激光熔覆再制造零件中超声传播及缺陷检测数值模拟

闫晓玲^{①*}, 董世运^②, 薛楠^③, 王望龙^②

① 北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 102488;

② 装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072;

③ 中国航空综合技术研究所, 北京 100028

* 联系人, E-mail: yanxl@th.btbu.edu.cn

2015-12-04 收稿, 2016-01-16 修回, 2016-01-18 接受, 2016-04-22 网络版发表

国家自然科学基金(51375493)、国家重点基础研究发展计划(2011CB0134052)和装备再制造技术国防科技重点实验室基金(9140c850301130c85289)资助

摘要 激光熔覆再制造零件在具备优良性能的同时, 其弹性性能呈现出声学各向异性, 为声学检测带来困难, 深入研究各向异性激光熔覆层及基体材料中超声波的传播特性, 可以为这类再制造零件的超声无损评价提供重要的理论依据. 本文建立了激光熔覆再制造零件中超声传播及缺陷检测数学模型, 通过计算获得了Fe314激光熔覆再制造涂层、45钢基体两层介质中超声波探头辐射声场的分布特征. 研究表明: 材料的各向异性对入射声场的影响程度与材料的慢度值有关, 声束的偏转方向由慢度面的法矢量决定, 声束的聚焦、散焦行为由慢度面的曲率决定. 应用建立的模型模拟了激光熔覆再制造零件中横通孔、裂纹缺陷的回波信号. 比较了数值模拟与实验测量结果, 二者的幅值和相位都具有很好的一致性, 有效验证了本文所建立的超声检测数学模型的正确性.

关键词 各向异性, 激光熔覆, 再制造, 超声检测, 数值模拟

激光熔覆^[1]凭借其技术优势, 已成为再制造工程的先进技术. 激光熔覆合金体系主要有铁基合金、镍基合金、钴基合金和金属陶瓷等. 铁基合金深层的基材多为铸铁和低碳钢, 本研究主要以包含Fe314合金及45钢基体的激光熔覆再制造零件为研究对象. 实践表明, Fe314合金激光熔覆再制造涂层在具备优良性能的同时, 其弹性性能呈现出声学各向异性^[2], 使得超声波在传播过程中出现偏转、分离和聚焦等复杂物理现象, 为声学检测带来困难, 因此如何检测和评价这类材料成为声学检测领域研究的难点和热点问题.

由于通过实验手段无法了解超声波在激光熔覆层及基体材料中的传播过程, 而数值模拟在模型“制作”、参数选取和变动及对模拟结果的数据处理方面,

较之实物模型实验皆具有无比的灵活性和优越性, 能够突出实验中不易观察的某些细节. 目前超声检测数值模拟^[3~7]主要是针对各向同性介质的材料, 例如, Zhao等人^[8]采用边界元法结合垂直模式扩展技术研究了超声导波经过各向同性介质表面及内部缺陷时的散射过程. Datta等人^[9]利用有二维有限元法建模并引入吸收边界条件模拟了超声波在各向同性介质中传播时, 声波在缺陷附近所发生的反射、透射、模式转换等复杂现象. Han等人^[10]将声线跟踪法和弹性动力学有限积分技术相结合, 模拟了含晶间应力腐蚀裂纹的厚壁奥氏体焊缝的超声波检测, 其结果显示超声波在奥氏体焊缝中会沿金属结晶方向发生偏转, 并在焊缝边界上发生散射.

对于包含各向异性涂层及各向同性基体材料的

引用格式: 闫晓玲, 董世运, 薛楠, 等. 激光熔覆再制造零件中超声传播及缺陷检测数值模拟. 科学通报, 2016, 61: 2074–2082

Yan X L, Dong S Y, Xue N, et al. Numerical simulation of ultrasonic propagation and defect testing in laser cladding remanufacturing parts (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2074–2082, doi: 10.1360/N972015-01113

超声检测建模还很少, 本文建立了Fe314激光熔覆再制造零件超声检测数学模型, 利用该模型分析了各向异性激光熔覆层中晶粒取向和探头类型变化两种因素对超声波传播的影响; 计算了Fe314激光熔覆再制造零件中横通孔、裂纹缺陷的回波信号, 比较分析了数值模拟与实验测量结果, 二者吻合度较好. 数值模拟结果为合理设计此类零件的超声检测工艺提供了重要的理论依据.

