

基于持续加热的热波无损探伤参数优化

张 炜¹, 刘 涛¹, 杨正伟¹, 张瑞民²

(1. 第二炮兵工程学院, 西安 710025; 2. 第二炮兵青州士官学校, 青州 262500)

摘 要: 确定的加热时间和加热强度一直是持续加热方式的热波无损检测技术中的关键问题, 利用仿真的方法, 对带有缺陷的材料的热传导过程进行模拟。通过观察分析和计算结果, 认为在假设条件下, 加热对象任意点上升的温度与加热强度的比值为一常数; 在持续加热一段时间后(该时间与加热强度无关)加热对象内任意一点温度上升的速度为相等的常数。这对红外热波无损探伤的定量检测和评估、加热强度的确定、加热参数的优化等奠定了理论基础。

关键词: 热波检测; 数值仿真; 傅立叶定律; 常数

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2009)11-0890-04

Parameter Optimization in Thermal Wave NDT with Uniform Heating

ZHANG Wei¹, LIU Tao¹, YANG Zheng-Wei¹, ZHANG Rui-Min²

(1. The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China;

2. The Second Artillery Qingzhou Petty Officer College, Qingzhou 262500, China)

Abstract: The determining of time and intensity of heating is on important problem of thermal wave NDT with uniform heating. In this paper, numerical computing was used to simulate the process of heat conduction in material with defect and to study on changing orderliness of temporal spatial thermal distribution. Observing and analyzing the result, conclusions are as follows: in given conduction, the rate of changed tmperature of any part of heated object and heat flux is a constant; when heating time is long enough(the time is not related to heat flux), the rate of changed temperature of any part of object is a constant. These phenomena show the relationship between the biggest temperature contrast and heat flux, which provides theoretical basis to determine intensity of heating and optimize the parameter of heating and lay a foundation for quantitative testing and evaluation of thermal wave NDT.

Keywords: Thermal wave NDT; Numerical computing; Fourier law; Constant

红外热波无损检测技术具备检测速度快、检测面积大和直观等特点, 但一直停留在定性检测阶段上。文献[2—5]利用热波检测技术分别对碳纤维、玻璃纤维、蜂窝结构和发动机绝热层脱粘等常用的复合材料缺陷进行了检测, 取得了比较好的结果。但是, 对于缺陷的定量检测和评估方法还在研究当中。借助数值模拟手段, 对含缺陷材料内部的热传导过程进行仿真, 找出基于持续加热方式的热波无损检测技术中最大温差和加热强度的定量关系, 对最大对比度和最佳检测时间的确定提出理论依据,

对红外热波无损探伤的定量检测和评估、加热强度的确定及加热参数的优化等奠定了理论基础。

1 理论基础

经典的传热学以傅立叶导热定律为基础, 当热流密度不是很高, 作用过程的时间足够长, 过程发生的尺寸范围也足够大时, 傅立叶传热定律以及基于该定律建立起来的导热微分方程是完全适用的。若物体各向同性, 其表达式为:

$$q = -\lambda \text{grad}t = -\lambda \frac{\delta t}{\delta n} n \quad (1)$$

式中 $\text{grad}t$ ——空间某点的温度梯度;

n ——通过该点的温度线(面)上的法向

收稿日期: 2009-02-21

作者简介: 张 炜(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事检测技术, 故障诊断, 无损探伤方面的研究。

单位矢量(指向温度升高的方向);

q ——热流密度矢量(单位时间通过单位面积的热量);

λ ——材料的导热系数。

基于傅立叶传热定律的传热微分方程为:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{\phi}{\rho c} \quad (2)$$

式中 ρ ——材料的密度;

c ——材料的比热容;

ϕ ——单位时间内单位体积中内热源的生成热;

