



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113138231 B

(45) 授权公告日 2021.12.07

(21) 申请号 202110393380.X

G01N 29/26 (2006.01)

(22) 申请日 2021.04.13

G01N 29/275 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

G01N 29/22 (2006.01)

申请公布号 CN 113138231 A

G01N 29/28 (2006.01)

G01N 29/24 (2006.01)

(43) 申请公布日 2021.07.20

审查员 刘俊

(73) 专利权人 武汉理工大学

地址 430070 湖北省武汉市洪山区珞狮路
122号

(72) 发明人 汪小凯 关山月 华林 戴殊同
李一轩

(74) 专利代理机构 湖北武汉永嘉专利代理有限
公司 42102

代理人 王丹

(51) Int. Cl.

G01N 29/06 (2006.01)

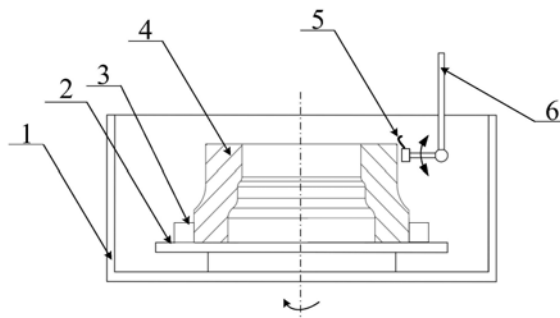
权利要求书3页 说明书8页 附图5页

(54) 发明名称

一种航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测装置及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测方法,包括以下步骤:S1、将机匣环锻件的表面作为检测区域,根据机匣环锻件的截面几何形状,将检测区域划分为凸面区域、凹面区域以及平面区域;S2、根据各检测区域的几何参数设置对应的检测参数;S3、通过检测参数设定相控阵探头的运动轨迹、偏转角度和水层高度;S4、两个相控阵探头沿机匣环锻件内外侧截面轮廓作步进式扫查,机匣环锻件作旋转运动,机匣环锻件在相控阵探头各检测位置旋转一周,依次完成整个机匣环锻件的全区域检测;S5、根据S4采集的机匣环锻件检测信号以及图像,分析机匣环锻件的凸面区域和凹面区域的缺陷尺寸和具体位置。本发明检测灵敏度高、缺陷检出能力强、检测效率高。



1. 一种航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测方法,其特征在于:该方法包括以下步骤:

S1、将机匣环锻件的表面作为检测区域,根据机匣环锻件的截面几何形状,将检测区域划分为凸面区域、凹面区域以及平面区域;其中凸面区域和凹面区域分别由若干凸面圆弧和凹面圆弧构成;设凸面圆弧有a处,凹面圆弧有b处,其中各凸面圆弧半径分别为 $r_1、r_2 \cdots r_a$,各凸面圆弧圆心角分别为 $\varphi_1、\varphi_2 \cdots \varphi_a$,各凹面圆弧半径为 $R_1、R_2 \cdots R_b$,各凹面圆弧圆心角分别为 $\sigma_1、\sigma_2 \cdots \sigma_b$;

S2、根据各凸面圆弧的半径及圆心角范围,分别计算各凸面圆弧的检测参数;根据各凹面圆弧的半径及圆心角范围,分别计算各凹面圆弧的检测参数;根据各平面区域的检测深度范围,分别计算各平面区域的检测参数;

S3、在计算机中为相控阵探头预设各区域的所述的检测参数,利用控制系统预设相控阵的运动轨迹和相控阵探头在各区域的偏转角度和水层高度;其中检测参数包括检测深度H、水层高度h、子孔径阵元数为L、激发阵元总数N;

S4、采用水浸耦合方式,两个相控阵探头分别沿机匣环锻件内侧和外侧截面轮廓作步进式扫查,机匣环锻件作旋转运动,机匣环锻件在相控阵探头各检测位置旋转一周,依次完成整个机匣环锻件的全区域检测,同时采集检测信号和图像;

S5、根据S4采集的机匣环锻件检测信号以及图像,分析机匣环锻件的凸面区域和凹面区域的缺陷尺寸和具体位置。

2. 根据权利要求1所述的航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测方法,其特征在于:S2中所述凸面圆弧的检测参数计算方法如下:

首先建立超声相控阵检测凸面圆弧的参数模型,并以探头阵元阵列作为X轴建立坐标系;凸面圆弧半径为r,凸面圆弧圆心角为 φ ,凸面圆弧方程为 $y = r + h - \sqrt{r^2 - x^2}$,激发阵元总数为N,子孔径阵元数为L,阵元间隔为p,探头总孔径 $D_N = (N-1)p + e$,子孔径 $D_A = (L-1)p + e$,子孔径个数 $K = N - L + 1$;其中e为阵元宽度;探头晶片距离凸面中心的最小距离定义为水层高度h,凸面圆弧检测深度为H,即各阵元产生的超声波在金属内部的聚焦点与凸面圆弧的距离;

凸面圆弧的检测参数依次设置过程如下:

1) 根据被测机匣环锻件的材料和曲面半径选取对应的相控阵探头频率、阵元间隔p以及电子扫描步进;

2) 水层高度h:使h在满足 $h > \frac{c_1}{c_2} r$ 的条件下尽可能小,其中 c_1 为水中的声速, c_2 为金属中的声速;

3) 子孔径阵元数L:凸面圆弧半径r较小时,根据需求增加子孔径阵元数L,以此确定子孔径阵元数L;

4) 激发阵元总数N:根据凸面圆弧与相控阵探头的几何关系,相控阵探头能检测的凸面圆弧最大圆心角 γ 与探头总孔径的关系 D_N 为:

$$\tan \frac{\gamma}{2} = \frac{D_N - D_A}{2(r + h)}$$

根据待测机匣环锻件的凸面圆弧圆心角 φ ,所选择的相控阵探头需满足条件: $\gamma \geq \varphi$,即阵元总数 N 需满足条件:

$$D_N - D_A = (N - L) * p \geq 2(r + h) \tan \frac{\varphi}{2}。$$

3. 根据权利要求2所述的航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测方法,其特征在于:当所述相控阵探头能检测的凸面圆弧最大圆心角 $\gamma < \varphi$ 时,通过相控阵探头沿凸面圆弧旋转增大扫查角度范围,此时相控阵探头旋转角度为: $\varphi' = \varphi - \gamma$ 。

4. 根据权利要求1所述的航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测方法,其特征在于:S2中所述凹面圆弧的检测参数计算方法如下:

首先建立超声相控阵检测凹面圆弧的参数模型,并以探头阵元阵列作为X轴建立坐标系;凹面圆弧半径为 R ,凹面圆弧圆心角为 σ ,凹面圆弧方程为 $y = h - R + \sqrt{R^2 - x^2}$,激发阵元总数为 N ,子孔径阵元数为 L ,阵元间隔为 p ,探头总孔径 $D_N = (N-1)p + e$,子孔径 $D_A = (L-1)p + e$,子孔径个数 $K = N - L + 1$;其中 e 为阵元宽度;探头晶片距离凹面中心的最大距离定义为水层高度 h ,凹面圆弧检测深度为 H ,即各阵元产生的超声波在金属内部的聚焦点与凹面圆弧的距离;

