



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110497092 B

(45)授权公告日 2020.08.14

(21)申请号 201910751233.8

审查员 叶志坚

(22)申请日 2019.08.15

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 110497092 A

(43)申请公布日 2019.11.26

(73)专利权人 大连理工大学  
地址 116024 辽宁省大连市甘井子区凌工  
路2号

(72)发明人 马建伟 王健 贾振元 姜文文  
王旭林 贺广智 司立坤

(74)专利代理机构 大连理工大学专利中心  
21200

代理人 关慧贞

(51)Int.Cl.

B23K 26/364(2014.01)

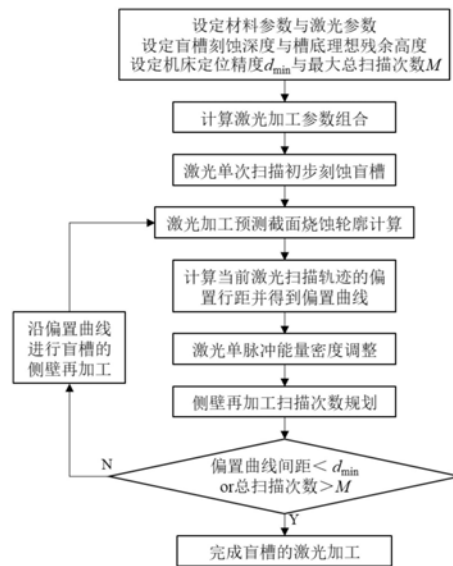
权利要求书5页 说明书8页 附图4页

(54)发明名称

一种低侧壁锥角盲槽的激光加工方法

(57)摘要

本发明一种低侧壁锥角盲槽的激光加工方法属于激光加工技术领域,涉及一种低侧壁锥角盲槽的激光加工方法。该方法先计算刻蚀所需深度的激光加工参数组合并进行盲槽的初步刻蚀,根据设定槽底理想残余高度与预测截面烧蚀轮廓,将当前激光扫描轨迹以微小行距进行偏置得到偏置曲线,作为后续盲槽侧壁再加工的激光扫描轨迹。再由激光光斑能量分布与加工材料的烧蚀阈值,计算激光沿偏置曲线进行扫描的单脉冲能量密度。最后,基于预测截面烧蚀轮廓以烧蚀深度为约束计算沿偏置曲线进行刻蚀的再加工次数。当偏置曲线间距或总扫描次数达到设定极限值时完成盲槽的激光加工。该方法在保证加工深度和盲槽宽度精度的同时减小盲槽侧壁锥角,提高了激光加工质量。



1. 一种低侧壁锥角盲槽的激光加工方法,其特征在于,该方法先建立包含材料参数和加工参数的激光加工截面烧蚀轮廓预测模型,以确定刻蚀特定深度盲槽所需的激光加工参数组合,并取其中一组参数进行盲槽的初步刻蚀;设定槽底理想残余高度,结合预测截面烧蚀轮廓计算当前激光扫描轨迹的偏置距离,对当前激光扫描轨迹进行等距偏置得到偏置曲线,作为后续侧壁再加工的激光扫描轨迹;然后,根据激光光斑内的能量分布与材料的烧蚀阈值约束,计算沿偏置曲线进行刻蚀所需的激光单脉冲能量密度,以避免金属表面的盲槽边缘过烧;最后,基于预测截面烧蚀轮廓以预设烧蚀深度为约束,计算沿偏置曲线进行刻蚀时盲槽截面槽底局部最大烧蚀深度,达到预设烧蚀深度所需的再加工次数;以最小偏置曲线间距和最大总扫描次数,作为盲槽侧壁再加工的终止条件;方法的具体步骤如下:

步骤1,计算初步刻蚀盲槽的激光加工参数组合

激光通过热效应去除材料存在一个烧蚀阈值,是指激光对材料产生不可逆的破坏所需的最小能量密度;对于特定的激光和材料,烧蚀阈值 $F_{th}$ 为:

$$F_{th} = (T_m - T_0) \sqrt{2Kt_p \rho_s C_p} \quad (1)$$

其中, $T_m$ 为材料熔点, $T_0$ 为室温, $t_p$ 为激光脉冲宽度, $K$ 为材料热导率, $\rho_s$ 为材料固态密度, $C_p$ 为材料比热容;

目前用于加工的激光脉冲宽度一般在纳秒量级甚至更小,而光斑半径 $w_0$ 在数十微米量级以上,故热扩散距离 $l_t = \sqrt{2Kt_p / \rho_s C_p} \ll 2w_0$ ,且激光对金属材料的穿透深度极小,认为用于加工的激光能量在材料表层被完全吸收并沿激光入射方向扩散至材料内部,即各激光脉冲均沿垂直于工件表面的方向进行材料烧蚀;光斑中心处被材料吸收的单脉冲能量密度 $F_0$ 由下式计算:

$$F_0 = \frac{2AE_p}{\pi w_0^2} = \frac{2AP}{\pi w_0^2 f} \quad (2)$$

其中, $A$ 为材料对激光的吸收率, $E_p$ 为激光的单脉冲能量, $f$ 为激光的脉冲重复频率, $P$ 为激光器的平均功率,激光器输出的单脉冲能量密度可由 $F_0/A$ 求得;

取一微小范围分析,则光斑某点邻域内单脉冲能量密度视作均为 $\delta F$ ;根据能量守恒定律,一定单脉冲能量密度激光去除一定体积材料时有以下等式:

$$\delta F - F_{th} = [\rho_s \Delta H_{s1} + \rho_l C_p (T_b - T_m) + \rho_l \Delta H_{lv}] \delta h \quad (3)$$

其中, $\rho_s$ 和 $\rho_l$ 分别为材料固态密度和液态密度, $\Delta H_{s1}$ 和 $\Delta H_{lv}$ 分别为材料熔化焓和汽化焓, $T_b$ 为材料沸点, $\delta h$ 为材料在所分析微小范围内的去除深度;

当激光沿直线扫描刻蚀盲槽时,在金属表面光斑中心经过的任意一点建立坐标原点 $O$ ,以激光扫描方向为 $y$ 轴方向,以垂直于激光扫描方向为 $x$ 轴方向,建立直角坐标系;光斑中心在 $O$ 点时单脉冲能量密度分布为:

$$F(x, y) = F_0 \exp\left(\frac{-2y^2}{w_0^2}\right) \exp\left(\frac{-2x^2}{w_0^2}\right) \quad (4)$$

结合公式(3)和公式(4),得到单脉冲去除材料后的烧蚀深度分布为:

$$h_p(x, y) = \frac{\max\{0, [F(x, y) - F_{th}]\}}{\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_l C_p (T_b - T_m) + \rho_l \Delta H_{lv}} \quad (5)$$

其中,  $h_p(x, y)$  为材料经过单脉冲作用后在  $(x, y)$  处的烧蚀深度;

当脉冲重复频率为  $f$  的激光束以扫描速度  $v$  沿  $y$  轴方向刻蚀材料时, 对于光斑中心从  $0$  点移动  $k \Delta y$  距离的第  $k$  个脉冲, 有:

$$\Delta y = \frac{v}{f} - vt_p \approx \frac{v}{f} \quad (6)$$

且, 该脉冲对应光斑在过  $0$  点的横截面即  $x$  轴上的单脉冲能量密度分布:

$$F_k(x, 0) = F_0 \exp\left(\frac{-2k^2 \Delta y^2}{w_0^2}\right) \exp\left(\frac{-2x^2}{w_0^2}\right) \quad (7)$$

为简化表达, 令  $\alpha = -2\Delta y^2/w_0^2 = -2v^2/(f^2 w_0^2)$ , 则上式化为:

$$F_k(x, 0) = F_0 \exp(\alpha k^2) \exp\left(\frac{-2x^2}{w_0^2}\right) \quad (8)$$

