

## 两层介质圆筒热设备运行状态的红外监测

康文秀

(华北电力大学(保定)数理系,河北保定 071003)

**摘要:**对两层介质组成的长圆筒形管道热设备,利用红外测温技术获得设备外表面的温度分布,即可计算出设备内的温度分布,从而获得其内部的运行状态或内壁缺陷信息,实现热设备的实时监测。

**关键词:**红外测温;运行状态;对流换热

**中图分类号:**TN219      **文献标识码:**A

### Infrared therm-diagnosis to internal condition of the double-layer hollow cylinder-shaped heat equipments

KANG Wen-xiu

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

**Abstract:** The operating condition and inner defect can be given based on the outer surface temperature distribution obtained by scanning for the double-layer hollow cylinder-shaped heat equipment. So the real-time testing internal condition of heat equipment can be realized.

**Key words:** infrared temperature measurement; operating condition; convective heat transfer

#### 1 引言

红外检测由于其速度快、无损伤、测温范围广、可靠性高等独特的优势,成为重要的故障诊断和在线监测手段。近几年已有多篇文献讨论利用红外热像仪获得热设备外壁温度,结合材料的物性参数及传热反问题方法反推设备内壁温度或内壁缺陷<sup>[1-3]</sup>,但都限于对一层介质热设备的计算。而实际管道由于外包保温层等情况往往由两层介质组成,本文针对两层介质组成的长圆筒形管道热设备,计算表明,红外热诊断同样适用此类热设备。

工程中的许多输热管道都是圆筒形的,且管道的长度远大于其内、外半径,因此在工程计算中常常看作无限长,此类设备沿管道长度方向的温度变化可忽略不计,温度分布简化为二维。

#### 2 稳定传热的长圆筒形设备内部积垢的计算

两层介质 I 和 II 组成的长圆筒形管道设备如图

1 所示,两层介质分界面的半径为  $a$ ,外层介质的外半径为  $b$ 。用  $u(r, \varphi)$  表示在极坐标系下系统达到稳态时的二维温度分布  $T(r, \varphi)$  与环境温度  $T_\infty$  之差,即:

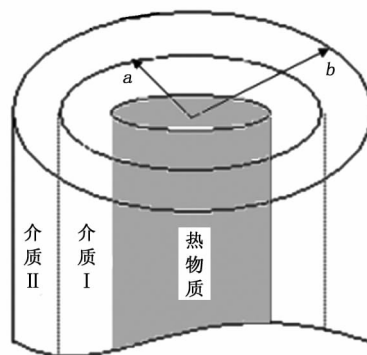


图1 长圆筒形管道

作者简介:康文秀(1964-),女,硕士,副教授,从事物理教学及应用物理的研究。E-mail: wxkangkang@sina.com

收稿日期:2009-01-10

$$u(r, \theta) = T(r, \theta) - T_\infty \quad (1)$$

内层介质 I ( $r < a$ ) 的  $u^I(r, \theta)$  和外层介质 II ( $a < r < b$ ) 的  $u^{II}(r, \theta)$  满足下列二维传热的定解问题:

$$\nabla^2 u^I = 0 \quad (2)$$

$$\nabla^2 u^{II} = 0 \quad (3)$$

$$(k_2 u_r^{II} + h u^{II})|_{r=b} = 0 \quad (4)$$

$$u^{II}|_{r=b} = f(\theta) \quad (5)$$

$$u^I|_{r=a} = u^{II}|_{r=a} \quad (6)$$

$$k_1 u_r^I|_{r=a} = k_2 u_r^{II}|_{r=a} \quad (7)$$

控制方程式(2)和式(3)为拉普拉斯方程<sup>[4]</sup>, 外壁面与环境  $T_\infty$  对流传热表示为式(4), 其中  $k_2$  为外层介质 II 的热传导系数,  $h$  是外层介质与环境的对流换热系数, 由红外扫描仪获得的外壁表面温度分布  $f(\theta) + T_\infty$ , 表示为式(5),  $r = a$  为两层介质的分界面, 在此满足衔接条件式(6)和式(7), 其中  $k_1$  为内外层介质 I 的热传导系数。

