

文章编号: 1001-5078 (2006) 07-0571-02

# 三维半球壳热设备运行状态的红外诊断

康文秀, 关荣华

(华北电力大学应用物理系, 河北 保定 071003)

**摘要:**在红外测温技术中,把计算三维球壳热设备内部温度分布及内壁缺陷的方法推广到三维半球壳热设备,为此类设备内部运行状态的实时监测提供了理论依据。

**关键词:**半球壳热设备;温度分布;红外技术;内壁缺陷

**中图分类号:** TN219 **文献标识码:** A

## Infrared Thermal Diagnosis of Internal Condition for Three-dimensional Semi-hollow Spheroid

KANG Wen-xiu, GUAN Rong-hua

(Department of Applied Physics, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The method that the internal temperature distribution and inner defect be given based on the outer surface temperature distribution obtained by scanning, is popularized to three-dimensional semi-hollow spheroid equipment. So the theoretical basis for testing internal condition of heat equipment is given.

**Key words:** semi-hollow spheroid equipment; surface temperature distribution; infrared technique; defects of inner wall

### 1 引言

工业生产中的热设备长期在高温、高压、介质腐蚀等环境下运行必然导致内壁破损,内壁缺陷的破损程度及设备内部的温度分布是标志生产状态的重要参量,对设备内部运行状态进行实时监测,及时提出判废标准和维修建议,保证生产安全具有重要的现实意义。

红外检测由于其非接触、无损伤、可靠性高等独特的优势,在运行状态监测和故障诊断领域取得了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。红外扫描设备外表面温度分布,利用传热反问题研究设备内部缺陷是红外热诊断的基本原理,文献[4]得出三维球壳热设备内壁缺陷的通用方程式,为此类热设备的实时诊断提供了理论依据,本文将此方法推广到三维半球壳热设备,使之使用范围更广。

### 2 半球壳热设备内部温度分布满足的定解问题

内外半径为  $R_1$  和  $R_2$  的三维半球壳热设备如图 1 所示,以球心为原点建立球坐标系,系统达到稳态时的温度分布  $T(r, \theta, \phi)$  满足拉普拉斯方程 (1) 式

要求,外壁与环境对流换热,满足 (2) 式,且外壁表面温度分布可由红外扫描仪获得,拟合为  $T_0(\theta, \phi)$  写为 (3) 式,内壁面可能破损,形状未知。如果半球壳底面 ( $\theta = \frac{\pi}{2}$ ) 满足第一类边界条件,写为 (4) 式;

如果半球壳底面 ( $\theta = \frac{\pi}{2}$ ) 上涂有绝热层,满足第二类齐次边界条件,写为 (5) 式:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} = 0 \quad (1)$$

$$\left[ k \frac{\partial T}{\partial r} + T \right] \Big|_{r=R_2} = T_0 \left( \theta, \phi \right) \quad \left( 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (2)$$

$$T(r, \theta, \phi) \Big|_{r=R_2} = T_0 \left( \theta, \phi \right) \quad \left( 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (3)$$

$$T \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = T_0 \left( \theta, \phi \right) \quad \left( \theta = \frac{\pi}{2} \right) \quad (4)$$

**作者简介:**康文秀 (1964 - ),女,副教授,硕士,从事物理教学及应用物理的研究,发表论文章数篇。

**收稿日期:** 2005-12-17

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=-\frac{R_2}} = 0 \quad \left( z = -\frac{R_2} \right) \quad (5)$$

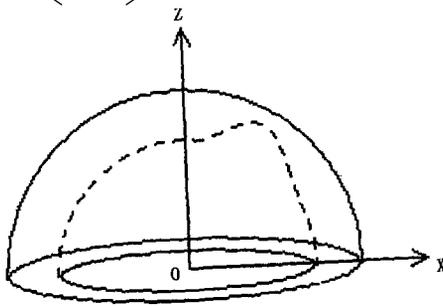


图 1 内壁破损的三维半球壳热设备

其中,  $k$  是热传导系数;  $\alpha$  是对流换热系数;  $T$  是环境温度。

作无量纲化变理替换  $\rho = \frac{r}{R_2}$  和  $u(\rho, \theta, \phi) =$

$\frac{T(\rho, \theta, \phi) - T}{T}$ , 外表面温度拟合结果  $T_0(\rho, \phi)$  无量

纲化为  $u_0(\rho, \phi) = \frac{T_0(\rho, \phi) - T}{T}$ ,  $B_i = \frac{R_2}{k}$  为毕渥