在激光束接近和离开  $0$  点的过程中, 作用于  $0$  点的脉冲个数  $N$  为:

$$N = 2n + 1 = 2 \operatorname{int}\left[\frac{w_0 f}{v}\right] + 1 \quad (9)$$

其中,  $n$  为激光束在接近/离开  $0$  点过程中作用于  $0$  点的脉冲个数,  $\operatorname{int}\left[\frac{w_0 f}{v}\right]$  为向下取整函数;

当激光以恒定光斑尺寸刻蚀, 各脉冲的材料去除结果均由公式 (5) 计算; 将  $N$  个脉冲在  $x$  轴各点的材料烧蚀深度叠加, 即得到所刻蚀盲槽的截面轮廓为:

$$h(x) = \frac{\sum_{k=-n}^n \max\{0, [F_k(x, 0) - F_{th}]\}}{\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_l C_p (T_b - T_m) + \rho_l \Delta H_{lv}} \quad (10)$$

其中,  $h(0)$  即为所需的盲槽刻蚀深度;

上式是在激光扫描轨迹为直线的条件下得出的, 实际加工图形的最小曲率半径一般在毫米量级以上, 比光斑尺寸大至少一个数量级, 故  $N$  个脉冲的光斑中心仍可近似位于一条直线上;

为保证加工效率, 根据公式 (10) 计算激光单次扫描实现所需最大烧蚀深度的工艺参数组合, 并取其中一组参数进行盲槽的初步刻蚀, 边缘修整由后续步骤完成;

步骤2, 确定侧壁再加工的激光扫描轨迹

经过步骤1后, 所加工盲槽的最大烧蚀深度满足要求但侧壁锥度较大; 为减小侧壁锥度, 还需对当前激光扫描轨迹进行等距偏置得到偏置曲线, 并将其作为后续侧壁再加工的激光扫描轨迹, 对盲槽进行修边; 盲槽初步刻蚀完成后,  $0$  点亦为盲槽截面在金属层表面的

中点,  $x$ 轴亦为盲槽截面各点横坐标,  $y$ 轴亦为盲槽中心线; 对于第  $i$ 次偏置 ( $i \geq 0$ ), 当  $i=0$ 时表示盲槽的初步刻蚀, 此时截面烧蚀轮廓为:

$$h_0(x) = \frac{m_0 \sum_{k=-n}^n \max\{0, [F_k(x, 0) - F_{th}]\}}{\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_l C_p (T_b - T_m) + \rho_l \Delta H_{lv}} \quad (11)$$

其中,  $m_0$ 为第  $i=0$ 次偏置后沿偏置曲线加工的扫描次数, 且有  $m_0=1$ ;

设第  $i$ 次偏置下侧壁再加工完成时的截面烧蚀轮廓为  $h_i(x)$ , 其经过第  $i+1$ 次偏置下的侧壁再加工后所产生的槽底理想残高顶点与  $0$ 点的水平距离为  $\Delta d_i$ , 由于  $\Delta d_i$ 位置对应的烧蚀深度为  $h(0) - h_{残}$ , 则有:

$$\Delta d_i = h_i^{-1}[h(0) - h_{残}] \quad (x > \Delta d_{i-1}) \quad (12)$$

其中,  $h_i^{-1}(x)$ 为  $h_i(x)$ 的反函数, 残高  $h_{残}$ 为第  $i+1$ 次偏置下的侧壁再加工所产生的槽底理想残高顶点与截面轮廓  $h(0)$ 点处的高度差, 此外有  $\Delta d_{-1}=0$ ;

设激光沿第  $i$ 次偏置  $i \geq 1$ 下的偏置曲线扫描时光斑中心与  $0$ 点的水平距离为  $d_i$ , 由于理想残高顶点与金属层表面的图案边缘均为材料刚好未发生烧蚀的位置, 故光斑在上述两处位置的能量密度值均对应于材料烧蚀阈值, 再由激光光斑单脉冲能量密度分布的对称性得到  $d_i$ 的计算公式为:

$$d_i = \Delta d_{i-1} + \frac{\frac{D}{2} - \Delta d_{i-1}}{2} = \frac{D + 2\Delta d_{i-1}}{4} \quad (13)$$

其中,  $D$ 为根据公式 (11) 计算得到的最大烧蚀宽度, 因为, 在公式 (11) 中描述了加工盲槽的截面轮廓,  $h_0(x)$ 即为盲槽各点  $x$ 对应的深度, 利用MATLAB计算  $h_0(x)$ 刚好等于  $0$ 时的位置即为盲槽的边缘, 两侧边缘的距离即为盲槽的最大烧蚀宽度  $D$ ; 此外, 由定义有  $d_0=0$ ;

步骤3, 激光单脉冲能量密度调整

经过步骤2确定偏置曲线后, 若仍采用步骤1中的单脉冲能量密度进行加工, 会造成盲槽深度已经达到  $h(0)$ 的地方被继续刻蚀, 进而会引起基底损伤或受热变形严重, 另外还会造成金属层表面的盲槽边缘被继续刻蚀, 导致加工盲槽的尺寸精度降低; 为避免上述问题, 需先根据偏置曲线的偏置距离重新调整激光单脉冲能量密度, 然后实施侧壁再加工;

在  $0-xyz$ 坐标系下, 当光斑中心由  $0$ 点沿  $x$ 轴移至  $x=d$ 位置, 由公式 (4) 描述的激光单脉冲能量密度在调整前的分布公式化为:

$$F(x, y, d) = F_0 \exp\left(\frac{-2y^2}{w_0^2}\right) \exp\left[\frac{-2(x-d)^2}{w_0^2}\right] \quad (14)$$

设激光单脉冲能量密度调整后关于偏置行距  $d$ 的函数为  $F(d)$ , 对于经过  $0$ 点的横截面有  $y=0$ , 并记公式 (14) 中的  $F(x, y, d)$  为  $F_x(x, d)$ , 于是与之对应的激光单脉冲能量密度在调整后的分布公式为:

$$F_x(x, d) = F(d) \exp\left[\frac{-2(x-d)^2}{w_0^2}\right] \quad (15)$$

其中,  $F(d)$  的表达式待确定, 并且由定义有  $F(0) = F_0$ ;

为确定  $F(d)$  的表达式, 由公式 (13) 的推导分析可知, 为保证盲槽在金属层表面的边缘, 即  $x = D/2$  位置不发生过热, 应使激光光斑在初步刻蚀盲槽和沿偏置曲线加工时  $x = D/2$  位置处的单脉冲能量密度均对应于材料烧蚀阈值, 即应保证以下恒等式成立:

$$F_x\left(\frac{D}{2}, 0\right) = F_x\left(\frac{D}{2}, d\right) \equiv F_{th} \quad (16)$$

将公式 (15) 带入公式 (16), 解得  $F(d)$  的表达式为:

$$F(d) = F_0 \exp\left[\frac{-2d(D-d)}{w_0^2}\right] \quad (17)$$

由公式 (8)、(15) 和 (17) 得到第  $i$  次偏置下第  $k$  个脉冲对应的光斑在过 0 点横截面上的单脉冲能量密度分布  $F_{x,i,k}(x, d_i)$  为:

$$F_{x,i,k}(x, d_i) = F(d_i) \exp(\alpha k^2) \exp\left[\frac{-2(x-d_i)^2}{w_0^2}\right] \quad (18)$$

步骤 4, 图案截面侧壁再加工

经过步骤 3 的单脉冲能量密度调整后, 已具备金属层表面盲槽边缘无过热的侧壁再加工能力, 但受限于调整后的低单脉冲能量密度水平, 沿偏置曲线进行单次扫描并不能刻蚀足够深的材料, 因此还需对再加工次数进行规划;

