

三维激光烧蚀加工的试验研究*

刘劲松 谭怀亮

(湖南大学激光研究所,长沙 410082)

摘要 针对激光烧蚀加工出三维表面所存在的几个问题,即沿光轴方向的尺寸精度,必要的表面粗糙度和表面完整性,设计了一种扩束-无球差聚焦光路系统,并配合适当的激光焦斑峰值功率密度,大大改善了直接切削的尺寸精度,从传热学角度分析了激光烧蚀的能量传输,获得了对激光烧蚀过程的了解,以陶瓷为例的激光烧蚀实验证实了这一分析的正确性,从而为改善激光烧蚀加工的表面粗糙度提供了依据。

关键词: 激光烧蚀加工; 尺寸精度; 去除机理; 表面质量

1 引言

激光烧蚀加工(laser ablation)采用脉冲激光,加热熔化以至汽化材料,每个激光脉冲在材料表面烧蚀一个小坑,通过大量激光脉冲的作用和大量烧蚀坑的叠加,有可能形成完整的已加工表面,是为三维激光烧蚀加工。

激光烧蚀加工是一个热作用过程,不存在切削力,在陶瓷这样的难加工材料和微型零件的加工方面应有良好的应用前景。

现已广泛应用的激光打印、打标也是激光烧蚀加工,但不严格控制沿光轴方向的加工尺寸和加工表面质量,属二维加工。

要用激光烧蚀加工出精确的三维表面,需要严格控制沿光轴方向的加工尺寸,保证必要的加工表面粗糙度及表面完整性,也应该有一定的材料去除率,这些问题将分别讨论如下:

2 激光烧蚀加工的尺寸精度研究

目前,控制激光加工尺寸精度的方法分为三类,第一类通过控制材料在不同部位的加工量或加工深度来实现三维切削,如日本渡部武弘根据激光加工深度与离焦量的关系,采用普通脉冲 YAG 激光对碳化硅陶瓷加工,获得了尺寸精度为 0.5mm,表面粗糙度 R_{\max} 0.13mm 的加工表面^[1];坂本治久根据激光加工深度与脉冲频率的关系,不离焦以声光调 Q 的 YAG 激光加工碳化硅陶瓷,获得了较高尺寸精度的加工表面,表面粗糙度约为 R_{\max} $5\mu\text{m}$ ^[2]。但是,此类

* 国家自然科学基金资助项目

收稿日期:1995年2月8日

方法的前提是待加工表面必须是理想的规则表面,如果待加工表面偏离规则表面,则加工表面的不平整度将复映为加工误差。此外,材料的去除量也难于严格控制。第二类是采用在线测量的方法来控制尺寸误差。如 G. Eberl 为把激光三维雕刻的尺寸精度提高到 $10\mu\text{m}$ 内,对激光雕刻的深度进行在线测量^[3]。此类方法其装置大多比较复杂,为此,我们研究了一种直接以激光刀刀尖为切削点的直接切削法。这种方法采用小焦深的激光,小焦深的激光就相当于一把有着明确刀尖的激光刀,刀尖就是激光的焦点,与前两种方法相比,这种方法最为简便,且有可能达到一定的尺寸精度。

2.1 小焦深激光的光路设计

由于实际的聚焦激光束均有一定的焦深,在焦斑处,光束直径最小,功率密度最大,沿光轴方向偏离聚焦平面,光斑尺寸逐渐加大,功率密度逐渐减小,如果焦斑处的功率密度高于去除材料所需的功率密度,则偏离焦斑某一距离后,激光的功率密度将降低而不能去除材料,我们把这一距离定义为焦深。

根据这一定义,加工激光的焦深由激光的焦斑功率密度和聚焦激光的光路两者共同决定。从聚焦光路而言,对于无像差透镜,增大光束直径,减小焦距,即减小焦数,可以减小焦深,但对于球面透镜,由球差引起的焦深随光束直径的增大和焦距的减小而增大,为此,设计制造了双曲面透镜,消除球差,采用焦距分别为 15mm 和 60mm ,焦点重合的两双曲面透镜组成扩束系统,再用焦距为 15mm 的双曲面透镜聚焦,如图 1 所示。

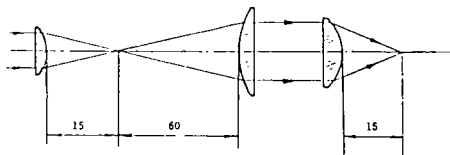


图 1 双曲面透镜系统

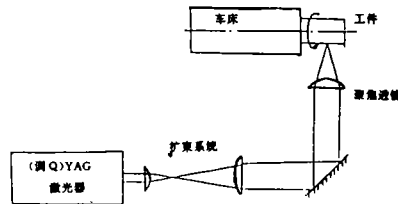


图 2 试验装置的组成示意图

2.2 切削精度试验

试验装置如图 2 所示。YAG 激光束与车床导轨平行,扩束并入射到装在溜板上的反射镜,转折到垂直于主轴的方向,经安装在刀架上的双曲面镜聚焦,进行刀削,透镜前方设置与光轴同心的锥形喷嘴,吹压缩空气以排除汽化物,激光器为声光调 Q 的 YAG 激光。

