

埋地热油管道开挖修复停输 再启动过程热力模拟

康 凯^{1,2} 刘 扬¹ 刘晓燕¹ 徐 颖^{1*}

(大庆石油学院土木建筑工程学院, 大庆 163318; 大庆油田矿区服务事业部管理二公司¹, 大庆 163416)

摘要 东部管网已运行 30 多年, 使用寿命已超过设计寿命, 多处出现防腐层破坏及漏油事故, 急需进行停输开挖维修。热油管道开挖段停输维修时, 由于开挖段的裸管与大气直接接触, 向外散热量增大, 温度骤降, 油品黏度发生变化, 影响再启动。对于整条埋地管道, 温度变化幅度最大的管段为开挖段。在热油管道稳态运行的研究基础上, 首次给出停输及再启动时开挖维修段内油品温度的非稳态计算模型, 模拟计算出停输及再启动过程中开挖段内的油品温度变化曲线, 并分析出不同的维修参数下, 开挖停输段内油品温度的变化规律。

关键词 停输 再启动 开挖段 温度 非稳态

中图法分类号 TE832.3; **文献标志码** A

1970 年, 为了解决东北三省及各地区大型企业动力燃料紧张问题, 缓解东北地区铁路运输大庆原油的压力, 国家决定修建大庆至抚顺的输油管道。在随后的五年里, 成功建成了东北输油管网, 到目前为止东部管道已运行三十多年, 超过了设计使用寿命。自 1994 年以来, 管道腐蚀造成事故增多, 管道漏油事故呈现上升趋势, 东北管网急需大修。

管道的动火维修必须在管道停输工况下进行。热油管道开挖停输维修过程中, 随着管内油品不断向外散热, 油温降低, 油品粘度增大, 当存油温度下降到一定程度时, 管道再启动工作就会变得十分困难, 以致发生凝管事故, 从而造成重大经济损失。因此研究停输以及再启动过程中开挖管段内油品温度变化非常必要, 其研究结果对长输热油管道维修具有重要的指导意义。

早期的研究者对管道停输温降问题采用解析求解的方法, 但由于问题的复杂性, 解析求解过程

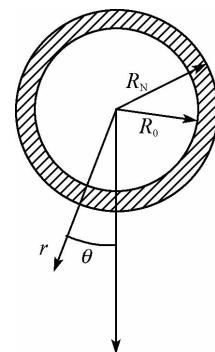


图 1 开挖段管道物理模型

中要作很多简化处理, 因而求解结果往往偏离实际。随着计算机技术的发展, 目前数值方法已成为计算管道停输温降的主要手段。李长俊^[1,2]以管道和半无限大土壤为研究对象, 分析停输后管内油品和土壤热力参数的变化。吴国忠等^[3,4]将大地半无限大区域简化为有限的矩形区域, 并考虑了埋地管道与周围土壤温度场的相互影响, 该模型对管内原油的传热也按纯导热处理。吴明等^[5]采用二维非稳态传热方程来计算输油管道周围土壤温度场, 在边界条件中考虑了地表温度的变化及管径等参数的影响, 采用混合网格, 利用有限差分进行计算。但以上研究均未涉及开挖段停输温降的变化规律,

2009 年 12 月 16 日收到 黑龙江省科技攻关项目(GZ07A302)资助
第一作者简介: 康 凯, 大庆石油学院博士生, 大庆油田矿区服务事业部管理二公司总经理。

* 通信作者简介: 徐 颖, E-mail: xuying1019@126.com。

本文在已有的稳态运行及停输轴向温度研究的基础上^[6],给出埋地管道停输维修及再启动过程中开挖段油品温度的计算模型,利用该模型进行模拟计算,并绘制出维修过程中整条长输管道沿线温度变化曲线^[7~10],分析不同的维修参数对开挖停输段温度的影响。由于目前稳态运行及埋地段管道停输轴向温度分布的研究足够成熟,这里不再详述,可参见作者专著^[6]。

