

航空航天装备

温度梯度下钛合金热防护结构的导波特性研究

任元强¹, 程冲¹, 白丽丽^{1,2}, 袁慎芳¹

(1.南京航空航天大学 a.航空航天结构力学及控制国家重点实验室 b.结构健康监测与预测研究中心, 南京 210016; 2.太原理工大学 航空航天学院, 太原 030002)

摘要: **目的** 实现可重复使用钛合金热防护结构的导波健康监测。**方法** 针对钛合金热防护结构, 提出热-力-电多物理场耦合导波传播建模仿真分析方法, 研究温度梯度下钛合金热防护结构中导波的传播特性, 以及在温度梯度和裂纹损伤耦合作用下导波的传播特性。**结果** 20~500 °C 的温度梯度会导致钛合金结构中导波的群速度降低、幅值衰减降低, 裂纹损伤使得钛合金结构中导波的群速度、幅值降低, 且损伤越大, 影响越明显。裂纹扩展至 20 mm 时, S0 模式群速度降低了 1.5%, A0 模式群速度降低了 2%。**结论** 此模型可为大范围的温度梯度条件下, 钛合金热防护结构上传感器优化布置以及导波监测方法的研究提供指导。

关键词: 钛合金热防护结构; 可重复使用航天器; 温度梯度; 热-力-电多物理场耦合建模; 压电导波; 结构健康监测

中图分类号: V219

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)06-0028-08

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2023.06.004

Guided Wave Characteristics in Titanium Alloy Thermal Protection Structures under Temperature Gradient

REN Yuan-qiang¹, CHENG Chong¹, BAI Li-li^{1,2}, YUAN Shen-fang¹

(1. a. State Key Lab of Mechanics and Control of Aerospace Structures, b. Research Center of Structural Health Monitoring and Prognosis, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. College of Aeronautics and Astronautics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030002, China)

ABSTRACT: The work aims to achieve guided wave health monitoring of reusable titanium alloy thermal protection structures. A thermal-force-electric multiple-physical field coupling simulation method for guided wave propagation in a thermal protection

收稿日期: 2022-10-07; 修订日期: 2022-12-21

Received: 2022-10-07; Revised: 2022-12-21

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目 (51921003); 国家自然科学基金面上项目 (52275153); 国家自然科学基金青年基金项目 (51905266); 机械结构力学及控制国家重点实验室 (南京航空航天大学) 自主研究课题 (MCMS-I-0521K01); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 南京航空航天大学前瞻布局科研专项资金

Fund: National Natural Science Foundation of China (51921003); National Natural Science Foundation of China (52275153); National Natural Science Foundation of China (51905266); Research Fund of State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures (Nanjing University of Aeronautics and astronautics) (MCMS-I-0521K01); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions of China; the Fund of Prospective Layout of Scientific Research for Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

作者简介: 任元强 (1990—), 男, 博士。

Biography: REN Yuan-qiang (1990-), Male, Doctor, Research focus: structural health monitoring.

通讯作者: 袁慎芳 (1968—), 女, 博士。

Corresponding author: YUAN Shen-fang (1968-), Female, Doctor, Professor, Research focus: structural health monitoring.

引文格式: 任元强, 程冲, 白丽丽, 等. 温度梯度下钛合金热防护结构的导波特性研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(6): 028-035.

REN Yuan-qiang, CHENG Chong, BAI Li-li, et al. Guided Wave Characteristics in Titanium Alloy Thermal Protection Structures under Temperature Gradient[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(6): 028-035.

structure of titanium alloy was proposed. The propagation characteristics of guided waves in the titanium alloy thermal protection structure under temperature gradient were investigated. The propagation characteristics of guided waves in the titanium alloy thermal protection structure under the coupling effect of temperature gradient and crack damage were also investigated. The results showed that the temperature gradient from 20 °C to 500 °C could decrease group velocity and amplitude attenuation of guided waves in the titanium alloy structure, and the crack damage could decrease group velocity and amplitude of guided waves in the titanium alloy structure. The greater the damage, the more obvious the influence. When the crack propagated to 20 mm, the velocity of S0 mode group decreased by 1.5% and that of A0 mode group decreased by 2%. Therefore, this model can be used as a guide for optimization of sensor layout and guided wave monitoring on titanium alloy thermal protection structures under a wide range of temperature gradient conditions.

