

Al₂O₃ 陶瓷的激光辅助磨削机理

马哲伦, 于奎东, 董金龙, 于天彪

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对氧化铝陶瓷难加工、加工表面质量差等问题,进行了激光辅助热磨削加工的研究. 根据氧化铝陶瓷的热物理性能参数,分析了激光辅助磨削热加工机理,搭建激光辅助磨削加工实验系统,进行激光辅助磨削与常规磨削加工实验. 采用扫描电子显微镜(SEM)和激光共聚焦分析加工后的工件表面. 结果表明:采用激光辅助磨削加工氧化铝陶瓷可改变材料的去除方式,使陶瓷的脆性去除变为塑性去除;与常规磨削加工相比,加工表面形貌脆性断裂减少,表面粗糙度值更低,表面质量更好,砂轮使用寿命延长.

关 键 词: 激光辅助磨削;氧化铝陶瓷;塑性去除;表面质量;脆性断裂

中图分类号: TG 580

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2020)04-0541-06

Laser-Assisted Grinding Mechanism of Al₂O₃ Ceramics

MA Zhe-lun, YU Kui-dong, DONG Jin-long, YU Tian-biao

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: YU Tian-biao, E-mail: tbyu@me.neu.edu.cn)

Abstract: Aiming at the problems of difficult processing of alumina ceramics and poor surface quality, laser-assisted heating grinding was studied. According to the thermophysical performance parameters of alumina ceramics, the laser-assisted heating grinding mechanism was analyzed, a laser-assisted heating grinding experimental system was built, laser-assisted heating grinding and conventional grinding experiments were performed. The scanning electron microscopy (SEM) and laser confocal analysis were used to analyze the processed workpiece surfaces. The results showed that alumina ceramics can change the material removal method and make the ceramic brittle removal into plastic removal by using the laser-assisted heating grinding. Compared with conventional grinding, the morphology of the processed surface has less brittle fracture, lower surface roughness value, better surface quality and longer service life of the grinding wheel.

Key words: laser-assisted grinding; alumina ceramics; plastic removal; surface quality; brittle fracture

陶瓷材料是典型的硬脆材料,具有高强度、高耐磨性、高硬度、低导热导电性和化学稳定性等优点,能够在恶劣的工作环境下保持稳定性能,具有很高的机械强度和抗磨损能力^[1]. 工程陶瓷材料已逐渐应用于化工、航空航天、石油勘探、冶金、机械、电子、国防、尖端科学技术和医疗,其地位越来越重要,已经成为现代工程结构材料的重要支柱之一,具有十分广阔的应用前景^[2]. 但是由于陶瓷材料固有的硬度和脆性,金刚石砂轮磨削陶瓷材料是目前应用最广泛的加工方法^[3-4]. 传统的金刚石砂轮磨削虽然可以满足工业应用中的一般

要求,但其主要问题是加工成本高,占产品总成本的60%~90%^[5-6]. 在提高材料去除率、延长刀具使用寿命和提高工件表面质量等方面,陶瓷加工方法是迫切需求的一种新方法.

激光辅助加工(LAM)被认为是提高陶瓷材料去除率的一种很有前途的技术. 激光辅助加工是将激光照射在切削工具前端的待去除材料表面,使其温度升高、材料变软、变形并具有延展性,可以改变陶瓷材料的去除方式,降低了陶瓷的屈服强度,使其低于断裂强度,但并不使陶瓷材料的温度高于其熔点,使其形态发生改变. 所以,要严

格控制激光功率与激光预热时间,才不会在工件的加工表面产生不良的热损伤副作用. 激光辅助加工不仅有效降低了加工过程中的切削力,而且改善了难加工材料特别是结构陶瓷材料的可加工性和加工质量. 激光辅助加工已经在许多不同的材料上以不同的形式进行了试验^[6-7]. 激光辅助切削加工是将激光和传统加工结合在一起的新型复合加工技术,在硬脆材料的加工方面应用广阔. 目前经常采用的激光辅助切削加工方式、激光器类型、刀具材料和工件材料如表 1 所示^[8].

