

双层保温热力管路的数值计算

于丽丽¹ 王为民¹ 王亮² 魏文杰¹ 张纯静¹

(辽宁石油化工大学¹,抚顺 113001;中油辽河工程有限公司²,盘锦 124010)

摘要 为了求解热力管路双保温层经济厚度,综合考虑了各种约束条件,用 Visual Basic 6.0 语言设计了求解程序,因为保温材料的导热系数随温度而变化,采用迭代法求解了每层材料的平均温度,并给出了计算程序。通过 ANSYS12.0 软件模拟了管路横截面温度场,绘制了管路径向温度变化曲线,分析得出,在内外层保温材料厚度相同且均满足工程实际耐热性与抗压性等条件下,导热系数较小的材料放在内层相比于放在外层来说,单位管长散热量较少。

关键词 双保温层 经济厚度 温度

中图法分类号 TE832.34; **文献标志码** A

1 双保温层经济厚度的优化模型

1.1 目标函数及各参数公式

保温层厚度应按最优经济条件设计,即保温材料投资年分摊费用与保温后管道热损失费用之和最小的原则^[1],并综合考虑各种约束条件,如导热系数随温度的变化,夹层温度、单位管长散热量以及管道外表面温度的限制。各参数公式由管道各层单位管长散热量相等推倒而得。

$$\min(s(\delta_1, \delta_2)) = as_b + s_r = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \{ a_1 \pi [(r + \delta_1)^2 - r^2] + a_2 \pi [(r + \delta_1 + \delta_2)^2 - (r + \delta_1)^2] + 2a_3 \pi (r + \delta_1 + \delta_2) \} + a_r q \tau \quad (1)$$

式(1)中: $s(\delta_1, \delta_2)$ 保温材料投资年分摊费用与保温后管道热损失费用总和,元/(m·a); δ_1, δ_2 分别为内外层保温材料的厚度,m; a 保温层材料的资金回收系数,1; s_b 保温层材料费用,元; s_r 热能损失费用,元; i 年利率(复利),%; n 计息年数,年; r 钢管外半径,m; a_1, a_2, a_3 分别为内、外层保温材料以及保护层的单价,元/m²; a_r 热能单价,元/J; q 单位管

长的散热量,W/m,这里并没有考虑保温材料之间的空隙及内层与钢管之间空隙,一般情况下,管路保温前必须处理好表面油污与杂质,确保各层之间黏贴紧密,相关设计规范中也没有计入各层之间的空隙^[2]。

$$q = \frac{t_0 - t_k}{\frac{1}{a_n \pi d_0} + \sum_{i=1, j=0}^3 \frac{1}{2\pi \lambda_i} \ln \frac{d_{j+1}}{d_j} + \frac{1}{a_w \pi d_3}} \quad (2)$$

$$t_w = \frac{q}{a_w \pi d_3} + t_k \quad (3)$$

$$a_w = 1.163 \times (10 + 6\sqrt{w}) \quad (4)$$

$$t_j = \frac{t_0 + t_k}{2} + \frac{q}{2\pi} \left(\frac{1}{2\lambda_3} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{a_w d_3} - \frac{1}{a_n d_0} - \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_1}{d_0} - \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_2}{d_1} \right) \quad (5)$$

式中: t_w 外层材料外壁温度,℃; a_w 管外空气与保温层对流换热系数,W/(m²·℃); t_0 管内流体温度,℃; t_k 环境温度,℃; d_0, d_1, d_2, d_3 分别为钢管内径、钢管外径、内层保温材料外径,外层材料外径,m; τ 年运行时间,s; a_n 管内流体对流换热系数,W/(m²·℃),对于保温管道内部对流换热热阻可以忽略; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别为钢管的导热系数、内层保温材料的导热系数、外层保温材料的导热系数,W/(m·℃); w 风速,m/s; t_j 夹层温度,℃。

