

激光宏观结构化金刚石砂轮磨削氧化铝工艺

李 颢 彭福远 康忠雄

(湖南理工学院机械工程学院, 岳阳 414006)

文 摘 为了研究砂轮表面结构化对砂轮磨削性能的影响,利用脉冲激光对树脂结合剂金刚石砂轮进行了表面宏观结构化。采用6种不同类型的金刚石砂轮表面宏观结构进行了氧化铝的磨削实验,建立了激光宏观结构化金刚石砂轮的磨削力模型,比较了6种不同激光宏观结构化金刚石砂轮与非结构化砂轮在不同磨削参数下磨削力的差异,分析了砂轮制造后的表面形貌与结构化砂轮的磨损特性。实验结果表明,砂轮宏观结构化对磨削性能有很大影响,激光宏观结构化砂轮的磨削力可以减小2.5%~24.5%,砂轮结构化后的表面形貌出现石墨化现象;宏观结构化砂轮沟槽边缘磨损加剧,但沟槽磨损并没有明显加快宏观结构化砂轮的磨损。

关键词 激光宏观结构化,激光烧蚀,氧化铝陶瓷,磨削力,形貌

中图分类号: TG580.6

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2020.02.013

Process Experimental of Laser Macro-structured Diamond Grinding Wheels for Alumina Grinding

LI Si PENG Fuyuan KANG Zhongxiong

(College of Mechanical Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006)

Abstract In order to study the effect of surface structuring on the grinding behavior of the grinding wheel, novel laser structuring method using pulsed laser was proposed and applied to produce certain macro patterns on the surface of resin bonded diamond grinding wheel. The grinding experimental of alumina ceramic was carried out by using six type different patterns of diamond grinding wheel surface. The grinding force model of laser macro-structured diamond grinding wheel was established. The grinding force between six different laser macro-structured diamond grinding wheel and non-structured was compared under different grinding parameters. The grinding wheel surface morphology after manufacturing and the wear behavior were analyzed. The experimental results shows that the type of surface pattern has a strong influence on the grinding results. The grinding force of laser macro-structured grinding wheels can be reduced by 2.5% to 24.5%. The graphitization phenomenon appears on the surface morphology of the structured grinding wheel. The wear of the groove edge is aggravated. The groove wear doesn't reveal a significant increase in wear of the structured grinding wheel.

Key words Laser macro-structuring, Laser ablation, Alumina ceramic, Grinding force, Topography

0 引言

氧化铝陶瓷具有高硬度、高强度、高耐热性、高温耐磨性、低断裂韧性等特点^[1]。研究人员在陶瓷磨削加工领域进行了大量研究。例如,丁文锋等^[2-3]研究了单层钎焊立方氮化硼(CBN)超硬磨料砂轮对颗粒增强钛基复合材料(PTMCs)和(TiC_p+TiB_w)/Ti-6Al-4V复合材料进行高速磨削加工的加工性能。杨长勇等^[4]研究了陶瓷结合剂CBN砂轮磨削镍基铸造高温合金K418的磨削性能。俞新华等^[5]研究了陶瓷结合剂CBN砂轮在

不同工艺条件下对钛合金TC4进行高速磨削加工的加工性能。伍俏平等^[6]利用模压成型技术和真空钎焊技术制备了多层钎焊金刚石砂轮,并开展了基于多层钎焊金刚石砂轮在线电解修整技术的超细晶硬质合金精密磨削性能研究。T. Sornakumar等^[7]研究了CBN砂轮磨削氧化铝和部分稳定氧化锆复合材料的磨削性能。由于磨削过程的复杂性,导致了超硬磨料砂轮在磨削过程中精度和效率受到限制。

为提高超硬磨料砂轮的磨削效率和精度,研究

收稿日期:2019-08-05

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(NO:16C0720)

