

西部原油管道冷热油交替输送过程温度场

邢晓凯¹, 孙瑞艳², 王世刚²

(1. 中国石油大学(北京)城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249;
2. 中国石油吉林油田勘察设计院, 吉林 松原 138000)

摘要: 热原油管道温度场的准确计算对管道的安全运行具有重要意义. 建立了描述冷热油交替输送过程中非稳态水力、热力问题的数学模型, 开发了计算软件, 并对西部原油管道交替输送4种原油进行了模拟计算. 结果表明: 考虑不同管道运行历史得到的管道沿线油品温度最大偏差一般出现在进站位置, 即管道加热站间距离越长, 建立同样精度的温度场需要的管道运行历史越长. 在当前算例范围内, 考虑前一个月的管道运行历史计算得到的温度场即可满足工程精度要求. 由于任意位置温度场的计算偏差都会累积到进站位置, 因此随着站间管道距离的减小, 初始温度场对运行过程的影响趋弱.

关键词: 原油管道; 冷热油交替; 温度场

中图分类号: TE 832

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)04-0614-05

Temperature Field of Batch Transportation of Cool and Hot Oil in Western Crude Pipeline

XING Xiao-kai¹, SUN Rui-yan², WANG Shi-gang²

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China;

2. Survey and Design Institute of Jilin Oilfield Corporation, CNPC, Songyuan 138000, JiLin, China)

Abstract: It is important for safe operation to determine temperature field of crude oil pipeline well and truly. The mathematic model for solving unstable thermal and hydrodynamic problems in the process of batch transportation of cool and hot oil is established, and calculation software is also developed. As an example, the process of batch transportation of four types of oil in western crude pipeline is simulated by the calculation software. The calculation results show that the maximum difference under varied simulating time appears in the inlet of heat stations, i. e. the longer distance between heat stations, the longer time of simulation. The precision requirements of temperature field considering the operation time as a month can be satisfied. The effect of initial temperature filed on the operation course becomes weak with shorter distance between adjacent heat stations because the temperature error can accumulate in the inlet of stations.

Key words: crude oil pipeline; batch transportation of cool and hot oil; temperature field

西部原油管道冷热交替输送既不同于传统的加热输送工艺,又不同于成品油管道顺序输送,在其顺

收稿日期: 2011-02-11.

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05016-004).

作者简介: 邢晓凯(1970—),男,副教授,主要从事长距离管道输送工艺方面的研究, E-mail: xingxk2002@cup.edu.cn.

序输送过程中部分油品在冬季需要加热,同时管内批次较多,有时多达几十个批次(如2007年12月1日,管内有23个批次油品),这些特点决定了该管道运行过程的复杂性,尤其是热力计算的复杂性。准确计算该管道的温度场,对管道的安全运行具有重要意义。

严格地说,初始温度场受管道投产以来所有水力和热力历史的影响,这里就提出了2个问题,第1个问题是,从工程需要的角度看,要确定管道系统任意时刻的温度场,是否有必要考虑管道投产以来的全部历史?如果没有必要,那么需要考虑之前多长时间的管道历史?第2个问题是,既然通过仿真确定的初始温度场与实际温度场间不可避免地存在偏差,那么,这个偏差会对以后的运行仿真(停输再启动、水击分析等)带来多大的影响?经历多长的管道运行之后,这个偏差可忽略不计?

冷热油交替输送是管道输送前沿技术,国内于2005年开始研究该技术^[1-3],重点是冷热油交替输送过程的热力计算方法,缺乏对管道温度场的系统研究。文献[4]认为:在冷热油交替输送过程中,当循环达一定次数后,进站油温将呈现周期性的变化,但在西部原油管道的实际运行中,几乎不存在同顺序等批量的循环输送情况;文献[5-6]在认为管外土壤温度呈周期性或准周期性变化的基础上,对管道温度场的确定进行了分析和讨论,其研究是结合加热输送单一原油管道的运行特性进行的,不适用于频繁调整出站温度、油品种类和流量的西部原油管道系统。

