

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 6 月 4 日 (04.06.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/107613 A1

- (51) 国际专利分类号:
B23K 26/00 (2014.01) *B23K 26/08* (2014.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2018/124564
- (22) 国际申请日: 2018 年 12 月 28 日 (28.12.2018)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201811469173.2 2018 年 11 月 27 日 (27.11.2018) CN
- (71) 申请人: 江苏大学 (JIANGSU UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省镇江京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。
- (72) 发明人: 符永宏 (FU, Yonghong); 中国江苏省镇江京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 陈天阳 (CHEN, Tianyang); 中国江苏省镇江京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 纪敬虎 (JI,

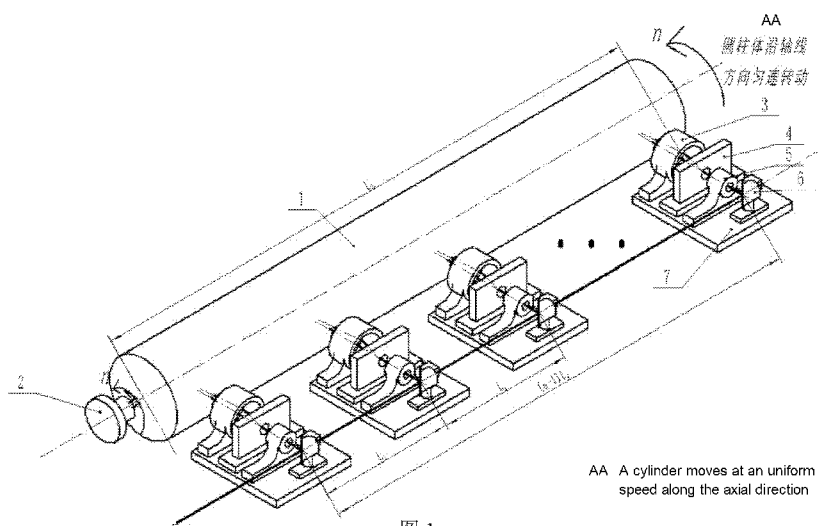
Jinghu); 中国江苏省镇江京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 汤发全 (TANG, Faquan); 中国江苏省镇江京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 张航成 (ZHANG, Hangcheng); 中国江苏省镇江京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 符昊 (FU, Hao); 中国江苏省镇江京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。

(74) 代理人: 北京德崇智捷知识产权代理有限公司 (JW IP LAW FIRM); 中国北京市朝阳区酒仙桥路 14 号 A5 楼 7 层 701, Beijing 100015 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,

(54) Title: ROUGH LASER MACHINING DEVICE FOR ROLLER AND MACHINING METHOD THEREOF

(54) 发明名称: 一种轧辊激光毛化加工设备及其加工方法



AA A cylinder moves at a uniform speed along the axial direction

(57) Abstract: A rough laser machining device for a roller and a machining method thereof. The machining method comprises the following steps: dividing a machinable region; determining a distribution scheme, i.e., obtaining an end-to-end connected, disordered, uniform and rough lattice distribution scheme according to a roller machining unit parameter and topography parameters; determining output signals, i.e., obtaining a laser emitting position signal, a light beam energy adjustment signal, and a one-dimensional light beam deflection unit deflection signal by means of an information processing module; and performs rough machining on a roller by means of laser, wherein the laser emitting position signal is used for controlling a light source module to emit laser, the light beam energy adjustment signal and the one-dimensional light beam deflection unit deflection signal are respectively inputted into the laser tip output modules and used for generating disordered laser lattices, and each laser tip output module is used for machining a roller machining unit. The present invention can ensure the degree of disorder of a roughening point, and can also ensure the uniformity of topography distribution, and the surface of a produced cold-rolled plate has better consistence in subsequent coating treatment.



MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种轧辊激光毛化加工设备及其加工方法, 包括如下步骤: 加工区域划分; 确定分布方案: 根据所述轧辊加工单元参数和形貌参数, 得出可首尾相连的无序均匀分布毛化点阵分布方案; 确定输出信号: 通过信息处理模块得出激光出光位置信号、光束能量调节信号和一维光束偏转单元偏转信号; 轧辊激光毛化加工: 所述激光出光位置信号用于控制光源模块发出激光; 所述光束能量调节信号和一维光束偏转单元偏转信号分别输入激光末端输出模块, 用于产生无序的激光点阵, 每个激光末端输出模块用于加工一个轧辊加工单元, 可保证毛化点无序程度的同时也能确保形貌分布的均匀性, 生产的冷轧板表面在后续涂装处理中一致性更好。

一种轧辊激光毛化加工设备及其加工方法

技术领域

本发明涉及表面处理领域中的激光毛化加工技术，特别涉及一种轧辊激光毛化加工设备及其加工方法。

背景技术

冷轧板表面的一定形貌参数对钢板的冲压性和表面涂镀性能有重要影响，而冷轧板的表面形貌在很大程度上又取决于冷轧生产过程中轧机工作辊及光整机组工作辊的表面形貌。实质上，冷轧板表面形貌是轧辊表面形貌的衰减性“拷贝”。为使带钢表面达到满足需要的表面形貌，一般采用轧辊表面毛化的办法。不同种类冷轧板，对毛化形貌的种类、形貌微观尺寸存在不同要求；毛化形貌的保持性、一致性、均匀性，对同一批次冷轧板表面质量一致性影响显著；毛化形貌排列的无序程度，与冷轧板后续涂装处理表面质量呈正相关。

目前，用于轧辊毛化的主流方法有喷丸毛化、电火花毛化、激光毛化。喷丸毛化靠硬质微粒冲击轧辊表面，形成凹陷毛化形貌，该技术明显缺陷有：1)形成的毛化形貌单一，且毛化形貌微观尺寸调节困难，不能适应不同类别钢板轧制需求；2)加工过程环境恶劣，并入冷轧板生产线难度大。电火花毛化是在绝缘液中电极与轧辊表面之间产生脉冲性的火花放电，靠局部放电产生的瞬时高温刻蚀轧辊表面，形成毛化形貌，形貌排列具有随机性，该技术的缺陷有：1)通过热效应烧蚀轧辊表面形成的毛化形貌，具有重铸层、重淬层、热影响层和基材四层，其中使得轧辊表面糙化的重铸层易剥落，形貌保持性差、寿命短，严重影响同一批次轧制钢板表面质量一致性；2)毛化加工中电极损耗，虽有电极补偿反馈，但难以保证轧辊表面毛化形貌微观尺寸一致和可控；3)加工过程中电极等损耗件，设备使用中存在持续成本；4)设备投入成本较大。

激光毛化，通过激光热效应在轧辊表面激光烧蚀或激光熔凝加工出毛化形貌，毛化形貌种类较多，形貌微观尺寸通过改变激光参数调节方便，但依然存在以下几个问题：1)通过激光烧蚀加工出的毛化形貌，形貌表层凸起部分为重铸层，冷轧板过程中易剥落，形貌保持性差；2)激光加工过程中激光作用点（焦点）位置固定，加工无序排列的毛化形貌难度大；3)毛化形貌随机分布时，总是会出现毛化形貌出现大批量重叠，分布的均匀性无法得到保证。

中国专利公开了一种实现毛化点均匀随机分布的激光毛化方法，通过随机信号对每个激光脉冲进行随机延时和随机偏转，在轧辊表面加工较疏的毛化形貌分布，再通过多激光头多次提高效率 and 面积占有率。虽然解决了激光毛化有序性的问题，但激光脉冲的随机延时、

随机偏转和多道次的加工方法都会导致毛化形貌出现大批量重叠，导致形貌分布的均匀性较差，直接影响后续涂装性能。同时形貌的多次重叠区域多次受到激光作用，相当于对轧辊局部区域进行回火处理，影响甚至破坏轧辊表层金相组织，极大地降低了轧辊使用寿命。

中国专利公开了一种无规则偏转毛化点的辊类表面毛化激光加工系统及方法，通过由正弦波精确控制变化得来的伪随机信号，控制伪随机偏转装置对每次向辊类工件表面发射的激光进行随机偏转，实现毛化点无规则分布。该方案在面积占有率较大的分布中，分布的均匀性问题依然存在，形貌会出现扎堆和重叠，分布的均匀性不佳。

中国专利公开了一种聚焦光点可控偏摆的激光毛化加工装置，在激光聚焦前布置压电陶瓷偏转系统，使得聚焦光点做二维摆动，从而加工无规则分布的毛化点。该专利并未公开控制形貌分布均匀性的方法，均匀性问题并未得到解决。

发明内容

针对现有技术中存在的不足，本发明提供了一种轧辊激光毛化加工设备及其加工方法，在轧辊表面待加工区域，选用合适的织构形貌并配合特定的输出激光参数，通过多个激光末端输出模块同步加工每个加工单元，设计可首尾相连的无序均匀分布点阵方案，检测同轴编码器瞬时位置信号与激光出光位置信号一致性，在激光末端输出模块处于确定位置时发出确定参数激光，同时给每个激光末端输出模块的光束能量调节单元不同的信号，完成能量衰减调节，并给每个激光末端输出模块的一维光束偏转单元同样的信号，完成光束一维偏转，使得各个激光末端输出模块的激光焦点按所设计可首尾相连的无序均匀分布点阵方案，采用不同的激光能量依次加工毛化硬质点。

本发明是通过以下技术手段实现上述技术目的的。

一种轧辊激光毛化加工方法，其特征在于，包括如下步骤：

加工区域划分：将轧辊表面加工区域均匀划分为若干轧辊加工单元；

确定分布方案：根据所述轧辊加工单元参数和形貌参数，通过可首尾相连无序均匀点阵分布设计方法得出可首尾相连的无序均匀分布毛化点阵分布方案；

确定输出信号：根据所述可首尾相连的无序均匀分布毛化点阵分布方案、机床参数和激光参数，通过信息处理模块得出激光出光位置信号、光束能量调节信号和一维光束偏转单元偏转信号；

轧辊激光毛化加工：所述激光出光位置信号用于控制光源模块发出激光；所述光束能量调节信号和一维光束偏转单元偏转信号分别输入激光末端输出模块，用于产生无序的激光点阵，每个激光末端输出模块用于加工一个轧辊加工单元。

进一步，加工区域划分具体为：

确定轧辊表面加工区域；所述轧辊加工区域为长度 L_{01} 和宽度 πd 的方形区域，其中， $L_{01} = 5\% \sim 100\% L_0$ ， L_{0-01} 为距轧辊端面距离， $L_{0-01} = 0 \sim 90\% L_0$ ； L_0 为轧辊表面展开长度， d 为轧辊直径；

将轧辊加工区域均匀划分为 m 个轧辊加工单元，任一轧辊加工单元长度为 L_1 ， $L_1 = \frac{1}{m_{max}} L_{01}$ ；任一轧辊加工单元宽度为 πd ；其中， $m \in \{1, 2, 3 \dots m_{max}\}$ ， $m_{max} = 1 \sim 30$ 。

进一步，所述激光末端输出模块包括光束折返单元、光束能量调节单元和一维光束偏转单元；所述光源模块入射的激光依次经过光束折返单元、光束能量调节单元和一维光束偏转单元后入射轧辊加工单元；

所述光束折返单元用于将光源模块入射的激光分光为垂直于轧辊轴线方向的反射激光和平行于轧辊轴线方向的透射激光；所述反射激光射入所述光束能量调节单元，所述透射激光射入下一个激光末端输出模块；

所述光束能量调节单元用于改变所述反射激光的能量；

所述一维光束偏转单元用于偏移所述反射激光的角度。

进一步，所述光束折返单元通过各半反镜片镀膜性质不同，使反射激光和透射激光能量比例为： $\frac{P_m}{P_{m-}} = 1: (m_{max} - m)$ ； $P_m = P_{output} = \frac{1}{m_{max}} P_{input}$ ， $m = 1, 2, 3 \dots m_{max}$ ；

其中， P_m 为第 $Line_m$ 个激光末端输出模块中光束折返单元分光的反射激光功率；

P_{m-} 为第 $Line_m$ 个激光末端输出模块中光束折返单元分光的透射激光功率；

P_{input} 为光源模块输出的激光光源功率；

P_{output} 为激光末端输出模块输入激光功率；

所述光束能量调节单元根据输入的电信号 ψ 使光束能量衰减固定值，即 $P_{focus} = (1 - Damp(\psi)) P_{output}$ ，其中， ψ 为光束能量调节单元驱动电源输入电信号， $\psi \in [\psi_{min}, \psi_{max}]$ ，对应能量衰减比例 $Damp(\psi)$ 从 0~100%变化； ψ_{min} 为最小输入电信号； ψ_{max} 为最大输入电信号； $Damp(\psi)$ 为激光能量衰减比例； P_{focus} 为所述光束能量调节单元输出的激光功率；

所述一维光束偏转单元根据输入电信号 ξ 使光束一维偏转固定角度 α ，经过聚焦镜片作用在待加工区域，使得焦点相对于光轴偏移确定距离 σ ，

$$\sigma = f(\alpha, L_2, f) = f(\alpha(\xi), L_2, f),$$

$$\sigma_{min} = f(\alpha_{min}, L_2, f) = f(0, L_2, f)$$

$$\sigma_{max} = f(\eta * \alpha_{max}, L_2, f)$$

其中， L_2 为所述一维光束偏转单元距工件表面距离； f 为所述一维光束偏转单元不发生偏

转时的焦距； α 为一维光束偏转单元使光束偏转角度，即 $\alpha = \alpha(\xi)$ ； α_{min} 为所述一维光束偏转单元使光束最小偏转角度； α_{max} 为一维光束偏转单元使光束最大偏转角度； η 为一维光束偏转单元安全使用系数； σ 为焦点位置偏移量； σ_{min} 为焦点位置偏移量最小值； σ_{max} 为焦点位置偏移量最大值。

进一步，所述可首尾相连无序均匀点阵分布设计方法具体包括如下步骤：

根据形貌参数分布建立均匀点阵分布毛化点圆心集 A_0 ，具体为：

$$A_0 = \left\{ (x_{0i}, y_{0j}) \middle| \begin{array}{l} x_{0i} = a(j-1), y_{0j} = b(i-1), \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max} \end{array} \right\},$$

其中： A_0 为均匀点阵分布毛化点圆心坐标位置集； (x_{0i}, y_{0j}) 为第*i*行第*j*列均匀点阵分布毛化点圆心坐标；*i*为行序号； i_{max} 为最大行序号， $i_{max} = \pi d/b$ ；*j*为列序号， $j_{max} = [L_1/a] + 1$ ； j_{max} 为最大列序号；*a*为形貌分布点距，*x*方向两个毛化硬质点之间距离；*b*为形貌分布线距，*y*方向两个毛化硬质点之间距离；

建立均匀点阵分布中每个毛化点随机位移向量集合 ΔX ，具体如下：

$$\Delta X = \left\{ (\delta x_i, \delta y_j) \middle| \begin{array}{l} \delta x_i = rand(-1, 1) * \varepsilon_b, \\ \delta y_j = rand(-1, 1) * \varepsilon_a, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max} \end{array} \right\},$$

其中： ΔX 为均匀点阵分布中每个毛化点随机位移向量集合； $(\delta x_i, \delta y_j)$ 为均匀点阵分布中第*i*行、第*j*列均匀点阵分布毛化点圆心坐标 (x_{0i}, y_{0j}) 的随机位移向量； ε_a 为列偏移常量； ε_b 为行偏移常量；

建立无序均匀分布毛化点圆心集A：将均匀点阵分布毛化点圆心坐标位置集 A_0 和均匀点阵分布中每个毛化点随机位移向量集合 ΔX 叠加：

$$A = A_0 + \Delta X = \left\{ (x_i, y_j) \middle| \begin{array}{l} (x_i, y_j) = (x_{0i}, y_{0j}) + (\delta x_i, \delta y_j), \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max} \end{array} \right\}$$

其中：A，无序均匀分布毛化点圆心集； (x_i, y_j) ，无序均匀分布毛化点圆心坐标；

查找坏点：按毛化点重叠容忍度查找无序均匀分布坏点行序列、列序列的集SP，具体如下：

$$SP = \left\{ (u_q, w_q) \left| \begin{array}{l} (u_q, w_q) = (i, j), \\ |A(i, j) - A(i+1, j)| < \zeta * D \text{ or} \\ |A(i, j) - A(i, j+1)| < \zeta * D \text{ or} \\ |A(i, j) - A(i+1, j+1)| < \zeta * D, \\ i = 2, 3, 4 \dots i_{max} - 1, \\ j = 2, 3, 4 \dots j_{max} - 1, \\ q = 1, 2, 3 \dots \end{array} \right. \right\},$$

其中：SP 为无序均匀分布坏点行序列、列序列的集；A(i, j)为无序均匀分布毛化点圆心坐标集中第 i、j 个毛化点圆心坐标；(u_q, w_q)为第 q 个坏点坐标行序列、列序列；q 为坏点排序号；ζ为无序均匀分布毛化点重叠容忍常量；

判断是否存在坏点：当SP ≠ ∅时，则存在坏点，则根据无序均匀分布坏点集 SP，调整随机位移向量集合ΔX，重复建立无序均匀分布毛化点圆心集A和查找坏点，直至SP = ∅；当SP = ∅时，则不存在坏点；

建立无序均匀分布毛化点圆心集 A 以轴向中心线为基准进行左右对调后的无序均匀分布毛化点圆心集A_{ex}：当SP = ∅时，对无序均匀分布毛化点圆心集 A 以轴向中心线为基准进行左右对调，以便多个激光末端输出模块加工区域的搭接：

$$A_{ex} = \left\{ (xex_i, yex_j) \left| \begin{array}{l} (xex_i, yex_j) = \begin{cases} \left(x_i + \frac{1}{2}L_1, y_j\right), & x_i < \frac{1}{2}L_1 \\ \left(x_i - \frac{1}{2}L_1, y_j\right), & x_i \geq \frac{1}{2}L_1 \end{cases} \\ (x_i, y_j) \in A, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max} \end{array} \right. \right\}$$

其中：A_{ex}为对无序均匀分布毛化点圆心集 A 以轴向中心线为基准进行左右对调后的无序均匀分布毛化点圆心集；(xex_i, yex_j)为左右对调后第 i、j 个毛化点圆心坐标；

查找中心线附近区域坏点：在左右对调过程后的中心线附近区域，按毛化点重叠容忍度查找无序均匀分布坏点行序列、列序列的集 SP_{ex}，具体为：

$$SP_{ex} = \left\{ (uex_{qex}, wex_{qex}) \left| \begin{array}{l} (uex_{qex}, wex_{qex}) = (i, j), \\ |A_{ex}(i, j) - A_{ex}(i+1, j)| < \zeta * D \text{ or} \\ |A_{ex}(i, j) - A_{ex}(i, j+1)| < \zeta * D \text{ or} \\ |A_{ex}(i, j) - A_{ex}(i+1, j+1)| < \zeta * D, \\ A_{ex}(i, j) \in Center, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, \\ j = 1, 2, 3 \dots j_{max}, \\ qex = 1, 2, 3 \dots \end{array} \right. \right\},$$

其中：SP_{ex} 为对左右对调过程后的中心线附近区域按毛化点重叠容忍度查找无序均匀分

布坏点行序列、列序列的集； (uex_{qex}, wex_{qex}) 为第 qex 个坏点坐标行序列、列序列； qex 为坏点排序号； $Aex(i, j)$ 为对调后的无序均匀分布毛化点圆心坐标集中第 i, j 个毛化点圆心坐标； $Center$ 为左右对调过程后的中心线附近区域：

$Center = \left\{ (x, y) \middle| x \in \left[\left(1 - \frac{\varpi}{2}\right) \frac{L_1}{2}, \left(1 + \frac{\varpi}{2}\right) \frac{L_1}{2} \right], y \in [0, \pi d] \right\}$; ϖ 为输入的中心线附近区域比例；

