



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104990982 A

(43) 申请公布日 2015. 10. 21

(21) 申请号 201510462937. 5

(22) 申请日 2015. 07. 31

(71) 申请人 中航复合材料有限责任公司

地址 101300 北京市顺义区双河大街中航工
贸大楼 507

(72) 发明人 刘松平 刘菲菲 李乐刚 白金鹏

(74) 专利代理机构 中国航空专利中心 11008

代理人 李建英

(51) Int. Cl.

G01N 29/06(2006. 01)

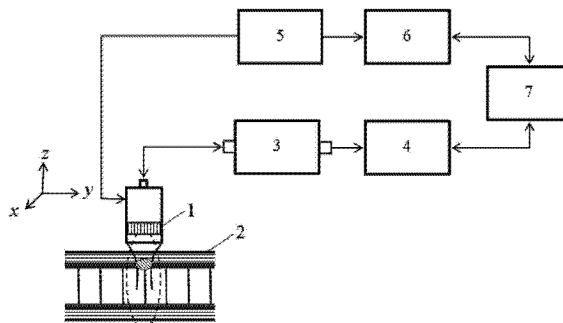
权利要求书3页 说明书8页 附图1页

(54) 发明名称

一种基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像
检测方法

(57) 摘要

本发明属于无损检测技术领域, 涉及一种基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法。本发明方法利用不同波长入射脉冲超声波在蒙皮/蜂窝芯连接层、蜂窝芯连接层/蜂窝壁、蜂窝芯连接层/蜂窝格界面形成的反射回波信号, 通过建立相应的转换函数进行缺陷判别和超声成像。可选择不同入射脉冲超声波频率、换能器及其声束直径、扫描步进、声学耦合方式及超声自动扫描设备等, 实现不同胶接、焊接等蜂窝夹芯结构的超声自动扫描成像检测。实际检测效果表明, 显著地提高了蜂窝芯结构检测灵敏度和分辨率及检测能力, 可准确检出蒙皮/蜂窝芯、蒙皮/连接层、连接层/蜂窝格之间的缺陷和结合情况, 大大提高了检测的可靠性。



1. 一种基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法,采用脉冲反射法,利用自动扫描超声成像检测系统进行蜂窝夹芯结构超声成像检测,自动扫描超声成像检测系统包括换能器(1)、超声单元(3)、信号处理单元(4)、机械扫查机构(5)、扫查控制单元(6)和成像系统(7),其特征是,

通过自动扫描超声成像检测系统中的换能器(1)向被检测蜂窝芯夹层结构(2)发射宽带窄脉冲超声信号 u_p ,此宽带窄脉冲超声信号 u_p 通过换能器与蜂窝夹芯结构(2)表面之间的声学耦合剂传播到被检测蜂窝夹芯结构(2)的蒙皮(2a)表面,并在被检测蜂窝夹芯结构(2)的蒙皮表面形成超声反射和折射后,在蜂窝夹芯结构(2)的蒙皮(2a)表面形成反射宽带窄脉冲超声信号 u_r 和透射宽带窄脉冲超声信号 u_t ,其中,透射宽带窄脉冲超声信号 u_t 经过蜂窝夹芯结构(2)的蒙皮(2a)后传播到蒙皮(2a)/蜂窝芯连接层(2b),形成新的超声反射/折射,

1) 当 u_t 的波长 $\lambda \ll h_1$ 时,这里, h_1 为蜂窝芯连接层(2b)的厚度,此时,

①换能器(1)接收到来自蜂窝夹芯结构(2)的蒙皮(2a)/蜂窝芯连接层(2b)的反射宽带窄脉冲超声信号 u_b 表示为:

$$u_b = \frac{2\rho_1c_1(\rho_3c_3 - \rho_2c_2)}{(\rho_1c_1 + \rho_2c_2)(\rho_2c_2 + \rho_3c_3)} u_p \quad (1a)$$

对应的成像信号 G 表示为:

$$G = ku_b \quad (1b)$$

这里, G —为成像信号,其域值范围为 $[0, 255]$,

k —为调制系数,根据 u_b 的大小和超声单元的增益,由试验设定。

②换能器(1)接收到来自蜂窝芯连接层(2b)/蜂窝壁(2c)界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u'_b 表示为:

$$u'_b = \frac{\rho_4c_4 - \rho_3c_3}{(\rho_3c_3 + \rho_4c_4)} (1 - u_b) \quad (2a)$$

对应的成像信号 G' 表示为:

$$G' = ku'_b \quad (2b)。$$

G' 的域值范围为 $[0, 255]$,

③换能器(1)接收到来自蜂窝芯连接层(2b)/蜂窝格(2d)界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u''_b 表示为:

$$u''_b \approx -(1 - u_b) \quad (3a)$$

对应的成像信号 G'' 表示为:

$$G'' = ku''_b \quad (3b)。$$

G'' 的域值范围为 $[0, 255]$,

这里,

ρ_1 —为换能器(1)与被检测蜂窝夹芯结构(2)之间的声学耦合介质的密度,

ρ_2 —为蒙皮(2a)的材料的密度,

ρ_3 —当蒙皮(2a)/蜂窝芯连接层(2b)界面没有缺陷时, ρ_3 为蜂窝芯连接层(2b)的材料的密度,当蜂窝夹芯结构(2)的蒙皮(2a)/蜂窝芯连接层(2b)界面存在脱粘缺陷时,

