

# ASME 标准对 FMC 检测的要求

郭剑豪

(上海贤达美尔森过程设备有限公司, 上海 201411)

**摘 要:** ASME BPVC V 标准在 2019 版中引入了 FMC(全矩阵捕获)检测并在 2021 版中进一步细化了 FMC 检测的要求。作为第一个引入 FMC 技术的国际标准,其在仪器校准、检测实施及结果评定上均有独特及先进之处。分析了 ASME 标准中 FMC 检测的相关要求,以为无损检测从业人员和研究人员提供一些参考。

**关键词:** 全矩阵采集;平面波激发;全聚焦;ASME 标准

中图分类号: TG115.28      文献标志码: A      文章编号: 1000-6656(2023)02-0077-06

## FMC examination requirements in ASME standard

**GUO Jianhao**

(Mersen Xianda Shanghai Co., Ltd., Shanghai 201411, China)

**Abstract:** ASME BPVC V 2019 introduced FMC examination and detailed the requirements of FMC examination in 2021 edition. As the first international standard including FMC technique, ASME code is unique and advanced in instrument calibration, examination implementation and result evaluation. This paper provides a reference for nondestructive testing practitioners and researchers by analyzing the relevant requirements for FMC testing in the ASME standard.

**Key words:** FMC; PWI; TFM; ASME standard

## 1 基本介绍

ASME BPVC V-2021《锅炉及压力容器规范第5卷 无损检测》在 I-121.2 条款中对 FMC(全矩阵捕获)相关的名词术语进行了定义,与 FMC 相关的章节主要有第四章强制性附录 XI“全矩阵捕获”和非强制性附录 F“全矩阵捕获焊缝检测”两部分。

### 1.1 定义

ASME BPVC V 在 I-121.2 条款中对基本名词术语进行了定义, FMC 被定义为一种矩阵, 在该矩阵中使用阵列孔径内的一组发射和接收模式组合对相干 A 扫描时域信号进行记录(捕获)从而使每个单元充满 A 扫描。不难看出, 根据此定义, 诸如平面波激发(PWI)、半矩阵采集(HMC)、稀疏矩阵采

集(SMC)等数据采集方式都是归入 FMC 中的。相应地,标准定义了基础 FMC,即每个收发组合中激发和接收均只有一个晶片,也就是平常仪器厂商宣传的“FMC”。此外,还有一种传统 FMC,即在基础 FMC 下,发射晶片组与接收晶片组相同的采集方式。波幅保真度也是 FMC 新引入的概念,主要用于描绘数据重建过程对于波幅的影响。成像路径(也称模式,对于全聚焦检测,“模式”一词优于路径)也是 FMC 检测的关键词,是数据重建的基础参数。以 TFM(全聚焦)为例,由于其成像要依靠基于 ToF(声时)的大量计算,需要利用各个发射接收组合的声线来计算 ToF 从而在原始 A 扫中定位各个点的对应信号,此时准确的声线路径就非常重要。例如 TT 模式就是横波发射和横波接收的组合,类似相控阵超声或传统超声中的一次波。不同成像路径的选择也赋予了 FMC 较相控阵超声更强的检测与分析能力。例如,TTT 自串列模式指探头发射横波抵达底面反射(横波)后再由反射体反射(横波)回到原

收稿日期:2022-03-22

**作者简介:**郭剑豪(1990—),男,工程师,主要从事承压设备质量管理及检测技术应用的研究工作

通信作者:郭剑豪,enzio.g@qq.com

探头,此模式在传统超声和相控阵超声中往往需要特定的扫查设置才能实现,而利用 FMC 数据和 TFM 算法可以直接在常规扫查时(或扫查后)与 TT 模式同步生成。

### 1.2 FMC 相关附录

ASME BPVC V 标准附录 F 为非强制性,其描述了焊缝 FMC 检测的过程和技术,解释了 FMC 检测的数据采集和图像重建。与国内标准 NB/T 47013.15—2021《承压设备无损检测 第 15 部分:相控阵超声检测》中全聚焦检测概念有所不同,ASME 标准明确将全矩阵捕获和后期图像重建算法解耦。对于 FMC 数据的处理,该标准允许使用不同的图像重建算法,满足附录 XI 中的校准要求并通过附录 IX 规程验证即可。考虑到当前主流的后处理是全聚焦,除特殊说明外文章中后处理均以 TFM 为例。

