

原油正反输送停输初始状态安全性分析

周刚¹ 吴宏雷¹ 刘杨² 金钰昕³

1. 中国电建集团山东电力建设有限公司, 山东 济南 250014;
2. 中国石化胜利油田石油开发中心有限公司, 山东 东营 257000;
3. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041

摘要:为了明确原油正反输送过程中不同停输初始状态与停输安全性之间的关系,首先,通过分析正反输送一个周期管内原油的流动状态,创新性地将一个正反输周期划分为正输冷油控制阶段、正输热油控制阶段、反输冷油控制阶段、反输热油控制阶段四个运行阶段;然后,在分析不同阶段管道温降特点的基础上,从油温变化的角度对不同运行阶段停输初始状态的安全性进行定性分析;最后,定义描述正反输送工艺不同停输初始状态安全性的新变量“安全停输概率”,从定量的角度对原油正反输送不同时刻停输初始状态的安全性进行分析。结果表明,安全停输概率为 ± 0 时,停输安全性最低;安全停输概率为 ± 1 时,停输安全性最高。

关键词:正反输;初始状态;停输;安全性;安全停输概率

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.01.005

Analysis on Initial State Safety of Pipeline Shutdown During Crude Oil Forward and Reverse Transportation

Zhou Gang¹, Wu Honglei¹, Liu Yang², Jin Yuxin³

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

Abstract: To define the relationship between initial state and safety of pipeline shutdown under the progress of forward and reverse transporting, the forward and reverse stages have been divided into 4 stages: forward cold oil control stage, forward hot oil control stage, reverse cold oil control stage, reverse hot oil control stage. And under the analysis of pipeline temperature drop on different running stages, qualitative analysis on safety of different initial state of pipeline shutdown is carried out from oil temperature changes. Lastly, a new variable “safe shutdown probability φ ” is defined. Quantificationally, the initial state safety of pipeline shutdown on different moments of oil forward and reverse transporting is analyzed. It turns out that while safe shutdown probability is ± 0 , shutdown is of the lowest safety; while safe shutdown probability is ± 1 , shutdown is of the highest safety.

Keywords: Forward and reverse transportation; Initial state; Shutdown; Safety; Safe shutdown probability

收稿日期:2018-07-05

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:周刚(1988-),男,山东潍坊人,助理工程师,硕士,主要从事油气站场及管道设计方面的研究。

0 前言

原油正反输送工艺是指在原油管道低输量运行时,为防止出现凝管危险而提出的一种解决办法^[1-5]。国内多条低输量管道均已开展正反输送工艺,如魏荆线^[6]、任京线^[7]等。而国内学者多集中在对正反输送方案制定的研究上,对正反输送停输安全性的研究较少^[8]。向秀平等人^[5]对添加剂输送与正反输送的经济性进行了分析,初步探讨了正反输送管道的运行规律;马伟平对任京线管道进行正反输送现场试验,确定正反输送允许的安全输量^[1,9];谢鑫结合姬塬油田外输管道的运行情况,对反输送所需的允许最大输量及最小启输量进行了研究,但未对反输初始阶段的安全性进行深入分析^[3]。正反输送过程不仅包括流程切换后管中存留的冷油向周围土壤的散热,还包括之后注入管道的热油向周围土壤的散热,原油温降及土壤温度场的变化过程较复杂,因此在原油正反输送的不同阶段进行停输具有不同的停输初始状态,而不同的停输初始状态又具有不同的停输安全性^[10-13]。导致在正反输送过程中发生停输工况无法准确预判管道最大允许停输时间,造成再启动困难,甚至发生凝管等严重后果^[14-19]。因此,有必要提出一种新方法对正反输送过程中各个时刻停输初始状态的安全性进行详细描述。

1 正反输送过程温降规律分析

1.1 基础数据

选取东北某采用正反输送运行的输油管道,正反输送工艺方案为 7 正 2 反。管道外径 219 mm,内径 207.8 mm,保温层 40 mm,管长 39.55 km,埋深 1.6 m。