ρ_3 近似为空气的密度,

ρ_4 —当蜂窝夹芯结构的蒙皮 (2a)/ 蜂窝壁 (2c) 界面没有缺陷时, ρ_4 为蜂窝芯 (2c) 的材料的密度,当蜂窝夹芯结构的蒙皮 (2a)/ 蜂窝壁 (2c) 界面有缺陷时, ρ_4 近似为空气的密度,

c_1 —为换能器 (1) 与被检测蜂窝夹芯结构 (2) 之间的声学耦合介质中的声速,

c_2 —为蒙皮 (2a) 中的声速,

c_3 —当蒙皮 (2a)/ 蜂窝芯连接层 (2b) 界面没有缺陷时, c_3 为蜂窝芯连接层 (2b) 中的声速,当蒙皮 (2a)/ 蜂窝芯连接层 (2b) 界面出现脱粘缺陷时, c_3 近似为空气中的声速,

c_4 —当蒙皮 (2a)/ 蜂窝壁 (2c) 界面没有缺陷时, c_4 为蜂窝芯 (2c) 中的声速,当蒙皮 (2a)/ 蜂窝壁 (2c) 界面有缺陷时, c_4 近似为空气中的声速,

进行缺陷判别:

①根据换能器 (1) 接收到来自蜂窝夹芯结构 (2) 中的蒙皮 (2a)/ 蜂窝芯连接层 (2b) 界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u_b , 按照式 (1a) 判别蒙皮 (2a)/ 蜂窝芯连接层 (2b) 界面的缺陷,按照式 (1b) 将反射宽带窄脉冲超声信号 u_b 转换为成像信号 G ;

②根据换能器 (1) 接收到来自蜂窝芯连接层 (2b)/ 蜂窝壁 (2c) 界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u'_b , 按照式 (2a) 判别蜂窝芯连接层 (2b)/ 蜂窝壁 (2c) 界面的缺陷,按照式 (2b) 将反射超声宽带窄脉冲信号 u'_b 转换为成像信号 G' ,按照式 (3a) 判别蜂窝芯连接层 (2b)/ 蜂窝格 (2d) 界面,按照式 (3b) 将反射超声宽带窄脉冲信号 u''_b 转换为成像信号 G'' ;

2) 当 u_t 的波长 $\lambda \gg h_1$ 时,此时, u_t 只会形成蒙皮 (2a)/ 蜂窝壁 (2c) 界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u_c 和蒙皮 (2a)/ 蜂窝格 (2d) 界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u'_c , 分别表示为:

$$u_c = \frac{2\rho_1c_1(\rho_4c_4 - \rho_2c_2)}{(\rho_1c_1 + \rho_2c_2)(\rho_2c_2 + \rho_4c_4)}u_p \quad (4a)$$

$$u'_c \approx \frac{-2\rho_1c_1}{\rho_1c_1 + \rho_2c_2}u_p \quad (5a)$$

对应蜂窝芯连接层 (2b)/ 蜂窝壁 (2c) 界面的成像信号 G_c 和蒙皮 (2a)/ 蜂窝格 (2d) 界面的成像信号 G'_c 分别表示为:

$$G_c = ku_c \quad (4b)$$

$$G'_c = ku'_c \quad (5b)$$

G_c 和 G'_c 的域值范围为 $[0, 255]$,

进行缺陷判别:

根据换能器 (1) 接收到来自蒙皮 (2a)/ 蜂窝壁 (2c) 界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u_c 和蒙皮 (2a)/ 蜂窝格 (2d) 界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u'_c , 按照式 (4a) 和式 (5a) 判别蒙皮 (2a)/ 蜂窝壁 (2c) 界面的缺陷,按照式 (4b) 和式 (5b) 将对应的反射宽带窄脉冲超声信号 u_c 和 u'_c 转换为成像信号。

2. 根据权利 1 所述的一种基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法,其特征是,根据被检测蜂窝夹芯结构、工艺的特点和检测要求,选择入射脉冲超声波的频率,用于检测蒙皮 (2a)/ 蜂窝芯连接层 (2b) 界面为胶接或焊接而成的蜂窝夹芯结构,频率在 5—

15MHz 之间选择。

3. 根据权利要求 1 所述的一种基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法,其特征是,换能器 (1) 与被检测蜂窝夹芯结构 (2) 之间采用喷液耦合、液膜接触耦合或液浸耦合方式。

4. 根据权利要求 1 所述的一种基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法,其特征是,换能器 (1) 与被蜂窝夹芯结构 (2) 之间的声学耦合介质选用:水、油、冷却液或者其他液体耦合剂,以适应不同材料被检测结构或者零件在不同环境条件下的超声成像检测。

5. 根据权利要求 1 所述的一种基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法,其特征是,换能器 (1) 的声束直径大小 d_0 按下式选择,

$$d_0 \leq \min \{L_i, d_j\} \quad (6)$$

这里, $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6,$

$j = 1, 2, 3,$

L_i —表示蜂窝芯格的第 i 条边的边长,

d_j —表示第 j 条蜂窝芯格相对两平行边的边长,

\min —表示取最小值,

换能器 (1) 与蜂窝夹芯结构零件表面之间的距离 h_f 按下式选择,

$$h_f = d_f \pm 0.5d_w \quad (7)$$

这里, d_f —为换能器 (1) 的焦距,

d_w —为换能器 (1) 的焦柱。

6. 根据权利要求 1 所述的一种基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法,其特征是,扫描步进 S 按下式选择,

$$S \leq (0.5-0.7) \times \min \{d_j\} \quad (8)。$$

7. 根据权利要求 1 所述的一种基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法,其特征是,根据蜂窝夹芯结构的工艺特点,选择相应的换能器 (1) 用于胶接蜂窝夹芯结构和焊接蜂窝夹芯结构以及其他蜂窝夹芯结构的检测与缺陷判别。

一种基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法

技术领域

[0001] 本发明属于无损检测技术领域,涉及一种基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法。

