

ITER 屏蔽包层结合质量超声检测方案研究

石思超¹, 沈京玲¹, 何凤歧¹, 金万平²

(1. 首都师范大学物理系北京 100037; 2. 北京维泰凯信新技术有限公司北京 100083)

摘要:国际热核聚变实验反应堆(ITER)是一项大型的国际合作项目,其中屏蔽包层(即第一壁,FW)模块起到屏蔽中子和冷却的作用。依据 FW 的组成材料、结构特点、检测要求和超声波在其内部的传播特性,FW 结合质量检测需采用宽频超声,针对上述情况,提出宽频超声检测方案,并对其可行性进行了理论分析和研究。

关键词:热核聚变;无损检测;宽频超声;声反射镜

中图分类号: TB553 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2007)02-0395-04

国际热核聚变实验反应堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, 简称 ITER)是一个大型的国际合作项目,其目的是用氢的同位素氘和氚来实现核聚变,提供新能源^[1]。中国将承担 ITER 项目最关键的部位屏蔽包层(即第一壁)模块的研究。第一壁(FW)将承受高温、强中子辐射,起屏蔽中子和冷却作用。第一壁由铍(Be)、铜(Cu)、不锈钢(SS)热等静压(HIP)和电子束焊接(EBW)而成,为了保证反应堆的安全运转,必须对 FW 进行无损检测和评价^[2]。

在国内,FW 的设计、加工工艺、热负荷分析、应力分析等方面都有有关单位在负责研究,唯独在无损检测方面还是空白。为此,我们针对 FW 的无损检测评价问题,参考国内外的有关资料^[3],并根据 FW 的组成材料、结构特点、检测要求和超声波在其内部的传播特性,指出 FW 结合质量检测可以采用宽频超声检测技术。

1 ITER 第一壁的构成

ITER 第一壁的示意图如图 1 所示。最内层是铍瓦,厚度为 10mm,它将直接面对高温等离子体,承受高温、强中子辐射;其后为穿插不锈钢冷却管的铜合金,厚度为 22mm,其中不锈钢冷却管的外径为 12mm,厚度为 1mm,起冷却作用;最外层为钻有一定孔的不锈钢基体板,厚度为 49mm,起支撑作用;和最外层相连的管状物是支撑梁,起支撑和进、排水作用^[2]。

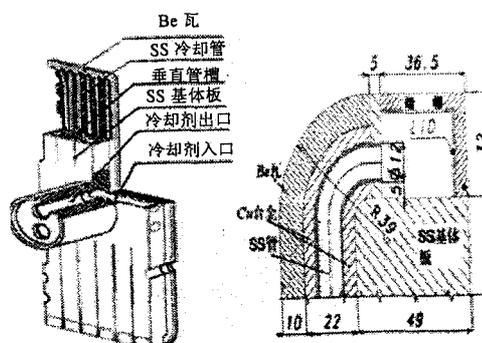


图 1 第一壁剖面图及尺寸

2 第一壁无损检测的要求

FW 加工工艺相当复杂,层与层间不仅要求无结合缺陷,且要求有一定的结合强度,必须对其进行无损检测和评价,其检测所要求的基

收稿日期:2006-07-05

作者简介:石思超(1982—),女(仡佬族),贵州遵义人,首都师范大学光学专业硕士生

本步骤为:

第1步:将铜合金、不锈钢冷却管采用热等静压焊接在一起,然后进行结合质量无损探伤;

第2步:将不锈钢管密封帽、支撑梁、不锈钢基板电子束焊接在一起,再进行焊接质量无损探伤;

