



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104977356 B

(45)授权公告日 2020.06.09

(21)申请号 201510462938.X

(22)申请日 2015.07.31

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104977356 A

(43)申请公布日 2015.10.14

(73)专利权人 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 傅天航

(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 29/04(2006.01)

(56)对比文件

CN 103852521 A,2014.06.11,

CN 102608214 A,2012.07.25,

JP 2000187024 A,2000.07.04,

US 5036496 A,1991.07.30,

CN 104198583 A,2014.12.10,

US 2009006005 A1,2009.01.01,

刘松平.大密度金属钎焊蜂窝构件超声检测
与缺陷识别技术的研究.《无损检测》.1995,第17
卷(第10期),

S. Gareth Pierce 等.Application of
ultrasonic Lamb wave techniques to the
evaluation of advanced composite
structures.《Proc. SPIE 3986, Smart
Structures and Materials 2000: Sensory
Phenomena and Measurement Instrumentation
for Smart Structures and Materials》.2002,

胡培.PMI 泡沫复合材料夹层结构的无损检
测方法.《材料工程/2009年增刊》.2009,

审查员 彭倩筠

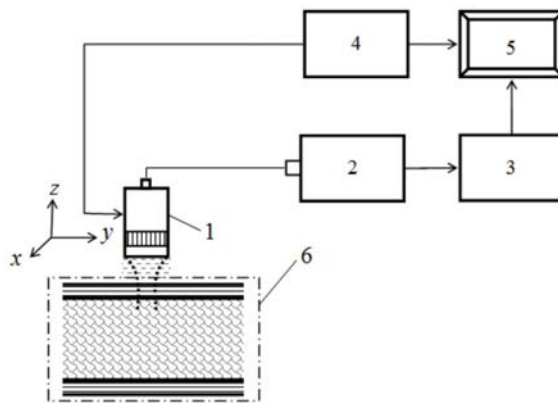
权利要求书2页 说明书9页 附图2页

(54)发明名称

一种基于反射原理的复合材料泡沫结构超
声检测方法

(57)摘要

本发明属于无损检测技术领域,涉及一种基
于反射原理的复合材料泡沫结构超声检测方法。
本发明方法利用宽带窄脉冲波在复合材料泡沫
结构中形成的超声回波,通过构建超声波在复
合材料泡沫结构中的传递函数,建立超声回波与
复合材料泡沫结构不同部位缺陷的数理关系,进行
缺陷判别和超声检测;可选择不同类型、大小和
频率的宽带窄脉冲超声波,采用超声反射检测方
法,实现不同复合材料泡沫结构的超声检测。实
际检测效果表明,显著地提高了复合材料泡沫结
构检测灵敏度和分辨率及检测能力,可准确检出
蒙皮、蒙皮/泡沫胶接区的缺陷和结合情况,大大
提高了检测的可靠性,表面检测盲区可达
0.13mm,检测灵敏度可Φ3mm。



1. 一种基于反射原理的复合材料泡沫结构超声检测方法, 利用超声反射法检测系统进行复合材料泡沫结构超声检测, 超声反射法检测系统包括换能器 (1)、超声单元 (2)、信号处理单元 (3)、扫查单元 (4) 和显示单元 (5), 其特征是,

1) 通过超声反射法检测系统中的换能器 (1) 产生宽带窄脉冲入射超声波 u_p , 并从被复合材料泡沫结构 (6) 的一侧入射, 分别在复合材料蒙皮 (6a或6c) 表面、复合材料蒙皮 (6a或6c)/胶接层 (6d或6e) 界面及复合材料蒙皮 (6a或6c)/胶接层 (6d或6e) 界面的缺陷区和胶接层 (6d或6e)/泡沫 (6b) 界面形成探测宽带窄脉冲超声波,

① 宽带窄脉冲入射超声波 u_p 在复合材料蒙皮 (6a或6c) 表面形成的宽带窄脉冲反射超声波 u_f 近似表示为,

$$u_f \approx \frac{\rho_1 c_1 - \rho_0 c_0}{\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1} u_p \quad (1)$$

这里,

ρ_0 —换能器 (1) 与复合材料蒙皮 (6a或6c) 之间的声学耦合介质的密度,

ρ_1 —为复合材料蒙皮 (6a或6c) 的密度,

c_0 —为换能器 (1) 与复合材料蒙皮 (6a或6c) 表面之间的声学耦合介质中的声速,

c_1 —为复合材料蒙皮 (6a或6c) 中的声速,

② 来自复合材料蒙皮 (6a或6c)/胶接层 (6d或6e) 界面的宽带窄脉冲反射超声波 u_b 近似表示为,

$$u_b \approx \frac{2\rho_0 c_0}{(\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1)(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)} [\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1 + \frac{2\rho_1 c_1(\rho_3 c_3 - \rho_2 c_2)}{\rho_2 c_2 + \rho_3 c_3}] u_p \quad (2)$$

这里,

ρ_2 —为复合材料泡沫结构 (6) 中的胶接层 (6d或6e) 的密度,

c_2 —为复合材料泡沫结构 (6) 中的胶接层 (6d或6e) 的声速,

ρ_3 —为复合材料泡沫结构 (6) 中的泡沫 (6b) 的密度,

c_3 —为复合材料泡沫结构 (6) 中的泡沫 (6b) 的声速,

③ 宽带窄脉冲入射超声波 u_p 在复合材料蒙皮 (6a或6c)/胶接层 (6d或6e) 界面的缺陷区和胶接层 (6d或6e)/泡沫 (6b) 界面的缺陷区形成的宽带窄脉冲反射超声波近似表示为,

$$u_d \approx -\frac{8\rho_0 c_0 \rho_1 c_1}{(\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1)(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)} u_p \quad (3)$$

