

文章编号: 1001-3806(2007)01-0018-04

Al_2O_3 陶瓷的激光三维雕刻实验研究

王 成, 曾晓雁*

(华中科技大学 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074)

摘要: 基于激光三维雕刻对单层雕刻深度的工艺需求, 采用不同雕刻工艺参数对 Al_2O_3 陶瓷进行雕刻实验。详细分析了工艺参数对单层雕刻深度、雕刻质量的影响以及激光雕刻陶瓷的机理, 并建立起激光雕刻深度的数学模型。当激光输出功率为 12.2A、重复频率为 2kHz、激光扫描速度为 25mm/s 时, 陶瓷试样的单层雕刻深度最接近 0.1mm, 同时获得较高的雕刻质量。利用实验中获得的参数数据进行了三维实体的雕刻并给出了应用实例。结果表明, 分层成形原理可以应用于激光雕刻领域, 三维雕刻系统能够在陶瓷表面直接加工真正的三维图形。

关键词: 激光技术; 激光三维雕刻; 分层成形; Al_2O_3 陶瓷; 雕刻深度

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A

Experimental study about 3-D laser carving of Al_2O_3 ceramic

WANG Cheng, ZENG Xiaoyan

(State Engineering Research Center of Laser Processing Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract In order to the accurate single layer depth to meet the technological requirement of 3-D laser carving experimental study of laser carving was carried out on the surface of Al_2O_3 ceramic with different laser processing parameters. The effects of parameters on single layer depth, quality and the mechanisms of laser carving were described. The mathematical model of laser carving depth was established. Through experiments, it was found that the single layer depth was nearly 0.1mm with a tolerance of less than three thousandths when the laser power was 12.2A, the scanning speed was 25mm per second and the repeating frequency of laser pulse was 2kHz. At last, a 3-D solid was successfully carved on the surface of ceramic sample based on the experimental results. It was shown from the results that the layered forming principle could be applied in the field of laser carving and the 3-D laser carving system could directly carve the real 3-D graphics on the surface of ceramic.

Key words laser technique; 3-D laser carving; layered shaping; Al_2O_3 ceramic; carving depth

引 言

陶瓷作为一种重要的结构材料, 具有高强度、高硬度、耐高温、耐腐蚀、抗氧化、抗磨损等一系列优点, 在航空、航天、机械、电子、能源及生物工程等领域得到广泛应用。陶瓷是由共价键、离子键或两者混合的化学键结合而成的物质, 在常温下对剪切应力的变形阻力很大。同时由于陶瓷晶体离子间的化学键具有方向性, 原子堆积密度低, 原子间距大, 使陶瓷又显示出很大的脆性^[1]。陶瓷作为典型的硬脆性材料, 采用常规机械加工法难以加工, 尤其是加工高精度、形状复杂的构件更是如此。由于激光的高能量密度、高功率及瞬间加热的特点, 已被应用于陶瓷的打孔、切割、划线、焊接等。和其它陶瓷加工法相比, 激光陶瓷加工工

有效率高、成本低、质量好等优点。但是, 利用激光进行陶瓷的复杂成形加工, 一直是激光加工的难点。近年来, 国内外有不少采用快速成形技术烧结陶瓷件的报道^[2-4], 可以进行陶瓷的复杂成形加工, 但由于是采用陶瓷粉末或者与其它材料的粉末混合进行烧结, 使得制件在机械性能、尺寸形状精度方面还无法达到功能件的要求, 而且其后续处理工艺比较复杂。如果能直接利用陶瓷作为基材进行复杂构件的成形加工, 势必将大大扩展其应用范围。本文将介绍一种新的激光加工工艺, 即激光三维雕刻, 并利用该工艺直接在氧化铝陶瓷表面雕刻真正的三维图形。

1 雕刻原理及雕刻实验的必要性

通常的激光雕刻系统只能进行二维平面雕刻, 尽管可以通过控制激光束对同一图形或文字进行反复扫描刻蚀, 形成一定深度、呈立体状的图案, 但严格来讲, 这依然属于平面雕刻的范畴。对于那些带有斜面或复杂曲面的立体图形, 这些系统就无能为力。为了拓宽

作者简介: 王 成 (1973-), 男, 博士研究生, 主要从事计算机图形图像处理、计算机控制及分层成形技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xyzen@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2005-12-06 收到修改稿日期: 2006-01-12