判断中心线附件区域是否存在坏点：当 $SPex \neq \emptyset$ ，则存在坏点，则根据中心线附近区域无序均匀分布坏点集 $SPex$ ，调整中心线附近区域坏点位置，重复建立无序均匀分布毛化点圆心集 A 以轴向中心线为基准进行左右对调后的无序均匀分布毛化点圆心集 Aex 和查找中心线附近区域坏点，直至 $SPex = \emptyset$ ；

当 $SPex = \emptyset$ 时，则不存在坏点，即 Aex 为所述可首尾相连的无序均匀分布毛化点阵分布方案。

进一步，所述根据无序均匀分布坏点集 SP ，调整随机位移向量集合 ΔX ，具体为：

$$\Delta X = \left\{ (\delta x_i, \delta y_j) \middle| \begin{array}{l} (\delta x_{re_i}, \delta y_{re_j}) = (\delta x_{re_i}, \delta y_{re_j}), \\ (\delta x_{re_i}, \delta y_{re_j}) \in \Delta X_{re}, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max}, \end{array} \right\},$$

$$\text{式中: } \Delta X_{re} = \left\{ (\delta x_{re_i}, \delta y_{re_j}) \middle| \begin{array}{l} (\delta x_{re_i}, \delta y_{re_j}) = \begin{cases} \lambda(\delta x_i, \delta y_j), (i, j) \in SP \\ (\delta x_i, \delta y_j), (i, j) \notin SP \end{cases}, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max}, \\ (\delta x_i, \delta y_j) \in \Delta X \end{array} \right\},$$

其中： ΔX_{re} 为调整后的随机位移向量集； $(\delta x_{re_i}, \delta y_{re_j})$ 为调整后的随机位移向量； λ 为坏点的随机位移向量的调整比例；

所述根据中心线附近区域无序均匀分布坏点集 $SPex$ ，调整中心线附近区域坏点位置，具体为：

$$Aex = \left\{ (xex_i, yex_j) \middle| \begin{array}{l} (xex_i, yex_j) = (xre_i, yre_j), \\ (xre_i, yre_j) \in Are, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max}, \end{array} \right\},$$

$$\text{式中: } Are = \left\{ (xre_i, yre_j) \left| \begin{array}{l} (xre_i, yre_j) = \\ \left\{ \begin{array}{l} (xex_i, yex_j) - \vartheta(\delta x_i, \delta y_j), (i, j) \in SPex \\ (xex_i, yex_j), (i, j) \notin SPex \end{array} \right. , \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max}, \\ (xex_i, yex_j) \in Aex, \\ (\delta x_i, \delta y_j) \in \Delta X \end{array} \right. \right\},$$

其中: Are 为中心线附近区域坏点位置调整后的无序均匀分布毛化点圆心坐标集;
 (xre_i, yre_j) 为中心线区域坏点位置调整后的无序均匀分布毛化点圆心坐标集中第 i 、 j 个毛化点圆心坐标; ϑ 为中心线附近区域坏点坐标调整比例。

进一步, 通过信息处理模块得出激光出光位置信号、光束能量调节信号和一维光束偏转单元偏转信号具体为如下步骤:

确定焦点运动轨迹与轧辊轴向夹角: 当一维光束偏转单元不工作时即 $\alpha = 0$ 时, 焦点运动轨迹与轧辊轴向夹角 θ :

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\pi * n * d}{v},$$

其中: n 为轧辊转速; v 为激光末端输出模块的运行速度;

确定焦点运动轨迹序号集 K 和计算每个焦点运动轨迹绕金属圆柱体圈数集 P ,

$$k \in K = \{1, 2, 3, \dots, k_{max}\}, \text{ 式中: } k_{max} = \begin{cases} \frac{\pi d}{\sigma_{max} \tan \theta}, \frac{\pi d}{\sigma_{max} \tan \theta} \text{ 为整数} \\ \left\lfloor \frac{\pi d}{\sigma_{max} \tan \theta} \right\rfloor + 1, \frac{\pi d}{\sigma_{max} \tan \theta} \text{ 不为整数} \end{cases};$$

$$p \in P = \{1, 2, 3, \dots, p_{max}\}, \text{ 式中: } p_{max} = \begin{cases} \frac{L_1}{\pi d \cot \theta}, \frac{L_1}{\pi d \cot \theta} \text{ 为整数} \\ \left\lfloor \frac{L_1}{\pi d \cot \theta} \right\rfloor + 1, \frac{L_1}{\pi d \cot \theta} \text{ 不为整数} \end{cases};$$

其中: K 为焦点运动轨迹序号集; k 为第 k 个焦点运动轨迹, 即第 k 次加工过程; P 为每个焦点运动轨迹绕金属圆柱体圈数集; p 为焦点运动轨迹绕金属圆柱体第 p 圈;

确定一维光束偏转单元偏转角度 $\alpha \in [0, \eta * \alpha_{max}]$ 时, 激光末端输出模块第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 A_k 的集合 A , 具体为:

$$\Lambda =$$

$$\left\{ \Lambda_k \middle| \Lambda_k = \left\{ (x, y) \left| \begin{array}{l} x \in [xk_{\min}(y, p = 1), xk_{\max}(y, p = 1)) \cup \\ [xk_{\min}(y, p = 2), xk_{\max}(y, p = 2)) \cup \\ [xk_{\min}(y, p = 3), xk_{\max}(y, p = 3)) \cup \\ \dots \cup \\ [xk_{\min}(y, p = p_{\max}), xk_{\max}(y, p = p_{\max}))], \\ y \in [0, \pi d) \end{array} \right. \right\}, k = 1, 2, 3 \dots k_{\max} \right\}$$

式中,

$$xk_{\min}(y, p) = xk(y, p, \sigma = 0) = \frac{\left[y - \frac{\pi d}{k_{\max}} k \right]}{\tan \theta} + \frac{\pi d}{\tan \theta} (p - 1), y \in [0, \pi d), p \in P, k \in K,$$

$$xk_{\max}(y, p) = xk(y, p, \sigma = \sigma_{\max}) = \frac{\left[y - \frac{\pi d}{k_{\max}} (k - 1) \right]}{\tan \theta} + \frac{\pi d}{\tan \theta} (p - 1), y \in [0, \pi d), p \in P, k \in K,$$

其中: Λ 为激光末端输出模块每次加工过程中焦点覆盖范围的集合; Λ_k 为激光末端输出模块第 k 次加工过程中焦点覆盖范围; $xk_{\min}(y, p) = xk(y, p, \sigma = 0)$ 为偏转角度 $\alpha = 0$ 即偏转量 $\sigma = 0$ 时, 第 k 条第 p 圈焦点运动轨迹方程; $xk_{\max}(y, p) = xk(y, p, \sigma = \sigma_{\max})$ 为偏转角度 $\alpha = \eta * \alpha_{\max}$ 即偏转量 $\sigma = \sigma_{\max}$ 时, 第 k 条第 p 圈焦点运动轨迹方程;

统计激光末端输出模块每次加工过程中焦点覆盖范围中的无序均匀毛化点圆心坐标的集合 Φ , 具体如下:

$$\Phi = \{\Phi_k | k = 1, 2, 3 \dots k_{\max}\},$$

$$\text{式中: } \Phi_k = \left\{ (x_{rk}, y_{rk}) \left| \begin{array}{l} (x_{rk}, y_{rk}) = (xex_i, yex_j), \\ (xex_i, yex_j) \in \Lambda_k, (xex_i, yex_j) \in Aex, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{\max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{\max}, \\ rk = 1, 2, 3 \dots \end{array} \right. \right\}, k \in K,$$

其中, Φ 为激光末端输出模块每次加工过程中焦点覆盖范围中的无序均匀毛化点圆心坐标集的集合; Φ_k 为激光末端输出模块第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的无序均匀毛化点圆心坐标集, 即圆心坐标落在 $xk_{\min} = xk(y, \sigma = 0)$ 、 $xk_{\max} = xk(y, \sigma = \sigma_{\max})$ 两条轨迹线之间的毛化点圆心坐标集; (x_{rk}, y_{rk}) 为第 k 次加工过程中包含的第 rk 个无序均匀毛化点圆心坐标; rk 为第 k 次加工过程中包含的无序均匀毛化点统计次序;

确定第 k 次加工过程中排序后的毛化点圆心坐标集 Ω_k : 按照毛化点加工先后顺序对 (x_{rk}, y_{rk}) 进行排序得到排序后的毛化点圆心坐标集 Ω_k , 具体排序规则如下:

$$\Omega_k = \{(x_{\tau k}, y_{\tau k}) | \tau k = 1, 2, 3 \dots rk_{max}\} =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\{ (x_{rk}, (y_{rk})_{min}), \dots, (x_{rk}, (y_{rk})_{max}) \right\} \left| \begin{array}{l} (x_{rk}, y_{rk}) \in \Phi_k, \\ rk = 1, 2, 3 \dots rk_{max}, \\ k \text{ 为奇数} \end{array} \right. \\ \left\{ (x_{rk}, (y_{rk})_{max}), \dots, (x_{rk}, (y_{rk})_{min}) \right\} \left| \begin{array}{l} (x_{rk}, y_{rk}) \in \Phi_k, \\ rk = 1, 2, 3 \dots rk_{max}, \\ k \text{ 为偶数} \end{array} \right. \end{array} \right\}, k \in K,$$

其中: Ω_k 为第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的无序均匀毛化点圆心坐标, 按照毛化点加工顺序进行排序后形成的圆心坐标集; $(x_{\tau k}, y_{\tau k})$ 为第 k 次加工过程中第 τk 个加工的毛化点坐标; τk 为第 k 次加工过程中毛化点加工顺序排序; rk_{max} 为第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中包含的无序均匀毛化点数量统计值最大值; $(y_{rk})_{max}$ 为第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的无序均匀毛化点圆心坐标 (x_{rk}, y_{rk}) 的 y 轴坐标最大值; $(y_{rk})_{min}$ 为第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的无序均匀毛化点圆心坐标 (x_{rk}, y_{rk}) 的 y 轴坐标最小值;

查找 Ω_k 中的加工奇点的集合 MSP_k : 根据加工系统响应频率查找 Ω_k 中的加工奇点的集合 MSP_k , 具体查找方式如下:

$$MSP_k = \left\{ msp_{mk} \left| \begin{array}{l} msp_{mk} = \tau k, \\ \frac{|y_{\tau k} - y_{\tau k-1}|}{\pi * n * d} < \frac{1}{F} \text{ or } \frac{|y_{\tau k} - y_{\tau k+1}|}{\pi * n * d} < \frac{1}{F}, \\ (x_{\tau k}, y_{\tau k}) \in \Omega_k, \\ \tau k = 2, 3, 4 \dots rk_{max} - 1, \\ mk = 1, 2, 3 \dots \end{array} \right. \right\}, k \in K,$$

$$\text{式中: } F = \frac{1}{\varrho} * \min \left(MaxfLas_{mor}, MaxfP_{res}, MaxfEX_{res}, \frac{n}{R_{encoder}} \right)$$

其中: MSP_k 为 Ω_k 中的加工奇点的集合; msp_{mk} 为第 k 次加工过程中加工奇点的加工顺序序号; F 为加工系统综合响应频率; $MaxfLas_{mor}$ 为加工第 mor 种形貌的输出激光最大出光频率; $MaxfP_{res}$ 为光束能量调节单元最高响应频率; $MaxfEX_{res}$ 为一维光束偏转单元最高响应频率; $R_{encoder}$ 为轧辊旋转同轴安装的编码器分辨率; ϱ 为系统响应频率安全系数;

判断是否存在加工奇点: 当 $MSP_k \neq \emptyset$, 且 $k \in K$, 则存在加工奇点, 根据 Ω_k 中的加工奇点的集合 MSP_k 对第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的按加工先后顺序排列的无序均匀毛化点圆心坐标集 Ω_k 进行调整, 重复确定第 k 次加工过程中排序后的毛化点圆心坐标集 Ω_k 和查找 Ω_k 中的加工奇点的集合 MSP_k , 直至 $MSP_k = \emptyset$; 当 $SP = \emptyset$ 时, 则不存在坏点;

当 $MSP_k = \emptyset$ 且 $k \in K$, 计算激光末端输出模块的激光出光位置信号-光束能量调节信号-

一维光束偏转单元偏转信号的信号集的集合 $\Gamma Line_m$:

$$\Gamma Line_m = \{\Gamma Line_{m_k}, k = 1, 2, 3 \dots k_{max}\}, m \in \{1, 2, 3 \dots m_{max}\},$$

式中:

$$\Gamma Line_{m_k} = \left\{ (\beta_{\tau k}, \psi_{m_{\tau k}}, \xi_{\tau k}) \left\{ \begin{array}{l} \beta_{\tau k} = 2\pi \frac{y_{\tau k}}{\pi d}, \\ \psi_{m_{\tau k}} = rand(\psi_{mi}, \varsigma * \psi_{max}) \text{ or } \\ \psi_{m_{\tau k}} = \psi_{min}, \\ \sigma_{\tau k} = x_{\tau k} - xk_{min}(y = y_{\tau k}, p = p_{\tau k}) \\ p_{\tau k} = \left\lfloor \frac{x_{\tau k} - xk_{min}(y = y_{\tau k}, p = 1)}{\pi d \cot \theta} \right\rfloor \\ \sigma_{\tau k} = f(\alpha_{\tau k}) = f(\alpha(\xi_{\tau k})) \\ (x_{\tau k}, y_{\tau k}) \in \Omega_k, \tau k = 1, 2, 3 \dots r_{max} \end{array} \right\}, k \in K, \right. \\ m \in \{1, 2, 3 \dots m_{max}\},$$

其中: $\Gamma Line_m$ 为每次加工过程中第 m 个激光末端输出模块的激光出光位置信号-光束能量调节信号-一维光束偏转单元偏转信号的信号集的集合; $\Gamma Line_{m_k}$ 为加工第 k 次加工过程中焦点覆盖范围中的按加工顺序排列的无序均匀毛化点第 m 个激光末端输出模块所需的激光出光位置信号-光束能量调节信号-一维光束偏转单元偏转信号的信号集; $(\beta_{\tau k}, \psi_{m_{\tau k}}, \xi_{\tau k})$ 为第 k 次加工过程中加工第 τk 个毛化点给加工系统发出的同样的激光出光位置信号、第 m 个激光末端输出模块的光束能量调节信号和同样的一维光束偏转单元偏转信号; $p_{\tau k}$ 为第 k 次加工过程中加工第 τk 个毛化点所在圈数; ς 为光束能量调节单元激光能量最大衰减比例常量。

进一步, 根据 Ω_k 中的加工奇点的集合 MSP_k 对第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的按加工先后顺序排列的无序均匀毛化点圆心坐标集 Ω_k 进行调整具体为:

$$\Omega_k = \left\{ (x_{\tau k}, y_{\tau k}) \left| \begin{array}{l} (x_{\tau k}, y_{\tau k}) = (xre_{\tau k}, yre_{\tau k}), \\ (xre_{\tau k}, yre_{\tau k}) \in \Omega re_k \\ \tau k = 2, 3, 4 \dots rk_{max} \end{array} \right. \right\}, k \in K$$

$$\text{式中, } \Omega re_k = \left\{ (xre_{\tau k}, yre_{\tau k}) \left| \begin{array}{l} (xre_{\tau k}, yre_{\tau k}) \\ \left\{ \begin{array}{l} (x_{\tau k}, y_{\tau k} - \Delta_{\tau k}), k \text{ 为奇} \\ (x_{\tau k}, y_{\tau k} + \Delta_{\tau k}), k \text{ 为偶} \end{array} \right\}, \\ \tau k \in MSP_k \\ (x_{\tau k}, y_{\tau k}), \tau k \notin MSP_k \\ (x_{\tau k}, y_{\tau k}) \in \Omega_k, \\ \Delta_{\tau k} = \gamma * |y_{\tau k} - y_{\tau k-1}|, \\ \tau k = 2, 3, 4 \dots rk_{max} \end{array} \right. \right\}, k \in K$$

其中: Ωre_k 为调整后第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的按加工先后顺序排列的无序

均匀毛化点圆心坐标集； $(xre_{\tau k}, yre_{\tau k})$ 为调整后的第 k 次加工过程中第 τk 个加工的毛化点圆心坐标； $\Delta_{\tau k}$ 为第 k 次加工过程中第 τk 个加工的毛化点的圆心坐标 y 轴坐标调整量； γ 为 y 轴坐标调整量的调整比例。

进一步，所述形貌分布点距 a 和形貌分布线距 b 的确定方法如下：

确定激光毛化硬质点形貌种类；

根据面积占有率初始值 ρ_0 ，计算形貌点距 a_0 的初始值和线距的初始值 b_0 ，具体如下：

$$a_0 = b_0 = \sqrt{\frac{\pi(D_{mor}/2)^2}{\rho_0}},$$

其中： ρ_0 为设定的形貌面积占有率初始值； a_0 为形貌分布点距初始值， x 方向两个毛化硬质点之间距离初始值； b_0 为形貌分布线距初始值， y 方向两个硬质点之间距离初始值； D_{mor} 为第 mor 种形貌的直径；

修正形貌分布点距、线距和面积占有率，具体如下：

$$a = b = \frac{\pi d}{[\pi d/b_0]}, \quad \rho = \frac{\pi(D_{mor}/2)^2}{a*b},$$

其中： ρ 为形貌面积占有率； a 为形貌分布点距， x 方向两个毛化硬质点之间距离； b 为形貌分布线距， y 方向两个毛化硬质点之间距离。

一种轧辊激光毛化加工设备，包括计算机、光源模块和激光末端输出模块；所述计算机包括可首尾相连无序均匀点阵分布设计模块和信号处理模块；根据轧辊加工单元参数和形貌参数，通过可首尾相连无序均匀点阵分布设计模块输出可首尾相连的无序均匀分布毛化点阵分布方案；根据所述可首尾相连的无序均匀分布毛化点阵分布方案、机床参数和激光参数，通过信息处理模块得出激光出光位置信号、光束能量调节信号和一维光束偏转单元偏转信号；

所述激光出光位置信号用于控制光源模块发出激光；

所述光束能量调节信号和一维光束偏转单元偏转信号分别输入激光末端输出模块，用于产生无序的激光点阵，每个激光末端输出模块用于加工一个轧辊加工单元；

每个所述激光末端输出模块在对应的轧辊加工单元区域轴向往复移动，所述往复运动起始线为 $x = -\frac{\pi d}{k_{max}} \cot \theta$ ，终止线为 $x = L_1$ 。

本发明的有益效果在于：

1. 本发明所述的轧辊激光毛化加工方法，通过可首尾相连无序均匀点阵分布设计方法，保证毛化点无序程度的同时也能确保形貌分布的均匀性，生产的冷轧板表面在后续涂装处理中一致性更好。

2. 本发明所述的轧辊激光毛化加工方法，能够精确准确加工所设计的毛化点无序均匀分布方案，实现所制造即所设计。

3. 本发明所述的轧辊激光毛化加工方法,通过可首尾相连无序均匀点阵分布设计方法得出可首尾相连的无序均匀分布毛化点阵分布方案,为多个激光末端输出模块加工模式提供了可能。

4. 本发明采用激光熔凝加工技术获得毛化形貌,形貌硬度高于基材,形貌使用寿命更长,能够保证生产的同批次冷轧板表面稳定性更好;同时毛化加工过程相当于对轧辊表面进行激光淬火,能够有效延长轧辊使用寿命。

5. 本发明所提供的毛化形貌种类多,且形貌的微观尺寸可通过改变激光参数精确调控,能够满足各种类别不同要求冷轧板生产。

6. 本发明所加工的毛化形貌为凹凸复合形貌,形貌的微凹陷部分在冷轧板过程中,能够储存润滑油改善润滑条件,微凸起部分在冷轧板过程中,能够钉扎入冷轧板表面,减小冷轧板与轧辊间相对运动,有效防止冷轧板表面划伤和轧辊磨损;同时形貌复印至冷轧板表面后,能够在冷轧板与涂覆层之间形成机械锚固群,解决了涂覆层剥落问题,为冷轧板和涂覆层热敏感度不一致问题提供了解决方案。

