

基于流固耦合的超声污垢检测数值模拟^{*}

NUMERICAL SIMULATION FOR ULTRASONIC FOULING DETECTION BASED ON FLUID-SOLID STRUCTURE INTERACTION

孙灵芳^{**} 徐曼菲^{***} 孔盛琦

(东北电力大学 自动化工程学院, 吉林 132012)

SUN LingFang XU ManFei KONG ShengQi

(School of Automation Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

摘要 基于 Comsol Multiphysics 仿真软件,建立了声发射耦合的板材-污垢多层有限元模型。以弹性动力学和压力声学为理论基础,推导了薄平板型试样在平面波辐射下的声波振动控制方程,研究了流相与固相区域超声传播特性规律,实现了二维平板污垢纵、横波分离的弹性数值模拟,通过分离后的波场提取,对薄层平板沉积污垢厚度进行高精度检测。数值模拟结果表明:流相区域服从微小声波波动方程传播规律,固相区域也能很好的实现弹性纵横波的完全分离提取;超声波对薄层平板沉积污垢的检测误差在 5% 以内,证明了数值模拟的可行性与准确性,对于实际换热系统的运行和清污具有很好的指导作用。

关键词 换热设备污垢 超声检测 纵横波分离 数值模拟

中图分类号 O329 O347.4 TP319

Abstract Based on simulation software of Comsol Multiphysics, a launch coupling-board-fouling multilayer finite element model was established. In addition, by deeming elastokinetics and pressure acoustics as theoretical foundations, an acoustic vibration control equation was derived for the thin plates at the condition of plane wave radiation to study ultrasonic propagation rules in flow and solid phase zones and also implement elastic numerical simulation for longitudinal and transverse wave separation of two-dimensional flat fouling. Furthermore, a high-precision detection was carried out for the thickness of fouling deposited on the thin plate after the extraction of the separated wave field. The numerical simulation results indicated that complete separation and extraction of elastic P-and S-waves were also realized for the solid phase zone in a better manner according to the flow zone complies with micro acoustic wave equation propagation law; In addition, the detection error of deposited fouling on thin plate performed by the ultrasonic wave was within a range of about 5%. Such results not only proved both feasibility and accuracy of numerical simulation, but also played a role of guidance in the operation and clearing of the actual heat exchange system.

Key words Heat exchange fouling; Ultrasonic detection; P-and s-waves separation; Numerical simulation

Corresponding author: SUN Lingfang E-mail: sunlf@nedu.edu.cn, Tel: +86-432-64807188

The project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 51176028).

Manuscript received 20160105, in revised form 20160116.

引言

换热器是将热流体的部分热量传递给冷流体的设备。根据冷、热流体热量交换的方式可分为间壁式、混合式和蓄热式换热器^[1]。在三类换热器中,间壁式换热器应用最多。板式换热器(plate heat exchanger, PHE)是典型的间壁式换热器,目前已广泛应用于电力、化工、冶金、纺织等领域^[2]。结垢作为换热器中一种极为普遍的现象,给生产效率和安全性造成负面影

响,因此对污垢的监测、预测与消除的研究正日益受到各国研究人员的重视^[3]。目前,较为普遍的换热污垢无损检测方式是利用热力学方法,采用热阻作为污垢量的间接衡量指标进行检测^[4]。而这种方法受多参数测量准确性影响,可信度有待提高。目前对换热污垢检测的研究中,直接、定量、实时监测的研究还比较少。鉴于此,有必要开展换热设备沉积污垢检测技术研究。超声检测技术是利用声波与物质相互作用时,声速及声波的能量会发生变化这一现象,通过对波至

