激光增材制造轻合金构件缺陷的超声相控阵定量评价

田康康，赵　煜，张家祥

（河南机电职业学院，河南 新郑 451191）

摘　要　在激光增材制造轻合金构件中，气孔、未熔合及裂纹等缺陷严重制约其力学性能与服役可靠性。超声相控阵凭借电子扫查、多角度成像及全聚焦技术优势，已成为增材制造质量评价的重要手段。本文围绕缺陷典型特征，分析超声相控阵检测的适配策略，深入探讨缺陷定位、尺寸定量及类型识别的关键技术环节，梳理工程应用瓶颈，并对高频检测、多模态融合及智能化定量趋势进行展望，以期为相关人员提供参考。

关键词　激光增材制造；轻合金；超声相控阵；缺陷定量；无损评价

中图分类号：TG146.2　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.024

0　引言

激光选区熔化（SLM）这类增材制造技术是通过逐层熔化粉末来实现轻合金复杂构件近净成形的，在航空航天支架、汽车轻量化结构以及精密模具等领域有着广泛的应用。AlSi10Mg、Ti-6Al-4V等轻合金由于具备高比强度和良好耐蚀性而成为首选材料，不过工艺本身固有的快速熔化与凝固特征使得气孔、未熔合以及裂纹等缺陷难以避免，这严重削弱了构件的静载强度与疲劳寿命，甚至会成为灾难性失效的诱因[1]。

超声相控阵是通过多阵元探头的电子延时控制来实现声束偏转与动态聚焦的，配合扇形扫查（S-scan）、全聚焦成像（TFM）等模式，能够直观呈现缺陷的空间位置与形态，显著提升检测效率。增材制造轻合金的粗晶组织、声学各向异性以及高表面粗糙度，让常规方法在检出灵敏度与定量精度方面面临新的挑战[2]。如何建立可靠的超声相控阵定量评价体系，把“检得出”提升为“定得准”，是当前制造检测领域的核心议题。

1　激光增材制造轻合金的典型缺陷特征

1.1　气孔、未熔合与裂纹的形成机理

气孔的产生主要是源于熔池动力学不稳定和气体析出情况，激光和粉末相互作用会形成匙孔，当能量密度过高或者扫描速度过快时匙孔会坍塌，蒸汽泡滞留凝固前沿从而形成气孔，此外粉末吸附水分或者保护气氛杂质在熔池中析出，凝固之后会形成弥散球形气孔，这类缺陷的内壁较为光滑，对静载的影响有限，却是疲劳裂纹稳定萌生源[3]。

未熔合是能量输入不足所导致的层间冶金结合不良状况，当激光功率偏低、扫描间距过大或者层厚设置不当时，当前熔池无法充分重熔下层表面，进而形成扁平状或长条状的层间缺陷，其本质为面状不连续且充当宏观裂纹角色，应力集中系数高对构件力学性能危害最为严重。

裂纹归因于极端热梯度和残余应力的耦合作用，轻合金热导率高、激光反射率大使得熔池附近温度梯度陡峭，热收缩受约束后形成高残余拉应力，AlSi10Mg凝固末期晶界处形成的低熔点Al-Si共晶液膜在拉应力下极易产生沿晶热裂纹，Ti-6Al-4V则因工艺窗口狭窄冷却过快时易形成凝固裂纹，裂纹尖端尖锐、走向不规则直接威胁结构完整性。

1.2　缺陷分布规律与超声响应关联

增材制造缺陷分布呈现和工艺坐标强相关的空间规律，气孔一般沿建造方向存在下密上疏的密度梯度，未熔合严格依附层间界面且延展方向多与建造方向垂直，裂纹常萌生于悬垂支撑界面或薄壁转角等应力集中区并可沿晶界贯穿多层（见表1）。

上述规律直接决定超声响应特征，气孔近似各向同性散射体在扇形扫查图像中表现为幅值均匀的点状特征，未熔合具有显著镜面反射特性，仅当声束接近垂直于其平面法向时回波最强，偏离后信号急剧衰减，这种角度选择性是识别未熔合的关键依据。裂纹尖端曲率极小，除镜面反射外还产生明显衍射波，在全聚焦图像中常表现为双曲线弧或尖端亮斑[4]。

作者简介：田康康（1988-），男，硕士研究生，助教，研究方向：智能制造。

此外，增材制造轻合金的柱状晶外延生长组织导致声波传播速度各向存在差异，引起缺陷定位的系统偏移，晶界散射使本底噪声显著高于锻件，压缩了微缺陷识别空间，原始成形表面粗糙度通常在 Ra 8 μm～20 μm 范围，远高于机加工表面不规则轮廓，造成耦合剂层波动与界面杂波，严重干扰近表面缺陷识别。