1 管道开挖段停输修复过程热力计算数学模型

对于管道开挖维修,由于开挖段管道裸露在空气中,可以视为管道架空,且无保温层。当管道停输时,因油品沿轴向的传热很小,可以忽略不计,并忽略由于高程差引起的管道流动。物理模型如图1所示,在极坐标(r, θ)下研究其传热问题。

1.1 原油的传热方程

原油传热方程见公式(1),等号左侧为控制体内能的变化,右侧为控制体内的油品向外界环境的散热量。

$$\rho c \frac{\partial T_y}{\partial t} = \frac{4h_s(T_y - T_1)}{d} \quad (1)$$

初始条件:

$$T_y|_{t=0} = f(l) \quad (2)$$

式中 T_1 —管道内壁温度,K; T_y —原油温度,K; ρ —原油密度, kg/m^3 ; c —原油比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $f(l)$ —管道稳态运行时,管道沿线温度分布; h_s —原油向管道内壁的放热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; d —管道内径,m。

1.2 管壁的传热

$$\rho_n c_n \frac{\partial T_n}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_n r \frac{\partial T_n}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial \theta} \right) \quad (3)$$

式(3)中 ρ_n —管道密度, kg/m^3 ; c_n —管道热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_n —管道外壁温度,K; λ_n —管道导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

边界条件为:

$$\lambda \frac{\partial T_y}{\partial r} \Big|_{r=R_0} = \lambda_n \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_N} = h_s(T_1 - T_y) \quad (4)$$

$$\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial r} \Big|_{r=R_N} = h_a(T_w - T_n) \quad (5)$$

式中 T_w —外界环境温度,K; λ —油品导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; R_0 —管道内径,m; R_N —管道外径,m; h_a —管道外壁向大气对流换热表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

2 管道开挖段启动过程热力计算模型

启动过程中压力波到达前,断面的热力模型与停输温降传热过程模型相同,压力波到达后的热力模型如下。

油流热平衡方程:

$$\frac{\partial T_y}{\partial t} + V \frac{\partial T_y}{\partial z} + \frac{4h_y(T_y - T_w)}{\rho_y c_y d} = 0 \quad (6)$$

油流初始条件为:

$$T_y = f(l) \quad (7)$$

出站端边界条件为:

$$T_y(0, t) = T_R \quad (8)$$

式(6)中第一项为单位时间内能的变化,第二项为流入控制体的热量,第三项为与外界的换热量。式(6)中 h_y —原油向外的换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; ρ_y —原油密度, kg/m^3 ; c_y —原油比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; V —流速, m/s ; T_R —出站温度,K。

3 停输过程中管道开挖段内油品温度模拟计算及影响因素分析

以林源站至太阳升站之间的东部输油管道为例进行分析计算,参数如下:管道长 48.57 km,管径 $\Phi 720 \times 7 \text{ mm}$,埋深 2.2 m,采用聚乙烯泡沫防腐,厚度为 1.8 mm;管道年均输量为 $1700 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。油品的剪切速率为 20 s^{-1} ,流变系数 1.47。油品参数:20°C 原油密度 $861.4 \text{ kg}/\text{m}^3$,凝点 32°C,析蜡点为 45°C。林源站原油出站温度一般为 41°C,出站压力为 3 MPa。

