

基于图像分析的粘接质量评价系统设计

王新德¹, 王文强¹, 钟峰²

(1. 西安维控自动化科技有限公司, 西安 710065;

2. 中国航天科工集团第六研究院二二零所, 西安 710065)

摘要: 目前对发动机防热结构件的粘接质量的判断采用电磁超声波进行无损检测, 检测人员只能通过超声波返回的 A 波波形进行粘接缺陷的评估; 这种检测方法效率低, 准确度低, 对人员要求高且无法实现在线检测, 严重影响产品量产; 针对此类情况, 采用数据可视化、智能图像分析的方法, 建立一套粘接质量评价系统; 系统包含了对测量结果数据进行过滤处理; 根据工件尺寸按照法线函数展开成二维模型; 为二维模型填充缺陷信息从而实现粘接效果可视化; 采用二值法建立缺陷矩阵; 通过粒子法求解缺陷的面积; 采用缺陷矩阵扩张的方法, 解决相邻缺陷的识别问题; 再通过特征值数组的方法解决从 3D 展开至 2D 时展开边界切割缺陷区域的问题, 从而完整地描述发动机防热结构件粘接质量的全面特征, 为粘接质量评价提供了直接依据。

关键词: 粘接质量; 二值法; 粒子法; 矩阵扩张

Design of Bonding Quality Evaluation System Based on Image Analysis Technology

Wang Xinde¹, Wang Wenqiang¹, Zhong Feng²

(1. Xi'an WeiKong Automation Technology Co., Ltd, Xi'an 710065; 2. The No. 210 Institute of

The Sixth Academy of China Aerospace Science & Industry Corporation, Xi'an 710065 710065)

Abstract: At present, electromagnetic ultrasonic wave is used to judge the bonding quality of engine thermal protection structure parts, and the inspection personnel can only evaluate the bonding defects through a-wave shape returned by ultrasonic wave. This detection method has low efficiency, low accuracy, high requirements for personnel and can not realize online detection, which seriously affects the mass production of products. In view of this kind of situation, a set of adhesive quality evaluation system is established by means of data visualization and intelligent image analysis. The system includes filtering the measured data; expanding the two-dimensional model according to the normal function according to the size of the workpiece; filling the defect information for the two-dimensional model to realize the visualization of the bonding effect; using the binary method to establish the defect matrix; using the particle method to solve the defect area product; using the defect matrix expansion method to solve the problem of adjacent defects identification; and then through the feature The method of value array can solve the problem of cutting the defect area from 3D to 2D, so as to fully describe the overall characteristics of bonding quality of engine thermal protection structure parts, and provide a direct basis for bonding quality evaluation.

Keywords: Bonding quality; Binary method; Particle method; Matrix extension

0 引言

固体火箭发动机的防热结构件是固体火箭的重要部件, 由金属外罩(常规为钢和铝)和绝热内衬通过胶粘接、压装、固化成形, 能够保证发动机在高温、高振动冲击环境下可靠工作。因此, 金属外罩与绝热内衬的粘接质量直接决定防热结构件的成品率。在防热结构件的生产过程中, 不可避免的有空气混入粘合剂中, 当产品经过粘接、压装和固化成形后, 在金属外罩和绝热内衬之间会形成气泡, 气泡的面积大小, 形状和气泡的分布决定了产品的粘接质量是否符合成品要求。

在目前的生产过程中, 由于缺乏高效的检测手段, 严

重制约产品的量产能力。主要体现在以下几个方面:

1) 现有生产方式因采取固化后检测方式, 缺少在线式检测方式及固化前检测手段, 当发现粘接缺陷后已经无法挽救, 导致质量成本居高不下。因此亟需一种在线检测的手段, 在压粘工序后即可进行粘接质量检测, 一旦发现粘接缺陷, 立刻重新粘接, 从而避免造成无法挽救的损失。