^{*} 20160105 收到初稿,20160116 收到修改稿。国家自然科学基金项目(51176028)资助。

^{**} 孙灵芳,1970年生,汉族,东北电力大学教授,博士,主要研究方向为换热设备污垢与对策;热工过程先进控制。

^{***} 徐曼菲,女,1991年生,汉族,东北电力大学硕士研究生,主要研究方向为换热设备污垢超声波检测技术。

时间和声波衰减的测量,来确定物质的一些基本物理参数的无损检测方法^[5]。

本课题组采用超声时域反射法 (ultrasonic time-domain reflectometry, 简称 UTDR) 在不损害生产设备、不影响生产正常运行的前提下,基于 comsol 多物理场耦合仿真软件,对有无/污垢时的薄层材质平板的声场传播过程进行模拟仿真,通过发射流相区域纵波辐射致使声压变化带动固相薄层板材与垢质应力位移产生改变,进而通过位移时程曲线定量检测出薄层材质平板下的沉积污垢,计算得到不同监测位置处的沉积污垢厚度,从而为解决换热运输设备工艺和清洗方案等一系列重大问题提供保障。

1 基本原理

1.1 假设条件

声波是声传播介质的运动,其传播过程较复杂,为了方便计算和建模,此次采用全局定义参数化建模^[6],建立发射区域-板式换热器-污垢三层材质模型,并提出以下合理的简化和假设:

(1) 流固耦合三层材质模型由两个固相和发射流相组成,固相区域为线弹性材质,满足基本胡克定律及各向同性条件,应力应变关系符合弹脆性固体本构模型;

(2) 脉冲发射区域属于理想游离态流层介质,在宏观上声振动连续,满足理想流体中微小声波运动方程、连续性方程、物态方程;

(3) 同一水平,流固耦合三层材质背景温度为 20 摄氏度,1 标准大气压,且均匀分布;

(4) 固相区域受有效应力影响,与弹性体的体应变有关,服从固体力学动量守恒方程。

1.1.1 流相区域数学模型

以牛顿质点动力学的观点,此时发射区域可当作是由许多紧密相连的微小体积元 dV 组成,满足理想流体中的微小声波运动方程、连续性方程和物态方程^[7]:

运动方程

$$\rho_0 \frac{dv}{dt} = - \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (1)$$

连续性方程

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} = - \left(\frac{\partial(\rho_0 v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_0 v)}{\partial y} \right) \quad (2)$$

物理方程

$$p = c_0^2 \rho' \quad (3)$$

由式(1)~式(3)联立消去 ρ_0 、 v 、 ρ' ,再求偏导可得笛卡尔坐标系下,二维流向区域微小声波波动方程

$$\frac{\partial p}{c_0^2 \partial t} = \frac{\partial p \partial t}{\partial^2 x} + \frac{\partial p \partial t}{\partial^2 y} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial p}{c_0^2 \partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial p \partial t}{\partial^2 x} + \frac{\partial p \partial t}{\partial^2 y} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 p}{c_0^2 \partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 p}{\partial^2 y} \quad (6)$$

式中, ρ_0 、 ρ' 分别为流相区域初始时刻和受激励后的介质密度, kg/m^3 ; p 为流相区域声压, Pa ; c_0 为流相区域声速, m/s 。

1.1.2 固相区域数学模型

依据基本假设条件,同理取线弹性固相区域微元体,微小位移用向量 $\vec{u}$ 表示,可知固相薄层平板污垢区域服从弹性力学中的运动方程(忽略体力)、本构方程和几何方程^[8]:

运动方程如下

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中, σ_{ij} 为应力, $i=j$ 时为正应力, $i \neq j$ 时为切应力, Pa ; u_i 为 i 方向的微小形变位移, m 。

由广义胡克定律^[9]可得薄层固相区域本构方程

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \varepsilon_{xx} & \sigma_{xy} = 2\mu \varepsilon_{xy} \\ \sigma_{yy} = \lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \varepsilon_{yy} & \sigma_{yz} = 2\mu \varepsilon_{yz} \\ \sigma_{zz} = \lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \varepsilon_{zz} & \sigma_{zx} = 2\mu \varepsilon_{zx} \end{cases} \quad (8)$$

