



中华人民共和国国家标准

GB/T 38895—2020

无损检测 电磁声换能器(EMATs)指南

Non-destructive testing—Guidelines for electromagnetic acoustic
transducers (EMATs)

2020-06-02 发布

2020-12-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 由制造者提供的换能器技术指标 2

5 一般要求 3

6 测试器具 4

7 换能器性能要求 6

8 检测报告..... 19



前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56)提出并归口。

本标准起草单位:爱德森(厦门)电子有限公司、中国特种设备检测研究院、中北大学、清华大学、浙江大学、武汉中科创新技术股份有限公司、广东汕头超声电子股份有限公司、钢铁研究总院、中国科学院金属研究所、中国铁道科学研究院集团有限公司金属及化学研究所、中国科学院声学研究所。

本标准主要起草人:郑阳、沈功田、林俊明、胡斌、张宗健、周进节、李素军、谭继东、蓝麒、崔高宇、黄松岭、唐志峰、王子成、詹红庆、张建卫、蔡桂喜、黄凤英、沈建中。



无损检测 电磁声换能器(EMATs)指南

1 范围

本标准规定了超声检测用电磁声换能器性能测试与检验的一般要求、由制造者提供的技术指标、测试器具、性能要求和测试报告。

本标准适用于电磁声体波(横波、纵波)换能器。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 3880.1 一般工业用铝及铝合金板、带材 第1部分:一般要求
- GB/T 12604.1 无损检测 术语 超声检测
- GB/T 19001 质量管理体系 要求
- GB/T 19799.2 无损检测 超声检测 2号校准试块
- GB/T 27664.2 无损检测 超声检测设备的性能与检验 第2部分:探头
- GB/T 33885 无损检测仪器 抽样、出厂检验、型式检验基本要求
- GB/T 34885 无损检测 电磁超声检测 总则

3 术语和定义

GB/T 12604.1、GB/T 27664.2 和 GB/T 34885 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

电磁声换能器 **electromagnetic acoustic transducer**
激励和接收超声体波(横波、纵波)的电磁声换能器。

3.2

偏置磁场 **bias magnetic field**
提供电磁声换能器工作的外加磁场。
注:偏置磁场的类型有永磁铁和电磁铁。

3.3

换能器数据表 **EMAT data sheet**
描述换能器性能参数的表格。
注:换能器数据表不作为单个换能器性能的检测证书。

3.4

提离 **lift-off**
电磁声换能器前端检测面距被检工件表面的距离。

3.5

操作温度范围 **operating temperature range**
能够正常检测被检对象的温度范围。

3.6

高温操作时限 **high-temperature operable time**

电磁声换能器在高温下工作允许的操作时间。

3.7

工作电流 **standard operating current**

电磁声换能器正常工作时通过的电流。

3.8

最大允许电流 **maximum allowable current**

电磁声换能器允许通过的最大电流。

3.9

标准工作电压 **standard operating voltage**

电磁声换能器正常工作的标准工作电压。

3.10

最大允许电压 **maximum allowable voltage**

电磁声换能器允许加载的最大电压。

4 由制造者提供的换能器技术指标

4.1 换能器数据表

表 1 给出了本标准规定的由制造者提供的所有换能器数据表中的项目清单,该数据表也应包含有关测试换能器用的仪器及其设定值、测试条件等数据。

表 1 数据表中列出的项目清单

应提供的项目、测量的 或计算的参数	电磁声换能器类别							
	直入射				斜入射			
	横波		纵波		横波		纵波	
	非聚焦	聚焦	非聚焦	聚焦	非聚焦	聚焦	非聚焦	聚焦
制造商名称	I	I	I	I	I	I	I	I
换能器类型	I	I	I	I	I	I	I	I
换能器重量和尺寸	I	I	I	I	I	I	I	I
连接器类型	I	I	I	I	I	I	I	I
线圈形状和尺寸	I	I	I	I	I	I	I	I
偏置磁场类型	I	I	I	I	I	I	I	I
最大允许电流	I	I	I	I	I	I	I	I
标准工作电流	I	I	I	I	I	I	I	I
最大允许电压	I	I	I	I	I	I	I	I
标准工作电压	I	I	I	I	I	I	I	I
标准允许提离	M	M	M	M	M	M	M	M
操作温度范围	M	M	M	M	M	M	M	M

表 1（续）

应提供的项目、测量的 或计算的参数	电磁声换能器类别							
	直入射				斜入射			
	横波		纵波		横波		纵波	
	非聚焦	聚焦	非聚焦	聚焦	非聚焦	聚焦	非聚焦	聚焦
高温操作时限	M	M	M	M	M	M	M	M
脉冲波形(时间和频率)	M	M	M	M	M	M	M	M
中心频率和带宽	M	M	M	M	M	M	M	M
相对脉冲回波灵敏度	M	M	M	M	M	M	M	M
距离幅度曲线	M、C	M、C	M、C	M、C	M、C	M、C	M、C	M、C
阻抗特性	M	M	M	M	M	M	M	M
辐射声场(铁磁性和非铁磁性)	M	M	M	M	M	M	M	M
近场长度	M	M	M	M	M	M	M	M
声束角	—	—	—	—	M	M	M	M
扩散角	M	—	M	—	M	—	M	—
换能器入射点	—	—	—	—	M	M	M	M
焦距	—	M、C	—	M、C	—	M、C	—	M、C
焦区宽度	—	M	—	M	—	M	—	M
焦区长度	—	M	—	M	—	M	—	M
外观	M	M	M	M	M	M	M	M
注：I——信息数据；M——测试数据；C——计算数据。								

4.2 其他要求

制造者应说明电磁声换能器在运输过程中特殊储存和防护的条件。

应经供应商和客户协商同意删减某些项目和(或)增加表 1 中未规定的其他一些项目。

对于高温条件下使用的换能器,制造者还应提供有关温度对灵敏度和声束角影响的数据。

5 一般要求

5.1 电磁声换能器应符合下列规定：

- a) 应具有标明工作频率、线圈形状尺寸、波型的唯一编号,或有能追溯这些信息的固定参考号；
- b) 按第 4 章给出电磁声换能器的性能数据表。

5.2 选择下列方式之一保证换能器质量：

- a) 在按 GB/T 19001 建立的质量管理体系下生产的大批量相同类型换能器的条件下,应按 GB/T 33885 的方法进行抽样控制换能器质量,且制造者要提供换能器数据表；
- b) 小批量生产的各类型的换能器或按要求生产的专用换能器,应提供单个换能器检测结果的检测证书；
- c) 对换能器各项例行测试应按本标准规定的现场检验方法进行。

6 测试器具

6.1 电子仪器

6.1.1 电磁声检测仪

对第7章规定的检验项目进行测试用的电磁声检测仪(或实验室用的脉冲发射器、双工器、信号放大器)应为与换能器相匹配的仪器。如测试时规定使用一种以上类型的电磁声检测仪,则应使用每一种型号的电磁声检测仪分别进行测试。

