DOI：10.11973/wsjc240377

基于镜面回波估计的热壁加氢反应器堆焊层缺陷多模式全聚焦成像

滕国阳[1,2]，陶杨吉[1,2]，杨锦辉[1,2]，缪存坚[1,2]，唐　萍[1,2]，虞雪芬[1,2]

（1. 浙江省特种设备科学研究院，杭州，310020；2. 浙江省特种设备安全检测技术研究重点实验室，杭州，310020）

摘　要：热壁加氢反应器长期在高温、高压和氢腐蚀等恶劣工况下运行，其内壁堆焊层的缺陷检测对设备安全至关重要。针对加氢反应器堆焊层的外侧超声检测技术难点，提出了一种基于镜面回波估计的多模式全聚焦成像检测方法。首先，使用镜面回波估计器进行仿真分析得到多模式全聚焦成像区域灵敏度，确定对缺陷敏感的超声路径；然后，获得不同路径下裂纹缺陷的全聚焦成像特征；最后，使用多模式全聚焦成像方法对试块堆焊层表面裂纹缺陷进行检测与定位。仿真及试验结果验证了该方法在内壁裂纹检测及缺陷定位精度上的可靠性，为行业提供了一种更经济高效的检测方案。

关键词：热壁加氢反应器；堆焊层；多模式全聚焦成像；镜面回波估计

中图分类号：TE966；TG115.28　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-6656(2024)10-0020-07

Multi-mode total focusing imaging for cladding layer defect in hot wall hydrogenation reactors based on specular echo estimation

TENG Guoyang[1,2], TAO Yangji[1,2], YANG Jinhui[1,2], MIAO Cunjian[1,2], TANG Ping[1,2], YU Xuefen[1,2]

（1. Zhejiang Academy of Special Equipment Science, Hangzhou 310020, China;
2. Key Laboratory of Special Equipment Safety Testing Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310020, China）

Abstract: The hot wall hydrogenation reactor operates under harsh conditions such as high temperature, high pressure, and hydrogen corrosion for a long time, and defect detection of the inner wall cladding layer is crucial for equipment safety. A multi-mode fully focused imaging detection method based on mirror echo estimation is proposed to address the technical difficulties of ultrasonic testing on the outer side of the hydrogenation reactor weld layer. Firstly, a mirror echo estimator is used for simulation analysis to obtain the sensitivity of the multi-mode fully focused imaging area, and to determine the ultrasonic path sensitive to defects in the weld overlay; Then, obtain the fully focused imaging features of crack defects under different paths; Finally, the multi-mode fully focused imaging method is used to detect and locate crack defects of different sizes on the surface of the test block weld layer. The simulation and experimental results have verified the reliability of this method in detecting inner wall cracks and locating defects accurately, providing a more economical and efficient detection solution for the industry.

Key words: hot wall hydrogenation reactor; cladding layer; multi-mode total focusing imaging; specular echoe estimation

热壁加氢反应器是炼油化工行业的关键设备，长期处于高温、高压、氢腐蚀等恶劣工况下，其内壁堆焊层中易出现表面裂纹、氢致剥离等损伤，而严重影响设备安全运行[1-2]。内壁堆焊层的定期检验需要进入容器内部并综合使用目视、磁粉、超声等多种检测手段，检验周期长、成本高[3]。若能从反应器外部

收稿日期：2024-08-08

基金项目：浙江省市场监督管理局科技计划项目(ZD2024012)；中国合格评定国家认可委员会科技项目(2022CNAS14)；浙江省“尖兵领雁＋X”研发攻关计划(2024C01128)

作者简介：滕国阳(1991—)，男，博士，主要从事特种设备智能检测方面的研究工作

通信作者：陶杨吉，taoyangji@126.com

检测内壁堆焊层缺陷，则可避免开罐检查并节省时间与成本。

常规脉冲反射式超声检测可检测内部埋藏缺陷，但对于大尺寸、大壁厚的热壁加氢反应器而言，传统单晶探头检测无法对缺陷进行快速定位、定量。近年来，基于全矩阵捕捉数据的全聚焦方法（TFM）得到了业界的广泛关注，其中考虑了声束传播路径的多模式全聚焦方法（MTFM）可有效提高缺陷响应率[4]。国内外学者针对MTFM展开了系列研究，金士杰等[5]发现，MTFM能够有效检出－80°～80°裂纹，且裂纹长度、取向和中心深度定量误差分别不超过0.6 mm、2.39°和0.73 mm；李衍[6]分析了MTFM成像结果中伪像来源和滤除方法，提出了多模式融合方法以降低伪像影响；SY等[7]提出使用镜面回波估计器（SEE）计算裂纹镜面反射波弹性场，可预测MTFM各模式的成像灵敏度。