式中, μ 为弹性体切变模量, GPa ; λ 为弹性体常数, GPa 。

根据弹性接触理论^[10],固体区域某一方向上的位移除了由于该方向上长度发生伸缩,还由于其他方向上长度发生伸缩,所以在笛卡尔直角坐标系中满足几何方程

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

式中, ε_{ij} 为固相区域应变。

将几何方程和本构方程带入运动方程得到此时各向同性弹性固相区域的波动方程^[11]

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \vec{u} = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad (10)$$

利用 Helmholtz 分解原理将 $\vec{u}$ 表示为标量梯度和零散度矢量的旋度,即

$$\vec{u} = \nabla \varphi + \nabla \times \vec{H} \quad (11)$$

将上式带入(10)式可得到用势函数表示的声波波动方程

$$[\nabla(\lambda + 2\mu) \nabla^2 \varphi - \rho \frac{\partial^2 \nabla \varphi}{\partial t^2}] +$$

$$\nabla \times [\mu \nabla^2 \vec{H} - \rho \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}] = 0 \tag{12}$$

于是有

$$(\lambda + 2\mu) \nabla^2 \varphi - \rho \frac{\partial^2 \nabla \varphi}{\partial t^2} = 0$$
$$\mu \nabla^2 \vec{H} - \rho \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \tag{13}$$

其中

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{14}$$

由此可见在薄层平板污垢区域的声振动有两个成分的位移,伸缩扰动纵波以速度 c_p 传播,切变扰动横波以速度 c_s 传播。

1.2 检测原理

采用超声时域检测法检测污垢厚度,换能器界面耦合在薄层平板外侧位置处,换能器将超声波发射出去,超声波通过耦合发射区域沿平板内向污垢侧传播,当遇到薄层平板与污垢界面由于发生显著的反射和透射现象,使交界面的质点产生振动位移,耦合分界面反射回来的超声波先被探头所接收,而后沉积污垢与薄层平板间的超声回波也被换能器所接收,并且换能器将接收到的信号转换为电信号,经检测设备的电子检测部件检测后可将其转换并输出。

由文献[12]可知,固体中传播速度是与弹性体材质有关,由于笔者采用的是超声时域反射法,所以此时仅与脉冲激励发射的纵波波速有关,根据(14)式采用弹性模量和泊松比有

$$\lambda = \frac{E\tau}{(1 + \tau)(1 - 2\tau)} \tag{15}$$

故在薄层平板和污垢区域的纵波波速理论值为

$$c_p = \sqrt{\frac{E(1 - \tau)}{\rho(1 - 2\tau)(1 + 2\tau)}} \tag{16}$$

式中, c_p 为纵波在介质中的传播速度, m/s; E 为介质的杨氏模量, GPa; τ 为泊松比; ρ 为介质材料密度, kg/m³。

由此,采用多次测量,监测不同厚度时的薄层平板和污垢的振动位移时程曲线,根据波至时间 Δt , 由此可计算出不同沉积污垢厚度

$$h = c_p \Delta t \tag{17}$$

通过数值模拟计算出污垢的厚度,与实际厚度比较是否吻合。

2 数值模拟

2.1 模型建立

本次基于 comsol 多物理场数值模拟软件,选取声学分析中的声-结构瞬态求解模块,该模块集合压力声

学与固体力学接口,以压力声学单元模拟发射耦合区域层,以固体力学单元模拟弹性波在薄层板式换热器内传播。以几何中心为基准,进行全局定义:平板高 5 mm,耦合层尺寸长 0.5 mm,宽 1 mm,材料属性设置为:声速 $c = 342$ m/s,密度 $\rho = 1.29$ kg/m³。由式(6)可得到瞬态压力声学控制方程^[13]为

$$\frac{1}{\rho c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p - q_d) \right) = Q_m \tag{18}$$

