

埋地热油管道正反输温降影响因素分析

金钰昕^{1,2} 姚安林¹ 周刚³ 刘杨⁴ 吴宏雷³

1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500;
2. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;
3. 中国电建集团山东电力建设有限公司, 山东 济南 250014;
4. 中国石化胜利油田石油开发中心有限公司, 山东 东营 257000

摘要: 将正反输非稳态过程进行合理的简化假设, 建立正反输非稳态计算物理模型。在验证正输稳态运行具有一定可靠性和准确性的基础上, 对反输稳态运行时的温降进行求解, 得出的正反输工艺温度变化对正确、合理、安全地制定反输方案具有重要的指导作用。创新性地将对反输温降过程分为反输初始阶段、冷油头控制阶段、热油头控制阶段和反输温降稳定阶段四个阶段, 详细地分析了出站油温、反输输量、埋地温度及管径在四个阶段中对反输温降的影响。结果表明, 增大反输输量对正反输稳态运行具有最积极的影响, 在夏季进行反输更易实现, 采用小管径管道进行反输, 达到稳定所需时间较短, 进而为以后更合理地安排正反输方案提供一定依据。

关键词: 正反输; 非稳态; 温降分析

DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2018.04.002

Analysis of the Temperature Drop Influence Factors During the Process of Forward and Reverse Pumping of Buried Hot Oil Pipeline Based on SPS

Jin Yuxin^{1,2}, Yao Anlin¹, Zhou Gang³, Liu Yang⁴, Wu Honglei³

1. College of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China;
2. China Petroleum Engineering & Construction Corp. Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;
3. SEPCO Electric Power Construction Corporation, Jinan, Shandong, 250014, China;
4. Petroleum Development Center Co., Ltd., Sinopec Shengli Oilfield, Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract: The non-steady state calculation model for forward and reverse pumping is established according to reasonable simplified assumption in this paper. Then solve the temperature drop in the reverse transportation of steady state on the basis of verifying the reliability and accuracy of steady-state operation in forward transportation. The obtained process temperature change of forward & reverse pumping has guiding significance for the proper and reasonable preparation of reverse pumping scheme. Innovatively, the reverse transportation temperature drop process can be divided into initial stage of reverse transmission, control stage of cold oil head, control stage of hot oil head, and steady stage of reverse transportation temperature drop. Detailed analysis on the effect of outlet temperature, reverse flow rate, buried temperature and pipe diameter on the temperature drop

收稿日期: 2018-05-21

基金项目: 中国石油输油管线配套建设工程可行性研究(S 2017117 C)

作者简介: 金钰昕(1987-), 男, 回族, 宁夏同心人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事油气储运工艺分析及相关设计工作。

in the four stages has been performed. The results shows that increasing the reverse flow has the most positive effect on the forward and reverse steady state pumping, and that it is easier to execute the reverse transportation in the summer. The use of small-diameter pipelines for reverse transportation will take a relatively short time to reach steady stage. This result will provide certain basis for more rational arrangements for forward and reverse transportation plans in the future.

Keywords: Forward and reverse pumping; Unsteady state; Analysis of temperature drop

0 前言

目前,国内大部分油田已处于开发中后期,油田产能下降,导致原油管道处于低输量运行状态。尤其是东部地区原油具有“三高”的特点,造成原油低输量运行时产生凝管停输的危险大大增加^[1-5]。解决管道低输量问题的一种有效方法是进行正反输送,如任京线、魏荆线等管道均开展过正反输送^[6-7]。目前,对正反输送工艺的研究较少,大多集中在对正反输运行方案制定及经济性等方面的分析^[8-9]。未见对正反输送工艺温降影响因素进行分析,而正反输送工艺温降变化,对正确、合理、安全地制定反输方案具有重要的指导作用。因此,对原油管道正反输温降影响因素进行研究具有重要意义。本文运用管内油流的热平衡方程及周围环境的传热微分方程,建立输油管道的正反输非稳态计算模型,并对反输运行时的各种温降影响因素进行详细分析。

1 正反输计算模型的建立

1.1 模型假设

实际正反输工况中油流在管内的流动及与周围环境的传热是复杂的三维非稳态传热模型,为了简化对正反输非稳态计算模型的求解,做如下假设^[10-14]:

