

脉冲激光辅助切削氧化铝陶瓷工艺参数选取的研究

刘为桥 鄢 铨 谢林春 史 珂 宋 威

(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)

摘要 激光辅助加热切削是解决陶瓷类硬脆材料难加工问题的有效方法。为研究工艺参数的选取对脉冲激光辅助切削陶瓷加工效果的影响,建立了脉冲激光加热辅助切削 Al_2O_3 陶瓷传热模型,求解不同参数组合下工件温度场分布。根据 Al_2O_3 陶瓷温度在 1000 K 以上时的软化层尺寸选取理论上合适的切削用量;采用激光参数和切削用量开展切削试验,统计试验切除率,检测加工表面粗糙度和表面形貌,探讨试验切除率与加工表面粗糙度之间的关系,结果发现采用温度场模拟获取的工艺参数能够获得较高的加工质量和切除效率。研究表明通过模拟温度场分布从而选取切削工艺参数,能有效保证脉冲激光辅助加热切削陶瓷类硬脆性材料的工艺要求。

关键词 激光技术;激光辅助切削;温度场模拟;切削用量;软化层

中图分类号 TG665 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0703005

Research on Parameter Selection of Pulsed Laser-Assisted Machining of Alumina Ceramics

Liu Weiqiao Yan Cuo Xie Linchun Shi Ke Song Wei

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract Laser-assisted machining is one of the effective way to solve the problems that the hard and brittle materials are difficult to process. In order to study the influence of chosen processing parameters on the pulsed laser-assisted machining of Al_2O_3 ceramics, a heat conduction model is established to calculate the temperature field distribution of the workpiece under different parameter combinations. According to the softened layer size of Al_2O_3 ceramics where the temperature is 1000 K or above, appropriate cutting parameters are determined theoretically. Using related laser and cutting parameters obtained by the theoretical calculation, a cutting experiment is performed, removal rate is calculated, surface roughness and morphology of the workpiece are detected, and the relationship between the removal rate and the surface roughness is analyzed simultaneously. The results indicate that using the chosen processing parameters in accordance with the simulated temperature distribution ensures low surface roughness and high material removal rate during pulsed laser-assisted machining of Al_2O_3 ceramics. It also indicates that the selected parameters through temperature field simulation can effectively guarantee the requirements to process the hard and brittle materials.

Key words laser technique; laser-assisted machining; temperature field simulation; cutting parameter; softened layer

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 350.3390; 350.3850

1 引 言

氧化铝陶瓷是应用较广、产量较大的氧化物陶瓷之一,具有高强度、耐高温、耐磨等优异的物理机械性能和生物相容性、生物惰性。在机械领域,氧化铝陶瓷被应用于刀具、球阀、磨轮、陶瓷钉和轴承等零部件

的制造;在电子方面有各种 Al_2O_3 陶瓷底板、基片;医学方面可制作 Al_2O_3 人工骨。目前,磨削是加工陶瓷的主要方式,但是陶瓷硬度高、耐磨性好,出现切削力大、温升高、砂轮磨损严重、加工成本高等问题,严重限制了 Al_2O_3 陶瓷的发展与应用^[1-3]。

收稿日期: 2013-11-28; 收到修改稿日期: 2014-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(51075135)、国家级大学生创新训练项目(hn201312)

作者简介: 刘为桥(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: lwq2013831@163.com

导师简介: 鄢 铨(1970—),男,博士,副教授,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: cuoyan@hnu.edu.cn(通信联系人)

激光加热与传统机械加工相结合的激光辅助加工(LAM)技术,是解决 Al_2O_3 陶瓷等材料难加工问题的有效方法^[4-5]。其基本原理是利用高能量密度激光束照射材料表面,加热软化照射区材料,使该部分材料的屈服极限低于断裂强度,然后以塑性加工形式被刀具去除。不同于无激光加热时加工陶瓷效果差的情况,有激光加热对辅助加工过程中切削力的降低,刀具寿命的延长,成本的降低,加工表面质量和生产效率的提高具有显著作用。

