

## 超声红外热波检测中的振动特性及声混沌分析

田 干<sup>1</sup>, 杨正伟<sup>1</sup>, 朱杰堂<sup>1</sup>, 张 炜<sup>1</sup>, 罗文源<sup>2</sup>

(1. 火箭军工程大学 602 室, 陕西 西安 710025; 2. 中国酒泉卫星发射中心, 甘肃 酒泉 736200)

**摘 要:** 为了消除超声热波检测中的驻波现象对检测结果的不利影响, 运用数值仿真方法研究了构件在超声激励下的振动特性和声混沌现象。首先, 通过建立含裂纹损伤的复合材料构件的有限元模型, 研究了不同激励频率条件下构件的驻波共振模态, 发现构件在超声谐波激励下的响应仍是谐波, 且响应频率与激励频率相同, 容易产生驻波共振。然后, 通过改进仿真模型, 分析了声混沌对检测结果的影响, 结果表明: 在相同激励频率条件下, 声混沌的产生能够消除驻波, 更有助于提高复合材料构件损伤处的表面温差, 并且随着激励频率的增加, 声混沌现象出现的概率也增加。实际检测过程中, 可据此改善检测条件提高检测能力。

**关键词:** 超声红外热波检测; 驻波; 振动特性; 声混沌

中图分类号: TP274 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0304003

## Vibration characteristics and acoustic chaos analysis of ultrasonic infrared thermal wave test

Tian Gan<sup>1</sup>, Yang Zhengwei<sup>1</sup>, Zhu Jietang<sup>1</sup>, Zhang Wei<sup>1</sup>, Luo Wenyan<sup>2</sup>

(1. 602 Office of Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 736200, China)

**Abstract:** The aim of this paper is to study and solve the disadvantage of standing wave on the damage detection by ultrasonic thermal wave testing technology. The vibration characteristics and acoustic chaos phenomena of the structure under ultrasonic excitation were numerically analyzed. Firstly, by establishing a composites finite model with a crack, the resonance models of the structure under different excitation frequencies were analyzed. It is found that the harmonic wave response of the structure under harmonic ultrasonic wave with the response frequency was equals to the excitation frequency, and the standing wave easily appeared. Then, by improving the composites finite model, the influences on the testing result caused by acoustic chaos were analyzed. The numerical results show that, under the same excitation frequency, the standing wave was effectively eliminated by acoustic chaos. Acoustic chaos is beneficial to the detection by increasing the surface temperature difference at the damage, and the probability of acoustic chaos generated is increased by increasing the excitation frequency. And the detection capability and conditions can be improved according to this result.

**Key words:** ultrasonic infrared thermal wave testing; standing wave; vibration characteristics; acoustic chaos

收稿日期: 2015-07-10; 修订日期: 2015-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(51305447, 51575516)

作者简介: 田干(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事飞行器结构无损检测与故障诊断方面的研究。Email: tiangantian@163.com

通讯作者: 杨正伟(1984-), 男, 讲师, 博士, 主要从事飞行器结构无损检测与故障诊断方面的研究。

Email: yangzhengwei1136@163.com

## 0 引言

超声红外热波(Ultrasonic Infrared Thermal Wave)无损检测技术<sup>[1-5]</sup>,是一种将超声波能量作为热激励源,引起材料表面或浅表面损伤部位生热,同时使用红外热像仪获取红外图像的无损检测方法。

但是由于超声波是一种机械波,构件在单一频率超声激励下会产生驻波现象,驻波共振<sup>[6]</sup>是构件在单一频率超声激励下进行的一种特殊形式的振动,最典型的特征是其不传播能量,这使得超声波的机械能在没有损伤的部位也会大量衰减,并以热的形式传导到构件表面,从而对损伤对应的温度场形成干扰,导致一些缺陷信息被淹没,或一些正常区域被判断为存在缺陷。