在以上MTFM成像研究中，斜入射技术被广泛用于增强缺陷响应。然而，对于热壁加氢反应器内壁缺陷，直接接触外表面进行检测可简化工艺且操作更为便捷。为此，笔者探讨了MTFM在不使用斜楔块情况下检测内壁堆焊层小尺寸缺陷的能力，并分析其声束传播路径，以期提供一种高效、简化的检测策略。首先，利用SEE对仿真数据进行分析，确定超声路径对堆焊层缺陷的敏感性；其次，研究不同超声路径下的缺陷全聚焦成像特征；最后，通过MTFM对试块堆焊层的裂纹缺陷进行检测与定位，验证所提方法的有效性。

1　检测原理

1.1　MTFM超声波传播路径

对于热壁加氢反应器内壁堆焊层中最易出现的裂缝类缺陷，沿裂纹高度方向的镜面回波和裂纹尖端的衍射回波是定位及定量的关键信息源。镜面回波因其能量较高，能够有效地指示出平面缺陷的表面特性；衍射回波虽然能量较低，但提供了裂纹尖端的精确位置信息，有助于裂纹的尺寸测量和特征分析。

MTFM通过综合应用多种声束路径，可以同时获得裂纹缺陷的镜面回波和衍射回波。具体来说，在对热壁加氢反应器的内壁堆焊层进行检测时，MTFM中最有效的模式是直接模式和半跨模式，MTFM超声波传播路径如图1所示，直接模式包括LL和TT两种配置，主要通过捕捉裂纹尖端产生的衍射波来实现成像，其优点在于对裂纹的取向及位置不敏感，缺点在于衍射回波能量较小；半跨模式（如LLL、TTT、LLT等）通过底面反射路径可以获得从裂纹侧面反射回来的镜面回波，能量较高易于成像，但缺陷的高度方向及与探头的相对位置会对检测产生影响。

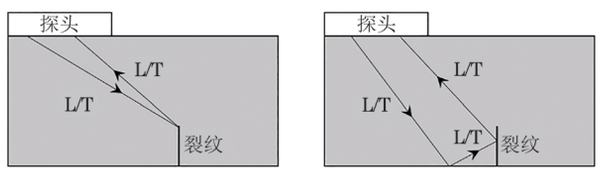


图1　MTFM超声波传播路径示意

因此，MTFM通过镜面回波对裂纹缺陷进行成像时，首先需要确定不同的超声波路径对于裂纹缺陷的检测灵敏度，此处使用的方法为镜面回波估计器SEE。

1.2　镜面回波估计

镜面回波估计器SEE根据Snell定律计算面状缺陷反射的弹性场，预测MTFM各个模式对特定方向缺陷的灵敏度。SEE做以下假设：① 假设成像区域每个点都存在缺陷，声束与各点缺陷进行镜面反射；② 缺陷在远场，声波近似为平面波；③ 缺陷近似为理想反射面，声束全被反射，反射系数为固体和空气的界面反射系数。

假定缺陷的法线为n，成像点为P，计算遵循Snell定律，即从发射阵元i到成像点P再到接收阵元j为镜面反射的过程。定义路径法线$\boldsymbol{n}_{ij}$是入射波的慢度矢量$\boldsymbol{s}_i$和反射波的慢度矢量$\boldsymbol{s}_j$之和产生的矢量，即

$$\boldsymbol{n}_{ij}=\frac{\boldsymbol{s}_i+\boldsymbol{s}_j}{\left\|\boldsymbol{s}_i+\boldsymbol{s}_j\right\|} \tag{1}$$

