基于 PHOENICS 埋地输油管道非稳态传热数值研究

张青松[1,2], 陆焱洪[1], 王 宏[1], 潘维英[1]

(1. 瑞吉格泰油气工程有限公司, 江苏 无锡 214072;
2. 江苏工业学院江苏省油气储运技术重点实验室, 江苏 常州 213016)

摘 要: 埋地输油管道非稳态热力研究能为热油管道间歇输送过程中确定停输时间以及再启动等问题提供基础。通过分析埋地热油管道的几何特性, 建立了有限区域内非稳态热油管道土壤数学模型和边界条件, 使用 PHOENICS 软件对数学模型进行了求解。模拟结果与工程现象吻合较好, 证明了利用 PHOENICS 软件完全能够对埋地输油管道土壤温度场变化规律进行研究, 提供了研究捷径。

关键词: 热油管道; 温度场; 数值模拟; PHOENICS; 传热

文章编号: 1006-5093(2007)03-0024-03 文献标识码: A

0 前言

为降低粘度, 减少摩阻损失和防止凝管, 加热输送是国内原油的主要输送方式, 且长输管道大多采用埋地敷设。在埋地热油管道的运行过程中, 由于热油温度远远高于周围土壤温度, 在径向温差作用下, 油流所携带的热量不断地向周围环境扩散, 导致其油温与土壤温度不断变化, 这一过程是非稳态热力过程。研究输油管道非稳态热力过程的关键是分析管道周围非稳态温度场。目前国内外已有许多学者对此进行了多方面的研究, 提出了大量有价值的求解方法。其主要是采用实验测量 (探针法、热电模拟等)与数值模拟两种方法。显然, 对长输管道全线土壤温度场进行测量是不现实的。数值模拟时, 边界条件的复杂性, 又导致程序编写烦琐。而通常采用的有限差分法对方程进行离散, 埋地管道周边的边界处网格也不易划分[1]。采用成熟的软件模拟, 既可以节省大量的人力、物力和财力, 又能达到研究的目的。因此, 本文将采用 PHOENICS 软件求解数学模型, 模拟热油管道与周围土壤温度场的变化规律, 对热油管道间歇输送过程中确定停输时间以及再启动等问题的研究奠定了基础, 同时也能为冷热油交替顺序输送过程热力问题的研究提供基础与捷径。

1 物理数学模型建立

忽略土壤沿管轴 Y 方向的温度梯度, 问题转化为二维无内热源的非稳态传热问题[2]。受管道内油品温度影响, 热油管道周围将形成一个以管道为中心的土壤热影响区域。由于管外土壤为无限大的空间, 因此将管外热影响区域简化为矩形, 大小由水平方向绝热面 ($\pm L_r$)和深度方向恒温层 (H)进行确定。在有限的热力影响区域内, 建立受热管内原油散热影响土壤温度场数学模型如下:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = a_s\left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2}\right),$$

$$t > 0,\ -L_r \leqslant x \leqslant L_r,\ 0 \leqslant z \leqslant H \qquad (1)$$

边界条件:

$$\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r}\Big|_{r=R_N} = -a_s(T_{oin} - T_s)$$

$$\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y}\Big|_{y=0} = -a(T_s - T_f)$$

收稿日期: 2006-09-18

作者简介: 张青松 (1982-), 男, 江苏淮安人, 在读硕士, 主要从事油气储运与运输研究。电话: 15961879978

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\left.\frac{\partial T_s}{\partial x}\right|_{x=\pm L}=0$$

$$T_s|_{H_1}=T_h$$

$$T_s|_{t=0}=T_0(x,z) \qquad (2)$$

式中：T_s，T_0 为土壤任意时刻和初始时刻温度分布，℃；T_{oil}，T_f 为管内油品温度和大气温度，℃；t 为时间，s；a_s 为土壤导温系数，m^2/s；λ_s 为土壤导热系数，W/(m·℃)；a，a_s 为土壤表面向大气的放热系数和原油与管内介质向土壤的当量放热系数，W/(m·℃)；R_N 为管道外半径，m；T_h 为大地恒温层温度，℃。

2　求解方法

PHOENICS主要应用于动力、化工、制冷、航空、核能等工业领域的流体流动与传热过程的数值模拟，是目前世界上最流行的计算流体力学的软件之一。本文将采用 PHOENICS对以上方程进行离散与求解。该软件采用了 SIMPLEST算法[3]。

2.1　PHOENICS控制方程

PHOENICS将质量守恒、动量守恒、能量守恒和其它守恒特性等控制方程统一为通用偏微分方程式，以此来描述流体的流动、传质传热、化学反应等物理现象。通过控制方程的形式如下：

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho U\Phi-\Gamma_{\Phi,\mathrm{eff}}\,\mathrm{grad}\Phi)=S_\Phi \qquad (3)$$