τ ——时间。

另外, $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$, 称为热扩散率。

2 计算模型的建立与分析

2.1 计算模型

在上述条件下建立如下模型,检测对象材料为铁,其物理参数:密度为 $7\,870\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,比定压热容为 $455\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,导热系数为 $81\text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。缺陷为空气,其物理参数:密度为 $1.205\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,比定压热容为 $1.005\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,导热系数为 $2.59\text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。设环境温度为 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图1为 ANSYS 建立的模型,选用 Thermal SOLID70 单元,这样计算节点较少,且计算精度要高于四面体单元,采用扫掠划分网格的方法,可以保证划分的网格在厚度方向上比较均匀,减少由于网格自身的不均匀导致的计算误差。图2为模型尺寸,图3为加热源热流密度为 $10\,000\text{ W/m}^2 \cdot \text{s}$,持续加热 3 s 后表面的温度图,由图3可以看出缺陷区域的温度高于非缺陷区域的温度。

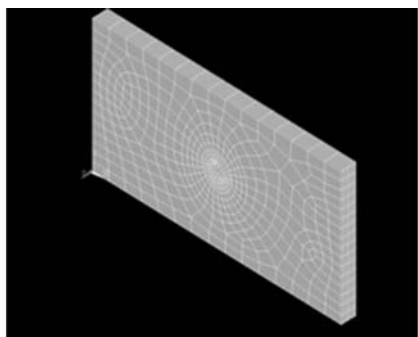


图1 有限元模型

2.2 结果与分析

2.2.1 结果与现象

基于持续加热方式的红外热波检测技术,在检测的过程中需要确定热激励源的加热强度和加热时

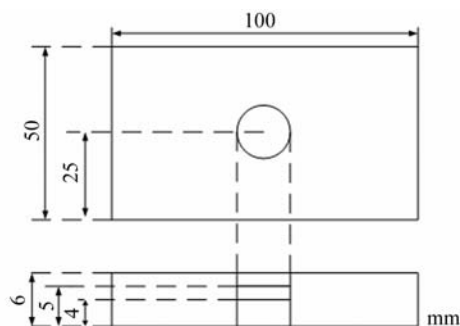


图2 模型尺寸图

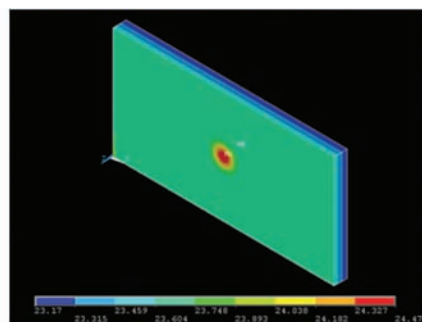


图3 加热3 min后温度分布图

间,对模型施加强度为 $5\,000, 10\,000, 20\,000$ 和 $50\,000\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的热流密度。

在红外热波检测过程中,检测对象的温升是研究重点,取温升为研究对象,表1列出在不同加热强度下,编号为2893和386的节点(2893为缺陷区内的节点,386为非缺陷区域内的节点,两点均在检测对象表面)分别在 $0.9, 1.8$ 和 2.7 s 时的温升。

表1 2893节点和386节点在不同加热强度下的温升

检测节点	加热时间/s	热流密度/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)				温升与热流密度的比值
		5 000	10 000	20 000	50 000	
2893	0.9	0.629 6	1.259 2	2.518 4	6.296 0	$1.259 2 \times 10^4$
	1.8	0.858 3	1.716 6	3.433 2	8.583 0	$1.716 6 \times 10^4$
	2.7	1.071 4	2.142 7	4.285 4	10.713 5	$2.142 7 \times 10^4$
386	0.9	0.331 5	0.663 0	1.326 1	3.315 3	$0.663 0 \times 10^4$
	1.8	0.541 5	1.082 9	2.166 0	5.414 9	$1.082 9 \times 10^4$
	2.7	0.750 9	1.501 8	3.003 7	7.509 5	$1.501 8 \times 10^4$

由表内数据发现在同一时刻,研究对象表面任意一点上升的温度与加热的强度的比值为一常数(不只是研究对象表面,其内部各节点的温升具备相同的变化规律)。这是因为傅立叶传热定律是以热扰动的传导速度为无限大为前提,由假设可知检测物体材料的 λ, ρ 和 c 为常数。因为在研究对象的一侧表面上加上恒定的热流密度,所以问题应该在第二

