

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.11.007

# 埋地管道气密性试验过程温度场的理论模型及试验研究

杜斌康, 卢志明, 卢 沛, 朱沈瑾, 石来民  
(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**为得到埋地管道气密性试验过程管道内介质和管外壁温度的关系式,降低管内温度测量不准确对气密性试验结果的影响,建立了埋地管道气密性试验过程温度场的物理模型和数学模型,全面考虑了埋地管道对土壤温度场的水平影响范围,分析了土壤恒温层深度及温度、土壤自然温度场及大气温度突变等对埋地管道温度场的影响,模拟得到了埋地管道气密性试验过程的温度场分布,拟合得到了管内外温度的关系式。根据《城镇燃气输配工程施工及验收规范》对埋地管道进行了气密性试验,对试验得到的温度数据进行了处理,拟合得到了管内外温度的关系式。将试验与模拟得到的管内外温度关系式和实际测得的管内外温度进行了全面比较。研究表明,数值模拟的结果准确合理,且试验得到的计算公式具有较高的可靠性与准确性,有利于提高管道气密性试验的准确度。

**关键词:**埋地管道;气密性试验;温度场;理论模型

**中图分类号:**TH122;TE969;TK521

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2013)11-1329-06

## Theoretical model and study of temperature field for buried steel pipeline during air-tight test

DU Bin-kang, LU Zhi-ming, LU Pei, ZHU Shen-jin, SHI Lai-min

(Mechanical Engineering College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Aiming at getting the formula of the temperature inside and outside the buried PE pipe during the air-tight test, a 1/2 physical and mathematical model was proposed, and the finite element software was applied to simulate the temperature distribution during the test considering the horizontal and vertical direction boundary conditions, the natural temperature field of the earth and the influence of the atmosphere temperature abrupt changing. Another computational formula was fitted based on the temperature data achieved by the air-tight test. According to the comparison with the temperature data getting from the air-tight test, the results indicate that the simulation is accurate and rational, and the formula fitted based on the air-tight test is proved to be reliable and accurate.

**Key words:** buried pipeline; air-tight test; temperature field; theoretical model

### 0 引 言

运输是天然气供应链中的重要环节,在很大程度上影响着天然气供应和消费的经济性。管道作为五大运输工具之一,在运输液体、气体、浆液等方面具有独特的优势。世界上已建有各种管道  $1.50 \times 10^6$  km。我国的管道运输业发展很快,到 20 世纪末,我国输油、输气管道总长度已超过  $6 \times 10^4$  km,管道运输被认为是传

输能量最为安全、经济的方法<sup>[1]</sup>。

为避免管道运输过程中发生泄漏而引起爆炸、环境污染、人身事故,保障人身财产和设备环境安全,有关部门在管道投产前必须对管道、阀门、焊缝等进行气密性试验。因此,管道的气密性检测是管道生产管理中的重要环节,可以防患于未然。

然而气密性试验过程中管内温度难以准确测量,本研究通过准确地建立埋地管道土壤温度场的物理模型,

数值模拟得到不同时刻的温度场分布,预测管内温度随时间的变化情况以及温度场达到稳定时所需要的时间,对埋地管道气密性试验过程如何获得稳定的温度测量结果具有指导作用;再通过试验研究,获得管内外温度随时间的变化数据,并拟合管内外温度在气密性试验过程中的关系式,与数值模拟得到的关系式进行比较,以验证理论模型和模拟结果的准确性;气密性试验时,通过测量管外温度,将管外温度代入管内外温度关系式计算管内温度,从而提高管道气密性试验的精度,降低误判和漏判的概率,减少不必要的资源浪费和安全隐患,对埋地管道安全投产和运行具有十分重要的意义和价值。

## 1 埋地管道温度场的理论模型

规格为  $\phi \times \delta$  埋地管道,埋于地下  $h_1$  处,土壤温度为自然分布,管道材质为聚乙烯管(PE),密度为  $\rho_c$ ,比热容为  $c_c$ ,导热系数为  $\lambda_c$ ,土壤与试验气体物性由现场实验测量获得,气密性试验时间为 24 h。

