

355 nm 紫外激光抛光 Al_2O_3 陶瓷作用机理的实验研究

华显刚 魏 昕 周 敏 谢小柱

(广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要 陶瓷材料的性能优越,但是表面质量差,采用短波长激光抛光技术可以有效提高陶瓷材料表面质量。针对紫外激光抛光 Al_2O_3 陶瓷过程中可能存在的熔化、汽化、微裂纹、材料的熔融飞溅和光化学作用等不同的作用形式进行了实验研究。通过对抛光后表面形貌特征进行观测,研究了紫外激光抛光 Al_2O_3 陶瓷的作用机理,并分析了高能量密度下产生的白色粉末的形貌、附着力、组成成分和主要物相,进一步确定了紫外激光抛光 Al_2O_3 陶瓷的作用机制。

关键词 激光技术; 加工机理; 紫外激光抛光; Al_2O_3 陶瓷; 白色粉末

中图分类号 O436/TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1203002

Experimental Study on Mechanism of 355 nm Ultraviolet Laser Polishing of Al_2O_3 Ceramics

Hua Xiangang Wei Xin Zhou Min Xie Xiaozhu

(Faculty of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology,
Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract Ceramic materials have excellent properties, but their surface qualities are poor. The surface quality of ceramic materials can be effectively improved using short-wavelength laser polishing technique. Experiments are conducted according to existing different forms, such as melting, vaporization, micro-cracks, splashes of molten material and photochemical effects etc, while ultraviolet (UV) laser is polishing Al_2O_3 ceramics. Through observing polished surface morphology, the mechanism of UV laser polishing Al_2O_3 ceramic is studied, and the morphology, adhesive force, elementary composition and main crystalline phase of white powder in high energy density are analyzed. The mechanism of UV laser polishing Al_2O_3 ceramics is further confirmed.

Key words laser technique; processing mechanism; UV laser polishing; Al_2O_3 ceramic; white powder

OCIS codes

1 引 言

近年来,陶瓷材料凭借优良的性能被广泛应用于航天、采矿、电子以及光波导传输等领域。但是陶瓷材料硬度高、脆性大,并且表面容易存在微裂纹和气孔等缺陷^[1],所以选择合适的抛光方法改善陶瓷材料的表面质量具有非常重要的意义。

激光抛光是利用激光与材料之间的相互作用实现材料去除的一种非接触抛光方法,短波长激光单光子能量高、功率密度大,可以实现陶瓷材料通过多

光子吸收^[2]的方式去除,并且可以使陶瓷材料在较短的时间内表面温度达到沸点以上,抑制抛光过程中微裂纹的产生。自 20 世纪 90 年代起,国内外相继开展了对于激光抛光机理的研究,Shaoa 等^[3-4]研究了激光对材料的热作用机理,对于材料的熔化抛光机理和蒸发去除机理进行了分析,并建立了二维和三维温度场数值模型,为抛光过程中激光参数的选取提供了参考依据。Brusasco 等^[5]利用 355 nm 激光与 CO_2 激光共同抛光硅材料表面,研究

收稿日期: 2014-05-20; 收到修改稿日期: 2014-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(50675038, 50805027)、广东省科技计划项目促进科技服务业发展专项计划(2010A040203002)、省部产学研结合科技创新平台(2011A091000002)、广东省自然科学基金项目(S2013010014070)

作者简介: 华显刚(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: xiaogang891111@126.com

