

## 超声红外锁相热像中金属疲劳裂纹的生热特性

冯辅周<sup>1,2</sup>, 闵庆旭<sup>2</sup>, 朱俊臻<sup>2</sup>, 徐超<sup>2</sup>, 曹维<sup>3</sup>

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063;  
2. 装甲兵工程学院 机械工程系, 北京 100072; 3. 北京特种车辆研究所, 北京 100072)

**摘要:** 超声红外锁相热像技术是一种将调制激励和锁相技术应用于红外热像检测的新型无损检测技术。针对缺陷生热及传热研究中存在的摩擦生热过程难以有效模拟、缺陷内部生热机理不清等理论问题, 采用电-力类比方法, 建立了含疲劳裂纹金属平板与超声激励系统的有限元模型, 研究了调制超声激励下裂纹区域和裂纹面的生热特点, 结果表明: 在调制超声激励下, 裂纹区域生热呈现出周期性上升的特点, 因预紧力的作用, 靠近激励同侧的裂纹面区域生热更明显。基于仿真分析和 Green 函数, 建立了裂纹摩擦生热的传热理论模型, 进一步探究了裂纹区域温度分布规律; 最后利用被测平板上下表面温度比值( $P$  值)对热源深度进行了估计, 证明了仿真结果与理论计算的一致性。研究成果将进一步丰富超声红外锁相热像技术的理论基础。

**关键词:** 超声红外锁相热像; 疲劳裂纹; 生热特性; 有限元分析; 理论分析

**中图分类号:** TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0704004

## Heating characteristics of metal fatigue crack in ultrasonic IR lock-in thermography

Feng Fuzhou<sup>1,2</sup>, Min Qingxu<sup>2</sup>, Zhu Junzhen<sup>2</sup>, Xu Chao<sup>2</sup>, Cao Wei<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;  
2. Department of Mechanical Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China;  
3. Beijing Special Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

**Abstract:** Ultrasonic infrared lock-in thermography is a novel nondestructive testing technology, which mainly combines the modulated excitation and lock-in technology to achieve infrared thermography test. With the lack of study on the frictional heating simulation and interior heating mechanism during the defect heating and diffusion, the electric-force analogy method was utilized to build the finite element model of the ultrasonic transducer and the metal plate with the fatigue crack. Simulation results show that the crack heating periodically increases with the modulated ultrasonic excitation, and the heating area of crack faces is closed to the excitation side by the influence of the engagement force. Based on the simulation results and the Green function, a theoretic model was introduced to describe the heat diffusion of the crack frictional heating and the heat distribution of the crack vicinity was demonstrated. Further,

收稿日期: 2016-11-05; 修订日期: 2016-12-03

基金项目: 无损检测教育部重点实验室开放基金(ZD201529007)

作者简介: 闵庆旭(1988-), 男, 博士生, 主要从事红外热像无损检测技术方面的研究。Email: minqingxu2011@163.com

导师简介: 冯辅周(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事故障诊断及无损检测技术方面的研究。Email: fengfuzhou@tsinghua.org.cn

the depth of the heat source was estimated with the ratio between top and lower surface of the test plate ( $P$ -value), which shows consistency between simulation and theoretic results. This study aims to enrich the theoretic basis in ultrasonic infrared lock-in thermography.

**Key words:** ultrasonic IR lock-in thermography; fatigue crack; heating characteristic; finite element analysis; theoretic analysis

## 0 引言

超声红外锁相热像技术是一种将调制激励和锁相技术应用于红外热像以实现缺陷检测的新型无损检测技术<sup>[1-2]</sup>,具有检测速度快、精度高、结果直观等优点,其对接触界面型缺陷具有独特的检测优势,该技术已在航空航天、汽车和铁路运输等领域广泛应用。