采用上述装置,以氧化铝为加工试件,在表 1 的条件下进行切削精度的试验。

表 1

| | |
|--------------|-----------------|
| 激光工作方式:声光调 Q | 工件:氧化铝陶瓷 |
| 脉冲频率:2kHz | 加工速度:70mm/s |
| 平均功率:20w | 工件每转走刀量:0.1mm/r |
| 5w | 辅助气体:压缩空气 |

首先调整激光束相对于工作表面的位置,当材料的去除速度最大时,表明焦斑正好位于工件表面,亦即离焦量为 0,使焦斑在一定的正离焦和负离焦下加工陶瓷,测量激光加工前后工件的直径,计算出材料去除速度,得到的材料去除速度与离焦量的关系曲线如图 3 所示。当离

焦量达到一定数值,材料去除速度趋近于零,表明激光束已不能去除材料,此即为激光切削的位置不确定度。

由图可见,当激光功率较小时,激光切削的位置不确定度也较小,但此时材料的去除速度也低。目前我们获得的最小的尺寸不确定度约为 $\pm 0.25\text{mm}$,这在我们已知文献中是最高的。

3 激光烧蚀加工去除材料的机理

试验表明,采用声光调 Q 的高频脉冲激光加工材料时比采用连续激光,在保持材料表面原有性能方面有显著的优越性,因此,研究采用高频脉冲激光获得表面粗糙度值较低的加工表面有十分重要的意义。

为降低激光切削后材料的表面粗糙度值,首先必须对激光烧蚀材料的机理与去除过程有一个明确的认识。为此,我们首先以陶瓷为加工对象,实测了不同条件下激光切削陶瓷的比能量,并从传热学角度进行了理论分析,明确了激光烧蚀加工去除材料的过程。

3.1 激光切削陶瓷的比能量和能量利用

YAG 激光加工工程陶瓷和金属材料,本质上都是热作用过程,即激光作用于材料使其温度升高、熔化、汽化或升华分解而达到去除材料的效果。

加工材料的激光其能量除用于去除材料外,尚存在相当一部分能量损失,包括:材料对激光的反射,激光能量部分传入材料基体,激光对去除后的产物继续强烈加热,等离子体对激光的阻隔,等等。如果忽略这些能量损失,激光能量全部用于熔融汽化或升华材料,这时去除每单位体积材料所需要的激光能量,我们称之为最小比能量,以氮化硅陶瓷为例,可以计算出其最小比能量为 $24.5\text{J}/\text{mm}^3$ 。

为了与激光加工陶瓷的最小比能量进行比较,我们通过实验测出激光加工陶瓷的实际比能量,并研究了采用不同工件线速度时脉冲激光光斑在工件上重叠或不重叠对实际比能量的影响,实验方法是:固定激光束,工件装夹于车床并以不同转速旋转,激光束对工件进行行径向照射,在工件上加工出一横槽,在各自的转速下工件不作纵向进给,用光切显微镜观察沟槽的截面,再根据光切显微镜读取的截面面积求出激光去除的陶瓷体积,从而获得激光加工陶瓷的实际比能量。

记脉冲激光的脉宽为 t_1 ,前后两脉冲周期为 t_2 ,对声光调 Q 的脉冲激光,近似地有 $t_1 = 150\text{ns}$,而 $t_2 = 1/f$ 。由于脉冲激光的脉宽极短,因此,可以认为,在脉宽时间 t_1 ,内工件静止不动,而在两脉冲之间的时间 t_2 ,内,当工件线速度较小时,工件转过的距离不足以使这两个脉冲激光光斑前后分离,这两个脉冲激光的光斑在工件上部分重叠;当工件线速度较大时,工件转过的距离足以拉开这两个脉冲光斑在工件上的位置。

在表 2 的加工条件下,采用从 85rpm 到 830rpm 5 种不同的工件转速对氮化硅陶瓷加工,得到了各种转速下的激光加工的实际比能量,实际比能量与工件线速度的关系如图 4 所示。

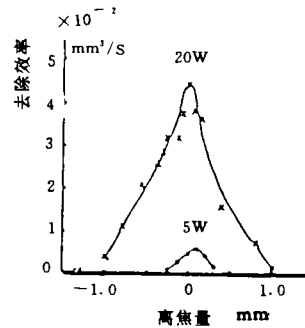


图 3 采用小焦深激光获得的尺寸精度的尺寸精度

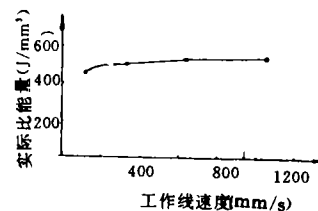


图 4 实际比能量与工件线速度的关系

表 2

| | |
|--------------|----------------------------|
| 激光工作方式:声光调 Q | 照射时间:15S |
| 脉冲频率: 3kHz | 工作尺寸:φ24.8mm |
| 平均功率:10W | 工作转速:85、147、260、475、830rpm |
| 工件:氮化硅陶瓷 | 辅助气体:压缩气体 |

