

脉冲光纤激光修锐青铜金刚石砂轮

陈根余^{1,2} 邓辉² 李宗根² 徐建波² 陈俊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 以青铜金刚石砂轮为试验对象, 采用短脉冲光纤激光器, 对金刚石砂轮的修锐进行了系统研究。理论分析了脉冲激光修锐青铜金刚石砂轮的机理, 试验研究了多脉冲激光烧蚀青铜轮的情况, 借助超景深三维显微系统对烧蚀凹坑的微观形貌进行检测, 总结了激光参数对烧蚀效果的影响规律。根据烧蚀试验结果选择最佳工艺参数, 开展了激光修锐青铜金刚石砂轮的试验, 并采用光学显微镜和磨削对比试验分别对修锐后的砂轮形貌进行了观测和评估。

关键词 激光技术; 激光修锐; 磨削试验; 青铜金刚石砂轮; 光纤激光器

中图分类号 TG74⁺3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0703002

Dressing of Bronze-Bonded Diamond Grinding Wheels Using Pulsed Fiber Laser

Chen Genyu^{1,2} Deng Hui² Li Zonggen² Xu Jianbo² Chen Jun²

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 Dressing experiment of bronze-bonded diamond grinding wheels using a nanosecond pulsed fiber laser is carried out. The systematic research starts with the mechanism of laser dressing, followed by the analysis of ablated crater impacted by multiple-pulse and the studies of relationship between pulsed laser parameters and ablation effect. The laser dressing experiments is carried out at the foundation of laser ablation and the surface topography after laser dressing on wheels are then observed and assessed by optical microscope and grinding experiment.

Key words laser technique; laser dressing; grinding experiment; bronze-bonded diamond grinding wheel; fiber laser

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 320.5540

1 引言

金刚石和立方氮化硼(CBN)砂轮统称为超硬磨料砂轮, 两者在适应性方面具有互补性: 金刚石砂轮适于磨削高硬度和高脆性的金属和非金属材料, 如各种硬质合金、陶瓷、玻璃、石材、宝石等; CBN 砂轮适于磨削各种工具钢、淬火钢、合金钢、不锈钢、高速钢等材料。由于其优良的磨削性能, 超硬磨料砂轮现已广泛应用于航空、汽车、医学、电子、建材等领域, 并成为精密和超精密磨削、高速高效磨削、难加工材料磨削、成形磨削、磨削自动化等技术的基

础^[1]。虽然超硬磨料砂轮的抗磨损能力强, 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。由于密实型结合剂(目前包括树脂和金属结合剂)对磨料的把持力强, 超硬磨料的硬度又极高, 所以采用传统基于力的机械接触修整方法, 难以达到令人满意的修整效率和精度。要对具有复杂凹曲面轮廓的成型和电镀薄片超硬磨料砂轮进行修整, 则更是严峻的挑战。寻找能从根本上解决超硬磨料砂轮修整问题的方法, 已成为世界各国学者研究的重要课题。

收稿日期: 2013-01-08; **收到修改稿日期**: 2013-02-26

基金项目: 超硬磨料砂轮数控精密修整技术与装备项目(2012ZX04003101)

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

激光修整通常包含整形和修锐两道工序,最初是由印度学者 Babu^[2-3] 于 20 世纪 90 年代提出的一种加工效率高、适用性广的超硬磨料砂轮修整技术。激光修整技术是利用经光学系统聚焦的脉冲激光束照射砂轮,随着激光能量的沉积,靶材烧蚀区域发生受热升温、熔化和气化、气化物质高速喷出以及等离子体形成等一系列热力学现象,使得表面材料发生质量迁移现象,并使磨粒有效暴露出来,达到整形和修锐的目的。激光修整作为一种非接触式修整法,避开力的直接作用和硬接触,其实质是基于脉冲激光烧蚀的热力学机理,无疑是很有发展潜力的修整技术。