目前,国内外针对调制激励下的缺陷生热及传热特性已经有了初步的研究。2008年,学者汪子君等人建立了三维非稳态的传热模型,对缺陷区域的传热进行了分析<sup>[3]</sup>。2013年,学者D. Peng等人利用FEMAP软件建立了锁相热像技术中下沉缺陷的3D有限元模型,以调制热流信号为热源激励,成功确定了下沉缺陷的位置和深度<sup>[4]</sup>。以上两个模型中的共同特点是:直接用热流激励来模拟缺陷热源。然而对于超声红外锁相热像技术,该模型无法有效模拟出缺陷接触面的摩擦生热过程。同年,学者秦雷等人建立了含裂纹缺陷的有限元模型,将位移激励直接作用于被测试件来模拟碰撞过程,探究了激励参数(激励位置,激励振幅和超声调制频率)对检测结果的影响<sup>[5]</sup>。该模型虽然增加了摩擦生热过程,但位移激励存在明显不足,即位移对激励系统具有约束性,与实际情况不符。此外,学者G. Busse等人指出超声红外锁相热像检测中,缺陷生热是由于裂纹边界的相对运动造成机械能损失,进而使得弹性能转化为热能,在转化过程中,裂纹充当热波的传导者<sup>[6]</sup>。然而遗憾的是,该研究成果依然是从裂纹面外部温度分布出发,对于裂纹面内部的生热特性仍不得而知。

针对现有研究中存在的不足,文中以含疲劳裂纹金属平板为研究对象,从仿真模拟和理论计算两方面出发,首先,在仿真过程中引入电-力类比方法<sup>[7]</sup>,建立了超声换能器与被测试件的有限元模型,探究调制超声激励下裂纹区域及裂纹面的生热特点;其

次,基于仿真分析和Green函数建立了调制热流的传热理论模型,探索裂纹区域温度场分布以及热量传播特性;最后,提出了基于 $P$ 值的热源深度估计方法,结果表明:仿真结果和理论计算具有很好的一致性。

## 1 仿真分析

### 1.1 电-力类比方法

如图1(a)所示,在压电陶瓷极化方向上施加电场时,由于逆压电效应,压电陶瓷将产生机械变形。在压电陶瓷片两端加载调制周期性电压激励 $U$ ,可表示如下:

$$U=[U_0+U_m\sin(\omega_m t)]\sin(\omega_0 t) \quad (1)$$

式中: $U_0$ 为电压激励的幅值; $U_m$ 为调制电压激励的幅值; $\omega_0$ 为激励系统角频率; $\omega_m$ 为调制角频率。此时,压电陶瓷片将会沿极化方向产生一个变形量 $\mu$ ,这个变形量在一定范围内与电压呈线性关系<sup>[8]</sup>:

$$\mu=kU=k[U_0+U_m\sin(\omega_m t)]\sin(\omega_0 t) \quad (2)$$

式中: $k$ 为电压 $U$ 和变形量 $\mu$ 的比例系数。进一步,压电陶瓷片沿振动方向的速度 $v$ 可表示为:

$$v=\dot{\mu}=kU_0\omega_0\cos(\omega_0 t)+kU_m[\omega_0\sin(\omega_m t)\cos(\omega_0 t)+\omega_m\sin(\omega_0 t)\cos(\omega_m t)] \quad (3)$$

由于LS-DYNA V971软件中不包含压电耦合单元,文中尝试利用力激励代替电激励加载到压电陶瓷片两端来实现相同的效果,如图1(b)所示。在压电陶瓷片的两个端面上加载大小相等且方向相反的周期力激励 $F$ ,表示如下:

$$F=[F_0+F_m\sin(\omega_m t)]\sin(\omega_0 t) \quad (4)$$

式中: $F_0$ 为加载到压电陶瓷片两端的力激励幅值; $F_m$ 为调制幅值。根据压电陶瓷片的纵向振动方程:

$$\rho\frac{\partial^2\mu(x,t)}{\partial t^2}=E\frac{\partial^2\mu(x,t)}{\partial x^2} \quad (5)$$