1 埋地管道非稳态传热数学模型

埋地热油管道的传热过程由3部分组成,即管内油流以对流方式将热量传给管道内壁(刚投产管线暂不考虑结蜡层),经过管壁、防腐层将热量传给管道周围土壤,再经地面与大气换热。由于埋地热油管道的热力计算非常复杂,为便于数学模型求解,在数学建模过程中作了如下简化:在油品流动过程中,认为管内原油的温度在同一截面上是均匀的,即管内原油温度只是时间和管轴向的函数;土壤是一种多相分散体系,其中的物质包括固体、液体和气体。传导和对流对体系中的热交换均有贡献,本文将各因素对热交换的贡献归结到土壤的导温系数中,应用导热微分方程来表示各传热形式。忽略轴向降温,将三维不稳定导热问题简化为二维不稳定

导热问题^[7]。

采用数值计算的方法来确定土壤的温度场时,要确定计算的区域。理论上讲,计算区域应该为半无限大土壤介质区域,但实际上,距离热油管道近的区域,土壤的温度场受热油的影响较大,远离热油管道的区域,土壤的温度基本不受影响,这就是所谓的热力影响区域,求解区域示意图如图1所示。通常,管道热力影响区域可按现场测量数据或通过试算来确定,保守起见,热力影响区域范围可取为10 m半径范围^[8],即图1中 R_h 为10 m。

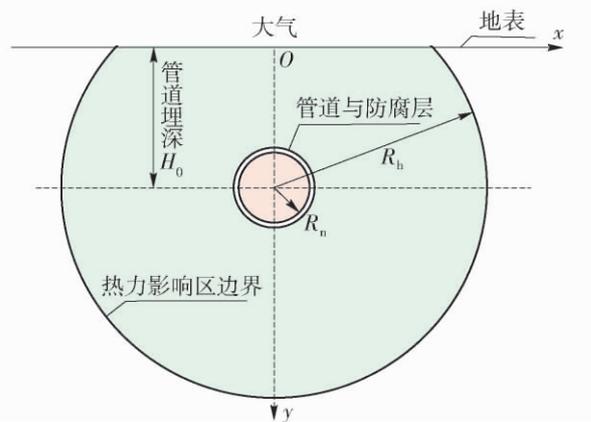


图1 求解区域示意

Fig. 1 Sketch map of the computational domain

根据以上假设与简化,综合考虑原油、管壁、防腐层、土壤及大气之间的相互影响,建立了描述西部原油管道冷热油交替输送过程的数学模型。

1) 油流的换热方程

$$c_p \frac{dt}{d\tau} - \frac{t}{\rho} \beta \frac{dp}{d\tau} = -\frac{4q}{\rho D} + \frac{\lambda v^3}{2D} \quad (1)$$

式中: c_p 为原油比定压热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; t 为原油温度, $^\circ C$; τ 为时间, s ; ρ 为原油密度, kg/m^3 ; β 为原油膨胀系数, $1/^\circ C$; p 为油流截面平均压力, Pa ; q 为单位时间内原油在单位管壁面积上的散热量, W/m^2 ; D 为管道的内直径, m ; λ 为达西摩阻系数; v 为油流截面平均速率, m/s 。

2) 管壁、防腐层及土壤的传热方程

$$\frac{\partial t_k}{\partial \tau} = a_k \left(\frac{\partial^2 t_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_k}{\partial y^2} \right) \quad (k=1, 2, 3) \quad (2)$$

式中: a 为导温系数, m^2/s ; x 为垂直于轴向的水平位置, m ; y 为深度, m ; k 取1、2、3,分别代表管壁、防腐层和土壤。

3) 边界条件

由于计算区域的对称性,仅取管道的右半部分进行研究,相应的边界条件为

当 $x=0, 0 \leq y \leq H_0 - R_n, H_0 + R_n \leq y \leq H_0 + R_n$ 时,

$$\lambda_s \frac{\partial t_s}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