KEY WORDS: titanium alloy thermal protection structure; reusable spacecraft; temperature gradient; thermal-force-electric multi-physical field coupling model; piezoelectric guided wave; structural health monitoring

可重复使用航天器返回大气层的过程中会受到剧烈的气动加热, 需要热防护结构来保护航天器的正常飞行, 并且确保航天器内部设备在允许温度范围内正常工作, 而且热防护结构还可以承受或者传递气动载荷, 保证航天器优良的气动外形^[1]。航天器再入大气层过程中, 机头、机翼前缘等迎风面温度能够达到 1 800~2 000 °C^[2], C/C 复合材料等材料是迎风面热防护结构所选用的材料之一; 航天器的背风面温度在 500 °C 左右, 钛合金材料是背风面热防护结构所选用的材料之一^[3]。虽然热防护结构外部环境温度很高, 但是内部环境温度在 20 °C 左右^[4], 使得热防护结构中存在温度梯度。热防护结构中长时间的强温度梯度, 加之飞行中面临的振动、冲击、强噪声等复杂的服役条件, 导致钛合金热防护结构容易产生裂纹等损伤, 为其安全服役留下严重隐患^[5-6], 威胁着航天器的安全。因此, 研究强温度梯度下钛合金热防护结构的健康监测具有重要意义。

结构健康监测技术可以利用集成在结构上的传感器, 获取与结构健康状态相关的信号, 通过特定的信号处理方法和力学建模方法, 提取与结构损伤状态相关的信号特征, 再利用损伤诊断方法实现对结构状态的评估^[7-10]。在现有的结构健康监测方法中, 基于压电传感器的导波监测方法具有损伤灵敏度高、监测范围大、既能在线监测也可以离线监测等优点, 是能够直接监测结构损伤的一种极具前景的方法^[11-24]。近年来, 有研究人员开展了基于导波的热防护结构健康监测研究。Yang 等^[25]基于压电传感器和导波研究了热防护结构的冲击、损伤和螺栓连接松动监测, 能够识别冲击、损伤和松动螺栓的位置, 证明了压电导波监测方法的潜在应用前景。Kundu 等^[26]报道了基于导波方法监测热防护结构脱粘研究, 研究结果表明, 高频导波可以很好地监测脱粘损伤, 但没有考虑热防护结构工作时的强温度梯度对该方法带来的影响。Wu 等^[27]提出了一种基于导波的修正时间反转方法来定位热防护结构中的松动螺栓, 结果表明, 所提出的方法可以在室温条件下很好地定位松动的

螺栓。上述研究证明了基于压电导波的结构健康监测方法在热防护结构健康监测上具有广阔的应用前景, 但是上述研究主要是集中在常温下, 没有考虑服役条件下热防护结构会面临的强温度梯度, 并且温度梯度会直接改变材料属性, 会对导波的传播特性有显著影响, 从而影响热防护结构导波健康监测的可靠性。

本文针对钛合金热防护结构提出了一种热-力-电多物理场耦合的导波传播特性仿真方法, 研究了 20~500 °C 温度梯度下, 钛合金热防护结构的导波传播特性, 以及裂纹损伤耦合影响下导波的传播特性, 为温度梯度下钛合金热防护结构导波健康监测提供指导。

1 导波传播的理论模型

钛合金材料中的导波传播由弹性力学中的控制方程、本构方程和应变位移方程决定, 分别如式 (1) — (3) 所示。

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} s_{kl} \quad (2)$$

$$s_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_l}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right) \quad (3)$$

式中: ρ 为材料密度; u_i 为位移; σ_{ij} 、 s_{kl} 、 c_{ijkl} 为应力张量, 应变张量和弹性刚度张量, 而弹性刚度张量中的元素是由工程弹性常数——杨氏模量、剪切模量和泊松比计算得到。大部分材料的工程弹性常数随温度的变化而变化, 尤其是在大的温度变化范围下, 这种现象非常明显。以钛合金为例, 环境温度从 20 °C 升高到 500 °C 后, 弹性模量降低了 31%^[28]。因此, 从式 (2) 中可以看出, 工程弹性常数的改变直接影响结构中传播的应力应变, 即影响导波的传播特性。

2 基于热-力-电多物理场耦合的导波仿真方法

2.1 热-力-电多物理场耦合

多物理场耦合包括热物理场、固体力学物理场和静电学物理场之间的耦合。其中,热物理场用于计算特定温度边界条件下钛合金热防护结构中的温度梯度,固体力学物理场用于仿真温度梯度下钛合金热防护结构的力学特性,静电学物理场用于仿真压电陶瓷的电特性。式(4)为热传导方程,用于计算热物理场中给定边界条件下的温度梯度。其中, T 表示温度; λ 表示导热系数; c 为比热容; ρ 为密度。式(1)——(3)为固体物理场中控制导波传播的波动方程。热