1 超声检测理论模型

激光熔覆再制造试样检测实验如图1所示, 试样长、宽、高分别80, 10, 50 mm, 基体材料为45钢, 铁基合金(Fe314)激光熔覆层厚度为10 mm, 试样中加工了一个横通孔及一个裂纹, 采用超声接触法检测.

建立图1超声检测结构对应的理论模型, 应当考虑超声波声束在有机玻璃楔块、激光熔覆再制造涂层、45钢基体三层介质中的传播以及缺陷的散射等问题, 选择有效的声场计算模型和缺陷散射模型. 针对超声波在单一介质或两种以上介质中的传播特性, 本文依据互易原则^[11]建立了一个依据超声波发射声场、缺陷散射波场预测缺陷回波信号的超声检测理论模型, 其表达式为

$$s_0(f) = B(f) \left[\frac{1}{s_0} \sqrt{\frac{2\pi i}{k_3}} \frac{\rho_3 c_3}{\rho_1 c_1} \right] \times A(f) \int_L [\hat{v}(x, f)^2] dl, \quad (1)$$

式中, $s_0(f)$ 为探头接收到的电压回波信号(频域内); $B(f)$ 为超声检测系统的影响因子; s_0 为探头表面积; k_3 为45钢中的波数; ρ_1, c_1, ρ_3, c_3 , 分别为有机玻璃及45钢材料的密度及纵波波速; L 代表缺陷的延伸方向

图1 激光熔覆再制造试样超声检测示意图

Figure 1 Schematic drawing of ultrasonic detection for laser cladding remanufacturing sample

(横通孔为轴向, 裂纹为长度方向); $v(x, f)$ 为缺陷延伸方向上质点的速度场, 可通过发射声场模型计算; $A(f)$ 为缺陷远场散射幅值, 可通过缺陷散射模型计算.

1.1 声场计算模型

采用瑞利积分结合Pencil法^[12-16]建立声场计算模型, 该模型计算效率高, 可方便地处理任意探头、复杂材质等情况. 计算固体中任意一点的速度势时, 首先计算离散点源在该点处产生的速度势的叠加, 其次考虑每个点源到计算点的衰减和在界面处的透射, 因此需要引入振幅衰减系数 DF 和透射系数 T , 则固体中点 r 的速度势可以表示为

$$\phi(r, t) = \iint_T \frac{DF \cdot T \cdot v_n(r_T, t - |r - r_T|/v)}{2\pi|r - r_T|} ds(r_T), \quad (2)$$

式中, T 表示探头; $ds(r_T)$ 表示探头点源 r_T 的面积; $\phi(r, t)$ 表示固体介质中点 r 在时刻 t 的速度势; r_T 表示探头表面的点源位置; v_n 表示探头表面点源在时刻 t 的振动速度; $|r - r_T|$ 表示从点源到计算点 r 处的距离; $|r - r_T|/v$ 表示声波从点源处传播到计算点处的时间. 振幅衰减系数 DF 可以用Pencil法求得, 透射系数 T 可以根据斯涅尔定律(超声波入射到不同介质的界面所产生的反射和折射规律)求得.

激光熔覆加工过程中, 材料的塑性变形会影响熔覆层的组织及性能. 如图2所示, Fe314激光熔覆层组织呈明显树枝晶, 为典型的各向异性组织. 因此应用该模型计算激光熔覆层中声场分布时, 需要确定能够表征材料各向异性特征的劲系数矩阵, Fe314激光熔覆材料为多晶立方晶系, 其劲度系数^[15]如下所示. 通过求解克里斯托弗尔方程^[16]可以得到材料的

图2 Fe314 激光熔覆层微观组织

Figure 2 Microstructure of laser cladding Fe314 alloy coating

慢度值并绘制出慢度曲线图.