式中: $\mu(x,t)$ 为位置 $x$ 处各质点在 $t$ 时刻离开原来位置的位移; $\rho$ 为材料密度; $E$ 为压电陶瓷的纵向弹性

模量。压电陶瓷两端受周期力激励,其边界条件为:

$$\begin{cases} \mu(x=0)=0 \\ E \frac{\partial \mu(x=a)}{\partial x} = \frac{[F_0+F_m \sin(\omega_m t)] \sin(\omega_0 t)}{S} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $S$  为压电陶瓷径向截面积。结合公式(5),可得到压电陶瓷片纵向振动的位移表达式:

$$\begin{aligned} \mu(x, t) = & \frac{c}{E \omega_0 S \cos \frac{\omega_0 a}{c}} \sin \frac{\omega_0 x}{c} \cdot [F_0 \sin(\omega_0 t) + \\ & F_m \sin(\omega_m t) \sin(\omega_0 t)] \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $c = \sqrt{E/\rho}$ , 为弹性波沿纵向传播的速度。当  $x=a$  时,圆盘沿振动方向的速度方程为:

$$\begin{aligned} v(a, t) = & \frac{c F_0}{ES} \tan \left( \frac{\omega_0 a}{c} \right) \cos(\omega_0 t) + \frac{c F_m}{E \omega_0 S} \tan \left( \frac{\omega_0 a}{c} \right) \cdot \\ & [\omega_0 \sin(\omega_m t) \cos(\omega_0 t) + \omega_m \sin(\omega_0 t) \cos(\omega_m t)] \end{aligned} \quad (8)$$

由公式(2)和(8)可以看出,压电圆盘受到电激励和力激励的振动方程非常相似,说明当选择的参数合适时,采用两种激励方式可以使得换能器的振动输出一致,从而证明了电-力类比方法的可行性。

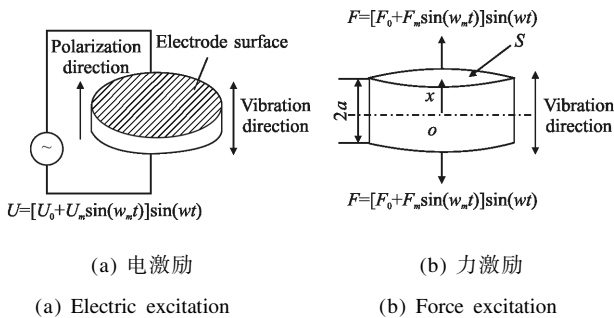


图 1 压电圆盘

Fig.1 Piezoelectric disc

### 1.2 仿真模型

图 2 所示金属平板选用 45 钢材料,平板尺寸为 240 mm×47.4 mm×5 mm,在长边中心位置有一个

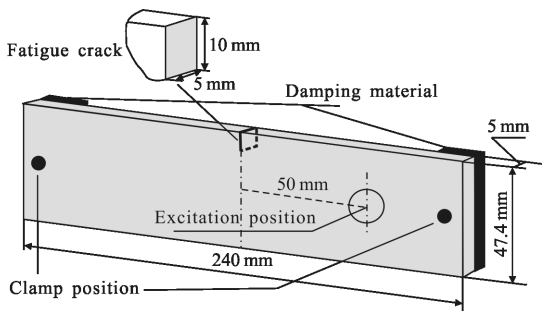


图 2 被测试件

Fig.2 Test specimen

10 mm×5 mm 的裂纹,激励位置偏离平板中心 50 mm。被测平板的详细物理参数如表 1 所示<sup>[9]</sup>。

表 1 金属平板的物理参数

Tab.1 Physical parameters of metal plate

$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$C/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\lambda/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
7 750	480	50.2

根据公式 (4),且角频率  $\omega$  和频率  $f$  之间满足  $\omega = 2\pi f$ ,力激励可按照下式加载:

$$F = [F_0 + F_m \sin(\pi f_m t)] \sin(\pi f_0 t) \quad (9)$$

式中:加载到节点上的力激励幅值  $F_0 = 50 \text{ N}$ ,调制幅值  $f_m = 0.5 F_0$ ,系统工作频率  $f_0 = 20 \text{ kHz}$ ,调制频率  $f_m = 5 \text{ Hz}$ 。