1 试验材料和方法

试验磨削加工中选用 99 氧化铝陶瓷试件,试件尺寸为 50 mm × 50 mm × 2 mm. 砂轮为电镀 CBN 砂轮,直径 12 mm,磨粒粒度为 200#. 图 1 为砂轮与工件的图片.

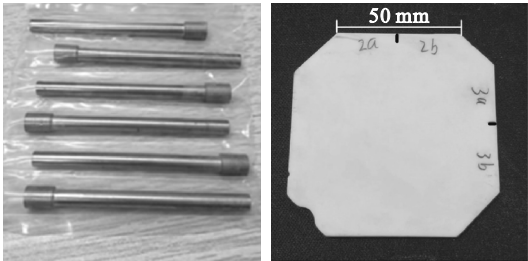


图 1 砂轮和工件实物图

Fig. 1 Grinding wheel and workpiece

试验中,激光的工艺参数比较复杂. 影响工件加工质量的工艺参数主要有:激光功率(P)、砂轮转速(n)、激光移动速度(v)、工件进给速率(f)、磨削深度(a_p)及激光光斑半径(r)等. 在试验过程中,激光照射位置相对于砂轮是不动的,因此激光移动速度和工件进给速率是相同的. 因为激光器设备的限制,激光半径不可调. 试验方案采用四因素四水平的正交试验方案,正交试验因素和水平表如表 1 所示. 在相同磨削工艺条件下,为保证激光辅助磨削加工和常规磨削加工的进行,在工件的前半部分使用激光辅助加热,后半部分不使用激光辅助加热,这样两种加工方法的其他工艺参数完全相同,保证了试验的准确性. 在试验过程中,通过热电偶测温法得到加工区的温度,从而控制激光功率.

自行搭建激光辅助热磨削试验系统. 激光器为光纤激光器,最大功率为 500 W,激光头固定在 KUKA 机器人上,能够任意调节激光照射位置;平台中利用电主轴驱动砂轮,最高转速为 24 000 r/min;工件进给装置使用步进电机驱动滚

珠丝杠带动工件进给;系统固定在大理石平台上,提高系统刚度和稳定性. 激光辅助热磨削加工实验装置见图 2.

表 1 正交试验因素和水平表
Table 1 Orthogonal experimental factors and levels table

序号	功率/W	转速 $r \cdot s^{-1}$	进给速率 $mm \cdot s^{-1}$	磨削深度 μm
1	75	80	1	10
2	100	100	2	20
3	125	120	3	30
4	150	140	4	40

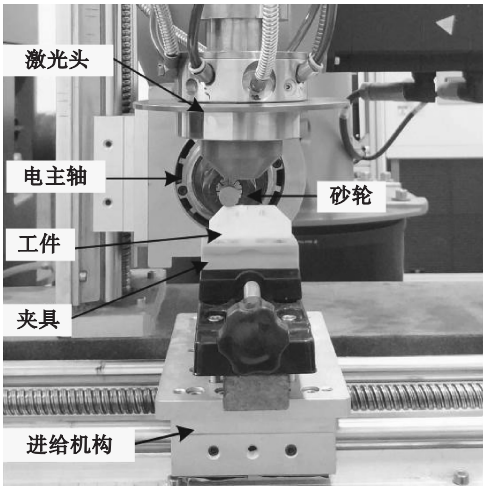


图 2 激光辅助热磨削加工装置

Fig. 2 Laser assisted heating grinding device

2 结果与讨论

2.1 已加工表面形貌分析

在图 3a 中可以明显看出砂轮磨削过程中的磨削痕迹,由于氧化铝陶瓷在 1 000 ℃左右变为玻璃相并且软化,以及在砂轮作用下的重分布,表明加工后的表面是在砂轮塑性挤压作用下形成的. 在图 3b 中,传统磨削加工后的表面不能够明显观察到砂轮磨削过程中的划擦痕迹,主要以脆性崩碎去除为主. 在图 3 中可以从宏观表面形貌看出激光辅助热磨削与常规磨削加工表面之间的差异性.