设第  $i$  次 ( $i \geq 1$ ) 偏置下沿偏置曲线进行  $m_i$  次侧壁再加工后, 盲槽截面的槽底局部最大烧蚀深度达到所需刻蚀深度  $h(0)$ ; 尽管相较于光斑边缘位置, 光斑中心较的材料去除率最大, 但第  $i$  次偏置下的侧壁再加工是在第  $i-1$  次偏置下侧壁再加工所形成的截面轮廓下进行的, 因此需要考虑在第  $i-1$  次偏置下侧壁再加工中被非均匀去除的材料, 其结果是随着再加工次数的增多, 所产生的槽底局部最大烧蚀深度的位置可能并非  $x = d_i$ , 而且是变化的; 考虑到这一情况, 可将第  $i-1$  次偏置下侧壁再加工完成后的盲槽截面轮廓  $h_{i-1}(x)$  的各点深度, 与所需刻蚀深度  $h(0)$  做差, 然后将差值与第  $i$  次偏置下截面各点的激光单次扫描去除深度做比值, 确定盲槽截面某点最先达到  $h(0)$  深度时, 所需的扫描次数即为  $m_i$ , 结合公式 (10) 和 (18) 有:

$$m_i = \min \left\{ \text{int} \left[ \frac{h(0) - h_{i-1}(x)}{\frac{\sum_{k=-n}^n \max\{0, [F_{ik}(x, 0, d_i) - F_{th}]\}}{\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_l C_p (T_b - T_m) + \rho_l \Delta H_{lv}}} \right] + 1 \right\} \quad (x > \Delta d_{i-1}) \quad (19)$$

此外由公式 (10)、(11)、(18) 和 (19), 得到第  $i$  次偏置下完成侧壁再加工后的盲槽截面轮廓的计算公式为:

$$\begin{aligned}
 h_i(x) &= \frac{\sum_0^i \left\{ m_i \sum_{k=-n}^n \max \left\{ 0, \left[ F_{ik}(x, 0, d_i) - F_{th} \right] \right\} \right\}}{\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_l C_p (T_b - T_m) + \rho_l \Delta H_{lv}} \\
 &= h_{i-1}(x) + \frac{m_i \sum_{k=-n}^n \max \left\{ 0, \left[ F_{ik}(x, 0, d_i) - F_{th} \right] \right\}}{\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_l C_p (T_b - T_m) + \rho_l \Delta H_{lv}}
 \end{aligned} \tag{20}$$

令  $i = i + 1$ , 重复步骤2~4; 受机床精度和加工效率限制, 设定机床定位精度  $d_{\min}$  和最大总扫描次数  $M$  约束条件, 当偏置曲线间距小于  $d_{\min}$  或总扫描次数大于  $M$  时停止侧壁再加工, 则沿偏置曲线进行侧壁再加工的终止条件为:

$$i = \max \{ \{i \mid d_i - d_{i-1} \geq d_{\min}\} \cap \{i \mid 2 \sum m_i - 1 \leq M\} \} \tag{21}$$

此外, 该方法的步骤3也可通过更换激光器, 改变光斑尺寸的方法来实现。

## 一种低侧壁锥角盲槽的激光加工方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于激光加工技术领域,具体涉及一种低侧壁锥角盲槽的激光加工方法。

### 背景技术

[0002] 激光加工因具有精度高、无工具磨损和无接触力等优点,被广泛应用于飞行器天线和电子线路板等零件的表层金属图案加工。在利用激光进行图案刻蚀时,不仅需严格控制刻蚀深度,以避免损伤零件的聚合物基底而降低零件机械性能,同时还要保证图案的加工精度以保证零件的电气性能。由于激光光斑能量呈高斯分布的特性,光斑中心能量最高并向四周递减,故材料去除率呈现中心高四周低的规律,使刻蚀图案的边缘具有较大的侧壁锥角,这种斜坡状的边缘严重影响了图案加工质量。以飞行器天线为例,大侧壁锥角一方面会降低天线带线的尺寸精度进而影响天线电气性能,另一方面易使相近的天线带线在盲槽底部粘连发生短路而导致天线失效。解决上述问题的关键是实现低侧壁锥角盲槽的制造,因此如何利用激光刻蚀出低侧壁锥角盲槽是激光加工领域的一大难点和迫切需要。

[0003] 段军等人专利公开号CN101610643A的“一种激光加工盲孔的方法”采用激光定点打孔结合同心圆扫描的方式多次去除材料,最终加工出侧壁较为垂直的一阶和多阶盲孔。然而该专利未说明对于不同刻蚀深度应如何调整激光单脉冲能量密度等参数,且激光打孔的加工方式较难应用于盲槽的刻蚀,因此具有较大局限性。Martin P E等人发表在《Journal of Laser Applications》2017年第29卷第2期文献号022211的《Laser cutting and drilling with zero conicity》一文中,提出一种激光旋进的加工方式,即激光束相对于零件表面做类似于陀螺仪边旋转边移动的运动,可加工出侧壁较为垂直的盲槽和切割边缘。但该方法所需的工艺装备较复杂,且论文并未涉及盲槽刻蚀深度的控制方法,当改变加工材料或加工深度要求时缺少参数规划理论依据,故存在局限性。

### 发明内容

[0004] 本发明针对现有技术的不足和局限性,通过对激光与材料相互作用过程进行分析和计算,发明了一种低侧壁锥角盲槽的激光加工方法,使得加工无需光束整形器件等附加复杂工艺系统,在保证加工深度和盲槽宽度精度的同时减小盲槽侧壁锥角,提高激光加工质量。

[0005] 本发明的技术方案是一种低侧壁锥角盲槽的激光加工方法,其特征在于,该方法首先建立包含材料参数和加工参数的激光加工截面烧蚀轮廓预测模型,以确定刻蚀特定深度盲槽所需的激光加工参数组合,并取其中一组参数进行盲槽的初步刻蚀。其次,设定槽底理想残余高度,结合预测截面烧蚀轮廓计算当前激光扫描轨迹的偏置距离,对当前激光扫描轨迹进行等距偏置得到偏置曲线,作为后续侧壁再加工的激光扫描轨迹。然后,根据激光光斑内的能量分布与材料的烧蚀阈值约束,计算沿偏置曲线进行刻蚀所需的激光单脉冲能量密度,以避免金属表面的盲槽边缘过烧。最后,基于预测截面烧蚀轮廓以预设烧蚀深度为约束,计算沿偏置曲线进行刻蚀时盲槽截面槽底局部最大烧蚀深度,达到预设烧蚀深度所

需的再加工次数。以最小偏置曲线间距和最大总扫描次数,作为盲槽侧壁再加工的终止条件。方法的具体步骤如下:

[0006] 步骤1,计算初步刻蚀盲槽的激光加工参数组合

[0007] 激光通过热效应去除材料存在一个烧蚀阈值,是指激光对材料产生不可逆的破坏所需的最小能量密度。对于特定的激光和材料,烧蚀阈值 $F_{th}$ 为:

$$[0008] \quad F_{th} = (T_m - T_0) \sqrt{2Kt_p \rho_s C_p} \quad (1)$$

[0009] 其中, $T_m$ 为材料熔点, $T_0$ 为室温, $t_p$ 为激光脉冲宽度, $K$ 为材料热导率, $\rho_s$ 为材料固态密度, $C_p$ 为材料比热容。

[0010] 目前用于加工的激光脉冲宽度一般在纳秒量级甚至更小,而光斑半径 $w_0$ 在数十微米量级以上,故热扩散距离 $l_t = \sqrt{2Kt_p / \rho_s C_p} \ll 2w_0$ ,且激光对金属材料的穿透深度极小,可认为用于加工的激光能量在材料表层被完全吸收并沿激光入射方向扩散至材料内部,即各激光脉冲均沿垂直于工件表面的方向进行材料烧蚀。光斑中心处被材料吸收的单脉冲能量密度 $F_0$ 可由下式计算:

$$[0011] \quad F_0 = \frac{2AE_p}{\pi w_0^2} = \frac{2AP}{\pi w_0^2 f} \quad (2)$$