当 $y=0$ 时,

$$-\lambda_s \frac{\partial t_s}{\partial y} = \alpha_2 (t_s - t_a) \quad (4)$$

当 $r=R_n$ 时,

$$t_s = t_d(y) \quad (5)$$

式中: H_0 为管道中心埋深, m; R_n 为管道内半径, m; R_h 为从管中心算起的热影响半径, m; α_2 为地表向大气的放热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; t_a 为大气温度, $^\circ C$; $t_d(y)$ 为热影响半径位置的土壤原始地温, 和深度 y 有关, $^\circ C$.

3) 初始条件

初始温度场包括管内油品的温度分布以及钢管、防腐层和土壤的温度分布, 要计算初始温度场, 必须准确模拟之前很长一段时间的管道运行过程, 这又是一个准稳态仿真过程, 而这个准稳态运行过程也需要一个初始条件, 初始条件为

管内油品各节点温度:

$$t(z) = t_0 + b + (t_R - t_0 - b) e^{-\frac{Kz}{Gc_p}} \quad (6)$$

式中: z 为沿管长方向节点里程, m; t_0 为管道埋深位置原始地温, $^\circ C$; b 为摩擦升温, $^\circ C$; t_R 为加热站出站温度, $^\circ C$; K 为稳态运行时管道的总传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; G 为油流的质量流量, kg/s.

钢管、防腐层及土壤:

$$\frac{\partial^2 t_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_k}{\partial y^2} = 0 \quad (k=1, 2, 3) \quad (7)$$

相应的边界条件同式(3)~(5).

2 模型算法、计算程序开发及现场数据验证

采用三角形网格对管内及土壤区域进行离散, 由于管中心附近温度梯度大, 而离管道越远, 土壤温度受热油管道影响越小, 温度梯度越小, 因此在管道附近网格划分得比较密, 离管道越远网格越稀疏. 采用有限差分法对油流换热方程(1)进行离散, 用有限容积法对传热方程(2)进行离散, 离散方程采用 Gauss-Seidel 法求解计算, 自行开发了冷热油交替输送模拟计算软件. 计算程序的准确性和稳定性已得到西部原油管道实际运行数据的验证, 如图2所示. 可看出, 程序的计算值与实测值偏差在 $0.3^\circ C$ 以内, 说明数学模型、计算方法和模拟计算程序是准确可靠的.

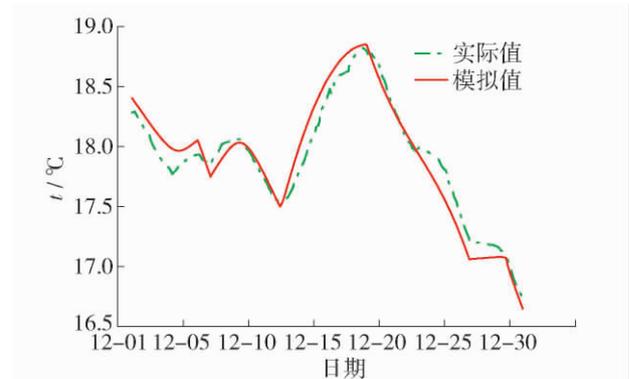


图2 2009年12月四堡站进站油温实际值与模拟值的比较

Fig.2 Actual value and the simulation result of Sipu station inlet temperature in December, 2009

3 温度场的确定与分析

3.1 管道历史对温度场的影响研究

这里提到的管道运行历史包括: 管道流量、各站的出站温度及管道沿线的环境参数(地温、气温及土壤物性等)等.

