

超声红外热像中激励源位置对裂纹生热的影响

闵庆旭,张超省,朱俊臻,冯辅周,徐 超

(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,裂纹生热效果直接决定了裂纹的可检测性,而激励源位置是影响裂纹生热的因素之一。针对激励源位置对裂纹生热影响不清楚的问题,建立了超声换能器与被测金属平板的有限元模型,并搭建了超声红外热像检测系统;研究了不同激励源位置时裂纹的生热特性;并利用等效摩擦力、等效速度以及等效热流进行了有效验证。研究表明:当激励源位于裂纹面正下方时,由于裂纹面两侧振动同步,裂纹生热效果将受到抑制;而随着激励源位置向两侧移动,裂纹生热呈现出先波动上升后波动下降的趋势,而且预紧力越大波动越剧烈。研究成果有效地揭示了激励源位置对裂纹生热的影响规律,为超声红外热像技术的检测优化奠定了理论基础。

关键词: 激励源位置; 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 **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0104007

Effect of excitation position on crack heating characteristics in sonic IR imaging

Min Qingxu, Zhang Chaosheng, Zhu Junzhen, Feng Fuzhou, Xu Chao

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

Abstract: Sonic IR imaging is one of the emerging NDT methods. The detectability of the cracks is based on its heating effect, which correlates with several excitation conditions, for example the excitation position. For the unclear effect of excitation position on crack heating, the finite element model and the experimental system was utilized to study the characteristic of crack heating under different excitation positions, and made an effective verification by using the equivalent force, equivalent velocity and equivalent heat flux. The research shows that when the excitation position is under the crack face, the crack heating will be restrained as a result of vibration synchronization for the two crack surfaces. However, as the excitation position moves both sides, the crack heating will rise first and fall later with a fluctuation, and bigger engagement force can lead it more severe. The study results clearly demonstrate the effect principle of excitation position on crack heating, which may further lay the theory basis to the optimization of test conditions in the sonic IR imaging.

Key words: excitation position; crack heating; finite element analysis; sonic IR imaging

收稿日期:2016-05-05; 修订日期:2016-06-06

基金项目:军内计划科研项目

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研究。Email:minqingxu2011@163.com

导师简介:冯辅周(1971-),男,教授,博士生导师,博士,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采用超声脉冲来激励被测对象使得裂纹等缺陷区域发生摩擦生热,然后利用红外热像仪获取被测对象表面温度分布以实现缺陷检测的新型无损检测技术^[1]。该技术具有检测速度快、操作简单、输出直观、安全性好等优点,现已经在航空航天、电力、机械等领域得到有效推广。

目前,针对结构件缺陷的检测条件优化,特别是检测参数的定量研究,是超声红外热像技术研究的热点,国内外研究人员对此开展了大量的探索工作。2009年,郑江等人指出了超声源和裂纹之间的相位方位和距离的差异可以引起裂纹区域不同的温升^[2]。2013年,Han X等人研究了预紧力对裂纹生热的影响,指出在其他条件不变的情况下,存在预紧力的最优值使得裂纹生热效果最好^[3];同年,秦雷等人设计了不同激励加载位置的实验方案,揭示了加载位置对检测结果的影响^[4]。冯辅周等人进一步指出了预紧力对被测对象振动特性和裂纹闭合度产生的共同影响,使得存在一个特定的预紧力使得裂纹面生热达到最大^[5]。实验研究表明:预紧力对裂纹生热的影响并不是一种单因素关系,它既与预紧力本身强度有关,还与激励源位置紧密相关且互相影响。然而,目前针对激励源位置影响裂纹生热规律的研究并不深入,且相关成果较少。

文中从仿真和实验两方面入手,开展激励源位置对裂纹生热的影响研究。建立了超声换能器与被测金属平板的仿真模型,并搭建了超声红外热像检测系统。仿真与实验结果具有很好的吻合性,揭示了激励源位置对裂纹生热的影响规律。研究成果将为超声红外热像技术的检测条件优化奠定理论基础。

