

相控阵超声检测技术在海上风电海缆焊接接头检测中的应用

闫俞廷^{1*}, 李晓博¹, 贾若飞¹, 王亮亮², 何晨博²

¹西安热工研究院有限公司, 陕西 西安

²西安益通热工技术服务有限责任公司, 陕西 西安

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月19日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

在双碳目标指引下, 海上风电已成为我国新能源发展重点方向, 交联聚乙烯(XLPE)绝缘海底电缆是深远海风电场电力传输的关键装备。本文采用相控阵超声检测技术, 通过聚乙烯专用试块完成声速校准与系统标定, 系统研究探头频率、阵元数量对声场分布、缺陷检出能力的影响, 引入信噪比(SNR)作为核心评估指标, 明确SNR计算方法与验收阈值, 并采用含真实缺陷的海缆接头开展工艺验证。结果表明: 交联聚乙烯材料纵波声速为2448 m/s, 缺陷定位误差 $\leq 0.5\%$; 2.25 MHz、64阵元相控阵探头在40 mm厚度内对 $\Phi 1$ mm缺陷SNR ≥ 12 dB、 $\Phi 0.5$ mm缺陷SNR ≥ 6 dB, 满足验收标准, 可有效用于风电海缆焊接接头的质量控制, 为海缆工程应用提供可靠的技术支撑。

关键词

海上风电, 相控阵超声检测, 海缆焊接接头

Application of Phased Array Ultrasonic Testing in Weld Inspection of Offshore Wind Power Submarine Cables

Yuting Yan^{1*}, Xiaobo Li¹, Ruofei Jia¹, Liangliang Wang², Chenbo He²

¹Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Xi'an Yitong Thermal Technology Service Co., Ltd, Xi'an Shaanxi

Received: April 25, 2026; accepted: May 19, 2026; published: May 29, 2026

*通讯作者。

文章引用: 闫俞廷, 李晓博, 贾若飞, 王亮亮, 何晨博. 相控阵超声检测技术在海上风电海缆焊接接头检测中的应用[J]. 材料科学, 2026, 16(5): 356-366. DOI: 10.12677/ms.2026.165128

Abstract

Guided by the carbon peaking and carbon neutrality goals, offshore wind power has become a key focus of new energy development in China. Cross-linked polyethylene (XLPE) insulated submarine cables are critical equipment for power transmission in deep-water offshore wind farms. In the paper, PAUT technology was adopted. Sound velocity calibration and system calibration are carried out using dedicated polyethylene test blocks. It systematically studies the influence of probe frequency and array element quantity on the distribution of the sound field and the detection ability of defects. The signal-to-noise ratio (SNR) is introduced as the core evaluation index with clear definition and acceptance criteria. Process validation is conducted using submarine cable joints containing actual defects. The results show that the longitudinal wave velocity of XLPE material is 2448 m/s, with a defect positioning error $\leq 0.5\%$. A 2.25 MHz, 64-element phased array probe achieves $\text{SNR} \geq 12 \text{ dB}$ for $\Phi 1 \text{ mm}$ defects and $\text{SNR} \geq 6 \text{ dB}$ for $\Phi 0.5 \text{ mm}$ defects within 40 mm thickness, meeting the acceptance standard, which can be effectively applied to the quality control of welded joints in wind power submarine cables, thereby providing reliable technical support for the engineering application of submarine cables.

Keywords

Offshore Wind Power, Phased Array Ultrasonic Testing, Submarine Cable Welded Joints

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在碳达峰、碳中和的背景下，我国加快了海上风电的发展并取得了重要进展，根据《世界能源蓝皮书：世界能源发展报告》中的内容，海上风电装机容量跃居世界第一，成为全球最大的海上风电市场[1][2]。海底电力电缆的传输效率高，同时具有抗风浪、防腐蚀、耐压力等性能，可以保证电力的可靠传输，是海上风电场中不可或缺的重要组成部分。交联聚乙烯绝缘海底电力电缆具有更优秀的电气性能、更紧凑轻量化的结构、运维方便以及对环境友好等优点，已经成为各大新建海上风电场电力传输的主要设备[3]-[5]。

但是受到塑料绝缘电缆连续挤出工艺的限制，海底电缆最大长度仅能达到 20 km~30 km，尚不能满足深远海的电力传输要求，因此需要中间接头焊接连接两段海底电力电缆，以保证电缆系统的连续性和可靠性。研究表明，受加工工艺、模具制造等条件限制，电缆软接头的本体绝缘反应力锥与恢复绝缘交界处为极其薄弱区域，易在焊接过程中产生气孔和微裂纹等缺陷，随着使用年限的增加易引发电树枝的生长，最终造成海缆的电击穿破坏[6]-[8]。目前海缆制造企业主要采用 X 射线检测对软接头处的气孔、裂纹等缺陷进行检查，但 X 射线检测存在面积型缺陷不敏感、对缺陷方向性要求高、检测周期长、对人体辐射等缺点[9][10]，相控阵超声检测可避免上述 X 射线检测中存在的技术缺陷，同时具有灵敏度高、穿透性强、扫查范围广、检测效率高等优势[11]-[15]。

2. 研究方案

本文通过构建材质声学特性一致的聚乙烯 CSK-IA 标准试块，确定超声波在交联聚乙烯材料中的传播声速，并于相控阵超声检测系统进行声速校准，如图 1 所示。通过制作阶梯式专用对比试块，对比试

