



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 111889893 A

(43) 申请公布日 2020.11.06

(21) 申请号 202010645926.1

(51) Int.Cl.

(22) 申请日 2020.07.07

B23K 26/364 (2014.01)

B23K 26/354 (2014.01)

(71) 申请人 江苏海洋大学

地址 222000 江苏省连云港市海州区苍梧路59号

申请人 南京萃智激光应用技术研究院有限公司

上海赛可出行科技服务有限公司

(72) 发明人 王衍 王英尧 曹志康 赵全忠

付强 徐冰 金小俊 胡琼

马志远

(74) 专利代理机构 南京纵横知识产权代理有限公司 32224

代理人 严志平

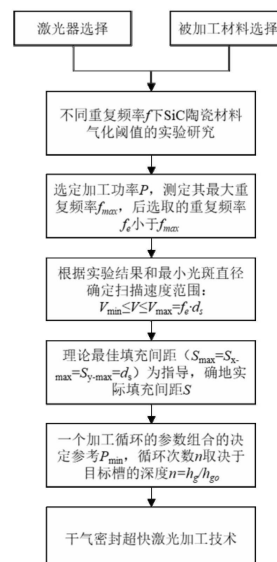
权利要求书1页 说明书5页 附图6页

(54) 发明名称

一种干气密封微米级沟槽的超短脉冲激光精密加工方法

(57) 摘要

本发明公开了一种干气密封微米级沟槽的超短脉冲激光精密加工方法,基于确保相邻光斑间距不超过最小光斑直径的前提下,提出一种以材料气化阈值为基准,围绕通过调节重复频率、扫描速度和填充间距等参数的加工方法,针对给定精度和深度实现连续加工。本发明通过依次确定相关参数的取值范围,并结合实际加工生产效率,可以实现对单次标刻加工深度的调节,提高了在不同槽型、槽深要求下的干气密封精密加工效率和精度。



1. 一种干气密封微米级沟槽的超短脉冲激光精密加工方法,其特征在于:所述方法如下:

S1:选择激光器,测量相邻光斑间距,保证相邻光斑间距不超过最小光斑直径;

S2:参考被加工材料的气化阈值,得出不同重复频率下对应的最小激光功率P;

S3:得到对应激光设备额定重复频率 f_e 时的最小激光功率 P_{\min} ;

S4:根据实验结果、精度及效率初步估算最低扫描速度 V_{\min} ;

S5:依据激光器的最小光斑直径 d_s 及相关参数可确定最大扫描速度: $V_{\max}=d_s \cdot f_e$,以此可对扫描速度进行限定;

S6:在 V_{\min} 和 V_{\max} 之内选择一个扫描速度V,由此可计算出加工轨迹y方向填充间距 S_y 以及激光扫描x方向填充间距 S_x ;

S7:在激光参数组合确定后,根据单次加工深度 h_{go} 和目标槽深 h_g 可计算得到循环次数: $n=h_g/h_{go}$ 。

2. 根据权利要求1所述的一种干气密封微米级槽深的超短脉冲激光精密加工方法,其特征在于:确定会影响加工质量的操作参数包括重复频率 f_e 、扫描速度V以及x方向填充间距 S_x ,y方向填充间距 S_y ;确定各个参数的关系,具体关系如下:

$$V_{\min} < V < V_{\max} = f_e \cdot d_s$$

$$S_x = S_y = \frac{V}{f_e}$$

其中, d_s 为光斑直径, V_{\min} 为最小扫描速度, V_{\max} 最大扫描速度。

3. 根据权利要求1所述的一种干气密封微米级沟槽的超短脉冲激光精密加工方法,其特征在于:以材料气化阈值为基准,在选定的额定功率下确定最小激光功率,然后在各设置参数对应的相邻光斑间距不超过最小光斑直径的前提下,依据槽深及精度等级要求,选择适宜的参数组合为单次循环基准,通过调整标刻次数n即可实现预期加工要求。

4. 根据权利要求1所述的一种干气密封微米级沟槽的超短脉冲激光精密加工方法,其特征在于:对参数的优化调整过程包括:给定参数 P_{\min} , f_e ,V, S_x , S_y ,进行m次激光加工,得到槽深 h_{gm} ,计算出单次加工深度 $h_{go}=h_{gm}/m$,根据是否满足加工条件,若是则输出,若不是则继续调整,最终进行有限次调整可以得到理想的参数。

