

# 超声振动红外热像法的影响因素

曹善友, 郭兴旺

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

**摘要:** 超声振动红外热像法(VT)是红外热像无损检测的重要方法之一, 在裂纹等紧贴型缺陷检测中有特殊的应用优势。为了寻找适宜的振动激励条件, 用解析法分析了材料热特性(热导率和热扩散系数)和缺陷深度对温升的影响, 分析了试件支撑条件和几何尺寸对共振频率的影响。结果表明, 复合材料较金属材料容易实现 VT 检测。对金属件宜用短时超声激励, 而对复合材料件宜用较长时间的超声激励。从共振角度看, 采用简支方式和超声激励相组合是比较好的选择。

**关键词:** 超声振动红外热像法; 热特性; 振动模态; 缺陷检测

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)10-0776-04

## Affecting Factors of Ultrasonic Vibrothermography

CAO Shan-You, GUO Xing-Wang

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Vibrothermography is one of the most important techniques in infrared thermographic NDT, and it has a special advantage in close crack-type defect detection. In order to find the suitable vibration excitation conditions, the influence of material thermal properties (conductivity and diffusivity) and defect depth on the surface temperature rise was solved with analytical method, and the influence of the support condition and geometric dimension of a specimen on its resonance frequencies was also studied. The results show that composite materials are easier to be detected than metals. A short duration excitation is appropriate for metal specimens, while a long duration excitation is preferred for composite parts. From the resonance point of view, the combination of simple support and ultrasonic excitation is a better choice.

**Keywords:** Ultrasonic vibrothermography; Thermal property; Vibration mode; Defect detection

振动红外热像法(VT)是一种在闭合裂纹等紧贴型缺陷检测中有一定优势的无损检测方法。它最先产生于 20 世纪 70 年代<sup>[1]</sup>, 但由于热像仪性能的相对滞后, 在 20 世纪 80 年以前没有得到较好的发展。直到 20 世纪 90 年代初期, 由于热像仪性能的不断提高, 使得微小裂纹的检测成为可能<sup>[2]</sup>。现该方法已投入到工业应用领域中<sup>[3]</sup>。VT 主要应用于金属闭合裂纹、复合材料的分层、脱粘和撞击损伤等缺陷的检测。它通过将声能转化为热能, 利用红外

热像仪对试件表面温度场成像, 从而对其表面及亚表面缺陷进行识别。与红外热像无损检测的其他方法相比, 它使用机械振动产生的内热激励, 使热波传播的距离较外热激励法缩减一半, 有利于增加探测深度。VT 的发展, 使红外热像无损检测技术延伸到了紧贴型、微缺陷的检测领域。但是, VT 的机理相对复杂, 到现在为止, 还没有建立起一套完整的理论。比较认可的解释为: 振动波在物体内传播时, 缺陷处会摩擦发热, 导致与缺陷相应的表面产生局部升温。此外应力集中处的塑性变形和缺陷的粘滞特性也会引起机械能向热能的转换。

笔者对 VT 的影响因素进行了分析, 重点研究了铝、钢、碳纤维复合材料(CFRP)和环氧树脂(Epoxy)材料的热特性和缺陷深度对缺陷可检参数(局

收稿日期: 2009-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975016, 60672101); 航空科学基金资助项目(2009ZD51045)

作者简介: 曹善友(1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为红外热像无损检测。

部温升)的影响,同时分析了共振起振条件与试件支撑方式的关系。

## 1 导热模型

试件在超声振动激励下的导热模型如图 1 所示。在一个半无限大物体中,存在一发热圆盘,表示持续超声波阶跃激励下试件内部缺陷发源。

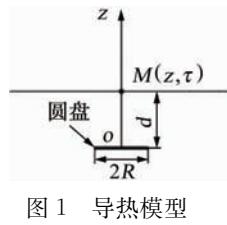


图 1 导热模型

设圆盘与物体表面平行,以圆盘中心  $o$  为坐标原点建立柱坐标系,取圆盘半径方向为  $r$  轴,垂直于圆盘的方向为  $z$  轴。 $M$  为  $oz$  与物体表面的交点,距  $o$  点的距离为  $d$ 。设物体环境温度和初始温度均为零。作如下两点假设:① 圆盘缺陷上的热量均匀释放。② 物体表面满足绝热条件,且物体的材料特性均匀、各向同性。则  $M$  处  $\tau$  时刻温升由式(1)计算。

$$T(d, \tau) = \frac{2Q\sqrt{\alpha\tau}}{k} \left\{ \text{ierfc} \frac{d}{2\sqrt{\alpha\tau}} - \text{ierfc} \frac{\sqrt{d^2 + R^2}}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right\} \quad (1)$$

