

# 基于水浸超声的 ITER 超导线缆 铠甲套管无损检测方法

左勇斌, 李云飞, 陈振茂, 李勇

(西安交通大学 机械结构强度与振动重点实验室, 西安 710049)

**摘要:**ITER 托卡马克装置极向场线圈需要大量 CICC 超导线缆, 不锈钢铠甲套管是其重要组成部分, 具有承力和液氦冷却剂容器的功能。为确保极向场线圈的安全, 需要采用无损检测方法对套管产品质量进行检测、控制。由于 PF 线圈不锈钢套管外方内圆的截面形状, 目前国内尚未确立对应的无损检测方法, 需要开发新的检测系统。针对上述问题, 提出了基于常规水浸超声与相控阵水浸超声的无损检测方法, 通过制作包含人工缺陷的模拟试件, 对水浸超声检测方法的有效性进行了试验验证, 结果表明, 该方法可满足铠甲套管的无损检测要求。

**关键词:**无损检测; 托卡马克; 不锈钢铠甲套管; 水浸超声检测

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2011)09-0025-04

## Immersed Ultrasonic Testing Methods for Conduit Tubes of ITER Superconducting Cables

ZUO Yong-Bin, LI Yun-Fei, CHEN Zhen-Mao, LI Yong

(MOE Key Laboratory for Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The poloidal field (PF) coils in ITER Tokamak device require a lot of superconducting cables in conduit conductors (CICC), stainless steel conduit tube is an important part of the CICC as it is the container of cooling liquid Helium and supporting structure of the electromagnetic load. To ensure the safety of the PF coil, non-destructive testing has to be performed for each conduit tube of CICC. However, because of outer square inner round cross section shape of the PF stainless steel conduit tube, the domestic corresponding NDT method hasn't established, so need to develop new testing system. Aiming at this problem, the approach of immersed ultrasonic testing method using single focus transducer or phased array probe was proposed, and through fabricating samples with artificial defects, the validity of this approach was verified. The experimental results showed that the approach was promising for the NDT of the ITER conduit tubes.

**Keywords:** Non-destructive testing; Tokamak; Cable in conduit conductor; Immersed ultrasonic testing

国际热核实验堆 (International Thermonuclear Experimental Reactor, 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

收稿日期: 2011-05-31

基金项目: 国家磁约束核聚变专项资助项目 (2009GB104002); 国家自然科学基金资助项目 (50977070); 国家 973 项目 (2007CB707702, 2011CB610303) 资助。

作者简介: 左勇斌 (1984—), 男, 硕士, 主要研究方向为超声和电磁无损检测。

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<sup>[1-3]</sup>。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。

托卡马克磁体系统的极向场线圈 (图 1) 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氦冷却剂容器的功能, 为确保极向场成图的安全, 要求不锈钢套管在制造阶段应确保其

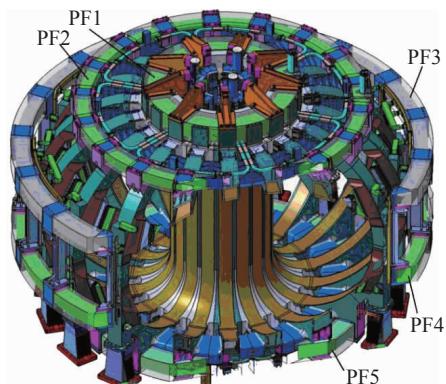


图 1 磁体系统极向场线圈



图 2 不锈钢套管试件

材料品质。因此,不但要采用可靠的不锈钢套管制造工艺和加工技术,而且还要对不锈钢套管的产品质量进行检测。由于极向场线圈的不锈钢套管采用了外方内圆截面形状(图 2),目前国内尚无可行的无损检测方法适用于这一产品的质量控制,需要开发新的无损检测系统。同时,要求相应的无损检测方法具有采购标准所要求的检测精度和较高的检测效率<sup>[4-6]</sup>。

针对以上问题,文章提出了外方内圆不锈钢套管的无损检测方案,即采用常规水浸超声和相控阵水浸超声的检测方法。为验证方案的可行性,制作了含有半椭圆槽和平底孔等人工缺陷的模拟试件,搭建了相应的检测系统,验证了方法的有效性。