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{11} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{pmatrix},$$

其中, $c_{11}=27.7$, $c_{12}=0$, $c_{44}=8.2$, 单位为 10^{10} N/m².

立方晶系的克里斯托弗尔方程为

$$\begin{vmatrix} \lambda k^2 - \rho\omega^2 & \delta k^2 & \varepsilon k^2 \\ \delta k^2 & \mu k^2 - \rho\omega^2 & \xi k^2 \\ \varepsilon k^2 & \xi k^2 & \nu k^2 - \rho\omega^2 \end{vmatrix} = 0, \quad (3)$$

式中, ρ 为材料密度, Fe314激光熔覆材料的密度为7770 kg/m³. $\lambda, \mu, \nu, \delta, \varepsilon, \xi$ 在不同晶系中不尽相同, 立方晶系中各参数表达式如下:

$$\begin{aligned} \lambda &= \mu = \nu = c_{11}n_1^2 + c_{44}(1 - n_1^2), \\ \delta &= (c_{11} + c_{44})n_1n_2, \\ \varepsilon &= (c_{11} + c_{44})n_1n_3, \\ \xi &= (c_{11} + c_{44})n_2n_3, \end{aligned} \quad (4)$$

式中, n_1, n_2, n_3 分别为声波传播方向在 x, y, z 轴上的角度余弦值, 即:

$$\begin{cases} n_1 = k_x/k, \\ n_2 = k_y/k, \\ n_3 = k_z/k, \end{cases} \quad (5)$$

式中, k 为波数, k_x, k_y, k_z 分别为 x, y, z 方向的分量. 求解克里斯托弗尔方程得到三个值 $s^2=k^2/\omega^2$, S 即为各向异性激光熔覆材料中的慢度值. 计算得到的慢度面在 oxz 坐标平面上的界面如图3所示, 可以看到, 传播方

图3 (网络版彩色) oxz 平面内Fe314合金激光熔覆材料的慢度图
Figure 3 (Color online) Slowness of laser cladding Fe314 alloy

向不同时, 声速差别较大, 原因在于材料的各向异性.

1.2 缺陷散射模型

目前激光熔覆再制造零件中的缺陷主要归纳为两类, 即面积型缺陷(未熔合和裂纹等)和体积型缺陷(气孔、夹渣等). 由于缺陷结构的复杂性, 为了提高模拟的精度和计算效率, 本文采用基于基尔霍夫近似及波恩近似理论的缺陷散射模型^[17,18]. 这里考虑由纵波入射引起的纵波远场散射, 其幅值可表示为

$$A_{pp}(\beta, \theta) = \frac{1}{2(v_L/v_T)^2} \times \left[\sin \beta \sin 2\theta A_{pt}(\beta) + \cos \beta (2 \sin^2 \theta - (v_L/v_T)^2) A_{pn}(\beta) \right], \quad (6)$$

$$A_{pn} = \left[1 - \frac{\sin 2\beta \sin 2\gamma - (v_L/v_T)^2 \cos 2\gamma}{\sin 2\beta \sin 2\gamma + (v_L/v_T)^2 \cos 2\gamma} + (v_L/v_T) \cot \gamma \frac{2(v_L/v_T) \sin 2\beta \cos 2\gamma}{\sin 2\beta \sin 2\gamma + (v_L/v_T)^2 \cos 2\gamma} \right], \quad (7)$$

$$A_{pt} = \left[1 + \frac{\sin 2\beta \sin 2\gamma - (v_L/v_T)^2 \cos 2\gamma}{\sin 2\beta \sin 2\gamma + (v_L/v_T)^2 \cos 2\gamma} + (v_L/v_T) \tan \gamma \frac{2(v_L/v_T) \sin 2\beta \cos 2\gamma}{\sin 2\beta \sin 2\gamma + (v_L/v_T)^2 \cos 2\gamma} \right], \quad (8)$$

式中, β 为超声波入射角度, γ 为反射角度, θ 为散射方向与缺陷表面法向线的夹角, v_L, v_T 分别为纵波与横波速度.