1 实验研究

1.1 实验装置及被测试件

超声红外热像实验系统如图 1 所示,该系统可实现激励源位置的定量调节。典型的超声红外热像系统由超声激励装置、红外热像仪、预紧单元和固定

支架等部分组成。其中,超声激励装置选择 Branson DCX-S 超声塑焊系统,最大功率 1.25 kW,工作频率为 20 kHz;红外热像仪选用 FLIR T640,采样频率为 30 Hz,其采集与激励同步。

图 2 所示为实验中所选用的铝合金平板,尺寸为 200 mm×100 mm×4 mm,在其长边中间位置预制贯穿裂纹,长度约为 10 mm,采用双侧短边夹持方式将平板紧固于固定支架上。实验中,保持激励幅值和激励时间不变,设置预紧力为 100、180 和 260 N。激励源位置沿被测平板短边中心线(X 轴方向)移动,原点位于平板中心位置,共设置 17 个激励点,相邻两个激励源位置间距 10 mm。为了减少外界环境对实验的干扰,采用双层遮光布构建一个红外暗室以屏蔽外界辐射光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。

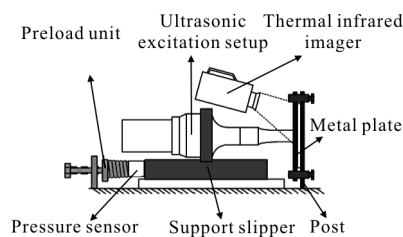


图 1 超声红外热像实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of sonic IR experimental setup

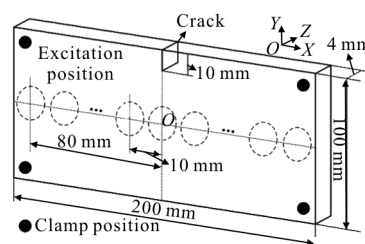


图 2 被测金属平板

Fig.2 Testing metal plate

1.2 实验结果分析

利用超声红外热像系统进行实验分析,得到不同激励源位置对应裂纹区域生热的结果。图 3 所示为预紧力 260 N 时不同激励源位置对应裂纹区域温度分布云图。可以看出:不同的激励源位置对应裂纹区域的生热效果差异明显;激励源位于 X=10 mm 和 40 mm 处对应的裂纹区域生热效果明显好于 X=0 mm 和 70 mm 处。

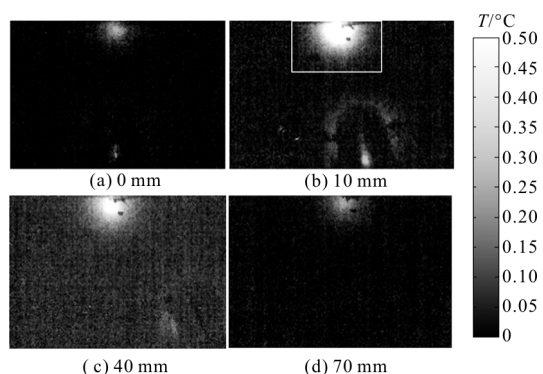


图 3 实验中裂纹区域温度分布云图

Fig.3 Temperature contour of crack region in experiment

由于实验中无法直接获取裂纹面的摩擦生热能量,文中采用热量估计的方法计算出裂纹面摩擦产生的热量。假定一个很薄的平板内部存在一个热源,在不考虑空气对流和热辐射前提下,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 可由公式(1)近似给出^[6]:

$$q_A = A \times h \times \rho \times c \times T_{avg} \quad (1)$$

式中: A 、 h 、 ρ 和 c 分别表示平板面积、厚度、密度和比热容,在温度变化不大时均视为常数; T_{avg} 为平板表面温升均值。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,选择一个矩形区域,大小为 $40 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,如图 3(b)所示,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。

将激励同侧的平板上选定区域温升均值和面积代入公式(1),即可估计出裂纹面产生的热量。图 4 所示为预紧力为 260 N ,激励源位置为 $X=-20$ 、 -40 和 -60 mm 时,裂纹区域由摩擦产生的估计热量。可以看出:不论激励源位置如何变化,实验中估算的裂纹生热量随时间的变化率基本恒定,在 1 s 时刻,激