背景技术

[0002] 随着复合材料蜂窝夹芯结构及金属蜂窝夹芯结构在航空航天、交通等工业领域的应用广泛,通常采用胶接和焊接等工艺制造成各种各样的蜂窝夹芯结构,需要对装机应用的蜂窝夹芯结构进行自动扫描无损检测,确保装机结构的质量和服役安全。目前主要是采用的两种检测方法:(1)X-射线数字成像检测方法,其主要不足是:1)只能检出蜂窝芯本身的缺陷,难以检出蒙皮/蜂窝芯连接界面的缺陷;2)成本高;3)需要严格的射线防护;4)不环保;(2)超声检测方法,多采用穿透法检测,其主要不足是:1)多采用平面换能器和低频换能器,分辨率低,难以得到每个蜂窝芯格与蒙皮的连接情况;2)对于大厚度蜂窝芯,因声波衰减异常剧烈,检测困难;3)换能器需要从零件两侧接近被检测零件,从而需要复杂的同步扫描机构和严格的喷水耦合控制及水净化要求;4)不能确定检出缺陷的深度位置。

发明内容

[0003] 本发明的目的是针对复合材料及金属蜂窝夹芯结构,提出一种基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法,实现复合材料蜂窝夹芯结构及金属蜂窝夹芯结构的超声成像检测,改进超声检测的灵敏度和分辨率,提高对胶接和焊接蜂窝夹芯结构中蒙皮、蒙皮/蜂窝芯、蜂窝芯/连接层之间的缺陷的检出能力和检测的可靠性。本发明的技术解决方案是,

[0004] 采用脉冲反射法,利用自动扫描超声成像检测系统进行蜂窝夹芯结构超声成像检测,自动扫描超声成像检测系统包括换能器、超声单元、信号处理单元、机械扫查机构、扫查控制单元和成像系统,其特征是,

[0005] 通过自动扫描超声成像检测系统中的换能器向被检测蜂窝芯夹层结构发射宽带窄脉冲超声信号 u_p ,此宽带窄脉冲超声信号 u_p 通过换能器与蜂窝夹芯结构表面之间的声学耦合剂传播到被检测蜂窝夹芯结构的蒙皮表面,并在被检测蜂窝夹芯结构的蒙皮表面形成超声反射和折射后,在蜂窝夹芯结构的蒙皮表面形成反射宽带窄脉冲超声信号 u_r 和透射宽带窄脉冲超声信号 u_t ,其中,透射宽带窄脉冲超声信号 u_t 经过蜂窝夹芯结构的蒙皮后传播到蒙皮/蜂窝芯连接层,形成新的超声反射/折射,

[0006] 1) 当 u_t 的波长 $\lambda \ll h_1$ 时,这里, h_1 为蜂窝芯连接层的厚度,此时,

[0007] ①换能器接收到来自蜂窝夹芯结构的蒙皮/蜂窝芯连接层的反射宽带窄脉冲超声信号 u_b 表示为:

$$[0008] \quad u_b = \frac{2\rho_1c_1(\rho_3c_3 - \rho_2c_2)}{(\rho_1c_1 + \rho_2c_2)(\rho_2c_2 + \rho_3c_3)} u_p \quad (1a)$$

[0009] 对应的成像信号 G 表示为:

[0010] $G = ku_b(1b)$

[0011] 这里, G —为成像信号,其域值范围为 $[0, 255]$,

[0012] k —为调制系数,根据 u_b 的大小和超声单元的增益,由试验设定。

[0013] ②换能器接收到来蜂窝芯连接层 / 蜂窝壁界面反射的宽带窄脉冲超声信号 u_b' 表示为:

$$[0014] \quad u_b' = \frac{\rho_4 c_4 - \rho_3 c_3}{(\rho_3 c_3 + \rho_4 c_4)} (1 - u_b) \quad (2a)$$

[0015] 对应的成像信号 G' 表示为:

$$[0016] \quad G' = ku_b' \quad (2b)。$$

[0017] G' 的域值范围为 $[0, 255]$,

[0018] ③换能器接收到来蜂窝芯连接层 / 蜂窝格界面反射的宽带窄脉冲超声信号 u_b'' 表示为:

$$[0019] \quad u_b'' \approx -(1 - u_b) \quad (3a)$$

[0020] 对应的成像信号 G'' 表示为:

$$[0021] \quad G'' = ku_b'' \quad (3b)。$$

[0022] G'' 的域值范围为 $[0, 255]$,

[0023] 这里,

[0024] ρ_1 —为换能器与被检测蜂窝夹芯结构之间的声学耦合介质的密度,

[0025] ρ_2 —为蒙皮的材料密度,

[0026] ρ_3 —当蒙皮 / 蜂窝芯连接层界面没有缺陷时, ρ_3 为蜂窝芯连接层的材料的密度,当蜂窝夹芯结构的蒙皮 / 蜂窝芯连接层界面存在脱粘缺陷时, ρ_3 近似为空气的密度,

[0027] ρ_4 —当蜂窝夹芯结构的蒙皮 / 蜂窝壁界面没有缺陷时, ρ_4 为蜂窝芯的材料密度,当蜂窝夹芯结构的蒙皮 / 蜂窝壁界面有缺陷时, ρ_4 近似为空气的密度,

[0028] c_1 —为换能器与被检测蜂窝夹芯结构之间的声学耦合介质中的声速,

[0029] c_2 —为蒙皮中的声速,

[0030] c_3 —当蒙皮 / 蜂窝芯连接层界面没有缺陷时, c_3 为蜂窝芯连接层中的声速,当蒙皮 / 蜂窝芯连接层界面出现脱粘缺陷时, c_3 近似为空气中的声速,