[0012] 其中, $A$ 为材料对激光的吸收率, $E_p$ 为激光的单脉冲能量, $f$ 为激光的脉冲重复频率, $P$ 为激光器的平均功率,激光器输出的单脉冲能量密度可由 $F_0/A$ 求得。

[0013] 取一微小范围分析,则光斑某点邻域内单脉冲能量密度可视作均为 $\delta F$ 。根据能量守恒定律,一定单脉冲能量密度激光去除一定体积材料时有以下等式:

$$[0014] \quad \delta F - F_{th} = [\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_l C_p (T_b - T_m) + \rho_l \Delta H_{lv}] \delta h \quad (3)$$

[0015] 其中, $\rho_s$ 和 $\rho_l$ 分别为材料固态密度和液态密度, $\Delta H_{sl}$ 和 $\Delta H_{lv}$ 分别为材料熔化焓和汽化焓, $T_b$ 为材料沸点, $\delta h$ 为材料在所分析微小范围内的去除深度。

[0016] 当激光沿直线扫描刻蚀盲槽时,在金属表面光斑中心经过的任意一点建立坐标原点 $O$ ,以激光扫描方向为 $y$ 轴方向,以垂直于激光扫描方向为 $x$ 轴方向,建立直角坐标系。光斑中心在 $O$ 点时单脉冲能量密度分布为:

$$[0017] \quad F(x, y) = F_0 \exp\left(\frac{-2y^2}{w_0^2}\right) \exp\left(\frac{-2x^2}{w_0^2}\right) \quad (4)$$

[0018] 结合公式(3)和公式(4),可得单脉冲去除材料后的烧蚀深度分布为:

$$[0019] \quad h_p(x, y) = \frac{\max\{0, [F(x, y) - F_{th}]\}}{\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_l C_p (T_b - T_m) + \rho_l \Delta H_{lv}} \quad (5)$$

[0020] 其中, $h_p(x, y)$ 为材料经过单脉冲作用后在 $(x, y)$ 处的烧蚀深度。

[0021] 当脉冲重复频率为 $f$ 的激光束以扫描速度 $v$ 沿 $y$ 轴方向刻蚀材料时,对于光斑中心从 $O$ 点移动 $k \Delta y$ 距离的第 $k$ 个脉冲,有

$$[0022] \quad \Delta y = \frac{v}{f} - vt_p \approx \frac{v}{f} \quad (6)$$



[0023] 且该脉冲对应光斑在过0点的横截面即x轴上的单脉冲能量密度分布:

$$[0024] \quad F_k(x,0) = F_0 \exp\left(\frac{-2k^2 \Delta y^2}{w_0^2}\right) \exp\left(\frac{-2x^2}{w_0^2}\right) \quad (7)$$

[0025] 为简化表达,令  $\alpha = -2\Delta y^2/w_0^2 = -2v^2/(f^2 w_0^2)$ ,则上式化为:

$$[0026] \quad F_k(x,0) = F_0 \exp(\alpha k^2) \exp\left(\frac{-2x^2}{w_0^2}\right) \quad (8)$$

[0027] 在激光束接近和离开0点的过程中,作用于0点的脉冲个数N为:

$$[0028] \quad N = 2n + 1 = 2 \operatorname{int}\left[\frac{w_0 f}{v}\right] + 1 \quad (9)$$

[0029] 其中,n为激光束在接近/离开0点过程中作用于0点的脉冲个数,  $\operatorname{int}\left[\frac{w_0 f}{v}\right]$  为向下取整函数。

[0030] 一方面,对于纳秒激光和脉冲宽度更短的激光,相邻两脉冲的时间间隔足够前一脉冲传递至材料的能量完全扩散,因而无需考虑热量积累问题。另一方面,数十微米的金属层厚度处于激光的焦深范围内,可认为激光以恒定光斑尺寸刻蚀。所以各脉冲的材料去除结果均可由公式(5)计算。将N个脉冲在x轴各点的材料烧蚀深度叠加,即可得到所刻蚀盲槽的截面轮廓为:

$$[0031] \quad h(x) = \frac{\sum_{k=-n}^n \max\{0, [F_k(x,0) - F_{th}]\}}{\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_l C_p (T_b - T_m) + \rho_l \Delta H_{lv}} \quad (10)$$

[0032] 其中,h(0)即为所需的盲槽刻蚀深度。

[0033] 上式是在激光扫描轨迹为直线的条件下得出的。实际加工图形的最小曲率半径一般在毫米量级以上,比光斑尺寸大至少一个数量级,故N个脉冲的光斑中心仍可近似位于一条直线上。

[0034] 为保证加工效率,根据公式(10)计算激光单次扫描实现所需最大烧蚀深度的工艺参数组合,并取其中一组参数进行盲槽的初步刻蚀,边缘修整由后续步骤完成。

[0035] 步骤2,确定侧壁再加工的激光扫描轨迹

[0036] 经过步骤1后,所加工盲槽的最大烧蚀深度满足要求但侧壁锥度较大。为减小侧壁锥度,还需对当前激光扫描轨迹进行等距偏置得到偏置曲线,并将其作为后续侧壁再加工的激光扫描轨迹,对盲槽进行修边。盲槽初步刻蚀完成后,0点亦为盲槽截面在金属层表面的中点,x轴亦为盲槽截面各点横坐标,y轴亦为盲槽中心线。对于第i次偏置( $i \geq 0$ ),当 $i=0$ 时表示盲槽的初步刻蚀,此时截面烧蚀轮廓为:

$$[0037] \quad h_0(x) = \frac{m_0 \sum_{k=-n}^n \max\{0, [F_k(x, 0) - F_{th}]\}}{\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_l C_p (T_b - T_m) + \rho_l \Delta H_{lv}} \quad (11)$$

[0038] 其中,  $m_0$  为第  $i=0$  次偏置后沿偏置曲线加工的扫描次数, 且有  $m_0=1$ 。

[0039] 设第  $i$  次偏置下侧壁再加工完成时的截面烧蚀轮廓为  $h_i(x)$ , 其经过第  $i+1$  次偏置下的侧壁再加工后所产生的槽底理想残高顶点与 0 点的水平距离为  $\Delta d_i$ , 由于  $\Delta d_i$  位置对应的烧蚀深度为  $h(0) - h_{残}$ , 则有:

$$[0040] \quad \Delta d_i = h_i^{-1}[h(0) - h_{残}] \quad (x > \Delta d_{i-1}) \quad (12)$$

其中,  $h_i^{-1}(x)$  为  $h_i(x)$  的反函数, 残高  $h_{残}$  为第  $i+1$  次偏置下的侧壁再加工所产生的槽底理想残高顶点与截面轮廓  $h(0)$  点处的高度差, 此外有  $\Delta d_{-1}=0$ 。

[0041] 设激光沿第  $i$  次偏置  $i \geq 1$  下的偏置曲线扫描时光斑中心与 0 点的水平距离为  $d_i$ , 由于理想残高顶点与金属层表面的图案边缘均为材料刚好未发生烧蚀的位置, 故光斑在上述两处位置的能量密度值均对应于材料烧蚀阈值, 再由激光光斑单脉冲能量密度分布的对称性可得  $d_i$  的计算公式为:

$$[0042] \quad d_i = \Delta d_{i-1} + \frac{\frac{D}{2} - \Delta d_{i-1}}{2} = \frac{D + 2\Delta d_{i-1}}{4} \quad (13)$$

[0043] 其中,  $D$  为根据公式 (11) 计算得到的最大烧蚀宽度, 因为, 在公式 (11) 中描述了加工盲槽的截面轮廓,  $h_0(x)$  即为盲槽各点  $x$  对应的深度, 利用 MATLAB 计算  $h_0(x)$  刚好等于 0 时的位置即为盲槽的边缘, 两侧边缘的距离即为盲槽的最大烧蚀宽度  $D$ ; 此外由定义有  $d_0=0$ 。