第一作者简介:李颢,1963年出生,高级实验师,主要从事机电一体化研究工作。E-mail: lisi@163.com

人员提出了一系列方法和措施。研究人员将砂轮结构化作为调节方法,发现结构化超硬磨料砂轮能够在不同程度上提高工件的加工效率和精度。K. Nakayama等^[8]研究了螺旋槽对传统陶瓷黏结剂砂轮磨削性能的影响。张伟等^[9]使用脉冲激光对大磨粒金刚石砂轮表面进行了微沟槽结构化加工,研究了大磨粒表面结构化砂轮磨削BK7光学玻璃的磨削性能。J. F. G. Oliveira等^[10]提出了一种利用砂轮修整器在金刚石砂轮表面雕刻各种结构的新型修整技术,通过对比表面结构化砂轮在不同磨削功率条件下的工件粗糙度,表明磨削功率的减小将导致工件粗糙度的增大。丁文锋等^[11]使用单层电镀和钎焊方法对砂轮进行了结构化,这种制造方法操作困难且耗时。虽然许多研究人员对砂轮结构化进行了大量的研究,并做出了卓越的贡献,但他们只是针对砂轮的微观进行研究。

本文通过对氧化铝陶瓷进行磨削实验,研究金刚石砂轮宏观结构化特性。对比激光宏观结构化磨削(LMSG)和传统磨削(CG)磨削力的大小,讨论砂轮转速和磨削深度对磨削力的影响,并对宏观结构化砂轮的磨损进行分析和讨论。

1 实验

1.1 激光结构化

采用IPG脉冲光纤激光对树脂结合剂金刚石砂轮表面进行结构化,所选砂轮详细规格见表1。

表1 树脂结合剂金刚石砂轮规格

Tab. 1 The specifications of resin-bonded diamond grinding wheels

砂轮外径/mm	孔径/mm	厚度/mm	磨料层深度/mm	粒径/ μm	浓度/%	结合剂	磨料
200	32	20	4	120	75	树脂	金刚石

砂轮表面生成的结构被细分为若干部分,为了在相同结构化区域上实现有效的结构化过程,区段宽度必须是圆周方向上沟槽间距的 N 倍。结构化示意图如图1所示。

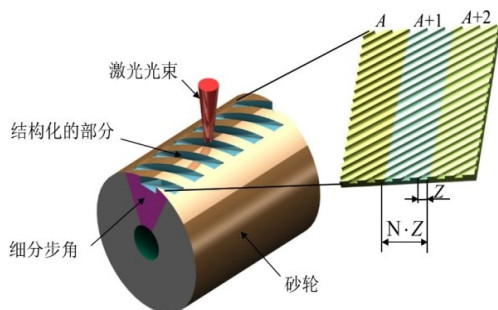


图1 激光结构化方法和形状排布

Fig. 1 Illustration of the laser structuring method and the pattern segment arrangement

所有激光烧蚀实验均在相同参数下进行。表2所示为激光烧蚀砂轮结构化表面的参数,经过12次烧蚀,得到 $D=0.85\text{ mm}$ 的理想沟槽深度。

表2 激光结构化参数

Tab. 2 Laser structuring parameters

焦距 f/mm	光斑直径 $d_f/\mu\text{m}$	平均激光功率 P_{avg}/W	脉冲频率 f_p/kHz	扫描速度 $v_s/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
105	60	17.5	50	2 500

设计了6种不同的结构化类型。图2描述了生成的结构形状及其尺寸,结构化砂轮特征尺寸包括沟槽宽度 L ,沟槽间距 S ,方向角 γ 和沟槽深度 D 。图2中模型高度为图1中区段宽度。根据结构类型的不同,在平均激光功率为17.5 W时,每个砂轮表面的烧蚀时间分别在2~5 min不等。