块中设置不同深度的平底孔，以确定相控阵超声检测系统配置相控阵探头参数组合，如图 2 所示。本研究定义信噪比(SNR)为缺陷回波峰值幅值与背景噪声均方根幅值的比值(dB)，可稳定检出缺陷要求 $SNR \geq 6$ dB，定量识别缺陷要求 $SNR \geq 12$ dB。重点研究探头频率、阵元数量、尺寸、激励孔径等参数对声场分布、缺陷定位的影响，并于含真实缺陷的交联聚乙烯海缆接头进行工艺验证(厚度 30 mm~38 mm)，如图 3 所示。最终确定适用于电缆接头交联聚乙烯绝缘层的相控阵超声检测方法 with 工艺，精准定位与成像电缆接头绝缘层制造过程中产生的微小缺陷。



Figure 1. CSK-IA standard reference block made of polyethylene
图 1. 聚乙烯 CSK-IA 标准试块

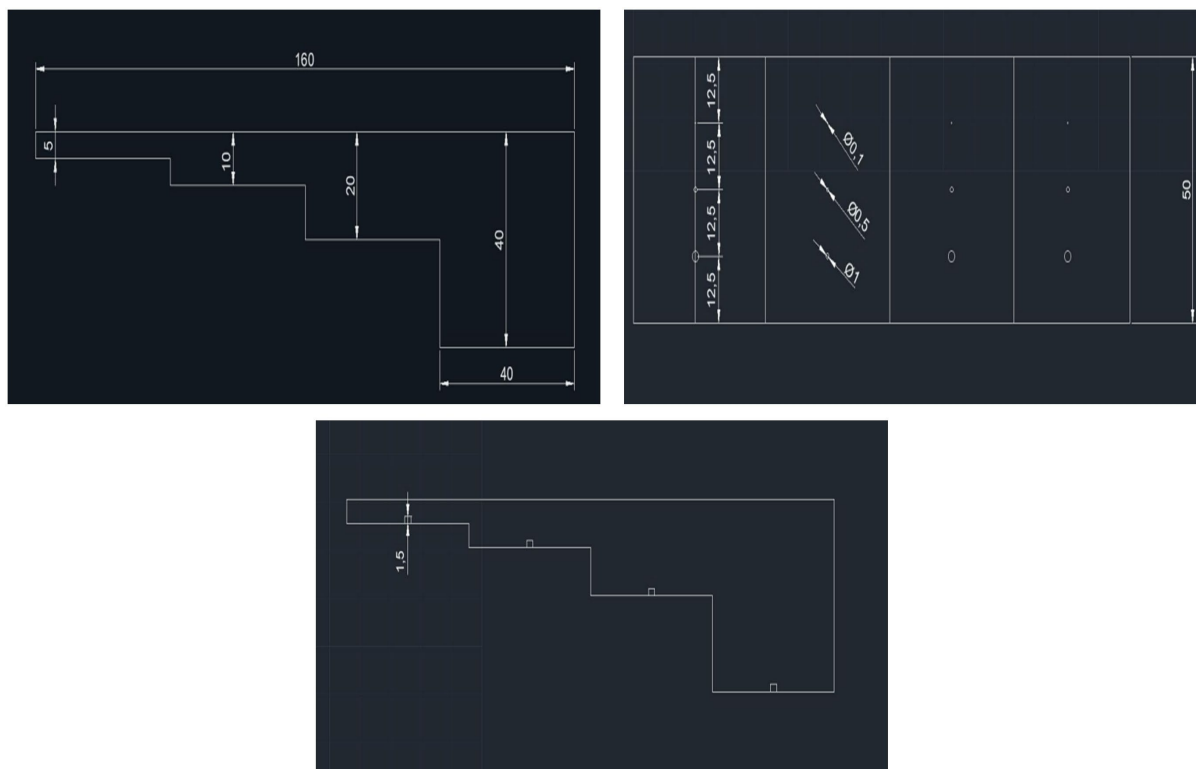


Figure 2. Polyethylene stepped specialized reference block
图 2. 聚乙烯阶梯式专用对比试块



Figure 3. XLPE submarine cable joint containing natural defects
图 3. 含真实缺陷的交联聚乙烯海缆接头

3. 探头参数组合与分析

3.1. 交联聚乙烯声速计算与测定

本节试验中使用常规 5L64-0.5 × 10 探头，对超声波在聚乙烯 CSK-IA 标准试块中的传播声速进行计算与校准。试验设备选用相控阵探伤仪 Phascan II型，试验设备系统性能应满足标准 GB/T 29302《无损检测仪器相控阵超声检测系统的性能与检验》的要求。

对于每条声波路径，根据几何关系计算声波传播的路径长度，通过三维空间两点间距离公式计算路径长度，即路径长度等于起点与终点在 x、y、z 三个方向坐标差值的平方和的平方根。设纵波传播声速为 V_L ，横波传播声速为 V_T ，每条路径的渡越时间为 t ，路径长度为 L ，构建声程方程 $L = V_L \times t$ (纵波路径)或 $L = V_T \times t$ (横波路径)， N 条路径对应 N 个声程方程，形成包含 2 个未知数(V_L, V_T)的超定方程组。利用最小二乘法反演计算声速，将超定方程组转化为矩阵形式 $Ax = b$ ，其中 A 为路径长度与渡越时间的关联矩阵， x 为待求声速向量(V_L, V_T)， b 为路径长度向量。利用最小二乘法求解该矩阵方程，计算过程中最小化各方程的误差平方和，得到纵波传播声速和横波传播声速。通过求解，最终得到针对当前聚乙烯材料、常温等条件下的声速值为 2480 m/s。