第3步:将上述两个部件和铍瓦热等静压焊接在一起,进行最后一次结合质量无损探伤。

FW 工艺过程中的质量监测点如图 2 所示,其中黑圈表示需要进行无损检测的监测点,白圈表示其他的监测点(如形位公差等)。

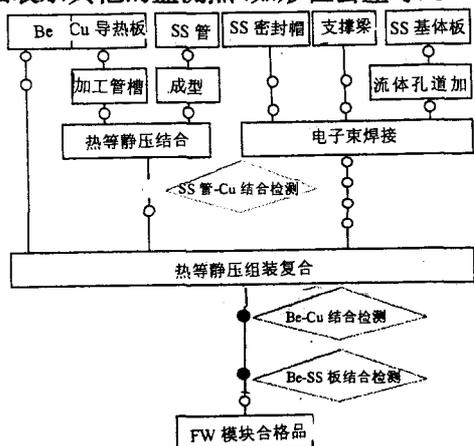


图 2 FW 工艺过程中结合质量监测点

表 1 界面的反射系数和透射系数值

界面	反射系数(r)	透射系数(t)
水-Be	$r_{01} 0.881, r_{10} -0.881$	$t_{01} 1.881, t_{10} 0.119$
Be-空气	$r_{13} -1, r_{31} +1$	$t_{13} \approx 0, t_{31} \approx 2$
Be-Cu	$r_{12} 0.278, r_{21} -0.278$	$t_{12} 1.278, t_{21} 0.722$

注:表中下标数值表示介质,0:水,1:Be,2:Cu,3:空气, r_{01} 代表超声波从水入射到 Be 中,在水-Be 界面处的反射系数,其他依此类推

当一束超声波经过两种介质界面时,一部分被反射回来,一部分继续往下传播,反射回来的波又会在表面发生透射和反射,如此反复下去,形成多次反射波和透射波。在结合面处声波的传播特性又分为结合、未结合两种情况来考虑。当界面结合时,声波的传播情况如图 3a 所示,超声波经过界面以后,一部分发生反射,一部分发生透射;当未结合时,声波的传播情况如图 3b 所示,由于遇到空气,声波全部反射。

根据图 3 所示各次回波脉冲的声程及超声波理论可推导出两种情况下的多次回波声压幅度的公式,并根据计算结果相互比较。

当结合时,超声波的 n 次回波的公式为:

3 FW 的超声检测方案研究

3.1 异种材料结合质量超声检测理论分析

下面以 Be-Cu 界面的结合质量超声检测理论分析为例,阐述 FW 结合质量超声检测的可行性。

在 Be 和 Cu 结合质量的超声检测中,当界面结合良好时,可近似为 Be-Cu 界面,当未结合时,可近似为 Be-空气界面。

根据超声波的反射、透射原理,当一束宽频超声脉冲法向入射到两种介质界面时,反射波和透射波的幅度和相位将随着界面两边介质的声阻抗数值发生变化,其声波幅度的反射系数(r_{12})和透射系数(t_{12})由下式确定:

$$r_{12} = (z_2 - z_1) / (z_2 + z_1) \quad (1)$$

$$t_{12} = 2z_2 / (z_2 + z_1) \quad (2)$$

式中, z_1 和 z_2 分别表示界面两侧介质的声阻抗, $r_{12} > 0$ 表示反射波的相位和入射波的相位相同,反之则相反; $t_{12} > 0$ 表示透射波的相位和入射波的位相相同,反之则相反^[3]。Be、Cu、水、空气的声阻抗分别为 2.35、4.16、0.149、0.004($\times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$)。由式(1、2)可计算出水-Be、Be-空气、Be-Cu 界面的反射系数和透射系数值,见表 1。

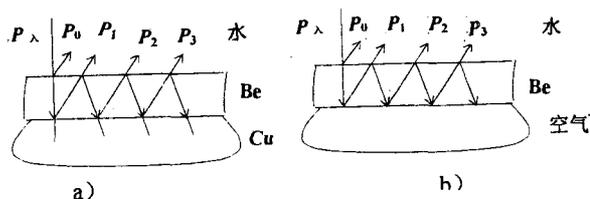


图 3 超声波传播规律

$$P_n = P_i t_{01} t_{10} r_{10}^{n-1} r_{12}^n e^{-2n\alpha d} \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (3)$$

2)未结合时的 n 次回波的公式为:

$$P_n = P_i t_{01} t_{10} r_{10}^{n-1} r_{12}^n e^{-2n\alpha d} \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (4)$$

