

ASME 法规对超声 TOFD 法的最新规定介绍

第一部分:操作要领

李 衍

(江苏太湖锅炉股份有限公司,无锡 214187)

摘 要:介绍了 ASME 法规最新版(2006 增补)有关超声波衍射时差法(TOFD)的最新规定,概述了 TOFD 技术规程和设备系统要求、校准事项和检测操作要领,为国内承压设备推广 TOFD 技术提供依据和借鉴。

关键词:超声检测;超声波衍射时差法;技术规程;设备系统;校准;检测操作

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2007)04-0209-05

New Requirements for TOFD Technique in ASME Code

Part 1: Procedure Essentials

LI Yan

(Jiangsu Taihu Boiler Co. Ltd., Wuxi 214187, China)

Abstract: The new requirements for time of flight diffraction(TOFD) technique specified in the latest edition (2006 addenda) of the ASME Code were presented. The first part outlined the requirements for a TOFD written procedure and the TOFD system, the calibration items and the key points of an examination procedure. It primarily aimed at providing basis and reference for application of the new technology to pressure equipment in China.

Keywords: Ultrasonic testing; Time of flight diffraction technique; Written procedure; Equipment system; Calibration; Examination procedure

超声衍射时差技术(Time-of-flight diffraction, 简称 TOFD)用于焊缝检测在欧美国家至少已有 10 年以上的历史。该技术具有缺陷检测能力强、缺陷定量精度高的优点,且有 A、D 和 B 三种显示(即直角坐标、焊缝纵断面和横断面显示)记录方式。

美国机械工程师学会锅炉压力容器法规 ASME BPVC 早在 1996 增补版第Ⅷ卷第一册《压力容器》规范案例 2235-1 中,就已确认可用 TOFD 超声检测取代射线照相,并在 2000 年 2 月认可的规范案例 2235-2 中,将 TOFD 超声检测适用的板厚范围从 $> 101.6 \text{ mm}$ (4 in) 提高到 $> 12.7 \text{ mm}$ (0.5 in)。在 ASME 2004 第 V 卷《无损检测》中,新增了第四章《焊缝超声检测方法》,该章 T-452 提到了用计算机成像技术(包括 TOFD 和相控阵技术)

的各种优点,具体方法列入附录 E 和 L。在最新发布的 2006 增补版中,有关 TOFD 法的操作技术细节已升级为强制性附录Ⅲ,即本文第一部分操作要领的内容;有关 TOFD 显示图像的判读和检测结果的评定,则结合 32 个典型图谱,在非强制性附录 N 中作了大量评析,即本文第二部分(见本刊 2007 年第 5 期)图像判读的内容。

据悉,目前国内已有多家企业和研究机构从欧美引进了超声 TOFD 检测设备。相信文中提供的 ASME 对 TOFD 技术的最新规定,能对该新技术的应用起到推动作用。

1 TOFD 工艺规程要求

实施 TOFD 检测前,先要制定切实可行的技术规程,其参数除 ASME 第 V 卷第四章《焊缝超声检测方法》规定的 20 项变量外,新版标准还提出了 6 项特定性变量。20 个一般性变量中,15 个主变量

收稿日期:2006-12-28

作者简介:李 衍(1940—),男,高级工程师,ASME 产品责任工程师,负责重大和出口产品的无损检测工作。

(Essential Variable)为受检焊缝形状、外径、壁厚、产品形式(管、板等),探测面,探测方法(直射波、斜射波、接触法或液浸法),超声波型和声束角度,探头型式、频率和晶片尺寸、形状,特殊探头、楔块、衬垫或鞍座(使用时),超声仪,校验(校准试块和校准方法),扫查方向和扫查范围,扫查方式(手工或自动),几何形状信号与缺陷信号识别方法,信号大小测定方法,计算机数据采集(使用时),扫查覆盖性(仅指减少时)和人员操作要求(有要求时);5个副变量(Nonessential Variable)为人员资格鉴定要求,表面状态(探测面,校准试块),耦合剂类型或牌号,自动报警或记录设备(使用时)和记录,包括要记录的必要校验数据(如仪器设定)。新增的6个特定性主变量为仪器型号和制造者,仪器软件,扫查方向和扫查范围,缺陷测长方法,缺陷测高方法和数据采样间隔。

对规定的主变量的变更,要求进行验证演示,以评定新参数的有效性;而对副变量的变更,则不要求重新评定。但不管是主变量或副变量,如有变更,均需在技术规程中作出相应修改或增补。

