

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.007

## 超声激励下混凝土板裂缝发热的有限元分析\*

蒋雅君<sup>1,2</sup>, 任 荣<sup>1,2</sup>, 冯辅周<sup>3</sup>, 陶 磊<sup>1,2</sup>, 杜 坤<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 3. 陆军装甲兵学院车辆工程系, 北京 100072)

**摘要:** 针对现有混凝土结构缺陷检测手段的不足, 引入了混凝土裂缝检测的超声红外热像检测方法。①总结了超声红外热像检测的理论基础, 对裂缝发热机制进行了推导和解释。②采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA, 考虑材料阻尼、自振特性、接触效应等情况, 建立模型, 对混凝土板件在超声激励下的发热效应进行了分析, 结果表明在超声激励下, 混凝土板件发热明显, 而且在实验室条件下该方法适用于混凝土材料; 裂缝不同区域接触和发热效应不相同, 裂缝中下部接触作用强烈, 发热明显; 裂缝接触面节点生热由 X 方向(接触面法向)接触碰撞作用和 Y 方向(接触面切向)摩擦滑移作用共同决定; 裂缝发热效应与板件自振特性有关, 激励频率近于板件自振频率时, 板件振动强烈, 发热效应明显。以上结果对混凝土结构无损检测研究具有一定参考价值。

**关键词:** 超声激励; 混凝土板裂缝; 接触和发热效应

**中图分类号:** TU375.2   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2020)06-0892-10

## Finite Element Analysis on Crack Heating of Concrete Slab under Ultrasonic Excitation

JIANG Yajun<sup>1,2</sup>, REN Rong<sup>1,2</sup>, FENG Fuzhou<sup>3</sup>, TAO Lei<sup>1,2</sup>, DU Kun<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Department of Vehicle Engineering, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of the existing defect detection methods for concrete structures, an ultrasonic infrared thermography detection method for concrete cracks was introduced. (1) The theoretical basis of the ultrasonic infrared thermography detection method was summarized, and the thermal mechanism of crack was deduced and explained. (2) Considering material damping, self-vibration characteristics and contact effects, a model was established to analyze the heating effect of a concrete slab under ultrasonic excitation, based on finite element software ANSYS/LS-DYNA. The results show that, under ultrasonic excitation, the heating of the concrete slab is obvious, and the method is suitable for concrete material under the condition of laboratory. The contact and heating effects are different in different areas of the crack. The contact effects in the middle and the lower part of the crack are strong and the heat is obvious. The nodal heating is determined by the contact collision effect of X

\* 收稿日期: 2018-10-26; 修回日期: 2018-12-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51875576)资助

作者简介: 蒋雅君(1980-), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事地下工程防水理论与技术、地下结构病害检测与治理研究。

Email: yajunjiang@swjtu.edu.cn

direction (normal direction of contact surface) and the frictional slip effect of Y direction (tangent direction of contact surface). The heating effect of the crack is related to the self-vibration characteristics of the slab. When the excitation frequency is close to the slab's natural frequency, the vibration of the slab is strong and the heating effect is obvious. The above results have a certain reference value for the nondestructive testing of concrete structures.

**Keywords:** ultrasonic excitation; cracks in concrete slab; contact and heating effects

## 引 言

近年来我国基础设施进入了大规模修建时期,大批量的基础设施投入运营以后,混凝土结构的病害及其治理问题也日益突出,尤其是混凝土结构的缺陷检测技术也成为了目前日益关注的热点。在混凝土结构的缺陷中,最常见的类型就是结构开裂,因此对混凝土结构裂缝的识别和表征往往也是混凝土结构缺陷检测及治理的重要内容。

常见混凝土结构裂缝检测方法根据其原理可大致分为波动法、扫描法、红外法等。波动法的主要原理是根据各种波在混凝土中的传播规律来判断混凝土缺陷特征,其优点是精度高、技术成熟,但现阶段还不适用大规模混凝土裂缝结构检测任务。扫描法是基于激光扫描或线性相机的机器检测方法,其主要优点是检测范围大、速度快、效率高,但其精度还很难达到检测要求。红外法检测原理是根据结构缺陷部位的热传导性能特点,从温差上测定缺陷的部位以及形状。现阶段红外法用于地下工程检测的难点是热源问题,本文引入外部超声激励作为人工热源,在超声激励作用下,结构物裂缝质点将发生接触、碰撞和摩擦,产生热量,缺陷区域就被选择性加热,为红外法开展检测提供条件<sup>[1]</sup>。开展混凝土结构裂缝的超声红外热像检测技术研究,主要目的是期望其能够解决现阶段地下工程检测精度和检测效率的矛盾。

早在20世纪90年代以前,国外学者就已经提出了结合主动激励的振动热像检测,但限于计算机和热像仪性能,仿真计算和实验验证都存在困难;较早结合实验和数值计算对超声红外热像技术展开研究的是Wayne State University的L. D. Favro等<sup>[2-3]</sup>,他们对石墨/环氧树脂复合材料的疲劳裂纹展开检测,获得了较为理想的结果,并对实验过程的声混沌现象做出了解释。国内朱小兵等<sup>[4-6]</sup>较早对超声红外热像技术开展理论研究和实验验证,他

们提出了超声红外热像检测发热机理的理论计算模型和红外信号识别方法,研发了超声红外检测实验系统。张超省等<sup>[7-8]</sup>对超声红外检测技术展开较多试验研究和仿真计算,相关成果包括预紧力对实验的影响,裂纹自动识别方法等。田干等<sup>[9]</sup>通过改善超声红外热像检测条件(如增大激励频率或采用双源激励),提高了复合材料构件声混沌现象发生概率,进而提升了超声红外热像技术的缺陷检测能力。张小川等<sup>[10-11]</sup>以玻璃钢、复合材料、古建筑等作为检测对象,扩展了该方法的应用领域,同时也对超声红外热像检测测量缺陷深度的方法做出探索。