式中 P_i 表示入射波的幅度, α 为衰减系数,

d 为铍的厚度 ($d=10\text{mm}$), 其他参数见表 1。 $P_n>0$ 表示反射波的相位和入射波的相位相同, 反之则位相反。

下面假设入射波的幅度为 $P_0=1$, 因材料中超声波的衰减系数与材料的晶粒度、加工状态和超声频率等都有关系, 在本文中, 根据有关资料^[4], 在计算中 Be 的衰减系数取 6.1×10^{-7} dB/mm, 由式(3、4)可计算多次回波值, 见表 2。并表现在波形图上, 结合良好时, 波形图如图 4 所示; 界面未结合时, 波形图如图 5 所示。

表 2 多次回波值

回波脉冲 序列号	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	...
结合时	0.881	0.0622	-0.0152	0.0037	-0.0009	...
未结合时	0.881	-0.2238	-0.1972	-0.1737	-0.1531	...

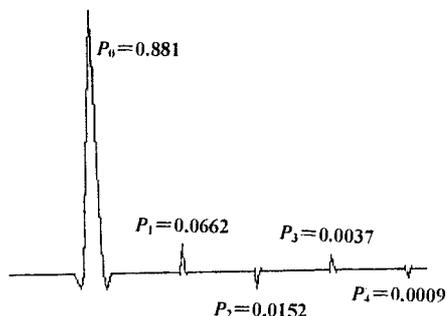


图 4 结合时界面的回波理论波形

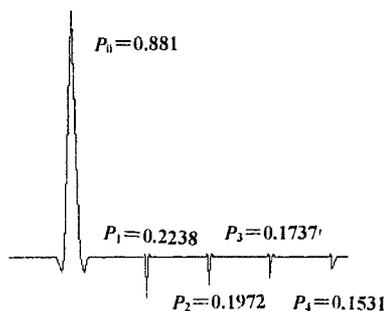


图 5 未结合时界面的回波理论波形

由上述可知, 当界面结合和未结合时, 其幅度和相位表现在波形上都是不一样的, 当界面结合时, 多次回波的幅度值相对未结合时较低, 且相位是一正一反相互交替的; 当界面未结合时, 界面多次回波的幅度值相对结合时较高, 且相位和入射波的相位总是相反的, 由此可判断 Be-Cu 是否结合良好。

3.2 宽频超声液浸聚焦检测技术

从上述理论分析, 可以看出, FW 在用超声波检测时, 必须同时根据界面回波的相位和幅度值, 才能准确判断出界面是否是结合的, 因此

超声检测系统必须具有显示相位信息的功能, 且检测精度要高。

在常规超声检测中, 频率低、频谱窄、检测精度低、盲区大, 且不能分辨相位信息; 而宽频带超声检测, 频率高、脉冲窄、具有幅度、相位、频谱全信息、检测精度高, 盲区小, 适合检测对精度要求高的工件。且被检材料厚度可覆盖 1~100mm 的范围。

宽频超声由于它独特的优点, 现在已广泛应用于裂变反应堆等领域中多层复合材料的结合质量检测^[5]。

FW 由多种材料复合而成, 对检测的精度要求高。Be/Cu, Cu/SS 各层间的检测精度要求能检出宽度在几十 μm , 长度小于 3mm 的缺陷。因为 FW 总厚度为 81mm, 由不同厚度 (最薄 1mm, 最厚 49mm) 的不同材料经过特殊的工艺制作而成, 宽频超声水浸界面自动跟踪、自动化检测系统可满足这种复合结构结合质量的检测要求。在本方案中, 为了提高检测精度, 探头均采用聚焦探头^[6]。

3.3 Be-Cu 和 Cu-SS 基体板结合质量检测方案

Be-Cu 和 SS 基体板-Cu 两部分都是平面结合, 可以采用宽频液浸聚焦纵波直探头检测, 如图 6a 所示, 探头在计算机实时程控下逐行扫描工件, 如图 6b 所示, 扫描的步长取决于 FW 的检测精度, 超声仪器将反射回波按上述理论分析处理后, 把信号传送给计算机, 在计算机上通过软件把不结合缺陷的大小、形状以 C-型投影图像形式显示出来。

