热油管道停输温降数值模拟

南发学[1], 亢 春[1], 张 海[2], 卿明祥[2]

(1. 西南石油大学, 四川 成都 610500; 2. 青海油田公司采油一厂, 甘肃 敦煌 736200)

摘 要: 将热油管道油品、管壁、土壤传热方程, 结合边界条件、连接条件、初始条件等组成热油管道停输温降分析微分方程组, 采用数值解法对方程组进行差分求解, 构建差分方程组, 采用高斯消元法对方程组进行求解, 从而获得热油管道停输后的温度变化规律, 对合理确定安全停输时间以及再启动所需的压力提供了计算依据。

关键词: 管道; 停输; 模型; 数值模拟

文章编号: **1006-5539(2009)01-0007-04** 文献标识码: A

热油管道在运行过程中, 不可避免地会发生如自然灾害、停电、计划性检修和事故抢修等故障, 以及间歇输送时都会造成管道的停输。在热油管道停输后, 由于管内存油不断向外放热, 使得温度逐渐下降, 粘度随之上升, 管壁上的结蜡层增厚, 油品的流动性受到影响。当存油温度降到一定程度时, 管道再启动时的阻力增大, 再启动工作就会变得十分困难, 甚至发生凝管事故[1~4]。因此, 进行热油管道停输后的热力计算, 了解管道在各种条件下停输后的温降情况, 掌握管道周围土壤温度场和介质温度随时间的变化, 对合理确定安全停输时间以及再启动所需的压力, 为安全生产提供科学依据, 对管道的事故处理、计划检修、再启动都具有重要的指导意义。

1 埋地管道停输热力计算数学模型

如图 1所示为某埋地管道横截面示意图, 设在管道内半径 R_0 和外半径 R_N 之间共有 N层 (管壁、保温层、防护层等), 其中任意层 n的内半径为 R_{n-1} ($n=1, 2, \cdots, N$)。在极坐标系 (r, θ) 下描述它们和原油的传热问题, 在直角坐标系 (xoy) 下描述半无穷大土壤的传热问题。

1.1 传热方程

根据热力学原理[5~7], 得到热油的传热方程为:

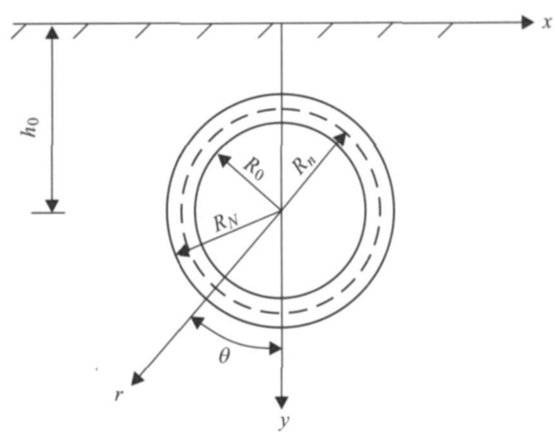

图 1 埋地管道横截面示意图

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial \theta}\right) \tag{1}$$

式中 ρ——油品密度, kg/m^3;

c——油品热容, J/(kg·℃);

T——油品温度, ℃;

λ——油品导热系数, W/(m·℃)。

管壁等的传热方程为:

$$\rho_n c_n\frac{\partial T_n}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda_n r\frac{\partial T_n}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\lambda_n\frac{\partial T_n}{\partial \theta}\right)$$

$$(n=1, 2, \cdots, N-1) \tag{2}$$

式中 ρ_n——管道第 n层材料密度, kg/m^3;

c_n——管道第 n层材料热容, J/(kg·℃);

T_n——管道第 n层 (管壁、保温层、防护层

收稿日期: 208-06-10
作者简介: 南发学 (1958-), 男, 新疆米泉县人, 高级经济师, 西南石油大学在读博士生。从事油气管道技术研究和管理工作。电话: (010) 59636635。

等温度，℃；

λ_n——管道第n层材料导热系数，W/(m·℃)。

土壤的传热方程为：

$$\rho_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial y}\right) \tag{3}$$