以上研究主要集中在机械、航天和材料科学等领域,将该方法运用于混凝土结构缺陷检测的研究还较为少见。本文在理论推导的基础上,建立带有裂缝的混凝土板件有限元模型,以验证超声激励在混凝土裂缝识别上的可行性,探讨影响检测结果主要因素,希望为建立混凝土裂缝超声红外热像实验系统提供指导性参数。

## 1 超声激励下裂缝发热原理

在超声激励下,混凝土板激励面上的质点首先振动,引起该处微元体变形,这种变形又促使其周围质点跟着振动,直至振动传递到裂缝周围,使裂缝表面的质点接触、碰撞和摩擦,这个接触、碰撞和摩擦过程便使得质点的振动机械能转化为热能,即裂缝区域产生热量,温度升高<sup>[12]</sup>。若保证激励时间,热量可传导至周围质点,最终形成较大范围的温度上升区域并易被红外热像仪捕捉。需要注意的是,根据振动理论,质点传递的还有应力波,那么裂缝区域质点温度升高必然使材料体积变化进而影响质点应力,即温度场与应力场互相影响,因此,该问题属于热固耦合问题<sup>[13]</sup>。

### 1.1 超声波在混凝土板中的传播规律

采用激励头激励混凝土板件,超声波以平面纵

波形式传播,激励面各质点作等幅同相振动。由于超声激励的时间效应,混凝土板件内质点的应力、应变和位移不仅是空间位置坐标的函数,还是时间的函数,因此需采用弹性动力学理论来求解超声波在混凝土板件的传播规律。相应假定混凝土板件是连续、均匀和各向同性的,服从小变形假定,自然状态无初应力。

据弹性动力学理论,混凝土板件内质点的应力、应变和位移满足运动方程式(1)、几何方程式(2)和物理方程式(3)<sup>[14]</sup>:

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij} &= \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \\ \sigma_{kk} &= (3\lambda + 2\mu) \varepsilon_{kk} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中,  $\delta_{ij}$  为指标表示法中的 Kroneker 符号;  $\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$  和  $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$  为材料的 Lamé 常数。

公式(1)~(3)消去应力和应变,可得到关于位移的偏微分控制方程式<sup>[14]</sup>:

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,ji} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (4)$$

式(4)可以求解无限域波动问题,对于有限求解域,则还需要边界条件和初始条件,即定解条件。对式(4)进行推导可得到各类波动方程,将波动方程与定解条件联立求解问题,最终得到波动行进特征<sup>[14]</sup>。

## 1.2 接触动力学分析

根据振动理论和接触动力学理论,动荷载下多维裂缝的瞬态动力学方程为<sup>[15]</sup>:

$$M \frac{d^2 U}{dt^2} + C \frac{dU}{dt} + KU = P + R \quad (5)$$

式中,  $U$ 、 $\frac{dU}{dt}$  及  $\frac{d^2 U}{dt^2}$  分别是节点位移、节点速度和节点加速度列阵;  $M$ 、 $K$ 、 $C$ 、 $R$  及  $P$  分别为质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵、裂缝接触矩阵和简谐外荷载矩阵。

求解式(5)的关键是求解裂缝接触矩阵  $R$ , 本文采用罚函数法求解接触力<sup>[15]</sup>。

采用罚函数法实现接触碰撞,首先要确定接触判定条件,这里介绍容易理解的节点-单元接触算法<sup>[16]</sup>。如图1(a)所示,假设  $m_s$  为与  $n_s$  最近的主节点,  $n_s$  为投影位于单元  $e_i$  的从节点,  $c_i$  与  $c_{i+1}$  为  $m_s$  上的

正交向量,向量  $s$  为向量  $h$  在单元  $e_i$  上的投影,则由向量混合积的几何意义,判定从节点  $n_s$  与单元  $e_i$  相互接触的条件为:

$$(c_i \times c_{i+1}) \cdot h \leq 0 \quad (6)$$

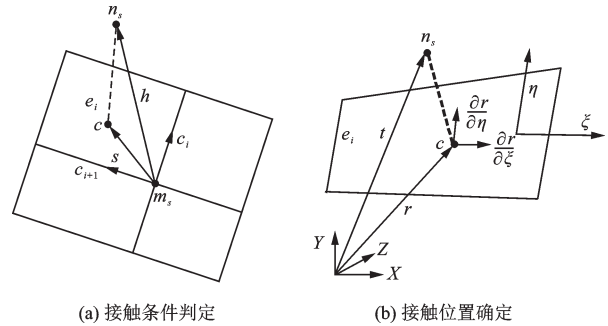


图1 主从节点及单元面接触

Fig.1 Master and slave node and element contact

然后确定从节点在单元  $e_i$  上接触点位置,如图1(b)所示,假设  $c$  点在平面单元  $e_i$  的局部坐标系坐标为  $(\eta_c, \xi_c)$ ,由向量空间关系得到<sup>[16]</sup>:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial r}{\partial \xi}(\xi_c, \eta_c) \cdot [t - r(\xi_c, \eta_c)] &= 0 \\ \frac{\partial r}{\partial \eta}(\xi_c, \eta_c) \cdot [t - r(\xi_c, \eta_c)] &= 0 \end{aligned} \right. \quad (7)$$

