

输油管道流场的仿真模拟

白芳杰

(中国石油天然气管道局设备管理中心, 河北 廊坊 065001)

摘 要: 基于质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律, 建立埋地热油管道管内原油耦合流动方程, 采用控制容积法, 对热油管道停输后的自然对流进行了耦合求解, 得到了管内典型流动洋相与等温线的变化, 并对冬季停输状态下的管内原油自然对流的形成发展进行了求解, 得到了直观的变化过程。

关键词: 热油管道; 停输; 流场; 数值模拟

管内含蜡原油停输过程是一种不稳定的变物性的耦合流动, 其降温传热是一种伴随有相变、析蜡潜热、移动边界的非稳态传热过程, 描述较为复杂^[1-2]。

在查阅大量文献的基础上, 通过三大守恒定律, 对埋地介质管道热传递过程中物性耦合的控制方程进行了推导和筛选, 建立了相应的热力与水力流动的数学模型, 计算过程中会考虑温度对物性参数的影响, 以及管内介质相态变化的问题, 主要研究埋地介质管道自然对流的变化趋势。

采用数值计算中常用的控制容积法以及压力与速度耦合的 SIMPLE 算法, 编制了交错网格流动传热求解软件并进行了仿真模拟。

1 模型建立

1.1 管内原油控制方程

$$\text{质量守恒方程: } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

动量守恒方程:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

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

其中, F_x 、 F_y 分别为体积力在 x 、 y 方向的分量
能量守恒方程:

$$\frac{\partial T_0}{\partial t} + u \frac{\partial T_0}{\partial x} + v \frac{\partial T_0}{\partial y} = \frac{\lambda_0}{\rho_0 c_{p0}} \left(\frac{\partial^2 T_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_0}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

对于管道和土壤, 采用导热微分方程, 即

$$\frac{\partial T_n}{\partial t} = \frac{\lambda_n}{\rho_n c_{pn}} \left(\frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial y^2} \right), n=1, 2 \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_t}{\partial t} = \frac{\lambda_t}{\rho_t c_{pt}} \left(\frac{\partial^2 T_t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_t}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

1.2 初始条件

$$t=0 \text{ 时, 原油: } T_o = T_{o0} \quad (6)$$

$$\text{管道各层: } T_n = f(x, y), n=1, 2 \quad (7)$$

$$\text{土壤: } T_t = f_t(x, y) \quad (8)$$

式中, 下标 o 和 t 分别表示原油和土壤。

ρ ——密度, kg/m^3 ; λ ——导热系数,

$W/(m \cdot ^\circ C)$; c_p ——比热容, $J/(K \cdot kg)$; T_{o0} ——管

道停输时原油的温度, $^\circ C$; α_0 ——液态原油与管内壁间的

对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; α_{at} ——地表与大气的综

合换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; T_{ts} ——地表温度, $^\circ C$ 。

2 网格划分

土壤温度在管中心附近的变化梯度是较大的, 较远处的土壤受管内介质温度变化的影响较小, 为提高计算速度, 运用先进的 DELAUNAY 方法对土壤区域生成三角形网格, 使得管道附近的土壤计算区域有疏密之分, 可得出重点分析的数据, 并形成不重叠的三角形网格, 见图 1-图 2。