## 1 检测要求和检测方案

### 1.1 不锈钢套管的检测要求和检测难点

基于 ITER 采购包的采购标准中要求的基准缺

陷,设计了检测试件,缺陷主要有内、外表面的半椭圆槽和内表面的平底孔。为了加工内部缺陷,将不锈钢套管对半切开,如图 3 所示。检测要求有三点:① 位于不锈钢套管外表面的半椭圆形槽,长 2.0 mm、宽 1.0 mm、深 0.5 mm(图 3(a))。② 位于不锈钢套管内表面的半椭圆形槽,长 2.0 mm、宽 1.0 mm、深 0.5 mm(图 3(b))。③ 位于不锈钢套管内表面的平底孔,深 7.0 mm、直径 0.5 mm(图 3(c))。

不锈钢套管的检测难点主要有三点:① 不锈钢套管采用了外方内圆的截面形状,目前国内尚无可行的无损检测方法适合于这一产品的无损检测。② ITER 采购标准中所要求的检测精度非常高,要求检测出不锈钢套管的缺陷尺寸很小,采用常规超声方法很难满足检测精度要求。③ ITER 采购包所需要的极向场线圈的超导线缆总长度以公里计,需要全长和全数检测,要求有较高的检测效率。

### 1.2 不锈钢套管的检测方案

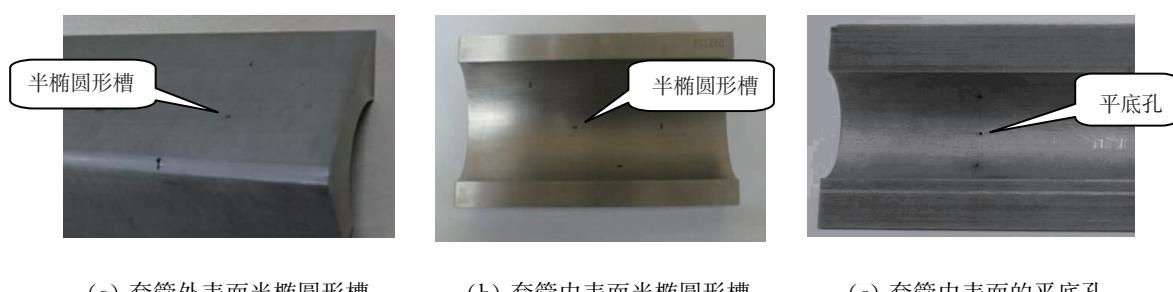
针对上述问题,笔者提出了不锈钢套管的无损检测方案——采用常规水浸超声和相控阵水浸超声的检测方法,利用其数据后处理的功能,实现检测要求。水浸超声检测方法用水作耦合剂,超声探头发射波束通过水入射到被检工件中,在被检工件的表面、底面和损伤处发生反射,超声波探头接收反射波束,用于检测被检工件的损伤。

图 4 所示为水浸超声检测系统框图,图 5 所示为水浸超声的试验系统。通过选取适当的聚焦型水浸超声探头、激励频率和焦距以及相应的信号处理方法,可以采用单探头超声检测方法对不锈钢套管的各种缺陷进行同步检测。由于常规水浸超声检测速度较慢,为提高检测效率可采用相控阵水浸超声进行检测。