针对驻波现象,宋远佳等<sup>[7]</sup>在试验中采用医用胶布作为超声枪探头与试件之间的耦合物质,较好的消除了驻波现象,但没有就此研究驻波消除的机理。Xiaoyan Han 等<sup>[8]</sup>指出改变超声枪和试件的接触状态可以产生声混沌现象,并认为这种非线性效应的产生有助于消除驻波现象;并通过进一步研究<sup>[9-10]</sup>发现声混沌现象的出现增强了裂纹处的红外热信号,提高了超声红外技术的检测能力,甚至在较低的超声激励能量下也能产生较好的激励效果;此后<sup>[11]</sup>,继续进行了一系列金属构件的数值仿真研究,从模型振动波形和频谱图初步解释了试验中的非线性振动现象。I. Y. Solodov 和 B. A. Korshak<sup>[12]</sup>也通过研究指出超声热波检测过程中分谐波的产生是由于构件损伤处存在非线性效应。

为了提高超声红外热波技术的检测能力,研究声混沌的产生机理,文中通过建立碳纤维复合材料构件有限元数值仿真模型,从分析复合材料构件在单一频率超声波激励下的振动模态出发,研究损伤处的生热与构件振动特性之间的关系,并通过对有限元模型的改进,研究声混沌现象对驻波的消除作用。

## 1 超声热波损伤检测的原理

### 1.1 超声热波检测系统组成

超声红外热波检测系统主要由超声激励源、红外热成像仪及计算机控制与处理系统三个部分组成。其中超声激励源产生超声波并将短脉冲(50~200 ms)、

低频率(20~40 kHz)的超声波作用于物体表面,红外热像仪用于观察和记录试件表面的温度场变化,采集到的原始红外热图经过计算机系统的处理和分析后,实现对损伤的类型、大小及深度等信息的有效判断。其检测原理如图 1 所示。

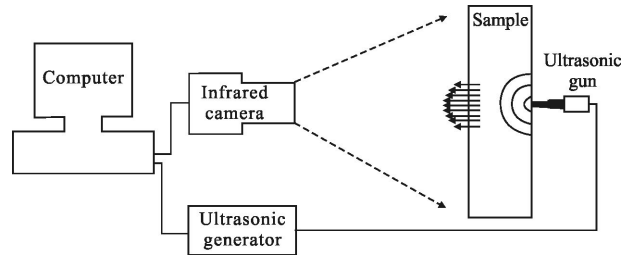


图 1 超声红外热成像检测原理图

Fig.1 Principle schematic of the ultrasonic infrared thermography technique

### 1.2 超声波引起损伤处的生热机理

在超声波激励的过程中,构件内部损伤界面间发生接触碰撞,界面质点间的摩擦作用使超声波机械能转化成热能。发生接触-碰撞的损伤部位为多自由度的振动系统,在超声波激励下受迫振动的控制方程为:

$$M \frac{d^2U}{dt^2} + C \frac{dU}{dt} + KU = F + R \quad (1)$$

式中: $U$ 为节点位移矩阵; $M$ 、 $C$ 和 $K$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $F$ 为超声波引起的外载荷矩阵; $R$ 为损伤界面接触力矩阵,是位移的函数。

沿材料厚度方向加载超声振动:

$$a(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

式中: $A$ 、 $f$ 分别为超声波的振幅和频率; $t$ 为时间, $t > 0$ 。

由热力学第一定律可知,在超声波激励过程中,损伤接触面在动摩擦力作用下摩擦产生热量的热流密度为<sup>[5]</sup>:

$$q(t) = \gamma \cdot [\mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-\beta v}] R_N(t) \cdot v_T(t) \quad (3)$$

式中: $\gamma$ 为摩擦机械能转化为热能的比例系数; $\beta$ 为静摩擦转化为动摩擦的速度系数; $R_N(t)$ 为法向摩擦力; $v_T(t)$ 为接触点的切向相对速度差; $\mu_s$ 为静摩擦系数; $\mu_d$ 为动摩擦系数。

## 2 超声热波检测的振动特性分析

超声波与板表面垂直且沿厚度方向传播时,遇到另一界面会发生反射。入射波和反射波的振幅、频率

及传播速度均相同,在同一直线上沿相反方向传播并叠加而形成驻波,情况与两端固定绳上的驻波类似<sup>[7]</sup>。

### 2.1 建模与网格划分

以含有表面微裂纹的碳纤维复合材料构件为例进行仿真计算,研究不同频率超声激励后构件出现驻波共振时的振动模态,力学参数<sup>[13]</sup>如表 1 所示,其他物理参数:密度  $\rho$  为 1 340 kg/m<sup>3</sup>,比热容  $c$  为 700 J/(kg · K),沿纤维方向的热传导系数  $\lambda_1$  为 12 W/(m · K),垂直于纤维方向的传热系数  $\lambda_2$  为 0.78 W/(m · K)。模型尺寸为 200 mm×30 mm×3 mm,如图 2 所示。