### 1.1 物理模型的建立

管道埋设于水平方向,长度为 25 m,试验时,埋地管道内部传热属于定容降温过程<sup>[2]</sup>,试验稳定后,由于试验气体的分子运动,埋地管道内温度分布可认为均匀分布,因此,可将模型简化为二维模型。埋地管道热传导对周围土壤温度场的影响局限在一个有限的范围内,因此,又可将无限大土壤区域简化为有界矩形区域,即距离管道水平一定远处 ( $\pm l$ ),受管道温度场影响非常小,可作绝热层条件,距地面一定深处 ( $h$ ),温度终年变化小于  $1^\circ\text{C}$ ,可认为是恒温层<sup>[3]</sup>。又埋地管道温度场关于管道中心左右对称,模型可再简化为二维对称模型,埋地管道温度场物理模型简图如图 1 所示。

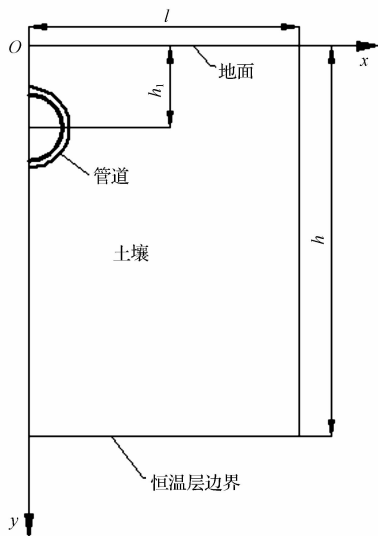


图 1 埋地管道温度场物理模型简图

### 1.1.1 温度场在水平方向的影响范围 $l$ 及边界条件

管道内介质含热量越大,管道对土壤温度场的水平方向影响范围越大。距埋地管道截面水平方向一定距离处对管道热量的耗散影响非常小,可认为是绝热的,即该处的边界条件为绝热边界条件<sup>[4]</sup>:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

水平影响范围的取值与当地土壤性质、管道介质、温度等有关,文献[5-6]取水平方向影响范围为 5 m,文献[7]的取值为 3 m。

### 1.1.2 恒温层深度 $h$ 、温度 $T_h$ 及边界条件

土壤温度是管道设计、施工及运行管理的基础参数,恒温层温度及深度是土壤温度场的重要指标。土壤温度随着大气温度年周期变化而变化,至一定深度处,地温变化渐趋消失,在此深度上,地温常年保持恒定,这一地温常年基本保持恒定不变的层叫做恒温层。恒温层深度随着地域纬度变化而变化,其计算公式为:

$$h = \frac{\ln[\phi \cdot (T_{\text{amax}} - T_{\text{am}}) / \varepsilon]}{\sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}}} \quad (2)$$

式中: $\phi$ —常量; $T_{\text{amax}}$ —大气最高日平均气温, $^\circ\text{C}$ ; $T_{\text{am}}$ —大气年平均温度, $^\circ\text{C}$ ; $\varepsilon$ —土壤恒温层温度振幅, $^\circ\text{C}$ ; $a$ —土壤的导温系数, $\text{m}^2/\text{s}$ ; $\tau_0$ —年周期时间, $\text{s}$ 。

文献[8]对 4 座城市的恒温层温度与气象数据提供的年平均气温进行了对比,研究表明,土壤恒温层温度与当地年平均气温绝对差值在  $1.5^\circ\text{C}$  内。

恒温层温度可通过钻孔探测法进行测量,但钻孔探测需要长期的观测才能得到准确恒温层温度。恒温层温度也可通过计算公式进行计算:

$$T_h = (T_{1.6-3.2} + 0.2) \pm 0.006\Delta h \quad (3)$$

式中: $T_{1.6-3.2}$ —该地区地表下 1.6 m ~ 3.2 m 处的多年平均地温, $^\circ\text{C}$ ; $\Delta h$ —与恒温层的高度差,m。