3.2 激光烧蚀加工去除材料的过程

调 Q 脉冲激光加工陶瓷的比能量随工件速度增大而缓慢增大,但不甚明显,亦即比能量基本不依赖于前后脉冲在工件上重叠与否,由此可以得到一个重要结论:调 Q 脉冲激光烧蚀陶瓷时是以单个脉冲的形式独立地去除陶瓷,各个脉冲对陶瓷产生的热量积累可以忽略不计。

这一结论可以由传热学理论来加以证明,由传热学可知,热穿透深度为 $\sqrt{4\alpha t}$ 。式中 α 为材料的热扩散率, t 为时间,当材料的厚度 $d > \sqrt{4\alpha t}$ 时,可近似为半无限体;当光斑的线度 $L \gg \sqrt{4\alpha t}$ 时,可近似为一维热传导,在我们的实验条件下,脉宽 $t_1 = 150\text{ns}$, α 取 $10^{-2}\text{cm}^2/\text{s}$ 数量级, $\sqrt{4\alpha t}$ 约为 $0.8\mu\text{m}$,而光斑的线度为 $100\mu\text{m}$,可见 $L \gg \sqrt{4\alpha t}$ 。因此,上述激光切削可近似为一维热传导,而把工件视为半无限体,此时在一个脉宽为 t_1 的激光矩形脉冲作用下,被辐照材料的表面温度与时间的关系为^[4]。

$$T(t) = 2AI \sqrt{\alpha} (\sqrt{t} - \sqrt{t - t_1}) / k \sqrt{\pi}$$

式中 A 为表面对激光的吸收率, I 为激光功率密度, k 为材料的导热系数,由式可以知道,当一个激光脉冲刚结束的瞬间时刻,即 $t = t_1$ 时,表面温度 $T(t)$ 有最大值

$$T(t)_{\max} = T(t_1) = 2AI \sqrt{\alpha t_1} / k \sqrt{\pi}$$

而当此脉冲结束,下一脉冲开始的时刻,表面温度

$$T(t_2) = 2AI \sqrt{\alpha} (\sqrt{t_2} - \sqrt{t_2 - t_1}) / k \sqrt{\pi}$$

实验采用的脉冲频率为 3kHz,此时

$$\frac{T(t_2)}{T(t)_{\max}} \times 100\% = \frac{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_2 - t_1}}{\sqrt{t_1}} \times 100\% = 1.06$$

这就是说,在第二个激光脉冲开始前的瞬间,温度已下降到第一个脉冲烧蚀材料完毕时温度的 1.06%,亦即第一个脉冲烧蚀材料产生的温升已几乎全部消失,各个脉冲对陶瓷几乎没有热量积累,这种情况对于消除加工过程的热影响,保持已加工表面的完整性是非常有利的。

4 结 论

(1) 采用扩束-无球差聚焦光路系统并配合适当的激光焦斑功率密度,可大大改善激光烧蚀加工的尺寸精度;

(2) 声光调 Q 的 YAG 激光烧蚀材料时是以单个脉冲的形式独立地去除陶瓷,而不依赖于前后脉冲对材料产生的热积累,各个脉冲对材料的热量积累可以忽略不计。

参 考 文 献

- [1] 昭和 63 年度精密工学会春季大会讲演会论文集. 明治大学工学部, 昭和 63 年 3 月 18 日, 东京, 精密工学会, 1988:851-852
- [2] 1989 年度精密工学会春季大会讲演会论文集. 千世工业大学, 平成元年 3 月 24 日, 东京, 精密工学会, 1989:1053-1054
- [3] GALEO'91 Laser Material Processing. San Jose, California, 3-8 Nov. 1991, Orlando. Flodrida, Laser Institute of America, 1992
- [4] 李力钧, 现代激光加工及其装备. 北京: 北京理工大学出版社, 1993

A Study of Three Dimensional Laser Ablation

Liu Jinsong, Tan Huailiang

(*Institute of Laser, Hunan University, Changsha 410082*)

Abstract

Several problems of dimensional precision, surface roughness and surface integrity must be solved to obtain three dimensional surface by laser ablation. The dimensional precision is improved greatly by using focal system with shorter focal depth and choosing appropriate peak power density at the focal spot. Laser ablation mechanism is understood by analysing heat transfer. Experimental results of laser ablation ceramics show that the analysis are right.

Key words: Laser ablation, Dimensional accuracy, Ablation mechanism, Surface integrity