

# 塔河原油顺序输送工艺在塔轮管线上的应用研究

路志乾, 王 城, 陈兰霞

(中国石化 西北油田分公司, 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**在概述了塔河原油顺序输送的背景、塔轮线基本概况的基础上, 简述了塔河中质原油、重质原油在塔轮线的顺序输送方案, 研究、总结了顺序输送过程中的混油机理、混油因素、管线水力特性的基本规律, 以便指导塔轮线高质高效安全运行。

**关键词:**中质原油; 重质原油; 顺序输送; 混油

**中图分类号:** TE86

**文献标识码:** A

## Application of Tahe crude oil batch transportation to Talun pipeline

Lu Zhiqian, Wang Cheng, Chen Lanxia

(SINOPEC Northwest Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

**Abstract:** The batch transportation background of Tahe crude oils and the basic conditions in Talun pipelines were introduced to illustrate how medium and heavy crude oils were transported. Oil mixing rules, factors and the hydraulic characteristics of pipelines during batch transportation were concluded to guide the safe operation of Talun pipelines.

**Key words:** medium crude oil; heavy crude oil; batch transportation; oil mixing

面对国际原油价格持续低迷的困境, 中国石化西北油田分公司实行中质原油、重质原油分储分销策略, 采用塔轮管线顺序输送工艺分批次输送 2 种原油至轮台末站外销。目前, 顺序输送在成品油管输应用较多, 且对应的研究与理论较为全面; 而在原油管输中的应用与研究均较少。本文将以塔轮管线顺序输送中质原油与重质原油的工艺过程为研究对象, 认识混油机理, 掌握混油控制措施, 降低混油损失; 把握顺序输送管线的水力变化规律, 指导安全生产。

## 1 塔轮线概况

### 1.1 基本情况

塔轮管线于 2002 年 2 月建成投产, 设计输送能力  $350 \times 10^4$  t/a, 全长 69.46 km, 管线规格为 323.9 mm  $\times$  7 mm, 管材为 X56 钢, 设计工作压力 6.4 MPa, 因运行年限较长, 最高工作压力定为 6.2 MPa, 埋深 1.5 m, 采用聚氨酯防腐涂料, 传热系数为  $0.82 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 设计原油输送密度  $0.93 \sim 0.96 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。塔轮管线起点为塔轮首站, 用于对原油储存、加热、加压、外输; 管线终点为轮台末站, 用于对原油接收、储存、装车外销; 在距离首站约 35 km 处设拉依苏中间热泵站, 用于对首站来油加热、加压、转输。其中, 塔轮首站

绝对高程 932.5 m, 拉依苏中间站绝对高程 943.9 m, 轮台末站绝对高程 1 031.8 m, 管线起终点高程差为 -99.3 m。

### 1.2 历史运行情况

在顺序输送中质原油、重质原油前, 塔轮线一直输送塔河重质原油。根据 2015 年 3 月至 2016 年 3 月历史运行数据分析可知, 沿线各站进、出站的平均压力、温度均在工艺参数设计范围内 (表 1), 管线运行安全、平稳。

## 2 顺序输送基本情况

### 2.1 原油物性

原油物性差异直接影响管线顺序输送的混油量和水力特性, 必须清楚原油水力特性。根据勘探开发研究院的原油化验结果, 重质原油、中质原油

表 1 顺序输送工艺前塔轮线工艺运行参数  
Table 1 Operation parameters of Talun pipelines before application of batch transportation

| 项目                                      | 塔轮首站 |      | 拉依苏中间站 |      | 轮台末站 |    |
|---|------|------|--------|------|------|----|
|   | 出站   | 进站   | 出站     | 进站   | 出站   | 进站 |
| 压力/MPa                                  | 1.0  | 0.02 | 2.2    | 0.16 |      |    |
| 温度/ $^\circ\text{C}$                    | 69   | 48   | 75     | 47   |      |    |
| 管输量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ |      |      | 90     |      |      |    |