图 3 给出了仿真模型的网格划分结果。图中,在变幅杆振型节点位置添加一个铝合金抓环,同时在抓环模型上所有节点施加 Z 方向的预紧力  $F_e = 384 \text{ N}$ ,其他自由度均施加位移约束。此外,平板的两端由隔振材料和夹持螺栓固定,而裂纹面接触类型为面面接触。仿真过程分为两个步骤:首先,施加一定预紧力使得工具杆前端顶紧被测平板,这一过程开启了仿真软件的动态松弛功能,被测平板在预紧力作用下将产生预应变;其次,施加调制超声激励作用于被测平板,该过程将以第一步产生的预应变为初始条件,并在超声激励作用下进行仿真分析<sup>[10]</sup>。

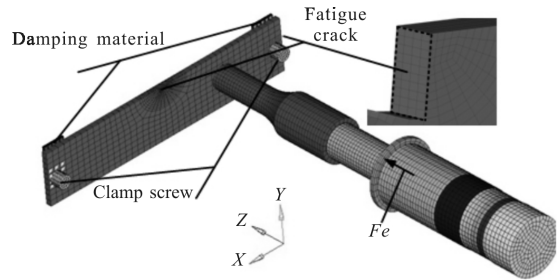


图 3 有限元模型

Fig.3 Finite element model

### 1.3 仿真结果分析

图 4 为仿真得到的被测平板两侧裂纹区域的温度分布情况。图中可以看出:裂纹区域温度明显高于其他正常区域,与激励异侧相比,激励同侧的裂纹区域温度分布范围更广。选择图 4 虚线内区域的表面节点,计算所有节点的平均温度随时间的变化情况,如图 5 所示。图中可以看到:在调制超声激励作用

下, 裂纹区域的生热随激励时间呈现出周期性上升的趋势。

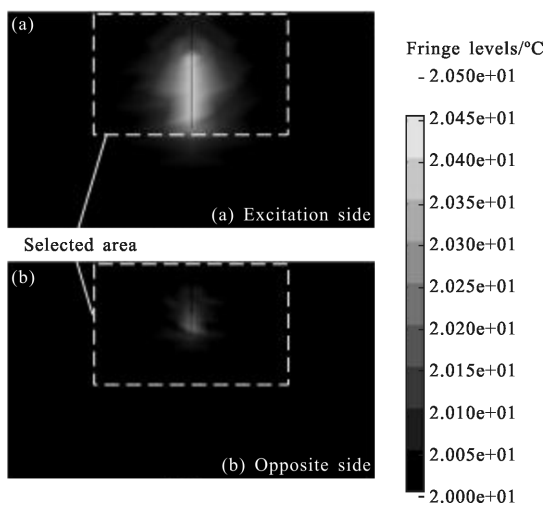


图 4 仿真中裂纹区域温度分布云图

Fig.4 Temperature contour of crack region in simulation

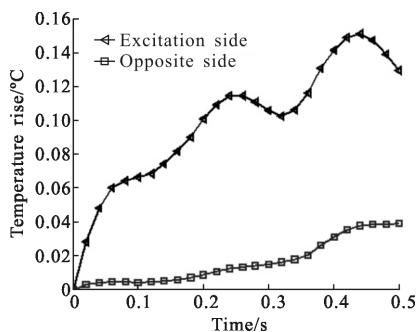
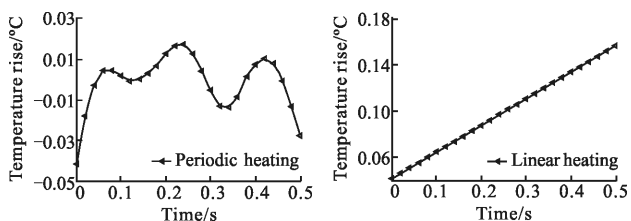


图 5 裂纹区域平均升温曲线

Fig.5 Mean temperature rise curve of crack vicinity

进一步, 图 5 中的激励同侧温度曲线可分解成周期生热和线性生热两部分, 如图 6(a)、(b)所示。其



(a) 周期部分

(b) 线性部分

(a) Periodic part

(b) Linear part

图 6 激励同侧裂纹区域生热情况

Fig.6 Crack heating of the excitation side

原因是: 根据公式(3)或公式(8), 在超声红外锁相热像技术中, 调制超声激励包含两部分, 高频超声激励和调制后的超声激励。前期研究表明: 在高频超声激

励作用下, 在一定的时间内, 缺陷生热呈现出线性升高的特点<sup>[10]</sup>, 与图 6(b)结果一致。而在调制后的超声激励作用下, 裂纹生热呈现出周期性变化的特点, 如图 6(a)所示。

