

基于变质层的 Al_2O_3 陶瓷激光铣削试验研究

王续跃*, 徐文骥, 雷明凯, 陈 华, 王连吉, 郭东明

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 介绍一种基于变质层控制的氧化铝陶瓷激光铣削方法. 在无辅助气体条件下, 激光扫描照射陶瓷表面, 产生一变质层, 对变质层的性质和尺寸进行控制, 达到激光铣削 Al_2O_3 陶瓷材料的目的; 同时, 对变质层进行晶相组织分析, 指导对激光铣削参数的选择, 形成陶瓷材料的激光铣削工艺. 试验研究了变质层的形成和脱落机理, 分析了激光铣削工艺参数对铣削深度和铣削表面质量的影响规律. 利用优化的铣削工艺对 Al_2O_3 陶瓷进行了激光多层铣削试验, 得到各单层铣削深度为 0.35~0.50 mm、各层表面粗糙度为 2.0~3.2 μm 的激光铣削效果. 试验结果可为 Al_2O_3 陶瓷激光铣削提供理论依据与应用指导.

关键词: 激光铣削; Al_2O_3 陶瓷; 变质层

中图分类号: TG665 **文献标志码:** A

0 引言

陶瓷零件在毛坯烧结过程中有 20% 的收缩率^[1], 因此, 对于复杂结构的陶瓷零件, 很难通过热压烧结来达到最终使用的尺寸和精度要求. 陶瓷晶体离子间由化学键结合而成, 化学键具有方向性, 原子堆积密度低、原子间距离大, 所以陶瓷有很大脆性^[2], 使得形状复杂、精度高的陶瓷零件加工十分困难. 作为工程陶瓷零件, 有一定的形状、尺寸精度和表面质量要求, 需要进行再加工才能达到使用要求^[2]. 人们尝试了用车削、磨削、钻削、珩磨等加工金属工件的方法实现对陶瓷零件的成形加工, 但是对加工工具的损伤和对零件表面质量的破坏以及加工精度和效率问题未能得到较好的解决.

针对陶瓷激光成形中存在的问题, 国内外学者进行了理论和应用研究. 通常情况下利用聚焦的激光束作用在一定的光斑范围内, 使作用区域的材料瞬间气化, 或者利用辅助气体去除熔化物, 或者产生裂纹, 剥离去除材料, 从而达到去除与成形目的. 艾枫等采用高峰值功率的 f 秒和 p 秒激光器, 直接将基体表面材料气化去除, 达到三维成形的目的, 然而由于去除效率较低, 且成本较高,

只适于微小零件的激光铣削^[3,4]. 袁根福等利用 500 W 左右的脉冲激光器进行了利用辅助同轴气体吹除熔融物质为主的激光铣削试验, 虽然单层铣削深度可达 1~2 mm, 然而加工表面的粗糙度较大, 可以利用高频低能量激光进行二次加工, 但表面重铸层所带来的裂纹问题影响激光铣削效果^[5]. 一些学者也尝试了通过控制裂纹的方法对 Al_2O_3 陶瓷进行激光铣削成形试验, 然而, 仍存在去除效率低、表面裂纹和粗糙度较大等问题^[6~9].

本试验采用无辅助气体条件下, 激光扫描照射形成可脱落变质层的方法, 以避免熔融物对铣削表面的覆盖, 也避免辅助同轴吹气条件下重铸层存在而产生的表面裂纹问题, 提高激光铣削的效率和质量, 开辟基于变质层的工程陶瓷材料激光铣削新途径.

1 基于变质层的激光铣削原理

通常激光铣削各种材料, 均采用同轴辅助吹气, 一定压力的气体将激光加热产生的熔融物质吹走, 形成只有几微米厚的重铸层. 本文提出无辅助气体激光铣削陶瓷材料, 并进行了试验研究, 激

收稿日期: 2007-05-10; 修回日期: 2009-02-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(重大项目 50290101); 辽宁省自然科学基金资助项目(20062181; 2008S054).

作者简介: 王续跃* (1960-), 男, 博士, 副教授.

光加热产生的熔融物质凝固后,形成几百微米厚的变质层.在无辅助气体作用条件下,激光照射到的陶瓷基体材料存在3种状态:一部分材料气化离开基体;一部分材料熔化状态下迸发离开基体,其间也夹杂着一些 Al_2O_3 陶瓷颗粒;另一部分熔化重凝在基体材料上,形成变质层.