表 2 塔河中质原油与重质原油物性

Table 2 Physical properties of medium and heavy crude oils in Tahe

| 油品名  | 20 °C 密度<br>( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 30 °C/60 °C<br>运动黏度/<br>( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 含蜡量/<br>% | 凝点/<br>°C |
|------|---|---|-----------|-----------|
| 中质原油 | 0.870 5   | 24  | 7.15      | -7        |
| 重质原油 | 0.954 5   | 898   | 2.97      | -4        |



图 1 塔轮线重质原油输送流程

Fig.1 Transportation procedure of heavy crude oils in Talun pipelines

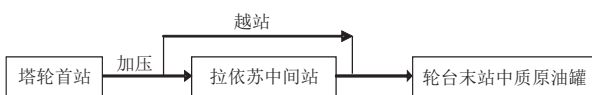


图 2 塔轮线中质原油输送流程

Fig.2 Transportation procedure of medium crude oils in Talun pipelines

关键物性参数见表 2。重质原油密度大、黏度高、凝点高、流动性差;中质原油密度小、黏度低、凝点低、流动性好。

## 2.2 工艺方案

2016 年 4 月,调整了塔轮线在库原油种类。考虑塔轮首站安全储量不少于管线容量( $5\ 200\ \text{m}^3$ ),根据销量需求,首站用容量为  $20\ 000\ \text{m}^3$  的 1# 储罐储存中质原油  $9\ 000\ \text{m}^3$ ;在轮台末站用容量为  $10\ 000\ \text{m}^3$  的 5# 储罐接收中质原油,作为装车外销量。

利用塔轮线,分批次顺序输送重质原油与中质原油至轮台末站。2 种原油物性差异较大,夏天地温  $15 \sim 25\ ^\circ\text{C}$ 。从经济、安全的角度考虑,加热输送重质原油,流程如图 1;不加热常温输送中质原油,流程如图 2。在轮台末站按 50/50 混油面切割法<sup>[1]</sup>将混油段切割存储至重质原油罐、中质原油罐。

## 3 原油混油分析

### 3.1 混油产生机理

管道顺序输送除了初始混油、过站混油、意外混油外,正常输送条件下,沿程混油<sup>[1]</sup>是最主要的。沿程混油产生的因素有 2 个:一是对流传递<sup>[2]</sup>,当 2 种原油在管内运动时,在管道横截面沿径向流速分布不均匀,后行原油便呈楔形进入前行油品中,使混油轴向伸展(图 3);二是紊流扩散传递<sup>[2]</sup>,管道内原油沿管道径向、轴向造成的紊流扩散作用,破坏了楔形油头的分布,使 2 种原油混合(图 4)。

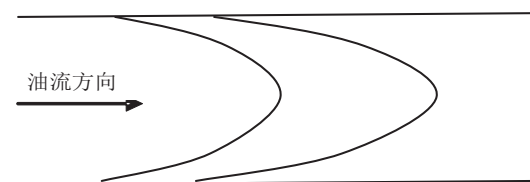


图 3 对流传递

Fig.3 Convective transmission

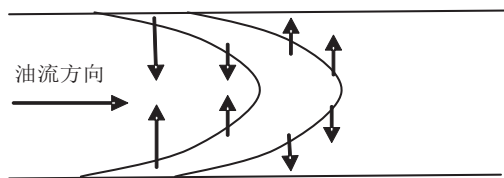


图 4 紊流扩散传递

Fig.4 Turbulent diffusion transmission

在层流时,管道截面上流速分布不均匀,对流传递是造成混油的主要原因,混油量有时达到总管容的若干倍<sup>[3]</sup>。在紊流时,管道任一横截面流速接近平均值,无楔形油头存在,对流传递不显著,主要为紊流扩散传递引起的混油,径向扩散比轴向扩散强劲,阻碍了混油的轴向伸展,因此,混油量比层流时要小很多。