凹面圆弧的检测参数依次设置过程如下:

1) 根据被测机匣环锻件的材料和曲面半径选取对应的相控阵探头频率、阵元间隔 p 以及电子扫描步进;

2) 水层高度 h :水层高度 h 需满足 $h > \frac{c_1}{c_2} H$ 和 $W_0 < 2\sqrt{R^2 - (R - h)^2}$,其中 $W_0 = (N + 1) * p + e$;

3) 子孔径阵元数 L :凹面圆弧半径 r 较小时,根据需求增加子孔径阵元数 L ,以此确定子孔径阵元数 L ;

4) 激发阵元总数 N :假设相控阵探头边缘孔径中心坐标为 $J_i(x_{1i}, 0)$,其在凹面圆弧深度 H 位置聚焦点的坐标为 $F_i(x_{1i}, y_{3i})$,圆心坐标为 $O_1(0, R - h)$,激发阵元总数为 N 的相控阵探头能检测的凹面圆弧最大圆心角 ε 计算公式为:

$$\frac{\varepsilon}{2} = \arcsin\left(\frac{|x_{1i}|}{R + H}\right)$$

其中 $|x_{1i}| = \frac{(N-L)}{2} * p$,根据待检测的凹面圆弧圆心角 σ ,相控阵探头需满足条件: $\varepsilon \geq \sigma$,即激发阵元总数 N 需满足条件:

$$\frac{(N - L) * p}{2(R + H)} \geq \sin\left(\frac{\sigma}{2}\right)。$$

5. 根据权利要求4所述的航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测方法,其特征在于:当所述相控阵探头能检测的凹面圆弧最大圆心角 $\varepsilon < \sigma$ 时,通过相控阵探头沿凹面圆弧旋转增大扫查角度范围,此时相控阵探头旋转角度为: $\sigma' = \sigma - \varepsilon$ 。

6. 根据权利要求2或4所述的航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测方法,其特征在

于:所述凸面圆弧和凹面圆弧的检测参数设置中,各阵元的发射延迟 时间计算过程如下:

所述子孔径中心点为 $J_i(C_i, 0)$,阵元 $M_i(x_{1i}, 0)$ 发射声波到凸面或凹面界面交点 $Q_i(x_{2i}, y_{2i})$,然后到达焦点 $F_i(x_{3i}, y_{3i})$,根据几何关系计算:

$$\tan\theta = \frac{|C_i|}{r+h}$$

$$x_{3i} = (r-h) \tan\theta$$

$$y_{3i} = (r+h) - (r-h) \sin\theta$$

其中 $Q_i(x_{2i}, y_{2i})$ 在圆弧 $y = R + h - \sqrt{r^2 - x^2}$ 上,则第i个阵元发射声波到达聚焦点的时间为:

$$T_i = \frac{\sqrt{(x_{1i} - x_{2i})^2 + (y_{2i})^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{(x_{3i} - x_{2i})^2 + (y_{3i} - y_{2i})^2}}{c_2}$$

根据费马原理,界面折射点 $Q_i(x_{2i}, y_{2i})$ 的横坐标可通过传播时间 T_i 导函数为零求得:

$$\frac{\partial T_i}{\partial x_{2i}} = 0$$

则第i个阵元的发射延迟时间根据上述公式可计算为:

$$\tau_i = T_i - \min(T_i)。$$

7. 用于实现权利要求1-6任一所述的航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测方法的航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测装置,其特征在于:该装置包括:

水箱,用于盛放水浸耦合方式所需的耦合剂;

旋转台,设置于所述水箱底部,用于驱动待测机匣环锻件旋转;

装卡工装,设置于所述旋转台上,用于对待测机匣环锻件进行固定和定位;

机械手,为至少2个,分别设置在待测机匣环锻件内侧和外侧;

相控阵探头,包括内圈相控阵探头和外圈相控阵探头,分别固定于两个所述机械手的执行端,用于在机械手的驱动下沿所述的运动轨迹对机匣环锻件的内侧和外侧各区域进行探查;

相控阵检测仪,用于发射和接收超声信号,与计算机和相控阵探头连接,通过计算机软件设置相控阵检测仪的检测参数并进行检测结果分析。

一种航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测装置及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及超声波无损检测技术领域,具体涉及一种航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测装置及方法。

背景技术

[0002] 根据我国航空工业现行法规和标准的要求,对航空锻件需要进行超声无损检测,以保证航空零部件的质量。

[0003] 航空发动机机匣环件是航空关键零部件,此类环锻件存在大量的异型截面结构,如凸面台阶、凹面R角、凹面沟槽等复杂截面轮廓,如何利用超声波检测技术对此类环锻件曲面内部缺陷进行全面精确检测是迫切需要的。目前,航空机匣环锻件采用常规单探头超声检测,单探头对于曲率过大的凹面和凸面等复杂几何特征,超声波在界面反射散射严重,声束可达性差,缺陷检测困难。常规超声相控阵成像方法,如线扫、扇扫、合成孔径成像等方法无法根据曲面曲率自适应发射超声波,曲面内部声束不能聚焦,造成相控阵成像检测灵敏度差。

[0004] 目前针对复杂曲面构件,一般采用超声相控阵柔性探头或者曲面阵列探头,此类探头采用接触式检测,存在耦合条件不稳定,检测效率低等问题,无法超声自动化检测系统。因此,如何开发机匣环锻件超声相控阵检测方法,实现工业自动化快速检测是急需解决的问题。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测装置及方法,以解决传统超声相控阵检测方法检测效果差、效率低的问题。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明提供了一种技术方案:一种航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测方法,其特征在于:该方法包括以下步骤:

[0007] S1、将机匣环锻件的表面作为检测区域,根据机匣环锻件的截面几何形状,将检测区域划分为凸面区域、凹面区域以及平面区域;其中凸面区域和凹面区域分别由若干凸面圆弧和凹面圆弧构成;设凸面圆弧有a处,凹面圆弧有b处,其中各凸面圆弧半径分别为 r_1 、 $r_2 \cdots r_a$,各凸面圆弧圆心角分别为 φ_1 、 $\varphi_2 \cdots \varphi_a$,各凹面圆弧半径为 R_1 、 $R_2 \cdots R_b$,各凹面圆弧圆心角分别为 σ_1 、 $\sigma_2 \cdots \sigma_b$;

[0008] S2、根据各凸面圆弧的半径及圆心角范围,分别计算各凸面圆弧的检测参数;根据各凹面圆弧的半径及圆心角范围,分别计算各凹面圆弧的检测参数;根据各平面区域的检测深度范围,分别计算各平面区域的检测参数;

[0009] S3、在计算机中为相控阵探头预设各区域的所述的检测参数,利用控制系统预设相控阵的运动轨迹和相控阵探头在各区域的偏转角度和水层高度;其中检测参数包括检测深度H、水层高度h、子孔径阵元数为L、激发阵元总数N;