3.1 不同开挖起点对开挖段内油品温度的影响

假设时间为 5 月 15 日,大气平均温度为 17°C,管道在 40 km 处开挖 4 000 m,并且停输 8 h 进行维修(一般工程中开挖停输维修时间不超过

10 h)。管道不同时间轴向温度变化曲线如图 2 所示。其他条件不变,当开挖起点在 12 km 处,其他条件不变,管道不同时间轴向温度变化曲线如图 3 所示。

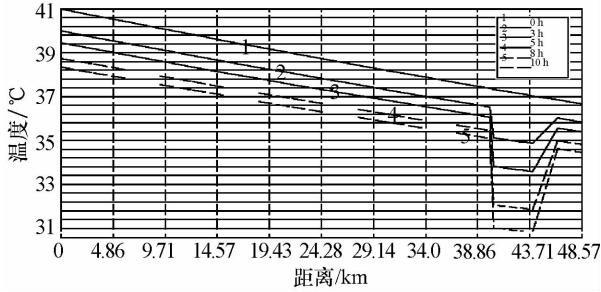


图 2 5月份在 40 km 处开挖 4 km 工况下管道内油品沿线温度

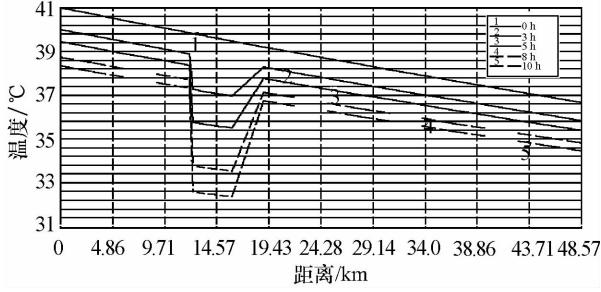


图 3 5月份在 12 km 处开挖 4 km 工况下管道内油品沿线温度

由图 2 可见,开挖后,由于开挖段的传热系数增大,所以该段温度降低的速率比不开挖段快。停输 10 h,开挖段起始端(距出站 40 km 处)温度由 37.37°C 变为 34.8°C。停输 8 h,整条管线最低温度为开挖段末端(距出站 44 km 处),温度由 37.03°C 降低到 31.82°C,温降为 5.21°C。管道停输的热力条件为停输后油品温度高于其凝固点温度,由图 2 可以看出,8 h 后原油开始凝固,故针对此工况应将维修时间控制在 8 h 内完成,这也满足工程维修中最大停输时间不超过 10 h 的要求。

由图 3 可见,停输 3 h 时,开挖段末端(即 16 km 处)温度为 36.97°C,全线最低温度为进站处(太阳升站)的 35.85°C。随着停输时间的增加(约 5 h 后),开挖段末端成为全线最低温度点。停输 8 h,开挖段末端温度由 39.8°C 降到 33.6°C,温降为 6.2°C。停输 10 h,开挖段末端温度由 39.80°C 变为 32.92°C,温降为 6.88°C。

通过以上分析可知,由于管道开挖后传热系数增大,随着停输维修时间的增加,全线最低温度点位置由进站处变为开挖段的末端;开挖起点离出站越远,开挖段末端成为全线最低温度点位置的时间越短。

3.2 不同维修季节对开挖段内油品温降的影响

10月份(大气平均温度 15°C)和 5 月份,在 40 km 处开挖 4 000 m,并且停输 8 h 维修后管道内油品温度变化曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,不开挖段换热量取决于土壤的蓄热能力,由于 10 月份土壤自然温度场较 5 月份高,故非开挖段内油品温度 10 月份较 5 月份高;而开挖段管道直接与大气发生热量交换,由于所选取的开挖维修季节大气温度接近,因此同一管段处的温度差值开挖段较非开挖段小。

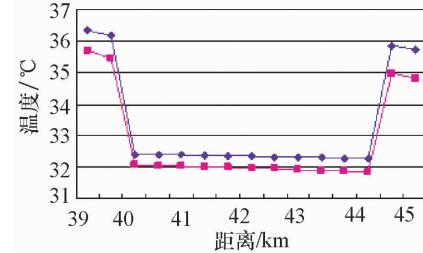


图 4 不同维修季节停输工况下开挖管道内油品沿线温度

3.3 不同开挖长度对停输段油品温度的影响

5 月份在 40 km 处开挖 6 km,停输工况下管道内油品沿线温度如图 5 所示。相同工况下,在 40 km 处开挖 4 km 和 6 km,停输的温降对比曲线如图 6 所示。