式中, q_d 为单级源; p 为节点声压, Pa; Q_m 为偶极源; 此次采用自定义平面波辐射声源,故 $q_d = Q_m = 0$ 。

固体力学区域的薄层板材单元为线弹性材料,材料属性设置为:杨氏模量 $E = 71.7$ GPa,密度 $\rho = 2\,710$ kg/m³,泊松比 $\tau = 0.33$;污垢层为碳酸钙,弹性模量 $E = 10$ GPa,密度 $\rho = 2\,700$ kg/m³,泊松比 $\tau = 0.3$ 。由于实际过程中空气是流动的,流体场与固体场之间存在着相互摩擦和热量传递,因此在耦合层和平板之间定义了声-结构耦合边界,使之耦合层边界声压 P 等于固体内垂直应力 F ,界面法向的质点加速度等于固体内界面法向的质点加速度 u_n ,即

外结构边界

$$\begin{cases} -\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p - q_d) \right) = -\mathbf{n} u_n \\ FA = P\mathbf{n} \end{cases} \tag{19}$$

内结构边界

$$\begin{cases} -\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p - q_d) \right) = \mathbf{n} u \\ -\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p - q_d) \right) = -\mathbf{n} u \\ FA = p_1 \mathbf{n} - p_2 \mathbf{n} \end{cases} \tag{20}$$

式中, $\mathbf{n}$ 为法向矢量; FA 为边界垂直应力, Pa。

为了更好的模拟结果,径向单元采用三角形网格剖分(如图1所示),由于激励信号为中心频率 f_c 的正弦脉冲信号,确定此时波长为 $\lambda = C/f_c$,耦合区域不是重点研究对象,此时最大单元尺寸不超过 2.2×10^{-4} mm。由式(16)可得此时在板料区域的波长大于污垢区域,采用三次样条插值时,为了更好实现振动连续,污垢区域最大单元尺寸不超过 $1/6\lambda$ 。

2.2 加载载荷

通过多种频率下的模拟优选,确定入射信号为 1 个周期、频率为 1 MHz 的、振幅为 1 mm 的激励脉冲 $P_i = \sin pluse(t)$,入射方式采用平面波辐射,控制方程如下

$$\begin{cases} -\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p - q_d) \right) + \frac{1}{\rho c_0^2} \frac{\partial p}{\partial t} = Q_i \\ Q_i = \frac{1}{\rho c_0^2} \frac{\partial p_i}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \frac{1}{\rho} \nabla p \end{cases} \tag{21}$$

此外耦合层边界 4、7 设置为硬声场边界,表示脉冲发

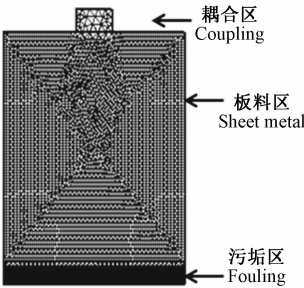


图 1 网格剖分示意图
Fig. 1 Mesh of model

射时到达壁面声波法向质点速度为 0,其控制方程定义为

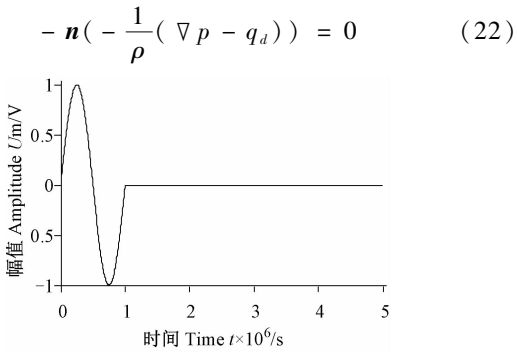


图 2 脉冲激励载荷
Fig.2 The load of pluse excitation

3 模拟求解与结果分析

3.1 流相区域分析

进行完建模,网格剖分,材料定义后,模拟时长为 5×10^{-6} s,时间步长确定为 10^{-8} s,相对容差为 0.01,记录模拟过程中每一步数据。在物理场求解中,求解器基于直接线性求解器 MUMPS,该方法采用完整的系统矩阵计算瞬态响应,不做任何其他假设,对方程直接求解,鲁棒性好,适用范围广。