求解式(6)便得到接触点  $c$  的位置,进一步,若  $n_i$  为接触点侧主单元外法向单位向量,则式(8)可用于检查从节点是否穿透主单元:

$$l = n_i \cdot [t - r(\xi_c, \eta_c)] \quad (8)$$

若  $l < 0$ ,说明  $c$  点向单元内侧穿透,从节点穿透主面,这就说明裂缝接触面发生接触碰撞,从节点  $n_i$  和接触点  $c$  之间具有法向接触力。对于是否施加切向摩擦力,切向摩擦力如何考虑,还应分析接触面状态,根据界面本构模型<sup>[4]</sup>,先判别接触面摩擦状态,若接触面仅处于粘合状态,按普通情况考虑,若接触面处于滑动状态,则将切向位移分解成弹性部分和塑性部分计算。最后,需将法向与切向接触力叠加为接触力矩阵进行动力计算。

## 1.3 裂缝发热机制

求得裂缝表面的接触、碰撞和摩擦作用后,考虑理想情况,由热力学第一定律,振动摩擦耗能将全部转化为热能。

计算热能的关键是确定切向接触力,而不同接触状态的切向接触力算法亦不同,若接触面处于粘合状态,则接触面相互挤压无相对滑动,理论上也

无摩擦生热过程,切向接触力计算公式为<sup>[4]</sup>:

$$F_{\tau} = -\mu_s \cdot F_n \quad (9)$$

式中, $F_{\tau}$ 为切向接触力; $\mu_s$ 为静摩擦系数; $F_n$ 为法向接触力;负号表示切向接触力方向与从节点的运动趋势方向相反。

若接触面处于滑移状态,则接触面会产生摩擦生热,假设 $\Delta t$ 内从节点产生的滑移位移为 $\Delta e$ ,则摩擦生热的等效热流密度 $q$ 为<sup>[4]</sup>:

$$q = F_{\tau} \cdot v = F_{\tau} \cdot \frac{\Delta e}{\Delta t} \quad (10)$$

式中, $v$ 为滑移速度; $F_{\tau}$ 为滑移状态下的切向接触力,按下式计算:

$$F_{\tau} = \pm \mu_d \cdot F_n \quad (11)$$

式中, $\mu_d$ 为动摩擦系数。

计算出等效热流密度 $q$ 后,可假定其均分于两个接触面的节点上,则单个接触面节点等效热流密度为 $q/2$ ,该 $q/2$ 的热流密度将作为三维瞬态热传导方程的节点热源<sup>[4]</sup>。

#### 1.4 生热后热传导过程

对于超声激励下混凝土板裂缝发热问题,最关心裂缝周围的温度场分布,以得到裂缝的相关特征,进而对混凝土结构的健康状态作出判定。

假定混凝土板热力学性质是各向同性的,求解温度场理论方法是求解导热微分方程<sup>[12]</sup>:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{\phi}}{\rho c} \quad (12)$$

式中, $T$ 为温度; $a$ 为热扩散系数; $\rho$ 为构件密度; $c$ 为比热容; $\dot{\phi}$ 为内热源。

同求解波动传播规律一样,若给出传热的三类边界条件,求解温度场的问题也转为求解偏微分方程的定解问题。

热能传递有三种方式,即热传导、热对流和热辐射,而此问题中超声激励时间通常很短,一般仅有几十到几百毫秒,在如此短的时间内可以忽略裂缝区域发生的热量与空气对流和热辐射,定解条件简化为<sup>[13]</sup>:

$$T(x, y, z, t) = T_0, t = 0 \quad (13)$$

式中, $T_0$ 为环境温度。

## 2 裂缝发热有限元建模及参数

由于超声激励下细小裂缝表面的接触碰撞作

用难以采用解析法定量计算,因此采用有限元方法解决此类问题。本文采用ANSYS建立有V形裂缝的混凝土板模型,采用LS-DYNA970求解器计算,LS-DYNA是显式有限元计算软件,具有较强的接触非线性功能,计算热固耦合问题的优点是收敛性好、效率高。

### 2.1 建模过程

由于本文须考虑多因素下混凝土板响应,为避免重复建模,故采用ANSYS APDL参数化编程命令进行建模。图2所示为有V形裂缝的混凝土板有限元网格模型,模型采用六面体单元。模型的长×宽×高为150 mm×60 mm×62 mm,V形裂缝宽度为0.08 mm,深度为15 mm。X方向、Y方向和Z方向分别是指接触面法向、平行于纸面的接触面切向和垂直于纸面的接触面切向。需注意本文采用显式直接积分法计算,网格尺寸宜尽量小以减小误差<sup>[17]</sup>。本模型裂缝周围网格宽约0.4 mm,边界网格宽为4 mm,采用渐变网格,从裂缝到两侧边界,网格逐渐变得稀疏,总共有63 360个单元和70 256个节点。

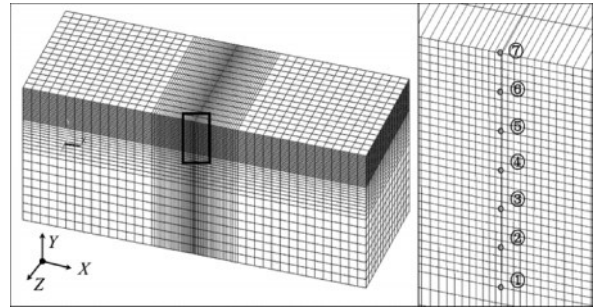


图2 V形裂缝混凝土板有限元网格模型

Fig.2 Finite element mesh model of V shaped cracked concrete slab

超声激励的施加方式为直接在激励位置的节点上施加随时间正弦变化的位移荷载,即:

$$D(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t) \quad (14)$$

式中, $D(t)$ 为节点位移荷载(mm); $A_0$ 为超声激励幅值(mm); $f_0$ 为超声激励频率(kHz); $t$ 为时间(ms)。

需注意式(14)中的单位是mm-kg-ms单位制。根据采样定理,离散信号采样频率须大于2倍 $f_0$ ,本模型激励荷载和结果输出的频率均大于10倍 $f_0$ ,此措施可保证数据不失真。图3是激励频率为14 kHz、激励幅值为0.03 mm时,激励位置的节点在振

