

# 热油管道停输后周围土壤温度场变化规律研究\*

王沛迪<sup>1</sup> 成庆林<sup>1</sup> 孙巍<sup>1</sup> 徐颖<sup>1</sup>

**摘要:** 针对埋地含蜡原油管道停输后温降的变化过程, 建立直角坐标系下埋地热油管道及其周围土壤传热的物理模型; 考虑原油物性、土壤温度随深度和时间的变化规律, 建立原油、管道和土壤耦合传热的数学模型。模拟管道在不同土壤导热系数、不同环境温度和不同初始油温情况下停输后的土壤温度场分布变化情况。模拟结果表明: 不同季节停输后土壤的温度场分布呈现不同的趋势, 且越靠近管道的土壤区域, 温度场分布受管道影响越大。

**关键词:** 热油管道; 停输温降; 传热; 土壤温度场; 数值模拟

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.12.004

## Research on Temperature Field Distribution of the Soil Around the Hot Crude Oil Pipeline After Shutdown

Wang Peidi, Cheng Qinglin, Sun Wei, Xu Ying

**Abstract:** This paper is aimed at the change process of buried waxy crude oil pipeline temperature drops after shutdown, the physical model under the rectangular coordinate system of buried oil pipeline and the heat transfer in the surrounding soil are established. Taking physical property of crude oil, change law of soil temperature with depth and time into consideration, the mathematical model for coupled heat transfer of crude oil, pipeline and soil is established. The distribution law of soil temperature field under different conditions can be obtained by simulating the soil temperature distribution situation under different thermal conductivity of soil, ambient temperature and initial oil temperature. The result shows that the temperature distribution is influenced by season changing, and the temperature distribution of the soil near the pipelines could be influenced more greatly.

**Key words:** waxy crude oil pipelines; temperature drop after shutdown; coupled heat transfer; temperature field of soil; numerical simulation

我国原油大多具有高含蜡、高凝点的特性, 为保证安全运行常采用加热的输送方式<sup>[1]</sup>。埋地热油管道在运行过程中, 常会因为检修或故障因素等发生停输现象。停输后管内原油温度逐渐降低, 热量逐渐沿土壤扩散, 蜡晶随温度降低逐渐析出, 长时间停输易发生凝管等事故。由于土壤温度场的分布对管内原油温降具有重要影响, 因此研究停输后管道周围土壤温度场具有重要意义<sup>[2]</sup>。李长俊等人根据半无限大土壤空间传热模型, 推导出土壤温度场随管内介质和气候条件变化的解析解, 但未将大地本身恒温层的影响考虑在内<sup>[3]</sup>; 张劲军等进行了埋

地原油管道停输后土壤温度场分布规律研究, 建立了热油管道热力影响区域模型, 通过有限元法进行求解, 并对管径、管道埋地深度、管内介质温度等对管道热力影响区域的影响进行定量分析<sup>[4]</sup>。前人研究虽已建立了较为合理的传热模型, 但并未考虑蜡晶析出的凝固潜热对温降和周围土壤温度场分布的影响。

本文针对埋地热油管道停输后温降过程进行模拟, 将析蜡潜热转换为附加比热容的等价比热容进行处理, 分析土壤导热系数、初始原油温度以及环境温度对土壤温度场分布的影响。

\*基金论文: 国家自然科学基金资助项目“含蜡原油管道安全经济输送的基础问题研究”(51534004); 黑龙江省普通高校科技创新团队基金项目(2009td08); 东北石油大学研究生创新科研项目(YJSCX2015-009NEPU)。

<sup>1</sup>东北石油大学石油工程学院

## 1 传热物理模型

为了对管道在土壤中的传热进行数值计算，需要将无限大的土壤空间转换为有限的区域，并引入管道热力影响区的概念（即在距离管道附近区域内，土壤温度场分布受热油管道影响；超过一定范围后，这种影响逐渐变小甚至忽略不计<sup>[6]</sup>）。本文利用该方法将半无限大的土壤区域转换为矩形的有限空间，水平方向边界为管道热力影响区域，纵向埋深方向边界为大地的恒温层<sup>[6]</sup>。利用周期性变化的大地土壤自然温度场的计算公式预测土壤恒温层深度和热力影响区域大小<sup>[7]</sup>，预测结果表明：在10 m以内土壤温度随季节变化较为明显；当深度超过10 m后，温度变化趋于平稳，保持在14℃左右。因此土壤深度方向边界取10 m，恒温层温度为14℃。根据相关文献可知，水平方向热力影响区域边界均未超过10 m，因此水平方向边界取10 m足够。埋深为1.5 m，输油管道规格为Φ600 mm×8 mm，保温层厚度为12 mm，沥青防腐层厚度为5 mm。停输后管道和土壤传热物理模型如图1所示。

