

核电站贯穿件超声检测探头架结构设计与分析

谌梁,王振华,陈国栋

(苏州大学 机电工程学院,江苏 苏州 215000)

摘要:在民用核安全设备的无损检验中,超声检验是应用较多的体积检验方法之一。焊接管道用于传输载热剂或冷却剂,材料一般为不锈钢或碳钢,在核电站中大量使用。为保证运行安全,需定期对焊缝进行超声检测。设计了一款多连杆机构的超声探头架,并对其进行静力学分析。结合实验数据验证探头耦合力对缺陷响应幅值的影响,从而确定该多连杆探头架的参数。

关键词:核电站;管道;超声检测;探头架;耦合力

中图分类号:TG115.285 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)04-0047-04

Structure and Analysis of Probe Frame for Ultrasound Inspection of Nuclear Power Plant Penetrators

SHEN Liang, WANG Zhenhua, CHEN Guodong

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215000, China)

Abstract: In the nondestructive testing of civil nuclear safety equipment, ultrasonic testing is one of the volume testing methods widely used in raw materials, manufacturing, installation, pre-service inspection and in-service inspection. Welding pipeline is used to transmit heat carrier or coolant. It is made from stainless steel or carbon steel and it is widely used in nuclear power plant. To ensure the safety operation, it is necessary to detect the weld regularly. In this paper, a multi-link mechanism ultrasonic probe frame is designed, and its static analysis is carried out. By the experimental data, the influence of probe coupling force on the response amplitude of defects is verified. And then, the parameters of the multi-link probe frame are determined.

Keywords: nuclear power plant; pipeline; ultrasonic inspection; probe rack; coupling force

0 引言

压水堆核电站由核岛、常规岛和配套设施三部分组成。核岛回路是由反应堆、蒸汽发生器、主冷却剂循环泵、稳压器和主管道等设备组成的密闭式高压循环回路^[1],其作用是将反应堆堆芯内核裂变所释放的大量热能导出,传给蒸汽发生器二次侧的给水,使之产生饱和蒸汽送入常规岛的汽轮机做功,带动发电机发电。将饱和蒸汽传送至汽轮机的管道叫做主蒸汽管道(VVP),做功后将冷却剂传送到蒸汽发生器二次侧的管道叫做主给水管管道(ARE),这两种管道连接在核岛与常规岛之间,贯穿于核岛墙体,所以称为贯穿件。在贯穿件的两端,管道与贯穿件焊接连接,由于管道内承受高压,根据核电站建设和运行要求,需对此贯穿件焊缝进行超声检测,这就是本文研究的对象,压水堆核电站运行原理见图1。

1 管道检测研究现状

自20世纪60年代,欧美国家政府支持管道检测的产学研合作,投入大量人力、物力进行了管道检测技术的开发,已开发出较多种类的管道检测设备,其定位、定量精度

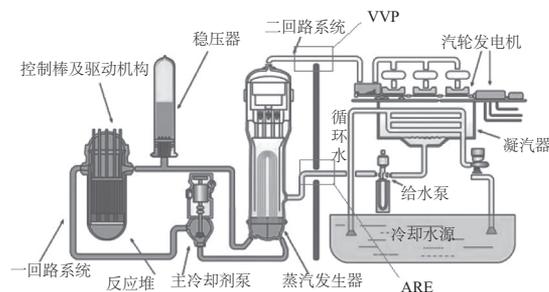


图1 压水堆核电站运行原理

均已达到较高水平^[2]。管道检测设备主要应用于石油化工行业、长距离输气输水管道、承压管道、城市排水管道^[3]。

目前,国内外已有很多机构研究管道超声检测设备,如美国 ZETEC 公司,法国 AREVA 公司,日本 OLYMPUS 公司,国内也有多家无损检测公司进行该方面研究。常见的管道扫查器见图2。该类设备由周向导轨、轴向驱动模块、超声探头架及电缆组成,其探头架占用的径向空间较大。

对于如 ARE 和 VVP 贯穿件等管道,其径向空间有限,管道结构示意图见图3。该类型管道外侧有罩管,径

第一作者简介:谌梁(1988—),男,工程师,硕士,现从事核电站在役检查设备的研发工作。

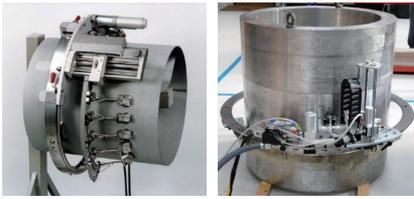


图2 常见管道超声扫查器

向空间受限。进行该管道的检测时,要求探头架径向尺寸小,而且需要提供足够的耦合压力,常见的超声扫查器无法进行该管道的超声检测,需设计新型的超声探头架,并分析其耦合压力是否能满足要求。

