

基于正交试验的脉冲激光辅助车削氧化铝陶瓷 表面质量研究

廖先宇 鄢 铨 谢林春 刘为桥 张孟奇

(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 氧化铝工程陶瓷因具有优越的热物理特性和机械性能,在现代制造业中得到了广泛应用。为研究脉冲激光辅助车削氧化铝陶瓷的表面质量,利用自行设计的脉冲激光加热辅助切削系统对热压 96 氧化铝陶瓷进行加热辅助车削试验。采用正交试验对影响加工表面质量的因素进行了研究,得出脉冲激光辅助切削的最佳参数组合以及激光功率、脉冲频率、机床转速和进给量对表面粗糙度和表面缺陷的影响规律。结果表明,进给量对表面粗糙度值的影响最大,达到 41.97%,在最佳参数组合,即激光功率为 50 W,机床转速为 510 r/min,脉冲频率为 50 kHz,进给量为 0.01 mm/r 条件下进行加热辅助切削试验,工件可以获得较小的表面粗糙度值和较少的表面缺陷。

关键词 激光技术; 脉冲激光辅助车削; 氧化铝陶瓷; 正交试验; 表面粗糙度; 表面缺陷

中图分类号 TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s103008

Surface Quality Investigation on Pulse-Laser Assisted Turning Alumina Ceramics Based on Orthogonal Experiment Method

Liao Xianyu Yan Cuo Xie Linchun Liu Weiqiao Zhang Mengqi

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

Abstract Alumina engineering ceramics have been widely used in modern industry for their superior thermal physical and mechanical properties. In order to study the surface quality of alumina ceramics during pulse-laser assisted turning, experimental investigations are conducted on pulse-laser assisted turning of hot-pressed 96 alumina ceramics. Based on the orthogonal experiment method, optimum operating conditions are achieved, and the influences on surface roughness and defects during pulse-laser assisted turning of alumina ceramics are attained under different parameters such as laser power, pulse frequency, rotational speed and feed. The results indicate that the feed makes the major contribution to overall turning performance, which reaches 41.97%. Good surface roughness and less surface defects can be achieved under the optimum operating conditions, which are laser power of 50 W, rotational speed of 510 r/min, pulse frequency of 50 kHz and feed of 0.01 mm/r.

Key words laser technology; pulse-laser assisted turning; alumina ceramics; orthogonal experiment method; surface roughness; surface defects

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 140.3538; 350.3850

1 引 言

工程陶瓷因其具有高硬度、高强度、热稳定性好和耐腐蚀等优越的特点,在现代制造业中得到了广

泛的应用。对这些材料进行加工时切削力大、温升高、刀具磨损严重、难以保证工件的加工精度和表面质量,且加工费时,效率低,成本高。激光加热辅助切削工艺为工程陶瓷的有效加工提供了一种新方

收稿日期: 2013-07-20; **收到修改稿日期**: 2013-09-20

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: 廖先宇(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: 674059225@qq.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)

法,这种激光-机械复合加工方式已应用于超硬磨料砂轮的修整等研究^[1-2]。研究发现,陶瓷材料在温度超过 1000 ℃时,机械强度明显下降,硬度也相应有所减小,材料的加工性能因而得到改善。激光具有快速局部加热的性能,热影响区小、柔性好,能较好地满足加热切削热源要求^[3-6]。

低功率的脉冲型激光器价格便宜,柔性大,在工业领域中应用较广泛,与高功率的连续型激光器相比,更适合作为加工复杂零件的辅助热源^[7-8]。

本文采用性能好、工业应用广泛的热压 96 氧化铝陶瓷作为研究对象,利用自行设计的脉冲激光加热辅助车削系统,研究加热辅助车削的主要工艺参数(激光功率、脉冲频率、机床转速和进给量)对已加工表面的表面质量的影响规律,为脉冲激光辅助加热车削技术的广泛应用提供参考。