为获得更好的加工效果,选取适宜工艺参数是激光辅助加工的重要内容,国内外学者在这方面做了大量工作。Rozzi 等^[6-9]对 Si_3N_4 、 ZrO_2 和莫来石等陶瓷从理论和试验两个角度出发,采用 150~300 W 高功率激光研究辅助加工陶瓷表面温度、切削力和刀具磨损情况,特别是铣削 Si_3N_4 时功率达到 1000 W。Tian 等^[10-11]用功率为 240 W 以上的连续 CO_2 激光加热 Si_3N_4 ,通过瞬态传热模型指导选取最优加工工艺参数。哈尔滨工业大学^[2,12-14]和湖南大学激光研究所^[15-17]的研究人员通过理论传热计算建立温度场模型,激光功率控制在 220 W 和 250 W 时,对 Si_3N_4 、 Al_2O_3 和 ZrO_2 等陶瓷进行激光辅助切削理论与试验研究。但以上研究多是针对大功率连续激光,少有涉及低功率脉冲激光,这限制了 LAM 技术的应用范围,引入低功率脉冲激光加工陶瓷较大功率连续激光具有能量利用率高、成本低的优势;其次,切削加工参数的选取主要依据切削经验数据和近似模拟值,缺少一定的理论支撑和精确度;最后,对加工效果的分析主要讨论的是单参数变化情况,而缺少能代表多参数变化对切削效果影响的指标。

在工艺参数中,切削用量 3 要素(进给量 f 、背吃刀量 a_p 与切削速度 v_c)是决定激光辅助加工切削效率(单位时间材料去除量)和加工质量的主要参数,可由激光加热陶瓷软化区尺寸确定其大小。为此,本文在构建的低功率脉冲激光辅助切削 Al_2O_3 陶瓷温度场传热模型的基础上,结合切削原理和网格法求解最优加工参数并开展切削试验,以探讨根据温度场选取的加工参数对切削加工效果的影响。

2 脉冲激光加热传热模型

2.1 传热模型的基本假设

对建立的 Al_2O_3 热压陶瓷激光辅助切削的传热模型,作如下简化假设^[15-19]:

- 1) 整个加工过程不含内热源,只有激光热源;
- 2) 确定被加工材料为各向同性,其热物理性质

(比如热容、密度、热传导系数以及热扩散系数)为常量;

3) 激光束考虑为基模高斯分布的在作用时间内能量相同的矩形脉冲;

4) 忽略远低于热传导的表面对流和辐射换热,无激光辐射表面为绝热边界;

5) 由于切削点至加热点距离短,切削点从加热位置运动到切削位置时间很短,热量传递深度远小于工作截面厚度,工件截面可看成半无限大平面;

6) 以激光光斑的中心为坐标原点,工件旋转方向为 x 轴,工件轴向为 y 轴,深入工件径向为 z 轴,建立空间直角坐标系,用平行于激光束的平面剖切 Al_2O_3 陶瓷棒,得到矩形平面,如图 1 所示,在这些二维平面内进行传热计算。

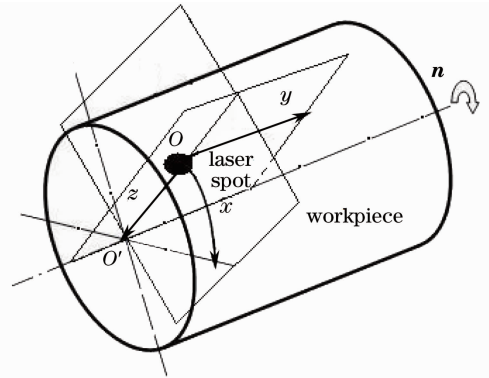


图 1 坐标系示意图

Fig. 1 Coordinate system schematic

2.2 传热模型的建立

在二维平面内,脉冲激光加热陶瓷的传热控制方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

式中 T 为陶瓷工件温度, t 为时间, λ 为导热系数, ρ 为工件密度, c_p 为工件比热容。

2.3 边界条件与求解初始条件

1) 激光束为加热热源,其功率密度 I 和热流密度 q 的关系为第二类边界条件,即表面沿法向 n 方向的温度梯度大小为

$$q = AI = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (2)$$

式中 A 为工件表面的吸收系数。

2) 设工件各处初始温度与离光斑无限远处的温度维持室温 300 K 不变。

3) 激光光束以入射角 θ 照射到工件表面,光束沿工件圆周方向被拉长呈椭圆型,半长轴为 $r_b/\cos \theta$,短轴还是光斑半径 r_b ,此时不同考察点的

激光功率密度为^[16]

$$I_L = \frac{2P \cos \theta}{\pi r_b^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_b^2}\right), \quad (3)$$