供专用型电磁声检测仪使用的电磁声换能器,也应使用换能器数据表中规定的换能器电缆和电气匹配装置进行检测。

注:当换能器电缆长度超过2 m时,可能对换能器的性能影响很大。

6.1.2 其他仪器

除电磁声检测仪或实验室脉冲发射器、双工器、信号放大器以外,按本标准评价换能器工作性能使用的主要仪器还有:

- a) 一台带宽不小于100 MHz的示波器及配套的探头;
- b) 一台带宽不小于100 MHz的频谱分析仪或一个具有离散型傅里叶变换(DFT)功能的示波器(或数字转换器);
- c) 网络分析仪或阻抗分析仪;
- d) 可选器具:
 - T型衰减器;
 - 其他声场接收器,如激光测振仪;
 - 指向性图形绘图仪。

6.2 线缆

线缆用于连接电磁声换能器和检测仪器,采用射频信号线。

线缆阻抗值为50 Ω ,串联电容小于30 pF。

6.3 阻抗匹配器

电气匹配器用于对电磁声换能器进行阻抗匹配,主要有以下两种形式:

- a) 换能器内置匹配器;
- b) 外置匹配器。

6.4 试块

材料种类:非铁磁性材料-铝,材质符合GB/T 3880.1的规定,材质纯度应不低于牌号为1070的纯铝纯度;铁磁性材料-20#钢。

对规定的检验项目进行检测时应使用下述试块进行检测,检测用的试块如下:

- a) 推荐使用具有不同半径 R 的半圆柱形试块。试块的半径范围从12 mm~200 mm,两个半径间隔为 $R\sqrt{2}$,材质应符合GB/T 19799.2的规定。每个试块厚度应等于或大于其半径,最大厚度可达200 mm。
- b) 具有如图1所示的平行平面和直径为3 mm横孔的钢试块。试块尺寸应符合下列规定:
 - 1) 试块的长 l 、高 h 、宽 w 应使超声波声束不受其侧面影响;

- 2) 孔深为 d_1 、 d_2 …的横通孔至少应有 3 个孔落在近场区以外；
 - 3) 孔的间距 s 应使相邻两横通孔显示的回波幅度至少下降 26 dB；
 - 4) 材质应符合 GB/T 19799.2 的规定。
- c) 具有如图 2 和图 3 所示的半球底孔钢试块。材质应符合 GB/T 19799.2 的规定。使用这些试块分别测量垂直面及水平面中的声束扩散。
- d) 方形试块,其长宽相等,具有一定厚度。