表 1 激光增材制造轻合金典型缺陷及其超声响应特征

缺陷类型	主要形成机理	典型形态特征	常见分布规律	超声响应特点	检出难点
气孔	匙孔坍塌、保护气氛残留、粉末吸氢析气	球形或类球形，内壁光滑	随机分布，建造方向存在密度梯度	近似全向性散射，回波幅值稳定，角度依赖性弱	微气孔信噪比低，密集气孔回波重叠
未熔合	能量密度不足、层厚过大、扫描间距不当	扁平状、长条状或不规则面状	多沿层间分布，延展方向垂直于建造方向	强镜面反射，角度选择性显著，仅在特定入射角回波最强	取向不利时声束几乎无反射，层间位置易与表面盲区重叠
裂纹	热应力集中、低熔点共晶液膜、凝固收缩	不规则走向，尖端尖锐	沿晶界或应力集中区萌生，可贯穿多层	尖端衍射波明显，图像边缘锐利	闭合裂纹或氧化填充裂纹反射系数低，粗晶噪声干扰大

2 超声相控阵检测原理与增材构件适配性

2.1 相控阵声场调控机制

超声相控阵依靠控制多阵元探头激发延时达成声束偏转与聚焦，不依靠机械移动就能在扇形区域内完成多角度投射。S-scan 在一次脉冲当中采集多角度回波，能够快速构建出截面视图，适合用来发现取向未知的缺陷，TFM 采用全矩阵采集以及逐像素相干叠加的方式，实现全区域动态聚焦，克服了常规相控阵在聚焦区外分辨力下降的问题，对于随机分布且尺寸大小不一的缺陷群具备更高成像精度[5]。不过 TFM 分辨力是由阵元间距、波长以及声速共同决定的，轻合金波长比较长，若要分辨微小缺陷就需要优化阵元排布，在工程应用中需要在分辨力与效率之间取得平衡。

2.2 针对增材制造构件的检测适配策略

频率选择是首要考量。增材制造轻合金柱状晶粗大且取向一致，高频超声波晶界散射衰减严重。对 10 mm～50 mm 厚度范围的 AlSi10Mg 或钛合金构件，通常选用 5 MHz ～ 10 MHz 探头作为折中，必要时对近表面辅以高频局部复验。

耦合方式需适应原始表面状态。水浸耦合通过稳定水层规避粗糙度影响，但需要配套扫查机构；局部研磨将检测区域粗糙度控制在可接受范围，现场适应性更强。近表面盲区抑制可采用双晶阵列（TRL）一发一收模式避开始波干扰，或借助水浸聚焦将焦点设置在表层以下 1 mm～2 mm 区域。尤为关键的是，增材构件声速各向异性显著，必须在检测前采用同工艺参考试块分别测定平行与垂直建造方向的纵波声速并输入系统，否则深度定位误差可达数毫米，定量评价失去意义。

3 缺陷定量评价的关键技术环节

3.1 缺陷定位与尺寸定量方法

定位精度在很大程度上高度依赖声速标定，增材制造轻合金柱状晶取向排列致使声波沿建造方向与垂直方向声速差异能达到百分之几，要是直接套用锻件声速参数，深度定位就会产生系统性偏差并且会随深度不断累积。在尺寸定量方面，传统 -6 dB 法假定缺陷为理想平面反射体，对于边缘参差不齐的未熔合缺陷存在显著局限性，定量结果可能偏离实际尺寸百分之三十以上。TFM 通过全域动态聚焦来改善声束均匀性，配合阈值分割或边缘提取算法能够更精确地描绘缺陷轮廓，然而当缺陷尺寸接近或小于波长时，衍射效应会使边界变得模糊，定量结果反映的是声学等效尺寸而非几何真实尺寸，需要在报告中对其予以区分。

3.2 基于成像特征的缺陷类型识别

综合 A 扫、B 扫、C 扫、S 扫以及 TFM 多视图信息之后不同缺陷图像特征逐渐显现，气孔在 C 扫上表现为孤立圆形斑点且边界清晰，S 扫中回波随角度变化平缓，未熔合呈现强角度选择性在扇形图像中表现为随角度出现或消失的线段状特征，裂纹图像边缘锐利 TFM 模式下尖端常伴有衍射双曲线亮纹。

图像后处理对于提升识别度来说至关重要，针对高背景噪声小波变换时频域去噪可在保留缺陷边缘同时抑制晶界散射噪声，背景均衡算法可补偿声束扩散与材料衰减造成的亮度不均。在智能化方向，研究者尝试从相控阵图像中提取纹理特征、灰度共生矩阵等参量，结合支持向量机或卷积神经网络实现自动分类，不过目前工程化应用仍受制于标注数据集稀缺，缺陷