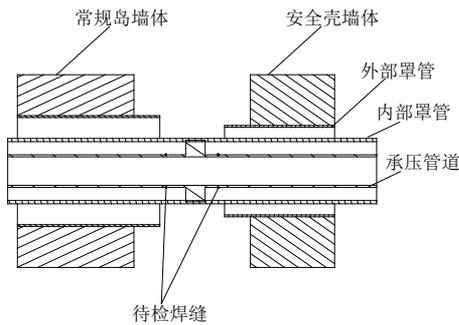


图3 ARE、VVP 管道结构示意图

ARE 和 VVP 管道在罩管端部附近安装有阀门和接管,如图4所示。检测设备安装空间受限,对检测设备的尺寸限制较多。

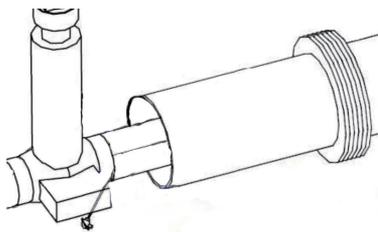


图4 VVP、ARE 贯穿件罩端部空间

VVP 管道焊接部分厚度尺寸是 36 mm,焊缝宽度约为 26 mm,是 U 型焊接坡口,如图 5 所示。ARE 焊缝高度是 28 mm,焊缝宽度约为 21 mm,U 型坡口,如图 6 所示。

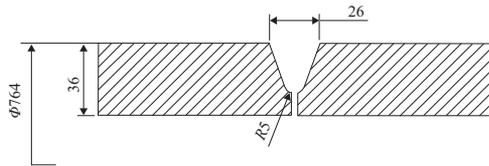


图5 VVP 贯穿件焊接坡口图

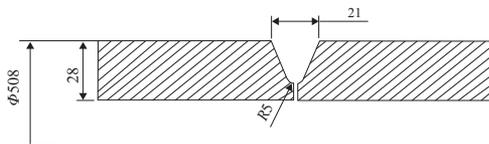


图6 ARE 贯穿件焊接坡口图

2 探头架结构设计

常见的一种探头架见图7,一般包括与扫查器本体的连接口、探头滑动行程模块、提供耦合力的弹簧和安装探头的安装架^[4]。此探头架需要管道径向空间较大,弹簧被压缩,产生耦合力,使探头贴紧被检件。

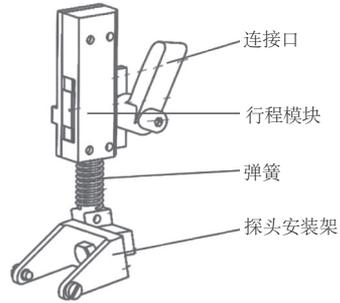


图7 一种常用的超声探头架

针对贯穿件管道检测专门设计了一款扁平式的多连杆探头架,如图8所示。

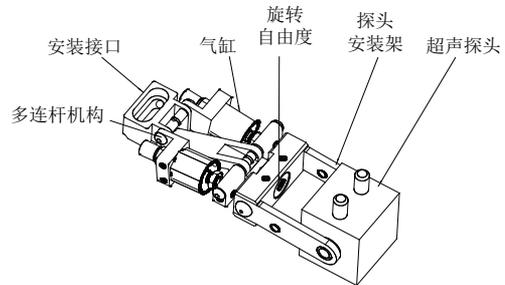


图8 扁平式多连杆探头架

该探头架主要由多连杆机构、2个气缸、探头安装架和探头组成。扁平式设计可减小探头架径向高度尺寸。

3 探头架静力学分析

可将图8所示探头架简化成以下多连杆机构模型,见图9。

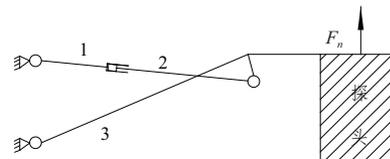


图9 探头架简化模型

该机构的自由度分析:杆1、杆2、杆3为活动构件,杆1和杆2之间为气缸,是移动副,另3处连接为铰接副, F_n 为探头与检测面之间的压力。

对机构进行运动自由度分析: $n=3$;低副数 $PL=4$;无高副, $PH=0$;自由度 $F=3n-2PL-PH=3\times 3-2\times 4-0=1$,可知该机构具备确定的相对运动,且动力源为气缸;其中气缸缸径为 10 mm,1 个探头架对称布置 2 个气缸。