2) 缺陷判别:

根据换能器 (1) 接收到来自复合材料泡沫结构 (6) 中的宽带窄脉冲反射超声波 u_b 和 u_f ,

当换能器 (1) 接收到的宽带窄脉冲反射超声波 u_r 近似表示为,

$$u_r \approx u_f + u_b \quad (4)$$

判别复合材料泡沫结构 (6) 中无缺陷,

当换能器 (1) 接收到的宽带窄脉冲反射超声波 u_r 近似表示为,

$$u_r \approx u_f + u_d + k u_b \quad (5)$$

这里,

$$\text{当 } S_d \leq S_u \text{ 时, } k = \frac{S_u - S_d}{S_u},$$

当 $S_d \geq S_u$ 时, $k = 0$,

S_u —为换能器 (1) 在复合材料泡沫结构 (6) 中形成的宽带窄脉冲入射超声波的声束面积 (1a),

S_d —为复合材料泡沫结构 (6) 中缺陷在垂直宽带窄脉冲入射超声波传播方向的投影面积,

分别判别复合材料蒙皮 (6a或6c) 中的缺陷、复合材料蒙皮 (6a或6c) /胶接层 (6d或6e) 界面的缺陷、胶接层 (6d或6e) /泡沫 (6b) 界面的缺陷,

根据宽带脉冲反射超声波 u_r 的时域特性和相位, 确定检出缺陷在复合材料泡沫结构 (6) 中的复合材料蒙皮 (6a或6c) 中、复合材料蒙皮 (6a或6c) /胶接层 (6d或6e) 界面、胶接层 (6d或6e) /泡沫 (6b) 界面的位置, 确定检出缺陷在复合材料泡沫结构 (6) 中的复合材料蒙皮 (6a或6c) 中的深度 h_d 、确定复合材料泡沫结构 (6) 中的蒙皮 (6a或6c) 的厚度 h_b ,

$$h_d = \frac{t_d c_1}{2} \quad (6)$$

$$h_b = \frac{t_b c_1}{2} \quad (7)$$

这里,

t_d —为 u_f 和 u_d 之间的时间差,

t_b —为 u_f 和 u_b 之间的时间差。

2. 根据权利要求1中所述的一种基于反射原理的复合材料泡沫结构超声检测方法, 其特征是, 根据被检测复合材料泡沫结构、工艺的特点和检测要求不同, 选择相应频率的宽带窄脉冲入射超声波, 用于检测复合材料泡沫结构中的蒙皮中的缺陷、蒙皮/泡沫胶接层界面的缺陷或泡沫胶接层/泡沫界面的缺陷, 用于检测复合材料泡沫结构中的蒙皮中的缺陷的频率在5MHz—15MHz范围内选择, 用于检测复合材料泡沫结构中的蒙皮/泡沫胶接层界面的缺陷或泡沫胶接层/泡沫界面的缺陷的频率在2MHz—5MHz范围内选择。

3. 根据权利要求1中所述的一种基于反射原理的复合材料泡沫结构超声检测方法, 其特征是, 通过选择具有单周脉冲特性的不同直径和类型的换能器 (1), 在被检测复合材料泡沫结构 (6) 中产生不同大小的宽带窄脉冲入射超声波的声束面积 S_u , 实现对不同复合材料泡沫结构 (6) 的超声检测, 根据复合材料泡沫结构 (6) 的厚度、材料和检出缺陷要求, 在0.5—10mm的直径范围内选择 S_u 的大小和类型, 换能器 (1) 与复合材料泡沫结构 (6) 表面之间采用不同粘度的耦合剂进行声学耦合, 用于不同扫查方式下换能器 (1) 的声学耦合, 以适应不同材料的被检测结构或者零件在不同环境条件与扫查条件下的超声检测; 换能器 (1) 与复合材料泡沫结构 (6) 表面之间的耦合剂采用喷液耦合或液膜接触耦合。

4. 根据权利要求1中所述的一种基于反射原理的复合材料泡沫结构超声检测方法, 其特征是, 换能器 (1) 和超声单元 (2) 相匹配, 实现单周脉冲特性的宽带窄脉冲超声波的发射/接收和检测结果的视频或者射频显示, 进行复合材料泡沫结构的高分辨率和无盲区的检测。