通过对 CSK-IA 标准试块中的 10 mm 和 20 mm 深横通孔进行深度定位，定位偏差为 0.5%以内，确定其声速的最终值为 2448 m/s，如图 4 所示。



Figure 4. Location of transverse holes at various depths
图 4. 不同深度横通孔定位

3.2. 相控阵探头频率参数测定

对于衰减较大的交联聚乙烯，需要选择一个较低的频率(1~5 MHz)，以保证超声波有足够的能量穿透整个绝缘层厚度，故本次试验分别使用 5L64-0.6 × 10、2.25L64-0.6 × 10、1L64-0.6 × 10 的探头、有效偏转角度为 0°，对阶梯试块 Φ 1、Φ 0.5、Φ 0.1 的平底孔进行检测，以得到不同频率在聚乙烯材料中的传播特性，判断频率对聚乙烯内缺陷检测灵敏度的影响。

图 5 为 5 MHz 相控阵探头在 0° 直射、64 阵元配置下，对聚乙烯阶梯试块 10 mm (图 5(a))、20 mm (图 5(b))、40 mm (图 5(c)) 深度 Φ 1 mm 与 Φ 0.5 mm 平底孔缺陷的检测成像结果，反映高频超声在高衰减交联聚乙烯(XLPE)介质中的传播规律与缺陷响应特征。10 mm 深度检测截面中，Φ 1 mm 与 Φ 0.5 mm 平底孔均呈现高幅值、高信噪比缺陷回波，SNR 分别为 22.3 dB、15.7 dB。A 扫波形尖锐对称，B 扫成像边界清晰、定位准确，缺陷几何特征还原度高，表明 5 MHz 探头在近场区具备优异的空间分辨率与缺陷定量能力，可精准识别微小孔径缺陷。20 mm 深度检测结果显示，Φ 1 mm 缺陷回波幅值略有下降但仍高于判废阈值，SNR = 13.5 dB。Φ 0.5 mm 缺陷信号可稳定捕获与识别，SNR = 7.2 dB 声场穿透性与近场相比略有衰减，但整体检测性能仍满足薄绝缘层缺陷检出要求。进入 40 mm 深度检测区间，XLPE 材料对 5 MHz 超声的本征衰减占据主导，声束能量在传播路径中急剧损耗，底波信号完全消失，缺陷回波被结构噪声与介质衰减淹没，Φ 1 mm 与 Φ 0.5 mm 平底孔均无法有效检出，成像界面无明显缺陷特征。该结果验证高频探头在 XLPE 材料中穿透深度受限，仅适用于 20 mm 以内浅绝缘层检测，无法满足海上风电海缆厚截面绝缘接头的全厚度检测需求。

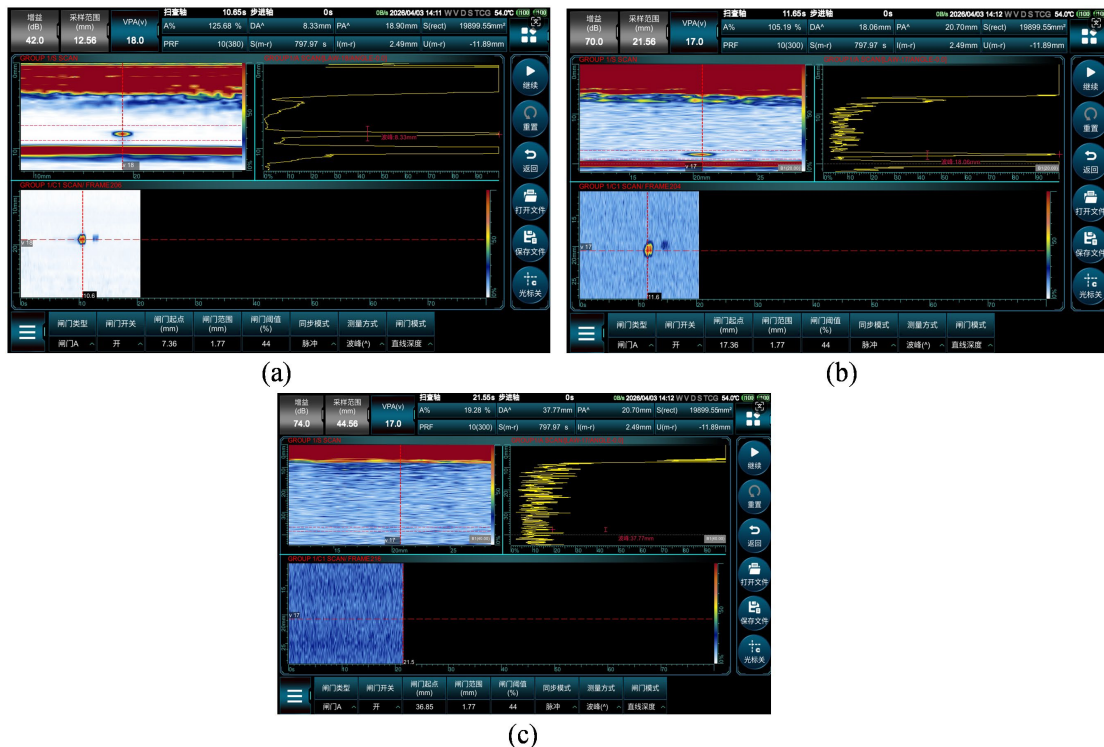


Figure 5. Detection results of different-depth flat-bottomed holes by phased array at 2.25 MHz
图 5. 5 MHz 频率下不同深度平底孔相控阵检测结果