2) 粘接工序因其品种多、工作量大、固化周期长的工艺特点导致其成为批量生产主要瓶颈环节之一。

3) 在检测过程中, 采用人工检测, 通过超声波回波的 a 波图形来人工判读^[1], 对于检测人员的要求很高, 而且检测人员需要时刻关注波形的变化, 人员工作强度大、负荷重、误判率也很高。人工检测时, 通过 a 波波形判断脱粘缺

收稿日期: 2020-11-25; 修回日期: 2020-12-04。

作者简介: 王新德(1968-), 男, 陕西西安人, 研究员, 本科, 主要从事固体火箭发动机测试技术方向的研究。

引用格式: 王新德, 王文强, 钟峰. 基于图像分析的粘接质量评价系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(1): 240-245.

陷以主观因素、经验判断为主, 标准不统一, 对于判断依据和做出结论无量化指标。

4) 在检测过程中, 一些产品需要涂抹耦合剂, 某些产品却不能用任何的耦合剂; 而涂抹耦合剂的产品, 在检测完毕后又需要清理耦合剂, 因此造成检测操作复杂, 且增加了多余的工序。

为了提高生产效率, 加快产品的列装速度, 针对固体火箭发动机耐热构件压装粘接过程设计了在线电磁超声无损检测质量评价系统。系统布置在压粘工序后, 检测时与工件不接触, 直接读取电磁超声 a 波的数据, 然后结合发动机的外形尺寸生成粘接缺陷的二维图形, 自动画出每个粘接缺陷区域的形状、分布, 对于相邻缺陷之间距离小于标准值的缺陷自动合并, 并自动计算每块粘接缺陷的面积, 给出粘接质量评价结果, 提升粘接质量的检测过程, 避免因粘接质量不合格造成的产品损失。

1 无损检测粘接质量评价系统结构

无损检测粘接质量评价系统的结构如图 1 所示。耐热结构件采用钢壳体材质, 外形呈锥台体, 采用专用公装安装在测试台上, 由伺服电机带动做匀角速度转动。电磁超声检测仪测量探头在距离结构件表面小于 2 mm 的位置进行检测, 测量探头由伺服电机带动, 沿着耐热结构件法线方向匀速移动, 从锥台体的上表面一直测量到下表面结束。所有的设备的运动过程由控制器控制自动完成, 采集的数据由无损检测粘接质量评价系统软件接收并分析。

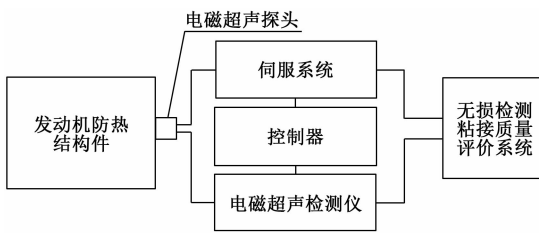


图 1 无损检测质量评价系统结构图

电磁超声波检测仪的型号为 ECTMAT-180, 探头直径 $\Phi 18$ mm, 伺服系统采用 DB100 直流伺服电机, 控制器采用 Ti 公司的 ARM A15 CPU 作为主控制器, 粘接质量评价软件采用 NI 公司的 Labview 2016 开发完成。

系统工作时, 测量声速为: 3 225 m/s, 超声波发射频率为: 3 840 Hz。^[2]

在每一时刻, 控制器将电磁超声检测仪的测量探头的实时位置, 电磁超声检测仪测量的该位置的粘接质量信息一并传送给粘接质量评价系统软件, 评价系统软件根据这两项数据和预设的坐标系, 完成绘图过程, 并展开粘接质量评价。