一种基于反射原理的复合材料泡沫结构超声检测方法

技术领域

[0001] 本发明属于无损检测技术领域,涉及一种基于反射原理的复合材料泡沫结构超声检测方法。

背景技术

[0002] 复合材料泡沫结构作为一种超轻结构,已在航空航天、交通等工业领域应用广泛,通过选用不同复合材料与泡沫材料,设计不同形状和厚度的泡沫胶接工艺,可以制造出形式多样化的复合材料泡沫结构。为了改进复合材料泡沫结构工艺、保证复合材料泡沫结构的质量,通常都需要对复合材料泡沫结构进行无损检测。较为常见的一种复合材料泡沫结构是,泡沫直接与复合材料蒙皮胶接,构成各种不同用途的复合材料泡沫结构,通常这类复合材料泡沫结构都具有大尺寸的特点。目前可行的无损检测方法有:(1)软X-射线检测方法,其主要不足是:1)对于X-射线束垂直取向的泡沫胶接界面及复合材料蒙皮中的缺陷难以检出;2)检测效率低、成本高、需要专门的辐射防护;(2)常规超声检测方法,其主要不足是:a)超声表面检测盲区大(通常在1-3mm),而复合材料泡沫结构中的蒙皮厚度通常在0.5-3mm,因此,极易造成漏检;b)检测信号回波为多周特性,分辨率低,难以准确确定泡沫复合材料中的缺陷深度位置和性质;c)当采用固体延时换能器进行手段扫查检测时,对表面检测盲区有所改善(可达0.8-2mm之间),但固体延时块与复合材料泡沫结构表面硬接触耦合,容易造成因耦合不良产生漏检,从而难以实现复合材料蒙皮及复合材料蒙皮/泡沫胶接界面缺陷的可靠检测和缺陷准确定位,也会导致缺陷判别和定位困难。

发明内容

[0003] 本发明的目的是针对复合材料泡沫结构,提出一种基于宽带窄脉冲复合材料泡沫结构的超声反射检测方法,实现复合材料泡沫结构中的蒙皮、蒙皮/泡沫胶接区等不同部位的超声检测,提高超声对复合材料泡沫结构中的蒙皮、蒙皮/泡沫胶接缺陷的检出能力和检测的可靠性,改进复合材料泡沫结构的可检性。本发明的技术解决方案是,

[0004] 利用的超声反射法检测系统进行复合材料泡沫结构超声检测,超声反射法检测系统包括换能器、超声单元、信号处理单元、扫查单元和显示单元,其特征是,

[0005] 1)通过超声反射法检测系统中的换能器产生宽带窄脉冲入射超声波 u_p ,并从被复合材料泡沫结构的一侧入射,分别在复合材料蒙皮表面、复合材料蒙皮/胶接层界面及复合材料蒙皮/胶接层界面的缺陷区和胶接层/泡沫界面形成探测宽带窄脉冲超声波,

[0006] ①宽带窄脉冲入射超声波 u_p 在复合材料蒙皮表面形成的宽带窄脉冲反射超声波 u_f 近似表示为,

$$[0007] \quad u_f \approx \frac{\rho_1 c_1 - \rho_0 c_0}{\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1} u_p \quad (1)$$

[0008] 这里,

[0009] ρ_0 —换能器与复合材料蒙皮之间的声学耦合介质的密度,

[0010] ρ_1 —为复合材料蒙皮的密度，

[0011] c_0 —为换能器与复合材料蒙皮表面之间的声学耦合介质中的声速，

[0012] c_1 —为复合材料蒙皮中的声速。

[0013] ②来自复合材料蒙皮/胶接层界面的宽带窄脉冲反射超声波 u_b 近似表示为，

$$[0014] \quad u_b \approx \frac{2\rho_0 c_0}{(\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1)(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)} [\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1 + \frac{2\rho_1 c_1(\rho_3 c_3 - \rho_2 c_2)}{\rho_2 c_2 + \rho_3 c_3}] u_p \quad (2)$$

[0015] 这里，

[0016] ρ_2 —为复合材料泡沫结构中的胶接层的密度，

[0017] c_2 —为复合材料泡沫结构中的胶接层的声速，

[0018] ρ_3 —为复合材料泡沫结构中的泡沫的密度，

[0019] c_3 —为复合材料泡沫结构中的泡沫的声速，

[0020] ③宽带窄脉冲入射超声波 u_p 在复合材料蒙皮/胶接层界面的缺陷区和胶接层/泡沫界面的缺陷区形成的宽带窄脉冲超声反射声波近似表示为，

$$[0021] \quad u_d \approx -\frac{8\rho_0 c_0 \rho_1 c_1}{(\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1)(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)} u_p \quad (3)$$

[0022] 2) 缺陷判别：

[0023] 根据换能器接收到来自复合材料泡沫结构中的宽带窄脉冲反射超声波 u_b 和 u_f ，

[0024] 当换能器接收到的宽带窄脉冲反射超声波 u_r 近似表示为，

$$[0025] \quad u_r \approx u_f + u_b \quad (4)$$

[0026] 判别复合材料泡沫结构中无缺陷，

[0027] 当换能器接收到的宽带窄脉冲超声反射声波 u_r 近似表示为，

$$[0028] \quad u_r \approx u_f + u_d + k u_b \quad (5)$$

[0029] 这里，

$$[0030] \quad \text{当 } S_d \leq S_u \text{ 时, } k = \frac{S_u - S_d}{S_u},$$

[0031] 当 $S_d \geq S_u$ 时, $k=0$ ，

[0032] S_u —为换能器在复合材料泡沫结构中形成的宽带窄脉冲入射超声波的声束面积(1a)，

[0033] S_d —为复合材料泡沫结构中缺陷在垂直宽带窄脉冲入射超声波传播方向的投影面积，

[0034] 分别判别复合材料蒙皮中的缺陷、复合材料蒙皮/胶接层界面的缺陷、胶接层/泡沫界面的缺陷。

[0035] 根据宽带脉冲反射超声波 u_r 的时域特性和相位，确定检出缺陷在复合材料泡沫结构中的复合材料蒙皮中、复合材料蒙皮/胶接层界面、胶接层/泡沫界面的位置，确定检出缺陷在复合材料泡沫结构中的复合材料蒙皮中深度 h_d ，确定复合材料泡沫结构中的蒙皮的厚度 h_b ，