导师简介: 魏 昕(1964—),女,博士,教授,主要从事精密与超精密加工等方面的研究。E-mail: weixin@gdut.edu.cn

发现不同能量密度下加工后硅表面都存在着不同的热作用损伤。杨焕等^[6]研究了飞秒激光和紫外激光对单晶硅表面加工质量的影响,发现紫外纳秒激光更适合对材料进行大量去除之类的加工。因此为了获得低热作用损伤的 Al₂O₃ 陶瓷加工表面,开展紫外激光抛光 Al₂O₃ 陶瓷的作用机理的研究是非常有必要的。Tsai 等^[7]还研究了激光对材料的热应力去除机理,为抛光过程中有效抑制微裂纹的产生提供了理论依据。谢小柱等^[8]通过纳秒激光划切蓝宝石实验研究了蓝宝石在纳秒激光作用下的熔化、汽化和裂纹形貌,进一步探索了激光的光热作用机理。刘莹等^[9]采用准分子激光加工方法,在相同的实验条件下加工了 Al₂O₃ 陶瓷、不锈钢等脆性和塑性材料。结果表明,准分子激光加工不同材料时具有不同的加工机理,对于脆性材料以光化学作用为主,而对于塑性材料则以热效应为主。Horisawa 等^[10-11]研究了激光抛光过程中的光化学作用机理,研究表明短波长激光在抛光过程中更容易通过光化学作用去除。目前国内对于激光热作用机理的研究主要集中在激光加工过程中的热传导和热影响方面,对于激光光化学作用的研究只有实验得出的工艺规律。因此开展紫外激光抛光陶瓷材料的实验研究,明确紫外激光与陶瓷材料的作用机理,为紫外激光抛光陶瓷表面提供理论依据,进一步提高陶瓷表面抛光质量,对于实现陶瓷材料更加广泛的应用具有重要的意义。

2 短波长激光抛光 Al₂O₃ 陶瓷实验研究条件

2.1 实验材料

陶瓷材料中的 Al₂O₃ 含量不同,其各项性能也不同,实验材料采用 Al₂O₃ 质量分数为 99% 的陶瓷,其主要性能参数如表 1 所示。

表 1 氧化铝陶瓷材料的性能参数

Table 1 Properties of Al₂O₃ ceramic material

Properties	Numerical size
Material	Al ₂ O ₃ ceramic
Tensile strength /MPa	300
Thermal conductivity /[W/(m·K)]	25
Thermal expansion coefficient /K ⁻¹	8.5×10 ⁻⁶
Specific heat /[J/(g·K)]	0.85
Density /(kg/m ³)	3920
Melting point /K	2300
Boiling point /K	3500

2.2 实验设备和仪器

实验采用的是半导体端面抽运 355nm 紫外激光器,频率范围为 0~100 kHz,激光的聚焦光斑直径为 12 μm。激光加工后的陶瓷表面采用激光共聚焦显微镜、扫描电子显微镜和 X 射线电子能谱仪等观察测量。

2.3 实验方法

1) 采用 355 nm 紫外激光在 Al₂O₃ 陶瓷表面进行单次扫描加工实验。图 1 为激光加工过程示意图,实验过程中扫描速度、重复频率和离焦量等激光参数不变,只改变激光能量密度,获取不同激光能量密度下 Al₂O₃ 陶瓷加工后的表面特征形貌,研究紫外激光与 Al₂O₃ 陶瓷的作用机理。

2) 采用 355 nm 紫外激光在 Al₂O₃ 陶瓷表面进行抛光实验。实验过程中扫描速度、重复频率、扫描间距和离焦量等激光参数不变,只改变激光能量密度,获取紫外激光在高能量密度下抛光 Al₂O₃ 陶瓷后的表面特征形貌,并对抛光后表面材料进行物相分析。

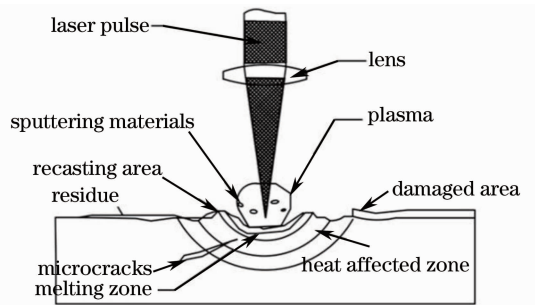


图 1 紫外激光加工过程示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of ultraviolet (UV)

laser processing

2.4 实验条件的选取原则

紫外激光加工 Al₂O₃ 陶瓷的工艺参数主要有激光能量密度、扫描速度、频率、扫描间距和离焦量等。

在紫外激光单次扫描加工 Al₂O₃ 陶瓷的实验中,激光能量密度的选取主要依据数学建模和 ANSYS 仿真结果,首先近似按照一维热传导问题处理,通过公式计算激光辐照区域内氧化铝陶瓷达到熔点和沸点的最小激光能量密度。然后通过 ANSYS 温度场仿真得到在 5 J/cm² 和 7 J/cm² 的激光能量密度下陶瓷材料的表面温度分别达到熔点和沸点。因此在加工过程中选取的激光能量密度为 4~21 J/cm²,便于观察 Al₂O₃ 陶瓷表面形貌在紫外激光作用下的渐变过程。扫描速度的选取主要依据激光两个连续脉冲的重叠情况,为了获得较好的激光加工效果,必须保