类边界条件下求解。其偏微分方程的表达式(2), λ 、 ρ 和 c 为常数, 这样积分运算中的系数都为常数, 而积分计算具有线性性质, 从而使本现象发生。对三维情况下的偏微分方程的很难求得解析解, 所以很难给出该现象的解析证明, 只能对其产生的原因进行定性的说明, 并通过数值计算的方法去验证。

观察图中曲线可以发现, 在持续加热一段时间后这些点温度上升的速度是相等的常数。

图 4 表示的是研究对象上节点随时间变化的温升曲线, 加热热流密度为 $5\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 选取四个节点, 在表面、深度为 2 mm 处缺陷区和非缺陷区各一个, 由图可以看出在后期四条曲线的上升的斜率相同。任取物体中的两点(A、B), 如果两点温度上升的速度关系为 $v_A > v_B$, 且 $T_A > T_B$, 这样在两点之间的温度梯度在两点的方向上一阶微分就越大, 由傅立叶传热定律可知在相同时间内由 A 传入 B 点的热量就会越多, 从而加快 B 点温度上升的速

度, 减小 A 点温度上升的速度, 直到这两点速度上升的速度相等时, 两点间温度梯度不变, A 传入 B 的热量在相同时间内相等, 两点温度上升速度相等。从而得到现象二的结论。

由图 5 中 0.1 s 和 0.2 s 时的温度分布图可知在加热刚开始的过程中, 物体的温度梯度分布变化很快。但在加热一段时间后温度梯度的分布变化很小(如 $t=25\text{ s}$ 和 $t=40\text{ s}$ 时的温度分布图所示), 可以认为不变, 这也说明各部分温度上升速度是相同的。

2.2.2 材料的热扩散率与温度进入稳定上升状态所需时间的关系

确定材料本身的性能参数(热扩散率)与进入这种稳定上升状态所需时间的关系, 可以针对不同材料, 选取合适的加热时间, 从而得到最大温度差, 以达到更好的检测效果。取铝(密度: $2\,710\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 比定压热容: $902\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 导热系数: $236\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 热扩散率: $9.65\times 10^{-5}\text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{J}^{-1}$), 铁(密度: $7\,870\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 比定压热容: $455\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 导热系数: $81\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 热扩散率: $2.26\times 10^{-5}\text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{J}^{-1}$)和钨钢(密度: $8\,070\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 比定压热容: $436\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 导热系数: $18.7\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 热扩散率: $0.53\times 10^{-5}\text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{J}^{-1}$)为研究材料, 加热热流密度为 $10\,000\text{ W}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, 模型不变, 节点 2893 为研究点, 加热时间 3 s , 材料不同时其温度随时间的变化曲线如图 6 所示。