1.2 约束条件

外层材料的使用温度(夹层温度)不能超过材

2012年6月18日收到,7月4日修改

第一作者简介:于丽丽(1987—),硕士研究生,研究方向:油气储运。

E-mail:yulili95@163.com。

料的最高使用温度的 0.9 倍;表层温度一般不超过 50℃;对应不同裸管表面温度,单位面积的散热量要满足对应的设计要求^[2]。

2 保温层的导热系数随着温度而变化的解决方法

2.1 平均温度试算法原理

首先对内外层保温材料的平均温度分别赋初值,每层材料的导热系数取该平均温度下的值,然后求得单位管长散热量,根据每层单位管长散热量相等,反算各层平均温度,分别判断这两个值是否满足允许误差,如果不满足,求出该平均温度,重新计算,循环迭代,直到满足允许误差。

2.2 平均温度试算法程序代码

使用 VB 语言:参数含义, $t_1()$, $t_2()$ 表示内外材料的平均温度数组, $f_1()$, $f_2()$ 是导热系数随材料平均温度变化的函数, t_{bl} 内层材料内壁温度, d_{rws1} , d_{rws2} 内外层材料的导热系数,其他参数见 1.1 节。

```

k = 0:t1(0) = 0:t2(0) = 0
do
drxs1 = f1(t1(k)):drxs2 = f2(t2(k))
q = pi * (t0 - tk) / (1 / (an * d0) + Log(d1/d0) / (2 * 46) + Log
(d2/d1) / (2 * drxs1) + Log(d3/d2) / (2 * drxs2) + 1 / (aw *
d3))
tb1 = t0 - q * (1 / (an * d0) + Log(d1/d0) / (2 * 46)) / pi
tj = (t0 + tk) / 2 + q / (2 * pi) * (Log(d3/d2) / (2 * drxs2) + 1 /
(aw * d3) - (1 / (an * d0) + Log(d1/d0) / (2 * 46) + Log(d2/
d1) / (2 * drxs1)))
tw = q / (aw * pi * d3) + tk
k = k + 1
t1(k) = (tb1 + tj) / 2:t2(k) = (tj + tw) / 2
Loopwhile(abs(t1(k) - t1(k - 1)) > 0.001 andabs(t2(k) -
t2(k - 1)) > 0.001)

```

2.3 ANSYS12.0 软件模拟原理

模拟采用 ANSYS12.0, ThermalQuad4node55 单元,利用有限元法,将管路横截面分为若干节点,每一节点的导热系数都随温度变化,根据能量守恒原理,利用热平衡分析法,各节点处温度满足圆柱坐标系下的导热微分方程,然后利用迭代法即可求出所有节点温度。这相比于平均温度试算法更接近真实值。

3 算例

3.1 管路横截面温度场的模拟与分析

选择直径不同的 D159×8 和 D426×5 管道,用 ANSYS12.0 进行模拟,管内流体温度为 410℃,内部对流换热系数取 1 200 W/(m²·℃),环境温度为 16℃,风速 4 m/s,两层保温层厚度均取 70 mm,材料 1 的导热系数为 $0.054 + 0.000 247 t(\text{℃})$,材料 2 的导热系数为 $0.038 + 0.000 089 t(\text{℃})$,单位皆为 W/(m·℃),材料 2 的导热系数总小于材料 1。经模拟,D159×8 管道横截面温度场输出结果如图 1(保温材料的内层为材料 1,外层为材料 2)。从图 1 中可以直观地了解到整体温度分布情况。

设置从内到外的管道径向路径,将路径温度数据输出,数据结果整理如表 1。表 1 中排序方案 1-2 表示内外层材料分别为材料 1 和 2,2-1 表示内外层材料分别为材料 2 和 1。分析得出,内外层采用相同的保温层厚度时,内层保温材料的导热系数较小时,外壁温度较小,散热量小,反之,外壁温度较高,散热量相对较大。对不同管径系列模拟亦得出相同结论,同样保温层厚度下,钢管管径越大这种影响会缩小。