此外,附录 F 中对各个技术关键点进行了解读。而附录 XI 则是强制性附录,规定了进行 FMC 检测时需执行的要求,也是笔者讨论的重点。该标准从通用、设备、技术、校准、检测、评定及文档等方面对 FMC 检测做出规定。其中最核心的是校准和评定两个部分,对于检测工艺设置,则需重点关注如何同时满足这两部分的要求。

## 2 ASME BPVC V 附录 XI 通用要求

附录 XI 规定,ASME BPVC V 第 4 章超声检测的要求同样适用于 FMC 检测,另作规定的除外。实际检测中,检测记录、报告、某些校准试块及检测后复核要参考该标准第 4 章中的要求。

### 2.1 规程

附录 XI-421 条款规定了编制及更新 FMC 规程的要求。与 TOFD 或 PAUT 一样,FMC 规程需描述所有适用的重要及非重要变素,且规程需验证后才可使用。重要变素包括受检焊缝几何构造、检测表面、技术、校验、人员演示(要求时)、区分几何回波的方法、仪器制造商及型号、软件版本、探头制造商及型号、楔块尺寸、检测区域、实现波幅保真度方法、帧描述、后处理网格描述、图像重建技术、扫查计划、扫查器制造商及型号、扫查技术、扫查吸附导向机构、缺陷定量方法等。非重要变素包括焊缝数据参考、人员资格要求、表面状况、耦合剂品牌或类型、检测后清洗、自动报警和/或记录设备(如有)及检测记录含基本校准记录等。根据 T-421.2 节的要求,重

要变素发生改变时,规程需要重新验证。但重新验证对于软件有所例外,仅当软件更新影响信号显示、记录或自动处理时才需进行验证,其他情况无需重新验证规程。另外,软件更新记录应保存好且可供审查。

对于规程验证,应按第 4 章强制性附录 IX 和第 1 章 T-150(d)的要求执行。一般来说,规程验证需要 AI(授权检验师)、FMC II 级/III 级检测人员及一位监督 FMC III 级人员共同在场(不同于检测人员),其中 FMC II 级/III 级检测人员应在监督 FMC III 级人员监督下扫查至少一块演示试块并评定结果。规程验证中所用演示试块至少应包含以下位置的面状模拟缺陷:一个位于上表面、一个位于下表面、一个(分区扫查时每区一个)埋藏于焊缝中且所有缺陷尺寸不得超过 IX-435.6 中要求。规程验证是否通过则取决于整个过程中对反射体的定量、定位、方向、数量及定性是否取得监督 III 级人员和 AI 的满意。规程验证的相关记录应形成文件并由监督 III 级人员和 AI 签署。2021 版的 ASME 标准新增了演示试块埋藏缺陷的要求:埋藏缺陷应为面状缺陷,且需布置在坡口处,角度公差与坡口角度公差一致;对于非单一角度的坡口,面状缺陷需布置在焊缝中心线上并垂直于检测面。此外,所有缺陷都必须与试块边缘间隔 25 mm 以上。XI-421.2.1 条款对埋藏缺陷提出了很高的要求,尤其在加工时无法在试块边缘处使用 EDM(电火花加工),这无疑给试块制作带来了很大难度。

### 2.2 扫查计划

附录 XI 要求扫查计划至少包含检测区域覆盖情况、成像路径、图像网格密度、焊接接头几何形状、扫查次数及探头位置、路线和零位。对于 TFM 来说,图像网格密度指 ROI(关注区域)的分辨率或 ROI 像素尺寸。一个典型的 FMC/TFM 设置(单次扫查)如图 1 所示,除了图 1 中所示的信息,扫查计划还应包含图 2 中所示的布局 and 路径信息。

### 2.3 人员资格(采集人员、数据处理与评定人员)

附录 XI 对人员资格的要求与相控阵超声检测类似。对于产品检测数据采集人员,并不要求持有 FMC 证书,但需要其为 UT II 级人员且经过仪器使用培训同时应具有并演示其正确采集检测数据、批准设置、执行校准等方面的能力;对于执行数据重建的人员(无论实时还是检测后的后处理)或分析、解释数据的人员,则必须是 FMC II 级或 III 级

