

ITER 超导线缆铠甲套管超声相控阵检测方法

罗 明 吴君豪 张 颖 吴时红 赵建华

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

摘 要 为实现 ITER 超导线缆铠甲套管的超声相控阵检测,对铠甲套管的外形结构及缺陷特点的深入了解并参考文献方法,设计制作不同角度 U 形槽的人工试样;进行多晶片组不同角度入射声场设计,建立理论模型;借助 M2M 256×256 相控阵设备和 Multi2000 软件平台进行 Multi-Salvo 设置,开发基于 VC++6.0 平台的客户端软件,实现 A 扫描的实时显示和数据存储,特殊形状试件的 B 扫描图像拟合并实时显示等功能。实验结果表明,通过旋转 90°检测一次的方式实现铠甲套管的 100% 相控阵检测。

关键词 ITER 超导电缆铠甲套管,超声波相控阵检测,软件开发,超声 B 扫描,图像拟合

中图分类号: TB553

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.02.017

Ultrasonic Phased Array Testing Method of Jacket Sections for ITER Superconducting Cables

LUO Ming WU Junhao ZHANG Ying WU Shihong ZHAO Jianhua

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract After a deep study of the configuration and defect feature, a series of specimens with U notch in different angles is designed and manufactured. The emission acoustic fields of multi crystal plates in different refracting angles has been simulated. With the help of the M2M 256×256 Ultrasonic Phased Array facility and software platform Multi2000, the setting of Multi-Salvo is completed. And the client software which based on VC++6.0 has been developed, which can realize the real-time display and data storage of A-scan, and image fitting and real-time display of B-scan for specimen with special configuration. It becomes possible to achieve 100% inspection of Jacket Sections for ITER superconducting cables by the means of rotating the specimen for 90° after each-time inspection.

Key words Jacket sections for ITER superconducting cables, Ultrasonic phased array testing, Software development, Ultrasonic B-scan, Image fitting

0 引言

国际热核实验堆(ITER)是通过核聚变解决人类未来能源需求的一项国际科技合作项目,其目标是要建造一个可长脉冲运行的托卡马克(Tokamak)核聚变实验堆,验证聚变反应堆的工程可行性,以便对未来的聚变示范堆及商用聚变堆的物理和工程问题作深入探索^[1-3],托卡马克装置是一种利用磁约束来实现受控核聚变的环形装置,其中央是一个环形真空室,外面缠绕环形向场线圈和极向场线圈,在通电时托卡马克内部会产生巨大的螺旋型磁场,使上亿度的氘氚等离子

体不与器壁接触,以达到核聚变的目的^[4]。

托卡马克磁体系统的极向场线圈由中心冷却管,超导绞线和不锈钢套管组成。不锈钢套管具有承力和液氮冷却剂容器的功能,其又被称为 ITER 超导线缆铠甲套管。铠甲套管在生产过程中可能产生裂纹、凹坑和折叠等多种缺陷,为确保极向场的安全,要求铠甲套管在制造阶段应确保其材料品质^[4-6]。因此,不但要采用可靠的铠甲套管制造工艺和加工技术,而且还要对铠甲套管的产品进行无损检测^[4-6],常用的检测手段为超声无损检测。由于极向场线圈的铠甲

收稿日期:2016-09-03

第一作者简介:罗明,1983 年出生,硕士研究生,主要从事超声无损检测开发和应用方面的研究。E-mail:121322830@qq.com

套管采用外方内圆截面形状,其超声无损检测难度较大。易子安等^[7]采用16通道探头车和多角度入射的方法对铠甲套管内部质量进行了研究。另外,左勇斌等^[4]常规水浸超声和相控阵水浸超声的检测方法,发现相控阵检测时的信噪比比常规水浸超声检测时的低。

中科院等离子体物理研究所委托航天材料及工艺研究所检测中心进行 ITER 超导线缆铠甲套管的超声无损检测研究。由于铠甲套管外形特殊,常规的超声很难实现100%检测,而超声相控阵技术具有声束角度可控,分组激发晶片,快速切换,仅一维运动就可以实现二维扫查等特点,非常适合特殊外形铠甲套管的无损检测。但目前市售相控阵仪器大多数仅能实现一组晶片一种延时法则的B、C扫描和显示,法国M2M相控阵仪器虽然能多组晶片多种延时法则的扫

