

④ 431-436

低导热系数物质在红外成像检测中的影响及其处理

杨黎俊 耿完楨 姜铃珍 邹立勋 魏功明 洪晶

(哈尔滨工业大学应用物理系, 黑龙江, 哈尔滨, 150001)

卢元军 崔振阳

(东北电力试验研究所, 辽宁, 沈阳, 110001)

TN211

摘要 讨论了红外成像技术检测金属管内壁腐蚀时管壁外表面所覆盖的低导热系数(LTC)层所产生的噪声. 从理论和实验上研究了LTC层对不同加载方式所产生的不同影响, 还从理论上提出了一种处理严重LTC层影响的新方法.

关键词 红外成像检测, 噪声抑制.

导热系数 LTC

引言

随着红外成像技术的迅速发展, 红外成像检测的范围也在不断拓宽, 出现了很多有关的理论^[1~3]以及基于这些理论的应用^[4~5]. 然而, 红外成像检测技术也受到很多方面的限制, 典型的例子是, 当我们用该方法探测金属表面以下的缺陷时, 由于金属的导热系数相对较大, 热平衡时由缺陷所引起的温差较小, 因此必须进行热加载以产生动态温度演化过程. 然而更坏的情况是, 被探测的表面往往还附有一层LTC物质, 从而给检测工作带来了困难.

本文采用数值方法研究了LTC层对检测中不同加载方式所产生的不同影响, 并给出了初步的实验结果. 另外, 还用计算机仿真的方法从理论上证明了一种能有效处理较严重LTC层产生的噪声的方法.

1 数值计算^[6]

本文采用由控制容积法导出的差分方法进行数值计算, 该法不同于基于泰勒级数的差分法, 前者可以有预先假定的变量分布, 同时也不同于传统的有限元法, 因它对不同的变量可以有不同的假定变量分布.

柱坐标系下三维非稳态导热控制微分方程为,

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + V, \quad (1)$$

式(1)中 ρ, c, k, T, V 分别表示体密度, 热容, 导热系数, 温度及单位体积的产热率; r, θ 和 z 表示空间坐标; t 是时间变量.

根据能量守恒定律, 对一个典型的控制容积(由 P 表示)在时间间隔 t 到 $t + \Delta t$ 之间对式(1)积分, 即有,

$$\int_{z_s}^z \int_{r_w}^r \int_{\theta_b}^{\theta} \int_t^{t+\Delta t} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} r dr d\theta dz dt = \int_{z_s}^z \int_{r_w}^r \int_{\theta_b}^{\theta} \int_t^{t+\Delta t} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + V \right\} r dr d\theta dz dt. \quad (2)$$

利用假定的变量分布及公式(2), 可得到对应于公式(1)的离散化方程,

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + a_F T_F + a_B T_B + b, \quad (3)$$

其中

$$a_E = \frac{k_e \Delta r \Delta z}{(\delta \theta)_e}, \quad a_W = \frac{k_w \Delta r \Delta z}{(\delta \theta)_w r_w}, \quad a_N = \frac{k_n r_n \Delta \theta \Delta z}{(\delta r)_n},$$

$$a_S = \frac{k_s r_s \Delta \theta \Delta z}{(\delta r)_s}, \quad a_F = \frac{k_f r_f \Delta r \Delta \theta}{(\delta z)_f}, \quad a_B = \frac{k_b r_b \Delta r \Delta \theta}{(\delta z)_b},$$

$$a_p^0 = \frac{(\rho c)_p r_p \Delta \theta \Delta r \Delta z}{(\Delta t)},$$

$$a_p = a_W + a_E + a_S + a_N + a_B + a_T + a_p^0 - S_p r_p \Delta \theta \Delta r \Delta z,$$

$$b = S_p r_p \Delta \theta \Delta r \Delta z + a_p^0 T_p^0;$$

其中脚标 W, E, S, N, F 和 B 表示与结点 P 相邻的西、东、南、北、前、后的结点. 根据上述离散化方程, 我们设计了求解非稳态导热方程的计算程序. 该程序通用于计算直角坐标系和柱坐标系下的三维对象, 只需在程序中调整标志变量即可完成在两坐标系之间的转换; 同时适用于稳态及动态情形, 求稳态解时只需将时间变量取大数值即可; 适用于任意边界形状, 任意边界条件下, 物体内部或表面任意位置的温度求解. 下面将利用该数值方法计算不同的边界条件下金属管外表面的温度分布.

