

海底双重保温管道传热特性研究

邢晓凯* 张国忠 安家荣 陈 炯

(石油大学(山东))

(胜利油田设计院)

邢晓凯 张国忠等:海底双重保温管道传热特性研究,油气储运,2000,19(5) 31~34。

摘 要 用瞬态法测定了使用不同年限的泡沫保温材料整管的导热系数,测定结果表明,随着使用时间的延长,保温材料结构收缩,导热系数增大。通过试验确定了双重保温管道环形空间自然对流换热在低 $Cr \cdot Pr$ 数下当量导热系数的计算公式。模拟计算表明,土壤当量导热系数的取值对管道的传热计算影响不大,给出了海底双重保温管道总传热系数的计算公式。

主题词 海底管道 保温管道 传热特性 研究

一、前 言

在热油管道的设计和运行中,总传热系数是计算沿程温降的重要参数,它会影响到整个设计及运行方案的确定。由于海底输油管道采用双重钢管保温结构和海床土壤水饱和的特点,影响总传热系数的因素较多,至今还没有合适的计算总传热系数的关系式。

海底双重钢管保温结构的传热热阻由以下几部分构成:①油流至管内壁的放热热阻,②保温层的导热热阻,③保温层和外套管之间环形空间的传热热阻,④套管外土壤的导热热阻,⑤海床表面与海水之间的放热热阻。

通过分析海上双重保温管道的热阻组成,可知管内壁放热强度较大,海床表面与海水之间温差较

K_1 较无焊后热处理变小,其裂纹扩展角增大。

(3)应用应变能密度理论,确定不同几何特征 I / II 型裂纹扩展的止裂压力,并确定了临界应变能密度因子。

(4)焊后消除残余应力,临界止裂压力 P_c 增加,对于焊管的工程实际应用具有重要意义。

参 考 文 献

1, 潘家华:螺旋焊缝管的断裂特点,油气储运,1988,7(5)。

小,油流至管内壁的放热热阻和海床表面与海水之间的放热热阻可以忽略。因此,影响海上双重保温管道传热过程的热阻主要有三部分,即保温层的导热热阻、环形空间的传热热阻以及套管外土壤的导热热阻。

二、整管成型泡沫塑料保温材料 导热系数的测定

目前测定泡沫保温材料导热系数的方法是,首先在预制好的泡沫保温管上取样,并将所取样品加工成规定尺寸的试件,然后使用快速导热系数测定仪测定试件的导热系数。这种测试方法的优点是所需设备少,操作简单,测试时间短。其缺点是:①取样并加工试件会破坏保温材料测试表面的微观结构,②测试时间短,因而试件的表面性质对测试结果的

2, 张建勋 史耀东:焊接接头母材区断裂韧度 COD 特征值研究,机械强度,1995,17(4)。

3, 董绍华等:螺旋焊管与直缝焊管裂纹断裂分析,油气储运,1999,18(2)。

4, 孟广哲 贾安东:焊接结构强度和断裂,机械工业出版社(北京),1986。

5, 沈成康:断裂力学,同济大学出版社(上海),1996。

(收稿日期:1999-09-06)

编辑:刘春阳

影响很大,测试时要求测试探头和试件表面密切接触,而实际测试时很难做到这一点,因而探头与试件之间存在接触热阻,③制作试件时一般均取用发泡良好的样品,而在预制好的保温管上,发泡均匀和发泡不均匀是同时存在的,因此测试结果不能全面反映泡沫保温管道的整体保温效果。

为了克服取样测试的缺点,开发了瞬态温降传热试验装置。该试验装置由双重保温管道系统、数据采集系统及水循环系统三部分组成,试验装置流程图见图 1。

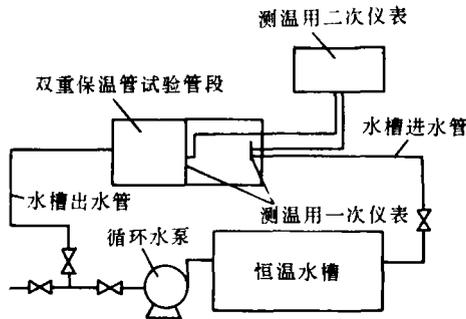


图 1 瞬态温降传热试验装置

保温材料导热系数的计算公式^[1]为:

$$\lambda_b = \frac{c_1\omega_1 + c_2\omega_2}{2\pi(\tau_{i+1} - \tau_i)} \ln \frac{d_3}{d_2} \ln \frac{T_i - T_w}{T_{i+1} - T_w}$$