### 3.2 混油量计算

目前,混油量计算广泛采用英国研究者 Austin 和 Palfrey 总结的经验公式<sup>[4]</sup>,适用于混油段中前行油品浓度为 1% ~ 99% 的混油量计算。

$$Re_j = 10\ 000 e^{2.72 d^{0.5}} \quad (1)$$

$$Re = \frac{4Q}{\pi d \nu} \quad (2)$$

$$\begin{cases} C = 11.75 d^{0.5} L^{0.5} Re^{-0.1} (Re > Re_j) \\ C = 18\ 384 d^{0.5} L^{0.5} Re^{-0.9} e^{2.18 d^{0.5}} (Re < Re_j) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $Re_j$  为混油临界雷诺数; $Re$  为混油段雷诺数; $C$  为混油段长度, m;  $L$  为管道长度, m;  $d$  为管道内径, m;  $Q$  为原油在管道中体积流量。

实例验证,由表 2 中油品物性参数,计算混油黏度<sup>[2]</sup>为  $108\ \text{mm}^2/\text{s}$ ,并选取 2 种工况利用(1)、(2)、(3)式计算理论混油长度(表 3)。

忽略人为监测混油段长度的操作误差,由以上

表 3 2 种工况的理论混油长度与实际混油长度对比  
Table 3 Theoretical mixed oil length and actual mixed oil length comparison under two conditions

| 工况   | 排量/<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) | $Re_j$ | $Re$ | 理论混油<br>长度/m | 实际混油<br>长度/m |
|------|---|--------|------|--------------|--------------|
| 工况 1 | 85  | 45 357 | 901  | 19 822       | 16 550       |
| 工况 2 | 190   | 45 357 | 2015 | 9 610        | 9 470        |

分析结果可知,混油长度理论计算结果与实际混油长度基本吻合;随着排量的增加,混油长度随之减少。

### 3.3 混油段各原油浓度分布情况

2016 年 4 月 21 日至 4 月 23 日,先将中质原油作为后行油品,顺序输送,顶替管道中原有的重质原油,保持输量 85 m<sup>3</sup>/h。在塔轮首站启输 53 h 后,在轮台末站每隔 1 h 取样化验一次混油密度,跟踪混油物性变化(表 4)。

利用管道的各横截面上 2 种原油浓度之和为 1 的原理<sup>[3]</sup>,换算每一个混油密度下,2 种油品的浓度百分比(表 4)。

假设轮台末站接收混油后,将混油静态放在与塔轮线一样的管道内,且不再发生混油现象。将第一次监测到的混油结点作为混油段零点,根据油流速度测算每个监测点对应的混油里程(表 4),则监测到的混

油长度合计约 16.5 km,产生混油累计 1 315 m<sup>3</sup>。

从表 4 和图 5 不难发现,混油段从轻质原油端至重质原油端,重质原油浓度越来越高,从 0 增加至 100%;而轻质油浓度正好相反,从 100%降至 0。在混油段中间段混油较充分,在混油段中心截面 2 种原油浓度几乎相等,近乎 50%。

### 3.4 混油影响因素

#### 3.4.1 流态

塔轮管道内顺序输送时,流态是影响混油量的关键因素,当管输量从小逐渐增大时,流态也逐渐由层流过渡至紊流,混油量逐渐减少,因此,保持最大输量输送可有效减少混油。

#### 3.4.2 顺序输送次序(黏度差异)

重质原油黏度远远大于中质原油黏度,重质原油在管壁处的层流边界层较厚,轻油很难在短时间内冲刷掉重质原油前行留下的层流边界层,因此,中质原油作为后行原油的混油量大于中质原油作为前行原油的混油量。

#### 3.4.3 原油密度差

塔轮线终点比起点高程高 99.3 m,中质原油比重质原油轻 0.08 g/cm<sup>3</sup>,当中质原油作为后行油品时,在混油截面上,在重力作用下,因密度差,中质原油上浮、重质原油下沉,加剧混油。

#### 3.4.4 油品切换(初始混油)

当顺序输送时,塔轮首站中质原油储罐、重质原油储罐出口阀门的切换速度是影响初始混油量的关键。而初始混油量也直接影响最终混油量。因此,将储罐阀门设置成电动阀门,操作时,快速切换外输罐,能有效减少初始混油量。