## 2 水浸超声检测结果

### 2.1 常规水浸超声的检测结果

常规水浸超声检测探头如图 6 所示,选用了较



(b) 套管内表面半椭圆形槽

(c) 套管内表面的平底孔

图 3 不锈钢套管检测要求

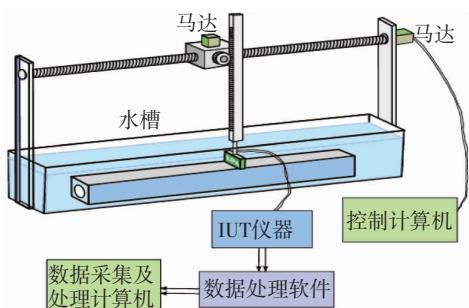


图 4 水浸超声检测系统框图



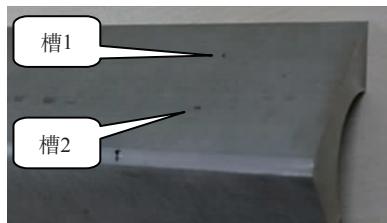
图 5 水浸超声试验系统



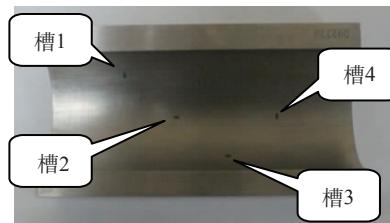
图 6 常规水浸超声探头

高频率的探头,分别对不锈钢套管内、外表面的半椭圆形槽及内表面平底孔进行试验检测。

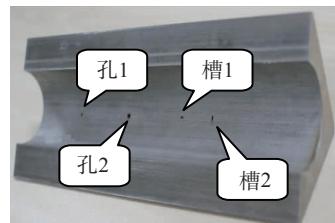
如图7(a)所示,不锈钢套管的外表面有两个半



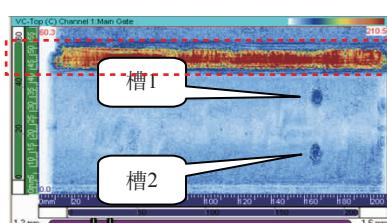
(a) 外表面两个半椭圆形槽



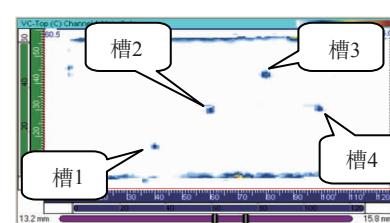
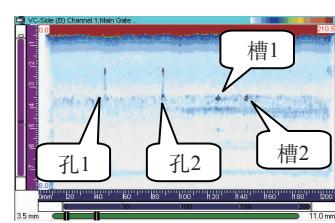
(b) 内表面四个半椭圆形槽



(c) 内表面平底孔和半椭圆形槽



(d) 外表面半椭圆形槽的检测结果图

(e) 内表面半椭圆形槽的检测结果图  
图 7 常规水浸超声的检测结果

(f) 内表面缺陷的检测结果图

椭圆形槽,槽1垂直于套管长度方向,槽2平行于套管长度方向。图7(b)为试验检测结果,可看出有明确的缺陷显示,图上方虚线框内区域为试件切口的噪声信号,在完整套管的实际检测中是不存在的。

如图7(c)所示,不锈钢套管的内表面有四个半椭圆形槽,槽1和槽4垂直于套管长度方向,槽2和槽3平行于套管长度方向。图7(d)为试验检测结果,可以看出有明确的缺陷显示,图中缺陷的排列形状与试件相符,说明水浸超声可以检测内表面的半椭圆形槽。

如图7(e)所示,不锈钢套管的内表面有四个缺陷,槽1、槽2、平底孔1(直径0.5 mm)和平底孔2(直径1.0 mm)。图7(f)为试验检测结果,从图中可见,两个半椭圆形槽的信号很清晰,平底孔的方向与外表面成45°,其两个端点的信号非常明显,即使对于直径0.5 mm的平底孔1,信号也非常清晰。

由以上试验结果可知,利用常规水浸超声技术可以检测不锈钢套管的内、外表面的半椭圆形槽及内表面平底孔等缺陷,由于常规水浸超声需要二维扫查(沿长度方向和宽度方向),而且要求有较高的检测精度,所以检测速度较慢。

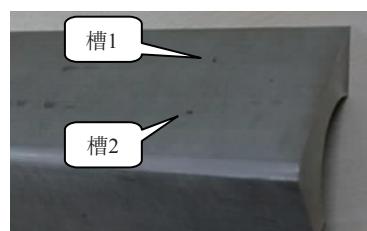
## 2.2 相控阵水浸超声的检测结果

为提高水浸超声的检测效率,笔者又采用相控阵水浸超声对不锈钢套管内、外表面的半椭圆槽及内表面平底孔进行了试验检测,图8所示为相控阵水浸超声探头和夹具,相控阵超声探头有128个晶片。

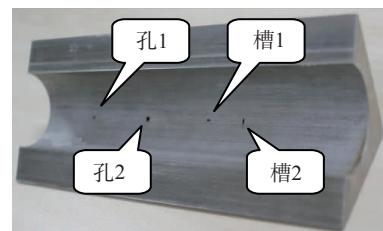
如图9(a)所示,不锈钢套管的外表面有两个半



(a) 相控阵超声探头



(a) 外表面的半椭圆形槽



(b) 内表面的平底孔和半椭圆形槽

(b) 相控阵超声夹具  
图 8 水浸相控阵超声探头和夹具

椭圆形槽,槽 1 垂直于套管长度方向,槽 2 平行于套管长度方向。图 9(b)为相控阵水浸超声的检测结果,与常规超声的检测结果类似,有明确的缺陷显示,说明相控阵水浸超声可以检测套管外表面的半椭圆形槽。