动方向(Y方向)波形和频谱,其中激励时间为10 ms,冷却时间为10 ms。超声红外热像检测系统的激励幅值采用最大电功率的百分比表示,最大电功率对应的空载振幅为0.05 mm,故模型采用0.03 mm的激励幅值<sup>[18]</sup>。激励面积取20 mm×20 mm,对应为大网格区域内25个节点。在实际检测条件下,边界条件应模拟应力波传至无限域,但实验室条件边界由夹具固定,故简化为固定边界。

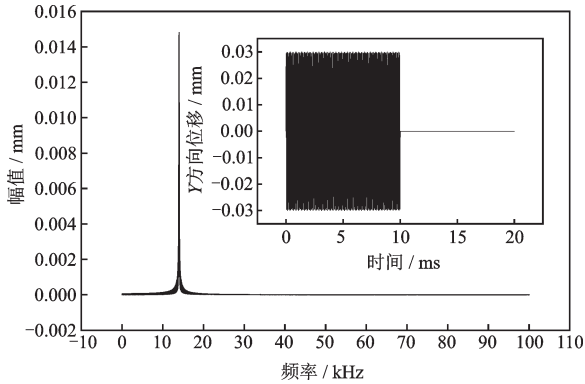


图3 激励位置节点振动波形和频谱

Fig.3 Vibration wave and spectrum of excitation position node

## 2.2 材料及参数选择

混凝土是一种复合多相材料,主要成分是骨料和水泥胶材料,其应力应变关系为非线性;此外,即使不考虑热对流和热辐射,在混凝土内的热传导也是各向异性的,但由于超声红外热像的理论研究还不成熟,相关推导多简化为各向同性弹性材料,并遵循小变形假定,故本文选用力学和热力学性能均为各向同性的热弹性材料,其中热传导系数和热容量均假定不随材料温度变化<sup>[12]</sup>。LS-DYNA通过\*Part关键字实现两种材料的耦合,模型中混凝土材料力学参数和热力学参数取值见表1<sup>[19]</sup>。

表1 混凝土材料力学参数和热力学参数

Table 1 Mechanical parameters and thermodynamic parameters of concrete materials

参数类型	参数取值
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3})$	$2.4 \times 10^{-6}$
弹性模量 $E/\text{GPa}$	28
泊松比 $\nu$	0.2
导热系数 $k/(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$	2.9
比热容 $c/(\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1})$	960
热膨胀系数 $\alpha_c/(\text{K}^{-1})$	$1.0 \times 10^{-5}$

## 2.3 接触与摩擦生热

超声激励下混凝土板发热问题的核心是接触、碰撞和摩擦作用,本问题是变形体与变形体的接触,故选用三维面面接触关键字,接触面即为V形裂缝表面,接触面的主面和从面可以任意选择,采用的算法为对称罚函数法,即主从面对称,不但考虑从节点是否穿透,同时考虑主节点是否穿透,故计算量为单面接触的两倍<sup>[15]</sup>。

计算接触面摩擦生热,须打开接触定义中的摩擦生热开关,考虑到摩擦生热算法的复杂性,LS-DYNA在计算摩擦生热时采用如下公式<sup>[20]</sup>:

$$q(t) = [\mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-DC|v_{rel}|}] F_n(t) v_\tau(t) \quad (15)$$

式中,DC为指数衰减系数; $v_{rel}$ 为接触表面相对速度。

并简化计算,取动静摩擦系数相等为0.6<sup>[21]</sup>。为避免摩擦力过大,可设置黏性摩擦系数VC来限定最大摩擦力,本文取 $VC=1.027$ <sup>[20]</sup>。

## 2.4 混凝土板模态分析

混凝土板的振动问题需要考虑其自振特性,通过模态分析,可以求得混凝土板的自振频率和振型,进而求得可能发生共振的频率区间。对图2所示模型进行模态分析,由于阻尼对模态分析影响小,故进行无阻尼模态分析,两侧固定边界保留,以防止刚体模态结果。提取模态结果见表2,对于本计算模型,主要关心低阶模态(10~30 kHz)。

表2 混凝土板模态分析结果

Table 2 Partial modal results of concrete slab

单位:kHz

阶数	频率	阶数	频率	阶数	频率
5	10.4	14	22.2	23	25.7
6	10.7	15	23.2	24	25.9
7	12.1	16	23.6	25	26.1
8	14.9	17	23.6	26	26.7
9	16.1	18	23.8	27	27.5
10	19.2	19	24.4	28	27.6
11	19.5	20	24.7	29	27.9
12	19.8	21	24.8	30	28.4
13	20.6	22	25.1	—	—

## 2.5 阻 尼

多维裂缝瞬态动力学方程式(5)的质量矩阵M

和刚度矩阵  $K$  都可以根据混凝土相关参数求解,而阻尼矩阵  $C$  则难以确定,对于线性阻尼系统,工程常采用 Rayleigh 阻尼, Rayleigh 阻尼实际上是构造与振型正交的阻尼矩阵,采用结构的两个低阶阻尼比来近似反推阻尼矩阵。然而, LS-DYNA 采用显式积分中心差分法,未知变量系数矩阵不包含刚度矩阵  $K$ ,仍采用 Rayleigh 阻尼,则显式算法失去优势,因此常采用比例阻尼<sup>[24]</sup>:

$$C_m = \alpha M \quad (16)$$

式中,  $\alpha$  为质量阻尼系数,其计算公式如下:

$$\alpha = \frac{2\omega_2\omega_1(\xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (17)$$

式中,  $\xi_i$  为  $i$  阶振型的阻尼比;  $\omega_i$  为  $i$  阶振型的自振圆频率。

本文取混凝土板各个振型的阻尼比相等且为 0.05,可以认为该阻尼比对应结构的低阶振型。取第 1 阶和第 2 阶的自振圆频率值代入(17)式,可算得  $\alpha$  的值<sup>[22]</sup>。刚度阻尼可以抑制高频振动和数值振荡,直接忽略可能会有一定影响,但却保证了显式