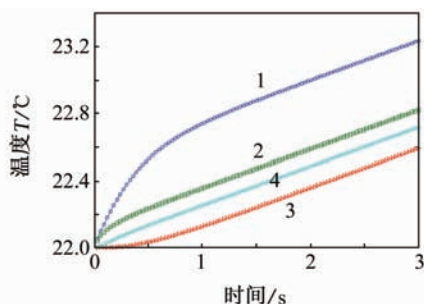


图 4 模型中四个节点随时间变化的温升曲线

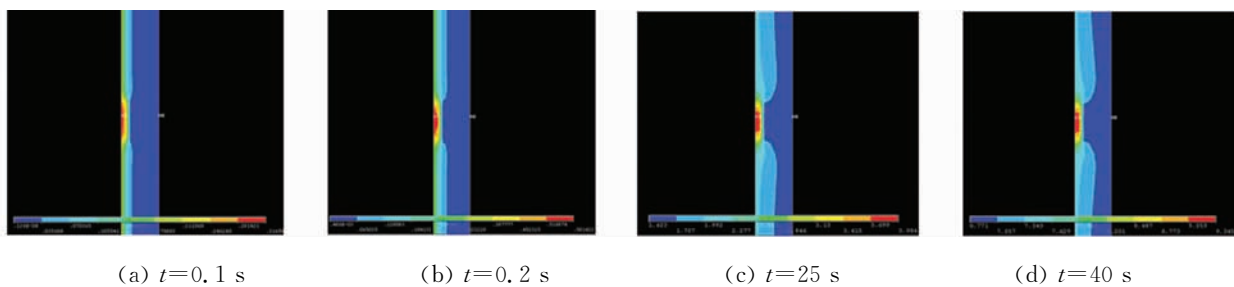


图 5 模型的纵向剖面在不同时刻的温度分布图

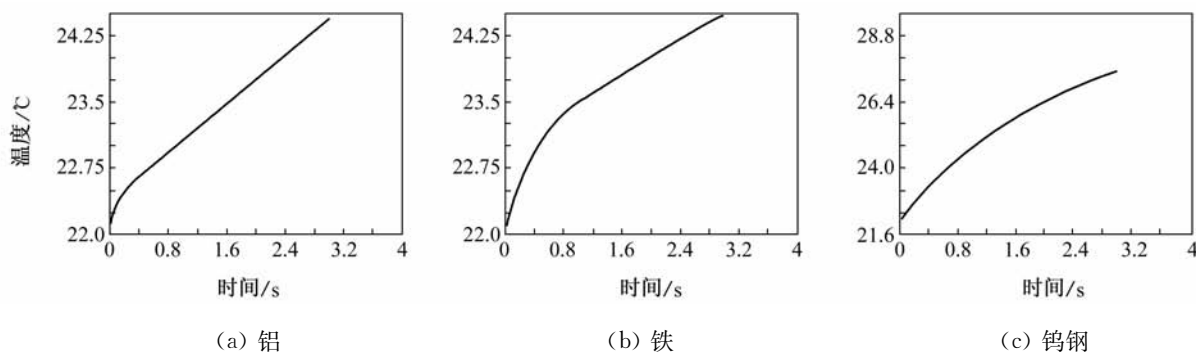


图 6 不同材料节点随时间变化的温度曲线图

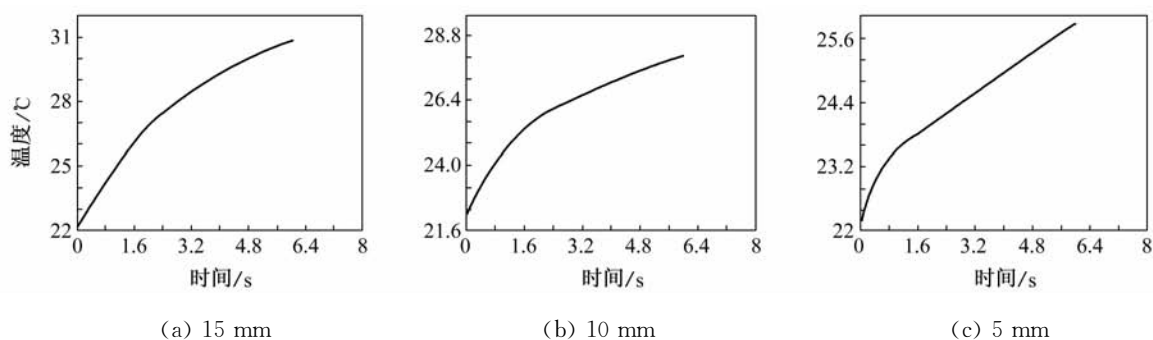


图7 不同缺陷尺寸节点随时间变化的温度

由图6可以看出,铝的热扩散率最大,它的节点温度进入稳定上升阶段所需时间也最少,铁的热扩散率比铝大,时间比铝也长,钨钢的热扩散率最小,时间也最长,在加热结束时,温度还没有进入稳定上升阶段。在检测过程中,要根据材料的热扩散率,选取合适的加热时间,这样能得到最好的检测效果。