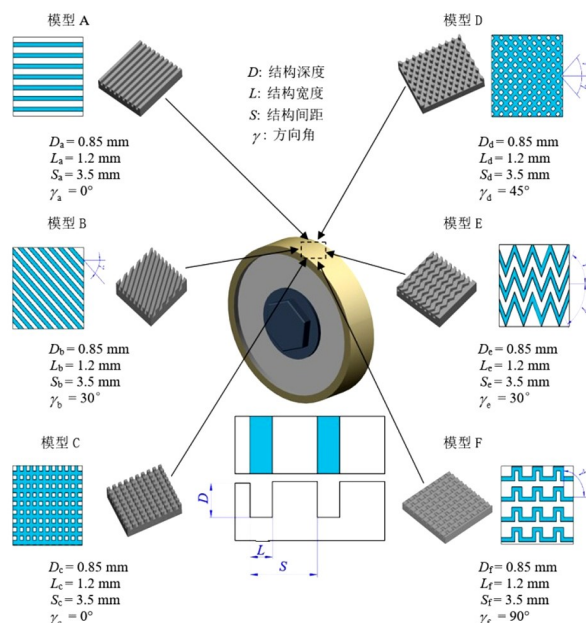


图2 结构化模型及其特征尺寸

Fig. 2 Structuring patterns and their specified dimension

1.2 磨削实验

激光宏观结构化砂轮和非结构化砂轮均经过一系列磨削实验。使用SBS4500型动平衡仪,砂轮平衡速度为50 m/s,修整平移速度为300 mm/min,修整深度为 $6\ \mu\text{m}$ 。在修整过程中,将3%的W20型水基冷却剂溶液以25 L/min的流速喷入金刚石砂轮和整形砂轮的接触区域。在磨削过程中,将3%的W20型水基冷却剂溶液以16 L/min的流速喷入到磨削区域。磨削方向与图2中所示模型垂直方向平行,即磨削方向与砂轮表面结构化纹理方向所成夹角为 $(90^\circ-\gamma)$ 。采用不同砂轮磨削速度、磨削深度和恒定进给速度进行一系列实验,研究磨削参数对砂轮磨削性能的影响。磨削实验参数如表3所示。在每组参数下,磨削过程至少重复三次,法向和切向磨削力通过取平均值求得。每次磨削实验结

束后,进行大约7~13次电火花放电测试,以确定下一步实验的稳态条件。

表3 磨削实验参数

Tab. 3 Parameters of grinding experiments

$v_s/m \cdot s^{-1}$	$a_p/\mu m$	$v_f/mm \cdot min^{-1}$	切削液	磨削方式
40;60;80	10;20;30	1 000	W20型水基冷却剂	顺磨

1.3 实验设备及材料

使用YCP-1-120-50-50-HC-RG型IPG光纤激光器对砂轮表面进行激光烧蚀。该激光器的平均功率(P_{avg})为1~50 W,脉冲频率(f)为1~200 kHz,脉冲宽度(τ)为0.2~25 ms,波长(λ)为1 064 nm。在MGK7120型磨床上进行磨削实验。砂轮为SDC120N75B型。

实验试件为中国沈阳宏扬公司生产的氧化铝陶瓷。物理性质包括纯度为99.6%,密度为3.7 g/cm³,弹性模量为382 GPa,线胀系数为8.2×10⁻⁶/K,热导率为33.5 W/(m·K),弯曲强度为500 MPa,断裂韧度为5.3 MN·m^{3/2},脆性为3 400 m^{-1/2},维氏硬度为18.3 GPa,热扩散率为1.06×10⁻⁵ m²/s。试件尺寸为30 mm×30 mm×10 mm。

采用Kistler仪器公司生产的Kistler 9257B型测力计测量砂轮的法向和切向磨削力。磨削力信号由计算机通过数据采集系统进行记录,再由LABVIEW软件进行滤波。使用VHX-5000型超景深(ULDF)显微镜观察用酒精清洁过的工件表面。