单位为毫米

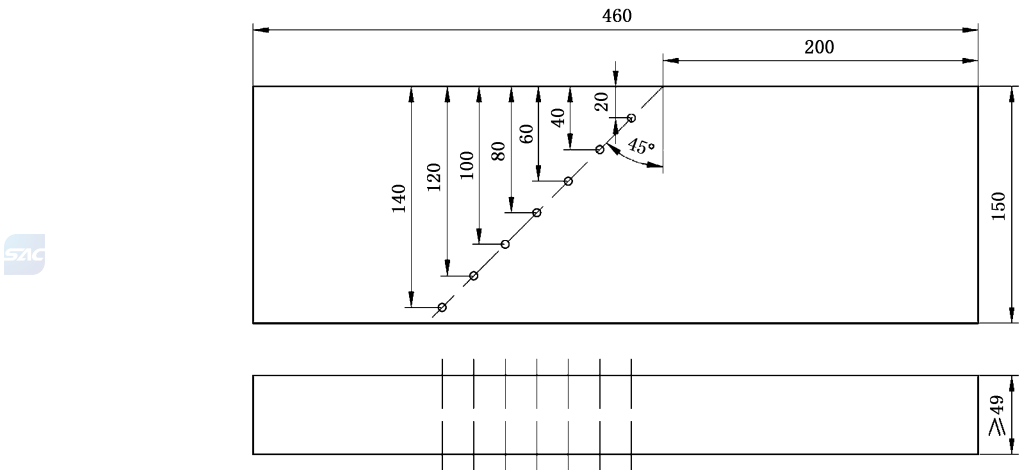


图 1 3 mm 横孔试块

单位为毫米

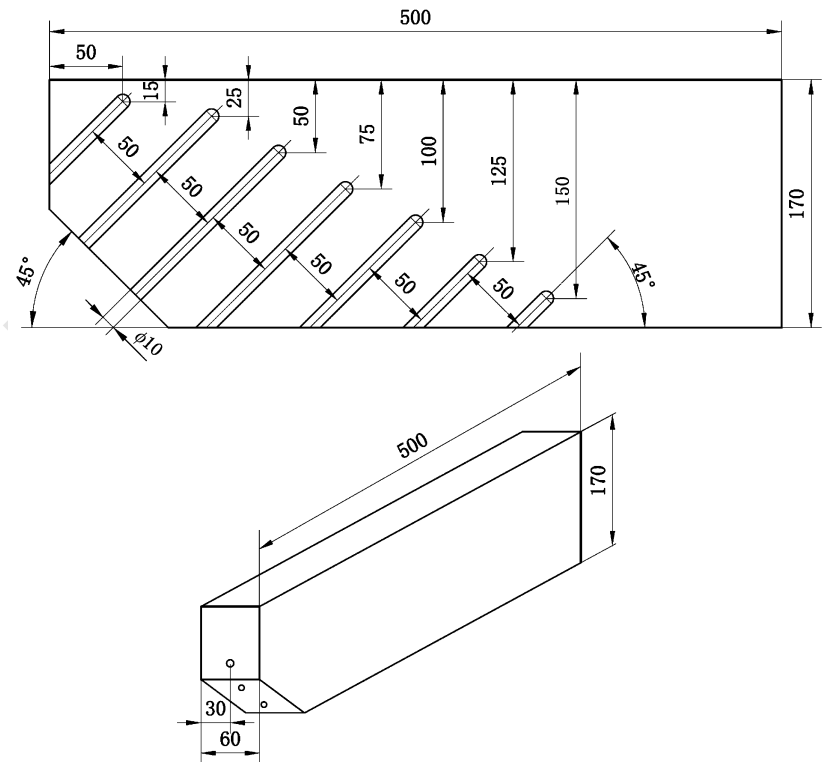


图 2 半球底斜孔钢试块

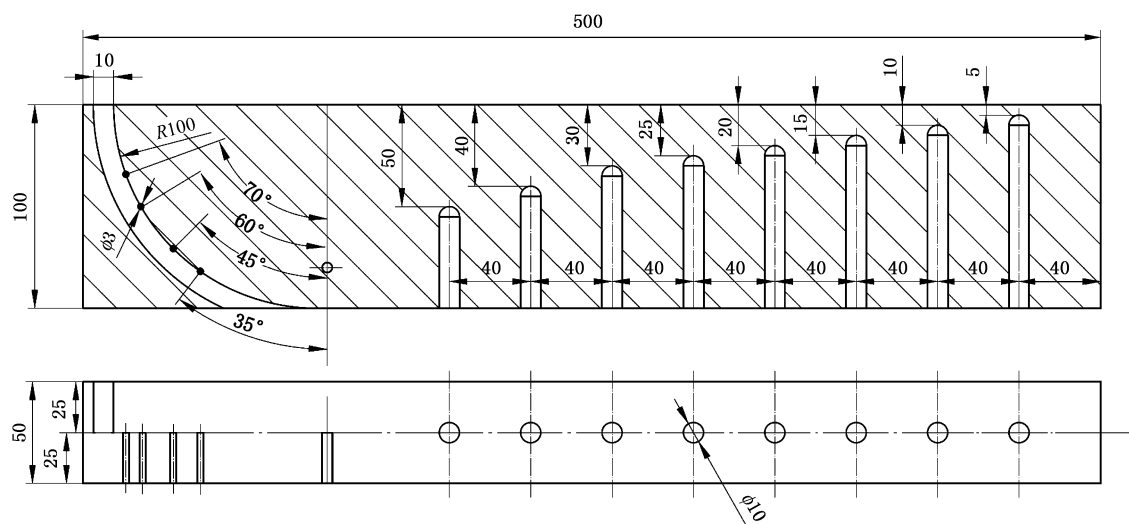


图3 横孔和半球底孔钢试块

6.5 其他器具

其他器具包括：

- a) 加热炉，温度可控，并应进行校准后使用。
- b) 五个自由度坐标的手动或自动扫查架：
 - 1) 三个直线坐标轴 x 、 y 、 z ；
 - 2) 两个角度坐标轴 θ 和 φ ，其中 θ 表示 x 轴的旋转自由度， φ 表示 y 轴的旋转自由度。
- c) 最小厚度 0.05 mm 的塞尺。
- d) 精度为 1 mm 的直尺。

7 换能器性能要求

7.1 外观质量

7.1.1 检测方法

目测检查换能器的外观和装配质量，看其是否标识齐全，以及是否存在能够影响换能器性能和长期稳定性的表面损伤。

7.1.2 验收规范

换能器外观应满足技术规范相关要求。

7.2 脉冲波形

7.2.1 检测方法

采用来自半圆柱体试块的半圆柱面的回波作为脉冲波形，半圆柱面的半径 R 应大于换能器近场长度的 1.5 倍或在聚焦换能器的聚焦范围内。

测试装置如图 4 和图 5 所示，主要由脉冲发射器、示波器、信号放大器、阻抗匹配器、双工器等组成，

测试装置应满足以下要求：

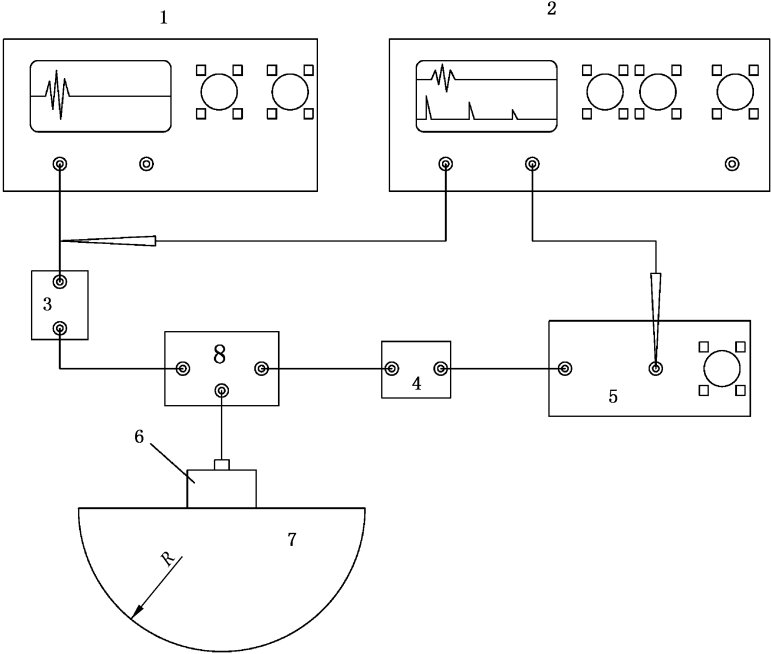
- a) 脉冲发射器可以定义脉冲参数,包括激励脉冲波形、脉冲宽度、频率等；
- b) 信号放大器通频带 0.1 MHz~20 MHz,在测试脉冲中心频率±3.5 MHz 内的通带平坦度为 ±0.5 dB,放大系数 100 dB,放大系数可调范围为 0 dB~100 dB。

测试电磁声换能器脉冲波形时,波形可采用方波、双极方波、正弦波、调制正弦波,可以任选一种或多种波形进行测试。测试脉冲的频率为电磁声换能器的中心频率,测试脉冲频带宽度应大于换能器的频带宽度。

不同的电磁声换能器的脉冲波形,采用下列测试条件进行测试：

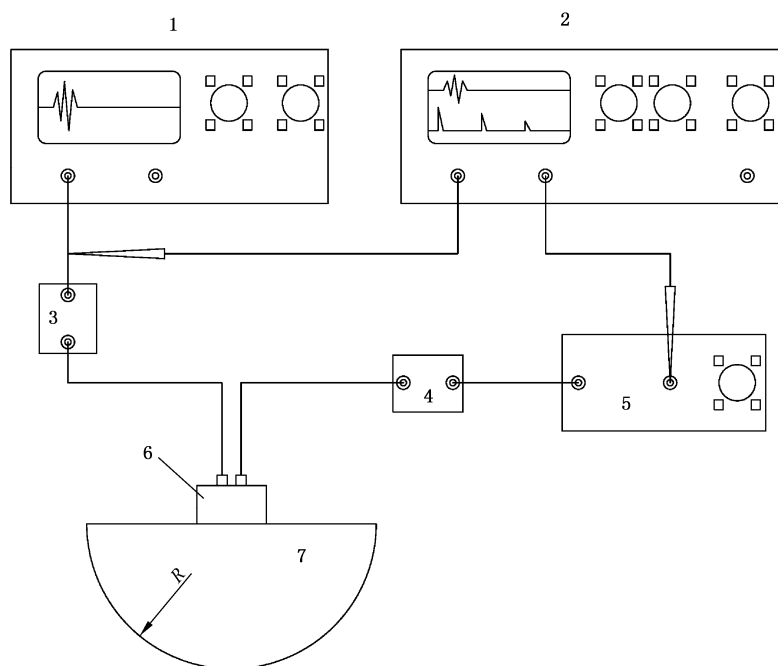
- 单线圈电磁声换能器:工作方式为自激自收,采用如图 4 所示的测量装置测试换能器的脉冲波形；
- 双线圈电磁声换能器:工作方式为一激一收,采用如图 5 所示的测量装置测试换能器的脉冲波形。