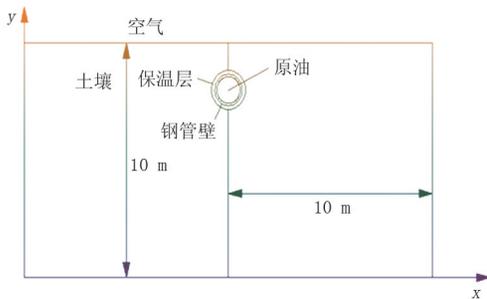


图1 停输后管道和土壤传热物理模型

## 2 数学模型的建立

### 2.1 热油管道

热油管道运行的质量守恒方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为

$$\rho_0 \left( \frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho_0 \left( \frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中： $\rho_0$ 为原油的密度， $g/cm^3$ ； $F_x$ 、 $F_y$ 分别为 $x$ 和 $y$ 方向上体积力的分量。

原油停输降温的能量守恒方程为

$$\frac{\partial T_0}{\partial t} + u \frac{\partial T_0}{\partial x} + v \frac{\partial T_0}{\partial y} = \frac{\lambda_0}{\rho_0 c_{p0}} \left( \frac{\partial^2 T_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_0}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

式中： $c_{p0}$ 为析蜡潜热转换为附加比热容的等价比

热容，自然对流随时间逐渐减弱，此时认为式中 $u = v = 0$ 。

### 2.2 管道与土壤间的传热

$$\frac{\partial T_n}{\partial t} = \frac{\lambda_n}{\rho_n c_{pn}} \left( \frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial y^2} \right) \quad n = 1, 2, 3 \quad (5)$$

式中： $n$ 指管道各层（沥青层、保温层等）。

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{\lambda_1}{\rho_1 c_{p1}} \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

式中： $T_n$ 为管道各层温度，℃； $T_1$ 为土壤温度，℃； $\tau$ 为计算时间s； $\rho$ 为密度， $kg/m^3$ ； $C_p$ 为比热容， $J/(K \cdot kg^{-1})$ ； $\lambda$ 为导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

### 2.3 初始条件

定义初始条件如下：

$t = 0$ 时

$$T_0(a, b, c) = T_1(a, b, c) \quad (7)$$

式中： $T_0(a, b, c)$ 为停输初始时刻温度（ $a$ 为原油， $b$ 为管道各层， $c$ 为土壤），℃； $T_1(a, b, c)$ 为正常输送时的温度（ $a$ 为原油， $b$ 为管道各层， $c$ 为土壤），℃。

### 2.4 埋地管道边界条件

由上文计算得到的土壤恒温层为10 m，温度为14℃。故设定管道埋深方向边界为温度边界，定值为287.15 K。大气与土壤接触的地表边界为对流传热边界，对流传热系数即为大地向大气的放热系数 $\alpha_2$ ，其值为 $16.5 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。地表以上流体的温度为空气的温度，空气平均温度的计算公式如下<sup>[8]</sup>

$$T_a = T_{am} + (T_{a,max} - T_{am}) \cos \left( \frac{2\pi\tau_1}{\tau} \right) \quad (8)$$

式中： $T_{am}$ 为年平均气温； $T_{a,max}$ 为日平均最高温度，℃； $\tau$ 为时间， $3.156 \times 10^7$  s； $\tau_1$ 为日平均最高气温之日起时间，经计算得出外界流体温度即大气温度为267.95 K。

将管道热力影响区右边界设置为绝热壁面，因此热流边界中热流密度为0。

### 2.5 物性参数

数值计算涉及的区域有原油、钢管壁、保温层、防腐层、土壤和大气等。其中钢管壁的密度为 $7860 kg/m^3$ ，比热容为 $500 J/(kg \cdot K)$ ，导热系数为 $46 W/(m \cdot ^\circ C)$ 。保温层采用聚氨酯泡沫材料，密度为 $60 kg/m^3$ ，比热容为 $750 J/(kg \cdot K)$ ，导热系数为 $0.04 W/(m \cdot ^\circ C)$ 。土壤的密度为 $1700 kg/m^3$ ；比热容为 $1300 J/(kg \cdot K)$ ，导热系数为 $1.5 W/(m \cdot ^\circ C)$ 。由于管道停输后的温降计算是一个非稳态过程，管内原油物性例如密度、黏度，比热容等并不是固定

值,而是与时间具有一定函数关系,管内原油物性随时间的变化对土壤温度场的分布具有一定影响,因此应予以考虑。通过现场试验与测定可得具体原油相关物性与温度的函数关系,利用UDF(用户自定义)功能进行编译和导入。