[0031] c_4 —当蒙皮 / 蜂窝壁界面没有缺陷时, c_4 为蜂窝芯中的声速,当蒙皮 / 蜂窝壁界面有缺陷时, c_4 近似为空气中的声速,

[0032] 进行缺陷判别:

[0033] ①根据换能器接收到来自蜂窝夹芯结构中的蒙皮 / 蜂窝芯连接层界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u_b ,按照式判别蒙皮 / 蜂窝芯连接层界面的缺陷,按照式 (1b) 将反射宽带窄脉冲超声信号 u_b 转换为成像信号 G ;

[0034] ②根据换能器接收到来蜂窝芯连接层 / 蜂窝壁界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u_b' ,按照式 (2a) 判别蜂窝芯连接层 / 蜂窝壁界面的缺陷,按照式 (2b) 将反射超声宽带窄脉冲信号 u_b' 转换为成像信号 G' ,按照式 (3a) 判别蜂窝芯连接层 / 蜂窝格界面,按照式 (3b) 将反射超声宽带窄脉冲信号 u_b'' 转换为成像信号 G'' ;

[0035] 2) 当 u_t 的波长 $\lambda \gg h_1$ 时,此时, u_t 只会形成蒙皮 / 蜂窝壁界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u_c 和蒙皮 / 蜂窝格界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u'_c ,分别表示为:

$$[0036] \quad u_c = \frac{2\rho_1c_1(\rho_4c_4 - \rho_2c_2)}{(\rho_1c_1 + \rho_2c_2)(\rho_2c_2 + \rho_4c_4)} u_p \quad (4a)$$

$$[0037] \quad u'_c \approx \frac{-2\rho_1c_1}{\rho_1c_1 + \rho_2c_2} u_p \quad (5a)$$

[0038] 对应蜂窝芯连接层 / 蜂窝壁界面的成像信号 G_c 和蒙皮 / 蜂窝格界面的成像信号 G'_c 分别表示为：

$$[0039] \quad G_c = ku_c \quad (4b)$$

$$[0040] \quad G'_c = ku'_c \quad (5b)$$

[0041] G_c 和 G'_c 的域值范围为 $[0, 255]$ ，

[0042] 进行缺陷判别：

[0043] 根据换能器接收到来自蒙皮 / 蜂窝壁界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u_c 和蒙皮 / 蜂窝格界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u'_c ，按照式 (4a) 和式 (5a) 判别蒙皮 / 蜂窝壁界面的缺陷，按照式 (4b) 和式 (5b) 将对应的反射宽带窄脉冲超声信号 u_c 和 u'_c 转换为成像信号。

[0044] 根据被检测蜂窝夹芯结构、工艺的特点和检测要求，选择入射脉冲超声波的频率，用于检测蒙皮 / 蜂窝芯连接层界面为胶接或焊接而成的蜂窝夹芯结构，频率在 5—15MHz 之间选择。

[0045] 换能器与被检测蜂窝夹芯结构之间采用喷液耦合、液膜接触耦合或液浸耦合方式。

[0046] 换能器与被蜂窝夹芯结构之间的声学耦合介质选用：水、油、冷却液或者其他液体耦合剂，以适应不同材料被检测结构或者零件在不同环境条件下的超声成像检测。

[0047] 换能器的声束直径大小 d_u 按下式选择，

$$[0048] \quad d_u \leq \min \{L_i, d_j\} \quad (6)$$

[0049] 这里， $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ，

[0050] $j = 1, 2, 3$ ，

[0051] L_i —表示蜂窝芯格的第 i 条边的边长，

[0052] d_j —表示第 j 条蜂窝芯格相对两平行边的边长，

[0053] \min —表示取最小值，

[0054] 换能器 (1) 与蜂窝夹芯结构零件表面之间的距离 h_f 按下式选择，

$$[0055] \quad h_f = d_f \pm 0.5d_w \quad (7)$$

[0056] 这里， d_f —为换能器的焦距，

[0057] d_w —为换能器的焦柱。

[0058] 扫描步进 S 按下式选择，

$$[0059] \quad S \leq (0.5-0.7) \times \min \{d_j\} \quad (8)$$

[0060] 根据蜂窝夹芯结构的工艺特点，选择相应的换能器用于胶接蜂窝夹芯结构和焊接蜂窝夹芯结构以及其他蜂窝夹芯结构的检测与缺陷判别。

[0061] 本发明具有的优点和有益效果，

[0062] 1. 针对复合材料蜂窝夹芯结构及金属蜂窝夹芯结构的自动扫描无损检测，本发明提出采用高分辨率超声反射法，利用不同波长入射脉冲超声波在蒙皮 / 蜂窝芯连接层、蜂

窝芯连接层 / 蜂窝壁、蜂窝芯连接层 / 蜂窝格界面形成的反射回波信号,通过建立相应的转换函数进行缺陷判别和超声成像,换能器只需从一侧接近蜂窝芯结构,入射声波不需要穿透蜂窝芯,从而大大提高了大厚度蜂窝芯的检测能力。

[0063] 2. 本发明提出的一种基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法,采用小声束扫描技术,分辨率得到显著提高,能够准确检出蒙皮 / 蜂窝芯格之间的缺陷以及蒙皮 / 连接层、连接层 / 蜂窝芯格之间的缺陷和结合情况,显著地提高了超声自动扫描检测对复合材料及金属蜂窝芯结构陷的检测灵敏度和分辨率及检测能力。

[0064] 3. 利用本发明提出的一种基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法,可以准确地确定检出缺陷在蜂窝夹芯结构中的深度,从而为工艺改进提供了十分重要的支撑数据信息。