对杆 3 进行受力分析,见图 10。

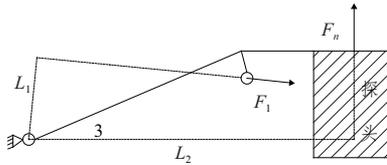


图 10 杆 3 受力分析

以铰接点为中心,对其力矩平衡,有以下关系:

$$F_1 \times L_1 = F_n \times L_2 \quad (1)$$

其中 F_1 为杆 1 和杆 2 之间的力,等于气缸产生的压力

$$F_1 = P \times \frac{\pi D^2}{4} \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)可计算出 F_n ,并考虑到两个气缸为对称布置。

$$F_n = \frac{P \times \frac{\pi D^2}{4} \times L_1}{L_2} \times 2 = \frac{P \times \pi D^2 \times L_1}{2 \times L_2} \quad (3)$$

根据实测, $L_1/L_2 = 0.2$,其变化范围很小。

由式(3)可知,在气缸型号确定下,给定气缸内部压力 P ,可得到探头的耦合压力 F_n 。

4 探头架耦合力实验分析

4.1 影响检测结果的因素

超声探头通过耦合剂与被检工件表面接触,由探头内部的压电晶片发出超声波,通过耦合剂进入工件。超声波在工件内经反射体反射后,在超声仪形成一个反射回波^[6],回波信号幅值代表缺陷大小,回波信号幅值受到 3 方面影响:1)反射体性质;2)耦合剂性质;3)耦合压力。

反射体性质指反射体的大小、形态和位置方向等;耦合剂性质是指耦合剂的种类、耦合层厚度等;耦合压力指由探头架向探头施加的耦合压力,耦合力不足会导致反射回波偏低,会造成缺陷漏检,耦合力过大容易导致探头磨损加速,所以需选择适当的耦合力。

4.2 实验平台

为保证探头检测到缺陷的信号幅值达到最大,不致缺陷漏检或偏小,需设计一实验平台,测试所需的最小耦合力,实验平台如图 11 所示。

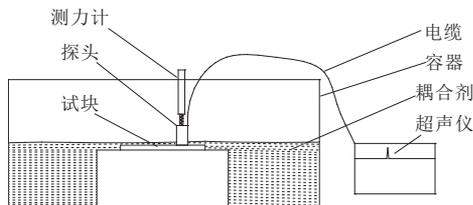


图 11 实验平台设计图

本实验平台将试块浸没于耦合剂中,可以保证探头与试块之间的良好耦合,排除由于耦合差异导致的回波高度差异;只选用试块中的一个反射体,排除由于反射体性质

差异导致的回波高度差异。

利用测力计施加耦合压力,从 0 开始,每次增加 1 N,依次记录回波高度,直至连续 3 次记录稳定在最高回波高度。

4.3 实验过程

实验平台实物如图 12 所示,探头为 5Z20N(自重 0.5 N),试块为 II W 试块,耦合剂为水。

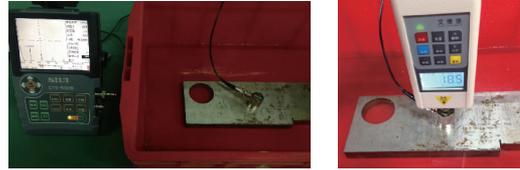


图 12 实验平台

实验步骤如下:

- 1) 设置超声仪参数;
- 2) 校准探头时基;
- 3) 将试块第一次底面信号调至最高,并将最高回波调至满屏的 80%,保持衰减不变;
- 4) 测力计从 0 开始,每一步增加 1 N 的压力,记录每一步的回波高度;
- 5) 将压力-回波高度制成表格,进行分析。

4.4 实验结果

测得数据见表 1,表中施加压力 0 代表探头未与工件接触,回波高度为 0;探头放在工件上,自重为 0.5 N,作为起始测试的耦合压力,之后依次增加 1 N 进行测试。

表 1 测试结果

施加压力/N	0	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
回波高度/%	0	28	36	40	44	50
施加压力/N	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5
回波高度/%	53	56	58	60	62	64
施加压力/N	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5
回波高度/%	68	72	73	74	75	76
施加压力/N	20.0	22.0	24.0	30.0		
回波高度/%	80	80	80	80		

将表 1 的结果制成曲线如图 13 所示。

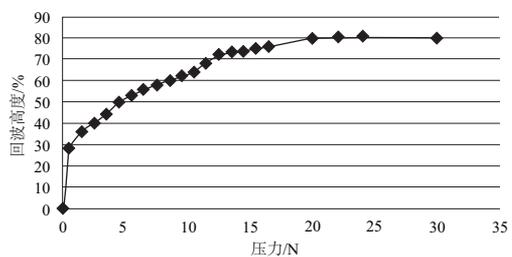


图 13 压力-回波高度曲线图

4.5 实验结果分析

从图 13 可看出,在施加压力 0~10 N 之间,回波高度随压力增加而迅速升高,而在 10 N~20 N 之间,压力加倍,但回波高度仅增加 16%,在 20 N 以后,回波高度稳定在 80%。从上述分析可得出结论,为保证检测结果准确性,对探头施加的耦合力至少为 20 N。