拉普拉斯方程式(2)和式(3)在极坐标系下的通解<sup>[4]</sup>为:

$$u^I = (C_0 + D_0 \ln r) + \sum_{m=1}^{\infty} r^m (A_m \cos m\theta + B_m \sin m\theta) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{r^m} (C_m \cos m\theta + D_m \sin m\theta) \quad (8)$$

$$u^{II} = (C'_0 + D'_0 \ln r) + \sum_{m=1}^{\infty} r^m (A'_m \cos m\theta + B'_m \sin m\theta) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{r^m} (C'_m \cos m\theta + D'_m \sin m\theta) \quad (9)$$

其中,  $C_0, D_0, A_m, B_m, C_m, D_m$  以及  $C'_0, D'_0, A'_m, B'_m, C'_m, D'_m$  为待确定的组合系数。

文献[5]已解出该导热反问题, 用红外扫描获得的外壁表面温度分布  $f(\theta) + T_\infty$  表示出式(8)和式(9)的各组合系数, 从而两层介质温度分布的级数解式(8)和式(9)成为已知。

### 3 应用与结论

#### 3.1 对于新投入使用的设备

已知其内壁没有缺陷, 且已知设备内层介质 I 的内半径为  $c$ :

1) 在式(8)中令  $r = c$  即可得设备内表面上的温度分布为  $T(r, \theta)|_{r=c} = u(r, \theta)|_{r=c} + T_\infty$ ;

2) 式(8)对  $r$  求导再令  $r = c$  即得设备内表面上的热流分布  $\frac{\partial u}{\partial r}|_{r=c}$ ;

3) 内层介质 I 与设备内的热物质间对流传热, 满足  $k_1 u_r^I|_{r=c} = h_0 (u^I|_{r=c} + T_\infty - T_0)$ , 其中  $h_0$  是内层介质 I 与热物质间的对流换热系数,  $T_0$  是热物质的温度分布, 测得  $h_0$ , 可由此式获得热物质的温度分布  $T_0$ 。

#### 3.2 对于较陈旧的设备

内壁可能有缺陷, 若已知管道内表面的边界条件, 可得破损内壁面的隐式曲面方程:

1) 若已知管道内表面为第一类边界条件, 内部流过温度为  $T_0$  的热流体, 令式(8)等于  $T_0$ , 即为破损内壁面的隐式曲面方程;

2) 若已知管道内表面为第二类边界条件, 热流密度为  $q$ , 令式(8)  $\frac{\partial u(r, \theta)}{\partial n}|_{\text{内壁面}} = q$ , 即为破损内壁面的隐式曲面方程;

3) 若已知管道内表面为第三类边界条件, 将式(8)代入  $(-k \frac{\partial u}{\partial n} - h_0 u)|_{\text{内壁面}} = h_0 (T_\infty - T_0)$ , 可得破损内壁面的隐式曲面方程。

上述计算表明, 利用红外测温技术获得长圆筒形热设备外表面的温度分布, 可得出两层介质组成的热设备内部运行状态参数或带有缺陷的内表面隐式曲面方程的无穷级数形式解析解, 可根据实际问题的精度要求, 取级数的前若干项, 对壁面离散化做数值计算, 从而实现此类热设备运行状态的实时监测。

#### 参考文献:

[1] 康文秀. 红外测温对圆筒设备内部温度及内壁缺陷的定量检测[J]. 激光与红外, 2006, 36(10): 948 - 949.  
 [2] 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.  
 [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] 梁昆森. 数学物理方法[M]. 第3版, 北京: 高等教育出版社, 1998.  
 [5] 康文秀. 圆筒热设备内部积垢的红外诊断[J]. 激光与红外, 2008, 38(2): 135 - 136.