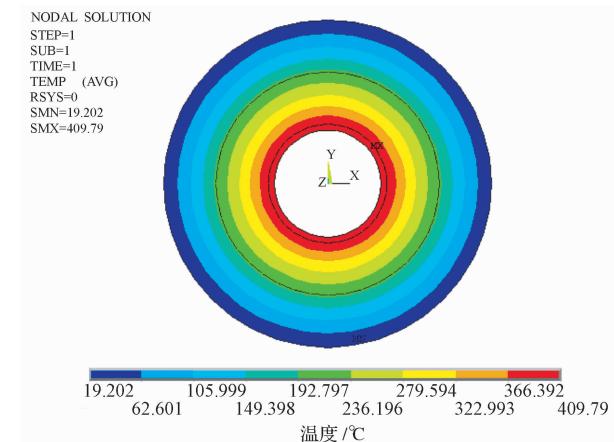


图 1 D159×8 的管路横截面温度场

表 1 两种管径的模拟结果数据表

管径/mm	排序方案	夹层温度/℃	外壁温度/℃	单位管长散热量/(W·m ⁻¹)
D159×8	1-2	200.32	19.20	112.92
D159×8	2-1	136.16	18.95	104.10
D426×5	1-2	224.13	19.89	137.27
D426×5	2-1	157.27	19.72	131.27

图2、图3表示两种管径下管道保温材料的排序对径向温度的影响,横轴起点坐标是钢管内壁,内层材料为较小的导热系数的曲线(2-1)的温度总是低于内层材料为较大导热系数的曲线(1-2)的温度,这也就说明,只考虑保温材料导热系数的影响,同样厚度下,内层材料使用导热系数较小的保温材料单位管长散热量较小,一般保温效果好的材料价钱比较贵,同样厚度下内层材料所占体积小,这样不仅散热量较小而且从材料费用上也比较经济。现在工程实际应用上一般采取耐热性较好的材料为内层材料,这种材料导热系数相对较低,但随着科技的发展,保温材料的性能再逐渐的完善。

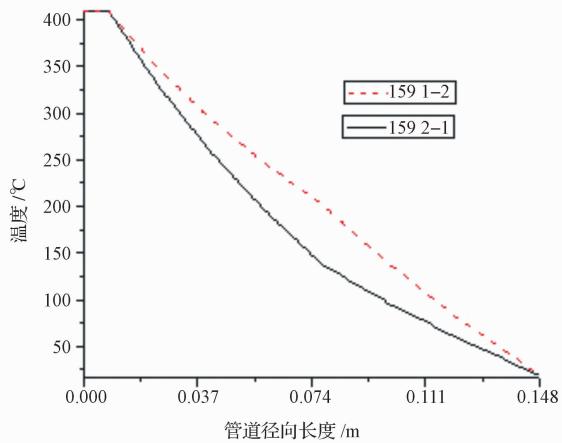


图2 D159×8 不同排序方案对管道径向温度的影响

3.2 双保温层经济厚度的求解

某热油管道直径为D159×8,管内流体和环境温度分别为410 °C、16 °C,管内对流换热系数1 200 W/(m²· °C),风速4 m/s,考虑保温材料的耐热性,试求解各保温层的经济厚度。

已知,内层材料的综合价格为950元/m³,导热系数为 $a_1 = 0.054 + 0.000247t$ (°C);外层材料的综合价格为1 100元/m³,导热系数为 $a_2 = 0.038 + 0.000089t$ (°C),W/(m· °C),热价29元/GJ,年运行时间8 000 h,计息年数10 a,年利率17.7%,保护层价格30元/m²。

约束条件:外层材料的最高使用温度为350 °C,夹层温度不要超过0.9倍材料的最高使用温度(即

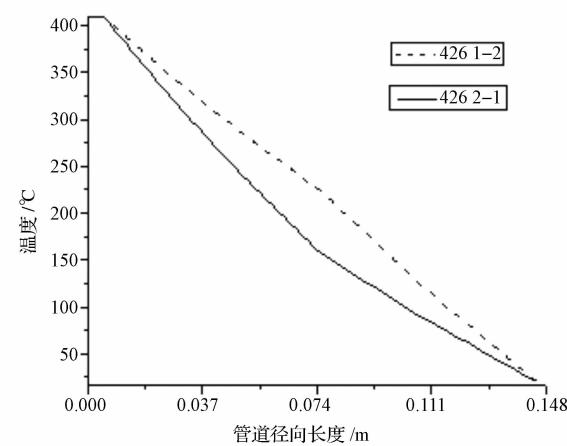


图3 D426×5 不同排序方案对管道径向温度的影响

315 °C),表层温度控制在50 °C以内,400 °C的管道单位面积散热量不超过工业设备及管道绝热工程设计规范^[2]规定的227 W/m²。参数输入窗口如图4,结果输出窗口如图5。

