



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112317978 B

(45) 授权公告日 2021. 11. 09

(21) 申请号 202011154707.X

B23K 26/0622 (2014.01)

(22) 申请日 2020.10.26

B23K 26/60 (2014.01)

B23K 26/70 (2014.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 112317978 A

(56) 对比文件

CN 101817120 A, 2010.09.01

CN 103240531 A, 2013.08.14

CN 1511433 A, 2004.07.07

CN 106166648 A, 2016.11.30

WO 2020211750 A1, 2020.10.22

JP 0263693 A, 1990.03.02

(43) 申请公布日 2021.02.05

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

审查员 李尚华

(72) 发明人 虞钢 张越 李少霞 何秀丽

田崇鑫 郑彩云 宁伟健

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理

事务所(普通合伙) 11390

代理人 焦海峰

(51) Int. Cl.

B23K 26/382 (2014.01)

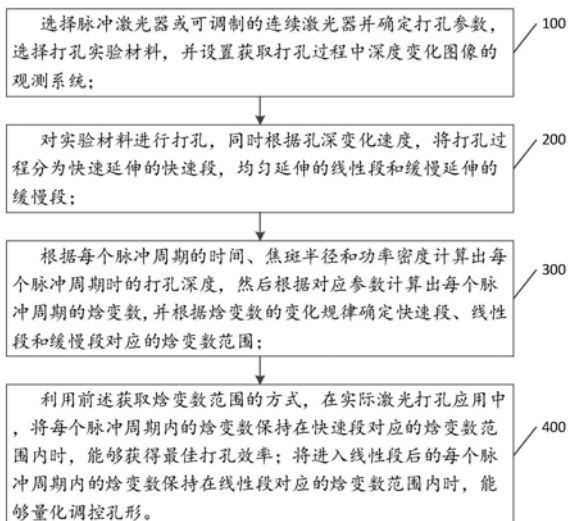
权利要求书1页 说明书4页 附图1页

(54) 发明名称

一种多脉冲激光打孔用移动离焦方法

(57) 摘要

本发明提供一种多脉冲激光打孔用移动离焦方法,选择激光器并确定打孔参数、实验材料、摄像机和分析系统;对实验材料进行打孔,同时根据孔深变化速度,将打孔过程分为快速段,线性段和缓慢段;通过观测方法测量出每个脉冲周期结束时的打孔深度,然后根据对应参数计算出每个脉冲周期的焓变数;确定各段对应的焓变数范围,将每个脉冲周期内的焓变数保持在快速段对应的焓变数范围内,则获得最佳打孔效率。本发明通过高速摄像机观测激光打孔过程并进行无量纲分析,计算出不同打孔阶段时的焓变数变化范围,然后控制激光打孔时的焓变数在不同脉冲周期内保持在一定的焓变数范围内的优化策略,进而提高打孔效率量化调控孔形,并增加溅射效率及深径比。



1. 一种多脉冲激光打孔用移动离焦方法,其特征在于,包括如下步骤,

步骤100,选择脉冲激光器或可调制的连续激光器并确定打孔参数,选择打孔实验材料,并设置获取打孔过程中深度变化图像的观测系统;

步骤200,对实验材料进行打孔,同时根据孔深变化速度,将打孔过程分为快速延伸的快速段,均匀延伸的线性段和缓慢延伸的缓慢段;

步骤300,根据每个脉冲周期的时间、焦斑半径和功率密度计算出每个脉冲周期时的打孔深度,然后根据对应参数计算出每个脉冲周期的焓变数,并根据焓变数的变化规律确定快速段、线性段和缓慢段对应的焓变数范围;

步骤400,利用前述获取焓变数范围的方式,在实际激光打孔应用中,将每个脉冲周期内的焓变数保持在快速段对应的焓变数范围内时,能够获得最佳打孔效率;将进入线性段后的每个脉冲周期内的焓变数保持在线性段对应的焓变数范围内时,能够量化调控孔形。

