

文章编号 :1001-5078(2004)06-0452-03

管壁减薄的红外检测方法研究

范春利,孙丰瑞,杨立

(海军工程大学船舶与动力学院 307 教研室,湖北 武汉 430033)

摘要:对红外检测管壁减薄建立了物理和数学模型,提出了通过测量外壁面温度计算管壁厚度的计算方法。通过红外热像仪的测温误差计算公式,引进了安全系数,提高了检测管壁减薄的可靠性。分析发现:通过测量管道外壁面的温度变化,可以判断细微的管壁厚度变化。在相同的外壁面温度和相同流体温度条件下,管壁当量导热系数越低或管内流体的导热系数越低,管道减薄越严重。

关键词:红外无损检测;管壁减薄;安全系数

中图分类号: TN219; TN206

文献标识码: A

Study on Detection of Pipeline Wall Thinning by Infrared NDT

FAN Chun-li, SUN Feng-rui, YANG Li

(Faculty 307, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: A physical and mathematical model is presented on detection of pipeline wall thinning by infrared NDT, and a calculation method is given about how to compute the inner diameter of the pipeline wall through detection of the temperature distribution of pipeline surface. In order to improve the reliability of detection, a safety coefficient is employed which is deduced from analyzing the error of temperature measurement of infrared imager. The conclusion can be drawn that the temperature difference on the outer surface of the pipeline can reflect the nice thinning of pipeline wall. The lower the thermal conductance or effective thermal conductance of pipeline wall and fluid in the pipeline, the more seriously the pipeline wall is thinned when both the temperature of fluid and that of the wall are same.

Key words: infrared NDT; pipeline thinning; safety coefficient

1 引言

红外检测由于非接触、无损伤、可靠性高等独特的优势日益成为一种广受欢迎并且行之有效的无损检测技术。其在管道检测方面的应用十分广泛,它在化学工厂管道、给水管道、蒸汽管道以及天然气管道等等的检测中起着十分重要的作用。文献 [1] 通过红外检测技术研究了高温管道的保温状态及热损失;文献 [2~4] 研究了换热器管的热传导效率;文献 [1] 将红外检测技术应用于对复合材料管道的缺陷检测,证明了红外检测技术的独特优势。

本文针对管道内壁由于长期化学腐蚀等原因引起的管壁减薄或管道内壁脱落建立了分析模型,提出了通过检测管道外壁面的温度,计算管道厚度的计算方法。通过对红外热像仪测温误差的分析公式,在计算管道厚度的时候,引入了安全系数,提高了管道壁厚检测的可靠性。

2 检测管道的物理模型

管道模型示意图如图 (1) 所示,管道的内径为 r_1 , 外径为 r_0 ; 内壁温度为 t_1 ; 外壁温度为 t_0 , 管道内流有均匀流体, 流体的温度为 t_f ;

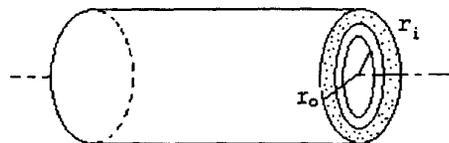


图 1 管道结构示意图

本文对管道模型做如下假设:

- 1) 管道的内壁减薄均匀;
- 2) 管壁内为一维稳态导热,忽略管壁轴向导热;
- 3) 忽略流体温度的轴向变化;

作者简介:范春利(1978-),男,海军工程大学博士研究生,主要研究方向:传热传质与热流体力学及其应用,热诊断。E-mail: chlfan @ 163.com

收稿日期:2004-03-19

4) 内部流体为湍流流动且流动状态不随管道内径的变化而变化。

3 红外热像仪的测温原理及误差计算公式

红外热像仪测温是靠接收被测物体表面发射的辐射来确定其温度的。实际测量时,热像仪接收到的有效辐射包括 3 部分:目标自身辐射、反射的环境辐射以及大气辐射。故热像仪所指示的温度实际上是目标温度、环境温度以及大气温度等参数的函数:

$$f(T_r) = \epsilon_a [f(T_0) + (1 - \epsilon_a) f(T_u)] + \epsilon_a f(T_a)$$

其中 T_0 为被测物体表面的温度, T_u 为环境温度, T_a 为大气温度, ϵ_a 为目标的发射率, ϵ_a 为大气透射率。

$$\text{由 } f(T) = CT^n$$

可以得到目标温度的计算公式:

$$T_0 = \left\{ \left[\frac{T_r^n}{\epsilon_a} - (1 - \epsilon_a) T_u^n - \frac{T_a^n}{\epsilon_a} \right] / \epsilon_a \right\}^{1/n}$$