2 试验材料、设备及方法

2.1 试验材料

试验材料是尺寸为 $\phi 22 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的 96 热压氧化铝陶瓷材料,其材料成分见表 1 如示。

表 1 氧化铝陶瓷材料组成

Table 1 Alumina ceramic material composition

Composition	Mass fraction / %
Al ₂ O ₃	96.0
SiO ₂	1.85
Fe ₂ O ₃	0.69
MgO	0.8
CaO	0.26

2.2 试验设备

基于下列主要设备设计了脉冲激光辅助车削氧化铝陶瓷试验系统。

脉冲掺镱型光纤激光器:型号 YLP-1-120-50-50-HC,最大输出功率为 50 W,采用 TEM₀₁ 脉冲输出,脉宽为 120 ns,脉冲频率范围为 50~120 kHz;

车床: CJK6236A2 经济型数控车床;

刀具: CBN 外圆数控车刀,刀杆型号 MTJNR2020K16,刀片型号 TNMG160404CBN;

粗糙度测量仪: JB-4C 精密粗糙度仪;
显微镜: VHX-1000 超景深立体显微镜。

2.3 试验方法

激光辅助加热切削是利用激光束照射工件表面,对待加工表面进行快速加热,以降低被加工材料的硬度,改善其塑性,进而采用刀具对其进行切削,以塑性破坏的形式去除材料,从而达到减小切削力,降低加工难度,改善加工表面质量,提高生产率的目的(原理如图 1 所示)。

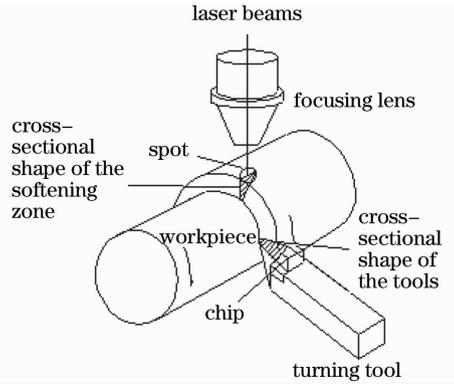


图 1 激光辅助加热切削原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser-assisted machining

辅助车削过程中的影响因素主要包括机床主轴转速、进给速率、背吃刀量等切削工艺参数和激光功率、脉冲频率等激光参数。

正交试验设计是研究多因素多水平的一种设计方法,具有高效、快速、经济的特点,其根据正交性从全面的试验中挑选出部分有代表性的点进行试验^[9-10]。

在众多影响辅助车削质量的参数中,激光功率、机床转速、脉冲频率和进给量的作用效果最为明显,这些参数直接或间接地影响材料表面对激光热源的能量的吸收,从而改变材料表面软化层尺寸。因此,基于正交试验法选择以上 4 个参数作为分析因素进行研究。各因素的水平根据陶瓷试件软化层的理论计算确定^[11],当其他因素固定时,激光功率在 30~50 W、机床转速在 150~500 r/min,脉冲频率在 50~120 kHz,进给量在 0.01~0.04 mm/r,陶瓷材料能得到较好的软化。设计因素水平如表 2 所示。

表 2 四因素三水平

Table 2 Four factors and three levels

Factor and level	Laser power / W	Rotational speed / (r/min)	Pulsed frequency / kHz	Feed / (mm/r)
1	30	255	50	0.01
2	40	330	70	0.02
3	50	510	90	0.03