5. 根据权利要求1所述的一种干气密封微米级沟槽的超短脉冲激光精密加工方法,其特征在于:上述所述额定功率下对应的最小激光功率 P_{\min} ,实际加工时可根据效率、成本、精度等要求,以 P_{\min} 为基准适当增大,可逐渐提高加工效率、降低成本、提高精度。

6. 根据权利要求1所述的一种干气密封微米级沟槽的超短脉冲激光精密加工方法,其特征在于:所述方法能够应用到飞秒、皮秒等超短脉冲激光加工技术于表面加工。

一种干气密封微米级沟槽的超短脉冲激光精密加工方法

技术领域

[0001] 本发明属于精密加工技术领域,具体涉及一种干气密封微米级沟槽的超短脉冲激光精密加工方法。

背景技术

[0002] 干气密封的主要特点在于采用激光开槽技术后实现了摩擦副运行中的非接触,在结构方面表现为动环或静环端面上开设有深度为 $3\sim 10\mu\text{m}$ 的各种织构槽型。其核心技术体现在微米级槽型的优化设计与精密加工水平。

[0003] 彭旭东团队的相关研究表明,较大粗糙度下,虽然密封开启力、气膜刚度随转速增加而显著提高,但同时泄漏量也明显加大,随着转速增加,较大粗糙度对干气密封低速运转性能是有害的。宋云鹏团队的相关实验也表明,加工工艺参数对开槽深度和槽底精度均有较大影响,合理的工艺参数有助于提升开槽的加工质量,同时给出了不同材质下相对合理的工艺参数范围。

[0004] 上述研究看出,粗糙度对干气密封的影响不可忽视且作用机理十分复杂,为确保干气密封理论研究的实际应用的有效指导,须使开槽技术可以精确实现理论研究所要求的槽深精度,将粗糙度影响降到最低。

[0005] 现阶段,国外针对此领域的实验研究成果公开较少,国内针对干气密封激光加工技术的研究仍然为数不多,槽型加工精度仍然不高(最小 $R_a=0.93\mu\text{m}$),同时也缺乏一个有效率的加工调节方法。

发明内容

[0006] 本发明针对目前激光加工领域内,缺乏对干气密封动环表面的精密加工的现状,结合现有的激光加工设备,综合调整激光功率 P 、重复频率 f 、扫描速度 V 以及填充间距 S ,提出一种干气密封微米级槽深的超短脉冲激光精密加工方法。

[0007] 为了实现上述目的,本发明采用的技术方案如下:

[0008] 一种干气密封微米级沟槽的超短脉冲激光精密加工方法,所述方法如下:

[0009] S1:测量相邻光斑间距,保证相邻光斑间距不超过最小光斑直径;

[0010] S2:参考被加工材料的气化阈值,得出不同重复频率下对应的最小激光功率 P ;

[0011] S3:根据S2得到对应激光设备额定重复频率 f_e 时的最小激光功率 P_{\min} ;

[0012] S4:根据实验结果、精度及效率初步估算最低扫描速度 V_{\min} ;

[0013] S5:依据激光器的最小光斑直径 d_s 及相关参数可确定最大扫描速度: $V_{\max}=d_s \cdot f_e$,以此可对扫描速度进行限定;

[0014] S6:在 V_{\min} 和 V_{\max} 之内选择一个扫描速度 V ,由此可计算出加工轨迹 y 方向填充间距 S_y 以及激光扫描 x 方向填充间距 S_x ;

[0015] S7:在激光参数组合确定后,根据单次加工深度 h_{go} 和目标槽深 h_g 可计算得到循环次数: $n=h_g/h_{go}$ 。

[0016] 优选地,确定会影响加工质量的操作参数包括重复频率 f_e 、扫描速度 V 以及 x 方向填充间距 S_x , y 方向填充间距 S_y ;确定各个参数的关系,具体关系如下:

[0017] $V_{\min} < V < V_{\max} = f_e \cdot d_s$

[0018] $S_x = S_y = \frac{V}{f_e}$

[0019] 其中, d_s 为光斑直径, V_{\min} 为最小扫描速度, V_{\max} 最大扫描速度。

[0020] 优选地,以材料气化阈值为基准,在选定的额定功率下确定最小激光功率,然后在各设置参数对应的相邻光斑间距不超过最小光斑直径的前提下,依据槽深及精度等级要求,选择适宜的参数组合为单次循环基准,通过调整标刻次数 n 即可实现预期加工要求。