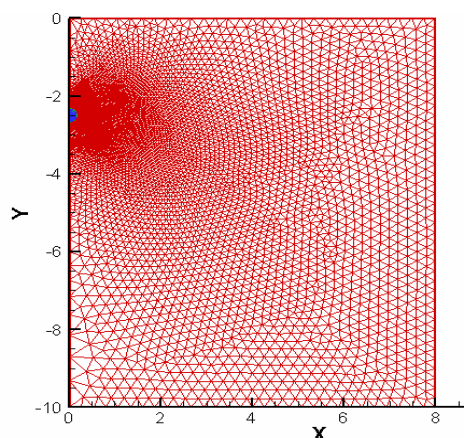


图1 土壤计算网格

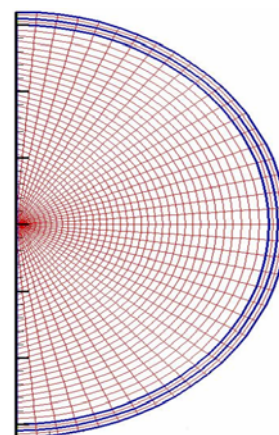


图2 管内介质及管壁网格

3 计算结果

(1) 管内介质的流动相与等温线分布

图3为模拟计算过程中的温度场及相应的速度场。可

知, 由于原油属于高 Pr 数流体, 粘性大不易混合, 加之因导热的热移动比因对流的热移动小得多, 所以管内的温度分布与流动相密切相关。

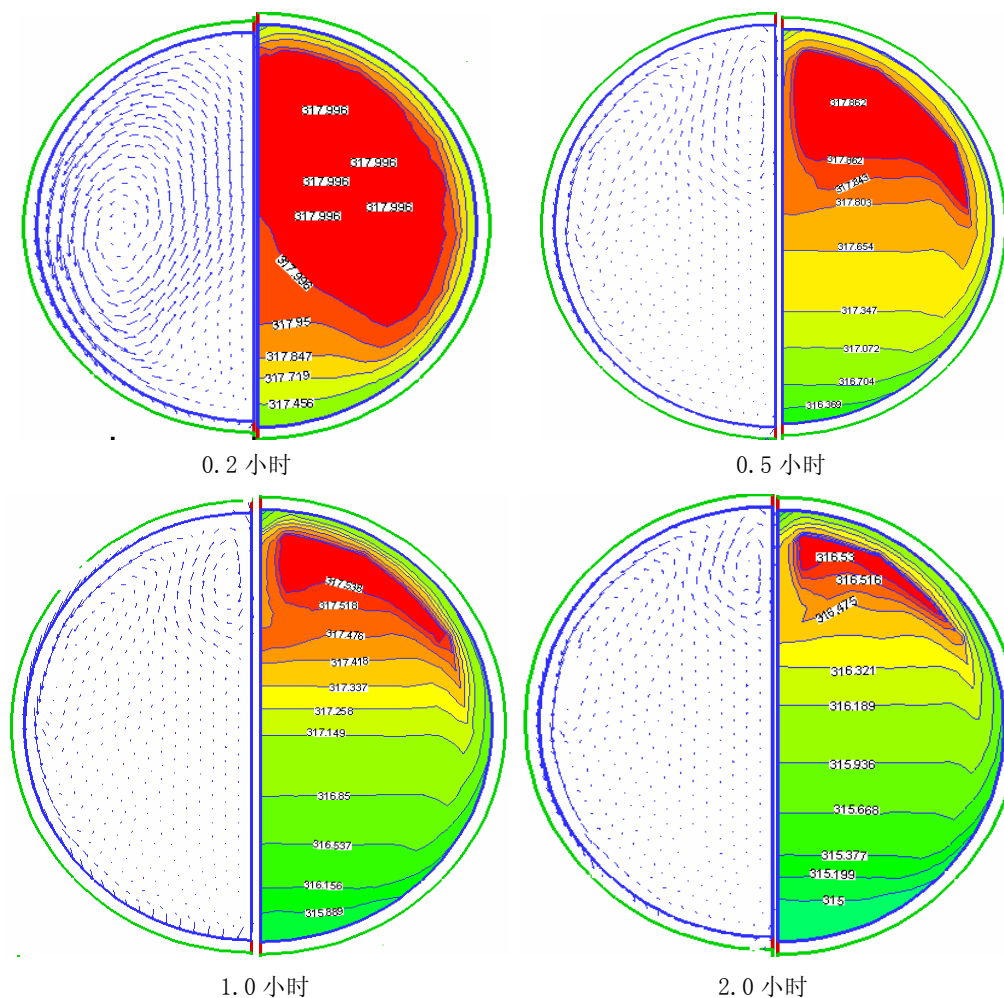


图3 管内介质的流动相与等温线分布

由图3的管内介质的流动相和等温线的模拟仿真结果分析, 在停输的0.5h内, 以下降流的表现方式, 在近管内壁处发生自然对流的传热形式, 中心介质温度高的部分向上移动, 形成的涡流详见图3。由于涡流的旋裹作用, 会将管

道横截面的地温流体移动至管道的中心, 中心温度高的介质运至管道内壁附近, 介质液体的冷却不会以管中心的水平轴而对称, 其他大部分的冷却会以层状的形式自管底一次向上进行。在无量纲数 Pr 较低的区域, 导热导致的热转移较强