采用八结点力-热耦合六面体单元 C3D8RT(三向线性位移,三向线性温度,减缩积分,沙漏控制)对试件划分网格,并在裂纹界面上覆盖面-面接触单元(模拟损伤表面的接触-碰撞及摩擦生热),单元总数约为 3 400 个,其中厚度方向划分单元数为 5 个,对裂纹区域进行网格细化。边界条件为约束试件两头端面 6 个方向的自由度。

表 1 碳纤维增强复合材料力学参数表

Tab.1 Mechanical properties of carbon fiber reinforced composite

Elasticity modulus / GPa			Shear modulus/GPa			Poisson ratio		
$E_1$	$E_2$	$E_3$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$
19.6	19.6	8.8	6.4	4.1	4.1	0.34	0.34	0.34

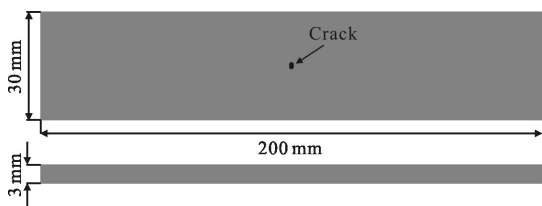


图 2 含表面裂纹的复合材料构件模型

Fig.2 Model of composite materials with surface crack

### 2.2 振动模态分析

保持激励时间 40 ms、激励幅度值 10  $\mu$ m 和步长 10<sup>-5</sup> s/step 不变,改变激励频率分别为 20 kHz、30 kHz、40 kHz 和 50 kHz,得到不同激励频率下的振动模态如图 3 所示。可以看出,驻波振动使构件表面一些区域温度较高,形成固定的微热斑,而且每种激励频率对应一种振动模态。