描(称为Multi-Salvo模式),但不能实现多组晶片多种延时法则下B、C扫描的图像显示。本文利用法国M2M相控阵仪器采用多组晶片不同延时法则激发,实现不同角度入射,并对M2M相控阵仪器进行软件开发,编写客户端软件,实现不同分组不同延时法则下,回波信号采集及B扫描图像实时合成显示。

1 相控阵晶片阵列设置

与普通圆管检测一样,在检测铠甲套管时,折射声波必须与内壁圆周相切,才能对内壁裂纹缺陷有效检出。采用相控阵检测时,为保证折射声波与内壁圆周相切,通过对一定范围内的多个晶片进行延时控制,使其波阵面发生偏转,产生一定角度的入射声束。图1所示,通过控制一定范围内的阵列(称为有效阵列)的激发时序,使得波阵面 egj 以入射角 β 进入铠甲套管,并在铠甲套管中产生折射纵波和折射横波。

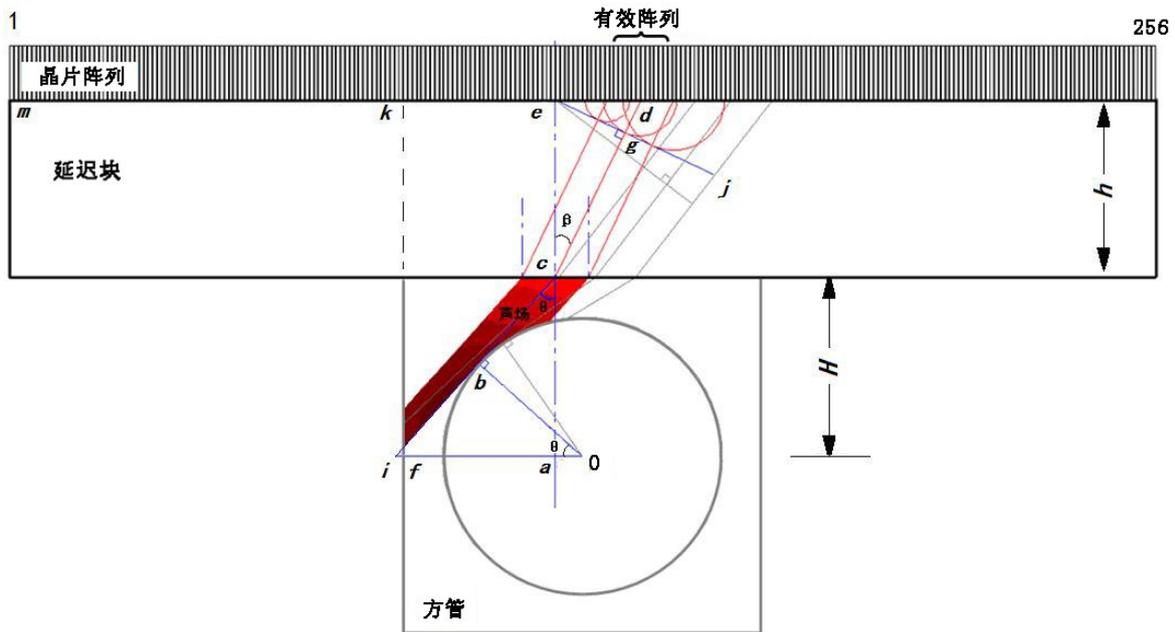


图1 ITER超导线缆铠甲套管相控阵检测声场示意图

Fig.1 Diagram of the emission acoustic field in jacket sections for ITER superconducting cables

由图1可知,需要推导出缺陷角度 θ 与中心晶片位置 $|md|$ 之间的关系,由此确定在不同入射角度时

晶片的选择。此处省去推导过程,根据声波折射定理和声束几何关系可得到如下式子:

$$|kd| = H + \sqrt{\left(\frac{H}{\cos\theta} - r \cdot \text{tg}\theta\right)^2 + r^2 - H^2} + h \frac{r \cdot \sin\theta}{\sqrt{1 - r \cdot \sin^2\theta}} \quad (a \text{ 在管子圆心 } O \text{ 的左边})$$

$$|kd| = H - \sqrt{\left(\frac{H}{\cos\theta} - r \cdot \text{tg}\theta\right)^2 + r^2 - H^2} + h \frac{r \cdot \sin\theta}{\sqrt{1 - r \cdot \sin^2\theta}} \quad (a \text{ 在管子圆心 } O \text{ 的右边})$$