- 1) 管道横截面上的流速相等,管内的流动当作一维流动。
- 2) 油流在管内的热效应只影响到周围土壤的有限区域。
- 3) 忽略管内油流和周围土壤在轴向上传热。
- 4) 管内油温取平均油温,管道截面上的油温均匀分布。
- 5) 忽略水分运移等对埋地温度的影响,沿线埋地温度取为定值。

1.2 数学模型

基于以上假设建立正反输非稳态计算物理模型^[15-18],见图1。

正反输送工艺计算模型的数学描述为:

1.2.1 管内油流的热平衡方程

$$\frac{\partial T(z, \tau)}{\partial \tau} + v \frac{\partial T(z, \tau)}{\partial z}$$

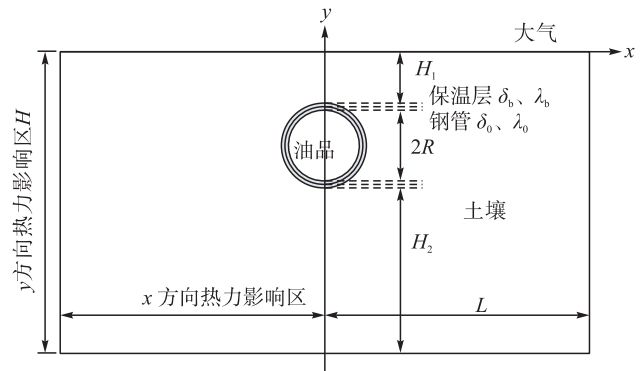


图1 正反输非稳态计算物理模型

$$= \frac{2\alpha_y}{\rho_y c_y R} [T(z, \tau) - T_w(R + \delta_0, z, \tau)] \quad (1)$$

1.2.2 结蜡层及保温层的非稳态导热微分方程

$$\frac{\partial T_w}{\partial \tau} = \frac{\lambda_w}{\rho_w c_w} \left(\frac{\partial^2 T_w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_w}{\partial \theta^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_b}{\partial \tau} = \frac{\lambda_b}{\rho_b c_b} \left(\frac{\partial^2 T_b}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_b}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_b}{\partial \theta^2} \right) \quad (3)$$

1.2.3 土壤的非稳态导热微分方程

$$\frac{\lambda_s}{\rho_s c_s} \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial T_s}{\partial \tau} \quad (4)$$

1.2.4 连接条件

$$T_b \Big|_{r=(R+\delta_0+\delta_b)^-} = T_s \Big|_{r=(R+\delta_0+\delta_b)^+} \quad (5)$$

$$\lambda_b \frac{\partial T_b}{\partial r} \Big|_{r=(R+\delta_0+\delta_b)^-} = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=(R+\delta_0+\delta_b)^+} \quad (6)$$

$$T_w \Big|_{r=(R+\delta_0)^-} = T_b \Big|_{r=(R+\delta_0)^+} \quad (7)$$

$$\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial r} \Big|_{r=(R+\delta_0)^-} = \lambda_b \frac{\partial T_b}{\partial r} \Big|_{r=(R+\delta_0)^+} \quad (8)$$

1.2.5 边界条件

$$T \Big|_{y=H} = T_n \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_{x=\pm L} = 0 \quad (10)$$

$$\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha(T_w - T_a) \quad (11)$$

$$-\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial r} \Big|_{r=R_0^+} = \alpha_y(T - T_w) \quad (12)$$