当路径法线$\boldsymbol{n}_{ij}$和缺陷法线n方向一致即$|n,\boldsymbol{n}_{ij}|=1$时产生完全镜面反射，SEE中路径法线及缺陷法线示意如图2所示。此时成像点P的振幅为

$$A_{ij}(P,n)=\begin{cases}A_i(P)A_j(P)R_{ij}(P,n) & |n,\boldsymbol{n}_{ij}|=1\\ 0 & \text{其他情况}\end{cases} \tag{2}$$

式中：$R_{ij}(P,n)$为成像点P的反射系数，若认为缺陷为完全镜面反射，可由固体与空气界面计算得到；$A_i(P)$为阵元i发射到成像点P的振幅值，$A_j(P)$为阵元j发射到成像点P的振幅。

由此，得出在成像点P通过全聚焦采集所有阵元对的总振幅

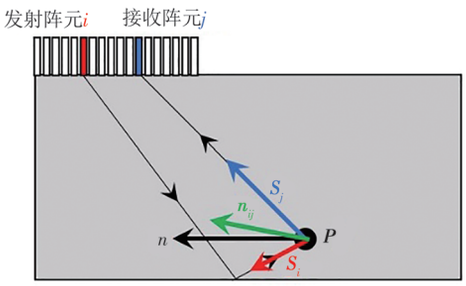


图 2　SEE 中路径法线及缺陷法线示意

$$A(P,n)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\begin{cases}A_i(P)A_j(P)R_{ij}(P,n) & |n,\boldsymbol{n}_{ij}|=1\\ 0 & \text{其他情况}\end{cases} \quad (3)$$

式中：N为阵元总数量。

2　仿真分析

2.1　灵敏度分析结果

CIVA 软件在 2021 版本新增的 Sensitivity Coverage 分析模块中集成了 SEE，可量化计算 MTFM 中各种模式对于指定方向裂纹类缺陷的响应。设置尺寸为 400 mm×100 mm×135 mm（长×宽×厚）的普通钢工件，采用 2.5 MHz，64 阵元的线阵探头进行 MTFM 仿真，通过 SEE 计算所有直接模式和半跨模式对 0°裂纹缺陷的成像结果。仿真设置的工件底部为热壁加氢反应器的内壁，属于堆焊层表面裂纹可能出现的位置。

MTFM 的 CIVA 灵敏度分布计算结果如图 3 所示。灵敏度分布图中，不同模式最高振幅出现的位置不同，在所设置的成像区域内最高振幅主要包括 LLL、TTT、LLT 和 TLT 三种半跨模式，直接模式仅有 LL 处于工件上表面 15 mm 以内。工件底部被 LLL 和 TTT 两种模式覆盖。

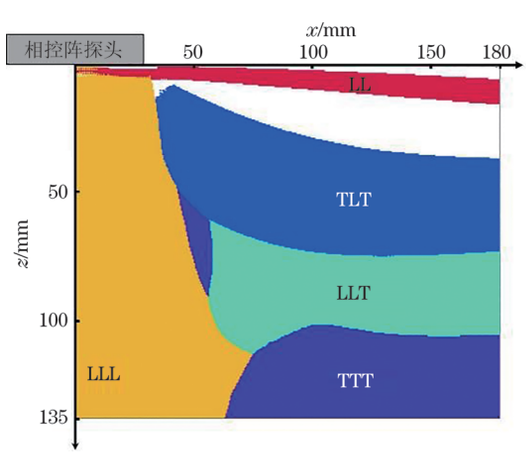


图 3　MTFM 的 CIVA 灵敏度分布计算结果

进一步计算发现，在相同增益下，LLL 模式和 TTT 模式的声场分布如图 4 所示。TTT 模式最大的镜面回波能量出现在探头侧方，其能量高于 LLL 模式且幅值差可达 15 dB。因此，文章选择 TTT 作为裂纹镜面回波成像模式，此外，选择 LL 作为衍射回波成像模式。