$$[0036] \quad h_d = \frac{t_d c_1}{2} \quad (6)$$

$$[0037] \quad h_b = \frac{t_b c_1}{2} \quad (7)$$

[0038] 这里，

[0039] t_d —为 u_f 和 u_d 之间的时间差，

[0040] t_b —为 u_f 和 u_b 之间的时间差。

[0041] 根据被检测复合材料泡沫结构、工艺的特点和检测要求不同，选择相应频率的宽带脉冲入射超声波，用于检测复合材料泡沫结构中的蒙皮中的缺陷、蒙皮/泡沫胶接层界面的缺陷或泡沫胶接层/泡沫界面的缺陷，用于检测复合材料泡沫结构中的蒙皮中的缺陷的频率在5MHz—15MHz范围内选择，用于检测复合材料泡沫结构中的蒙皮/泡沫胶接层界面的缺陷或泡沫胶接层/泡沫界面的缺陷的频率在2MHz—5MHz范围内选择。

[0042] 通过选择具有单周脉冲特性的不同直径和类型的换能器，在被检测复合材料泡沫结构中产生不同大小的宽带窄脉冲入射超声波的声束面积 S_u ，实现对不同复合材料泡沫结构的超声检测，根据复合材料泡沫结构的厚度、材料和检出缺陷要求，在0.5—10mm的直径范围内选择 S_u 的大小和类型，换能器与复合材料泡沫结构表面之间采用不同粘度的耦合剂进行声学耦合，即：喷液耦合或液膜接触耦合，用于不同扫查方式下换能器的声学耦合，以适应不同材料的被检测结构或者零件在不同环境条件与扫查条件下的超声检测。

[0043] 换能器和超声单元相匹配，实现单周脉冲特性的宽带窄脉冲超声波的发射/接收和检测结果的视频、射频或者图像显示，进行复合材料泡沫结构的高分辨率和无盲区的检测。

[0044] 本发明具有的优点和有益效果，

[0045] 1. 针对复合材料泡沫结构的超声反射检测，通过构建复合材料泡沫结构的声波传播行为和缺陷判别函数，清晰地表征了复合材料泡沫结构中各种部位、不同特点的缺陷与接收信号之间的数理联系，基于此数理联系，用于超声检测和缺陷判别，明显提高了复合材料泡沫结构超声缺陷定性定量检测的准确性；

[0046] 2. 针对复合材料泡沫结构的超声检测，本发明提出采用宽带窄脉冲产生入射声波，使换能器与超声单元匹配，提高入射声波的能量的同时，还保持有足够的空间分辨率，从而显著提高了对复合材料泡沫结构的检测能力和缺陷分辨率及检测灵敏度，表面检测盲区 and 检测分辨率可达到单个复合材料铺层厚度，约0.13mm，检测灵敏度可达 Φ 3mm，大大地提高了复合材料泡沫结构表面及近表面缺陷的检出能力；

[0047] 3. 采用宽带窄脉冲超声激励/接收方法，基于超声反射模式，使超声回波信号具有单周特性，从而可以准确地用于判断和确定复合材料泡沫结构中的缺陷深度位置和缺陷性质；

[0048] 4. 换能器与被检测复合材料泡沫结构之间采用水膜或液膜耦合，显著改善了换能器扫查过程中的耦合效果，明显提高了检测可靠性；而且换能器只需位于复合材料泡沫结构的一侧，既简化了扫查机构，也能确定检出缺陷的深度位置和分布区域，显著提高了对复合材料蒙皮及复合材料蒙皮/泡沫胶接界面的缺陷检出能力和定性定量定位能力；

[0049] 5. 利用本发明提出的一种复合材料泡沫结构超声反射检测方法，既可实现手动扫查检测，也可以实现自动扫描检测，检测效率高、成本低、环保，可以准确地确定检出缺陷在泡沫结构中的部位和深度位置，从而为工艺改进和产品质量控制提供了十分重要的无损检

测方法和技术手段。

附图说明

[0050] 图1是本发明的复合材料泡沫结构超声反射检测方法原理示意图,其中,图1(a)是本发明专利的检测原理示意图,图1(b)是复合材料泡沫结构中没有缺陷时宽带窄脉冲超声波在其内部的传播示意图,图1(c)是蒙皮中有缺陷时宽带窄脉冲超声波在复合材料泡沫结构中的传播示意图,图1(d)是胶接层中有缺陷时宽带窄脉冲超声波在复合材料泡沫结构中的传播示意图,图1(e)是宽带窄脉冲入射超声波的声束面积与缺陷大小的关系示意图;

[0051] 图2是本发明的缺陷深度定位原理示意图;