式中：Φ 为通用因变量，可代表浓度、速度、焓、单位质量的动量及紊流动能等；S_Φ 表示源项，对不能纳入非稳态项，对流项与扩散项的一律纳入源项中处理；U为速度矢量；$\Gamma_{\Phi,\mathrm{eff}}$为广义的扩散系数；$\rho$为流体密度；$t$表示时间。采用有限体积法对控制方程进行离散，其离散形式为：

$$a_P\Phi_P=a_N\Phi_N+a_S\Phi_S+a_E\Phi_E+a_W\Phi_W+a_H\Phi_H+a_L\Phi_L+a_T\Phi_T+S_\Phi \qquad (4)$$

这里 Φ 代表变量，下标 P，E，W，N，S，H，L表示该变量所处的位置如图 1所示，下标 T代表前时步时间的值，a代表系数。

2.2　边界条件处理

PHOENICS软件对于边界条件的处理采用附加源项法[4]。将边界上的未知量从方程组中消去，并在邻近边界的节点方程中添加。对于简单的边界条件，

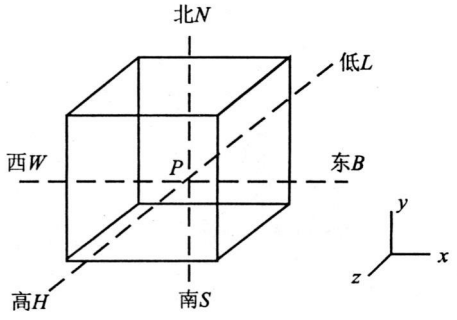

图 1　网格划分

如模型中的大地恒温层温度，属于第一类边界条件，直接可以给它赋值。对于第二类边界条件，模型中的受管道水平影响几乎可以忽略不计的左右两个竖直面，可以通过 VR界面进行设置，本模型选为绝热面(adiabatic)。大地与环境的交界面，管道流体与管壁都属于第三类边界条件，需要自定义源项，可以直接在 VR界面进行设置或通过 PIL语言施加该源项：

Patch(name, type, ix,f ix,l iy,f iy,l iz,f iz,l int,f int)

Coval(name, variable, coefficient, value)

这里 variable是 PHOENICS求解变量，coefficient写入对流扩散系数，value写入值。type代表类型，如面积、体积等。

对一些复杂的边界条件如非稳定的大气温度也可以通过 PHOENICS内置的 PLANT或 INFORM进行设置。

3　算例分析

东北某输油管道[5]管外径 $D=377$ mm，埋深 $h=1.3$ m，油温 $T_{in}=55$℃，土壤导热系数 $\lambda_s=1.5$ W/(m·℃)，导温系数 $a_s=0.002$ m²/h，原油导热系数 $\lambda_y=0.13$ W/(m·℃)，导温系数 $a_y=0.00025$ m²/h，比热容 $C_y=2.1$ kJ/(kg·℃)，密度 $\rho_y=800$ kg/m³，管内原油对土壤的放热系数 $a_s=177$ W/(m·℃)，土壤对空气的放热系数 $a=17.5$ W/(m·℃)，大气温度 $T_f=12$ ℃，大地恒温层取 $H_1=10$ m，温度 $T_h=5$ ℃。PHOENICS模拟部分见图 2～3。

稳态环境下的大地温度场分布呈线形分布，而当大地受到非稳态环境影响时，由于温度波的延迟性，大地温度场分布呈曲线分布。图 2与图 3是不同时刻土壤受到运行热油管道温度影响的温度场。可以看出，温度场中的等稳线大致呈偏心环状分布于管道周围，离管心越远，偏心环半径越大。但埋深