[0044] 步骤 3, 激光单脉冲能量密度调整

[0045] 经过步骤 2 确定偏置曲线后, 若仍采用步骤 1 中的单脉冲能量密度进行加工, 会造成盲槽深度已经达到  $h(0)$  的地方被继续刻蚀, 进而会引起基底损伤或受热变形严重, 另外还会造成金属层表面的盲槽边缘被继续刻蚀, 导致加工盲槽的尺寸精度降低。为避免上述问题, 需先根据偏置曲线的偏置距离重新调整激光单脉冲能量密度, 然后实施侧壁再加工。

[0046] 在  $O-xyz$  坐标系下, 当光斑中心由 0 点沿  $x$  轴移至  $x=d$  位置, 由公式 (4) 描述的激光单脉冲能量密度在调整前的分布公式化为:

$$[0047] \quad F(x, y, d) = F_0 \exp\left(\frac{-2y^2}{w_0^2}\right) \exp\left[\frac{-2(x-d)^2}{w_0^2}\right] \quad (14)$$

[0048] 设激光单脉冲能量密度调整后关于偏置行距  $d$  的函数为  $F(d)$ , 对于经过 0 点的横截面有  $y=0$ , 并记公式 (14) 中的  $F(x, y, d)$  为  $F_x(x, d)$ , 于是与之对应的激光单脉冲能量密度在调整后的分布公式为:

$$[0049] \quad F_x(x, d) = F(d) \exp\left[\frac{-2(x-d)^2}{w_0^2}\right] \quad (15)$$

[0050] 其中,  $F(d)$  的表达式待确定, 并且由定义有  $F(0) = F_0$ 。

[0051] 为确定  $F(d)$  的表达式, 由公式 (13) 的推导分析可知, 为保证盲槽在金属层表面的

边缘(即 $x=D/2$ 位置)不发生过热,应使激光光斑在初步刻蚀盲槽和沿偏置曲线加工时 $x=D/2$ 位置处的单脉冲能量密度均对应于材料烧蚀阈值,即应保证以下恒等式成立:

$$[0052] \quad F_x\left(\frac{D}{2}, 0\right) = F_x\left(\frac{D}{2}, d\right) \equiv F_{th} \quad (16)$$

[0053] 将公式(15)带入公式(16),可解得 $F(d)$ 的表达式为:

$$[0054] \quad F(d) = F_0 \exp\left[\frac{-2d(D-d)}{w_0^2}\right] \quad (17)$$

[0055] 由公式(8)、(15)和(17)可得到第 $i$ 次偏置下第 $k$ 个脉冲对应的光斑在过0点横截面上的单脉冲能量密度分布 $F_{x,i,k}(x, d_i)$ 为:

$$[0056] \quad F_{x,i,k}(x, d_i) = F(d_i) \exp(\alpha k^2) \exp\left[\frac{-2(x-d_i)^2}{w_0^2}\right] \quad (18)$$

[0057] 步骤4,图案截面侧壁再加工

[0058] 经过步骤3的单脉冲能量密度调整后,已具备金属层表面盲槽边缘无过热的侧壁再加工能力,但受限于调整后的低单脉冲能量密度水平,沿偏置曲线进行单次扫描并不能刻蚀足够深的材料,因此还需对再加工次数进行规划。

[0059] 设第 $i$ 次( $i \geq 1$ )偏置下沿偏置曲线进行 $m_i$ 次侧壁再加工后,盲槽截面的槽底局部最大烧蚀深度达到所需刻蚀深度 $h(0)$ 。尽管相较于光斑边缘位置,光斑中心较的材料去除率最大,但第 $i$ 次偏置下的侧壁再加工是在第 $i-1$ 次偏置下侧壁再加工所形成的截面轮廓下进行的,因此需要考虑在第 $i-1$ 次偏置下侧壁再加工中被非均匀去除的材料,其结果是随着再加工次数的增多,所产生的槽底局部最大烧蚀深度的位置可能并非 $x=d_i$ 而且是变化的。考虑到这一情况,可将第 $i-1$ 次偏置下侧壁再加工完成后的盲槽截面轮廓 $h_{i-1}(x)$ 的各点深度,与所需刻蚀深度 $h(0)$ 做差,然后将差值与第 $i$ 次偏置下截面各点的激光单次扫描去除深度做比值,确定盲槽截面某点最先达到 $h(0)$ 深度时所需的扫描次数即为 $m_i$ ,结合公式(10)和(18)有:

$$[0060] \quad m_i = \min \left\{ \text{int} \left[ \frac{h(0) - h_{i-1}(x)}{\frac{\sum_{k=-n}^n \max\{0, [F_{ik}(x, 0, d_i) - F_{th}]\}}{\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_l C_p (T_b - T_m) + \rho_l \Delta H_{lv}}} \right] + 1 \right\} \quad (x > \Delta d_{i-1}) \quad (19)$$

[0061] 此外由公式(10)、(11)、(18)和(19),可得第 $i$ 次偏置下完成侧壁再加工后的盲槽截面轮廓的计算公式为:

$$\begin{aligned}
 h_i(x) &= \frac{\sum_0^i \left\{ m_i \sum_{k=-n}^n \max \left\{ 0, \left[ F_{ik}(x, 0, d_i) - F_{th} \right] \right\} \right\}}{\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_l C_p (T_b - T_m) + \rho_l \Delta H_{lv}} \\
 &= h_{i-1}(x) + \frac{m_i \sum_{k=-n}^n \max \left\{ 0, \left[ F_{ik}(x, 0, d_i) - F_{th} \right] \right\}}{\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_l C_p (T_b - T_m) + \rho_l \Delta H_{lv}}
 \end{aligned} \tag{20}$$

[0063] 令  $i = i + 1$ , 重复步骤 2~4。受机床精度和加工效率限制, 设定机床定位精度  $d_{\min}$  和最大总扫描次数  $M$  约束条件, 当偏置曲线间距小于  $d_{\min}$  或总扫描次数大于  $M$  时停止侧壁再加工, 则沿偏置曲线进行侧壁再加工的终止条件为:

$$i = \max \{ \{i \mid d_i - d_{i-1} \geq d_{\min}\} \cap \{i \mid \cap 2 \sum m_i - 1 \leq M\} \} \tag{21}$$

[0065] 此外, 该方法的步骤 3 也可通过更换激光器等改变光斑尺寸的方法来实现。

[0066] 本发明的显著效果和益处是针对激光刻蚀盲槽过程中, 因普遍采用能量为高斯分布的激光而使盲槽侧壁呈具有较大锥度斜坡状的问题, 通过对激光与材料相互作用过程进行分析和计算, 发明了一种低侧壁锥角盲槽的激光加工方法, 使得加工无需光束整形器件等附加复杂工艺系统, 在保证刻蚀深度及宽度要求的同时, 减小了盲槽的侧壁倾斜程度, 实现激光加工质量的提高。

## 附图说明

[0067] 图 1—方法整体流程图。

[0068] 图 2—盲槽激光加工示意图, 其中 0 为盲槽截面在金属层表面的中点, 表示坐标轴原点;  $x$  轴垂直于激光扫描方向, 表示盲槽截面各点横坐标;  $y$  轴平行于激光扫描方向, 表示盲槽中心线;  $h$  轴为盲槽截面各点的烧蚀深度,  $D$  为金属层表面的盲槽宽度,  $i$  为与偏置次数相对应的偏置曲线序号,  $d_1$  和  $d_2$  分别为  $i = 1$  和  $i = 2$  对应偏置曲线与 0 点的水平距离,  $h_{残}$  为侧壁再加工后盲槽底部的理想残高,  $\Delta d_0$  和  $\Delta d_1$  分别为沿  $i = 1$  和  $i = 2$  对应偏置曲线进行侧壁再加工后的理想残高顶点与 0 点的水平距离,  $h_0(x)$ 、 $h_1(x)$  和  $h_2(x)$  分别为激光单次刻蚀加工、沿  $i = 1$  和  $i = 2$  对应偏置曲线进行侧壁再加工后的盲槽截面轮廓。