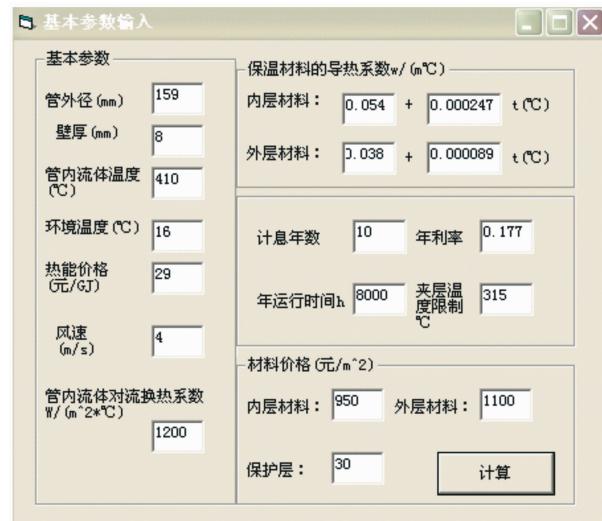


图4 双层保温经济厚度计算参数输入窗口

计算结果如图5:内层保温层材料厚度57 mm,外层材料厚度为119 mm,夹层温度314.94 °C,保温层外表面温度19.81 °C,单位面积散热量89.18 W/m²满足规范要求,总经济费用为185.42元/(a·m)。

反之,如果不考虑温度限制和抗压强度限制,内外层材料排序互换,经计算,这里不存在双保温层最优解^[4],只需要单一的导热系数较小的材料



图 5 双层保温经济厚度计算结果输出窗口

157.5 mm, 总经济费用 154.83 元/(a · m), 这一值小于内层使用导热系数较大(1-2)时的排序费用。

4 结论

(1) 绘制了沿保温层径向的温度变化曲线, 可

以直观地了解到管道横截面的温度变化趋势。

(2) 设计了热力管路双保温层经济厚度的计算程序, 综合考虑了保温材料导热系数随温度变化以及夹层温度、外表面温度、单位管长散热量的限制的约束条件, 它适用于各种热力管路双保温层经济厚度优化。

(3) 如果两层材料都满足耐热性及抗压强度等条件, 推荐使用内层导热系数较小, 外层导热系数较大的排序方案进行双保温层厚度优化。这时要注意两种材料的导热系数的大小具有可比性, 这一规律才能适用。

参 考 文 献

- 王瑛, 黄善波. 双层保温层经济厚度的优化计算. 管道技术与设备, 2004; (2): 25—26
- GB 50264—97 工业设备及管道绝热工程设计规范, 1997
- 郭光臣, 董文兰, 张志廉. 油库设计与管理. 东营: 中国石油大学出版社, 1994: 214—220
- 王为民, 董忠武. 管道双层保温经济厚度存在性分析及计算. 油气储运, 1995; 14(2): 50—54

Numerical Calculation of Thermal Pipeline of Double Insulating Layers

YU Li-li¹, WANG Wei-min¹, WANG Liang², WEI Wen-jie¹, ZHANG Chun-jing¹

(Liaoning Shihua University¹, Fushun 113001, P. R. China;

China Liaohe Petroleum Engineering Company Limited², Panjin 124010, P. R. China)

[Abstract] In order to solve the economical thickness of thermal pipeline of double insulating layers, various kinds of constraint conditions had been considered, the solving program was designed by Visual Basic 6.0. Because of the coefficient of thermal conductivity of thermal insulating material changes with temperature, the average temperature of the every layer material was solved by iterating and its calculating program was designed. Pipeline temperature field was simulated by ANSYS12.0, and radial temperature change curve of pipeline was drawn. When innner and external material with the same thickness both meet conditions of the engineering practical heat resistance and resistance, and coefficient of thermal conductivity of the inner material is smaller than external material, heat dissipating capacity of per unit length of pipeline is less.

[Key words] double layers of thermal insulation economic thickness temperature