[0021] 优选地,对参数的优化调整过程包括:给定参数 P_{\min} , f_e , V , S_x , S_y ,进行 m 次激光加工,得到槽深 h_{gm} ,计算出单次加工深度 $h_{go} = h_{gm}/m$,根据是否满足加工条件,若是则输出,若不是则继续调整,最终进行有限次调整可以得到理想的参数。

[0022] 优选地,上述所述额定功率下对应的最小激光功率 P_{\min} ,实际加工时可根据效率、成本、精度等要求,以 P_{\min} 为基准适当增大,可逐渐提高加工效率、降低成本、提高精度。

[0023] 优选地,所述方法能够应用到飞秒、皮秒等超短脉冲激光加工技术于表面加工。

[0024] 上述技术方案可以得到以下有益效果:

[0025] 以材料气化阈值为基准、确保相邻光斑间距不超过最小光斑直径为前提,通过调节重复频率、扫描速度和填充间距等参数的加工方法,针对给定精度和深度实现连续加工,将精度影响降到最低,具体效果如下:

[0026] (1) 针对现有激光精密加工设备型号众多、机理复杂、参数关联性高,较难高效率应用于干气密封微米级槽深精密加工的现状,基于先进的超短脉冲激光加工技术,提出一套完整的面向干气密封微米级槽深的超短脉冲激光精密加工方法,可操作性高。

[0027] (2) 在介观尺度上研究超短脉冲激光加工的加工过程,定量地确定了影响加工质量的参数之间的数学关系。

[0028] (3) 总结了一套完整的参数调整方法,来实现对给定的不同精度要求和槽深要求的连续精密加工,并运用所总结的方法进行实验。

[0029] 在碳化硅(SiC)制成的试样上进行超短脉冲激光精密加工实验,操作参数为:光斑直径 $d_s = 15\mu\text{m}$,激光功率 $P = 6\text{W}$,额定重复频率 $f = 400\text{kHz}$,额定扫描速度 $V = 4000\text{mm/s}$,循环次数10-20次,给定加工深度 $h_g = 5\mu\text{m}$,最终实现的加工结果 $\text{Value} = 5.1032\mu\text{m}$,误差为2.064%,测量工具为美国Rtec公司生产的三维通用式共聚焦形貌仪。

附图说明

[0030] 图1激光加工特性曲线。

[0031] 图2干气密封超短脉冲激光加工技术流程图。

[0032] 图3最佳操作参数求解图。

[0033] 图4激光加工效果示意图。

[0034] 图5均方差变化图。

[0035] 图6填充间距 $11\mu\text{m}$ 微观图。

[0036] 图7填充间距 $7\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m}$ 微观图。

[0037] 图8填充间距 $7\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m}$ 微观图。

[0038] 图9是均方差数值表图。

具体实施方式

[0039] 下面结合附图对本发明做进一步的说明：

[0040] 图1-9所示，一种干气密封微米级沟槽的超短脉冲激光精密加工方法，所述方法如下：

[0041] S1:测量相邻光斑间距，保证相邻光斑间距不超过最小光斑直径；

[0042] S2:参考被加工材料的气化阈值，得出不同重复频率下对应的最小激光功率 P ；

[0043] S3:根据S2得到对应激光设备额定重复频率 f_e 时的最小激光功率 P_{\min} ；

[0044] S4:根据实验结果、精度及效率初步估算最低扫描速度 V_{\min} ；

[0045] S5:依据激光器的最小光斑直径 d_s 及相关参数可确定最大扫描速度： $V_{\max}=d_s \cdot f_e$ ，以此可对扫描速度进行限定；

[0046] S6:在 V_{\min} 和 V_{\max} 之内选择一个扫描速度 V ，由此可计算出加工轨迹 y 方向填充间距 S_y 以及激光扫描 x 方向填充间距 S_x ；

[0047] S7:在激光参数组合确定后，根据单次加工深度 h_{go} 和目标槽深 h_g 可计算得到循环次数： $n=h_g/h_{go}$ 。

[0048] 确定会影响加工质量的操作参数包括重复频率 f_e 、扫描速度 V 以及 x 方向填充间距 S_x ， y 方向填充间距 S_y ；确定各个参数的关系，具体关系如下：

[0049] $V_{\min} < V < V_{\max} = f_e \cdot d_s$

[0050]
$$S_x = S_y = \frac{V}{f_e}$$

[0051] 其中， d_s 为光斑直径， V_{\min} 为最小扫描速度， V_{\max} 最大扫描速度。

[0052] 以材料气化阈值为基准，在选定的额定功率下确定最小激光功率，然后在各设置参数对应的相邻光斑间距不超过最小光斑直径的前提下，依据槽深及精度等级要求，选择适宜的参数组合为单次循环基准，通过调整标刻次数 n 即可实现预期加工要求。