测试过程应记录脉冲发射器的设定值、测得的发射脉冲的峰-峰值幅度以及信号接收器的增益值。建议绘制发射脉冲波形图,宜在其检测结果中包括这些脉冲波形图。



- 说明：
- | | |
|-----------|----------------|
| 1——脉冲发射器； | 6——电磁声换能器； |
| 2——示波器； | 7——试块； |
| 3——发射匹配器； | 8——双工器； |
| 4——接收匹配器； | R ——半圆柱试块半径。 |
| 5——信号放大器； | |

图 4 单线圈换能器脉冲波形测量装置



说明：

- | | |
|-----------|-------------|
| 1——脉冲发射器； | 5——信号放大器； |
| 2——示波器； | 6——电磁声换能器； |
| 3——发射匹配器； | 7——试块； |
| 4——接收匹配器； | R——半圆柱试块半径。 |

图5 双线圈换能器脉冲波形测量装置

7.2.2 验收规范

脉冲宽度误差的最大允许值为制造者规定的技术指标的 $\pm 10\%$ 。

7.3 脉冲频谱和带宽

7.3.1 检测方法

采用如图4所示的装置,使用频谱分析仪或离散傅里叶变换测出回波频谱。测量回波频谱幅度下降到峰值幅度 -6 dB时的高、低频率。

根据这些高频率和低频率,按式(1)计算脉冲波形中心频率:

$$f_0 = \frac{f_u + f_l}{2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

f_0 ——脉冲波形中心频率;

f_u ——测量回波频谱幅度下降到峰值幅度 -6 dB时的高频率;

f_l ——测量回波频谱幅度下降到峰值幅度 -6 dB时的低频率。

脉冲波形带宽按式(2)计算:

$$\Delta f = f_u - f_l \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

Δf ——脉冲波形带宽。

脉冲波形相对带宽按式(3)计算,以百分数表示:

$$\Delta f_{rel} = (\Delta f / f_0) \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

式中:

Δf_{rel} ——脉冲波形相对带宽。

7.3.2 验收规范

脉冲中心频率偏差的最大允许值为数据表中规定频率的±10%。

—6 dB 带宽偏差的最大允许值为标称带宽的±15%。如果频谱在 f_1 和 f_u 之间有多个最大值,相邻最大值和最小值幅度的差值不应超过 3 dB。

对于相对带宽超过 100%的宽带换能器,下限频率不应高于 $1.1 \times f_1$,上限频率不应低于 $0.9 \times f_u$ 。

7.4 相对脉冲回波灵敏度

7.4.1 检测方法

相对脉冲回波灵敏度按式(4)计算:

$$S_{rel} = 20\log_{10}(V_e/V_a) \dots\dots\dots (4)$$

式中:

V_e ——来自规定反射体的回波峰-峰值电压;

V_a ——按 7.2.1 测出的施加到换能器上的峰-峰值电压。

对检测用的规则反射体、试块及方法要求如下:

- a) 规则反射体优选平面反射体;
- b) 直入射电磁声换能器采用大平底试块测试;
- c) 斜入射电磁声换能器采用半圆柱试块测试;
- d) 反射体的回波调至满屏的 80%,并记录接收增益。

7.4.2 验收规范

相对脉冲回波灵敏度偏差的最大允许值为制造者规定指标的±3 dB。

7.5 距离幅度曲线

7.5.1 检测方法

电磁声脉冲幅度随换能器的距离改变而变化,因此,所有类型换能器应使用表 2 中规定的反射体测得的距离幅度曲线来评定。

表 2 测定距离幅度曲线的反射体

反射体类型	反射体
圆板形反射体	平底孔
圆柱形反射体	横孔
球形反射体	半球底孔

测试电磁声换能器时,圆板形反射体、横孔、半球底孔被视作为等效的反射体。

使用一组大小相同且与换能器距离不同的反射体来绘制接收到的回波幅度与换能器距离的关系图。每条曲线至少应有八个有效测量点。对于聚焦换能器,选用的测试距离应覆盖焦距范围;对于非聚

焦换能器,此距离应覆盖包括近场长度在内的范围。

距离和幅度在数据表规定的电磁声检测仪校准后的显示屏上测定。

在获得最大反射体回波的各测试位置,通过提高增益,使噪声达到反射体回波原来幅度时为止,测定噪声与反射体回波的差值,由此得出一条噪声曲线。

如果通过提高增益不能使噪声达到那样的幅度时,可采用下述方法估算测定的噪声与反射体回波的差值,例如反射体回波为全屏幅度的 40%时:

- 若噪声为全屏幅度的 20%,则要将衰减器读数再加 6 dB;
- 若噪声为全屏幅度的 10%,则要将衰减器读数再加 12 dB;
- 若噪声为全屏幅度的 5%,则要将衰减器读数再加 18 dB。

测量噪声曲线时,换能器要移开反射体。

制造者的数据表中,每种型号的换能器都要配有曲线图,曲线图中至少要有一条距离幅度曲线,还应有一条距离噪声曲线。

7.5.2 验收规范

在焦区长度内,规定反射体(例如 3 mm 横孔)的回波与噪声电平的 dB 差不应比制造者规定的数值小 3 dB。

7.6 阻抗特性

7.6.1 检测方法

对于电磁声的换能器,没有恒定阻抗或相位的频率间隔,其阻抗特性易受被检对象材料及提离等因素影响。因此,应用完整的阻抗相位曲线来表征换能器的特性,并且应分别在铝材料和 20 # 钢材料试块进行阻抗特性测试。

电磁声换能器阻抗使用规定的网络分析仪或阻抗分析仪测定。测试时,将电磁声换能器置于试块上,保持提离距离为 0,然后将换能器用固定电缆线直接连接到分析仪上,如电缆线是可更换的,则要用长度不超过 100 mm 的电缆连接。

在以电磁声换能器的中心频率为对称中心的一个频段内,绘制阻抗模和相位相对频率的关系曲线。

7.6.2 验收规范

测得的阻抗模和相位或静电容偏差的最大允许值为制造者规定指标的 $\pm 20\%$ 。

7.7 标准允许提离

7.7.1 检测方法

采用厚度为 40 mm 的大平底试块,试块材料为铝和 20 # 钢,分别在两种材料试块上进行提离测试。测试时,在室温下,首先将电磁声换能器放置于试块上表面,初始提离为 0,设置电磁声检测仪或脉冲发射器输出换能器的标准工作电压或电流,激励电磁声换能器,并接收试块底面回波,调整一次底面回波达到满屏的 80%,逐步增加换能器与工件间的提离高度,在此过程中观察一次底面回波,并测量一次底面回波的信噪比,以信噪比不小于 6 dB 为准,对应得出电磁声换能器在该厚度下的最大允许提离高度。

检测过程中,记录激励电磁声换能器的电压或电流以及接收信号的增益。

7.7.2 验收规范

标准允许提离高度应满足制造者规定的技术指标。

7.8 操作温度范围

7.8.1 检测方法

采用 20 mm 厚大平底试块进行检测。试块材料依据测试温度进行选择,温度 $-277\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时宜选用铝材,温度 $50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时宜选用 20 # 钢材,温度 $400\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时宜选用 1Cr17 钢材,测试过程中温度应不超过材料的许用温度。