算法的优越性。

### 3 裂缝发热有限元计算结果及分析

#### 3.1 不同时刻裂缝区域温度分布

此分析取激励频率为 15 kHz、激励幅值为 0.03 mm 时的数值模拟结果。提取模型  $Z$  方向的前边界面 ( $Z=0$ ) 在不同时刻的裂缝区域温度分布(图 4),以直观认识超声激励下混凝土板裂缝的温度分布。根据图 4 可知,在前 10 ms 的激励作用下,裂缝区域的最高温度随着时间的增加而增加,当  $t=10$  ms 时,激励停止,裂缝区域的最高温度为 31.3 °C,  $t > 10$  ms 时,裂缝区域温度降低。根据图 4(a)可知,  $t=0.5$  ms 时,激励作用在混凝土板件的时间较短,温度主要分布在宽度较窄的裂缝根部,温度上升稍慢,当  $t \geq 2.5$  ms,裂缝区域温度分布趋于稳定,中上部温度较高,且混凝土材料主要升温区域为裂缝两侧区域。

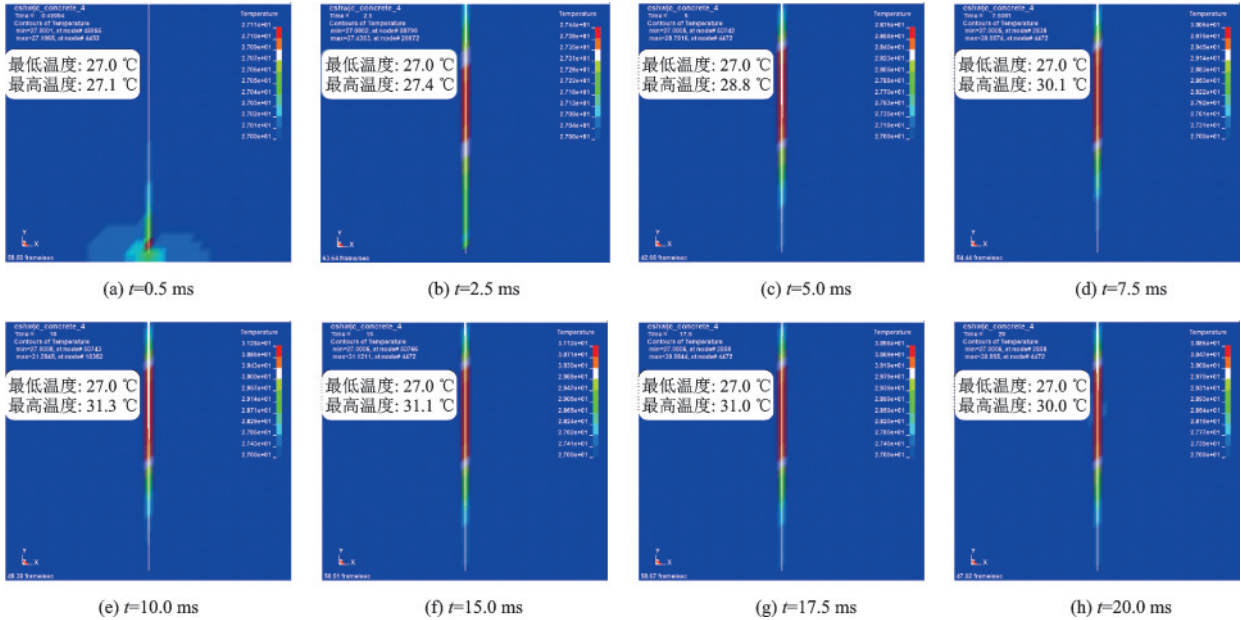


图 4 前边界面 ( $Z=0$ ) 裂缝区域温度分布

Fig.4 Temperature contour in the fracture region of the front interface

#### 3.2 纵向不同位置裂缝面温度分布规律

温度分布不能准确确定裂缝区域的温度变化规律,为比较裂缝平面不同位置处温度分布差异,取模型  $Z$  方向的前边界面 ( $Z=0$ ) 和  $Z$  方向的模型中面 ( $Z=30$ ) 的节点温度数据作比较,节点按照从裂

缝根部到裂缝顶部均匀分布,依次取 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 号节点,提取节点编号如图 2 所示。节点温度随时间变化的曲线如图 5、6 所示。

根据两不同平面节点温度数据可以看出,在总体趋势上,同图 4 云图结果,裂缝节点温度随着激励时间的增加而升高;激励在 10 ms 停止后,前边界面

( $Z=0$ ) 裂缝节点温度下降, 模型中面( $Z=30$ ) 节点温度先升高再下降; 在模型边界面上(图5)的最高温度为  $31.3^{\circ}\text{C}$ , 最高点温度节点为5号节点; 而模型中面(图6)的最高温度为  $27.6^{\circ}\text{C}$ , 最高温度节点为2号节点。

分析以上结果可知, 激励作用下裂缝接触作用持续增强, 相应的热量积累反映在裂缝节点温度上升; 模型中面( $Z=30$ ) 节点激励停止后温度仍继续上升的原因需进一步分析; 在裂缝平面上, 纵向不同位置截面温度差异较大, 实际检测条件下没有混凝土边界, 那么单从温度数据上说, 模型中面节点温度变化能达到  $0.6^{\circ}\text{C}$ , 这远大于一般红外热像仪的热灵敏度( $0.02\sim 0.05^{\circ}\text{C}$ ), 即该方法理论上可以实现混凝土裂缝检测。但裂缝表面的温度变化小, 探测裂纹深度方向内部的发热, 可能对热红外仪镜头有特别要求。边界条件温升范围远大于中截面, 可能的原因是边界处应力波的反射与折射, 同时边界节点的活动能力强于中面节点, 因此节点在激励作用下运动剧烈, 相应的摩擦生热也较大。