- 式中 C_1 ——水的比热, J/(kg · C);
 C_2 ——钢管的比热, J/(kg · C);
 ω_1 ——水的单位长度质量, kg/m;
 ω_2 ——钢管的单位长度质量, kg/m;
 T_i —— τ_i 时刻的管内流体温度;
 T_{i+1} —— τ_{i+1} 时刻的管内流体温度;
 T_w ——保温层外壁温度。

根据试验测得的任意两个时刻管内流体的温度 T_i 和 T_{i+1} , 便可求出保温层导热系数 λ_b 。

为更准确评价保温材料的保温性能, 分别测试了成型夹克泡沫保温管道刚出厂及放置 6 年后保温材料的导热系数, 得到以下结论。

(1) 在同样的条件下, 采用文献[1]方法测定的导热系数平均值为 0.039 W/(m · C), 比当时用快速导热系数测定仪测定的导热系数 (0.025 W/(m · C)) 偏大约 56%, 其值更接近于“埋地钢管管道硬质聚氨酯泡沫塑料防腐保温层技术标准”(SYJ18—86) 规定的保温层导热系数允许的最大值 0.035 W/(m · C)。

(2) 随着使用时间的延长, 泡沫塑料整管保温材料的结构会产生收缩, 导热系数会增大。试验测定, 黄夹克泡沫塑料保温管道静置 6 年后, 整管成型泡沫塑料平均导热系数增至 0.052 W/(m · C), 比出厂时用同样方法测定的导热系数 (0.039 W/(m · C)) 偏大约 33%。因此, 在研究运行的泡沫塑料保温管道的保温性能时, 可以根据管道的实际运行年限, 以此数据作为参考。

三、空气夹层热阻特性的试验研究

海底双重保温管道空气夹层的传热属于热面在内的内环行夹层的自然对流传热, 由于保温管道空气夹层壁面温度较低, $C_r \cdot P_r$ 数较小, 不在文献[2]给出的自然对流传热公式的适用范围 ($C_r \cdot P_r \geq 6000$) 内, 因此应通过试验研究来确定双重保温管道环形空间自然对流传热在低 $C_r \cdot P_r$ 数下当量导热系数的计算公式。

1、空气夹层换热热阻的计算

(1) 公式的推导

设从停输开始的时间为 τ , 微小时间 $d\tau$ 内管内流体、钢管和保温层的放热量为 dQ_1 , 流体和钢管温降为 dT , 保温层温降为 dT_1 , 管内流体和钢管温度为 T , 保温层外壁温度为 T_{w1} , 则放热量 dQ_1 可由式 (1) 表示:

$$dQ_1 = (T - T_{w1})d\tau/R = -(C_1\omega_1dT + C_2\omega_2dT + C_3\omega_3dT_1) \quad (1)$$

- 式中 C_1 ——水的比热, J/(kg · C);
 C_2 ——钢管的比热 J/(kg · C);
 C_3 ——保温层的比热 J/(kg · C);
 ω_1 ——水单位长度的质量, kg/m;
 ω_2 ——钢管单位长度的质量, kg/m;
 ω_3 ——保温层单位长度的质量, kg/m;
 R ——水至夹克外壁的热阻, m · C/W。

设 $dT_1 = h dT$ (h 为常数), 则有:

$dQ_1 = -(C_1\omega_1 + C_2\omega_2 + hC_3\omega_3)dT$ 在 $d\tau$ 时间间隔内空气夹层的传热量为 dQ_2 :

$$dQ_2 = (T_{w1} - T_{w2})d\tau/R_g$$

- 式中 τ_{w1} ——空气夹层内壁面温度;
 T_{w2} ——空气夹层外壁温度;
 R_g —— $d\tau$ 时间间隔内空气夹层的平均热阻。

由于空气夹层的热容量很小,可以忽略。而在 $d\tau$ 时间间隔内空气夹层的传热量和管内流体、钢管及保温层的放热量近似相等,即 $dQ_2=dQ_1$ 。

$$\text{则有 } (T_{w1} - T_{w2})d\tau/R_q \\ = - (C_1\omega_1 + C_2\omega_2 + hC_3\omega_3)dT \quad (2)$$