根据式(3),在已知 $F_n = 20 \text{ N}$ 、 $D = 10 \text{ mm}$ 前提下,可计算出气缸所需压力 P :

$$P = \frac{F_n \times 2 \times L_2}{\pi D^2 \times L_1} \quad (4)$$

将上述已知参数代入计算式(4):

$$P = \frac{20 \times 2}{3.14 \times 0.01^2} \div 0.2 = 0.63 \times 10^6,$$

计算出 $P = 0.63 \text{ MPa}$,即 0.6 MPa 的气压。

5 结语

针对径向空间狭小的管道需进行超声检测,笔者设计了一款扁平式多连杆探头架。本文对该探头架进行了力

学分析,确定了气缸压力与探头耦合力的数学关系;搭建实验平台,对耦合力与反射体回波高度之间的关系进行了研究,得出了需保证得到最大反射回波的耦合压力值;由所需耦合压力及数学关系,计算出气缸所需气压。经现场测试,施加该气压值,可保证缺陷回波信号最高,缺陷不漏检、缺陷尺寸不偏小。

参考文献:

- [1] 陈桂辉. 轻水堆核电站的原理与应用前景[J]. 能源与环境, 1996(1): 15-16.
- [2] 张琦. 大容量高保真海底管道超声检测数据处理技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- [3] 王朝晖, 石永春, 朱欢勤. 管道检测技术[J]. 管道技术与设备, 1999(1): 40-41.
- [4] 郑伟和, 付汝龙, 张定成, 等. 管道纵缝检测扫查器: 中国, CN201320768647.X[P]. 2014-05-28.
- [5] 胡建恺. 超声检测原理和方法[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1993.

收稿日期:2019-04-16

(上接第 46 页)

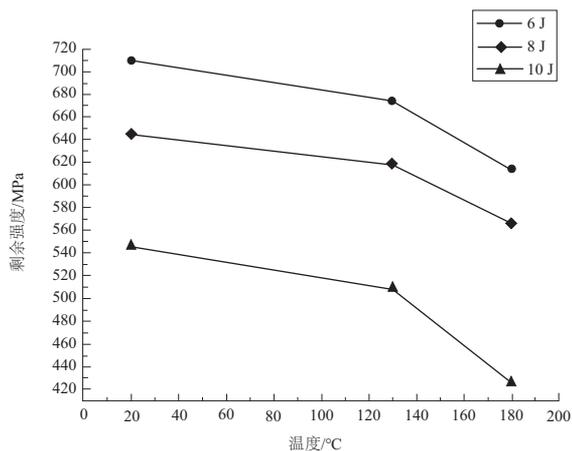


图 7 剩余强度随温度变化曲线

3 结语

1) 低速冲击在复合材料层板表面造成损伤较小,但会在层板内部造成基体开裂、纤维断裂和大量的分层损伤,且冲击能量越大,损伤面积越大,层板的剩余强度越低。

2) 复合材料层板内部铺层方向不同,在受热时内部会产生热应力,且随着温度升高,材料性能会有下降,在承

受相同冲击能量时,温度越高,层板损伤程度越严重,剩余强度越低。

参考文献:

- [1] DE Moura M, MARQUES A T. Prediction of low velocity impact damage in carbon-epoxy laminates[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002, 33(3): 361-368.
- [2] 程小全, 张子龙, 吴学仁. 小尺寸试件层合板低能冲击后的剩余压缩强度[J]. 复合材料学报, 2012, 19(6): 8-12.
- [3] 闫李昕, 王秋成, 陈光耀. 碳纤维复合材料低速冲击特性及损伤分析研究[J]. 机电工程, 2016, 33(7): 815-821
- [4] 吴盼, 阎建华, 俞建勇, 等. 碳纤/环氧树脂复合材料层合板低速冲击损伤机理研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(3): 31-37.
- [5] 温卫东, 崔海坡, 徐颖. T300/BMP316 复合材料层板冲击损伤研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(5): 749-754.
- [6] WANG Shixun. Low-velocity impact and residual tensile strength analysis to carbon fiber composite laminates [J]. Materials and Design, 2010, 42: 118-125.
- [7] KOO J M, CHOI J H, SEOK C S. Prediction of residual strength of CFRP after impact [J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 54: 28-33.
- [8] 王志, 张雷, 陈健, 等. 碳纤维环氧树脂复合材料高温力学性能研究[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(12): 1659-1663.
- [9] 姚佳伟, 张腾, 牛一凡. 非连续湿热作用下树脂基复合材料性能变化及机理的研究[J]. 塑料工业, 2017, 45(12): 83-86.

收稿日期:2019-04-26