2 无损检测粘接质量评价系统实现技术路线

无损检测粘接质量评价系统主要包含 2 个部分的功能,

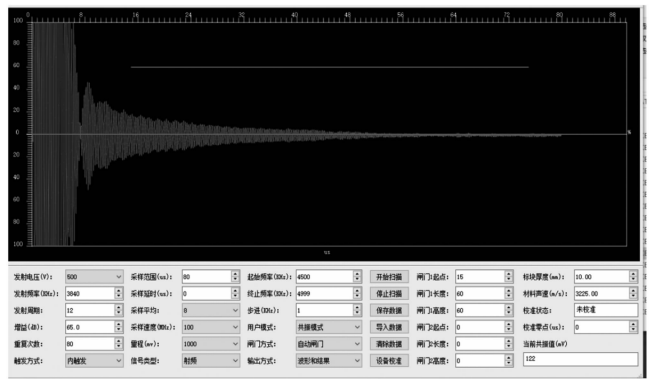


图 2 电磁超声测量时的 A 波

第一部分是把从控制器接收到的数据进行可视化。在这个过程中, 主要采用三维网格化建模, 将待测工件根据其法线的函数旋转形成三维模型^[3], 然后根据电磁超声的最小分辨率^[4], 对其轮廓表面进行网格化划分, 而后进行二维极坐标展开^[5], 用不同的色块填充相应位置的缺陷信息, 形成可视化图像。第二部分是对形成的可视化图形进行分析, 采用二值法建立缺陷矩阵^[6], 根据可视化图像的尺寸建立缩放系数, 然后通过粒子法求解缺陷的面积^[7], 采用缺陷矩阵扩张^[8]的方法, 解决相邻缺陷的识别问题, 在通过特征值数组的方法解决从 3D 展开至 2D 时展开边界切割缺陷区域的问题, 从而完整地描述缺陷的特征, 并根据判断标准完成粘接缺陷质量的评价。

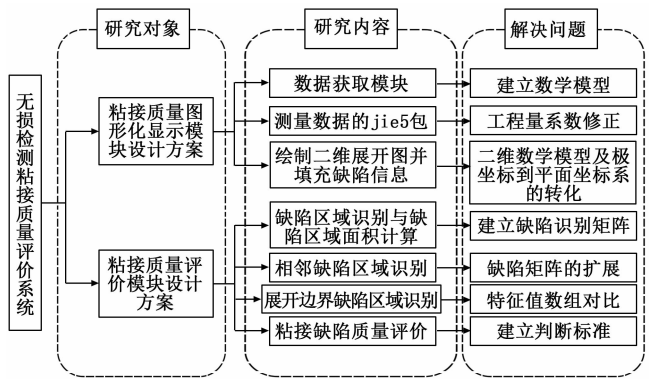


图 3 粘接质量评价系统技术路线图

3 无损检测粘接质量评价系统实现方案

3.1 结构件上点的数据建模

如图 4 所示, 耐热结构件外形呈锥台形, 上底半径为 R_0 , 下底半径为 R , 锥体高度为 H 。对于壳体上的任何一个点 P , 都可以用 $P(h, r, \theta, V)$ 来描述其位置信息。其中 h 表示 P 点距离锥台上表面的高度, r 代表 P 在距离旋转轴线的半径, θ 表示 P 点所在的法线距离 0° 法线的角度, V 代表 P 点的缺陷状态, 当 $V=0$ 时, 代表该点为正常, 不是缺陷; 当 $V=1$ 时, 代表该点为缺陷。

粘接质量评价系统从超声波检测仪和伺服系统中获取

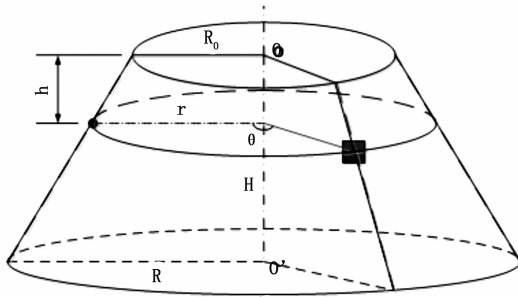


图 4 隔热结构件的数学模型

测量结果，每一个点的测量结果采用 11 个字节表示。其中：

0、1、2 三个字节代表高度 (h)；3、4、5 三个字节代表半径 (r)；6、7、8 三个字节代表角度 (θ)；9 字节代表置信度 (η)；10 字节代表测量结果 (V)。