[0053] 对参数的优化调整过程包括：给定参数 P_{\min} ， f_e ， V ， S_x ， S_y ，进行 m 次激光加工，得到槽深 h_{gm} ，计算出单次加工深度 $h_{go}=h_{gm}/m$ ，根据是否满足加工条件，若是则输出，若不是则继续调整，最终进行有限次调整可以得到理想的参数。

[0054] 上述所述额定功率下对应的最小激光功率 P_{\min} ，实际加工时可根据效率、成本、精度等要求，以 P_{\min} 为基准适当增大，可逐渐提高加工效率、降低成本、提高精度。

[0055] 将本方法应用飞秒、皮秒等超短脉冲激光加工技术于表面加工，以碳化硅陶瓷材料为例：

[0056] 确保相邻光斑间距不超过最小光斑直径的前提下，提出一种以材料气化阈值为基准，通过调节重复频率、扫描速度和填充间距等参数的加工方法，实现对给定精度和深度连续加工。本方法通过调节上述参数，对单次标刻的加工深度进行调节，准确实现了不同加工效率要求下的各类槽型、槽深的精密加工。

[0057] 原理如图1，当单位激光能量小于气化阈值 e_0 时，激光不会在材料表面进行有效加工，故单位激光能量必须大于 e_0 ，但在激光能量超过 e_0 时，随着激光能量的提高，加工精度不

断下降,所以需要选择一个既保证加工有效性,又能保证加工精度的加工功率(加工功率为单位激光能量与频率的乘积)。

[0058] 在碳化硅陶瓷材料上进行不同重复频率 f 的气化阈值实验研究,得到对应激光设备额定重复频率 f_e 时的最小激光功率 P_{\min} 。

[0059] 根据实验结果、精度及效率初步估算最低扫描速度 V_{\min} ,在额定重复频率 f_e 确定后,依据激光器的最小光斑直径 d_s 及相关参数可确定最大扫描速度: $V_{\max}=d_s \cdot f_e$,以此可对扫描速度进行限定。

[0060] 在 V_{\min} 和 V_{\max} 之内选择一个扫描速度 V ,由此可计算出加工轨迹方向(y方向)填充间距 S_y 以及激光扫描方向(x方向)填充间距 S_x (一般取 $S_x=S_y=V/f$)。在激光参数组合确定后,循环次数 n 取决于目标槽的深度 $n=h_g/h_{go}$ 。

[0061] $V_{\min} < V < V_{\max} = f_e \cdot d_s$

[0062] $S_x = S_y = \frac{V}{f_e}$

[0063] 其中, d_s 为光斑直径, V_{\min} 为最小扫描速度, V_{\max} 最大扫描速度,流程图如图2。

[0064] 实际加工中,为获得精度较高的加工质量,以材料气化阈值为基准,在选定的额定功率下确定最小激光功率,然后在各设置参数对应的相邻光斑间距不超过最小光斑直径的前提下,依据槽深及精度等级要求,可基于最小激光功率 P_{\min} 适当调节实际用激光功率,进而确定适宜的参数组合为单次循环基准,通过调整标刻次数 n 即可实现预期加工要求。

[0065] 对参数的优化调整过程包括:给定参数 $P_{\min}, f_e, V, S_x, S_y$,进行 m 次激光加工,得到槽深 h_{gm} ,计算出单次加工深度 $h_{go}=h_{gm}/m$,根据是否满足加工条件($h_{go}=h_{gm}/m=h_g/n$, m,n 都应为整数),若是则输出,若不是则继续调整,最终进行有限次调整可以得到理想的参数,流程图如图3。

[0066] 为保证连续性加工,在光斑直径 $d_s=15\mu m$ 时,填充间距 S (一般选择 y 方向填充间距 $S_y=x$ 方向填充间距 S_x ,这里统一为 S 表述)只能小于 d_s 且为整数,即为1-15间整数值。理论研究表明,填充间距的变化会导致激光光斑重叠区出现一系列复杂变化,为有效衡量不同填充间距下的加工均匀度,特提出以下均方差概念。

[0067] 均方差计算公式如下:

[0068] $h_a = \frac{\sum h_i S_i}{\sum S_i}$

[0069] $\sigma^2 = \frac{\sum (h_i - h_a)^2 S_i}{\sum S_i}$

[0070] h_i ——为类比加工深度(即光斑重叠次数) $i=0,1,2 \dots n$. n 为自然数,指光斑重叠次数(如 h_2 表示某一填充间距下光斑重叠次数为2的类比加工深度);

[0071] S_i ——为不同光斑重叠次数(即不同类比加工深度)对应的区域面积覆盖率, $i=0,1,2 \dots n$. n 为自然数,指光斑重叠次数(如 S_2 表示某一填充间距下光斑重叠次数为2的区域面积覆盖率);

[0072] h_a ——为类比平均加工深度;

[0073] σ^2 ——为均方差。

[0074] 依据实际激光加工区域大小,假设总加工面积为 1cm^2 ,实际加工一般设置 $S_x=S_y$,且设为整数,故加工面示意图如图4(光斑直径 $15\mu\text{m}$)。在统计了填充间距从 $1\mu\text{m}$ 到 $15\mu\text{m}$ 的整数变化,并根据加工区域深度的均方差的统计公式,计算出表面高度的均方差相对填充间距的变化(两个方向同时变化)。

[0075] 结果如图5和图9所示。整体上,随着间距越大,表面高度的均方差越小,但当填充间距 $S>10\mu\text{m}$,加工将无法完成,因为路径内部出现未加工区域,如图6所示。通过分析可以得出,填充间距 S 位于 $6\text{--}10\mu\text{m}$ 时,均方差较小。

[0076] 图7所示为填充间距 $S=7\text{--}8\mu\text{m}$ 时的光斑位置间隙示意图,可以看出,当 $S>7\mu\text{m}$ (理论为 7.5)时,相临光斑不再重叠,即 $S\geq 8\mu\text{m}$ 之后的加工中,单次重叠加工部分逐渐成为稳定加工区域的主要部分。基于此,综合考虑加工精度、效率以及实际加工效果,取填充间距 $S=7\mu\text{m}$ 最为合适。

[0077] 进一步分析图5,间距 $S=3\mu\text{m}$ 时的均方差较间距 $S=2\mu\text{m}$ 时的均方差大,产生这一现象的原因是二者的加工区不同,具体如图8所示:将重复区域分为加工多数区和加工少数区两类区域,通过分析,间距为 $S=3\mu\text{m}$ 时的两类区域平均相差不大、整体均匀,且面积相当;而间距为 $S=3\mu\text{m}$ 时的两类区域平均相差3次以上,较大地影响了整体的均方差,是图5中间距为 $S=3\mu\text{m}$ 时均方差值出现突变的原因。

[0078] 以上所述均为本发明的优选实施方式,对于本技术领域的普通技术人员,在不脱离本发明的原理前提下,对本发明的各种等价形式的修改均属于本申请所附权利要求的保护范围。