2 结果与分析

2.1 磨削力

2.1.1 建立结构化磨削的磨削力模型

在砂轮结构化磨削中,磨削力是影响磨削性能、成形精度和表面/亚表面质量的关键因素。为提高工件表面质量,磨削力是需要控制的最基本因素。

根据脆性材料的压痕断裂力学,磨削时工件表面会产生径向裂纹和横向裂纹。当磨削深度超过脆性-韧性过渡的临界深度时,通过在工件表面传播横向裂纹来实现材料的去除。材料去除量由横向裂纹的长度和深度决定。根据王岩^[12]和B. R. Lawn^[13]的研究结果,横向裂纹的长度和深度与断裂韧性、工件硬度和法向磨削力有关。 n_s 为主轴转速, v_f 为进给速度, a_p 为磨削深度, B 为砂轮宽度, ε 为宽度系数, W 为砂轮有效宽度, d_s 为磨削轨迹长度, k_1 、 k_2 、 k 为比例系数。

横向裂缝长度如式(1)^[12-13]所示:

$$C_1 = k_1 \left(\frac{F_n}{K_{IC}} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (1)$$

式中, K_{IC} 为断裂韧性。

横向裂缝深度如式(2)^[12-14]所示:

$$C_h = k_2 \left(\frac{F_n}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中, H 为维氏硬度。

单位时间内单颗磨粒的轨迹长度 l 见式(3):

$$l = \sqrt{\left(1 + \frac{v_f}{v_s}\right)^2 a_p d_s} \quad (3)$$

有效宽度如式(4)所示:

$$W = \varepsilon B \quad (4)$$

材料总去除量 V 如式(5)所示:

$$V = 2C_1 C_h L A = a_p v_w W \quad (5)$$

式中, A 为接触区金刚石砂轮中磨粒数。

通过式(1)~式(3)、式(5),可以得到单颗磨粒的法向磨削力 F_s ,如式(6)所示:

$$F_s = \left(\frac{\frac{30 \arccos\left(1 - \frac{2a_p}{d_s}\right)}{\pi n_s} K_{IC} \frac{3}{4} H^{\frac{1}{2}} N_s^2 (\tan \alpha)^{-1}}{2.99k \left(\frac{d_s}{a_p v_s v_f^2}\right)^{\frac{1}{3}} \sqrt{\left(1 + \frac{v_f}{v_s}\right)^2 a_p d_s}} \right)^{\frac{4}{5}} \quad (6)$$

式中, N_s 为宏观结构化金刚石砂轮单位体积磨粒数, α 为宏观结构化砂轮磨粒角锐度。

法向磨削力 F_{n-LMSG} 为多颗磨粒法向磨削力之和。通过式(6),得到式(7)中的法向磨削力 F_{n-LMSG} :

$$F_{n-LMSG} = \left(\frac{\frac{30 \arccos\left(1 - \frac{2a_p}{d_s}\right)}{\pi n_s} K_{IC} \frac{3}{4} H^{\frac{1}{2}} N_s \frac{17}{6} (\tan \alpha)^{-\frac{17}{12}} W^{\frac{5}{4}}}{1.824k \left(\frac{v_s}{d_s a_p 14 v_f 13}\right)^{\frac{1}{12}} \sqrt{\left(1 + \frac{v_f}{v_s}\right)^2 a_p d_s}} \right)^{\frac{4}{5}} \quad (7)$$

切向磨削力 F_{t-LMSG} 与宏观结构化磨削过程中的法向磨削力 F_{n-LMSG} 呈线性关系:

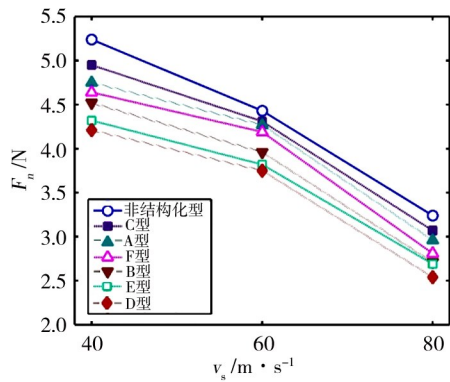
$$F_{t-LMSG} = \eta \left(\frac{\frac{30 \arccos\left(1 - \frac{2a_p}{d_s}\right)}{\pi n_s} K_{IC} \frac{3}{4} H^{\frac{1}{2}} N_s \frac{17}{6} (\tan \alpha)^{-\frac{17}{12}} W^{\frac{5}{4}}}{1.824k \left(\frac{v_s}{d_s a_p 14 v_f 13}\right)^{\frac{1}{12}} \sqrt{\left(1 + \frac{v_f}{v_s}\right)^2 a_p d_s}} \right)^{\frac{4}{5}} \quad (8)$$