扫描电镜放大 2 000 倍检测图片如图 4 所示. 图 4a 为激光辅助磨削加工表面,可以观察到在激光辅助磨削加工的表面以光滑区域为主,光滑区域约占整个面积的 70%,其余面积存在少许的晶粒断裂区. 图 4b 为常规磨削加工表面,从中可以看出常规磨削加工表面的大部分区域以晶粒断裂为主,占整个区域的 80% 左右. 这是因为激

光加热之后工件表面温度升高,材料晶粒之间产生塑性流动.在砂轮磨削过程中,磨粒与材料之间的挤压改变了磨粒与晶粒之间的相互作用,使脆性去除变为塑性去除.在常规磨削过程中,材料硬

度很高,并且流动性非常低,磨削过程中砂轮和材料之间的挤压及磨粒和晶粒之间的冲击使得晶粒断裂或整个晶粒从工件表面上脱落.因此在普通磨削过程中陶瓷材料的去除主要为脆性断裂.

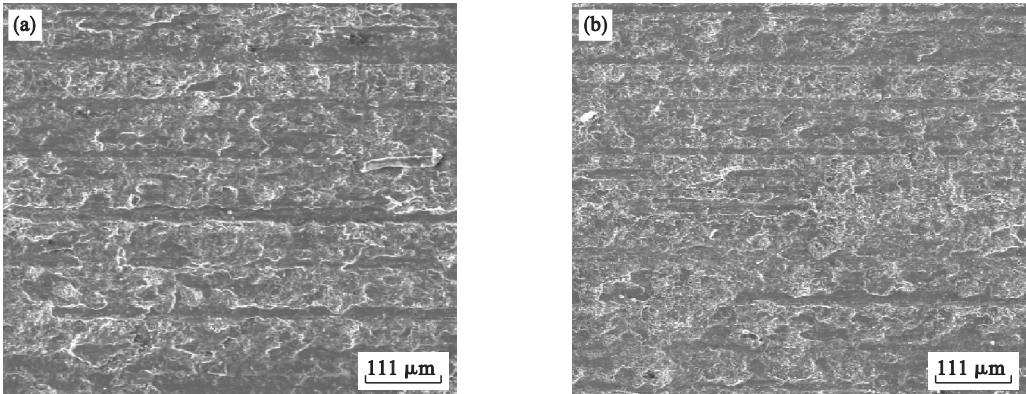
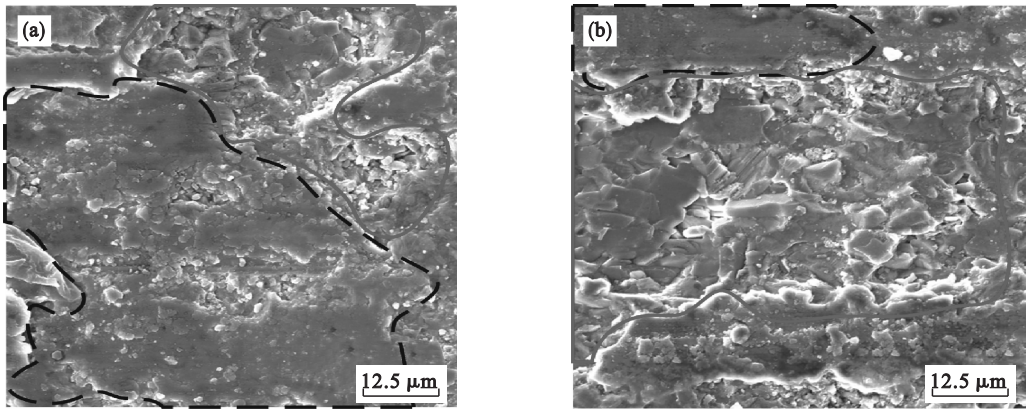


图 3 扫描电镜放大 200 倍检测图片
Fig. 3 Scanning electron microscopy magnifies image 200 times
(a)—激光辅助热磨削; (b)—常规磨削.