试验装置如图 2 所示,激光器发出的光束通过聚焦镜聚焦后垂直照射到氧化铝陶瓷表面,每次试验参数下纵向走刀 20 mm 对氧化铝陶瓷试件进行

加热辅助切削。然后利用粗糙度测量仪检测工件表面粗糙度值,采用超景深立体显微镜观察试件的加工表面形貌。

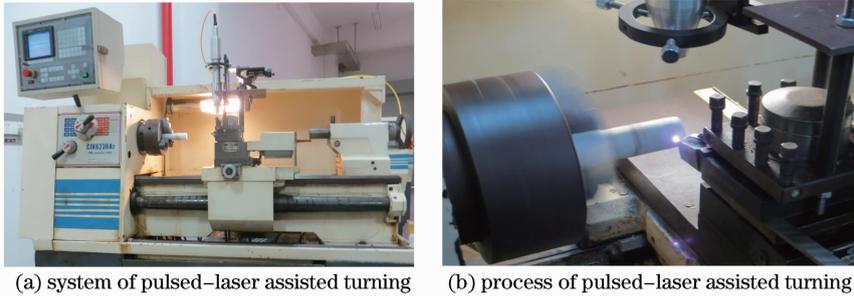


图 2 脉冲激光辅助车削试验装置图

Fig. 2 Experimental setup of pulsed-laser assisted turning

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

按正交表中的参数进行脉冲激光加热辅助切削

氧化铝陶瓷试验,得到每次试验表面粗糙度值 R_a , 如表 3 所示。

表 3 试验加工条件和结果

Table 3 Experimental operating conditions and results

Test case	Laser power /W	Rotational speed /(r/min)	Pulsed frequency /kHz	Feed /(mm/r)	$R_a/\mu\text{m}$	η/dB
1	50	155	50	0.01	0.666	3.531
2	50	310	70	0.02	0.401	7.937
3	50	510	90	0.03	0.629	4.027
4	40	155	70	0.03	1.095	-0.788
5	40	310	90	0.01	0.577	4.776
6	40	510	50	0.02	0.641	3.863
7	30	155	90	0.02	0.843	1.483
8	30	310	70	0.03	1.113	-0.930
9	30	510	50	0.01	0.471	6.539

3.2 田口方差分析

预测激光加工的工件表面质量的方法较多,如基于人工神经网络分析^[12]。本文采用在分析多因素影响效果方面优势明显的质量管理法,根据日本质量管理学家田口玄一对质量特性的分类,对于表面粗糙度这一质量特性,定义望小特征目标函数^[13]:

$$\eta = -10 \lg \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right], \quad (1)$$

式中 Y_i 代表每次试验所测的表面粗糙度 R_a 值,计算每次试验望小特征目标函数值(见表 3)。

根据田口方法分析的理论,方差分析代表加工参数(包括激光参数与切削工艺参数)与目标值之间的关系。本试验中,目标值与激光功率、脉冲频率、机床转速和进给量 4 个因素有关。方差分析结果见表 4。

表 4 变化分析

Table 4 Analysis of variation

Factor	Sum of square	Degree of freedom	Sum of mean square	Contribution
Laser power	14.40	2	7.20	0.1942
Rotational speed	18.69	2	9.35	0.2521
Pulsed frequency	9.93	2	4.96	0.1339
Feed	31.12	2	15.56	0.4197
Sum	74.14	8	37.07	

由方差分析表可以看出,4个因素对表面粗糙度的影响大小不同,其中进给量影响最大,贡献率达到41.97%,其次是机床转速和激光功率,而脉冲频率对表面粗糙度值的影响不大。在切削过程中,刀具相对工件作进给运动时,在加工表面会留下切削层残留面积,形成理论粗糙度,其最大高度 R_{\max} 可由车刀刀尖圆角半径 r_g 、进给量 f ,按几何关系求得^[14]:

$$R_{\max} \approx \frac{f^2}{8r_g} \quad (2)$$

由(2)式可知在车刀刀尖圆角半径一定的情况下,粗糙度值大小受进给量影响,并且进给量越大切削层残留面积和表面粗糙度值越大。同时结合表3,分析发现粗糙度值与由(2)式计算得到的理论粗糙度值差别较大,这是由于粗糙度除受刀尖圆角半径 r_g 、进给量 f 等几何因素影响外,还受到激光功率、脉冲频率和机床转速等因素的影响。