式中, η 为摩擦因数。

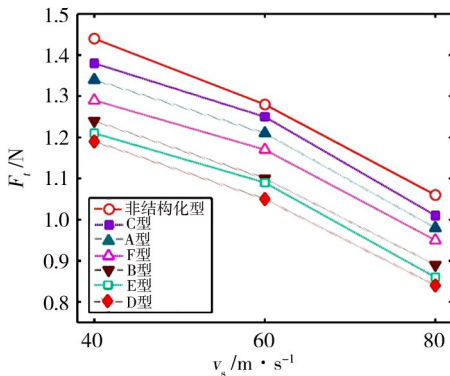
2.1.2 法向磨削力和切向磨削力分析

图3和图4描述了磨削参数与磨削力的关系。

通过分析磨削力测量结果,可以看出砂轮宏观



(a) F_n 与 v_s 关系



(b) F_i 与 v_s 关系

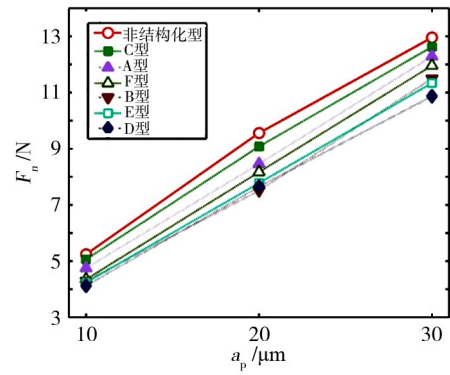
图3 磨削力与砂轮转速的关系。

Fig. 3 The relationship between grinding forces and wheel speeds

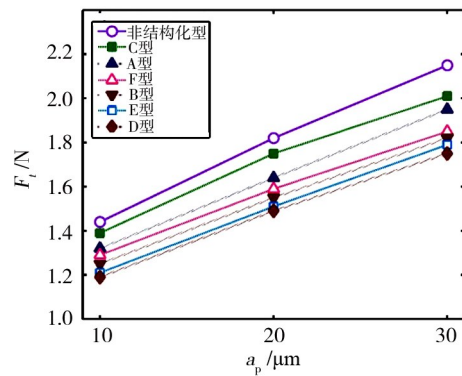
结构化对磨削力有显著的影响,不同宏观结构化砂轮的磨削力区别很大。法向磨削力和切向磨削力在大小上均遵循以下顺序:非结构化型>模型C>模型A>模型F>模型B>模型E>模型D。图3和图4显示出,在不同实验参数下,与非结构化砂轮相比,D型砂轮的 F_n 和 F_i 大约降低20%,B型和E型砂轮的磨削力降低10%~19.5%,F型砂轮的磨削力降低5%~15%,A型砂轮的磨削力降低5%~11%,C型砂轮的磨削力降低2%~7%。

如图3所示,法向磨削力和切向磨削力随砂轮转速的增大而减小。实验数据验证了式(7)和式(8)的正确性,法向、切向磨削力的计算值与测量值相对误差在5%~10%。例如,当磨削深度为10 μm ,进给速度为1000 mm/min,砂轮转速为40 m/s时,C型结构化砂轮法向和切向磨削力的测量值分别为4.95 N和1.38 N。通过式(7)和式(8)计算出的法向和切向磨削力分别为4.65 N和1.28 N。测量值与计算值之间的误差介于6%~7.2%。由于砂轮转速的增加,磨削深度和参与磨削的有效磨粒数减少,导致磨削力降低。因此,较低的磨削力进一步表明,在砂轮发生失效前,结构化砂轮可以取得更高的磨削效率。