上限温度检测时,将试块加热至制造者规定的操作温度范围的上限温度。操作电磁声换能器进行检测获取底面回波信号,检测时间不超过电磁声换能器允许的高温操作时限。采集并记录试块的底面回波,通过观察分析底面回波,确定电磁声换能器是否达到工作要求。在测试过程中,应至少重复测量三次。

下限温度检测时,将试块降温至制造者规定的操作温度范围的下限温度。操作电磁声换能器进行检测获取底面回波信号。采集并记录试块的底面回波,通过观察分析底面回波,确定电磁声换能器是否达到工作要求。在测试过程中,应至少重复测量三次。

7.8.2 验收规范

操作温度范围应满足制造者规定的技术指标。

7.9 高温操作时限

7.9.1 检测方法

采用 20 mm 厚大平底试块。试块材料依据测试温度进行选择,温度 $50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时宜选用 20 # 钢材,温度 $400\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时宜选用 1Cr17 钢材,测试过程中温度应不超过材料的许用温度。

将试块置加热到操作温度范围的上限温度。操作电磁声换能器进行检测获取底面回波信号,测试时操作时间从换能器接触试块开始计时,在制造者规定的操作时限内,采集并记录试块的底面回波,通过观察分析底面回波,确定电磁声换能器是否达到工作要求。一次测试完成后,取下换能器待其冷却恢复至常温时,测试电磁声换能器是否正常工作。

7.9.2 验收规范

高温操作时限应满足制造者规定的技术指标要求。

7.10 直入射电磁声换能器的声束参数

7.10.1 概述

本条规定的方法仅适用于测试具有平面接触前端的直入射电磁声换能器。具有曲面接触前端的换能器仅能在与之对应相同曲面的参考试块上进行测试。

7.10.2 声束扩散

7.10.2.1 检测方法

可采用不同的方法测定指向性检测图:

a) 使用电磁声接收器:

测试装置如图 6 所示,其中试块为 6.4 中描述的半圆柱试块,被测电磁声换能器与电磁声检测仪或脉冲发射器相连接,电磁声接收器要求其换能线圈直径应小于或等于 3 mm,半圆柱体试

块的半径应大于被测电磁声换能器与电磁声接收器之间的影响距离,以避免电磁声接收器对被测电磁声换能器声场的影响。

测试时,将被测电磁声换能器接触在半圆柱体试块上,即提离距离为 0,并调整换能器的中心位于半圆柱试块的中轴线上,对于矩形线圈换能器还要求换能器检测面的其中一对称轴与试块中轴线重合。调整好被测电磁声换能器位置后,保持其位置不动,用电磁声接收器在试块的半圆柱面上扫查并测量所接收到的信号。

绘制信号幅度与电磁声接收器扫查角度的关系图,所绘的图应包括主瓣和相邻的副瓣。对应主瓣-3 dB 位置时的角度即为扩散角,如图 7 所示。对于被测电磁声换能器,应测定两个垂直平面上的扩散角,即完成一次扫查测试后,将被测电磁声换能器在试块平面内旋转 90°,重复扫查测试换能器的另一平面上的扩散角。

b) 使用带有横孔的参考试块:

使用如图 1 所示的带有在不同距离上钻出的与侧面平行的 3 mm 横孔试块,能够测定两个相互垂直平面内的扩散角和副瓣。

在最后绘制的图中要标绘出对应每个孔换能器接收到最大回波的位置和下降-6 dB 时的前、后位置及副瓣位置。

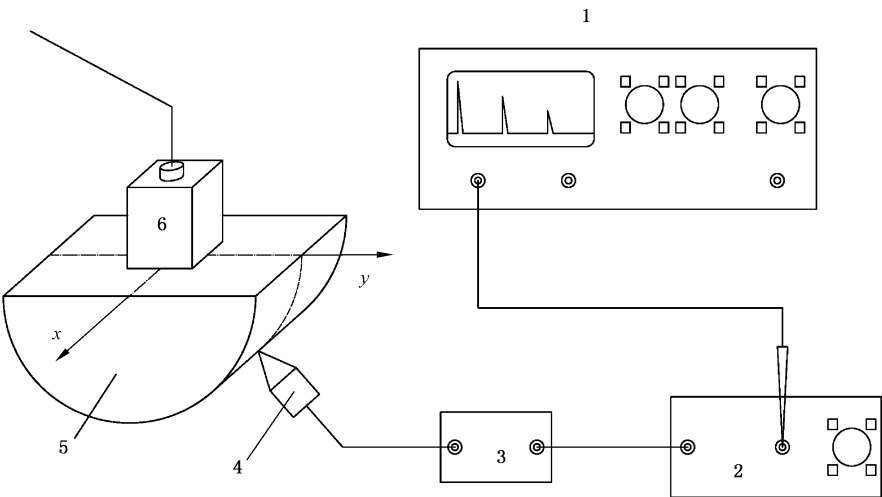
通过最大回波标记位置的直线与垂直于试块表面直线的夹角即为测定的声束角。由各声束边沿点的拟合直线与声束角能够得出该平面-6 dB 时的扩散角。

应在声束依次对每个孔扫查时,记录回波幅度相对换能器移动的变化量。

如果从两个或多个孔的幅度横剖面图中测出一个副瓣时,则选其中的最大副瓣,并绘制其相对于主瓣的位置,还应记录相对于主瓣幅度的副瓣幅度。

c) 使用带有半球底孔的参考试块:

使用如图 2 所示的带有与侧面平行不同深度的直径为 10 mm 的半球底孔试块,能够测定两个相互垂直平面的扩散角。在最后绘制的图中,对应每个孔要标出接收到最大回波时换能器的位置,以及下降-6 dB 时的前、后位置。



说明:

- | | |
|--------------|----------------------|
| 1 —— 示波器; | 5 —— 半圆柱试块; |
| 2 —— 信号放大器; | 6 —— 被测电磁声换能器; |
| 3 —— 接收匹配器; | x —— 换能器在试块上的坐标方向 x; |
| 4 —— 电磁声接收器; | y —— 换能器在试块上的坐标方向 y。 |