图 6 为 2.25 MHz 相控阵探头在相同阵元配置与扫查参数下，对同组阶梯试块的检测结果，体现中低

频超声在高衰减高分子材料中穿透性与分辨率的最优匹配。10 mm 深度检测截面中(图 6(a)), $\Phi 1\text{ mm}$ 与 $\Phi 0.5\text{ mm}$ 平底孔缺陷回波饱满、定位精度高, SNR 分别为 20.5 dB、14.1 dB, B 扫成像连续完整, 缺陷定量误差控制在工程允许范围, 近场检测能力与 5 MHz 探头接近, 未因频率降低出现明显分辨率损失。20 mm 深度检测结果显示(图 6(b)), 声场衰减平缓, $\Phi 1\text{ mm}$ 缺陷信号稳定, SNR = 15.3dB, $\Phi 0.5\text{ mm}$ 缺陷回波幅值略有降低但仍具备清晰可辨的特征, SNR = 8.4 dB, 信噪比满足定性与定量要求, 验证 2.25 MHz 探头在中场区可兼顾声束能量与缺陷识别能力。40 mm 深度检测区间(图 6(c)), 2.25 MHz 超声在 XLPE 中传播衰减显著低于 5 MHz, 声束可完整穿透试块厚度, $\Phi 1\text{ mm}$ 平底孔缺陷可稳定检出, SNR = 12.1 dB; $\Phi 0.5\text{ mm}$ 微小缺陷 SNR = 5.8 dB, 接近验收阈值。综合全深度检测结果, 2.25 MHz 探头在 10 mm~40 mm 厚度范围内实现穿透性与检出能力的平衡, 可覆盖海缆接头绝缘层典型厚度, 是适配 XLPE 材料的最优中心频率。

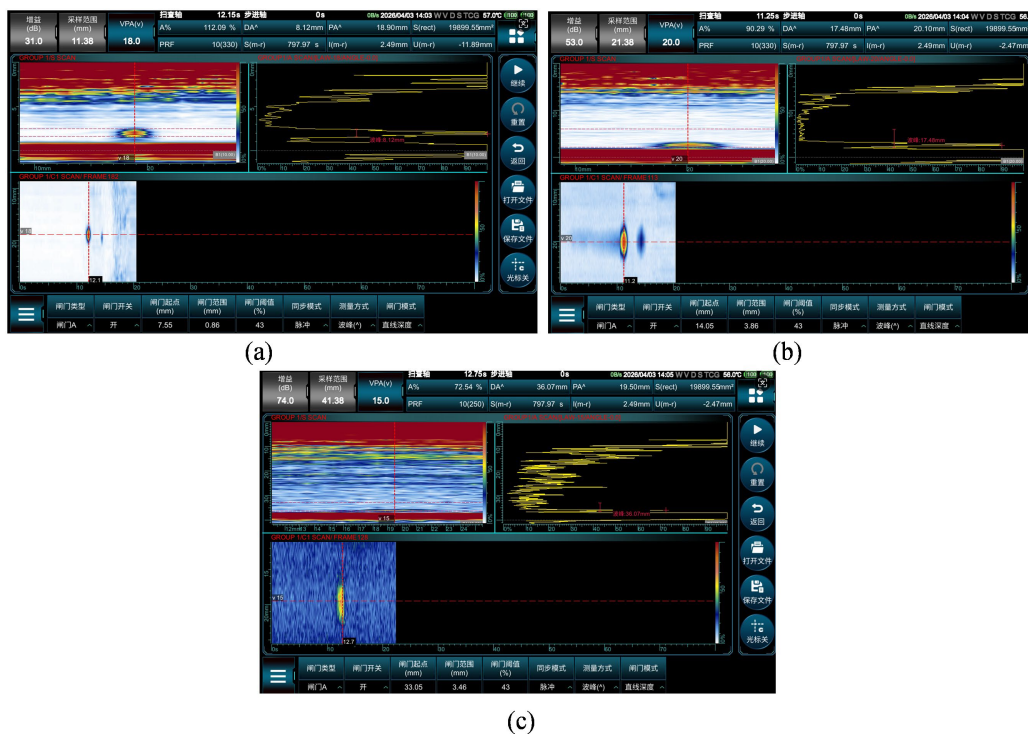


Figure 6. Detection results of different-depth flat-bottomed holes by phased array at 2.25 MHz
图 6. 2.25 MHz 频率下不同深度平底孔相控阵检测结果