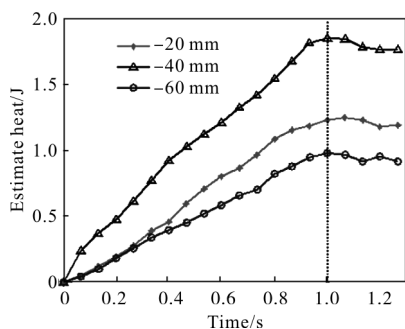


图 4 裂纹区域热量估计

Fig.4 Estimate heat on crack areas

励停止,裂纹面的摩擦生热也随即终止,之后一段时间,裂纹面估计热量基本保持平稳。

按照上述方法,计算出在不同激励源位置条件下的裂纹区域热量估计,实验得到了 3 组数据,具体结果如图 5 所示。实验中,由于裂纹预制时很难精确控制,裂纹面并不完全与 YOZ 面平行,而且外界干扰因素不可避免,在 $X=0 \text{ mm}$ 两侧激励源位置对应的裂纹生热结果并不完全对称。但是从整体结果来看,依然可以得到:不论预紧力如何变化,当激励源位置位于裂纹面正下方($X=0 \text{ mm}$)时,裂纹区域生热效果很不明显;而当激励源位置向两侧移动时,裂纹区域生热呈现出先波动上升后波动下降的趋势,而且预紧力越大波动越剧烈。

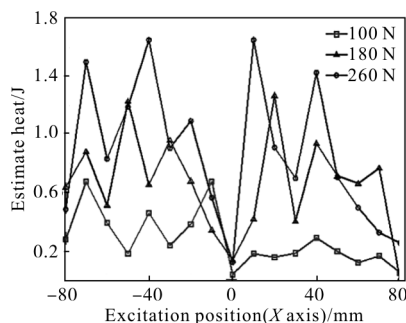


图 5 不同激励源位置对应裂纹区域估计热量

Fig.5 Estimate heat of crack areas with different excitation positions

2 有限元仿真

2.1 仿真模型的建立

利用压电-力类比方法^[9],简化超声红外热像实验系统,建立了超声换能器与被测金属平板的仿真模型,如图 6 所示。

仿真中,力激励代替电激励加载到压电陶瓷片两端,其表达式为:

$$F = F_0 \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

式中:加载到单节点上的力激励幅值大小为 70 N ,系统工作频率为 20 kHz ;在变幅杆振型节点位置添加一个铝合金抓环,同时抓环模型上所有节点施加 Z 向的预紧力,其他自由度均施加位移约束。

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,施加超声脉冲激励作用于被测

平板,该过程将以第一步产生的预应变为初始条件,并在超声激励下进行仿真分析。

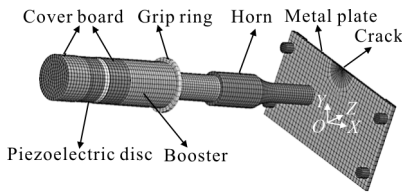


图 6 实验系统有限元模型

Fig.6 Finite element model of experiment setup

2.2 仿真结果分析

按照 2.1 节所述步骤进行有限元分析,得到不同激励源位置下裂纹生热的仿真结果。图 7 为在预紧力 384N 的条件下,不同激励源位置时的裂纹区域温度分布。图中可以看出:激励源位置在 $X=20\text{mm}$ 和 50mm 处对应的裂纹生热更加明显,而激励源位置在 $X=0\text{mm}$ 和 80mm 处生热则受到抑制,仿真结果与实验结果比较吻合

