

# 应用量纲分析与热图像的板缺陷深度检测

李常有<sup>1</sup>, 杨 勇<sup>1</sup>, 郭 耸<sup>2</sup>, 张义民<sup>1</sup>  
(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳建筑大学 信息与控制工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘 要:** 利用量纲分析与板的红外热图像相结合, 提出板缺陷深度的定量检测方法. 建立了缺陷板的热分析有限元模型, 并由已知实验数据对模型进行验证. 在此基础上, 分析缺陷与完好处峰值温差时间的影响因素, 采用量纲分析推导影响因素与峰值温差时间的对应关系, 利用热分析有限元模型仿真数据进行拟合, 获得板缺陷深度和半径与峰值温差时间之间的函数关系式, 相比于其他定义温差法, 提出的方法以峰值温差时间为缺陷特征, 更具全面性. 结果表明, 提出的方法能较为准确地检测板的缺陷深度.

**关 键 词:** 量纲分析法; 热图像; 峰值温差; 参数关系; 缺陷检测

中图分类号: TH 17      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2017)05-0680-05

## Detection of Depth Plate Defect Based on Dimensional Analysis and Thermal Image

LI Chang-you<sup>1</sup>, YANG Yong<sup>1</sup>, GUO Song<sup>2</sup>, ZHANG Yi-min<sup>1</sup>  
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;  
2. School of Information & Control Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China.  
Corresponding author: LI Chang-you, E-mail: chyli@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** A method combining dimensional analysis with thermal image is proposed to quantitatively detect the defect depth of plates. The thermal analysis model of defective plates is built with the finite element method and verified by the known experimental data. Then, the influence factors of the time of maximum temperature difference between the defective and intact parts are analyzed and the corresponding relationship between the time and the factors is derived by means of dimensional analysis. The corresponding relationship is formulated by fitting the simulation data of the thermal analysis model. Compared with the other defined temperature difference methods, the proposed method is more comprehensive, which could detect the defect depth of plates more accurately, as the result shows.

**Key words:** dimensional analytical method; thermal image; maximal temperature difference; factor relation; defect detection

利用红外热图像<sup>[1]</sup>进行缺陷检测是20世纪60年代开始迅速发展起来的一种无损检测技术, 具有非接触、快速、直观安全等优势, 是对传统检测手段的一种补充. 然而大多数技术为定性方法, 定量分析方法较少涉及. 目前, 基于红外热图像的缺陷深度的定量检测方法主要借助于特征时间, 主要有温差法、对数峰值二阶导数法<sup>[2]</sup>以及时域曲线最小二乘拟合法<sup>[3]</sup>等. 温差法检测快速、方便, 其以定义各种温差表达式为基础, 使用降温曲线特征时间点为计算手段, 从而形成了峰值温差时间法<sup>[2]</sup>、峰值斜率时间法<sup>[2]</sup>、绝对峰值斜率时间法<sup>[2]</sup>、标准温度对照法<sup>[4]</sup>等. 峰值温差时间法计算较为简单, 研究也最为广泛, 但已知方法大多只考虑时间与深度的函数关系, 而忽略其他参数对数据结果的影响. 由此, 本文提出基于量纲分析与热图像的板缺陷定量检测方法, 选取缺陷中心

表面及远离缺陷中心表面两点的温度进行讨论,在综合考虑了各个影响参数后重新分析峰值温差时间与板缺陷深度之间的关系,构建其近似函数关系,从而实现缺陷深度的定量准确检测.结果表明该方法具有较高的缺陷检测精度.

# 1 板缺陷深度与峰值温差时间的耦合关系分析

## 1.1 热图像分析模型的建立与验证

本文以 316L 奥氏体钢为研究对象,采用有限元方法对其热图像进行模拟研究.建模中采用圆盘结构的样板,不仅可以很好地模拟三维传热过程,而且可以节约计算时间,分析模型如图 1 所示.研究对象相关参数:比热容、热导率、换热系数(自然对流)、密度分别为  $502\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,  $15\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,  $15\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,  $7\,750\text{ kg}/\text{m}^3$ .

