

超声红外热像技术中金属平板裂纹的生热特性

冯辅周,张超省,闵庆旭,王鹏飞

(装甲兵工程学院 机械工程系,北京 100072)

摘要: 超声红外热像技术是一种新型无损检测技术,缺陷区域生热特性的研究有利于最优化检测方案的制定。实验分析表明:超声激励作用于含贯穿裂纹的金属平板时,与激励同侧的裂纹区域温度升高比异侧更明显,但裂纹面总体的生热效率稳定。针对上述实验现象,采用显式有限元方法建立了与实验系统对应的仿真模型,进行了机热耦合分析。在仿真模型中,采用压电-力类比方法模拟超声换能器的逆压电效应,并引入动态松弛模拟预紧力对被测平板初始状态的影响。仿真与实验结果得到了一致的裂纹区域温度分布和裂纹面生热规律,建立了裂纹面生热效率与裂纹面摩擦力及相对运动速度之间的联系,揭示了工具杆和被测平板之间的预紧力使裂纹面接触状态改变是裂纹生热向激励同侧偏移的直接原因。

关键词: 金属平板; 裂纹生热; 有限元分析; 超声红外热像

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1456-06

Heating characteristics of metal plate crack in sonic IR imaging

Feng Fuzhou, Zhang Chaosheng, Min Qingxu, Wang Pengfei

(Department of Mechanical Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Sonic infrared imaging is a new kind of hybrid nondestructive testing method. Research on heating characteristics of defect region is propitious to the optimization of testing scheme. Experimental results show that temperature rising of crack region measured at the excitation side is higher than that at the excitation opposite side; however, the heating rate of crack contact surface is stable in the mass. Based on the phenomenon of crack heating under intensive ultrasonic pulse, a finite element model of experimental setup was established and a thermal-stress analysis was performed by an explicit finite element method. In the finite element model, a piezoelectric-force analogy method was employed to simulate inverse piezoelectric effect in the ultrasonic excitation system, and dynamic relaxation was introduced into the simulation in order to cover the effect of engagement force on the initial state of specimen. During the FEM simulation, the crack frictional heating excited by ultrasonic pulse was calculated, and temperature distribution in space and time domain was described. The relationship between friction heating, friction force and relative velocity at contact surface was revealed. Simulated results reveal the engagement force between horn and testing plate makes the heating position in crack surface shift to the excitation side.

Key words: metal plate; crack heating; finite element analysis; sonic IR imaging

收稿日期:2014-09-17; 修订日期:2014-10-20

基金项目:军队科研计划项目

作者简介: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研究。Email: fengfuzhou@tsinghua.org.cn

0 引言

超声红外热像技术是一种新型无损检测技术,其基本原理是利用高强度超声脉冲激发被测对象内部产生高频振动,引起缺陷及不均匀区域产生热量并传导至被测对象表面,通过热像仪捕捉到被测对象表面温度场变化以实现缺陷检测^[1]。目前,普遍认为缺陷区域生热主要由摩擦、塑性变形和粘弹性效应三种因素构成,而且摩擦生热是接触界面类型缺陷生热的主要因素^[2]。前期实验表明:对含贯穿裂纹的金属平板施加超声激励时,位于激励位置同侧和激励位置异侧缺陷区域的温度信息有很大差异,然而由于实验手段难以获取裂纹接触面的状态信息,上述现象尚得不到科学合理的解释。

目前,研究人员针对超声激励下缺陷区域摩擦生热现象的数值模拟已开展了大量的研究。2004年,X Han 等人在不考虑超声工具杆和被测平板之间的接触-碰撞现象的情况下,采用正弦位移激励代替超声激励系统,模拟了超声激励下复合材料脱粘接触面的裂纹生热现象^[3];随后,他们以正弦振动的圆柱体模拟超声激励系统,计算裂纹区域的摩擦生热和塑性变形生热^[4-5],然而这种方法却忽略了超声激励系统因接触-碰撞作用而产生的位移变化。2010年,陈赵江等人针对 LS-DYNA 不包含电力耦合模块的问题,采用压电结构的热弹性类比方法来模拟超声换能器,准确地获取了不同工况下超声激励系统和被测对象的振动特征^[6],并将振动位移作为载荷导入到含裂纹平板的激励位置,间接地实现了不同工况下裂纹生热的模拟,然而其模型与检测条件仍不能很好对应^[7]。2013年,秦雷等人采用在加载位置施加调制位移载荷的方式建立了锁相超声激励下缺陷的生热模型,并探索了激励参数对检测结果的影响^[8]。