其中, n 的值取决于所用热像仪的工作波段^[5]。由上式可以得到红外热像仪测温的误差计算公式:

$$\left| \frac{dT_0}{T_0} \right| = \left\{ \begin{array}{l} - \left[\frac{T_r^n}{\epsilon_a} - (1 - \epsilon_a) T_u^n - \frac{T_a^n}{\epsilon_a} \right] d / + T_u^n d + \left(\frac{T_r^n}{\epsilon_a} - T_r^n \right) d / \epsilon_a^2 \\ - \frac{T_a^n}{\epsilon_a} d / \epsilon_a + n T_r^{n-1} d T_r / \epsilon_a - (1 - \epsilon_a) n T_u^{n-1} d T_u - n T_a^{n-1} d T_a / \epsilon_a \end{array} \right\} / (n T_0^n) \quad (1)$$

其中, ϵ_a 为被测物体的吸收率。

4 壁厚的计算方法

4.1 计算公式

对于管内强迫对流换热,采用最为广泛使用的 Dittus-Boelter^[6] 关联公式:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (2)$$

式中当管道加热流体时 $n = 0.4$, 冷却流体时 $n = 0.3$, 式中采用流体平均温度 t_f 为定性温度, 管内径 D_i 为定性长度, 式中三个无量纲参数的定义分别为:

$$Nu = \frac{h D_i}{\lambda} \quad Re = \frac{v D_i}{\nu} \quad Pr = \frac{c_p \rho \nu}{\lambda}$$

其中 h 为流体和管道的对流换热系数; λ 为流体的导热系数; ν 为流体的黏度; v 为流体的速度; c_p 为流体的热扩散系数,

通过方程(2)可以得到求解对流换热系数的方程:

$$h = f(D_i, v) \quad (3)$$

则流体和管道的对流换热量为:

$$q = 2 r_i h (t_f - t_i) \quad (4)$$

根据质量守恒有:

$$v_1 D_1^2 = v_2 D_2^2$$

其中, v_1, D_1 分别为管道内流体的原始流速与管道内径, v_2, D_2 分别为减薄以后流体流速以及管道内径。

由圆筒壁的稳态导热微分方程:

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dt}{dr} \right) = 0$$

得到管壁的导热热流密度为:

$$q = \frac{2 \pi (t_i - t_0)}{\ln(r_0/r_i)}$$

考虑到在不同的环境下 t_0 的测量误差,这里引进了一个安全系数,所以上式变为:

$$q = \frac{2 \pi (t_i - t_0)}{\ln(r_0/r_i)} \quad (5)$$

管道外壁面 and 环境的换热量为:

$$q = 2 \pi r_0 h_0 (t_0 - t_a) \quad (6)$$

其中, h_0 为管道外壁面 and 环境的换热系数, t_a 为环境温度。

4.2 安全系数的取值

热像仪在不同的工作环境条件下,测温的精度也大不相同。由于测温误差的影响可能会对红外检测管道壁厚带来很大的偏差,使得不能对管道的工作状态进行准确的判断,延误了安全措施的实施,从而可能带来安全事故。所以本文在计算壁厚时,在所测温度前添加了一个安全系数:

$$T_0 = (1 + \beta) T_0' \quad \text{其中 } \beta \text{ 为工作环境、物体发射率等因素引起的测温误差,即:}$$

$$\beta = \left| \frac{dT_0}{T_0} \right|$$

在进行测温计算之前,要先对所工作的环境有所了解。对各种参数的值以及误差值进行估计,然后根据方程(1)求得 β ,从而得到安全系数 β 。

4.3 数值计算过程

计算管壁厚度的计算过程如图(2)所示,具体步骤如下:

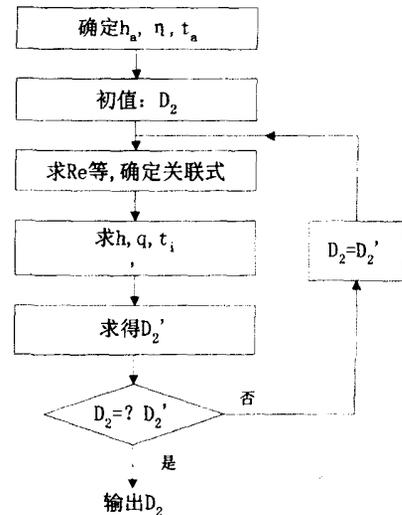


图 2 计算 D_2 的流程图

1) 根据热像仪所工作的环境,确定环境温度等参数,判断可能的误差,根据式(1)确定安全系数的值。

2) 设管壁内径的初值。

3) 由管内液体流速等确定 Re 的值,从而判断流体是层流流动还是湍流流动,从而确定所需要的对流换热关联式。从而根据方程(3)得到对流换热系

数。

4) 根据方程(6)得到换热热流,从而依据方程(4)得到管壁内表面的温度值。

5) 由方程(5)求得新的管壁内径值,并判断是否和初值相等,如果相等则得到管壁的厚度,否则将此值设为内径的初值,然后返回到3)。

5 算例及计算结果分析

图3所示为外径为0.4m,内径为0.2m的灰铸铁输水管道减薄的模拟计算结果,水温为70,流速为3m/s。由图可见,当外壁面温度为66时,计算的内径恰好为0.2m,随着外壁面的温度的升高,管道的内径几乎线性增加,管壁的厚度逐渐减小。当外壁面温度为69时,壁面的厚度由原来的100mm变为70mm。