2 TOFD 设备系统要求

2.1 TOFD 仪器要求

对扫描参数的调整和信号分析要求 TOFD 所用仪器能提供线性 A 扫描显示。仪器放大线性和时基线性误差应不大于 $\pm 5\%$ 。最新版提出,超声脉冲发生器可通过单向或双向方波脉冲提供激励电压。脉冲宽度应可调,以使脉冲幅度和持续时间达到最优化。超声接收器的带宽应与探头标称频率带宽相匹配。接收器增益旋钮应以 ≤ 1 dB 的增量调节信号幅度。系统中可设前置放大器。波形的模-数变换取样频率至少应为探头标称频率的4倍。要对原始数据进行数字信号处理时,波形的模数变换取样频率应提高到探头标称频率的8倍。

2.2 TOFD 数据显示和记录

最新版强调,数据显示要求观测不检波的 A 扫描图形,以便确定与 A 扫描时基记录有关的显示闸门的始点和长度。所用设备应能将所有进入显示闸门的 A 扫描图形储存到磁盘或光盘上。设备还要能提供至少 64 灰度等级或彩色色谱的被检焊缝的断面图。但不允许只存断面图,而不存 TOFD 的 A 扫描射频(不检波)波形。TOFD 显示用的计算机软件应包括将光标或波形时基线性化的算法,以便测评缺陷埋藏深度和自身高度。除储存包括波幅和时基细节的波形数据外,所用设备还要储存指示相邻波

形相对位置(即编码位置)的定位数据。

2.3 TOFD 探头要求

对超声 TOFD 探头,最新版提出应至少满足七项要求,即① 使用一对探头(称为 TOFD 探头对),相对放置,一发一收。② TOFD 探头对的标称频率相同。③ TOFD 探头对的晶片相同。④ 对峰值回波降 20 dB 测试时,探头脉冲持续时间应不大于 2 周期。⑤ 探头可用非聚焦探头,也可用聚焦探头(前者推荐用于探伤,后者推荐用于提高定量分辨力)。⑥ 探头可用单晶片,也可用相控阵。⑦ 标称频率应为 2~15 MHz,除非检测的产品材料具有特殊晶粒结构,才可用其他频率,以保证有足够的声穿透,或提高分辨力。

除上述要求外,TOFD 探头角度的选择和布置也很重要。表 1 为不同壁厚范围可达到足够分辨力和评定范围的探头参数推荐值。对壁厚 $T \leq 70$ mm 的钢焊缝,一般要求用一对纵波斜探头横跨在焊缝两侧。对 $70 < T \leq 300$ mm 的钢焊缝,应进行分层检测。

表 1 不同壁厚时 TOFD 探头参数推荐值

壁厚范围 /mm	壁厚 T /mm	中心频率 /MHz	晶片尺寸 /mm	标称探头 角度/ $^{\circ}$
$T \leq 70$	< 10	10~15	2~6	50~70
	$10 \sim < 30$	5~10	2~6	50~60
	$30 \sim 70$	2~5	6~12	45~60
$70 < T \leq 300$	$70 \sim < 80$	5~10	2~6	50~70
	$80 \sim < 100$	2~5	6~12	45~60
	$100 \sim 300$	1~3	10~25	45~60

TOFD 检测的最佳探头对间距 $2S$ 由图 1 求得为 $S = d_m \cdot \tan 60^{\circ} = 1.73d_m$, 式中 d_m 为缺陷高度中点离板材表面的距离(深度)。

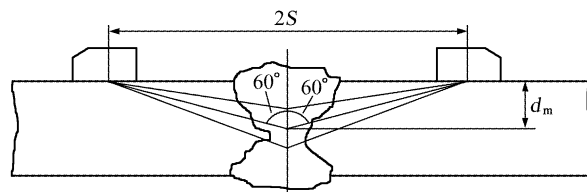


图 1 TOFD 探头对最佳间距的设定

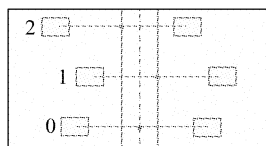
若声束中夹角 $2\theta < 85^{\circ}$ 或 $2\theta > 165^{\circ}$, 就可能引起缺陷端部衍射波减弱, 以致检测灵敏度降低。

2.4 TOFD 校验试块要求

2.4.1 校准反射体

原 ASME(2004 版)第 V 卷仅在非强制性附录

出和表征,探头对间距中心(PCS)还应偏离焊缝轴线 $\pm b/2$ (b 为焊缝宽度),再作两次附加扫查。如果对校准试块中要求检出的长横孔不能全部检出,就要求 TOFD 探头对按上述规定,进行两次偏心附加扫查,示例见图 5。