图 4 从微观角度阐释了激光辅助磨削加工与常规磨削加工之间的区别.可明显看出激光辅助磨削加工和常规磨削加工之后的表面都具有光滑区域和晶粒断裂区,其中激光辅助加工后的表面

光滑区域明显多于常规加工后的表面.证明了激光辅助加工对提高加工表面的质量起到了积极的作用.



---- 光滑区域 —— 脆性断裂区域

图 4 扫描电镜放大 2000 倍图片
Fig. 4 Scanning electron microscopy magnifies image 2000 times
(a)—激光辅助热磨削; (b)—常规磨削.

由图 3 和图 4 可知,氧化铝陶瓷在磨削加工过程中使用激光辅助加工可以改变材料的去除方式.陶瓷在常规磨削加工过程中由于陶瓷的硬脆性,材料的去除方式为脆性崩碎,加工表面存在脆性断裂,没有明显的磨粒磨削痕迹;使用激光辅助磨削加工方式,在材料待去除区域提前利用激光的高能量使材料温度瞬间升高,材料软化、硬度降低、流动性提高,材料的去除方式变为塑性去除,在加工表面可以明显看到磨粒的磨削痕迹,并且加工之后的表面比较光滑,脆性断裂区域大大

减少.

2.2 已加工表面粗糙度分析

表面粗糙度是衡量加工表面质量的一个重要衡量参数,为了进一步对比陶瓷材料在磨削加工中使用激光的加工效果,在粗糙度方面对两种工艺进行了对比.采用 LEXT OLS4000 3D 激光显微镜测量表面粗糙度,为了减小试验过程中的人为误差,对每组试验的不同表面测量 3 次,然后计算表面粗糙度 R_a 的平均值.激光辅助磨削加工和常规磨削加工后的表面粗糙度如图 5 所示.

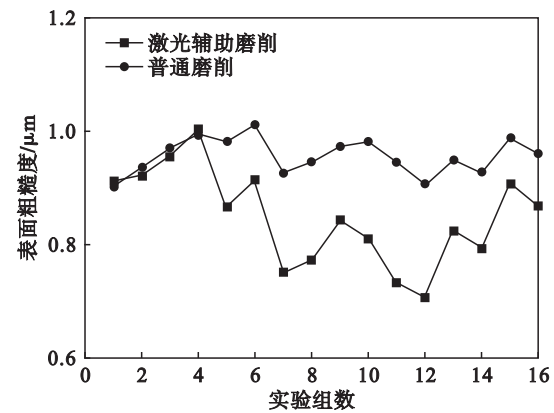


图 5 表面粗糙度值折线图

Fig. 5 Surface roughness broken line map

从图 5 中可以看出,激光辅助磨削加工表面粗糙度整体上小于常规磨削加工表面粗糙度,表明陶瓷材料在磨削加工中利用激光辅助加热有利于提高加工表面质量.1~4 组试验结果显示两者之间几乎没有差距,因为这几组试验中的激光功率为 75 W,功率比较低,导致工件表面材料达不到软化温度,没有起到降低材料硬度的作用.激光功率为 100,125 W 时,在 5~12 组试验结果中可以看出:激光辅助磨削加工表面的粗糙度明显低于常规磨削加工表面的粗糙度值,工件表面温度适中,达到材料软化温度,增加了材料流动性,使材料去除方式变为塑性去除.从 13~16 组试验结果中可知,激光辅助磨削加工表面粗糙度值略小于常规磨削加工的表面粗糙度值.这是因为这几组试验中激光功率为 150 W,功率过大导致材料表面温度过高,材料软化过度,使材料流动性和黏附性增强,降低了材料的可磨削性能.

常规磨削加工中表面粗糙度值比较稳定,在合适温度范围内,激光辅助磨削加工表面粗糙度值明显减小.因此,激光辅助磨削加工的表面粗糙度值总体上小于常规磨削加工的表面粗糙度值.陶瓷材料在磨削加工过程中通过激光辅助加热在改变材料去除方式的同时,表面粗糙度值有效降低,明显提高了加工表面质量.