式中, H 为铠甲套管圆心到外壁的距离, h 为延迟块的高度, r 为铠甲套管内圆半径, θ 为内壁缺陷角度与声波折射角度相等。

而 $|md| = |mk| + |kd|$, $|mk|$ 可以直接测量, $|kd|$ 通过上式计算而得。据此可推算出某一角度下应激发以某一晶片为中心的一组晶片。

2 实验过程

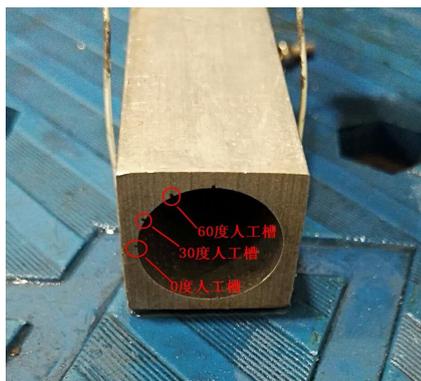
2.1 仪器和试样

仪器:法国M2M 256×256通道相控阵系统。

探头:频率为10 MHz,128晶片,线阵探头,晶片宽度0.4 mm,晶片间距0.1 mm。

试样:借鉴文献资料中人工试样的制作方
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2017年 第2期

法^[4,7],在铠甲套管内壁与圆周成 $\theta=0,30,60$ 度按照标准要求分别沿轴线方向加工长2 mm,宽0.5



mm,高0.5 mm的U形槽。铠甲套管 $H=20$ mm,延迟块 $h=20$ mm。如图2所示。

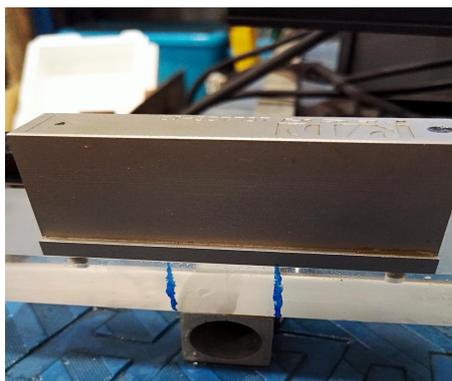


图2 试样及探头

Fig.2 Specimen and probe

2.2 软件设计

基于VC++6.0采用多线程技术对M2M相控阵进行客户端软件开发,实现波形数据的实时采集,A、B扫描图的实时显示和数据存储,软件的设计流程如图3所示,界面如图4所示。

以及 $1^\circ \sim 80^\circ$)下激发的中心晶片位置,并列出了各角度下的激发孔径。由于铠甲套管宽度方向最大尺寸为22 mm,经计算最大折射角度为 $\pm 80^\circ$ 。各角度下声场示意图见图5(数据与表1对应)。

