

# 基于红外测温技术的圆筒壁厚测量\*

曹春梅

(华北电力大学 223 信箱, 河北 保定 071003)

摘要: 利用红外测温技术, 结合导热反问题求解, 给出了一种根据圆筒外壁温度计算筒壁厚的方法。经数值实验验证, 本方法可对薄壁高温圆筒状热设备的内壁减薄给出高精度的定量检测结果。

关键词: 红外测温; 导热反问题; 壁厚

中图分类号: TN24

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2005)06-0490-03

## Detection of Cylinder-shaped Equipment Wall Thickness Based on Infrared Temperature-measuring

CAO Chun-mei

(Dept. of Applied Physics, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China)

**Abstract:** By solving an inverse heat conduction problem, one method is given about to compute wall thickness of cylinder-shaped equipment based on the outer surface temperature. The conclusion can be drawn that this method can detect inner wall diameter or wall thickness of cylinder-shaped equipment.

**Key words:** infrared; temperature-measuring; inverse heat conduction problem; wall thickness

### 引言

在工程实践中, 常见圆筒形高温热设备, 这些设备的内壁长期处于高温、高压及流体腐蚀下的运行状态, 产生内腐蚀, 表现为原有壁厚变薄, 这种减薄可能是均匀的, 也可能是非均匀的。如何准确获得在役热圆筒设备的剩余层厚度这一参数, 对于确切了解设备目前的使用状态有重要的实际意义<sup>[1]</sup>。本文针对这一工程实际问题, 结合红外测温技术成熟稳定、灵敏度高、误差小、非接触、被动式、快速、安全测量等特点<sup>[2~3]</sup>, 给出了一种基于红外测温技术的圆筒热设备剩余壁厚的实时简易测量方法, 并对其进行了验证。

### 1 基本原理

图 1 为一简化单层圆筒形热设备横截面俯视图。其外壁半径为  $b$ , 向周围环境自然对流换热, 并且该面温度可由红外测温获得, 假设内壁与其内部高温流体介质接触良好而认为热平衡时具有相同的温度, 为一等温面, 但其半径  $a$  由于筒内高温、高压流体的冲刷、腐蚀等原因造成未知, 是需确定的量。假定圆筒内壁处于相同的工作状态, 且整个壁厚均匀减薄。这里是要根据红外测温得到的筒体外壁温度计算出内壁半径, 从而确定壁厚。

忽略管道和管内流体的轴向导热和温度变化, 若材料的物性不随时间变化, 且内部无热沉积, 达到稳定状态时, 可以用以下方程和定解条件来描述这个热传导问题<sup>[4]</sup>:

控制方程: 
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial u}{\partial r}) = 0 \quad (1)$$

定解条件: 
$$-k \frac{\partial u}{\partial r} = h(u - T_{\infty}) \quad r = b \quad (\text{对流散热条件}) \quad (2)$$

$$u = T_1 \quad r = b \quad (\text{附加的红外测温条件}) \quad (3)$$

$$u = T_0 \quad r = a \quad (\text{内壁等温条件}) \quad (4)$$

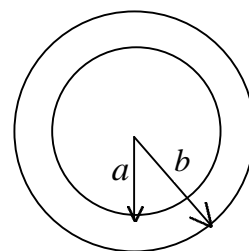


图 1 圆筒热设备俯视图

Fig.1 Vertical view of cylinder-shaped equipment

\* 收稿日期: 2005-05-13; 基金资助项目: 河北保定华北电力大学青年教师基金 (93210028)

式中:  $T_{\infty}$  为环境温度;  $T_0$  为内壁温度;  $T_1$  为利用红外测温技术测得的外壁温度;  $h$  为对流换热系数,  $k$  为圆筒外壁热传导系数,  $B_i = bh/k$  为毕奥数; 已知外壁半径  $b$ , 要求解的是由于内部流体冲刷、腐蚀等原因而造成的未知内壁半径  $a$ , 以确定壁厚。

式(1)的通解为:

$$u = A' + B' \ln r \quad (5)$$

利用外壁的对流散热条件(2)和附加的红外测温条件(3)可解出:

$$A' = T_1 + B_i(T_1 - T_{\infty}) \ln b \quad (6)$$

$$B' = -B_i(T_1 - T_{\infty}) \quad (7)$$

再利用内壁的等温条件(4), 有:

$$T_0 = A' + B' \ln a \quad (8)$$

联立(6)、(7)、(8)三式即可计算出内壁半径  $a$ , 从而得出壁厚  $b - a$ 。

## 2 方法验证

上述问题实际上是一个导热反问题<sup>[5~7]</sup>, 其解算方法是否可行, 要经过检验进行说明。检验方法是预先给定内壁半径  $a$ , 由相应的常规导热正问题即式(1)、(2)、(4)求得外壁温度值, 以该值模拟红外测温数据  $T_1$ , 并根据此数据用前面讨论反问题的求解方法反求内壁半径  $a$ , 进一步求出壁厚  $b - a$ 。