以上分析均从裂纹区域温度出发, 探究金属平板表面裂纹区域生热及温度分布特性, 但是对于裂纹面内部生热的规律仍然无法直接得到。有限元分析的优点之一是可以观察模型中任意节点的温度变化情况, 因此, 可以实现对裂纹面内部生热规律的分析。图 7 给出了仿真分析中裂纹面的生热分布情况。图中可以看出: 裂纹面上的生热并不是覆盖整个裂纹面, 而是明显靠近激励同侧。这是由于预紧力的存在, 导致靠近激励同侧的裂纹面闭合度增加, 而靠近激励异侧的裂纹面闭合度下降甚至分开。图 8 给出了裂纹面生热总能量的变化情况, 可以看出: 裂纹面由于摩擦生热产生的总能量与裂纹区域温度的变化趋势类似, 验证了裂纹生热呈现周期性上升特点的正确性。

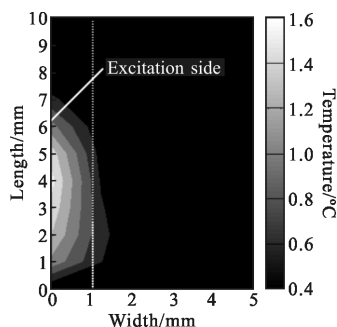


图 7 裂纹面温度分布云图

Fig.7 Temperature contour of crack face

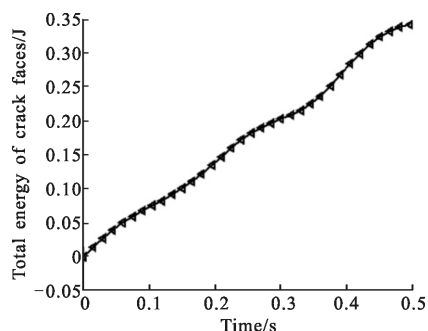


图 8 裂纹面总能量

Fig.8 Total energy of crack faces

## 2 理论分析

### 2.1 理论模型

前面分析得到: 受到预紧力的影响, 靠近激励同

侧的裂纹面区域生热效果更好, 导致裂纹面的实际生热区域并不覆盖整个裂纹面, 而是靠近激励同侧的局部区域(图 7 中裂纹宽度 1 mm 范围的裂纹面区域)。理论计算时, 假设厚度为  $D$  的 45 钢金属平板, 平板侧面存在一个贯穿疲劳裂纹, 裂纹面由于摩擦生热形成(接触)一个深度为  $h$ 、长度为  $d$  的面热源, 如图 9 所示。特别指出, 面热源紧靠上表面(与激励同侧对应), 沿  $Z$  轴方向延伸距离  $h$ 。例如, 当试件厚度  $D=5$  mm, 且  $h=3$  mm 时, 面热源与被测试件上表面的距离为 0, 而与下表面的距离为 2 mm。

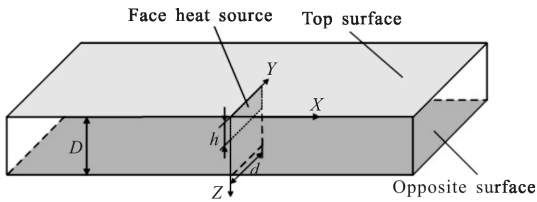


图 9 理想条件下裂纹面生热示意图

Fig.9 Crack frictional heating face under ideal conditions

按上述理论分析, 并引入 Green 函数求解传热问题, 最终得到三维平板各点的温度分布情况如下<sup>[11]</sup>:

$$T(x, y, z, t) = T_0(x, y, z) + \frac{\alpha}{\lambda} \int_{\tau=0}^t d\tau$$

$$\int_0^h \int_0^d G(x, y, z, t | \varepsilon=0, \eta, \xi, \tau) \dot{q}(\varepsilon=0, \eta, \xi, \tau) d\eta d\xi \quad (10)$$