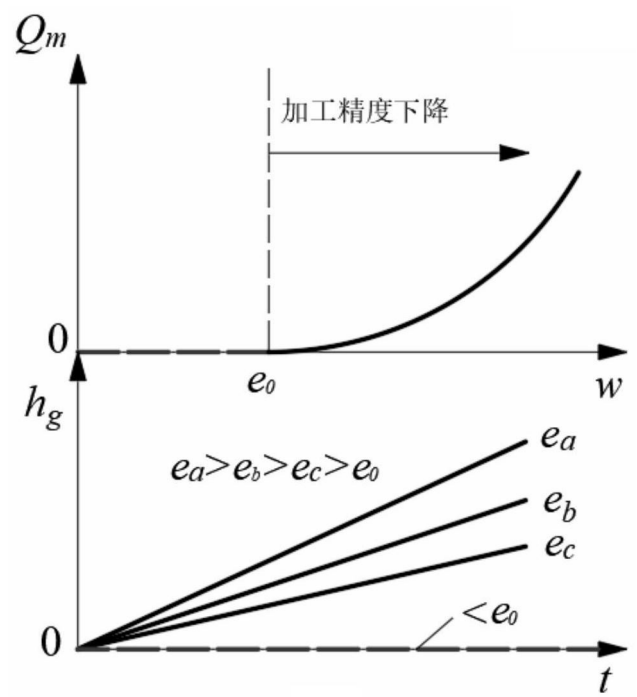


图1

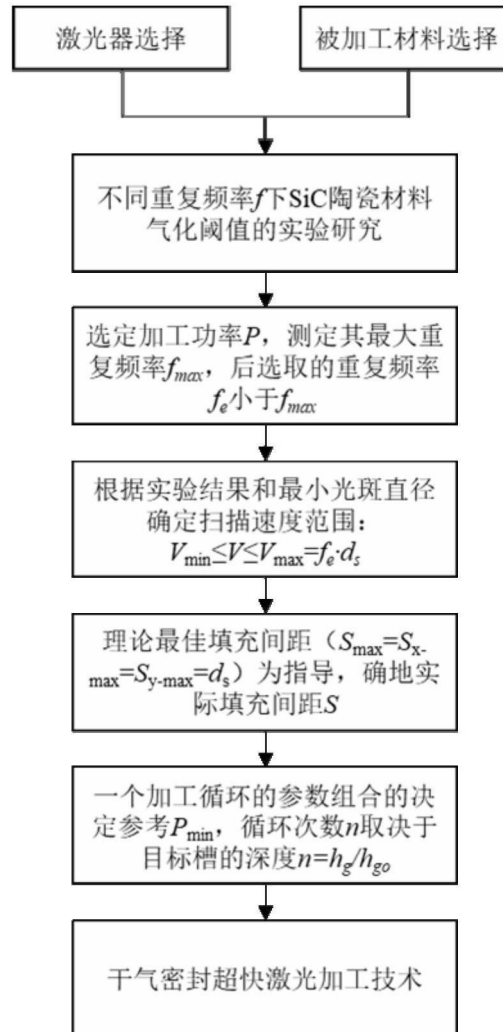


图2

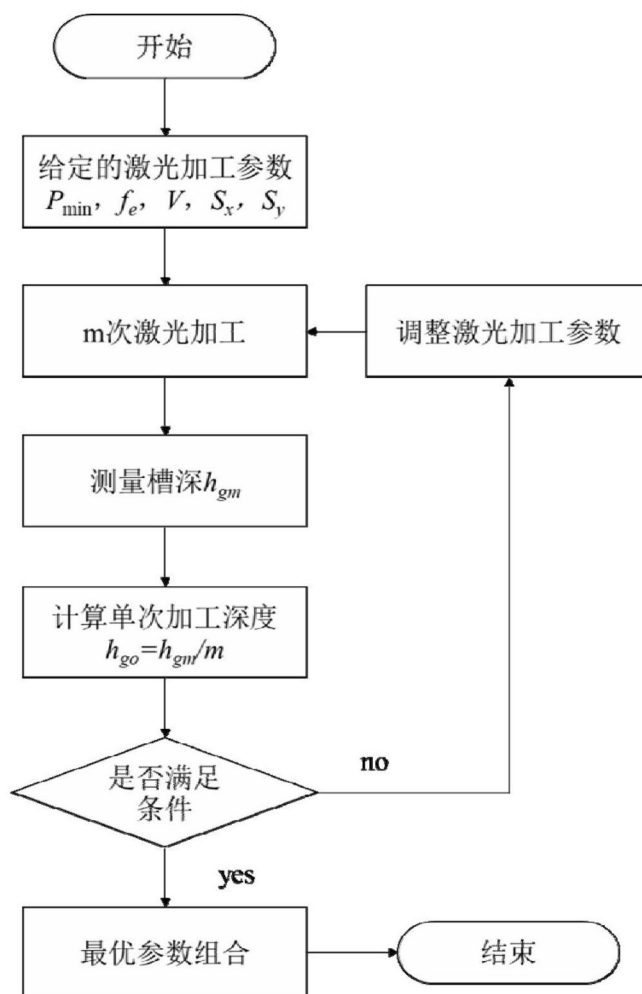


图3

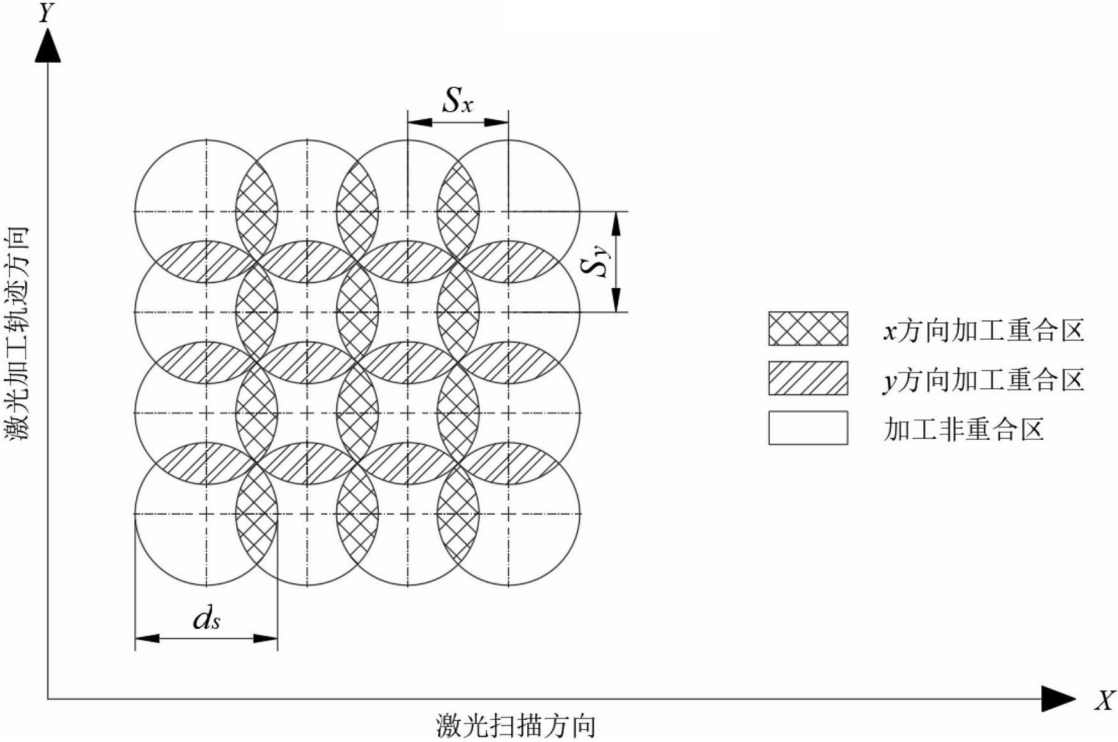


图4

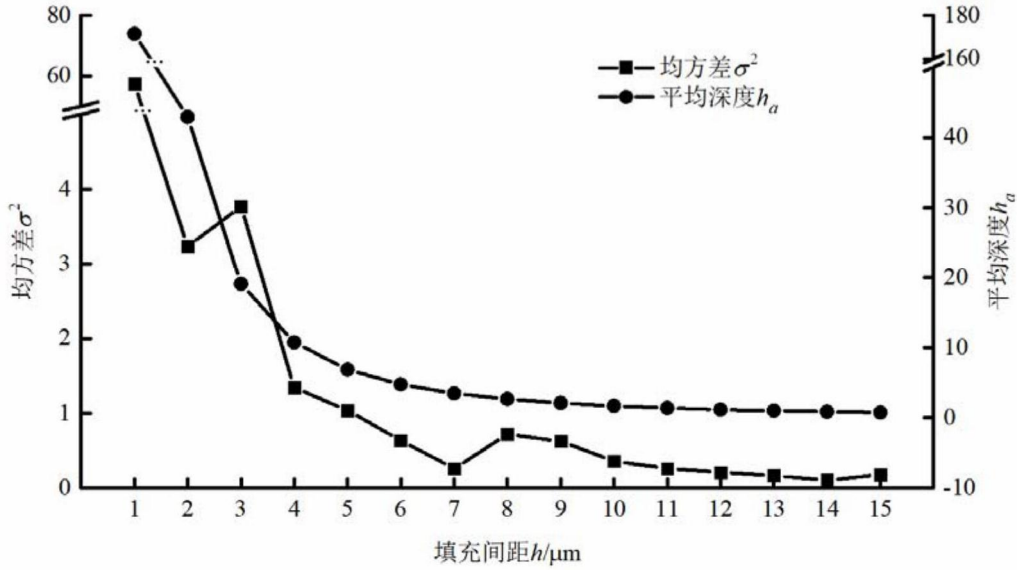


图5

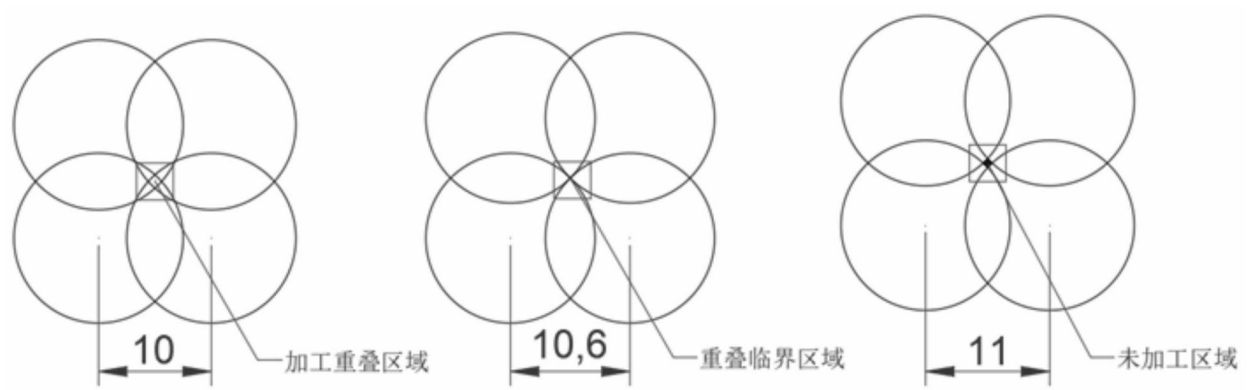


图6