正是由于上述优点,近年来,国内外学者对激光修整技术深入开展了多方位的研究,并取得了重大的突破。Dold 等^[4] 用 Yb:YAG 脉冲皮秒激光切向整形单层电镀金刚石砂轮,研究了不同激光参数、工艺参数对修整效果的影响,实现了短脉冲激光对金刚石磨粒的无损加工,通过磨削对比试验证明了在合适的加工参数条件下,相比传统机械法而言,短脉冲激光整形法是一种非常高效且可靠的先进整形技术。Walter 等^[5] 采用脉冲光纤激光切向修整复合结合剂 CBN 成型磨具,系统研究了激光参数对砂轮的磨损特性、表面粗糙度以及几何尺寸稳定性的影响,实现了将砂轮表面微小凹槽的圆角半径控制在 $20\ \mu\text{m}$ 以内,最后开展了磨削对比试验,借助三维光学显微镜对工件的表面组织结构进行了检测。国内方面,康仁科等^[6-7] 利用 Nd:YAG 固体脉冲激光器对树脂和青铜结合剂金刚石进行了修整试验研究,对砂轮表面金属和树脂结合剂材料的去除机理进行了分析,建立了激光修锐超硬磨料砂轮时结合剂的去除模型。王艳等^[8] 用 YAG 激光对普通树脂结合剂砂轮进行了修锐试验和理论计算,使用激光三维扫描方法考察了砂轮修锐前后磨粒突出高度及有效磨粒数等变化特征,并用二氧化碳激光器对超硬磨料砂轮进行了修锐试验,对激光烧蚀过程进行了模拟仿真分析。湖南大学陈根余等^[9-11] 在激光修整超硬磨料砂轮方面做了大量的工作,他们采用声光调 Q Nd:YAG 脉冲激光对超硬磨料砂轮进行了修整试验,并与传统机械修整和连续激光修锐砂轮的磨削性能进行了比较。研究了声光调 Q Nd:YAG 脉冲激光和光纤激光修整超硬磨料砂轮的机理,总结了工艺参数对修整效果的影响特点和规律,并借助 Matlab 等商业软件对烧蚀过程进行了数值模拟研究。此外,他们在研发激光修整装备领域开展了

大量的试验,并取得了进展。

本文采用脉冲光纤激光器对青铜金刚石砂轮进行修锐试验,理论分析了激光修锐青铜金刚石砂轮的机理,试验研究了激光烧蚀青铜结合剂材料的情况,总结了激光平均功率和脉冲重复频率对烧蚀凹坑的微观形貌和几何形状的影响特点和规律,找到了有效的激光修锐参数。最后,根据烧蚀试验选择的最佳参数,开展了一系列脉冲激光修锐青铜金刚石砂轮试验,并采用光学显微镜和磨削对比试验对修锐后砂轮的形貌进行了检测和评价。

2 激光修锐青铜金刚石砂轮的机理

激光修锐青铜金刚石砂轮的原理图如图 1 所示,聚焦激光束就如一把基于热效应的非接触式微型切削“刀具”,将钝化的磨料尖端细细切碎,并去除砂轮表层局部微小区域的青铜结合剂材料,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。当高功率密度脉冲激光束辐照到砂轮表面,激光能量被迅速吸收并转化为热量,砂轮材料在很短的时间内迅速升温,固态金属首先熔化,继而出现气相。金属开始气化后,激光仍继续提供能量,这时金属被继续强烈加热,气化效应变得非常剧烈,同时出现高温蒸气等离子体。气相流和之后形成的等离子体冲击波就像一个高速活塞作用于砂轮表面,在材料表面产生强大的反冲压力,激光烧蚀区域的熔融金属在反冲压力的作用下形成强烈的喷射和飞溅,从而实现辐照区域的材料以液态和气态形式微量去除,形成烧蚀凹坑。当连续入射的激光脉冲离散地辐照于旋转的砂轮表面时,在砂轮表层将形成大量有序排列的烧蚀凹坑(图 2),脉冲激光修锐青铜金刚石砂轮最终所获得的砂轮表面形貌就取决于这些烧蚀凹坑的表面微观形貌及其分布规律是否合适。激光作用停止后,部分溅出的液相金属形成再结晶的球状物附着在砂轮表面,熔化而未溅出的液相金属在凹坑内部和周围形成再结晶层,所以在试验过程