2 Fe314激光熔覆再制造零件中声场模拟

针对激光熔覆再制造零件的超声波无损检测, 常用的探头主要包括纵波直探头以及横波斜探头. 因此研究Fe314合金激光熔覆再制造涂层中声场分布时, 主要分析这两类探头辐射声场的特点, 讨论了Fe314合金激光熔覆层中晶粒的取向对入射声场的影响, 结合超声传播理论分析了各向异性激光熔覆层中不同类型探头辐射声场的分布特征.

采用接触法检测, 为了获得好的耦合效果, 采用有机玻璃楔块, 中心频率为5 MHz、晶片半径为10 mm的纵波直探头, 晶粒取向 θ_q 及坐标系方向如图4所示.

2.1 纵波直探头辐射声场模拟

应用上述声场计算模型计算了Fe314激光熔覆层

图4 激光熔覆层晶粒取向及坐标系方向

Figure 4 The grain orientation of laser cladding coating and the direction of coordinate system

及45钢中纵波直探头辐射声场(熔覆层及基体厚度均为30 mm). 图5给出了激光熔覆层中晶粒取向不同时, oxz 截面内声场的分布情况(图中白线为熔覆层与基体结合面). 纵波垂直入射时, 其相速度方向(声波

波矢方向)始终保持为垂直向下, 但由于晶粒取向的影响, 声波群速度方向(声波能量的传播方向)发生了变化. 由图4的计算结果可以看出, 当晶粒取向角度 $\theta_q=30^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 时, 激光熔覆层中超声纵波的相速度与群速度分离, 声波传播方向发生了偏转. 当 $\theta_q=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 时, 超声波相速度与群速度方向一致, 声波传播方向始终保持垂直向下, 在各向同性的45钢基体中, 超声波传播方向没有受到激光熔覆层中晶粒取向的影响, 其传播方向没有发生偏转. 从图6可以看出, 由于晶粒取向的影响, 声束截面形状也发生了不同程度的变化. 图5分别为 $\theta_q=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 时, oxy 截面内(z 坐标为10 mm)的声场分布. 当 $\theta_q=0^\circ, 90^\circ$ 时,

图5 Fe314 激光熔覆试样 oxz 截面内纵波直探头辐射声场. (a) $\theta_q=0^\circ$; (b) $\theta_q=30^\circ$; (c) $\theta_q=45^\circ$; (d) $\theta_q=60^\circ$; (e) $\theta_q=75^\circ$; (f) $\theta_q=90^\circ$

Figure 5 The ultrasonic field radiated by longitudinal wave straight probe in oxz plane of laser cladding remanufacturing sample. (a) $\theta_q=0^\circ$; (b) $\theta_q=30^\circ$; (c) $\theta_q=45^\circ$; (d) $\theta_q=60^\circ$; (e) $\theta_q=75^\circ$; (f) $\theta_q=90^\circ$

图6 Fe314 激光熔覆试样 oxy 截面内纵波直探头辐射声场. (a) $\theta_q=0^\circ$; (b) $\theta_q=45^\circ$; (c) $\theta_q=90^\circ$

Figure 6 The ultrasonic field radiated by longitudinal wave straight probe in oxy plane of laser cladding remanufacturing sample. (a) $\theta_q=0^\circ$; (b) $\theta_q=45^\circ$; (c) $\theta_q=90^\circ$

声束截面为均匀的圆形, 原因在于此时超声纵波的入射方向垂直于Fe314合金立方晶体的各向同性面. 当 $\theta_q=45^\circ$ 时, 声场在 x 方向汇聚, 在 y 方向发散. 由此可见, 圆形换能器辐射声场在各向异性的激光熔覆层中传播时, 其能量变化是不均匀的, 原因在于慢度面的曲率系数发生了变化.