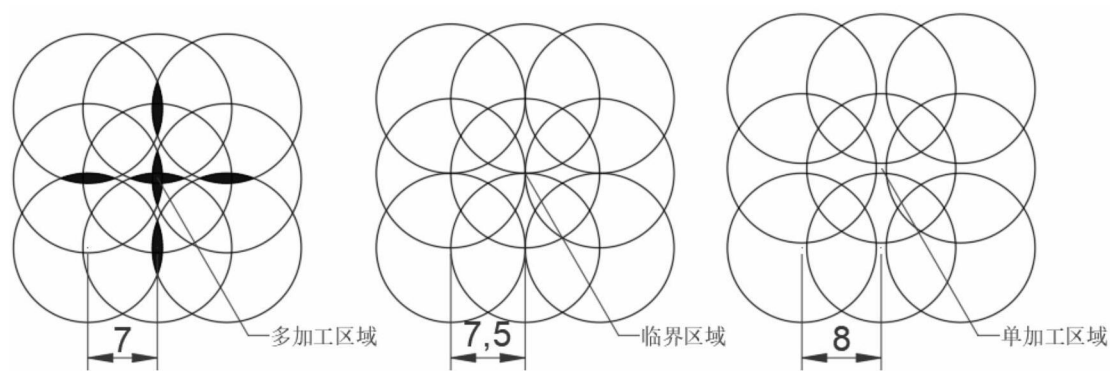


图7

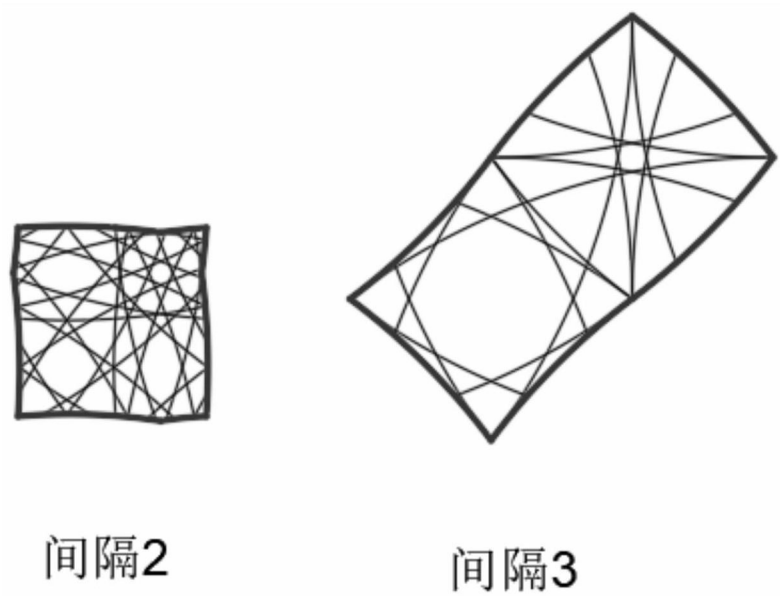


图8

| | | | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 间距 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 均方差 | 57.40 | 3.238 | 3.771 | 1.344 | 1.040 | 0.6399 | 0.2607 | 0.7185 |
| 平均深度 | 171.5 | 42.89 | 19.07 | 10.73 | 6.866 | 4.769 | 3.505 | 2.684 |
| 间距 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
| 均方差 | 0.6281 | 0.3624 | 0.2608 | 0.2124 | 0.1714 | 0.1076 | 0.1801 | |
| 平均深度 | 2.121 | 1.718 | 1.42 | 1.194 | 1.017 | 0.8774 | 0.7644 | |

图9