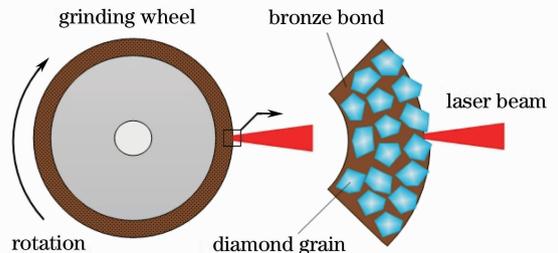


图 1 激光修锐原理

Fig. 1 Principle of laser dressing

中,采用辅助侧向吹气,达到去除烧蚀区域熔融物和冷却烧蚀区域的目的。

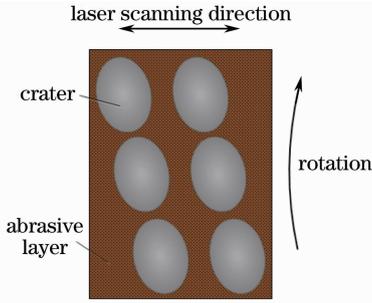


图2 激光烧蚀凹坑的分布

Fig. 2 Distribution of ablated craters

3 试验设备和方法

3.1 试验设备

试验装置原理图如图3所示。试验在 MGS-250AH 型普通平面磨床上进行,磨床主轴转速为 240 r/min。激光器是德国 IPG 生产的紧凑型脉冲掺镱光纤激光器,其平均输出功率 $P_{avg} = 10 \sim 48$ W,脉冲重复频率 $f = 50 \sim 150$ kHz,脉冲宽度 $\tau = 210$ ns,波长 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$,输出能量近似呈高斯分布。光束质量 $M^2 < 1.5$,采用焦距为 180 mm 的双凸透镜聚焦,焦斑直径为 $38 \mu\text{m}$ 。激光束经带金属护套的单模光纤传导、耦合至带有标准隔离器的激光烧蚀头。烧蚀头通过夹持器安装在 7STA01A 型电动平移台上,重复定位精度 $\delta < 5 \mu\text{m}$,试验中电控平台运动速度设为 0.1 mm/s 。辅助侧向吹气喷嘴的直径为 2 mm,辅助气体压力

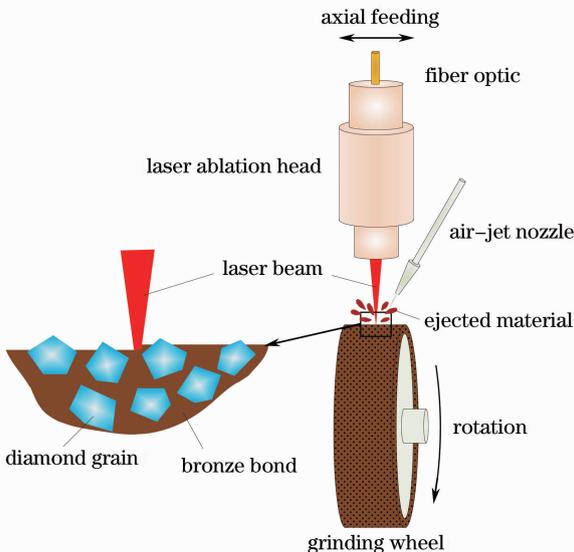


图3 激光修锐设备示意图

Fig. 3 Schematic of laser dressing setup

为 0.6 MPa。

3.2 试验材料和方法

修锐试验所用青铜金刚石砂轮的型号为 100D×10T×5X×31.75H/120,激光束沿砂轮表面内法线方向辐照砂轮,离焦量为 0。在激光修锐过程中,采用 LP-3C 型能量计实时测量和调节激光输出功率,使之与磨床主轴转速和激光烧蚀头的轴向进给速度相匹配。

在正式开始激光修锐青铜金刚石砂轮试验之前,首先开展了大量的激光烧蚀青铜结合剂材料的探索性试验。整个试验分为两个部分:首先,采用完全析因设计方法,在不加辅助侧吹气体的情况下进行多脉冲激光烧蚀青铜结合剂材料试验,借助超景深三维显微系统对激光烧蚀后的凹坑微观形貌和烧蚀深度以及凹坑孔径进行观测,确定激光参数与青铜结合剂材料去除率之间的定量关系。为了便于激光烧蚀凹坑的测量,试验所用的材料为不带金刚石磨粒的青铜结合剂光轮,烧蚀试验参数如表 1 所示。然后,在烧蚀试验的基础之上,选择最佳的激光参数,进行激光修锐青铜结合剂金刚石砂轮的试验,并通过光学显微镜和磨削对比试验对激光修锐后的砂轮形貌进行观察和评价。