恒温层的边界条件为绝热边界条件,即:

$$T = T_h \quad (4)$$

### 1.1.3 土壤的自然温度场及大气温度突变对土壤温度场的影响

土壤自然温度场是随着大气温度的年周期性变化而做周期性变化的<sup>[9]</sup>,土壤自然温度场的计算可以简化为第三类边界条件下的半无限大物体一维周期性导热问题,土壤自然温度场的解析表达式<sup>[10]</sup>为:

$$T(y, \tau) = T_{\text{am}} + (T_{\text{amax}} - T_{\text{am}}) \cdot \phi \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{a \cdot \tau_0}} x\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi\tau}{\tau_0} - \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot \tau_0}} x - \psi\right) \quad (5)$$

$$\varphi = \left[ 1 + 2 \frac{\lambda}{\alpha_2 \sqrt{a\tau_0}} \sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}} + 2 \left( \frac{\lambda}{\alpha_2 \sqrt{a\tau_0}} \sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}} \right)^2 \right]^{-0.5} \quad (6)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{1}{1 + \frac{\alpha_2}{\lambda} \sqrt{\frac{a\tau_0}{\pi}}} \right) \quad (7)$$

式中:  $T(y, \tau)$ — $\tau$  时刻  $y$  深度处的土壤温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau$ —距离最高日均气温的时间,  $\text{s}$ ;  $y$ —土壤深度,  $\text{m}$ ;  $\lambda$ —土壤导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $\alpha_2$ —地表与大气间的对流换热系,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

但实际大气温度并不严格按周期变, 当有寒流或暖流通过时, 大气温度就会有突变。气温突变持续时间越长, 对土壤温度场的影响程度越大; 土壤深度越深, 气温突变对其影响程度就越小。大气温度日变化对距离地表  $0.4 \text{ m}$  以内的土壤温度有较大的影响, 而对  $0.4 \text{ m}$  以下的土壤温度影响不大, 更深处土壤只受月、年气温波动的影响。当气密性试验过程中没有较大的气温突变时, 可以忽略大气温度变化对埋地管道传热的影响。

### 1.2 埋地管道温度场的数学模型

传热的 3 种基本方式为热传导、热辐射和热对流, 本研究模型的传热方式主要是热传导和热对流。热传导是指不同温度的物体接触时所发生的热能传递现象, 土壤、管壁以及土壤与管壁之间的传热方式为热传导; 热对流是指流体流过另一物体表面时所发生的热交换, 管壁与空气、土壤与大气之间的传热属于热对流。热传导与热对流的导热微分方程式如下<sup>[11]</sup>。

(1) 土壤热传导:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_t \frac{\partial T_t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_t \frac{\partial T_t}{\partial y} \right) = \rho_t c_t \frac{\partial T_t}{\partial \tau} \quad (\tau > 0) \quad (8)$$

(2) 管壁热传导:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial y} \right) = \rho_c c_c \frac{\partial T_c}{\partial \tau} \quad (\tau > 0) \quad (9)$$

(3)  $r = R$  处, 即管壁与介质之间的热对流:

$$-\lambda_c \left( \frac{\partial T_c}{\partial r} \right)_{r=R} = \alpha (T_c|_{r=R} - T_a) \quad (10)$$

(4)  $r = R + \delta$  处, 即土壤与管壁之间热传导:

$$\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial r} \Big|_{r=R+\delta} = \lambda_t \frac{\partial T_t}{\partial r} \Big|_{r=R+\delta} \quad (11)$$

式中:  $T_t$ —任意时刻土壤温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda_t$ —土壤导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $\rho_t$ —土壤密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_t$ —土壤比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $T_c$ —任意时刻管壁温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda_c$ —管子导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $\rho_c$ —管子密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_c$ —管子比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $T_a$ —任意时刻管内气体温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.3 埋地管道温度场的数值模拟结果

以规格为  $\phi 160 \times 14.5$  的 PE 埋地管道为例进行模拟计算, 试验时打入的空气温度为  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 地下恒温层温度为  $16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 地表温度为  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 管道、土壤及空气的物性参数如表 1 所示。

表 1 PE 管道、空气及土壤的物性参数

材料	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	热导率/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	比热容/ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
空气	1.619	0.024 5	1 005
PE	960	0.056	2 300
土壤	1 800	1.512	1 500

本研究通过 ANSYS 有限元软件建立埋地管道及土壤温度场的计算模型, 将土壤恒温层、土壤上表面及水平方向  $l$  截面设置为绝热边界条件, 土壤上表面施加的温度载荷为  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 恒温层土壤施加的温度载荷为  $16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 其他位置处的土壤温度沿深度呈线性分布, 管道内壁设置为对流边界条件。运用 ANSYS 软件的热分析功能, 对埋地管道气密性试验过程  $24 \text{ h}$  内的温度场分布进行模拟, 模拟结果如图 2 所示。