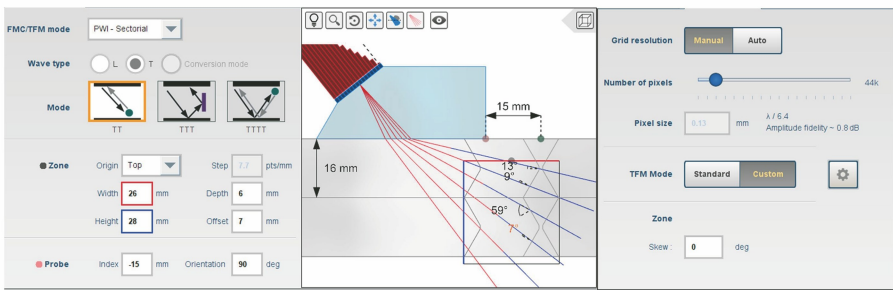


图 1 典型的 FMC/TFM 设置(单次扫查)

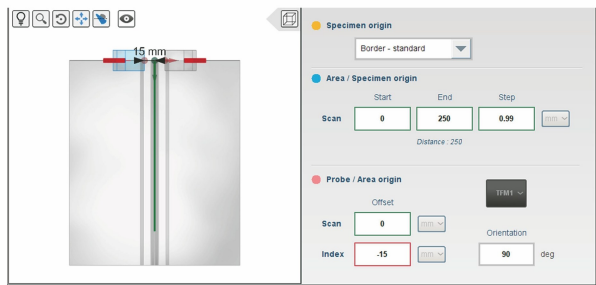


图 2 布局及扫查路径信息示例

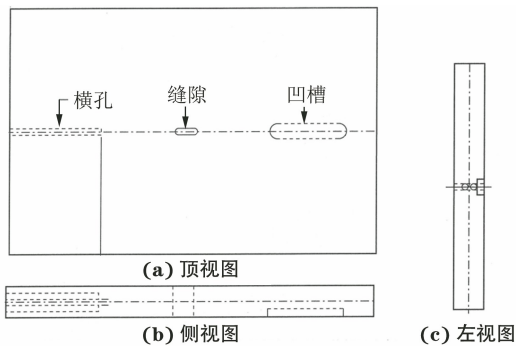


图 3 FMC 校准试块反射体布局示意  
(可根据使用需要调整反射体位置)

人员。按 2021 版 ASME 标准,FMC III 级人员资格需要持有 UT III 一个号书,且经 80 h 培训,具备 320 h 的 FMC 实践经验并通过 FMC 通用考试、FMC 专业考试、FMC 实践考试(编制规程)及 FMC 演示考试后才可被认定。FMC II 级人员需持有 UT II 级证书,经 80 h 培训,具备 320 h 的 FMC 实践经验,并通过 FMC 通用考试、FMC 专业考试、FMC 实践考试(操作技能)即可。

### 3 设备

#### 3.1 探头

检测所用探头应为规程验证中所用探头。对于探头本身,晶片一致性需在 3 dB 以内,超出则视为失效。每 16 个晶片允许存在 1 个失效晶片,但失效晶片不得相邻。需要注意的是,晶片一致性要求与 2019 版标准要求略有不同,要求更为严格。

#### 3.2 校准试块及标准试块

标准试块的选用并未有太多要求,常见的国内外标准试块都可以使用,试块主要用于设置仪器范围和校准延迟。因为声速的小幅偏差都可能导致 TFM 成像波幅的大幅下降,所以使用 TFM 时,标准试块的材料应尽量与工件材料一致。

附录 XI 提出了独特的校准试块设计,FMC 校准试块反射体布局如图 3 所示,与相控阵超声的扫查试块不同,该试块是强制使用的。试块中需布置 3 种反射体,即两个侧钻孔(横孔)、一个通槽(缝隙)

和一个表面槽(凹槽)。侧钻孔用于分辨率验证及检测灵敏度设置,但 ASME 标准也允许使用其他标准试块上的侧钻孔,只需确保所用标准试块上侧钻孔深度位于检测区域的中间 1/3 处即可。另外,校准试块可以增加额外的反射体,但需确保该反射体不用于替代规定的反射体,同时不影响规定反射体的超声信号,且需在规程中描述附加反射体的目的。

### 4 技术

接触或水浸法均可使用。对于数据重建,重建算法需与规程验证时的一致。如需采用多种重建算法则应满足下列 4 点要求:① 重建技术使用原始规程验证数据成功演示;② 重建技术写入规程;③ 已采集的检测数据足以完成重建,无需重新采集;④ 成像路径在检测前已校准。

### 5 校准

#### 5.1 仪器校准

系统校准应在首次使用前执行并且每年进行一次,此项校准应按仪器厂家的说明书或操作指导进行。这点在执行时有比较大的灵活度,可与所用设备的厂家沟通具体的仪器校准方法与验收要求。