式中 ρ_g——土壤密度，kg/m³；

c_g——土壤热容，J/(kg·℃)；

T_g——土壤温度，℃；

λ_g——土壤导热系数，W/(m·℃)。

1.2 边界条件

考虑到油品在冷却过程中管道各截面最大油温会偏离轴心(即 $r=0$时，$\frac{\partial T}{\partial r}\neq 0$)，得到：

$$\lim_{r\to 0} r\frac{\partial T}{\partial r}=0 \tag{4}$$

土壤与外部大气间对流换热方程：

$$\left.\frac{\partial T_g}{\partial y}\right|_{y=0}=\frac{\alpha_k}{\lambda_g}(T_g-T_0) \tag{5}$$

式中 α_k——土壤表面向大气放热系数，W/(m²·℃)；

T_0——大气温度，℃。

1.3 连接条件

由原油与最内层管壁接合处通过热流密度相等及对流换热方程[7]，得：

$$\lambda\left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=R_0^-}=\lambda_1\left.\frac{\partial T_1}{\partial r}\right|_{r=R_0^+}=-\alpha_Y(T-T_1) \tag{6}$$

式中 λ_1——管道最内层材料的导热系数，W/(m·℃)。

T_1——管道最内层温度，℃；

α_Y——原油向管内壁的放热系数，W/(m²·℃)；

R_0——管道内半径，m。

由管壁各层边界处通过的热流密度相等，得：

$$\lambda_n\left.\frac{\partial T_n}{\partial r}\right|_{r=R_n^-}=\lambda_{n+1}\left.\frac{\partial T_{n+1}}{\partial r}\right|_{r=R_n^+} \quad (n=1,2,\cdots,N-1) \tag{7}$$

式中 R_n——管道第n层外半径，m。

由管壁各层边界处温度相等，得：

$$T_n|_{r=R_n^-}=T_{n+1}|_{r=R_n^+}\quad(n=1,2,\cdots,N-1) \tag{8}$$

由最外层管壁与土壤接合处通过的热流密度相等，得：

$$\lambda_N\left.\frac{\partial T_N}{\partial r}\right|_{r=R_N^-}=\lambda_g\left.\frac{\partial T_g}{\partial r}\right|_{r=R_N^+} \tag{9}$$

式中 λ_N——管道最外层材料的导热系数，W/(m·℃)。

T_N——管道最外层温度，℃；

R_N——管道最外层半径，m。

由最外层管壁与土壤接合处温度相等，得：

$$T_N|_{r=R_N^-}=T_g|_{r=R_N^+} \tag{10}$$

1.4 初始条件

$$T|_{t=0}=f(r,\theta) \tag{11}$$

$$T_n|_{t=0}=f_n(r,\theta) \tag{12}$$

$$T_g|_{t=0}=f_g(x,y) \tag{13}$$

2 模型的数值解法

方程(1)是在极坐标系下描述的有限区域的传热问题。对管内油品，设沿θ方向划分网格的等分数为 J_0，$\Delta\theta=\frac{2\pi}{J_0}$，则 $\theta_j=j\Delta\theta(j=0,1,\cdots,J_0)$；沿r方向划分网格数为 M_0，$\Delta r=\frac{R_0}{M_0+0.5}$，则 $r_i=(i+0.5)\Delta r(i=0,1,\cdots,M_0)$。管道剖分网格如图2。

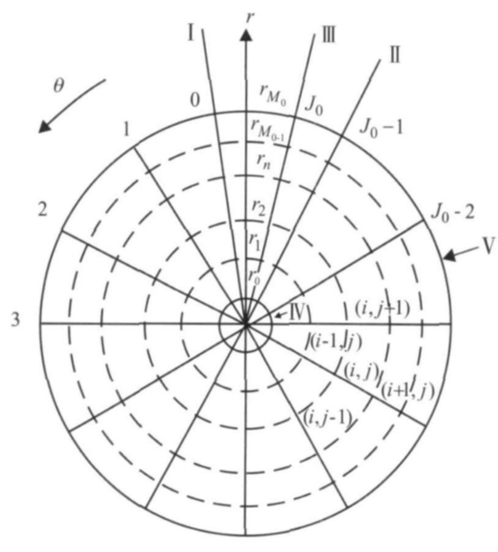

图2 管道剖分截面示意图

对管道系统油品、管壁和土壤传热方程在图2所示网格系统中进行差分求解，形成一个封闭的差分方程组如下：

$$W_1 T_{i,j}^{M+1} + W_2 T_{i+1,j}^{m+1} + W_3 T_{i-1,j}^{m+1} + W_4 T_{i,j+1}^{m+1} + W_5 T_{i,j-1}^{m+1} = \xi_1 T_{i,j}^{m} (i=1,2,\dots,M_0-1;\ j=1,2,\dots,J_0-2) \tag{14}$$