图 7 为 1 MHz 相控阵探头检测结果, 反映极低频率超声在 XLPE 材料中声束扩散、分辨率不足、检测失效的特征。10 mm 近场深度下(图 7(a)), 尽管介质衰减最小, 但声束指向性差、聚焦性能弱, 声场能量严重扩散, 结构噪声与杂波干扰显著, $\Phi 1\text{ mm}$ 与 $\Phi 0.5\text{ mm}$ 平底孔缺陷 SNR 分别为 4.2 dB、2.1 dB, 低于验收阈值, 无清晰可识别的缺陷特征。20 mm 深度检测区间(图 7(b)), 声束扩散进一步加剧, 侧向分辨率与轴向分辨率同步劣化, 缺陷散射信号无法形成有效回波峰值, SNR 均小于 3 dB, B 扫成像无缺陷轮廓信息, 全界面呈现高噪声、低对比度状态, 微小缺陷完全无法识别。40 mm 远场深度下(图 7(c)), 1 MHz 探头虽理论穿透深度最大, 但声场聚焦失效、信噪比过低, 缺陷信号与背景噪声无明显区分, $\Phi 1\text{ mm}$ 与 $\Phi 0.5\text{ mm}$ 缺陷均无有效响应。该结果明确 1 MHz 频率因分辨率不足、聚焦性能差, 无法满足 XLPE 海缆接头微小缺陷检测要求, 不具备工程应用价值。

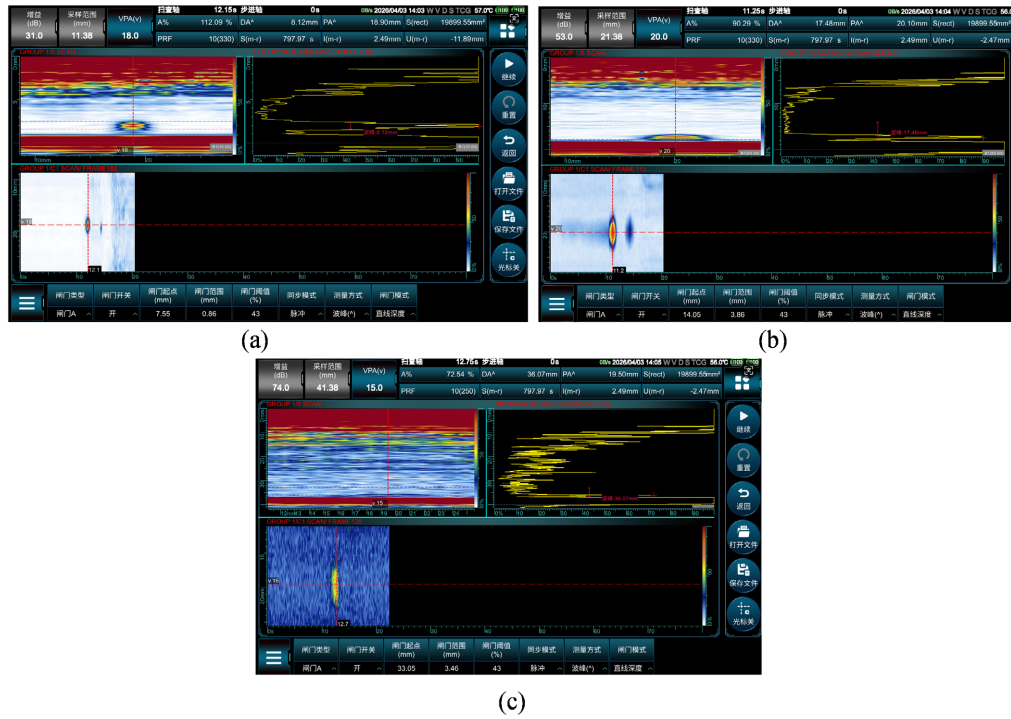


Figure 7. Detection results of different-depth flat-bottomed holes by phased array at 1 MHz
 图 7. 1 MHz 频率下不同深度平底孔相控阵检测结果