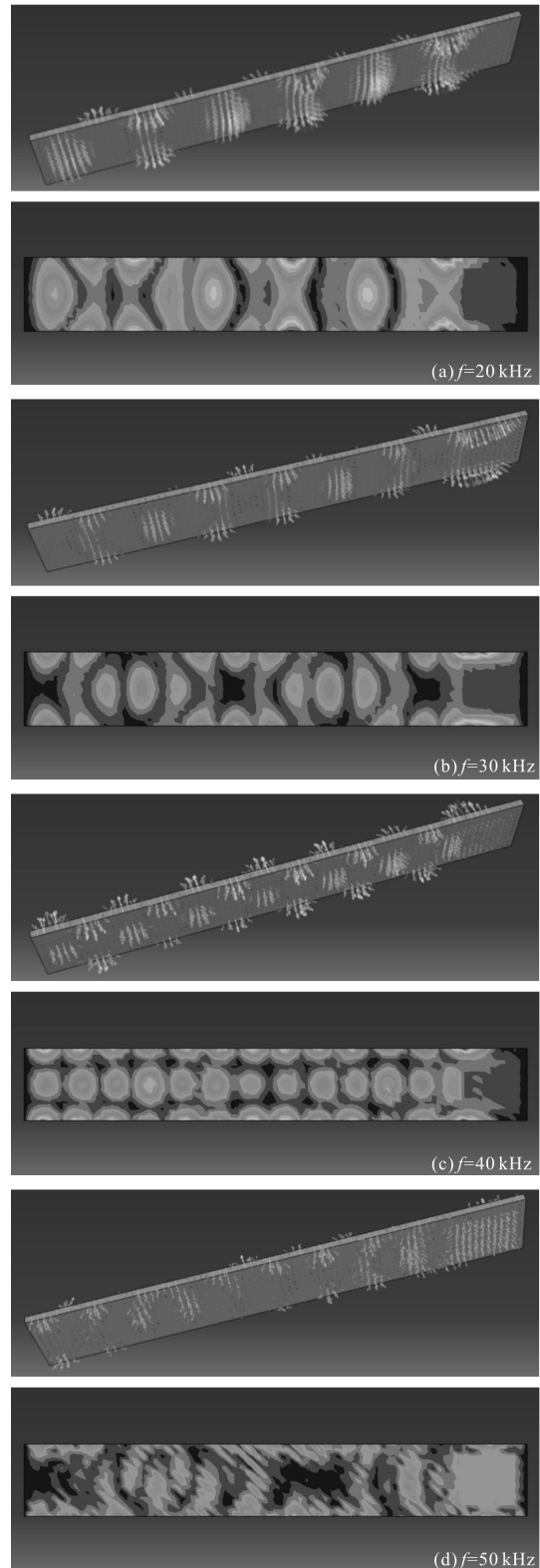


图 3 不同激励频率时的振动模态

Fig.3 Vibration modals under different excitation frequencies

### 2.3 振动速度频谱分析

以 20 kHz 激励频率条件下振动模态图为例,选

取构件表面 1 792 和 2 001 两个节点, 其位置如图 4 所示, 提取两点 y 方向(板厚方向)的振动速度图如图 5 所示, 并对其进行傅里叶变换, 得频谱图如图 6 所示。提取不同激励频率条件下节点 1 792 的 y 方向振动速度频谱图如图 7 所示。从图中可以看出, 构件在超声谐波激励下的响应仍是谐波, 且响应频率与激励频率相同, 因此, 在检测过程中容易产生驻波共振。