式中 I_L 为工件不同考察点 L 处的激光功率密度, P 为激光功率, r_b 为激光光斑半径, r 为考察点到光斑中心的距离。

进行加热模拟计算的材料为 $99\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷棒, 其基本物理参数是: 直径 d 为 22 mm, 密度 ρ 为 3810 kg/m^3 , 比热 c_p 为 $837.4 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 热传导系数 λ 为 $34.1 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 光束以 Al_2O_3 陶瓷的布儒斯特角 70° 入射时陶瓷对激光的吸收系数为 0.95。

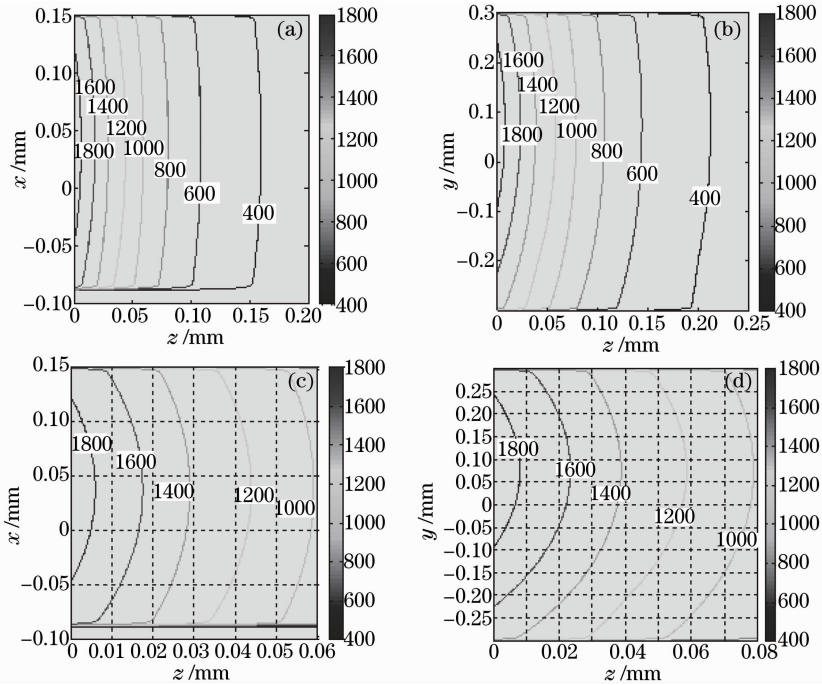


图2 脉冲激光加热工件温度场分布图(单位:K)。(a) $y=0$ 工件横截面;(b) $x=0$ 工件纵截面;
(c) $y=0$ 工件横截面网格;(d) $x=0$ 工件纵截面网格

Fig. 2 Temperature distribution of workpiece heated by pulsed laser (unit: K). (a) $y=0$ cross-section of workpiece; (b) $x=0$ vertical section of workpiece; (c) $y=0$ grid of cross-section of workpiece; (d) $x=0$ grid of vertical section of workpiece

如图1中坐标系所示,图2中横截面为平行于激光束并平行于切削速度方向的平面 xoz , 纵截面为平行于激光束并垂直于切削速度方向的平面 $yoze$ 。 Al_2O_3 陶瓷的熔点为 2323 K , 而当温度升高到 1000 K 以上时, 陶瓷材料就会出现较均匀软化, 硬度降低到 CBN 刀具之下, 是进行切削的理想温度区域^[20]。图2(c), (d) 为分别对图2(a), (b) 中温度达到 1000 K 的区域进行网格划分处理的图像。 x 、 y 、 z 轴单位网格尺寸分别为 0.05 、 0.05 和 0.01 mm , 将 1000 K 等温线完全包围的网格范围作为软化层区间, 以确保理论上切削区的准确度。沿 x 轴, 工件周向温度达 1000 K 时软化层尺寸为 0.24 mm ; 沿 y 轴, 工件周向温度达到 1000 K 时软

3 加热温度场的求解与工艺参数的选取

3.1 脉冲激光加热温度场

基于 Matlab 软件, 利用有限差分法对建立的脉冲激光加热辅助切削 Al_2O_3 陶瓷的传热模型求解。选取脉冲激光功率 $P = 50 \text{ W}$, 光斑半径 $r_b = 0.25 \text{ mm}$, 脉冲频率 $\omega = 50 \text{ kHz}$, 工件转速 $n = 255 \text{ r/min}$, 脉冲宽度 $t = 120 \text{ ns}$, 求解得到坐标系中心处温度分布情况如图2(a), (b)所示。