2. 根据权利要求1所述的移动离焦方法,其特征在于,

所述观测用的实验材料为由两块耐高温透明玻璃夹持的金属片,且金属片的厚度与所述脉冲激光器的焦斑直径对应。

3. 根据权利要求1所述的移动离焦方法,其特征在于,

所述的孔深变化速度是通过采用某一观测方法进行分析后,确定激光器每一次脉冲与当前孔深的变化关系,进而得到所述快速段、线性段和缓慢段时的孔深变化速度。

4. 根据权利要求3所述的移动离焦方法,其特征在于,

所述焓变数的计算方式如下:

$$I' = \frac{C_p r_b(h) I(h)}{k L_v}$$

其中:

$$r_b(h) = r_0 \sqrt{1 + \left( \frac{h - z_0}{Z_R} \right)^2}$$

$$I(h) = \frac{2Q\eta}{\pi r_b^2(h)}$$

$r_b(h)$  为离焦量为 $h$ 时的光斑半径, $I(h)$  为离焦量为 $h$ 时的功率密度, $h$ 为孔深度, $r_0$ 焦点半径, $z_0$ 为焦点位置, $Z_R$ 激光瑞利长度, $Q$ 激光功率, $\eta$ 为实验材料对激光的吸收系数, $C_p$ 为实验材料的比热容, $k$ 为实验材料的导热系数, $L_v$ 为实验材料的蒸发潜热。

5. 根据权利要求1所述的移动离焦方法,其特征在于,

所述量化调控孔型的过程为:

将所述线性段每一个脉冲作用后相等的打孔距离设为 $dz$ ,进入线性段时的临界孔深为 $h_1$ ,进入缓慢段时的临界孔深为 $h_2$ ,目标孔深为 $h_3$ ;

然后根据 $h_3 \approx h_1 + N * dz$ ,在进入线性段之后进行离焦,并保持离焦后每一个脉冲周期内的焓变数在所述线性段的焓变数范围内,在发射 $N$ 个脉冲之后,孔深近似为 $h_3$ ,并满足实际孔型要求。

## 一种多脉冲激光打孔用移动离焦方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及激光打孔领域,特别是涉及一种可提高打孔效率的多脉冲激光打孔用移动离焦方法。

### 背景技术

[0002] 在激光打孔时,一般情况下,多个脉冲作用后,孔底辐照区激光功率密度减小,打孔效率降低。当降低到一定程度后,孔深不再增加。此时通过移动离焦方法,可以将焦点位置向孔底移动,来增加孔底辐照区的激光功率密度,在一定程度上可以增加孔深。

[0003] 但现有的研究没有提出有效的移动离焦策略,来优化多脉冲激光打孔的溅射效率或者孔形调控。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种可提高打孔效率的多脉冲激光打孔用移动离焦方法。

[0005] 具体地,本发明提供一种多脉冲激光打孔用移动离焦方法,包括如下步骤,

[0006] 步骤100,选择脉冲激光器或可调制的连续激光器并确定打孔参数,选择打孔实验材料,并设置获取打孔过程中深度变化图像的观测系统;

[0007] 步骤200,对实验材料进行打孔,同时根据孔深变化速度,将打孔过程分为快速延伸的快速段,均匀延伸的线性段和缓慢延伸的缓慢段;

[0008] 步骤300,根据每个脉冲周期的时间、焦斑半径和功率密度计算出每个脉冲周期时的打孔深度,然后根据对应参数计算出每个脉冲周期的焓变数,并根据焓变数的变化规律确定快速段、线性段和缓慢段对应的焓变数范围;

[0009] 步骤400,利用前述获取焓变数范围的方式,在实际激光打孔应用中,将每个脉冲周期内的焓变数保持在快速段对应的焓变数范围内时,能够获得最佳打孔效率;将进入线性段后的每个脉冲周期内的焓变数保持在线性段对应的焓变数范围内时,能够量化调控孔形。

[0010] 本发明通过高速摄像机观测激光打孔过程并进行无量纲分析,确定多脉冲激光打孔过程的质量迁移机制,计算出不同打孔阶段时的焓变数变化范围,然后基于质量迁移机制给出激光打孔时,控制激光打孔时的焓变数在不同孔段时保持在该段的焓变数范围内的优化策略,进而提高打孔效率量化调控孔形,并增加溅射效率及深径比。

### 附图说明

[0011] 图1是本发明一个实施方式的移动离焦方法流程示意图。

### 具体实施方式

[0012] 以下通过具体实施例和附图对本方案的具体结构和实施过程进行详细说明。

[0013] 如图1所示,在本发明的一个实施方式一种多脉冲激光打孔用移动离焦方法,包括

如下步骤，

[0014] 步骤100,选择脉冲激光器或可调制的连续激光器并确定打孔参数,选择打孔实验材料,并设置获取打孔过程中深度变化图像的摄像机和分析系统;