图 3a~图 3d 分别为起始四个不同时刻的流体声压分布模拟记录云图,在时刻 $t = 0$ s,声源位于上界面,入射平面波在边界 6 上产生一个垂直方向的微小作用力,此时耦合层处于线声源激发,选取二维截线,两监测点中起始点为 $(2.5 \times 10^{-3}, 5.5 \times 10^{-3})$,终止点为 $(2.5 \times 10^{-3}, 5 \times 10^{-3})$,由图 3a 图 3e 可见,此时轴线声源未激发脉冲波,纵向位移为 0,声压变化缘于所加声场的固有压力,从图 3a 可观察得到此时声压最大值仅为 4.21×10^{-8} Pa,压力声学区域总声压场平均值为 3.22×10^{-10} Pa,纵向声压分布不均匀,靠近声源处的声压变化相对其他区域更为剧烈。随着时间的推移,当 $t = 2 \times 10^{-7}$ s,在耦合层激发出纵向的脉冲波,由于空气此处为流体,不存在切变应力,所以耦合层以平

面辐射出纵波开始在法线方向上由上而下往固体层传播。图 3a~图 3d 声压分布模拟记录很好地验证了所假设的平面声源在流体中以纵波辐射传播而不存在剪切波。图 3e 为不同时刻径向位移分量曲线图,总的声压分布随着超声传播时间的增加而发生改变。在同一时刻,此时传播过程中总声压随着径向位移的增加,呈现出先增加,达到总声压的最大幅值,然后减小,最后趋于稳定的趋势。随着传播时间的增加,径向传播距离也在增大。此时求解出的声压满足微小流体声波振动分布,这也进一步说明了利用压力声学瞬态求解模拟出的流体平面波辐射与声学波动传播分布规律相符。

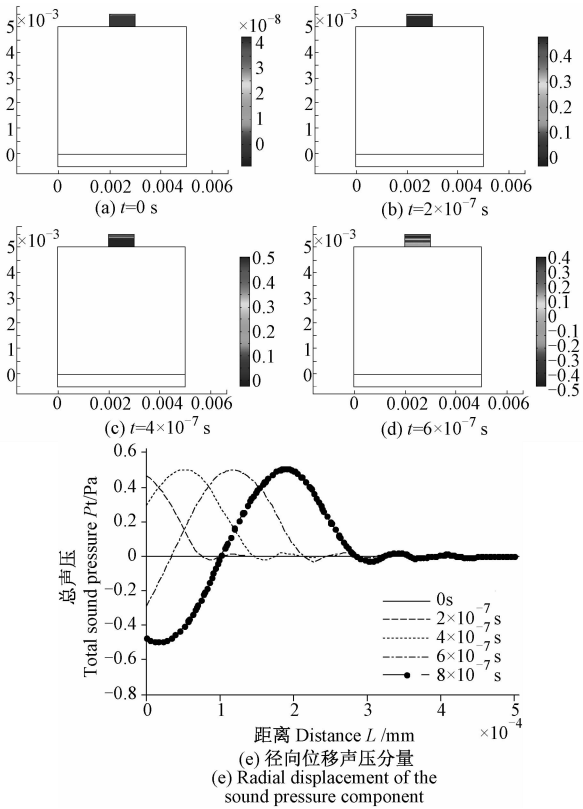


图 3 流相区域仿真结果
Fig.3 The simulation results of flow-phase region

3.2 固相区域分析

由于在流固耦合界面设置了声结构边界,使得声源激发时,流体层的声波能量通过边界与固体区域平板耦合。求解出当 $t = 1 \times 10^{-7}$ s,此时总的平板区域应力分布如图 4 所示,从图中可以看出,初始时刻所激发的声场进入平板区域后,在反射耦合界面以表面波 L 为主,此时应力面平均值 $8.175 6 \times 10^{-13}$ Pa。在 $t = 1 \times 10^{-6}$ s 时刻,此时能隐约看出激发纵波在平板中向外辐射,并以纵波 P 和表面波 L 为主,应力面平均值达到 $2.854 6 \times 10^{-5}$ Pa,应力较初始时刻有较大提升。随着时间的推移,在 $t = 2 \times 10^{-6}$ s 时刻,波阵面越来越明