化层尺寸为 0.6 mm ; z 轴代表软化层的深度, 1000 K 时 z 方向高度最大尺寸 h_D (即切削厚度) 达到 0.05 mm 。此时, 1000 K 等温线包含的理论切削区域近似为 $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z = 0.24 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm} \times 0.05 \text{ mm}$, 考虑激光与刀具的同步进给, 刀尖运动不能超过温度场中心, 允许的切削宽度 b_D 为

$$b_D = \sqrt{\left(\frac{\Delta y}{2}\right)^2 + (\Delta z)^2}. \quad (4)$$

实际切削过程中, 切削表面为一螺旋面, 加工刀具的主偏角为 k_r 时, 刀具理论上合适的进给量 f 与 1000 K 时 z 方向高度最大尺寸 h_D 之间的关系为

$$f = h_D / \sin k_r, \quad (5)$$

理论背吃刀量 a_p 与切削宽度 b_D 之间的关系为

$$a_p = b_D \sin k_r, \quad (6)$$

代入参数 $h_D=0.05 \text{ mm}$, $k_r=45^\circ$, Δy 和 Δz , 可以得到 $f=0.07 \text{ mm/r}$, $a_p=0.21 \text{ mm}$.

车削圆柱面时, 单位时间材料切除量(切除率)^[21]为

$$Q_c = 1000 v_c a_p f = \pi d n a_p f, \quad (7)$$

代入参数 $d=22 \text{ mm}$, $n=255 \text{ r/min}$, $f=0.07 \text{ mm/r}$, $a_p=0.21 \text{ mm}$, 得到此时切削陶瓷材料的理论切除率为 $258.9 \text{ mm}^3/\text{min}$.

但是, 切削时为避免刀具出现严重磨损或破损,

要求实际背吃刀量 a'_p 应不超过 z 轴软化层深度 0.05 mm , 要获得最大切削效率, 取 a'_p 为 0.05 mm , 则由(8)式得到实际切除率 Q'_c 为 $61.7 \text{ mm}^3/\text{min}$.

$$Q'_c = \pi d n a'_p f. \quad (8)$$

3.2 不同参数温度场模拟

为了研究不同参数对软化层尺寸大小的影响, 采用相同方法设计不同参数组合进行温度场模拟, 各次温度场模拟试验参数与温度场模拟结果如表 1 所示。

表 1 不同参数组合下温度场模拟结果

Table 1 Simulation results of temperature field under different parameter combinations

No.	Laser power P / W	Workpiece speed $n / (\text{r/min})$	Pulse frequency ω / kHz	Softened layer size $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z / (\text{mm} \cdot \text{mm} \cdot \text{mm})$	Theoretical cutting depth a_p / mm	Actual cutting depth a'_p / mm	Feed $f / (\text{mm/r})$	Theoretical removal rate $Q_c / (\text{mm}^3/\text{min})$
1	50	255	50	$0.24 \times 0.6 \times 0.05$	0.21	0.05	0.07	258.9
2	50	330	70	$0.15 \times 0.6 \times 0.04$	0.21	0.04	0.06	290.1
3	50	510	90	$0.12 \times 0.5 \times 0.02$	0.18	0.02	0.03	186.8
4	40	255	70	$0.13 \times 0.57 \times 0.02$	0.20	0.02	0.03	106.5
5	40	330	90	$0.075 \times 0.15 \times 0.002$	0.053	0.002	0.003	3.6
6	40	510	50	$0.15 \times 0.6 \times 0.045$	0.21	0.045	0.06	448.3
7	30	255	90	$0.1 \times 0.3 \times 0.001$	0.11	0.001	0.001	1.9
8	30	330	70	$0.11 \times 0.38 \times 0.001$	0.13	0.001	0.001	3.1
9	30	510	50	$0.15 \times 0.56 \times 0.025$	0.20	0.025	0.04	278.9

4 加工试验与结果分析

工件加工表面粗糙度 R_a 是评价加工质量的重要指标, 而切除率直接关系到实际加工效率, 综合分析切除率和粗糙度对研究切削意义重大。

4.1 激光加热辅助切削试验

试件取 $99\text{Al}_2\text{O}_3$ 圆棒陶瓷, 尺寸为 $\phi 22 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$, 夹持在 CJK6236A2 经济型数控车床上, 选波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 、光束模式为 TEM01/TEM00 的脉冲掺镱型光纤激光器 (YLP-1-120-50-50-HC) 辅助