物理场与固体物理场耦合的方式为温度直接影响弹性刚度张量 c_{ijkl} 。式(5)、(6)是静电学物理场中表征压电陶瓷的控制方程。其中, S_{ij} 和 T_{ij} 分别为应变和应力; E_k 和 D_i 分别为电场强度和电位移。固体物理场和静电学物理场的耦合方式为式(5)中的应变 S_{ij} 与式(2)中的应变 s_{kl} 相等,即压电传感器与固体结构接触区域的应变相同。公式(1)——(6)的耦合关系如图1所示。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T, \quad a = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (4)$$

$$S_{ij} = s_{ijkl} T_{kl} + d_{kij} E_k \quad (5)$$

$$D_i = d_{ikl} T_{kl} + \varepsilon_{ik} E_k \quad (6)$$

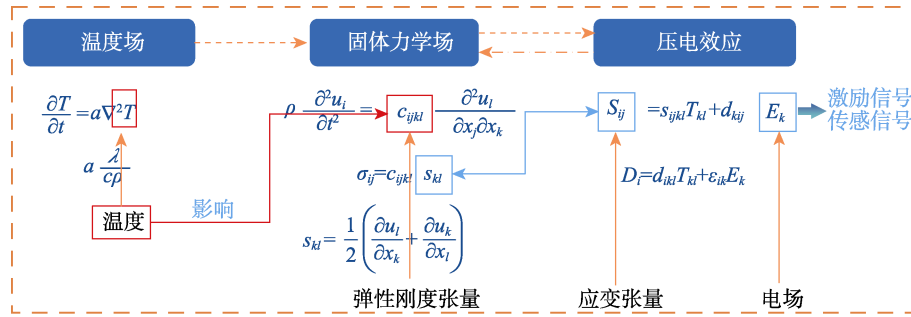


图1 多物理场耦合示意图

Fig.1 Diagram of multiple-physical field coupling

2.2 COMSOL 中有限单元尺寸和时间步长设置

有限单元的尺寸和求解器的时间步长与仿真结果的精度和计算稳定性密切相关。根据 Yang 等^[29]对导波仿真的研究,有限单元尺寸与导波波长的关系如式(7)所示。其中, $L_{\max}$ 为有限单元边长的最大边长, $\lambda_{\min}$ 为导波信号的最小波长。为保证计算精度, $n_{\min}$ 应该尽量大,但是 $n_{\min}$ 越大,计算速度越慢,且对计算机内存的需求量呈指数上升,文献建议的取值范围为6~10。Yang 等^[29]也给出了时间步长与信号波速的关系,如式(8)所示。其中, $L_{\min}$ 是有限单元边长的最小边长, C_d 为S0模式的波速。

$$L_{\max} < \frac{\lambda_{\min}}{n_{\min}} \quad (7)$$

$$\Delta t \leq \frac{L_{\min}}{C_d} \quad (8)$$

2.3 基于 COMSOL 的热-力-电多物理场耦合导波仿真框架

基于多物理场耦合的导波仿真方法的总体框架如图2所示。首先,要建立带有压电传感器的热防护

结构的几何形状,确定激励信号以及压电传感器和热防护结构的材料属性。然后,定义多物理场耦合。接着,根据上文给出的相关原理配置有限元网格的尺寸和求解器的时间步长。最后,通过对仿真结果进行分析,得到导波信号和损伤特性。

3 温度梯度对钛合金板中导波传播的影响

3.1 温度梯度下结构导波传播特性建模

1) 三维几何模型。钛合金结构的三维几何模型如图3所示,结构对象为钛合金材料平板结构,长、宽、厚尺寸为450 mm×300 mm×2 mm。压电片直径为8 mm,厚度为0.48 mm。2个压电片之间的距离为300 mm,对称布置在结构表面。

2) 材料参数。本文开展20~500℃温度梯度下钛合金热防护结构的导波传播特性仿真,不同温度下的钛合金材料参数见表1。

3) 多物理场耦合。如图4所示,在固体传热模块中,在钛合金的外表面和内表面,分别设置为500、20℃。在固体力学模块中,将整个钛合金板几何模型设置为Linear Elastic Material。将钛合金板的四周

