

文章编号: 1001-5078(2024)03-0364-09

· 激光应用技术 ·

基于激光超声的钛合金裂纹合成孔径 组合成像研究

陈涛¹, 张洪伟¹, 闫锡超¹, 袁俊²

(1. 北京石油化工学院, 机械工程学院, 北京 102617; 2. 北京翔博科技股份有限公司, 北京 101312)

摘要: 针对钛合金内部疲劳裂纹激光超声成像问题, 提出了一种基于合成孔径聚焦技术的多模式组合成像方法。采用扫描激光源法, 通过提取不同探测位置的时域模式回波信号, 根据 B-scan 图中反射纵波与反射横波的幅值分布, 将裂纹回波时域特征进行分区重组, 对其进行反演聚焦完成了对内部裂纹的识别及图像重构。使用 COMSOL Multiphysics 对钛合金板材内部裂纹成像过程进行数值模拟并通过 MATLAB 图像算法验证了其可行性。与单一模式波成像相比, 采用反射纵波与反射横波组合的成像方法有效减少了伪像, 实现了对内部裂纹的定位及图像重构, 重构裂纹位置 X 轴与 Y 轴相对误差均在 3% 以内。

关键词: 合成孔径聚焦技术; 钛合金; 方向性; 内部裂纹

中图分类号: TG115.28; TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.03.006

Synthetic aperture combination imaging of cracks in titanium alloy based on laser ultrasonics

CHEN Tao¹, ZHANG Hong-wei¹, YAN Xi-chao¹, YUAN Jun²

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China;
2. Beijing Sembo Technology Co., LTD, Beijing 101312, China)

Abstract: In this paper, a multi-modal combination imaging method based on synthetic aperture focusing technique is proposed to address the laser ultrasonic imaging problem of internal fatigue cracks in titanium alloy. The scanning laser source method is employed to extract time-domain mode-echo signals from different detection positions. By analyzing the amplitude distribution of reflected longitudinal waves and reflected shear waves in the B-scan image, the temporal characteristics of crack echo signals are partitioned and recombined. Furthermore, inversion focusing is applied to accomplish the recognition and image reconstruction of internal cracks. The feasibility of this approach is demonstrated by conducting numerical simulations of the internal crack imaging process in titanium alloy plates using COMSOL Multiphysics, and its viability is further validated using MATLAB image algorithms. Compared to single-mode wave imaging, the imaging method that combines reflected longitudinal wave and reflected shear waves effectively reduces artifacts, enabling accurate localization and image reconstruction of internal cracks. The relative errors of the reconstructed crack positions in the X-axis and Y-axis are both within 3%.

Keywords: SAFT; titanium alloy; directivity; internal cracks

基金项目: 北京高校高精尖学科建设机械工程项目 (No. 21010221002); 国家级大学生创新创业计划项目 (No. 2022J00180) 资助。

作者简介: 陈涛 (1999 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为激光超声检测技术研究。E-mail: 1873221600@qq.com

通讯作者: 张洪伟 (1978 -), 男, 博士, 副教授, 研究方向为数字化设计及制造技术, 表面强化及抗疲劳制造技术等。

E-mail: zhanghw@bipt.edu.cn

收稿日期: 2023-05-23; **修订日期:** 2023-06-24

1 引言

钛合金材料常用于工作环境恶劣的航空发动机的涡轮叶片,在其工作过程中经常受到高温高压及金属疲劳等影响,极易萌生很多细微裂纹^[1-2],若在裂纹早期没有及时进行检测和维护,其可能会持续扩展并致使整个钛合金结构的瞬间灾难性失效,因此迫切需要对钛合金材料在其使用过程中可能出现的裂纹进行检测及定位。激光超声检测具有宽频带、多模态、非接触等特点,检测过程不受构件外形的制约,是一种极具发展和应用潜力的无损检测技术。目前研究中通过激光激发表面波对材料表面裂纹进行定量表征^[3-5]的检测理论及技术较为成熟,并逐渐应用于工程检测中。但在材料检测内部裂纹时,还存在提取超声体波裂纹特征困难及无法定量表征等问题,虽然可以通过优化激发功率及检测精度来突显裂纹信号,但是由于热弹效应及实验设备的限制,信噪比的提升十分有限^[6-8]。利用图像重构算法对裂纹进行识别及定位也是一种行之有效的方法。

目前应用较为广泛的激光超声重构成像算法有全聚焦成像法(Total Focusing Method)^[9-11]和合成孔径聚焦成像技术(Synthetic Aperture Focusing Technique)^[12-14]等。虽然通过全聚焦成像技术能够对材料内部裂纹进行较好的图像重构,但是其所需处理的数据量庞大,而 SAFT 能够在不损失深度信息的情况下通过合成算法提高重构分辨率,所需的数据量也仅与传统激光超声 B-scan 相同。目前对于 SAFT 的研究主要是扫查方式的选择及合成算法优化,Lorraine 等人^[15]首次将 SAFT 技术应用到激光超声检测中,采用同点激发并探测的扫查方式完成了对材料表面及内部裂纹图像重构;在此基础上,Blouin 等^[16]利用此方法完成了对内部裂纹的重构成像,但是这种扫查方式中激励激光源会对探测信号造成极大影响;为了解决该问题,李俊燕等^[17]提出了一种激励光源与检测光源分离的 SAFT 扫查方式,通过在材料表面固定探测点,利用激光线源扫查的方式实现了对内部裂纹的检测。在算法优化上,Levesque^[18]等针对 SAFT 技术提出了时域和频域两种算法,提高了空间图像重构的分辨率。倪辰荫等^[19]利用激光超声的宽频带生成特性在声波信号中实现了频带范围选择,开发了频域 SAFT 算法。但是在上述研究中 SAFT 对裂纹重构成像时如果采用单一模式波进行反演叠加,可能会在计算过程中包含有其他模式波的幅值片段导致重构图