针对实验中观察到的激励同侧裂纹区域温度升高比激励异侧裂纹区域明显,而裂纹生热效率基本稳定的现象,文中利用 LS-DYNA 建立超声激励下含裂纹金属平板的仿真模型,其中采用压电-力类比方法模拟超声换能器的逆压电效应,引入动态松弛模拟预紧力对被测平板初始状态的影响,计算

了超声激励下金属平板上裂纹区域的摩擦生热,仿真结果揭示了超声激励下裂纹区域的温度和热量分布规律,仿真结论与实验结论具有很好的一致性。研究成果进一步揭示了超声激励下裂纹的生热特性,为超声红外热像技术检测方案的优化提供了理论指导。

1 裂纹生热特性的实验研究

典型的超声红外热像系统包括加载单元、超声激励系统、红外热像仪、固定夹具等,如图1所示。其中,旋转加载单元的螺纹丝杠推动超声换能器和工具杆轴向运动,迫使工具杆压紧被测对象,压力传感器实时测量工具杆与被测平板之间的预紧力;为减少振动能量沿夹具向外传播,在被测平板和固定夹具之间放置橡胶材料以实现隔振。超声激励系统选用 Branson DCX-S 超声塑料焊接系统,工作频率为 20 kHz,最大电功率为 1.25 kW;红外热像仪选用 FLIR T640,热灵敏度为 0.035 °C,像素为 640 pixel×480 pixel,采样频率为 30 Hz。

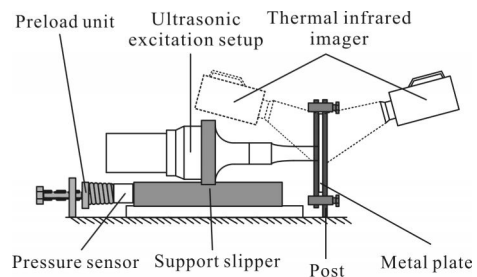


图1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

被测对象选用尺寸为 200 mm×100 mm×3.95 mm 的铝合金平板,其一侧人工预制一个长度为 10 mm 的贯穿裂纹;固定夹具通过螺栓夹持被测平板四角实现固定;激励位置偏离中心 20 mm,如图2所示。实验设定工具杆与被测平板之间的预紧力为 200 N,激励振幅设定为最大输出振幅的 30%,超声激励时长为 0.5 s,采样时长为激励开始时刻到激励结束后 0.3 s,即 0.8 s。为了减少外界环境对实验过程的干扰,采用双层遮光布料构建一个红外暗室以屏蔽外界辐射源和空气流动造成的影响;同时,在被测平板的表面喷涂黑色哑光漆以提高表面发射率。

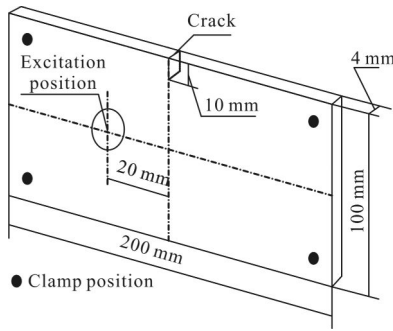


图 2 被测平板示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tested plate

1.1 裂纹区域温度分布

在其他检测条件相同的情况下，采用红外热像仪分别采集激励异侧（热像仪位于图 1 中右侧实线位置）和激励同侧（热像仪位于图 1 中左侧虚线）裂纹区域的温度分布。图 3(a)和(b)分别给出了两种情况下采集的激励结束时刻裂纹区域的温度云图，图中颜色越亮表示温度越高，可以看到：超声激励下，两侧获取的裂纹附近区域温度均呈现出明显的升高，但显然同侧采集比异侧采集观察到的裂纹区域温度升高更明显。

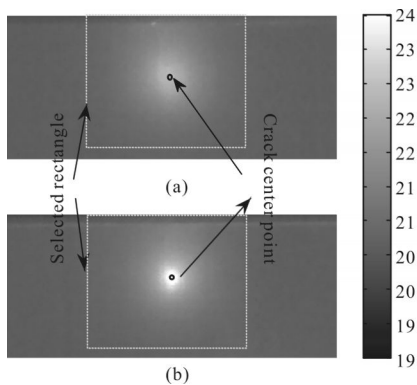


图 3 裂纹区域温度云图(a)激励异侧(b)激励同侧

Fig.3 Temperature contour of crack region(a)excitation opposite side (b)excitation side