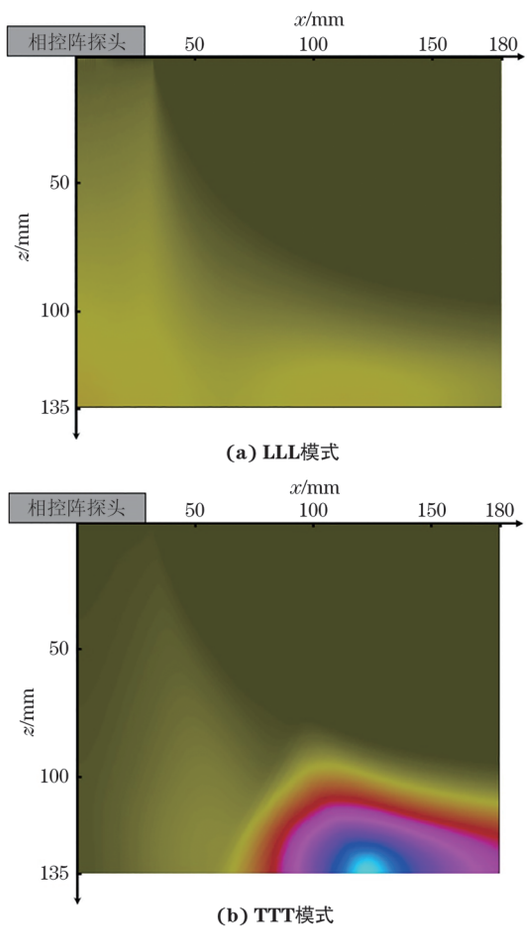
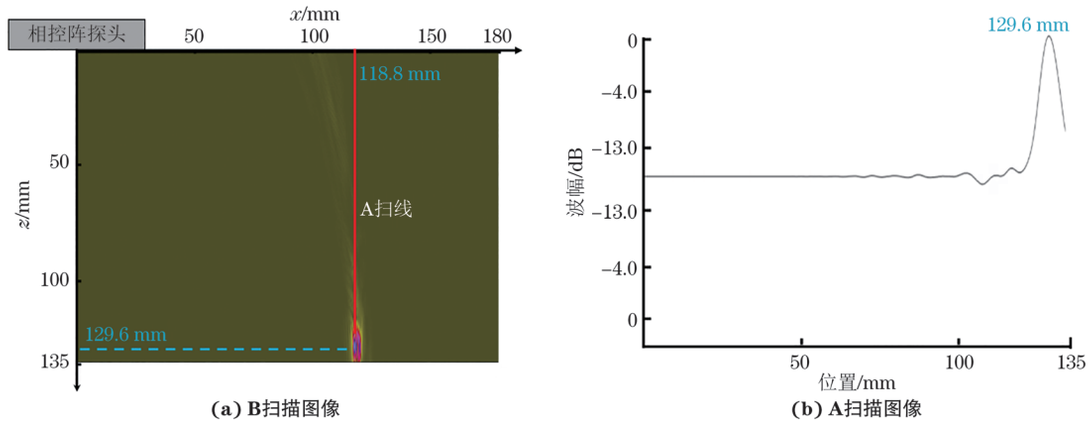


图 4　LLL 模式和 TTT 模式声场分布

2.2　0°刻槽全聚焦仿真结果

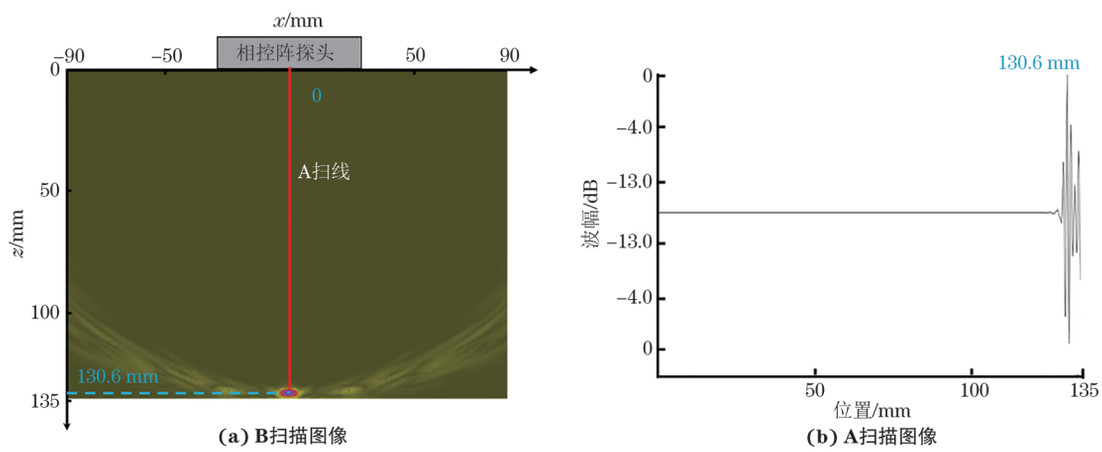
采用上述灵敏度仿真模型参数对 0°裂纹类缺陷进行全聚焦检测模拟计算。设置缺陷高度为 4 mm，位置位于工件底面且 x 轴方向与探头中心距离为 120 mm，与 TTT 灵敏度分布图中最高能量处位置一致，得到 TTT 模式下的缺陷成像结果如图 5 所示。TTT 模式下缺陷回波信号能量较高，其水平位置为 118.8 mm，与缺陷实际位置接近；缺陷特征呈长条状，若以其信号能量最高处 129.6 mm 为缺陷最高点，则计算得到缺陷高度为 5.4 mm，误差为 35%。