2 LTC 层对不同加载方式的影响

计算的对象是一内径为 55mm、壁厚为 5mm 的部分钢管, 钢管的内壁弧长与长度均为 100mm. 其内表面中央有一规则缺陷, 内壁弧长与长度均为 19mm, 深度为 2mm. 有关的热物性参数是: 钢管、LTC 层、空气的导热系数分别取 $40 \text{W/m} \cdot \text{C}$ 、 $3 \text{W/m} \cdot \text{C}$ 和 $0.03 \text{W/m} \cdot \text{C}$; 钢管与外表面空气的对流热交换系数都取 $5 \text{W/m}^2 \cdot \text{C}$, 而钢管与内表面水的对流热交换系数取作 $10000 \text{W/m}^2 \cdot \text{C}$; 钢管及 LTC 层的密度分别取为 7840kg/m^3 和 2800kg/m^3 , 钢管和空气的比热容则分别取作 $460 \text{J/kg} \cdot \text{C}$ 和 $1013 \text{J/kg} \cdot \text{C}$, 环境温度及钢管的初始温度均设为 20C , 而其它部位则设为绝热边界条件. 我们用一组 2 维随机数来模拟钢管外表面的 LTC 层的厚度, 其厚度范围为 $0 \sim 0.51 \text{mm}$.

2.1 管外表面热辐射加载

假设外表面吸收的辐射装置的单位面积上的功率为 $2\text{W}/\text{cm}^2$, 则加载 3s 后, 计算得到的外表面的温度分布如图 1(a) 所示, 由图 1(a) 可见, 由于 LTC 层的存在, 尽管仍能从图中辨别出缺陷的位置, 但已叠加了由随机分布的 LTC 层所产生的噪声. 我们对一个壁厚为 5mm, 内表面有两个人工缺陷且外表面带有 LTC 层的管子进行了管外辐射加载的实验, 两个缺陷的直径都为 15mm, 深度分别为 2mm 和 3mm (见图 1(b)). 从图 1(b) 可见, 两缺陷的位置能明显分辨出来, 只是叠加上了外表面 LTC 层所导致的噪声.

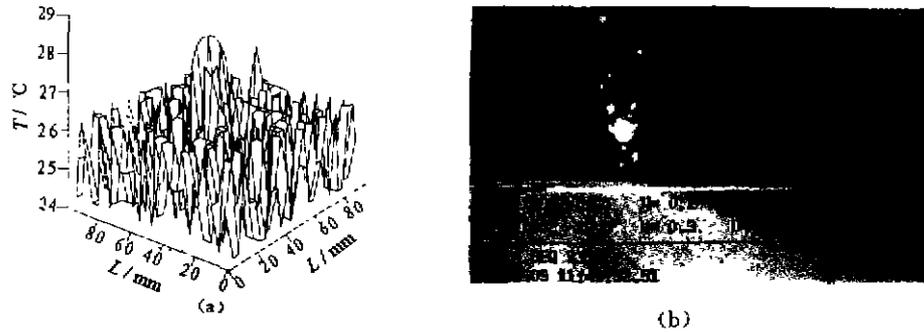


图 1 管外热辐射加载时 LTC 层的影响

(a) 管外加载的理论模拟温度分布 (b) 实际测量得到的温度分布

Fig. 1 Influence of LTC layer on detection in outer heat-loading case

(a) theoretical simulation of temperature distribution produced by outer heat-loading

(b) temperature distribution in practical case

2.2 管内热水加载

对于与前面同样的计算对象, 我们计算当管内迅速装满 50C 的热水时, 3s 后管外表面的动态温度分布如图 2(a) 所示.