7. 本发明的毛化点分布方案和激光出光控制信号通过计算机计算,再将控制信号集发送给机床加工控制系统,有效地简化了生产过程,方便企业应对各种类别不同要求冷轧板生产,能有效保证计算效率、计算精度,同时不影响机床正常生产任务,还能有效降低机床制造成本。

附图说明

图1为本发明所述的激光末端输出模块安装位置图。

图2为本发明所述的轧辊激光毛化加工设备控制原理图。

图3为本发明所述的无序均匀激光毛化点阵方案设计方法流程图。

图4为本发明所述的信息处理模块流程图。

图5为本发明所述的加工区域划分示意图。

图6为本发明所述的毛化形貌图。

图7为本发明所述的均匀点阵方案图

图8为本发明所述的均匀点阵方案随机位移方案图。

图9为本发明所述的无序点阵方案坏点处理方案图。

图10为本发明所述的每个加工单元点阵分布以中心线为分割左右对调示意图。

图11为本发明所述的第 k 次加工过程中焦点覆盖范围图。

图12为本发明所述的第 k (奇数)次加工过程中焦点覆盖范围中毛化点加工先后排序规则图。

图 13 为本发明所述的第 k （偶数）次加工过程中焦点覆盖范围中毛化点加工先后排序规则图。

图 14 为本发明所述的第 k 次加工过程中加工奇点判断。

图 15 为本发明所述的第 k 次加工过程中加工奇点处理图。

图中：

1-待加工金属圆柱体；2-同轴编码器；3-激光聚焦装置；4-一维光束偏转单元；5-光束能量调节单元；6-光束折返单元；7-激光末端输出模块安装座。

具体实施方式

下面结合附图以及具体实施例对本发明作进一步的说明，但本发明的保护范围并不限于此。

如图 1 所示，本发明所述的轧辊激光毛化加工设备，包括计算机、光源模块和激光末端输出模块；所述计算机包括可首尾相连无序均匀点阵分布设计模块和信号处理模块；根据轧辊加工单元参数和形貌参数，通过可首尾相连无序均匀点阵分布设计模块输出可首尾相连的无序均匀分布毛化点阵分布方案；根据所述可首尾相连的无序均匀分布毛化点阵分布方案、机床参数和激光参数，通过信息处理模块得出激光出光位置信号、光束能量调节信号和一维光束偏转单元偏转信号；所述激光出光位置信号用于控制光源模块发出激光；所述光束能量调节信号和一维光束偏转单元偏转信号分别输入激光末端输出模块，用于产生无序的激光点阵，每个激光末端输出模块用于加工一个轧辊加工单元；每个所述激光末端输出模块在对应的轧辊加工单元区域轴向往复移动。

所述激光末端输出模块包括光束折返单元 6、光束能量调节单元 5 和一维光束偏转单元 4；所述光源模块入射的激光依次经过光束折返单元 6、光束能量调节单元 5、一维光束偏转单元 4 和激光聚焦装置 3 后入射轧辊加工单元；所述光束折返单元 6 用于将光源模块入射的激光分光为垂直于轧辊轴线方向的反射激光和平行于轧辊轴线方向的透射激光；所述反射激光射入所述光束能量调节单元 5，所述透射激光射入下一个激光末端输出模块；所述光束能量调节单元 5 用于改变所述反射激光的能量；所述一维光束偏转单元 4 用于偏移所述反射激光的角度。所述激光聚焦装置 3 用于将偏移后的反射激光聚焦到待加工金属圆柱体 1 上，由于激光聚焦装置 3 为现有的装置在此不再介绍结构和原理。所述激光末端输出模块安装在激光末端输出模块安装座 7 上，所述激光末端输出模块安装座 7 可以沿轧辊加工单元区域轴向往复移动。

所述激光末端输出模块按与激光光源由近及远的顺序标号，标号为：

$Line_1$ 、 $Line_2$... $Line_m$... $Line_{m_{max}}$ ，分别加工第 1 个、第 2 个...第 m 个...第 m_{max} 个单元：

所述光束折返单元 6，利用多个半反镜片将入射激光均分为多个能量相等的输出激光，具有以下特征：光束折返单元 6 中各半反镜片镀膜性质不同，可将入射激光能量分光为特定能量的反射激光和透射激光；光束折返单元 6 可将平行于轧辊轴线方向的入射激光分光为垂直于轴线方向的反射激光和平行于轴线方向的透射激光，其中第 $Line_m$ 个激光末端输出模块中光束折返单元 6 分光能量比例为： $\frac{P_m}{P_{m-}} = 1:(m_{max} - m)$ ；通过此方法，能够使得每个激光末端输出模块中的输入激光能量一致，即 $P_m = P_{output} = \frac{1}{m_{max}} P_{input}$, $m = 1, 2, 3 \dots m_{max}$ ；

其中： P_m 为第 $Line_m$ 个激光末端输出模块中光束折返单元分光的反射激光功率； P_{m-} 为第 $Line_m$ 个激光末端输出模块中光束折返单元 6 分光的透射激光功率； P_{input} 为激光光源功率； P_{output} 为激光末端输出模块输入激光功率。

所述光束能量调节单元 5 可通过对光束能量调节单元驱动电源输入电信号无极改变通过激光的能量，具有以下特征：可根据电信号 ψ 使光束能量衰减固定值，即 $P_{focus} = (1 - Damp\psi)P_{output}$ ；电信号 ψ 可连续变化，具有固定范围，即 $\psi \in \psi_{min}, \psi_{max}$ ，对应能量衰减比例 $Damp(\psi)$ 从 0~100% 变化；

其中： ψ 为光束能量调节单元 5 驱动电源输入电信号； ψ_{min} 为最小输入电信号； ψ_{max} 为最大输入电信号； $Damp(\psi)$ 为激光能量衰减比例； P_{focus} 为激光末端输出模块聚焦激光输出功率。

所述一维光束偏转单元 4，具有以下特性：可根据电信号 ξ 使光束一维偏转固定角度 α ，即 $\alpha = \alpha(\xi)$ ；使光束一维偏转角度 α 具有固定范围，且 α_{max} 为一维光束偏转单元 4 固有属性；具有固定的最高响应频率 $Maxf_{res}$ ， $Maxf_{res} \geq 10KHz$ ；使光束一维偏转固定角度 α ，经过聚焦镜片作用在待加工区域，使得焦点相对于光轴偏移确定距离 σ ，即 $\sigma \propto \alpha$ ， $\sigma \propto L_2$ ， $\sigma \propto f$ ，即 $\sigma = f(\alpha, L_2, f) = f(\alpha(\xi), L_2, f)$ ；故当加工系统中 L_2 、 f 固定时，可得到焦点位置偏移量 σ 与电信号 ξ 的关系如下：

$$\sigma = f(\alpha) = f(\alpha(\xi))$$

$$\sigma_{min} = f(\alpha = \alpha_{min} = 0) = 0$$

$$\sigma_{max} = f(\alpha = \eta * \alpha_{max})$$

式中： $\alpha_{max} = 0.1 \sim 1 \text{ rad}$ ； $\alpha \in [0, \eta * \alpha_{max}]$ ； $\eta \in [50\%, 80\%]$ ；

其中, L_2 为所述一维光束偏转单元 4 距工件表面距离; f 为所述一维光束偏转单元 4 不发生偏转时的焦距; α 为一维光束偏转单元 4 使光束偏转角度, 即 $\alpha = \alpha(\xi)$; α_{min} 为所述一维光束偏转单元 4 使光束最小偏转角度; α_{max} 为一维光束偏转单元 4 使光束最大偏转角度; η 为一维光束偏转单元 4 安全使用系数; σ 为焦点位置偏移量; σ_{min} 为焦点位置偏移量最小值; σ_{max} 为焦点位置偏移量最大值; $Maxf_{res}$ 为一维光束偏转单元最高响应频率。

如图 2、图 3 和图 4 所示, 本发明所述的轧辊激光毛化加工方法, 包括如下步骤:

S01 加工区域划分: 将轧辊表面加工区域均匀划分为若干轧辊加工单元; 如图 5 所示, 具体为:

确定轧辊表面加工区域; 所述轧辊加工区域为长度 L_{01} 和宽度 πd 的方形区域, 其中, $L_{01} = 5\% \sim 100\% L_0$, L_{0-01} 为距轧辊端面距离, $L_{0-01} = 0 \sim 90\% L_0$; L_0 为轧辊表面展开长度, d 为轧辊直径;

将轧辊加工区域均匀划分为 m 个轧辊加工单元, 任一轧辊加工单元长度为 L_1 , $L_1 = \frac{1}{m_{max}} L_{01}$; 任一轧辊加工单元宽度为 πd ; 其中, $m \in \{1, 2, 3 \dots m_{max}\}$, $m_{max} = 1 \sim 30$ 。

S02 确定分布方案: 根据所述轧辊加工单元参数和形貌参数, 通过可首尾相连无序均匀点阵分布设计方法得出可首尾相连的无序均匀分布毛化点阵分布方案; 具体为:

如图 6 所示, 设定毛化硬质点为激光熔凝加工形貌, 根据形貌截面可分为球冠状毛化点、墨西哥帽状毛化点、火山口状毛化点, 形貌具体参数为:

$$Morphology = \left\{ B_{mor} \left| B_{mor} = (D_{mor}, Depth_{mor}, H_{mor}), \right. \right. \\ \left. \left. mor = 1, 2, 3 \right. \right\}$$

式中:

$$B_1 = (30 \sim 200, 0 \sim 5, 3 \sim 30) \mu m$$

$$B_2 = (30 \sim 300, 1 \sim 15, 3 \sim 30) \mu m$$

$$B_3 = (30 \sim 300, 1 \sim 30, 1 \sim 10) \mu m$$

其中所述毛化硬质点加工所采用的输出激光参数, 有激光脉冲宽度、激光功率、最高出光频率、辅助气体, 具体如下:

$$Laer = \left\{ laser_{mor} \left| laser_{mor} = \begin{pmatrix} PluseWidth_{mor}, P_{focus_{mor}} \\ MaxfLa_{mor}, Gas_{mor} \end{pmatrix}, \right. \right. \\ \left. \left. mor = 1, 2, 3 \right. \right\}$$

$$laser_1 = \begin{pmatrix} 1\mu s \sim 100ms, & 10 \sim 200W \\ 50Hz \sim 20KHz, & N_2 or Ar_2 or 高压空气 \end{pmatrix}$$

$$laser_2 = \begin{pmatrix} 150\mu s \sim 100ms, & 10 \sim 200W, \\ 50Hz \sim 10KHz, & N_2 or Ar_2 or 高压空气 \end{pmatrix}$$

$$laser_3 = \begin{pmatrix} 300\mu s \sim 100ms, & 10 \sim 200W, \\ 50Hz \sim 5KHz, & N_2 or Ar_2 or 高压空气 \end{pmatrix}$$

其中： $Morphology$ 为形貌参数集合； B_{mor} 为第 mor 种形貌的形貌参数； D_{mor} 为第 mor 种形貌的直径； $Depth_{mor}$ 为第 mor 种形貌的深度； H_{mor} 为第 mor 种形貌的高度； mor 为形貌次序， $mor = 1, 2, 3$ 分别表示激光熔凝形貌的火山口状毛化点、球冠状毛化点、墨西哥帽状毛化点； $Laser$ 为形貌的激光加工参数集合； $laser_{mor}$ 为第 mor 种形貌的激光加工参数； $PluseWidth_{mor}$ 为第 mor 种形貌的激光加工脉宽； $P_{focus_{mor}}$ 为第 mor 种形貌的激光加工功率； $MaxfLas_{mor}$ 为第 mor 种形貌的激光加工最高出光频率； Gas_{mor} 为第 mor 种形貌的激光加工辅助气体种类。

步骤 1-1: 建立笛卡尔坐标系, 将待加工单元区域沿轴向展开, 形成长、宽分别为 L_1 、 πd 的方形表面, 以起始毛化点为坐标原点, 轴向为 x 轴, 圆周方向为 y 轴, 根据形貌分布建立均匀点阵分布毛化点圆心集 A_0 , 详细步骤如下, 步骤 1-1-S1 至步骤 1-1-S4:

步骤 1-1-S1: 确定激光毛化硬质点形貌种类, 确定 mor 值。

步骤 1-1-S2: 根据面积占有率初始值 ρ_0 , 计算形貌点距和线距的初始值 a_0 、 b_0 , 具体如下:

$$a_0 = b_0 = \sqrt{\frac{\pi(D_{mor}/2)^2}{\rho_0}},$$

其中： ρ_0 为设定的形貌面积占有率初始值, 一般 $\rho_0 = 50\%$; a_0 为形貌分布点距初始值, x 方向两个毛化硬质点之间距离初始值; b_0 为形貌分布线距初始值, y 方向两个硬质点之间距离初始值; D_{mor} 为第 mor 种形貌的直径;

步骤 1-1-S3: 修正形貌分布点距、线距和面积占有率, 具体如下:

$$a = b = \frac{\pi d}{[\pi d / b_0]}, \quad \rho = \frac{\pi(D_{mor}/2)^2}{a * b},$$

其中： ρ 为形貌面积占有率; a 为形貌分布点距, x 方向两个毛化硬质点之间距离; b 为形貌分布线距, y 方向两个毛化硬质点之间距离。

步骤 1-1-S4: 如图 7 所示, 根据点距、线距建立均匀点阵分布毛化点圆心集 A_0 , 具体为:

$$A_0 = \left\{ (x_{0i}, y_{0j}) \middle| \begin{matrix} x_{0i} = a(j-1), y_{0j} = b(i-1), \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max} \end{matrix} \right\},$$

其中： A_0 为均匀点阵分布毛化点圆心坐标位置集; (x_{0i}, y_{0j}) 为第 i 行第 j 列均匀点阵分布毛化点圆心坐标; i 为行序号; i_{max} 为最大行序号, $i_{max} = \pi d / b$; j 为列序号, $j_{max} = [L_1 / a] + 1$; j_{max} 为最大列序号; a 为形貌分布点距, x 方向两个毛化硬质点之间距离; b 为形貌分布线距,

y 方向两个毛化硬质点之间距离;

步骤 1-2: 如图 8 所示, 建立均匀点阵分布中每个毛化点随机位移向量集合 ΔX , 具体如下:

$$\Delta X = \left\{ (\delta x_i, \delta y_j) \left| \begin{array}{l} \delta x_i = rand(-1,1) * \varepsilon_b, \\ \delta y_j = rand(-1,1) * \varepsilon_a, \\ i = 1,2,3 \dots i_{max}, j = 1,2,3 \dots j_{max} \end{array} \right. \right\},$$

其中: ΔX 为均匀点阵分布中每个毛化点随机位移向量集合; $(\delta x_i, \delta y_j)$ 为均匀点阵分布中第 i 行、第 j 列均匀点阵分布毛化点圆心坐标 (x_{0i}, y_{0j}) 的随机位移向量; ε_a 为列偏移常量, 一般 $\varepsilon_a \in (0, 2a]$; ε_b 为行偏移常量, 一般 $\varepsilon_b \in (0, 2b]$, $\varepsilon_a = \varepsilon_b$ 。

步骤 1-3: 由均匀点阵分布毛化点圆心坐标位置集 A_0 和均匀点阵分布中每个毛化点随机位移向量集合 ΔX , 计算无序均匀分布毛化点圆心集 A , 具体如下:

$$A = A_0 + \Delta X = \left\{ (x_i, y_j) \left| (x_i, y_j) = (x_{0i}, y_{0j}) + (\delta x_i, \delta y_j), \right. \right. \\ \left. \left. i = 1,2,3 \dots i_{max}, j = 1,2,3 \dots j_{max} \right. \right\}$$

其中: A , 无序均匀分布毛化点圆心集; (x_i, y_j) , 无序均匀分布毛化点圆心坐标;

步骤 1-4: 按毛化点重叠容忍度查找无序均匀分布坏点行序列、列序列的集 SP , 具体如下:

$$SP = \left\{ (u_q, w_q) \left| \begin{array}{l} (u_q, w_q) = (i, j), \\ |A(i, j) - A(i+1, j)| < \zeta * D \text{ or} \\ |A(i, j) - A(i, j+1)| < \zeta * D \text{ or} \\ |A(i, j) - A(i+1, j+1)| < \zeta * D, \\ i = 2,3,4 \dots i_{max} - 1, \\ j = 2,3,4 \dots j_{max} - 1, \\ q = 1,2,3 \dots \end{array} \right. \right\},$$

其中: SP 为无序均匀分布坏点行序列、列序列的集; $A(i, j)$ 为无序均匀分布毛化点圆心坐标集中第 i, j 个毛化点圆心坐标; (u_q, w_q) 为第 q 个坏点坐标行序列、列序列; q 为坏点排序号; ζ 为无序均匀分布毛化点重叠容忍常量, 一般 $\zeta \in [0.5, 1.5]$ 。

步骤 1-5: 判断是否存在坏点, 决定下一步, 从而获得无序均匀分布毛化点圆心集, 具体如下:

若 $SP \neq \emptyset$, 存在坏点, 则按以下进行计算, 步骤 1-5-S1 至步骤 1-5-S2:

步骤 1-5-S1: 根据无序均匀分布坏点集 SP , 调整随机位移向量集合 ΔX , 如图 9 所示, 具体如下:

$$\Delta X = \left\{ (\delta x_i, \delta y_j) \left| \begin{array}{l} (\delta x_i, \delta y_j) = (\delta x_{re_i}, \delta y_{re_j}), \\ (\delta x_{re_i}, \delta y_{re_j}) \in \Delta X_{re}, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max}, \end{array} \right. \right\},$$

$$\text{式中: } \Delta X_{re} = \left\{ (\delta x_{re_i}, \delta y_{re_j}) \left| \begin{array}{l} (\delta x_{re_i}, \delta y_{re_j}) = \begin{cases} \lambda(\delta x_i, \delta y_j), (i, j) \in SP \\ (\delta x_i, \delta y_j), (i, j) \notin SP \end{cases}, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max}, \\ (\delta x_i, \delta y_j) \in \Delta X \end{array} \right. \right\},$$

其中: ΔX_{re} 为调整后的随机位移向量集; $(\delta x_{re_i}, \delta y_{re_j})$ 为调整后的随机位移向量; λ 为坏点的随机位移向量的调整比例, 一般 $\lambda \in (0, 1)$ 。

步骤 1-5-S2: 重复步骤 1-3 到步骤 1-4, 直至 $SP = \emptyset$;

若 $SP = \emptyset$, 不存在坏点, 则进行步骤 1-6。

步骤 1-6: 对无序均匀分布毛化点圆心集 A 以轴向中心线为基准, 进行左右对调, 以便多个激光末端输出模块加工区域的搭接, 如图 10 所示, 具体对调规则如下:

$$A_{ex} = \left\{ (x_{ex_i}, y_{ex_j}) \left| \begin{array}{l} (x_{ex_i}, y_{ex_j}) = \begin{cases} \left(x_i + \frac{1}{2}L_1, y_j\right), x_i < \frac{1}{2}L_1 \\ \left(x_i - \frac{1}{2}L_1, y_j\right), x_i \geq \frac{1}{2}L_1 \end{cases}, \\ (x_i, y_j) \in A, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max} \end{array} \right. \right\}$$

其中: A_{ex} 为对无序均匀分布毛化点圆心集 A 以轴向中心线为基准进行左右对调后的无序均匀分布毛化点圆心集; (x_{ex_i}, y_{ex_j}) 为左右对调后第 i 、 j 个毛化点圆心坐标;

步骤 1-7: 在左右对调过程后的中心线附近区域, 按毛化点重叠容忍度查找无序均匀分布坏点行序列、列序列的集 SP_{ex} , 具体如下:

$$SP_{ex} = \left\{ (u_{ex_{qex}}, w_{ex_{qex}}) \left| \begin{array}{l} (u_{ex_{qex}}, w_{ex_{qex}}) = (i, j), \\ |A_{ex}(i, j) - A_{ex}(i + 1, j)| < \zeta * D \text{ or} \\ |A_{ex}(i, j) - A_{ex}(i, j + 1)| < \zeta * D \text{ or} \\ |A_{ex}(i, j) - A_{ex}(i + 1, j + 1)| < \zeta * D, \\ A_{ex}(i, j) \in Center, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, \\ j = 1, 2, 3 \dots j_{max}, \\ qex = 1, 2, 3 \dots \end{array} \right. \right\},$$