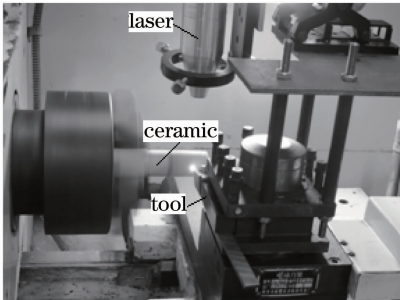


图 3 脉冲激光辅助加工试验图

Fig. 3 Experimental photo of pulsed laser-assisted machining

加热, 硬度为 $\text{HV}72000 \sim 98000$ 的 CBN 数控车刀作为切削刀具。按表 1 中所给定的加工参数(激光功率 P 、工件转速 n 、脉冲频率 ω 、实际背吃刀量 a'_p 和进给量 f 等)进行激光加热辅助切削陶瓷棒外圆面试验, 每次走刀距离 l 为 10 mm 。为防止激光直接加热刀具, 保持激光光斑中心与刀尖周向距离为 2 mm 。试验加工装置及加工过程如图 3 所示。

4.2 材料切除率分析

材料切除率代表刀具去除材料的速度, 体现加工效率。切削试验后, 取表 1 中各次试验参数, 如工件转速 n 、实际背吃刀量 a'_p 和进给量 f , 代入(8)式计算得到每次试验的实际切除率 Q'_c , 得到各次试验的理论切除率 Q_c 和实际切除率 Q'_c 对比结果, 如图 4 所示。

理论切除率 Q_c 是实际切除率 Q'_c 的 4 倍左右, 各次试验间的理论与实际切除率波动均较大, 但变化走势基本相同。考虑切削参数选择经验, 为避免刀具过度磨损或破损, 温度场模拟得到的 x 、 y 和 z 3 向软化尺寸量要大于刀具切削所允许的最大量,

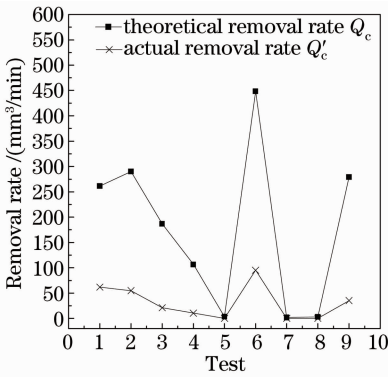


图4 各次试验切除率对比

Fig. 4 Comparison of removal rate of each test

使切削区域完全被包含在软化层区域中,从而产生理论与实际切除率在数值上的明显差异。

4.3 材料切除率与粗糙度值分析

切削用量决定切除率,并影响加工表面粗糙度,以取样长度 $L_r = 0.25 \text{ mm}$ 和评定长度 $L_n = 1.25 \text{ mm}$ 为例,平行于工件轴线方向测量其外圆表面的粗糙度值 R_a 。各次试验的实际切除率 Q_c' 与表面粗糙度值 R_a (即加工效率与加工质量)变化趋势对比如图5所示。

虽然没有明显的 Q_c' 最小(大)时 R_a 值最小(大)的对应关系,但是 Q_c' 与 R_a 变化趋势大体同步,呈同增同减走势。表面粗糙度值在 $0.62 \sim 1.08 \mu\text{m}$ 范围内,波动幅度不大;实际切除率在 $0.02 \sim$

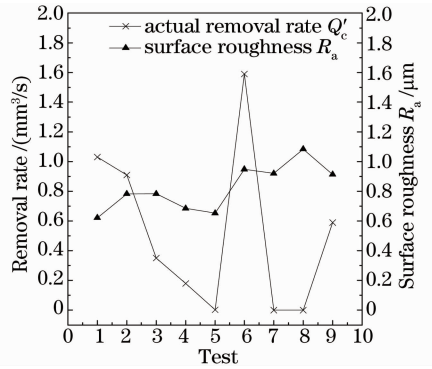


图5 切除率与表面粗糙度值变化趋势

Fig. 5 Trends of removal rate and surface roughness

95.1 mm³/min区间,最小值与最大值相差3个数量级,波动幅度大。这种明显的差异有助于挑选适宜的加工参数组合,在满足加工表面质量要求的同时获得尽可能高的加工效率。