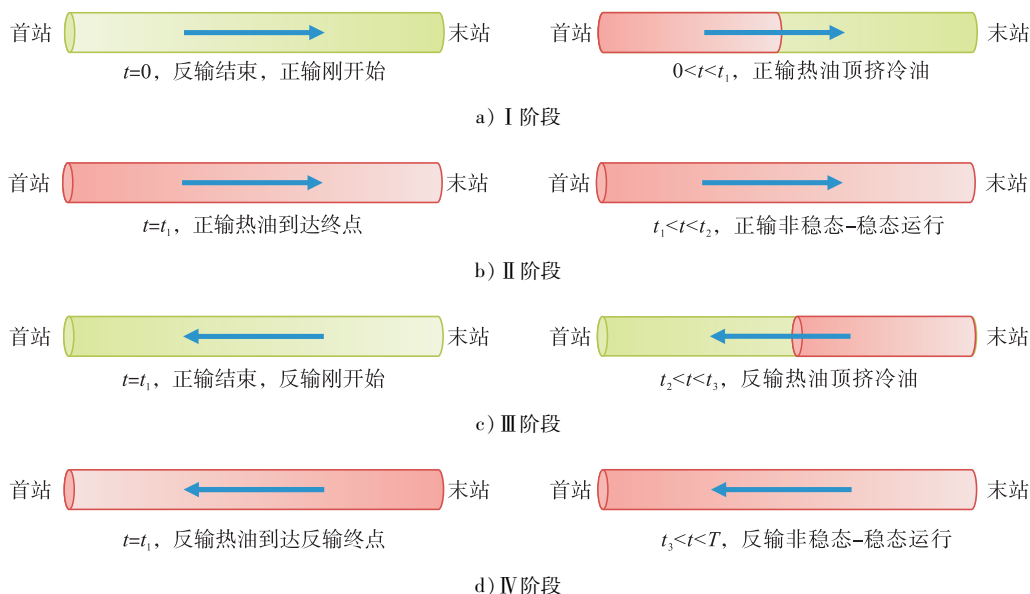


图 2 一个正反输周期内不同运行阶段油品流动状态

管道正反输送现场运行参数:正输输量 $85 \text{ m}^3/\text{h}$,正输出站油温 60°C ,反输输量 $95 \text{ m}^3/\text{h}$,反输出站油温 55°C 。所输油品物性参数和原油黏温曲线见表 1 和图 1。

表 1 油品物性参数

20℃密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	凝点 / $^\circ\text{C}$	反常点 / $^\circ\text{C}$	50℃比热 / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)
850	27	35	2 225

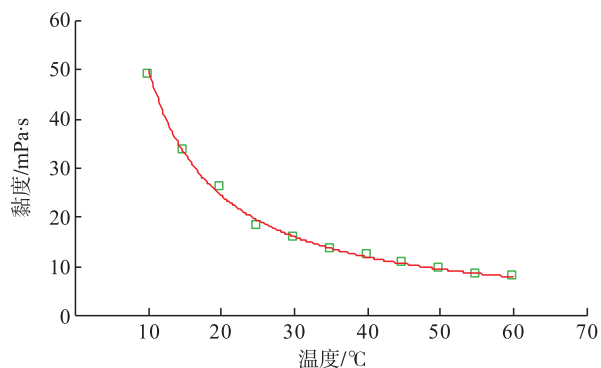


图 1 原油黏温曲线

1.2 不同运行阶段的热力特性

假设完成一个完整的正反输送周期所需时间为 T , 由于一个正反输送周期内管中原油向周围环境的散热,既包括热油散热,还存在冷油向周围环境的散热,整个温降过程较复杂。为了更清晰地分析正反输送过程中不同运行阶段停输初始状态的安全性,根据正反输送温降的特点将一个正反输送周期分为正输冷油控制阶段(以下简称 I 阶段)、正输热油控制阶段(以下简称 II 阶段)、反输冷油控制阶段(以下简称 III 阶段)、反输热油控制阶段(以下简称 IV 阶段)四个阶段。一个正反输送周期内不同运行阶段油品流动状态见图 2。

