

红外热像检测的 3D 建模与 1D 建模的对比

刘颖韬¹, 郭兴旺², 郭广平¹

(1. 北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘要: 3D 模型常被简化为 1D 模型用于理论分析和定量评价缺陷。为了评估这种模型简化引入的误差, 使用有限元法对两种 3D 模型及其简化后的 1D 模型进行仿真对比, 得出以下结论: 当其它条件相同时, 不计材料导热的各向异性, 热扩散率越高的材料中横向导热越明显, 由三维模型简化为一维模型所带来的误差越大。通过对 GFRP/NOMEX 蜂窝样件进行试验发现, 即使是对于热扩散率很低的复合材料, 随着时间的延长, 横向导热的影响也变得明显。所以利用简化的一维模型进行缺陷定量分析一定要考虑适用条件, 并对引入的误差进行评估。

关键词: 红外热像检测; 计算机仿真; 误差; 有限元法

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2011)02-0005-04

Comparison of 3D and 1D Models in Infrared Thermographic Nondestructive Testing by Numerically Simulating

LIU Ying-Tao¹, GUO Xing-Wang², GUO Guang-Ping¹

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: For simplicity in theoretical analysis and quantitative calculation, 3D model is often simplified to 1D model. 3D and 1D models for 2 samples, one is a CFRP panel and another is an aluminum one, are built and calculated by FEM method. The results showed that influence of lateral heat diffusion was more serious in materials with greater thermal diffusivity. An experiment was carried out on a GFRP/NOMEX honeycomb panel. It was seen that lateral heat diffusion became obvious in materials with low thermal diffusivity as time goes by. In conclusion, error should be estimated before using 1D model instead of 3D model for simulation and analysis in infrared thermographic NDT.

Keywords: Infrared thermographic testing; Numerical simulation; Error; Finite element method

红外热像无损检测技术由于检测速度快、无污染和非接触, 在复合材料制件的无损检测中应用越来越广泛。对红外热像无损检测进行建模分析, 可以确定表面温度信号与制件几何参数、材料热物性参数、缺陷几何参数、缺陷热物性参数、边界条件和检测中的加热方式等因素的关系, 有助于设计最佳的热激励方式及确定信号的最佳采集时段, 有助于开发新的检测方法和数据处理方法。从而优化检测

条件, 包括热激励条件、数据采集时段和数据处理方法等。

在红外热像检测的建模分析方面, 虽然国内外学者做了大量深入的研究, 不仅对典型的一维模型、二维模型和三维模型进行了仿真研究^[1-2], 而且还进行了复杂模型的研究, 如两个缺陷位置重叠的建模分析^[3]、针对裂纹缺陷的建模分析^[4]、用于地雷探测的复杂模型分析^[5]、裂纹特征的建模^[6]、混凝土缺陷的建模^[7]、激励强度对检测的影响^[8]和空腔自然对流对红外检测的影响^[9]等。但是为了便于缺陷分析和定量评价, 三维模型常常被简化为一维模型, 从而忽略横向导热的存在, 这样将引入误差。这种误

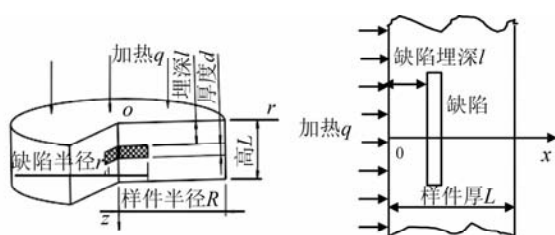
收稿日期: 2010-04-08

作者简介: 刘颖韬(1976—), 男, 工程师, 研究方向为红外热像检测。

差在什么情况下会带来怎样的影响,目前研究较少。它的影响依据所研究的内容有所不同,主要是影响对缺陷大小和埋深进行估算的准确性。笔者将通过建模对比分析,对模型简化引入的误差进行定量研究。