其中: SP_{ex} 为对左右对调过程后的中心线附近区域按毛化点重叠容忍度查找无序均匀分布坏点行序列、列序列的集; $(u_{ex_{qex}}, w_{ex_{qex}})$ 为第 qex 个坏点坐标行序列、列序列; qex 为

坏点排序号； $Aex(i, j)$ 为对调后的无序均匀分布毛化点圆心坐标集中第 i 、 j 个毛化点圆心坐标； $Center$ 为左右对调过程后的中心线附近区域：

$Center = \{(x, y) | x \in [(1 - \frac{\varpi}{2})\frac{L_1}{2}, (1 + \frac{\varpi}{2})\frac{L_1}{2}], y \in [0, \pi d]\}$ ； ϖ 为输入的中心线附近区域比例，一般 $\varpi = 1\% \in (1\%, 50\%)$ 。

步骤 1-8：判断中心线附件区域是否存在坏点，决定下一步，从而最终获得无序均匀分布毛化点圆心集，具体如下：

若 $SPex \neq \emptyset$ ，存在坏点，则按以下进行计算，步骤 1-8-S1 至步骤 1-8-S2：

步骤 1-8-S1：根据中心线附近区域无序均匀分布坏点集 $SPex$ ，调整中心线附近区域坏点位置，具体如下：

$$Aex = \left\{ (xex_i, yex_j) \left| \begin{array}{l} (xex_i, yex_j) = (xre_i, yre_j), \\ (xre_i, yre_j) \in Are, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max} \end{array} \right. \right\},$$

$$\text{式中: } Are = \left\{ (xre_i, yre_j) \left| \begin{array}{l} (xre_i, yre_j) = \\ \left\{ \begin{array}{l} ((xex_i, yex_j) - \vartheta(\delta x_i, \delta y_j), (i, j) \in SPex \\ (xex_i, yex_j), (i, j) \notin SPex \end{array} \right. \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max}, \\ (xex_i, yex_j) \in Aex, \\ (\delta x_i, \delta y_j) \in \Delta X \end{array} \right. \right\},$$

其中： Are 为中心线附近区域坏点位置调整后的无序均匀分布毛化点圆心坐标集； (xre_i, yre_j) 为中心线区域坏点位置调整后的无序均匀分布毛化点圆心坐标集中第 i 、 j 个毛化点圆心坐标； ϑ 为中心线附近区域坏点坐标调整比例，一般 $\vartheta = 0.1 \in (0, 0.5)$ 。

步骤 1-8-S2：执行步骤 1-6 和 1-7，直至 $SPex = \emptyset$ ；

若 $SP = \emptyset$ ，不存在坏点，则 Aex 为所设计的无序均匀分布毛化点阵分布方案。

S03 确定输出信号：根据所述可首尾相连的无序均匀分布毛化点阵分布方案、机床参数和激光参数，通过信息处理模块得出激光出光位置信号、光束能量调节信号和一维光束偏转单元偏转信号，具体如下，步骤 2-1 至步骤 2-8：

步骤 2-1：计算激光末端输出模块相对于金属圆柱体表面的运动方向与圆柱体轴线方向的夹角，当一维光束偏转单元（4）不工作时即 $\alpha = 0$ 时也就是偏转量 $\sigma = 0$ 时，焦点运动轨迹与 x 轴夹角 θ ，具体如下：

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\pi * n * d}{v},$$

其中: n 为轧辊转速; v 为激光末端输出模块的运行速度;

步骤 2-2: 对激光末端输出模块往复运动按加工顺序进行编号, 即焦点运动轨迹序号集 K , 计算每个焦点运动轨迹绕金属圆柱体圈数集 P , 具体如下:

$$k \in K = \{1, 2, 3, \dots, k_{max}\}, \text{ 式中: } k_{max} = \begin{cases} \frac{\pi d}{\sigma_{max} \tan \theta}, \frac{\pi d}{\sigma_{max} \tan \theta} \text{ 为整数} \\ \left\lfloor \frac{\pi d}{\sigma_{max} \tan \theta} \right\rfloor + 1, \frac{\pi d}{\sigma_{max} \tan \theta} \text{ 不为整数} \end{cases};$$

$$p \in P = \{1, 2, 3, \dots, p_{max}\}, \text{ 式中: } p_{max} = \begin{cases} \frac{L_1}{\pi d \cot \theta}, \frac{L_1}{\pi d \cot \theta} \text{ 为整数} \\ \left\lfloor \frac{L_1}{\pi d \cot \theta} \right\rfloor + 1, \frac{L_1}{\pi d \cot \theta} \text{ 不为整数} \end{cases};$$

其中: K 为焦点运动轨迹序号集; k 为第 k 个焦点运动轨迹, 即第 k 次加工过程; P 为每个焦点运动轨迹绕金属圆柱体圈数集; p 为焦点运动轨迹绕金属圆柱体第 p 圈;

步骤 2-3: 如图 11 所示, 计算激光末端输出模块每次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 的集合 Λ , 一维光束偏转单元 (4) 偏转角度 $\alpha \in [0, \eta * \alpha_{max}]$ 时, 激光末端输出模块第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 的集合 Λ , 具体为:

$$\Lambda = \left\{ \Lambda_k \mid \Lambda_k = \left\{ (x, y) \mid \begin{aligned} & x \in [xk_{min}(y, p=1), xk_{max}(y, p=1)) \cup \\ & [xk_{min}(y, p=2), xk_{max}(y, p=2)) \cup \\ & [xk_{min}(y, p=3), xk_{max}(y, p=3)) \cup \\ & \dots \cup \\ & [xk_{min}(y, p=p_{max}), xk_{max}(y, p=p_{max})], \\ & y \in [0, \pi d) \end{aligned} \right\}, k = 1, 2, 3, \dots, k_{max} \right\}$$

式中,

$$xk_{min}(y, p) = xk(y, p, \sigma = 0) = \frac{\left\lfloor y - \frac{\pi d}{k_{max}} k \right\rfloor}{\tan \theta} + \frac{\pi d}{\tan \theta} (p - 1), y \in [0, \pi d), p \in P, k \in K,$$

$$xk_{max}(y, p) = xk(y, p, \sigma = \sigma_{max}) = \frac{\left\lfloor y - \frac{\pi d}{k_{max}} (k-1) \right\rfloor}{\tan \theta} + \frac{\pi d}{\tan \theta} (p - 1), y \in [0, \pi d), p \in P, k \in K,$$

其中: Λ 为激光末端输出模块每次加工过程中焦点覆盖范围的集合; Λ_k 为激光末端输出模块第 k 次加工过程中焦点覆盖范围; $xk_{min}(y, p) = xk(y, p, \sigma = 0)$ 为偏转角度 $\alpha = 0$ 即偏转

量 $\sigma = 0$ 时, 第 k 条第 p 圈焦点运动轨迹方程: $xk_{max}(y, p) = xk(y, p, \sigma = \sigma_{max})$ 为偏转角度 $\alpha = \eta * \alpha_{max}$ 即偏转量 $\sigma = \sigma_{max}$ 时, 第 k 条第 p 圈焦点运动轨迹方程;

步骤 2-4: 统计激光末端输出模块每次加工过程中焦点覆盖范围中的无序均匀毛化点圆心坐标的集合 Φ , 具体如下:

$$\Phi = \{\Phi_k | k = 1, 2, 3 \dots k_{max}\},$$

$$\text{式中: } \Phi_k = \left\{ (x_{rk}, y_{rk}) \left| \begin{array}{l} (x_{rk}, y_{rk}) = (xex_i, yex_j), \\ (xex_i, yex_j) \in \Lambda_k, (xex_i, yex_j) \in Aex, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max}, \\ rk = 1, 2, 3 \dots \end{array} \right. \right\}, k \in K,$$

其中, Φ 为激光末端输出模块每次加工过程中焦点覆盖范围中的无序均匀毛化点圆心坐标集的集合; Φ_k 为激光末端输出模块第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的无序均匀毛化点圆心坐标集, 即圆心坐标落在 $xk_{min} = xk(y, \sigma = 0)$ 、 $xk_{max} = xk(y, \sigma = \sigma_{max})$ 两条轨迹线之间的毛化点圆心坐标集; (x_{rk}, y_{rk}) 为第 k 次加工过程中包含的第 rk 个无序均匀毛化点圆心坐标; rk 为第 k 次加工过程中包含的无序均匀毛化点统计次序;

步骤 2-5: 如图 12 和图 13 所示, 对统计来的第 k 次加工过程中的焦点覆盖范围 Λ_k 中的无序均匀毛化点圆心坐标, 按照毛化点加工先后顺序进行排序, 得到排序后的毛化点圆心坐标集 Ω_k , 具体排序规则如下:

$$\Omega_k = \{(x_{\tau k}, y_{\tau k}) | \tau k = 1, 2, 3 \dots rk_{max}\} =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\{ (x_{rk}, (y_{rk})_{min}), \dots, (x_{rk}, (y_{rk})_{max}) \right\} \left| \begin{array}{l} (x_{rk}, y_{rk}) \in \Phi_k, \\ rk = 1, 2, 3 \dots rk_{max}, \\ k \text{ 为奇数} \end{array} \right. \\ \left\{ (x_{rk}, (y_{rk})_{max}), \dots, (x_{rk}, (y_{rk})_{min}) \right\} \left| \begin{array}{l} (x_{rk}, y_{rk}) \in \Phi_k, \\ rk = 1, 2, 3 \dots rk_{max}, \\ k \text{ 为偶数} \end{array} \right. \end{array} \right\}, k \in K,$$

其中: Ω_k 为第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的无序均匀毛化点圆心坐标, 按照毛化点加工顺序进行排序后形成的圆心坐标集; $(x_{\tau k}, y_{\tau k})$ 为第 k 次加工过程中第 τk 个加工的毛化点坐标; τk 为第 k 次加工过程中毛化点加工顺序排序; rk_{max} 为第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中包含的无序均匀毛化点数量统计值最大值; $(y_{rk})_{max}$ 为第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的无序均匀毛化点圆心坐标 (x_{rk}, y_{rk}) 的 y 轴坐标最大值; $(y_{rk})_{min}$ 为第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的无序均匀毛化点圆心坐标 (x_{rk}, y_{rk}) 的 y 轴坐标最小值;

步骤 2-6: 以加工系统响应频率为依据, 查找在第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的按加工先后顺序排列的无序均匀毛化点圆心坐标集 Ω_k 中的加工奇点的集合 MSP_k , 具体查找方式

如下:

$$MSP_k = \left\{ msp_{mk} \left| \begin{array}{l} msp_{mk} = \tau k, \\ \frac{|y_{\tau k} - y_{\tau k-1}|}{\pi * n * d} < \frac{1}{F} \text{ or } \frac{|y_{\tau k} - y_{\tau k+1}|}{\pi * n * d} < \frac{1}{F}, \\ (x_{\tau k}, y_{\tau k}) \in \Omega_k, \\ \tau k = 2, 3, 4 \dots rk_{max} - 1, \\ mk = 1, 2, 3 \dots \end{array} \right. \right\}, k \in K,$$

$$\text{式中: } F = \frac{1}{\varrho} * \min \left(MaxfLas_{mor}, MaxfP_{res}, MaxfEX_{res}, \frac{n}{R_{encoder}} \right)$$

其中: MSP_k 为 Ω_k 中的加工奇点的集合; msp_{mk} 为第 k 次加工过程中加工奇点的加工顺序序号; F 为加工系统综合响应频率; $MaxfLas_{mor}$ 为形貌加工的最大输出激光出光频率; $MaxfP_{res}$ 为光束能量调节单元 5 最高响应频率; $MaxfEX_{res}$ 为一维光束偏转单元 4 最高响应频率; $R_{encoder}$ 为轧辊旋转同轴编码器 2 分辨率; ϱ 为系统响应频率安全系数, 一般 $\varrho \in (1, 10]$;

步骤 2-7: 如图 14 所示, 判断是否存在加工奇点, 若 $MSP_k \neq \emptyset$ 且 $k \in K$, 则存在加工奇点, 进行步骤 2-7-S1~S2:

步骤 2-7-S1: 如图 15 所示, 根据 Ω_k 中的加工奇点的集合 MSP_k 对第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的按加工先后顺序排列的无序均匀毛化点圆心坐标集 Ω_k 进行调整, 具体如下:

$$\Omega_k = \left\{ (x_{\tau k}, y_{\tau k}) \left| \begin{array}{l} (x_{\tau k}, y_{\tau k}) = (xre_{\tau k}, yre_{\tau k}), \\ (xre_{\tau k}, yre_{\tau k}) \in \Omega re_k \\ \tau k = 2, 3, 4 \dots rk_{max} \end{array} \right. \right\}, k \in K$$

$$\text{式中, } \Omega re_k = \left\{ (xre_{\tau k}, yre_{\tau k}) \left| \begin{array}{l} (xre_{\tau k}, yre_{\tau k}) \\ \left\{ \begin{array}{l} (x_{\tau k}, y_{\tau k} - \Delta_{\tau k}), k \text{ 为奇} \\ (x_{\tau k}, y_{\tau k} + \Delta_{\tau k}), k \text{ 为偶} \end{array} \right. \\ \tau k \in MSP_k \\ (x_{\tau k}, y_{\tau k}), \tau k \notin MSP_k \\ (x_{\tau k}, y_{\tau k}) \in \Omega_k, \\ \Delta_{\tau k} = \gamma * |y_{\tau k} - y_{\tau k-1}|, \\ \tau k = 2, 3, 4 \dots rk_{max} \end{array} \right. \right\}, k \in K$$

其中: Ωre_k 为调整后第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的按加工先后顺序排列的无序均匀毛化点圆心坐标集; $(xre_{\tau k}, yre_{\tau k})$ 为调整后的第 k 次加工过程中第 τk 个加工的毛化点圆心坐标; $\Delta_{\tau k}$ 为第 k 次加工过程中第 τk 个加工的毛化点的圆心坐标 y 轴坐标调整量; γ 为 y 轴坐标调整量的调整比例, 一般 $\gamma \in (0, 1)$;

步骤 2-7-S2: 重复步骤 2-5 和步骤 2-6, 直至 $MSP_k = \emptyset$;

若 $MSP_k = \emptyset, k \in K$, 不存在加工奇点, 则进行步骤 2-8。

步骤 2-8: 根据每次加工过程中焦点覆盖范围中的按加工先后顺序排列的无序均匀毛化点

坐标, 计算每次加工过程中各个激光末端输出模块的激光出光位置信号-光束能量调节信号-一维光束偏转单元偏转信号的信号集的集合 $\Gamma Line_m$, 具体如下:

$$\Gamma Line_m = \{\Gamma Line_{mk}, k = 1, 2, 3 \dots k_{max}\}, m \in \{1, 2, 3 \dots m_{max}\},$$

式中:

$$\Gamma Line_{mk} = \left\{ (\beta_{\tau k}, \psi_{m_{\tau k}}, \xi_{\tau k}) \left\{ \begin{array}{l} \beta_{\tau k} = 2\pi \frac{y_{\tau k}}{\pi d}, \\ \psi_{m_{\tau k}} = rand(\psi_{min}, \varsigma * \psi_{max}) \text{ or } \\ \psi_{m_{\tau k}} = \psi_{min}, \\ \sigma_{\tau k} = x_{\tau k} - x_{k_{min}}(y = y_{\tau k}, p = p_{\tau k}) \\ p_{\tau k} = \left\lfloor \frac{x_{\tau k} - x_{k_{min}}(y = y_{\tau k}, p = 1)}{\pi d \cos} \right\rfloor \\ \sigma_{\tau k} = f(\alpha_{\tau k}) = f(\alpha(\xi_{\tau k})) \\ (x_{\tau k}, y_{\tau k}) \in \Omega_k, \tau k = 1, 2, 3 \dots r_{max} \end{array} \right\}, k \in K, \right.$$

$$m \in \{1, 2, 3 \dots m_{max}\},$$

其中: $\Gamma Line_m$ 为每次加工过程中第 m 个激光末端输出模块的激光出光位置信号-光束能量调节信号-一维光束偏转单元偏转信号的信号集的集合; $\Gamma Line_{mk}$ 为加工第 k 次加工过程中焦点覆盖范围中的按加工顺序排列的无序均匀毛化点第 m 个激光末端输出模块所需的激光出光位置信号-光束能量调节信号-一维光束偏转单元偏转信号的信号集; $(\beta_{\tau k}, \psi_{m_{\tau k}}, \xi_{\tau k})$ 为第 k 次加工过程中加工第 τk 个毛化点给加工系统发出的同样的激光出光位置信号、第 m 个激光末端输出模块的光束能量调节信号和同样的一维光束偏转单元偏转信号; $p_{\tau k}$ 为第 k 次加工过程中加工第 τk 个毛化点所在圈数; ς 为光束能量调节单元 5 激光能量最大衰减比例常量, 一般 $\varsigma \in [10\%, 50\%]$ 。

S04 轧辊激光毛化加工: 所述激光出光位置信号用于控制光源模块发出激光; 所述光束能量调节信号和一维光束偏转单元偏转信号分别输入激光末端输出模块, 用于产生无序的激光点阵, 每个激光末端输出模块用于加工一个轧辊加工单元。

所述精确控制方法为: 待加工金属圆柱体 1 与激光末端输出模块同步运动, 确定了加工形貌种类后, 计算机自动的确定加工激光的参数, 激光光源多次分光后分别进入各激光末端输出模块, 根据计算机计算得到的激光出光位置信号-光束能量调节信号-一维光束偏转信号的信号集, 检测同轴编码器 2 瞬时位置信号与激光出光位置信号一致性, 在激光末端输出模块处于确定位置时发出确定参数输入激光, 同时给每个激光末端输出模块的光束能量调节单元不同的信号, 完成能量衰减调节, 并给每个激光末端输出模块的一维光束偏转单元同样的信号, 完成光束一维偏转, 使得各个激光末端输出模块的激光焦点按所设计无序均匀分布点

阵方案，采用不同的激光能量依次加工毛化硬质点。

其中所述轧辊与激光末端输出模块的同步运动为轧辊即待加工金属圆柱体 1 沿轴线方向匀速旋转，同轴编码器 2 与轧辊同轴同步旋转，转速为 n ，参数范围为 $n=200\text{ rpm}$ ，各激光末端输出模块在轧辊自转的同时沿轧辊轴线方向匀速直线往复运动，往复运动范围为 $0 \sim L_1 + \frac{\pi d}{k_{\max}} \cot \theta$ ，所述往复运动起始线为 $x = -\frac{\pi d}{k_{\max}} \cot \theta$ ，终止线为 $x = L_1$ ，运动速度 v ，范围为 $v = 200\text{ mm/s}$ ，激光末端输出模块匀速往返运动过程中，每次运动速度方向改变时，在原地等待时间 Δt 。

其中所述同轴编码器 2，具有如下特性：具有固定的同轴编码器分辨率 R_{encoder} ，是同轴编码器固有属性，范围为 $R_{\text{encoder}} \in [2^{16}, 2^{20}]$ 。

上述方案中，所述激光末端输出模块匀速往返运动过程中，每次运动速度方向改变时，在原地等待时间 Δt ， $\Delta t = \frac{1}{k_{\max} * n}$ 。

上述方案中，所述激光末端输出模块沿待加工圆柱体轴线匀速水平往返运动，通过位置传感器或光栅尺，实时监控激光头相对于起始加工点 x 周方向位移 Δx_t ，对照同轴编码器 2 瞬时旋转角度 β_t ， $\beta_t \in [0, 2\pi]$ ，保证 $\frac{\beta_t d/2}{\Delta x_t} = \tan \theta$ ，适时调整激光头位置。