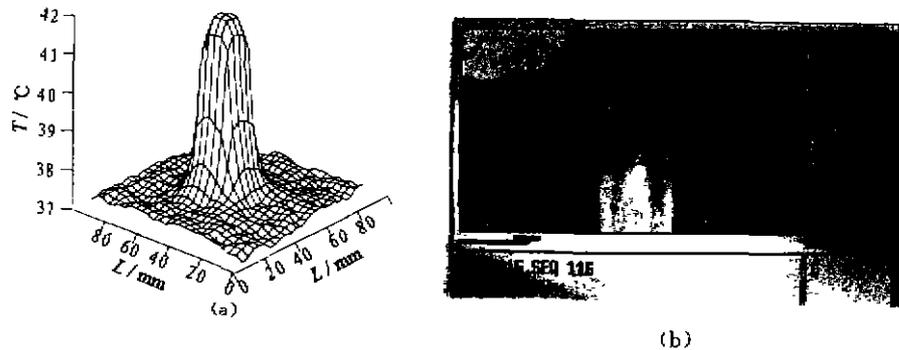


图 2 管外热辐射加载时 LTC 层的影响

(a) 管外加载的理论模拟温度分布 (b) 实际测量得到的温度分布

Fig. 2 Influence of LTC layer on detection in inner heat-loading case

(a) theoretical simulation of temperature distribution produced by

outer heat-loading (b) temperature distribution in practical case

由图 2(a)可知,管内热水加载要比管外热辐射加载有较高的信噪比.图 2(b)对应于钢管内迅速装满热水 2s 后的温度分布,它显然要比图 1(b)中的信噪比高.由此说明:当管外表面的 LTC 层不太严重时,两种加载方式都是可行的,其中热水加载方式的信噪比较高,但产生动态温度分布时不如管外热辐射加载方便,尤其对于被检测物体面积很大的情况(如锅炉水冷壁),因此在实际的检测中,应根据具体的 LTC 层的严重程度来选取加载方式.

3 处理严重 LTC 层影响的方法

对 LTC 层较厚,导热系数相对更小的情况(如水冷壁外表面的结焦层),则无论采用哪种加载方式,单次的探测都不可能检测出缺陷,因为此时 LTC 层产生的噪声功率远大于信号功率,从热图中根本无法判断缺陷的存在.对这种情况,我们利用计算机仿真的方法提出了两种加载方式共同去噪的方法.

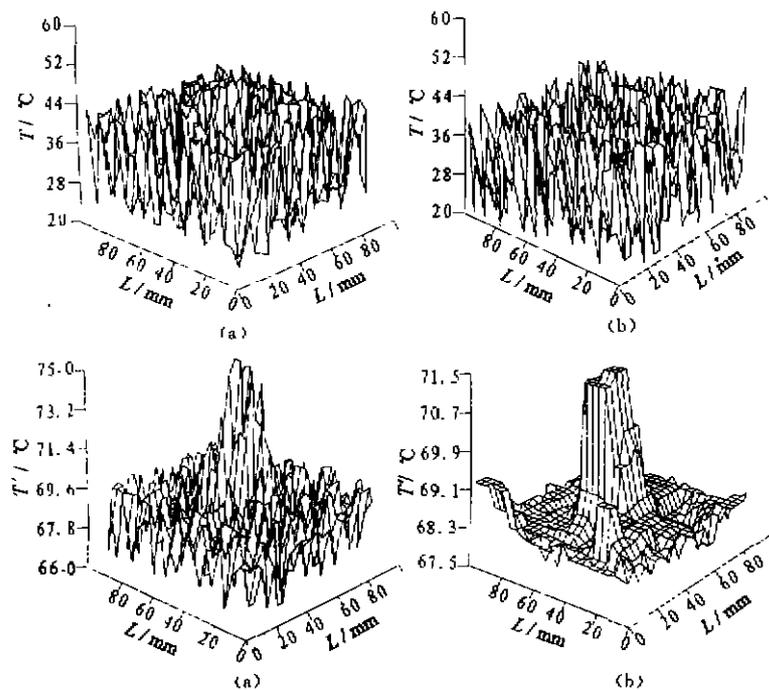


图 3 热图叠加去噪的计算机仿真

- (a) 管内加载计算得到的温度分布 (b) 管外加载计算得到的温度分布
 (c) 图 3(a)与图 3(b)的叠加结果 (d) 图 3(c)经滤波后的结果
 Fig. 3 Computer simulation of noise reduction by superposition method
 (a) simulated temperature profile produced by inner heat-loading
 (b) simulated temperature profile produced by outer heat-loading
 (c) superposition of Fig. 3a and Fig. 3b
 (d) smoothed result of Fig. 3c after filtering process