表1 激光烧蚀试验参数

Table 1 Parameters of laser ablation test

Parameters	Value
Laser mode	single-mode
Laser average power (P_{avg}) /W	10~48
Pulse frequency (f) /kHz	50~150
Pulse width (τ) /ns	210
Spot diameter (d_0) / μm	38
Ablation time (t) / μs	120

4 试验结果

图4描述的是当激光重复频率固定为 110 kHz 时,不同激光平均功率条件下的烧蚀青铜轮效果图。可以看出,烧蚀凹坑孔径和深度都随激光功率的增大而增大,这是因为当激光功率较低时,熔化和蒸发机制是材料破坏去除的主要方式,烧蚀过程中产生的金属蒸气压力因不足以克服液体的表面张力和重力,熔融物质不能排出,材料去除率较低,凹坑边缘和周围的溅射重凝物较少,凹坑孔径和深度也较小,如图 4(b)和(c)所示;随着激光功率的增大,即激光功率密度越高,烧蚀过程中产生较多的金属蒸气和等离子体,进而演变成强烈的冲击波,致使高压蒸气

带着熔融金属从凹坑底部高速向外喷射,如同产生局部微型爆炸,凹坑孔径和深度迅速增大,如图4(d)所示。从图4(e)和(f)中可以发现,当激光功率进一步上升至40 W甚至48 W时,烧蚀凹坑周