#### 3.4.5 顺序输送频次与批量

每种油品输送频次和每批次输量大小均影响整体混油量,当频次越高、每批次输量越小,原油整体混油量越多。

#### 3.4.6 其他因素

管线上的中间站中热泵站工艺复杂程度、管件数量、阀门开度、沿线翻越点数量及落差大小等因素也会影响混油量。

## 4 管线水力特性分析

塔轮线顺序输送原油的黏度、密度不同会引起管线工况变化。为了便于研究顺序输送的管线水力特性,对塔轮线进行理想化,即忽略热力变化对水力特性的影响。假设重质原油在拉依苏中间站压力越站,将拉依苏中间站出站压力叠加至塔轮首站泵机组出口压力上,使重质原油、中质原油具备

表 4 轮台末站混油密度监测记录与换算

Table 4 Monitoring record and conversion of mixed oil density in Luntai terminal station

| 序号 | 时间          | 密度/<br>(g · cm <sup>-3</sup> ) | 中质<br>原油% | 重质<br>原油% | 混油<br>里程/km |
|----|-------------|--------------------------------|-----------|-----------|-------------|
| 1  | 4月23日 23:00 | 0.952 8                        | 2         | 98        | 0           |
| 2  | 4月24日 0:00  | 0.948 6                        | 7         | 93        | 1.1         |
| 3  | 4月24日 1:00  | 0.951 1                        | 4         | 96        | 2.2         |
| 4  | 4月24日 2:00  | 0.944 4                        | 12        | 88        | 3.3         |
| 5  | 4月24日 3:00  | 0.933 5                        | 25        | 75        | 4.4         |
| 6  | 4月24日 4:00  | 0.925 1                        | 35        | 65        | 5.5         |
| 7  | 4月24日 5:00  | 0.927 6                        | 32        | 68        | 6.6         |
| 8  | 4月24日 6:00  | 0.925 1                        | 35        | 65        | 7.7         |
| 9  | 4月24日 7:00  | 0.909 1                        | 54        | 46        | 8.8         |
| 10 | 4月24日 8:00  | 0.895 7                        | 70        | 30        | 9.9         |
| 11 | 4月24日 9:00  | 0.891 5                        | 75        | 25        | 11          |
| 12 | 4月24日 10:00 | 0.885 6                        | 82        | 18        | 12.1        |
| 13 | 4月24日 11:00 | 0.876 4                        | 93        | 7         | 13.2        |
| 14 | 4月24日 12:00 | 0.878 9                        | 90        | 10        | 14.3        |
| 15 | 4月24日 13:00 | 0.873 0                        | 97        | 3         | 15.4        |
| 16 | 4月24日 14:00 | 0.870 5                        | 100       | 0         | 16.5        |

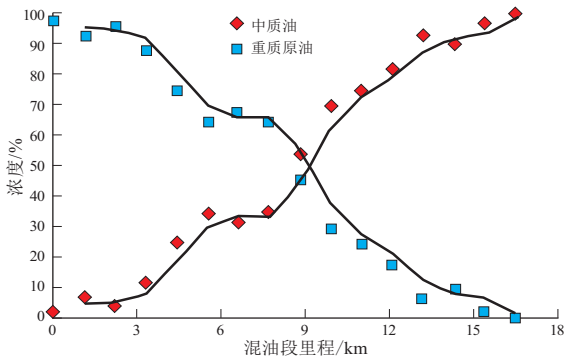


图 5 混油段重质原油与中质原油浓度变化曲线

Fig.5 Concentration changes of heavy and medium crude oils in mixed section

相同的增压流程。

#### 4.1 双螺杆泵特性曲线分析

塔轮首站使用双螺杆泵对外输原油加压输送,影响双螺杆泵工作特性<sup>[5]</sup>的主要因素之一是定子与转子间的过盈量<sup>[5]</sup>,而塔轮首站双螺杆泵主要针对密度 0.93~0.95 g/cm<sup>3</sup>、黏度 500 mm<sup>2</sup>/s 以上的重质稠油设计使用,输送重质原油时泵特性曲线如图 6 中的 B 曲线所示。

中质原油密度为 0.85~0.87 g/cm<sup>3</sup>、50 ℃ 的黏度小于 30 mm<sup>2</sup>/s,属于轻质稀油;当双螺杆泵输送中质原油时,由于定子与转子的过盈量过大,泵内漏失量大,出液少,泵效低,则输送中质原油的泵特性曲线如图 6 中的 A 曲线所示。