为了进一步研究在激光辅助磨削加工过程中工艺参数对加工表面粗糙度的影响,对实验结果进行了极差分析.通过分析每种因素的平均极差来研究不同的工艺参数对加工表面粗糙度的影响,结果见表 2.

从表 3 中可以看出,极差的大小依次是功率>磨削深度>转速>进给速率,因此激光功率对加工表面的粗糙度影响最大,其次是磨削深度、砂轮转速,最后是进给速率.

表 2 表面粗糙度极差分析

Table 2 Surface roughness range analysis

变量	功率 W	转速 $r \cdot s^{-1}$	进给速率 $mm \cdot s^{-1}$	磨削深度 μm
水平 1	75	80	1	10
水平 2	100	100	2	20
水平 3	125	120	3	30
水平 4	150	140	4	40
均值 1	0.950	0.873	0.833	0.792
均值 2	0.827	0.862	0.842	0.815
均值 3	0.775	0.839	0.853	0.852
均值 4	0.825	0.814	0.859	0.918
极差	0.175	0.049	0.019	0.126

在不同参数下,各因素对表面粗糙度的影响如图 6 所示.从图 6 中可以看出,随激光功率的增大,工件的表面粗糙度值减小,当激光功率为 125 W 时表面粗糙度值最小,激光功率为 150 W 时表面粗糙值呈增大趋势.这是因为激光功率小于 125 W 时,随激光功率的增加,工件表面温度也增加,材料软化便于去除.功率为 150 W 的时候工件表面温度过高,材料黏附性增强,影响砂轮磨削性能.随着砂轮转速的增加,粗糙度值有减小趋势,而随着进给速率的增大表面粗糙度值有增大趋势.但两者对表面粗糙度影响比较小,表面粗糙度值变化很小.磨削深度对表面粗糙度影响比较大,随着磨削深度的增加,表面粗糙度有增加趋势.

2.3 砂轮磨损分析

在磨削过程中,砂轮磨损和磨粒脱落是影响砂轮使用寿命的主要因素.砂轮磨损的主要形式包括:磨料磨损、局部破碎、大面积破碎、脱落、结合剂沿磨削速度方向的机械擦伤.本试验选用电镀 CBN 砂轮,研究激光辅助磨削加工和常规磨削加工的砂轮磨损情况.利用 LEXT OLS4000 3D 激光显微镜观察了磨削后砂轮表面的形貌和磨粒脱落情况,如图 7 所示.

试验过程中两种工艺的磨削参数相同,激光辅助磨削加工中的激光功率为 125 W.为了对比砂轮的磨损情况,在相同条件下进行了 5 次实验.图 7 中黑色磨料为已磨损磨粒,白色为未磨损磨粒.从图中可以看出:电镀 CBN 砂轮磨损失效形式主要是磨粒脱落和破损;激光辅助磨削加工的砂轮磨损失效形式主要是磨粒脱落,磨粒磨损脱落比较少.在常规磨削加工中磨粒脱落和破损比较严重,大部分磨粒破损或脱落,未受损的磨粒非常少.陶瓷材料在磨削加工中利用激光辅助加热

降低材料硬度、软化材料,使砂轮磨粒磨损脱落明显减少. 砂轮的使用寿命相对于常规磨削加工明

显得到延长,降低了磨削加工成本.