该式是由文献[4]中的解析式通过热源镜像法得到的。其中  $Q$  是发热圆盘的发热强度,即单位时间在单位面积产生的热量,单位  $\text{J}/\text{s} \cdot \text{m}^2$  或  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $R$  是圆盘的半径,单位  $\text{m}$ ;  $k$  是热导系数,单位  $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ;  $\alpha$  是热扩散系数,单位  $\text{m}^2/\text{s}$ 。拟研究材料的热物性参数如表 1。ierfc( $x$ )为误差函数的补函数 erfc( $x$ )的一次积分,如式(2)所示:

$$\text{ierfc}(x) = \int_x^{+\infty} \text{erfc}\xi d\xi \quad (2)$$

表 1 材料的热物性参数<sup>[4]</sup>

材料	热导率 $k/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	热扩散系数 $\alpha/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
铝	200	$82 \times 10^{-6}$
钢	50	$14 \times 10^{-6}$
CFRP	0.7	$0.5 \times 10^{-6}$
Epoxy	0.2	$0.09 \times 10^{-6}$

## 2 模型分析

### 2.1 材料特性对温升的影响

取  $d=0.001 \text{ m}$ ,  $R=0.015 \text{ m}$ ,  $Q=2000 \text{ J}/\text{s} \cdot \text{m}^2$ , 时间步长为  $0.02 \text{ s}$ , 时间范围为  $0 \sim 10 \text{ s}$ 。由公式(1)可算出四种材料在缺陷深度  $d=1 \text{ mm}$  时  $M$  点处的温升  $T$  与时间  $\tau$  的关系,如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,在同样的条件下,初始阶段金属材料的温升要略高于复合材料表面温升。大约  $1 \text{ s}$  以后,复合材料的温升明显大于金属材料。因此

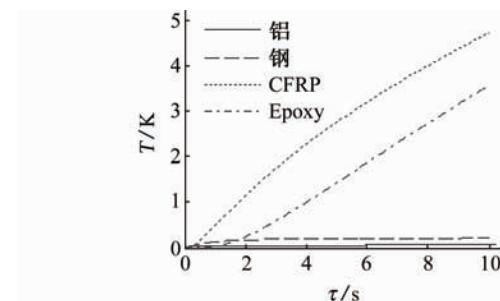


图 2 不同材料在  $d=1 \text{ mm}$  时  $M$  点的温升

对于不同的材料,VT 检测所需的激励时间应有所区别,一般对金属材料短时激励即可,而对复合材料则需要相对较长时间的激励。

为了具体说明材料热特性对温升行为的影响,使用归一化方法对结果进行处理:

$$T' = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (3)$$

式中  $T$  为数据集中的任一值;  $T_{\min}$  为最小值;  $T_{\max}$  是最大值。图 3 是缺陷深度  $d=1 \text{ mm}$  时四种材料在  $M$  点的温升与时间关系的归一化曲线。

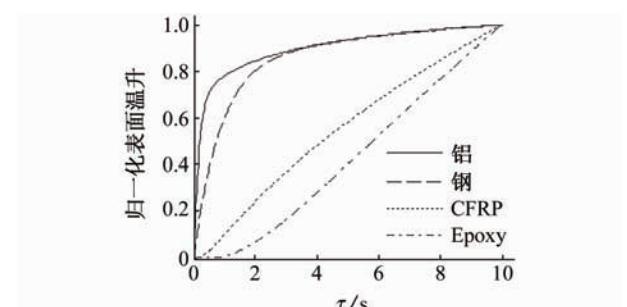


图 3 不同材料在  $d=1 \text{ mm}$  时  $M$  点的归一化温升

从图 3 可知,金属材料由于较高的热扩散系数,使得缺陷产生的热量扩散迅速,在很短的时间里就有明显的温升,且温升很快就达到稳定。在复合材料中,初期温升不太明显,需要一段时间积累才逐渐明显,且温升一直在变大。这种方式从另一个角度阐述了金属材料的检测需要较短时间激励,而复合材料需要较长时间激励的结论。同时也应注意到,较长时间的激励,可能会对复合材料试件表面造成破坏,必要时应选用低功率超声激励。