所述实施例为本发明的优选的实施方式，但本发明并不限于上述实施方式，在不背离本发明的实质内容的前提下，本领域技术人员能够做出的任何显而易见的改进、替换或变型均属于本发明的保护范围。

25 权 利 要 求 书

1. 一种轧辊激光毛化加工方法，其特征在于，包括如下步骤：

加工区域划分：将轧辊表面加工区域均匀划分为若干轧辊加工单元；

确定分布方案：根据所述轧辊加工单元参数和形貌参数，通过可首尾相连无序均匀点阵分布设计方法得出可首尾相连的无序均匀分布毛化点阵分布方案；

确定输出信号：根据所述可首尾相连的无序均匀分布毛化点阵分布方案、机床参数和激光参数，通过信息处理模块得出激光出光位置信号、光束能量调节信号和一维光束偏转单元偏转信号；

轧辊激光毛化加工：所述激光出光位置信号用于控制光源模块发出激光；所述光束能量调节信号和一维光束偏转单元偏转信号分别输入激光末端输出模块，用于产生无序的激光点阵，每个激光末端输出模块用于加工一个轧辊加工单元。

2. 根据权利要求1所述的轧辊激光毛化加工方法，其特征在于，加工区域划分具体为：

确定轧辊表面加工区域；所述轧辊加工区域为长度 L_{01} 和宽度 πd 的方形区域，其中， $L_{01} = 5\% \sim 100\% L_0$ ， L_{0-01} 为距轧辊端面距离， $L_{0-01} = 0 \sim 90\% L_0$ ； L_0 为轧辊表面展开长度， d 为轧辊直径；

将轧辊加工区域均匀划分为 m 个轧辊加工单元，任一轧辊加工单元长度为 L_1 ， $L_1 = \frac{1}{m_{max}} L_{01}$ ；任一轧辊加工单元宽度为 πd ；其中， $m \in \{1, 2, 3 \dots m_{max}\}$ ， $m_{max} = 1 \sim 30$ 。

3. 根据权利要求1所述的轧辊激光毛化加工方法，其特征在于，所述激光末端输出模块包括光束折返单元（6）、光束能量调节单元（5）和一维光束偏转单元（4）；所述光源模块入射的激光依次经过光束折返单元（6）、光束能量调节单元（5）和一维光束偏转单元（4）后入射轧辊加工单元；

所述光束折返单元（6）用于将光源模块入射的激光分光为垂直于轧辊轴线方向的反射激光和平行于轧辊轴线方向的透射激光；所述反射激光射入所述光束能量调节单元（5），所述透射激光射入下一个激光末端输出模块；

所述光束能量调节单元（5）用于改变所述反射激光的能量；

所述一维光束偏转单元（4）用于偏移所述反射激光的角度。

4. 根据权利要求3所述的轧辊激光毛化加工方法，其特征在于，所述光束折返单元（6）通过各半反镜片镀膜性质不同，使反射激光和透射激光能量比例为： $\frac{P_m}{P_{m-}} = 1: (m_{max} - m)$ ；

$$P_m = P_{output} = \frac{1}{m_{max}} P_{input}, m = 1, 2, 3 \dots m_{max};$$

其中， P_m 为第 $Line_m$ 个激光末端输出模块中光束折返单元（6）分光的反射激光功率；

P_{m-} 为第 $Line_m$ 个激光末端输出模块中光束折返单元（6）分光的透射激光功率；

P_{input} 为光源模块输出的激光光源功率；

P_{output} 为激光末端输出模块输入激光功率；

所述光束能量调节单元（5）根据输入的电信号 ψ 使光束能量衰减固定值，即 $P_{focus} = (1 - Damp(\psi))P_{output}$ ，其中， ψ 为光束能量调节单元（5）驱动电源输入电信号， $\psi \in [\psi_{min}, \psi_{max}]$ ，对应能量衰减比例 $Damp(\psi)$ 从 0~100%变化； ψ_{min} 为最小输入电信号； ψ_{max} 为最大输入电信号； $Damp(\psi)$ 为激光能量衰减比例； P_{focus} 为所述光束能量调节单元（5）输出的激光功率；

所述一维光束偏转单元（4）根据输入电信号 ξ 使光束一维偏转固定角度 α ，经过聚焦镜片作用在待加工区域，使得焦点相对于光轴偏移确定距离 σ ，

$$\sigma = f(\alpha, L_2, f) = f(\alpha(\xi), L_2, f),$$

$$\sigma_{min} = f(\alpha_{min}, L_2, f) = f(0, L_2, f)$$

$$\sigma_{max} = f(\eta * \alpha_{max}, L_2, f)$$

其中， L_2 为所述一维光束偏转单元（4）距工件表面距离； f 为所述一维光束偏转单元（4）不发生偏转时的焦距； α 为一维光束偏转单元（4）使光束偏转角度，即 $\alpha = \alpha(\xi)$ ； α_{min} 为所述一维光束偏转单元（4）使光束最小偏转角度； α_{max} 为一维光束偏转单元（4）使光束最大偏转角度； η 为一维光束偏转单元（4）安全使用系数； σ 为焦点位置偏移量； σ_{min} 为焦点位置偏移量最小值； σ_{max} 为焦点位置偏移量最大值。

5. 根据权利要求 1 所述的轧辊激光毛化加工方法，其特征在于，所述可首尾相连无序均匀点阵分布设计方法具体包括如下步骤：

根据形貌参数分布建立均匀点阵分布毛化点圆心集 A_0 ，具体为：

$$A_0 = \left\{ (x_{0i}, y_{0j}) \middle| \begin{matrix} x_{0i} = a(j-1), y_{0j} = b(i-1), \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max} \end{matrix} \right\},$$

其中： A_0 为均匀点阵分布毛化点圆心坐标位置集； (x_{0i}, y_{0j}) 为第 i 行第 j 列均匀点阵分布毛化点圆心坐标； i 为行序号； i_{max} 为最大行序号， $i_{max} = \pi d/b$ ； j 为列序号， $j_{max} = \lfloor L_1/a \rfloor + 1$ ； j_{max} 为最大列序号； a 为形貌分布点距， x 方向两个毛化硬质点之间距离； b 为形貌分布线距， y 方向两个毛化硬质点之间距离；

建立均匀点阵分布中每个毛化点随机位移向量集合 ΔX ，具体如下：

$$\Delta X = \left\{ (\delta x_i, \delta y_j) \left| \begin{array}{l} \delta x_i = rand(-1,1) * \varepsilon_b, \\ \delta y_j = rand(-1,1) * \varepsilon_a, \\ i = 1,2,3 \dots i_{max}, j = 1,2,3 \dots j_{max} \end{array} \right. \right\},$$

其中： ΔX 为均匀点阵分布中每个毛化点随机位移向量集合； $(\delta x_i, \delta y_j)$ 为均匀点阵分布中第*i*行、第*j*列均匀点阵分布毛化点圆心坐标 (x_{0i}, y_{0j}) 的随机位移向量； ε_a 为列偏移常量； ε_b 为行偏移常量；

建立无序均匀分布毛化点圆心集A：将均匀点阵分布毛化点圆心坐标位置集 A_0 和均匀点阵分布中每个毛化点随机位移向量集合 ΔX 叠加：

$$A = A_0 + \Delta X = \left\{ (x_i, y_j) \left| (x_i, y_j) = (x_{0i}, y_{0j}) + (\delta x_i, \delta y_j), \right. \right. \\ \left. \left. i = 1,2,3 \dots i_{max}, j = 1,2,3 \dots j_{max} \right. \right\}$$

其中：A，无序均匀分布毛化点圆心集； (x_i, y_j) ，无序均匀分布毛化点圆心坐标；

查找坏点：按毛化点重叠容忍度查找无序均匀分布坏点行序列、列序列的集SP，具体如下：

$$SP = \left\{ (u_q, w_q) \left| \begin{array}{l} (u_q, w_q) = (i, j), \\ |A(i, j) - A(i+1, j)| < \zeta * D \text{ or} \\ |A(i, j) - A(i, j+1)| < \zeta * D \text{ or} \\ |A(i, j) - A(i+1, j+1)| < \zeta * D, \\ i = 2,3,4 \dots i_{max} - 1, \\ j = 2,3,4 \dots j_{max} - 1, \\ q = 1,2,3 \dots \end{array} \right. \right\},$$

其中：SP 为无序均匀分布坏点行序列、列序列的集； $A(i, j)$ 为无序均匀分布毛化点圆心坐标集中第*i*、*j*个毛化点圆心坐标； (u_q, w_q) 为第*q*个坏点坐标行序列、列序列；*q*为坏点排序号； ζ 为无序均匀分布毛化点重叠容忍常量；

判断是否存在坏点：当 $SP \neq \emptyset$ 时，则存在坏点，则根据无序均匀分布坏点集SP，调整随机位移向量集合 ΔX ，重复建立无序均匀分布毛化点圆心集A和查找坏点，直至 $SP = \emptyset$ ；当 $SP = \emptyset$ 时，则不存在坏点；

建立无序均匀分布毛化点圆心集A以轴向中心线为基准进行左右对调后的无序均匀分布毛化点圆心集A_{ex}：当 $SP = \emptyset$ 时，对无序均匀分布毛化点圆心集A以轴向中心线为基准进行左右对调，以便多个激光末端输出模块加工区域的搭接：

$$Aex = \left\{ (xex_i, yex_j) \left| \begin{array}{l} (xex_i, yex_j) = \begin{cases} \left(x_i + \frac{1}{2}L_1, y_j\right), x_i < \frac{1}{2}L_1 \\ \left(x_i - \frac{1}{2}L_1, y_j\right), x_i \geq \frac{1}{2}L_1 \end{cases} \\ (x_i, y_j) \in A, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max} \end{array} \right. \right\}$$

其中： Aex 为对无序均匀分布毛化点圆心集 A 以轴向中心线为基准进行左右对调后的无序均匀分布毛化点圆心集； (xex_i, yex_j) 为左右对调后第 i 、 j 个毛化点圆心坐标；

查找中心线附近区域坏点：在左右对调过程后的中心线附近区域，按毛化点重叠容忍度查找无序均匀分布坏点行序列、列序列的集 $SPex$ ，具体为：

$$SPex = \left\{ (uex_{qex}, wex_{qex}) \left| \begin{array}{l} (uex_{qex}, wex_{qex}) = (i, j), \\ |Aex(i, j) - Aex(i + 1, j)| < \zeta * D \text{ or} \\ |Aex(i, j) - Aex(i, j + 1)| < \zeta * D \text{ or} \\ |Aex(i, j) - Aex(i + 1, j + 1)| < \zeta * D, \\ Aex(i, j) \in Center, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, \\ j = 1, 2, 3 \dots j_{max}, \\ qex = 1, 2, 3 \dots \end{array} \right. \right\},$$

其中： $SPex$ 为对左右对调过程后的中心线附近区域按毛化点重叠容忍度查找无序均匀分布坏点行序列、列序列的集； (uex_{qex}, wex_{qex}) 为第 qex 个坏点坐标行序列、列序列； qex 为坏点排序号； $Aex(i, j)$ 为对调后的无序均匀分布毛化点圆心坐标集中第 i 、 j 个毛化点圆心坐标； $Center$ 为左右对调过程后的中心线附近区域：

$Center = \left\{ (x, y) \left| x \in \left[\left(1 - \frac{\varpi}{2}\right) \frac{L_1}{2}, \left(1 + \frac{\varpi}{2}\right) \frac{L_1}{2} \right], y \in [0, \pi d] \right\}$ ； ϖ 为输入的中心线附近区域比例；

判断中心线附件区域是否存在坏点：当 $SPex \neq \emptyset$ ，则存在坏点，则根据中心线附近区域无序均匀分布坏点集 $SPex$ ，调整中心线附近区域坏点位置，重复建立无序均匀分布毛化点圆心集 A 以轴向中心线为基准进行左右对调后的无序均匀分布毛化点圆心集 Aex 和查找中心线附近区域坏点，直至 $SPex = \emptyset$ ；

当 $SPex = \emptyset$ 时，则不存在坏点，即 Aex 为所述可首尾相连的无序均匀分布毛化点阵分布方案。

6. 根据权利要求 5 所述的轧辊激光毛化加工方法，其特征在于，所述根据无序均匀分布

坏点集 SP ，调整随机位移向量集合 ΔX ，具体为：

$$\Delta X = \left\{ (\delta x_i, \delta y_j) \left| \begin{array}{l} (\delta x_i, \delta y_j) = (\delta x_{re_i}, \delta y_{re_j}), \\ (\delta x_{re_i}, \delta y_{re_j}) \in \Delta X_{re}, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max}, \end{array} \right. \right\},$$

$$\text{式中: } \Delta X_{re} = \left\{ (\delta x_{re_i}, \delta y_{re_j}) \left| \begin{array}{l} (\delta x_{re_i}, \delta y_{re_j}) = \begin{cases} \lambda(\delta x_i, \delta y_j), (i, j) \in SP \\ (\delta x_i, \delta y_j), (i, j) \notin SP \end{cases}, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max}, \\ (\delta x_i, \delta y_j) \in \Delta X \end{array} \right. \right\},$$

其中： ΔX_{re} 为调整后的随机位移向量集； $(\delta x_{re_i}, \delta y_{re_j})$ 为调整后的随机位移向量； λ 为坏点的随机位移向量的调整比例；

所述根据中心线附近区域无序均匀分布坏点集 SP_{ex} ，调整中心线附近区域坏点位置，具体为：

$$A_{ex} = \left\{ (x_{ex_i}, y_{ex_j}) \left| \begin{array}{l} (x_{ex_i}, y_{ex_j}) = (x_{re_i}, y_{re_j}), \\ (x_{re_i}, y_{re_j}) \in A_{re}, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max}, \end{array} \right. \right\},$$

$$\text{式中: } A_{re} = \left\{ (x_{re_i}, y_{re_j}) \left| \begin{array}{l} (x_{re_i}, y_{re_j}) = \begin{cases} (x_{ex_i}, y_{ex_j}) - \vartheta(\delta x_i, \delta y_j), (i, j) \in SP_{ex} \\ (x_{ex_i}, y_{ex_j}), (i, j) \notin SP_{ex} \end{cases}, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max}, \\ (x_{ex_i}, y_{ex_j}) \in A_{ex}, \\ (\delta x_i, \delta y_j) \in \Delta X \end{array} \right. \right\},$$

其中： A_{re} 为中心线附近区域坏点位置调整后的无序均匀分布毛化点圆心坐标集； (x_{re_i}, y_{re_j}) 为中心线区域坏点位置调整后的无序均匀分布毛化点圆心坐标集中第 i 、 j 个毛化点圆心坐标； ϑ 为中心线附近区域坏点坐标调整比例。

7. 根据权利要求 4 所述的轧辊激光毛化加工方法，其特征在于，通过信息处理模块得出激光出光位置信号、光束能量调节信号和一维光束偏转单元偏转信号具体为如下步骤：

确定焦点运动轨迹与轧辊轴向夹角：当一维光束偏转单元（4）不工作时即 $\alpha = 0$ 时，焦点运动轨迹与轧辊轴向夹角 θ ：

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\pi * n * d}{v},$$

其中： n 为轧辊转速； v 为激光末端输出模块的运行速度；

确定焦点运动轨迹序号集 K 和计算每个焦点运动轨迹绕金属圆柱体圈数集 P ,

$k \in K = \{1, 2, 3, \dots, k_{max}\}$, 式中:

$$k_{max} = \begin{cases} \frac{\pi d}{\sigma_{max} \tan \theta}, \frac{\pi d}{\sigma_{max} \tan \theta} \text{ 为整数} \\ \left\lfloor \frac{\pi d}{\sigma_{max} \tan \theta} \right\rfloor + 1, \frac{\pi d}{\sigma_{max} \tan \theta} \text{ 不为整数} \end{cases};$$

$p \in P = \{1, 2, 3, \dots, p_{max}\}$, 式中:

$$p_{max} = \begin{cases} \frac{L_1}{\pi d \cot \theta}, \frac{L_1}{\pi d \cot \theta} \text{ 为整数} \\ \left\lfloor \frac{L_1}{\pi d \cot \theta} \right\rfloor + 1, \frac{L_1}{\pi d \cot \theta} \text{ 不为整数} \end{cases};$$

其中: K 为焦点运动轨迹序号集; k 为第 k 个焦点运动轨迹, 即第 k 次加工过程; P 为每个焦点运动轨迹绕金属圆柱体圈数集; p 为焦点运动轨迹绕金属圆柱体第 p 圈;

确定一维光束偏转单元 (4) 偏转角度 $\alpha \in [0, \eta * \alpha_{max}]$ 时, 激光末端输出模块第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 的集合 Λ , 具体为:

$$\Lambda = \left\{ \Lambda_k \mid \Lambda_k = \left\{ (x, y) \mid \begin{aligned} & x \in [xk_{min}(y, p = 1), xk_{max}(y, p = 1)] \cup \\ & [xk_{min}(y, p = 2), xk_{max}(y, p = 2)] \cup \\ & [xk_{min}(y, p = 3), xk_{max}(y, p = 3)] \cup \\ & \dots \cup \\ & [xk_{min}(y, p = p_{max}), xk_{max}(y, p = p_{max})], \\ & y \in [0, \pi d) \end{aligned} \right\}, k = 1, 2, 3, \dots, k_{max} \right\},$$

式中,

$$xk_{min}(y, p) = xk(y, p, \sigma = 0) = \frac{\left[y - \frac{\pi d}{k_{max}} k \right]}{\tan \theta} + \frac{\pi d}{\tan \theta} (p - 1), y \in [0, \pi d), p \in$$

$P, k \in K,$

$$xk_{max}(y, p) = xk(y, p, \sigma = \sigma_{max}) = \frac{\left[y - \frac{\pi d}{k_{max}} (k-1) \right]}{\tan \theta} + \frac{\pi d}{\tan \theta} (p - 1), y \in$$

$[0, \pi d), p \in P, k \in K,$

其中: Λ 为激光末端输出模块每次加工过程中焦点覆盖范围的集合; Λ_k 为激光末端输出模块第 k 次加工过程中焦点覆盖范围; $xk_{min}(y, p) = xk(y, p, \sigma = 0)$ 为偏转角度 $\alpha = 0$ 即偏转量 $\sigma = 0$ 时, 第 k 条第 p 圈焦点运动轨迹方程; $xk_{max}(y, p) = xk(y, p, \sigma = \sigma_{max})$ 为偏转角

度 $\alpha = \eta * \alpha_{max}$ 即偏转量 $\sigma = \sigma_{max}$ 时, 第 k 条第 p 圈焦点运动轨迹方程;

统计激光末端输出模块每次加工过程中焦点覆盖范围中的无序均匀毛化点圆心坐标的集合 Φ , 具体如下:

$$\Phi = \{\Phi_k | k = 1, 2, 3 \dots k_{max}\},$$

$$\text{式中: } \Phi_k = \left\{ (x_{rk}, y_{rk}) \left| \begin{array}{l} (x_{rk}, y_{rk}) = (xex_i, yex_j), \\ (xex_i, yex_j) \in \Lambda_k, (xex_i, yex_j) \in Aex, \\ i = 1, 2, 3 \dots i_{max}, j = 1, 2, 3 \dots j_{max}, \\ rk = 1, 2, 3 \dots \end{array} \right. \right\}, k \in K,$$

其中, Φ 为激光末端输出模块每次加工过程中焦点覆盖范围中的无序均匀毛化点圆心坐标集的集合; Φ_k 为激光末端输出模块第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的无序均匀毛化点圆心坐标集, 即圆心坐标落在 $xk_{min} = xk(y, \sigma = 0)$ 、 $xk_{max} = xk(y, \sigma = \sigma_{max})$ 两条轨迹线之间的毛化点圆心坐标集; (x_{rk}, y_{rk}) 为第 k 次加工过程中包含的第 rk 个无序均匀毛化点圆心坐标; rk 为第 k 次加工过程中包含的无序均匀毛化点统计次序;