将缺陷移至探头正下方，其他参数保持不变，使用 LL 模式进行全聚焦成像，结果如图 6 所示。此时在缺陷尖端处形成了能量较强的衍射回波，其



(a) B扫描图像　　(b) A扫描图像

图 5　侧方刻槽缺陷的 TTT 模式下缺陷成像结果



(a) B扫描图像　　(b) A扫描图像

图 6　正下方刻槽缺陷的 LL 模式下缺陷成像结果

纵坐标位置为130.6 mm，计算得出的缺陷高度为4.4 mm，误差为10%。

3　模拟试块检测结果与分析

3.1　试验配置及模拟试块

试验所用检测仪器为汕头超声CTS-PA322T型相控阵全聚焦实时超声成像系统，配备64阵元，2.5 MHz线阵探头，其阵元横向宽度为10 mm，间距为1 mm，试验装置实物如图7所示。

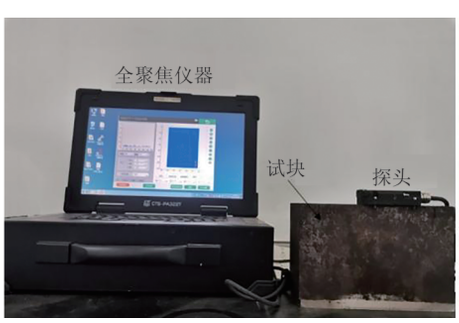


图 7　试验装置实物

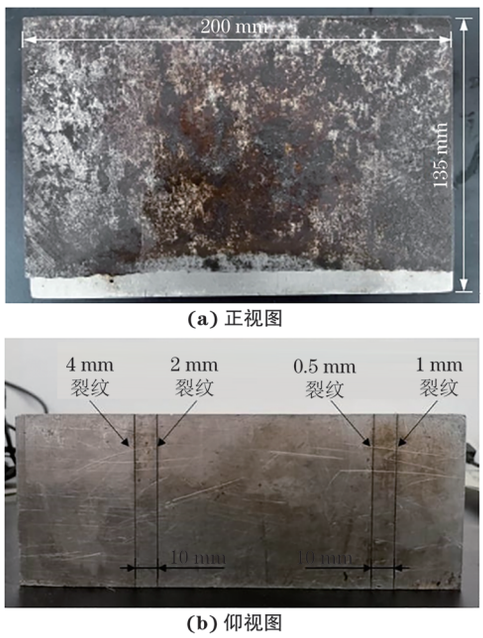
为了验证MTFM直接接触法对于热壁加氢反应器内壁堆焊层缺陷的实际检测效果，参照某型号反应器的实际结构，制作了尺寸为200 mm×100 mm×135 mm（长×宽×厚）的模拟试块，其结构如图8所示。其基体材料为2.25CrIMo，厚为127 mm；堆焊层材料为TP309，厚为8 mm。

在堆焊层内表面加工了深度为0.5，1，2，4 mm的人工刻槽作为模拟裂纹缺陷。为了便于确定文章方法的测量能力，定义裂纹深度大于声波半波长的为深裂纹，否则为浅裂纹。文章所用2.5 MHz探头在该试块中的波长为2.36 mm，故2 mm和4 mm裂纹为深裂纹，0.5 mm及1 mm裂纹为浅裂纹，同组裂纹缺陷之间间隔为10 mm，试块缺陷分布示意如图9所示。此外，在距离4 mm深裂纹横向距离15 mm处加工了ϕ2 mm×40 mm（直径×长度）的长横孔作为模拟气孔缺陷。