[0052] 图3是本发明的复合材料泡沫结构超声反射检测实现方法原理组成。

具体实施方式

[0053] 本发明方法利用超声反射法检测系统进行复合材料泡沫结构超声检测,复合材料泡沫结构如图1(a)所示,超声反射法检测系统主要包括换能器1、超声单元2、信号处理单元3、扫查单元4和显示单元5,利用超声反射法检测系统中的换能器1产生宽带窄脉冲入射超声波 u_p ,从被复合材料泡沫结构6的一侧入射,形成探测宽带窄脉冲超声波,如图1所示。宽带窄脉冲入射超声波 u_p 经过在复合材料泡沫结构6中的复合材料蒙皮6a或6c一侧→泡沫区6b传播后,宽带窄脉冲入射超声波 u_p 的一部分能量在复合材料蒙皮6a或6c表面形成宽带窄脉冲反射超声波 u^f ,另一部分能量传播到复合材料蒙皮6a或6c中,并在复合材料蒙皮泡沫区6b/蒙皮6a或者6c界面形成宽带窄脉冲反射超声波 u^b ,如图1所示。

[0054] 1)当宽带窄脉冲入射超声波 u_p 传播到复合材料泡沫结构6的一侧,此时,

[0055] ①如图1(a)所示,宽带窄脉冲入射超声波 u_p 在复合材料蒙皮6a或6c表面形成的宽带窄脉冲反射超声波 u_f 近似表示为,

$$[0056] \quad u_f \approx \frac{\rho_1 c_1 - \rho_0 c_0}{\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1} u_p \quad (1)$$

[0057] 这里,

[0058] ρ_0 —换能器1与复合材料蒙皮6a或6c之间的声学耦合介质的密度,

[0059] ρ_1 —为复合材料蒙皮6a或6c的密度,

[0060] c_0 —为换能器1与复合材料蒙皮6a或6c表面之间的声学耦合介质中的声速,

[0061] c_1 —为复合材料蒙皮6a或6c中的声速。

[0062] ②如图1(a)所示,来自复合材料蒙皮6a或6c/胶接层6d或6e界面的宽带窄脉冲反射超声波 u_b 近似表示为,

$$[0063] \quad u_b \approx \frac{2\rho_0 c_0}{(\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1)(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)} \left[\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1 + \frac{2\rho_1 c_1 (\rho_3 c_3 - \rho_2 c_2)}{\rho_2 c_2 + \rho_3 c_3} \right] u_p \quad (2)$$

[0064] 这里,

[0065] ρ_2 —为复合材料泡沫结构6中的胶接层6d或6e的密度,

[0066] c_2 —为复合材料泡沫结构6中的胶接层6d或6e的声速,

[0067] ρ_3 —为复合材料泡沫结构6中的泡沫6b的密度,

[0068] c_3 —为复合材料泡沫结构6中的泡沫6b的声速,

[0069] 此时,换能器1接收到的宽带窄脉冲反射超声波 u_r 近似表示为,

$$[0070] \quad u_r \approx u_f + u_b \quad (3)$$

[0071] ③如图1 (b) 和 (c) 所示,宽带窄脉冲入射超声波 u_p 在复合材料蒙皮6a或6c/胶接层6d或6e界面的缺陷区和胶接层6d或6e/泡沫6b界面的缺陷区形成的宽带窄脉冲超声反射声波近似表示为,

$$[0072] \quad u_d \approx -\frac{8\rho_0 c_0 \rho_1 c_1}{(\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1)(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)} u_p \quad (4)$$

[0073] 此时换能器1接收到的宽带窄脉冲超声反射声波 u_r 近似表示为,

$$[0074] \quad u_r \approx u_f + u_d + k u_b \quad (5)$$

[0075] 这里,

$$[0076] \quad \text{当 } S_d \leq S_u \text{ 时, } k = \frac{S_u - S_d}{S_u},$$

$$[0077] \quad \text{当 } S_d \geq S_u \text{ 时, } k = 0,$$

[0078] S_u —为换能器1在复合材料泡沫结构6中形成的宽带窄脉冲入射超声波的声束面积 $1a$,

[0079] S_d —为复合材料泡沫结构6中缺陷在垂直宽带窄脉冲入射超声波传播方向的投影面积,如图1 (d) 所示。

[0080] 2) 缺陷判别:

[0081] ①根据换能器1接收到来自泡沫结构6中的宽带窄脉冲反射超声波 u_b 和 u_f ,按照式(3)判别复合材料泡沫结构6中无缺陷。

[0082] ②根据换能器1接收到来自复合材料泡沫结构6中的宽带窄脉冲反射超声波 u_b 和 u_f ,按照式(5)判别复合材料蒙皮6a或6c中的缺陷、复合材料蒙皮6a或6c/胶接层6d或6e界面的缺陷、胶接层6d或6e/泡沫6b界面的缺陷。

[0083] ③根据宽带脉冲反射超声波 u_r 的时域特性和相位确定检出缺陷在复合材料泡沫结构6中复合材料蒙皮6a或6c中、复合材料蒙皮6a或6c/胶接层6d或6e界面、胶接层6d或6e/泡沫6b界面的位置和深度 h_d 及蒙皮的厚度 h_b ,

$$[0084] \quad h_d = \frac{t_d c_1}{2} \quad (6)$$

$$[0085] \quad h_b = \frac{t_b c_1}{2} \quad (7)$$

[0086] 这里,

[0087] t_d —为 u_f 和 u_d 之间的时间差,

[0088] t_b —为 u_f 和 u_b 之间的时间差。

[0089] 3) 不同复合材料泡沫结构的检测:

[0090] 对于不同复合材料泡沫结构的检测,由于 ρ_1 、 ρ_2 、 c_1 、 c_2 不同,同样利用式(3)到式(5),可以进行缺陷的判别。

[0091] 4) 检测结果显示:

[0092] 根据换能器1接收到的超声回波 u_r ,可以将其转换为视频信号、射频信号和成像信号,用于检测结果的显示。

[0093] 根据被检测复合材料泡沫结构、工艺的特点和检测要求不同,选择相应频率的宽带脉冲入射超声波,用于检测复合材料泡沫结构中的蒙皮中的缺陷、蒙皮/泡沫胶接层界面的缺陷、泡沫胶接层/泡沫界面的缺陷,

[0094] 对于复合材料泡沫结构6中不同部位的缺陷检测,宽带脉冲入射超声波的频率在2MHz—15MHz范围内选择,其中用于检测复合材料泡沫结构中的蒙皮中的缺陷的频率在5MHz—15MHz范围内选择,用于检测复合材料泡沫结构中的蒙皮/泡沫胶接层界面的缺陷或泡沫胶接层/泡沫界面的缺陷的频率在2MHz—5MHz范围内选择。

[0095] 通过选择具有单周脉冲特性的不同直径和类型的换能器1,在被检测复合材料泡沫结构6中产生不同大小的宽带窄脉冲入射超声波的声束面积 S_u ,实现对不同复合材料泡沫结构6的超声检测,根据复合材料泡沫结构6的厚度、材料和检出缺陷要求,在0.5—10mm的直径范围内选择 S_u 的大小和类型,换能器1与复合材料泡沫结构6表面之间采用不同粘度的耦合剂进行声学耦合,即:喷液耦合或液膜接触耦合,用于不同扫查方式下换能器1的声学耦合,以适应不同材料被检测结构或者零件在不同环境条件与扫查条件下的超声检测。

[0096] 换能器1和超声单元2相匹配,实现单周脉冲特性的宽带窄脉冲超声波的发射/接收和检测结果的视频、射频或者图像显示,进行复合材料泡沫结构的高分辨率和无盲区的检测,表面检测盲区和分辨率可达0.13mm或单个复合材料铺层厚度。

[0097] 本发明方法的实现过程是,

[0098] 1)实现复合材料泡沫结构的超声反射检测的系统主要包括:换能器1、超声单元2、信号处理单元、扫查单元4和显示单元5,参见图3,其中,

[0099] 对于自动扫描检测,换能器1安装在扫查单元5上,超声单元2的发射端与换能器1的信号端通过高频同轴电缆连接,超声单元2的信号输出端与信号处理单元3的接收端通过高频同轴电缆连接,显示单元5的信号端通过高频同轴电缆连接与信号处理单元4的信号输出端连接。

[0100] 对于手动扫描检测,换能器1采用手持操作,超声单元2的发射端与换能器1的信号端通过高频同轴电缆连接。

[0101] 换能器1:选用高分辨率脉冲换能器,工作在反射模式,换能器1与复合材料泡沫结构表面之间水或者液膜耦合。

[0102] 超声单元2:采用冲击波工作方式,在其发射端输出一个高压冲击激励脉冲,超声单元2的输出阻抗可调,用于激励换能器1,在复合材料泡沫结构中形成最佳的宽带窄脉冲入射超声波 u_p ,换能器1接收到的宽带窄脉冲反射超声 u_r 可通过视频、射频信号在超声单元2中实时显示,可实现复合材料泡沫结构的手动扫查检测,推荐选择使用中航复合材料有限责任公司生产的UPower-1或FCC-D。对于自动扫描检测,超声单元2的输出信号与信号处理单元3相连接,用于实现复合材料泡沫结构6的自动扫描成像检测。

[0103] 信号处理单元3:由前置变换和放大滤波两大部分构成,采用高增益低噪声处理模块构成,信号处理单元3的增益可调,调节范围不小于30dB,对来自超声单元2的检测信号进行数字化处理后,通过数据总线送显示单元5,进行超声检测结果的成像显示,推荐选择使用中航复合材料有限责任公司生产的MUT-1。

[0104] 扫查单元4:对于自动扫查检测,根据被检测复合材料泡沫结构的形状选择扫查单元,换能器1安装在扫描单元上,用于实现复合材料泡沫结构的自动扫描,换能器的扫查位

置信号通过其数据接口送显示单元5,用于超声检测结果的成像显示。

[0105] 显示单元5:采用数字显示和数字成像方式,用于显示超声检测结果图像,对于自动扫描检测,根据来自扫查单元4的位置数据和信号处理单元3的超声检测数据,对检测结果进行数字成像显示,推荐选择使用中航复合材料有限责任公司生产的CUS-6000、CUS-21J构成显示单元5。

[0106] 2) 根据被检测复合材料泡沫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2、信号处理单元3、扫查单元4和显示单元5等功能的超声检测系统,用于实现本发明专利中的复合材料泡沫结构手动扫查检测或者自动扫描的超声检测,其中,扫查单元4可根据被检测复合材料泡沫的形面复杂程度和大小,选择具有能实现换能器1的(x, y, z)位置调节和(α, β, θ)姿态调节的超声检测系统。这里,