高度 h ，半径 r ，角度 θ 都采用浮点数表示，前两个字节代表整数部分，第三个字节代表小数部分。

置信度 η 表示本次测量结果的可信度，取值范围为：0~100。当 $\eta < 75$ 时，表示本次测量不可信，测量结果不采纳；反之接受测量结果。

读取数据的流程图如图 5。

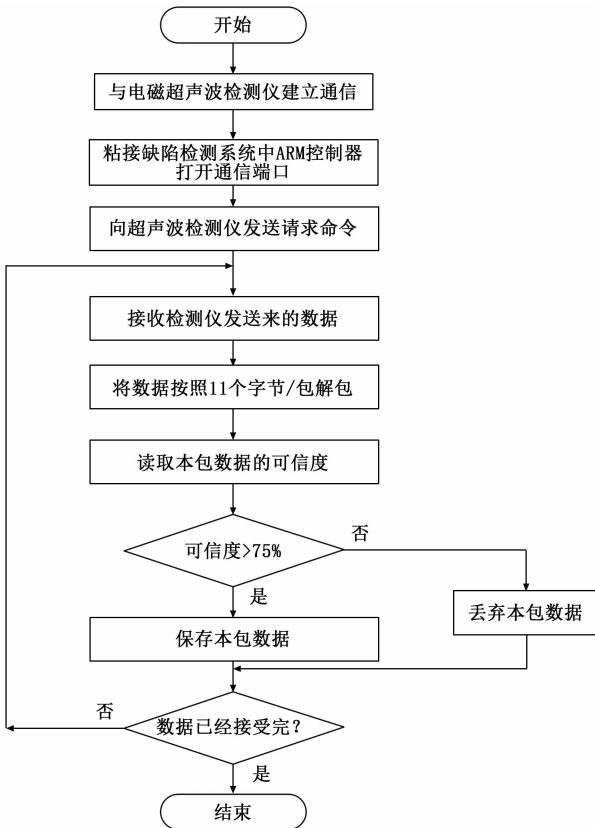


图 5 数据读取模块流程图

3.2 测量数据的解包

从超声波检测仪中接收的测量数据是经过 DSP 编码后

采用十六进制格式保存的结果，评价系统无法直接使用，需要通过数据处理模块进行分解和工程量的转化。

对于高度 h ，半径 r 和角度 θ ，都采用 3 个字节定义。其结构如下：

| | | |
|-----|-----|-----|
| CC | BB | AA |
| 高字节 | 中字节 | 低字节 |

图 6 三字节参数结构

则其值为：

$$\text{实际值} = (AA + BB \times 255 + CC \times 65535) / 1000$$

“/1000”表示实际值保留 3 位小数，精确到 0.001 mm。

角度 θ 的测量值是弧度，通过弧度角度公式转化为角度。

由于测量返回值中 $P(h, r, \theta)$ 的形式采用“极坐标”的方式表示，为了绘制平面展开图形方便，将 (r, θ) 转化为直角坐标系 (x, y) 。