#### 5.2 通用校准

通用校准部分包含系统校准、楔块校准、声速和



延迟校准、DAC(距离幅度曲线)/TCG(时间校正增益)校准和性能验证等。

5.2.1 超声系统

对于整个检测系统,波幅保真度应控制在 2 dB 以内。需要注意的是,附录 XI 后文规定了后处理成像的像素尺寸应小于板厚的 1%,实际设置时往往需要一并考虑,以二者所需像素数量大(或像素尺寸小)的为准。

5.2.2 楔块

对于楔块的规定主要是针对弧度楔块的校准问题,满足一定条件的前提下允许使用平楔块进行校准并使用弧度楔块来检测。其中最苛刻的一个条件是检测用的弧度楔块需要在曲面试块上进行验证,曲面试块应具备与灵敏度校准时相同的反射体且波幅和深度偏差应在 10% 以内。

5.2.3 声速及延迟

附录 XI 允许检测时在工件上调整声速和延迟,前提是规程验证时也是如此且将其写入规程中。标准允许在工件上校准声速主要是因为声速对于 TFM 是非常重要的参数,会直接影响到成像质量及波幅,故使用工件校准声速时,可获得最准确的声速值。

5.2.4 DAC/TCG

对于 FMC 检测的 TCG 曲线,附录 XI 的规定很灵活,可使用也可不使用,一旦使用则需在规程中明确规定。实际校准过程中可能会遇到声场不均匀

的问题,例如对于薄板焊缝检测,第 1 个侧钻孔波幅可能明显低于其他深度孔的波幅,使用 TCG 校准声场就非常有必要。

5.2.5 性能验证

性能验证包含 3 个方面,即分辨率验证、成像路径验证和定量验证。此项校准需完成全部 3 项性能验证。

分辨率验证需使用 FMC 校准试块,需确保试块中的 2 个侧钻孔能够有效分辨。FMC 校准试块的侧钻孔可用 XI-435 章节中所述的其他试块(如 IIW、IIW PA Block Type A、ASTM E2491、ISO 19675 等)上的侧钻孔替代,但所用侧钻孔深度需要在检测区域的中部 1/3 范围内。

附录 XI 将成像路径验证分为两类,偶数成像路径(如 TT、LL、TTTT、LLLL 等)和奇数成像路径(如 TTT、TLL、TLT、TTTTT 等)。对于偶数成像路径,需检出侧钻孔及表面槽;对于奇数成像路径应检出通槽。通过在 FMC 校准试块上的一系列试验,笔者总结出对各个反射体横波检测所用的成像路径清单,不同反射体的成像路径选择如表 1 所示。但需注意的,表 1 仅为示例,试验时使用了当前主流的一些成像路径组合,未列出全部可用的成像路径,可用的成像路径组合有很多种。几种常见自串列模式对通槽的成像结果如图 4 所示,图中浅色信号为伪影。

表 1 不同反射体的成像路径(模式)选择

反射体	明确符合标准要求成像路径	其他成像路径	备注
侧钻孔	TT+TTTT	TTT 模式会有显示,但无法正常分辨,不宜视为检出	不得单独使用 TT 基于对称性,TTTT 模式可通过设置 TT 模式深度范围为板厚至两倍焊缝厚度(考虑余高)替代 注意:TTTT 模式仅包含母材厚度而不包含余高是不符合标准要求的,此时覆盖不到余高区域。
下表面槽	TT	TTT 可检出下表面槽,成像优于 TT	注意:TTT 模式并非标准要求要检出下表面槽的模式,下表面槽必须在偶数路径中检出
通槽	TTT+TTTTT	TLL、TLT 等路径可用于对通槽成像	奇数路径成像对缺陷走向有较高要求,校准中准确显示通槽并不代表对各类实际缺陷有较好的显示,轻微的角度变化都可能导致成像波幅大幅下降

需要特别指出的是,脉冲回波模式下成像路径的验证需要在大于前端距离的位置上成像,也就意味着校准时探头前端距需要大于扫查计划中的前端距;但对置串列布局模式下(两个相控阵超声探头相对放置且配置为一收一发,类似于 TOFD 布局)要求两探头前端距一致,这主要是由于对置串列模式仅用于缺陷测高且需要缺陷位于

两探头正中位置。

对于定量验证,应扫查表面槽并对其长度和高度定量。测得长度及高度不得小于其实际尺寸。测得高度不得超出实际高度的 50% 或 4 mm 中的较小者。测得长度不得超过实际长度的 50%。