像中伪像的形成。

为解决此问题,本文提出了一种基于 SAFT 的多模式波组合成像方法,采用 COMSOL Multiphysics 软件建立了热弹激光超声模型,通过对钛合金材料内部多种模式波传播特性及方向性进行分析,利用扫描激光线源法,根据 B-scan 图中反射纵波与反射横波的幅值分布,在 MATLAB 合成叠加图像算法中选择不同反射回波特征曲线来对钛合金内部进行组合重构成像,在保证重构分辨率的同时极大减少激光超声成像中的伪像影响,实现了对内部裂纹的定位及图像重构。

2 SAFT 多模波组合成像法

SAFT 最早源于合成孔径雷达,其成像原理是通过小孔径超声换能器的离散信号通过延时叠加(DAS)的方法对脉冲回波信号进行聚焦成像,从而实现来模拟大孔径阵列的目的^[20]。其扫查原理如图 1(a)所示,超声换能器沿待测材料表面移动,每隔步长 d 发射一次超声波,同时接收裂纹的反射及反射信号,其中 L_0 为激发点到裂纹的距离,也是探测点与裂纹的距离。通过对接收到的信号进行延时叠加,再逐点进行反演合成得到物体内部裂纹的聚焦成像^[15]。但使用该方法需将激励激光和探测点重合,探测信号容易淹没在激励激光引起的热膨胀变形中,为后续的重构图像的数据处理造成干扰。

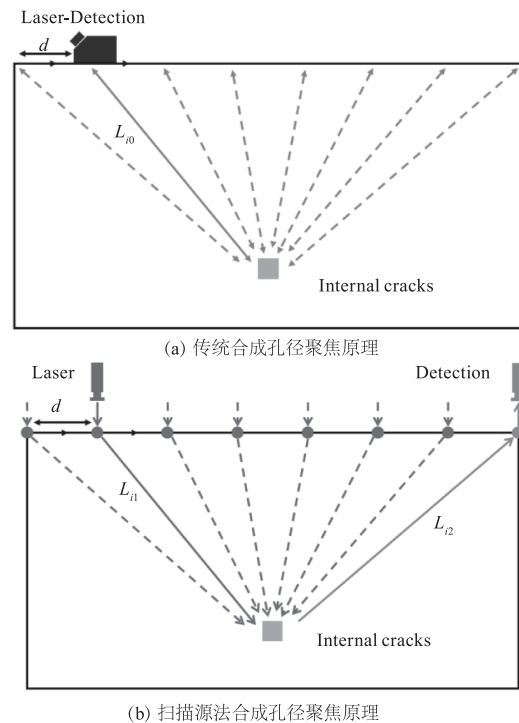


图 1 合成孔径聚焦成像原理图

Fig. 1 Schematic diagram of synthetic aperture focusing imaging

而采用扫描激光光源^[17]扫查方式可以很好地解决这个问题。其扫查原理如图 1(b)所示,固定探测点不动,选择扫描激励的方式在钛合金表面上以 d 为步长完成扫描,以第一个激励点为原点在剖面建立笛卡尔坐标系,将成像区域划分为若干的像素块,每一个像素块颜色由一个聚焦点聚焦幅值表示,设每一个聚焦点的坐标为 (a, b) ,以第 i 次激励为例,若在聚焦点 (a, b) 处出现裂纹,那么在探测点接收到的时域信号中就会存在一个由缺陷引起的反射波峰,可根据第 i 次激发超声波在钛合金材料内部与裂纹作用后传播的总声程与纵波波速与横波波速可求解出此时裂纹回波波峰出现的时间 t_i :

$$t_i = \frac{\sqrt{(a - i \times d)^2 + b^2}}{v_m} + \frac{\sqrt{(x_D - a)^2 + b^2}}{v_n} \quad (1)$$

其中, v_m 为所选激光激发模式波传播到裂纹位置的波速,其中 $m = S$ 或 L 表示激发模式波为横波或纵波; v_n 表示与裂纹作用后的模式转换波波速; $n = S$ 或 L 表示模式转换为横波或纵波。在钛合金材料中,激光激发的纵波波速 C_L 、横波波速 C_S 可参考式(2)及式(3):

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \sqrt{\frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}}} \quad (2)$$

$$C_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \sqrt{\frac{1}{2(1 + \sigma)}}} \quad (3)$$

其中, E 表示弹性模量; ρ 表示密度; σ 表示泊松比。然而激光在物体表面会同时激发出多种模式的超声波,在检测内部裂纹时表面波信号可能与反射回波信号发生混叠,影响成像的质量和精度。所以需要将无裂纹检测得到的数据集作为超声波背景场减去^[21],采用扫描激光光源扫查法的合成孔径聚焦原理可用式表示为:

$$Q(a, b) = \sum_{i=1}^N S(t_i) \quad (4)$$

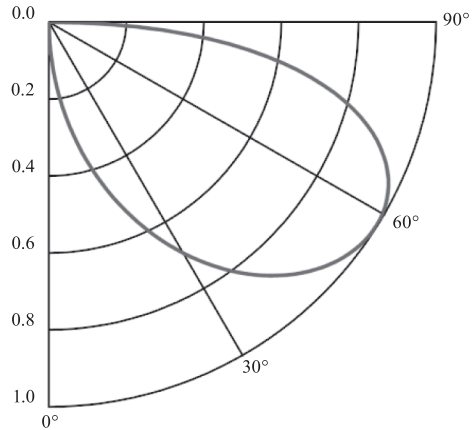
其中, $S(t_i)$ 为差分后的时域数据,然后将激励扫描 N 次得到波峰峰值进行反演叠加就可以得到该聚焦点的聚焦幅值。以此类推,对成像区域内不同位置的点 (a_i, b_j) 进行聚焦计算,便可以得到关于钛合金内部裂纹的二维数组 Q_{ij} ,运用 MATLAB 软件制成二维云图,进而完成聚焦区域的图像重构。然而和传统超声不同,激光超声检测中利用热弹机制采用激光激发的多种模式波是具有一定的方向性,