采用VHX-1000超景深立体显微镜,放大2000倍观察各次试验加工表面显微形貌图,以直观显示表面粗糙度情况,并反映激光辅助切削效果。其中,粗糙度值最小的试验1,最大的试验8和中间的试验9的表面形貌如图6所示。表面粗糙度从最小 $0.62 \mu\text{m}$ 到最大 $1.08 \mu\text{m}$,加工表面形貌虽然变化明显,表面形貌越好对应的表面粗糙度越低,但是均未出现明显的凹坑和表面损伤等缺陷。这表明根据软化层尺寸选取工艺参数进行激光辅助切削试验,能获得加工表面粗糙度低、表面形貌好的切削效果。

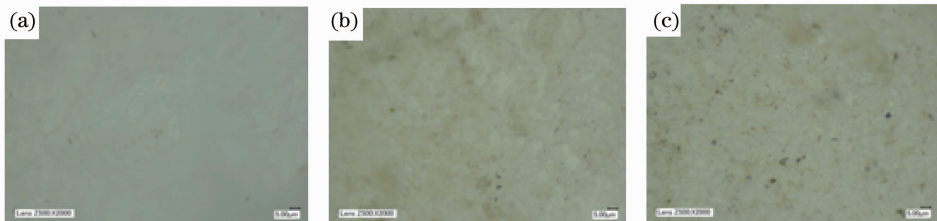


图6 加工表面形貌。(a) 试验1, $R_a = 0.62 \mu\text{m}$; (b) 试验9, $R_a = 0.91 \mu\text{m}$; (c) 试验8, $R_a = 1.08 \mu\text{m}$

Fig. 6 Surface topography. (a) Test 1, $R_a = 0.62 \mu\text{m}$; (b) test 9, $R_a = 0.91 \mu\text{m}$; (c) test 8, $R_a = 1.08 \mu\text{m}$

5 结 论

1) 对低功率脉冲激光辅助加热切削 Al_2O_3 陶瓷进行温度场模拟,通过软化层尺寸大小指导选取合适切削用量等工艺参数开展切削试验,能够获得加工表面粗糙度低、表面形貌好的切削效果,证明根据温度场模拟选取工艺参数是可行的。

2) 理论切除率 Q_c 与实际切除率 Q_c' 变化趋势相同,各次试验 Q_c 比 Q_c' 大3倍左右,这种差异表明采用模拟温度场指导选取切削用量时,需考虑实际切削条件,如背吃刀量不宜过大,以防刀具过度磨损

或破损。

3) 通过模拟温度场来选取工艺参数进行激光辅助切削试验,得到试件加工表面粗糙度值 R_a 在 $0.62 \sim 1.08 \mu\text{m}$ 范围内,加工表面质量高;实际切除率 Q_c' 与表面粗糙度值 R_a 变化趋势大体上呈同增同减趋势; Q_c' 大范围变化与 R_a 小区间波动的对比关系有助于获取合适的加工参数组合,在获得较好加工质量的同时保证较高的加工效率。