[0069] 图 3—基于材料烧蚀阈值的激光单脉冲能量密度调整方法示意图, 其中  $F$  轴为光斑内用于材料去除的激光单脉冲能量密度水平,  $F_{th}$  为材料烧蚀阈值,  $d$  为偏置曲线与 0 点的水平距离,  $F_x(x, 0)$  和  $F_x(x, d)$  分别为激光沿盲槽中心线和沿偏置曲线进行加工时光斑内用于材料去除的单脉冲能量密度分布曲线,  $F_0$  和  $F(d)$  分别为  $F_x(x, 0)$  和  $F_x(x, d)$  的最大单脉冲能量密度。

[0070] 图 4—利用 MATLAB 计算的激光单次扫描刻蚀后的盲槽截面预测轮廓, 其中, 金属层表面的盲槽宽度  $D = 28.1 \mu\text{m}$ , 盲槽刻蚀深度  $h = 10 \mu\text{m}$ 。

[0071] 图 5—利用 MATLAB 计算的经过侧壁第一次偏置第七次再加工的盲槽截面预测轮廓。

[0072] 图 6—激光单次扫描刻蚀后的盲槽截面轮廓测量图。

[0073] 图 7—经过侧壁再加工后的盲槽截面轮廓测量图。

[0074] 图8—不同工艺参数组合下激光刻蚀10 $\mu\text{m}$ 深度盲槽时盲槽侧壁平均锥角在侧壁再加工前后的对比,其中盲槽侧壁平均锥角是指盲槽截面侧壁的起止点连线与竖直方向夹角, $f$ 为激光的脉冲重复频率, $E_p$ 为激光的单脉冲能量密度, $v$ 为激光的扫描速度。

### 具体实施方式

[0075] 结合技术方案与附图详细说明本发明的具体实施方式。

[0076] 鉴于采用光斑能量呈高斯分布的激光刻蚀盲槽时,光斑内单脉冲能量密度中心高四周低的特性导致所加工盲槽的侧壁锥度较大,严重影响加工质量。针对这一情况,为减小盲槽侧壁的锥角,发明了一种低侧壁锥角盲槽的激光加工方法,整体流程如附图1所示。

[0077] 以激光刻蚀单条直槽为例,借助MATLAB软件详细说明本发明实施过程。

[0078] 选用波长为532nm的激光,其焦点光斑半径 $w_0=20\mu\text{m}$ ,脉冲宽度为 $t_p=15\text{ns}$ 。金属为经过研磨的铜,对所用激光的吸收率 $A=0.107$ ,熔点 $T_m=1085^\circ\text{C}$ ,沸点 $T_b=2571^\circ\text{C}$ ,比热容 $C_p=390\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ,导热率 $K=397\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ,固态密度 $\rho_s=8900\text{kg}/\text{m}^3$ ,液态密度 $\rho_l=8000\text{kg}/\text{m}^3$ ,熔化焓 $\Delta H_{s1}=205\times 10^3\text{J}/\text{kg}$ ,汽化焓 $\Delta H_{lv}=4803\times 10^3\text{J}/\text{kg}$ 。

[0079] 首先,面向覆镀型天线等产品的制造要求,设定激光单次扫描的刻蚀深度为10 $\mu\text{m}$ ,根据公式(10)计算满足 $h(0)=10\mu\text{m}$ 的 $E_p, f, v$ 参数组合,并从中选取一组为 $E_p=0.109\text{mJ}, f=30\text{kHz}, v=0.8\text{m}/\text{min}$ ,并根据公式(2)计算激光器应设置的单脉冲能量密度

$$F_0/A=2E_p/\pi w_0^2=17.356\text{J}/\text{cm}^2。$$

[0080] 利用MATLAB计算该参数组合下激光刻蚀预测截面轮廓,公式(11)描述了加工盲槽的截面轮廓, $h_0(x)$ 即为盲槽各点 $x$ 对应的深度,利用MATLAB计算 $h_0(x)$ 刚好等于0时的位置,即为盲槽的边缘,两侧边缘的距离即为盲槽的最大烧蚀宽度 $D$ 。所以,利用公式(11)得出金属层表面的盲槽宽度 $D=28.1\mu\text{m}$ 。

[0081] 其次,确定当前激光扫描轨迹的偏置距离与偏置曲线。设定残高 $h_{残}=0.5\mu\text{m}$ ,根据公式(12)利用MATLAB算得沿 $i=1$ 对应偏置曲线进行侧壁再加工时理想残高顶点与0点的水平距离为 $\Delta d_0=2.4\mu\text{m}$ ,由公式(13)算得 $i=1$ 对应的偏置曲线与0点的水平距离为 $d_1=(D+\Delta d_0)/4=8.225\mu\text{m}$ ,即沿第一条偏置曲线进行侧壁再加工时光斑中心与盲槽中心线的距离为8.225 $\mu\text{m}$ ,相关参数的定义参见附图2。

[0082] 然后,根据公式(17)计算激光沿第一条偏置曲线进行扫描刻蚀时激光器应设置的单脉冲能量密度为 $F(8.275)/A=(F_0/A)\exp[-2d(D-d)/w_0^2]=7.642\text{J}/\text{cm}^2$ ,调整单脉冲能量密度的原理示意图,如附图3所示。另外,激光的脉冲重复频率和扫描速度保持不变。

[0083] 最后,利用MATLAB软件由公式(19)计算得激光沿第一条偏置曲线进行侧壁再加工的扫描次数 $m_1=7$ ,并基于公式(20)计算侧壁再加工后的盲槽截面轮廓。激光单次刻蚀后的盲槽截面预测轮廓参见附图4,金属层表面的盲槽宽度 $D=28.1\mu\text{m}$ ,盲槽刻蚀深度 $h=10\mu\text{m}$ 。

[0084] 经过侧壁再加工后的盲槽截面预测轮廓参见附图5。设定机床定位精度 $d_{\min}=2\mu\text{m}$ 与最大总扫描次数 $M=40$ ,算得当 $i=2$ 时有偏置曲线间距 $d_2-d_1=2.25\mu\text{m}>d_{\min}$ ,而 $m_2=19$ 并且总扫描次数 $2\sum m_i-1=53>M$ ,因此在本例的加工条件下单方向只能进行一次偏置。

[0085] 为衡量盲槽截面侧壁的倾斜程度,定义盲槽截面侧壁的起止点连线与竖直方向夹角为盲槽侧壁平均锥角,其表征了盲槽侧壁的整体倾斜程度;定义盲槽截面侧壁的局部切线与竖直方向的最小夹角为盲槽侧壁局部最小锥角,其表征了盲槽侧壁的局部最优倾斜程度。

[0086] 附图6和附图7分别为在上述加工参数设置下激光单次扫描刻蚀后的盲槽截面轮廓和经过侧壁再加工后的盲槽截面轮廓,与附图4和附图5的激光刻蚀预测截面轮廓计算结果基本吻合,证明了激光加工截面烧蚀轮廓预测模型的准确性,另外可见经本发明提出的侧壁再加工后盲槽截面轮廓由近似倒锥形变为近似倒梯形,盲槽截面侧壁的倾斜程度得到改善,经计算两盲槽的截面侧壁平均锥角分别为 $\arctan[28.4/(2 \times 11)] = 52.2^\circ$ 和 $\arctan[(27-8)/(2 \times 10)] = 43.5^\circ$ ,测得两盲槽的截面侧壁局部最小锥角分别为 $45.5^\circ$ 和 $26.5^\circ$ ,进而算得盲槽经侧壁再加工后截面侧壁平均锥角减小了16.7%,截面侧壁局部最小锥角减小了41.8%,验证了此方法的有效性,表明本发明的方法对减小盲槽侧壁锥角具有显著效果。