在不考虑激光源的尺寸和热传导效应时,可以将激励热弹源看作是作用在表面的点扩散源,远场波场方向性则可以表示为^[22]:

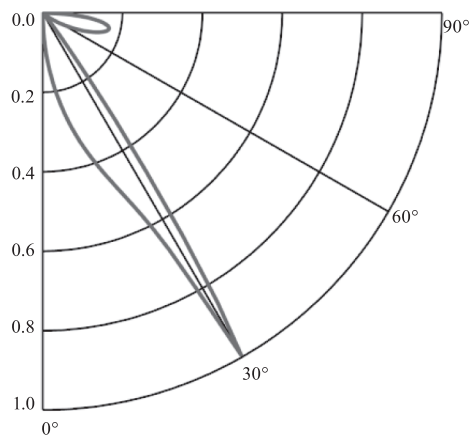
$$A_L(\theta_g) \propto \frac{\sin 2\theta_g \sqrt{k^2 - \sin^2 \theta_g}}{(k^2 - 2\sin^2 \theta_g)^2 + 4\sin^2 \theta_g \sqrt{(1 - \sin^2 \theta_g)(k^2 - \sin^2 \theta_g)}} \quad (5)$$

$$A_S(\theta_g) \propto \frac{k \sin(4\theta_g)}{k(1 - 2\sin^2 \theta_g)^2 + 4\sin^2 \theta_g \sqrt{(1 - \sin^2 \theta_g)(1 - k^2 \sin^2 \theta_g)}} \quad (6)$$

其中, A_L 和 A_S 分别表示横波和纵波的振幅; θ_g 表示传播方向与表面法向的夹角。根据(5)式及(6)式可以计算出钛合金材料中纵波与横波的方向性,如图 2 所示。纵波在钛合金材料中辐射区域较广,幅值呈现水滴状分布,在 60° 时达到最大,而横波辐射区域较窄,幅值呈现双瓣分布且主副瓣幅值差较大,幅值集中于主瓣,在 30° 时达到最大。



(a) 激光激发纵波方向性图



(b) 激光激发横波方向性图

图 2 钛合金中纵波与横波的方向性图

Fig. 2 Directionality of longitudinal and transverse waves in titanium alloys

在裂纹作用后的声场分布中,反射及模式转换波也具备方向性特征。当声波沿一定角度传播到两种介质的

交界处时,根据声波的传播性质,会在交界处发生反射及模式转换现象。通过入射波模式及材料参数等,可得到反射及转换模式波方向性分布,如图3所示^[23]。

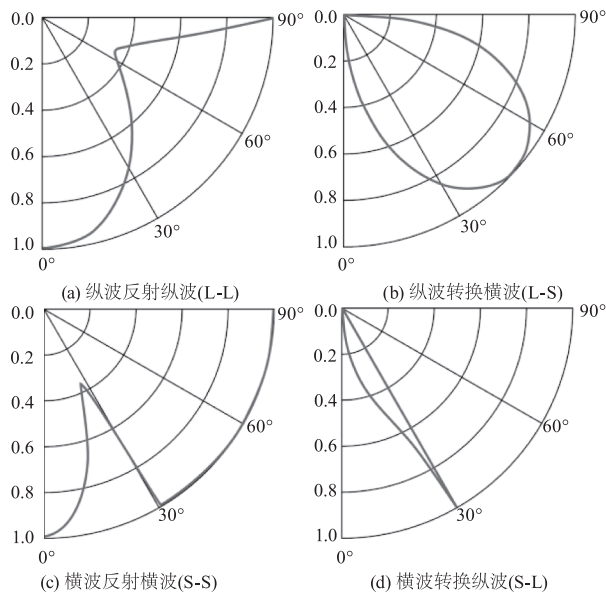


图3 不同模式反射波方向性

Fig. 3 Directionality of reflected waves in different modes

由于入射模式波的方向性及反射模式波的方向性导致表面探测点接收的回波幅值信号在同深度方向呈现不均匀分布,在 B-scan 图中显示结果是裂纹模式回波曲线的幅值不连续,如果采用单一裂纹模式波反演叠加可能会导致合成孔径聚焦成像分辨率降低,而 L-L 波与 S-S 波拥有较广的辐射范围,将两种模式波进行组合成像,不但提升了内部裂纹图像的重构质量,而且还极大减少了伪像的出现。

扫描激光光源法在检测过程中激光光源与探测点属于单发单收的,根据声学互易定理^[24]中声波传播路径可逆,在交换激励和接收位置后测得的信号是相同的。所以在仿真中可以等效为单点激励,多点探测。仿真模拟原理如图4所示。

3 钛合金激光超声数值模拟

3.1 激光超声有限元理论模型

材料表面吸收激光能量后,温度迅速升高引起表层局部的体积膨胀。当脉冲激光的脉宽是纳秒量级时,作用在样品表面的时间很短,因此可忽略与外界的热对流与热辐射效应。由于在热弹机制下激发超声,温度变化范围很小,所以可以忽略热力学参数随温度变化的情况,只需考虑激光能量与材料的热传导,在二维笛卡尔坐标系中,热传导方程可表示为:

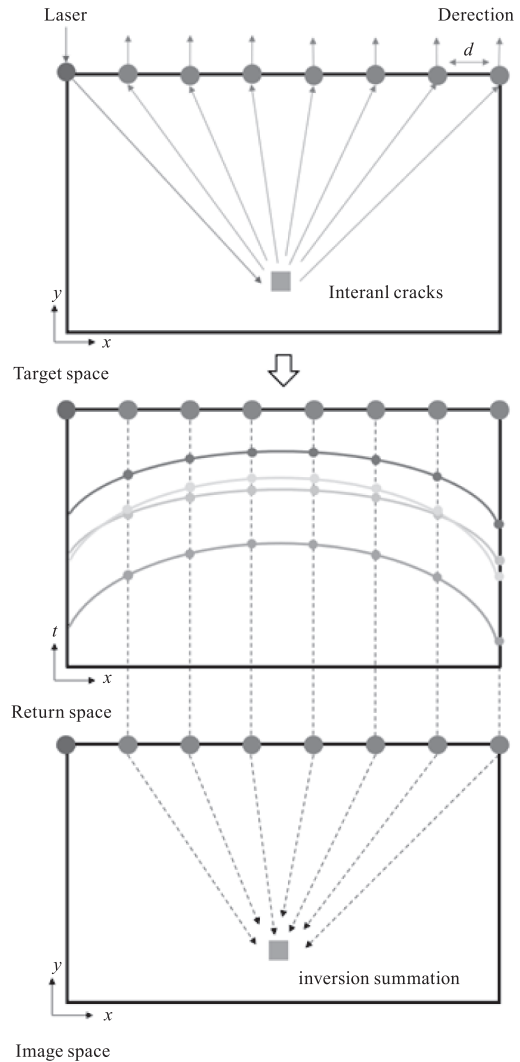


图4 扫描源法合成孔径成像示意图

Fig. 4 Schematic diagram of synthetic aperture imaging using scanning source method

$$\begin{aligned} \nabla^2 T(x, y, z, t) - \frac{1}{k} \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \\ = - \frac{Q(x, y, z, t)}{K} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $T(x, y, z, t)$ 为物体内部的温度场分布; $Q(x, y, z, t)$ 表示单位体积的热源在单位时间内的生热; K 为物体的热导率; k 为热扩散系数。对于金属材料而言,激光能量的能量转换只在金属表层发生,因此可以看作是材料表层的边界条件。在数值模拟中采用二维模型,则模型的上表面边界条件可表示为:

$$-k \left. \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right|_{y=0} = Q(x, t) = I_0 (1 - R) \exp\left(-\frac{x^2}{R_0^2}\right) \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) \quad (8)$$

其中, I_0 表示激光源的峰值功率密度; R 为钛合金的

反射率; R_0 表示激光的光斑半径; t_0 表示激光的上升时间。由于瞬态温度场的温升不均匀, 在材料内部产生应力、应变, 此时由热膨胀引起了瞬态位移场, 满足热弹耦合方程:

$$\mu \nabla^2 U + (\lambda + \mu) \nabla \nabla U - \alpha(3\lambda + 2\mu) \nabla T = \rho \ddot{U} \quad (9)$$

其中, U 和 T 分别表示材料位移矢量和温升; λ 和 μ 为材料拉梅常数; α 为材料热膨胀率。

3.2 平面热力模型建立

采用有限元方法进行数值模拟。以钛合金材料为研究对象, 根据热弹激光超声的激发原理, 建立激光超声热-结构耦合模型。钛合金材料参数见表 1。在二维钛合金板 (15 mm × 7.5 mm) 内部设置裂纹为边长为 0.5 mm 的正方形孔洞, 裂纹中心坐标为 (7.5 mm, -5.5 mm), 如图 5 所示。设置一束激光垂直入射于钛合金材料的上表面左端点, 激励激光参数见表 2, 根据高斯热源式(8)等效的激光函数解析如图 6 所示。将两侧及底部设置为“低反射边界”。激发点和探测区如图所示, 探测区域步长为 0.1 mm, 共计 151 个探测点。

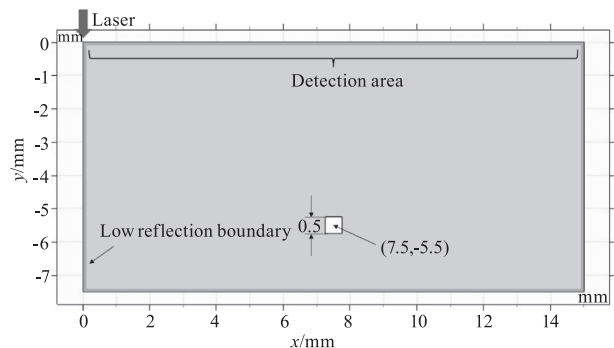


图 5 有限元激光超声模型

Fig. 5 Finite element laser ultrasound model

表 1 钛合金材料的参数

Tab. 1 Parameters of titanium alloy materials

Parameter	Value
Thermal conductivity / (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	15.24
Coefficient of thermal expansion / K ⁻¹	9.41 × 10 ⁻⁶
Young's modulus / Pa	1.1 × 10 ¹¹
Poisson's ratio	0.34

表 2 激励激光参数

Tab. 2 Excitation laser parameters

Parameter	Value
Energy density / (W · m ⁻²)	1.25 × 10 ⁹
Surface absorption rate	0.1
Rise time/ns	14
Beam radius / μm	30