为了更加清晰地展示相同激励条件下，两种采集方式获取的裂纹附近区域温升的差异，文中提取裂纹中心位置对应像素点的温度变化来详细说明，如图 4 所示。可以看到：相同激励条件下，与激励位置同侧的裂纹中心位置的温升最大值约为 4℃，而与激励异侧的裂纹中心位置的温升最大值为 2℃，由此可以推测裂纹面生热效率较大的位置靠近激励一侧。

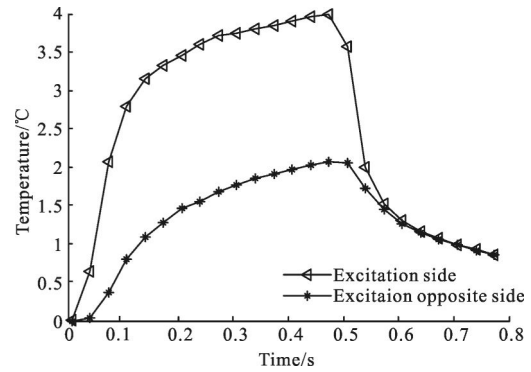


图 4 裂纹中心位置温度变化曲线

Fig.4 Temperature curves of crack center point

1.2 热量估计

假定一个厚度很小的平板内部存在一个热源，在不考虑空气对流和热辐射的情况下，可以认为平板表面的温度分布近似等于内部温度分布，那么内热源产生的热量 q_A 可由下式近似给出：

$$q_A = A \cdot h \cdot \rho \cdot C \cdot T_{avg} \tag{1}$$

式中： A 、 h 、 ρ 和 C 分别表示平板面积、厚度、密度和比热容，温度变化不大时均视为常数； T_{avg} 为选定区域内部温升的均值。

对于超声激励下含裂纹的金属板来讲，以裂纹中间位置为中心选取一个方形区域，如图 3 所示，其内切圆的半径 $r_D = 4\sqrt{\alpha T}$ ，其中 α 为热扩散系数， T 为采集时间，那么该区域之外某点的温度值（依 Green 函数）小于中心点温度的 e^{-8} ，可以忽略不计。因此，选定区域内温升均值可以近似表征裂纹区域内部的平均温升，故利用公式(1)可以估计裂纹区域产生的热量，如图 5 所示。从图中可以看到：激励同侧温度分布估算的热量高于激励异侧估算的热量，且在激励过程中(0~0.5 s 之间)，两侧温度均值均呈

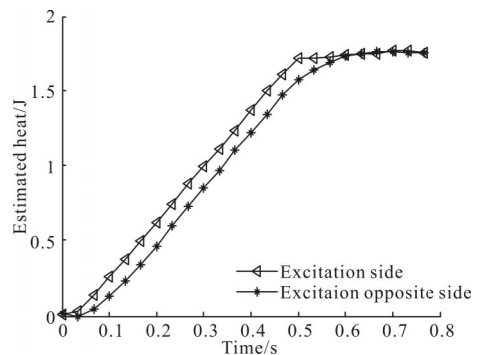


图 5 裂纹生热估计

Fig.5 Estimate of crack heating

直线上升。由此可以初步推断:尽管激励同侧和异侧的裂纹区域温度存在一定的差异,但超声激励下裂纹生热效率基本维持恒定。

2 实验系统的有限元建模

2.1 压电-力类比方法

如图 6(a)所示,在压电陶瓷极化方向上施加电场时,压电陶瓷由于逆压电效应将产生机械变形。当在压电陶瓷片两端加载周期性电压激励 $U=U_0\sin(\omega t)$ 时,将会沿极化方向产生一个变形量 μ , 这个变形量在一定范围内与电压呈线性关系:

$$\mu = kU = kU_0 \sin(\omega t) \quad (2)$$

式中: U_0 为电压激励的幅值; $\omega = 2\pi f_0$ 为角速度; f_0 为

工作频率; k 为电压 U 和变形量 μ 的比例系数,则压电陶瓷片沿振动方向的速度 v 表示为:

$$v = \dot{\mu} = kU_0 \omega \cos(\omega t) \quad (3)$$

由于 LS-DYNA V971 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 6(b)所示。在压电陶瓷片的两个端面上加载大小相等、方向相反的周期力激励 $F = F_0 \sin(\omega t)$ 。压电陶瓷片的纵向振动方程为:

$$\rho \frac{\partial^2 \mu_f}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 \mu_f}{\partial x^2} \quad (4)$$