[0010] S4、采用水浸耦合方式,两个相控阵探头分别沿机匣环锻件内侧和外侧截面轮廓

作步进式扫查,机匣环锻件作旋转运动,机匣环锻件在相控阵探头各检测位置旋转一周,依次完成整个机匣环锻件的全区域检测,同时采集检测信号和图像;

[0011] S5、根据S4采集的机匣环锻件检测信号以及图像,分析机匣环锻件的凸面区域和凹面区域的缺陷尺寸和具体位置。

[0012] 按上述方案,S2中所述凸面圆弧的检测参数计算方法如下:

[0013] 首先建立超声相控阵检测凸面圆弧的参数模型,并以探头阵元阵列作为X轴建立坐标系;凸面圆弧半径为 r ,凸面圆弧圆心角为 φ ,凸面圆弧方程为 $y = r + h - \sqrt{r^2 - x^2}$,激发阵元总数为 N ,子孔径阵元数为 L ,阵元间隔为 p ,探头总孔径 $D_N = (N-1)p+e$,子孔径 $D_A = (L-1)p+e$,子孔径个数 $K=N-L+1$;其中 e 为阵元宽度;探头晶片距离凸面中心的最小距离定义为水层高度 h ,凸面圆弧检测深度为 H ,即各阵元产生的超声波在金属内部的聚焦点与凸面圆弧的距离;

[0014] 凸面圆弧的检测参数依次设置过程如下:

[0015] 1) 根据被测机匣环锻件的材料和曲面半径选取对应的相控阵探头频率、阵元间隔 p 以及电子扫描步进;

[0016] 2) 水层高度 h :使 h 在满足 $h > \frac{c_1}{c_2}r$ 的条件下尽可能小,其中 c_1 为水中的声速, c_2 为金属中的声速;

[0017] 3) 子孔径阵元数 L :凸面圆弧半径 r 较小时,根据需求增加子孔径阵元数 L ,以此确定子孔径阵元数 L ;

[0018] 4) 激发阵元总数 N :根据凸面圆弧与相控阵探头的几何关系,相控阵探头能检测的凸面圆弧最大圆心角 γ 与探头总孔径的关系 D_N 为:

$$[0019] \quad \tan \frac{\gamma}{2} = \frac{D_N - D_A}{2(r + h)}$$

[0020] 根据待测机匣环锻件的凸面圆弧圆心角 φ ,所选择的相控阵探头需满足条件: $\gamma \geq \varphi$,即阵元总数 N 需满足条件:

$$[0021] \quad D_N - D_A = (N - L) * p \geq 2(r + h) \tan \frac{\varphi}{2}$$

[0022] 按上述方案,当所述相控阵探头能检测的凸面圆弧最大圆心角 $\gamma < \varphi$ 时,通过相控阵探头沿凸面圆弧旋转增大扫查角度范围,此时相控阵探头旋转角度为: $\varphi' = \varphi - \gamma$ 。

[0023] 按上述方案,S2中所述凹面圆弧的检测参数计算方法如下:

[0024] 首先建立超声相控阵检测凹面圆弧的参数模型,并以探头阵元阵列作为X轴建立坐标系;凹面圆弧半径为 R ,凹面圆弧圆心角为 σ ,凹面圆弧方程为 $y = h - R + \sqrt{R^2 - x^2}$,激发阵元总数为 N ,子孔径阵元数为 L ,阵元间隔为 p ,探头总孔径 $D_N = (N-1)p+e$,子孔径 $D_A = (L-1)p+e$,子孔径个数 $K=N-L+1$;其中 e 为阵元宽度;探头晶片距离凹面中心的最大距离定义为水层高度 h ,凹面圆弧检测深度为 H ,即各阵元产生的超声波在金属内部的聚焦点与凹面圆弧的距离;

[0025] 凹面圆弧的检测参数依次设置过程如下:

[0026] 1) 根据被测机匣环锻件的材料和曲面半径选取对应的相控阵探头频率、阵元间隔 p 以及电子扫描步进;

[0027] 2) 水层高度 h : 水层高度 h 需满足 $h > \frac{c_1}{c_2} H$ 和 $W_0 < 2\sqrt{R^2 - (R-h)^2}$, 其中 $W_0 = (N+1) * p + e$;

[0028] 3) 子孔径阵元数 L : 凹面圆弧半径 r 较小时, 根据需求增加子孔径阵元数 L , 以此确定子孔径阵元数 L ;

[0029] 4) 激发阵元总数 N : 假设相控阵探头边缘孔径中心坐标为 $J_i(x_{1i}, 0)$, 其在凹面圆弧深度 H 位置聚焦点的坐标为 $F_i(x_{3i}, y_{3i})$, 圆心坐标为 $O_1(0, R-h)$, 激发阵元总数为 N 的相控阵探头能检测的凹面圆弧最大圆心角 ε 计算公式为:

$$[0030] \quad \frac{\varepsilon}{2} = \arcsin\left(\frac{|x_{1i}|}{R+H}\right)$$

[0031] 其中 $|x_{1i}| = \frac{(N-L)}{2} * p$, 根据待检测的凹面圆弧圆心角 σ , 相控阵探头需满足条件: $\varepsilon \geq \sigma$, 即激发阵元总数 N 需满足条件:

$$[0032] \quad \frac{(N-L) * p}{2(R+H)} \geq \sin\left(\frac{\sigma}{2}\right)$$

[0033] 按上述方案, 当所述相控阵探头能检测的凹面圆弧最大圆心角 $\varepsilon < \sigma$ 时, 通过相控阵探头沿凹面圆弧旋转增大扫查角度范围, 此时相控阵探头旋转角度为: $\sigma' = \sigma - \varepsilon$ 。

[0034] 按上述方案, 所述凸面圆弧和凹面圆弧的检测参数设置中, 各阵元的发射延迟时间计算过程如下:

[0035] 所述子孔径中心点为 $J_i(C_i, 0)$, 阵元 $M_i(x_{1i}, 0)$ 发射声波到凸面或凹面界面交点 $Q_i(x_{2i}, y_{2i})$, 然后到达焦点 $F_i(x_{3i}, y_{3i})$, 根据几何关系计算:

$$[0036] \quad \tan\theta = \frac{|C_i|}{r+h}$$

$$[0037] \quad x_{3i} = (r-h) \tan\theta$$

$$[0038] \quad y_{3i} = (r+h) - (r-h) \sin\theta$$

[0039] 其中 $Q_i(x_{2i}, y_{2i})$ 在圆弧 $y = R+h - \sqrt{r^2 - x^2}$ 上, 则第 i 个阵元发射声波到达聚焦点的时间为:

$$[0040] \quad T_i = \frac{\sqrt{(x_{1i} - x_{2i})^2 + (y_{2i})^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{(x_{3i} - x_{2i})^2 + (y_{3i} - y_{2i})^2}}{c_2}$$

