

# TOFD 检测技术在溧阳抽水蓄能电站 蜗壳焊缝质量检查中的应用

陈雪峰

(中国水利水电第五工程局有限公司,四川 成都 610225)

**摘要:**介绍了溧阳抽水蓄能电站将 X 射线检测替换为超声波衍射时差法(TOFD)检测技术,有利于提高焊缝缺欠的检出率。检测结果表明:采用该技术,不仅提高了检测效率,改善了工作环境,而且还能缩短工期并减少射线辐射风险等。

**关键词:**TOFD;X 射线;溧阳抽水蓄能电站;蜗壳;焊缝质量检测

**中图分类号:**TV7;TV743;TV522;TV523

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2017)03-0054-04

## 1 概述

TOFD (Time - of - flight - diffraction technique) 超声衍射时差检测技术是一种依靠超声波与缺陷端部相互作用发出的衍射信号来检出缺陷并对其进行精确定量的检测技术,于 1977 年由英国国家无损检测中心的 Mauric Silk 博士首先提出,后经 Silk 博士和他的合作者经过大约 10 a 时间的研究创造出了能够探测和确定缺陷尺寸的一整套检测方法。2000 年左右开始,该项技术在中国逐步得到应用。首先应用于核工业设备在役检验,现在在核电、建筑、化工、石化、长输管道等工业厚壁容器和管道方面多有应用。近几年在一些大型水电站的蜗壳和水工金属结构检测中逐步开始使用该检测技术,如三峡工程、溪洛渡、锦屏等大型水电站。

## 2 溧阳抽水蓄能电站蜗壳具有的特点

(1) 江苏溧阳抽水蓄能电站共安装 6 套额定出力为 250 MW 的混流可逆式水泵水轮机,座环、蜗壳由哈尔滨电机厂有限责任公司制造。

(2) 蜗壳共有 21 节、分八部分组成,第 6 节和第 16 节为凑合节,蜗壳第一、第二节和蜗壳进口段第一、第二节单独发货运输。

(3) 蜗壳材质为 B610CF 低合金高强度钢,板厚 30 ~ 55 mm,焊条为 CHE620CFLH。

(4) 蜗壳焊接现场为地下厂房安装间,现场湿度大、粉尘多、施焊作业环境较差。

(5) 施工现场有几家施工单位同时或交叉作业,来往施工人员较多。

## 3 TOFD 检测技术的原理及其与常规检测方法的区别

(1) 常规超声波探伤技术为脉冲反射式,利用探头发射脉冲波到被检工件中,通过观察工件内部缺陷或底面反射波的情况对工件进行检测,包括缺陷回波法、底面高度法和多次底面法(图 1)。

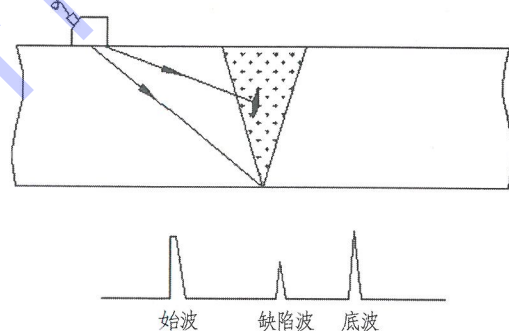


图 1 脉冲反射法示意图

(2) 射线探伤技术(射线照相法)是利用 X 射线或伽马射线穿透工件并与物质发生相互反应,因缺陷与工件材质存在对射线不同的衰减常数,从而因胶片上感光程度不同而得到缺陷的潜影并通过胶片记录下来(图 2)。

(3) TOFD 技术则是以缺陷尖端对超声波的作用为基础,利用超声波的反射、绕射原理对工件进行无损检验。TOFD 检测法的特点是利用在固体中传播速度最快的纵波进行检测,在焊缝的两侧,将一对频率、尺寸、角度相同的纵波斜角探头对称放置,在无缺陷部位发射超声波脉冲后,首先收到的是直通波,然后是底面反射波。有缺陷存在时,在直通波与底面发射波之间接收探头还会收到缺陷尖端产生的衍射信号波。除了上述显示