证脉冲叠加面积占光斑总面积的 60% 以上,在兼顾加工后表面粗糙度值越小越好的前提下,合理的扫描速度为 40~60 mm/s。激光频率的选取要与激光能量密度相互协调,实验选择重复频率 30 kHz 不变,通过改变激光加工过程中能量密度的大小研究紫外激光与 Al₂O₃ 陶瓷的作用机理。

采用的 Al₂O₃ 陶瓷键能大小约为 9.1 eV,发生单光子吸收光化学作用的临界波长为 136 nm,紫外激光的波长为 355 nm,不满足单光子吸收光化学作用条件,但是可能会存在多光子吸收的光化学作用。光化学作用下,材料表面会经历小平面去除和表面组织细化的过程,并且增大激光能量密度可以增加材料发生多光子吸收的概率。因此在紫外激光抛光 Al₂O₃ 陶瓷的实验中,选取的激光能量密度为 15~35 J/cm²,扫描速度为 40 mm/s,便于研究紫外激光在高能量密度下加工 Al₂O₃ 陶瓷后的表面形貌。扫描间距的大小会直接影响到抛光后的表面质量,间距过大会导致残余材料过多,间距过小抛光后的材料表面会严重烧蚀,因此在实验设备允许的条件下,选取扫描间距为 3 μm。离焦量会严重影响到材料的去除深度与去除宽度,当激光处于正离焦时,激光作用于材料表面的能量密度会高于作用于材料内部的能量密度,有利于材料从表面汽化作用去除,离焦量过大,材料表面的凸峰晶粒不能有效去除,因此实验选取的离焦量为 0.1 mm。紫外激光抛光过程中,在激光辐照区域内,材料表面的凸峰晶粒将会被去除,表面粗糙度降低,该区域就达到了激光抛光的效果。

3 实验结果及其分析

3.1 陶瓷加工后的表面形貌特征

图 1 为紫外激光加工 Al₂O₃ 陶瓷过程的示意图,在实验过程中,首先采用单因素实验研究不同激光能量密度下紫外激光单次扫描加工 Al₂O₃ 陶瓷的作用形式,实验条件参数如表 2 所示。

图2为激光能量密度为 5 J/cm² 时,在扫描电镜下放大 5000 倍观察到的紫外激光加工 Al₂O₃ 陶瓷后的表面形貌。可以看出,激光能量密度为 5 J/cm² 时达到了 Al₂O₃ 陶瓷的熔化阈值,Al₂O₃ 陶瓷表面在短波长紫外激光的作用下产生了明显的熔化现象,陶瓷材料在熔化后,液体材料由于表面张力的作用会向陶瓷表面低凹处流动,熔化作用下不产生材料去除,在局部范围内可以获得较为平整光滑的表面。

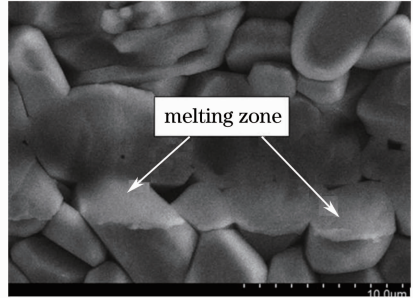


图 2 激光加工后陶瓷表面熔化形貌
Fig. 2 Ceramic surface melting morphology after laser processing

图 3 为激光能量密度为 7 J/cm² 时,在扫描电镜下放大 10000 倍观察到的紫外激光加工 Al₂O₃ 陶瓷后的表面形貌。可以看出,激光能量密度为 7 J/cm² 时达到了 Al₂O₃ 陶瓷的汽化阈值,Al₂O₃ 陶瓷表面在短波长紫外激光的作用下产生了明显的汽化现象,陶瓷材料在汽化后,产生的汽化物会聚集在材料表面附近,并且可以微弱地电离成等离子体,等离子体会对紫外激光起到吸收和屏蔽作用。并且由于汽化膨胀压力的作用,陶瓷材料表面熔化的液体材料会变形而形成汽化坑。