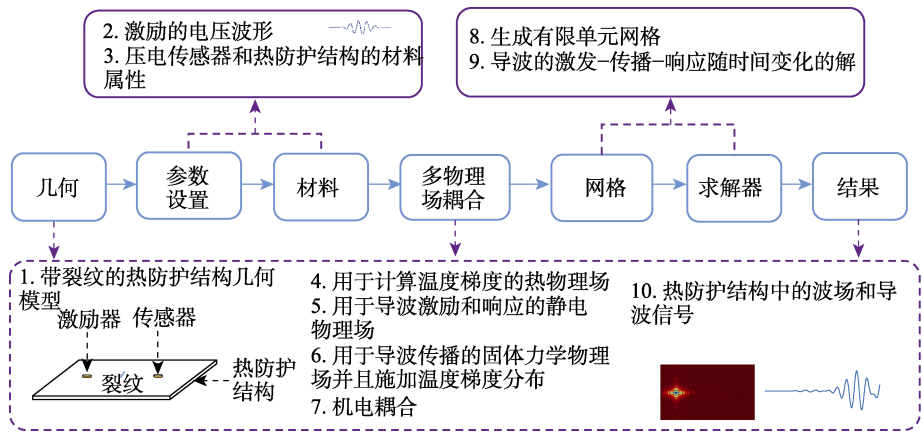


图 2 基于多物理场耦合的导波仿真方法框架
Fig.2 Guided wave simulation method framework based on multi-physical field coupling

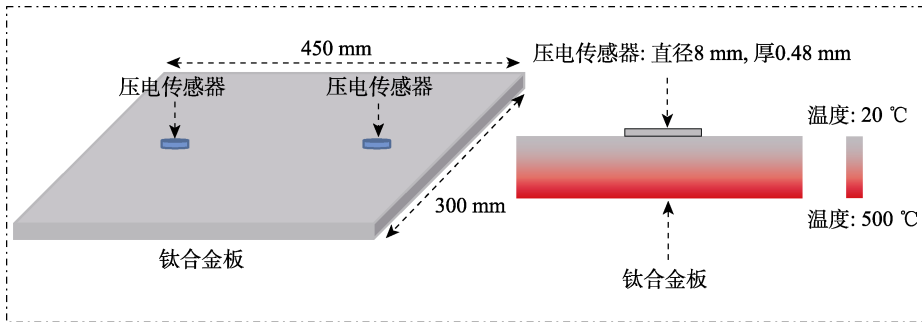


图 3 钛合金健康状态温度梯度下几何模型
Fig.3 Geometric model of healthy titanium alloy under temperature gradient

表 1 温度梯度下钛合金材料属性^[29]
Tab.1 Material properties of titanium under temperature gradient^[29]

温度/℃	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	密度 ρ $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
20	109	0.34	4 440
100	109	0.34	4 440
200	97	0.34	4 440
300	91	0.35	4 440
400	85	0.37	4 440
500	75	0.37	4 440

设置为 Low-Reflecting Boundary, 其中阻尼类型设为“P 和 S 波”。压电材料以及静电物理模块中机械阻尼性质采用 Rayleigh 阻尼, 其中阻尼属性设置为 $\alpha=0$, $\beta=2.2\times10^{-8}$ 。在静电物理模块, Ground 定义在压电传感器的下表面, 以保证电势为 0。Electric Potential 是激励信号的电压波形, 设置在压电传感器的上表面。

4) 有限单元划分和求解器时间步长设置。根据上文提及的有限单元划分原则, 有限单元网格的最大单元尺寸和最小单元尺寸分别为 2、1 mm。本文采用的有限元网格类型为自由四面体, 它是一个十节点的二阶多项式插值函数单元。求解器的时间步长设为 1×10^{-7} s。