经过数据处理模块后，所有的测量数据全部转化成可以直接进行绘图使用的参数，分别保存在数组中。记作：

数组 H ：记录高度 h ；

数组 R ：记录半径 r ；

数组 X, Y ：转化为直角坐标系中的坐标值；

数组角度：转化为角度表示的 θ 。

3.3 绘制二维展开图并填充缺陷信息

在平面中图形中，可以采用缺陷矩阵的算法来计算粘接缺陷，因此将根据图 3 的结构图将发动机外轮廓展开到平面如图 7 所示。锥体展开成一个扇形，其参数为：

外环半径：

$$R_{\text{外}} = \sqrt{\left(\frac{R}{R - R_0}\right)^2 \cdot R^2}$$

内环半径：

$$R_{\text{内}} = \sqrt{\left(\frac{R_0}{R - R_0}\right)^2 \cdot R^2}$$

顶角：

$$\beta = \frac{R_0}{R - R_0} \times 360^\circ$$

展开后，有效区域是蓝色线框中的区域。此时如下。

长：

$$L = 2 \times R_{\text{外}} \cdot \sin \frac{\beta}{2}$$

宽：

$$W = R_{\text{外}} - R_{\text{内}} \cdot \cos \frac{\beta}{2}$$

设置显示图像的区域为 $Q(m, n)$ ，其中 m, n 分别为图像的水平像素点和垂直方向的像素点，建立标定参数 a, b 。

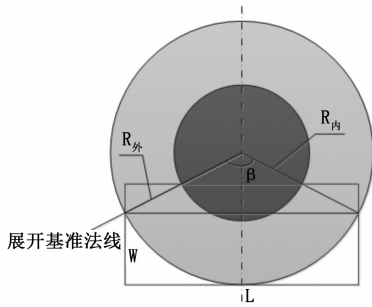


图 7 防热结构件二维展开数学模型

$$a = \frac{m}{L}, b = \frac{n}{W}$$

参数 a, b 意思是标定图像上多少个像素表示 1 mm 的长度。

根据标定参数 a, b 的值在缺陷数组、直角坐标系数组 X, Y 中抽取各个坐标点的数据和数据个数, 用不同的颜色填充区域 Q , 可以画出缺陷的展开图。如图 8 所示。

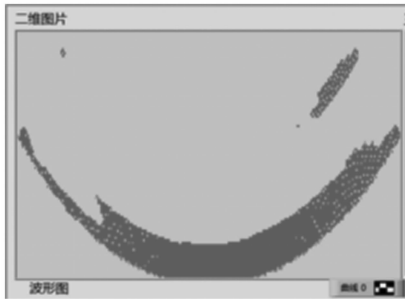


图 8 防热结构件粘接缺陷展开图

3.4 缺陷区域识别与缺陷区域面积计算

在第 3 节中填充区域 $Q (m, n)$ 时, 同时建立一个识别矩阵 $M [a \times L, b \times W]$, 其中的部分区域如下:

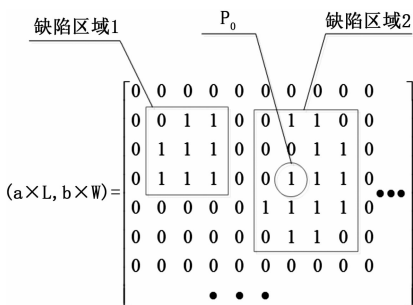


图 9 识别矩阵的部分区域

其中, 当矩阵元素的值为 1 时, 代表该点为缺陷; 当矩阵元素的值为 0 时, 代表该点为正常。

在矩阵 M 中, 设有一个元素点 $P_0 (x_0, y_0)$, 若 $P_0 = 1$, 则表示该点为缺陷。那么搜索其周围八个点 $P (x_{0+1}, y_0)$ 、 $P (x_{0-1}, y_0)$ 、 $P (x_0, y_{0+1})$ 、 $P (x_0, y_{0-1})$ 、 P