1.2.6 初始条件

$$T_a \Big|_{\tau=0} = \varphi(\tau) \quad (13)$$

$$T_b|_{\tau=0} = f_b(r, \theta) \quad (14)$$

$$T_w|_{\tau=0} = f_w(r, \theta) \quad (15)$$

$$T_s|_{\tau=0} = f_s(x, y) \quad (16)$$

式中: T_a 为大气温度, $^{\circ}\text{C}$; T_n 为土壤恒温层温度, $^{\circ}\text{C}$; T_w 、 T_b 、 T_s 分别为原油、管壁、保温层和土壤温度, $^{\circ}\text{C}$; λ_w 、 λ_b 、 λ_s 分别为管壁、保温层和土壤导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$; v 为管内油流流速, m/s ; α_y 、 α 分别为油流与结蜡层及地表土壤与大气间的换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$; L 、 H 分别为管道热力影响区域在 x 、 y 方向上的边界坐标, m ; τ 为时间, h ; ρ_y 、 ρ_w 、 ρ_b 、 ρ_s 分别为油流、管壁、保温层和土壤的密度, kg/m^3 ; c_y 、 c_w 、 c_b 、 c_s 分别为油流、管壁、保温层和土壤的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; f_b 为保温层温度分布函数; f_w 为管壁温度分布函数; f_s 为土壤温度分布函数; z 为油品在管道内轴向流动距离, m ; R 为管道内半径, m ; δ_b 为管道保温层厚度, m ; δ_0 为管道壁厚, m 。

以上正输切换为反输时,反输模型周围土壤的温度场为正输结束时形成的稳态温度场,反输油流的热平衡方程及周围环境的传热微分方程与正输时相同,反输切换为正输时原理类似。因此,仅需讨论反输开始到反输稳定时各因素对反输温降的影响。

2 实例应用

2.1 基础参数

某原油管道全长 44.7 km,管径 219 mm \times 5.6 mm,全线设有首站、末站,输送介质为原油,末站进站压力为 0.2 MPa。管道和环境相关参数见表 1。

表 1 管道和环境相关参数

项目	导热系数 / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	厚度 / mm	比热容 / ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	密度 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
管道	40	5.6	0.46	7 800
保温层	0.045	40	2.3	400
土壤	1.4	1 600	1.84	1 300

2.2 反输运行温降计算

反输运行温降是以正输切反输操作结束时的温降为初始条件的非稳态过程,通过计算整个反输运行过程中管道每 10 km 距离处每一时刻管内原油沿线的油温,得到反输运行油温随时间变化规律,见图 2。

由图 2 可知,反输运行开始后冷油被热油顶挤,反向推进,并逐渐向周围土壤散热。冷油到达进站口的温度要低于正输时的进站温度,这是由于管道保温层的隔热特性引起的,反输时保温层隔绝了土壤向冷油头传热,使冷油头在管道输送过程中没有出现温升现象,反而出现了进一步温降。

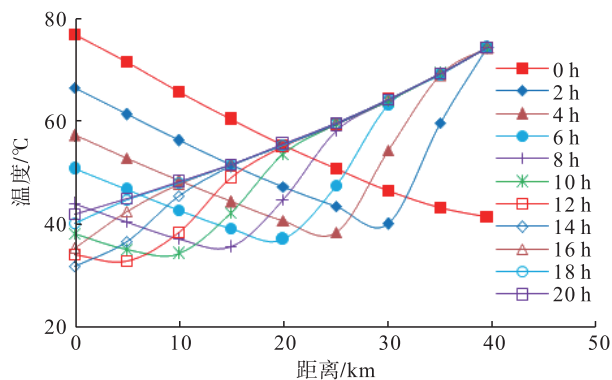


图 2 反输运行油温随时间变化规律

另外,反输运行开始后出站油温与土壤温度之间的温差较大,出现较大的温降梯度使油温迅速降低,随着运行时间的积累,由于热油头在管道内不断向前推移,出现温降梯度较大的管段部分也随之向前推移,同时,不断有新的热油头对周围土壤进行传热,进而使热油头与土壤之间的温差减小,最终在 20 h 左右反输运行管道内油温达到稳态。

3 反输运行温降影响因素分析

3.1 出站油温对反输温降的影响

由于反输运行开始后的温降,不仅包括反输运行时冷油头向周围土壤的散热,还包括反输运行后注入管道的热油头向周围土壤的散热,温降变化过程较复杂。为了对反输温降的过程进行更详细的分析,根据反输温降特点,将反输温降变化过程分为反输温降非稳态阶段和反输温降稳态阶段(见图 3 IV 阶段)两个阶段,其中反输温降非稳态阶段又可细分为反输初始阶段、冷油头控制阶段和热油头控制阶段。以下简称为 I 阶段、II 阶段、III 阶段。