显,板内的纵横波沿圆形界面以聚焦形式在平板区域中传播,此时在耦合层界面能清楚地观察到表面波L。到 $t=3\times10^{-6}$ s时,从图中可以看出,模拟记录对纵波和横波都有清晰地显示,伴有表面波L和直达纵波P时,纵波P多转换成横波S并在硬声场边界处得到反射横波。在 $t=4\times10^{-6}$ s可观察到污垢区域已经发生明显应变。由abcd模拟记录能够很好地证实二维纵横波分离的弹性数值模拟,并能同时模拟出全横波和全纵波记录ef,验证了数值模拟的可行性。

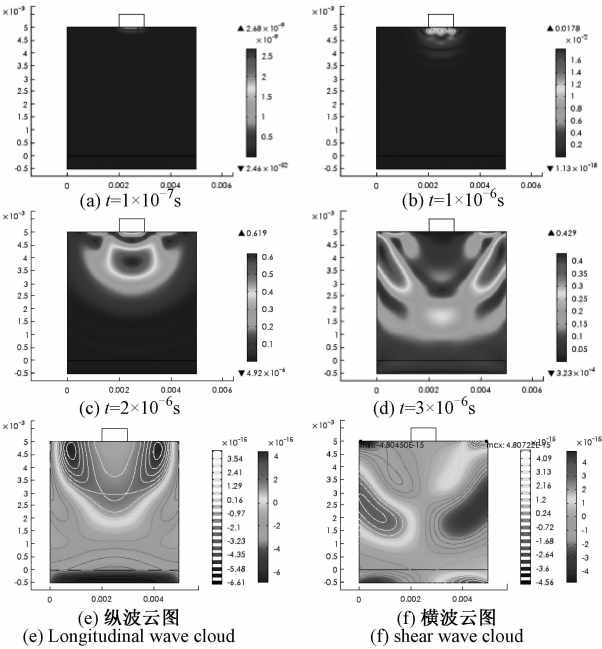


图 4 固相区域仿真结果

Fig.4 The simulation results of solid-phase region

3.3 污垢区域分析

要想检测出污垢厚度,根据式(16)得到此时污垢在纵波声场中的传播速度为2 232 m/s,在薄板中的速度为6 261 m/s,并根据纵波波场中位移时程曲线,定量污垢厚度。首先提取不同监测厚度薄板下的位移时程曲线如图 5。

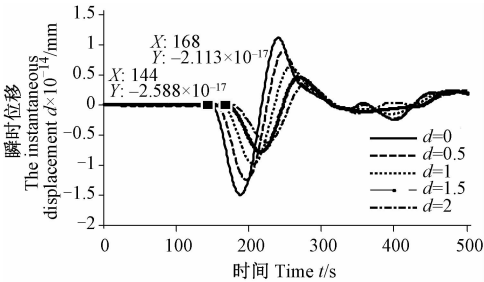


图 5 洁净无垢区域位移时程曲线

Fig.5 Time-history curve of displacement without fouling

根据位移时程曲线,读取并分析模拟结果数据得

到初始入射纵波到达薄板与耦合界面时的时间间隔为 1.44×10^{-6} s,由于发射区距离监测节点为0.5 mm,所以得到此时发射区域厚度为0.492 48 mm,相对误差为1.5%。同理在1.5mm时的波至时间为 1.68×10^{-6} s,整理得到不同厚度洁净薄板的模拟结果如表1(以上板面为基准)。