### 2.2 所需能量与缺陷深度关系

为了研究在一定温升下,所需能量与不同缺陷深度的关系,将  $T, \tau$  作为常数,研究  $Q$  随  $d$  的变化。对式(1)进行变量互换得:

$$Q = \frac{T k}{2\sqrt{\alpha\tau}} \left[ \text{ierfc} \left( \frac{d}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right) - \text{ierfc} \left( \frac{\sqrt{d^2 + R^2}}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

以铝为研究对象,在温升  $T=0.5\text{ K}$ ,  $\tau=0.2\text{ s}$ ,  $R=0.015\text{ m}$  时,  $Q$  和  $d$  的关系如图 4。

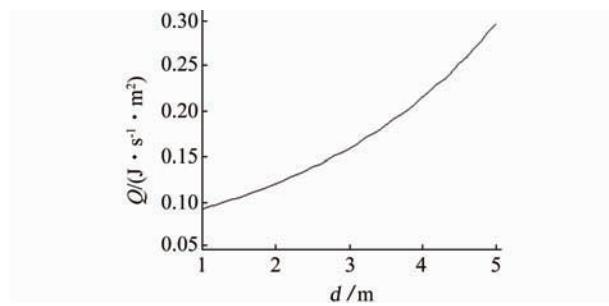


图 4 铝在温升 0.5 K 时  $Q$  与  $d$  的关系

从图 4 可知,在铝试件中,试件缺陷处对应表面要达到一定的温升,缺陷距离表面越大,则需要的能量就越多,抑或需要较长的激励时间。

以 CFRP 为研究对象,在温升为  $T=0.5\text{ K}$ ,  $\tau=2\text{ s}$  时,  $Q$  和  $d$  的关系如图 5 所示。

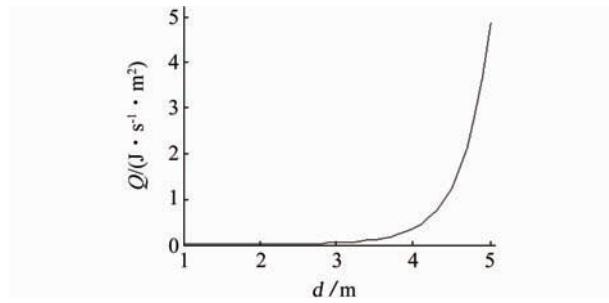


图 5 CFRP 在温升 0.5 K 时  $Q$  与  $d$  关系

从图 5 可知,在 CFRP 试件中,试件缺陷处对应表面要达到一定的温升,缺陷距离表面越大,则需要的能量就越多。在深度  $>4\text{ mm}$  后,所需能量急剧增大。同金属材料相比,能量需求变化更显著。

### 3 共振频率与几何尺寸关系

任何固体材料工件都有其固有频率,当外界激振频率和固有频率一致时,就会发生共振现象。在 VT 技术中,共振有时能够使物体内部缺陷处摩擦剧烈,产生更多的热量,对应试件表面温升显著,易于对缺陷的识别。