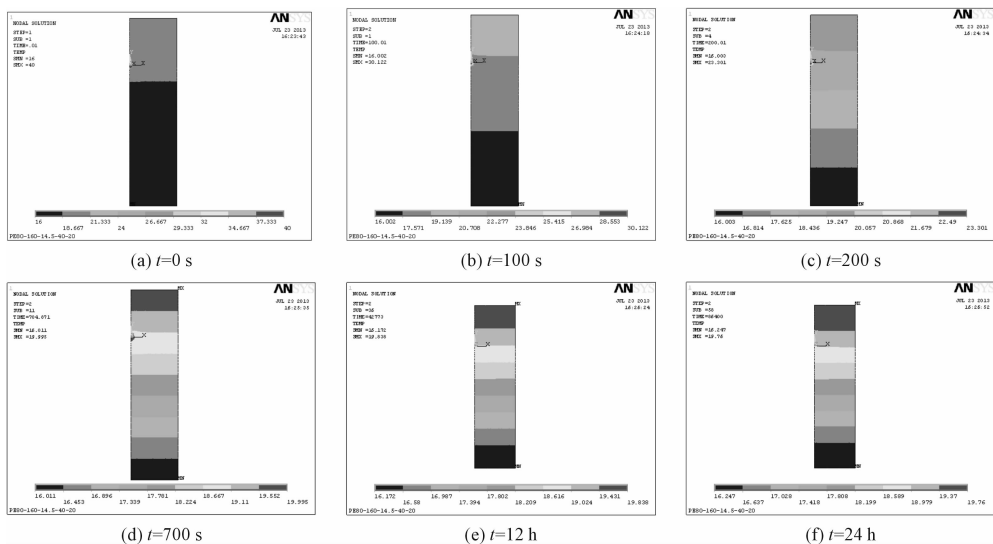


图 2 不同时刻的温度场的分布情况

由图 2(a)可以看出,试验初始时刻,土壤温度场呈自然分布,温度场最高温度在管道中心,为 40 ℃;随着传热过程的进行,管内温度逐渐降低,100 s 和 200 s 后,最高温度在管道中心,温度分别降至 30 ℃ 和 23 ℃;700 s 后,温度场最高温度出现在土壤上表面,12 h 和 24 h 时,温度场分布与 700 s 时基本相同,说明土壤温度场在 700 s 后基本达到稳定。

根据模拟结果得到管道中心(A)和管道外壁(B)的温度随时间的变化曲线如图 3 所示。

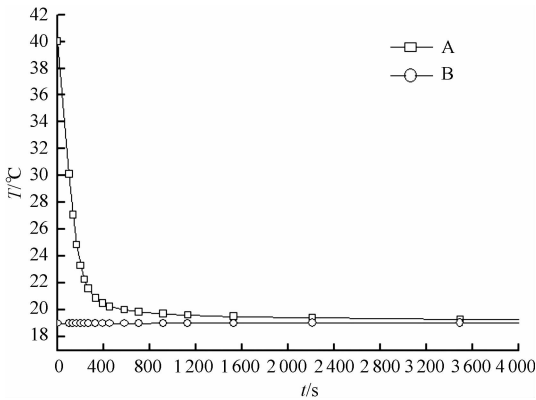


图 3 管道中心和管道外壁温度随时间的变化曲线

由图 3 可以看出,管道中心的温度在试验刚开始阶段下降较快,400 s 后管道中心温度接近管道外壁温度,管道中心温度下降速度减缓。随着传热过程的进行,管道外壁温度缓慢上升,逐渐接近管道中心温度,在 1 600 s 后,两条温度曲线基本平行。取 1 600 s 后的管内外温度数据进行拟合,得到管内外温度的拟合曲线及关系式如图 4 所示。