图 6 声束扩散测量装置

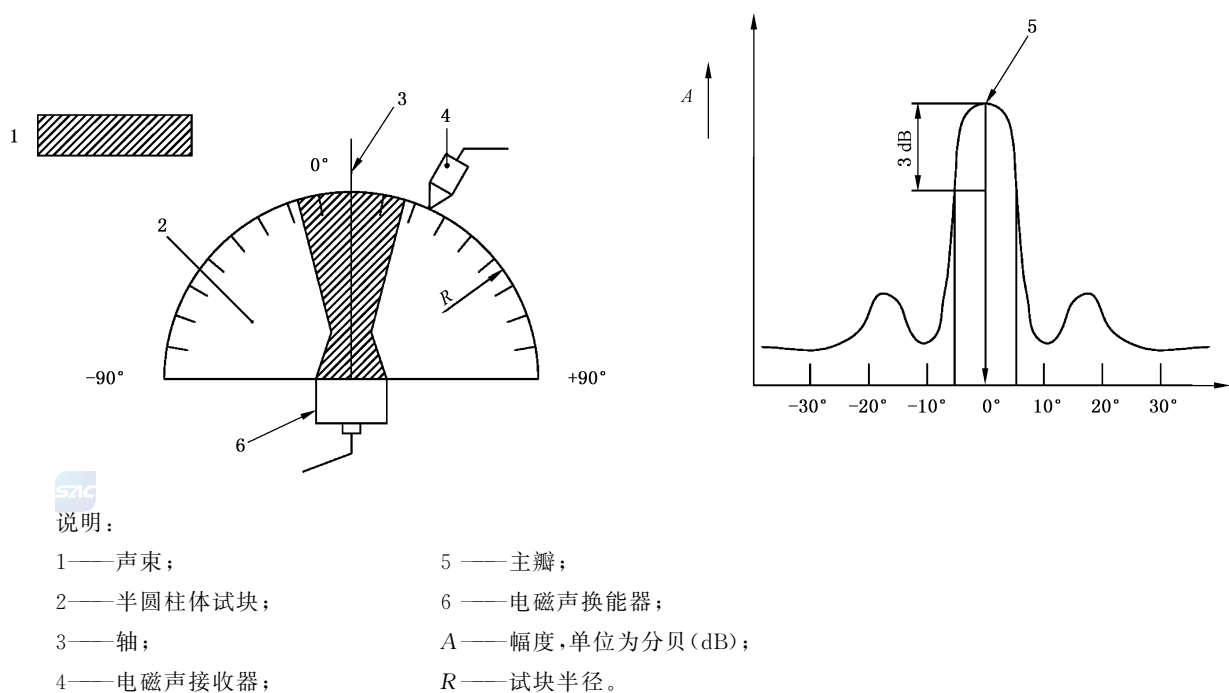


图 7 声束扩散角和声束角的测量

7.10.2.2 验收规范

扩散角误差的最大允许值为制造者规定指标的 $\pm 10\%$ 或 $\pm 0.5^\circ$,取其较大者。反射方式时,副瓣应小于主瓣 20 dB 以上。电磁声方式时,副瓣应小于主瓣 10 dB 以上。

7.10.3 焦距

7.10.3.1 检测方法

对于电磁声聚焦直入射换能器,应在换能器焦区长度内使用带有恒定直径的平底孔或横孔的参考试块上进行测量。

应利用直径为 2 mm 或 3 mm 的反射体,产生一条最好与测量点拟合的距离幅度曲线。

测量点应靠近该曲线(该曲线给出了所应用材料的焦距)的峰值。

7.10.3.2 验收规范

焦距误差的最大允许值为制造者规定技术指标的 $\pm 20\%$ 。

7.10.4 焦区宽度

7.10.4.1 检测方法

对于聚焦直入射电磁声换能器的焦区宽度能采用与 7.10.2.1 类似的方法用电磁声接收器或带有横孔或半球底孔的试块进行检测。

可使用的检测方法如下：

a) 使用电磁声接收器：

将电磁声换能器置于半径接近换能器焦距的半圆柱体试块上,沿着两个相互垂直方向的表面

进行扫查,测出信号幅度降低 3 dB 时的角度如图 6 和图 7 所示。换能器的焦区宽度能够用这些角度和已知的试块半径进行计算。

b) 使用带横孔的参考试块:

扩散角采用 7.10.2.1b)所述的检测方法,使换能器沿着两个相互垂直的方向移动,直至来自靠近换能器焦距的横孔的回波降低 6 dB 时为止,声束的焦区宽度由换能器的移动量测定。

c) 使用半球底孔的参考试块:

扩散角采用 7.10.2.1c)所述的检测方法,使换能器沿着两个相互垂直方向移动,直至来自靠近换能器焦距的半球底孔的回波降低 6 dB 时为止,声束的焦区宽度由换能器的移动量测定。

7.10.4.2 验收规范

焦区宽度误差的最大允许值为制造者规定指标的 $\pm 10\%$ 。

7.10.5 焦区长度

7.10.5.1 检测方法

依据 7.5.1 测出的距离幅度曲线,确定出相对于焦点幅度降低 6 dB 的各点。根据这些点的坐标差值计算出焦区长度。

7.10.5.2 验收规范

焦区长度误差的最大允许值为制造者规定指标的 $\pm 20\%$ 。

7.11 斜入射电磁声换能器的声束参数

7.11.1 概述

本条规定的方法仅适用于测试平面接触型的电磁声换能器。曲面接触的换能器仅能在与之对应相同曲面的参考试块上进行测试。

7.11.2 入射点

7.11.2.1 检测方法

检测换能器入射点时应使用半圆柱体试块。半圆柱体试块的半径应足够大,以便使反射圆柱面位于换能器的远场。

调整换能器,使来自圆柱面的回波最大,这时,对应半圆柱体试块的中心刻度线位置便是换能器的入射点。

7.11.2.2 验收规范

测定的入射点误差的最大允许值为制造者所标示的入射点的 $\pm 1\text{ mm}$ 。

7.11.3 声束角和声束扩散

7.11.3.1 检测方法

可采用与 7.10.2.1 测试直入射电磁声换能器所用的相似的方法测试斜入射换能器的扩散角:

a) 使用电磁声接收器:

把待测电磁声换能器置于半圆柱体试块上。绘制信号幅度相对电磁声声接收器扫查角度的关

系图。绘制的图应包括主瓣及其相邻的副瓣。主瓣为 -3 dB 位置时的角度即为扩散角,如图 7 所示。应测出两个相互垂直平面(方位面和水平面)的扩散角。最大回波信号的位置即为声束角度(声束角)。

b) 用带横孔的参考试块:

使用如图 1 所示的带有在不同距离上钻出的一组 3 mm 横孔的试块,能够测定垂直平面内的声束角、扩散角和副瓣。

在最后绘制的图中要标绘出对应每个孔换能器接收到的最大回波的位置和降低 6 dB 时的前、后位置及副瓣位置。

通过最大回波标记位置的直线与垂直于试块表面入射点直线的夹角,即为测定的垂直面内的声束角。由各声束边沿点的拟合直线与声束角能够得出该平面 -6 dB 时的扩散角。

应记录声速依次对每个孔扫查时,回波幅度相对换能器移动的变化量。如果从两个或多个孔的回波幅度横剖面图中测出一个副瓣时,则选其中的最大副瓣,并绘制其相对于主瓣的位置,还应记录相对于主瓣幅度的副瓣幅度。

c) 用半球底孔的参考试块:

使用如图 2 所示的带有一组不同深度的 10 mm 直径半球底孔的试块,能够检测垂直面和水平面内的声束角和扩散角。

在最后绘制的图中要标绘出对应每个孔换能器接收到最大回波的位置和降低 6 dB 时的前、后位置。

通过最大回波标记位置的直线与垂直于试块表面入射点直线的夹角,即为测定的垂直面和水平面内的声束角。由各声束边沿点的拟合直线与声束角能够得出这些平面内 -6 dB 时的扩散角。