如图 9(c)所示,不锈钢套管的内表面有四个缺陷,槽 1、槽 2、平底孔 1(直径 0.5 mm)和平底孔 2(直径 1.0 mm)。图 9(d)为试验检测结果,从图中可以看出,四个缺陷的信号比较清晰,所以相控阵水浸超声技术可检测不锈钢套管的内表面缺陷。

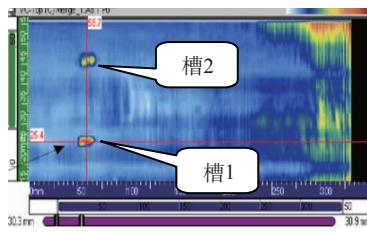
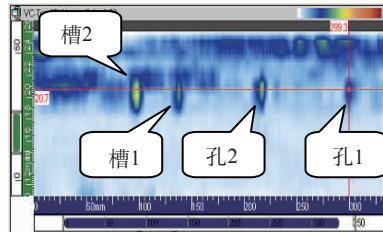
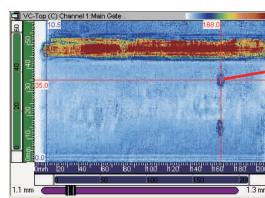
与常规水浸超声的试验检测结果相比较,相控阵水浸超声的检测结果有比较多的噪声,可以对试验结果进行信号处理以提高信噪比。

由以上试验结果可知,利用水浸相控阵超声技术可以检测不锈钢套管的内、外表面的半椭圆形槽及内表面平底孔等缺陷,由于水浸相控阵超声只需要一维扫查(沿长度方向),宽度方向为电子扫查,所以检测速度非常快(10~20 s)。

### 3 试验信号分析

笔者对水浸超声的检测结果进行了初步分析,分析了试验信号的信噪比。

在水浸超声试验检测结果的 C 扫图上,选取某一点,A 扫图则显示该点在深度方向的超声信号,用这种方法确定超声信号的最大值和噪声的最大值。如图 10 所示,常规水浸超声检测外表面半椭圆形槽

(c) 外表面半椭圆形槽  
的检测图(d) 内表面的平底孔和半椭  
圆形槽的检测图  
图 9 水浸相控阵超声检测结果

(a) C 扫图

(b) A 扫图  
图 10 外表面的半椭圆形槽

信号的最大值为 92.2%,其余缺陷的信号类似。

对于不锈钢套管的实际检测,由于套管的数量巨大,需要对试验数据进行信号处理。通过获取试验原始数据,对试验数据进行信号处理(如小波分析),首先获取缺陷的信号(含有噪声),然后通过缺陷信号的 A 扫图判断是否符合采购包的采购标准,比如,采购标准要求 75.0%,上面缺陷为 92.2%,可以判定为缺陷。

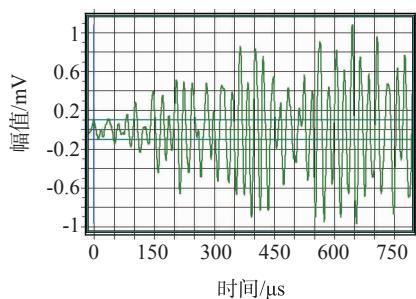
根据公式  $SN = 20 \ln \frac{S}{N}$ ,求出不同缺陷的信噪比,具体数值见表 1。

由表 1 可以看出,试验信号的信噪比是明显的,

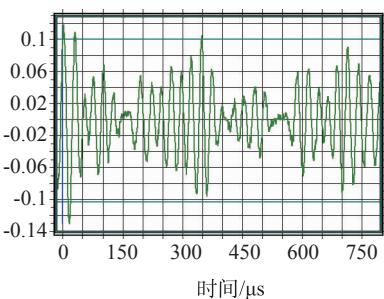
表 1 两种超声检测方法的信噪比

检测法	信噪比		
	外表面槽	内表面槽	平底孔
常规水浸超声	7.95	9.95	9.55
相控阵水浸超声	7.73	9.29	7.50

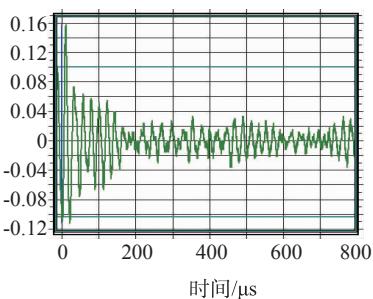
(下转第 32 页)