由于在形成变质层的过程中,氧化铝陶瓷材料在 2 050~2 980 K 的熔化与气化,引起氧化铝陶瓷的晶相变化,形成黑色的变质层.图1(较小离焦量)和图2(较大离焦量)是在无辅助气体激光照射条件下, Al_2O_3 陶瓷铣削后断面和表面形貌照片,图中黑色部分为重铸的变质层,白色部分为 Al_2O_3 陶瓷基体,由断面图片可见, Al_2O_3 陶瓷基体与黑色变质层有分界面,分界面的性质是本文考察的焦点.从图3中的晶相图谱可以看出,形成以 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 混合相为主的黑色变质层, Al_2O_3 陶瓷经激光照射后,产生的变质层物理化学性质相对原 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷基体的性质发生了改变.改变铣削工艺参数,变质层与氧化铝陶瓷基体以不同的收缩系数收缩,导致变质层大片翘起与脱落,铣削后容易清除,见图2.变质层的脱离避免了辅助同轴吹气条件下,重铸层裂纹在基体内的延伸,既满足了逐层铣削的层深要求,又满足了铣削表面质量的要求.

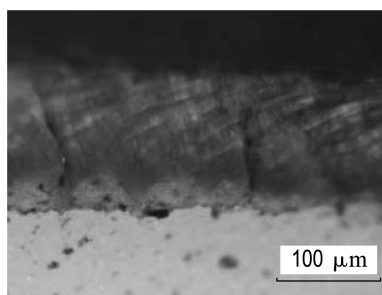


图1 变质层截面形貌

Fig. 1 Optical topography of deteriorative layer

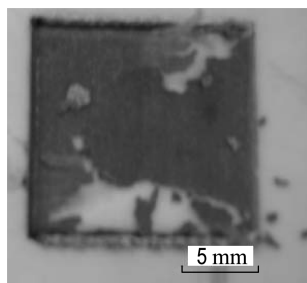


图2 变质层法激光铣削陶瓷表面

Fig. 2 Surface of ceramic surface after laser milling by deteriorative layer method

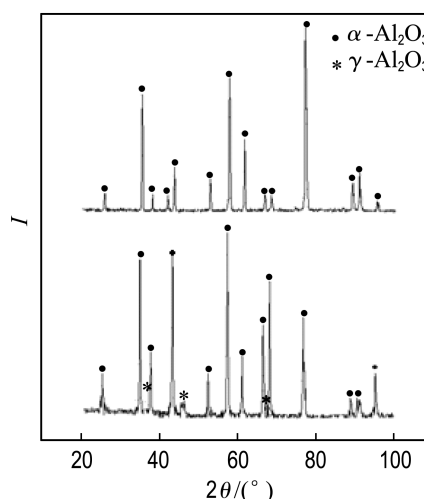


图3 陶瓷基体和变质层的X射线谱

Fig. 3 XRD patterns of ceramic substrate and deteriorative layer

2 基于变质层的激光铣削表面粗糙度

基于变质层原理的激光铣削加工,其表面粗糙度的形成与辅助同轴吹气条件下的激光铣削表面粗糙度的形成不同.排除熔渣对加工表面的影响,辅助同轴吹气条件下,激光铣削形成的表面粗糙度主要由铣削凹坑与凹坑之间的非熔化部分的突起和重铸层构成.但是,基于变质层的激光铣削中,这种突起和重铸层对粗糙度影响占有的比例较小.如图2所示,脉冲激光扫描形成的变质层连在一起,每个脉冲产生的熔池内的熔融物质将铣削凹坑填充,凹坑之间的突起被部分熔化,与填充物质一起重凝形成变质层.当变质层脱落时,原来的凹坑与搭接几何形貌,在铣削表面上被均匀细化,这样大大地降低了表面的粗糙度.

3 试验与结果分析

3.1 试验条件

采用 JK701 型 Nd:YAG 数控激光加工机.激光器脉冲宽度 1 ms、重复频率 35 Hz、输出功率 0~100 W 连续可调.试验材料为 99.9% 以上纯度的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷板,陶瓷板厚度 10 mm.试验采用直线单行扫描,然后依次行与行搭接扫描,进行激光铣削型腔表面的试验研究(见图4).采用 MX40 光学显微镜对试验样件进行铣削表面和剖面形貌观察,用 X 射线仪对变质层进行晶相分析,用表面粗糙度仪进行表面粗糙度测量.