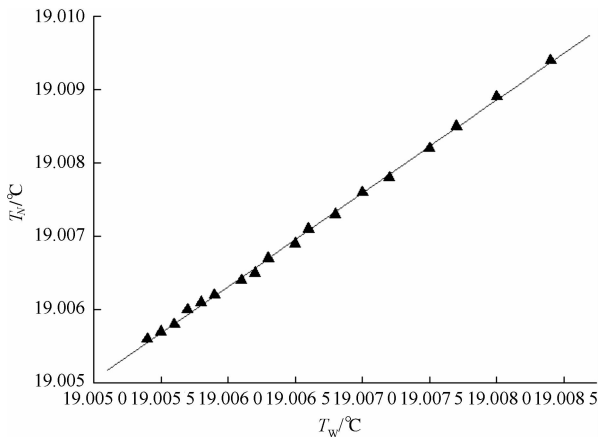


图 4 管内、外温度拟合曲线

查看 Origin 拟合的结果,得到数值模拟的管内、外温度拟合的方程为:

$$T_{M1} = 1.270\ 08T_{W1} - 5.132\ 85 \quad (12)$$

相关系数:  $R_s = 0.999\ 44$ , 标准差  $S_D = 0.000\ 039$ ,

方差  $S^2 = 1.52 \times 10^{-9}$ 。

## 2 温度场的试验研究及与模拟结果的比较

根据 CJJ33—2005《城镇燃气输配工程及验收规范》中规定,气密性试验应在强度试验合格、管线回填后进行。气密性试验稳压的持续时间应为 24 h,每小时记录应不少于 1 次,当修正压力降小于 133 Pa 为合格。修正压力降应按式确定:

$$\Delta P = (P_1 + P_{a1}) - (P_2 + P_{a2}) (273 + T_{a1}) / (273 + T_{a2}) \quad (13)$$

式中:  $\Delta P$ —修正压力降, Pa;  $P_1, P_2$ —试验开始和结束时的管内气体压力, Pa;  $P_{a1}, P_{a2}$ —试验开始和结束时的大气压力, Pa;  $T_{a1}, T_{a2}$ —试验开始和结束时的管内介质温度, ℃。

正确计算修正压力降的关键在于准确测量管内温度,而管内温度随着温度场的变化而变化,难以准确测量,工程上常用管外壁温度代替管内温度;而实际上,管内温度与管外壁温度并不相等,管内温度略高于管外壁温度,导致修正压力降的计算存在误差,引起误判和漏判。因此,本研究通过实验测量管道气密性试验过程管内、外不同时刻的温度,拟合管内温度的计算经验公式,并与数值模拟的结果进行比较,验证管内外温度计算关系式的准确性。埋地管道气密性试验时,通过测量管外壁温度,根据管内外温度关系式计算管内温度,再代入修正压力降计算公式,得到较为准确的修正压力降,从而提高气密性试验的准确度和可靠性。

### 2.1 试验管道的布置

埋地管道试验深度为地下 1 m,试验场所为一南方城市,管道规格为  $\phi 160 \times 14.5$ ,材料为 PE80,无防腐层,管道长度为 25 m,在管道上安装一个压力传感器,在外壁安装 8 个温度传感器,内壁同位置安装 8 个温度传感器,温度传感器布置如图 5 所示。管道中间段温度分布较为均匀,温度传感器分布较疏,管道两端温度受到无限大土壤的影响,温度分布较为不均,温度传感器排列较密。

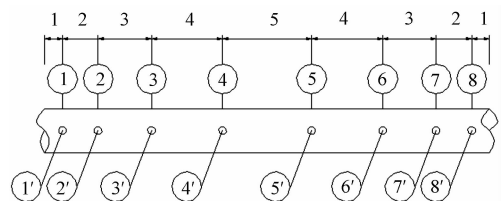


图 5 管内、外测温点布置简图

## 2.2 试验步骤

### (1) 管道敷设。

在埋地管道安装温度及压力传感器后,进行填土,土宜采用天然砂,埋深为 1 m,保证埋管水平埋设。

### (2) 打压。

根据 CJJ33—2005《城镇燃气输配工程及验收规范》,设计压力小于 5 kPa 时,试验压力应为 20 kPa;设计压力大于或等于 5 kPa 时,试验压力应为设计压力的 1.15 倍,且不得小于 0.1 MPa。

试验时的升压速度不宜过快。对设计压力大于 0.8 MPa 的管道试压,压力缓慢上升至 30% 和 60% 试验压力时,应分别停止升压,稳压 30 min,并检查系统有无异常情况,如无异常情况继续升压。