2.2.3 缺陷尺寸与温度进入稳定上升状态时间的关系

材料取铁,加热热流密度为 $10\,000\text{ W} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,三个缺陷的缺陷深度1 mm,厚度1 mm,缺陷半径分别为15,10和5 mm,取各个缺陷几何中心(该点温度最高,是研究的关键点)它们的温度随时间变化的曲线图如图7所示。

由图7可以看出,缺陷半径为15 mm的缺陷区域中的节点进入温度稳定上升阶段经过时间最长,缺陷半径为10 mm的次之,缺陷半径为5 mm的时间最短,这表明缺陷的半径越大,节点进入稳定上升的时间越长。

2.2.4 结果分析

在红外热波无损检测技术中有三个重要特征量,最大温差(表面缺陷区域与非缺陷区域的最大温差)、最大对比度(温差与非缺陷区域的比值)和最佳检测时间(最大对比度出现的时间)。最大温差和最大对比度都是为了达到最好的检测效果而提出来的,最佳检测时间就是检测研究对象的最佳时机,所以掌握最大温差和最大对比度的出现时间和规律就非常重要。

由现象二可知,在持续加热一段时间后(该时间与加热强度无关)物体内部任意一点温度上升的速度是相等的常数,所以最大温差出现在研究对象各点进入温度稳定上升阶段,而且不会随时间的延长而增大。由现象一可知,最大温差与加热热流密度的强度成正比,所以增大加热热流密度可以成比例地增大最大温度差。检测对象的材料要求检测时温度

不能超出某一上限,而增大温度差可以提高检测效果,所以这要求找到最合适的加热强度。由上面的分析可知,对于很快进入温度稳定上升阶段的检测对象,增强热流密度可以有效地增大最大温度差,而且加热热流密度与最大温度差成正比,这就为加热热流密度的选取提供了确定的方法和尺度。

最大温差在一段时间内是定值,而非缺陷区域的平均温度会随时间的延长而上升,所以最大对比度在上升到一定阶段后下降,而且出现在研究对象各点进入温度稳定上升阶段以前。这为最佳检测时间的确定提供了理论依据。

3 结论

(1) 对于较快进入温度稳定上升阶段的检测物体,提高加热强度是提高最大温差最有效的方法。

(2) 在假设条件(建立模型时的条件)成立的前提下,最大温差和加热强度成正比关系。

(3) 在假设条件下,检测对象会在加热一段时间后,温度进入稳定上升阶段。进入稳定阶段所需要的时间与材料的性能参数和缺陷尺寸有关,导热率越大,缺陷尺寸越小,进入该状态所需时间越少,所需要的加热时间越少。

(4) 最大对比度出现在温度稳定上升阶段以前,相应的也就确定了最佳检测时间。

上述结论为像铁质材料能够使用基于持续加热方式的红外热波无损检测技术热激励源强度的选择提出了明确的方法,并对确定最佳检测时间和寻找最大对比度提出了理论依据。

参考文献:

- [1] 戴炳生. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1999.
- [2] 李艳红,金万平. 蜂窝结构的红外热波无损检测[J]. 红外与激光工程,2006,2(1):45-48.

(下转第896页)

两种测量裂纹深度方法的检测结果见表1。由表1可见,缺陷深度 $<1.5\text{ mm}$ 时,ADDT技术检测相对误差有变小的趋势,均 $<2.5\%$,回波幅度法的检测相对误差有所上升,但也 $<3\%$,均满足检测精度的要求。但是由于回波幅度法操作简单,所以使用回波幅度法尤为方便。

表1 两种测量裂纹深度方法的检测结果比较

缺陷	测量结果			相对误差	
编号	回波幅度法/mm	ADDT技术/mm	计量深度/mm	回波幅度法/%	ADDT技术/%
1	16.05	15.740	16.1	0.31	2.24
2	15.50	15.328	15.6	0.64	1.74
3	15.48	15.001	15.1	2.52	0.65
4	15.19	14.769	14.6	4.04	1.16
5	14.95	13.886	13.6	9.93	2.10
6	14.50	13.030	12.6	15.08	3.41