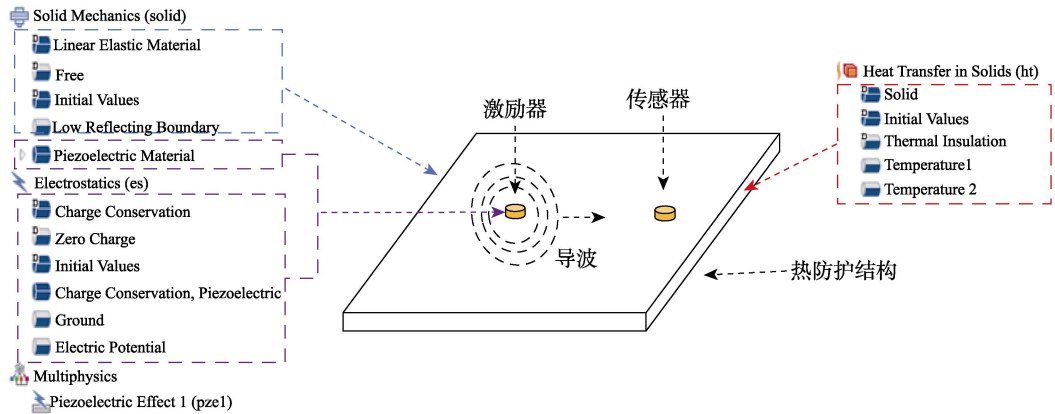


图 4 多物理场耦合设置
Fig.4 Multi-physical field coupling setup

3.2 温度梯度对结构导波传播特性影响分析

激励信号的中心频率为 100 kHz 时,有无温度梯度的导波波形对比如图 5 所示。可以看出,温度梯度使得 S0 模式的幅值减小,相位发生滞后。温度梯度

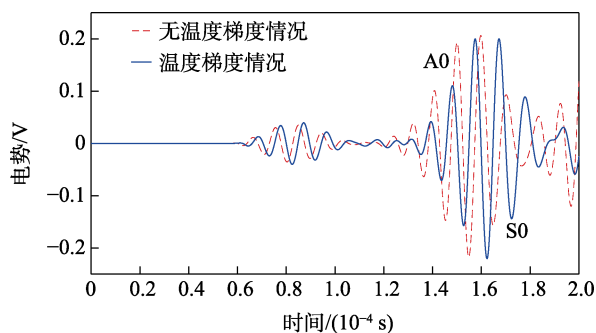


图 5 导波信号典型时刻波形对比
Fig.5 Comparison of wave forms at typical time of guided wave signals

对 A0 模式的影响主要体现在相位上,相较于无温度梯度的情况,有很大的滞后。在有无温度梯度 2 种情况下,导波信号群速度的对比见表 2。有温度梯度各个模式的传播速度都要低于没有温度梯度的情况,这是温度梯度下传播信号的相位滞后所导致的。激励信号的中心频率为 100 kHz 时,有无温度梯度的导波波场对比如图 6 所示。从波场中同样可以看出相位的滞后性, S0 模式和 A0 模式的相位都发生了滞后。

表 2 钛合金健康状态下有无温度梯度波传播速度对比
Tab.2 Comparison of wave propagation velocity with and without temperature gradient in healthy titanium alloy

激励信号中心 频率/kHz	模式	群速度/(m·s ⁻¹)	
		无温度梯度	有温度梯度
100	S0	6 849	53 00
	A0	3 429	2 207

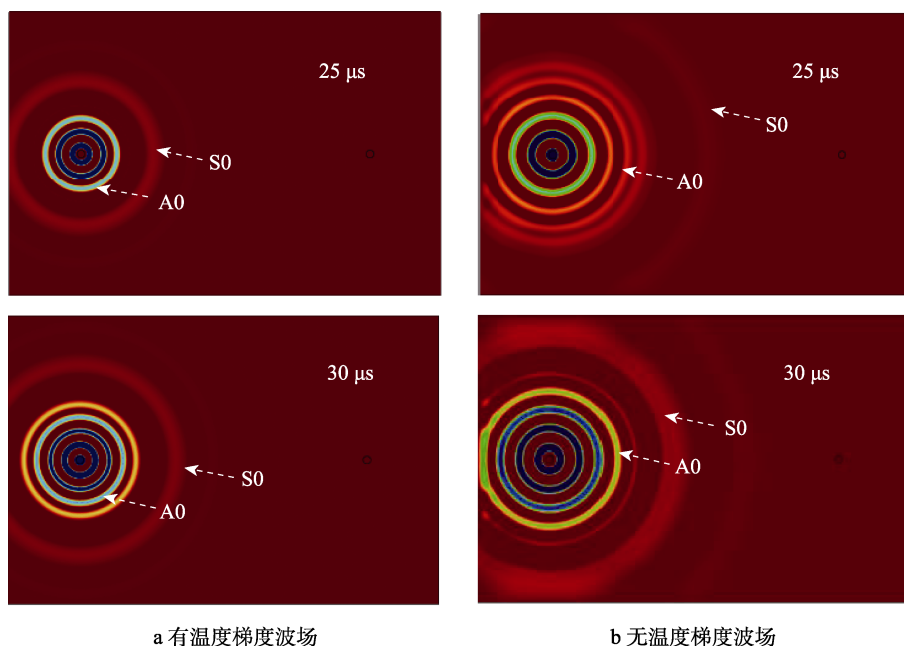


图 6 钛合金健康状态中心频率为 100 kHz 的导波信号典型时刻波场对比

Fig.6 Comparison of wave field at typical time of guided wave signal with center frequency of 100 kHz in healthy titanium