5.3 其他校准

此外,附录 XI 还规定了灵敏度校准、编码器校

准和系统复核的要求。灵敏度校准可以使用一个侧钻孔完成,将其回波调到满屏幕高度的 50%或更高即可,但不得饱和,其他反射体则可以饱和。编码器校准与相控阵超声校准一致,编码器移动 500 mm 的误差不得超过 1%。对于系统复核,附录 XI 规定单次或连续检测后需复核晶片一致性及波幅保真度,复核结果应符合校准时的要求。附录 XI 中虽未对超出校准要求的处理做出规定,但附录 XI 是在第 4 章基础上执行的,故超出要求时应按 T-467 中规定对超出校准范围的情况进行复探。

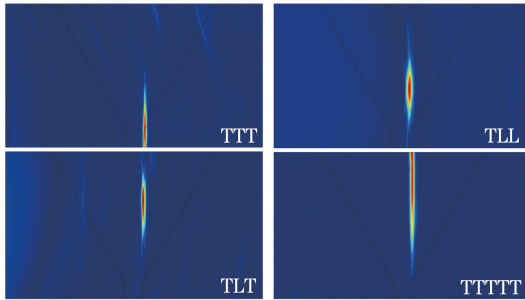


图 4 几种常见自串列模式对通槽的成像结果  
(浅色信号即伪影)

## 6 检测

对于现场检测的实施,在标准从覆盖、FMC 帧、扫查、记录、横向缺陷和检测灵敏度几个方面做出了规定。对于覆盖,附录 XI 要求使用线性编码扫查对检测区域进行扫查,需符合扫查计划,整体与相控阵超声的扫查方式一致;对于 FMC 帧,要求帧具有足够大尺寸能覆盖检测区域,同时像素密度也要足够高以满足波幅保真度要求;对于扫查,需平行于焊缝进行扫查,扫查时探头前端距应使用扫查器固定,数据丢失不超过 2 线/25 mm,如果需要进行分区扫查,相邻分区应覆盖 10%;对于编码步进,被检测板厚不超过 75 mm 时,步进不得大于 1 mm;被检板厚超过 75 mm 时,不得超过 2 mm;在横向缺陷的检测方面,标准允许使用其他超声技术进行检测,比如常规超声;最后,检测灵敏度不得低于规程验证时的设置,但如果确定了检测方法和工件上的反射体且灵敏度上限及下限经过验证合格则可在工件上调整灵敏度。要注意的是,使用工件调节灵敏度的具体方法需写入规程。

## 7 评估

这部分是标准中比较重要的,需要注意评估的要求不应单独使用,需要与校准部分结合使用。尤

其是使用便携式仪器时,应在前期设置时就考虑好其相关评估要求。

### 7.1 成像路径

标准要求成像路径应覆盖整个检测体积,允许使用不同路径组合来覆盖。标准中虽未明确说明,但一般来说 TT 和 TTTT 应完成一次覆盖,其他串列模式也应完成一次覆盖。对于覆盖的范围,标准规定以-6 dB 包含的范围确认。需要注意,TT 模式覆盖区域不宜过小,例如 TT 模式下,板厚为 20 mm 时不能选择覆盖 10~20 mm 深度,否则较浅的侧钻孔无法显示出来,不满足性能验证中每个反射体需由两种路径检出的要求。

### 7.2 直接路径

使用单一的直接路径(单独使用 TT 或 LL 模式)覆盖整个厚度是不被允许的。实际检测中,ROI 虽然可以设置为完整覆盖整个检测区域,但 FMC 检测并不能超出超声波本身的物理限制,声能无法有效覆盖高角度区域。单独使用 TT 或 LL 模式类似于常规超声或相控阵超声中的只用一次波检测,而一次波是无法完全覆盖焊缝上表面的。

### 7.3 数据密度

附录 XI 要求在满足 AF(波幅保真度)要求前提下数据点的空间分辨率不超过工件厚度的 1%,即规定了最大像素尺寸不超过工件厚度的 1%。一般应在工艺设置时提前考虑好分辨率,除非具备后期数据处理能力且保存了 FMC 原始数据才可在后期进行调整。