收稿日期:2017-04-23

波以外,还有缺陷和底面波转换成的横波。横波的声速小于纵波的声速,故其会比纵波稍迟到达接收探头,其路径见图 3。

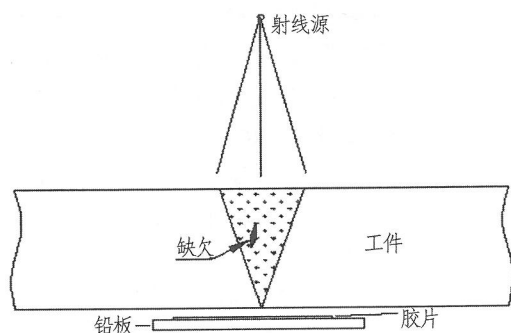


图 2 射线照相法示意图

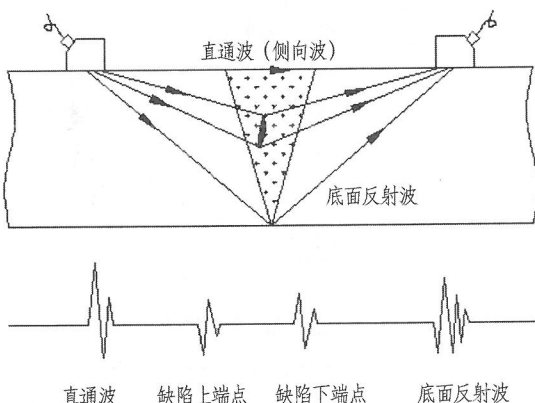


图 3 端点衍射时差法示意图

#### (4) TOFD 具有的检测特点。

- ①与常规脉冲回声检测技术相比,TOFD 在缺陷检测方面与缺陷的方向无关。
- ②同射线相比,TOFD 可以检测出与检测表面不相垂直的缺陷和裂纹。
- ③可以精确地确定缺陷的高度。
- ④在安全方面,不需要一个安全、独立的操作空间,因此可以在不中断工艺生产的情况下进行检测,可以节约设备制造时间。
- ⑤可以在线得到检测结果且将结果用数字信号型式永久保存在光盘中,以便于以后在役检验进行对比分析。
- ⑥可以在线应用相关的工程评定标准对缺陷进行评定,仅将按标准评定的缺陷进行挖补修复,从而避免了无用的破坏焊缝整体性的修补现象。
- ⑦由于其检测速度快,对于板厚超过 25 mm 的材料,成本比 RT 少得多。
- ⑧可以在 200 °C 以上的温度表面进行检测

(已经有在 400 °C 检测的实例)。

⑨TOFD 检测系统易于搬运,可以方便地在任何地方进行检测。

⑩由于其可以在产品制造期间进行检测,因此而节约了大量的时间和修复成本。

⑪检测率高于常规的超声 UT。

#### 4 蜗壳安装焊缝 TOFD 检测前的准备工作

(1)人员:TOFD 检测人员应具有无损检测 UT II 级资格或与其相当的 UT II 级资格并经过 TOFD 专项培训且有 2 年以上现场 TOFD 检测经历。技术负责人应持有 UT III 级和 TOFD II 资格,报告签发审核人员应当具有 UT II 级和 TOFD II 资格,熟悉溧阳水电站检测用的 TOFD 标准和作业指导书,检测人员矫正视力应不低于 1,并不得有色盲、色弱。

(2)设备:仪器常规性能应符合《A 型脉冲反射式超声波探伤仪通用技术作条》的规定,选用以色列生产的(单通道)数字衍射时差探伤仪(型号为:ISONIC STAR 2005),仪器频率范围为 0.35 ~ 35 MHz,可调。每次检测前和检测后应对仪器显示范围、显示延迟、探头延迟、增益、探头间距进行校验。当发现以上参数有偏差时,应对上次校验以后所检测的所有焊缝重新进行检测。

(3)探头:探头主声束偏离不应大于 2°,用于 B 扫描的常规探头不得有明显的双峰。TOFD 操作的两只探头应有相同或相近的探头角度、尺寸和频率。由于该工程板厚为 30 ~ 55 mm,根据溧阳抽水蓄能电站 TOFD 检测相关标准规定,探头角度优先选用 60°探头和 45°探头,直径宜为 6 mm。

(4)PCS(探头入射点间距):探头间距的选择:为了能检测到整个焊缝截面内的缺欠,探头间距的调整宜使两探头声束中心线交点位于焊缝厚度的 2/3 处。所选定的探头间距调整误差不得大于 1 mm;根据对接焊缝和蝶形边焊缝的具体情况设置更能够有利于缺陷检测的 PCS 值。

(5)耦合剂:耦合剂(包括添加剂)不应损害被检测材料,耦合剂可以是工业浆糊或与其性质相近的物质,检测结束时应清除被检焊缝两侧的耦合剂。

#### 5 蜗壳焊缝 TOFD 的实施

(1)由于溧阳抽水蓄能电站业主在合同中要求 100% 射线检测,也就相当于要求 100% TOFD 检测,从而要求对所有现场蜗壳焊缝进行打磨抛



光处理并达到检测的要求。焊缝两侧各 200 mm 范围为打磨区,划线、仪器现场调整、探头 PCS 调校等按作业指导书进行。

(2)第 8~16 节蜗壳板厚不超过 50 mm,采用单面平行于焊缝的方向进行(非平行扫查)(图 4),两只探头的连线垂直于焊缝。探头连线的中心与焊缝中心的纵向偏离不得大于 5 mm,否则会影响缺欠评定。原则上宜采用导向装置,以保证探头的移动方向始终与焊缝平行。对第 1~7 节厚度大于 50 mm 的管接焊缝应实施双面扫查,在对缺欠进行自身高度测量时,还可以对缺欠部位进行横向扫查(图 5)。