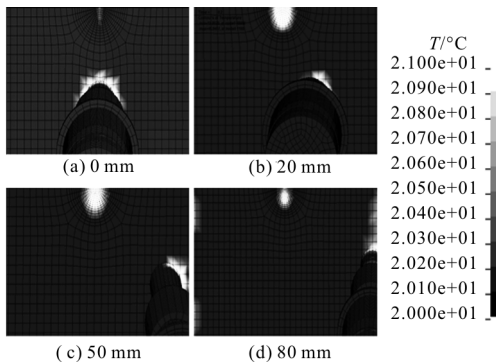


图 7 仿真中裂纹区域温度分布云图

Fig.7 Temperature contour of crack region in simulation

与实验分析不同,在仿真分析中,可以通过叠加裂纹面上所有节点的生热量来求解裂纹面摩擦生热的能量,如图 8 所示。仿真中,预紧力设为 384 N,选

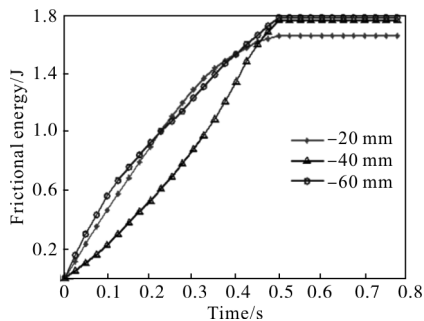


图 8 裂纹面摩擦生热能量

Fig.8 Frictional energy at crack faces

择 $X=-20,-40$ 和 -60mm ,3 处激励源位置。而为了完整地观察裂纹生热的变化情况,激励时间设为 0.5s ,求解时间设为 0.8s 。对比图 4 可以看出:裂纹面的摩擦生热速率基本保持恒定;当激励停止时,裂纹摩擦生热量不再增加,并趋于平稳。

进一步,提取不同激励源位置时的裂纹面摩擦生热能量,得到 3 组数据,具体结果如图 9 所示。为节约计算成本,求解时间设置为 200ms 。对比图 5 可以看出:当激励源位置位于裂纹面正下方($X=0\text{mm}$)时,裂纹区域生热效果总是最弱,这是由于裂纹面两侧振动同步,裂纹面相对运动较弱,导致裂纹面摩擦作用效果不明显;而当激励源位置向两侧移动时,裂纹生热呈现出先波动上升后波动下降的趋势,而且预紧力越大波动越剧烈,仿真与实验结果具有很好的一致性。由此可以看出:激励源位置对裂纹生热的影响很大,且预紧力越大,这种影响越明显,裂纹生热随激励源位置的变化呈“M”型。

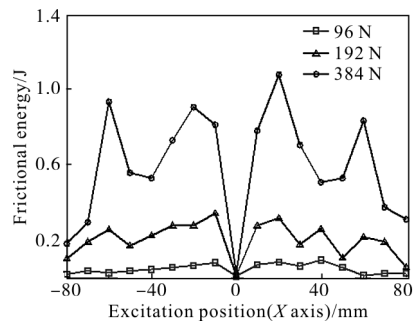


图 9 不同激励源位置的裂纹区域摩擦生热能量

Fig.9 Frictional energy of crack areas with different excitation positions

3 激励源位置对裂纹生热的影响分析

3.1 对裂纹面驱动力及闭合度的影响

影响裂纹面摩擦生热的两个因素是裂纹面的驱动力和闭合度。其中,驱动力可以通过裂纹区域节点振动的幅值和节点振动频率的复杂程度来表征,裂纹区域节点振动的幅值越大或者节点振动频率越复杂,裂纹面的驱动力越大;而闭合度则主要受裂纹面法向接触力的影响,法向接触力越大,裂纹面的闭合度也越大。图 10 和图 11 分别为不同激励源位置时裂纹区域节点振动幅值以及节点振动频谱分析。其中,图 10 表明激励源位置的改变并不会引起裂纹区域节点振幅的单调线性变化,而是使得振幅在一恒