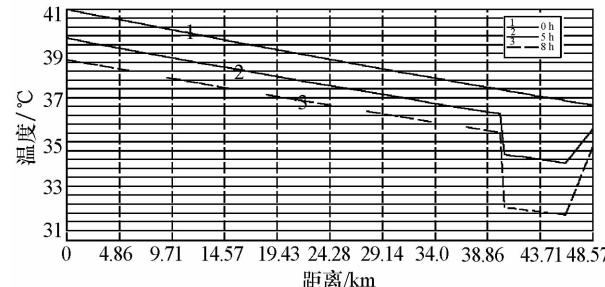


图 5 5月份在 40 km 处开挖 6 km 停输工况下
管道内油品沿线温度

4 再启动过程中开挖段油品温度模拟计算及分析

维修后管道需要重新启动运行,以40 km处开挖4 km,5月份停输8 h维修后,再启动运行20小时为例进行模拟计算,图6给出了开挖停输后再启动沿线温度变化曲线。

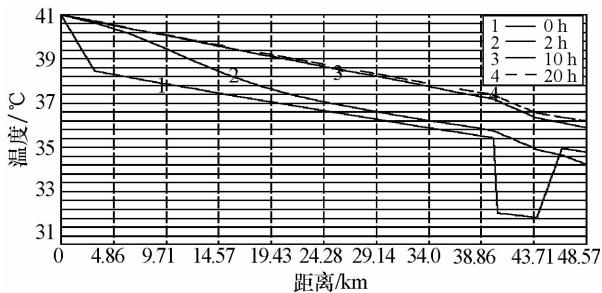


图6 再启动过程中管道内油品沿线温度

从图6中可以看出,因为冷油被顶挤出开挖段,启动初期开挖段油温立即升高,与此同时,开挖段后端的埋地管道内油温下降。随着启动后运行时间的增加,土壤温度的蓄热逐渐使该段油温上升。启动初的10 h内,进站温度(即管道末端温度)迅速上升,这是由于油流带入进站处截面的热量大于管道向土壤的散热量,进站油温开始迅速升高。启动10 h后进站温度升高趋势有所减缓,因为启动一段时间后油品运行趋于稳定,整条管道沿线温度基本保持不变。

图7给出了在40 km开挖4 km,停输8 h、启动后20 h及开挖稳态运行工况下的管道内油品轴向温度变化曲线图。由图8可知,停输8 h,整个管道内油品温度均降低,且开挖处温度降低幅度最大。再启动后,管道内的油品温度迅速上升,随着启动时间的增加,管道内的油品温度与开挖后达稳态运行的温度逐渐接近。当时间足够长时,两条温度曲线最终会完全重合,即管道内油品温度达到稳定状态。

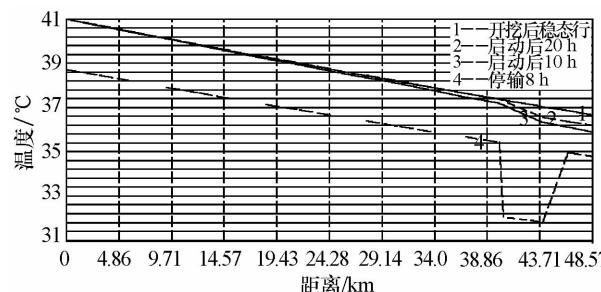


图7 停输10 h、启动20 h及正常运行各工况下管道内油品温度曲线

5 结论

本文建立了停输及再启动过程中开挖段内油品温度计算模型,通过模拟计算,研究了停输及再启动工况下管道开挖段内的油品温度变化规律,主要得到以下结论:

(1) 由于管道开挖后传热系数增加,随着停输维修时间的增加,全线最低温度点位置由进站处变为开挖段的末端;