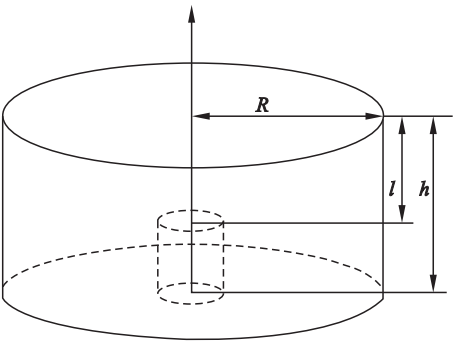


图 1 分析模型简图  
Fig. 1 Sketch map of the analysis model

用 ANSYS 软件对模型进行仿真分析,其仿真流程如下:

1) 建模及网格划分.在建模时选用的单元为 mesh200 和 solid70,同时将整体分为两个部分进行网格划分,即内部缺陷部分和外部完整部分,并对缺陷部分网格进行细化,加大求解精度,得到的网格模型如图 2 所示.

2) 模型加载及求解.利用瞬时求解,第一个载荷步加载  $0.000\,1\text{ s}$  的温度载荷,模拟模型的初始温度分布,之后将载荷去除;第二个载荷步在模型的上表面加载  $0.003\text{ s}$  的热流密度,模拟脉冲热输入,之后将载荷删除;第三个载荷步在模型的上下表面加载自然对流载荷并对模型进行求解,得到模型某时刻的温度云图如图 3 所示,且分析在选定时间内模型的温度变化,得到在不同的缺陷下样板缺陷表面中心及远离缺陷的完整表面处的温度变化并记录相关数据.

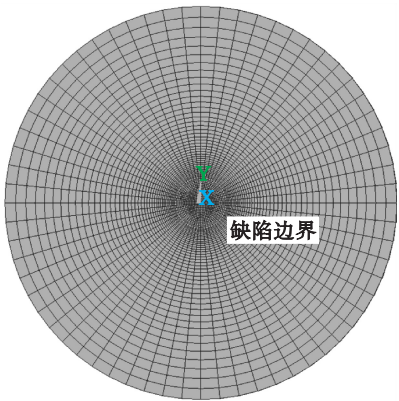


图 2 缺陷板网格模型  
Fig. 2 Mesh of the defect plate

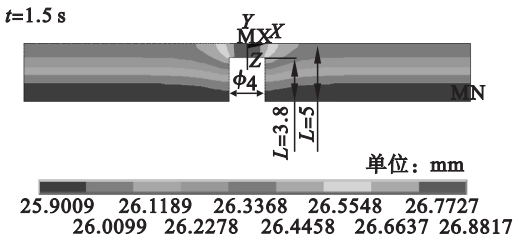


图 3 模型温度云图  
Fig. 3 Temperature cloud map of the model

为了对所建模型的准确性进行评估,本文借助文献[4]对应的一组相同条件下的实验数据对仿真模型进行验证.文献中实验模型如图 4 所示,包括两台对称放置的闪光灯、一台红外摄像机、带缺陷的样板以及相应的控制及分析系统.其中对称的闪光灯负责提供设定的脉冲热输入,红外热像仪对样板的表面温度进行显示记录.最后由文献中的数据处理方法得到仿真和实验的标准温度对照时间<sup>[4]</sup>(SCT)–深度( $l$ )数据如表 1 所示.

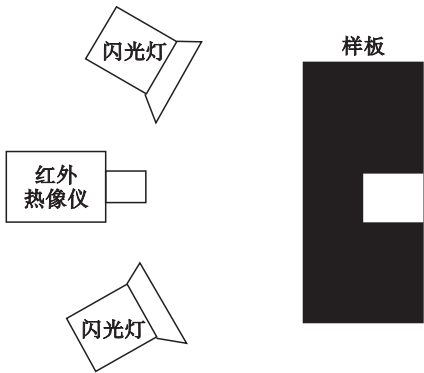


图 4 脉冲红外测试示意图  
Fig. 4 Sketch map of the pulsed thermographic principle

表 1 模型仿真数据与实验数据对照表 Table 1 Simulation data and experimental data					
深度 $l/\text{mm}$	0.3	0.5	0.7	0.9	1.2
仿真 SCT/s	0.24	0.29	0.34	0.41	0.57
实验 SCT/s	0.25	0.32	0.36	0.43	0.59

从表 1 可知, 仿真得到的结果与实验得到的结果非常接近, 从而认为模型的边界加载和简化是合理的, 可以用该模型来对相关问题进行分析.