数, 以上各式改写为:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho^2 \frac{\partial u}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 u}{\partial \phi^2} = 0 \quad (6)$$

$$\left. \left( \frac{\partial u}{\partial \rho} + B_i u \right) \right|_{\rho=1} = 0 \quad \left( 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (7)$$

$$u(\rho, \theta, \phi) \Big|_{\rho=1} = u_0(\rho, \phi) \quad \left( 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (8)$$

$$u \Big|_{z=-\frac{R_2}} = 0 \quad \left( z = -\frac{R_2} \right) \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=-\frac{R_2}} = 0 \quad \left( z = -\frac{R_2} \right) \quad (10)$$

由 (6)、(7)、(8)、(9) 式组成的定解问题, 称为定解问题 I; 由 (6)、(7)、(8)、(10) 式组成的定解问题称为定解问题 II。

### 3 定解问题 I 的求解

定解问题 I 仅在上半球区域有定义, 而拉普拉斯方程分离变量形式解中含有的连带勒让德多项式  $P_l^m(\cos \theta)$  在整个球形区域上才是完备的, 为了能运用连带勒让德多项式作展开, 需要把定解问题延拓到整个球形区域, 补充定义下半球区域  $(\rho, \theta, \frac{\pi}{2})$  上

的边界条件, 为了满足半球壳底面  $(z = -\frac{R_2})$  上的第

一类齐次边界条件 (9), 需作关于  $z = -\frac{R_2}$  的奇延拓,

即把边界条件 (7)、(8) 式延拓到下半球区域:

$$\left. \left( \frac{\partial u}{\partial \rho} + B_i u \right) \right|_{\rho=1} = 0 \quad (0 \leq \theta \leq \pi) \quad (7)$$

$$u(\rho, \theta, \phi) \Big|_{\rho=1} = \begin{cases} u_0(\rho, \theta, \phi) & \left( 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \right) \\ -u_0(\rho, \pi - \theta, \phi) & \left( \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi \right) \end{cases} \quad (8)$$

由 (6)、(7)、(8) 组成的定解问题的解可由拉普拉斯方程在球坐标系中分离变量形式的通解:

$$u(\rho, \theta, \phi) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} \left( C_n \rho^n + D_n \frac{1}{\rho^{n+1}} \right) (A_n^m \cos m\phi + B_n^m \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta) \quad (11)$$

代入边界条件 (7)、(8) 解出所有展开系数<sup>[5,4]</sup>来得到, 且此解就是定解问题 I 的解。

### 4 定解问题 II 的求解

类似于定解问题 I 的求解, 定解问题 II 的求解也需要延拓到整个球形区域, 为了满足半球壳底面

$(z = -\frac{R_2})$  上的第三类齐次边界条件 (10), 把边界条

件 (7)、(8) 式作  $z = -\frac{R_2}$  的偶延拓:

$$\left. \left( \frac{\partial u}{\partial \rho} + B_i u \right) \right|_{\rho=1} = 0 \quad (0 \leq \theta \leq \pi) \quad (7)$$

$$u(\rho, \theta, \phi) \Big|_{\rho=1} = \begin{cases} u_0(\rho, \theta, \phi) & \left( 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \right) \\ -u_0(\rho, \pi - \theta, \phi) & \left( \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi \right) \end{cases} \quad (8)$$

由 (6)、(7)、(8) 组成的定解问题的解也可由拉普拉斯方程在球坐标系中分离变量形式的通解

(11) 式代入边界条件 (7)、(8) 解出所有展开系数<sup>[4]</sup>来得到, 且此解就是定解问题 II 的解。

### 5 应用与结论

上面已得到定解问题 I 和 II 的解, 对于新投入使用的设备, 已知其内壁没有缺陷, 代入位置坐标

$(\rho, \theta, \phi)$  值, 可得设备内部温度分布, 代入  $\rho = \frac{R_1}{R_2}$  即  $\rho$

$= R_1$  可得内壁温度分布; 对于较阵旧的设备, 内壁可能有缺陷, 在解中代入设备内表面的边界条件

(第一、第二或第三类), 可得破损内壁面的隐式曲面方程, 从而为三维半球壳热设备运行状态的实时诊断提供了可靠的理论依据。

### 参考文献:

- [1] 关荣华. 用红外定量诊断法监测热设备内部状态 [J]. 红外与激光工程, 2002, 31(2): 129 - 131.
- [2] 曹春梅, 张晓宏. Neumann 条件下三维内壁缺陷的红外热诊断 [J]. 激光与红外, 2005, 35(1): 29 - 30.
- [3] 关荣华. 非接触测温技术对圆筒设备内部温度的定量检测 [J]. 红外技术, 2002, 24(2): 46 - 48.
- [4] 曹春梅, 关荣华, 陈衡. 三维球壳内壁缺陷的红外诊断方案 [J]. 华北电力大学学报, 2002, 29(4): 98 - 100.
- [5] 梁昆森. 数学物理方法 [M], 第三版. 北京: 高等教育出版社, 1998, 313 - 316.