(x_{0+1}, y_{0+1}) 、 $P (x_{0+1}, y_{0-1})$ 、 $P (x_{0-1}, y_{0+1})$ 、 $P (x_{0-1}, y_{0-1})$ 的值, 若其中存在一个点 P_1 , 其值为 1, 则认为 P_1 与 P_0 属于同一个缺陷区域。遍历所有相邻的点, 直至缺陷区域内再没有新的点满足上述条件。其伪代码如下^[9]:

```

for i=0 to a×L
for j=0 to b×W
if P[i,j] == 1
生成一个缺陷数组 Defect1[]
if P[i+1,j] = 0,该点为右边界之一
if P[i+1,j] ∈ Right[]
将 P[i+1,j]写入右边界数组 Right[]
将 P[i+1,j]的 x 坐标写入右边界数组 RightX[]
else
if P[i+1,j] ∈ Defect1[]
RightPointisNew = true
将 P[i+1,j]写入缺陷数组 Defect1[]
else
RightPointisNew = false
if P[i-1,j]=0,该点为左边界之一
if P[i-1,j] ∈ Left[]
将 P[i-1,j]写入左边界数组 Left[]
将 P[i-1,j]的 x 坐标写入右边界数组 LeftX[]
else
if P[i-1,j] ∈ Defect1[]
LeftPointisNew = true
将 P[i-1,j]写入缺陷数组 Defect1[]
else
LeftPointisNew = false
左上、右上、左下、右下的检测伪代码与此类似,故省略。
if P[i,j+1]=0,该点为上边界之一
if P[i,j+1] ∈ Top[]
将 P[i,j+1]写入上边界数组 Top[]
将 P[i,j+1]的 Y 坐标写入上边界数组 TopY[]
else
if P[i,j+1] ∈ Defect1[]
TopPointisNew = true
将 P[i,j+1]写入缺陷数组 Defect1[]
else
TopPointisNew = false
if P[i,j-1]=0,该点为下边界之一
if P[i,j-1] ∈ Bottom[]
将 P[i,j-1]写入下边界数组 Bottom[]
将 P[i,j-1]的 Y 坐标写入下边界数组 BottomY[]
else
if P[i,j-1] ∈ Defect1[]
BottomPointisNew = true
将 P[i,j-1]写入缺陷数组 Defect1[]
else

```

```

BottomPointisNew = false
HaveNewDefectPoint = RightPointisNew && LeftPointisNew
&& ottomPointisNew
if HaveNewDefectPoint == true

```

一个缺陷检测完毕,保存缺陷数组 Defect1[]。

此时即可确定一个缺陷区域,如图 9 所示。

用函数 count() 统计缺陷数组 Defect1 [] 中数据的个数,记作 NUM,则本区域的缺陷面积 S 为:

$$S = \frac{NUM}{a \times b}$$

缺陷区域的重心 G 位置的坐标为:

$$G(x,y) = \left(\begin{array}{c} \frac{\max(RightX[]) - \min(LeftX[]) }{2} \\ \frac{\max(TopY[]) - \min(BottomY[]) }{2} \end{array} \right)$$

在 Labview 中提供了一个 dll 函数^[10], IMAQ Particle Analysis ReportA 函数,可以对一个二值图形提取 8 连通或者 4 连通的区域,此函数的功能可以满足缺陷区域识别和缺陷面积计算的要求。

3.5 相邻缺陷区域识别

在缺陷评价时,对于相邻的缺陷区域存在一个判定准则。若存在 2 个缺陷区域的最近点之间的距离小于 d,则将 2 个缺陷区域合并为一个,面积为 2 个缺陷区域面积之和。

如图 9 所示,设 d=5 mm,若缺陷区域 1 和缺陷区域 2 的最近点之间的距离 ≤ 5 mm,则将缺陷区域 1 和缺陷区域 2 合并为命名为区域 3,而区域 3 的面积为:

$$S_{区域3} = S_{区域1} + S_{区域2}$$

在矩阵 M 中,识别缺陷区域 1 和缺陷区域 2 的最近点过于麻烦,计算量大。因此采用如下方法:

沿着缺陷区域 1 的轮廓,向外的方向,将 $a \times \frac{d}{2}$ 行和 $b \times \frac{d}{2}$ 列的元素的值由 0 变为 1;同样沿着缺陷区域 2 的轮廓,也向外将 $a \times \frac{d}{2}$ 行和 $b \times \frac{d}{2}$ 列的元素的值由 0 变为 1。

此时,若缺陷区域 1 和缺陷区域 2 的最近点之间的距离小于 d,则 2 个缺陷区域将会融合成一个缺陷区域。使用第 4 节中的缺陷区域识别的方法后,缺陷的数量会减少为 1,且重心 G 的位置,移至缺陷区域 1 的重心 G1 与缺陷区域 2 的重心 G2 之间。由此可以判定,缺陷区域 1 和缺陷区域 2 可以依据判定准则,合并为一个曲线区域 3。