烈，虽然会伴随着自然对流形式的换热，但不会分层。随着冬季冷却时间的继续，自然对流形式的换热会逐渐削弱进而消失。

(2) 停输管内自然对流的模拟

较冷气候状态下，埋地管道介质的停输流程模拟结果见表 4。

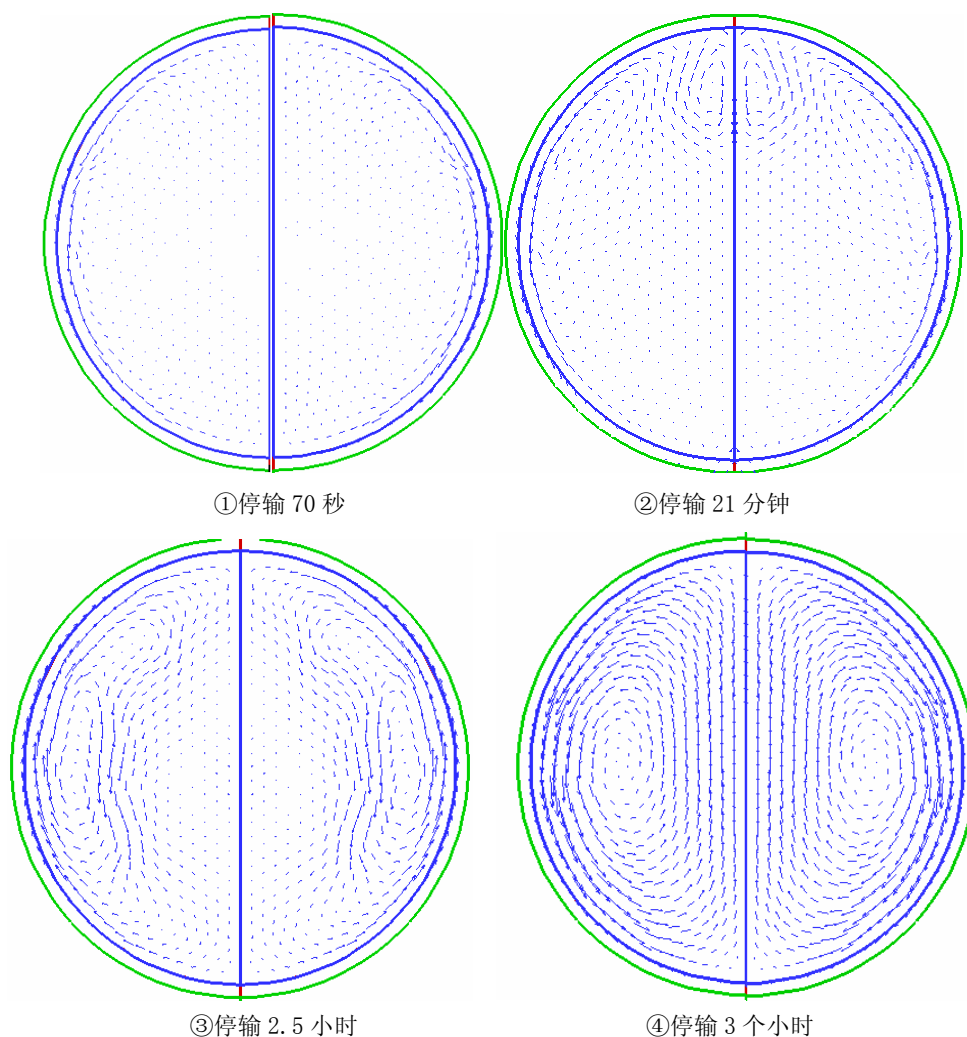


图 4 气温较低状态下埋地管道介质的自然对流模拟

从计算流场结果图 4 分析，管内介质的温度在管道停输的初始阶段是很均匀的，各个部分的温度差别较小，自然对流的影响较弱。冬季状态下，地面温度较低，埋在地面下的管道，其顶部是温度下降较大的，顶部首先与其他部原油产生温差，顶部原油开始下降，管道中心温度较高的介质会朝向顶部流动，由此形成旋转的涡流，可见图 b。对着意外停输时间的继续延长，顶部原油温降增大，与中心介质的温度差别会逐渐增大，管壁处的对立对流漩涡也会形成。

对流作用产生的影响是，管壁处的介质也参与掺混，并随着停输时间的沿长而继续下降，从而形成温度始终低于介质中心的温度，形成在停输 3h 左右较为剧烈的对流涡流，导致管道的散热强度到达最大阶段值。

4 小结

(1) 原油属于高 Pr 数流体，管内介质温度受流动相态影响较大。

(2) 对于埋地介质管道，初始停输时刻，介质温度均一，温差小，随计算时间的延长自然对流的漩涡会在管顶小范围内形成。

(3) 管内在停输后的漩涡是与管轴线垂直的，并沿着管壁向下。

(4) 为提高计算的精度，停输后的自然对流是不可忽视的一项。

参考文献

- [1] 吴国忠. 输油埋地管线实验研究[J]. 油气田地面工程, 2003, 22(5): 8-9.
- [2] 杨显志. 海底输油管道传热实验研究[D]. 大庆石油学院, 2007: 53-61.