2.2 横波斜探头辐射声场模拟

图7为横波入射时Fe314激光熔覆层及45钢中的辐射声场. 采用折射角为 45° 的横波探头, 激励信号中心频率为5 MHz、晶片半径为10 mm. 图6给出了 oxz 截面内不同晶粒取向时声场的分布情况. 当

$\theta_q=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 时, 折射横波声束发生偏转的同时产生了分离现象. 分离出来的声束能量分布明显不均匀, 即在特定方向上声束能量较强, 而在另外方向上声束能量较弱; 当 $\theta_q=45^\circ$ 时, 折射横波声束没有出现分离和偏转现象. 在各向同性的45钢基体中, 折射横波声束没有出现偏转和分离现象. 图8为传播距离为5 mm处($Z=5$ mm) oxy 截面内的声束截面图. 从图中可以看出 $\theta_q=45^\circ$ 时, 折射横波声束没有出现分离现象, 其截面形状为椭圆形, 声场在 x 方向发散, 在 y 方向汇聚. $\theta_q=60^\circ$ 时, 折射横波声束分离为两束, 并且分离出来的横波能量强弱基本相同. 声束截面形状均为不规则形状. $\theta_q=75^\circ$ 时, 折射横波声束分

图7 Fe314 激光熔覆试样 oxz 截面内横波斜探头辐射声场. (a) $\theta_q=0^\circ$; (b) $\theta_q=30^\circ$; (c) $\theta_q=45^\circ$; (d) $\theta_q=60^\circ$; (e) $\theta_q=75^\circ$; (f) $\theta_q=90^\circ$

Figure 7 The ultrasonic field radiated by transverse wave angle probe in oxz plane of laser cladding remanufacturing sample. (a) $\theta_q=0^\circ$; (b) $\theta_q=30^\circ$; (c) $\theta_q=45^\circ$; (d) $\theta_q=60^\circ$; (e) $\theta_q=75^\circ$; (f) $\theta_q=90^\circ$

图8 Fe314 激光熔覆试样 oxy 截面内横波斜探头辐射声场. (a) $\theta_q=45^\circ$; (b) $\theta_q=60^\circ$; (c) $\theta_q=75^\circ$

Figure 8 The ultrasonic field radiated by transverse wave angle probe in oxy plane of laser cladding remanufacturing sample. (a) $\theta_q=45^\circ$; (b) $\theta_q=60^\circ$; (c) $\theta_q=75^\circ$

离为两束,并且分离出来的横波能量强弱明显不同,声束截面形状均为不规则形状.由此可见,圆形换能器辐射横波声场在各向异性的激光熔覆层中传播时,其能量变化是不均匀的, oxy 截面内声场的发散或汇聚与该平面内慢度面的曲率变化有关.

2.3 基于超声传播理论的探头辐射声场特征分析

图9为Fe314激光熔覆层中 ozx 截面内垂直入射纵波传播原理图.从图8可以看出,各向异性材料中,纵波的慢度面不是一个圆,纵波入射方向与界面垂直(入射角 $\beta=0^\circ$)时,根据斯涅尔定律^[19],采用作图法可以确定折射声束相速度的大小和方向.如图9(a)所

示,慢度面的法矢量方向(声波群速度方向)与相速度方向(图中折射声束方向)一致时,纵波声束不会偏转,否则,如图9(b)所示,纵波声束将会偏转,偏转角度为群速度与相速度之间的夹角 $\beta_p=\beta_q-\beta_x$ (图8(c)所示).角度之间的关系为

$$\tan \beta_p = \frac{\tan \beta_q - \tan \beta_x}{1 + \tan \beta_q \tan \beta_x}. \quad (9)$$

图10为Fe314激光熔覆层中 ozx 截面内折射角为 45° 的横波传播原理图.从图9可以看出,各向异性材料中,横波出现了分裂.横波分裂就是横波通过各向异性介质时,沿每一条射线路径可以分裂成两个偏振方向互相垂直的剪切波(通常称为准SV波,准SH

图9 (网络版彩色)Fe314 激光熔覆层中 ozx 截面内垂直入射纵波传播原理图. (a) $\theta_q=0^\circ$; (b) $\theta_q=30^\circ$; (c) 群速度及相速度关系
Figure 9 (Color online) The schematic diagram of vertically incident longitudinal wave propagation in ozx plane of laser cladding remanufacturing sample. (a) $\theta_q=0^\circ$; (b) $\theta_q=30^\circ$; (c) the relationship between group velocity and phase velocity