由图2可知,在正反输送过程不同运行阶段,管内原油具有不同的热力状态。尤其是在正反输送切换过程及切换完成后的一段初始运行时间,管内原油向周围土壤的传热具有非稳态特性,温降随时间不断改变,现场测试数据见图3。图3中 t_a 指I阶段的某时间点; t_b 指I阶段的 t_a 之后、 t_1 之间的某时间点; t 指I阶段的末时点(或II阶段的起始时间点); t_1 、 t_2 、 t_3 分别指I、II、III、IV阶段的交接点。

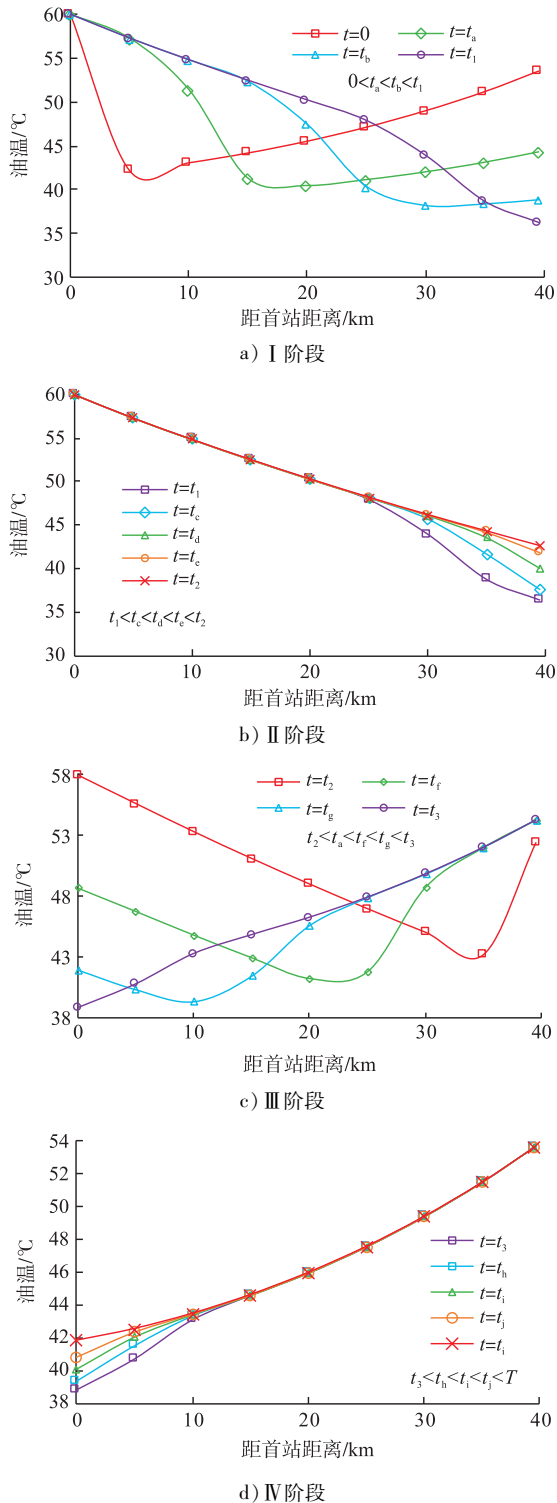


图3 正反输送不同运行阶段管道沿线油温变化

由图3可知,正反输送过程不同运行阶段管道沿线油温分布特点:第I阶段,反输结束,正输开始。首站正输热油顶挤反输结束时首站附近的冷油,向末站推进。这一阶段,首站附近油温与周围土壤之间的温差较大,管内油温随时间逐渐升高。虽然此时末站附近的土壤温度场温度较高,但由于保温层的隔热作用,油流受土壤温度场的影响较小^[20]。因此热油及冷油随时间温度均降低,最低温度点出现在 $t = t_1$ 时刻冷油到达末站时。第II阶段,反输结束时管内存油全部被顶挤出管道。由于靠近末站处的油温和周围土壤温度场之间的温差较大,管内沿线各点油温随时间逐渐升高。此阶段靠近首站处温差较小,沿线油温几乎不变。第III阶段,正输结束,反输开始。末站反热油顶挤正输结束时末站附近的冷油,向首站推进,管道沿线油温变化同I阶段类似。第IV阶段,正输结束时管内存油全部被顶挤出管道,管道沿线油温逐渐升高,分布特点同II阶段类似。