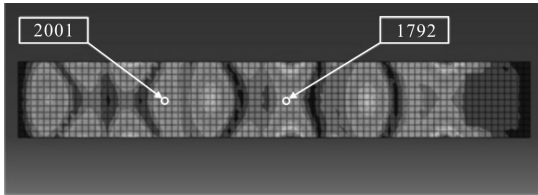


图 4 激励频率为 20 kHz 时的振动模态图

Fig.4 Vibration modal for  $f=20$  kHz

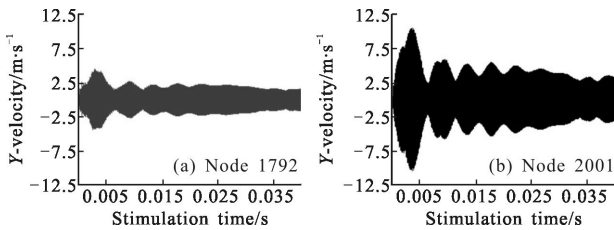


图 5 节点 y 方向的振动速度波形图

Fig.5 Vibration velocity oscillogram at y direction of nodes

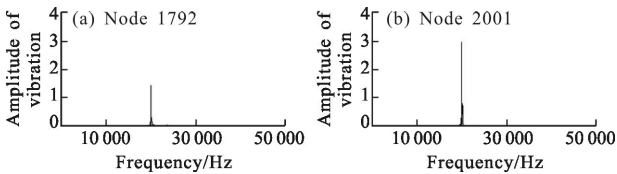


图 6 节点 y 方向的振动速度频谱图

Fig.6 Vibration velocity spectrum at y direction of nodes

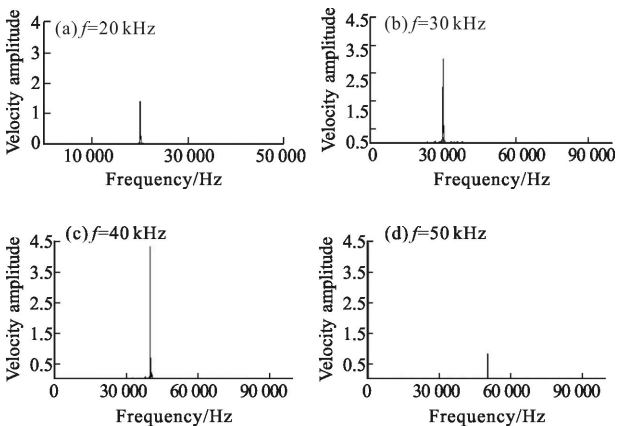


图 7 节点 1792 y 方向的频谱图

Fig.7 Spectrums at y direction of node 1792

### 3 超声热波检测中的声混沌现象分析

在上述仿真分析中, 均以一个简谐位移函数模拟超声激励, 但在实际检测中, 超声激励枪头与构件表面的相互作用会产生非线性效应, Xiaoyan Han 称之为声混沌<sup>[10-11]</sup>, 并认为这种非线性效应的产生有助于消除驻波现象, 提高检测效果。文中对检测模型进行改进, 通过改进构件两端的固定方式, 从而改变超声波激励探头与构件的接触状态, 以研究声混沌的产生机理和对驻波的消除作用。

#### 3.1 建模与网格划分

建立含表面裂纹的构件模型, 如图 8 所示, 试件仍为碳纤维增强复合材料, 超声激励头为钛合金, 试件支撑件为钢材料, 其中试件尺寸和材料参数与前面模型相同。超声激励头的长为 20 mm, 直径为 15 mm, 材料参数如表 2 所示; 支撑件的尺寸为 80 mm×30 mm×10 mm, 材料参数如表 3 所示。超声枪头以频率 20 kHz, 幅度 10  $\mu$ m 向试件作简谐振动, 激励时间为 40 ms, 步长为 10<sup>-5</sup> s/step。

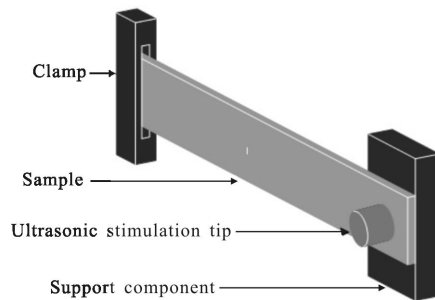


图 8 改进后的仿真模型

Fig.8 Improved composites finite model

表 2 超声枪钛合金材料参数

Tab.2 Parameters of titanium material of ultrasonic gun

Density /kg·m <sup>-3</sup>	Specific heat /J·(kg·°C) <sup>-1</sup>	Thermal conductivity /W·(m·°C) <sup>-1</sup>	Elasticity modulus /GPa	Poisson ratio
4 730	495	10.9	114	0.33

表 3 支撑件材料的物性参数表

Tab.3 Materials properties of the strutting piece

Material/s	Density /kg·m <sup>-3</sup>	Specific heat /J·(kg·°C) <sup>-1</sup>	Thermal conductivity /W·(m·°C) <sup>-1</sup>	Elasticity modulus /GPa	Poisson ratio
Alumini- um	2 700	870	170	70	0.33
Steel	7 854	465	49.8	210	0.29

试件网格的划分与前面的保持一致,试件左端的前后两面均固定(约束其 6 个自由度,实现夹具的效果),假设右端可以在超声枪头和支撑件之间自由运动。采用八结点线性六面体单元 C3D8R (减缩积分,沙漏控制)对超声激励头和支撑件划分网格,在超声枪头与试件表面、支撑件与试件背面之间均覆盖面-面接触单元。

### 3.2 计算结果分析

加载计算后,提取构件表面两节点 y 方向(板厚方向)的振动速度图如图 9 所示,并对其进行傅里叶变换,得频谱图如图 10 所示。

由图 9~10 可见,超声枪头与构件的相互作用使构件产生了非线性响应,其振动频谱成分非常丰富,包含了幅值较高的基波(Fundamental wave)、次谐波(Sub-harmonics)、间谐波(Inter-harmonics)及高次谐波(Higher-harmonics)等,即声混沌振动现象产生,有效地消除了驻波。计算 20 kHz 激励频率下产生声混沌现象时的裂纹表面温度场如图 11 所示。