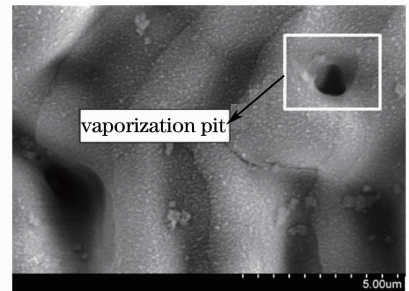


图 3 激光加工后陶瓷表面汽化形貌
Fig. 3 Ceramic surface vaporization morphology after laser processing

图 4 为激光能量密度为 21 J/cm² 时,在扫描电镜下放大 10000 倍观察到的紫外激光加工 Al₂O₃ 陶瓷后的表面形貌。可以看出,Al₂O₃ 陶瓷表面在短波长紫外激光的作用下产生了明显的微裂纹,紫外激光加工过程中急剧的温度变化会引起较大的热应

Table 2 Experimental conditions of UV laser single scan processing Al₂O₃ ceramic

Properties	Numerical size
Wavelength /nm	355
Laser energy density /(J/cm ²)	4~21
Pulse width /ns	55
Scanning speed /(mm/s)	50
Frequency /kHz	30
Defocus amount /mm	0.1

力,当热应力超过材料所能承受的应力极限后就会产生微裂纹,微裂纹在扩展和连接为一体后,陶瓷材料会发生脆性断裂而整块剥离。

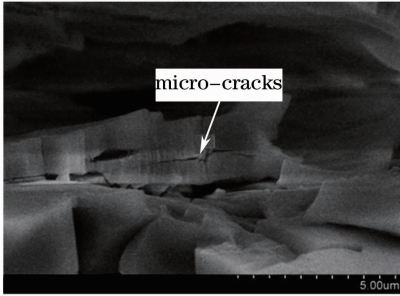


图 4 激光加工后陶瓷表面的微裂纹形貌
Fig. 4 Ceramic surface micro-cracks morphology after laser processing

随着激光能量密度的继续提高,Al₂O₃ 陶瓷表面产生了一些飞溅的熔融陶瓷材料,采用紫外激光抛光 Al₂O₃ 陶瓷的方法进一步确定激光加工陶瓷材料的作用形式。激光抛光路径会直接影响到激光加工质量的好坏,依据前期实验结论,兼顾加工效率和数控编程的简易性,激光抛光扫描路径宜采用如图 5 所示的弓字型路径^[12]。实验条件参数如表 3 所示。

当激光能量密度为 21 J/cm² 时,抛光后的 Al₂O₃ 陶瓷表面开始出现白色的粉末状物质,继续提高激光

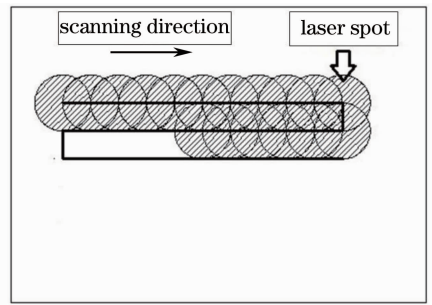


图 5 激光抛光 Al₂O₃ 陶瓷时的扫描路径示意图
Fig. 5 Diagrammatic sketch of laser polishing Al₂O₃ ceramic

表 3 紫外激光抛光氧化铝陶瓷的实验条件

Table 3 Experimental conditions of UV laser polishing Al₂O₃ ceramic

Properties	Numerical size
Wavelength /nm	355
Laser energy density /(J/cm ²)	15~35
Pulse width /ns	55
Scanning speed /(mm/s)	40
Frequency /kHz	30
Scanning pitch /μm	3
Defocus amount /mm	0.1