2 不同运行阶段的停输安全性

2.1 定性分析

根据现场正反输送运行的测试数据,可从油温变化的角度对不同运行阶段的停输初始状态安全性进行定性分析。按照上文描述的管道沿线油温随时间变化的特点,只有在I阶段、III阶段管道中有冷油存在时,停输的危险性是逐渐增大的。由于I阶段、II阶段的油温变化具有对称特性,仅对正反输送运行一个周期中I阶段的停输安全性进行分析,见图4和表2。

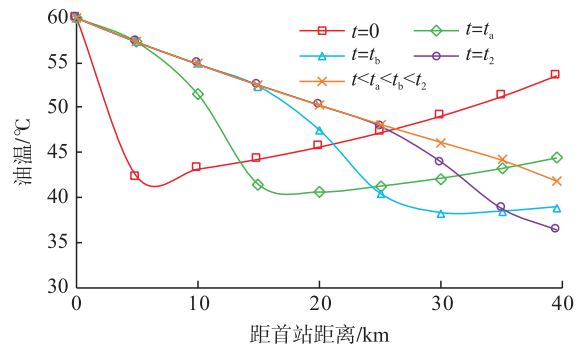


图4 停输危险阶段安全性分析

表2 不同运行阶段停输初始状态及安全性分析

阶段	运行状态	沿线油温变化	停输安全性
I	正输热油顶挤反输存油	首站附近升高,末站附近降低	单调递减
II	充满正输油品	首站附近几乎不变,末站附近升高	单调递增
III	反输热油顶挤正输存油	末站附近升高,首站附近降低	单调递减
IV	充满反输油品	末站附近几乎不变,首站附近升高	单调递增

由图 4 和表 2 可知,以 I 阶段 $t = t_a, t = t_b$ 时刻沿线油温分布为例, $t = t_b$ 时刻处于管道 20 ~ 30 km 处 (CD 段) 的反输结束后冷油的油温,明显低于 $t = t_a$ 时刻时反输结束后冷油 (AB 段) 的油温,因此, $t = t_b$ 时刻的停输安全性低于 $t = t_a$ 时刻。同理可知, $t = t_1$ 时刻冷油尾通过末站时是 I 阶段停输安全性最低时刻。之后,末站附近油温逐渐升高,停输安全性单调递增。

2.2 定量分析

定义安全停输概率 φ 与正反输送一个周期内不同时刻的停输初始状态相对应。针对输油管道站间仅有一个冷热油混油界面 (即正反输原油均能全部充满整条管道) 的正反输送情况,安全停输概率 φ 可定义为:

$$\varphi = \begin{cases} \frac{|vt - L|}{L_1 - L}, & \text{正输时} \\ -\frac{|vt - L|}{L_2 - L}, & \text{反输时} \end{cases} \quad (1)$$

式中: φ 为安全停输概率; v 为流速, m/s; t 为正输油品通过出站口 (对正输来说为首站,对反输来说为末站) 的运行时间, s; L 为管长, m; L_1 为一个正反输送周期中正输油品通过首站后的总长度, m; L_2 为一个正反输送周期中反输油品通过末站后的总长度, m。

安全停输概率公式的意义在于:其取值表示在一个正反输送周期内某一时刻发生停输时,已通过出站口截面的油品体积与管道容积之差的绝对值比上正反输送的油品总体积与管道容积之差的绝对值。其中“+、-”表示油品输送方向,正输时 φ 取正值,反输时 φ 取负值。安全停输概率的取值意义:正输时 $\varphi \in [0, 1]$,反输时 $\varphi \in [-1, -0]$ 。其中当正输结束 (反输开始) 时, φ 即可用 1 表示,也可用 $-L/(L_2 - L)$ 表示;当正输开始 (反输结