定值附近波动变化;而在图 11 中,不同的激励源位置对应裂纹区域的节点振动频率成分比较接近,主要以 1/2 次谐波、超谐波以及倍频为主。综合上述分析,可以看出:激励源位置变化时,裂纹的驱动力可以认为是一个恒定值。图 12 所示为裂纹面的法向接触力随激励源位置变化的曲线,图中可知:裂纹面法向接触力随着激励源位置偏离裂纹而呈现出逐渐下降的趋势,说明了裂纹面的闭合度逐渐降低。

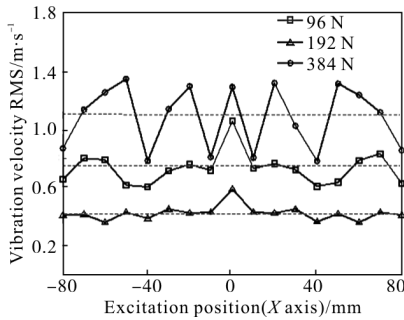


图 10 不同激励源位置时裂纹区域节点振动振幅
Fig.10 Vibration amplitude of nodes on crack areas with different excitation positions

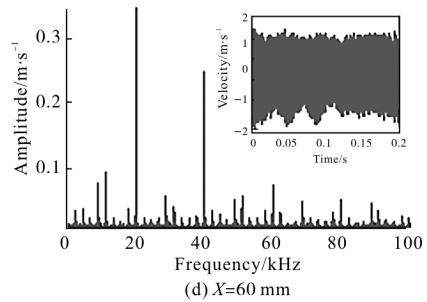


图 11 不同激励位置时裂纹区域节点振动频谱分析
Fig.11 Frequency spectrum of nodes on crack areas with different excitation positions

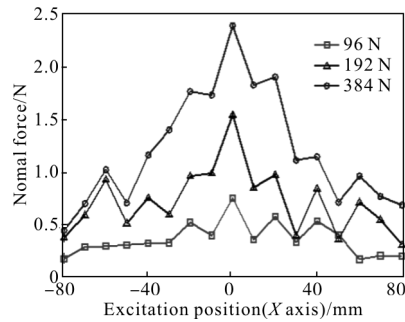


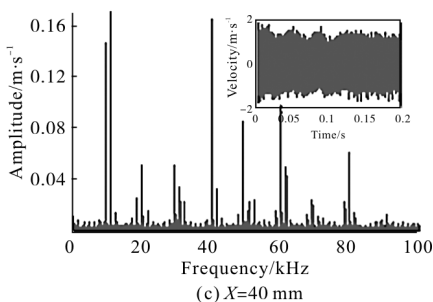
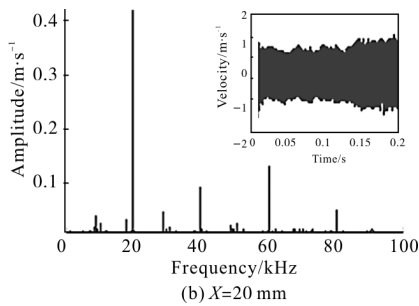
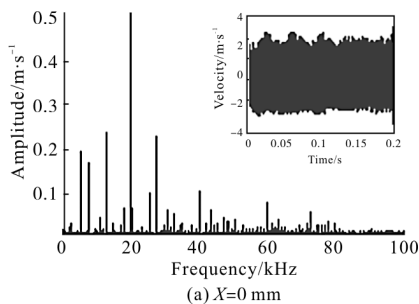
图 12 不同激励源位置的裂纹面法向接触力
Fig.12 Normal contact force of crack faces with different excitation positions

3.2 对摩擦生热的影响

在超声红外热像技术检测过程中, 超声激励通过变幅杆将振动能量注入被测试件, 进而传导至裂纹区域, 引起裂纹的摩擦生热。为了揭示裂纹面摩擦生热产生的原因, 进而确定激励源位置对裂纹生热的影响, 定义裂纹面上所有节点 Z 向相对运动速度的均方根值作为等效摩擦速度 V_f^e , 如图 13(a)所示, 图中可以看出: 由于裂纹根部受到约束, 等效摩擦速度从裂纹开口到裂纹根部呈现出逐渐减小的趋势; 等效摩擦力 F_f^e 用裂纹面上所有节点的 Z 向接触力均方根值表示, 结果如图 13(b)所示, 可以看出: 由于预紧力的作用, 使得激励同侧(靠近激励的一侧)部分裂纹面闭合而激励异侧部分裂纹面分开, 加之裂纹根部约束的影响, 使得激励同侧裂纹面根部区域的等效摩擦力最大; 而等效热流 q^e 为两者乘积, 如图 13(c)所示, 表达式可表示^[6]:

$$q^e = F_f^e \times V_f^e \tag{3}$$

图 13(d)所示为裂纹面上所有节点的温度分布云图, 对比图 13(c), 可以看出: 与等效热流的分布情



况类似,激励同侧裂纹生热效果好于激励异侧,并且温度最大值位于靠近激励一侧裂纹的中间位置。

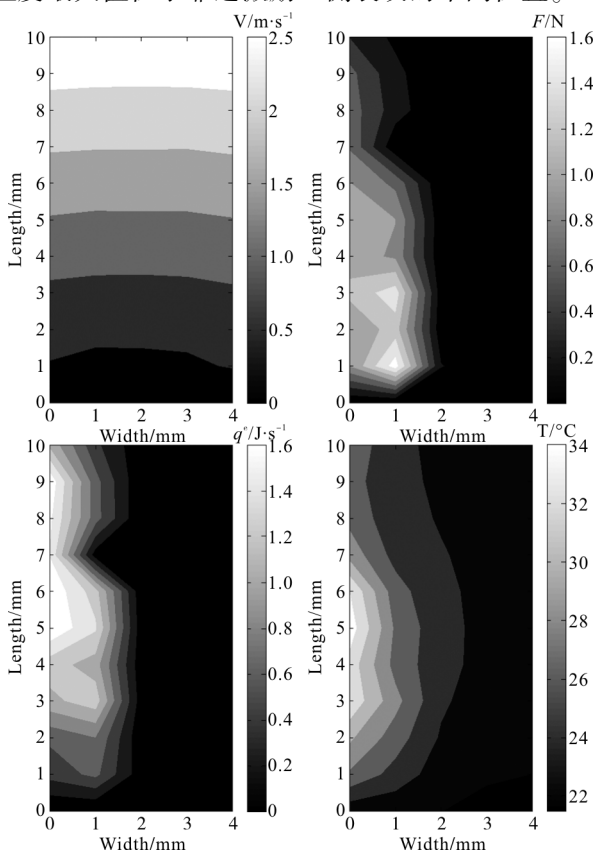
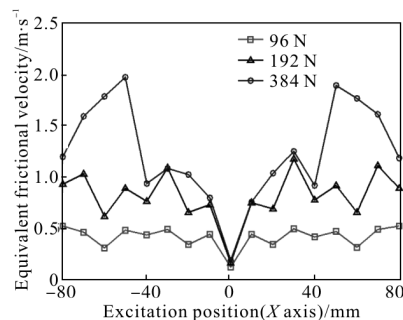


图 13 裂纹面生热特性

Fig.13 Heating characteristics on crack face

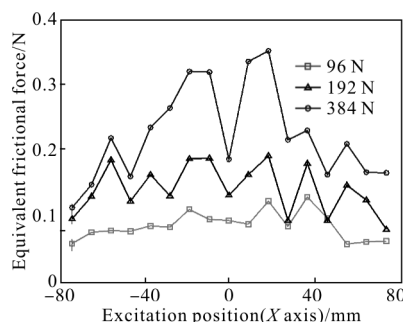
利用上述方法,得到不同激励源位置时裂纹面等效速度、等效摩擦力以及等效热流的平均值,如图 14 所示。由 3.1 节分析可知:裂纹面的驱动力并不随着激励源位置的改变而改变,而是保持在一个恒定值。如图 14(a)所示,等效速度随着激励源位置的偏移呈现出逐渐增大趋势。当激励源在 $X=0$ mm 时,由于裂纹面闭合度最大,造成了等效速度非常小;随着激励源位置的偏移,裂纹面的闭合度逐渐减小,因此,等效速度逐渐增大。图 14(b)所示,在驱动力保持不变的情况下,等效摩擦力主要受裂纹闭合度的影响。随着激励源逐渐偏离裂纹区域,裂纹闭合度逐渐降低,等效摩擦力也呈现出逐渐下降的趋势。而对比图 14(c)和图 9 可以看出,等效热流曲线与裂纹面摩擦能量曲线具有很好的对应,随着激励源位置偏离裂纹区域,裂纹生热呈现出先波动增大后波动减小的趋势,而且预紧力越大波动越明显,从而验证了 2.2 节中的分析而针对裂纹生热出现波动现象的原