#### 3.1 振动模型

为方便起见,以长方体试件作为研究对象,分析其在两端简支和一端固定、一端自由两种边界条件下(即简支梁和悬臂梁)的横向弯曲振动模态<sup>[5]</sup>。

以试件左端面中心为坐标原点,建立直角坐标系,  $l, w, t$  分别表示试件的长、宽、厚(图 6 和 7)。

#### 3.2 模型分析

简支梁和悬臂梁对应的横向弯曲振动的固有频

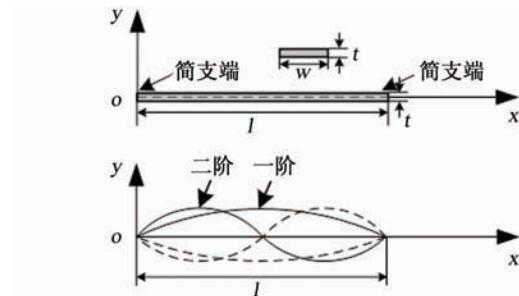


图 6 简支梁的振动模型

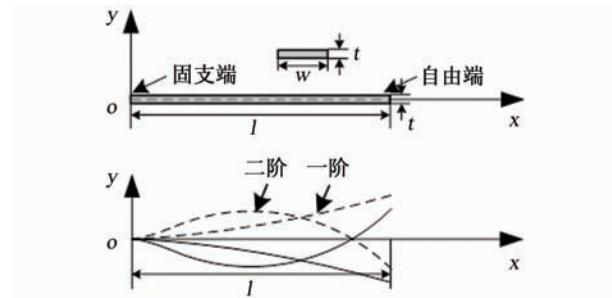


图 7 悬臂梁的振动模型

率分别为式(5)和(6)。

$$f_{s,i} = \left(\frac{i\pi}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho_l}} \quad i = 1, 2, \dots \quad (5)$$

$$f_{c,i} = (\beta_i l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho_l l^4}} \quad i = 1, 2, \dots \quad (6)$$

式中  $f_{s,i}$  和  $f_{c,i}$  分别表示简支梁和悬臂梁的第  $i$  阶共振频率;  $E$  是杨氏模量;  $I = \frac{wt^3}{12}$  为截面惯性矩;  $\rho_l = \rho \cdot s$ , 为梁单位面积质量;  $s = wt$  为截面积;  $\beta_i l$  为频率方程的特征根,前三个根依次为 1.875, 4.694 和 7.855。若材料为铝,则  $\rho = 2700\text{ kg/m}^3$ ,  $E = 68.9\text{ GPa}$ 。

下面分析简支梁和悬臂梁前三阶固有频率与试件厚度、长度和宽度的关系。

##### 3.2.1 厚度对固有频率的影响

对矩形等截面梁,由式(5)和(6)得:

$$f_{s,i} = \left(\frac{i\pi}{l}\right)^2 \left(\frac{E}{12\rho}\right)^{\frac{1}{2}} t \quad i = 1, 2, \dots \quad (7)$$

$$f_{c,i} = (\beta_i l)^2 \frac{1}{l^2} \left(\frac{E}{12\rho}\right)^{\frac{1}{2}} t \quad i = 1, 2, \dots \quad (8)$$

可见各阶固有频率与厚度成正比。

取铝试件的长度  $l=0.15\text{ m}$ , 宽度  $w=0.05\text{ m}$ , 厚度  $t$  为自变量, 变化范围为  $10 \times 10^{-3} \sim 20 \times 10^{-3}\text{ m}$ 。简支梁和悬臂梁的前三阶固有频率与厚度的关系如图 8 和 9 所示, 固有频率都随着厚度的增加而线性增加。