3.2　深裂纹检测

3.2.1　TTT 模式

将探头放置于x轴方向距离4 mm深裂纹横向距离100 mm处，对包含了2 mm深裂纹、4 mm深裂纹、ϕ2 mm气孔缺陷的160 mm×135 mm（长×宽，下同）区域进行MTFM成像，得到TTT成像结果如图10



(a) 正视图

(b) 仰视图

图 8　模拟试块结构示意

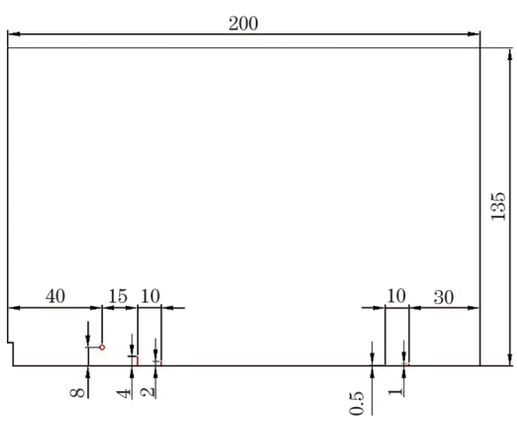
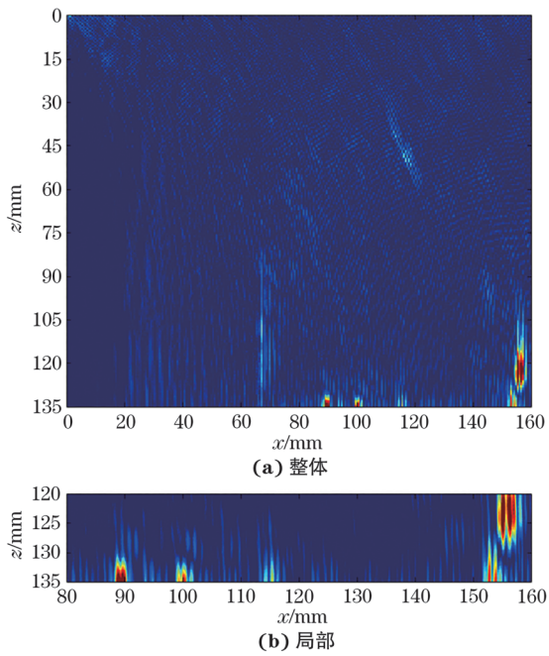


图 9　试块缺陷分布示意

所示。

从图像特征定位上来看，x轴90 mm处出现了2 mm深裂纹缺陷特征，100 mm处出现4 mm深裂纹缺陷特征，115 mm处出现ϕ2 mm气孔缺陷特征，150～160 mm间为试块边缘缺角特征，TTT检测结果在x轴方向上的定位与实际情况完全一致；但若以信号特征中心位置计算缺陷高度，2 mm深裂纹的高度计算结果要大于4 mm深裂纹的高度计算结果，与实际不符。

在对图像特征强度的分析中，通常反射体的尺寸越大，其能量特征越显著，从而允许利用能量特征对缺陷大小进行定量评估。然而，在图10中，2 mm刻槽的图像能量特征异常地超过了4 mm刻槽的能量特征。对比图4中的TTT模式的灵敏度分析结果，发现不同位置的镜面回波强度存在差异。图10中观



(a) 整体

(b) 局部

图 10　TTT 模式下的深裂纹检测结果

察到的异常检测结果可以归因于2 mm刻槽位于高能量镜面回波区域，而4 mm刻槽位于较低能量的镜面回波区域。

为了验证这一分析结论，移动探头使4 mm的缺陷在x轴方向距离探头90 mm进行检测得到的结果如图11所示，此时，4 mm刻槽的能量特征明显高于2 mm刻槽的。这表明，TTT检测模式在表征堆焊层内缺陷的能量特征时会受到探头与缺陷相对位置的显著影响。因此，如要使用TTT检测模式准确定量缺陷，则必须进一步结合TTT灵敏度结果进行分析，但限于篇幅，文章在此不做讨论。