由于泡沫材料的密度很小,且比热也较小,因此 $C_3\omega_3 \ll C_1\omega_1, C_3\omega_3 \ll C_2\omega_2$,故可忽略 $C_3\omega_3$,则式(2)整理为:

$$R_q = - \frac{T_{w1} - T_{w2}}{C_1\omega_1 + C_2\omega_2} \frac{d\tau}{dT} \\ \approx \frac{T_{w1} - T_{w2}}{C_1\omega_1 + C_2\omega_2} \frac{\Delta\tau}{\Delta T} \quad (3)$$

根据试验测得的相临两个时刻空气夹层的内外壁面温度 T_{w1}, T_{w2} , 温降 ΔT 及时间间隔 $\Delta\tau$, 便可由式(3)求出空气夹层不同内外壁面温度下的换热热阻。

(2) 试验数据处理

取水的比热 $c_1=4186 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{C})$

$$\text{质量 } \omega_1 = \pi/4 \times d_1^2 \times \rho_1 \\ = \pi/4 \times 0.147^2 \times 1000 \\ = 16.971 \text{ kg/m}$$

取钢管的比热 $c_2=473 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{C})$

$$\text{质量 } \omega_2 = \pi/4 \times (d_2^2 - d_1^2) \times \rho_1 \\ = \pi/4 \times (0.159^2 - 0.147^2) \times 7800 \\ = 22.495 \text{ kg/m}$$

将以上基础数据代入式(3),可得:

$$R_q = \frac{T_{w1} - T_{w2}}{81678.92} \frac{\Delta\tau}{\Delta T} \quad (4)$$

根据多次温降试验所测温降数据,利用式(4)可以计算出空气夹层的换热热阻,部分试验数据见表 1。

表 1 整管保温特性试验中的空气夹层热阻

序号	时间间隔 (s)	平均水温 (C)	空气层内壁温度 (C)	空气层外壁温度 (C)	空气夹层热阻 (m·C/W)
1	10320	60.20	34.29	30.17	0.131
2	4260	57.45	33.88	30.05	0.137
3	4140	51.52	31.96	28.73	0.156
4	49740	45.65	30.60	28.09	0.160
5	13980	39.95	29.49	27.71	0.164
6	52920	35.55	28.36	27.12	0.195

从表 1 可以看出,空气夹层的换热热阻随夹层内外壁面温度的降低而增大。

2、空气夹层当量导热系数的计算

空气夹层的换热即为有限空间的对流换热,为了便于计算,将有限空间的自然对流换热当作热传导处理,而用当量热传导系数 λ_q 的大小来反映夹层内换热的强弱。

换热热阻和当量导热系数的关系为:

$$R_q = \frac{1}{2\pi\lambda_{ac}} \ln \frac{d_5}{d_4}$$

$$\text{即 } \lambda_{ac} = \frac{1}{2\pi R_q} \ln \frac{d_5}{d_4} \quad (5)$$

式中 d_4 ——空气夹层的内径;

d_5 ——空气夹层的外径。

对于水平放置的环形夹层,经常把当量导热系数写成如下的准则方程:

$$\frac{\lambda_{ac}}{\lambda} = C(Cr \cdot Pr)^m$$

式中 λ ——干空气在定性温度下的热传导系数;

C, m ——分别为常系数;

Gr ——定性温度下的格拉晓夫准数;

Pr ——定性温度下的普朗特准数。

定性温度为夹层内外壁温度的算术平均值。

根据试验所测温降数据,利用式(4)计算出空气夹层的换热热阻后,即可由式(5)计算出当量热传导系数,再计算出当量导热系数所对应的定性温度下的格拉晓夫和普朗特准数,由最小二乘法回归出两个常系数 C 和 m 。得到水平放置的环形空间自然对流换热当量导热系数的经验关系式为:

$$\frac{\lambda_{eq}}{\lambda} = 0.6464(Cr \cdot Pr)^{0.3053} \quad (6)$$

$$(660 \leq Cr \cdot Pr \leq 2062)$$

四、海床水饱和土壤当量导热系数的确定

通过室内试验测定了海底双重保温管道成型泡沫塑料的导热系数和空气夹层的当量导热系数。为了确定处于水饱和状态的海床土壤热阻,使用数值模拟方法模拟计算了海底双重保温管道管外土壤的温度场和管道温降,从而确定了海床水饱和土壤的当量导热系数。