4 裂纹对温度梯度下钛合金热防护结构中导波传播特性的影响研究

4.1 温度梯度下含裂纹钛合金结构的导波传播特性建模

与健康状态温度梯度下的钛合金仿真相比,温度梯度下含裂纹的钛合金仿真主要区别在于三维几何模型,其余设置均相同。含裂纹钛合金结构的三维几何模型如图 7 所示。与健康状态下的三维几何模型相比,在板上增加了长度不同的裂纹损伤,裂纹长度有 5、10、15、20 mm 等 4 种,宽度均为 0.1 mm。

4.2 温度梯度下裂纹对导波传播特性影响分析

激励信号中心频率 100 kHz 下的健康状态与不同裂纹损伤大小的导波响应信号如图 8 所示。可以看出,裂纹损伤对 S0 模式的信号幅值和相位都有影响,且幅值随着裂纹损伤的增大而降低,相位则随着裂纹损伤的增大而不断滞后,即 S0 模式的群速度逐渐降低。裂纹损伤对 A0 模式幅值和相位的影响和 S0 模式相同,随着裂纹损伤增大, A0 模式幅值逐渐减小,相位也逐渐滞后,即 A0 模式的群速度逐渐降低。钛合金在不同损伤状态下的群速度对比见表 3。可以看出,裂纹损伤从 0 mm 扩展到 20 mm, S0 模式的群速

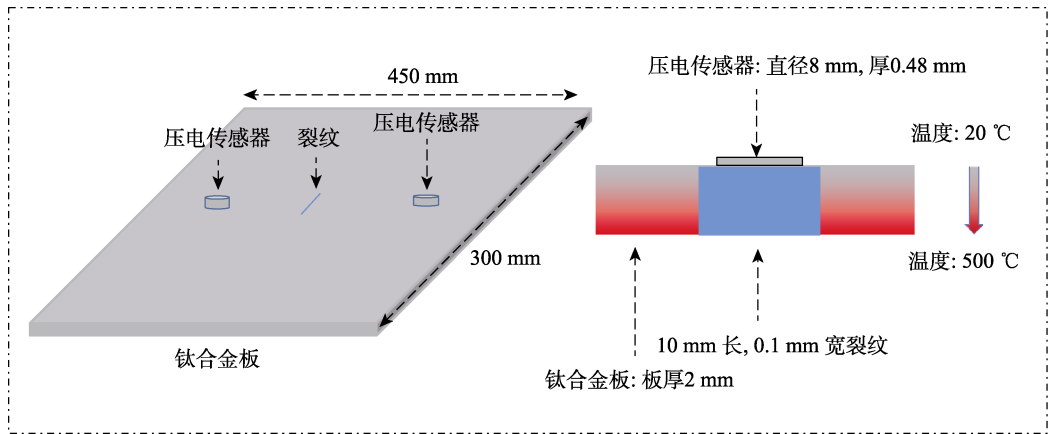
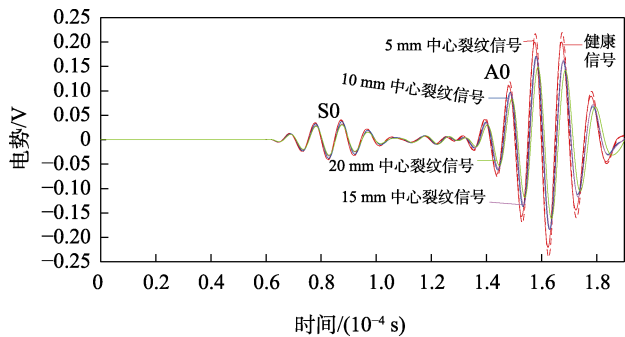
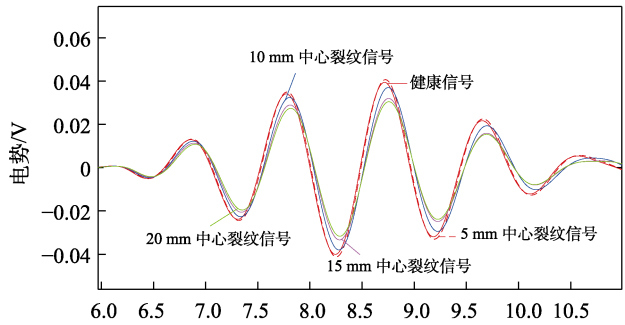