[0087] 按照此方法采用其他 $E_p, f, v$ 参数组合实现 $10\mu\text{m}$ 深度盲槽的刻蚀时,盲槽的侧壁锥角减小效果参见附图8,同样说明了本发明的有效性。

[0088] 由于本实施例中光斑尺寸较小,在机床精度的限制下只能完成一次偏置进行侧壁再加工,增大光斑直径和提高机床精度将实现更好的侧壁锥角减小效果。

[0089] 本发明针对激光刻蚀盲槽具有较大侧壁锥角的问题,建立了一种低侧壁锥角盲槽的激光加工方法,为面向脉冲激光刻蚀低侧壁锥角盲槽提供了理论与技术支撑,对工程实际加工中激光加工参数及扫描路径的规划具有重要指导作用。

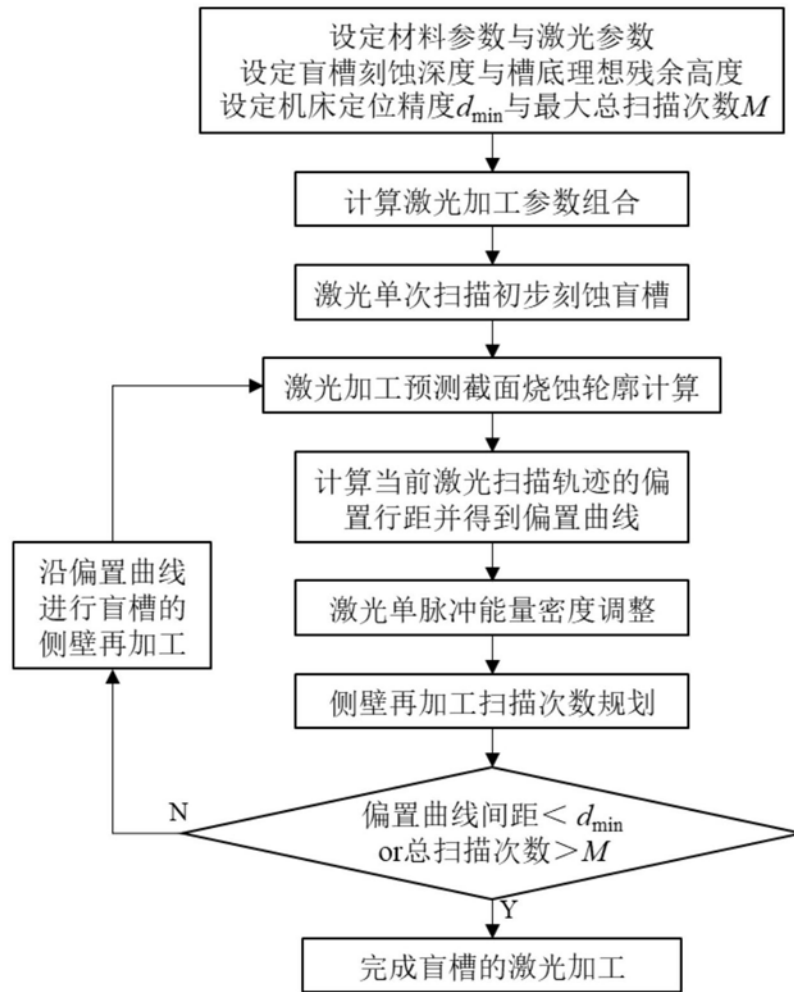


图1