现以胜利油田埕岛海上中心一号平台至登陆点海三站为例进行计算和分析。

管道长 9 300 m,埋深 1.2 m。内管尺寸为 $\phi 325 \times 14.5$,保温层为 40 mm 厚的聚氨酯泡沫塑料,套管尺寸为 $\phi 460 \times 16$ 。根据室内试验结果,保温层导热系数取 0.052 W/(m·°C)。

9 月上旬当管输量为 270 m³/h 时,中心一号出站油温为 52°C,海三站进站油温为 49~50°C。取海床表面水温夏季最高 20°C,冬季最低 0.5°C。管道运行参数见表 2。不同海床土壤当量导热系数、管道温

降及管道起点垂直管道土壤温度计算结果见表 3。

表 2 中心一号平台至海三站的管道实际运行参数

时间	输油量 (m ³ /h)	含水 %	P _d (MPa)	T _d (°C)	T _z (°C)
1998-07-01	275	27	2.4	55	54
1998-07-15	275	28	2.5	52	49
1998-09-01	270	24	1.8	52	49
1998-09-11	270	21	1.8	52	50

表 3 模拟计算不同的土壤当量导热系数对管道运行温度的影响

中心一号出站油温 (°C)	土壤当量导热系数 (W/(m·°C))	海三站进站油温 (°C)	垂直管道不同埋深处的地温						
			1 000 (mm)	975 (mm)	915 (mm)	795 (mm)	530 (mm)	265 (mm)	0 (mm)
52	5	49.4	16.82	16.56	16.28	16.03	15.58	15.28	15.08
52	10	49.3	15.66	15.58	15.45	15.28	15.10	15.05	15.05
52	15	49.3	15.31	15.26	15.17	15.08	15.00	15.00	15.02

从表 3 可以看出,管外土壤热容量变化很小,土壤当量导热系数变化对温降影响不大。当量导热系数从 5 W/(m·°C)变化至 15 W/(m·°C)时,海三站进站油温只变化了 0.1°C。建议海床土壤当量导热系数取为 10 W/(m·°C)。

温层导热系数的选取应根据管道的实际运行年限来确定,以 0.039~0.52 W/(m·°C)为参考,空气夹层的当量导热系数可按式(6)计算,海床土壤当量导热系数可取为 10 W/(m·°C)。

参 考 文 献

- 安家荣等:管道泡沫保温层导热系数测定,油气储运,1994,5(13)。
- 钱滨江等:简明传热手册,高等教育出版社(北京),1990。

(收稿日期:2000-01-17)

编辑:刘春阳

五、海底双重保温管道总传热系数的计算公式

海底双重保温管道的总传热系数可按下式计算:

$$k = \frac{1}{d_2 \left(\frac{1}{2\lambda_b} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{ac}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_{se}} \ln \frac{4h}{d_3} \right)}$$

式中 k——海底双重保温管道的总传热系数, W/(m²·°C);

λ_b ——保温层导热系数, W/(m·°C);

λ_{ac} ——环形空气夹层当量导热系数, W/(m·°C);

λ_{se} ——海床土壤当量导热系数,取 10 W/(m·°C);

d_1 ——保温层内径, m;

d_2 ——保温层外径, m;

d_3 ——套管外径, m;

h_i ——管中心埋深, m。

通过对试验数据和双重保温管道传热特性的模拟计算结果的分析,可知保温管道成型泡沫塑料保

兰州至成都重庆输油管道工程开工建设

国家重点建设工程项目——兰州至成都、重庆输油管道工程开工建设。

由中国石油天然气股份有限公司投资建设的这条输油管道全长 1 200 余千米,途经甘肃、陕西、四川、重庆等 4 个省市的 30 余个县、市(区),年输油能力达 500 多万吨。据了解,这项工程将于 2002 年 6 月全部建成并投入运行。这一长距离输油管道建成后,将在西北与西南之间架起一条成品油料的输送大通道,缓解西南地区油品供应和铁路运输紧张的状况,对推动西部大开发和国防建设具有重要意义。

摘自《石油消息报》