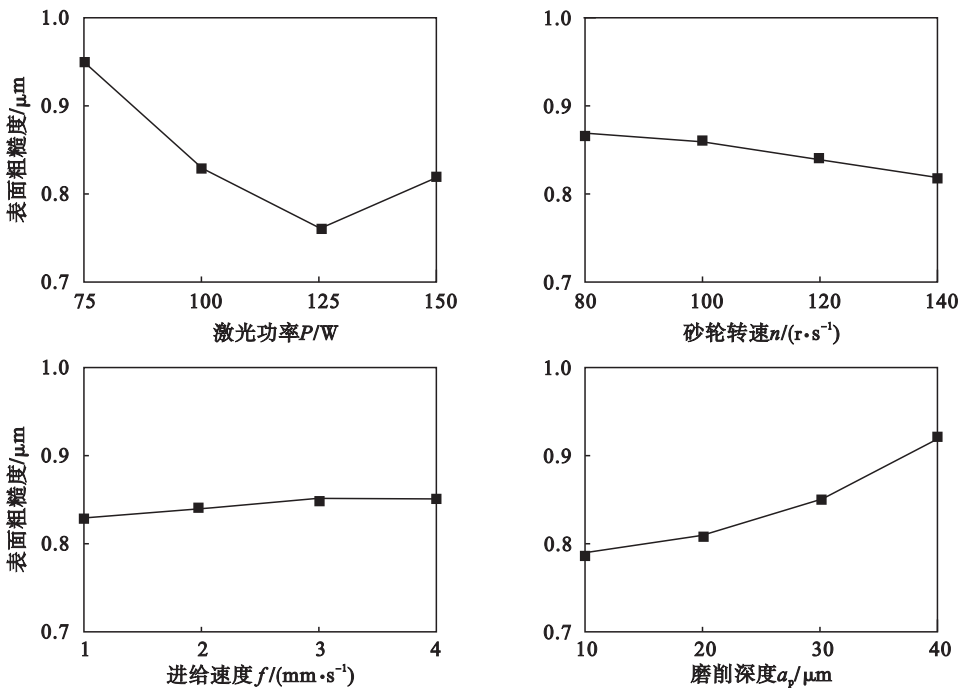


图 6 因素效应曲线
Fig.6 Factor effect curve

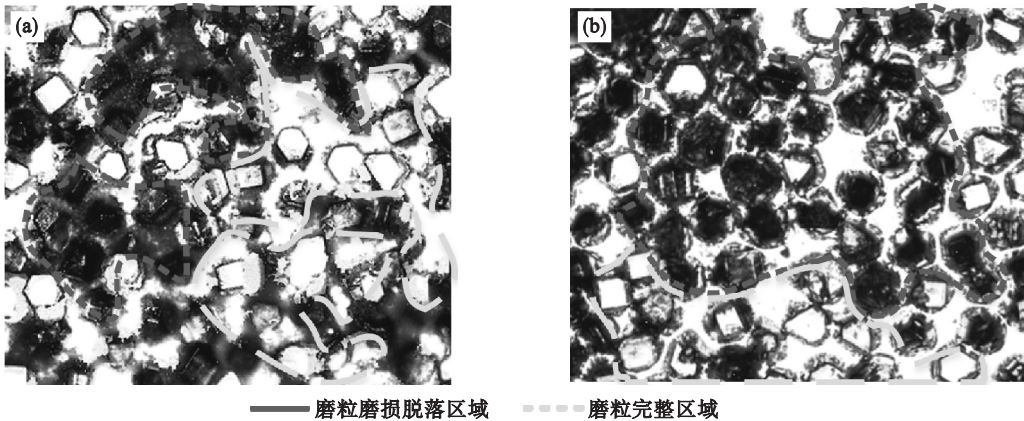


图 7 砂轮磨损表面形貌
Fig.7 Grinding wheel wear surface topography
(a)—激光辅助磨削; (b)—常规磨削.

3 结 论

- 1) 在陶瓷材料的激光辅助磨削加工过程中,激光辅助加热使待去除材料温度升高、材料软化、硬度降低,增加了材料的流动性,使材料的去除方式由脆性崩碎变为塑性去除,降低了材料的加工难度,提高了加工表面质量.
- 2) 激光辅助磨削加工的表面粗糙度值比常规磨削加工表面粗糙度值更低. 激光功率为

- 125 W 时,表面粗糙度值最小;激光功率小于 125 W 时,随温度升高表面粗糙度值减小;激光功率大于 125 W 时,材料温度过高,流动性和黏附性增强,降低了加工表面质量.
- 3) 虽然在加工过程中引入了激光,增加了一些加工成本,但从长远来看,激光辅助磨削加工降低了砂轮磨损,延长了砂轮的使用寿命,减少了更换砂轮的次数,并且提高了工件的加工质量.

(下转第 550 页)