3.3. 相控阵探头阵元数量参数测定

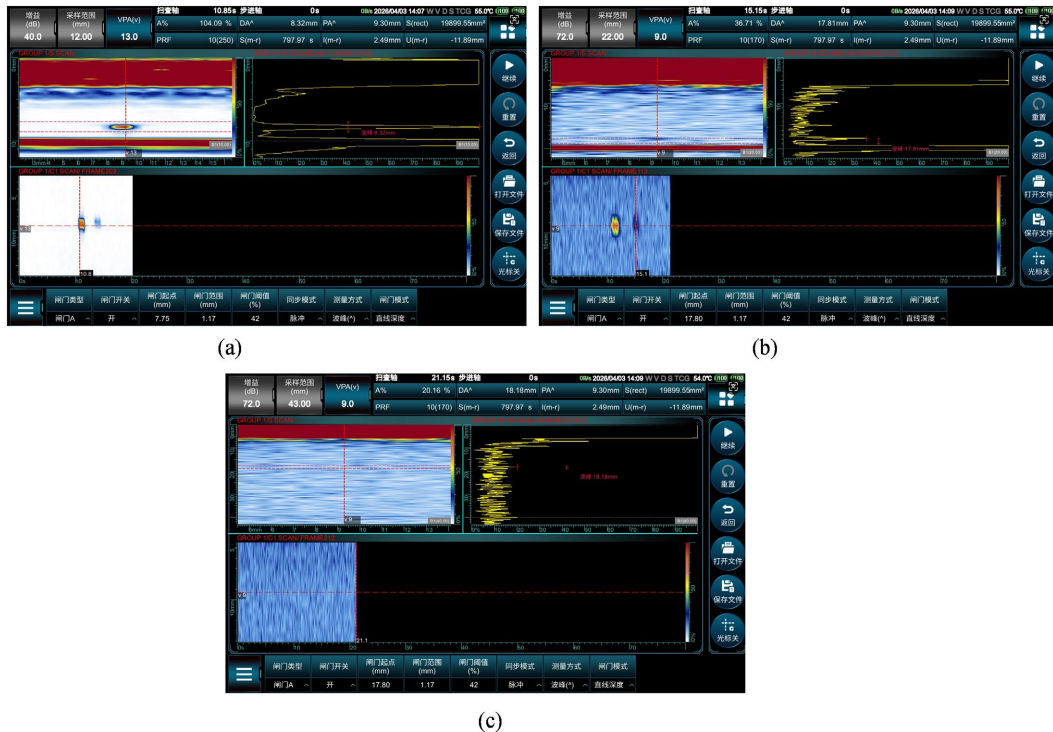


Figure 8. Detection results of flat-bottomed holes at different depths by phased array at a 2.25 MHz 32-element array probe
 图 8. 2.25 MHz 频率 32 阵元探头对不同深度平底孔相控阵检测结果

本节分别采用 2.25L64-0.6×10、2.25L32-0.6×10 探头，有效偏转角度为 0°，对阶梯试块 Φ1、Φ0.5、Φ0.1 的平底孔进行检测，以判断不同阵元数量对聚乙烯内缺陷检测灵敏度的影响。

图 8 分别为 2.25 MHz、32 阵元探头参数下，10 mm (图 8(a))、20 mm (图 8(b))、40 mm (图 8(c))深度 的 Φ1、Φ0.5 平底孔相控阵检测结果。10 mm、20 mm 厚度下，10 mm 深度 SNR 分别为 16.3 dB、9.5 dB，20 mm 深度 SNR 分别为 10.2 dB、5.1 dB。但随着试块深度的增加，40 mm 厚度下 Φ1、Φ0.5 缺陷均无法检出。对比图 6 中 64 阵元与 32 阵元探头：32 阵元激励孔径小，声场能量分散，远场信噪比不足，40 mm 深度微小缺陷无法检出，SNR 分别为 4.3 dB、1.8 dB；64 阵元有效孔径更大，声束聚焦精度高、能量集中度好，40 mm 深度内 Φ1 mm 缺陷回波清晰、定量准确。结果表明，64 阵元可显著提升远场检测能力与缺陷定位精度，满足海缆厚绝缘层检测要求。

3.4. 不同参数组合信噪比与定位误差对比

表 1 为不同探头参数组合下缺陷检测信噪比与定位误差结果。由表 1 可知，5 MHz 探头在 10 mm、20 mm 深度处可获得较高信噪比，但 40 mm 深度处信号完全衰减；2.25 MHz + 64 阵元探头在 10 mm~40 mm 全厚度范围内信噪比最优，Φ1 mm 缺陷在各深度 SNR 均不低于 12.1 dB，满足定量识别要求，定位误差均值小于 0.12 mm、标准差小于 0.04 mm；1 MHz 探头因分辨率不足，全深度范围内 SNR 均低于 6 dB，无法满足检出标准；2.25 MHz + 32 阵元探头在近场可检出缺陷，但 40 mm 深度 SNR 仅 4.3 dB，远场检测能力低于 64 阵元配置。整体表明，2.25 MHz、64 阵元组合在信噪比与定位精度上表现最佳，可满足海缆接头绝缘层检测要求。

Table 1. Statistics of defect SNR and positioning error under different probe parameters

表 1. 不同探头参数下缺陷 SNR 与定位误差统计

探头参数	缺陷类型	检测深度/mm	SNR/dB	定位误差均值/mm	定位误差标准差/mm
5 MHz + 64 阵元	Φ 1 mm	10	22.3	0.08	0.03
5 MHz + 64 阵元	Φ 0.5 mm	10	15.7	0.11	0.04
5 MHz + 64 阵元	Φ 1 mm	20	13.5	0.12	0.05
5 MHz + 64 阵元	Φ 0.5 mm	20	7.2	0.15	0.06
5 MHz + 64 阵元	Φ 1 mm	40	—	—	—
2.25 MHz + 64 阵元	Φ 1 mm	10	20.5	0.07	0.02
2.25 MHz + 64 阵元	Φ 0.5 mm	10	14.1	0.09	0.03
2.25 MHz + 64 阵元	Φ 1 mm	20	15.3	0.08	0.02
2.25 MHz + 64 阵元	Φ 0.5 mm	20	8.4	0.10	0.03
2.25 MHz + 64 阵元	Φ 1 mm	40	12.1	0.11	0.04
2.25 MHz + 64 阵元	Φ 0.5 mm	40	5.8	0.16	0.05
1 MHz + 64 阵元	Φ 1 mm	10	4.2	0.25	0.08
1 MHz + 64 阵元	Φ 0.5 mm	10	2.1	0.31	0.09
2.25 MHz + 32 阵元	Φ 1 mm	10	16.3	0.10	0.04
2.25 MHz + 32 阵元	Φ 0.5 mm	10	9.5	0.13	0.05
2.25 MHz + 32 阵元	Φ 1 mm	40	4.3	—	—