式中: μ_f 为位置 x 上各质点离开原来位置的位移; ρ 为材料密度; E 为压电陶瓷的纵向弹性模量。

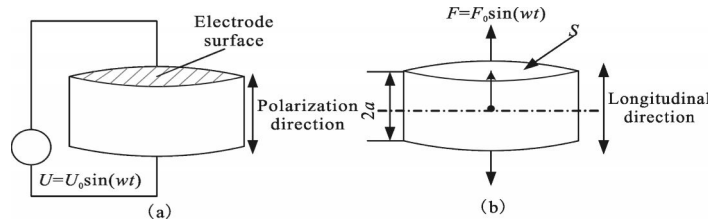


图 6 压电圆盘(a)电激励,(b)力激励

Fig.6 Piezoelectric disc(a)electric excitation(b)Force excitation

结合边界条件:当 $x=a$ 时,圆盘沿振动方向的速度方程为:

$$v(a,t) = \frac{cF_0}{ES} \tan \frac{\omega a}{c} \cos(\omega t) \quad (5)$$

式中: c 为弹性波沿纵向传播的速度; E 为压电陶瓷的纵向弹性模量; S 为压电陶瓷片的径向截面积。

由公式(3)和(5)可以看出:压电圆盘受到正弦电激励和正弦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。

2.2 建模过程

基于上述理论,建立了超声脉冲激励下含裂纹金属平板的有限元模型,如图 7 所示。超声枪由换能器、变幅杆和工具杆 3 部分组成,其中换能器由后盖板、压电陶瓷片组(4 片)、前盖板组成。前后盖板材料为高强度钢,压电陶瓷材料为 PZT,变幅杆及工具杆为钛合金。被测对象为含裂纹的铝合金平板,尺寸为 $200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 3.95 \text{ mm}$,贯穿裂纹的长度为 10 mm 。

与实验对应,超声激励系统的工作频率 f_0 为 20 kHz ,施加于压电陶瓷片两侧的正弦激励力的振幅为

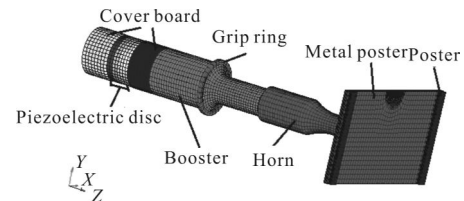


图 7 实验系统的有限元网格模型

Fig.7 Finite element model of experimental setup

9800 N ,超声激励时间为 500 ms ,求解时间为 800 ms 。为了模拟超声枪的固定和预紧,将固定支撑等效为由复合橡胶制成支撑平板,固定夹具简化为四角 1000 N 的轴向外力;同时在变幅杆对应振型节点位置添加一个由铝合金制成的抓环,模型所有节点被施以除轴向之外的其他 5 个自由度的位移约束,而在轴向施加大小为 200 N 的预紧力迫使工具杆输出的振动能量可以作用于被测平板。各部分材料属性参数选取参照表 1。

超声激励下含裂纹的金属平板生热现象模拟包含裂纹面之间、工具杆端面和被测对象之间以及被测对象和固定夹具之间 3 个接触区域,均视为面-面 (Surface-to-surface) 接触类型。由于罚函数数值结果

表 1 模型各部分材料的物理参数

Tab.1 Physical parameters in the finite element model

| Material | Density/ kg · m ⁻³ | Elastic modulus/GPa | Poisson | Specific heat /(J/(kg · °C)) | Thermal conductivity /(W/(m · °C)) |
|----------|----------------------------------|------------------------|---------|------------------------------------|--|
| Steel | 7 750 | 210.00 | 0.29 | 480.0 | 50.2 |
| PZT | 7 600 | 86.90 | 0.33 | 420.0 | 2.1 |
| Ti-alloy | 4 500 | 122.00 | 0.33 | 138.0 | 16.3 |
| Al-alloy | 2 700 | 75.00 | 0.33 | 875.0 | 121.0 |
| Poster | 1 200 | 14.00 | 0.33 | 475.0 | 100.0 |

噪声较小,算法动量守恒准确,且引起的沙漏效应较小,因此采用罚函数法计算法向接触力。为了合理模拟接触面的生热现象,设定所有活动接触面的静态摩擦系数 $\mu_s=0.4$,动态摩擦系数 $\mu_s=0.35$ 以及指数衰减参数 $\beta=1$ 。