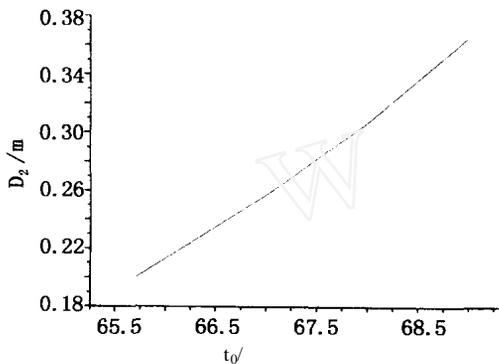


图3 管道内径随外壁面温度的变化曲线

当管道内外直径一定,与图3管道相内,但管道由金属管道和保温材料组成或其它非金属材料组成时,管道的当量导热系数各不相同。图4为管道内径随管壁的当量导热系数的变化关系。管内流体为水,温度恒定在70。管外壁面温度为65。由图可知,外壁温升一定时,管道的当量导热系数越低管道的内径越大,则管道内壁减薄越严重。

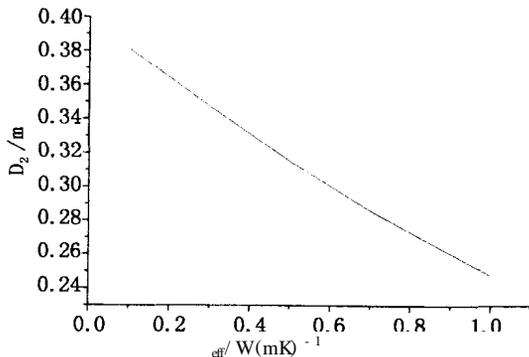


图4 管道内径随管壁当量导热系数的变化曲线

图5为管道内径值随不同流体的当量导热系数的变化曲线。管道的其它参数不变。在相同的温升条件下,流体的导热系数越小,管壁减薄的越明显。并且在导热系数为0.4W/mK以下,管壁厚度变化对流的导热系数的变化非常敏感,0.5W/mK以

后,趋于平缓。

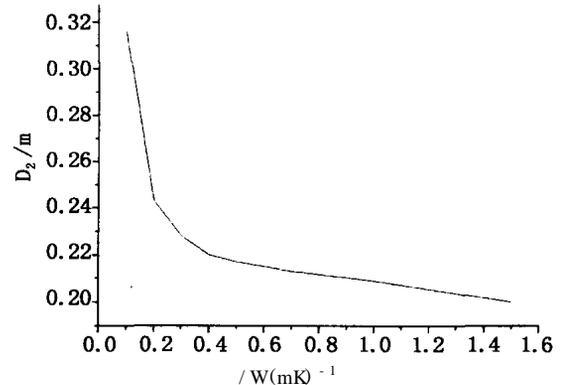


图5 管道内径随流体导热系数的变化曲线

6 结论

本文从对流换热及导热方程出发,提出了计算管壁减薄的红外检测计算方法,通过引入安全系数,消除了检测目标发射率、环境温度等因素造成的测温误差对管道安全性判断的影响。提高了红外检测的可靠性。本方法可以根据不同的工作条件以及不同的检测目标在工程上直接应用。本方法同样适用于其它管道形状以及螺旋管等,只需将关联式(2)的Nu数后再乘以一个修正系数即可^[6]。此外,如果管道内流体为受迫层流流动,只需将关联式(2)改为层流换热关联式。通过数值计算,主要可以得到如下结论:

- 1) 通过管道外壁面的温度变化可以判断细微的管道的厚度的变化。
- 2) 在相同的外壁面温度条件下,管壁当量导热系数越低,管道减薄越严重。
- 3) 在相同的外壁面温度条件下,流体的当量导热系数越低,管道减薄越明显。

参考文献:

- [1] Wurzbach Richard N, Seith David A. Infrared monitoring of power plant effluents and heat sinks to optimize plant efficiency[A]. Proceedings of SPIE[C]. Orlando:2000. 24 - 27.
- [2] Rozenblit R, Simkhis M, et al. Heat transfer in horizontal solid-liquid pipe flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2000, 26(8): 1235 - 1246.
- [3] Yamawaki Shigemichi, Yoshida Toyooki, et al. Fundamental heat transfer experiments of heat pipes for turbine cooling[A]. Proceedings of the International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exposition[C]. Orlando:1997. 2 - 5
- [4] Qin Yuwen, Bao Naikeng. Thermographic nondestructive testing technique for delaminated defects in composite structure[A]. Proceedings of SPIE[C]. Orlando:1995.
- [5] 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J]. 红外技术, 1999, 21(4): 20 - 24.
- [6] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. (第三版), 北京: 高等教育出版社, 1998.