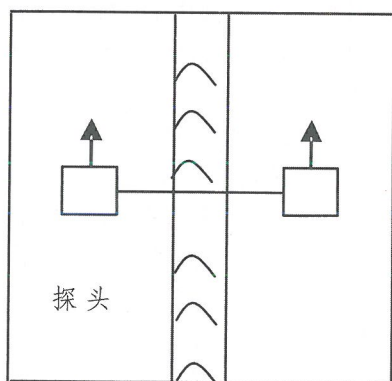


图 4 探头沿焊缝方向移动示意图

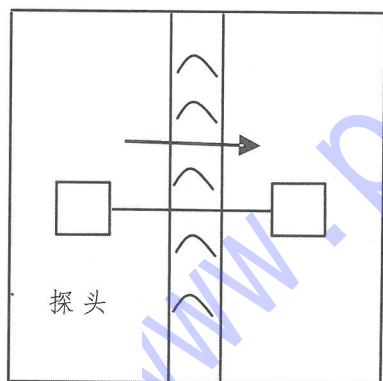


图 5 探头沿垂直于焊缝方向移动示意图

(3)对所有的焊缝应进行分段扫查,每段长度不宜大于 450 mm,重叠扫查不小于 50 mm,用记号笔在焊缝现场做永久标示。当发现接近最大允许尺寸的缺陷或需要了解缺陷的更多信息时,宜采用两种或两种以上的探头间距或探头角度对焊缝进行扫查。

(4)扫查过程中,注意直通波和底面反射波的波幅值,应保持直通波波幅在 40% 上下、不超过 5% 的范围内,扫查速度不得大于 50 mm/s,如

此实施保存的扫描图会比较清晰,不会出现模糊的条带,有利于对焊缝缺陷衍射信号进行评定和测量。

(5)对蜗壳蝶形边焊缝采用两次偏心扫查(D 扫),一次一只探头靠近焊缝一侧(如过渡板一侧),一次另一只探头靠近焊缝另一侧(蜗壳瓦片侧),如图 6(a)和(b)。对于第 1~7 节的蝶形边进行两次偏移扫查,对于第 8~16 节现场焊接焊缝和第 1~7 节的环焊缝不进行偏移扫查,对钢管外壁不进行偏移扫查。

(6)对图谱上显示有横向缺陷的地方,将焊缝余高磨平,进行一次垂直于焊缝方向的 D 扫。

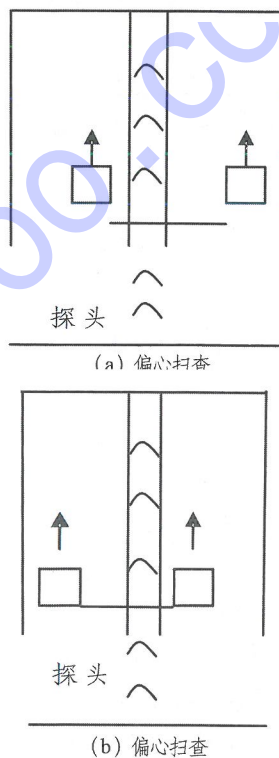


图 6 蜗壳蝶形近焊缝偏心扫查图

## 6 对蜗壳焊缝 TOFD 检测出的质量问题进行分析

(1)溧阳抽水蓄能电站共装有 6 台蜗壳,分两瓣安装,第 1~4 节为现场组装,过渡板板厚为 100~65 mm(渐变),材质与蜗壳相同,为 B610CF 钢,焊条由厂家统一供货,焊条型号为 CHE620CFLH。蜗壳只有环缝和蝶形边焊缝,在检测第 6 节蜗壳安装焊缝时,上蝶形边非平行偏心扫查和过焊缝非平行扫查中发现,在过渡板熔合线和热影响区靠近板材内侧有断续衍射信号显示(图 7、8)。

从图 7 可以看出:在直通波和底面反射波之

间有少量的不连续衍射波显示,而图8则在厚板侧(过渡板)直通波和底部反射波之间有显的不连续衍射显示。这种不连续衍射显示只有TOFD检测才能检测出来。按照TOFD检测标准DL/T 330-2010评定规定,该焊缝按一类焊缝要求检测,此类缺陷测长大于 $1/3$ 板厚以及单个缺陷高度不大于4 mm则判定为不合格。区域焊缝用角磨机磨平,用超声波直探头(5P-D20)和斜探头(2.5P13×13K2.5)对焊缝和热影响区实施检测,有回波很低的间断回波显示,按照ASME-VIII-APP-12条款要求得知其是合格的。