1.2 耦合关系分析

由验证模型得到在不同条件下样板缺陷表面中心及远离缺陷完整表面处的温度记录, 并对每组的两处数据作差处理后得到相应曲线图(图 5 ~ 图 8). 由图 5 可知, 在缺陷不变的情况下, 改变对样板的热输入, 可以加大温差但不影响峰值温差时间, 鉴于此, 在红外故障检测的过程中可以通过控制热输入来促进缺陷显示. 由图 6 可知, 在其他条件不变的情况下, 单独考虑缺陷半径的影响, 得知峰值温差时间随着半径的增大而增大. 由图 7 可知, 在保持模型缺陷深度 2 mm 及其他参数不变, 而对样板板厚进行变化时发现: 当缺陷深度与样板厚度的比值大于 0.5 时峰值温差时间随着板厚的增加而增加, 当缺陷深度与样板厚度的比值小于 0.5 时, 板厚对峰值时间的影响解除, 文献[6]对这个结论也做了相关的理论推导.

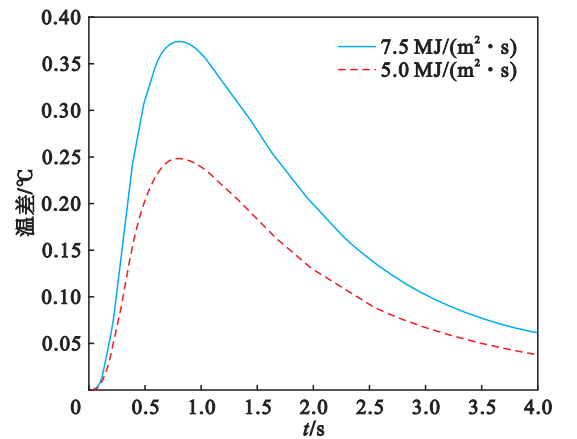


图 5 不同热输入下的温差 - 时间曲线  
Fig. 5 Temperature difference vs. time curve

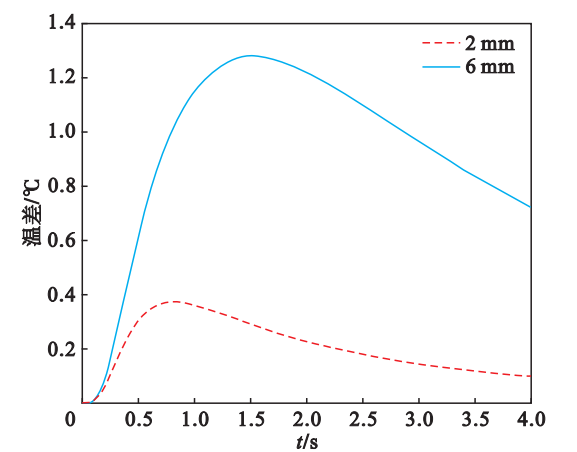


图 6 不同缺陷半径下的温差 - 时间曲线  
Fig. 6 Temperature difference vs. time curve under different heat input under different radius

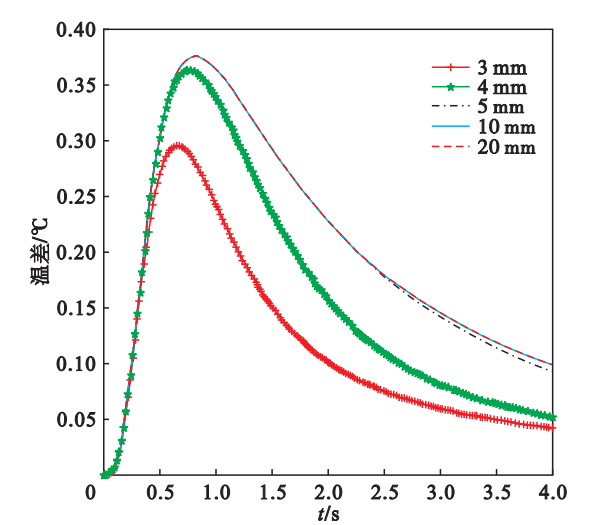


图 7 不同板厚情况下的温差 - 时间曲线  
Fig. 7 Temperature difference vs. time curve under different thickness