3.5. 海缆接头缺陷的工艺验证

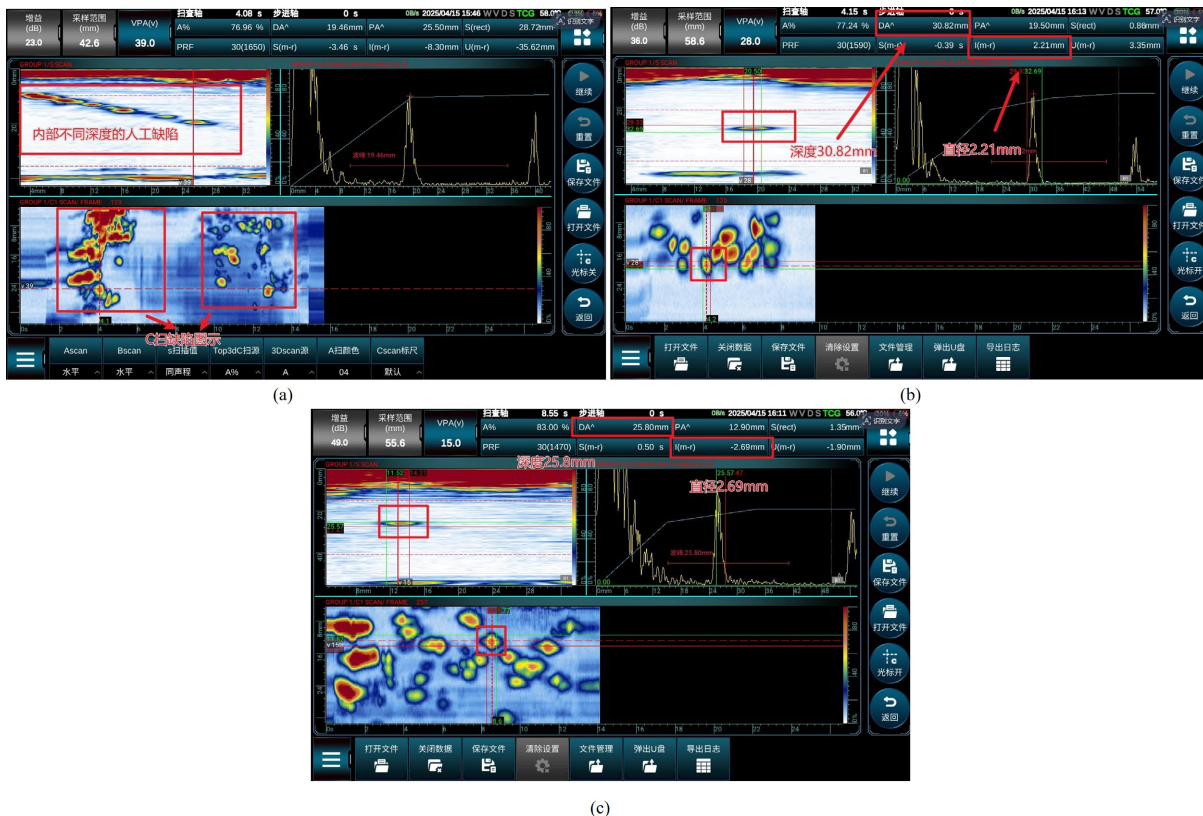


Figure 9. Validation results of XLPE submarine cable joint process

图 9. 交联聚乙烯海缆接头工艺验证结果

图 9 为采用 2.25L64-0.6 × 10 相控阵探头对含真实制造缺陷的交联聚乙烯(XLPE)海缆焊接接头进行全截面扫查的检测成像结果。从成像特征来看, B 扫图像可清晰呈现 XLPE 绝缘层的层状结构与界面轮廓, 声束传播路径完整、底波连续稳定, 真实缺陷 SNR 为 10.3~14.7 dB, 定位误差均值 0.12 mm, 标准差 0.04 mm。表明 2.25 MHz 频率与 64 阵元组合在厚截面高分子介质中具备充足穿透能量与良好声束指向性, 无明显声影遮挡与能量衰减失效问题。检测区域内不同埋深、不同当量尺寸的真实缺陷均形成可辨识的特征反射信号, 缺陷回波幅值稳定、位置明确, 无明显偏移与畸变, 验证了 2448 m/s 声速校准精度与探头聚焦法则设置的合理性, 缺陷定位误差满足 GB/T 29302 与电力电缆无损检测相关规范要求。

整体检测结果表明, 2.25 MHz 中心频率、64 阵元、0.6 mm 阵元间距的相控阵探头参数组合, 可适配 XLPE 材料高衰减特性与海缆接头厚绝缘结构, 在真实缺陷样件上实现全厚度覆盖、微小缺陷稳定检出、缺陷形态精准成像, 检测灵敏度、分辨率与可靠性均满足海上风电海缆焊接接头制造验收与现场质量控制要求。