### 2.2 理论结果分析

设定试件的厚度  $D$  为 5 mm, 模拟面热源的深度  $h$  (1, 2, 3 mm), 长度  $d$  为 10 mm。根据仿真结果(图 8), 通过裂纹面生热总能量、生热时间以及裂纹面的面积可以近似估算出面热源生热率的幅值为  $1 \times 10^5$  W/m<sup>2</sup>。而前面分析可知, 裂纹生热由周期和线性两部分组成, 因此模拟面热源的生热率可表示为:

$$\dot{q} = 1 \times 10^5 (1 + \sin(2\pi ft)) \text{ W/m}^2 \quad (11)$$

式中: 调制频率  $f=5$  Hz, 求解时间  $t=0.5$  s, 采样频率为 50 Hz。与有限元模型一致, 被测平板的物理参数选取参考表 1。

图 10 给出了理论求解结束时刻被测平板两侧表面裂纹区域的温度分布, 其中颜色越亮, 温度越高。可以看到: 两侧表面的温度峰值均出现在裂纹位置, 而且上表面裂纹区域温升明显高于下表面。而图 11 给出了为面热源深度为 2 mm 时两侧表面裂纹区域平均温度随时间的变化情况。图 11 可以看出:

在一定的时间范围内, 裂纹区域温度随时间呈现周期性上升的趋势, 而且上表面的温升明显高于下表面, 与仿真分析的结果相吻合。

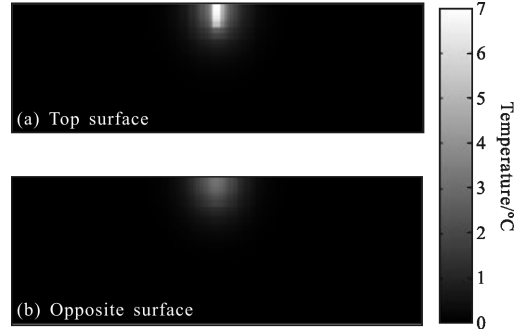


图 10 裂纹区域温度分布的理论计算结果

Fig.10 Theoretic result of temperature contour at crack vicinity

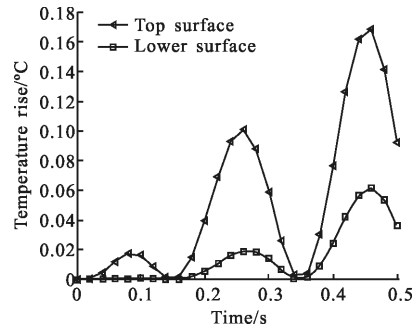


图 11 裂纹区域温升变化的理论结果

Fig.11 Theoretic result of temperature rise at crack vicinity

进一步, 将图 11 中上表面温升曲线进行分解, 依然可以得到裂纹区域生热由周期和线性两部分组成, 如图 12 所示。理论计算与仿真结果的变化趋势具有很好的一致性。

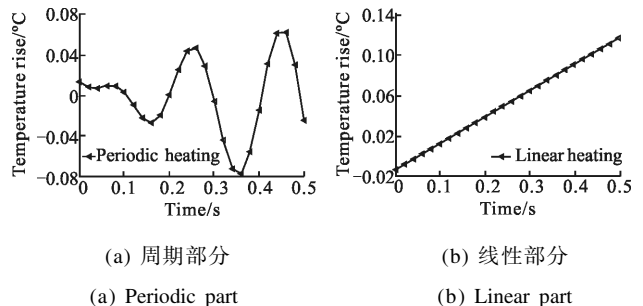


图 12 上表面温度变化

Fig.12 Temperature variety of the top surface

### 3 热源深度估计

在预紧力的作用下, 靠近激励同侧的裂纹面区

域生热更加明显,造成了传递到平板两侧裂纹区域热量的差异,如图 4、5 和 10、11 所示,而且这种差异会随着面热源深度  $h$  的变化而变化。这里,定义下表面与上表面裂纹区域温度之比  $P$  来表征面热源的深度,表达式为:

$$P = \frac{T_{\text{oppo}}}{T_{\text{top}}} \quad (12)$$

式中:  $T_{\text{top}}$  和  $T_{\text{oppo}}$  分别表示上表面和下表面裂纹区域温度均值。图 13 所示为理论计算 ( $h=1, 2, 3 \text{ mm}$ ) 和有限元仿真得到  $P$  值随时间的变化情况。图中可以看到:  $P$  值随时间和热源深度的增大而逐渐增大,而且图中虚线(仿真结果)与热源深度 1 mm 的理论模型  $P$  值曲线基本一致,据此可以估算出仿真中裂纹摩擦形成的热源深度大约为 1 mm,与图 7 所示裂纹面生热情况基本吻合,从而验证了估算结果的正确性。

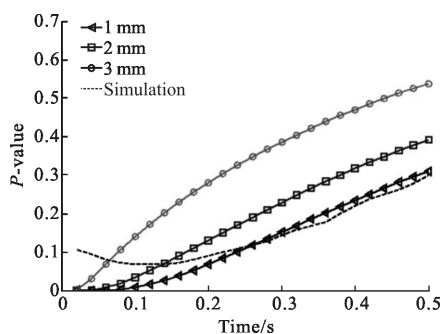


图 13  $P$  值随激励时间的变化曲线

Fig.13  $P$ -value curve versus excitation time

## 4 结 论

文中分析了特定检测条件下金属平板裂纹区域温度分布规律和裂纹面生热特性,确定了裂纹面摩擦生热的有效区域。基于传热理论模型,揭示了热源深度与裂纹区域温度分布之间的关系,得出的结论如下:

(1) 在调制超声激励下,电-力类比模型有效模拟了裂纹面的摩擦生热过程,裂纹区域生热呈现出随激励时间周期性上升的趋势,而且裂纹生热可分为周期和线性两部分;

(2) 由于预紧力的作用,靠近激励同侧的裂纹面区域摩擦生热效果更明显;

(3) 利用  $P$  值可以有效估算出热源的深度,仿真结果与理论结果具有较好的一致性。

## 参考文献:

- [1] Busse G, Wu D, Karpen W. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 71(8): 3962-3965.
- [2] Rantala J, Wu D, Busse G. Amplitude-modulated lock-in vibrothermography for NDE of polymers and composites [J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 1996, 7(4): 215-228.
- [3] Wang Zijun, Liu Junyan, Dai Jingmin, et al. Heat transfer analysis and finite element simulation of phase infrared nondestructive testing [J]. *Journal of Millimeter Waves*, 2008, 27(5): 361-364. (in Chinese)
- [4] Peng D, Jones R. Modelling of the lock-in thermography process through finite element method for estimating the rail squat defects [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 28(3): 275-288.
- [5] 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)
- [6] Busse G, Gleiter A, Spiessberger C. NDE using lock-in thermography principle and recent developments [J]. *Nondestructive Testing of Materials and Structures*, 2013, 6(1): 627-632.
- [7] Feng Fuzhou, Min Qingxu, Zhang Chaosheng, et al. The electric-mechanic analogous excitation method for the analog simulation of ultrasonic infrared imaging technique [J]. *Nondestructive Testing*, 2014, 36(7): 1-5. (in Chinese)
- [8] Xu Weihua, Bao Hai, Yang Yihan, et al. Voltage signal transmission principle based on the inverse piezoelectric effect of piezoelectric ceramic [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(4): 80-83. (in Chinese)
- [9] Zhang Chaosheng, Feng Fuzhou, Min Qingxu, et al. Effect of engagement force on vibration characteristics and frictional heating in sonic IR imaging [J]. *NDT & E International*, 2015, 76(1): 52-60.
- [10] Feng Fuzhou, Zhang Chaosheng, Min Qingxu, et al. Heating characteristics of metal plate crack in sonic IR imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1456-1461. (in Chinese)
- [11] Zhang Chaosheng. Research on detection of metal plate crack based on sonic infrared imaging [D]. Beijing: Academy of Armored Forces Engineering, 2015. (in Chinese)