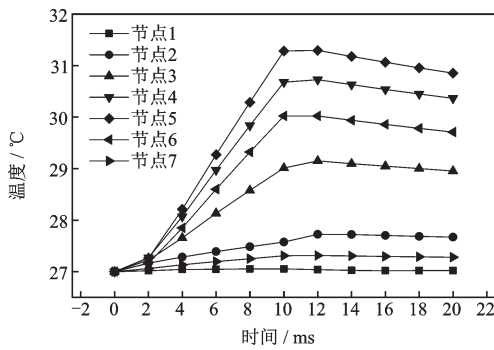


图5 前边界面( $Z=0$ )节点温度随时间的变化

Fig.5 Time temperature curves at the front interface node

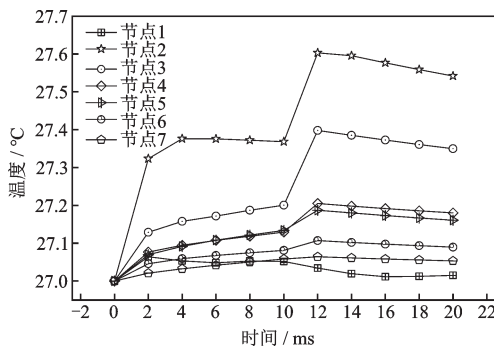


图6 模型中面( $Z=30$ )节点温度随时间的变化

Fig.6 Time temperature curves on the middle surface of the model

### 3.3 裂缝不同深度温度分布规律

从裂缝根部到裂缝顶部, 不同部位节点的温度

上升情况也不相同, 据图6可知, 中截面下侧2、3节点温度上升明显, 根据1.3节的裂缝发热机制, 节点温度上升与节点接触力和热流密度相关, 故取图6的2节点, 提取接触力和热流密度, 均取绝对值后的数据作图, 如图7、8所示。

由图7可知, 接触力分解后主要成分是X方向接触力和Y方向接触力, 激励荷载刚刚施加上的2ms内, 混凝土板振动并不稳定, 2~10ms内, 激励稳定, 接触力波动变化小, 当激励停止后, X方向接触力逐渐变小, Y方向的接触力却增大, 推测其产生原因可能是激励停止, 混凝土板振动并未停止, 在趋向于振动停止的过程中, 混凝土板的衰减振动对于Y方向节点有利, 因此, 模型中面( $Z=30$ ) 节点激励停止后温度仍继续上升的原因之一可能是Y方向节点接触力在激励停止后的突变。

由图8可知, 节点主要热流密度方向为X方向, 故节点振动形态主要为X方向节点相互接触与碰撞, 同时, 热流密度显著升高的时间段与接触力不稳定的区段相对应, 即在激励初期和激励停止后的时间段内热流密度变化最大, 温度升高也最快。

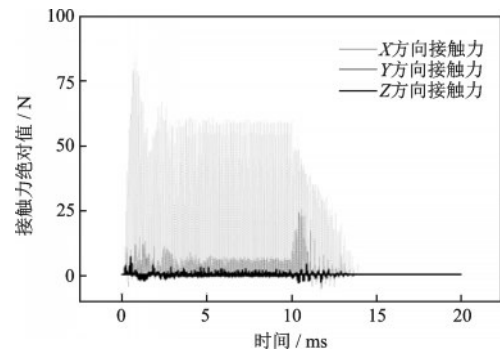


图7 节点2接触力

Fig.7 Contact force of node 2

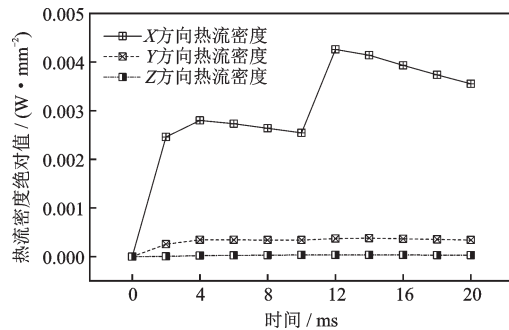


图8 节点2热流密度

Fig.8 The heat flux of node 2

由于激励施加方向为Y向,较为容易发生的振动形态是混凝土板在Y方向的变形,相应的摩擦生热可能来源于节点在Y方向的滑移作用,同时,节点主要的接触碰撞方向又是X方向,摩擦生热也可能来源于X方向的接触碰撞作用。为进一步分析裂缝表面节点的振动情况,提取节点2的X、Y方向位移,同时提取节点振动频谱信息。

如图9和图10所示,节点2的X方向振动幅值约为0.02 mm,而裂缝底部的宽度远小于0.02 mm,说明节点在X方向有强烈的接触碰撞;节点2的Y方向振动幅值约为0.04 mm,即使激励停止后,裂缝质点的振动幅值也以抛物线规律下降,节点Y方向仍发生较强烈的滑移摩擦作用。这说明本例热力学各向同性材料的摩擦生热是由Y方向的滑移摩擦和X方向的接触碰撞共同决定,摩擦生热不追随节点单一方向振动规律而变化。

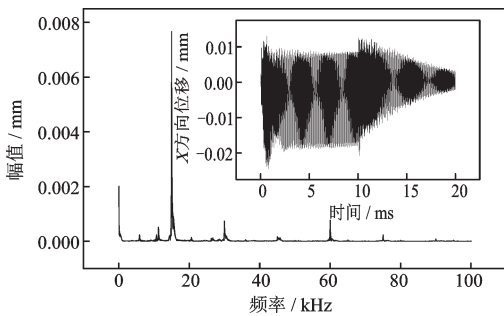


图9 节点2的X方向位移振动波形和频谱  
Fig.9 X directional displacement vibration wave and frequency spectrum of node 2