[0107] x, y, z—为换能器1在被检测泡沫结构中的坐标位置,

[0108] α —为换能器1在x方向的摆角,

[0109] β —为换能器1在y方向的摆角,

[0110] θ —为换能器1在z方向的摆角,

[0111] 3) 复合材料泡沫结构超声反射检测方法的步骤是,

[0112] ①换能器选择

[0113] 根据被检测复合材料泡沫结构6的材料和几何特征、检测要求,选择换能器1,

[0114] ②超声检测系统连接

[0115] 将用于复合材料泡沫结构6超声检测的系统各单元按照1)进行连接,或者按照2)要求选择能够实现本发明专利方法的超声检测系统,确定扫描方向和步进方向,

[0116] ③零件装卡

[0117] 将被检测复合材料泡沫结构6放置到所选择超声检测设备的工作台上,检查无误后,超声单元2、信号处理单元3、显示单元5通电,并换能器1安装在扫查机构4上,

[0118] ④参数设置

[0119] 调节换能器1与复合材料泡沫结构6表面之间的距离和耦合效果,并调节超声单元2的输出阻抗和信号处理单元3的增益,使显示单元5中显示的超声信号处于最佳位置;设置扫描速度、步进、扫描范围;设置采样频率,信号闸门参数,

[0120] ⑤扫描检测

[0121] a) 判断是否开始扫描,如果不进入扫描,则等待扫描,否则执行下一步;

[0122] b) 移动扫查机构,进行扫描检测;

[0123] c) 获取当前行扫描位置点的超声信号 u_r ;

[0124] d) 进行超声信号的显示和数据缓存;

[0125] e) 判断当前行是否结束,如未结束,重复执行步骤b)到d);

[0126] f) 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e);如果已完成零件扫描,结束扫描。

[0127] 换能器1和超声单元2相匹配,实现单周脉冲特性超声波的发射/接收和检测结果视频、射频显示,进行复合材料泡沫结构的高分辨率和无盲区的检测,表面检测盲区和分辨率可达单个复合材料铺层厚度,约0.13mm。

[0128] 实施例一

[0129] 选择中航复合材料有限责任公司生产的MUT-1超声检测设备和FJ-1高分辨率换能器,采用水膜耦合对多种复合材料泡沫结构进行了系列的实际手动扫描检测应用,复合材料泡沫结构的大小在 $100 \times 500\text{mm}$ — $500 \times 5000\text{mm}$ 不等,泡沫的厚度在 10mm — 150mm 不等,复合材料蒙皮厚度 $0.5\text{--}3\text{mm}$ 不等,

[0130] 1) 复合材料泡沫结构中蒙皮中缺陷的检测

[0131] 将被检测复合材料泡沫结构置于工作台上,换能器频率选择 10MHz ,采用MUT-1超声检测设备进行手动扫描检测,根据MUT-1超声检测设备显示屏上显示的来自复合材料泡沫结构中的蒙皮中的超声检测信号进行缺陷判别:(a)当显示信号满足式(4)时,表明此时换能器所对应的复合材料泡沫结构中的蒙皮位置没有缺陷,此时可以根据式(7)确定被检测位置的蒙皮厚度;(b)当显示信号满足式(5)时,表明此时换能器所对应的复合材料泡沫结构中的蒙皮位置有缺陷,此时,根据式(6)确定缺陷的深度。

[0132] 2) 复合材料泡沫结构中的蒙皮/胶接层界面和胶接层/泡沫界面中的缺陷的检测

[0133] 将被检测复合材料泡沫结构置于工作台上,换能器频率选择 5MHz ,采用MUT-1超声检测设备进行手动扫描检测,根据MUT-1超声检测设备显示屏上显示的来自复合材料泡沫结构中蒙皮/胶接层界面和胶接层/泡沫界面的超声检测信号进行缺陷判别:(a)当显示信号满足式(4)时,表明此时换能器所对应的复合材料泡沫结构中的蒙皮/胶接层界面和胶接层/泡沫界面中的位置没有缺陷;(b)当显示信号为满足式(5)时,表明此时换能器所对应的复合材料泡沫结构中的蒙皮/胶接层界面和胶接层/泡沫界面中的位置有缺陷,此时,根据式(6)确定缺陷的深度。

[0134] 实施例二

[0135] 选择中航复合材料有限责任公司生产的CUS-6000超声检测设备,采用液膜耦合对多种复合材料泡沫结构进行了系列的实际自动扫描检测应用,其中,换能器频率选择 4MHz 和 15MHz ,复合材料泡沫结构的大小在 $200 \times 500\text{mm}$ — $500 \times 5000\text{mm}$ 不等,泡沫的厚度在 10mm — 150mm 不等,复合材料蒙皮厚度 $0.5\text{--}3\text{mm}$ 不等,

[0136] 1) 复合材料泡沫结构中蒙皮中缺陷的检测

[0137] 将被检测复合材料泡沫结构置于工作台上,换能器频率选择 15MHz ,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复合材料泡沫结构中的蒙皮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图像的灰度或者颜色进行缺陷判别:(a)当能器接收的信号满足式(4)时,对应的图像信号为无缺陷显示颜色或者灰度,表明此时换能器所对应的复合材料泡沫结构中的蒙皮位置没有缺陷;(b)当换能器接收的信号满足式(5)时,对应的图像信号为有缺陷显示颜色或者灰度,表明此时换能器所对应的复合材料泡沫结构中的蒙皮位置有缺陷;当需要确定缺陷的深度或者蒙皮的厚度时,参见实施例一中的方法,利用手动扫描检测确定。

[0138] 2) 复合材料泡沫结构中的蒙皮/胶接层界面和胶接层/泡沫界面中的缺陷的检测

[0139] 将被检测复合材料泡沫结构置于工作台上,换能器频率选择 4MHz ,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复合材料泡沫结构中的蒙皮/胶接层界面和胶接层/泡沫界面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图像的灰度或者颜色进行缺陷判别:(a)当换能器接收的信号满足式(4)时,对应的图像信号为无缺陷显示颜色或者灰度,表明此时换