但是当缺陷深度值 $>1.5\text{ mm}$ 后,两种方法的相对误差都有所增大,但回波幅度法的增长趋势明显高于ADDT技术。如在检测 2 mm 深的缺陷时,回波幅度法的相对误差为 4.04% ,ADDT技术的相对误差为 1.16% ;在检测 4 mm 深的缺陷时,前者相对误差为 15.08% ,而ADDT的相对误差为 3.41% 。所以,在裂纹缺陷深度 $>1.5\text{ mm}$ 时,推荐使用ADDT技术检测。

3.2 自然裂纹实验

检测管道外径为 720 mm ,壁厚为 17 mm ,ADDT技术检测灵敏度为 70.8 dB , β 值为 0.55 。超声评定长度采用 6 dB 法,误差范围 $2\sim 3\text{ mm}$,检测结果见表2。

从表2可见,回波幅度法和ADDT技术在检测自然裂纹时相对误差也是随着裂纹深度减少而在增加。ADDT技术在检测原理上不但考虑了缺陷的径向深度会影响回波幅度,而且还会影响传播时间,所以对缺陷的定位更加准确一些。当然检测精度的影响因素是多方面的,不但与检测仪器、操作人员水平有关,还与自然裂纹的方向、形态有关。不同的裂纹方向、形态,超声波对它们的敏感程度不同,当裂

~~~~~

(上接第893页)

- [3] Shepard S M, Lhota J R, Ahmed T, et al. Thermographic inspection of composite structures[J]. SAM-PL E Journal, 2003, 39(5): 5—8.
- [4] Ling H S, Ming L L, Qing Y H, et al. NDE of com-

表2 自然裂纹的深度定量结果比较

| 缺陷 | 壁厚方向尺寸测量结果 |           |         | 相对误差    |          |
|----|------------|-----------|---------|---------|----------|
| 编号 | 回波幅度法/mm   | ADDT技术/mm | 计量深度/mm | 回波幅度法/% | ADDT技术/% |
| 1  | 16.5       | 16.981    | 16.6    | 0.60    | 2.29     |
| 2  | 13.72      | 13.932    | 14.5    | 5.37    | 3.92     |
| 3  | 13.16      | 13.561    | 13.9    | 5.32    | 2.43     |
| 4  | 11.37      | 10.543    | 10.1    | 12.57   | 4.38     |
| 5  | 10.75      | 9.311     | 8.8     | 22.16   | 5.81     |
| 6  | 10.53      | 9.102     | 8.4     | 25.35   | 8.36     |

纹所在平面与超声波束垂直时,检测精度较高;裂纹所在平面与超声波束几乎平行时,检测精度较低,甚至不能发现裂纹。

## 4 结论

(1) 试验表明,回波幅度法定量缺陷适用于裂纹深度 $<1.5\text{ mm}$ 的情况,对深度 $>1.5\text{ mm}$ 的缺陷,由于端角反射效应,回波幅度变化很小,缺陷评定困难,推荐使用ADDT技术。

(2) 当扫描测量缺陷的时间不超过参考指示体的扫描测量时间时,也可推荐使用ADDT技术。标准化校准后,缺陷的反射波振幅 $\geq 100\%$ 屏幕高度时,ADDT技术受到限制。所以使用参考指示体,确定ADDT技术 $\beta$ 值大小时,要确定好增益值。

(3) 随着裂纹径向深度的增加,回波幅度法和ADDT技术的评定误差将会增大,但前者的误差增加幅度较大。

(4) 检测精度的影响因素是多方面的,不但与检测仪器、操作人员水平有关,还与自然裂纹的方向、形态有关。

## 参考文献:

- [1] 胡天明. 超声波探伤[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,1995.
- [2] API RP SUE—2005 Recommended Practice for Ultrasonic Evaluation of Pipe Imperfections, Second Edition[S].
- [3] posites delamination by infrared thermography[J]. Proceedings of SPIE, 2003(5046): 219—233.
- [5] 张小川,金万平,等. 玻璃钢平底洞缺陷试件红外热波检测方法[J]. 激光与红外, 2006, 1(1): 16—18.