3.6 展开边界缺陷区域识别

在将发动机的外形轮廓进行二维展开时,如图 7 所示,展开基准法线的位置是随机选择的,这样就存在 3 种情况:

- 1) 基准法线的位置正好将一个缺陷区域分割开来;
- 2) 基准法线的位置没有经过任何一个缺陷区域,但是存在 2 个或者多个缺陷区域,它们的最近点之间的距离 ≤ d;

3) 基准法线的位置没有经过任何一个缺陷区域,且与其他缺陷区域的最近点之间的距离 > d。

对于第一种情况:基准法线上所有元素所对应的点 P (h, r, θ) 的极坐标中,其 θ=0,而在另一端,所有元素所对应的点 P (h, r, θ) 的 θ=2π。建立 2 个对比数组 A1, A2, A1 中保存所有基准法线上的元素的值, A2 中保存所有 2π 法线上的元素的值,数组的索引号为识别矩阵 M 的行号 a×L。

对于数组 A1, A2, 若存在 $i \in [0, a \times L]$, 使得:

$$A1[i] = A2[i] = 1$$

则说明在第 i 行,基准法线分割了一个缺陷区域。基准法线两端的 2 个缺陷区域合并为 1 个参与评价。

对于第二种情况:采用重合线检测的方式实现。

将 0°基准法线向后平移 d/2 得到重合线 A,将 360°法线向前平移 d/2 得到重合线 B,当 2 块缺陷区域的最近点之间的距离 ≤ d 时,根据第 5 节“相邻缺陷区域识别”中描述的方法,在重合线 A、B 上的点一定存在缺陷点,其值为 1。

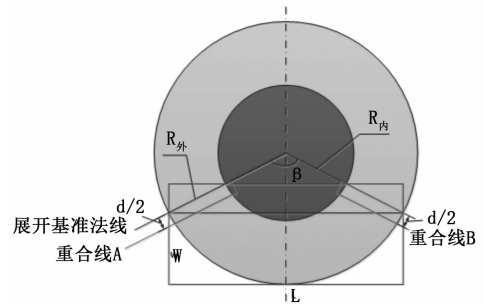


图 10 处于边界且最近点距离 ≤ d 的缺陷区域示意图

此时参照处理“第一种情况”的方法,以重合线 A 的数据建立对比数组 A1,以重合线 B 上的数据建立对比数组 A2,以个点的 Y 轴坐标为索引,对于数组 A1, A2, 若存在 $i \in [0, a \times L]$, 使得:

$$A1[i] = A2[i] = 1$$

则说明在第 i 行,分布在基准法线两边的 2 个缺陷区域,其最近点的距离 ≤ d,在粘接质量评价时,需要按照 1 个缺陷区域进行评价,评价面积为 2 个缺陷区域的面积之和。

当不存在任何一个 i,使得上述等式成立时,就对应第三种情况。说明分布在基准法线两边的 2 个缺陷区域是独立的缺陷,单独进行评价。

3.7 粘接缺陷质量评价

当缺陷区域的面积 > 1 cm² 时,记入缺陷面积。粘接缺陷总面积不得大于 35 cm²,单块缺陷面积不大于 8 cm²,两块面积之和大于 5 cm² 的相邻缺陷区之间的距离不得小于 1 cm。

在设置画面中,可以根据不同的评价标准进行调整,

参数设置画面

缺陷参数设置

条件1: 缺陷总面积 \leq 35 cm²
 条件2: 单块缺陷面积 \leq 8 cm²
 条件3: 两块缺陷面积之和 \leq 5 cm² 的相邻缺陷之间的距离 \geq 1 cm