$$W_1' T_{i,0}^{m+1} + W_2' T_{i+1,0}^{m+1} + W_3' T_{i-1,0}^{m+1} + W_4' T_{i,1}^{m+1} + W_5' T_{i,J_0-1}^{m+1} = \xi_1' T_{i,0}^{m} (i=1,2,\dots,M_0-1) \tag{15}$$

$$W_1'' T_{i,J_0-1}^{m+1} + W_2'' T_{i+1,J_0-1}^{m+1} + W_3'' T_{i-1,J_0-1}^{m+1} + W_4'' T_{i,0}^{m+1} + W_5'' T_{i,J_0-2}^{m+1} = \xi_1'' T_{i,J_0-1}^{m} (i=1,2,\dots,M_0-1) \tag{16}$$

$$T_{i,J_0}^{m+1} - T_{i,0}^{m+1} = 0 \quad (i=0,1,\dots,M_0) \tag{17}$$

$$V_1 T_{0,j}^{m+1} + V_2 T_{1,j}^{m+1} + V_3 T_{0,j+1}^{m+1} + V_4 T_{0,j-1}^{m+1} = \mu_1 T_{0,j}^{m} (j=1,2,\dots,J_0-2) \tag{18}$$

$$V_1' T_{0,0}^{m+1} + V_2' T_{1,0}^{m+1} + V_3' T_{0,1}^{m+1} + V_4' T_{0,J_0-1}^{m+1} = \mu_1' T_{0,0}^{m} \quad (j=1,2,\dots,J_0-2) \tag{19}$$

$$V_1'' T_{0,J_0-1}^{m+1} + V_2'' T_{1,J_0-1}^{m+1} + V_3'' T_{0,0}^{m+1} + V_4'' T_{0,J_0-2}^{m+1} = \mu_1'' T_{0,J_0-1}^{m} \tag{20}$$

$$\lambda(0,1) T_{M_0,j}^{m+1} - \lambda(0,1) T_{M_0-1,j}^{m+1} + \lambda(1,0) T_{0,j}^{m+1(1)} - \lambda(1,0) T_{1,j}^{m+1(1)} = 0 \tag{21}$$

$$\alpha_{M_0,j}^{m} T_{0,j}^{m+1(1)} - \left(\alpha_{M_0,j}^{m} + \lambda(0,1)\right) T_{M_0,j}^{m+1} + \lambda(0,1) T_{M_0-1,j}^{m+1} = 0 \tag{22}$$

$$T_M^{m+1} - \frac{1}{4}\left(T_{0,0}^{m+1} + T_{0,\frac{1}{4}J_0}^{m+1} + T_{0,\frac{1}{2}J_0}^{m+1} + T_{0,\frac{3}{4}J_0}^{m+1} \right) = 0 \tag{23}$$

$$W_1^{(n)} T_{i,j}^{m+1(n)} + W_2^{(n)} T_{i+1,j}^{m+1(n)} + W_3^{(n)} T_{i-1,j}^{m+1(n)} + W_4^{(n)} T_{i,j+1}^{m+1(n)} + W_5^{(n)} T_{i,j+1}^{m+1(n)} = \xi_1^{(n)} T_{i,j}^{m(n)} (n=1,2,\dots,N-1;\ i=1,2,\dots,M_n-1;\ j=1,2,\dots,J_0-2) \tag{24}$$

$$W_1'^{(n)} T_{i,0}^{m+1(n)} + W_2'^{(n)} T_{i+1,0}^{m+1(n)} + W_3'^{(n)} T_{i-1,0}^{m+1(n)} + W_4'^{(n)} T_{i,1}^{m+1(n)} + W_5'^{(n)} T_{i,J_0-1}^{m+1} = \xi_1'^{(n)} T_{i,0}^{m(n)} (n=1,2,\dots,N-1;\ i=1,2,\dots,M_n-1) \tag{25}$$