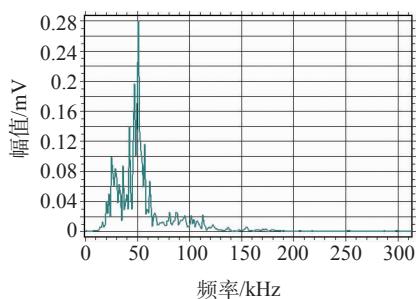
(a) 波形图



(a) 波形图

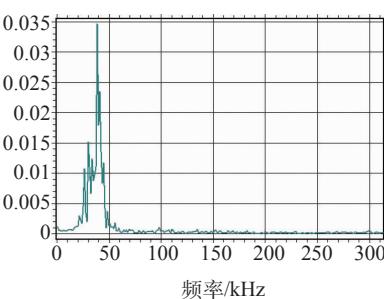


(a) 波形图



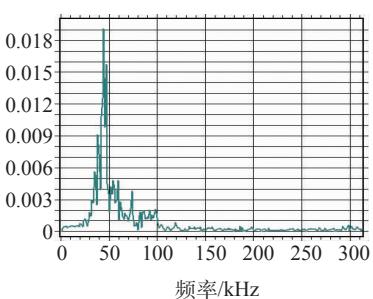
(b) 频谱图

图 5 挡板与行程开关的撞击产生的声发射信号波形图及频谱图



(a) 波形图

图 6 第 40 圈声发射信号的波形图与频谱图



(b) 频谱图

发射信号主要是低频信号,在 45 kHz 附近。

## 参考文献:

- [1] 耿荣生. 声发射技术发展现状—学会成立 20 周年回顾[J]. 无损检测, 1998, 20(6): 151—154.
- [2] 沈功田, 李金海. 压力容器无损检测——声发射检测技术[J]. 无损检测, 2004, 26(9): 457—463.

(上接第 28 页)

常规水浸超声的信噪比略大于相控阵超声的信噪比, 其中内表面槽的信噪比最大, 对于平底孔常规水浸超声的信噪比明显大于相控阵超声的信噪比。由于受试验试件的限制, 上述观点有待进一步试验验证。

## 4 结论

提出了针对 ITER 极向场线圈超导线缆中不锈钢套管缺陷的无损检测方法。由试验结果可得出以下结论:

- (1) 常规水浸超声和相控阵水浸超声检测方法都可以满足不锈钢套管的检测要求。
- (2) 常规水浸超声技术检测速度较慢, 相控阵水浸超声技术检测速度很快。

## 参考文献:

- [1] Chen Zhenmao, Zuo Yongbin, Zhang Dongli, et al.

- [3] 关卫和, 沈纯厚, 陶元宏, 等. 大型立式储罐在线声发射检测与安全性评估[J]. 压力容器, 2005(1): 40—44.
- [4] 姜诚君, 李孟源, 杨黎明. 采用声发射技术对货车轮对轴承的故障诊断[J]. 铁道车辆, 2004, 42(1): 20—25.
- [5] 郝如江, 卢文秀, 褚福磊. 声发射技术用于滚动轴承故障诊断的研究综述[J]. 振动与冲击, 2008, 27(3): 75—79.

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] 邱励勤. 核聚变研究 50 年[J]. 核科学与工程, 2001, 21(1): 29—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] Chen Zhenmao, Yusa N, Miya K. Enhancements of ECT techniques for quantitative NDT of key structural components of nuclear power plants[J]. Nuclear Eng and Design, 2008, 238(7): 1651—1656.
- [5] Chen Zhenmao, Yusa N, Miya K. Some advances in numerical analysis techniques for quantitative electromagnetic NDE[J]. Nondestr Testing Eval, 2009, 24(1/2): 69—102.
- [6] Tian S, Chen L, Chen Zhenmao. Numerical analysis on influence of damage configuration on vibration parameters for lattice sandwich plate[J]. Int J Appl Electromagn Mech, 2010, 33(3/4): 1565—1572.