实际检测过程中,超声激励系统和被测对象的作用过程分为两步:首先,施加一定的预紧力使超声激励系统的工具杆端面顶紧被测平板;其次,输出强超声脉冲来激励被测平板。因此,对应的仿真模型也必须在预紧力引起的被测平板预应变的前提下,才能对平板进行瞬态动力学分析。文中将瞬态动力学仿真分两部分进行:(1)开启 LS-DYNA 中动态松弛功能,获取夹持和预紧力作用下被测平板的预应变;(2)将预应变作为初始条件,对超声脉冲激励下被测平板中裂纹区域的生热现象进行仿真。

3 仿真结果分析

图 8 给出了激励异侧和同侧的裂纹区域温度分布云图。可以看到:由于摩擦生热,裂纹区域存在明

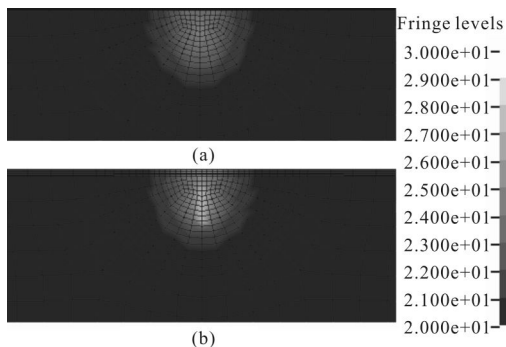


图 8 裂纹区域温度分布(a)激励异侧(b)激励同侧

Fig. 8 Temperature contour of crack region (a) excitation opposite side (b) excitation side

显的温度升高现象,且激励同侧裂纹附近区域的温升高于激励异侧裂纹区域的温升。

选定两侧裂纹中心位置对应单元,提取其温度值,如图 9 所示,可以看到:在超声激励下,两侧中心位置的温度均呈上升趋势,且激励同侧单元的温升最高约为 10 °C,而激励异侧单元温升最高为 5 °C;当激励结束后,两侧中心位置的温度迅速下降并趋于一致。

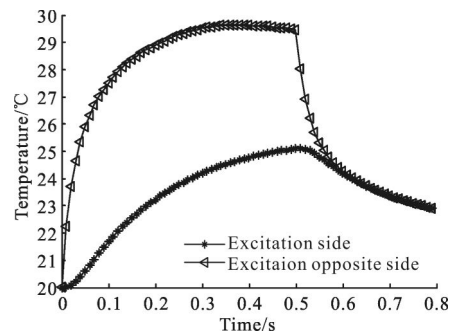


图 9 裂纹中心位置单元温度

Fig.9 Temperature curves of crack center element

与实验不同,有限元方法可以通过叠加裂纹接触面所有节点生热量求解裂纹面摩擦产生的总热量,如图 10 所示。可以看到:超声激励下裂纹面摩擦生热产生的总热量随时间近似直线上升,激励结束后摩擦生热总热量保持不变,说明裂纹面摩擦生热效率在整个激励过程中保持恒定,即说明超声激励下裂纹面保持稳定的生热;当激励结束后,裂纹摩擦生热停止。对比图 5 和图 10,可以看到:尽管通过裂纹温升估计裂纹热量存在误差,但由于被测平板厚度较小,因此实验估算得到的热量与仿真结果基本一致。

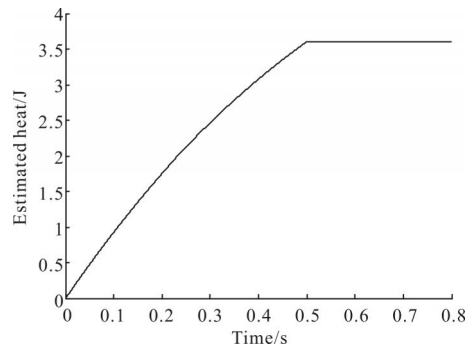


图 10 裂纹面摩擦生热能量

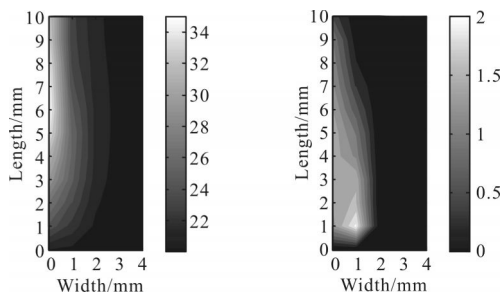
Fig.10 Friction heating energy at crack surface