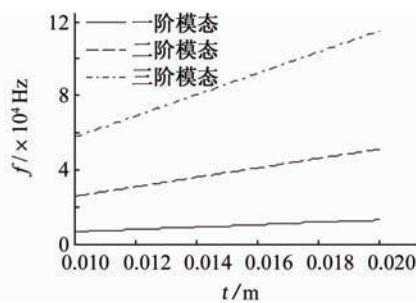


图 8 简支梁固有频率与厚度的关系

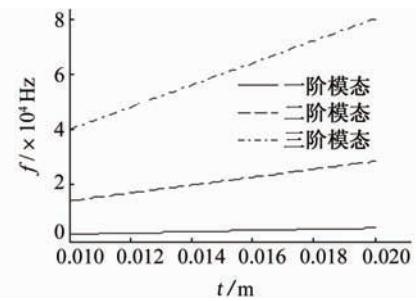


图 9 悬臂梁固有频率与厚度的关系

在图 8 中,简支梁前三阶共振频率范围为[6.40~12.79 kHz], [25.59~51.17 kHz], [57.57~115.1 kHz]。

在图 9 中,悬臂梁前三阶共振频率范围为[2.27~4.55 kHz], [14.28~28.56 kHz], [39.99~79.98 kHz]。

### 3.2.2 长度对固有频率的影响

由式(7)和(8)知,各阶固有频率与长度的平方成反比。取铝试件的宽度  $w=0.05 \text{ m}$ ,厚度  $t=0.01 \text{ m}$ ,长度  $l$  为变量,变化范围为[0.13~0.18 m]。前三阶固有频率与长度的关系如图 10 和 11 所示,固有频率都随着长度的增加而成指数降低。

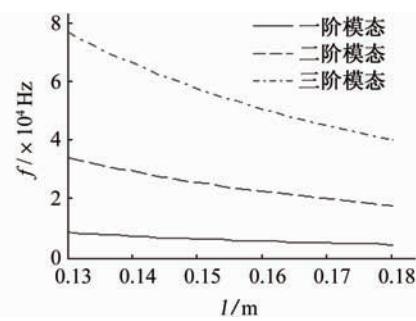


图 10 简支梁固有频率与长度的关系

在图 10 中,简支梁前三阶共振频率范围为[8.51~44.44 kHz], [34.07~17.77 kHz], [76.65~39.98 kHz]。在图 11 中,悬臂梁前三阶共振频率范围为[3.03~1.58 kHz], [19.01~9.92 kHz], [53.24~27.77 kHz]。

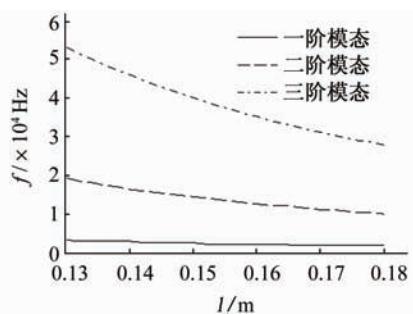


图 11 悬臂梁固有频率与长度的关系

宽度对固有频率没有影响,但不同支撑方式的固有频率也不相同。取铝试件的长度  $l=0.15 \text{ m}$ ,厚度  $t=0.02 \text{ m}$ ,可知  $f_{s,i}$  的前三阶频率依次约为 12.79, 51.17 和 115.1 kHz。 $f_{c,i}$  的前三阶频率为 4.55, 28.56 和 79.98 kHz。

上面定量分析了长方体铝试件(板状)在两种支撑条件下共振频率和几何尺寸的关系。发现简支梁的一、二阶固有频率接近于常用功率超声频率范围(15~40 kHz),用超声激振时容易发生共振现象。两种支撑方式下试件共振频率与尺寸的关系见表 2。

表 2 共振频率与尺寸的关系

参数	简支梁	悬臂梁
厚度	正比例	正比例
长度	平方反比	平方反比
宽度	无影响	无影响

## 4 结论

研究了振动红外热像法中材料热特性、缺陷深度对可检温升的影响,同时研究了金属材料的两种振动模式,得出如下结论:

- (1) 在缺陷处发热强度相同、超声激励时间  $>1 \text{ s}$  的情况下,复合材料表面温升比金属材料大。
- (2) 对金属件选用窄脉冲激励较适宜,而对复合材料件采用宽脉冲超声激励更合适。
- (3) 试件缺陷处对应表面要达到一定的温升,缺陷距离表面越远,则所需的能量就越多,抑或需要较长的激励时间。
- (4) 在简支梁方式下对试件激励,其共振频率更接近激振频率,易发生共振,是比较理想的选择,但尚需进一步的试验验证。

## 参考文献:

- [1] Shepard S M, Ahmed T, Lhota J R. Experimental  
(下转第 784 页)

对于第Ⅲ部分,明显看出两种方法计算结果存在较大差异,不能通过均匀各向异性材料频散曲线预测精确频散曲线的形态和分布,故第Ⅲ部分不适用层状各向异性周期结构的均匀化方法。

进一步分析可得,在纤维方向上,纵波声速为 $\sqrt{C_{11}/\rho}=5.45$  km/s,与Ⅱ,Ⅲ部分分界线相一致。故对于高频段,在相速度大于相应方向纵波速度的区域内适用均匀化方法;而低于纵波波速的区域内则不适用均匀化方法。