### (3) 稳压。

打压时,经压缩机压缩的空气温度高于大气温度,为消除压缩空气热量的影响,应稳压一定时间后进行数据采集。

### (4) 数据采集与记录。

经稳压后,每隔 30 min 记录一次管内、外温度和压力数据,气密性试验时间约为 24 h。

## 2.3 试验结果及数据处理

本研究分析温度传感器采集的管内、外温度数据,将具有明显误差的数据剔除。温度数据的记录时间间隔约为 30 min,24 h 的数据约为 45 组,一个测温点一个月所记录的数据约为 1 350 组。若将 8 个测温点的所有数据进行拟合,不仅工作量庞大,而且拟合结果误差也较大。因此,本研究取 8 个测温点 5 天的平均温度作为一个数据点,如将 3 月 1 日~3 月 5 日 8 个测温点的管内、管外温度分别取平均数,得到管内平均温度为 10.05 ℃,

表 2 埋地管道温度数据测量结果

序号	外温 $T_w$ /℃	内温 $T_N$ /℃	序号	外温 $T_w$ /℃	内温 $T_N$ /℃
1	9.84	10.36	12	11.15	11.56
2	9.52	9.99	13	12.21	12.59
3	9.05	9.57	15	14.27	14.61
4	9.15	9.64	14	12.96	13.33
5	9.15	9.65	16	14.87	15.20
6	9.25	9.72	17	15.63	15.95
7	9.17	9.61	18	16.35	16.65
8	9.22	9.65	19	19.47	19.90
9	9.35	9.82	20	18.84	19.29
10	10.03	10.49	21	16.23	16.57
11	10.54	10.97			

管外平均温度为 9.78 ℃,将(9.78,10.05)作为拟合的数据点,温度数据的处理结果如表 2 所示。

本研究将所有温度数据通过 Origin 软件拟合,得到温度数据的散点图如图 6 所示。由图 6 可以看出,温度数据点基本在一条直线上,因此笔者用一次函数进行拟合,数据点基本上在拟合的直线上。

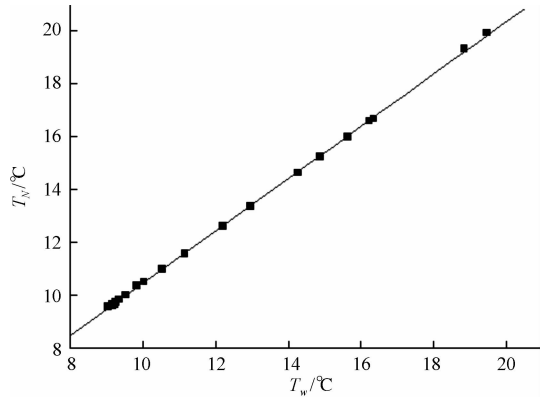


图 6 温度数据散点分布及一次拟合结果

查看 Origin 拟合的结果,得到管内、外温度拟合的方程为:

$$T_{N2} = 0.98775T_{w2} + 0.57237 \quad (14)$$

相关系数  $R_s = 0.99975$ , 标准差  $S_D = 0.05505$ , 方差  $S^2 = 0.00303$ 。

## 2.4 试验与模拟结果对比分析

由图 3、图 4 可以看出,数值模拟的结果主要集中在 19 ℃~21 ℃,拟合的关系式在该温度范围内计算具有较高准确度。因此,本研究取试验测得的 19 ℃~21 ℃范围内的几组管内外温度,将管外壁温度分别代入数值模拟和试验得到的关系式计算得到管内温度,并与实际测得的管内温度进行比较,分析两者的误差。试验与模拟的比较结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出,通过数值模拟和试验得到的管内、外温度关系式计算的管内温度  $T_{N1}$  和  $T_{N2}$  相近,且  $T_{N1}$  和  $T_{N2}$  均大于实际的管外温度  $T_w$ ,计算结果符合实际,说明埋地管道温度场的理论模型与数值模拟结果基本准确。通过误差分析可知,根据试验得到的管内外温度关系式计算的管内温度误差较小,均小于 1%, $T_{N2}$  比实际管外温度  $T_w$  更接近实际的管内温度  $T_N$ 。因此,用计算得到的管内温度代入修正压力降计算公式,比直接用管外温度代替管内温度代入计算修正压力降更加准确,可提高埋地管道气密性试验的准确度,降低漏判和误判的概率。