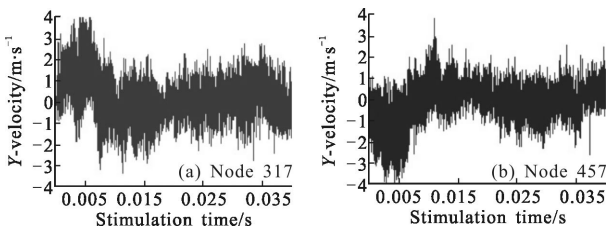


图 9 节点 y 方向的振动速度波形图

Fig.9 Vibration velocity oscillogram at y direction of nodes

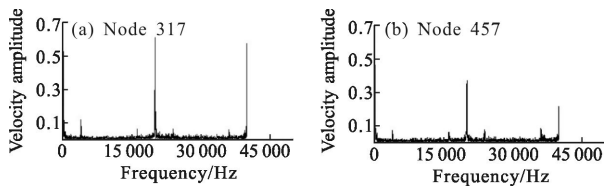


图 10 节点 y 方向的振动速度频谱图

Fig.10 Vibration velocity spectrum at y direction of nodes

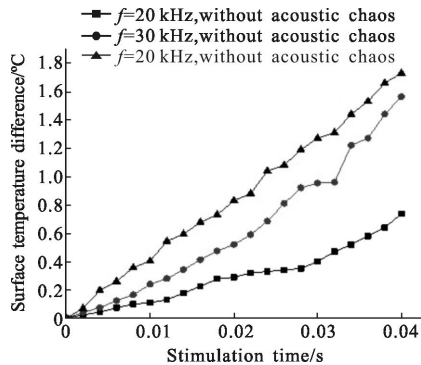


图 11 裂纹表面温度场

Fig.11 Temperature of the crack surface

从图中可以看出,声混沌现象的出现对复合材料损伤的超声热波检测具有重大意义:在相同激励频率下,声混沌现象提高了损伤处的表面温度差;而在相同激励时间及振幅的条件下,低频率的激励可能产生比高频率激励时更高的表面温度差。

### 3.3 激励源参数对声混沌现象的影响

改变激励源参数设置,重新计算后提取不同激励时间条件下节点 317 的 y 方向振动速度频谱图如图 12 所示。提取不同激励幅度条件下节点 317 的 y 方向振动速度频谱特征得到如图 13 所示的频谱图。提取不同激励频率条件下节点 317 的 y 方向振动速度频谱特征如图 14 所示频谱图。

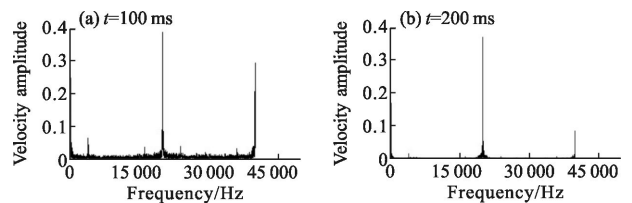


图 12 不同激励时间条件下节点 317 的速度频谱图

Fig.12 Vibration velocity spectrum of node 317 under different length excitation times

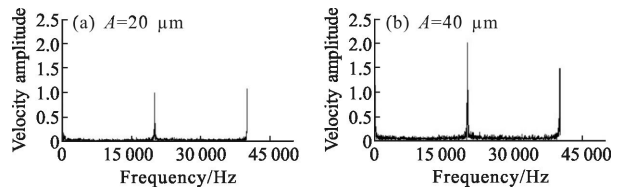


图 13 不同激励幅度下节点 317 的速度频谱图

Fig.13 Vibration velocity spectrum of node 317 under different excitation amplitudes

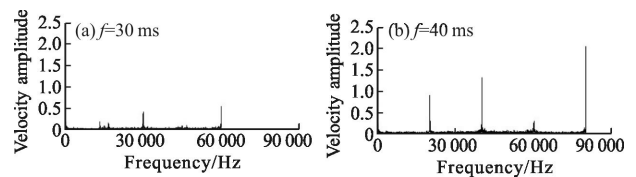


图 14 不同激励频率条件下节点 317 的速度频谱图

Fig.14 Vibration velocity spectrum of node 317 under different excitation frequencies

由图 12~14 可知,延长激励时间和提高激励幅度并不能有效地产生幅值较高的次谐波或高次谐波,而随着激励频率的增加,高幅值的次谐波和高次谐波也随之增加。这种非线性效应越明显,表面温度差将会越大,从而越有利于损伤的检测。