激光加工的应用范围,本实验室成功研制了激光三维雕刻系统。该系统采用分层雕刻、累积成形的原理。系统通过对三维 CAD 模型离散分层切片,根据切片轮廓信息进行扫描线生成及扫描路径规划,并控制扫描装置在基材上进行选择性刻蚀,得到该层的平面图形,然后工作台上升,开始新一轮的切片与扫描,不断累积,最后在基材上形成模型的三维图形,见图 1。该系统不仅可以雕刻三维图形,也可以雕刻平面图形。

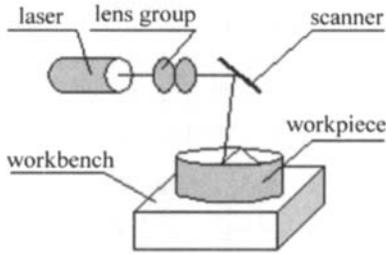


Fig 1 The principle of three dimension laser carving

从其原理不难看出,激光三维雕刻实质是将三维模型经过计算机切片处理,简化为二维平面进行雕刻。在计算机的控制下,通过激光扫描对选定区域进行填充,利用激光的高能量脉冲对材料进行刻蚀,达到去除成形的目的。一般的二维雕刻只要求在材料表面留下清晰可见的标记,对雕刻深度没有严格要求。但根据分层雕刻的原理,三维雕刻除了在分层平面上保持刻蚀深度一致外,刻蚀深度的可控性也是非常重要的。只有保证单层切片厚度与激光每层雕刻的实际深度相等,才能加工出理论上正确的三维实体。由于激光雕刻是一种无接触成形加工,无法像传统机床那样依靠机械进给来保证加工余量,只能通过调整系统的工艺参数,利用单脉冲激光束刻蚀材料表面,使一定体积的物质发生转移来确保某一具体材料的雕刻深度。故预先对待雕刻材料进行雕刻实验,获得在某一单层雕刻深度下的工艺参数数据是进行激光三维雕刻的重要一环。

利用激光对某种材料进行雕刻,其刻蚀深度总是同雕刻系统的工艺参数息息相关,表现出较强的设备相关性。刻蚀深度可以表示为工艺参数(如激光功率、扫描速度、重复频率等)的函数。有很多人陶瓷的激光加工进行过研究,有的通过实验还给出了陶瓷的激光铣削量与工艺参数的关系曲线^[5]。这些研究为陶瓷的激光加工积累了一定的经验和数据。但是不能将这些实验数据直接用于激光三维雕刻的参数设置,因为工艺参数的种类会因实验设备的不同而不同,而且不同的应用对参数的具体要求也不一样。加之由于陶瓷的成分及制作工艺不同,会导致陶瓷对光的吸收率、热传导率、比热容等性能参数存在差异,而这些参数都将直接影响陶瓷的雕刻深度。因此,在激光三维雕刻系统上对选定的陶瓷进行雕刻实验是必需的。

通过实验,不仅可以获得所需的精确单层雕刻深度,积累参数数据以建立工艺数据库,而且为进一步研究陶瓷的激光雕刻机理提供了条件。

2 实验设备及方法

雕刻试样选用厚度为 5mm 的 95% Al_2O_3 陶瓷片,表面为蓝色。实验所采用的设备是由笔者负责开发的激光三维雕刻系统,该系统主要由工控机、激光器、扫描装置、三维工作台及雕刻软件组成。其中激光器为波长 1.06 μm 的 Nd:YAG 固体激光器,最大平均输出功率 100W,实际输出功率大小可以通过调节氙灯电流来控制,可调范围 0.1A ~ 20A。该激光器可以输出连续式或调制式激光,实验中使用调制式,其调 Q 频率范围为 0.1kHz ~ 50kHz。

激光三维雕刻中,切片厚度如果取值过大,进行斜面雕刻时就会产生台阶效应,影响表面质量;若取值太小,又会增加雕刻层数,降低加工效率。因此,确定切片厚度既要考虑表面质量,又要顾及雕刻效率。在实际雕刻中,切片厚度一般取为 0.1mm。实验的目的除了探索改变工艺参数对雕刻深度及表面质量影响的规律外,更重要的是确定单层雕刻深度为 0.1mm 时各工艺参数的具体取值,为激光三维雕刻提供参数设置依据。为了方便定量评价激光雕刻深度,实验中直接在陶瓷试样表面雕刻 5mm × 5mm 的方形槽,激光扫描间距设为 0.1mm。为了便于测量和减小测量误差以获得更准确的单层雕刻深度,也为了模拟实际雕刻中的多层连续加工环境,采用雕刻 10 层然后取平均值的方法。