正问题的控制方程和定解条件如下:

$$\text{控制方程:} \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u}{\partial r} \right) = 0 \quad (9)$$

$$\text{定解条件:} \quad u = T_0 \quad r = a \quad (\text{内壁等温条件}) \quad (10)$$

$$-k \frac{\partial u}{\partial r} = h(u - T_{\infty}) \quad r = b \quad (\text{对流散热条件}) \quad (11)$$

满足定解条件的解为:

$$u = T_0 - \frac{T_0 - T_{\infty}}{\ln \frac{b}{a} + \frac{1}{B_i}} \ln \frac{r}{a} \quad (12)$$

$r = b$  时:

$$u = T_0 - \frac{T_0 - T_{\infty}}{\ln \frac{b}{a} + \frac{1}{B_i}} \ln \frac{b}{a} \quad (13)$$

取  $T_0 = 500^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ , 将表 1 中的物性参数(这些数据是参照文献[8]选取的)代入(13)式, 可解得外壁面温度为  $u = 73.2^{\circ}\text{C}$ , 利用此温度模拟红外测温温度值  $T_1$ , 并根据反问题的计算公式(6)、(7)、(8)可反求得内壁半径  $a$ , 从而求得壁厚  $b - a$ 。

为进一步说明本方法是切实可行的, 考虑实际应用时红外测温有一定的测温误差, 其中偏移误差是遇到的最坏情况, 为模拟测量误差, 在精确值上引入一定的偏差, 即用导热正问题的解(忽略数值计算误差)作为温度测量的真值, “假想”测量值用  $T_{\text{测}} = T_{\text{真}} + \Delta T$  引入, 测量误差取  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , 再利用反问题的计算公式求得内壁半径, 并与预定内壁半径相比较, 按式(14)所示:

$$E_a = (a_{\text{计算}} - a_{\text{预定}}) \times 100\% / a_{\text{预定}} \quad (14)$$

计算相对误差, 所得结果见表 2。

## 3 结论

本文给出了基于红外测温技术的圆筒壁厚测量方法, 数值检验的结果表明, 即使考虑了红外测温误差, 内壁半径的预定值和计算值可精确到毫米位上, 二者在工程要求允许的误差范围内高度吻合。分别改变热管道的

表 1 圆筒物性及几何参数

Table 1 Property and geometry parameter of the cylinder-shaped equipment

物性参数	$K/(\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}))$	0.13
	$H/(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}))$	10.45
几何参数	预定 $a/\text{mm}$	136.5
	已知 $b/\text{mm}$	216.5

表 2 测量误差对结果的影响

Table 2 The effect of measuring errors upon results

$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	-0.5	-0.2	0.0	+0.2	+0.5
$a_{\text{计算}}/\text{mm}$	136.58	136.63	136.66	136.69	136.73
$E_T/\%$	0.06	0.09	0.12	0.14	0.17

运行参数及几何参数, 利用上述方法进行数值计算, 还可得出如下结论: (1) 管道内高温介质温度越高, 计算出的结果与实际越符合; (2) 原有管壁越薄, 计算出的减薄后管道的内壁半径与实际越符合。因此利用本文方法可对薄壁高温圆筒状热设备的壁厚进行普查性测量, 依据测得的管壁厚这一参数, 及时在线了解设备目前的使用状态, 对内壁减薄损坏进行科学定量的评估, 从而为此类热设备的正常运行提供了可靠的依据, 以防止将来可能发生的故障, 并对管道运行和检修进行正确的规划, 同时也开拓了红外测温技术的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] 郑津洋, 马夏康, 尹谢平, 编著. 长输管道安全[M]. 北京: 化学工业出版社. 2004.
- [2] 江先阳, 石定河. 测温用黑体腔的理论研究[J]. 红外技术. 1998, 20(2): 18~20.
- [3] 郑兆平, 曾汉生, 丁翠娇, 刘占增, 蒋扬虎, 朱小平. 红外热成像测温技术及其应用[J]. 红外技术. 2003, 25(1): 96~98.
- [4] 程尚模. 传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社. 1988.
- [5] 陈 衡. 电力设备故障红外诊断[M]. 北京: 中国电力出版社. 1999.
- [6] 吴宗凡, 柳美琳, 张绍举, 等. 红外与微光技术[M]. 北京: 国防工业出版社. 1998.
- [7] 李世雄, 刘家琦, 编著. 小波变换和反演数学基础[M]. 北京: 地质出版社. 1994.
- [8] 李景田, 赵廷元, 编. 设备与管道保温[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 1984.

作者简介: 曹春梅 (1965-), 女, 河北保定华北电力大学动力工程系在读博士, 从事物理教学工作, 主要科研方向为红外热诊断在工程实际上的应用。