如图4所示,磨削深度越大,磨削力越大。随着



(a) F_n 与 a_p 关系



(b) F_i 与 a_p 关系

图4 磨削力与磨削深度的关系。

Fig. 4 The relationship between grinding forces and depths of cut

磨削深度的增加,凹槽边缘与工件的摩擦加剧,更多的磨粒参与磨削,从而增大了磨削力。

宏观结构化砂轮磨削获得较低磨削力主要归因于沟槽边缘磨粒凸起较高,提高了磨削时砂轮自锐性,增大了磨削过程中冷却液的储存空间。

2.2 激光烧蚀后砂轮的三维形貌

使用VHX-5000型超景深显微镜观察宏观结构化金刚石砂轮的表面形貌。图5为激光烧蚀后的四种宏观结构化砂轮(A型、D型、E型、F型)表面形貌,砂轮表面的纹理清晰可见。然而,与原始状态相比表面可见大量的磨粒和磨料痕迹,这可能导致磨削力分布不均匀。如图5(a)至图5(d)所示,大部分磨粒从表面凸起,这主要是由于黏结剂和磨粒的不均匀分布导致的。由于金刚石在空气中的热稳定性差(在温度<1000 $^{\circ}\text{C}$ 时热稳定),在激光烧蚀时烧蚀区产生过高的温度使金刚石磨粒石墨化,导致磨粒表面逐渐失去其原有的光泽并最终变黑。这在公式中描述为: $\text{C}_{\text{diamond}} + \text{O}_2 \rightarrow \text{C}_{\text{graphite}} + (\text{CO} + \text{CO}_2) \uparrow$ [15]。金刚石磨粒石墨化使金刚石内部晶体结构遭到破坏,其强度和导热性能均降低,导致砂轮磨削力增大和砂轮磨损加剧。这种变化将显著影响砂轮表面金刚石磨粒的磨削性能。

