窄而浅,底部和两侧光滑,两侧隆起很小。因此,光纤激光径向修锐后的树脂 CBN 砂轮磨粒突出较均匀,加工工件表面质量较好。

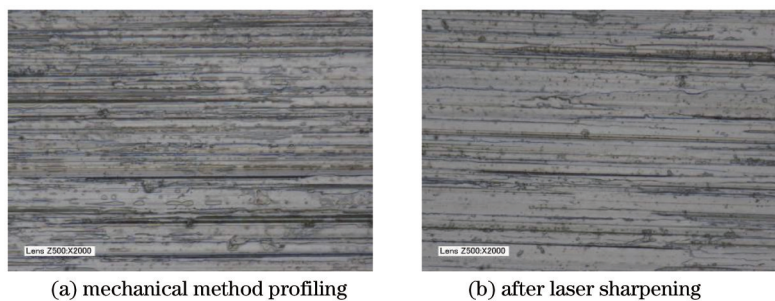


图 11 45# 钢工件表面形貌对比

Fig.11 45# steel workpiece surface topography

### 3.4.3 砂轮表面形貌的变化

砂轮表面地形地貌的变化也是磨削加工过程中判定砂轮磨损情况的重要指标。图 12(a)和(b)分别是机械法和光纤激光修锐后树脂 CBN 砂轮磨削后砂轮表面形貌。从图 12(a)中可以看出机械法整形磨削后,砂轮

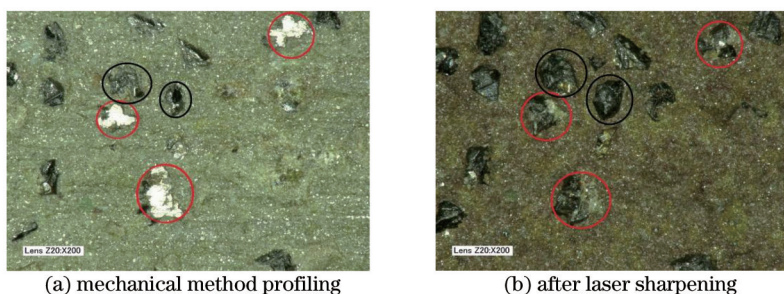


图 12 磨削后砂轮表面地形地貌图

Fig.12 Grinding wheel surface topography and geomorphological map after grinding

表面磨粒突出不是很明显。图中黑色圈圈部分磨粒未突出,参与切削加工磨粒较少,且红色圈圈部分磨粒被磨平。从图 12 (b)可以看出,经过光纤激光修锐后,磨粒整体突出高度增加明显,黑色掩埋磨粒修锐后完全突出;且红色原本被磨平磨粒再次露出锋刃。由此可见,修锐后参与磨削的有效磨粒数显著增加,激光修锐效果明显。

## 4 结 论

1) 光纤激光烧蚀树脂结合剂轮最佳脉冲重叠率为 30%~50%,此时,烧蚀凹坑排列后获得的凹槽规整,且深度分布较均匀,最大深度不超过 27  $\mu\text{m}$ 。

2) 随着单脉冲激光功率密度值的不断增大,光纤激光烧蚀树脂结合剂轮的烧蚀深度基本处于上升趋势。激光径向修锐树脂 CBN 砂轮最佳单脉冲激光功率密度分布于  $5\times 10^7\sim 7.5\times 10^7\text{ W/cm}^2$  区间内。

3) 树脂 CBN 砂轮径向修锐深度为 39  $\mu\text{m}$ ,修锐后砂轮磨粒突出高度和容屑空间深度显著增加,且无明显损伤。

4) 激光修锐后砂轮磨削工件的表面粗糙度为 0.789  $\mu\text{m}$ 、磨痕窄而浅,工件质量、砂轮形貌均优于修锐前。

## 参 考 文 献

- 1 Babu Ramesh N, Radhakrishnan V, Murti Y V G S. Investigations on laser dressing of grinding wheels—part I: preliminary study[J]. J Manuf Sci Engineering, 1989, 3(111): 244–252.
- 2 Babu Ramesh N, Radhakrishnan V. Investigations on laser dressing of grinding wheels—part II: grinding performance of a laser dressed aluminum oxide wheel[J]. J Manuf Sci Engineering, 1989, 3(111): 253–261.
- 3 Zhang C H, Shin Y C. Wear of diamond dresser in laser assisted truing and dressing of vitrified CBN wheels[J]. Int J Mach Tool Manu, 2003, 43(1): 41–49.
- 4 Zhang C, Shin Y C. A novel laser-assisted truing and dressing technique for vitrified CBN wheels[J]. Int J Mach Tool Manu, 2002, 42(7): 825–835.
- 5 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 Ann—Manuf Tech, 2012, 61(1): 279–282.
- 6 Zuo Dunwen, Kawano Yoshihiro. Effect of CO<sub>2</sub> pulsed laser scanning on diamond wheel pieces[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(2): 42–45.  
左敦稳,河野良弘. 金刚石砂轮的 CO<sub>2</sub> 脉冲激光修锐研究[J]. 机械工程学报, 1999, 35(2): 42–45.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 Chen Genyu, Bu Chun, Deng Hui, *et al.* Research on laser and mechanical compound truing and dressing of superabrasive grinding wheels[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0703002.  
陈根余,卜纯,邓辉,等. 激光-机械复合修整超硬磨料砂轮研究[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0703002.
- 10 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.
- 11 Deng Hui, Chen Genyu, Zhang Ling, *et al.* Plasma emission spectra during laser dressing of bronze-bonded diamond wheel[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0830002.  
邓辉,陈根余,张玲,等. 激光修整青铜金刚石砂轮的等离子体光谱[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0830002.
- 12 Chen Genyu, Deng Hui, Li Zonggen, *et al.* Dressing of bronze-bonded diamond grinding wheels using pulsed fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0703002.  
陈根余,邓辉,李宗根,等. 脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0703002.

栏目编辑: 张 雁