表 1 洁净薄板数值模拟结果

Tab.1 The results of numerical simulation with clean sheet			
预设板厚 Actual thickness	数值模拟结果 Results	绝对误差 Absolute error	相对误差 Relative error
d/mm	d/mm	Δ /mm	δ /%
0.5	0.500 8	0.000 8	0.16
1.0	1.001 8	0.001 8	0.18
1.5	1.491 8	-0.008 2	-0.54

因此,数值模拟得到的薄板厚度与实际厚度吻合较好,相对误差保持在 $\pm 2\%$ 以内。此时初始污垢厚度为0.5 mm,如图6a波至时间为 22×10^{-8} s,数值模拟结果为0.491 mm,与实际厚度相差不大,相对误差为-1.8%。

为进一步验证理论的可靠性和数值模拟的正确性,选取3种污垢层厚度进行沉积污垢碳酸钙超声检测的数值模拟计算(表2),波至时间如图6b,由模拟结果可知在三种污垢厚度条件下得到的数值模拟碳酸钙层厚度略小于实际值,且随着污垢厚度增加,误差也相对减小,保持在 $\pm 5\%$ 以内。由此可见,利用超声对薄板沉积污垢的非介入式检测具有较高的精度,可以很好地指导换热设备的运行和清洗工作。

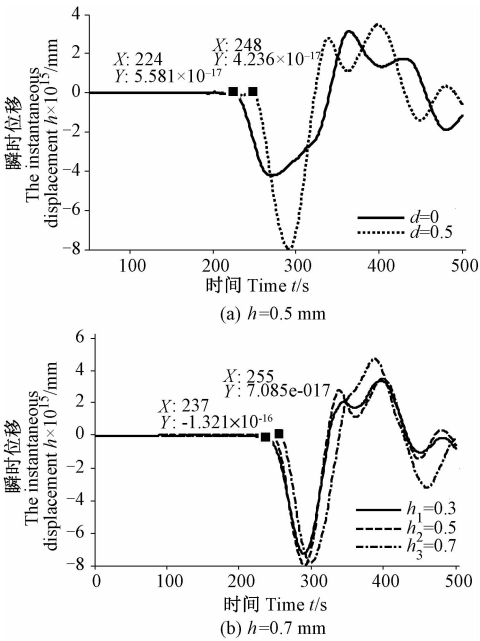


图 6 污垢区域位移时程曲线

Fig.6 Time-history curve of displacement with fouling

表 2 污垢薄板数值模拟结果

Tab.2 The results of numerical simulation
with fouling sheet

垢层厚度 Actul thickness h/mm	过渡时间 Transition time t/10 ⁻⁸ s	模拟结果 Results h/mm	相对误差 Relative error δ/%
0.3	13	0.290 16	-3.28
0.5	22	0.491 04	-1.70
0.7	31	0.691 92	-1.15

4 结论

在数值仿真研究领域,首次基于 comsol 多物理场仿真软件,采用声-固耦合模块建立了板式换热器-污垢材料介质模型,并基于压力声学瞬态和固体力学接口建立了完美匹配声-固耦合边界条件,其主要结论:

1)瞬态求解后能够完全实现二维平板污垢纵、横波分离的弹性数值模拟,直观显示了多层介质中沿圆周辐射方向传播的模式波分解过程,揭示了不同平板污垢厚度下位移场、应力场的变化规律,其结果可为超声弹性成像在污垢检测中的声场特性分析提供理论指导;

2)建立了全纵波模态下的二维薄层平板污垢检测模型,并能基于超声时域反射法对污垢厚度波至时间准确提取,模拟精度和效率高,为解决工程实际中换热管道污垢超声检测问题提供了可行的途径。

参考文献 (References)

[1] 杨善让,徐志明,孙灵芳. 换热设备污垢与对策[M]. 第2版. 北京: 科学出版社,2004:8.
YANG ShanRang, XU ZhiMing, SUN LingFang. Fouling and countermeasures of heat transfer equipment[M]. Second Edition, Beijing: Science Press,2004:8(In Chinese).