围的热影响区变宽,青铜结合剂材料发生了变质,其颜色逐渐加深,这将严重损伤砂轮表层结合剂材料对金刚石磨粒的把持性能。

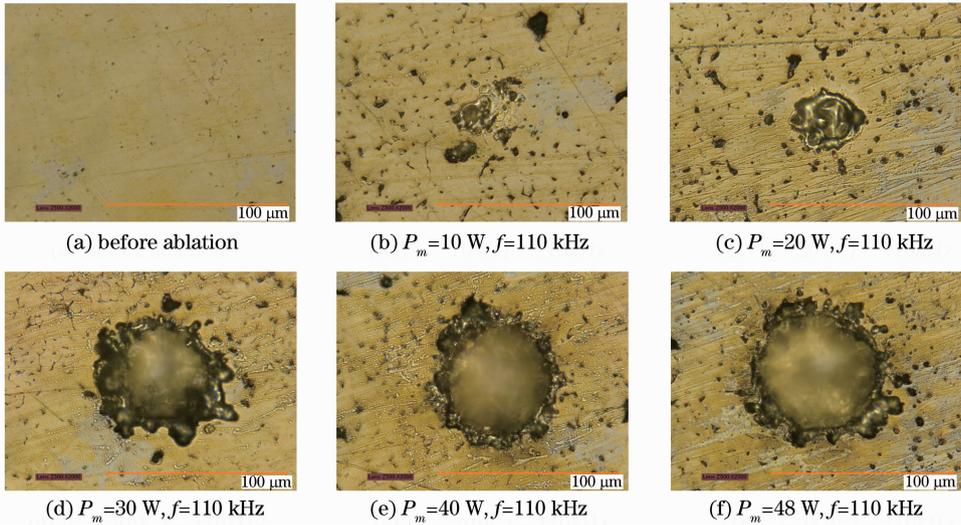


图4 激光平均功率对烧蚀凹坑的影响

Fig. 4 Influence of laser average power on the ablated craters

图5描述的是当激光功率固定为30 W时,不同激光重复频率条件下的烧蚀青铜轮效果图。可以发现,随着脉冲重复频率的增加,烧蚀凹坑的孔径和

深度均呈减小趋势。这是由于在同一激光平均功率条件下,脉冲重复频率越高,激光功率密度越小,因而导致激光烧蚀效率有所降低。

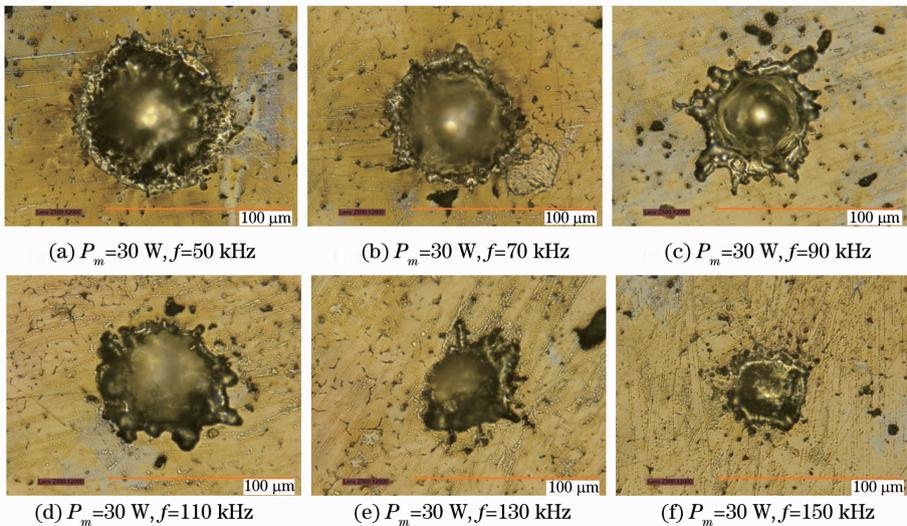


图5 激光脉冲重复频率对烧蚀凹坑的影响

Fig. 5 Influence of pulse repetition frequency on the ablated craters

激光修锐青铜金刚石过程中,结合剂材料的去除量(指烧蚀凹坑的体积,即由孔径和深度的统称)主要由单脉冲能量、线重合率以及脉冲重叠率决定。单脉冲能量取决于激光平均功率和脉冲重复频率;线重合率主要指激光束在砂轮表面的各条加工轨迹之间的轴向重合度,主要由激光束轴向进给速度决

定,因激光束的轴向速度设定为0.1 mm/s,故加工过程中线重合率不变。脉冲重叠率是指覆盖于砂轮表面的各个激光烧蚀凹坑在砂轮旋转方向上的重合度,主要取决于激光脉冲重复频率和砂轮旋转速度。从图6可知,烧蚀凹坑孔径随激光平均功率的增大而迅速增大,而随着脉冲重复频率的增加逐渐减小。

当脉冲重复频率为 110 kHz, 激光平均功率为 10 W 时, 烧蚀凹坑孔径只有 10 μm 左右, 而当功率增大至 48 W 时, 凹坑孔径值达到约 60 μm ; 当激光平均功率为 30 W, 脉冲重复频率为 50 kHz 时, 烧蚀凹坑的孔径值为 70 μm , 而当脉冲重复频率增大至 150 kHz 时, 凹坑的孔径值减小至 25 μm 左右。这主要是因为, 在激光烧蚀过程中, 在其他参数不变的条件下, 随着激光平均功率的增大和脉冲重复频率的减小, 尽管脉冲重叠率稍有减小, 但激光单脉冲能量却迅速增强, 所以烧蚀凹坑的孔径增加。从图中也可发现, 凹坑孔径随脉冲重复频率的变化要比随激光功率的变化速率缓慢一些, 所以可以推断在激光修锐砂轮过程中, 决定烧蚀凹坑孔径值最主要的影响因素是单脉冲激光能量。

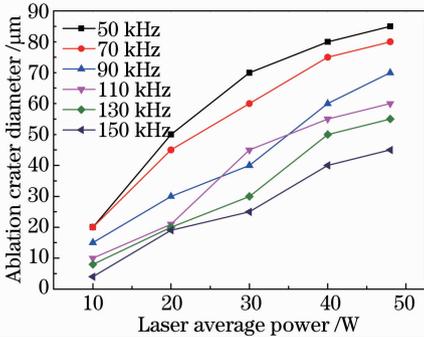


图 6 不同脉冲重复频率条件下烧蚀凹坑孔径随激光平均功率的变化

Fig. 6 Ablation crater diameter versus laser average power for various laser repetition frequencies