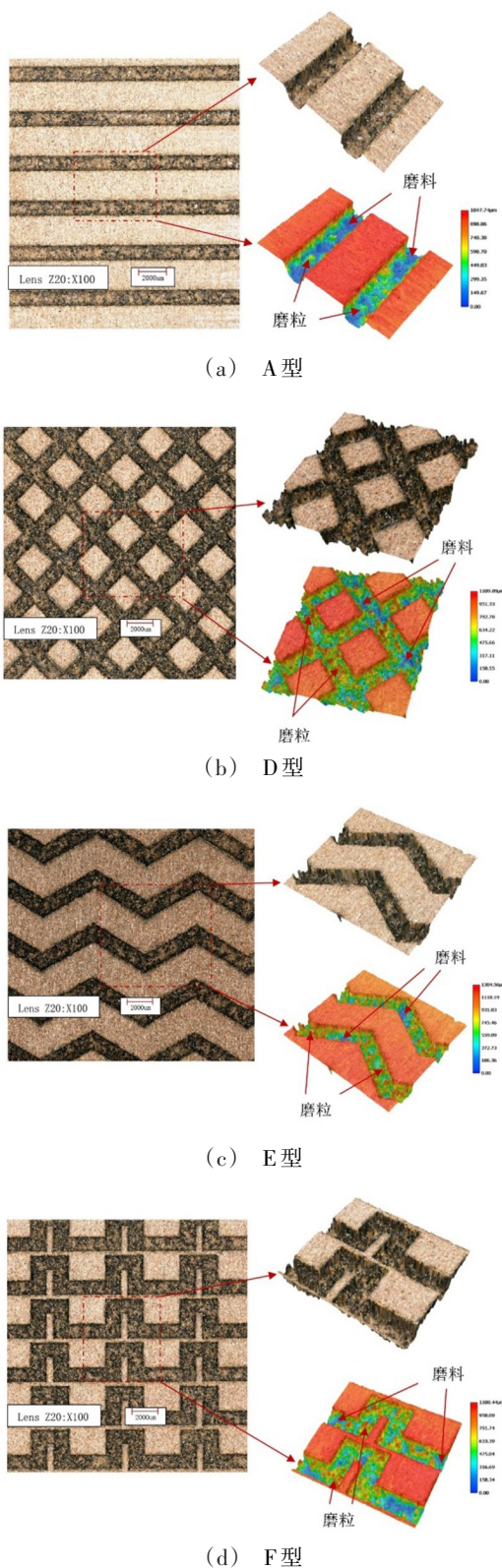


图5 激光宏观结构化砂轮的光学显微镜图像及三维形貌
Fig. 5 Optical microscope images of laser structured grinding wheel and corresponding 3D topography

2.3 砂轮磨损

在超景深(ULDF)显微镜下观察砂轮磨削后的表面,表面形貌如图6所示。通过观察A型和E型砂轮磨削后的表面,仍然可以看到砂轮磨损表面的结

构化痕迹,磨损主要发生在宏观结构化表面的沟槽边缘附近。砂轮表面有大量磨粒脱落的现象,由于砂轮宏观结构化使沿结构化纹理方向所能承受的最大切向磨削力降低,砂轮结构化纹理方向所能承受的最大切向磨削力在砂轮结构化表面各方向承受最大切向磨削力中为较小值,导致磨粒脱落方向与结构化纹理的走向几乎完全相同。结果表明,不同宏观结构化砂轮沟槽边缘的磨损情况和磨粒的脱落方式存在很大的区别,结构化的几何形状可能是造成沟槽边缘磨损行为的主要原因。但是,沟槽边缘磨损对宏观结构化砂轮的轮廓没有显著影响。

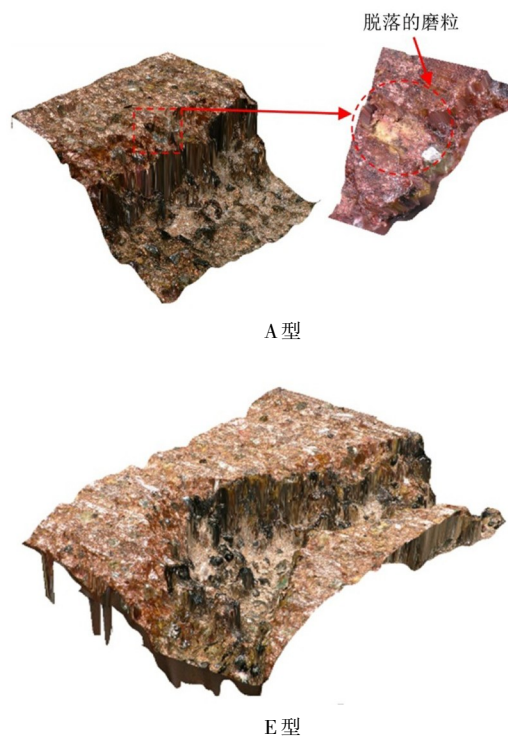


图6 A型和E型砂轮磨削后的表面三维超景深显微图
Fig. 6 ULDF micrographs of the grinding wheel surface with pattern A and E after the grinding

3 结论

提出了一种新型砂轮表面宏观结构化方法,通过使用激光烧蚀技术在树脂结合剂金刚石砂轮表面进行表面结构化。对宏观结构化砂轮的磨削性能进行了实验,研究了几何结构形状对砂轮磨削性能的影响,并与非结构砂轮进行了对比,砂轮宏观结构化对磨削性能有很大影响。通过以上分析和讨论,可以得出以下结论。

(1)基于不同结构化砂轮的不同磨削力,有必要建立磨削力模型来验证实验数据。与非结构化砂轮相比,宏观结构化砂轮的磨削力减小了2.5%~24.5%。这归因于较小的摩擦和较好的润滑冷却效