### 3 结论

以正交 S-2 玻璃/环氧树脂周期对称结构为研究对象,采用改进全局矩阵算法,分析了频散特性随层数增加的演变规律,给出了等效模量的计算方法,并对等效模量的适用范围进行了进一步讨论。得到如下结论:

(1) 层数较少时,频散曲线随层数增加变化显著。层数增多,模态数量增加,频散曲线整体向低频方向移动,但曲线变化趋势并无明显改变。

(2) 层数 $\geq 31$ 后,频散曲线趋于稳定。研究发现,相速度频散图可分为三部分。Ⅰ部分频散模态稳定,层数增加不显著改变曲线的形状和位置。Ⅱ部分模态数量随层数同步增加,频散曲线向低频移动但不进入Ⅰ区域。Ⅲ部分频散曲线集中于两个区域,且不随层数增加变化,区域内频散模态集中,在大层数情况下不能有效区分模态。

(3) 理论和数值结果都表明,在一定范围内,层状周期结构频散特性可以采用等效模态计算。但等效模量计算方法只适用于Ⅰ部分和Ⅱ部分,而不适用Ⅲ部分。Ⅲ部分区域内波的性质有待进一步研究。

### 参考文献:

[1] 罗斯 J L, 著. 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.

[2] 张海燕, 他得安, 刘镇清. 层状各向异性复合板中的兰

(上接第 779 页)

considerations in vibrothermography[C]// Burleigh D D, Cramer K E, Peacock G R. Thermosense XXVI. Orlando, FL, USA: SPIE, 2004:332—335.

[2] 杨小林, 谢小荣, 江涛, 等. 疲劳裂纹的振动红外热成像检测[J]. 激光与红外, 2007, 37(5):442—444.

[3] Rothenfusser M, Homma C. Acoustic thermography: vibrational modes of cracks and the mechanism of heat

姆波[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

- [3] Karunasena W, Shah A H, Datta S K. Wave propagation in a multilayered laminated cross-ply composite plate[J]. Journal of Applied Mechanics, 1991, 58(10): 1028—1032.
  - [4] Lee J. Plate waves in multi-directional composite laminates[J]. Composite Structures, 1999, 46(4): 289—297.
  - [5] Wang L, Rokhlin S I. Floquet wave homogenization of periodic anisotropic media[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 112(1): 38—45.
  - [6] Rokhlin S I, Wang L. Stable recursive algorithm for elastic wave propagation in layered anisotropic media: stiffness matrix method[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 112(3): 822—834.
  - [7] Rokhlin S I, Wang L. Ultrasonic waves in layered anisotropic media: characterization of multidirectional composites[J]. Solids and Structures, 2002, 39(9): 5529—5545.
  - [8] Liu G R, Tani J, Watanabe K, et al. Lamb wave propagation in anisotropic laminates[J]. Journal of Applied Mechanics, 1990, 57(6): 923—929.
  - [9] Michel J C, Moulinec H, Suquet P. Effective properties of composite materials with periodic microstructure: a computational approach[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1999, 172(2): 109—143.
  - [10] Cohen I, Bergman D J. Effective elastic properties of periodic composite medium[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2003, 51(9): 1433—1457.
  - [11] Pastukhova S E. Homogenization of elasticity problems on periodic composite structures[J]. Sbornik: Mathematics, 2005, 196(7): 1033—1073.
  - [12] 曹礼群, 崔俊芝. 复合材料拟周期结构的均匀化方法[J]. 计算数学, 1999, 21(3): 331—344.
  - [13] 胡更开, 郑泉水, 黄筑平. 复合材料有效弹性性质分析方法[J]. 力学进展, 2001, 31(3): 361—392.
- generation[C]// Thompson D O, Chimenti D E. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation. Golden, Colorado (USA): AIP, 2005: 624.
- [4] Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of Heat in Solids (2nd edition)[M]. Oxford: Clarendon Press, 1959: 263—264.
- [5] 刘延柱, 陈文良, 陈立群. 振动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998: 132—136.