3.2 功率对铣削效果的影响

图5为不同输出功率条件下变质层深度与铣削深度的变化曲线,可见随着输出功率的增加,变

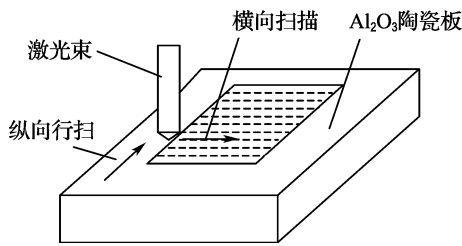
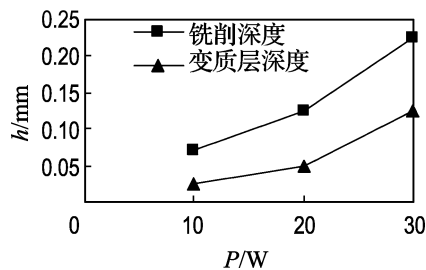
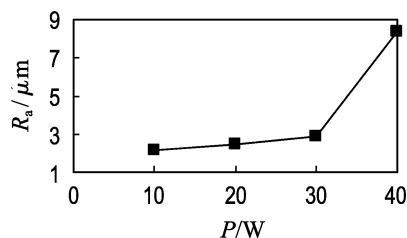


图4 激光铣削示意图

Fig. 4 A principle of laser milling

质层深度和铣削深度明显增加。在离焦量不变的情况下,单脉冲输出功率的增加直接导致作用在材料表面的功率密度的增加,在铣削过程中,材料的气化量和熔池的深度都随着增加,这样所形成的变质层的深度与去除变质层后总的激光铣削都明显增加。随着变质层深度的增加,变质层与基体之间的互相嵌入将更加紧密,变质层的脱落难度增加。图6为输出功率变化对表面粗糙度的影响曲线,从图中可以看出在形成可脱落变质层的前提下,输出功率在10~30 W变化,对粗糙度的影响并不是很大;但当输出功率达到40 W时,表面粗糙度达到 $8.5 \mu\text{m}$ 左右,且变质层去除难度增加,这是由于功率的增大,导致熔化比增大。综合考虑基于变质层的激光铣削功率推荐值范围为20~30 W。

图5 输出功率对变质层深度和铣削深度的影响 ($z=+3 \text{ mm}$, $s=0.8$)Fig. 5 Effect of laser power on thicknesses of deteriorative layer and milling ($z=+3 \text{ mm}$, $s=0.8$)图6 输出功率对表面粗糙度的影响 ($z=+3 \text{ mm}$, $s=0.8$)Fig. 6 Effect of laser power on surface roughness ($z=+3 \text{ mm}$, $s=0.8$)

3.3 离焦量对铣削效果的影响

图7给出了在输出功率20 W、重叠度0.8的条件下,离焦量对铣削深度和变质层深度的影响试验曲线。可以看出,铣削深度由气化(包括熔体迸发)深度和变质层深度两部分组成,随着离焦量的增加变质层的深度与总体铣削深度都明显减小。原因是随着离焦量的增加,光斑面积增大,在相同的激光功率条件下,作用在材料表面的功率密度下降,这样单脉冲所形成的凹坑深度变浅,熔池深度也变浅,因此气化(包括熔体迸发)所形成的铣削深度和变质层深度都有所降低,即大面积铣削深度下降。图8给出了离焦量对铣削表面粗糙度的影响试验曲线,表明随着离焦量的增加,铣削表面的粗糙度明显降低,在离焦量为3.5 mm时,粗糙度可达到 $2 \mu\text{m}$ 。在小离焦量时,单脉冲所形成的凹坑直径小、深度大,凹坑内熔池的深径比较大,熔池内熔融剧烈迸发,凹坑与凹坑之间的非熔化部分突起不能被熔化,在这种条件下,所形成的变质层与陶瓷基体紧密地结合在一起。图9为激光铣削面表面形貌照片,随着离焦量的增加,凹坑内熔池的深径比减小,熔体内迸发的剧烈程度降低,单脉冲形成的凹坑内的熔融物质将填充和熔化凹坑与凹坑搭接处,与陶瓷基体形成成分界面,脱落后,形成平滑的表面形貌。因此,在大离焦量条件下,变质层容易脱离,并形成较低粗糙度的铣削表面,参见图2。