表 3 试验与模拟得到的管内外温度关系式比较

编号	$T_W/^\circ\text{C}$	$T_N/^\circ\text{C}$	$T_{N1}/^\circ\text{C}$	$T_{N2}/^\circ\text{C}$	$\eta_1/(\%)$	$\eta_2/(\%)$
1	19.18	19.66	19.23	19.52	2.2	0.7
2	19.40	19.83	19.51	19.73	1.6	0.5
3	19.52	19.88	19.66	19.85	1.1	0.1
4	19.85	20.25	20.08	20.18	0.8	0.3
5	20.12	20.50	20.42	20.45	0.4	0.3
6	20.20	20.65	20.52	20.52	0.6	0.6
7	20.32	20.76	20.68	20.64	0.4	0.6
8	20.43	20.93	20.81	20.75	0.6	0.9

$T_W, T_N$ —管内、外温度值;  $T_{N1}, T_{N2}$ —通过模拟和试验获得的管内外温度关系式计算得到的管内温度值

### 3 结束语

(1) 本研究建立了埋地管道气密性试验过程温度场的理论模型和数值模型, 物理模型全面考虑了埋地管道温度场在水平方向的影响范围, 土壤恒温层深度与温度的确定与理论计算公式, 分析了土壤自然温度场的周期变化规律与大气温度突变对土壤自然温度场的影响。通过数值模拟, 得到了埋地管道气密性试验过程中不同时刻的温度场分布和温度场达到稳定的时间, 并拟合得到了管内外温度计算关系式。

(2) 按照埋地管道气密性试验的验收规范, 笔者对埋地管道气密性试验过程的温度场进行了试验研究, 全面考虑了埋地管道的材料、规格、埋深及温度传感器的布置等, 根据试验测得的温度数据, 拟合得到了埋地管道气密性试验过程中管内温度的计算公式。

(3) 在本研究中, 根据管内、外温度关系式计算的管内温度与实际的管内温度误差较小, 且大于管外温度, 用计算得到的管内温度计算修正压力降比直接用管外温度代替管内温度计算的修正压力降更加准确合理, 可以提高气密性试验的准确度。

### 参考文献(References):

- [1] 吴长春, 张孔明. 天然气的运输方式及其特点[J]. 油气储运, 2003, 22(9): 39-43.
- [2] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 337-350.
- [3] 张青松. 输油管道三维非稳态温度场数值研究[J]. 天然气与石油, 2010, 28(3): 32-34.
- [4] 许丹, 申龙涉, 杜明俊, 等. 埋地热油管道停输三维非稳态传热过程的数值模拟[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2010, 30(4): 47-50.
- [5] 王常斌, 徐洋, 赵艳红, 等. 埋地热油管道沿程温降的数值模拟[J]. 管道技术与设备, 2012(1): 15-17.
- [6] 孙亭, 刁乃仁, 肖洪海, 等. 水平埋管换热器的传热性能研究[D]. 济南: 山东建筑大学热能工程学院, 2009.
- [7] 吴挺, 赵军, 张春雷, 等. 水平埋管周围土壤温度场数值模拟研究[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(6): 68-71.
- [8] 刘晓燕, 赵军, 石成, 等. 土壤恒温层温度及深度研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(5): 494-498.
- [9] 崔慧. 环境变化对热油管道运行过程的影响分析[J]. 油气田地面工程, 2004, 23(12): 10-12.
- [10] 刘晓燕, 石成, 赵军, 等. 大气温度突变对土壤温度场的影响研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(8): 918-921.
- [11] 吴国忠, 庞丽萍, 卢丽冰. 埋地输油管道热力计算数值求解结果分析[J]. 油气田地面工程, 2001, 20(2): 1-2.

[编辑: 张翔]

#### 本文引用格式:

杜斌康, 卢志明, 卢沛, 等. 埋地管道气密性试验过程温度场的理论模型及试验研究[J]. 机电工程, 2013, 30(11): 1329-1334.

DU Bin-kang, LU Zhi-ming, LU Pei, et al. Theoretical model and study of temperature field for buried steel pipeline during air-tight test[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(11): 1329-1334.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>