4. 讨论

4.1. 最优参数与声学理论及文献对比

本研究确定 2.25 MHz 为 XLPE 绝缘检测最优频率, 与聚合物超声检测声学理论一致。XLPE 作为高衰减高分子材料, 超声衰减系数与频率近似成正比, 频率过高会导致远场能量急剧损耗, 频率过低则声

束扩散、分辨率下降。2.25 MHz 实现了穿透深度与空间分辨率的最佳平衡，与郭永玉等提出的高压电缆接头超声检测宜采用 2~3 MHz 低频探头结论一致，也符合卢超等关于高分子材料相控阵超声检测的频率选择原则。

64 阵元优于 32 阵元的核心原因在于相控阵声学原理：阵元数量越多，有效激励孔径越大，声束聚焦角越小、能量集中度越高，远场信噪比与定位精度显著提升。本研究中 64 阵元在 40 mm 深度仍可保持 $SNR \geq 12$ dB，而 32 阵元远场信噪比快速衰减，与鲍晓宇相控阵孔径与远场检测能力正相关的理论分析完全匹配。

4.2. 研究局限性与未来研究展望

本研究仍存在一定局限性，试验所用缺陷以平底孔、横通孔等规则人工缺陷及少量真实气孔为主，未覆盖海缆接头现场常见的微裂纹、界面分层、夹杂等不规则缺陷，缺陷定量模型的适用范围有限；检测过程仅在标准室温下开展，未考虑海水浸泡、温度波动、接头弯曲与多层界面等复杂工程工况，超声传播特性与检测结果易受实际环境干扰；同时采用手动扫查方式，检测稳定性与重复性受人为操作影响较大。

后续可进一步构建包含微裂纹、分层、夹杂等典型缺陷的海缆接头专用试块，完善多类型缺陷定量识别模型与评估体系；开展复杂工况下的检测特性研究，建立温度、水环境、弯曲应力等因素的超声信号补偿算法，提升工程适用性，同时优化探头与工艺参数，最终形成标准化检测流程与行业规范，为海上风电海缆全生命周期质量管控提供更全面的技术支撑。

5. 结论

(1) 经试验标定，交联聚乙烯材料纵波声速为 2448 m/s，采用该声速进行相控阵超声检测，缺陷定位误差 $\leq 0.5\%$ ，可满足海缆接头缺陷精准定位与定量检测要求。

(2) 经试验数据确定信噪比 $SNR = 20 \lg$ (缺陷/噪声)验收标准： $SNR \geq 6$ dB 可定性检出， $SNR \geq 12$ dB 可定量识别；优化确定 2.25 MHz、64 阵元、0.6 mm 阵元间距为最优探头参数，该组合在高衰减 XLPE 介质中兼顾穿透深度、声场聚焦与缺陷检出能力，可稳定识别 40 mm 深度内微小缺陷。

(3) 相控阵超声检测可有效检出海缆接头气孔、微裂纹等缺陷，克服 X 射线对面积型缺陷不敏感、检测周期长、存在辐射风险等不足，适用于海上风电海缆焊接接头工程检测。本文建立的试块校准方法与检测工艺，可为海上风电海缆制造、安装及运维阶段的质量管控提供可靠的技术支撑。

基金项目

中国华能集团科技项目(TP-24-TZK35)。

参考文献

- [1] 程晓青. 我国海上风电规模化发展路径分析[J]. 区域治理, 2025(9): 13-15.
- [2] 秦海岩. 加快开发海上风电, 打造沿海地区高质量发展引擎[J]. 风能, 2023(9): 1.
- [3] 周远翔, 刘睿, 张云霄, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 电工文摘, 2014(6): 1-14.
- [4] 张建民, 张洪亮, 谢书鸿, 等. 交联聚乙烯绝缘海底电缆在中国海洋风电建设中的典型应用和发展前景[J]. 南方电网技术, 2017, 11(8): 25-33.
- [5] 杜伯学, 李忠磊, 杨卓然, 等. 高压直流交联聚乙烯电缆应用与研究进展[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 344-354.
- [6] 张振鹏, 胡列翔, 赵健康, 等. 500kV 海缆工厂接头绝缘恢复过渡区形成过程及电树枝特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3413-3420.

- [7] 史润普. 高压海缆工厂接头绝缘层界面区微观结构及电树枝化行为研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
- [8] 常文治. 电力电缆中间接头典型缺陷局部放电发展过程的研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [9] 曹俊平, 蒋愉宽, 王少华, 等. XLPE 电力电缆接头缺陷检测关键技术分析与展望[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 87-97.
- [10] 魏钢. 高压交联聚乙烯电力电缆接头绝缘缺陷检测及识别研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [11] 郭永玉, 方春华, 周固, 等. 基于超声的高压电缆中间接头多层结构定位检测[J]. 现代电子技术, 2024, 47(18): 35-40.
- [12] 方春华, 周固, 饶迪, 等. 高压电缆附件铅封缺陷超声检测定量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(6): 125-134.
- [13] 卢超, 钟德煌. 超声相控阵检测技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [14] 陆铭慧, 潘文超, 刘勋丰. 基于衍射波的孔类缺陷超声相控阵定量方法研究[J]. 应用声学, 2015, 34(5): 385-390.
- [15] 鲍晓宇. 相控阵超声检测系统及其关键技术的研究[D]: [博士学位论文]. 清华: 清华大学, 2003.