图10 (网络版彩色)Fe314 激光熔覆层中 ozx 截面内折射角为 45° 横波传播原理图. (a) $\theta_q=45^\circ$; (b) $\theta_q=75^\circ$
Figure 10 (Color online) The schematic diagram of transverse wave refraction angle is 45° propagation in ozx plane of laser cladding remanufacturing sample. (a) $\theta_q=45^\circ$; (b) $\theta_q=75^\circ$

波),其传播速度不同.从图10(a)可以看出,当晶粒取向角 $\theta_q=45^\circ$ 时,根据斯涅尔定律确定的折射声束相速度方向与慢度面的法矢量方向一致,因此横波声束没有发生偏转,另外这种情况下,偏振方向互相垂直的准SV波、准SH波速度相等,横波没有分裂,所以声束也没有出现分离现象.从图10(b)中可以看出,晶粒的取向角 $\theta_q=75^\circ$,纵波入射角为 36° (横波折射角为 45°)时,根据斯涅尔定律,采用作图法可以确定折射声束相速度的大小和方向.这种情况下,横波分裂产生的准SH波和准SV波传播速度不相等,所以横波折射后,除主声束(折射声束1)外,还产生了其他角度的声束(折射声束2).

3 缺陷回波数值模拟与实验研究

用(1)式建立的超声检测模型预测激光熔覆再制造零件中缺陷回波信号,还需要确定检测系统影响因子 $B(f)$,这里通过参考实验确定^[20,21],则

$$B(f) = \frac{S_0(f)}{S_i(f)} W(f), \quad (10)$$

式中, $S_0(f)$ 为探头接收到的玻璃楔块底面的回波信号, $S_i(f)$ 为探头的激励信号,由于上述计算是在频域进行的,为了稳定频域相除过程,使用维纳滤波 $W(f)$ 对频域相除结果进行处理.

图11(a)为参考实验中楔块底面反射的回波信号;(b)为参考实验中脉冲发生器产生的探头激励信号;(c)为解卷积后求得的系统影响因子.

确定了系统影响因子之后,利用(1)式分别计算图1检测系统中裂纹、横通孔缺陷在频域内的响应,然后通过傅里叶逆变换求得时域内的缺陷回波信号.图12(a),(b)分别为激光熔覆再制造试样中横通孔、裂纹缺陷回波信号的数值模拟和实验测量结果,从图中可以看出,数值模拟结果和实验测量结果保持了很好的一致性,即缺陷回波的幅值、相位基本一致,从而验证了(1)式建立的超声检测理论模型的正确性.另外,根据模型预测以及实验测量结果还可以判断出缺陷距离探侧面的距离(裂纹为51.5 mm,横通孔为39 mm),与缺陷的实际位置基本吻合,误差仅为3%左右.

4 结论

(1)通过参考实验法确定了超声检测系统影响因子,建立了适用于各向异性激光熔覆再制造零件的超声检测模型,可用于预测此类再制造零件中各类缺陷的回波信号;比较了数值模拟与实验测量结果,二者的幅值和相位都具有很好的一致性,有效验证了本文建立的超声检测数学模型的正确性.

图11 参考实验中检测到的信号。(a) 楔块底面反射回波信号;(b) 探头激励信号;(c) 系统影响因子

Figure 11 Signal detected in reference test. (a) Echo signal reflected by wedge back; (b) probe excitation signal; (c) system impact factors

图12 (网络版彩色)不同类型缺陷回波信号的模型预测与实验测量结果。(a) 直径6 mm横通孔回波信号的模型预测与实验测量结果;(b) 长度10 mm裂纹回波信号的模型预测与实验测量结果

Figure 12 (Color online) Model prediction and experiment results of different types of defects echo signal. (a) Model prediction and experiment results of horizontal hole echo signal with diameter of 6 mm; (b) model prediction and experiment results of crack echo signal with length of 10 mm

(2) 应用建立的声场模型计算了Fe314激光熔覆再制造涂层、45钢基体两种介质中的声场, 获得了此类复合材质零件中超声波探头辐射声场的分布特征, 为合理设计此类零件的超声检测工艺提供了重要的理论依据。