[0065] 4. 本发明提出的一种基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法,通过选用自适应跟踪换能器,不需要从零件两侧对被检测蜂窝芯结构进行形面跟踪,大大地简化了超声自动扫描机构的复杂程度,对喷水耦合无严格要求,无需水净化系统,从而显著地减低了制造成本和检测成本,大大提高了检测的可靠性。

附图说明

[0066] 图 1 是本发明基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法原理示意图 ($\lambda \ll h_i$),其中:图 1(a) 为蜂窝夹芯结构检测原理示意图,图 1(b) 为入射声波在蜂窝夹芯结构 2 中的蒙皮 2a、蜂窝芯连接层 2b 和蜂窝壁 2c 中传播示意图,图 1(c) 为入射声波在蜂窝夹芯结构 2 中的蒙皮 2a、蒙皮 2a/ 蜂窝芯连接层 2b 和蜂窝格 2d 中传播示意图,图 1(d) 为蜂窝格 2d 的形状、边长示意图。

[0067] 图 2 是本发明基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法原理示意图 ($\lambda \gg h_i$),其中:图 2(a) 为入射声波在蜂窝夹芯结构 2 中的蒙皮 2a、蜂窝壁 2c 中传播示意图,图 2(b) 为入射声波在蜂窝夹芯结构 2 中的蒙皮 2a 和蜂窝格 2d 中传播示意图。

[0068] 图 3 是本发明基于自动扫描的蜂窝夹芯结构超声成像检测方法原理组成。

具体实施方式

[0069] 采用脉冲反射法,利用自动扫描超声成像检测系统进行蜂窝夹芯结构超声成像检测,蜂窝夹芯结构由蒙皮 2a、蜂窝芯连接层 2b、蜂窝壁 2c 和蜂窝格 2d 组成,蜂窝壁 2c 的两端头分别通过胶接或焊接与其两侧的蒙皮 2a 连接,进而构成蜂窝夹芯结构,如图 1 所示,自动扫描超声成像检测系统包括换能器 1、超声单元 3、信号处理单元 4、机械扫查机构 5、扫查控制单元 6 和成像系统 7,如图 3 所示,

[0070] 通过自动扫描超声成像检测系统中的换能器 1 向被检测蜂窝芯夹层结构 2 发射宽带窄脉冲超声信号 u_p ,此宽带窄脉冲超声信号 u_p 通过换能器与蜂窝夹芯结构 2 表面之间的声学耦合剂传播到被检测蜂窝夹芯结构 2 的蒙皮 2a 表面,并在被检测蜂窝夹芯结构 2 的蒙皮表面形成超声反射和折射后,在蜂窝夹芯结构 2 的蒙皮 2a 表面形成反射宽带窄脉冲超声信号 u_r 和透射宽带窄脉冲超声信号 u_t ,其中,透射宽带窄脉冲超声信号 u_t 经过蜂窝夹芯结构 2 的蒙皮 2a 后传播到蒙皮 2a/ 蜂窝芯连接层 2b,形成新的超声反射 / 折射,

[0071] 1) 当 u_t 的波长 $\lambda \ll h_i$ 时,这里, h_i 为蜂窝芯连接层 2b 的厚度,此时,

[0072] ①换能器 1 接收到来自蜂窝夹芯结构 2 的蒙皮 2a/ 蜂窝芯连接层 2b 的反射宽带窄脉冲超声信号 u_b 表示为：

$$[0073] \quad u_b = \frac{2\rho_1c_1(\rho_3c_3 - \rho_2c_2)}{(\rho_1c_1 + \rho_2c_2)(\rho_2c_2 + \rho_3c_3)} u_p \quad (1a)$$

[0074] 如图 1 (b) 所示, 对应的成像信号 G 表示为：

$$[0075] \quad G = ku_b \quad (1b)$$

[0076] 这里, G—为成像信号, 其域值范围为 [0, 255],

[0077] k—为调制系数, 根据 u_b 的大小和超声单元的增益, 由试验设定。

[0078] ②换能器 1 接收到来自蜂窝芯连接层 2b/ 蜂窝壁 2c 界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u_b' 表示为：

$$[0079] \quad u_b' = \frac{\rho_4c_4 - \rho_3c_3}{(\rho_3c_3 + \rho_4c_4)} (1 - u_b) \quad (2a)$$

[0080] 如图 1 (c) 所示, 对应的成像信号 G' 表示为：

$$[0081] \quad G' = ku_b' \quad (2b)$$

[0082] G' 的域值范围为 [0, 255],

[0083] ③换能器 1 接收到来自蜂窝芯连接层 2b/ 蜂窝格 2d 界面反射的宽带窄脉冲超声信号 u_b'' 表示为：

$$[0084] \quad u_b'' \approx -(1 - u_b) \quad (3a)$$

[0085] 对应的成像信号 G'' 表示为：

$$[0086] \quad G'' = ku_b'' \quad (3b)$$

[0087] G'' 的域值范围为 [0, 255],

[0088] 这里,

[0089] ρ_1 —为换能器 1 与被检测蜂窝夹芯结构 2 之间的声学耦合介质的密度,

[0090] ρ_2 —为蒙皮 2a 的材料的密度,

[0091] ρ_3 —当蒙皮 2a/ 蜂窝芯连接层 2b 界面没有缺陷时, ρ_3 为蜂窝芯连接层 2b 的材料的密度, 当蜂窝夹芯结构 2 的蒙皮 2a/ 蜂窝芯连接层 2b 界面存在脱粘缺陷时, ρ_3 近似为空气的密度,

[0092] ρ_4 —当蜂窝夹芯结构的蒙皮 2a/ 蜂窝壁 2c 界面没有缺陷时, ρ_4 为蜂窝芯 2c 的材料的密度, 当蜂窝夹芯结构的蒙皮 2a/ 蜂窝壁 2c 界面有缺陷时, ρ_4 近似为空气的密度,