### 3 数值模拟与计算结果分析

利用Gambit软件对所建模型进行网格划分。管道部分的保温层、防腐层采用四边形网格结构(Quad)进行划分,土壤区域采用三角形网格结构(Tri primitive)进行划分<sup>[9]</sup>。由于管道和土壤温度场关于竖直轴对称,因此为提高运算速度,只对对称轴右半侧部分进行网格划分。求解器选用压力-密度基求解器,打开能量方程选项,考虑重力作用。环境大气压为标准大气压(101.325 kPa),所有双边壁面均设置成耦合壁面,采用二阶精度格式进行离散。

#### 3.1 环境温度对停输后管道周围土壤温度场的影响

不同季节外界环境温度不同,导致热油管道停输后周围土壤温度场分布产生差异。以华东地区某管道为例,该地区冬季地表平均气温为 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,计算得到土壤初始温度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。夏季地表平均温度为 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,土壤初始温度为 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。分别对冬、夏两季管道停输后土壤温度场的分布进行模拟。

从模拟结果可以看出,夏季停输后土壤温度场分布呈现“上高下底”,温度“上疏下密”的情况,这是因为靠近地表的土壤温度场主要受空气温度影响,夏季地表温度较高,致使靠近地表的土壤温度场温度升高,土壤从大气吸收热量,地表附近温度高于地下温度,管道向下方散失的热流强度较大,造成土壤等温线“上疏下密”的分布情况。冬季由于管道内油品、土壤与空气的温差较大,土壤温度高于空气温度,土壤向地表附近大气放出热量,使得向上热流强度增强,造成土壤等温线“上密下疏”的情况。同时可以看出,夏季停输时管道左下方区域等温线大致呈线性分布,冬季在管道左上方区域等温线呈线性分布。

#### 3.2 不同土壤导热系数下停输后土壤温度分布

土壤的导热系数主要取决于土壤的类别和土壤的孔隙度、渗透率等因素,土壤导热系数对于土壤温度场的分布具有一定影响<sup>[10]</sup>。设初始地温为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,外界流体温度为 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,分别模拟土壤导热系数为 $0.5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $1.5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $3.0\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 条件下管道停输15h后土壤温度场的分布(图2)。

由图2的模拟结果可知:土壤温度场分布受土

壤导热系数不同影响较大,且影响作用与距管道中心距离有关,距离管道中心越近,导热系数影响越大。同时可以看出,导热系数越小,在相同时间内热量在土壤中的散失越慢,保温效果越好;相同时间内,随着土壤导热系数的增大,热油管道周围土壤温降加快,等温线变稀疏。

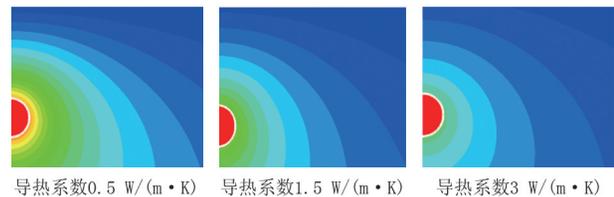


图2 不同土壤导热系数下管道停输15h温度场的分布

#### 3.3 不同初始油温停输后周围土壤温度场的分布

为研究不同初始原油温度停输后管道周围土壤温度的变化情况,在距离管道中心0.5m的水平方向上设置温度监控点,分别模拟初始油温为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,管道停输后土壤温度变化的情况(图3)。

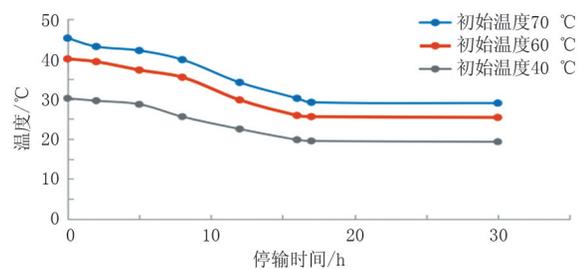


图3 不同初始油温停输后30h土壤温度变化情况

从图3可以看出,在0~5h的停输初期,虽然此阶段管道内自然对流比较强烈,热流密度较大,但是土壤温降并不明显。这是因为土壤对于温度的变化具有“延迟性”,温度并不是迅速降低,但随着时间的推移土壤的这种蓄热作用逐渐减弱,土壤温度随原油温度的下降开始逐渐下降;随着管内原油蜡晶逐渐析出,原油黏度增大致使自然对流减弱,管内原油温度趋于稳定,此时管外土壤温度也随原油温度的稳定和热流密度的减小而趋于稳定。

## 4 结论

(1) 根据土壤恒温层理论,综合考虑大气温度的变化情况,将半无限大土壤空间转换为矩形区域进行求解,计算得到华北某油田管道外土壤区域恒温层深度为10m,恒温层年平均温度为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过UDF(用户自定义)功能处理原油随物性的变化问题,可使模拟更接近实际情况。

(2) 对停输后埋地含蜡原油管道周围土壤温度场进行了较为准确的模拟,从模拟(下转第17页)