[0041] 根据费马原理, 界面折射点 $Q_i(x_{2i}, y_{2i})$ 的横坐标可通过传播时间 T_i 导函数为零求得:

$$[0042] \quad \frac{\partial T_i}{\partial x_{2i}} = 0$$

[0043] 则第 i 个阵元的发射延迟时间根据上述公式可计算为:

$$[0044] \quad \tau_i = T_i - \min(T_i)$$

- [0045] 一种航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测装置,该装置包括:
- [0046] 水箱,用于盛放水浸耦合方式所需的耦合剂;
- [0047] 旋转台,设置于所述水箱底部,用于驱动待测机匣环锻件旋转;
- [0048] 装卡工装,设置于所述旋转台上,用于对待测机匣环锻件进行固定和定位;
- [0049] 机械手,为至少2个,分别设置在待测机匣环锻件内侧和外侧;
- [0050] 相控阵探头,包括内圈相控阵探头和外圈相控阵探头,分别固定于两个所述机械手的执行端,用于在机械手的驱动下沿所述的运动轨迹对机匣环锻件的内侧和外侧各区域进行探查;
- [0051] 相控阵检测仪,用于发射和接收超声信号,与计算机和相控阵探头连接,通过计算机软件设置相控阵检测仪的检测参数并进行检测结果分析。
- [0052] 本发明的有益效果是:根据待测发动机机匣环锻件的截面的凸面圆弧半径和凹面圆弧半径,计算对应的检测参数,最大程度地提高了超声波入射能量,明确了检测范围,大大提高了检测灵敏度和缺陷检出能力;根据检测参数的设置实现了凸面区域和凹面区域的一次性扫查,减小了相控阵探头的旋转角度,简化了相控阵探头的运动轨迹,提高了检测效率
- [0053] 进一步地,通过采用水浸耦合方式,设置由两个机械手分别控制的内圈相控阵探头和外圈相控阵探头,旋转台旋转带动被装卡工装固定的发动机机匣环锻件,相比单相控阵探头检查方式,减少了扫查步进步数,提高了缺陷检测率。

附图说明

- [0054] 图1为本发明一实施例的装置结构示意图;
- [0055] 图2为本发明一实施例的相控阵探头扫查轨迹示意图;
- [0056] 图3为本发明一实施例的凸面圆弧的检测参数示意图;
- [0057] 图4为本发明一实施例的凹面圆弧的检测参数示意图;
- [0058] 图5为本发明一实施例的平面区域的检测参数示意图;
- [0059] 图6为本发明一实施例的航空发动机机匣环锻件尺寸示意图;
- [0060] 图7为本发明一实施例的凹面与凸面试块与相控阵检测成像图。
- [0061] 图中:1-水箱,2-旋转台,3-装卡工装,4-机匣环锻件,5-相控阵探头,6-机械手,7-聚焦线。

具体实施方式

[0062] 为使本公开实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本公开实施例的附图,对本公开实施例的技术方案进行清楚、完整地描述。显然,所描述的实施例是本公开的一部分实施例,而不是全部的实施例。基于所描述的本公开的实施例,本领域普通技术人员在无需创造性劳动的前提下所获得的所有其他实施例,都属于本公开保护的范围。

[0063] 一种航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测方法,包括以下步骤:

[0064] S1、将机匣环锻件4表面作为检测区域,根据机匣环锻件4的截面几何形状,将检测区域划分为凸面区域、凹面区域以及平面区域;其中凸面区域和凹面区域分别由若干凸面圆弧和凹面圆弧构成;设凸面圆弧有a处,凹面圆弧有b处,其中各凸面圆弧半径分别为 r_1 、

$r_2 \cdots r_a$, 各凸面圆弧圆心角分别为 $\varphi_1, \varphi_2 \cdots \varphi_a$, 各凹面圆弧半径为 $R_1, R_2 \cdots R_b$, 各凹面圆弧圆心角分别为 $\sigma_1, \sigma_2 \cdots \sigma_b$;

[0065] S2、根据各凸面圆弧的半径及圆心角范围, 分别计算各凸面圆弧的检测参数; 根据各凹面圆弧的半径及圆心角范围, 分别计算各凹面圆弧的检测参数; 根据各平面区域的检测深度范围, 分别计算各平面区域的检测参数;

[0066] S3、在计算机中为相控阵探头5预设各区域的所述的检测参数, 利用控制系统相控阵探头5的运动轨迹和相控阵探头5在各区域的偏转角度和水层高度; 其中检测参数包括检测深度H、水层高度h、子孔径阵元数为L、激发阵元总数N;

[0067] S4、采用水浸耦合方式, 两个相控阵探头5分别沿机匣环锻件4内侧和外侧截面轮廓作步进式扫查, 相控阵探头5扫查轨迹参见图2, 机匣环锻件4作旋转运动, 机匣环锻件4在相控阵探头5各检测位置旋转一周, 依次完成整个机匣环锻件4的全区域检测, 同时采集检测信号和图像;

[0068] S5、根据S4采集的机匣环锻件4检测信号以及图像, 分析机匣环锻件4的凸面区域和凹面区域的缺陷尺寸和具体位置。

[0069] 进一步地, S2中所述凸面圆弧的检测参数计算方法如下:

[0070] 参见图3, 首先建立超声相控阵检测凸面圆弧的参数模型, 并以探头阵元阵列作为X轴建立坐标系; 凸面圆弧半径为r, 凸面圆弧圆心角为 φ , 凸面圆弧方程为 $y = r + h - \sqrt{r^2 - x^2}$, 激发阵元总数为N, 子孔径阵元数为L, 阵元间隔为p, 探头总孔径 $D_N = (N-1)p + e$, 子孔径 $D_A = (L-1)p + e$, 子孔径个数 $K = N - L + 1$; 其中e为阵元宽度; 探头晶片距离凸面中心的最小距离定义为水层高度h, 凸面圆弧检测深度为H, 即各阵元产生的超声波在金属内部的聚焦点与凸面圆弧的距离;

[0071] 凸面圆弧的检测参数依次设置过程如下:

[0072] 1) 根据被测机匣环锻件4的材料和曲面半径选取对应的相控阵探头5频率、阵元间隔p以及电子扫描步进;

[0073] 2) 水层高度h: 使h在满足 $h > \frac{c_1}{c_2} r$ 的条件下尽可能小, 其中 c_1 为水中的声速, c_2 为金属中的声速;

[0074] 3) 子孔径阵元数L: 凸面圆弧半径r较小时, 根据需求增加子孔径阵元数L, 以此确定子孔径阵元数L;

[0075] 4) 激发阵元总数N: 根据凸面圆弧与相控阵探头5的几何关系, 相控阵探头5能检测的凸面圆弧最大圆心角 γ 与探头总孔径的关系 D_N 为:

$$[0076] \quad \tan \frac{\gamma}{2} = \frac{D_N - D_A}{2(r + h)}$$

[0077] 根据待测机匣环锻件4的凸面圆弧圆心角 φ , 所选择的相控阵探头5需满足条件: $\gamma \geq \varphi$, 即阵元总数N需满足条件:

$$[0078] \quad D_N - D_A = (N - L) * p \geq 2(r + h) \tan \frac{\varphi}{2}$$

[0079] 进一步地,当所述相控阵探头5能检测的凸面圆弧最大圆心角 $\gamma < \varphi$ 时,通过相控阵探头5沿凸面圆弧旋转增大扫查角度范围,此时相控阵探头5旋转角度为: $\varphi' = \varphi - \gamma$ 。