参 考 文 献

- 1 Zhu Wubin, Guo Zhijun. Development and application of alumina ceramics[J]. *Ceramics*, 2003, (1): 5-8.
朱武斌, 郭志军. 氧化铝陶瓷的发展与应用[J]. *陶瓷*, 2003, (1): 5-8.
- 2 Wu Xuefeng, Wang Yang, Zhang Hongzhi. Experimental research on laser assisted machining of silicon nitride ceramics [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(5): 1457-1462.
吴雪峰, 王 扬, 张宏志. 激光加热辅助切削氮化硅陶瓷实验研究[J]. *宇航学报*, 2010, 31(5): 1457-1462.
- 3 Zhang Xiaofeng, Yu Guoqiang, Jiang Linwen. Application of alumina ceramics[J]. *Foshan Ceramics*, 2010, 20(2): 38-43.
张小锋, 于国强, 姜林文. 氧化铝陶瓷的应用[J]. *佛山陶瓷*, 2010, 20(2): 38-43.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 J C Rozzi, F P Incropera, Y C Shin. Transient thermal response of a rotating cylindrical silicon nitride workpiece subjected to a translating laser heat source, part II: Parametric effects and assessment of a simplified model[J]. *J Heat Transfer*, 1998, 120(4): 907-915.
- 7 J C Rozzi, F E Pfefferkorn, Y C Shin. Experimental evaluation of the laser assisted machining of silicon nitride ceramics [J]. *J Heat Transfer*, 2000, 122(4): 666-670.
- 8 F E Pfefferkorn, F P Incropera, Y C Shin. Surface temperature measurement of semi-transparent ceramics by long-wavelength pyrometry[J]. *J Heat Transfer*, 2003, 125(1): 48-56.
- 9 F E Pfefferkorn, Y C Shin, Y G Tian, *et al.*. Laser-assisted machining of magnesia-partially-stabilized zirconia [J]. *J Manufacturing Science and Engineering*, 2004, 126(1): 42-51.
- 10 Y Tian, B Wu, M Anderson. Laser-assisted milling of silicon nitride ceramics and inconel 718[J]. *J Manufacturing Science and Engineering*, 2008, 130(3): 310131-310139.
- 11 Y Tian, Y C Shin. Laser-assisted machining of damage-free silicon nitride parts with complex geometric features via in-process control of laser power[J]. *J American Ceramic Society*, 2006, 89(11): 3397-3405.
- 12 Wang Yang, Ma Lixin, Xie Dagang, *et al.*. Distribution of temperature fields for laser heating assisted cutting of ceramics [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2001, 33(6): 785-788.
王 扬, 马丽心, 谢大纲, 等. 陶瓷材料激光加热辅助切削温度场分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2001, 33(6): 785-788.
- 13 Ma Lixin, Wang Yang, Xie Dagang, *et al.*. Experimental investigation on laser assisted hot machining of cold hard cast iron [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2002, 34(2): 228-231.
马丽心, 王 扬, 谢大纲, 等. 冷硬铸铁激光加热辅助切削实验研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2002, 34(2): 228-231.
- 14 Wang Yang, Yang Lijun, Qi Litao. Laser-assisted hot cutting characteristics of particle reinforced Al-matrix composite [J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(4): 344-346.
王 扬, 杨立军, 齐立涛. Al₂O₃ 颗粒增强铝基复合材料激光加热辅助切削的切削特性[J]. *中国机械工程*, 2003, 14(4): 344-346.
- 15 Chen Pei, Jin Xiangzhong. Numerical simulation on temperature histories of laser aided machining [J]. *Machinery Manufacturing*, 2005, 43(12): 32-34.
陈 沛, 金湘中. 激光辅助切削温度场的数值模拟[J]. *机械制造*, 2005, 43(12): 32-34.
- 16 Yan Cuo, Li Lijun, Jin Xiangzhong, *et al.*. Temperature field distribution and cutting depth during laser-assisted machining of hot-sintered Al₂O₃ ceramics [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(2): 254-259.
鄢 铨, 李力钧, 金湘中, 等. Al₂O₃ 热压陶瓷激光辅助切削温度场分布与切削深度[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(2): 254-259.
- 17 Yan Cuo, Li Lijun, Li Dasheng. Experimental measurement on the absorption coefficients of Al₂O₃ ceramics to CO₂ laser radiation [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2008, 35(1): 41-44.
鄢 铨, 李力钧, 李大生. Al₂O₃ 陶瓷对 CO₂ 激光吸收率试验测定[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2008, 35(1): 41-44.
- 18 Chen Genyu. Mechanism and Technology Research on Laser Trimming Bronze-Bonded Diamond Grinding Wheels by a Q-Switched Nd:YAG Pulse Laser [D]. Changsha: Hunan University, 2006. 49-55.
陈根余. 声光调 Q Nd:YAG 脉冲激光修整青铜金刚石砂轮机理及技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006. 49-55.
- 19 Zhang Yingcong, Shen Hua, Zhu Rihong. Three-dimensional temperature field of material irradiated by continuous wave laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0806002.
张英聪, 沈 华, 朱日宏. 连续激光辐照材料三维温度场[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0806002.
- 20 Li Jianbao, Huang Yong. Investigation and development on newer ceramic tool materials [J]. *Modern Technology Ceramic*, 1993, (1): 7-13.
李建保, 黄 勇. 新型陶瓷刀具材料的研究与开发[J]. *现代技术陶瓷*, 1993, (1): 7-13.
- 21 Pang Lijun, Shang Xiaofeng. *Metal Cutting Principle* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. 38-39.
庞丽君, 尚晓峰. *金属切削原理* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. 38-39.

栏目编辑: 宋梅梅