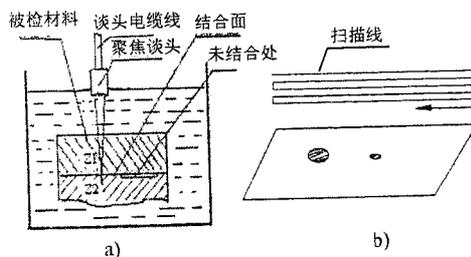


图 6 水浸检测示意图

3.4 Cu-SS 管结合检测

要对此部分进行质量检测, 超声探头只能在 SS 管内进行检测。然而在管内, 由于内径 (10mm) 较小, 把探头伸进管内进行旋转检测, 技术上难以实现, 为此需采用管内超声声反射镜检测装置, 如图 7 所示。声反射镜被装在特

制的管里面,在管内伸缩、旋转自如,只要超声束垂直向下入射,且声反射镜和管内壁成 45° 角就能保证声波可以垂直入射到管的内壁上,对Cu管-SS结合进行准确检测^[5]。

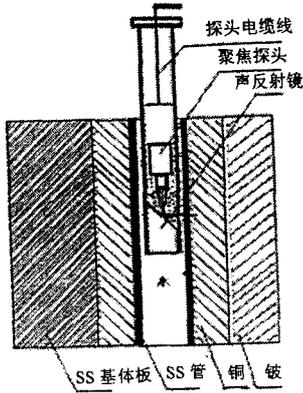


图7 管内超声声反射镜检测装置

4 结束语

通过对异种材料结合质量超声检测理论分析,结果表明利用宽频超声无损检测方法可以对第一壁结合质量进行检测。鉴于第一壁的检测精度要求和超声波频率与检测精度的关系,

第一壁结合质量检测不能采用常规的超声检测方法,需采用宽频超声聚焦探头液浸法。由于第一壁各层结构不一样,Be-Cu、Cu-SS基板结合质量检测需采用水浸法,计算机控制探头逐行扫描工件,以C-型图像显示检测结果。而Cu-SS管结合质量采用管内超声反射镜装置进行检测。

参考文献:

- [1]赵君煜. 国际热核聚变实验堆(ITER)计划, 前沿进展, 257-261
- [2]mario merola, Delopment of Carbon Materials and Plasma-Facing Components of ITER, EFDA Close Support Unit, Garching, Germany.
- [3] Pitkanen J, et al. Ultrasonic Studies On Iiter Diverter And First Wall Prototype Modules, VTT Finland, 2002
- [4]冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001.
- [5]何凤歧, 等. 小盲区超声反射镜技术无损检测管-板爆炸焊缝的研究[J]. 核科学与工程, 1984, 4(1);
- [6]GANG Tie, et al. Ultrasonic echo signal fetures of dissimilar material bonding joints[J]. Trans Non-ferrous Met Soc China, 2004, 14 :

Studies of the ultrasonic testing scheme on bonding quality in shield blanket of ITER

SHI Si-chao¹, SHEN Jing-ling¹, HE Feng-qi¹, JIN Wan-ping²;

(1. Capital Normal University Department of Physics, Beijing 100037, China;

2. Beijing Waiteksin Advanced Technology Co., LTD, Beijing 100043, China)

Abstract International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) is an international cooperative item. One of its components, the First Wall (FW) functioning as neutron shielding and cooling, is an important part. According to the component materials, structural features, testing requirements of the FW, and the ultrasonic propagation characteristics, it is suggested that Broad-band ultrasonic can be used to test the bonding quality of the FW. According to the case mentioned above, the Broad-band Ultrasonic Testing scheme was presented, and the ultrasonic testing feasibility was analyzed theoretically in this paper.

Key words:

Key words: thermonuclear fusion; non-destructive testing; broad-band ultrasonic; acoustic mirror