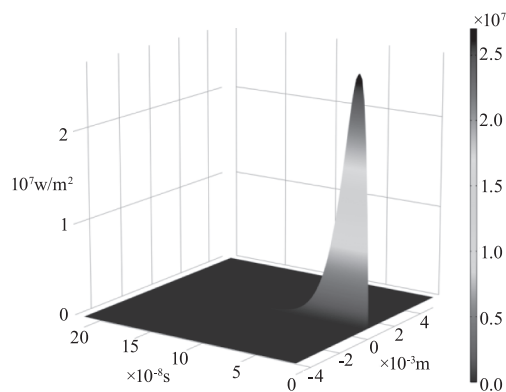


图 6 激励激光热源函数

Fig. 6 Excitation laser heat source function

为保证数值仿真结果的准确性, 其关键就在积分时间步长和网格单元尺寸的选取。通常, 最大网格尺寸应不大于弹性波波长的 25% 才能维持声波不间断地在网格单元间进行传播以及符合激光作用后弹性波传播的仿真精度要求。有限元法钛合金二维模型中超声波的积分时间 Δt 及最小波长 λ_{\min} 可以参考下式:

$$\lambda_{\min} = \frac{\pi t_0}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

$$\Delta t = \frac{1}{20 f_{\max}} \quad (11)$$

其中, f_{\max} 为激发超声波的最高频率。选取合理的时间积分步长以及网格划分密度, 有利于缩短仿真求解过程, 增加整体模型计算效率。在总体考虑了仿真精度及求解量的情况下, 网格采用自由四边形整体均匀细化, 网格尺寸设置为 5 μm, 时间步长设置为 10 ns, 网格划分见图 7。

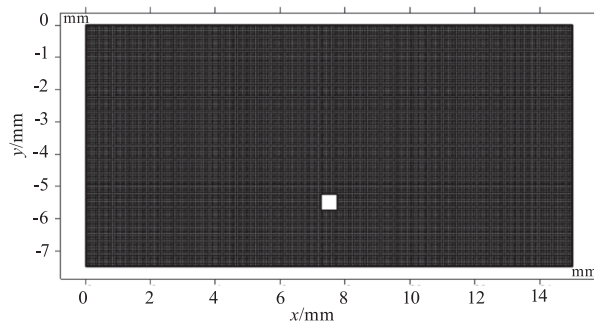


图 7 钛合金板材网格划分

Fig. 7 Mesh division of titanium alloy sheet

4 超声波传播特性分析及合成孔径聚焦裂纹识别

图 8 为激光激发的多种模式波波形, 可观察到超声波包括表面波 (R)、横波 (S) 和纵波 (L), 不难

发现纵波扩散速度最快且距离最远,横波出现在纵波的后面,能量略弱于横波,表面波传播速度与横波相近,紧跟着横波出现,但是其能量要远远胜于前面两种波形。

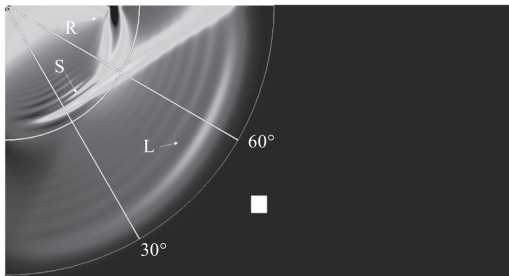


图 8 激光激发的模式波

Fig. 8 Mode wave excited by laser

表面波虽然幅值较高,但只能在表面传播,主要能量集中于 90°,适合用于检测表面及亚表面的裂纹,而横波(S)及纵波(L)则可以在钛合金材料内部传播。从图 8 中可以看到横波(S)的主要能量集中于 30°方向朝材料内部传播,纵波(L)辐射较广,最大幅值方向为 60°,与理论一致。这两种体波在与裂纹作用后均会产生反射波和模式转换波。如图 9 所示,纵波在 2000 ns 时碰触裂纹后会衍生出反射纵波(L-L),部分横波会转化为纵波(L-S);3750 ns 时横波在碰触裂纹后产生反射横波(S-S),部分纵波转化为横波(L-S)。而纵波在钛合金材料中传播的速度根据式(2)计算为 5250 m/s,横波波速根据式(3)计算为 2900 m/s,因此在固定激励点的情况下,表面同一探测点接收的信号中 L-L 波最先出现,之后是 L-S 波及 S-L 波,最后是 S-S 波。

为了进一步研究不同模式波到达时间与探测点位置关系,当钛合金表面激发探测方式为“单点激发-多点探测”时,可将式(1)改写为:

$$\frac{(t_i - \sqrt{(x_d - x_D)^2 + y_d^2/v_m^2})^2}{v_n^2/y_d^2} - (x_L - x_d)^2/y_d^2 = 1 \tag{12}$$

式中, x_L 为激励点位置; x_D 为探测点位置; (x_d, y_d) 为裂纹位置,当在样品表面固定激励点激发超声波时,反射波峰抵达时间 t_i 是关于不同位置探测点 x_D 的双曲线型函数。在表面完成扫查后探测到的裂纹反射或模式转换波将在横轴为探测点位置,纵轴为时间 t 的 B-scan 扫描图中呈现为双曲线其中的一条曲线,如图 10 所示。