3 实验结果与分析

3.1 工艺参数对雕刻深度的影响

在激光扫描速度为 25mm/s 重复频率为 2kHz 的条件下,激光功率(用电流表征,下文同)对雕刻深度影响的关系曲线如图 2 所示。结果表明,激光输出功率

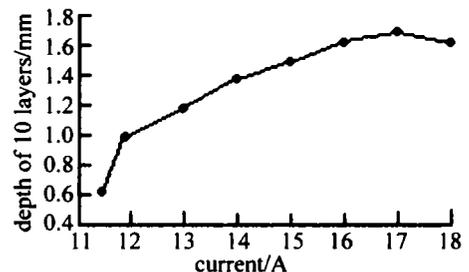


Fig 2 The relation between laser power and carving depth

率越大,雕刻深度越深。随着激光输出功率的增加,单个脉冲激光形成的孔深加大,由密集孔群形成的刻蚀区域也随之加深。但是实验发现,激光功率增加到一定值后(17A),光点温度急剧上升,达到陶瓷的熔点,

在雕刻面产生不易清除的熔渣,使有效雕刻深度下降。

图 3 所示为在激光功率为 12A、重复频率为 2kHz 的条件下,雕刻深度随激光扫描速度变化的规律。可

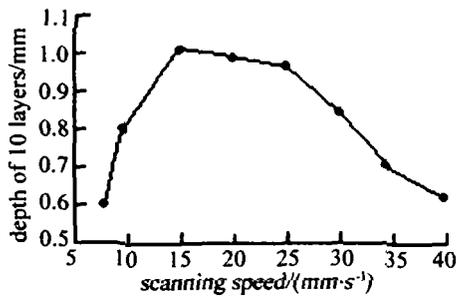


Fig 3 The relationship between scanning speed and carving depth

以看出:激光扫描速度太大或太小,雕刻深度都会降低,只有当扫描速度适中(此时为 15mm/s),雕刻深度才明显增加。如果激光重复频率保持不变,增加扫描速度会导致激光光斑重叠度降低,雕刻深度明显下降。太小的扫描速度又会引起单位时间内雕刻面接受的激光能量增加,产生熔渣,同样降低了雕刻深度。

在激光扫描速度为 25mm/s、激光功率为 12A 的条件下,雕刻深度随激光脉冲重复频率变化的关系曲线如图 4 所示。可见,雕刻深度随重复频率的增加而

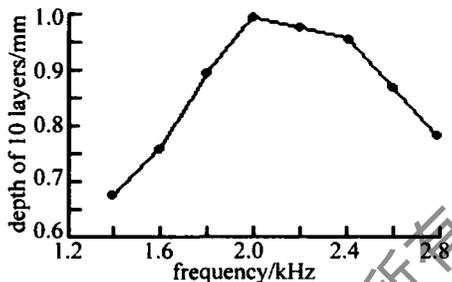


Fig 4 The relation between frequency of laser pulse and carving depth

增加,达到一定值后(2.0kHz),雕刻深度开始呈下降趋势。重复频率的增加意味着雕刻区在同一时间内接受的能量增加,激光和材料相互作用的次数增加,导致陶瓷部分熔化,在雕刻面产生熔渣,使有效雕刻深度下降。

3.2 雕刻质量及实验误差分析

为了方便评价某一参数对雕刻深度的影响,在实验中总是保持其它参数不变。通过实验可以看出,导致陶瓷雕刻面产生熔渣的原因实质上是相同的,即参数的改变均引起了单位时间内陶瓷单位面积接受激光能量的增加。其中,改变激光功率是显式提高激光能量,改变扫描速度及重复频率是隐式提高激光能量。导致雕刻质量恶化的直接原因就是在加工面形成了厚度不匀的熔渣。熔渣的堆积不仅使加工表面变得极其粗糙,而且会引起图形尺寸及形状的失真,使雕刻无法继续进行。实验表明,在高激光功率(大于 18A)、低扫描速度(小于 12mm/s)、高重复频率(高于 2.4kHz)的条件下,容易在雕刻面形成熔渣。另外,有的雕刻表