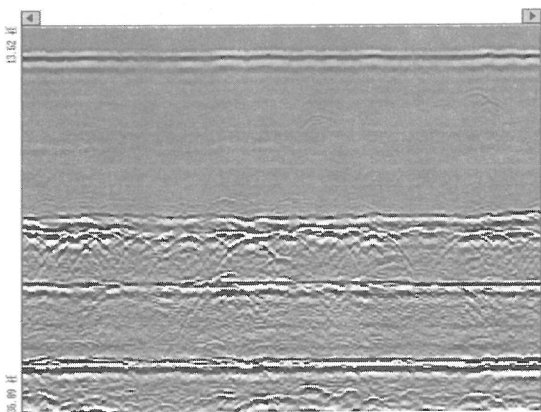


图7 第6节蜗壳上蝶形边偏心非平行扫查示意图

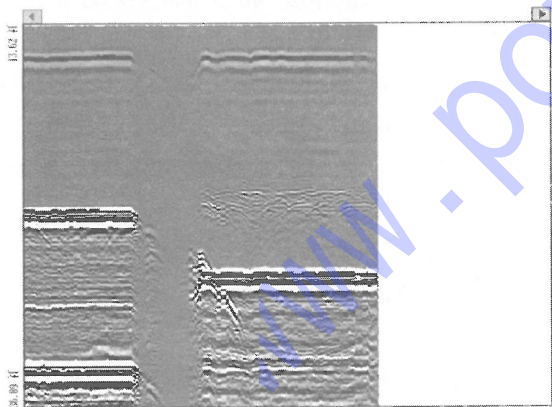


图8 第6节蜗壳上蝶形边蜗壳侧向过渡板侧扫查示意图

虽然这两种结论截然不同,然而都有可靠的标准作为依据,对此,我们采用碳弧气刨将焊缝靠过渡板侧打开,用着色探伤仪对TOFD指定的深度区域进行复检,发现零星出现直径为0.05~0.1 mm左右的氢气孔和夹渣类缺陷,进而确定了缺陷的性质同我们采用TOFD检测得出的结论一致。由于蝶形边焊缝是蜗壳焊缝中相当重要的焊缝,其受力情况复杂且此类高强钢焊接性一般,韧

性远不及Q345钢,容易产生疲劳裂纹和氢脆,故经项目部技术部决定,将此节上蝶形边进行返工处理以杜绝隐患。

(2)在环缝的一处返修部位进行复检时发现TOFD检测图谱出现了未返修部分清楚、而返修区域出现部分模糊状图谱的情况,然而,经过用直探头和不同角度的斜探头均未能发现缺陷反射回波,这种情况是之前的Q345钢没有出现的。由于已经返修过一次,不能对此处焊缝贸然采用碳弧气刨的方法。在这种情况下,我们采用Q3505射线机对该焊缝用照相法进行验证,发现焊缝内部也是合格的。

对焊接工艺过程审查发现:返修时焊接参数偏大很多,未按照焊接工艺进行,焊后采用的热处理方法不正确等。最终研究决定对返修部位重新进行热处理,最好的补救方法就是采用去应力退火处理或正火处理,然而,现场只能进行退火。在进行完退火处理、缓冷8 h、完成72 h后重新进行TOFD检测,扫图模糊区清晰了很多,其主要原因是在焊接线能量偏大的情况下使焊缝区晶粒变粗大,对高频率超声波检测衰减较快,从而出现了一个扫图出现两种清晰度的情况。

(3)通过采用几种方法进行比对发现:TOFD检测不论对典型的缺陷和非典型分散型缺陷均定性准确、可靠,而且还能对焊接工艺不当时进行旁证。

## 7 结 语

(1)溧阳抽水蓄能电站蜗壳经过1年多时间的实践,完成了4台蜗壳的检测任务,在陆续进行的水压试验圆满成功,验证了其焊缝的质量符合标准要求。TOFD检测的优势在抽水蓄能机组上又一次得到了验证,每台蜗壳节省的焊缝无损检测时间为3~5 d,从而为电站早日调试运行并网发电起到了重要的作用。

(2)由于TOFD检测肯定存在盲区,所以,应增加对其近表面区域进行磁粉检测;另外,焊缝检测对其表面粗糙度要求也很高,故应对扫查装置和探伤楔块进行改造,同时提高仪器的采样率和分辨率等综合性能,才能提高工作效率和缺陷定性。

作者简介:

陈雪峰(1980-),男,湖南衡东人,副主任,工程师,学士,从事金属结构与焊接工作。

(责任编辑:李燕辉)