确定第 k 次加工过程中排序后的毛化点圆心坐标集 Ω_k : 按照毛化点加工先后顺序对 (x_{rk}, y_{rk}) 进行排序得到排序后的毛化点圆心坐标集 Ω_k , 具体排序规则如下:

$$\Omega_k = \{(x_{\tau k}, y_{\tau k}) | \tau k = 1, 2, 3 \dots rk_{max}\} =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\{ (x_{rk}, (y_{rk})_{min}), \dots, (x_{rk}, (y_{rk})_{max}) \right\} \left| \begin{array}{l} (x_{rk}, y_{rk}) \in \Phi_k, \\ rk = 1, 2, 3 \dots rk_{max}, \\ k \text{ 为奇数} \end{array} \right. \\ \left\{ (x_{rk}, (y_{rk})_{ma}), \dots, (x_{rk}, (y_{rk})_{min}) \right\} \left| \begin{array}{l} (x_{rk}, y_{rk}) \in \Phi_k, \\ rk = 1, 2, 3 \dots rk_{max}, \\ k \text{ 为偶数} \end{array} \right. \end{array} \right\}, k \in K,$$

其中: Ω_k 为第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的无序均匀毛化点圆心坐标, 按照毛化点加工顺序进行排序后形成的圆心坐标集; $(x_{\tau k}, y_{\tau k})$ 为第 k 次加工过程中第 τk 个加工的毛化点坐标; τk 为第 k 次加工过程中毛化点加工顺序排序; rk_{max} 为第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中包含的无序均匀毛化点数量统计值最大值; $(y_{rk})_{max}$ 为第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的无序均匀毛化点圆心坐标 (x_{rk}, y_{rk}) 的 y 轴坐标最大值; $(y_{rk})_{min}$ 为第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的无序均匀毛化点圆心坐标 (x_{rk}, y_{rk}) 的 y 轴坐标最小值;

查找 Ω_k 中的加工奇点的集合 MSP_k : 根据加工系统响应频率查找 Ω_k 中的加工奇点的集合 MSP_k , 具体查找方式如下:

$$MSP_k = \left\{ msp_{mk} \left| \begin{array}{l} msp_{mk} = \tau k, \\ \frac{|y_{\tau k} - y_{\tau k-1}|}{\pi * n * d} < \frac{1}{F} \text{ or } \frac{|y_{\tau k} - y_{\tau k+1}|}{\pi * n * d} < \frac{1}{F}, \\ (x_{\tau k}, y_{\tau k}) \in \Omega_k, \\ \tau k = 2, 3, 4 \dots rk_{max} - 1, \\ mk = 1, 2, 3 \dots \end{array} \right. \right\}, k \in K,$$

$$\text{式中: } F = \frac{1}{\varrho} * \min \left(MaxfLas_{mor}, MaxfP_{res}, MaxfEX_{res}, \frac{n}{R_{encoder}} \right)$$

其中: MSP_k 为 Ω_k 中的加工奇点的集合; msp_{mk} 为第 k 次加工过程中加工奇点的加工顺序序号; F 为加工系统综合响应频率; $MaxfLas_{mor}$ 为加工第 mor 种形貌的输出激光最大出光频率; $MaxfP_{res}$ 为光束能量调节单元 (5) 最高响应频率; $MaxfEX_{res}$ 为一维光束偏转单元 (4) 最高响应频率; R_{encod} 为轧辊旋转同轴编码器 (2) 分辨率; ϱ 为系统响应频率安全系数;

判断是否存在加工奇点: 当 $MSP_k \neq \emptyset$, 且 $k \in K$, 则存在加工奇点, 根据 Ω_k 中的加工奇点的集合 MSP_k 对第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的按加工先后顺序排列的无序均匀毛化点圆心坐标集 Ω_k 进行调整, 重复确定第 k 次加工过程中排序后的毛化点圆心坐标集 Ω_k 和查找 Ω_k 中的加工奇点的集合 MSP_k , 直至 $MSP_k = \emptyset$; 当 $SP = \emptyset$ 时, 则不存在坏点;

当 $MSP_k = \emptyset$ 且 $k \in K$, 计算激光末端输出模块的激光出光位置信号-光束能量调节信号-一维光束偏转单元偏转信号的信号集的集合 $\Gamma Line_m$:

$$\Gamma Line_m = \{ \Gamma Line_{m_k}, k = 1, 2, 3 \dots k_{max} \}, m \in \{1, 2, 3 \dots m_{max}\},$$

式中:

$$\Gamma Line_{m_k} = \left\{ (\beta_{\tau k}, \psi_{m_{\tau k}}, \xi_{\tau k}) \left| \begin{array}{l} \beta_{\tau k} = 2\pi \frac{y_{\tau k}}{\pi d}, \\ \psi_{m_{\tau k}} = rand(\psi_{min}, \varsigma * \psi_{max}) \text{ or } \\ \psi_{m_{\tau k}} = \psi_{min}, \\ \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\tau k} = x_{\tau k} - xk_{min}(y = y_{\tau k}, p = p_{\tau k}) \\ p_{\tau k} = \left\lfloor \frac{x_{\tau k} - xk_{min}(y = y_{\tau k}, p = 1)}{\pi d \cot \theta} \right\rfloor, \\ \sigma_{\tau k} = f(\alpha_{\tau k}) = f(\alpha(\xi_{\tau k})) \\ (x_{\tau k}, y_{\tau k}) \in \Omega_k, \tau k = 1, 2, 3 \dots r_{max} \end{array} \right. \end{array} \right\}, k \in K,$$

$$m \in \{1, 2, 3 \dots m_{max}\},$$

其中: $\Gamma Line_m$ 为每次加工过程中第 m 个激光末端输出模块的激光出光位置信号-光束能量调节信号-一维光束偏转单元偏转信号的信号集的集合; $\Gamma Line_{m_k}$ 为加工第 k 次加工过程中焦点覆盖范围中的按加工顺序排列的无序均匀毛化点第 m 个激光末端输出模块所需的激

光出光位置信号-光束能量调节信号-一维光束偏转单元偏转信号的信号集; $(\beta_{\tau k}, \psi_{m_{\tau k}}, \xi_{\tau k})$ 为第 k 次加工过程中加工第 τk 个毛化点给加工系统发出的同样的激光出光位置信号、第 m 个激光末端输出模块的光束能量调节信号和同样的一维光束偏转单元偏转信号; $p_{\tau k}$ 为第 k 次加工过程中加工第 τk 个毛化点所在圈数; ς 为光束能量调节单元 (5) 激光能量最大衰减比例常量。

8. 根据权利要求 7 所述的轧辊激光毛化加工方法, 其特征在于, 根据 Ω_k 中的加工奇点的集合 MSP_k 对第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的按加工先后顺序排列的无序均匀毛化点圆心坐标集 Ω_k 进行调整具体为:

$$\Omega_k = \left\{ (x_{\tau k}, y_{\tau k}) \left| \begin{array}{l} (x_{\tau k}, y_{\tau k}) = (xre_{\tau k}, yre_{\tau k}), \\ (xre_{\tau k}, yre_{\tau k}) \in \Omega re_k \\ \tau k = 2, 3, 4 \dots rk_{max} \end{array} \right. \right\}, k \in K$$

$$\text{式中, } \Omega re_k = \left\{ (xre_{\tau k}, yre_{\tau k}) \left| \begin{array}{l} (xre_{\tau k}, yre_{\tau k}) \\ \left\{ \begin{array}{l} (x_{\tau k}, y_{\tau k} - \Delta_{\tau k}), k \text{ 为奇} \\ (x_{\tau k}, y_{\tau k} + \Delta_{\tau k}), k \text{ 为偶} \end{array} \right. \\ \tau k \in MSP_k \\ (x_{\tau k}, y_{\tau k}), \tau k \notin MSP_k \\ (x_{\tau k}, y_{\tau k}) \in \Omega_k, \\ \Delta_{\tau k} = \gamma * |y_{\tau k} - y_{\tau k-1}|, \\ \tau k = 2, 3, 4 \dots rk_{max} \end{array} \right. \right\}, k \in K$$

其中: Ωre_k 为调整后第 k 次加工过程中焦点覆盖范围 Λ_k 中的按加工先后顺序排列的无序均匀毛化点圆心坐标集; $(xre_{\tau k}, yre_{\tau k})$ 为调整后的第 k 次加工过程中第 τk 个加工的毛化点圆心坐标; $\Delta_{\tau k}$ 为第 k 次加工过程中第 τk 个加工的毛化点的圆心坐标 y 轴坐标调整量; γ 为 y 轴坐标调整量的调整比例。

9. 根据权利要求 5 所述的轧辊激光毛化加工方法, 其特征在于, 所述形貌分布点距 a 和形貌分布线距 b 的确定方法如下:

确定激光毛化硬质点形貌种类;

根据面积占有率初始值 ρ_0 , 计算形貌点距 a_0 的初始值和线距的初始值 b_0 , 具体如下:

$$a_0 = b_0 = \sqrt{\frac{\pi(D_{mor}/2)^2}{\rho_0}},$$

其中: ρ_0 为设定的形貌面积占有率初始值; a_0 为形貌分布点距初始值, x 方向两个毛化硬质点之间距离初始值; b_0 为形貌分布线距初始值, y 方向两个硬质点之间距离初始值; D_{mor} 为第 mor 种形貌的直径;

修正形貌分布点距、线距和面积占有率, 具体如下:

$$a = b = \frac{\pi d}{[\pi d/b_0]}, \quad \rho = \frac{\pi(D_{mor}/2)^2}{a*b},$$

其中： ρ 为形貌面积占有率； a 为形貌分布点距， x 方向两个毛化硬质点之间距离； b 为形貌分布线距， y 方向两个毛化硬质点之间距离。

10. 一种根据权利要求1所述的轧辊激光毛化加工方法的加工设备，其特征在于，包括计算机、光源模块和激光末端输出模块；所述计算机包括可首尾相连无序均匀点阵分布设计模块和信号处理模块；根据轧辊加工单元参数和形貌参数，通过可首尾相连无序均匀点阵分布设计模块输出可首尾相连的无序均匀分布毛化点阵分布方案；根据所述可首尾相连的无序均匀分布毛化点阵分布方案、机床参数和激光参数，通过信息处理模块得出激光出光位置信号、光束能量调节信号和一维光束偏转单元偏转信号；

所述激光出光位置信号用于控制光源模块发出激光；

所述光束能量调节信号和一维光束偏转单元偏转信号分别输入激光末端输出模块，用于产生无序的激光点阵，每个激光末端输出模块用于加工一个轧辊加工单元；

每个所述激光末端输出模块在对应的轧辊加工单元区域轴向往复移动，所述往复运动起始线为 $x = -\frac{\pi d}{k_{max}} \cot \theta$ ，终止线为 $x = L_1$ 。