这种方法的主要思想是:由于LTC层的存在,当不同方向的热流经过外表面时可产生近似互相反转的温度分布.如果能适当地控制边界条件及加载装置的功率,那么,互为反转的温度分布可以相加到最小值(这里指其交流部分),因而可以在很大程度上消除LTC层的影响.这主要基于下述事实:(a)钢板及LTC层的导热系数都可按常数处理,因而方程(1)为线性微分方程,进而叠加原理在此成立;(b)前面提到的两种加载方式得到的热图在叠加过程中,由缺陷产生的温度信号因叠加会变大,而与此同时,LTC层的影响却会相互抵消,这是因为缺陷与LTC层分属钢管的不同表面.图3是这一过程的计算机模拟结果.

这里的LTC层的厚度范围比原来大,为 $0\sim 1.02\text{mm}$,而其导热系数则变得更小,为 $0.1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{C})$.图3(a)是管内迅速装满 60C 热水 4s 后外表面的温度分布,图3(b)是管外辐射热加载 5s 后外面的温度分布.显然,无论是哪种加载方式,由缺陷所产生的温度信号已完全淹没于LTC层所导致的噪声之中.我们经各种滤波尝试后,情况也没有任何改观.但是,当图3(a)及图3(b)中的数据相加在一起时,缺陷信号会显示出来,而噪声则得到了很大程度的抑制(见图3(c),其中 T' 表示温度和).图3(d)是图3(c)经两次中值滤波后得到的结果,缺陷信号比滤波前更加明显.在实际的检测过程,关键是在得到一种加载方式的热图后应如何选择另一种加载方式的热图与之相加.如我们首先得到了管内加水后 4s 的热图(见图3(a)),选择管外热辐射加载时间的原则是,选取能与图3(a)相加时满足下列条件的一个分布,即满足叠加后各点温度与叠加后平均温度的差的平方和为最小.

4 结语

本文采用数值方法研究了LTC层对红外检测金属管内壁腐蚀时不同加载方式所产生的不同影响,讨论了各自的特点及适用范围,同时给出了初步的实验结果,为红外成像用于大面积扫描检测金属管内壁的缺陷奠定了基础.最后,我们用计算仿真的方法从理论上证明了一种能有效处理较严重LTC层产生的噪声的方法,可望用于解决锅炉水冷壁缺陷检测的难题,该方法不需了解被检测物体及LTC层的任何热物性参数,因此有很好的适应性.

REFERENCES

- 1 Balageas D.L, Krapez J, Cielo P. *J. App. Phys.*, 1986, **59**(2):348~357
- 2 Pade O, Mandelis A. *Rev. Sci. Instrum.* 1993, **64**(12):3548~3561
- 3 Munidasa M, Mandelis A. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1991, **8**(12):1851~1858
- 4 Vavilov V, Bales M J. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1996, **39**(2):355~371
- 5 Patel P M, Almond D P, Reiter H. *Appl. Phys. B*, 1987, **43**(1):9~15
- 6 GUO K L, KONG X Q, CHEN S N. *Calculation of Heat Transmission*, Hefei: Chinese University of Science and Technology Press(郭宽良,孔祥谦,陈善年. *计算传热学*,合肥:中国科技大学出版社), 1988: 48~59

INFLUENCE AND TREATMENT OF LOW THERMAL CONDUCTIVITY SUBSTANCE IN INFRARED IMAGING TESTING

YANG Li-Jun GENG Wan-Zhen JIANG Lin-Zhen

ZOU Li-Xun WEI Gong-Ming HONG Jin

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

LU Yuan-Jun CUI Zhen-Yang

(Electric Power Administration Bureau of Northeast China, Shenyang, Liaoning 110001, China)

Abstract The noise produced by a randomly distributed low thermal conductivity (LTC) layer on the outer surface of a metal tube when using infrared imaging technique to detect the corrosion defects on the inner surface of the tube was studied. The different influences of LTC layer on different heat loading methods were also studied both theoretically and experimentally. A new approach to diminish the high power noise produced by LTC layer was proposed in the end.

Key words infrared imaging testing, noise suppression.