### 3.4 讨论

在超声热波检测的振动特性分析中,可以观察到损伤对应周围出现了带状的“微热斑”,这些“微热斑”为超声波在试件中传播时形成的驻波,它们的存在影响了对缺陷信息的获取和识别,将会严重影响检测效果。而通过改进检测模型,改变超声枪探头与构件的接触方式,使检测过程中产生了声混沌现象,改变了试件在超声波激励下的振动状态,丰富了检测过程中的振动频谱成分,提高了对缺陷和损伤的检测能力。

### 4 结论

文中通过数值仿真方法分析构件在超声激励下的振动特性,研究了不同激励频率条件下构件的驻波共振模态,发现构件在超声谐波激励下的响应仍是谐波,且响应频率与激励频率相同。通过改进检测模型,合理设计了构件检测时的固定形式,分析了声混沌的产生和对驻波的消除作用,并在改进仿真模型的基础上研究得出:随着激励频率的增加,声混沌现象出现的概率也增加,且频谱成分更丰富,包含了更多的次谐波、高次谐波等;而且在相同激励频率条件下,声混沌更有助于提高复合材料构件损伤处的表面温差,提高超声热波技术的检测能力。因此,在实际检测过程中,可通过选用适当的耦合材料来改善超声枪头与被检对象之间的表面接触状态、合理设计检测过程、优化检测设备参数(频率、振幅)、调整激励时间等措施,提高对缺陷的检测和识别能力。

### 参考文献:

[1] Marco Morbidini, Peter Cawley, Tim Barden, et al. Prediction of the thermosonic signal from fatigue cracks in metals using vibration damping measurements [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(10): 104905.1-13.

[2] Cho Jaiwan, Yongchil Seo, Jung Seungho, et al. Defect detection within a pipe using ultrasound excited thermography [J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2007, 39(5): 637-646.

[3] Vavilov V P. Dynamic thermal tomography: Recent improvements and applications [J]. *NDT & E International*, 2015, 71: 23-32.

[4] Qin Lei, Liu Junyan, Gong Jinlong, et al. Testing surface

crack defects of sheet metal with ultrasonic lock-in thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1123-1130. (in Chinese)

秦雷, 刘俊岩, 龚金龙, 等. 超声红外锁相热像技术检测金属板材表面裂纹[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(5): 1123-1130.

[5] Liu Hui, Liu Junyan, Wang Yang. Detection of contacting interface-type defects using ultrasound lock-in thermography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 653-660. (in Chinese)

刘慧, 刘俊岩, 王扬. 超声锁相热像技术检测接触界面类型缺陷[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 653-660.

[6] Ma Wenwei, Jie Xishun, Tan Shumei, et al. Physics (Fourth Edition Volume II) [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 67-72. (in Chinese)

马文蔚, 解希顺, 谈淑梅, 等. 物理学(下册第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 67-72.

[7] Song Yuanjia, Zhang Wei, Tian Gan, et al. Damage detection of composites based on ultrasonic infrared thermography technique [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2012, 35(4): 559-564. (in Chinese)

宋远佳, 张炜, 田干, 等. 基于超声红外热成像技术的复合材料损伤检测[J]. *固体火箭技术*, 2012, 35(4): 559-564.

[8] Han Xiaoyan, Li Wei, Zeng Zhi. Acoustic chaos and sonic infrared imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(17): 3188-3190.

[9] Han Xiaoyan, Zeng Zhi, Li Wei, et al. Importance of acoustic chaos in sonic IR imaging NDE [C]//Review of Quantitative Nondestructive Evaluation23. AIP Conference Proceedings, 2004, 700: 496-500.

[10] Han Xiaoyan, Zeng Zhi, Li Wei, et al. Acoustic chaos for enhanced detectability of cracks by sonic infrared imaging [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(7): 3792-3797.

[11] Han Xiaoyan, Sarwar Islam Md, Newaz G, et al. Finite-element modeling of the heating of cracks in sonic infrared imaging [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(7): 074905.1-7.

[12] Igor Yu Solodov, Boris A Korshak. Instability, chaos, and "memory" in acoustic-wave-crack interaction [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(1): 014303.1-3.

[13] Ahsan Mian, Golam Newaz, Xiaoyan Han, et al. Response of sub-surface fatigue damage under sonic load-A finite element study[J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(9): 1115-1122.