[0093] c_1 —为换能器 1 与被检测蜂窝夹芯结构 2 之间的声学耦合介质中的声速,

[0094] c_2 —为蒙皮 2a 中的声速,

[0095] c_3 —当蒙皮 2a/ 蜂窝芯连接层 2b 界面没有缺陷时, c_3 为蜂窝芯连接层 2b 中的声速, 当蒙皮 2a/ 蜂窝芯连接层 2b 界面出现脱粘缺陷时, c_3 近似为空气中的声速,

[0096] c_4 —当蒙皮 2a/ 蜂窝壁 2c 界面没有缺陷时, c_4 为蜂窝芯 2c 中的声速, 当蒙皮 2a/ 蜂窝壁 2c 界面有缺陷时, c_4 近似为空气中的声速,

[0097] 进行缺陷判别：

[0098] ①根据换能器 1 接收到来自蜂窝夹芯结构 2 中的蒙皮 2a/ 蜂窝芯连接层 2b 界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u_b , 按照式 (1a) 判别蒙皮 2a/ 蜂窝芯连接层 2b 界面的缺陷, 按照式 (1b) 将反射宽带窄脉冲超声信号 u_b 转换为成像信号 G。

[0099] ②根据换能器 1 接收到来蜂窝芯连接层 2b/ 蜂窝壁 2c 界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u_b' ,按照式 (2a) 判别蜂窝芯连接层 2b/ 蜂窝壁 2c 界面的缺陷,按照式 (2b) 将反射超声宽带窄脉冲信号 u_b' 转换为成像信号 G' ,按照式 (3a) 判别蜂窝芯连接层 2b/ 蜂窝格 2d 界面,按照式 (3b) 将反射超声宽带窄脉冲信号 u_b'' 转换为成像信号 G'' 。

[0100] 2) 当 u_t 的波长 $\lambda \gg h_1$ 时,此时, u_t 只会形成蒙皮 2a/ 蜂窝壁 2c 界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u_c 和蒙皮 2a/ 蜂窝格 2d 界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u'_c ,分别表示为:

$$[0101] \quad u_c = \frac{2\rho_1c_1(\rho_4c_4 - \rho_2c_2)}{(\rho_1c_1 + \rho_2c_2)(\rho_2c_2 + \rho_4c_4)} u_p \quad (4a)$$

$$[0102] \quad u'_c \approx \frac{-2\rho_1c_1}{\rho_1c_1 + \rho_2c_2} u_p \quad (5a)$$

[0103] 分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示,。

[0104] 对应蜂窝芯连接层 2b/ 蜂窝壁 2c 界面的成像信号 G_c 和蒙皮 2a/ 蜂窝格 2d 界面的成像信号 G'_c 分别表示为:

$$[0105] \quad G_c = ku_c \quad (4b)$$

$$[0106] \quad G'_c = ku'_c \quad (5b)$$

[0107] G_c 和 G'_c 的域值范围 $[0, 255]$,

[0108] 当所选用的入射声波的波长 $\lambda \gg h_1$ 时,根据换能器 1 接收到来自蒙皮 2a/ 蜂窝壁 2c 界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u_c 和蒙皮 2a/ 蜂窝格 2d 界面的反射宽带窄脉冲超声信号 u'_c ,按照式 (4a) 和式 (5a) 判别蒙皮 2a/ 蜂窝壁 2c 界面的缺陷,按照式 (4b) 和式 (5b) 将对应的反射宽带窄脉冲超声信号 u_c 和 u'_c 分别转换为成像信号 G_c 和 G'_c 。

[0109] 根据被检测蜂窝夹芯结构、工艺的特点和检测要求,选择入射脉冲超声波的频率,用于检测蒙皮 2a/ 蜂窝芯连接层 2b 界面为胶接或焊接而成的蜂窝夹芯结构,频率在 5—15MHz 之间选择。

[0110] 换能器 1 与被检测蜂窝夹芯结构 2 之间采用喷液耦合、液膜接触耦合或液浸耦合方式。

[0111] 换能器 1 与被蜂窝夹芯结构 2 之间的声学耦合介质选用:水、油、冷却液或者其他液体耦合剂,以适应不同材料被检测结构或者零件在不同环境条件下的超声成像检测。

[0112] 换能器 1 的声束直径(大小) d_u 按式 (6) 选择,

$$[0113] \quad d_u \leq \min \{L_i, d_j\} \quad (6)$$

[0114] 这里, $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$,

[0115] $j = 1, 2, 3$,

[0116] L_i —表示蜂窝芯格的第 i 条边的边长,参见图 1(d) 所示,

[0117] d_j —表示第 j 条蜂窝芯格相对两平行边的边长,参见图 1(d) 所示,

[0118] min—表示取最小值,

[0119] 换能器 1 与蜂窝夹芯结构零件表面之间的距离 h_f 按式 (7) 选择,

$$[0120] \quad h_f = d_f \pm 0.5d_w \quad (7)$$

[0121] 这里, d_f —为换能器 1 的焦距,

[0122] d_w —为换能器 1 的焦距。

[0123] 扫描步进 S 按式 (8) 选择,

[0124] $S \leq (0.5-0.7) \times \min \{d_j\}$ (8)

[0125] 根据蜂窝夹芯结构的工艺特点,选择相应的换能器 1,用于胶接蜂窝夹芯结构和焊接蜂窝夹芯结构以及其他蜂窝夹芯结构的检测与缺陷判别。

[0126] 换能器的选择:可以根据蜂窝夹芯结构的工艺特点,选择相应的换能器 1,用于胶接蜂窝夹芯结构和焊接蜂窝夹芯结构以及其他蜂窝夹芯结构的检测与缺陷判别,推荐选用中航复合材料有限责任公司生产的 FJ 系列高分辨率超声换能器。