7.11.3.2 验收规范

频率低于 2 MHz 时,声束角误差的最大允许值为标称角度的 $\pm 3^\circ$;频率不低于 2 MHz 时,声束角误差的最大允许值为标称角度的 $\pm 2^\circ$ 。

扩散角误差的最大允许值为制造者规定指标的 $\pm 10\%$ 或 $\pm 0.5^\circ$,取其较大者。

当使用反射方法时,对于标称声束角在 $45^\circ \sim 65^\circ$ 范围内的副瓣应小于主瓣 20 dB 以上;对于标称声束角较大的副瓣应小于主瓣 15 dB 以上。

当使用电磁声接收器测量时,对于标称声束角度在 $45^\circ \sim 65^\circ$ 范围内的副瓣应小于主瓣 10 dB 以上;对于标称声束角较大的副瓣应小于主瓣 8 dB 以上。

7.11.4 焦距

7.11.4.1 检测方法

采用与检测电磁声直入射换能器焦距相同的方法,检测电磁声聚焦斜入射换能器的焦距,见 7.10.3.1。

用小直径平底孔、半球底孔或横孔绘制一条至少包含八个测量点的距离幅度曲线,由曲线上峰值幅度的点即可求出焦距。

建议这些测量点要在换能器的焦区长度以内,其中之一宜靠近峰值。

测量点中应包括相对于峰值幅度降低 6 dB 的点。

7.11.4.2 验收规范

焦距误差的最大允许值为制造者规定指标的 $\pm 20\%$ 。

7.11.5 焦区宽度

7.11.5.1 检测方法

使用电磁声接收器或横孔试块,采用与检测扩散角相似的方法,见 7.10.2.1,能够测定焦区的边界。采用下述方法之一,在两个垂直方向上测定焦区宽度:

a) 使用电磁声接收器:

将电磁声换能器置于半径接近于待测电磁声换能器焦距的半圆柱体试块上,通过扫查试块表面,测出信号幅度相对于峰值幅度降低 3 dB 的各点。

根据这些角度和已知的试块半径能够计算出焦距处的声束宽度。

b) 使用横孔试块:

按 7.10.2.1b)所述的方法移动换能器,直至比焦距处横孔回波幅度低 6 dB 时为止,换能器的这个移动量能够测出垂直方向上声束的焦区宽度。

c) 用半球底孔参考试块:

按 7.10.2.1c)所述的方法移动换能器,直至比焦距处半球底孔的回波幅度低 6 dB 时为止,换能器的这个移动量能够测出垂直和水平方向上声束的焦区宽度。

7.11.5.2 验收规范

焦区宽度误差的最大允许值为制造者规定指标的 $\pm 10\%$ 。

7.11.6 焦区长度

7.11.6.1 检测方法

根据 7.5.1 测得的距离幅度曲线能够确定其幅度比焦点幅度降低 6 dB 时的各点。各点的坐标差值即为聚焦区域的长度(焦区长度)。

7.11.6.2 验收规范

焦区长度误差的最大允许值为制造者规定指标的 $\pm 20\%$ 。

7.12 三维辐射声场

7.12.1 通用技术

电磁声换能器制造商或代理商在提供换能器产品前宜进行换能器三维辐射声场测试。

7.12.2 检测方法

采用如图 8 所示的装置,进行电磁声换能器的三维辐射声场扫描测量。采用断层扫描的方式,扫描电磁声换能器的三维辐射声场:

a) 使用电磁声接收器对于直入射探头电磁声换能器,在其能够测量的最大厚度范围内,选择系列厚度大平底试块进行测试,试块材料为 20 # 钢和铝。测量方式采用一发一收形式,被测 EMAT 在大平底试块的一侧发射超声波,电磁声接收器在另一侧接收。

测量时,脉冲发射器输出电磁声换能器工作的标准电压或电流,同时电磁声接收器在试块表面上进行 C 扫描测试,取接收信号的一次波峰值进行绘图,可得到被测电磁声换能器在试块中的声场分布图,如图 9 所示,是环形线圈直入射电磁声换能器的断层声场分布示意图。

对系列不同厚度的试块分别依次进行 C 扫描测试,可得到电磁声换能器在材料中三维辐射声场分布。

- b) 对于斜入射电磁声换能器,则选择对应入射角的斜面试块进行扫描测试,如图 10 所示,展示了 45°斜入射电磁声换能器在具有 45°斜面的试块上的声场 C 扫描测试。进行断层扫描时,沿斜面移动斜入射电磁声换能器,每移动一定距离利用电磁声接收器在与声束垂直的水平面上进行一次 C 扫描,重复测量完成斜入射电磁声换能器的三维辐射声场断层扫描。

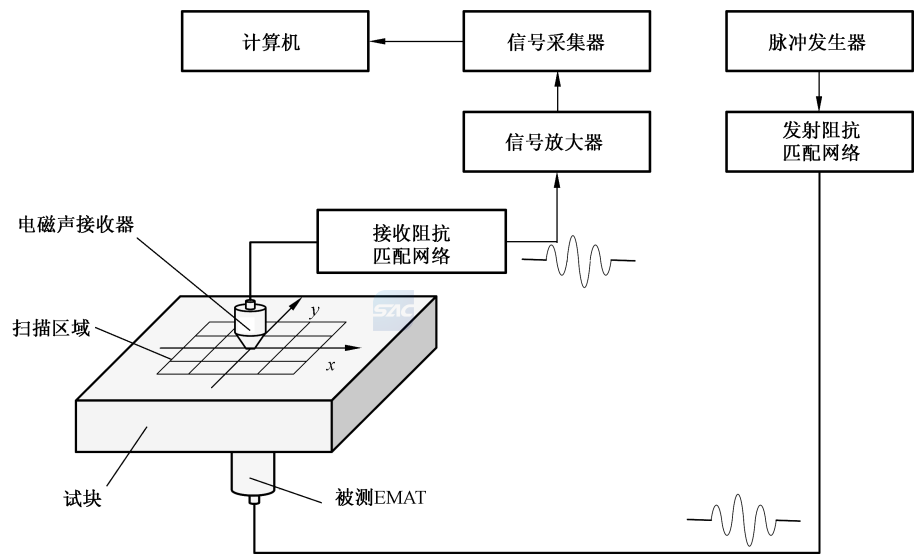
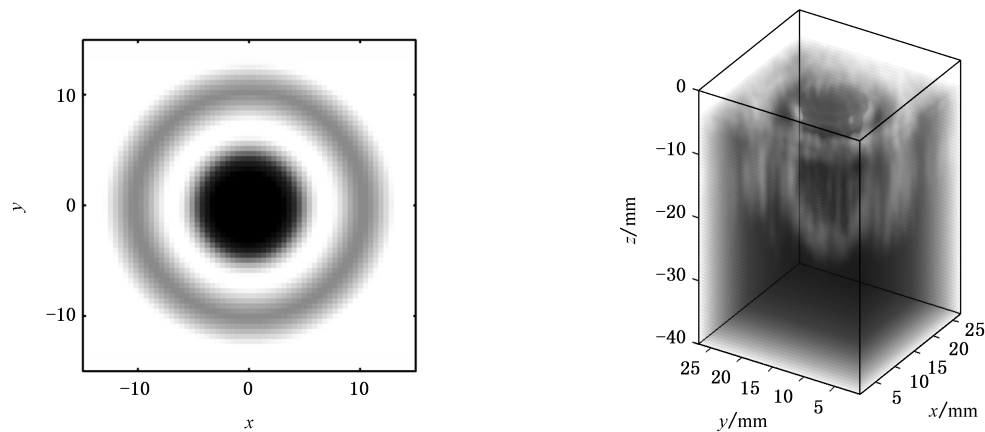