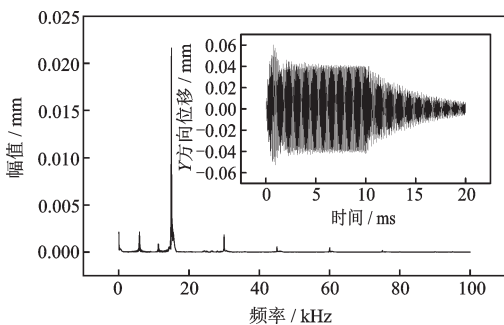


图10 节点2的Y方向位移振动波形和频谱  
Fig.10 Y directional displacement vibration wave and frequency spectrum of node 2

现将节点温升较低的1号节点,和温升一般的4号节点以及节点温升最高的2号节点振动接触力合力提取成图,如图11所示,节点1为裂缝根部,接触作用不强烈,最大接触力仅为0.2 N,节点4比节点2

的接触合力稍小,这与三个节点的温度分布差异相似,因此,节点温度规律与节点接触合力大小有关,且接触合力越大,温度升高也越大。

此外,相比张超省等<sup>[7]</sup>的金属材料超声振动有限元分析,混凝土材料的比热容比金属大,热传导系数比金属小,相应的差异在于混凝土温度分布范围扩散慢,温度显著变化范围都在裂缝周围,而相应的温度升高或降低的速度也比金属慢。

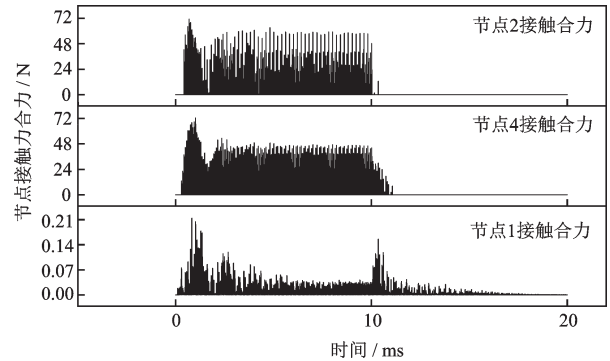


图11 节点1、2、4接触合力  
Fig.11 Contact joint force of nodes 1, 2 and 4

### 3.4 不同激励频率混凝土板温度响应

为研究不同激励频率下混凝土板温度响应,分别取激励频率为15、18、20、22、24、26、28、30 kHz进行计算。然后取裂缝平面的所有节点,绘出其温度随时间的变化曲线,再对其求平均温度曲线(图12),可知在激励频率低于26 kHz时,除了15 kHz下平面具有较为明显的温度变化,其余激励频率下均无明显温度变化。

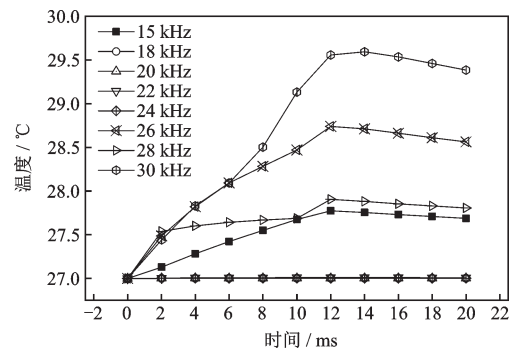


图12 前边界界面节点温度随时间的变化  
Fig.12 Time temperature curves at the front interface node

根据表2,发现该混凝土板件在第8阶模态下自振频率为14.9 kHz,这与激励频率相近,同时根据模态分析结果,混凝土板第8阶的振型为XY面的二

阶弯曲变形,裂缝两侧变形挠曲线关于中线平面对称,此变形与超声激励产生的变形趋势相近,故混凝土板在激励频率为 15 kHz 时,混凝土板件发生共振,这便加强了裂缝表面的接触、碰撞和摩擦作用,最终加强混凝土板的温升效应。

同理,根据表 2 的模态分析结果,当激励频率为 26、28 kHz 时,对应 24 和 25 阶混凝土板自振频率接近 26 kHz,29 阶混凝土板自振频率接近 28 kHz,故亦有共振引起的温升加强作用,同时,随着激励频率加大,振动能量加强,温升效应也有增强。

## 4 结 论

(1) 裂缝表面节点的温度变化大于热像仪热灵敏度,超声红外热像检测运用于混凝土裂缝识别理论可行。裂缝表面节点温度随时间增加而升高,激励停止后一段时间内,温度还会继续上升。

(2) 裂缝面上沿深度方向不同节点温升效应不同,这与节点接触作用有关,裂缝中下部节点接触作用强烈,热流密度大,温升效应明显;同一节点接触作用与发热效应具有方向性,X 方向接触力大,热流密度高,则 X 方向为主要热能传递方向;在整个激励过程中,节点的 X 方向接触碰撞作用强烈,Y 方向摩擦滑移作用强烈,节点摩擦生热由以上两项确定,即节点摩擦生热不追随单一方向的振动和接触规律。

(3) 不同激励频率下混凝土板发热效应不相同,激励频率近于混凝土板自振频率时,板件发生共振,发热效果好,利于实验观测。

## 参考文献:

[1] 张淑仪. 超声红外热像技术及其在无损伤评价中的应用[J]. 应用声学, 2004, 23(4): 1-6.  
Zhang Sh Y. Ultrasonic infrared thermal imaging technology and its application in nondestructive evaluation [J]. Applied Acoustics, 2004, 23(4): 1-6. (in Chinese)

[2] Favro L D, Han X, Ouyang Z, et al. Thomas infrared imaging of defects heated by a sonic pulse[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(6): 2 417-2 421.