[0080] 进一步地,S2中所述凹面圆弧的检测参数计算方法如下:

[0081] 参见图4,首先建立超声相控阵检测凹面圆弧的参数模型,并以探头阵元阵列作为X轴建立坐标系;凹面圆弧半径为R,凹面圆弧圆心角为 σ ,凹面圆弧方程为 $y = h - R + \sqrt{R^2 - x^2}$,激发阵元总数为N,子孔径阵元数为L,阵元间隔为p,探头总孔径 $D_N = (N-1)p+e$,子孔径 $D_A = (L-1)p+e$,子孔径个数 $K=N-L+1$;其中e为阵元宽度;探头晶片距离凹面中心的最大距离定义为水层高度h,凹面圆弧检测深度为H,即各阵元产生的超声波在金属内部的聚焦点与凹面圆弧的距离;

[0082] 凹面圆弧的检测参数依次设置过程如下:

[0083] 1) 根据被测机匣环锻件4的材料和曲面半径选取对应的相控阵探头5频率、阵元间隔p以及电子扫描步进;

[0084] 2) 水层高度h:水层高度h需满足 $h > \frac{c_1}{c_2}H$ 和 $W_0 < 2\sqrt{R^2 - (R-h)^2}$,其中 $W_0 = (N+1)*p+e$;

[0085] 3) 子孔径阵元数L:凹面圆弧半径r较小时,根据需求增加子孔径阵元数L,以此确定子孔径阵元数L;

[0086] 4) 激发阵元总数N:假设相控阵探头5边缘孔径中心坐标为 $J_i(x_{1i}, 0)$,其在凹面圆弧深度H位置聚焦点的坐标为 $F_i(x_{1i}, y_{3i})$,圆心坐标为 $O_1(0, R-h)$,激发阵元总数为N的相控阵探头5能检测的凹面圆弧最大圆心角 ε 计算公式为:

$$[0087] \quad \frac{\varepsilon}{2} = \arcsin\left(\frac{|x_{1i}|}{R+H}\right)$$

[0088] 其中 $|x_{1i}| = \frac{(N-L)}{2} * p$,根据待检测的凹面圆弧圆心角 σ ,相控阵探头5需满足条件: $\varepsilon \geq \sigma$,即激发阵元总数N需满足条件:

$$[0089] \quad \frac{(N-L)*p}{2(R+H)} \geq \sin\left(\frac{\sigma}{2}\right)$$

[0090] 进一步地,当所述相控阵探头5能检测的凹面圆弧最大圆心角 $\varepsilon < \sigma$ 时,通过相控阵探头5沿凹面圆弧旋转增大扫查角度范围,此时相控阵探头5旋转角度为: $\sigma' = \sigma - \varepsilon$ 。

[0091] 进一步地,所述凸面圆弧和凹面圆弧的检测参数设置中,各阵元的发射延迟时间计算过程如下:

[0092] 所述子孔径中心点为 $J_i(C_i, 0)$,阵元 $M_i(x_{1i}, 0)$ 发射声波到凸面或凹面界面交点 $Q_i(x_{2i}, y_{2i})$,然后到达焦点 $F_i(x_{3i}, y_{3i})$,根据几何关系计算:

$$[0093] \quad \tan\theta = \frac{|C_i|}{r+h}$$

$$[0094] \quad x_{3i} = (r-h) \tan\theta$$

$$[0095] \quad y_{3i} = (r+h) - (r-H) \sin\theta$$

[0096] 其中 $Q_i(x_{2i}, y_{2i})$ 在圆弧 $y = R + h - \sqrt{r^2 - x^2}$ 上,则第 i 个阵元发射声波到达聚焦点的时间为:

$$[0097] \quad T_i = \frac{\sqrt{(x_{1i} - x_{2i})^2 + (y_{2i})^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{(x_{3i} - x_{2i})^2 + (y_{3i} - y_{2i})^2}}{c_2}$$

[0098] 根据费马原理,界面折射点 $Q_i(x_{2i}, y_{2i})$ 的横坐标可通过传播时间 T_i 导函数为零求得:

$$[0099] \quad \frac{\partial T_i}{\partial x_{2i}} = 0$$

[0100] 则第 i 个阵元的发射延迟时间根据上述公式可计算为:

$$[0101] \quad \tau_i = T_i - \min(T_i)$$

[0102] 进一步地,相控阵探头5检测平面区域时的参数参见图5。

[0103] 参见图1,一种航空发动机机匣环锻件超声相控阵检测装置,该装置包括:

[0104] 水箱1,用于盛放水浸耦合方式所需的耦合剂;

[0105] 旋转台2,设置于水箱1底部,用于驱动待测机匣环锻件4旋转;

[0106] 装卡工装3,设置于旋转台2上,用于对待测机匣环锻件4进行固定和定位;

[0107] 机械手6,为至少2个,分别设置在待测机匣环锻件4内侧和外侧;

[0108] 相控阵探头5,包括内圈相控阵探头和外圈相控阵探头,分别固定于两个机械手6的执行端,用于在机械手6的驱动下沿所述的运动轨迹对机匣环锻件4的内侧和外侧各区域进行探查;

[0109] 相控阵检测仪,用于发射和接收超声信号,与计算机和相控阵探头5连接,通过计算机软件设置相控阵检测仪的检测参数并进行检测结果分析。

[0110] 本实施例中,参见图6,待测的机匣环锻件4参数为:内径 $D_1 = 750\text{mm}$,外径 $D_2 = 850\text{mm}$,外表面凹面圆弧半径为 $R_1 = 35\text{mm}$,圆心角为 $\sigma_1 = 45^\circ$;内表面的凸面圆弧半径和圆心角分别为 $r_1 = 10\text{mm}$, $\varphi_1 = 60^\circ$ 和 $r_2 = 15\text{mm}$, $\varphi_2 = 60^\circ$;内表面凹面圆弧半径和圆心角分别为 $R_2 = 15\text{mm}$, $\sigma_2 = 60^\circ$ 和 $R_3 = 20\text{mm}$, $\sigma_1 = 60^\circ$,环件高度为 120mm ,检测深度 $H = 10\text{mm}$,机匣环锻件4材料为高温合金,耦合剂为水;

[0111] 本实施例中采用两个相控阵探头5,使用水浸法同时检测,针对机匣环锻件4的截面内外轮廓按凸面和凹面划分检测区域,分别采用上述检测参数计算方法针对不同曲率的凸面圆弧和凹面圆弧进行检测参数设定:

[0112] 凸面区域检测参数设定如下:

[0113] 凸面区域选用的相控阵探头5参数为:探头频率 10MHz ,激发阵元总数 $N = 64$,阵元间隔 $p = 0.6\text{mm}$,阵元宽度 $e = 0.5\text{mm}$,扫描步进为一个阵元,探头总宽度 $W_0 = p(N-1) + e = 38.3\text{mm}$;

[0114] 根据上述凸面区域检测参数计算方法,将凸面圆弧半径代入公式计算,得到各参数限制条件,依次确定水层高度 h 、子孔径阵元数 L 和激发阵元总数 N ,选择声场最佳参数如下:

	凸面圆弧半径	水层高度 h	子孔径阵元数 L	激发阵元总数 N	扫查角 γ	探头旋转角 φ'
[0115]	$r_1 = 10\text{mm}$	3mm	24	64	42.71°	17.29°
	$r_2 = 15\text{mm}$	4mm	20	64	34.79°	25.21°

[0116] 凹面区域检测参数设定如下:

[0117] 凹面区域选用的相控阵探头5参数为:凹面圆弧 R_1 和 R_3 对应激发阵元总数为64的探头,探头频率为5MHz;凹面 R_2 采用激发阵元总数 N 为32,探头频率为10MHz;阵元间隔 $p = 0.6\text{mm}$,阵元宽度 $e = 0.5\text{mm}$,扫描步进为一个阵元,探头总宽度 $W_0 = p(N-1) + e = 19.1\text{mm}$ 。

[0118] 根据上述凹面区域检测参数计算方法,将凹面圆弧半径代入公式计算,得到各参数限制条件,依次确定水层高度 h 、子孔径阵元数 L 和激发阵元总数 N ,选择声场最佳参数如下:

[0119]	凹面圆弧半径	水层高度 h	子孔径阵元数 L	激发阵元总数 N	扫查角 ε	探头旋转角 σ'
	$R_1 = 35\text{mm}$	20mm	12	64	40.56°	4.44°
	$R_2 = 15\text{mm}$	15mm	16	64	57.36°	2.64°
	$R_3 = 20\text{mm}$	10mm	20	32	16.56°	43.44°

[0120] 根据上述计算结果,选择对应型号的相控阵探头5,在计算机中预设相控阵探头5在各位置的检测参数(检测深度 H 、水层高度 h 、子孔径阵元数为 L 、激发阵元总数 N),利用控制系统预设机械手的运动轨迹和相控阵探头在各位置的偏转角度 σ' 和水层高度 h ;

[0121] 本实施例利用M2M工业用相控阵检测仪器PANTER和Acquire1.2检测软件对凸面和凹面试块中的横通孔缺陷进行曲面电子扫描聚焦成像,检测参数按上述方法设置,检测结果如图7所示。

[0122] 以上所述仅为本发明的实施例,并非因此限制本发明的专利范围,凡是利用本发明说明书及附图内容所作的等效结构或等效流程变换,或直接或间接运用在其它相关的技术领域,均同理包括在本发明的专利保护范围内。