详细分析不同出站油温、输量、埋地温度及管径对反输温降的影响,其中不同出站油温下的反输温降变化规律见图 3。

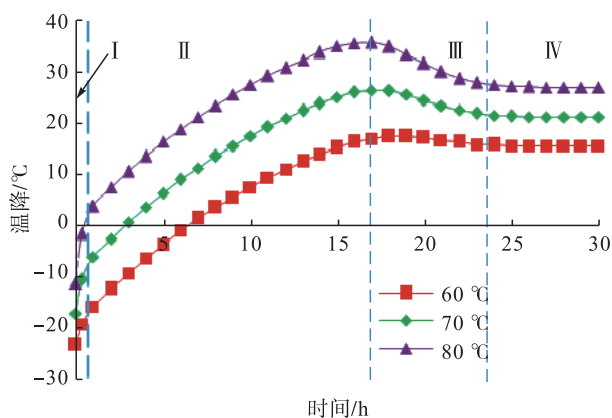


图 3 不同出站油温下的反输温降变化规律

由图 3 可知,不同出站油温下 I 阶段温降均迅速升高,且出站油温越高,温降升高越快。之后在 II 阶段温降逐渐升高,由于此阶段进站温度由冷油头的温度形

成,反输出站油温的变化对冷油头的温降没有影响,因此随着出站油温的升高,不同的出站油温的温降趋势变化相似。当冷油头被全部顶出管道时,温降达到最大。之后在Ⅲ阶段随着热油头对周围土壤的不断蓄热,使反输温降逐渐减小,并渐渐达到反输稳定状态。由于出站油温的升高,使热油头在管道中流动时对周围土壤的散热能力也增大,导致在Ⅲ阶段反输温降之间的温度差逐渐减小。

3.2 反输输量对反输温降的影响

不同反输输量下的反输温降变化规律见图 4。

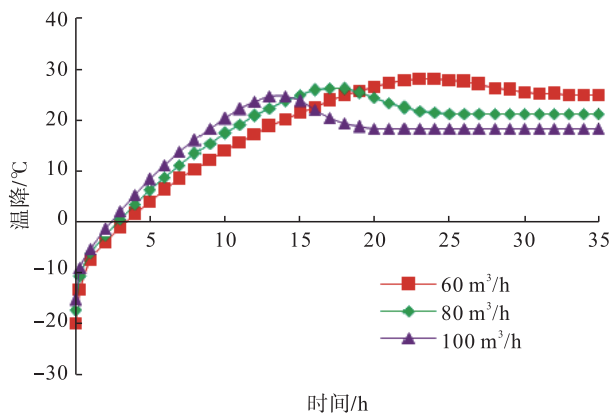


图 4 不同反输输量下的反输温降变化规律

由图 4 分析可知,在 I 阶段反输温降的增大速度几乎相同,反输输量的增大对 I 阶段的反输温降影响很小。在 II 阶段由于反输输量的增大导致反输总传热系数增大,冷油头温降增大,且反输输量越大温降梯度越大;另一方面由于反输输量的增大,使冷油头在管道内的时间减小,更快地被顶出管道,这也导致了反输温降最大值的不同和出现时间的不同。在 III 阶段当热油头的反输输量较大时,其与周围土壤的换热量也较大,使这一阶段的反输温降下降也较快,更快地达到反输稳定状态。

3.3 埋地温度对反输温降的影响

不同埋地温度下的反输温降变化规律见图 5。

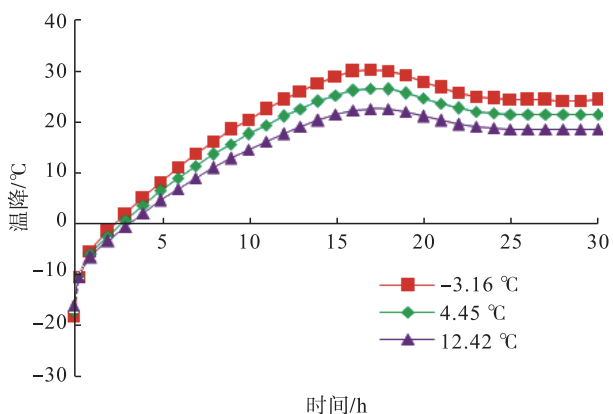


图 5 不同埋地温度下的反输温降变化规律

由图 5 可知,在 I 阶段反输温降的增大速度几乎相同的,埋地温度的升高对 I 阶段的反输温降影响很小。在 II 阶段,一方面随着冷油头与周围土壤之间的换热,

使反输温降逐渐增大;另一方面由于埋地温度的升高使冷油头与周围土壤之间的温差减小,使反输总传热系数减小,冷油头反输温降梯度减小,进一步导致了在冷油头被全部顶出管道时最大反输温降变小。由于热油头与周围土壤之间的温差与埋地温度的升高产生的温差相比要大得多,因此,在 III 阶段虽然埋地温度较高的反输温降梯度较小,但不明显。