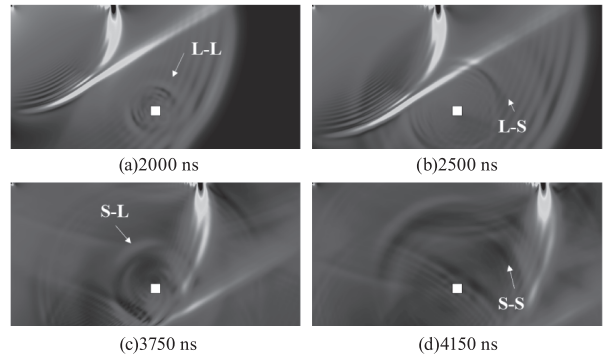


图 9 不同时刻超声波声场分布图

Fig. 9 Ultrasonic sound field distribution at different times

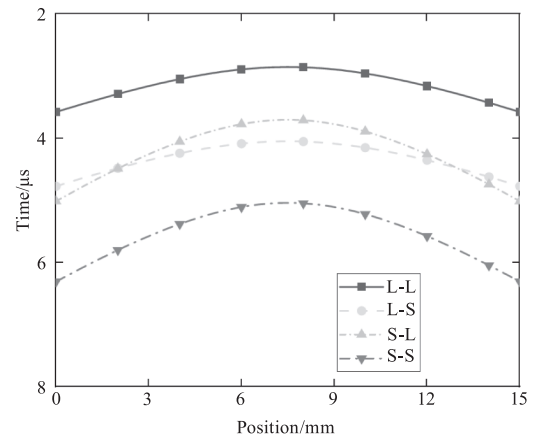
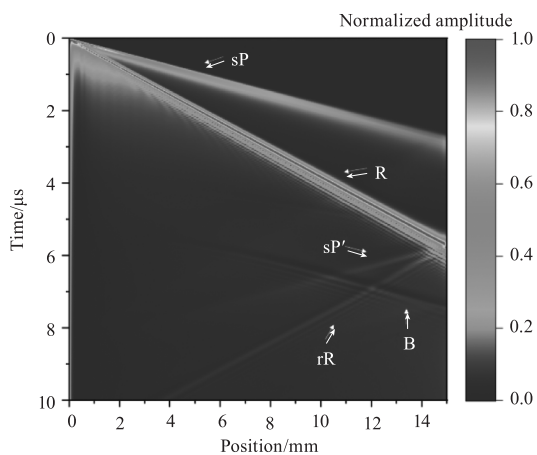


图 10 不同模式波到达时间与探测点位置关系

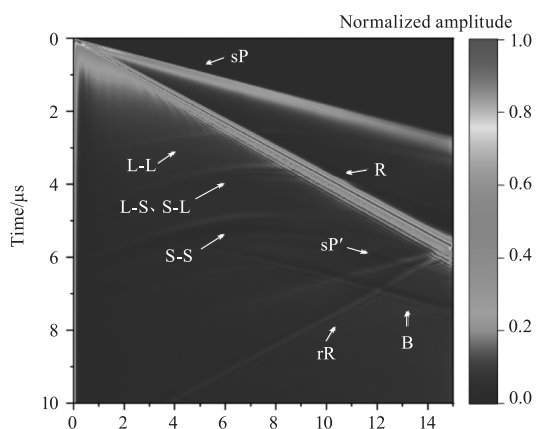
Fig. 10 The relationship between the arrival time of different mode waves and the position of detection

从图 10 中可以看到超声波与裂纹作用产生的纵波反射波(L-L)、横波反射波(S-S)、纵波的模式转换横波(L-S)及横波的模式转换纵波(S-L)的四个信号,L-S 和 S-L 两个模式转换波信号在时间上接近且交叉出现。图 11 是在上表面探测区内探得信号所作 B-scan 图,图中横轴表示探测点的位置,纵轴表示时间。从图 11(a)无裂纹 B-scan 中可看到几种超声模式:沿材料表面传播的掠面纵波(sP)、瑞利波(R)和瑞利波在样品右边界的反射表面波(rR)及反射掠面纵波(sP')、底面回波(B)。

与无裂纹模型相比,图 11(b)中出现了超声波与裂纹作用后产生了纵波反射波(L-L)和横波反射波(S-S)。理论上存在的纵波的模式转换横波(L-S)与横波的模式转换纵波(S-L)的两个信号相互交织叠加,无法将二者明显区分开,因此只能观察到三条信号。由于激发点处热膨胀幅值远强于回波幅值,并且有其他模式的超声波影响,所以裂纹特征曲线并不明显。将无裂纹时的 B 扫结果与预制了裂纹的 B 扫结果进行差分处理,差分结果如图 12 所示。



(a) 无裂纹B-scan图



(b) 埋藏裂纹B-scan图

图 11 有无裂纹 B-scan 图

Fig. 11 Comparison of B-scan with or without cracks

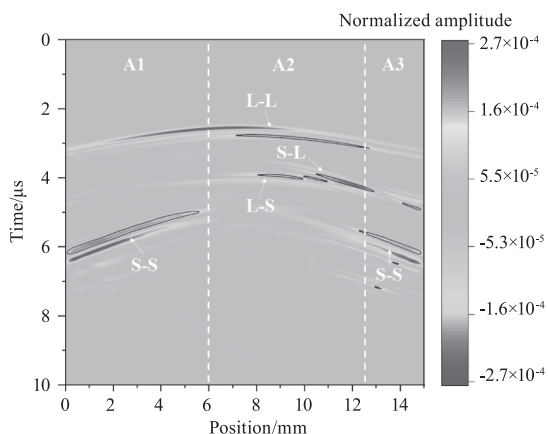


图 12 有无裂纹时差分 B 扫结果的幅值之差

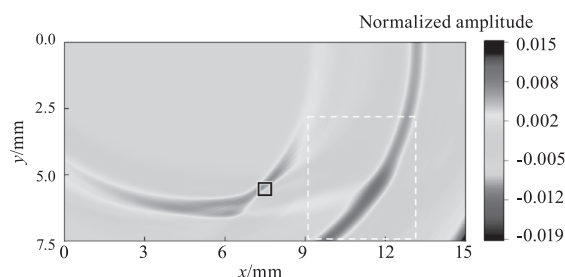
Fig. 12 Difference in the amplitude of differential