因,通过以上分析可知:首先,节点的振动以及裂纹面的接触碰撞本身就是存在波动现象,而且驱动力和闭合度分别通过节点振动幅值和频谱以及裂纹面的接触作用力来描述;其次,裂纹面的等效速度和等效摩擦力受到驱动力和闭合度的影响产生波动;最后,受等效速度和等效摩擦力的影响,裂纹生热随激励源位置的变化将呈现出波动现象。



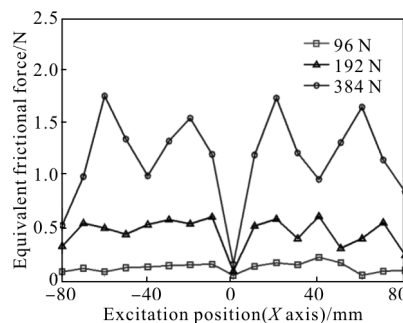
(a) 等效速度

(a) Equivalent velocity



(b) 等效摩擦力

(b) Equivalent frictional force



(c) 等效热流

(c) Equivalent heat flux

图 14 不同激励源位置时裂纹面节点等效输出

Fig.14 Equivalent results of nodes on crack face with different excitation positions

然而,如图 14(b)所示,当激励位置位于 $X=0$ mm 时,等效摩擦力有一个下降的突变,这与前面分析并

不相符。其原因是由于裂纹面两侧振动的同步性大大降低了裂纹面节点相对运动的趋势,使得裂纹面部分节点实际上并没有出现相对滑动摩擦,进而裂纹面的等效摩擦力受到抑制。即此条件下利用裂纹面的闭合度来推断裂纹面等效摩擦力并不适用。然而一旦激励源位置偏离裂纹面,裂纹面两侧的节点振动情况必然出现很大的偏差,裂纹面上节点的相对滑动作用将十分明显,如图 14(a)所示,此时利用裂纹面的闭合度来推断等效摩擦力将非常有效。

4 结 论

文中利用仿真和实验方法,揭示了激励源位置对裂纹生热的影响规律,并利用等效摩擦力、等效速度以及等效热流进行了有效验证,得出的结论如下:

(1) 随着激励源位置远离裂纹区域,裂纹面驱动力维持在一恒定值,而裂纹面闭合度呈现出逐渐下降的趋势;

(2) 当激励源位于裂纹面正下方($X=0$ mm)时,由于裂纹面两侧振动同步,相对运动较弱,导致裂纹区域生热效果很不明显;而随着激励源位置向两侧移动,裂纹生热呈现出先波动升高后波动下降的趋势,而且预紧力越大波动越剧烈。

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] Zheng Jiang, Zheng Kai, Zhang Shuyi. Effect of position of ultrasonic excitation source on thermosonic image of cracks [J]. *Nondestructive Testing*, 2009, 31(12): 946–949.
- [3] Han X, Song Y. Study the effect of engagement force of ultrasound transducer on crack detectability in sonic IR imaging [C]//AIP Conference Proceeding, 2013, 1511: 532–538.
- [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)
- [5] Feng Fuzhou, Zhang Chaosheng, Min Qingxu, et al. Effect of engagement force on vibration characteristics and frictional heating in sonic IR imaging [J]. *NDT&E Int*, 2015, 76(1): 52–60.
- [6] 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)