面呈现微细的波浪纹,可能与激光能量的波动及扫描速度有关。实验发现,降低扫描速度可以减小波浪纹,获得平整的雕刻面。

由激光器和飞行光路组成的扫描系统,其焦平面位置是固定的。当刻蚀完一层之后,雕刻面下降,此时工作台上升,雕刻面重新处于焦平面位置。由于实验前并不知道每层的雕刻深度,在 10 层的雕刻过程中如果让工作台位置保持不变,雕刻面就会逐渐远离焦平面,导致光斑直径变大,能量密度急剧下降。对于长焦光学系统,1mm 左右的离焦产生的影响基本可以忽略,但对于短焦系统,光斑大小变化明显,如果忽略就可能造成较大的误差。为此,实验中每次刻完一层之后,让工作台自动上升一定的距离,其大小可根据实际情况模糊预设,如在本实验中设为 0.1mm。

3.3 雕刻机理分析

激光烧蚀过程一般被认为是高能量脉冲激光轰击固体材料表面,激光辐射区域的固体物质在瞬间发生微型爆炸式喷发、直接气化导致物质转移的过程。由于激光烧蚀的机理非常复杂,目前尚无定论。但基本认为有两种方式:一种是认为被辐照的固体物质直接气化逸出固体表面,另一种是认为固体物质先熔化再气化逸出固体表面^[6,7]。引起物质逃逸的条件是入射激光的功率密度超过某一阈值,这个阈值与激光的脉冲宽度、材料对光的吸收率、热导率、比热容、熔点等参数有关。需要指出的是,目前在研究激光雕刻、激光打标时,一般笼统地认为材料的去除机理是烧蚀。

ZHANG 等人^[8]提出,陶瓷的激光加工难易程度可用激光单位能量材料的去除量(mm^3/J)即去除效率的大小来描述。一般而言,材料的熔点越高,或热传导率越大,激光的材料去除率就越低。对于熔点较低的材料,在激光照射下,材料表面先熔化然后温度很快就上升至沸点并气化溅射^[9,10]。但对于陶瓷这种高熔点、低传导率且脆性很大的材料,在不同的工艺参数下,表现出不同的去除机理。实验表明,在激光功率小于 18A、扫描速度大于 12mm/s、重复频率低于 2.4kHz 时,在激光光斑周围很小的区域引起定向温度梯度并产生很高的机械应力,导致陶瓷形成微细裂缝进而粉碎成小块状物体被气流带走。但是当提高陶瓷表面的入射激光能量时,陶瓷在短时间内熔融,由于熔融体无法在激光移走之前全部气化转移,当激光移走,剩余的部分就会凝固重铸形成熔渣。本实验中,陶瓷的雕刻机理主要表现为块状剥落和熔体溅射。

3.4 应用实例

通过进一步试验得到:当激光输出功率为 12.2A、重复频率为 2kHz、激光扫描速度为 25mm/s 时,陶瓷

试样的平均单层雕刻深度最接近 0.1mm, 误差达到 0.003mm, 而且雕刻面的陶瓷均以微细粉末汽化转移, 无熔渣形成, 雕刻质量非常好。图 5 所示为采用这一组实验参数在激光三维雕刻系统上雕刻的三维五角星图形, 雕刻类型为阳刻。五角星图形长 15mm, 宽 14.27mm, 高 2.5mm, 边框距 1mm。

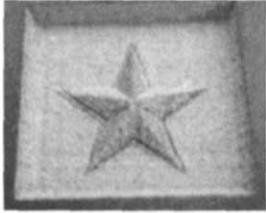


Fig 5 3-D five pointed star carved on Al_2O_3 ceramic

4 雕刻深度数学模型

在激光三维雕刻中, 聚焦的激光束犹如一把铣刀, 在计算机的控制下进行材料的去除。当激光束沿给定的方向扫描时, 激光光斑就会部分重叠形成密集孔群, 见图 6。通过调节扫描速度及扫描间距, 可以改变每

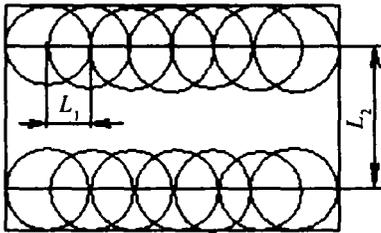


Fig 6 Overlapping faculas in laser carving

个光斑同其在水平和竖直方向上相邻光斑之间的间隔 L_1 及 L_2 。前面已经通过实验分析了各工艺参数对雕刻深度的影响, 为进一步从理论上进行分析并指导以后的雕刻实验, 建立一个理想的雕刻深度数学模型是非常有意义的。