在西部原油管道系统中, 玉门到张掖站间距最长, 为 284 km, 以此站间为研究对象, 目标是确定西部原油管道投产 6 个月后玉门至张掖站间的温度场. 假定投产的第 1 个月(30 d)出站温度始终维持在 $50^\circ C$; 第 2 和 3 个月(共 61 d) 2 种油品冷热油交替输送, 出站温度分别为 30 和 $40^\circ C$; 第 4 和 5 个月(共 62 d) 3 种油品交替输送, 出站温度分别为 50 、 30 、 $40^\circ C$; 第 6 个月(共 30 d) 4 种油品交替输送, 出站温度分别为 30 、 35 、 60 、 $35^\circ C$. 各月份每种油品在玉门站均发油 2 d 后进行交替.

模拟计算过程中地表对流换热系数为 $14.2 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$, 土壤比热容为 $1450 J/(kg \cdot ^\circ C)$, 土壤密度为 $1500 kg/m^3$, 土壤导热系数为 $1.3 W/(m \cdot ^\circ C)$, 管道埋深处温度为 $4.5^\circ C$.

数值计算之前, 首先要确定相应“初始温度场”, 例如要由 1 个月以来的管道运行历史确定当前时刻的温度场, 必须首先确定 1 个月前的“初始温度场”, 显然, 这个“初始温度场”越接近其时的真实温度场, 得到的仿真结果越准确, 如果这个“初始温度场”恰好和其时的真实温度场相同, 那么, 在不考虑数值模拟方法偏差的前提下, 无论管道运行历史取多长, 得到的仿真结果都是准确的, 这同样是温度场的确定问题. 分别考虑当前时刻之前 6 个月、2 个月、1 个月、24 d、16 d 和 8 d 的运行历史, 进行数

值计算,分别得到当前时刻管道沿线油品的温度分布。计算过程中,考虑管道投产以来的全部管道运行历史时,认为投产初期管内介质为水,温度为当时的地温;在考虑其他管道历史时,以距当前时刻最近的管道出站温度(35℃)和流量为基础参数,计算在稳态条件下建立的温度场为“初始温度场”。

图3给出了流量为1200 m³/h时,考虑当前时刻之前6个月、2个月、1个月、24 d、16 d和8 d的运行历史情况下的沿线温度分布。将考虑管道全部运行历史(6个月)得到的温度场作为当前时刻的准确温度场,可看出,考虑的热历史越长,得到的温度场越接近真实温度场。运行历史分别取为2个月、1个月、24 d、16 d、8 d时,管道沿线温度与真实温度场的最大偏差分别为0.3、0.8、1.3、1.8、3.3℃,且均出现在进站位置,之所以出现在进站位置,原因在于出站温度对不同位置温度场的建立存在着滞后,离出站处越远,滞后的影响越大。

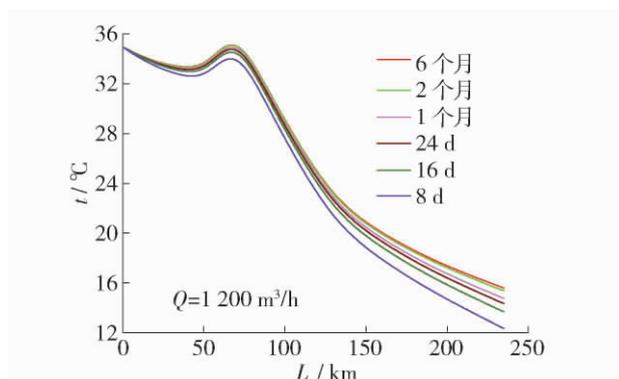


图3 不同管道运行历史下油品温度分布的变化
Fig.3 Change of oil temperature under different operation time

从图4中还可看出,不同加热距离情况下,管道运行历史对温度场的影响,如果管线长度为100 km,在同样的运行历史条件下,运行历史分别按2

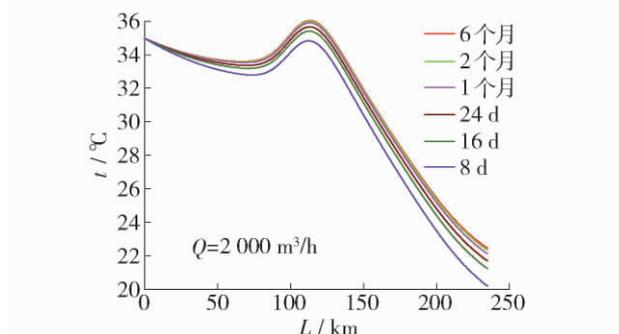


图4 不同管道运行历史下油品温度分布的变化
Fig.4 Change of oil temperature under different operation time