束) 时, φ 即可用 $L/(L_1 - L)$ 表示,也可用 -1 表示。除去这 2 个正反输送交替时刻外,其余时刻仅有 1 个相对应的 φ 值。各时刻 φ 值见表 3。

由表 3 可知,在正输/反输送运行时冷油存在的阶段安全停输概率较低,随着冷油油尾接近进站口,安全停输概率单调递减,冷油油尾到达进站口时安全停输概率最低为 0。之后,随着进站口附近油温的逐渐升高,安全停输概率逐渐增大。

3 结论

1) 通过分析正反输送一个周期管内原油的流动状态,创新性地将一个正反输周期划分为正输冷油控制阶段、正输热油控制阶段、反输冷油控制阶段、反输热油控制阶段四个阶段。

2) 根据不同运行阶段的管道温降特点,从管道沿线油温变化的角度对不同正反输送运行阶段停输初始状态的安全性进行定性分析。

3) 提出新变量“安全停输概率”,从定量的角度对原油正反输送不同时刻停输初始状态的安全性进行分析。结果表明, ± 0 时,停输安全性最低; ± 1 时,停输安全性最高。

参考文献:

- [1] 马伟平,王 舰,王禹钦,等.任京线正反输运行长期不清管条件下的结蜡规律[J].石油工程建设,2011,37(6):7-11.
Ma Weiping, Wang Jian, Wang Yuqin, et al. Wax Deposition Laws for Renqiu-Beijing Oil Pipeline Under Conditions of Forward and Reverse Transportation Operation and Longtime Non-Pigging [J]. Petroleum Engineering Construction, 2011, 37 (6): 7-11.
- [2] 金钰昕,姚安林,周 刚,等.埋地热油管道正反输温降影响因素分析[J].天然气与石油,2018,36(4):8-12.
Jin Yuxin, Yao Anlin, Zhou Gang, et al. Analysis of the Temperature Drop Influence Factors During the Process of Forward and Reverse Pumping of Buried Hot Oil Pipeline Based on SPS [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36 (4): 8-12.
- [3] 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.
- [4] 姜笃志.输油管道非稳定热力过程数值分析[J].油气储运,1996,15(8):1-5.
Jiang Duzhi. Numerical Analysis of Non-Steady Thermal

表 3 不同时刻安全停输概率 φ 值

时刻	正反输运行状态	安全停输概率 φ
0	反输结束,正输开始	0.10 / -1
t_{0-1}	正输热油油头 (反输存油油尾) 到达管道 1/2 处	0.05
t_1	正输热油油头 (反输存油油尾) 到达末站	0
t_{1-2}	正输 3.5 d	0.45
t_2	正输结束,反输开始	1 / -0.42
t_{2-3}	反输热油油头 (正输存油油尾) 到达管道 1/2 处	-0.21
t_3	反输热油油头 (正输存油油尾) 到达首站	-0
t_{3-T}	反输 1 d	-0.29
t_T	反输结束,正输开始	-1 / 0.10

- Process for Oil Pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1996, 15 (8): 1-5.
- [5] 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.
- [6] 魏立新, 周刚, 于航, 等. 基于相关向量机算法的埋地热油管道降温预测[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.
- [7] Jung Y, Hu J H. A K-fold Averaging Cross-Validation Procedure [J]. Journal of Nonparametric Statistics, 2015, 27 (2): 167-179.
- [8] 周刚, 张伟, 杨林, 等. 寒区输油管道正反输降温规律分析[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.
- [9] 马伟平, 李立, 徐海红, 等. 任京输油管道加降凝剂正反输运行规律研究[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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 周刚. 高含蜡原油管道低输量状态下的安全经济运行技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
- Zhou Gang. Research on Safe and Economical Operation of High Waxy Crude Oil Pipeline Under Low-Flowrate [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [14] 杨军, 钟仕荣, 王建华. 热油管道不饱和输送工况下总传热系数的取值[J]. 油气储运, 2006, 25(3): 55-57.
- Yang Jun, Zhong Shirong, Wang Jianhua. Determining the Total Heat Transfer Coefficient for Hot Oil Pipeline Under the Condition of Low Throughput [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2006, 25 (3): 55-57.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.