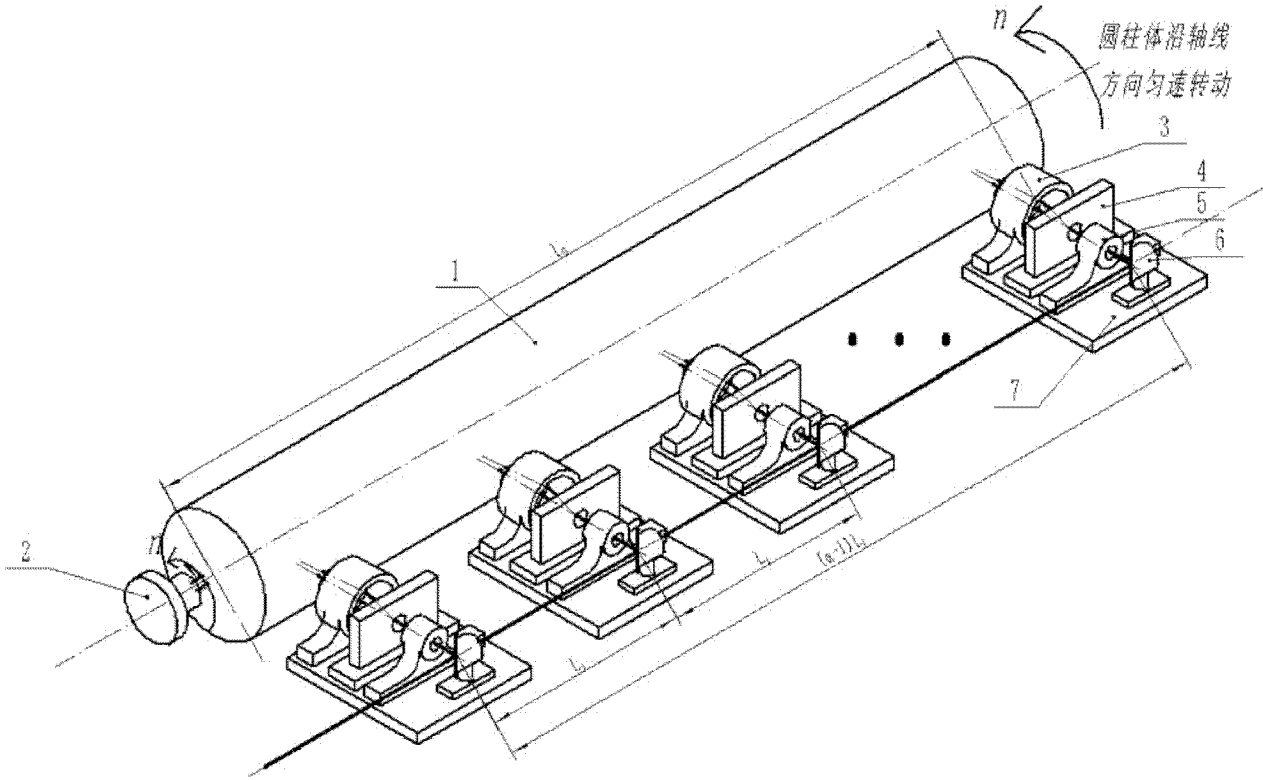


图 1

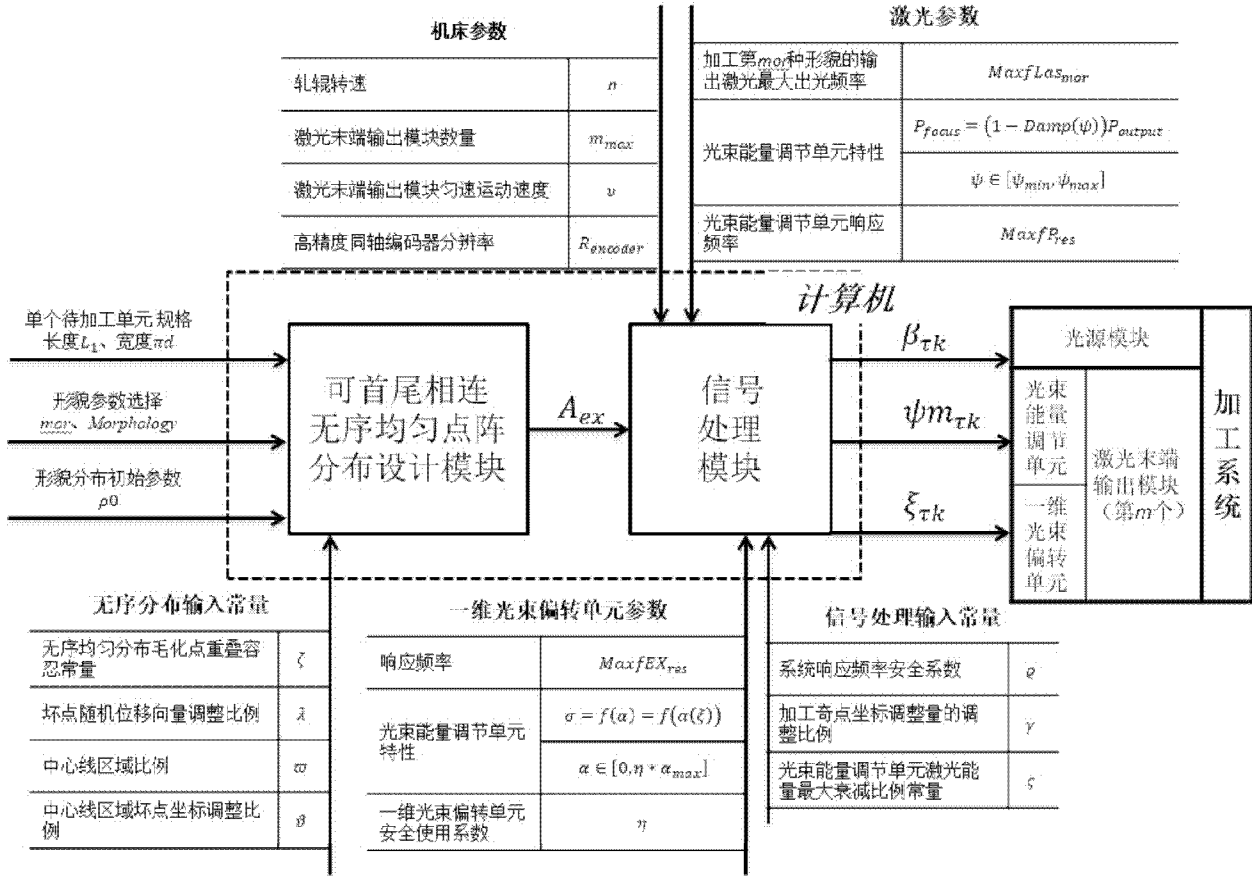


图 2

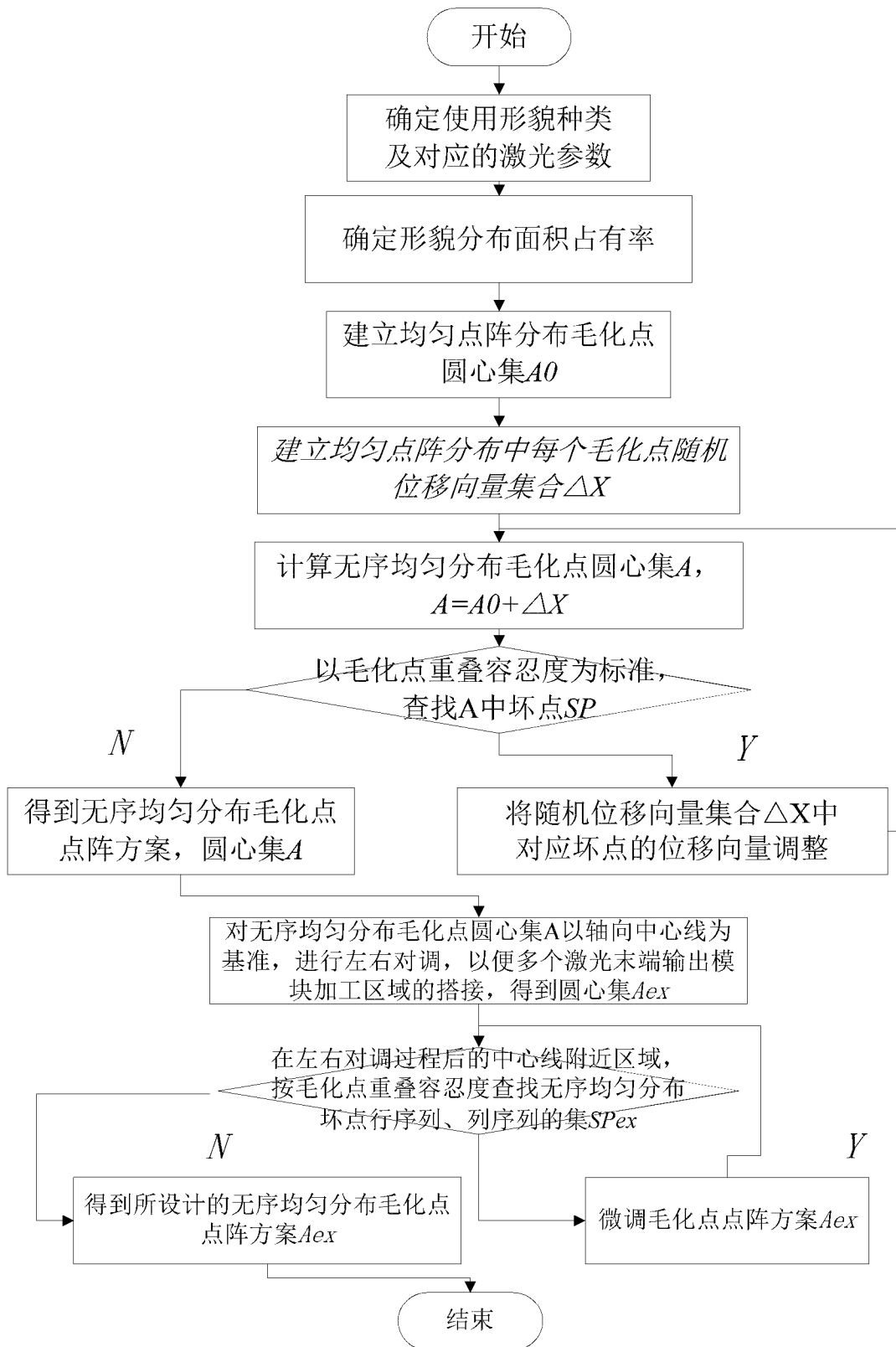


图 3

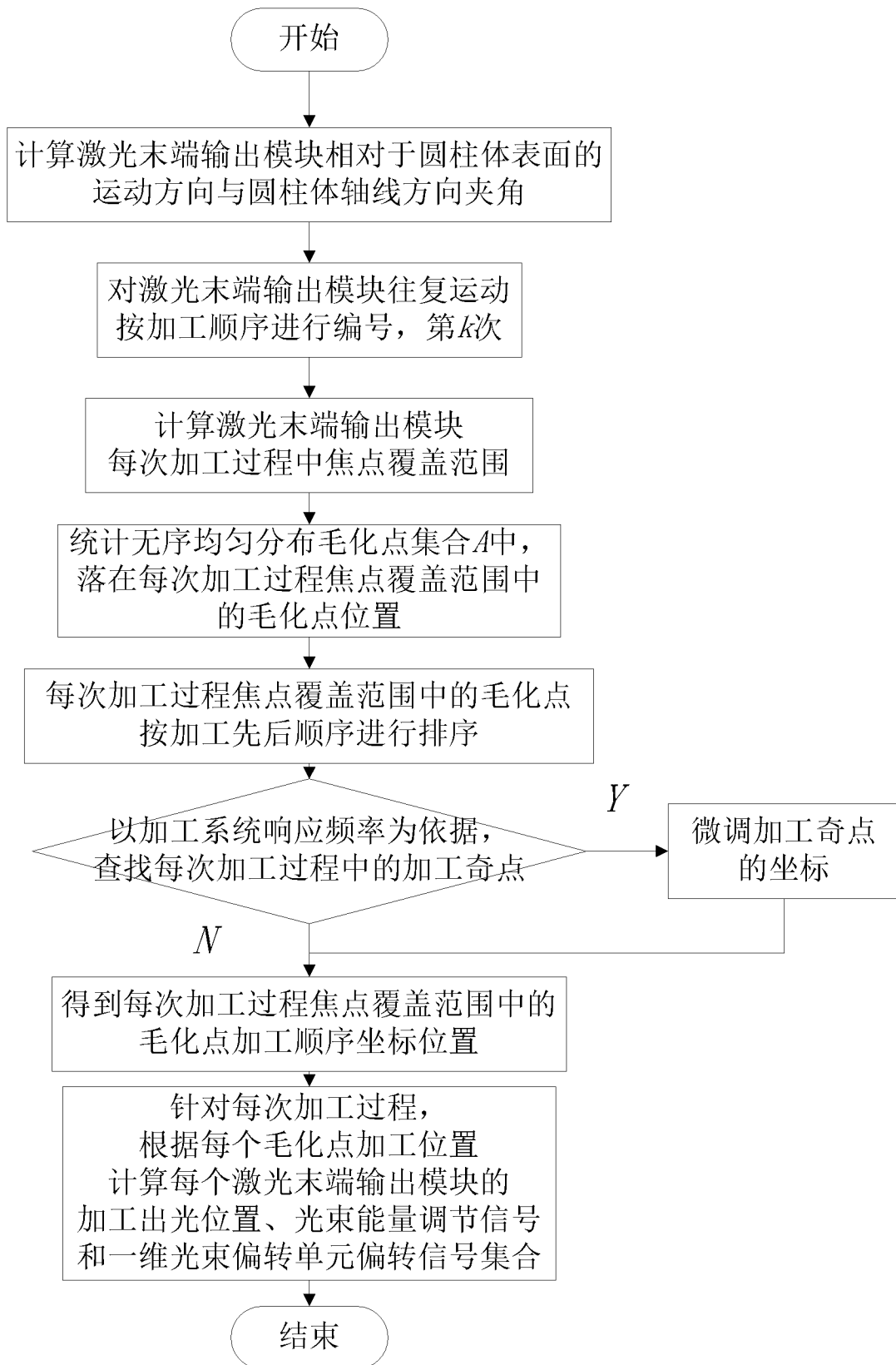


图 4

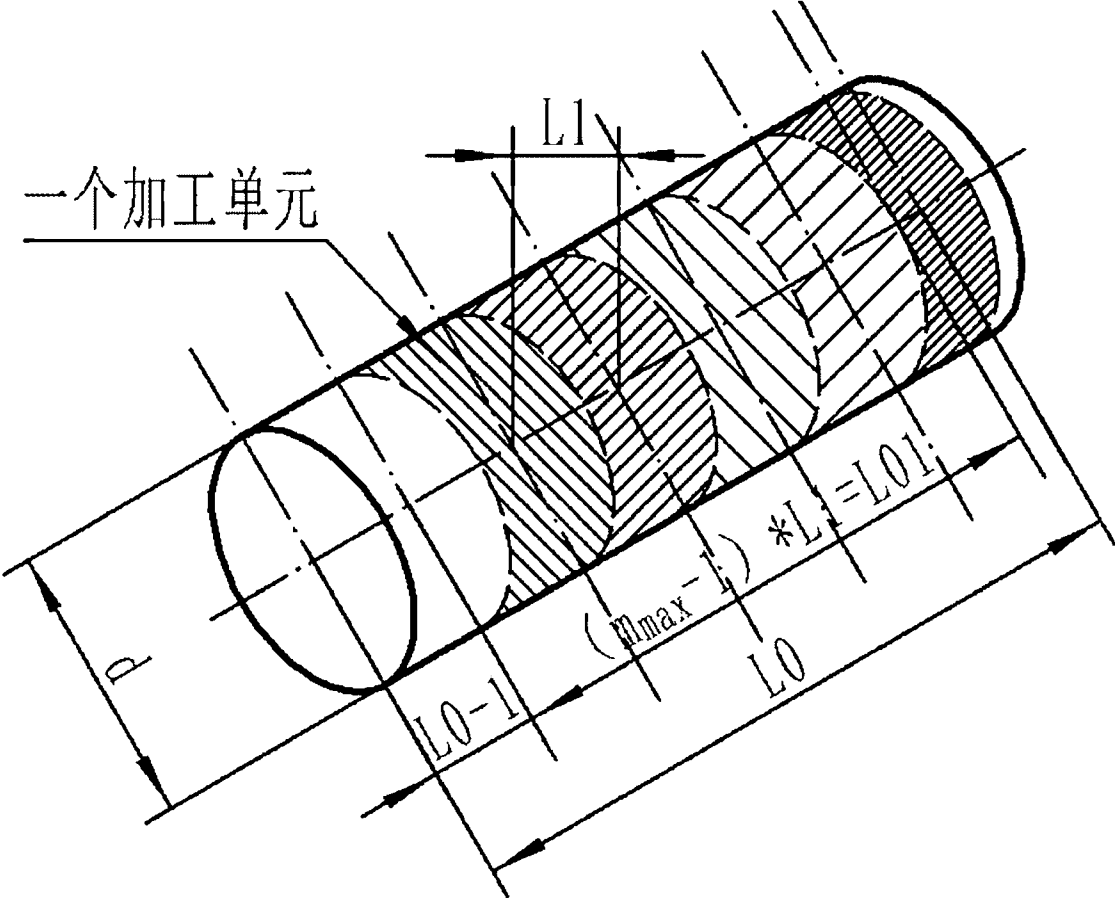


图 5

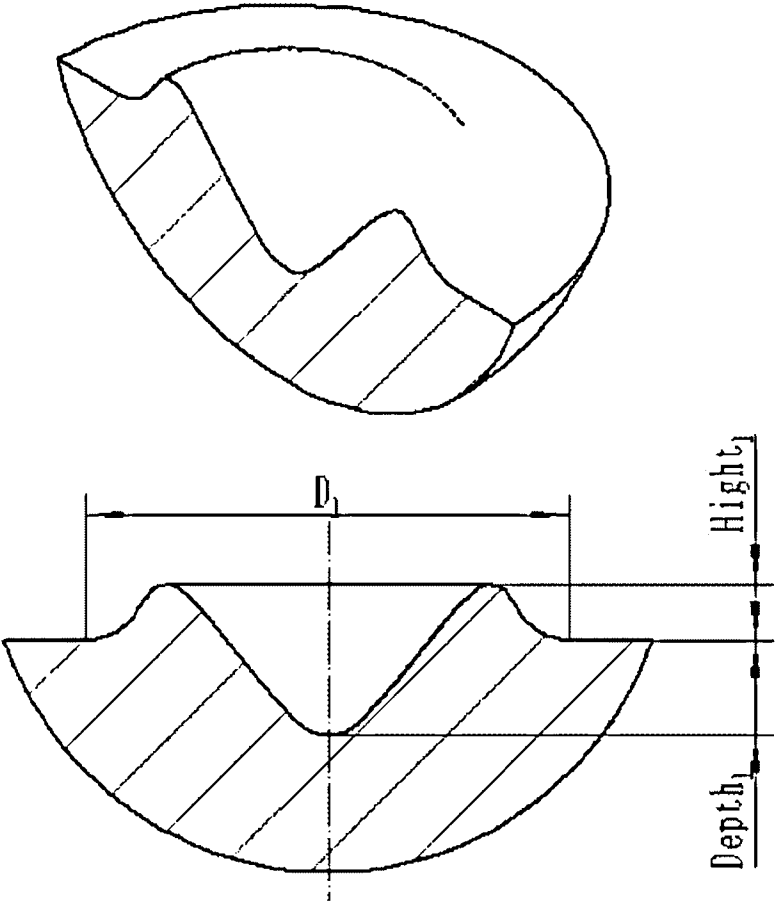


图 6

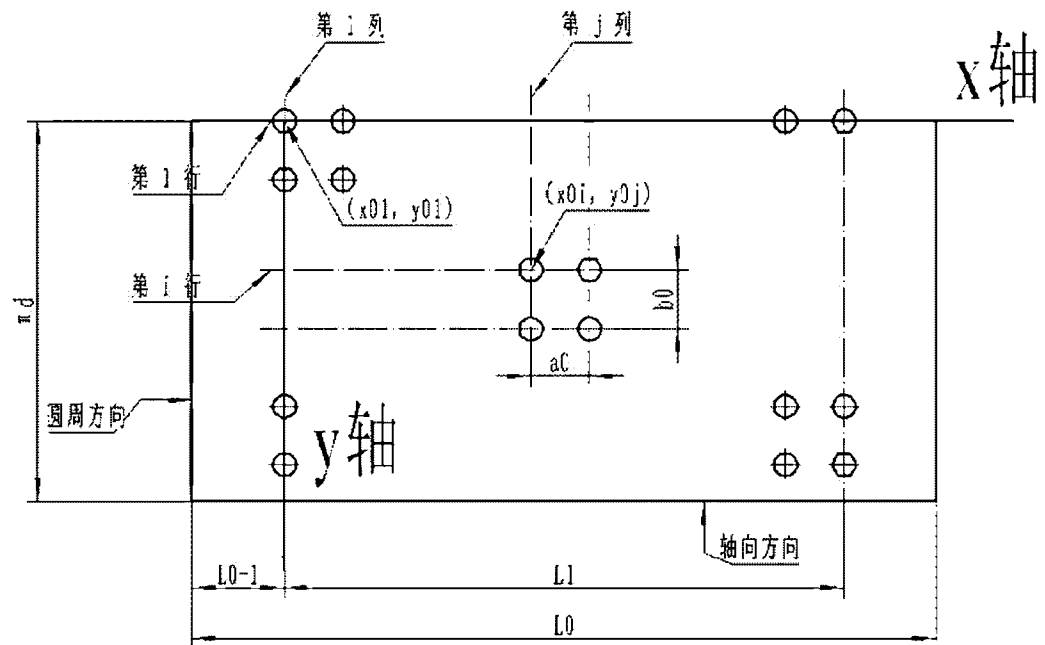


图 7

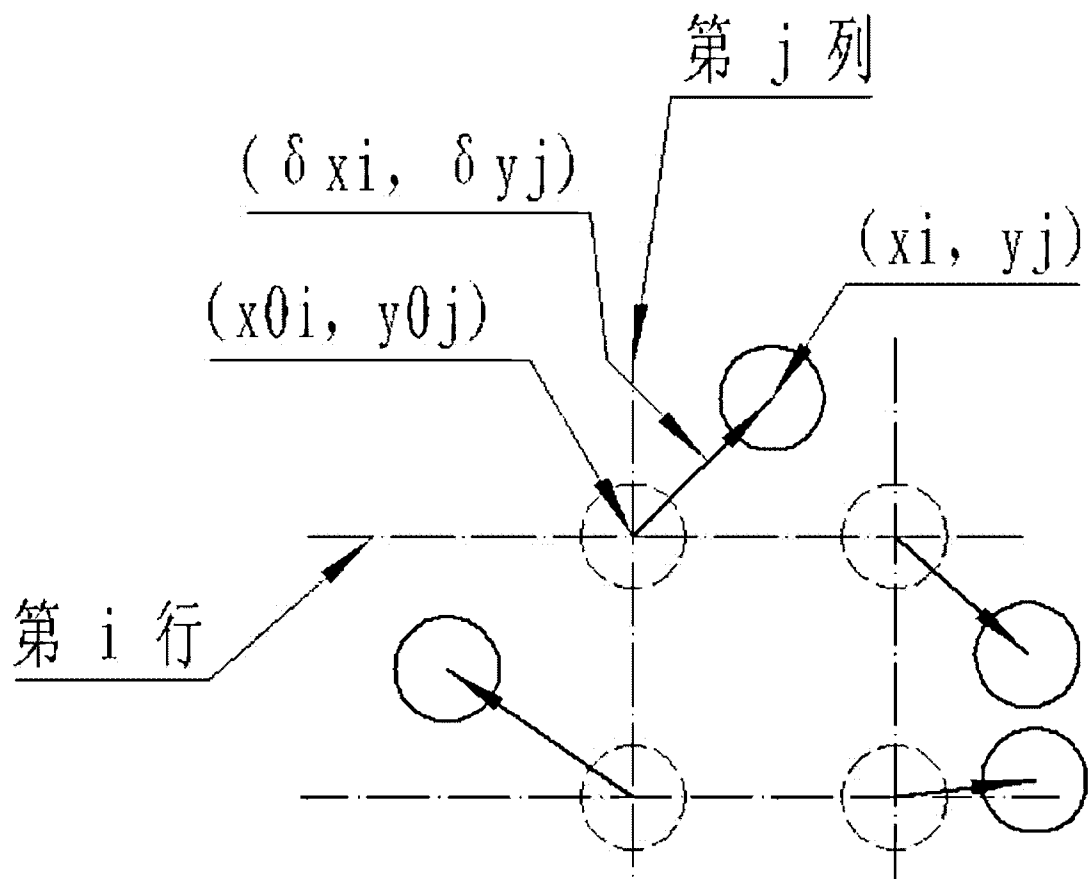


图 8

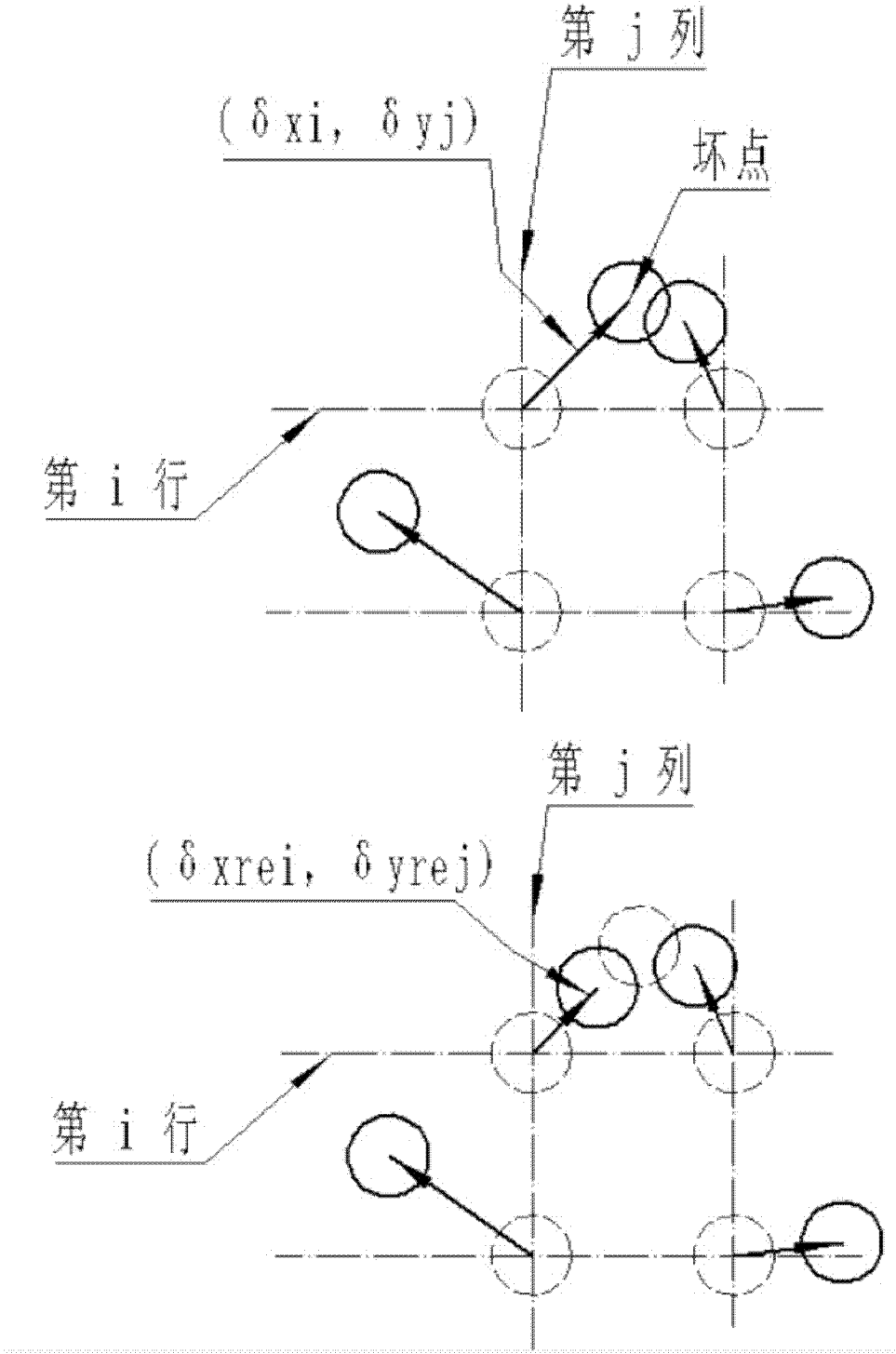


图 9

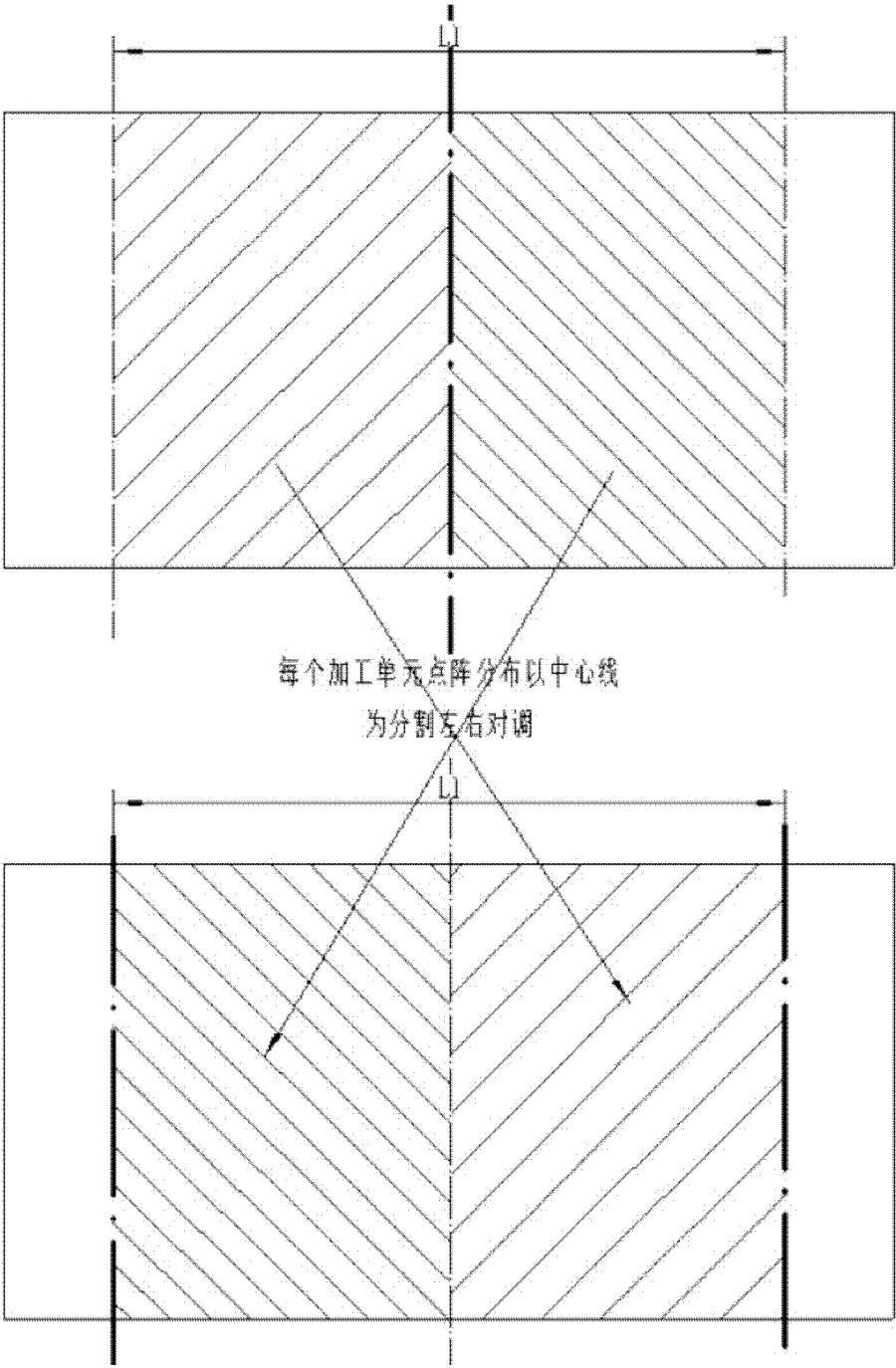


图 10

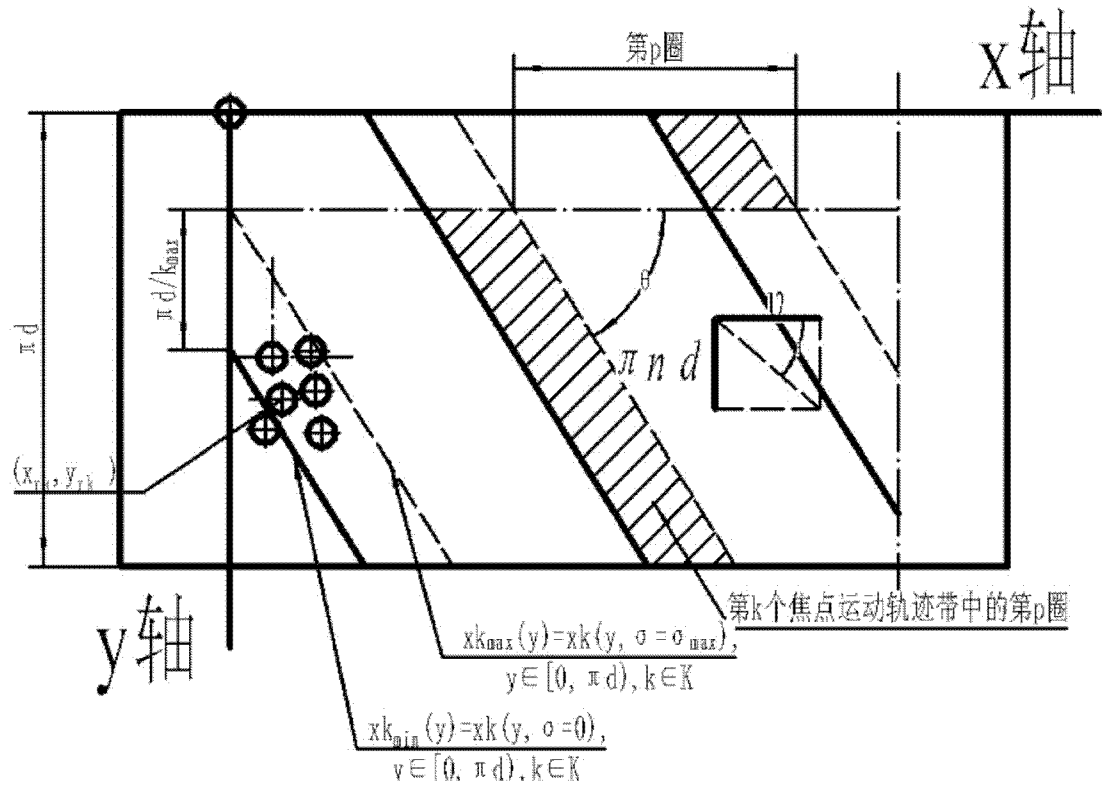


图 11

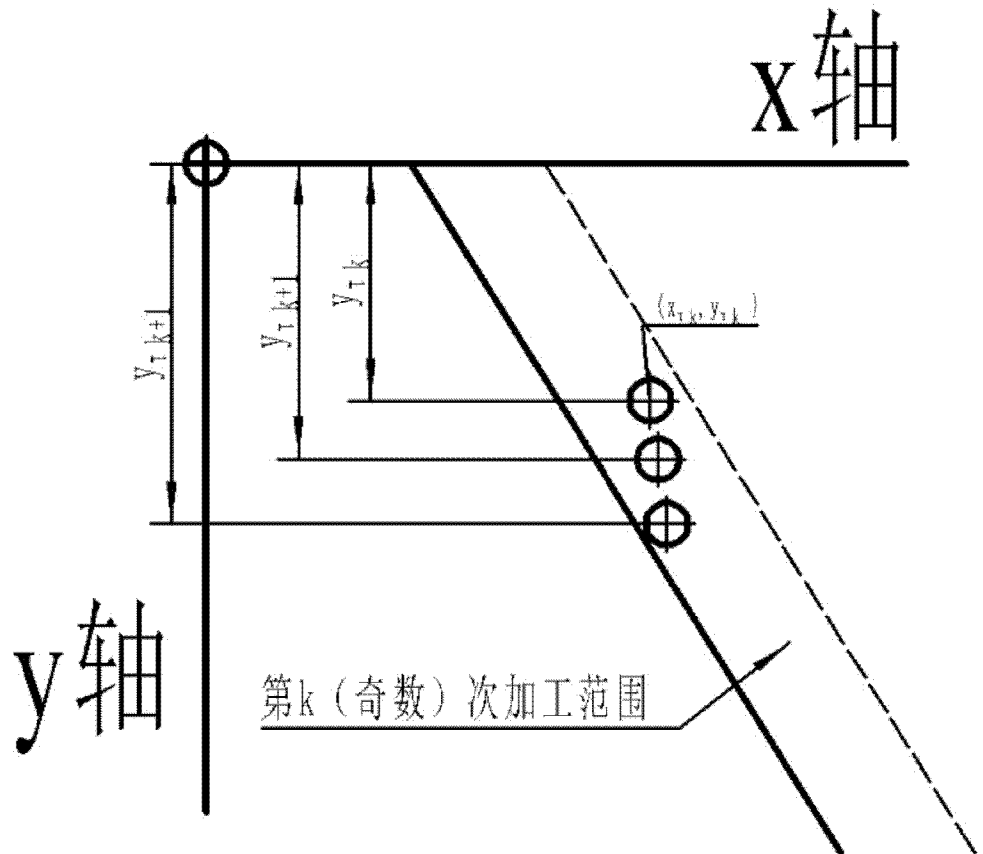


图 12

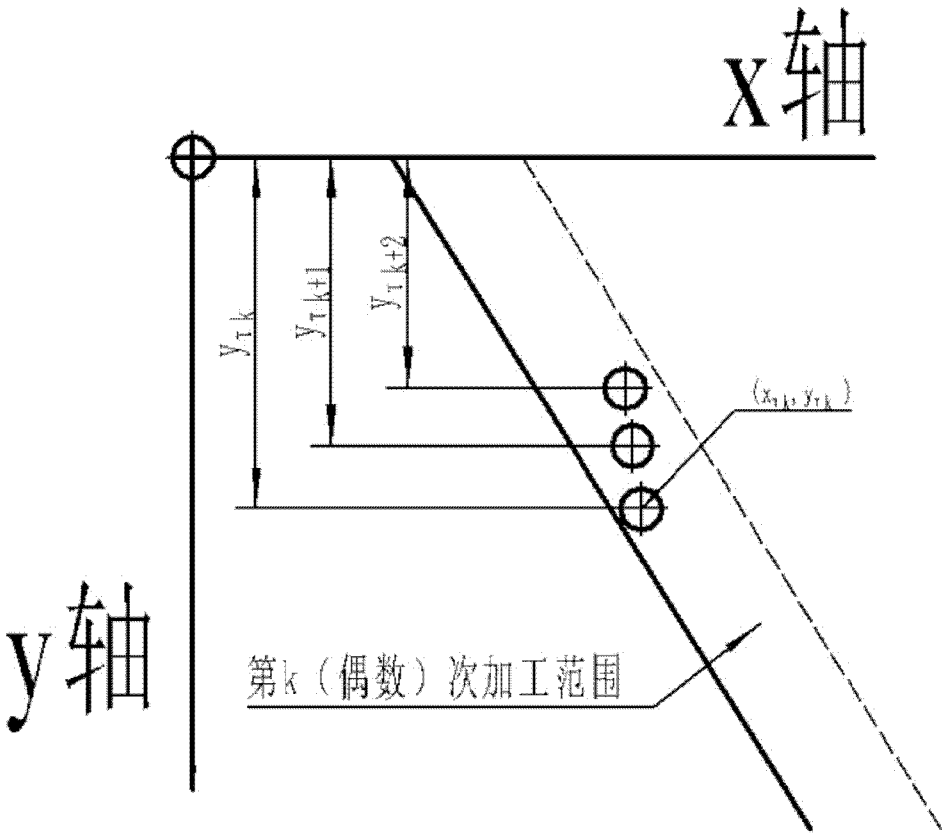


图 13

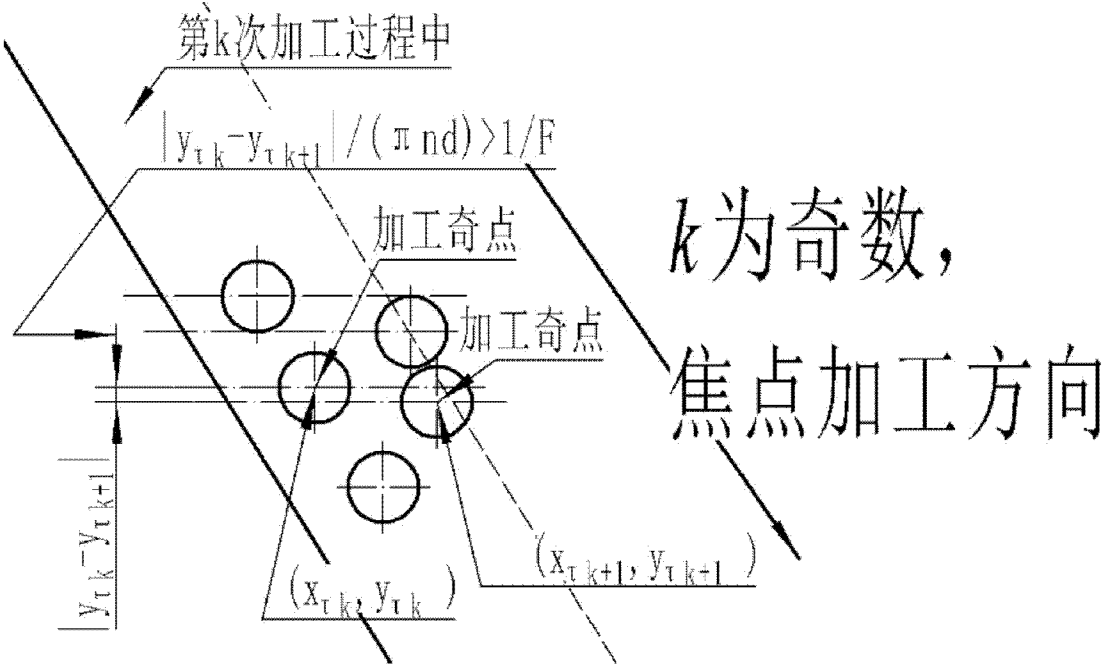


图 14

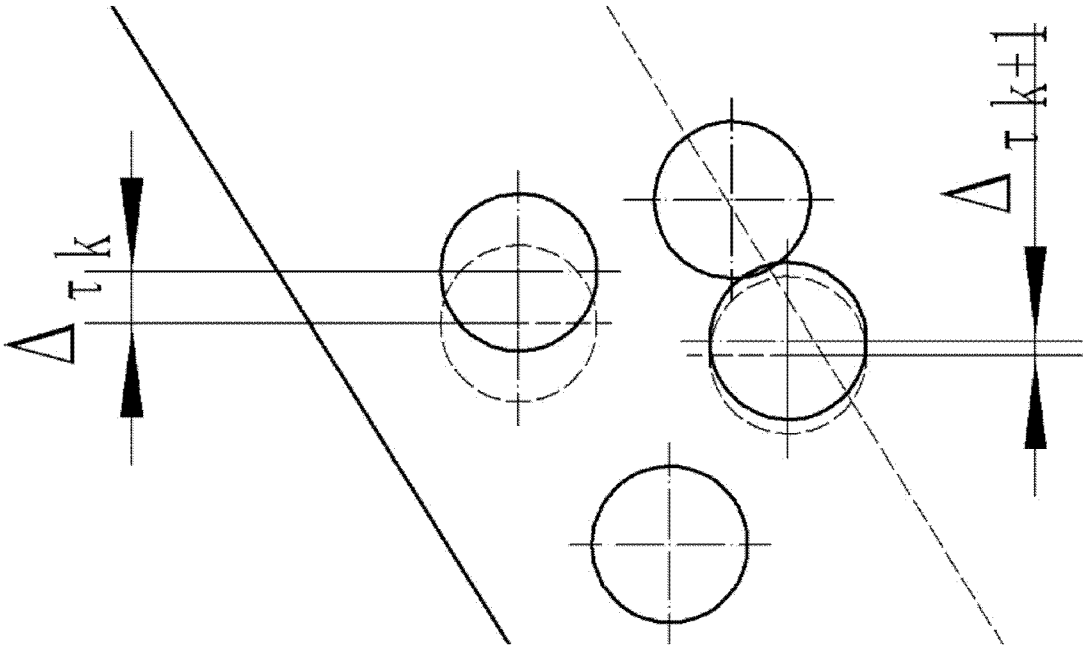


图 15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/124564

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B23K 26/00(2014.01)i; B23K 26/08(2014.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B23K

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 江苏大学, 轧辊, 激光, 无序, 无规则, 随机, 毛化, 重叠, 扎堆, 偏转, 首尾, 往复, 多头, 多个, roller, roll, laser, roughen+, texturing, engrav+, mult+, disorder+, random, deflect+, rotat+, reciprocate+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 102699524 A (WUHAN HUAGONG LASER ENGINEERING CO., LTD.) 03 October 2012 (2012-10-03) description, paragraphs 7-37, and figures 1-4	1-10
A	CN 107511588 A (BAOSTEEL GROUP CORP.) 26 December 2017 (2017-12-26) entire document	1-10
A	CN 1401456 A (SHANGHAI INSTITUTE OF OPTICS AND FINE MECHANICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 12 March 2003 (2003-03-12) entire document	1-10
A	CN 106425085 A (WUHAN KAIRUIDI LASER TECHNOLOGY CO., LTD.) 22 February 2017 (2017-02-22) entire document	1-10
A	CN 102179621 A (INSTITUTE OF MECHANICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 14 September 2011 (2011-09-14) entire document	1-10
A	KR 100721862 B1 (POSCO) 18 May 2007 (2007-05-18) entire document	1-10



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

09 July 2019

Date of mailing of the international search report