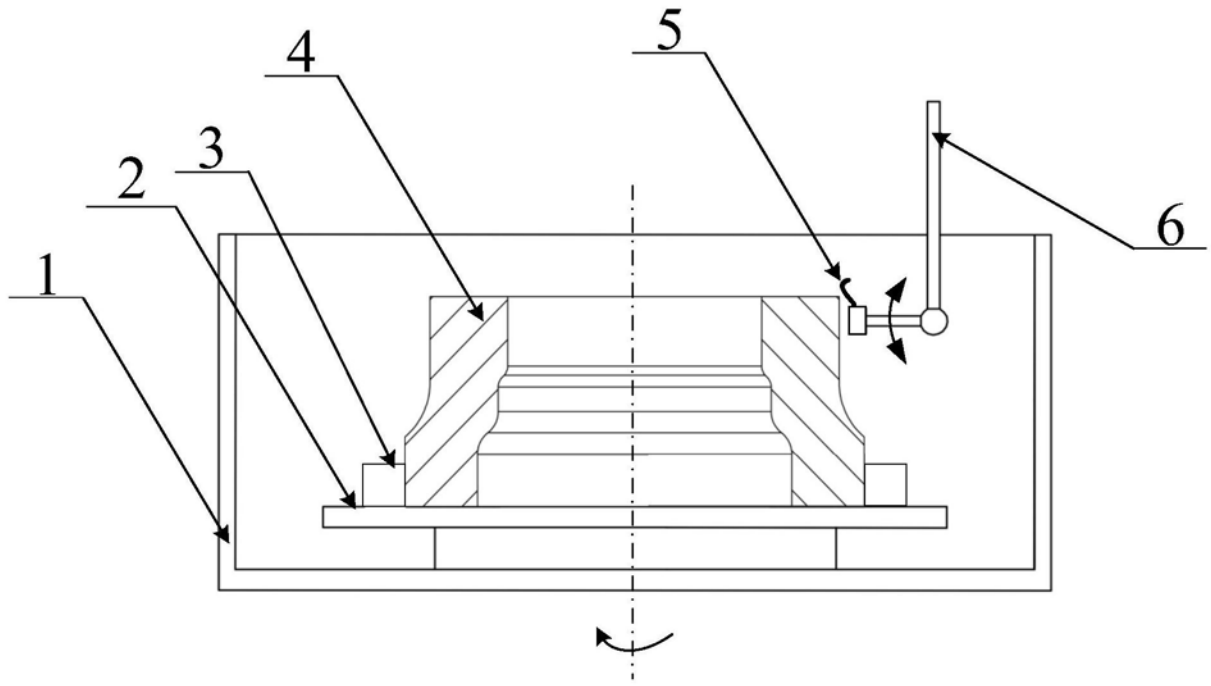


图1

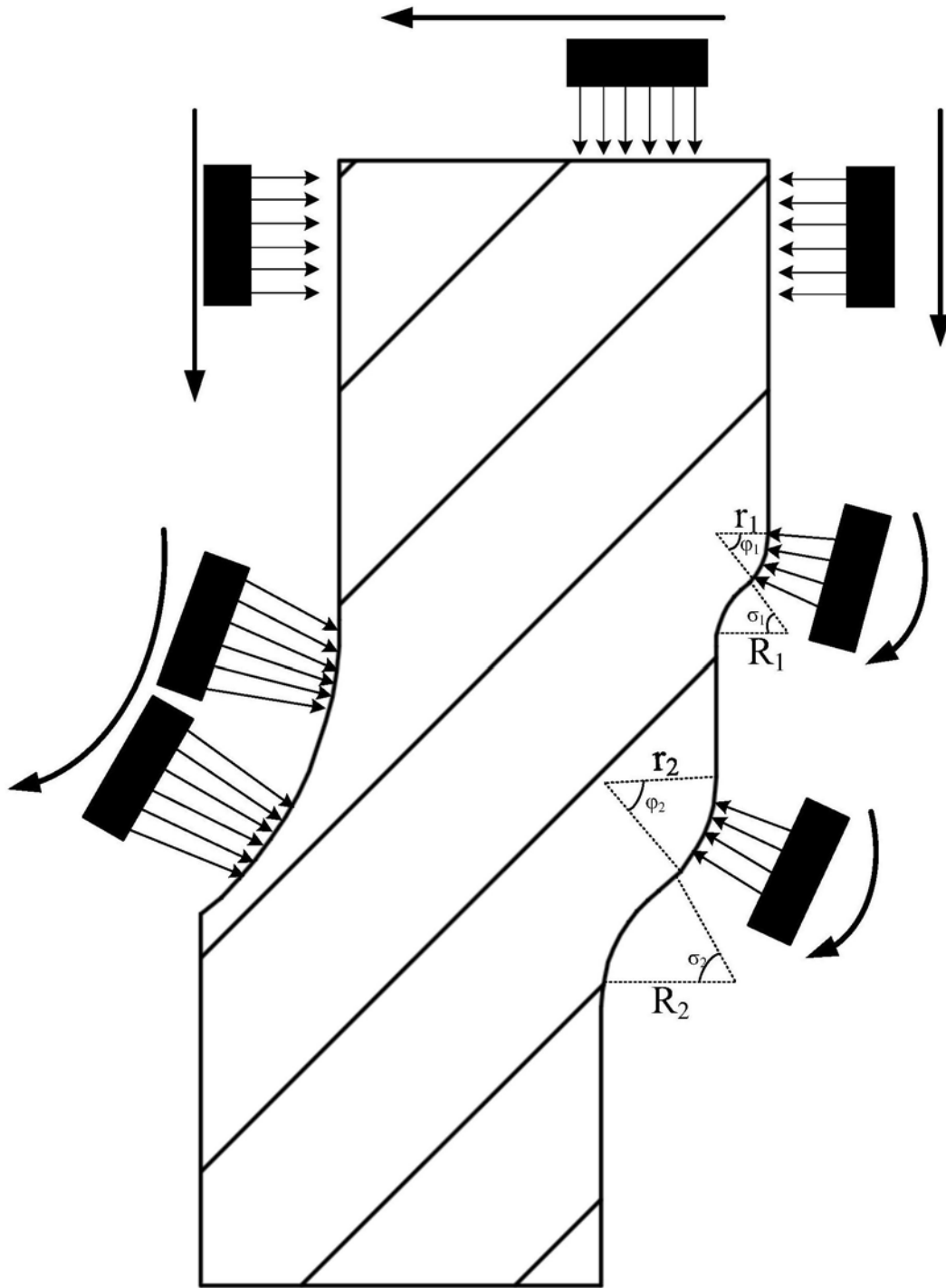


图2

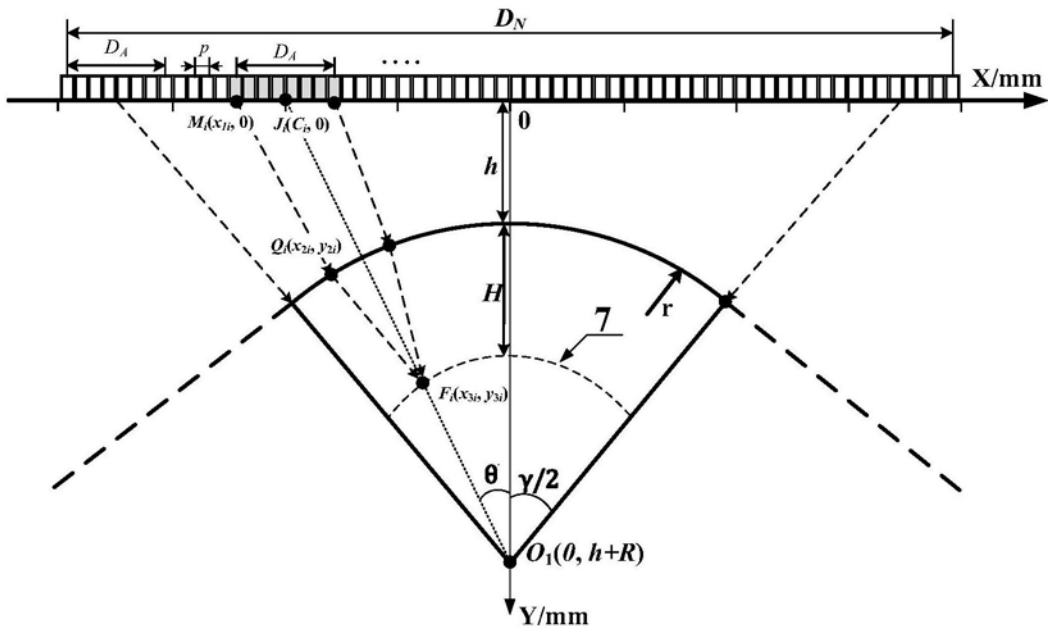


图3

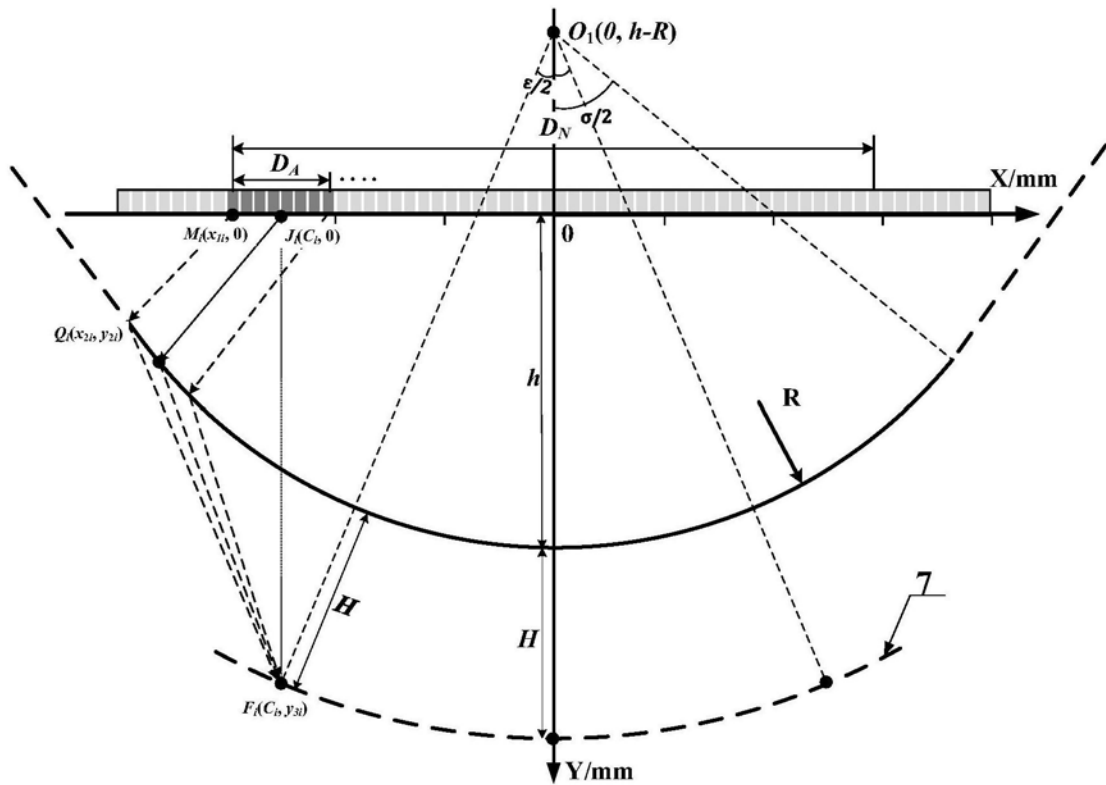