真实三维形态验证需借助金相切片或显微CT，获取成本高且周期长，模型泛化能力尚待提升。

3.3 定量精度控制与标定

定量可信度高低取决于全链路精度控制情况，系统标定不能单纯依赖通用标准试块，不同设备的激光光斑、扫描策略以及热历史会致使同牌号合金声学性能存在设备依赖性。应采用与待检构件同批次粉末、同台设备、同工艺参数制作参考试块，并且加工平底孔、横通孔或者线切割槽作为人工缺陷，以此制作距离—波幅曲线（DAC）来建立灵敏度基准。

增益补偿的作用是抵消材料衰减和表面耦合差异，利用试块底面多次回波或者已知人工缺陷幅值反馈能够实现分段增益补偿，从而让相同当量缺陷在不同深度、不同表面状态下呈现可比回波幅值。在聚焦法则优化方面，对于厚度变化大的构件要采用分段聚焦策略，在浅、中、深区域分别设置最优聚焦点，以此缓解近场盲区与远场扩散的矛盾。在上述措施协同作用之下，实验室条件下毫米级缺陷长度定量误差可控制在 ±1 mm至 ±2 mm范围，深度误差大约为 ±0.5 mm，基本能够满足工程质量分级需求。

4 缺陷定量评价的现存瓶颈与发展趋势

4.1 工程应用中的主要瓶颈

微缺陷检出极限是当前面临的首要瓶颈问题，亚表面微气孔以及宽度不足五十微米的层间未熔合情况，其回波能量常常会淹没在晶界散射噪声与电子噪声基底当中，即便采用高增益也会面临信噪比不足的困境，这类缺陷在疲劳载荷作用下是早期裂纹的萌生源，航空级构件对此种情况尤为敏感，而现有检测能力还难以做到全面覆盖。

表面状态制约同样突出。原始表面粗糙度不仅导致耦合不稳，更直接产生界面杂波与表面波转换效应，使近表面区域有效检测困难。若机加工打磨改善耦合，又可能破坏尺寸精度甚至去除表层临界缺陷，形成“检前破坏”。

标准体系缺失是存在的深层瓶颈，现行超声检测标准以锻造、铸造或焊接件作为对象，其验收等级并不适用于增材制造缺陷的形态特征与分布规律。微气孔允许量、未熔合允许尺寸与载荷方向的关联等问题缺乏标准依据，检测结果难以直接转化为合格判定，这阻碍了检测技术在生产线上的闭环应用。

4.2 技术发展方向

高频与超高频相控阵是提升微缺陷分辨力的直接有效路径，采用二十兆赫兹以上高频探头配合水浸聚焦，能将分辨率推进至亚毫米甚至微米量级，有望实现亚表面微气孔早期捕捉，但需通过自适应滤波与信号累积改善远场信噪比。

激光超声与相控阵接收融合为在线检测提供全新思路，激光脉冲在表面激发宽带超声无需耦合介质，从根本上消除表面粗糙度制约，且可适应高温成形环境进行在线监测，将激光激发与相控阵接收结合，既能保持成像优势又突破耦合限制，特别适合逐层质量监控的闭环控制。

智能化定量评价是当下重要的发展趋势，基于深度学习的端到端方法可从原始阵列数据中直接学习缺陷边界与类型特征，减少对传统物理模型的依赖，随着数字化制造发展，工艺仿真预测的缺陷分布概率与超声实测结果可进行数据融合，利用数字孪生框架缩小搜索空间，提升定量效率与置信度。

标准建设层面建立增材制造轻合金专用超声相控阵检测标准迫在眉睫，该标准应涵盖参考试块制备规范、各向异性声速标定程序、缺陷定量误差容限及面向不同服役工况的验收等级，形成从粉末到构件的全流程无损评价规范体系。

5 结束语

激光增材制造轻合金构件质量控制需依靠超声相控阵技术不断精进，从工艺缺陷声学机理解析到检测参数系统适配，再到定量评价链路精度控制，每一个环节的突破都直接关系到构件工程化可靠应用。未来，高频检测手段、激光超声融合技术、智能化定量算法与专用标准体系协同发展，会为轻合金增材制造产业构建起坚实的质量屏障，让该技术在高端装备领域规模化落地更稳健可信。

参考文献：

[1] 江奕良,孟宪凯,姚喆赫,等.钛合金激光复合增材制造技术研究现状[J].激光与光电子学进展,2026,63(01):82-97.
[2] 黄西娜,王登,周旌旗,等.机器学习在增材制造轻合金疲劳寿命预测中的应用[J].中国有色金属学报,2025,35(05):1549-1564.
[3] 梁文杰,董强胜,章晓波.增材制造铝合金组织结构与性能研究进展[J].材料导报,2025,39(19):207-221.
[4] 马志远,崔振,康达,等.3D打印镍基合金亚毫米级缺陷多分辨低频超声C扫描定量检测[J].机械工程学报,2025,61(04):24-31.
[5] 任国鑫,崔泽琴,丁正祥,等.殷瓦合金激光增材制造研究进展[J].机械工程学报,2024,60(11):259-272.