3.3 最优参数组合

根据望小特征目标函数, η 值越大则表面粗糙度值越小,表面质量也相对越好,所以应该选择能使 η 值大的参数组合。图3为各因素不同水平对 η 值的影响图。

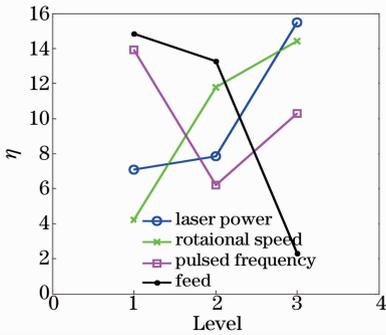


图3 各个因素对 η 值的影响

Fig. 3 Effect of different factors on the value of η

由图3可以看出,当激光功率为50 W,机床转速为510 r/min,脉冲频率为50 kHz,进给量为0.01 mm/r时, η 值越大,表面粗糙度值越小,故为本文试验条件下的最优参数组合。

4 试验验证

4.1 表面粗糙度值验证

采用正交试验法获得的最优参数组合进行多次脉冲激光加热辅助车削试验,对加工后的试件进行粗糙度值测量,得到各测量表面粗糙度值 R_a 均在0.22~0.35 μm 之间,试验验证在最优参数组合下激光辅助车削的陶瓷能获得较低的表面粗糙度值。

4.2 表面缺陷试验验证

采用VHX-1000超景深立体显微镜对不同参数组合下的已加工表面进行观察。图4(a)~(e)分别为放大倍数为2000倍时试件加工表面的形貌图,各图参数分别为:(a)为最优参数组合;(b)激光功率30 W;(c)脉冲频率70 kHz;(d)脉冲频率70 kHz;(e)进给量0.04 mm/r。通过表面形貌分析可以判断试件加工后是否存在表面缺陷。

其中图4(a)为最优参数组合下获得的试件加工表面形貌,图4(b)~(e)为保持其他工艺参数不变,分别改变最优参数组合中的激光功率、机床转速、脉冲频率和进给量某一参数所获得的试件加工表面形貌图。由图可以看出,最优参数组合工艺试验条件下获得的试件表面没有明显的表面缺陷,而在其他的工艺参数组合下出现了表面凹坑和表面损伤类表面缺陷,在最优参数下进行脉冲激光加热辅助车削试验能获得较小的表面粗糙度值与较好的表面形貌,表面质量较好。在最优参数组合下,试件表面待切除区域温度达到材料的软化温度,既不至于

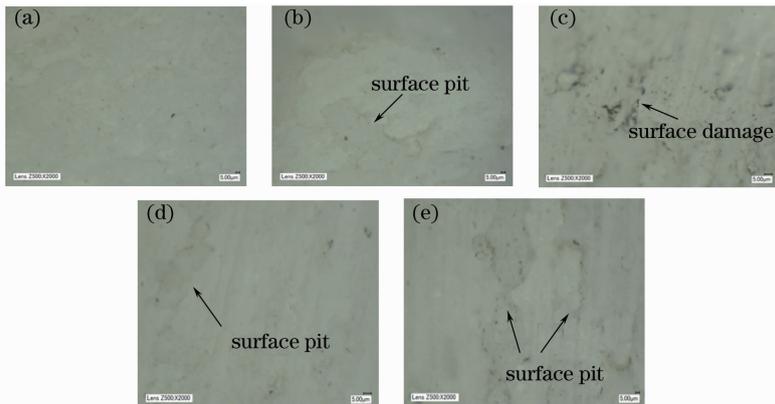


图4 不同参数下已加工表面形貌

Fig. 4 Surface appearance of machined workpiece under different parameters

能量过大造成表面烧伤或者热裂纹,也不至于对表面区域软化不足,而致使切除效果不佳。改变最优参数组合下的某一参数,可能会导致试件待加工表面获得的激光能量不足,软化效果不佳,难以实现材料的有效去除,切削过程达不到要求,影响加工表面质量。