### 7.4 工件体积校正

与相控阵超声可使用角度 C 扫或体积校正 C 扫不同,附录 XI 明确要求视图需要进行厚度和轮廓的体积校正,FMC 检测的 C 扫图必须以体积校正 C 扫呈现。

### 7.5 伪影

伪影在 FMC 检测中也会出现。对于出现的伪影,如不影响其他信号的评定则可以接受,但需要识别其来源。对于波型转换的串列模式,伪影问题尤为明显,需要特别关注,一些常见的成像路径对通槽成像的结果如图 4 所示,其中自串列模式下可发现一些波幅较低的信号,这些信号就是典型的伪影。以实际 FMC 校准经验来看,某些情况下自串列模式的伪影波幅甚至超过反射体或缺陷本身的波幅,使用时需格外注意。在基本的 TT 或 TTTT 模式下也会出现类似相控阵超声中的伪影,这些伪影一

般较容易识别。

7.6 评定级别

母材厚度小于 38 mm 时,指示图像长度超过 4 mm 则需要评定;厚度大于 38 mm 但不超过 100 mm 时,指示图像长度超过 5 mm 则需要评定;厚度大于 100 mm 时,超过 0.05T(T 为母材厚度)或 19 mm 二者中较小的时需要评定。需要注意评定级别不是验收标准,而是相当于“评定线”,由于 ASME 规范中 FMC 检测的验收标准都是以基于断裂力学为基础的,验收时不以最高波幅为依据,评定缺陷时与相控阵相同。

7.7 分层评定

母材有分层时,应调整扫查计划以最大限度进行检测。

7.8 评定设置

评定前需要调整好所有的显示参数,评定过程中不能再调整参数。

7.9 定量和分类

与相控阵检测相同,缺陷需测长测高,并区分埋藏或表面缺陷,具体分类需参照产品建造规范。

8 文档

检测记录标准在最后规定了 FMC 检测需要保存的记录,主要包括追踪信息、校准数据、工艺参数及扫查数据 4 个方面及相关保存要求。

9 其他说明

9.1 同一项设置多个条款中提要求的问题

ASME 标准将 FMC 检测的数据采集与图像重建解耦,导致不少参数在 ASME 标准中不同位置处给出了不同要求。而实际检测中常使用便携式仪器,FMC 设置与 TFM 设置往往整合在一起,这给标准阅读和使用带来了极大的不便。为了满足 ASME 标准要求,使用者需要将所有相关条款整合,而不能单独只看一个条款,具体在前文已有说明。

9.2 2021 版较 2019 版主要变化

(1) 新增演示试块缺陷位置

此修订用于指导用户从众多可用的 TFM 路径中选择正确的 TFM 路径,并强调正确使用 FMC 校准试块中参考反射体。

(2) 探头晶片一致性

修订了 XI-432.4 条款,此修订提高了探头晶片一致性要求。

(3) 校准试块使用

修订了 XI-462.8.2,以澄清 FMC 校准试块中反射体的具体用途。

(4) 附加反射体

增加了第 XI-434.1.1 条款以允许在 FMC 校准试块上加工额外的反射体。但是不得使用额外的反射体代替 ASME 标准要求的反射体。

(5) DAC 的使用

增加了 XI-462.7,以澄清允许但不要求对衰减进行校正(如 DAC 或 TCG)。

(6) 系统校准

增加了条款 XI-461,规定了年度仪器校准。原 XI-461 关于 AF 规定已移至 XI-462.1 并补充了校准的基本说明。

(7) 分区扫查

对 XI-471.3(c)进行了修订,使用 FMC 进行多次扫描时,要求帧宽度至少有 10% 的重叠。

9.3 附录 VIII 与附录 XI 关系

ASME BPVC V 中要求基于断裂力学验收标准的超声检测需符合附录 VIII 要求。但需注意 FMC 并不适用附录 VIII,在 VIII-410 条款中明确说明:当断裂力学验收标准与 FMC 技术共同使用时,必须按附录 XI。此外,考虑到 FMC 校准及成像方式的独特性,附录 VIII 中的规定明显无法在 FMC 技术上执行。

10 结语

ASME 标准对 FMC(包含 PWI、HMC、SMC 等)检测的数据采集和数据重建做出了其独特的规定,使用时应尤其注意校准过程及校准试块的制作。

ASME 标准将数据采集与数据重建解耦,允许使用者自行选择数据重建的方式,灵活性非常大,而相应的限制方式是要求规程必须进行验证,需要在演示试块上检测出所有的“合格”缺陷。

使用 TFM 进行数据重建时,需要进行多组多模式设置,设置需要基于所用仪器的算法,不同仪器设置差别非常大。当前便携式仪器性能在面对多组 TFM 时仍要面临相当大的挑战,尤其焊缝厚度较大时可能需要对 ROI 进行分区以便检测可以正常实施。