个月、1个月、24 d、16 d、8 d考虑时,管道沿线温度与真实温度场的最大偏差为0.06、0.3、0.5、0.8、1.5℃。可见,在同样条件下,管道加热站间距离越长,建立同样精度的温度场需要的管道运行历史越长。

图4给出了流量为2000 m³/h时,考虑不同运行历史的情况下的沿线温度分布,可看出,运行历史分别取为2个月、1个月、24 d、16 d、8 d时,管道沿线温度与真实温度场的最大偏差为0.1、0.2、0.7、1.2、2.3℃。

从这个算例可看出,如果考虑前一个月的管道运行历史计算当前时刻的温度场,则模拟得到的管道沿线油品温度和实际温度的偏差在0.5℃内。

3.2 初始温度场对运行仿真的影响研究

将前面不同管道运行历史计算得到的温度场作为初始条件进行仿真计算。在第1个算例中,管道流量为1200 m³/h,管道出站温度设为60℃;另一个算例中,管道流量为2000 m³/h,管道出站温度设为50℃,均连续运行。

图5给出了不同初始温度场下,管道流量为1200 m³/h,管道出站温度60℃条件下,管道运行8 d后管内油品的温度分布。可看出,在由2个月、1个月、24 d、16 d、8 d的运行历史形成的初始温度场条件下,运行8 d后,管道沿线温度与真实温度场的最大偏差分别为0.2、0.6、0.9、1.3、2.0℃,均出现在进站位置,在管道100 km处,油品温度与真实温度场的偏差仅分别为0.05、0.2、0.3、0.5、0.8℃,其值要比进站位置的偏差小得多。原因在于,一方面初始温度场本身在进站位置偏差就最大,另一方面进站位置温度场受到管道沿线任意位置热力过程的影响,即使管道进站位置的初始温度场没有偏差,但之前任意位置温度场的计算偏差都会累积到进站位置,使进站位置温度场的计算产生偏离。显然,管道

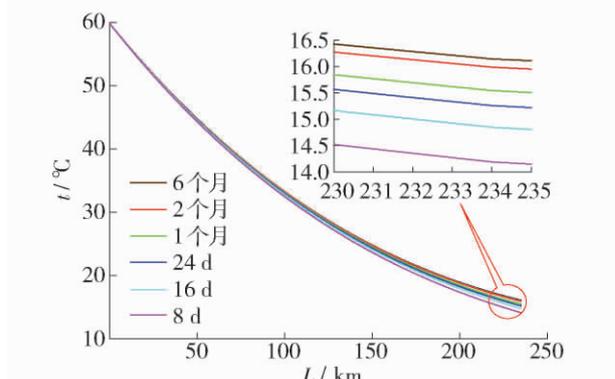


图5 不同初始温度场对管道仿真的影响
Fig.5 Effect of initial temperature field on the simulation result

距离越长, 偏离越大, 因此, 随着站间管道距离的减小, 初始温度场对仿真过程的影响趋弱.

图6给出了不同初始温度场下, 管道流量为 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$, 管道出站温度 $50\ ^\circ\text{C}$ 条件下, 管道运行8 d后管内油品的温度分布. 可看出, 在由2个月、1个月、24 d、16 d、8 d的运行历史形成的初始温度场条件下, 运行8 d后, 管道沿线温度与真实温度场的最大偏差分别为 0.1 、 0.2 、 0.5 、 0.8 、 $1.3\ ^\circ\text{C}$, 也均出现在进站位置.