B-scan results with or without cracks

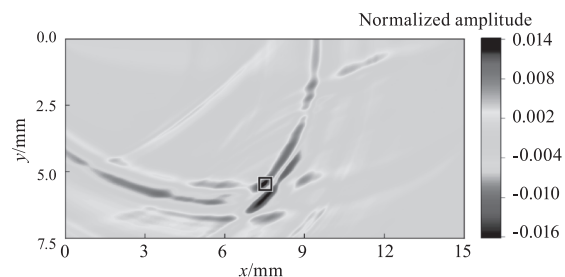
从图 12 中不但可以看到除与裂纹作用后的反射纵波 L-L 及反射横波 S-S 两条较为完整的曲线外,还能观察到部分 L-S 和 S-L 两条交错的纵波与横波的模式转换波曲线。以归一化幅值 1.2×10^{-4}

为等值线可清晰看到,由于纵波与横波传播的方向性,导致曲线幅值出现偏移,造成曲线的不完整。将差分 B-scan 结果按等值线和 L-L 和 S-S 曲线幅值分布以探测点位置 6 mm、12.5 mm 为界限分为 A1 ~ A3 三块区域,可以看到 S-S 在 A1, A3 区域有较为完整且幅值较大的曲线,而在 A2 区域曲线特征不明显,L-L 曲线在 A2 区域内整体曲线较为完整且幅值较大。而 L-S 与 S-L 方向性辐射较窄且相互交错,不适合用于聚焦成像。

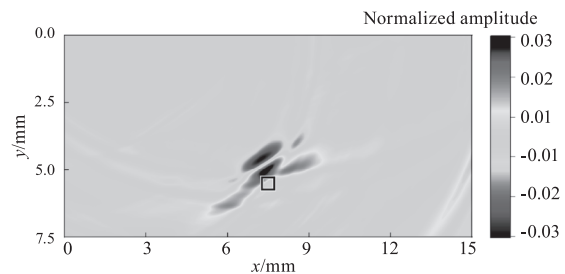
为了实现对内部裂纹的识别及成像并分析不同模式波对裂纹的重构效果,将 B-scan 结果导入 MATLAB,根据合成孔径聚焦算法分别采用 L-L 波、S-S 波及 L-L 波与 S-S 波组合法进行成像计算,结果如图 13 所示。



(a) L-L波重建图像



(b) S-S波重建图像



(c) 多模式波重建图像

图 13 不同模式波的合成孔径聚焦图像

Fig. 13 Synthetic aperture focusing images of different mode wave

据图 13 可知,不同的模式波对裂纹重构效果也有所差异。其中 S-S 波对裂纹具有较好的成像效果,如图 13(b)所示,与 L-L 波相比,S-S 波的反射幅值较大,所以在裂纹处的重构幅值较为聚焦,但

是伪像较为杂乱;从图 13(a)可观察到,采用 L-L 波对裂纹反演成像,但由于其反射幅值较低导致重构图像中信噪比较差,而从虚线框中的伪像的幅值更高,这是由于在使用 L-L 波进行图像重构时,伪像位置的叠加信号会取到反射模式波 S-L 波与 L-S 波交错的一部分。而选择 S-S 波对 A1 ~ A3 成像,L-L 波对 A2 区域进行多模式组合成像的 SAFT 方法能够实现对裂纹的高质量成像,减少裂纹重构图像的伪像、消除盲区,因此为了进一步评估 SAFT 多模式组合算法的成像效果,将实际裂纹的碰触端点位置(7.25 mm,5.25 mm)与采用 SAFT 多模式组合算法处理后的裂纹碰触端点位置进行比较。结果如表 3 所示,裂纹碰触端点位置 X 轴的相对误差为 1.7%,Y 轴误差为 2.4%。

表 3 SAFT 重构结果对比

Tab. 3 Comparison of SAFT reconstruction results

Mode wave	Crack reconstruction location		error	
	x/mm	y/mm	x/%	y/%
L-L	7.42	5.48	2.3	4.3
S-S	7.49	5.55	3.3	5.7
L-LandS-S	7.38	5.12	1.7	2.4

5 结论

本文提出了一种基于 SAFT 的多模式波组合成像方法,针对使用激光超声体波对内部裂纹重构成像时信噪比低,伪像等问题,利用 COMSOL Multiphysics 对钛合金板材内部裂纹成像过程进行数值模拟,采用扫描激光源法,通过提取不同探测位置的时域模式回波信号,根据模式波的幅值分布将 B-scan 图划分为 A1 ~ A3 区域,在 A2 区域选取纵波反射纵波(L-L 波)作为裂纹特征曲线,在 A1,A3 区域选择横波反射横波(S-S 波)作为裂纹特征曲线,将裂纹模式时域特征进行重组反演成像,通过 MATLAB 图像算法完成了对钛合金内部裂纹的识别及图像重构。与单一模式波成像相比,采用多模式组合成像方法有效减少了伪像,实现了对内部裂纹的定位及图像重构,重构裂纹位置 X 轴与 Y 轴相对误差范围均在 3% 以内。

参考文献:

[1] S K Bhaumik, M Sujata, M A Venkataswamy, et al. Failure of a low-pressure turbine rotor blade of an aeroengine

[J]. Engineering Failure Analysis,2005,13(8).