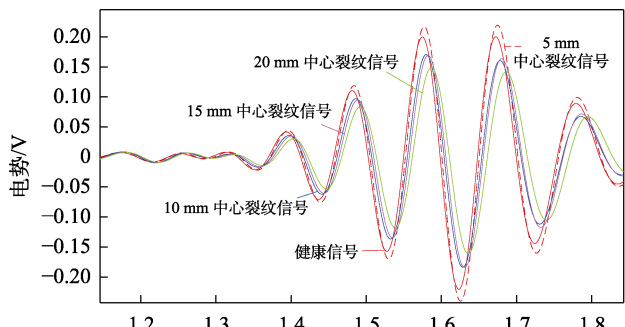
图 7 钛合金损伤状态温度梯度下的几何模型
Fig.7 Geometric model of damaged titanium alloy under temperature gradient



a 完整信号



b S0模式



c A0模式

图 8 钛合金结构健康和损伤状态下导波信号的对比
Fig.8 Comparison of guided wave signals in healthy and damaged titanium alloy structures

表 3 钛合金不同损伤状态下群速度对比
Tab.3 Comparison of group velocity under different damage state in titanium alloy

模式	裂纹长度/mm				
	0	5	10	15	20
S0	5 300.4	5 283.5	5 261.7	5 240.3	5 220.4
A0	2 207.5	2 193.6	2 181.6	2 169.2	2 160.8

度降低了 1.5%，A0 模式的群速度降低了 2%。

5 结论

本文提出了一种基于热-力-电多物理场耦合的钛合金热防护结构导波仿真方法。通过钛合金板结构中的导波传播特性,验证了该多物理场耦合模型的适用性。通过裂纹对导波传播的影响现象,进一步验证了模型的适用性,得到以下结论:

1) 构建了温度与固体物理场控制方程中的弹性刚度张量线性模型,利用压电传感器与固体结构接触区域应变相等的原理,将固体物理场和静电学物理场进行了耦合,实现了温度梯度下钛合金热防护结构的多物理场耦合仿真模型。

2) 针对典型热防护结构中的钛合金板,进行了导波传播群速度和传播幅值衰减特性分析。研究发现,该多物理场耦合模型可以有效地表征不同温度梯度影响下导波的传播群速度和幅值,表现为导波的群速度减慢,幅值衰减降低。

3) 通过对钛合金平板结构中贯穿裂纹损伤的预设,利用该多物理场耦合模型,研究了温度梯度下裂纹损伤对导波传播群速度和幅值的影响。结果表明,裂纹损伤使导波的群速度减慢、幅值减弱,且损伤越大,影响越明显。裂纹扩展至 20 mm 时,S0 模式群速度降低了 1.5%,A0 模式群速度降低了 2%。

参考文献:

- [1] 程兴华. 高超声速飞行器防热壁板气动热弹性耦合建模与分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
CHENG Xing-hua. Coupled Aerothermoelastic Modeling and Analysis of Thermal Protection Panel for Hypersonic Vehicles[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [2] 李宇峰, 贺利乐, 张璇, 等. 典型热防护壁板结构的热模态分析[J]. 应用力学学报, 2017, 34(1): 43-49.
LI Yu-feng, HE Li-le, ZHANG Xuan, et al. Thermal Modal Analysis of Typical Thermo-Defend Panel Structure[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(1): 43-49.
- [3] 姚草根, 吕宏军, 贾新潮, 等. 金属热防护系统材料与结构研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2005, 35(2): 10-13.
YAO Cao-gen, LYU Hong-jun, JIA Xin-chao, et al. Development of Metallic Thermal Protection System[J]. Aerospace Materials & Technology, 2005, 35(2): 10-13.
- [4] XIE Gong-nan, WANG Qi, SUNDEN B, et al. Thermomechanical Optimization of Lightweight Thermal Protection System under Aerodynamic Heating[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 59(1/2): 425-434.
- [5] 解维华, 韩国凯, 孟松鹤, 等. 返回舱/空间探测器热防护结构发展现状与趋势[J]. 航空学报, 2019, 40(8): 022792.
XIE Wei-hua, HAN Guo-kai, MENG Song-he, et al. Development Status and Trend of Thermal Protection Structure for Return Capsules and Space Probes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(8): 022792.
- [6] DARYABEIGI K. Thermal Analysis and Design Optimization of Multilayer Insulation for Reentry Aerodynamic Heating[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2002, 39(4): 509-514.
- [7] 袁慎芳. 结构健康监控[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
YUAN Shen-fang. Structural Health Monitoring and Damage Control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [8] 魏东, 黄旌, 韩斐. 飞机结构健康监控模拟加载试验系统的设计[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 128-130.
WEI Dong, HUANG Jing, HAN Fei. Design of Simulated Loading Test System for Aircraft Structure Health Monitoring[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 128-130.
- [9] 马凌, 李俊, 赵韶平, 等. 面向导弹贮存延寿的 PHM 技术研究与应用[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 42-48.
MA Ling, LI Jun, ZHAO Shao-ping, et al. PHM Technique Studies and Engineering Applications Faced to Missile Storage and Life Extension[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 42-48.
- [10] 黄梦宏, 朱令娴, 张志勇, 等. 基于短时傅里叶变换的飞行器故障振动信号分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2): 62-65.
HUANG Meng-hong, ZHU Ling-xian, ZHANG Zhi-yong, et al. Fault Vibration Signal Analysis of Air Vehicle Flying Based on STFT[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(2): 62-65.
- [11] 彭望舒, 于晴. 直升机机载产品环境鉴定试验故障分析[J]. 装备环境工程, 2019, 16(1): 73-76.
PENG Wang-shu, YU Qing. Failures of Helicopter Airborne Product in Environmental Qualification Tests[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(1): 73-76.
- [12] YUAN Shen-fang, REN Yuan-qiang, QIU Lei, et al. A Multi-Response-Based Wireless Impact Monitoring Network for Aircraft Composite Structures[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7712-7722.
- [13] MITRA M, GOPALAKRISHNAN S. Guided Wave Based Structural Health Monitoring: A Review[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(5): 053001.
- [14] MEI Han-fei, YUAN Shen-fang, QIU Lei, et al. Damage Evaluation by a Guided Wave-Hidden Markov Model Based Method[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(2): 025021.
- [15] YUAN Shen-fang, CHEN Jian, YANG Wei-bo, et al. On-Line Crack Prognosis in Attachment Lug Using Lamb Wave-Deterministic Resampling Particle Filter-Based Method[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(8): 085016.
- [16] QIU Lei, YAN Xi-xi, LIN Xiao-dong, et al. Multiphysics Simulation Method of Lamb Wave Propagation with Piezoelectric Transducers under Load Condition[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(5): 1071-1086.
- [17] CHEN Jian, YUAN Shen-fang, WANG Hui. On-Line Updating Gaussian Process Measurement Model for Crack Prognosis Using the Particle Filter[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 140: 106646.
- [18] MARIANI S, CAWLEY P. Change Detection Using the Generalized Likelihood Ratio Method to Improve the Sensitivity of Guided Wave Structural Health Monitoring Systems[J]. Structural Health Monitoring, 2021, 20(6): 3201-3226.
- [19] ZHANG Jin-jin, YUAN Shen-fang, CHEN Jian. Guided Wave-Hidden Markov Model for On-Line Crack Evaluation of a Full-Scale Aircraft[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 117: 106976.
- [20] RICCI F, MONACO E, BOFFA N D, et al. Guided Waves for Structural Health Monitoring in Composites: A Review and Implementation Strategies[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2022, 129: 100790.
- [21] CROXFORD A J, WILCOX P D, DRINKWATER B W, et al. Strategies for Guided-Wave Structural Health Monitoring[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007, 463(2087): 2961-2981.
- [22] CROXFORD A J, MOLL J, WILCOX P D, et al. Efficient Temperature Compensation Strategies for Guided Wave

- Structural Health Monitoring[J]. Ultrasonics, 2010, 50(4/5): 517-528.
- [23] MOLL J, SCHULTE R T, HARTMANN B, et al. Multi-Site Damage Localization in Anisotropic Plate-Like Structures Using an Active Guided Wave Structural Health Monitoring System[J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(4): 045022.
- [24] SALAS K I, CESNIK C S. Guided Wave Structural Health Monitoring Using CLoVER Transducers in Composite Materials[J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(1): 015014.
- [25] YANG J, CHANG Fu-kuo. Detection of Bolt Loosening in C—C Composite Thermal Protection Panels: I. Diagnostic Principle[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(2): 581-590.
- [26] KUNDU T, DAS S, JATA K V. Health Monitoring of a Thermal Protection System Using Lamb Waves[J]. Structural Health Monitoring, 2009, 8(1): 29-45.
- [27] WU Guan-nan, XU Chao, DU Fei, et al. A Modified Time Reversal Method for Guided Wave Detection of Bolt Loosening in Simulated Thermal Protection System Panels[J]. Complexity, 2018, 2018: 1-12.
- [28] BOYER R, WELSCH G, COLLINGS E W. Materials Properties Handbook: Titanium Alloys[M]. Nevada: ASM International, 1993.
- [29] YANG Chun-hui, YE Lin, SU Zhong-qing, et al. Some Aspects of Numerical Simulation for Lamb Wave Propagation in Composite Laminates[J]. Composite Structures, 2006, 75(1/2/3/4): 267-275.

责任编辑: 刘世忠