(3) 各向异性激光熔覆层中慢度曲线的法向量

决定着声束的偏转方向, 慢度曲线的曲率决定着声束的聚焦和散焦特点; 相比于纵波, 横波在各向异性激光熔覆层中的传播更复杂一些, 因此为了提高超声检测结果的可靠性, 对此类零件进行质量评价时, 应当优先选用纵波探头, 并且纵波的入射方向与激光熔覆层晶粒取向一致或垂直时, 声束的指向性最好。

参考文献

- 1 Zhang X D, Dong S Y, Wang Z J, et al. Microstructure and wear resistance of clad layer on laser remanufacturing metal pieces (in Chinese). *Trans China Weld Inst*, 2010, 31: 75–78 [张晓东, 董世运, 王志坚, 等. 激光再制造金属零件熔覆层组织及耐磨性能. *焊接学报*, 2010, 31: 75–78]
- 2 Sun J B, Zhou J. Negative refraction in anisotropic material (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 231–238 [孙竞博, 周济. 各向异性材料中的负折射行为. *科学通报*, 2012, 57: 231–238]
- 3 Xu N, Li Y, Zhou Z G, et al. Improvement of finite difference time domain and its application to calculation of ultrasonic sound fields (in Chinese). *J Beijing Univ Aeronaut Astronaut*, 2013, 39: 78–82 [徐娜, 李洋, 周正干, 等. FDTD 方法的改进及其在超声波声场计算中的应用. *北京航空航天大学学报*, 2013, 39: 78–82]
- 4 Zhao X Y, Gang T. Nonparaxial multi-Gaussian beam models and measurement models for phased array transducers. *Ultrasonics*, 2009, 49: 126–130
- 5 Kim H J, Song S J, Schmerr L W. An Ultrasonic measurement model using a multi-Gaussian beam model for a rectangular transducer. *Ultrasonics*, 2006, 44: e969–e974
- 6 Zhao X Y, Gang T, Xu C G. Prediction of side-drilled hole contact probe signals captured by a dual crystal. *J Nondestr Eval*, 2010, 29: 105–110
- 7 Zhao F Z, Zhu S Z, Feng X H, et al. Sound field simulation of ultrasonic processing to fabricate carbon nanotubes reinforced AZ91D composites (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2015, 64: 144302 [赵福泽, 朱绍珍, 冯小辉, 等. 高能超声制备碳纳米管增强 AZ91D 复合材料的声场模拟. *物理学报*, 2015, 64: 144302]
- 8 Zhao X, Rose J L. Boundary element method modeling for defect characterization potential in a wave guide. *Int J solid struct*, 2003, 40: 2645–2658
- 9 Datta D, Kishore N N. Features of ultrasonic wave propagation to identify defects in composite materials modelled by finite element method. *NDT E Int*, 1996, 29: 213–223
- 10 Han T Y, Khler B, Schmitz V, et al. Explore investigation into ultrasonic testing of thick walled austenitic welds. *Nondestr Test*, 2009, 31: 838–840
- 11 Schmerr L W. *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation: A Modeling Approach*. New York: Plenum Press, 1998
- 12 Jia D W, Bourse G, Chaki S, et al. Investigation of stress and temperature effect on the longitudinal ultrasonic waves in polymers. *Res Nondestruct Eval*, 2014, 25: 20–29
- 13 Li T B. *Computational Acoustics: The Equation and Calculation Method of Sound Field* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2006 [李太宝. 计算声学: 声场的方程和计算方法. 北京: 科学出版社, 2006]
- 14 Gengembre N, Lhemery A. Pencil method in electrodynamics: Application ultrasonic field computation. *Ultrasonics*, 2000, 38: 495–499
- 15 Lopezsanchez L, Kim H J, Schmerr L W, et al. Measurement models and scattering models for predicting the ultrasonic pulse-echo response from side drilled holes. *J Nondestruct Eval*, 2005, 24: 83–96
- 16 Ding H. *Computational Ultrasonics-Analysis and Application of Ultrasonic Field* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2006 [丁辉. 计算超声学-声场分析及应用. 北京: 科学出版社, 2010]
- 17 Du G H, Zhu Z M, Xi X F. *Fundamentals of Acoustics* (in Chinese). 3rd ed. Nanjing: Nanjing University Press, 2012 [杜功焕, 朱哲民, 裘秀芳. 声学基础(第三版). 南京: 南京大学出版社, 2012]
- 18 Zeng W, Wang H T, Tian G Y, et al. Research on the oscillation effect of near-surface metal defect based on laser-generated acoustic surface wave (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2015, 64: 144302 [曾伟, 王海涛, 田贵云, 等. 研究激光激发的声表面波与材料近表面缺陷的振荡效应. *物理学报*, 2015, 64: 144302]
- 19 Chapman R K, Pearce J E, Burch S F, et al. Recent in-house developments in theoretical modeling of ultrasonic inspection. *Insight*, 2007, 49: 93–97
- 20 Hua R. *Signal Analysis and Processing* (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2004 [华容. 信号分析与处理. 北京: 高等教育出版社, 2004]
- 21 Yan X L, Dong S Y, Xu B S, et al. Cepstrum analysis method in surface acoustic wave signals time delay estimation (in Chinese). *Vib Shock*, 2013, 32: 159–162 [闫晓玲, 董世运, 徐滨士, 等. 超声表面波检测信号时差的倒频谱分析. *振动与冲击*, 2013, 32: 159–162]