[2] 徐志明,张仲彬,李煜,等. 水质对板式换热器结垢的影响权重及其机制分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(32):69-74.
XU ZhiMing, ZHANG ZhongBin, LI Yu, et al. Influences of water quality's effect weights and mechanisms on fouling of plate heat exchangers[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(32):69-74(In Chinese).

[3] 李霞,孙灵芳,杨明. 薄层污垢超声检测信号处理方法[J]. 振动、测试与诊断,2013,6(36):961-965.
LI Xia, SUN LingFang, YANG Ming. Thin fouling ultrasonic testing signal analysis and dentification method[J]. Journal of Vibration, Measurement& Diagnosis,2013,6(36):961-965(In Chinese).

[4] 王建国,刘高生,孙伟. 电磁场作用下循环水污垢热阻的灰色预测模型实验研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(11):61-61.
WANG JianGuo, LIU GaoSheng, SUN Wei. Experiment research on

fouling resistance grey forecast model for circulating water in electromagnetic field[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(11):61-64(In Chinese).

[5] 郭佳,李四海,宁宁,等. 激光超声技术在无损检测中的应用[J]. 航空工程进展,2014,5(4):487-501.
GUO Jia, LI SiHai, NING Ning, et al. Application of laser ultrasonic technique in non-destructive testing[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014,5(4):487-501(In Chinese).

[6] Teich L, Hutten A, Schroder C. Utilization of COMSOL Multiphysics JAVA API for the implement action of a micromagnetic modeling and simulation package with a customized user interface[C]//COMSOL Conference Europe. Mailand:[s.n],2012:151-157.

[7] 张烈辉,李允. 低渗透气藏流-固耦合渗流数值模拟[J]. 天然气工业,2004,24(10):80-82.
ZHANG LieHui, LI Yun. Numeral simulation of fluid-solid coupling percolation in gas reser-voirs with low permeability[J]. Natural Gas Industry,2004,24(10):80-82(In Chinese).

[8] 姜文忠,李野,梁冰. 炮采煤层工作面瓦斯涌出规律的数值模拟研究[J]. 系统仿真学报,2010,22(6):1531-1534.
JIANG WenZhong, LI Ye, LIANG Bing. Numerical simulation of methane emission regularity in coal face used blasting[J]. Journal of System Simulation, 2010,22(6):1531-1534(In Chinese).

[9] 钟云晴. 根据不同模量弹性理论设计铸铁液缸壁厚[J]. 机械设计与制造,2007(9):121-123.
ZHONG YunQin. The designe for the thickness of the wall of the hydraulic cylinder made of cast iron according to the elastic theory of different modulus[J]. Machinery Design & Manufacture,2007(9):121-123(In Chinese).

[10] 李小伟,赵军海. 金属板材成形应力统一解[J]. 机械强度,2009,31(3):454-459.
LI XiaoWei, ZHAO JunHai. Sheet metal forming stress unifiedsolution[J]. Journal of Mechanical Strength,2009,31(3):454-459(In Chinese).

[11] ROSE J L. 固体中的超声波[M]. 何存富,吴斌,王秀彦,译. 北京:科学出版社,2004:23-25.
ROSE J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. HE CunFu, WU Bin, WANG XiuYan. Jr. Beijing: Science Press, 2004:23-25(In Chinese).

[12] 董为荣,帅健,许葵. 管道腐蚀缺陷超声导波检测数值模拟研究[J]. 机械强度,2008,30(6):988-993.
DONG WeiRong, SHUAI Jian, XU Kui. Numerical simulation ofcorrosion detection in pipes using ultrasonic guided waves[J]. Journal of Mechanical Strength, 2008,30(6):988-993(In Chinese).

[13] 李章剑,邵维维,韩志乐,等. 医用50 MHz超声换能器材料厚度影响仿真研究[J]. 压电与声光,2014,36(2):205-216.
LI ZhangJian, SHAO WeiWei, et al. Simulation study on the effect of thickness for 50MHz medical ultrasound transducer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014,36(2):205-216(In Chinese).