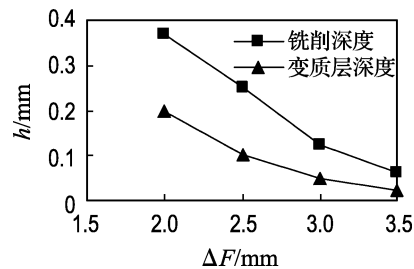


图7 离焦量对变质层深度和铣削深度的影响

Fig. 7 Effect of focus offset on thicknesses of deteriorative layer and milling

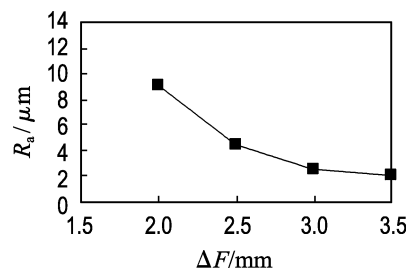


图8 离焦量对表面粗糙度的影响

Fig. 8 Effect of focus offset on surface roughness

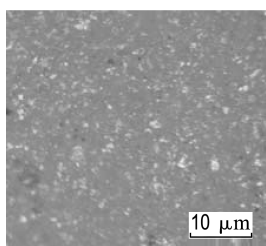


图9 铣削面表面形貌

Fig. 9 Milling surface topography

3.4 重叠度对铣削效果的影响

图10为光斑重叠度对铣削表面影响的对比照片,可以看出,当重叠度很小时(图10(a)),光斑内能量作用分散,凹坑侧壁的坡度很小,相对凹坑深度来说,凹坑之间的非熔化带的突起很大,熔池内部分熔融物质向已加工凹坑内填充,这部分的熔融物质重凝在凹坑内壁上,加大了非熔化带

突起的高度和宽度,在加工表面可以看到密排的互相分离的小孔,铣削效果较差.随着重叠度的增大(图10(b)),铣削表面的小孔排列界限变得模糊,达到一定的铣削效果.当重叠度增大到0.8时(图10(c)),由于非熔化带的突起减小,凹坑之间熔融物质填充到已加工凹坑,与已形成的变质层连接在一起,变质层表面比较平坦,这种条件下所形成的变质层,凝固成形后易被去除,且铣削表面粗糙度较小.当重叠度继续增加时(图10(d)),由于重叠度过大,后一个激光脉冲对前一个已形成凹坑加深作用变得剧烈,在快速加工过程中,能量过于集中在同一个部位,将造成熔池内的熔融物剧烈迸发,表面被迸发的熔渣覆盖.优化试验得出:激光功率20 W,离焦量+3 mm,重叠度0.8时,可以得到优化的铣削表面,粗糙度为2.0~3.2 μm.

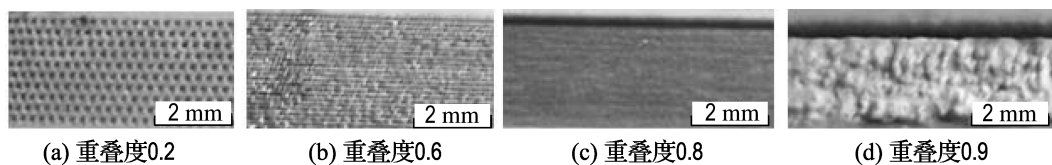


图10 重叠度对铣削表面质量的影响

Fig. 10 Effect of overlapping coefficient on surface quality

3.5 氧化铝陶瓷的激光多层铣削

图11是在激光功率35 W,离焦量+3 mm,重叠度0.8下,进行激光多层铣削所形成的上表面为10 mm×10 mm的台阶方槽照片,每加工一层后,去除变质层,在同样参数条件下,进行下一层加工.图12为各层的粗糙度数值对比(a),以及每一层的铣削深度数值对比(b),可见各层铣削面粗糙度在3.2 μm左右.理论上,表面粗糙度将影响材料对激光能量的吸收,所以,不同铣削层铣削条件将随之变化.试验表明:粗糙度变化范围较小,对激光能量的吸收和反射的影响并不明显,对下一层铣削影响很小,所以,各层铣削深度在0.35 mm左右趋于一致,各层表面粗糙度变化也很小,

即多层铣削效果稳定.因此通过铣削深度控制和优化激光加工参数,可以铣削出复杂形状的陶瓷零件.