26 July 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

State Intellectual Property Office of the P. R. China
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2018/124564

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	102699524	A	03 October 2012	CN 102699524 B	02 March 2016
CN	107511588	A	26 December 2017	None	
CN	1401456	A	12 March 2003	CN 1199757 C	04 May 2005
CN	106425085	A	22 February 2017	None	
CN	102179621	A	14 September 2011	None	
KR	100721862	B1	18 May 2007	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/124564

A. 主题的分类 B23K 26/00(2014.01)i; B23K 26/08(2014.01)i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类		
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) B23K 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNPAT, CNKI, WPI, EPDOC: 江苏大学, 轧辊, 激光, 无序, 无规则, 随机, 毛化, 重叠, 扎堆, 偏转, 首尾, 往复, 多头, 多个, roller, roll, laser, roughen+, texturing, engrav+, mult+, disorder+, random, deflect+, rotat+, reciprocate+		
C. 相关文件		
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 102699524 A (武汉华工激光工程有限责任公司) 2012年 10月 3日 (2012 - 10 - 03) 说明书第7-37段、附图1-4	1-10
A	CN 107511588 A (宝山钢铁股份有限公司) 2017年 12月 26日 (2017 - 12 - 26) 全文	1-10
A	CN 1401456 A (中国科学院上海光学精密机械研究所) 2003年 3月 12日 (2003 - 03 - 12) 全文	1-10
A	CN 106425085 A (武汉市凯瑞迪激光技术有限公司) 2017年 2月 22日 (2017 - 02 - 22) 全文	1-10
A	CN 102179621 A (中国科学院力学研究所) 2011年 9月 14日 (2011 - 09 - 14) 全文	1-10
A	KR 100721862 B1 (POSCO) 2007年 5月 18日 (2007 - 05 - 18) 全文	1-10
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。		
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件		
国际检索实际完成的日期 2019年 7月 9日		国际检索报告邮寄日期 2019年 7月 26日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		授权官员 刘文 电话号码 86-010-53961102

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/124564

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	102699524	A	2012年 10月 3日	CN 102699524 B	2016年 3月 2日
CN	107511588	A	2017年 12月 26日	无	
CN	1401456	A	2003年 3月 12日	CN 1199757 C	2005年 5月 4日
CN	106425085	A	2017年 2月 22日	无	
CN	102179621	A	2011年 9月 14日	无	
KR	100721862	B1	2007年 5月 18日	无	