[0015] 这里的激光器只要是具备脉冲激光或连续激光调制的脉冲序列即可,具体的脉宽为毫秒量级,优选为不高于1ms,不低于0.4ms。

[0016] 由于打孔深度会随脉冲个数的增加而增加,但脉冲个数增加到一定数量时(脉冲个数临界值),孔深不再随着脉冲个数增加而变化(达到孔深临界值),因此所选用的脉冲个数不应低于该脉冲个数临界值。

[0017] 激光器的平均功率可设定在1200W~2000W左右。

[0018] 用于孔深观测实验时的打孔材料,应采用与实际加工的金属材料相同的材料,本实施方式选用的实验材料为不锈钢,也可以采用物性参数(导热系数、密度、比热容等)与不锈钢相近的其它金属材料。

[0019] 本实施方式中采用的工艺参数为:0.6ms,270A,100Hz,10个脉冲。

[0020] 为方便观察孔深变化,本实施方式采用的观察结构如下:

[0021] 拍摄对象选用薄板金属材料及耐高温透明玻璃(如JGS1石英玻璃)组成的“三明治结构”;其中,以薄板垂直状态为例,薄板的厚度应略小于激光焦斑直径,薄板在垂直方向上的长度至少大于孔深临界值,在水平方向上的宽度满足打孔的数量要求。耐高温透明玻璃的长、宽应与薄板材料一致,厚度要在10mm以上。利用高精度的夹持夹具保证薄板材料与激光束、摄像机之间的相对位置精度。

[0022] 此外,在进行孔深观测时,观测系统内实验材料的几何形状参数还可依据不同的观测方法,并可以采用区别于实际应用场景中材料的几何形状参数,以方便观测孔深并获得焓变数变化规律。

[0023] 在获得焓变数变化规律后,采用移动离焦策略打孔时,材料的几何形状参数应与实际应用场景中材料的几何形状参数相同。

[0024] 进一步地,还可以配置相应的滤光片系统,保证摄像机拍摄结果的清晰,摄像机采用高速摄像机,以获取小于毫秒级的图像,拍摄的孔形图像由计算机构成的分析系统进行图像分析,测量并获取孔深随脉冲个数变化的状态和结果。

[0025] 步骤200,对实验材料进行打孔,同时根据孔深变化速度,将打孔过程分为快速延伸的快速段,均匀延伸的线性段和缓慢延伸的缓慢段;

[0026] 激光照射在实验材料上后,辐照区会升温、熔化、蒸发、溅射。蒸发及溅射引起金属基体材料的质量损失,进而形成小孔,并向基体内部发展。

[0027] 在打孔过程中,激光束的能量分布受到空间位置的影响,会随着离焦量增加而减小(非线性变化)。当形成小孔后,激光辐照区为小孔底部,此时小孔底部位置远离激光焦点位置,辐照区内的激光输入能量发生了变化。因此不同脉冲激光作用时,辐照区输入能量不同,因此孔深变化也不同。

[0028] 通过孔深测量方案获得孔深随脉冲个数的变化规律。在达到临界孔深之前,若孔深随脉冲个数大致均匀变化,则为线性打孔阶段;否则为快速打孔阶段。达到临界孔深之后,则为缓慢打孔阶段。

[0029] 具体的孔深变化速度可通过对摄像机获取的图像进行分析得到,即先根据图像上

孔深的变化情况,确定激光器每一次脉冲与当前孔深的变化关系,进而可得到快速段、线性段和缓慢段时的对应孔深变化速度。

[0030] 此外,孔深变化速度的测量方案还可采用如下方式:

[0031] 在实验材料的长度方向上,以脉冲数为依据,分别以脉冲起始值至脉冲最大值依次并排打孔;如脉冲数量为10,则先以第1个脉冲打第1个孔,再以2个脉冲打第二个孔,依次类推,直至利用10个脉冲打第10个孔;

[0032] 然后沿各孔的轴线将实验材料剖开,进而可测量出孔深随脉冲数量变化的规律,从而确定对应的快速段,线性段和缓慢段。具体可用线切割等方法沿孔轴线进行切割,观测其剖面形状,测量并获得孔深随脉冲个数的变化。

[0033] 步骤300,根据每个脉冲周期的时间、焦斑半径和功率密度计算出每个脉冲周期时的打孔深度,然后根据对应参数计算出每个脉冲周期的焓变数,并根据焓变数的变化规律确定快速段、线性段和缓慢段对应的焓变数范围;