[3] Main A, Han X, Islam S. Golam Newaz Fatigue damage detection in graphite/epoxy composites using sonic infrared imaging technique[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64: 657-666.

[4] 米小兵,张淑仪. 超声波引起固体微裂纹局部发热的理论计算[J]. 自然科学进展, 2004, 14(6): 628-634.  
Mi X B, Zhang Sh Y. Theoretical calculation of local heating of solid microcrack caused by ultrasonic wave [J]. Natural Science Progress, 2004, 14(6): 628-634. (in Chinese)

[5] 洪毅,缪鹏程,张仲宁,等. 超声红外热像技术及其在无损伤检测中的应用[J]. 南京大学学报, 2003, 39(4): 547-552.  
Hong Y, Miao P Ch, Zhang Zh N, et al. Ultrasonic infrared thermal imaging technology and its application in nondestructive testing [J]. Journal of Nanjing University, 2003, 39(4): 547-552. (in Chinese)

[6] 郑凯,张淑仪,蔡士杰. 超声激发下缺陷红外信号的识别方法研究[J]. 无损检测, 2008, 30(10): 757-759.  
Zheng K, Zhang Sh Y, Cai Sh J. Study on recognition method of ultrasonic excitation signal [J]. Nondestructive Testing, 2008, 30(10): 757-759. (in Chinese)

[7] 张超省,冯辅周,闵庆旭,等. 超声红外热像技术中预紧力对金属平板振动特性的影响[J]. 机械工程学报, 2016, 52(5): 154-161.  
Zhang Ch Sh, Feng F Zh, Min Q X, et al. The effect of pretension on the vibration of metal plate in ultrasonic infrared thermal imaging technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(5): 154-161. (in Chinese)

[8] 冯辅周,张超省,江鹏程,等. 超声红外热像技术中缺陷的自动识别[J]. 激光与红外, 2012, 42(10): 1 149-1 153.  
Feng F Zh, Zhang Ch Sh, Jiang P Ch, et al. Automatic identification of defects in ultrasonic infrared thermography [J]. Laser and Infrared, 2012, 42(10): 1 149-1 153. (in Chinese)

[9] 田干,杨正伟,朱杰堂,等. 超声红外热波检测中的振动特性及声混沌分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 1-6.  
Tian G, Yang Zh W, Zhu J T, et al. Vibration characteristics and acoustic chaos analysis of ultrasonic infrared thermal wave test [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(3): 1-6. (in Chinese)

[10] 张小川,李艳红,丁友福,等. 玻璃钢试件红外热波检测能力研究[J]. 无损检测, 2006, 28(11): 587-589.  
Zhang X Ch, Li Y H, Ding Y F, et al. Research on infrared thermal wave detection capability of FRP specimens [J]. Nondestructive Testing, 2006, 28(11): 587-589. (in Chinese)

[11] 刘波,张存林. 基于热波无损检测的缺陷深度检测和边缘识别[J]. 首都师范大学学报, 2006, 27(5): 22-25.

- Liu B, Zhang C L. Defect depth detection and edge recognition based on thermal wave nondestructive detection [J]. Journal of Capital Normal University, 2006, 27 (5): 22-25. (in Chinese)
- [12] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:33-195.  
Yang Sh M, Tao W Q. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:33-195. (in Chinese)
- [13] 刘 慧. 超声红外锁相热像无损检测技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.  
Liu H. Research on ultrasonic infrared phase locked thermal image nondestructive testing technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [14] J. L. 罗斯. 固体中的超声波[M]. 何存富, 吴 斌, 等, 译. 北京:科学出版社, 2004:19-106.  
Ross J L. Ultrasound in solid[M]. He C F, Wu B, et al. Beijing: Science Press, 2004:19-106. (in Chinese)
- [15] 彼得·艾伯哈特. 现代接触动力学[M]. 胡 斌, 译. 南京:东南大学出版社, 2003:77-134.  
Eberhard P. Modern contact dynamics[M]. Hu B. Nanjing: Southeast University Press, 2003: 77-134. (in Chinese)
- [16] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与计算实例[M]. 北京:科学出版社, 2005:50-56.  
Bai J Z. LS-DYNA3D theoretical basis and calculation examples[M]. Beijing: Science Press, 2005:50-56. (in Chinese)
- [17] 陆新征,叶列平,缪志伟,等. 建筑抗震弹塑性分析[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009:127-129.  
Lu X Zh, Ye L P, Miao Zh W, et al. Seismic elasto-plastic analysis of buildings [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2009:127-129. (in Chinese)
- [18] 张超省,宋爱斌,冯辅周,等. 超声红外热像检测条件的优化方法研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2):1-8.  
Zhang Ch Sh, Song A B, Feng F Zh, et al. Research on optimization method of test conditions in sonic infrared imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45 (2): 1-8. (in Chinese)
- [19] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.  
Specification for design of concrete structure: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [20] Livermore software technology corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual (Version 971)-Volumes I and II [EB/OL]. (2007) [2009-08-17]. <http://www.lstc.com>.
- [21] 陈富强,田 唯,刘占国,等. 匹配浇筑混凝土接触面摩擦系数试验研究[J]. 中国港湾建设, 2014(12):34-38.  
Chen F Q, Tian W, Liu Zh G, et al. Experimental study on friction coefficient of matching casting concrete contact surface[J]. Chinese Harbor Construction, 2014 (12):34-38. (in Chinese)
- [22] 谢靖中. 结构地震反应分析中的阻尼问题探讨[J]. 建筑结构, 2015, 45(23):53-58.  
Xie J Zh. Discussion on damping in structural seismic response analysis[J]. Building Structure, 2015, 45 (23): 53-58. (in Chinese)

(本文责编:池营营)