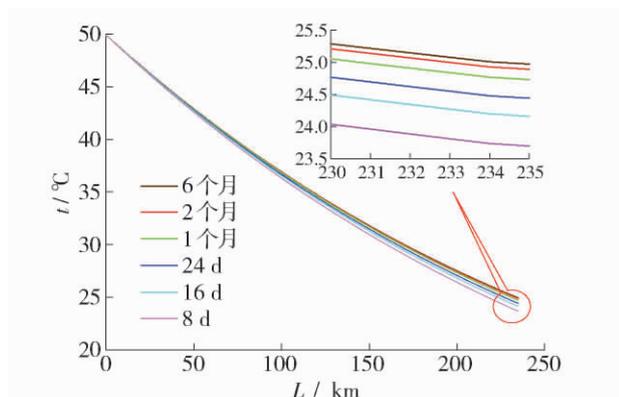


图6 不同初始温度场对管道仿真的影响

Fig. 6 Effect of initial temperature field on the simulation result

4 结论

1) 考虑不同管道历史得到的管道沿线油品温度最大偏差一般出现在进站位置, 因此, 在同样条件下, 管道加热站间距离越长, 建立同样精度的温度场需要的管道运行历史越长.

2) 在当前算例范围内, 如果考虑之前一个月的管道运行历史计算当前时刻的温度场, 则模拟得到的管道沿线油品温度和实际温度的偏差在 $0.5\ ^\circ\text{C}$ 以内.

3) 由于任意位置温度场的计算偏差都会累积到进站位置, 管道距离越长, 偏差越大, 因此, 随着站间管道距离的减小, 初始温度场对仿真过程的影响趋弱.

参考文献:

[1] 崔秀国. 冷热油交替输送管道非稳态水力-热力耦合问题分析及其应用[D]. 北京: 中国石油大学(北京)

石油天然气工程学院, 2005.

CUI Xiu-guo. Analysis and application of coupling problem between flow and heat transfer of batch transportation of cool and hot oil [D]. Beijing: College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, 2005. (in Chinese)

[2] 钱建华. 中国石化进口原油输送方案研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京)石油天然气工程学院, 2007.

QIAN Jian-hua. Study on transportation scheme of imported crude oil of SINOPEC [D]. Beijing: College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, 2007. (in Chinese)

[3] 宇波, 徐诚, 张劲军. 冷热原油交替输送停输再启动研究[J]. 油气储运, 2009, 28(11): 4-16.

YU Bo, XU Cheng, ZHANG Jin-jun. Study on start of crude oils batch pipelined with different outlet temperature [J]. OGST, 2009, 28(11): 4-16. (in Chinese)

[4] 崔秀国, 张劲军. 冷热油交替顺序输送过程热力问题的研究[J]. 油气储运, 2004, 23(11): 15-19.

CUI Xiu-guo, ZHANG Jin-jun. The research of heat transfer problem in process of batch transportation of cool and hot oil [J]. OGST, 2004, 23(11): 15-19. (in Chinese)

[5] 邢晓凯, 张国忠. 埋地热油管道正常运行温度场的确定[J]. 油气储运, 1999, 18(12): 28-30.

XING Xiao-kai, ZHANG Guo-zhong. Determination of temperature field of crude oil pipeline [J]. OGST, 1999, 18(12): 28-30. (in Chinese)

[6] 张国忠. 埋地热油管道准周期运行温度研究. 油气储运[J], 2001, 20(6): 4-7.

ZHANG Guo-zhong. A study on quasi-periodic operating temperature for buried hot oil pipelines [J]. OGST, 2001, 20(6): 4-7. (in Chinese)

[7] YU Bo, LI Chao, ZHANG Zheng-wei, et al. Numerical simulation of a buried hot crude oil pipeline under normal operation [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30: 2670-2679.

[8] YU Bo, WANG Yi, ZHANG Jin-jun, et al. Thermal impact of the products pipeline on the crude oil pipeline laid in one ditch-the effect of pipeline interval [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51: 597-609.

(责任编辑 吕小红)