[0034] 焓变数表示材料吸收激光能量后的焓值增量与蒸发潜热之比,反映了打孔过程质量去除即孔深变化的快慢。

[0035] 假设初始时刻为 $t_0$ ,第一个脉冲结束后时刻为 $t_1$ ,第二个脉冲结束后时刻为 $t_2$ ,以此类推第 $i$ 个脉冲结束后时刻为 $t_i$ ,则第一个脉冲周期为 $t_0$ 至 $t_1$ ,第 $i$ 个脉冲周期为 $t_{(i-1)}$ 至 $t_i$ ;

[0036] 孔深同样也随时间变化, $t_0$ 时刻孔深为 $h_0=0$ , $t_i$ 时刻孔深为 $h_i$ ,则第 $i$ 个脉冲周期内孔深由 $h_{(i-1)}$ 变化至 $h_i$ ;

[0037] 由于激光的高斯分布特性,且辐照区为孔深位置处,因此不同孔深时,辐照区焦斑半径不同,即孔深为 $h_i$ 时,焦斑半径为 $r_i$ ,第 $i$ 个脉冲周期内辐照区焦斑半径由 $r_{(i-1)}$ 变化至 $r_i$ ;

[0038] 辐照区功率密度受到焦斑半径影响,第 $i$ 个脉冲周期内辐照区功率密度由 $I_{(i-1)}$ 变化至 $I_i$ 。

[0039] 焓变数受前述参数的变化影响,随着脉冲个数的增加而不断减小,在第 $i$ 个脉冲周期内焓变数由 $I'_{(i-1)}$ 变化至 $I'_i$ 。

[0040] 焓变数的计算方式如下:

$$[0041] \quad I' = \frac{C_p r_b(h) I(h)}{k L_v}$$

[0042] 其中:

$$[0043] \quad r_b(h) = r_0 \sqrt{1 + \left( \frac{h - z_0}{Z_R} \right)^2}$$

$$[0044] \quad I(h) = \frac{2Q\eta}{\pi r_b^2(h)}$$

[0045]  $r_b(h)$  为离焦量为 $h$ 时的光斑半径, $I(h)$  为离焦量为 $h$ 时的功率密度, $h$ 为孔深度, $r_0$  焦点半径, $z_0$  为焦点位置, $Z_R$  激光瑞利长度, $Q$  激光功率, $\eta$  为金属材料对激光的吸收系数, $C_p$  为金属材料的比热容, $k$  为金属材料的导热系数, $L_v$  为金属材料的蒸发潜热。

[0046] 步骤400,利用前述获取焓变数范围的方式,在实际激光打孔应用中,将每个脉冲周期内的焓变数保持在快速段对应的焓变数范围内时,能够获得最佳打孔效率;将进入线性段后的每个脉冲周期内的焓变数保持在线性段对应的焓变数范围内时,能够量化调控孔形。

[0047] 通过本实施方式可以确定,不同工艺参数下(改变脉宽、脉冲能量等),快速段向线性段转变,以及线性段向缓慢段转变的临界脉冲个数、临界孔深、临界功率等均发生了变化,但只有临界焓变数没有发生变化,因此可以用作不同打孔阶段转变的判据。

[0048] 即,假设快速段向线性段打孔转变时的临界焓变数为 $I_1$ ,线性段向缓慢段打孔转变时的临界焓变数为 $I_2$ ,若想要获得较高的打孔效率,应尽量使得打孔过程中,每一个脉冲作用时的焓变数 $I'(i-1)$ 及 $I' i$ ,始终大于 $I_1$ 。则大大增加了快速段打孔阶段的时间,保证了打孔的效率。

[0049] 而若要量化调控孔形,则应在进入线性段后离焦,且尽量使得打孔过程中,每一个脉冲作用时的焓变数 $I'(i-1)$ 及 $I' i$ ,始终保持在 $I_1$ 及 $I_2$ 之间。

[0050] 量化调控孔型的具体过程为:

[0051] 将线性段每一个脉冲作用后相等的孔深距离设为 $dz$ ,进入线性段时的临界孔深为 $h_1$ ,由线性段进入缓慢段时的临界孔深为 $h_2$ ,待获取的目标孔深为 $h_3$ ;其中 $h_3$ 最大, $h_2$ 次之, $h_1$ 最小。

[0052] 然后根据 $h_3 \approx h_2 + N * dz$ ,在线性段打孔阶段时,进行离焦并保持焓变数在线性段的焓变数范围内,在发射 $N$ 个脉冲之后,孔深近似为 $h_3$ ,并满足实际孔型要求。

[0053] 孔深 $h$ 是随脉冲个数逐渐变化。由焓变数公式可以看出,孔深 $h$ 与焓变数具有一定的函数关系。移动离焦后,焦点位置与孔深的之间的距离变化,功率密度变化。移动离焦 $\Delta z$