5 结 论

采用正交试验法分别分析了激光功率、机床转速、脉冲频率和进给量对脉冲激光加热辅助车削氧化铝陶瓷后表面粗糙度的影响。运用方差分析方法,得出以上4个因素对表面粗糙度值的贡献率分别为19.42%、25.21%、13.39%和41.97%,同时得到最优参数组合为激光功率50 W,主轴转速510 r/min,脉冲频率50 kHz,进给量0.01 mm/r。在该最优参数组合下进行脉冲激光加热辅助车削氧化铝陶瓷试验,试件能获得较小的表面粗糙度值,表面无明显的缺陷。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Ji Lingfei, Yan Yinzhou, Bao Yong, *et al.*. Research on laser close-piercing lapping processing for damage-free cutting of thick Al₂O₃ ceramics[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603002.
季凌飞,闫胤洲,鲍勇,等.致密Al₂O₃陶瓷厚板激光离散通孔密排无损切割新技术研究[J].中国激光,2011,38(6):0603002.
- 3 Luo Zhihai, Yang Runze. Development of processing technology of engineering ceramics [J]. Machinery Manufacture, 2010. 46-48.
罗志海,杨润泽.工程陶瓷加工技术的现状及研究[J].机械制造,2010.46-48.
- 4 Zhang Baoguo, Tian Xinli, She Anying, *et al.*. Review of the

- principle and research on laser machining of engineering ceramics [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2012, 10: 5-9.
- 张保国,田欣利,余安英,等.工程陶瓷材料激光加工原理及应用研究进展[J].现代制造工程,2012,10:5-9.
- 5 Yongho Jeon, Choon Man Lee. Current research trend on laser assisted machining [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(2): 311-317.
 - 6 Li Jian. Laser assisting heating cutting technology [J]. Machinery Design & Manufacture, 2009, 12: 072.
李健.激光辅助加热切削加工新技术[J].机械设计与制造,2009,12:072.
 - 7 Han Shijie. New development of laser processing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1996, 2: 9-11.
韩世杰.激光加工技术的新发展[J].航空制造技术,1996,2:9-11.
 - 8 Han Kai, Ma Yanxing, Wang Xiaolin, *et al.*. Progress of high power Tm-doped fiber laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(10): 101406.
韩凯,马阎星,王小林,等.高功率掺铥光纤激光的研究进展[J].激光与光电子学进展,2010,47(10):101406.
 - 9 Chang C W, Kuo C P. An investigation of laser-assisted machining of Al₂O₃ ceramics planning[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(3): 452-461.
 - 10 Xia Bozhong. Orthogonal Experiment Method[M]. 1st Edition, Changsha: National Defence Industry Press,1985.
夏伯忠.正交试验法[M].第一版,长沙:国防工业出版社,1985.
 - 11 Liao Xianyu. Simulation of Temperature Fields and Experimental Research on Pulse-Laser Assisted Turning of Al₂O₃ Ceramics [D]. Changsha: Hunan University, 2013. 18-30.
廖先宇.脉冲激光加热辅助车削氧化铝陶瓷温度场仿真和试验研究[D].长沙:湖南大学,2013.18-30.
 - 12 Yang Donghui, Ma Liang, Huang Weidong. Component's surface quality predictions by laser rapid forming based on artificial neural networks[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0803004.
杨东辉,马良,黄卫东.基于人工神经网络的激光立体成形件成形表面质量预测[J].中国激光,2011,38(8):0803004.
 - 13 G Taguchi, E A Elsayed, T Hsiang. Quality Engineering in Production System [M]. New York: McGraw-Hill College, 1989.
 - 14 Gu Chongxian, *et al.*. Mechanical Manufacturing Engineering [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2006. 224.
顾崇衍,等.机械制造工艺学[M].西安:陕西科学技术出版社,2006.224.

栏目编辑:宋梅梅