$$W_1''^{(n)} T_{i,J_0-1}^{m+1(n)} + W_2''^{(n)} T_{i+1,J_0-1}^{m+1(n)} + W_3''^{(n)} T_{i-1,J_0-1}^{m+1(n)} + W_4''^{(n)} T_{i,0}^{m+1(n)} + W_5''^{(n)} T_{i,J_0-2}^{m+1} = \xi_1''^{(n)} T_{i,J_0-1}^{m(n)} (n=1,2,\dots,N-1;\ i=1,2,\dots,M_n-1) \tag{26}$$

$$T_{i,J_0}^{m+1(n)} - T_{i,0}^{m+1(n)} = 0 (n=1,2,\dots,N;\ i=1,2,\dots,M_n) \tag{27}$$

$$\lambda(n,n+1) T_{M_n,j}^{m+1(n)} - \lambda(n,n+1) T_{M_n-1,j}^{m+1(n)} - \lambda(n+1,n) T_{1,j}^{m+1(n+1)} - \lambda(n+1,n) T_{0,j}^{m+1(n+1)} = 0 \quad (n=1,2,\dots,N-1;\ j=1,2,\dots,J_0) \tag{28}$$

$$T_{M_n,j}^{m+1(n)} - T_{0,j}^{m+1(n+1)} = 0 (n=1,2,\dots,N-1;\ j=1,2,\dots,J_0) \tag{29}$$

$$e_2 T_{M_N,j}^{m+1(N)} - e_2 T_{M_N-1,j}^{m+1(N)} + e_1 T_{g0,j}^{m+1} - e_1 T_{g1,j}^{m+1} = 0 \quad (j=0,1,\dots,J_0) \tag{30}$$

$$T_{g0,j}^{m+1} - T_{M_N,j}^{m+1(N)} = 0 (j=0,1,\dots,J_0) \tag{31}$$

$$K_1 T_{g,i,j}^{m+1} + K_2 T_{g,i+1,j}^{m+1} + K_3 T_{g,i-1,j}^{m+1} + K_4 T_{g,i,j+1}^{m+1} + K_5 T_{g,i,j-1}^{m+1} = K_6 (i=1,2,\dots,M_\beta-1;\ j=1,2,\dots,J_0-2) \tag{32}$$

$$K_1' T_{g,i,j}^{m+1} + K_2' T_{g,i+1,0}^{m+1} + K_3' T_{g,i-1,0}^{m+1} + K_4' T_{g,i,1}^{m+1} + K_5' T_{g,i,J_0-1}^{m+1} = K_6' (i=1,2,\dots,M_\beta-1) \tag{33}$$

$$K_1'' T_{g,i,J_0-1}^{m+1} + K_2'' T_{g,i+1,J_0-1}^{m+1} + K_3'' T_{g,i-1,J_0-1}^{m+1} + K_4'' T_{g,i,0}^{m+1} + K_5'' T_{g,i,J_0-2}^{m+1} = K_6'' (i=1,2,\dots,M_\beta-1) \tag{34}$$

$$T_{g,i,J_0}^{m+1} - T_{g,i,0}^{m+1} = 0 (i=0,1,\dots,M_\beta-1) \tag{35}$$

$$-(e_1+e_2) T_{gM_\beta,j}^{m+1} + e_1 T_{gM_\beta-1,j}^{m+1} = -e_2 T_W \tag{36}$$

这个方程组有未知数 $(M_0+1)(J_0+1) + \sum_{n=1}^{N}(M_n+1)(J_0+1) + (M_\beta+1)(J_0+1)$ 个, 方程个数与未知数相同, 方程组为线性方程组, 可通过高斯消元法求解。

将网格节点统一编号后, 封闭差分方程组中第 i 个节点的差分方程可写成下列形式:

$$C_{i1} T_1^{m+1} + C_{i2} T_2^{m+1} + \cdots + C_{ij} T_j^{m+1} + \cdots C_{isz} T_{sz}^{m+1} = b_i \tag{37}$$

式中　$i=1,2,\dots,sz$; $j=1,2,\dots,sz$;