3.4 管径对反输温降的影响

不同管径下的反输温降变化规律见图 6。

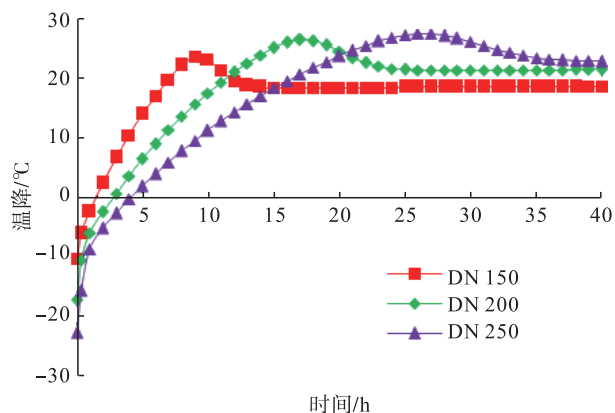


图 6 不同管径下的反输温降变化规律

由图 6 可知,在 I 阶段和 II 阶段,反输运行时冷油头向周围土壤散热,使反输温降增大,且管径变小后,管道总传热系数变大,冷油头与周围土壤之间的换热变强,导致管径小的反输温降梯度也较大。反输运行时,管径越小,油流流速越快,冷油头被顶出管道需要的时间越短。同理,在 III 阶段,管径越小,热油头与周围土壤换热越强,反输温降梯度越大,达到反输运行稳定所需的时间越短。

4 结论

本文将正反输非稳态过程进行合理的简化假设,建立正反输的非稳态传热计算模型,并求解。创新性地将对反输温降过程分为反输初始阶段、冷油头控制阶段、热油头控制阶段和反输温降稳定阶段四个阶段进行分析,得出:

- 1) 对于保温管道,反输运行最低温度为冷油头全部被顶出管道时的进站温度。
- 2) 增大反输输量,在夏季进行反输运行均能有效地提高反输时的最低温度,而提高出站油温及变换管径对升高反输运行最低温度几乎没有作用。
- 3) 增大反输输量及缩小反输管径均能较好地缩短反输运行达到稳定所需的时间,而提高出站油温及季节变换对反输运行达到稳定所需时间的影响很小。
- 4) 增大反输输量对正反输运行具有最积极的影响,在夏季进行反输更易实现,采用小管径管道进行反输运行,反输温降达到稳定所需时间较短。

参考文献:

- [1] 谢鑫,陈国群,薛增伟,等.埋地热油管道正反输送非稳态热力计算[J].油气储运,2007,26(8):30-34.
Xie Xin, Chen Guoqun, Xue Zengwei, et al. Non-steady Thermal Calculation of Right and Reverse Transportation for Buried Oil Pipelines [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2007, 26 (8): 30-34.
- [2] 马伟平,李立,徐海红,等.任京输油管道加降凝剂正反输送运行规律研究[J].油气储运,2006,25(2):27-30.
Ma Weiping, Li Li, Xu Haihong, et al. Study on the Forward Transportation and Reverse Pumping Operation Law on PPD-benefited Oil in Renjing Oil Pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2006, 25 (2): 27-30.
- [3] 向秀平,杨振中.魏荆线低输量下加剂输送与正反输的经济分析[J].油气储运,1996,15(1):7-8.
Xiang Xiuping, Yang Zhenzhong. Pour Depressant or Reverse Pumping? Which Is More Economical for Wei-Jing Pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1996, 15 (1): 7-8.
- [4] 陈从磊,黄启玉,王乾坤.正反输送管道停输再启动数值模拟分析[J].石油化工高等学校学报,2015,28(2):77-82.
Chen Conglei, Huang Qiyu, Wang Qiankun. Numerical Simulation Analysis of Shutdown and Restart Procedure in Normal and Opposite Direction Transportation Pipeline [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2015, 28 (2): 77-82.
- [5] 王凯,张劲军,宇波.原油管道差温顺序输送水力-热力耦合计算模型[J].油气储运,2013,32(2):0143-0151.
Wang Kai, Zhang Jinjun, Yu Bo. Hydraulic-thermal Coupled Model of Different Temperature Batch Transportation of Crude Oil Pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32 (2): 0143-0151.
- [6] 吴玉国.冷热原油顺序输送技术研究[D].青岛:中国石油大学,2010.
Wu Yuguo. Research on Technology of the Batching Transportation of Cold and Hot Crude Oils [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [7] 杨显志.海底输油管道传热实验研究[D].大庆:大庆石油学院,2007.
Yang Xianzhi. Experiment Study on Heat Transfer of Submarine Oil Pipeline [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2007.
- [8] Laskowski R M. The Application of the Buckingham π Theorem to Modeling High-pressure Regenerative Heat Exchangers in Off-design Operation [J]. Journal of Power Technologies, 2011, 91 (4): 198-205.
- [9] 王云,马贵阳,赵梁,等.管道停输开挖过程传热数值计算[J].辽宁石油化工大学学报,2015,35(3):23-26.
Wang Yun, Ma Guiyang, Zhao Liang, et al. The Numerical Calculation of Pipeline Heat Transfer During the Periods of Shut Down and Excavation [J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2015, 35 (3): 23-26.
- [10] 张丙辰.西部原油管道满输量测试研究[J].天然气与石油,2015,33(3):1-4.
Zhang Bingchen. Test Study on Western Crude Oil Pipeline with Full Capacity [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33 (3): 1-4.
- [11] 周刚,赵健,王倩楠,等.含蜡热油管道总传热系数新模型的实验研究[J].天然气与石油,2016,34(4):1-6.
Zhou Gang, Zhao Jian, Wang Qiannan, et al. Experimental Study for New Model of Total Heat Transfer Coefficient of Waxy Hot Pipeline [J]. Natural Gas and Oil, 2016, 34 (4): 1-6.
- [12] 崔秀国,姜保良,郑月好,等.埋地热油管道停输温降的大型环道测试分析[J].油气储运,2009,28(7):59-62.
Cui Xiuguo, Jiang Baoliang, Zheng Yuehao, et al. Large-scale Flow Loop Experiment and Analysis on Temperature Drop of Buried Hot Oil Pipeline after Shutdown [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28 (7): 59-62.
- [13] 魏立新,周刚,于航,等.基于相关向量机算法的埋地热油管道温降预测[J].数学的实践与认识,2016,46(11):143-148.
Wei Lixin, Zhou Gang, Yu Hang, et al. Prediction for Temperature Drop of Buried Hot-oil Pipeline Based on the Relevant Vector Machine [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46 (11): 143-148.
- [14] 齐龙,曹放.埋地热油管道传热规律研究[J].当代化工,2015,44(10):2462-2464.
Qi Long, Cao Fang. Study on Heat Transfer of Buried Hot Oil Pipeline [J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, 44 (10): 2462-2464.
- [15] 孙法峰,田旭东,尚义,等.西部某原油管道冬季安全运行总结与思考[J].天然气与石油,2015,33(2):18-22.
Sun Fafeng, Tian Xudong, Shang Yi, et al. Summary and Thinking of Safe Operation of Certain Western Crude Oil Pipeline in Winter [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33 (2): 18-22.
- [16] 王龙.埋地原油管道降温特性的大型环道试验研究[D].青岛:中国石油大学,2010.
Wang Long. Experimental Research on Characteristic of Oil's Temperature Decrease in Buried Pipe by Real Scale Flow Loop [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [17] 周刚,张伟,杨林,等.寒区输油管道正反输温降规律分析[J].当代化工,2016,45(3):542-544.
Zhou Gang, Zhang Wei, Yang Lin, et al. Analysis of the Temperature Drop during the Process of Right and Reverse Transportation in Cold Region [J]. Contemporary Chemical Industry, 2016, 45 (3): 542-544.
- [18] Li Hongying, Zhang Jinjun, Song Chaofan, et al. The Influence of the Heating Temperature on the Yield Stress and Pour Point of Waxy Crude Oils [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 135: 476-483.