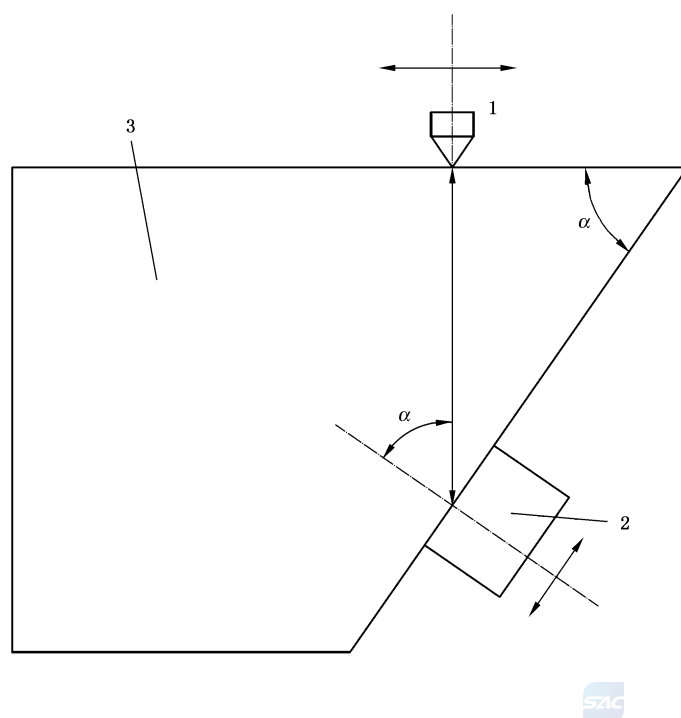
图 8 电磁声换能器三维辐射声场断层扫描测量装置

单位为毫米



说明：
 x ——断层截面的 x 坐标；
 y ——断层截面的 y 坐标；
 z ——声束轴向坐标。

图 9 直入射电磁声换能器断层 C 扫描及三维辐射声场示意图



说明：

1——电磁声接收器；

2——斜入射电磁声换能器；

3——试块；

α ——斜面角度。

图 10 斜入射电磁声换能器断层扫描方式

在电磁声换能器三维辐射声场测量过程中,应保持测试装置各项参数的设置不变。

依据换能器三维辐射声场断层扫描结果,提取声轴线平面上的声场信息,推算出焦距和焦区长度。

提取焦距位置处的声场断面信息,测得声束轴线上幅值下降 3 dB 的两个方向上的宽度为焦区宽度。从三维辐射声场中提取换能器声轴线上的辐射声场幅值,在每个断面上以声轴线为中心沿两个互相垂直的方向上提取衰减 3 dB 的声场幅值,可以获得换能器在两个方向的声束扩散角。

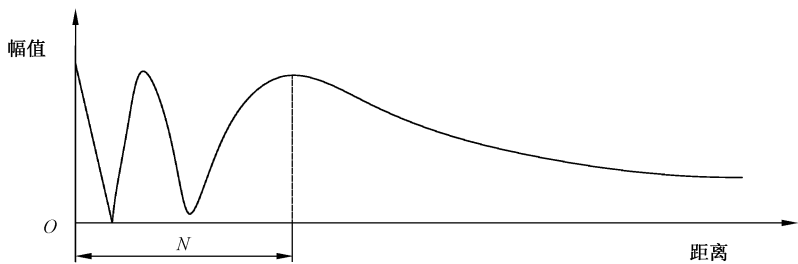
7.12.3 验收规范

换能器的三维辐射声场分布应符合技术规范中的相关规定。

7.13 近场长度

7.13.1 检测方法

采用 7.12.2 所述的测量方法,测量不同厚度下试块中的辐射声场,并提取每个厚度下轴线上的声场幅值,通过拟合绘制电磁声换能器的轴线声压图,如图 11 所示。取轴线声压最后一个极大值的位置为电磁声换能器的近场长度。为准确测出近场区长度,近场区的断层试块厚度间隔应尽量小一些。



说明：
N——近场长度。

图 11 斜入射电磁声换能器断层扫描方式

7.13.2 验收规范

近场长度应满足应符合制造者规定的指标要求。

7.14 换能器中心频率和带宽

7.14.1 检测方法

采用如图 4 所示的装置进行测试,试块选择铝和 20 # 钢的方形厚度试块。测试时保持电磁声检测仪或脉冲发射器输出的电压或电流不变,同时保持信号接收器的接收增益不变。在一定频率范围内,以一定的频率步进手动或自动的进行频率扫查,记录一次或二次回波幅值,通过拟合曲线得到换能器频率特性曲线。进一步获得,相对于最大幅度降低 6 dB 处测定的较高和较低截止频率,并按式(5)定义中心频率:

$$f_0 = \frac{f_u + f_1}{2}$$

.....(5)

式中：
 f_0 ——换能器中心频率；
 f_u ——最大幅度降低 6 dB 处测定的较高截止频率；
 f_1 ——最大幅度降低 6 dB 处测定的较低截止频率。
换能器带宽为高、低截止频率之差,按式(6)计算：

$$\Delta f = f_u - f_1$$

.....(6)

式中：
 Δf ——换能器频率带宽。

7.14.2 验收规范

换能器的中心频率和带宽应满足制造者规定的技术要求。

8 检测报告

对第 7 章规定的检验项目进行检测并提供电磁声换能器的性能检测报告,报告应包含以下内容：
a) 表 1 中由制造者直接提供的电磁声换能器基本信息数据,包括换能器类型、换能器质量和尺寸、连接器类型、线圈形状和尺寸、偏置磁场类型、最大允许电流和电压以及标准工作电流和电压；

- b) 电磁声换能器各性能指标检测时所设置的检测参数及检测结果数据；
 - c) 根据各性能参数检验验收规范，给出检测结果数据的验收结论；
 - d) 经供应商和客户协商同意删减表 1 中规定的某些项目时，应在报告中说明；
 - e) 经供应商和客户协商同意增加表 1 中未规定的其他一些项目时，应提供这些增加项目的检测方法、检测设置的参数、检测结果数据及验收结论。
-