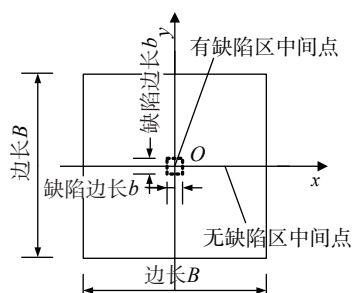
1 典型的三维模型和简化后的一维模型

红外热像无损检测中常使用三维模型进行建模分析。典型的三维模型有用于模拟分层缺陷的三维模型和用于模拟金属腐蚀缺陷的三维模型(见图 1 和 2)。

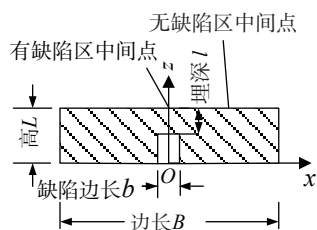


(a) 三维模型 (b) 简化后的一维模型

图 1 复合材料分层缺陷



(a) xOy 面内的平面图



(b) 通过 x 轴的剖面图

图 2 金属腐蚀缺陷的三维模型

图 1(a) 中的阴影区域为分层缺陷, L 为试件厚度, l 为缺陷深度, d 为缺陷厚度, R 为模型半径, r_d 为缺陷半径, q 为加热热流密度。图 1(b) 中无缺陷区简化为一层有限厚度板, 厚度为试件厚度 L 。有缺陷区为三层结构的有限厚度板, 中间层为缺陷, 厚度为 d 。

图 2 中 B 为试件的边长, b 为缺陷区的边长, L 为试件厚度, l 为缺陷深度, 加热面在 $z=L$ 处。该模型简化为: 无缺陷区为一层有限厚度板, 板厚为试件厚度 L , 有缺陷区同样为一层有限厚度板, 板厚为缺陷深度 l 。

以下使用有限单元法进行数值求解, 采用有限元分析软件 ANSYS 实现。

2 三维模型和一维模型计算结果的比较

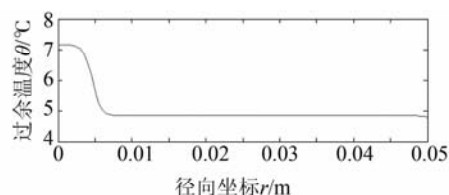
2.1 分层缺陷

首先考察表面温度的空间分布。计算模型为图 1 中的三维模型, 加热阶段不考虑向环境散热, 冷却阶段边界条件为对流换热, 初始温度同环境温度, 本底材料为碳纤维增强塑料(CFRP), 缺陷为空气, 热物性参数见表 1, 计算参数为试件厚度 $L=0.002$ m, 缺陷厚度 $d=0.0001$ m, 缺陷深度 $l=0.0009$ m, 试件半径 $R=0.05$ m, 缺陷半径 $r_d=0.005$ m, 热流密度 $q_0=1.0 \times 10^6$ W/m², 脉冲宽度 $\tau_h=0.01$ s, 计算截止时间 $\tau_{\text{stop}}=5$ s, 网格大小 $\text{Size}=0.00002$ m。

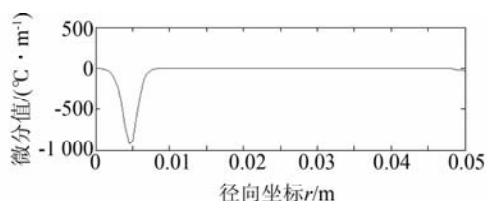
表 1 材料的热物性参数

	密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容 c / ($\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$)	导热系数 λ / ($\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$)	热扩散率 α / (m^2 / s)
CFRP ^[10,11]	1 620	760	0.64	5.2×10^{-7}
干空气(20℃) ^[12]	1.205	1 005	0.025 9	2.14×10^{-5}
铝(20℃) ^[12]	2 710	902	236	9.65×10^{-5}

图 3 给出在时刻 $\tau=1.8728$ s 时表面温度的空间分布和表面温度对径向 r 的偏微分曲线。可见,



(a) 表面温度 θ 的空间分布



(b) 表面温度对径向 r 的偏微分 $\partial\theta/\partial r$ 曲线

图 3 $\tau=1.8728$ s 时的表面温度

由于缺陷为空气,其导热性差,导致缺陷区的表面温度明显高于无缺陷区的表面温度,并且表面温度对径向 r 的偏微分在缺陷边缘附近取得最大值。由于横向传导的热流密度 q_r 与横向温度梯度 $\partial\theta/\partial r$ 成正比,因此这种横向温度梯度的存在必然导致横向导热的发生。一维模型完全忽略了横向导热的存在,其解与三维模型的解有本质的区别。