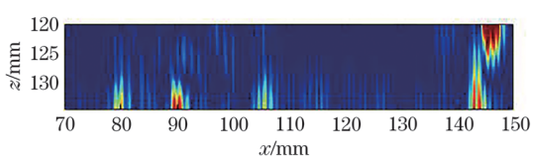


图 11　探头移动后 TTT 模式下的深裂纹检测结果

此外，ϕ2 mm气孔缺陷特征出现在底面上，在气孔实际位置上并未出现能量特征，表明气孔缺陷在TTT模式下并未产生强烈的镜面反射，不宜使用TTT模式检测孔类缺陷。

3.2.2　LL模式

将探头放置于4 mm深裂纹正上方，对包含了2 mm深裂纹、4 mm深裂纹、ϕ2 mm气孔缺陷的160 mm×135 mm区域进行MTFM成像，得到的LL模式成像结果如图12所示。对于深裂纹缺陷成像特征而言，其尖端衍射回波可以被所有阵元接收并虚拟

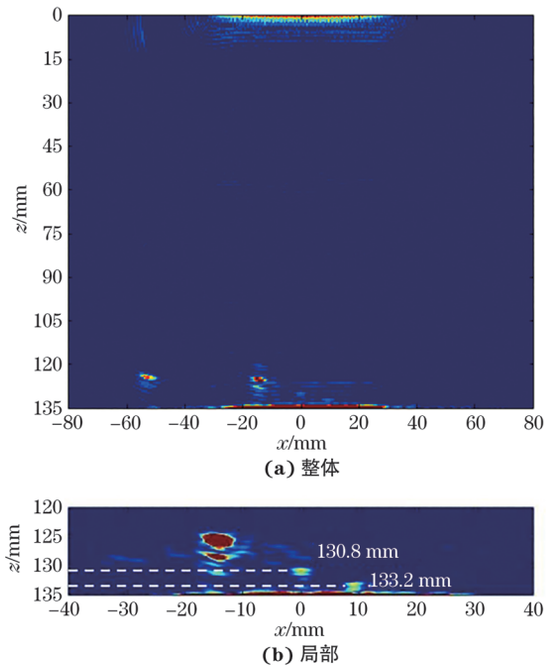


图 12　LL 模式下的深裂纹检测结果

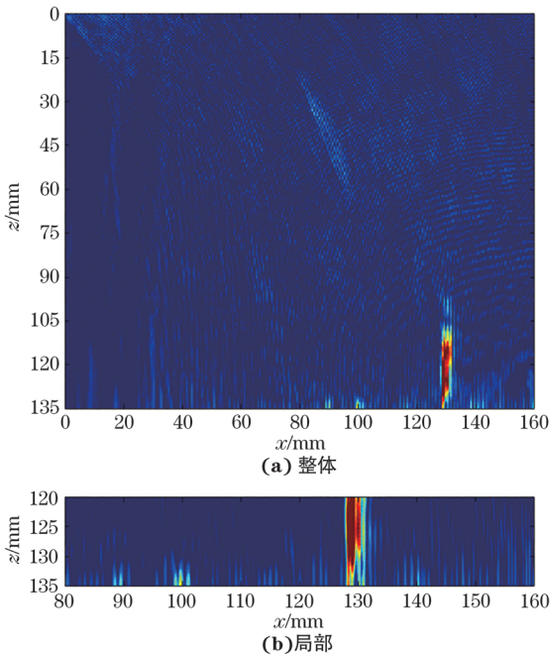


图 13　TTT 模式下的浅裂纹检测结果

聚焦成像，具有一定的能量强度。以尖端衍射回波能量最高处为深裂纹最高点，计算得到两条裂纹高度分别为4.2 mm和1.8 mm，误差分别为5%及10%。

值得注意的是，2 mm刻槽尖端回波已和底面回波位置十分接近，在刻槽高度进一步减小时其尖端回波可能会与底波融合在一起而无法分辨，这将在下一节的浅裂纹的MTFM试验结果中得到验证。

3.3　浅裂纹检测

3.3.1　TTT模式

将探头放置于x轴方向距离1 mm浅裂纹100 mm处，对包含了0.5 mm浅裂纹和1 mm浅裂纹的160 mm×135 mm区域进行MTFM成像，得到TTT成像结果如图13所示。