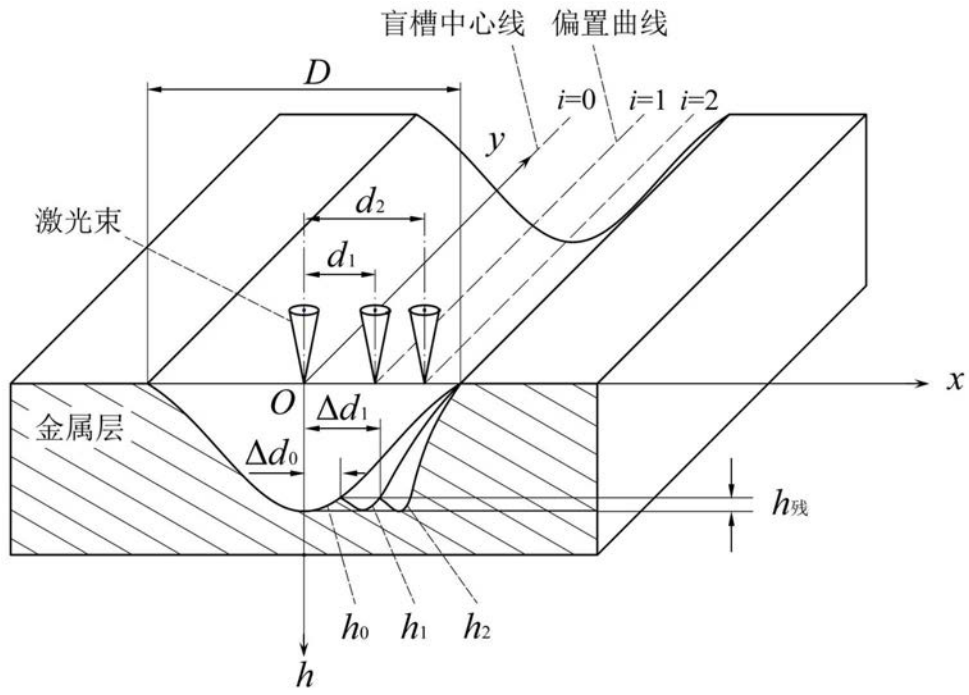


图2

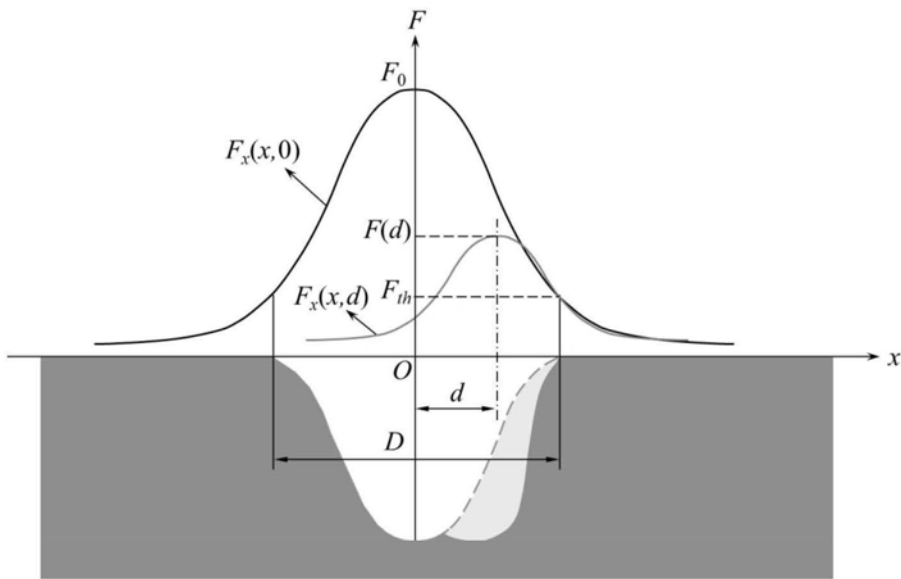


图3



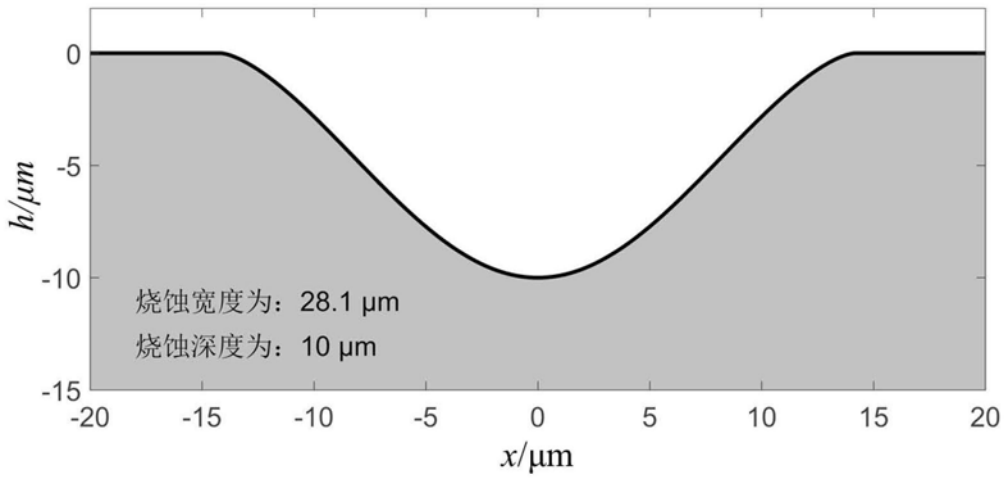


图4

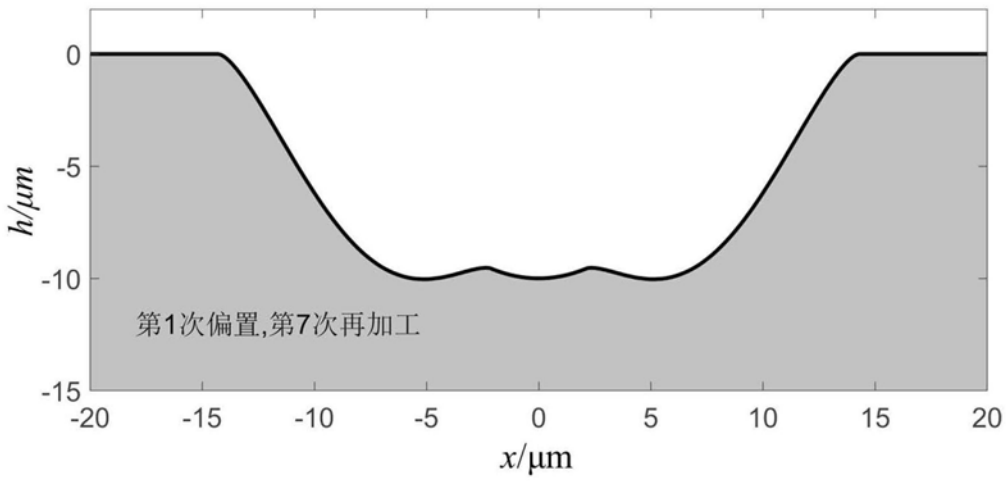


图5

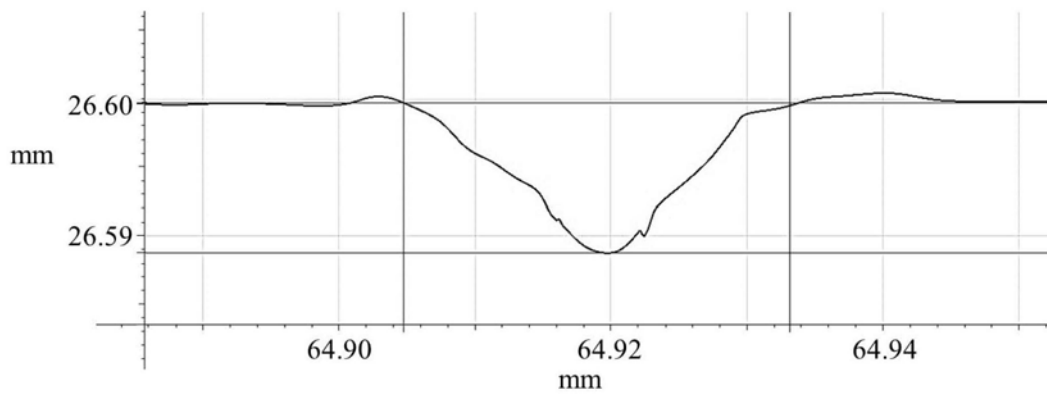


图6

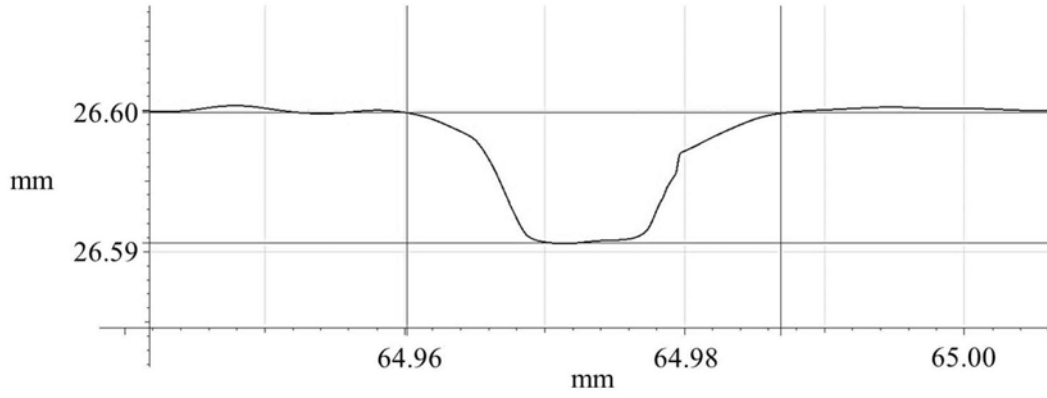


图7

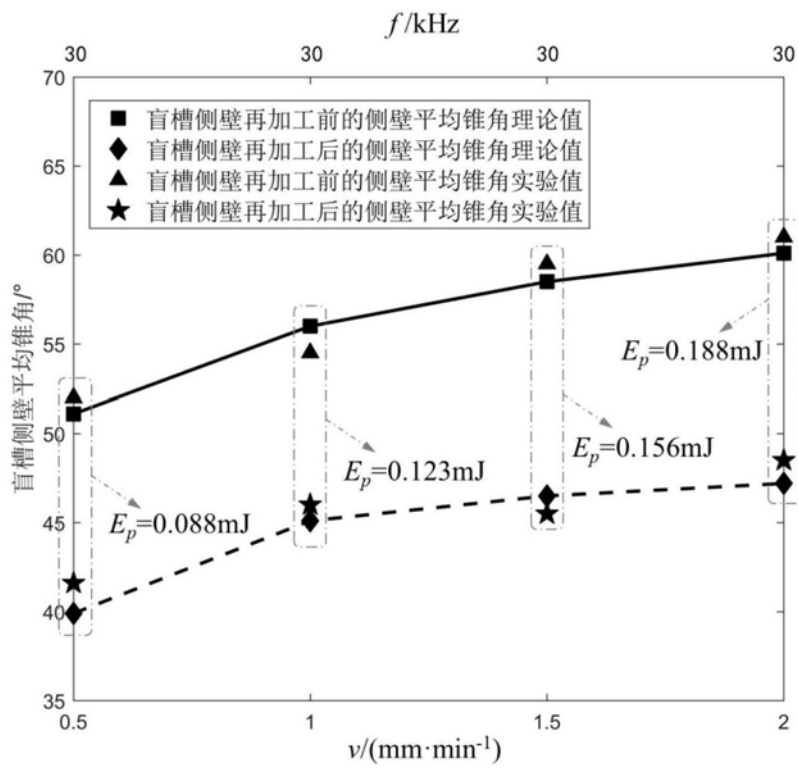


图8