从图 7 可以看出烧蚀凹坑深度与激光平均功率和脉冲重复频率的关系。可以看到, 当脉冲重复频率为 110 kHz, 激光平均功率为 10 W 时, 烧蚀凹坑深度只有 2.5 μm 左右, 而当功率增大至 48 W 时, 凹坑深度值达到约 25 μm ; 当激光平均功率为 30 W, 脉冲重

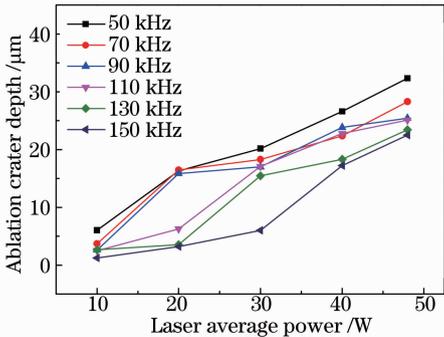


图 7 不同脉冲重复频率条件下烧蚀凹坑深度随激光平均功率的变化

Fig. 7 Ablation crater depth versus laser average power for various laser repetition frequencies

复频率为 50 kHz 时, 烧蚀凹坑的孔径值为 20 μm , 而当脉冲重复频率增大至 150 kHz 时, 凹坑的孔径值减小至 6 μm 左右。这主要是因为, 在激光烧蚀过程中, 在其他参数不变的条件下, 随着激光平均功率的减小和脉冲重复频率的增大, 激光单脉冲能量减小, 所以烧蚀凹坑的深度逐渐减小, 但同时脉冲重叠率却因为重复频率的增大而增大, 使得烧蚀凹坑的深度减小速率较为缓慢, 甚至出现反复。所以可以推断在激光修锐砂轮过程中, 烧蚀凹坑的深度同时由激光单脉冲能量和脉冲重叠率两个因素决定。

根据上述激光烧蚀试验的理论分析和观测结果可知, 当激光平均功率为 30 W, 脉冲重复频率为 110 kHz 时, 激光烧蚀青铜结合剂材料的去除效率较高, 烧蚀凹坑的表面微观形貌较为理想, 同时在烧蚀凹坑周围未观察到明显的热影响区, 结合剂未发生深层变质, 且溅射重凝物较少, 故最后选用此工艺参数对青铜金刚石砂轮进行约 20 min 的激光修锐试验。试验前, 先采用碳化硅滚轮与待修锐的青铜金刚石砂轮对滚一段时间, 使得金刚石砂轮表面平整, 无明显的金刚石磨粒突出(图 8), 这样有利于试验结果的观测和比较分析。

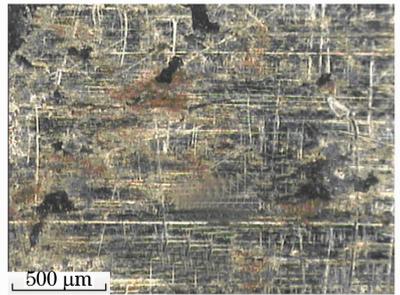


图 8 激光修锐前青铜金刚石砂轮表面形貌图
Fig. 8 Surface topography of grinding wheel without dressing

图 9 为采用光学显微镜观察到的激光修锐后砂轮表面局部区域的地形地貌图, 可以看到, 金刚石磨

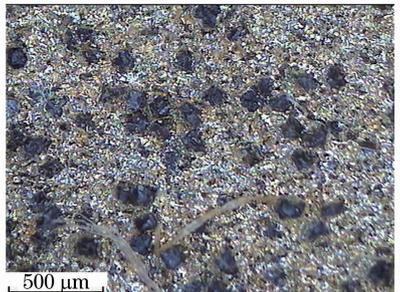


图 9 激光修锐后青铜金刚石砂轮表面形貌图
Fig. 9 Surface topography of laser dressed wheel

粒周围的青铜结合剂被有效、均匀去除,砂轮切削表面的金刚石磨粒没有出现大量脱落,且磨粒在砂轮表层分布均匀、高度差异较小。试验观察并没有发现激光束对青铜结合剂和金刚石磨粒造成的热损伤,砂轮表面具有良好的形貌。