从图像特征定位上来看，与深裂纹检测结果类似，x轴90 mm处出现了0.5 mm浅裂纹缺陷特征，100 mm处出现了1 mm浅裂纹缺陷特征，130 mm处为试块边缘特征，TTT检测结果在x轴方向上的定位与实际情况完全一致；此时缺陷信号特征均较弱，尤其0.5 mm浅裂纹缺陷特征几乎与背景噪声处于同等水平，不能作为缺陷存在的判别依据。

3.3.2　LL模式

将探头放置于1 mm浅裂纹正上方，对包含了0.5 mm浅裂纹、1 mm浅裂纹的160 mm×135 mm区域进行MTFM成像，得到的LL成像结果如图14所示。由局部放大图可见，对于浅裂纹缺陷成像特征而言，其尖端衍射回波已消失。根据3.2.2节的

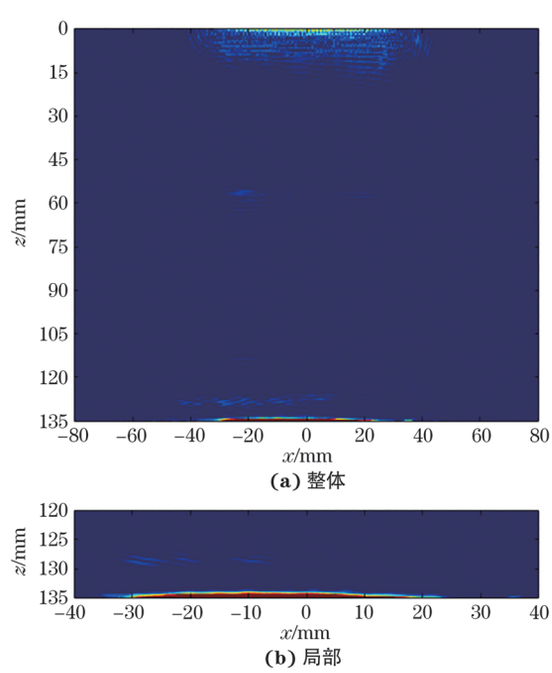


图 14　LL 模式下的浅裂纹检测结果

推论可知，因为缺陷高度过小，尖端衍射回波与底面回波融为一体而无法分辨，因此LL模式并不适用于浅裂纹成像检测。

4　结论

文章针对热壁加氢反应器内壁堆焊层的缺陷检测问题，提出了一种基于镜面回波估计的多模式全聚焦成像方法。应用SEE对超声路径进行灵敏度分析，优化了超声检测路径与对应缺陷的模式选择，增强了

对堆焊层缺陷的响应。仿真分析和试验结果表明，使用TTT模式和LL模式的MTFM检测方法能够有效地从反应器外部检测内壁堆焊层的裂纹缺陷，无需楔块，简化了检测流程，提高了检测效率和精度；TTT模式在提高缺陷检测灵敏度和定位精度方面具有显著优势，但对于缺陷高度的定量检测，仅有LL模式可定量检测高度大于超声波波长的裂纹缺陷。

参考文献：

[1] 强天鹏. 压力容器检验[M]. 北京：新华出版社，2008.
[2] 吴焕利，唐春容，朱省初. 在用厚壁加氢反应器的常规超声检测[J]. 无损探伤，2014，38(3)：20-24.
[3] 秦建秀. 热壁加氢反应器的无损检测技术[J]. 设备管理与维修，2020(16)：123-124.
[4] 宋泽宇，胡静，莫润阳. 多模式全聚焦法对焊缝内部条状缺陷的检测及定量[J]. 无损检测，2023，45(7)：53-60.
[5] 金士杰，刘晨飞，史思琪，等. 基于全模式全聚焦方法的裂纹超声成像定量检测[J]. 仪器仪表学报，2021，42(1)：183-190.
[6] 李衍. 多模式全聚焦法成像解析[J]. 无损探伤，2021，45(4)：1-16.
[7] SY K，BRÉDIF P，IAKOVLEVA E，et al. Development of the specular echoes estimator to predict relevant modes for total focusing method imaging [J]. NDT & E International，2018，99：134-140.