(2) 开挖起点离进站处越近,开挖段末端成为最低温度点位置所需的时间越短;

(3) 停输再启动初期,开挖段内油品温度上升幅度较大,但与开挖段相邻管段内的油品温度却下降。这是由于启动后,热油将冷油挤出开挖段,短时间内,土壤的蓄热不足以使油品温度升高。启动后运行一定时间,一般大于20 h,管道内油品温度接近于开挖后达到稳态运行工况下的温度;

(4) 针对大庆油田林源站至太阳升站之间的长输管道,进行修复模拟计算后可知:

① 5月份在40 km处开挖4 km,停输维修时间应控制在8 h之内;若在12 km处开挖4 km,则允许停输维修时间可达到10 h。

② 开挖4 km,停输维修8 h,12 km处开挖则开挖段末端温降为6.88°C,40 km处开挖则开挖段末端温降为5.21°C。可知,相同停输维修时间,开挖起点越靠近出站端(林源站),油品温降越大。

参 考 文 献

- 1 李长俊.埋地输油管道的热力计算.西南石油学院学报,1997;19(1):79—84
- 2 李长俊,曾自强.热油管道停输过程中油品温降计算.油气储运,1991;10(2):1—11
- 3 吴国忠,曲洪权,庞丽萍,等.埋地输油管道非稳态热力计算数值求解方法.油气田地面工程,2001;20(6):6—7
- 4 Liu Yang,Liu Xiaoyan,Liu Lijun. A study of optimizing operation of the buried oil pipelines from daqing to harbin. Hua B. Proceedings of the 3rd International Symposium On Heat Transfer And Energy Conservation, Guangzhou, Peoples R China,2004, Guangzhou: South China University Of Technology Press,2004:1194—1199
- 5 吴 明,江国业,安丙威.输油管道土壤温度场的数值计算.石油化工高等学校学报,2001;14(4):54—57
- 6 刘晓燕,刘 扬.寒区热油管道修复热力水力安全研究.哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2007
- 7 刘 扬,刘晓燕,魏立新.原油集输系统转油站效率及能耗.油气储运,2006;25(11):50—52
- 8 刘晓燕,赵 军,石 成,等.土壤恒温层温度及深度研究.太阳能学报,2007;28(5):494—498
- 9 Chang C,Nguyen Q D, Renningsen H P. Isothermal start-up of pipeline transporting waxy crude oil. Non-Newtonian Fluid Mech,1999;87(12):127—154
- 10 刘晓燕,刘 扬,孙建刚.输油管道运行优化研究.工程热物理学报,2004;25(4):558—561

The Thermal Simulation of Restoration Segment of Buried Hot Oil Pipeline during the Periods of Shut Down and Restart

KANG Kai^{1,2}, LIU Yang¹, LIU Xiao-yan[,], XU Ying^{1*}

(College of Civil Engineering, Daqing Petroleum Institute¹, Daqing 163318, P. R. China;

The Second Management Co. of the Service Undertaking Department in Daqing Oil Field², Daqing 163416, P. R. China)

[Abstract] The hot oil pipeline of northeast has been worked for 30 years, and it's using life has exceed the designing life. Corrosion protective covering breakage and oil scattering are very common, so it urgent needs to be repaired in shut down. When hot oil pipeline is repaired in the state of shut down, the bared pipe of excavation segment directly contact with air, heat loss and temperature drop are great, which affect the changing of oil viscosity and restart. For the whole buried oil pipeline, the segment of maximal temperature range is the excavation segment. Now the researches about temperature drop in shut down all focus on the temperature variation of the whole buried pipeline. The unsteady-state computation module of oil temperature in excavation segment during the periods of shut down and restart for the first time based on the research of the run in stable state is established, and simulated the curve of temperature variation, at last analyzed the alternation regularity of oil temperature in excavation segment during the period of shut down with different repair parameters.

[Key words] shut down restart excavation segment temperature unsteady-state