- [2] Sun Yubo, Lei Juanjuan. Research on vibration fatigue crack propagation and residual life prediction of TC4 titanium alloy for aircraft engine blades[J]. Surface Technology,2016,45(9):207-213.1001-3660.2016.09.031. (in Chinese)
孙宇博,雷娟娟.航空发动机叶片 TC4 钛合金振动疲劳裂纹扩展研究及剩余寿命预测[J].表面技术,2016,45(9):207-213.1001-3660.2016.09.031.
- [3] Song Yan, Ma Shipang. Measurement of open cracks using diffraction signals of laser ultrasonic longitudinal waves[J]. Laser & Infrared,2021,51(1):9-14. (in Chinese)
宋艳,马世榜.利用激光超声纵波的衍射信号测量开口裂纹[J].激光与红外,2021,51(1):9-14.
- [4] Zuo Ouyang, Wu Meiping, Tang Youhong. Numerical simulation of laser ultrasonic crack detection based on COMSOL[J]. Laser & Infrared,2020,50(10):1164-1171. (in Chinese)
左欧阳,武美萍,唐又红.基于 COMSOL 的激光超声裂纹检测数值模拟研究[J].激光与红外,2020,50(10):1164-1171.
- [5] Liu Hui, Zheng Bin, Wang Zhaoba, et al. Time dependent detection of surface defect depth by laser Rayleigh wave wave[J]. Laser & Infrared,2017,47(6):669-673. (in Chinese)
刘辉,郑宾,王召巴,等.激光瑞利波的时间依赖性探测表面缺陷深度[J].激光与红外,2017,47(6):669-673.
- [6] Tanaka T., Izawa Y. Nondestructive detection of small internal defects in carbon steel by laser ultrasonics[J]. Japanese Journal of Applied Physics,2001,40(3A).
- [7] Cuixiang Pei, Kazuyuki Demachi, Tetsuo Fukuchi, et al. Cracks measurement using fiber-phased array laser ultrasound generation[J]. Journal of Applied Physics,2013,113(16).
- [8] Cuixiang Pei, Kazuyuki Demachi, Haitao Zhu, et al. Numerical simulation of phased-array laser ultrasound and its application for defect inspection[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics,2012,39(1-4).
- [9] Stratoudaki Theodosia, Clark Matt, Wilcox Paul D. Laser-induced ultrasonic phased array using full matrix capture data acquisition and total focusing method[J]. Optics Express,2016,24(19).
- [10] Stratoudaki T, Clark M, Wilcox P D. Adapting the full matrix capture and the total focusing method to laser ultra-

- sonics for remote non-destructive testing[C]//2017 IEEE International Ultrasonics Symposium(IUS). IEEE,2017.
- [11] Chen Jian, Xiao Jing, Lisevych Danylo, et al. Laser-induced full-matrix ultrasonic imaging of complex-shaped objects[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control,2019,66(9).
- [12] Hossam Selim, Miguel Delgado-Prieto, Jose Trull, et al. Defect reconstruction by non-destructive testing with laser-induced ultrasonic detection[J]. Ultrasonics,2020,101(C).
- [13] Varnosfaderani Mehdi Haji Heidari, Mohammadzadeh Asl Babak, Faridsoltani Saman. An adaptive synthetic aperture method applied to ultrasound tissue harmonic imaging [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control,2018,65(4) :.
- [14] H Selim, M Delgado, J Trull, et al. Material defect reconstruction by non-destructive testing with laser induced ultrasonics[J]. Journal of Physics: Conference Series,2018,1149(1) :012011.
- [15] Lorraine P W, Hewes R A, Staver P R. Method and system for laser ultrasonic imaging of an object: US 5801312 [P]. 1998-9-1.
- [16] Blouin A, Levesque D, Neron C, et al. Improved resolution and signal-to-noise ratio in laser-ultrasonics by SAFT processing[J]. Optics Express,1998,2(13) :531-539.
- [17] Li Junyan, Shen Zhonghua, Ni Xiaowu, et al. Research on laser ultrasonic non-destructive testing method based on synthetic aperture focusing technology [J]. China Laser, 2018,45(9) :269-275. (in Chinese)
李俊燕,沈中华,倪晓武,等.基于合成孔径聚焦技术的激光超声无损检测方法研究[J].中国激光,2018,45(9) :269-275.
- [18] D Lévesque, Y Asaumi, M Lord, et al. Inspection of thick welded joints using laser-ultrasonic SAFT [J]. Ultrasonics,2016,69:236-242.
- [19] Ni C, Dong L, Shen Z, et al. Numerical simulation study of defect detections by using laser array generated giant acoustic waves[J]. International Journal of Thermophysics, 2015,36(5-6) :1236-1243.
- [20] Sun Baoshen, Shen Jianzhong. Synthetic aperture focused ultrasound imaging (I) [J]. Applied Acoustics, 1993, (3) :43-48. (in Chinese)
孙宝申,沈建中.合成孔径聚焦超声成像(一)[J].应用声学,1993(3) :43-48.
- [21] Fan Weiliang. Research on laser ultrasonic defect reconstruction method based on line scan excitation [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022: 18-20. (in Chinese)
范炜亮.基于线扫描激励的激光超声缺陷重建方法研究[D].北京:北京化工大学,2022:18-20.
- [22] Zhong Hua, Sun Kaihua, Sun Ming, et al. Simulation analysis of multimodal synthetic aperture focusing imaging using laser ultrasound [J]. Applied Acoustics, 2022, 41(4) :535-547. (in Chinese)
钟华,孙凯华,孙铭,等.激光超声的多模式合成孔径聚焦成像仿真分析[J].应用声学,2022,41(4) :535-547.
- [23] Zhang Wan. Research on the application of synthetic aperture focused imaging in laser ultrasonic transverse wave detection of internal defects in lead blocks [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2020:9. (in Chinese)
张婉.合成孔径聚焦成像在激光超声横波检测铅块内部缺陷中的应用研究[D].南京:南京理工大学,2020:9.
- [24] Wan Quan, Zhang Haibin, Jiang Weikang. Research on the multi degree of freedom reciprocity principle of diffusion sound field based on the description of sound pressure field [J]. Journal of Acoustics (Chinese Edition), 2009,34(5) :445-452. (in Chinese)
万泉,张海滨,蒋伟康.基于声压场描述的扩散声场多自由度互易原理研究[J].声学学报(中文版),2009,34(5) :445-452.