能量密度到 35 J/cm² 时,抛光后的 Al₂O₃ 陶瓷表面几乎被这种白色粉末状物质覆盖,如图 6 所示。

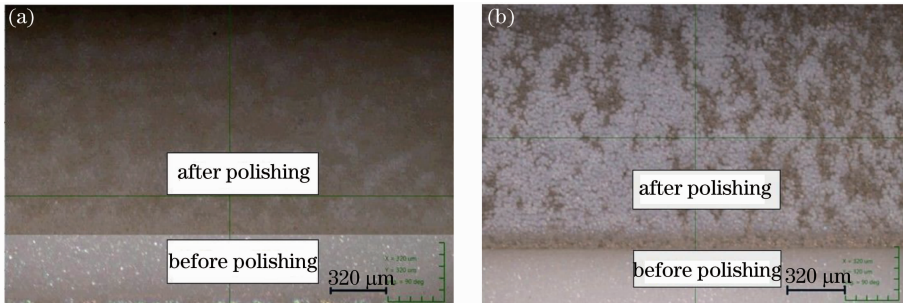


图 6 紫外激光在能量密度下抛光 Al₂O₃ 陶瓷后的表面形貌。(a) 21 J/cm²; (b) 35 J/cm²

Fig. 6 Surface morphology after UV laser polishing Al₂O₃ ceramics with high energy density. (a) 21 J/cm²; (b) 35 J/cm²

通过扫描电子显微镜对抛光后 Al₂O₃ 陶瓷表面产生的白色粉末状物质进行了形貌观测,如图 7

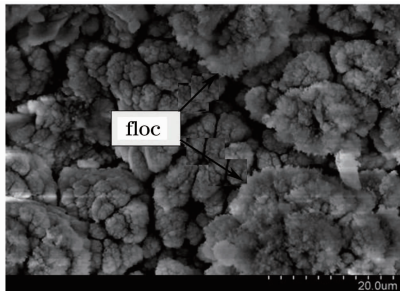


图 7 白色粉末的微观形貌图
Fig. 7 Micro-topography of white powder

所示。可以看出白色粉末是由大量的微小颗粒团聚形成的絮状物质,这些白色粉末附着在加工后的陶瓷材料表面。为了研究 Al₂O₃ 陶瓷表面白色粉末状物质附着力的大小,将去离子水滴在抛光后的陶瓷表面,轻微擦拭后白色粉末物质明显减少,如图 8 所示。研究表明,白色粉末物质与抛光后的陶瓷表面的附着力很小,可以推测白色粉末是加工的过程中材料汽化飞溅后团聚形成的。

在激光能量密度增加的过程中,并没有观察到陶瓷材料表面出现小平面去除和表面组织细化的形貌,只有紫外激光热作用后留下的熔化、汽化和裂纹



图 8 白色粉末清洗前后对比图

Fig. 8 Comparison chart before and after cleaning white powder

形貌。由于白色粉末物质产生的条件为激光处于高能量密度下,高能量密度有利于材料发生多光子吸收光化学作用去除,因此进一步分析白色粉末的成分,有利于研究紫外激光抛光 Al₂O₃ 陶瓷的主要作用机理。

3.2 陶瓷抛光后表面材料的物相分析

为了进一步明确紫外激光抛光 Al₂O₃ 表面的材料去除机理,采用 X 射线光电子能谱(XPS)进一步分析了白色粉末的元素组成,并与原始材料的成分进行了对比。

图 9 为抛光前 Al₂O₃ 陶瓷的 XPS 图谱,抛光前 Al₂O₃ 陶瓷的主要组成成分(质量分数)为: Al(5.4%)、O(34.3%)、C(51.7%)、Ca(0.9%)等。检测结果中 C、O 含量偏高的主要原因是 XPS 主要检测样件表层 5~10 nm 材料的元素组成,由于样件与空气接触时间过长,使得样件表层吸附了不少空气中的有机小分子,因此,XPS 检测中出现了较高的 C、O 含量。因此在不考虑 C 元素和其他污染时,原始材料的主要成分为 Al₂O₃。图 10 为抛光后产生的白色粉末物质的 XPS 图谱,抛光后白色粉末的主要组成成分(质量分数)为: Al(18.2%)、O(58.0%)、C(22.8%)、Ca(0.3%)等。忽略检测结果中 C 元素和其他污染时,白色粉末的主要成分是