C_{ij}——第 i 个节点的差分方程中第 j 个节点温度对应的温度系数;

b_i——封闭差分方程组中第 i 个节点差分方程的常数项系数。

C_{ij}、b_i 均由原油、管壁、土壤、大气等的物性参数, 时间步长, 差分网格数, 等分数等值决定, 并且对于不同的节点、不同时刻, 它们的值不尽相同。

对各个节点都建立了差分方程后, 将各个差分方程组合, 就建立了热油管道停输热力计算的差分方程组, 采用高斯消元法可以对这个方程组进行求解。

3　应用实例

某埋地热油管道, 管径为 $\Phi 355.6\times 6.4$, 输量在 $150\times 10^4 \sim 320\times 10^4$ t/a, 沿线地温夏季为 15℃左右, 冬季为 4~5℃, 春秋为 8~9℃, 进站油温在 48~61℃, 出站油温为 72℃。图 3~图 5为管道停输

后管道全线温度随时间变化的情况。从而根据油品性质就可以确定出管道的安全停输时间[8]。

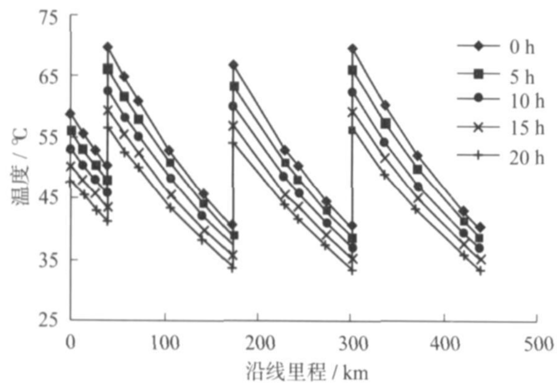

图 3 春秋季时沿线温降图

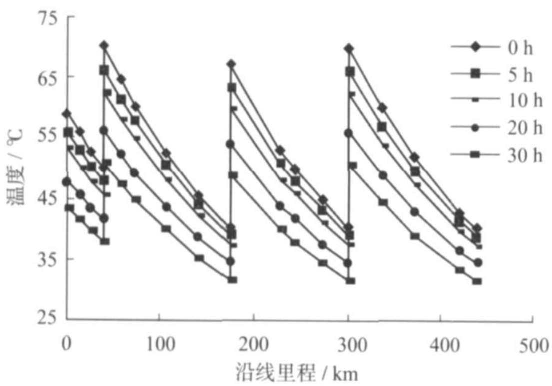

图 4 夏季时沿线温降图

4 结束语

通过建立热油管道土壤、油品、管壁传热方程，结合边界条件、连接条件、初始条件等，对其进行数值求解，可以计算出管道停输后的温降规律，从而为更合理地确定管道的不同季节的安全停输时间提供了计算依据。

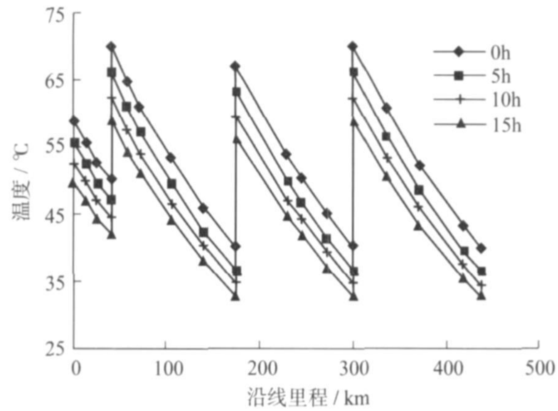

图 5 冬季时沿线温降图

参考文献:

[1] 罗塘湖. 含蜡原油流变特性及其管道输送[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.

[2] 古宾 B E. 高粘高凝原油和成品油管道输送[M]. 陈祖泽译. 北京: 石油工业出版社, 1997.

[3] 张 帆. 马—惠线、红—惠线应用降凝剂进行原油混输的研究[J]. 油气储运, 1988, 7(5): 21-24.

[4] 杨筱蘅, 张国忠. 输油管道设计与管理[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996.

[5] А апкин В М. 原油和油品管道的热力与水力计算[M]. 罗塘湖译. 北京: 石油工业出版社, 1981.

[6] 黄福其, 张家猷, 罗塘湖. 地下输油管热工计算[J]. 石油学报, 1980, 1(1): 77-91.

[7] 李长俊, 李丙文. 热油管道停输数值模拟[J]. 油气储运, 2001, 20(7): 28-31.

[8] 谢依杨. 含蜡原油管道安全停输时间的确定[J]. 油气储运, 2001, 20(8): 22-23.