假设采用 Nd:YAG 固体激光器在试样上雕刻一个长度为 L 、宽度为 W 的矩形槽, 单脉冲形成的孔径为 d , 深度为 h , 并近似认为激光形成的孔是无锥度的圆柱体。由文献 [11] 可知:

$$h = \left[\frac{3E}{\pi(L_b + 2L_m) \tan^2 Q} \right]^{1/3} \quad (1)$$

式中, E 为激光输出单脉冲能量 (J); L_b 为材料的汽化能 (J/cm^3), L_m 为材料的熔化热比能 (J/cm^3), Q 为激光进入材料的发散角。对于同一种材料, L_b 和 L_m 都是固定的, 所以存在: $h \propto E^{1/3}$ 。

由上式可知: 当材料一定时, 激光的雕刻深度仅与激光的入射能量有关。在激光沿给定方向以一定速度扫描时, 可以计算在单位长度内材料表面所接收的平均激光能量。由于激光光斑在扫描过程中相互重叠, 每个单位区域均被光斑多次重复雕刻, 因此, 可以将单

位长度内接收的平均能量视为激光单脉冲能量 E 来计算雕刻深度。设 v 为扫描速度, f 为激光脉冲重复频率, e 为单个脉冲的激光能量, 则单位长度内接收的平均能量 E 为:

$$E = f \cdot e / v \quad (2)$$

若令 $K = \left[\frac{3}{\pi(L_b + 2L_m) \tan^2 Q} \right]^{1/3}$, 并将 (2) 式代入 (1)

式中, 就得到激光雕刻深度和各个工艺参数之间的数学关系:

$$h = K \left[\frac{fe}{v} \right]^{1/3} \quad (3)$$

5 结 论

保证单层切片厚度与激光每层雕刻的实际深度相等, 是进行激光三维雕刻的工艺关键。对于一种选定的雕刻材料, 只要工艺参数选择得当, 总可在保证雕刻质量的前提下获得某一精确的单层雕刻深度。探索激光雕刻深度随工艺参数变化的规律、建立雕刻数学模型, 有助于在实验中快速获得满足工艺需要的参数数据, 为激光三维雕刻提供数据依据。三维五角星图形的成功雕刻不仅说明分层成形原理可应用于激光雕刻领域, 且为激光三维雕刻系统提供了一个工业性验证。

参 考 文 献

- [1] NI W. Introduction to mineral material [M]. Beijing Science Press 1999. 123~125 (in Chinese).
- [2] CAWLEY J D, HEUER A H, NEWMAN W S *et al*. Computer aided manufacturing of laminated engineering materials [J]. American Ceramic Society Bulletin 1996, 75(5): 75~79.
- [3] KLOSTERMAN D A, RICHARD C. Interfacial characteristics of composites fabricated laminated object manufacturing [J]. Composites Part A, 1998, 29(9~10): 1165~1174.
- [4] DENG Q L, HU D Q, PEI J Y *et al*. Experimental study on selected laser sinter of ceramic powder [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2001, 37(5): 28~31 (in Chinese).
- [5] YUAN G F, ZENG X Y. Research on laser milling Al_2O_3 ceramic [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(5): 467~470 (in Chinese).
- [6] HANSEN S G, ROBITA L L E. Formation of polymer films by pulsed laser evaporation [J]. A P L, 1988, 52(1): 81~83.
- [7] BIANCHET G G, FISHER J R, JACKSON C L. Laser ablation and the production of polymer films [J]. Science 1993, 262(5134): 719~721.
- [8] ZHANG Sh, KANG Sh Y. Experimental study on laser machining ceramic [J]. Applied Laser, 1994, 14(6): 253~256 (in Chinese).
- [9] YUAN G F, ZENG X Y. Experimental study of laser milling silicon wafer [J]. Laser Technology, 2003, 27(5): 460~465 (in Chinese).
- [10] ZHANG L, LOU Q H, WEI Y R *et al*. Micropatterns on polymers etched by excimer laser [J]. Laser Technology, 2002, 26(2): 94~96 (in Chinese).
- [11] ПЫКАЛИН H H. Laser processing of material [M]. Beijing Science Press, 1982. 168~182 (in Chinese).