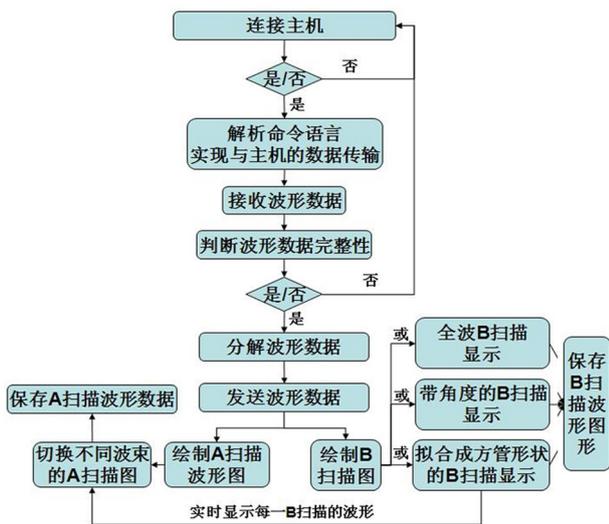


图3 软件流程图

Fig.3 Flow chart of the software

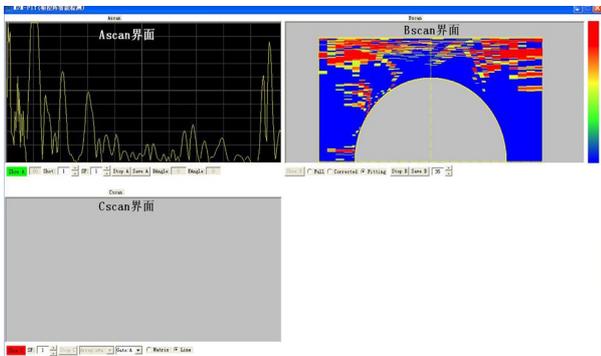


图4 软件界面

Fig.4 Interface of the software

2.3 Multi-Salvo 设置

表1为由式1计算得到的折射角度($-80^\circ \sim -1^\circ$ 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2017年 第2期

表1 各折射角度下激发的中心晶片位置及激发孔径

Tab.1 Centre chip position and aperture in different refraction angles

折射角度 $\angle/^\circ$	中心 晶片	激发 孔径 ¹⁾	折射角度 $\angle/^\circ$	中心 晶片	激发 孔径 ¹⁾
-1	47 [#]	40 [#] -54 [#]	80	27 [#]	20 [#] -34 [#]
-7	50 [#]	43 [#] -57 [#]	79	30 [#]	23 [#] -37 [#]
-12	53 [#]	46 [#] -60 [#]	77	33 [#]	26 [#] -40 [#]
-17	56 [#]	49 [#] -63 [#]	75	36 [#]	29 [#] -43 [#]
-22	59 [#]	52 [#] -66 [#]	73	38 [#]	31 [#] -45 [#]
-26	61 [#]	54 [#] -68 [#]	70	41 [#]	34 [#] -48 [#]
-30	63 [#]	56 [#] -70 [#]	67	44 [#]	37 [#] -51 [#]
-35	66 [#]	59 [#] -73 [#]	62	47 [#]	40 [#] -54 [#]
-41	69 [#]	62 [#] -76 [#]	58	50 [#]	43 [#] -57 [#]
-47	72 [#]	65 [#] -79 [#]	52	53 [#]	46 [#] -60 [#]
-52	75 [#]	68 [#] -82 [#]	47	56 [#]	49 [#] -63 [#]
-58	78 [#]	71 [#] -85 [#]	41	59 [#]	52 [#] -66 [#]
-62	81 [#]	74 [#] -88 [#]	35	62 [#]	55 [#] -69 [#]
-67	84 [#]	77 [#] -91 [#]	30	65 [#]	58 [#] -72 [#]
-70	87 [#]	80 [#] -94 [#]	26	67 [#]	60 [#] -74 [#]
-73	90 [#]	83 [#] -97 [#]	22	69 [#]	62 [#] -76 [#]
-75	92 [#]	85 [#] -99 [#]	17	72 [#]	65 [#] -79 [#]
-77	95 [#]	88 [#] -102 [#]	12	75 [#]	68 [#] -82 [#]
-79	98 [#]	91 [#] -105 [#]	7	78 [#]	71 [#] -85 [#]
-80	101 [#]	94 [#] -108 [#]	1	81 [#]	74 [#] -88 [#]

注1):激发孔径此处采用指定编号的晶片范围表示。

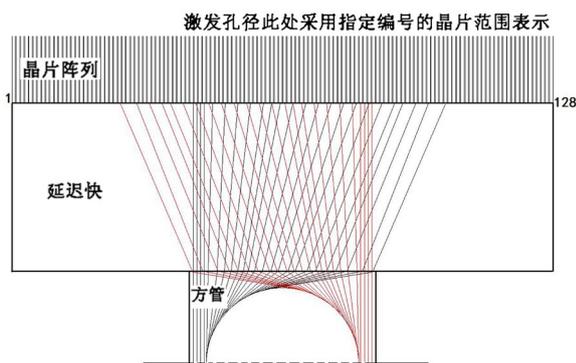
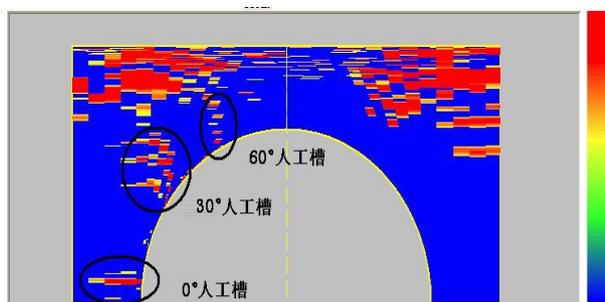