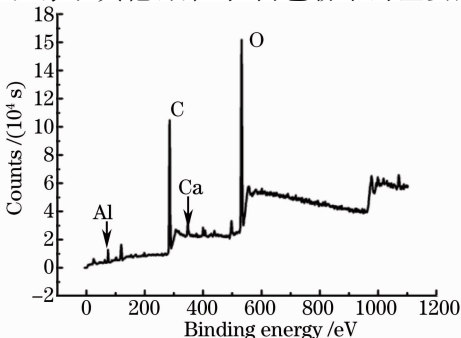


图 9 抛光前氧化铝陶瓷的 XPS 图谱

Fig. 9 XPS spectras of Al₂O₃ ceramic before polishing

Al₂O₃,但是 Al₂O₃ 的纯度相对于抛光前的原始材料有了很大提高。因此,可以认为白色物质产生的原因是当激光能量密度大于 21 J/cm² 时,激光与陶瓷材料之间产生剧烈的汽化作用,由于汽化膨胀压力的作用,使汽化后的材料向四周飞溅,飞溅出的 Al₂O₃ 材料在空气中重凝结晶,并附着在抛光后的陶瓷材料表面,形成白色粉末状物质。

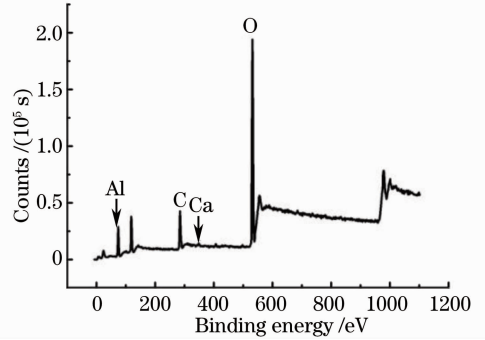


图 10 抛光后白色粉末的 XPS 图谱

Fig. 10 XPS spectras of white powder after polishing

为了进一步确定抛光后陶瓷表面白色粉末的形成原因,采用 X 射线衍射(XRD)分析了白色粉末的主要晶相,如图 11 所示。通过对比 Al₂O₃ 不同晶体类型的特征峰值所对应的 2θ,得出白色粉末中含有 α-Al₂O₃、γ-Al₂O₃ 两种晶体类型。从图 11 中可以看出 γ-Al₂O₃ 所对应的特征峰值的强度比 α-Al₂O₃ 要高很多,即 γ-Al₂O₃ 在白色粉末中所占的百分比比较高。推断原因主要为:汽化的 Al₂O₃ 会迅速地材料四周飞溅,飞溅的材料在空气中急速冷却结晶(温度低于 1000 ℃)为 γ-Al₂O₃,结晶后的 γ-Al₂O₃ 材料重新团聚在材料表面。其他少量的 Al₂O₃ 在激光加工后的材料的表面,温度较高(高于 1000 ℃),转化为稳定的 α-Al₂O₃ [13]。

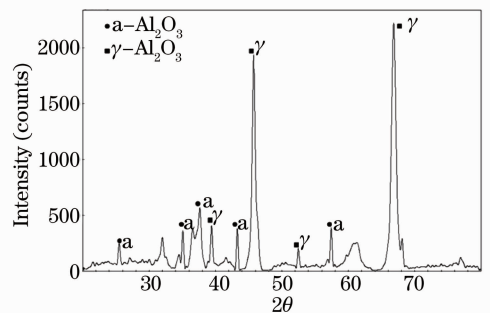


图 11 抛光后白色粉末的 XRD 图谱

Fig. 11 XRD spectra of white powder after polishing

根据以上激光抛光后陶瓷表面的白色粉末的形貌观察和 XPS、XRD 检测结果分析,可以认为这些白色粉末为抛光过程中汽化后的 Al₂O₃ 在空气中冷却

结晶产生的,其主要物相为 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。此结论与 Kacara 等^[14-15]的研究结果基本一致。所以在高能量密度下,紫外激光抛光陶瓷过程中存在很强的汽化作用去除材料的方式,多光子吸收光化学作用并不明显,陶瓷材料的性质在很大程度上影响了多光子吸收光化学反应的产生。紫外激光抛光陶瓷材料主要是通过激光的热作用使得陶瓷表面材料达到熔化和汽化的作用效果,熔化的材料通过流动、冷却重凝等过程,使材料表面粗糙度降低;汽化作用使材料表面凸峰晶粒被有效去除,汽化后的 Al_2O_3 在空气中冷却结晶,最终达到 Al_2O_3 陶瓷表面抛光的效果。

3 结 论

使用波长为 355 nm 紫外激光刻划、抛光 Al_2O_3 陶瓷,研究加工后的微观形貌和材料物相,分析其加工机理和热作用机制,得出以下结论:

1) 紫外激光加工 Al_2O_3 陶瓷过程中存在熔化和汽化作用形式,当选取的激光能量密度在陶瓷材料熔化阈值和汽化阈值之间时,有利于获得较好的表面加工质量。

2) 紫外激光加工 Al_2O_3 陶瓷过程中的能量密度超过汽化阈值后,激光加工后的材料表面会出现微裂纹,当能量密度继续增加,陶瓷材料会在热应力作用下整块剥离。微裂纹会影响陶瓷表面抛光质量,因此在抛光过程中要抑制微裂纹的产生。

3) 当能量密度大于 21 J/cm^2 时,紫外激光抛光 Al_2O_3 陶瓷过程中会产生大量白色物质,其主要成分为 Al_2O_3 ,主要物相为 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$,紫外激光抛光陶瓷过程中存在很强的汽化作用去除材料的机制。

4) 355 nm 紫外激光抛光 Al_2O_3 陶瓷时材料的主要作用机理为激光的热作用,激光的光化学作用不明显。

参 考 文 献

1 Cui Yuanyuan. Study of Laser Machining Ceramic Green Bodies [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
崔园园. 激光加工陶瓷胚体的工艺研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.

2 A Braun, K Zimmer, B, Hosselbrath, *et al.*. Excimer laser micromachining and replication of 3D optical surfaces[J]. *Apply Surface Science*, 1998, 127: 911-914.
3 T M Shaoa, M Hua, H Y Tam, *et al.*. An approach to modeling of laser polishing of metals[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, 197(1): 77-84.
4 J Hildebranda, K Hecht, J Bliedtner, *et al.*. Laser beam polishing of quartz glass surfaces[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 452-461.
5 R M Brusasco, B M Penetrante, J A Butler, *et al.*. CO_2 Laser polishing for reduction of 351 nm surface damage initiation in fused silica[C]. *International Society for Optics and Photonics*, 2002. 34-39.
6 Yang Huan, Huang Shan, Duan Jun, *et al.*. Contrastive study on laser ablation of single-crystal silicon by 1030 nm femtosecond laser and 355 nm nanosecond laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0103003.
杨 焕, 黄 珊, 段 军, 等. 飞秒与纳秒激光刻蚀单晶硅对比研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0103003.
7 C H Tsai, H W Chen. Laser milling of cavity in ceramic substrate by fracture machining element technique[J]. *Journal of materials Processing Technology*, 2003, 136(1): 158-165.
8 Xie Xiaozhu, Huang Xiandong, Chen Weifang, *et al.*. Study on scribing of sapphire substrate by pulsed green laser irradiation [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1203010.
谢小柱, 黄显东, 陈蔚芳, 等. 脉冲绿激光划切蓝宝石基片过程研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1203010.
9 Liu Ying, Wen Shizhu. Excimer micromachining mechanism of different materials [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2005, 24(1): 62-65.
刘 莹, 温诗铸. 不同材料的准分子微细加工机制[J]. *机械科学与技术*, 2005, 24(1): 62-65.
10 H Horisawa, E Hajime. Surface machining characteristics of sapphire with fifth harmonic YAG laser pulses [J]. *Vacuum*, 2004, 73(3-4): 661-666.
11 X X Li, T Q Jia, D H Feng, *et al.*. Ablation induced by femtosecond laser in sapphire [J]. *Applied Surface Science*, 2004, 225(1-4): 339-346.
12 Xu Gang, Dai Yutang, Xiao Xiang. Study on mathematical modeling and experiment of ultrashort laser polishing micro-processing [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0603003.
徐 刚, 戴玉堂, 肖 翔. 超短激光抛光微加工的数学建模与实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0603003.
13 E N Solodkii, N F Solodkii. Reasons for tinting of corundum ceramics (A Review) [J]. *Glass and Ceramics*, 2001, 58(11): 391-393.
14 E Kacara, M Mutlua, E Akman, *et al.*. Characterization of the drilling alumina ceramic using Nd:YAG pulsed laser [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(4): 2008-2014.
15 M M Hanon, E Akman, O B Genc, *et al.*. Experimental and theoretical investigation of the drilling of alumina ceramic using Nd:YAG pulsed laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44 (4): 913-922.

栏目编辑: 张 雁