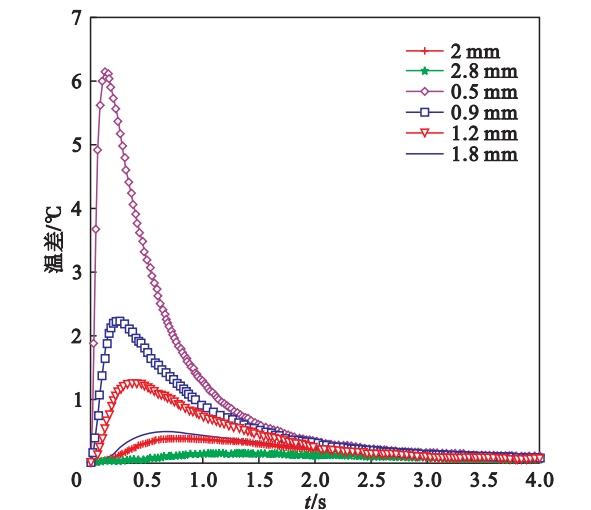


图 8 不同深度下样板的温差 - 时间曲线组图  
Fig. 8 Temperature difference vs. time curve under different thickness under different depth

由图 8 可知, 在只改变样板缺陷深度的情况下, 缺陷深度越小, 温差的峰值越大, 峰值温差对应的时间越短. 表 2 为在保持缺陷半径为 2 mm, 板厚为 10 mm 不变的情况下单独变化缺陷深度后得到的深度 ( $l$ ) - 峰值温差时间 ( $t$ ) 的对应值.

表 2 模型深度 ( $l$ ) - 峰值温差时间 ( $t$ ) 表 Table 2 Table of depth vs. maximal temperature difference					
$l/\text{mm}$	$t/\text{s}$	$l/\text{mm}$	$t/\text{s}$	$l/\text{mm}$	$t/\text{s}$
0.5	0.16	1.5	0.55	2.8	1.42
0.7	0.22	1.8	0.71	3.2	1.77
0.9	0.27	2.0	0.82	3.8	2.36
1.2	0.39	2.3	1.06	4	2.54

## 2 基于量纲分析与热图像的板缺陷深度定量关系推导

由模型结果分析处理可知,热输入对峰值温差时间没有影响,对此不予考虑. 因此,在考虑到峰值温差时间与深度之间的关系时,涉及的物理量为比热容  $c$ , 密度  $\rho$ , 峰值温差时间  $t$ , 导热系数  $k$ , 缺陷深度  $l$ , 缺陷半径  $r$ , 样本厚度  $h$ , 且其物理量纲分别为  $L^2T^{-2}B^{-1}$ ,  $ML^{-3}$ ,  $T$ ,  $MLT^{-3}B^{-1}$ ,  $L$ ,  $L$ . 基本量纲分别为长度  $L$ , 时间  $T$ , 温度  $B$ , 质量  $M$ .

这里考虑缺陷深度与板厚的比值小于 0.5 时的情况,即不考虑板厚的影响,得到各个参数间的本构方程为

$$\Theta(\rho,c,k,l,r,t)=0. \tag{1}$$

根据量纲分析法的 Pi 定理<sup>[11]</sup>得到量纲矩阵  $A^T$ ,即

$c$

$\rho$

$t$

$k$

$l$

$r$

$$A^T = \begin{bmatrix} 2 & -3 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 1 & -3 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} L \\ M \\ T \\ B \end{matrix}$$

解齐次线性方程组  $A^T\beta=0$  得到基本解向量:

$$\begin{cases} \mathbf{y}_1 = (0.5, 0.5, -0.5, -0.5, 1, 0), \\ \mathbf{y}_2 = (0.5, 0.5, -0.5, -0.5, 0, 1). \end{cases}$$