Numerical simulation of ultrasonic propagation and defect testing in laser cladding remanufacturing parts

YAN XiaoLing¹, DONG ShiYun², XUE Nan³ & WANG WangLong²

¹ College of Material and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 102488, China;

² Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China;

³ China Aero-Poly Technology Establishment, Beijing 100028, China

The laser cladding remanufacturing parts show typical anisotropic behaviors, which is difficult for acoustic detection. Therefore, the propagation behaviors of ultrasonic beam in the laser cladding remanufactured parts should be investigated in-depth, which will provides an important theoretical basis for ultrasonic nondestructive evaluation of this kind of parts. An ultrasonic measurement model for the laser cladding remanufacturing parts was developed. The influence of anisotropic laser cladding coating on the propagation behaviors of ultrasonic beam was analyzed. The propagation behaviors of ultrasonic beam in the laser cladding Fe314 alloy coating were investigated with the help of Rayleigh integral combined with Pencil method. The simulation results show that the influence of anisotropic material on the incident field due to the value of slowness, the direction of beam steering is determined by the normal vector of slowness surface, the beam focusing and defocusing behavior is determined by the curvature of slowness surface. The radiated ultrasonic field maintains a uniform distribution relative to the axis of the incident beam, when the direction of incident beam is consistent with or perpendicular to the grain orientation of laser cladding coating, which the directivity of beam is preferably. The reason lies in the incident direction of ultrasonic wave is perpendicular to the isotropic plane of crystal. In the radiated field of transverse wave angle probe, the transverse wave splits and the beam steers, separates with the change of grain orientation. The fundamental reason that transverse wave splitting due to the anisotropy of the laser cladding coating. The reason that beam steering lies in that the direction of group velocity (the direction of normal vector of slowness surface) is inconsistent with that of phase velocity (the direction of transverse wave vector). The slowness surface of anisotropic laser cladding coating is irregular in shape, the beam will appear in other angles in addition to the main beam, when transverse wave refraction. An ultrasonic measurement model for the laser cladding remanufacturing parts was developed by combining the beam model with the scattering model based on Kirchhoff approximation and Born approximation theory. This model can be used to predict the testing signals from the flaws in laser cladding remanufacturing parts. The accuracy of the provided model was verified by comparisons of the simulation results with the experimental results, both the signal amplitude and phase were in good agreement. Numerical simulation results provide an important theoretical basis for rational design of the process scheme of ultrasonic testing for laser cladding remanufacturing parts.

anisotropy, laser cladding, remanufacturing, ultrasonic testing, numerical simulation

doi: 10.1360/N972015-01113