先以图 1 中的模型为对象进行对比。设加热方式为矩形窄脉冲,脉冲宽度为 τ_h ,本底材料为 CFRP,缺陷为空气,模型参数及计算参数同上。三维模型边界条件为:上表面在加热后绝热,加热过程中忽略对流和辐射换热,其余表面始终绝热。

三维模型中选取的比较点为有缺陷区和无缺陷区的中间点,回避了横向导热明显的区域——缺陷边界。如果在这两个点的温度变化上出现偏差,则更能说明横向导热的影响。

在比较之前,首先定义绝对差和相对差,绝对差定义为:

$$e_a = |\theta_1 - \theta_2| \quad (1)$$

相对差定义为:

$$e_r = \frac{|\theta_1 - \theta_2|}{\theta_1} \times 100\% \quad (2)$$

这里 θ_1 为一维模型下的计算温度值, θ_2 为三维模型下的计算温度值的插值。这是由于两个计算结果的计算时间点不同,不能直接进行比较,所以在比较之前对二维模型下的计算温度值进行了线性插值。比较结果见表 2。

表 2 柱状三维模型与一维模型表面温度的比较结果

类别	e_a 最大值/ $^{\circ}\text{C}$	e_a 最大值出现时间/s	相对差 e_r 最大值/(%)	e_r 最大值出现时间/s
无缺陷区(中间点)	0.001 0	0.217 61	0.007 1	0.217 61
有缺陷区(中间点)	0.089 6	0.445 41	1.550 8	5

由表 2 可以看出,有缺陷区中间点的温度出现了比较明显的偏差(1.550 8%),而无缺陷区中间点的温度几乎没有偏差(0.007 1%),这是因为有缺陷区很小,其中间点距离缺陷边缘——温度梯度较大的区域很近,而无缺陷区较大,其中间点距离缺陷边缘较远,两者受横向导热的影响程度不同。

2.2 金属腐蚀缺陷

金属腐蚀缺陷的基体材料为铝,热物性参数见表 1,计算参数为试件的边长 $B=0.02\text{ m}$,试件厚度

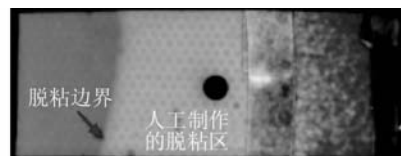
$L=0.002\text{ m}$,缺陷区的边长 $b=0.002\text{ m}$,缺陷深度 $l=0.000\ 6\text{ m}$,热流密度 $q_0=1.0\times 10^6\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,脉冲宽度 $\tau_h=0.01\text{ s}$,计算截止时间 $\tau_{\text{stop}}=0.5\text{ s}$,网格大小 $\text{Siz}=0.000\ 2\text{ m}$ 。边界条件为:上表面在加热后绝热,加热过程中忽略对流和辐射换热,其余表面始终绝热。三维模型选取的比较点为有缺陷区的中间点和无缺陷区的中间点,比较结果见表 3。

表 3 金属腐蚀缺陷三维模型与一维模型比较的过剩温度

类别	有缺陷区		无缺陷区	
	中间点最大值	$\tau=0.5\text{ s}$ 处	中间点最大值	$\tau=0.5\text{ s}$ 处
一维模型	7.642 14	6.818 25	4.631 35	2.045 48
三维模型	6.056 80	2.060 55	4.631 52	2.060 17
差值	1.585 34	4.757 70	-0.000 17	-0.014 69

表 3 中无缺陷区中间点在两种模型下的温度极为接近,而有缺陷区中间点的温度有明显不同,受横向导热的影响非常严重。综合表 2 和表 3 可以看到,金属腐蚀缺陷三维模型中的横向导热比分层缺陷三维模型中的更为明显,主要是因为前者基体材料是铝,后者基体材料是 CFRP,铝的热扩散率远高于 CFRP 的热扩散率,热量能够更快地向四周扩散。也就是说,当其它条件都相同时,不计材料导热的各向异性,热扩散率越高的材料中横向导热越明显,由模型简化带来的误差越大,一维模型的理论解应用于三维问题得到的结果越不准确。