[0127] 蜂窝夹芯结构自动扫描超声成像检测系统成像过程,

[0128] 1) 蜂窝夹芯结构自动扫描超声成像检测系统包括换能器 1、超声单元 3、信号处理单元 4、机械扫查机构 5、扫查控制单元 6 和成像系统 7,如图 3 所示。换能器 1 采用具有自适应跟踪能力的高分辨率脉冲超声喷水式或者水膜式换能器,换能器 1 安装在机械扫查机构 5 中的换能器 1 安装座上,机械扫查机构 5 与扫查控制单元 6 连接,扫查控制单元 6 与成像系统 7 通过总线连接,在扫查控制单元 6 的控制下,实现换能器 1 对被检测夹芯结构的自动扫描,并将换能器 1 的每个检测点位置实时传送到成像系统 7 中;超声单元 3 的发射/接收 I/O 端与换能器 1 的信号端通过高频同轴电缆连接,超声单元 3 的信号输出端与信号处理单元 4 的模拟信号输入端连接,信号处理单元 4 通过 PCI 总线方式与成像系统 7 连接,由超声单元 3 对换能器 1 接收到的来自被检测夹芯结构 2 的超声脉冲信号进行放大、滤波等处理后,通过其信号输出端送到,由信号处理单元 4,由其转换为数字信号,并实时换能器 1 的每个检测点超声信号实时传送到成像系统 7 中,由成像系统 7 利用实时得到的每个检测点超声信号和检测点位置,按照选定的成像方式,实现检测结果的成像显示。

[0129] 2) 根据被检测蜂窝夹芯结构的几何特征和制造工艺特点,可以选择包含有换能器 1、超声单元 3、信号处理单元 4、机械扫查机构 5、扫查控制单元 6 和成像系统 7 等功能的自动扫描超声成像检测系统,用于实现本发明专利中的蜂窝夹芯结构自动扫描的超声成像检测方法,其中,机械扫查机构 5 和扫查控制单元 6 根据被检测夹芯结构的形面复杂程度和大小,可选择具有能实现换能器 1 的 (x, y, z) 位置调节和 (α, β, θ) 姿态调节的自动扫描超声成像检测系统。这里,

[0130] x, y, z —为换能器 1 在被检测蜂窝夹芯结构中的坐标位置,

[0131] α —为换能器 1 在 x 方向的摆角,

[0132] β —为换能器 1 在 y 方向的摆角,

[0133] θ —为换能器 1 在 z 方向的摆角,

[0134] 根据被检测蜂窝夹芯结构的几何形状和尺寸等特点,选用 1-6 个坐标自由度的超声自动扫描检测设备,实现不同形状、尺寸的蜂窝夹芯结构超声成像检测,推荐使用中航复合材料有限责任公司生产的 MUI 和 CUS 系列超声自动扫描检测设备。

[0135] 3) 蜂窝夹芯结构超声成像检测方法步骤是,

[0136] ①换能器选择

[0137] 根据被检测蜂窝夹芯结构几何特征和工艺、检测要求,选择换能器 1、超声自动扫描检测设备,确定自动扫描方向和步进方向,

[0138] ②零件装卡

[0139] 将被检测蜂窝夹芯结构 2 放置到所选择超声自动扫描检测设备的检测工位,检查

无误后,接通电源,开启检测设备,并进入超声自动扫描成像检测窗口,

[0140] ③参数设置

[0141] 控制程序加载与自检;调节换能器 1 与蜂窝夹芯结构表面之间的距离;设置扫描速度、步进、扫描范围;设置采样频率,信号闸门参数,

[0142] ④扫描成像

[0143] a) 判断是否开始自动扫描,如果不进入自动扫描,则等待扫描,否则执行下一步;

[0144] b) 开始行扫描;

[0145] c) 获取当前行扫描中检测位置点位置信号和超声信号;

[0146] d) 超声信号转化为成像信号数据;

[0147] e) 成像信号数据缓存;

[0148] f) 判断当前行是否结束,如未结束,重复执行步骤 c) 到 e);如果已结束,当前行成像数据保存到对应的行位置,并显示当前扫描行图像;

[0149] g) 判断零件扫描是否完成,如未完成,扫描步进后,重复步骤 b) 到 f);如果已完成零件扫描,结束扫描,进入图像分析。

[0150] 实施例一

[0151] 选择中航复合材料有限责任公司生产的 MUI-21 和 CUS-6000 超声自动扫描检测设备和 5MHz 的 FJ-1 高分辨率超声换能器和 10MHz 高分辨率超声换能器,分别采用水膜耦合和喷水对碳纤维复合材料蒙皮 /NOMEX 蜂窝夹芯结构进行了系列的实际检测应用,复合材料蜂窝夹芯结构的大小在 300×500mm—1500×5000mm 不等,

[0152] 复合材料蜂窝夹芯结构的检测

[0153] 将被检测复合材料蜂窝夹芯结构置于工作台上,换能器频率选择 5MHz,采用 CUS-6000 超声检测设备进行自动扫描检测,由 CUS-6000 超声检测设备将能器接收到来自复合材料蜂窝夹芯结构中的超声检测信号自动转化为图像信号,根据 CUS-6000 超声检测设备显示屏上显示的成像信号,按照式 (2b) 和式 (3b) 进行缺陷判别。