后,无量纲功率密度变为 $I' = \frac{C_p r_b (h - \Delta z) I (h - \Delta z)}{k L_v}$ ,依据该公式,可以制定移动离焦策略。

[0054] 以前面的假设的数值为例:若要增加打孔效率,则应尽量保持移动离焦 $\Delta z$ 后,缓慢段时孔底部的焓变数 $I'$ 大于 $I_2$ 。若要量化调控孔形,则应在进入线性打孔阶段后离焦,且尽量保持离焦后,孔底部的焓变数 $I'$ 大于8小于12。

[0055] 至此,本领域技术人员应认识到,虽然本文已详尽示出和描述了本发明的多个示例性实施例,但是,在不脱离本发明精神和范围的情况下,仍可根据本发明公开的内容直接确定或推导出符合本发明原理的许多其他变型或修改。因此,本发明的范围应被理解和认定为覆盖了所有这些其他变型或修改。

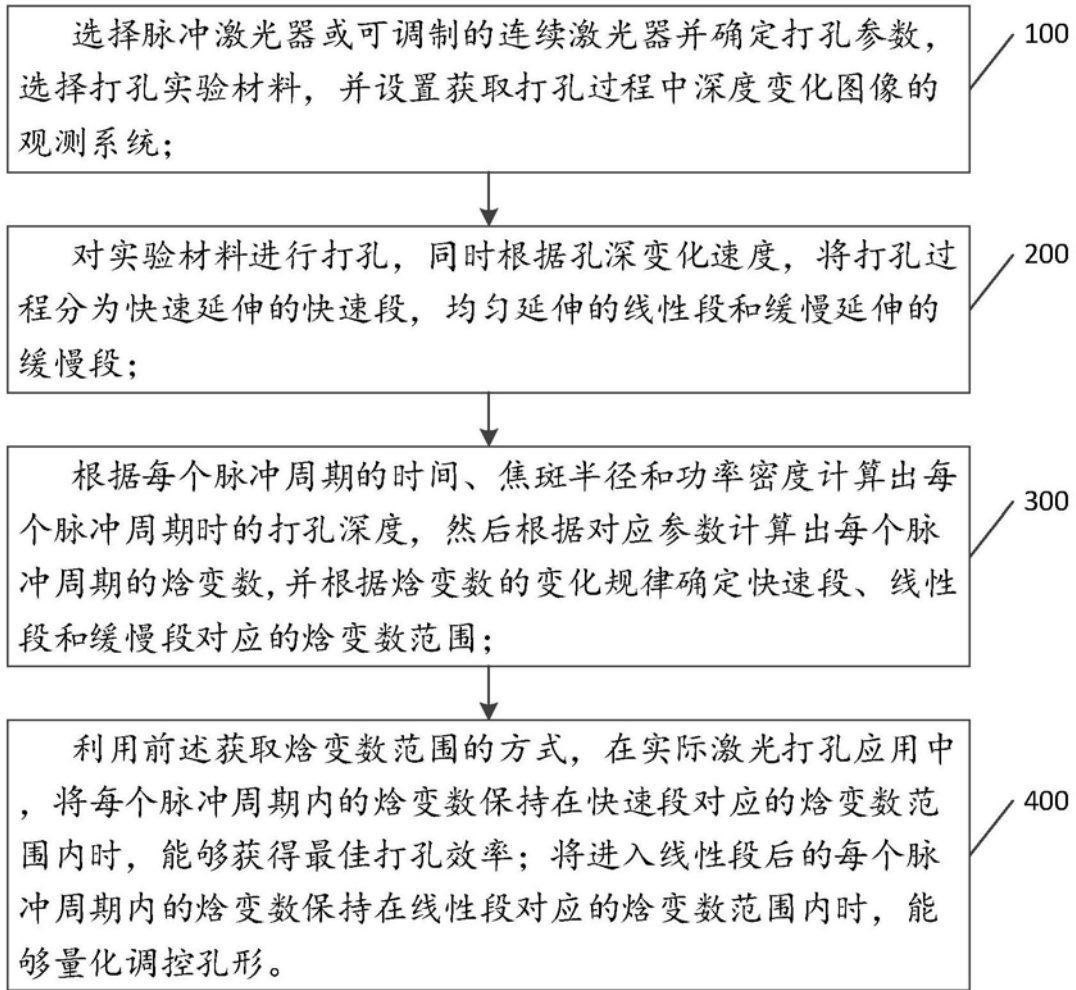


图1