能器所对应的复合材料泡沫结构中的蒙皮/胶接层界面和胶接层/泡沫界面中的位置没有缺陷；(b) 当换能器接收的信号满足式 (5) 时，对应的图像信号为有缺陷显示颜色或者灰度，表明此时换能器所对应的复合材料泡沫结构中的蒙皮/胶接层界面和胶接层/泡沫界面中的位置有缺陷。

[0140] 检测应用结果表明，本发明可检测出复合材料泡沫结构中蒙皮区 $\Phi 3\text{mm}$ 的缺陷，蒙皮/泡沫胶接区 $\Phi 6\text{mm}$ 的膜上和膜下脱粘缺陷以及胶层微细气孔，可以非常清晰地检测出蒙皮、蒙皮/泡沫胶接区的缺陷和结合情况，取得了很好的实际检测效果。

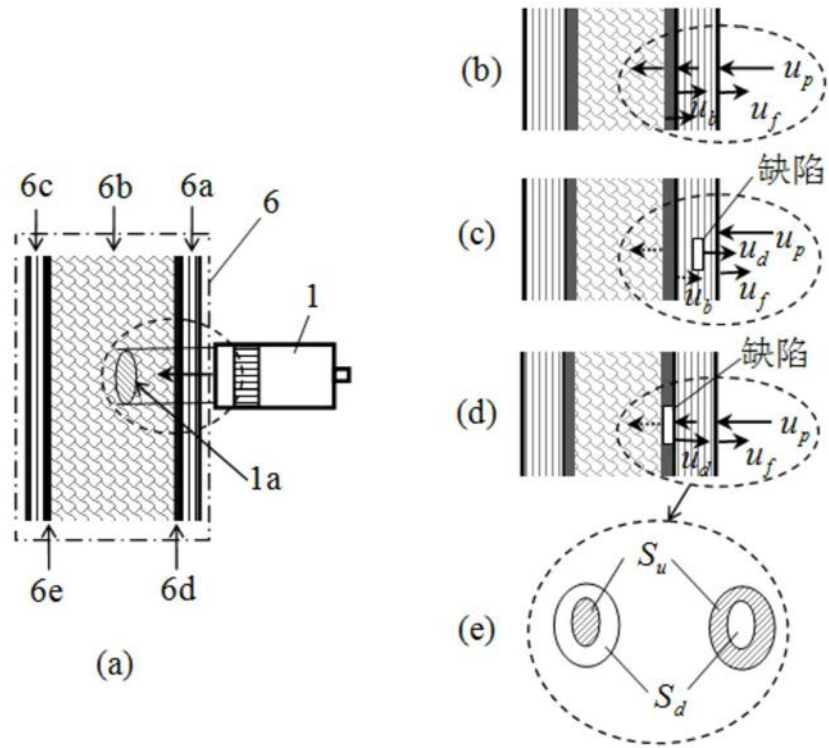


图1

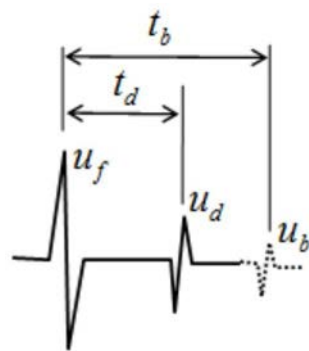


图2

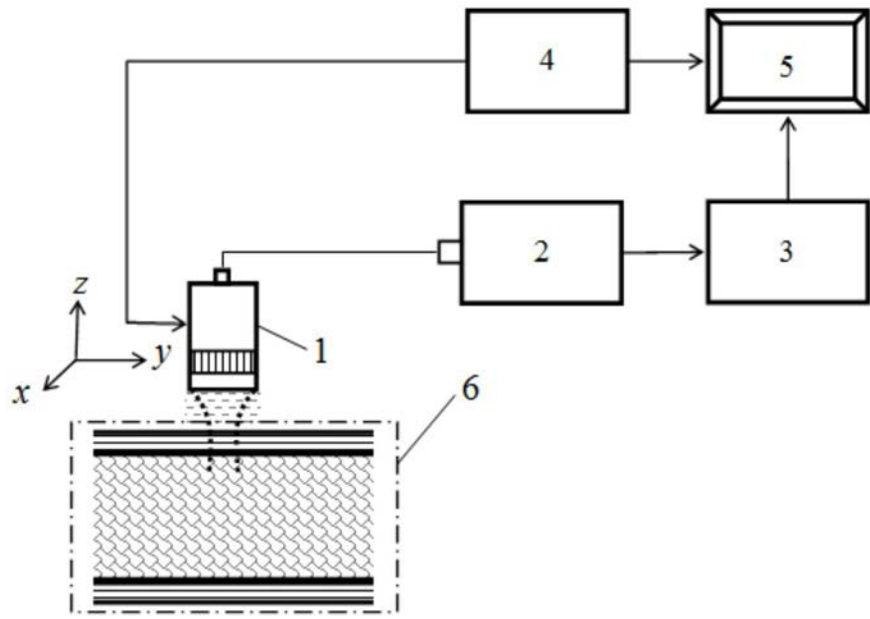


图3