通过试验发现,即使是对于热扩散率很低的复合材料,随着时间的延长,横向导热的影响也会变得很明显。图 4 为带人工脱粘缺陷的蜂窝板样件的红外热像检测结果,右边为脱粘区。从图中可见,由于横向导热的存在,脱粘区的边界发生了“移动”。



(a) $\tau=0.5\text{ s}$ 时



(b) $\tau=4\text{ s}$ 时

图 4 蜂窝板的红外热像检测原始热像图

3 结语

当其它条件相同时,不计材料导热的各向异性,热扩散率越高的材料中横向导热越明显,由三维模型简化为一维模型进行分析所带来的误差越大,一维模型的理论解应用于三维问题得到的结果越不准确。即使是对于热扩散率很低的复合材料,随着时间的延长,横向导热的影响也会变得很明显,从而影响利用一维模型所得到的结论的正确性及分析的准确性。对于经历较短的检测时间或对于精度要求不高的定量分析,可以使用简化后的一维模型,但是对于更加复杂的检测过程或精度要求较高的定量分析,需要谨慎地使用简化的一维模型,并在使用前利用三维和一维模型进行仿真分析,评估模型简化带来的误差。

参考文献:

- [1] Galietti U, Ladisa S, Pappalettere C, et al. Hybrid procedure to characterize hidden defects in composite [J]. Thermosense XXIV SPIE, 2002(4710): 599—609.
- [2] Vladimir P Vavilov. Accuracy of thermal NDE numerical simulation and reference signal evolutions [J]. Thermosense-XXI SPIE, 1999(3700): 14—19.
- [3] Vladimir P Vavilov. Three-dimensional analysis of transient thermal NDT problems by data simulation and processing [J]. Thermosense XXII SPIE, 2000(4020): 152—163.
- [4] Robin Steinberger, Thomas Grünberger, Paul O'Leary. Simulations and analytical models for optimization of photothermal surface crack detection[J]. Thermosense XXIII SPIE, 2001(4360): 524—533.
- [5] Vladimir P Vavilov, Douglas Burleigh, Alexey G Klimov. Advanced modeling of thermal NDT problems: from buried landmines to defects in composites [J]. Thermosense XXIV, SPIE, 2002(4710): 507—521.
- [6] 李大鹏,张利群,赵岩松. 红外无损检测中的裂纹特征提取和图形重建方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(7): 624—626.
- [7] 黄红梅,魏臻. 红外无损检测的三维有限元仿真[J]. 安徽工业大学学报, 2006, 23(3): 313—314.
- [8] 李国华,赵会友,朱红秀,等. 红外热像检测的数值优化[J]. 煤矿机械, 2004(9): 23—24.
- [9] 范春利,孙丰瑞,杨立. 缺陷表面温度分布及空腔自然对流对红外检测的影响[J]. 激光与红外, 2005, 35(7): 504—507.
- [10] Sergio Marinetti, Alberto Muscio, Paolo Giulio Bison, et al. Modeling of thermal non-destructive evaluation techniques for composite materials [J]. Thermosense XXII Bellingham, SPIE, 2000(4020): 164—173.
- [11] Bison P G, Bressan C, Cavaccini G, et al. NDE of composite materials by Thermal method and Shearography[J]. Proc SPIE Thermosense—XIX. Bellingham: SPIE, 1997(3056): 220—229.
- [12] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 1998: 420—424.

第十九届俄罗斯无损检测和技术诊断会议暨展览会信息

第十九届俄罗斯无损检测和技术诊断会议暨展览会将于 2011 年 9 月 6—8 日在俄罗斯萨马拉举行。此次会议汇集了俄罗斯最好的无损检测研究人员、专家以及相关行业组织,为了“确保安全”这一共同的目标,互相交流最新的无损检测和技术诊断的发展。会议由俄罗斯无损检测学会和萨马拉航空航天大学共同主办。会议主要议程为:

1. 各种无损检测方法在各个工业领域的应用: 确保安全生产
2. 无损检测在航空航天领域的应用

3. 材料评价和状态监测
4. 最新无损检测发展
5. 无损检测人员培训和认证

鉴于全世界无损检测技术的飞速发展,俄罗斯学会以无损检测全球化和国际合作为主要目的,欢迎全世界无损检测同仁参加第十九届俄罗斯无损检测和技术诊断会议暨展览会。

会议网站: www.conf.ronktd.ru

会议秘书处邮箱: info@ronktd.ru