0. 正常扫查——中心扫查
(探头对间距中心 PCS 对准焊缝轴线)

1. 附加扫查 1——右偏心扫查
(PCS 右偏离焊缝轴线半宽度距离)

2. 附加扫查 2——左偏心扫查
(PCS 左偏离焊缝轴线半宽度距离)

图 5 增补版规定的 TOFD 探头对扫查方式

3.5 编码器的校准

与 TOFD 探头架联动、与 A 扫描取样同步的编码器,应按制造厂推荐方法进行校准,并每移动 500 mm 至少验证一次,确认显示距离误差不大于实际移动距离的 $\pm 1\%$ 。

4 TOFD 检测工艺要领

4.1 扫查方法

(1) 使用 TOFD 探头对,使其连线中点(PCS)对准焊缝轴线,沿焊缝长度方向,作平行于焊缝轴线的扫查,以此完成对焊缝全体积的检测。

(2) 由于焊缝宽度关系需作偏心扫查时,应使探头对连线中点偏离焊缝轴线二分之一焊缝宽度,作一次平行于焊缝轴线的附加扫查;随后在焊缝另一侧,使探头对连线中点偏离焊缝轴线二分之一焊缝宽度,再作第二次平行于焊缝轴线的附加扫查。

(3) 相邻两次扫查之间至少应有 25 mm 的重叠范围。

(4) 被检焊缝分层检测时,应对各层厚度重复第(1)和(2)的操作。

4.2 数据记录(选通区)

应记录不检波 A 扫描信号(射频波形)。A 扫描闸门范围起点就设在直通波前面,终点至少设在第一次底面回波信号后面,以便能记录厚度范围内的回波信号(包括错边信号)。观察底波附近的变型波信号,将有助于获取有用数据。因此,如果 ASME 有关制造设计的规范有要求时,还应将第一

次底面回波到变型波产生的底波信号(迟到波)之间的一段距离也包括在采集的数据中。

4.3 横向缺陷检测

制造设计标准对横向缺陷有检测要求时,应将各组 TOFD 探头对置于磨平的焊缝表面,与焊缝轴线平行布置,并使探头对沿焊缝轴线进行扫查。若焊缝余高未磨平,可将探头对置于焊缝附近的母材上,尽可能作平行于焊缝轴线的扫查。

4.4 横波辅助检测

由于直通波和底面回波信号的存在,对这些区域存在的缺陷可能发现不了。为此,对被检焊缝上下近表面区域,还应使用普通横波斜探头按一般要求进行检测,所选用的探头角度,应使声束尽量与熔合面垂直。此辅助检测可用手工或机械装置进行。用机械装置时,有关数据应与 TOFD 检测一起采集。

4.5 数据采集间隔

$T \leq 50$ mm 时, A 扫描的采样间隔最大应为 1 mm; $T > 50$ mm 时,采样间隔最大为 2 mm。

4.6 扫描漏缺限制

显示器上的漏缺扫描不应超过采集扫描线的 5%,且相邻扫描线不应漏缺。

4.7 缺陷定量和结果评定

有缺陷测高要求时,系统按上述第 3 节要求校准后,应将探头对在校准试块上作自由移动,由系统得出的底面反射深度与实际厚度的偏差不大于 1 mm。对焊缝作分层检测,底波不显示或很难识别时,应使用校准试块中的长横孔进行校验。有关 TOFD 图谱识别和结果评定等具体要求,见后续第二部分。

5 TOFD 检测记录报告

完成 TOFD 检测后,应作出包含以下内容的记录和报告。

(1) 缺陷分类 包括①合格缺陷,即长度不超标的体积状缺陷。②判废缺陷,即任何尺寸的面状缺陷、超标的体积状缺陷。对判废缺陷应注明缺陷性质(如裂纹、未熔合或夹渣等)、缺陷位置、缺陷范围(如长度)及返修后的复检结果。

(2) 检测条件和参数 共 19 项,包括① UT 规程号及修订版号。② 超声仪型号及出厂编号。③ 探头型号、尺寸、频率及出厂编号。④ 声束角度。⑤ 耦合剂牌号或类型。⑥ 探头电缆、类型和长度。⑦ 专用设备(探头、楔块、垫块、自动扫查器、