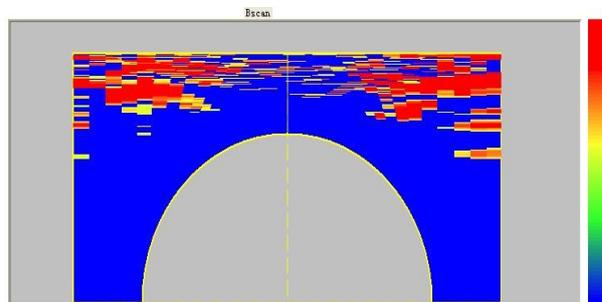
图5 各角度下声场示意图

Fig. 5 Diagram of the acoustic field in different angles

图5为各角度下声场示意图,为使声场覆盖铠甲套管两侧区域,各增加4条垂直入射声束。检测前,先在M2M自带软件Multi2000中将各角度下激发晶片孔



(a) 有缺陷处



(b) 无缺陷处

图6 B扫描检测结果

Fig. 6 Detection -result of B-scan

4 结论

通过对铠甲套管的外形结构及缺陷特点的深入了解并参考文献方法,设计制作包括 0° 、 30° 、 60° 等不同角度U形槽的人工试样。进行多晶片组不同角度入射声场设计,建立理论模型借助M2M 256×256 相控阵设备和Multi2000软件平台,进行Multi-Salvo设置,开发客户端软件,实现包括A扫描的实时显示和数据存储,特殊形状试件的B扫描图像拟合并实时显示等功能。通过旋转 90° 检测一次的方式实现铠甲套管的100%相控阵检测。

参考文献

- [1] CHEN ZHENMAO, ZUO YONGBIN, ZHANG DONGLI, et al. Proposal and demonstration of strategies for NDT of conduit tube of cable in conduit conductors used in ITER PF coils[J]. ICONE18, Xi'an, China: Nuclear Engineering Division, 2009.
- [2] 邱励俭. 核聚变研究50年[J]. 核科学与工程, 2001,

径、折射角度及其他声学参数设置好,并将每一种设置结果分别保存,一种设置状态即为一个Salvo,检测时,先在Multi2000中按一定的顺序依次导入各Salvo并创建Multi-Salvo,再利用开发的软件进行数据采集和A、B扫描成像显示。在将B扫图像拟合成铠甲套管形状显示时,需要对每一Salvo原始的A扫描数据按照一定的规则进行截取,然后按照每一角度进行画图。

3 检测结果及讨论

图6为人工缺陷的B扫描检测结果,可以看出 0° 、 30° 、 60° 人工槽均能有效检出。产品壁最薄的区域仅为2mm,图中检测盲区约为1mm,可通过提高检测频率的方式减小盲区。另外,可通过旋转 90° 检测一次的方式实现铠甲套管的100%检测。

21(1):39-38.

- [3] 冯开明. 可控核聚变与国际热核实验堆(ITER)计划[J]. 中国核电, 2009, 2(3): 212-219.

- [4] 左勇斌, 李云飞, 陈振茂, 等. 基于水浸超声的ITER超导电缆铠甲套管无损检测方法[J]. 无损检测, 2011, 33(9): 25-28, 32, 89.

- [5] TAKAHASHI A, SUWA T, NABARA Y, et al. Non-Destructive Examination of Jacket Sections for ITER Central Solenoid Conductors[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 1-4.

- [6] RAFAEL MARTINEZ-ONA, MONICA GARCIA, MERCEDES MEDRANO. Ultrasonic techniques for quality assessment of ITER Divertor plasma facing component[J]. Fusion Engineering and Design, 2009, 84: 1263-1267.

- [7] 易子安, 吴敦明. 外方内圆不锈钢管超声波探伤[J]. 无损检测, 2011, 33(1): 33-36.