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

方向超过一定深度，热油管道对下方土壤温度场的影响弱到可以忽略不计。

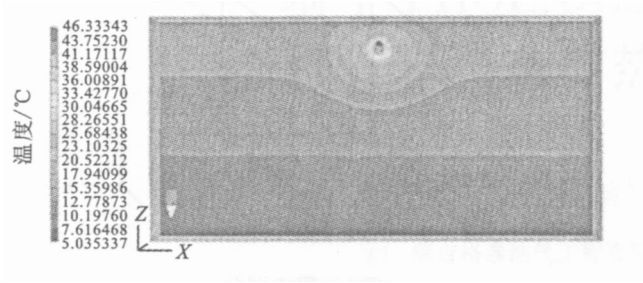

图 2 PHOENICS模拟温度场，T= 500 h

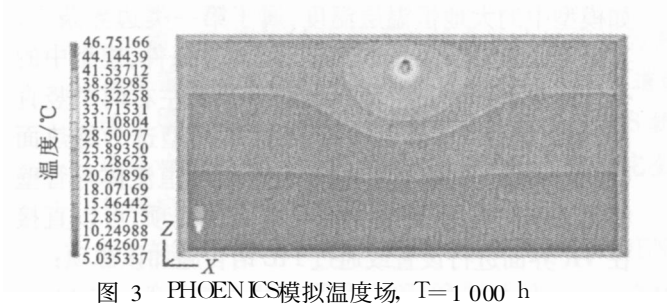

图 3 PHOENICS模拟温度场，T= 1 000 h

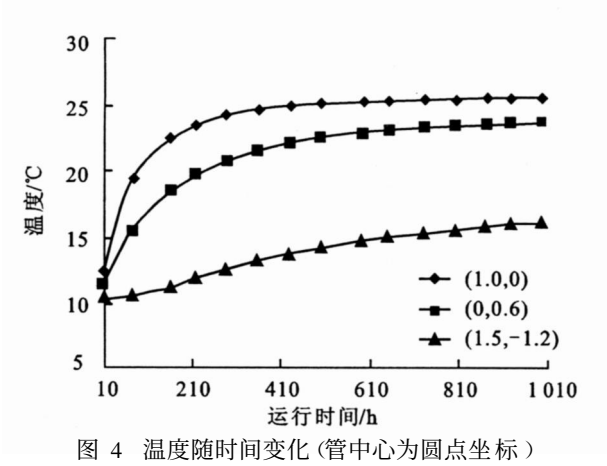

图 4 温度随时间变化（管中心为圆点坐标）

在管道运行过程中，管外土壤与管内原油作为一个整体发生着温度变化。从图 4中，（1.0，0）、（0，0.6）、（1.5，－1.2）三个点土壤温度变化可以看出，沿 X轴方向及沿 Y轴方向土壤温度随运行时间增多，土壤吸热量增多，温度继续呈上升趋势，只是曲线越来越平滑，温度变化越来越小。

图 5中可以发现，热油管道运行 500 h时，距管道中心垂直下方距离 3.5 m外，土壤温度场受热油管道影响几乎可以忽略不计。土壤温度场与初始温度场曲线达到了重合。在管道水平方向，距管道中心 3 m处，温度几乎达到稳定值，与初始温度相同。因此，管外土壤温度的变化集中在管道周围一个不大的区域，该区域的大小受到管道内油温及土壤介质等因素

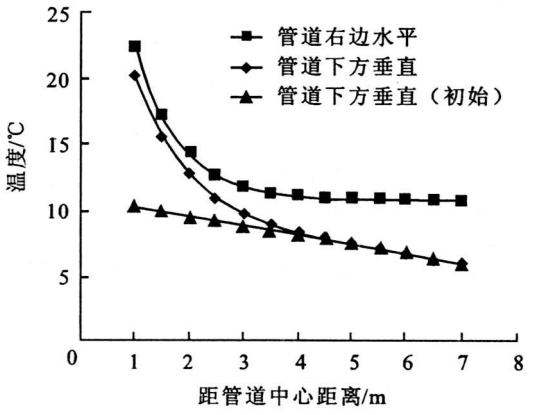

图 5 温度随距管道中心距离变化，T= 500 h

的影响。同时也证明了无限的区域简化为有限的热力影响区域，这是完全可行的，大大简化了热油管道求解过程。

4 结论

a. 考虑大地恒温层及埋地热油管道对大地温度场的影响范围，建立了热油埋地管道非稳态情况下，有限区域的传热简化模型。应用 PHOENICS软件，对周围土壤温度场的变化进行了模拟。能够得到任意时刻土壤温度场的温度分布，从而能更好地对热油管道与土壤非稳态热力进行研究。并且通过 PHOENICS模拟出的自然条件下土壤温度场作为初始温度场，更符合真实情况，避免了因人为设置初始温度场而引起的误差。

b. 数值模拟结果与工程现象完全吻合，证明了该软件完全能够对输油管道与土壤之间非稳态时温度场的变化进行模拟。同时能为类似的传热问题（停输、间歇输送）研究提供行之有效的解决方法，为冷热油交替顺序输送过程热力问题的研究提供基础与捷径。

参考文献：

[1] 吴国忠，陈 超．埋地管道传热数值模拟网格划分方法[J]．大庆石油学院学报，2005，29(2)：82-84.
[2] 张国忠．埋地热油管道停输降温过程的研究[J]．油气储运，2004，23(12)：33-37.
[3] 段雪淘，邬志敏，刘道平，等．板带式速冻机空载状况下速度场的数值模拟[J]．上海理工大学学报，2005，27(2)：131-134.
[4] 严良文，王志文．折流板换热器的数值模拟及协同分析[J]．石油机械，2005，33(4)：13-15.
[5] 吴 明，杨惠达，邓秋远．热油管道停输过程中土壤温度变化规律研究[J]．西安石油学院学报（自然科学版），2002，17(4)：51-55.

u u e eserv