需要时还应有记录仪等)。⑧ 计算机编程号及修订版本号(使用时)。⑨ 校验试块标识。⑩ 模拟试块和电子模拟体标识(使用时)。⑪ 仪器基准灵敏度、衰减、抑制调节值。⑫ 校准数据(包括基准反射体、信号幅度、距离读数)。⑬ 与模拟试块、电子模拟体(使用时)有关的原始校准数据。⑭ 焊缝或检测区编号及位置。⑮ 探测面及表面状况。⑯ 检出的判废缺陷草图或记录,或缺陷返修区域。⑰ 接近受限制的区域或不可接近的焊缝。⑱ UT 人员编号及资格等级(规范有要求时)。⑲ 检测日期和时间。

(3) 追加数据 包括① 探头对中心线距离 PCS。② 数据采样间隔。③ 缺陷高度(有规定时)。

6 结论和讨论

(1) TOFD 显示要求有 A、B 和 D 三种显示。A 显示必须是不检波波形,由其相位显示可推断缺陷类别(表面或底面开口缺陷,或内部缺陷,面状或体积状缺陷);D 显示可判读缺陷在焊缝纵断面中的位置和范围;B 显示可判读缺陷在焊缝横断面中的位置。所有显示均有编码器的同步定位数据。

(2) 实施 TOFD 前,制定切实可行、有量化要求的规程,并在含人工缺陷或自然缺陷的试块或焊接试样上进行验证演示,对保证 TOFD 的检测可靠性具有重要意义。应对 6 个特定量化要求——作出应答。

(3) TOFD 探头一般采用相对布置、相隔一定间距的一对纵波斜探头。探头对间距要作优化考虑。探头频率和角度的选择相关于被检焊缝厚度。壁厚较薄时,用一对同频率、同尺寸、同角度的探头横跨焊缝两侧;壁厚较厚时,用多对不同角度的探头横跨焊缝两侧,进行分层检测。

(4) TOFD 检测中,校准试块是校准检测灵敏度、校验声束可覆盖范围、确定缺陷可探范围的重要

器具。ASME 法规 2004 版采用槽型试块,槽的形状和端部特征体现了面状缺陷特征,要求用该试块作验证演示。最新版规定了设有上、下、中三横孔的校验试块作为灵敏度校准试块,为便于校验声束在厚度方向上的可覆盖范围,对厚板则提出了分层检测的孔型试块。长横孔作校验反射体有易加工、且适用于各种声束角度的优点。

(5) TOFD 是双探头检测,需要设计专用机械手,使其夹持探头对和编码器同步动作。探头对间距要根据焊缝厚度和声束角度进行调节。必要时还可停下来,用慢动作对相关显示进行复检和诊断。

(6) ASME 法规最新版一般采用中心扫查法,即探头对连线中心对准被检焊缝中心线;当焊缝宽度较大,或为检测焊缝熔合线或坡口熔合面上的面状缺陷时,规定还需作两次偏心附加扫查。被检焊缝有横裂纹检出要求时,探头对还应置于磨平的焊缝表面,作平行于焊缝轴线的扫查。

(7) TOFD 检测主要是用斜入射纵波检测,根据缺陷端部的衍射波来检测缺陷,并对缺陷进行定位、定量和表征分类。近表面和近底面的缺陷,由于直通波和底面回波脉冲宽度的影响,有可能识别不了。为弥补这一缺点,尚需用普通斜探头或新型相控阵探头对表层和底层作补充检测。在自动检测装置中,一般通过多组探头对和多种角度单探头的并列设置来统筹解决。

(8) 迄今为止,世界上已公布的有关 TOFD 法的应用标准主要有 BS 7706:1993, ENV 583—6:2000, NDIS 2423:2001, ASME 规范案例 2235:1996, 2003, 2005, ASME 2004 版第 V 卷第四章非强制性附录 E-475, L-410~491, 2006 增补版强制性附录 III 等。其中,有 TOFD 检测图谱识别内容的为英国和美国标准。

《无损检测》杂志欢迎广大作者网上远程投稿

尊敬的作者:

为了适应当今期刊网络化、数字化的发展趋势,我刊经过长期的筹划与准备,初步建立了远程在线投稿、审稿系统。该系统的建立,可以方便作者进行远程在线投稿、查询稿件的处理进度、与编辑部进行实时沟通;审稿专家可以进行在线审稿。从而达到保证文章报道时效性、缩短稿件处理周期和节约成本的目的。

该系统已正式运行,欢迎大家登录“材料与测试网站”(http://www.mat-test.com)进行网上投稿。希望大家积极配合,争取尽快过渡到全部采用网上投稿(有条件的作者)。您在使用过程中如发现该系统有什么不完善的地方,希望您悉心指教,并多提宝贵意见。我们的电子邮箱为 ndt@mat-test.com。在此感谢大家多年来对我刊的大力支持,我们定会以更好的服务回报广大作者! 《无损检测》编辑部