为了更好地评价激光修锐青铜金刚石砂轮的效果,本文分别用激光和传统方法(SiC 砂轮)修锐的青铜金刚石砂轮,在相同试验条件下磨削硬质合金(牌号:YT5)材料,采用 Kistler 三相压电磨削力测量仪测量了磨削过程中法向磨削力与切削深度的关系,如图 10 所示。可以发现,激光修锐的青铜金刚石砂轮在磨削过程中产生的法向磨削力要比用传统方法修锐的小。这表明用传统方法修锐的青铜金刚石砂轮与硬质合金表面发生了较为严重的摩擦,这将使得金刚石砂轮磨损加剧。相反,激光修锐的砂轮因金刚石磨粒凸出结合剂较多,切削刃较锐利,磨削时与工件表面间的摩擦力较小,砂轮磨粒不容易钝化,砂轮磨削性能较好。

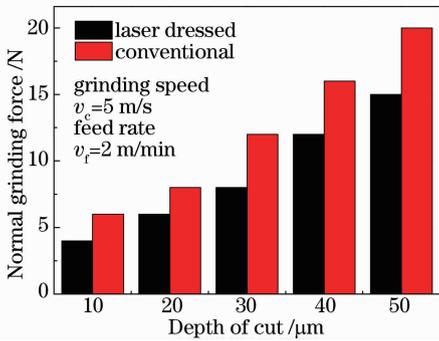


图 10 激光和传统修锐砂轮的法向磨削力与切削深度的关系

Fig. 10 Normal grinding force versus depth of cut for laser and conventional (SiC) dressed wheel

5 结 论

理论研究了激光修锐青铜金刚石砂轮的机理,开展了脉冲光纤激光烧蚀青铜轮试验,并采用超景深三维显微系统对激光烧蚀凹坑的微观形貌、溅射重凝物以及凹坑周围热影响区进行了观测,总结了烧蚀凹坑孔径和深度随激光平均功率和脉冲重复频率的变化规律。研究发现凹坑孔径和深度都随激光功率的增大呈增大趋势,随脉冲频率的增大呈减小趋势,但是激光平均功率是决定烧蚀效率的主要因

素。最后,采用烧蚀试验选择的最佳工艺参数($P_{\text{avg}}=30\text{ W}$, $f=110\text{ kHz}$)对磨钝后的青铜金刚石砂轮进行激光修锐,使得金刚石磨粒重新凸出在青铜结合剂之外,磨粒高度差异较小,且其均匀分布在砂轮表层,砂轮具有良好的表面形貌。通过磨削对比试验发现激光修锐的青铜金刚石砂轮的法向磨削力要比用传统方法修锐的小,砂轮具有更优良的磨削性能。

参 考 文 献

- X Z Xie, G Y Chen, L J Li. Dressing of resin-bonded superabrasive grinding wheels by means of acousto-optic Q-switched pulsed Nd:YAG laser[J]. Optics & Laser Technology, 2004, 36: 409-419.
- N R Babu, V Radhakrishnan, Y S Mufti. Investigation on laser dressing of grinding wheels Part I: preliminary study[J]. J Engineering for Industry, Transaction of ASME, 1989, 111: 244-252.
- N R Babu, V Radhakrishnan. Investigation on laser dressing of grinding wheels Part II: grinding performance of a laser dressed aluminum oxide wheel [J]. J Engineering for Industry, Transaction of ASME, 1989, 111: 253-261.
- C Dold, R Transchel, M Rabiey, et al.. A study on laser touch dressing of electroplated diamond wheels using pulsed picosecond laser sources[J]. CIRP Annals, 2011, 60(1): 363-366.
- C Walter, M Rabiey, M Warhanek, et al.. Dressing and truing of hybrid bonded CBN grinding tools using a short-pulsed fiber laser[J]. CIRP Annals, 2012, 61(1): 279-282.
- R K Kang, J T Yuan, Y P Zhang, et al.. Truing of diamond wheels by laser[J]. Key Engineering Materials, 2001, 202-203: 137-142.
- Kang Renke, Yuan Jingting, Shi Xingkuan, et al.. Study on laser dressing of superabrasive grinding wheels [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 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, 5: 493-496.
- 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.
- 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.
- Chen Genyu, Mei Lifang, Zhang Bi, 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.
- 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.

栏目编辑:宋梅梅