则得到两个无量纲量,记为  $\pi_1$  和  $\pi_2$ ,即

$$\pi_1 = c^{0.5}\rho^{0.5}t^{-0.5}k^{-0.5}l, \tag{2}$$

$$\pi_2 = c^{0.5}\rho^{0.5}t^{-0.5}k^{-0.5}r. \tag{3}$$

则式(1)等价于

$$\Phi(\pi_1,\pi_2)=0. \tag{4}$$

即存在某一函数  $G_1$  得到

$$l = \frac{\sqrt{kt}}{\sqrt{\rho c}}G_1\left(\frac{\sqrt{\rho c}r}{\sqrt{tk}}\right), \tag{5}$$

对于缺陷深度与板厚的比值大于 0.5 的情况下,则需要对得到的公式进行修正处理,并由相似的方法得到相关的函数关系式为

$$l_1 = \frac{\sqrt{kt}}{\sqrt{\rho c}}G_2(\pi_2,\pi_3). \tag{6}$$

其中,无量纲式  $\pi_3$  为包含板厚的关系式  $\frac{\sqrt{p}ch}{\sqrt{tk}}$ .

本文对此式不作进一步讨论.

为了进一步对式(5)进行处理,首先,运用表 2 中的数据对公式进行拟合,得到在比值小于 0.5 时的相关拟合函数图像如图 9 所示. 其次,将  $p$ ,  $c$ ,  $k$ ,  $r$  的值带入推导公式并将其与拟合函数进行

对照,得到  $l$  关于各参数的近似关系式为

$$l = a \frac{\sqrt{kt}}{\sqrt{\rho c}}(\pi_2)^{-0.3}. \tag{7}$$

其中: $a$  为常数 1.1; $\pi_2$  是无量纲式,为  $\frac{\sqrt{\rho c}r}{\sqrt{tk}}$ .

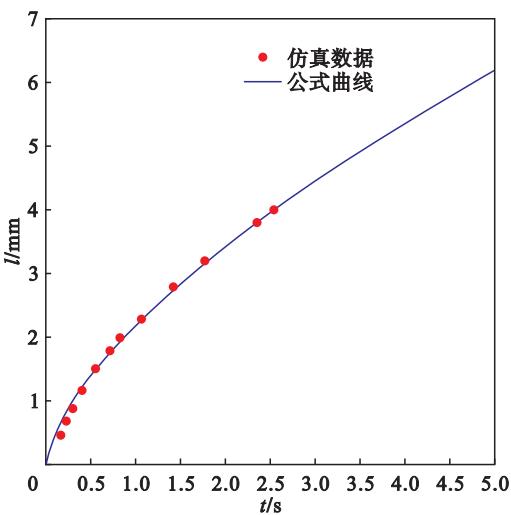


图 9 仿真数据与公式拟合函数的对比

Fig. 9 Comparison of simulation data and fitting function

## 3 数值分析

为了对式(7)进行相关验证,这里采取选择不同的板缺陷将仿真得到的峰值温差时间运用到公式中计算出深度值,之后与真实深度进行对比的方法.

在进行模型仿真时选择与上文相同加载条件和边界条件,选择样板厚度为 14 mm. 首先,选定缺陷的半径为 2 mm,改变缺陷深度分别为 4.5, 5.0, 5.5, 6 mm 时记录相关数据,再次,选定缺陷深度为 2 mm,改变缺陷半径分别为 2, 4, 6 mm 时记录相关数据,最后,计算深度及其误差如表 3 所示. 由结果可知,从推导公式计算的深度误差在 10% 以内,具有比较准确的预测性.

表 3 计算深度与实际深度对照表

Table 3 Comparison table of calculation depth and actual depth

实际深度/半径/mm	计算深度/mm	误差/%
4.5/2	4.59	2.2
5.0/2	5.38	7.9
5.5/2	5.87	7.2
6.0/2	6.31	5.1
2/2	1.91	4.9
2/4	2.09	5.0
2/6	2.19	8.9