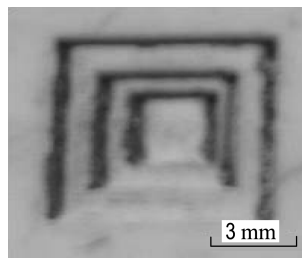


图11 激光多层铣削加工的型腔

Fig. 11 Cavity milled by laser multi-layers milling

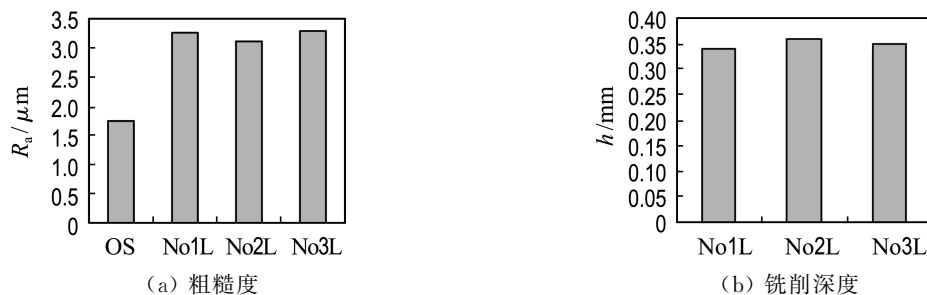


图12 多层铣削的各层表面粗糙度和深度对比

Fig. 12 Comparison of milling layer on surface roughness and milling depth

4 结 论

(1) 在无辅助气体条件下, 可以在加工表面形成可自动脱落去除的变质层, 避免了铣削表面熔渣的二次覆盖, 也避免了由于辅助同轴吹气条件下重铸层存在而带来的裂纹向基体内部延伸的问题, 表面粗糙度达到 $2.0 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 的加工水平。

(2) 选择激光铣削参数, 功率 35 W, 离焦量 $+3 \text{ mm}$, 重叠度 0.8, 进行台阶槽多层铣削, 得到各层粗糙度均在 $3.2 \mu\text{m}$, 每层铣削深度在 0.35 mm 的型腔面, 取得了稳定的铣削效果, 通过铣削深度控制和优化激光加工参数, 开发出一种氧化铝陶瓷材料的激光三维成形方法。

参考文献:

- [1] 赵置新, 艾冬梅, 张勤河, 等. 工程陶瓷材料加工技术现状[J]. 机械工程材料, 2000, **24**(1): 2-3
- [2] 倪文. 矿物材料导论[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 123-125

- [3] 艾枫. DMG 的激光加工技术[J]. 高能束流加工技术, 2004, **30**(2): 51-60
- [4] SHARIF Al-hawat, KHEIR Al-mutaib. Numerical modeling of a fast-axial-flow CW- CO_2 laser [J]. **Optics & Laser Technology**, 2007, **39**: 610-615
- [5] 袁根福, 增晓雁. Al_2O_3 陶瓷激光铣削试验研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(5): 467-470
- [6] 邢世凯, 吕世君, 闻德生, 等. 应用于汽车工业的特种陶瓷材料及其研究发展[J]. 中国陶瓷, 2003, **39**(4): 35-38
- [7] TSAI Chwan-huei, CHEN Hong-wen. Laser milling of cavity in ceramic substrate by fracture machining element technique [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2003, **136**: 158-165
- [8] 郭春丽. 陶瓷零件的加工方法[J]. 陶瓷, 2006, **5**(2): 21-24
- [9] 于爱兵, 林彬, 徐燕申, 等. 工程陶瓷表面珩磨加工表面质量[J]. 中国工程机械, 1998, **9**(1): 16-18

An experimental study of laser milling based on deteriorative layer on Al_2O_3 ceramic

WANG Xu-yue*, XU Wen-ji, LEI Ming-kai, CHEN Hua, WANG Lian-ji, GUO Dong-ming

(Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A new method using laser milling of Al_2O_3 ceramic based on controlling deteriorative layer is presented in which the process does not use any assistant gas. Using laser to radiate ceramic surface to form deteriorative layer directly, and by using the method of analyzing the type of crystal phases of the deteriorative layer to select laser milling parameters, a new laser milling technology is developed. The mechanism of the formation and falling-off of the deteriorative layer is investigated. Milling depth and milling surface quality with different milling parameters are studied systematically, and experiments of multi-layers laser milling are also researched with optimized processes on Al_2O_3 ceramic. A steady result for every layer is 0.35-0.50 mm of milling depth and $2.0 \sim 3.2 \mu\text{m}$ of surface roughness. The experimental study has provided deeper understanding of laser milling Al_2O_3 ceramic technology both in theory and application.

Key words: laser milling; Al_2O_3 ceramic; deteriorative layer