进一步分析裂纹面的生热情况。图 11(a)给出了

超声激励 30 ms 时刻裂纹接触面上的温度分布云图,左侧为靠近激励位置一侧,左下角对应激励同侧裂纹根部,可以看到:温度最大值位于靠近激励位置的裂纹中心位置。为了深入揭示上述现象的形成原因,定义裂纹接触面上各个节点的摩擦力和相对运动速度的均方根值(RMS)为该节点等效摩擦力 F_f^e 和等效摩擦速度 V_f^e ,以表征超声激励过程中的裂纹面摩擦力和相对运动速度。图 11(b)给出了垂直于平板方向的等效摩擦力云图,可以看到:由于预紧力迫使被测平板产生初始变形,迫使激励位置同侧裂纹面闭合的同时异侧分开,因此激励同侧裂纹根部的等效摩擦力最大,裂纹开口位置的等效摩擦力最小;图 11(c)给出了垂直于平板方向的等效摩擦速度云图,可以看到由于裂纹根部存在约束,等效摩擦速度最大值位于裂纹开口位置,向裂纹根部逐渐变小。进一步,定义等效热流 q^e 为:

$$q^e = F_f^e * V_f^e \quad (6)$$

得到裂纹接触面上的等效热流,如图 11 (d)所示,可以看到激励同侧裂纹面中间位置的热量分布最大,与图 11(a)的温度分布云图最值位置重合。

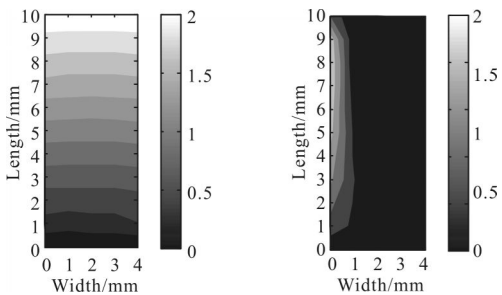


(a) 温度云图

(b) 等效摩擦力云图

(a) Temperature contour

(b) Equivalent friction force contour



(c) 等效摩擦速度云图

(d) 等效热流云图

(c) Equivalent friction velocity contour

(d) Equivalent heat flux contour

图 11 裂纹面生热特性

Fig.11 Heating characteristics on crack surface

4 结 论

文中对超声脉冲激励下裂纹区域的生热特性进行了分析,描述了裂纹附近区域温度分布规律以及裂纹面的生热规律,建立了裂纹面摩擦生热与摩擦力、摩擦速度之间的联系,揭示了预紧力对裂纹生热产生的影响,得出结论如下:

(1)超声脉冲激励下,平板贯穿裂纹靠近激励同侧的裂纹附近区域的温升高于激励异侧对应的裂纹区域温升。

(2)超声脉冲激励过程中裂纹面摩擦生热效率保持基本恒定。

(3)预紧力作用下激励同侧的裂纹面摩擦力高于激励异侧,使得裂纹面摩擦生热的位置向激励同侧偏移。

参考文献:

- [1] Favro L D, Han X, Ouyang Z, et al. Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(6): 2418–2421.
- [2] Renshaw J, Chen J, Holland S, et al. The sources of heat generation in vibrothermography [J]. *NDT&E International*, 2011, 44: 736–739.
- [3] Mian A, Han X, Islam S, et al. Fatigue damage detection in graphite/epoxy composites using sonic infrared imaging technique [J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64 (5): 657–666.
- [4] Han X, Islam S, Newaz G, et al. Finite element modeling of the heating of cracks during sonic infrared imaging [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(7): 074905.
- [5] Zhang D, Han X, Newaz G, et al. Modeling turbine blade crack detection in sonic IR imaging with a method of creating flat crack surface in finite element analysis [C]//AIP Conference Proceeding, 2012, 1430: 527–532.
- [6] Chen Zhaojiang, Zhang Shuyi. Finite element analysis of superharmonic and subharmonic vibrations of plates excited by intensive ultrasonic pulses [J]. *Acta Acustica*, 2011, 36 (2): 102–112. (in Chinese)
- [7] Chen Zhaojiang, Zheng Jiang, Zhang Shuyi. Finite element modeling of heating phenomena of cracks Excited by High-intensive Ultrasonic Pulses [J]. *Chinese Physics B*, 2010, 19 (11): 118104.
- [8] 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)