果,以及沟槽良好的磨削液输送能力。

(2)使用超景深(ULDF)显微镜观察了脉冲激光烧蚀后的树脂结合剂金刚石砂轮表面三维形貌。发现了激光烧蚀后磨粒发生石墨化。对于砂轮磨损,未观察到宏观结构化砂轮磨损的明显增加。

在今后的研究工作中,可以研究沟槽宽度、开槽深度、曲率半径等结构尺寸对结构化砂轮磨削性能的影响,以确定最优配置,从而更好地了解宏观结构化砂轮的磨削性能。

参考文献

[1] ZHANG X H, CHEN G Y, AN W K, et al. Experimental investigations of machining characteristics of laser-induced thermal cracking in alumina ceramic wet grinding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(9-12):1325-1331.

[2] XI X X, DING W F, ZHENG L, et al. High speed grinding of particulate reinforced titanium matrix composites using a monolayer brazed cubic boron nitride wheel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(5-8):1529-1538.

[3] ZHAO B, DING W F, DAI J B, et al. A comparison between conventional speed grinding and super-high speed grinding of $(\text{TiC}_p+\text{TiB}_w)/\text{Ti-6Al-4V}$ composites using vitrified CBN wheel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(1-4):69-75.

[4] 杨长勇,徐九华,顾坤坤,等.陶瓷CBN砂轮磨削镍基铸造高温合金K418磨削力研究[J].机械科学与技术,2014,33(5):657-661.

YANG C Y, XU J H, GU S S, et al. Study on grinding force of nickel-based superalloy K418 with CBN grinding wheel vitrified bond [J]. Mechanical Science & Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(5):657-661.

[5] 俞兴华.陶瓷结合剂CBN砂轮高速磨削钛合金(TC4)的实验研究[D].泉州:华侨大学,2011.

YU X H. Experimental study on high speed grinding of titanium alloy (TC4) with vitreous bond CBN wheel [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2011.

[6] 伍俏平,王煜,赵恒,等.基于多层钎焊金刚石砂轮在线电解修整技术的超细晶硬质合金精密磨削研究[J].机械工

程学报,2018,54(21):212-220.

WU Q P, WANG Y, ZHAO H, et al. Research on precision grinding of ultrafine carbide based on on-line electrolytic dressing technology of multi-layer brazed diamond grinding wheel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(21):212-220.

[7] SORNAKUMAR T, GOPALAKRISHNAN M V, ANNAMALAI V E, et al. CBN wheel grinding of alumina and partially stabilized zirconia ceramic-ceramic composites [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 1995, 13(4):181-185.

[8] NAKAYAMA K, TAKAGI J, ABE T. Grinding wheel with helical grooves—an attempt to improve the grinding performance [J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 1977, 25(1):133-138.

[9] 张伟.基于激光加工方法的大磨粒金刚石砂轮表面结构化研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

ZHANG W. Study on surface structure on large abrasive diamond grinding wheel based with laser machining method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[10] OLIVEIRA J F G, BOTTENE A C, FRANKCA T V. A novel dressing technique for texturing of ground surfaces [J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2010, 59(1):361-364.

[11] DING W F, BARBARA L, ZHU Y J, et al. Review on monolayer CBN superabrasive wheels for grinding metallic materials [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(1):109-134.

[12] WANG Y, LIN B, WANG S, et al. Study on the system matching of ultrasonic vibration assisted grinding for hard and brittle materials processing [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 77(1):66-73.

[13] LAWN B R, EVANS A G, MARSHALL D B. Elastic/plastic indentation damage in ceramics: The median/radial crack system [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1980, 63(9-10):561-566.

[14] SILVA E J, KIRSCH B, BOTTENE A C, et al. Manufacturing of structured surfaces via grinding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243:170-183.

[15] DENG H, CHEN G Y, ZHOU C, et al. A theoretical and experimental study on the pulsed laser dressing of bronze-bonded diamond grinding wheels [J]. Applied Surface Science, 2014, 314(10):78-89.