应用并保存数据 载入数据 返回

图 11 缺陷评价标准设置画面

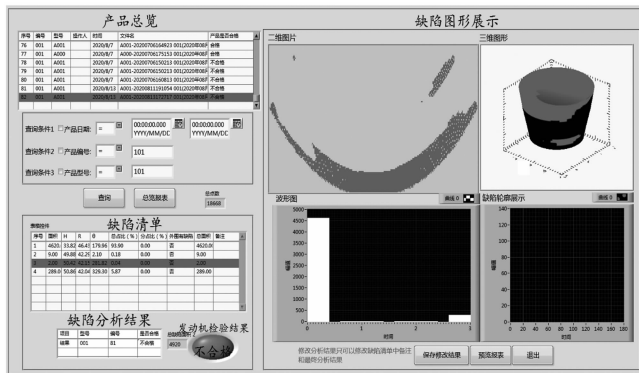


图 13 某型固体火箭发动机耐热结构件图像分析画面

方便不同的产品进行粘接质量的评价。

4 实验结果与分析

4.1 实验方法

采用无损检测粘接质量评价系统和电超声粘接质量检测台架配合, 对某型发热结构件的粘接质量进行检测, 获取粘接质量数据, 输入评价系统软件进行可视化显示、二维图形展开、缺陷区域分析计算、给出粘接质量评价结论。

4.2 实验设备

电磁超声波检测仪 1 台, 耐热结构件 1 个, 电磁超声粘接质量检测台架 1 套, 评价软件 1 套, 笔记本电脑 1 台。评价软件提前安装在笔记本电脑上。



图 12 实验设备实物画面

4.3 实验步骤

- 1) 将耐热结构件如图所示安装在的试验台架上;
- 2) 将电磁超声波检测仪与 PC 相连;
- 3) 设置法线上的旋转线速度为 25 mm/s; 探头与耐热结构件的表面距离保持为 1.5 mm;
- 4) 设置电磁超测量声速为: 3 225 m/s, 超声波发射频率为: 3 840 Hz;
- 5) 启动测量, 并记录测量数据;
- 6) 启动粘接质量评价系统软件, 开始数据分析。

如图 13 所示, 左上角为“产品总览”, 保存着已经获取的测量数据。读取保存的测量数据, 经过解包后, 根据测

量数据形成三维网格图, 并按照坐标进行缺陷区域的填充, 填充后效果如右上角的“三维图形”所示。该三维图形支持图像的旋转、翻转、放大、缩小等功能, 可以从各个方向展示缺陷区域的轮廓及分布。

在画面的上中部, 是三维图形的二维展开图。展开过程中采用极坐标展开, 并对各个缺陷区域进行了标识。

在左下角中的“缺陷清单”中列出了本次测量的耐热结构件上缺陷统计表, 包括各块缺陷区域的编号、面积大小, 重心位置和缺陷的占比信息。当选中清单中的某一条缺陷信息时, 在二维图形上会有轮廓线指示该缺陷的对应图形。

最后在“缺陷分析结果”中给出了评价结论, 并给出了所有缺陷面积的总和。

4.4 在线检测速度实验

生产线安装一套粘接质量评价系统, 布置在涂胶、压粘工序后即可进行检测, 实现了在线检测的功能。经过一批产品的实际加工测试, 与手工检测对比, 结果如表 1。

表 1 在线检测与手工检测对比表

| 序号 | 任务编号 | 工件型号 | 加工数量 / 个 | 时间 | |
|----|---------------|---------------|----------|------|------|
| | | | | 在线检测 | 手工操作 |
| 1 | 2020-1009-001 | ** * * - I 型 | 10 | 25 | 60 |
| 2 | 2020-1009-002 | ** * * - II 型 | 20 | 55 | 130 |
| 3 | 2020-1012-003 | ** * * - I 型 | 20 | 50 | 120 |
| 4 | 2020-1012-004 | ** * * - II 型 | 20 | 55 | 130 |

由表 1 可以看出, 在线检测极大降低了检测时间, 提高了检测效率。与之前手工相比, 缺陷检测效率提高 58%。而只要通过增加粘接质量评价系统的数量, 即可迅速扩大生产线的产能。

5 结束语

采用固体火箭发动机绝热层粘接缺陷质量评价系统后, 可以有效降低对专业无损检测人员的要求, 对于装备的量

(下转第 250 页)