[0154] 实施例二

[0155] 选择中航复合材料有限责任公司生产的 MUI-21 和 CUS-6000 超声自动扫描检测设备和 5MHz 的 FJ-1 高分辨率超声换能器和 10MHz 高分辨率超声换能器,分别采用水膜耦合和喷水对金属蒙皮 / 钎焊蜂窝夹芯结构进行了系列的实际检测应用,钎焊蜂窝夹芯结构的大小在 500×1500mm—1500×2000mm 不等,

[0156] 钎焊蜂窝夹芯结构的检测

[0157] 将被检测钎焊蜂窝夹芯结构置于工作台上,换能器频率选择 10MHz,采用 CUS-6000 超声检测设备进行自动扫描检测,由 CUS-6000 超声检测设备将换能器接收到来自钎焊蜂窝夹芯结构中的超声检测信号自动转化为图像信号,根据 CUS-6000 超声检测设备显示屏上显示的成像信号,按照式 (2b) 和式 (3b) 进行缺陷判别。

[0158] 检测应用结果表明,本发明可检测出蜂窝夹芯结构中 $\Phi 3\text{mm}$ 的缺陷,可以非常清晰地再现蜂窝芯形状及蒙皮 / 蜂窝芯、蒙皮 / 蜂窝芯连接层、蜂窝芯连接层 / 蜂窝芯之间的缺陷和结合情况,取得了很好的实际检测效果。

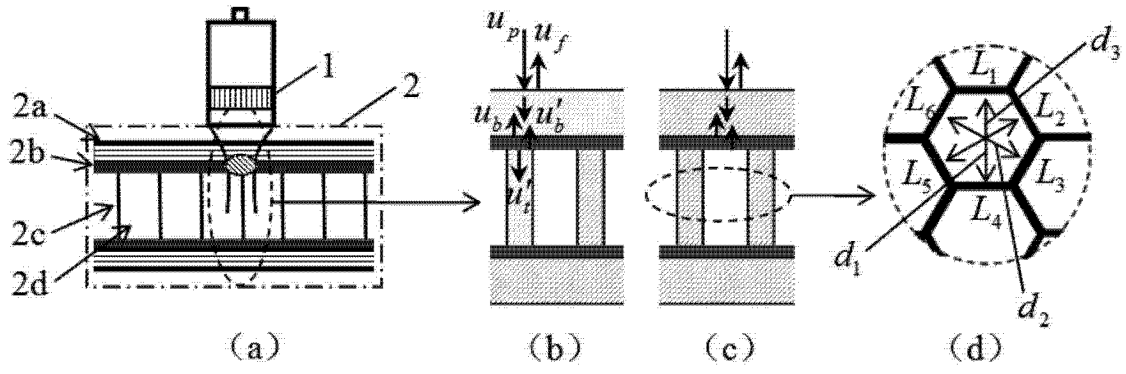


图 1

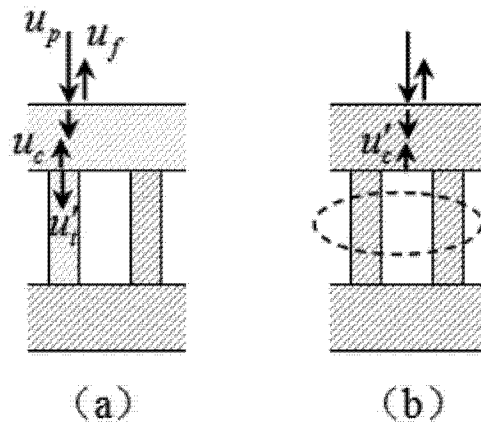


图 2

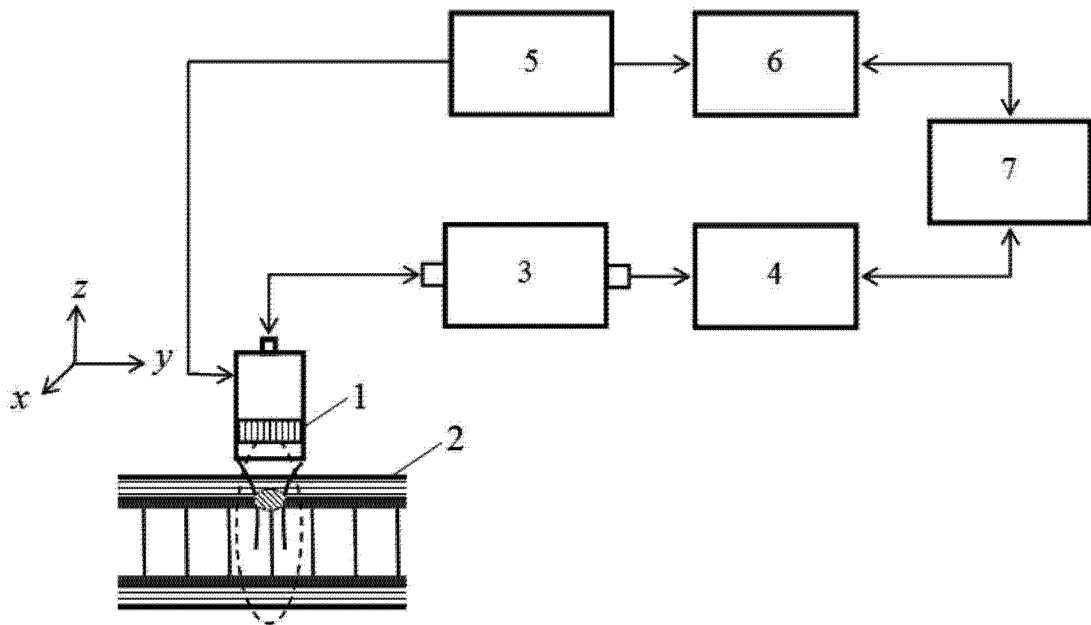


图 3