图4

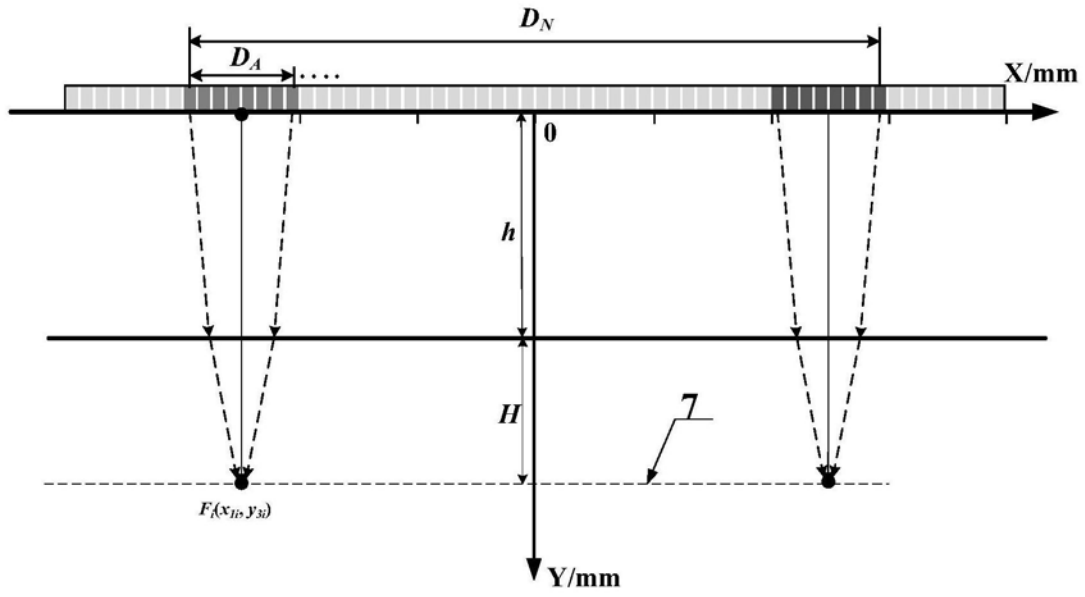


图5

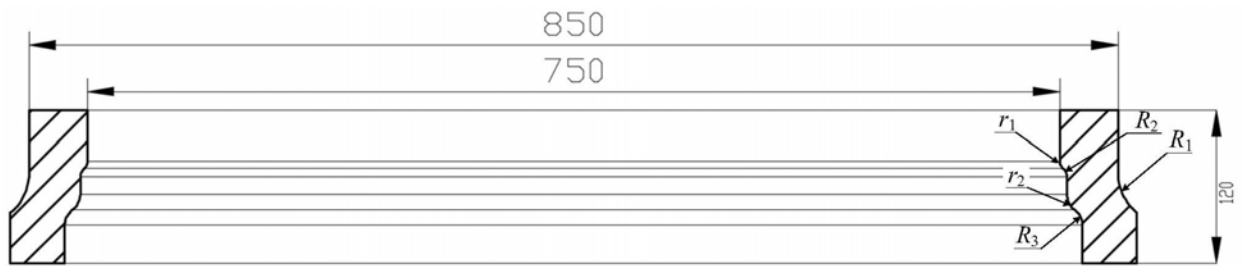


图6

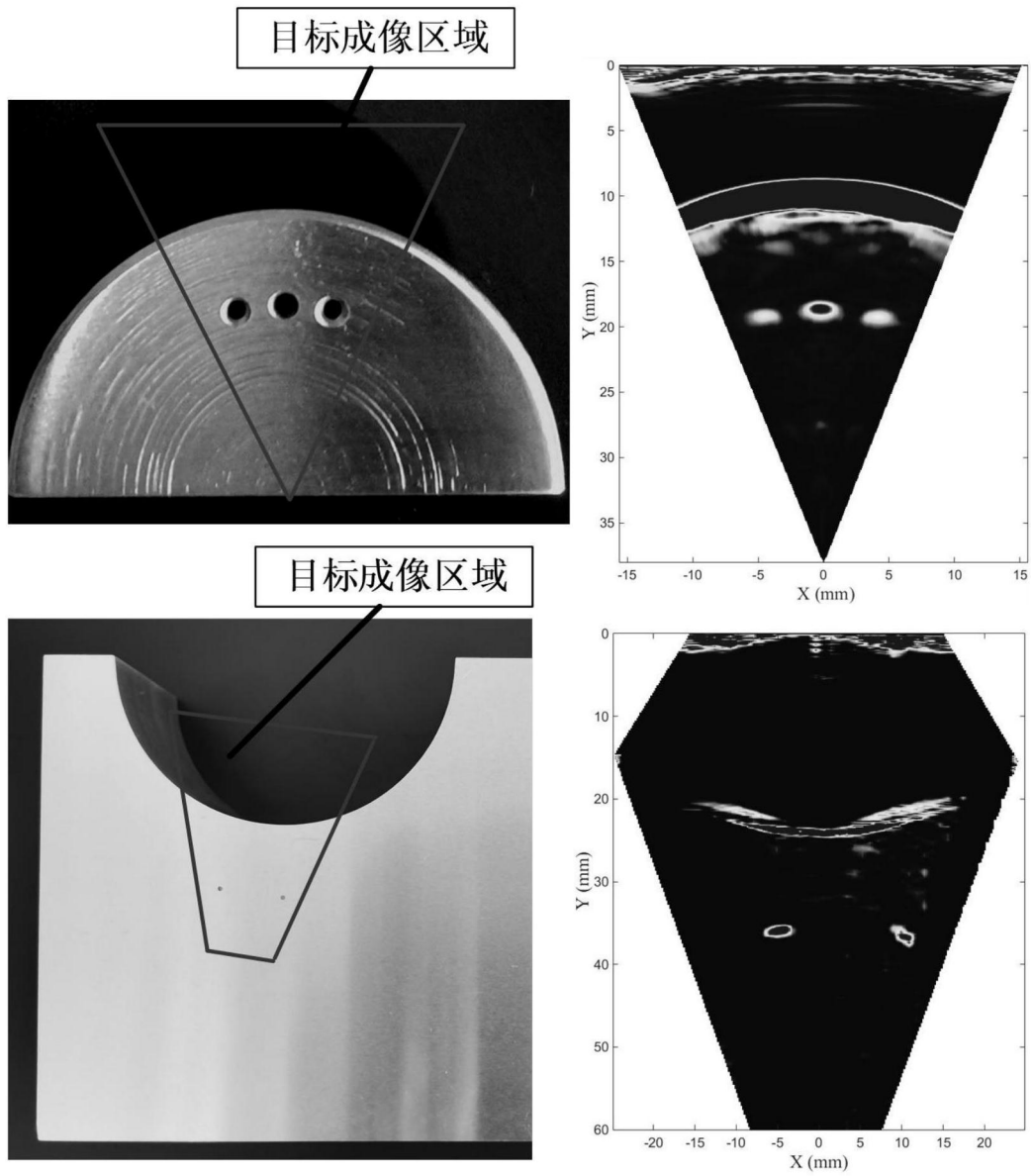


图7