#### 4.2 管路特性曲线分析

在原油长输管道运行中,管道水力特性符合能量守恒定律<sup>[2]</sup>:

$$P_{起} = P_{终} + \rho g (\Delta H + \beta \frac{Q^{2-m} \nu^m}{d^{5-m}} L) \quad (4)$$

式中: $P_{起}$  为管线起点压力; $P_{终}$  为管段终点压力; $\rho$  为管输介质密度; $\Delta H$  为管线起终点高程差; $\beta$ 、 $m$  为流态常数; $d$  为管道内径; $L$  为管线总长; $Q$  为管输量; $\nu$  为管输介质运动黏度。

由(4)式分析可知,在管线状况、输量不变的情况下,管道输送油品密度越小、浓度越低,管路特性越平缓,流量为零时的起点压力越小。忽略塔轮线顺序输送中输量、流态的变化,因  $\rho_{中} < \rho_{重}$ 、 $\nu_{中} < \nu_{重}$ ,所以,在图 6 中,单一输送中质原油时管路特性曲线为 I,单一输送重质原油时管路特性曲线为 II。

#### 4.3 管线系统工况分析

管线系统工况点符合能量守恒定律,即流体机械提供给管路系统的总能量等于管线系统所消耗

的能量<sup>[2]</sup>。由图 6 可知,单一输送中质原油时管线系统工况点为 1,单一输送重质原油时管线系统工况点为 3。

当重质原油顶替中质原油时,初始混油界面通过首站双螺杆泵后,泵机组充满重质原油时,泵特性曲线由 A 跃升为 B,而管道内此时为中质原油,管路特性曲线为 I,此时系统工况点由 1 突变为 2,泵机组排量和压力均突然升高,排量由 90 m<sup>3</sup>/h 升高至 92 m<sup>3</sup>/h,压力由 2 MPa 升高至约 2.1 MPa。随着管道内重质原油长度的增加,系统工况点沿曲线 B 渐渐由 2 向 3 移动,泵机组排量缓慢降低、压力逐渐升高,直到管内充满重质原油,系统工况点稳定在 3 处,排量约 85 m<sup>3</sup>/h,泵压约 2.8 MPa。

当中质原油顶替重质原油时,初始混油界面通过首站双螺杆泵后,待泵机组充满中质原油时,泵特性曲线由 B 降为 A,而管道内此时为重质原油,管路特性曲线为 II,此时系统工况点由 3 变为 4,泵机组排量和压力均突然下降,排量由 85 m<sup>3</sup>/h 降至 84 m<sup>3</sup>/h,泵压由 2.8 MPa 降至 2.5 MPa,随着管道内中质原油长度的增加,系统工作点沿曲线 A 由 4 向 1 移动,泵机组排量缓慢升高、压力逐渐降低,直到管内充满中质原油,系统工况点稳定在 1 处,排量约 90 m<sup>3</sup>/h,压力约 2 MPa。

在 2 种原油周期性交替顺序输送过程中,泵机组-管道系统工作点变化呈现周期性。一个周期内,工况点变化由 2 个过程组成,即“点 1 越变至点 2、再渐变至点 3”和“点 3 越变至点 4、再渐变至点 1”,管线系统水力特性具有不稳定性。

## 5 结论

(1) 原油长输管道顺序输送产生混油机理除初始混油、意外混油、过站混油外,主要为沿程混油。而沿程混油包括有对流传递和扩散传递,层流时对流传递占主因,紊流时扩散传递占主因。

(2) 管道内混油长度与混油输送距离成正比,在混油段上,距纯油端越近该原油混油浓度越高,反之越低。

(3) 影响混油量的因素很复杂,有管道运行流态、原油顺序输送次序、初始混油、顺序输送频次、各原油物性差异、管道翻越点数量及起伏差等。

(4) 2 种原油顺序交替输送时,水力特性表现也呈周期性,且具有不稳定性。

(5) 塔轮线重质原油加热、中质原油不加热顺序输送,2 种原油温度差约 30 ℃,对管道运行管理带来考验。

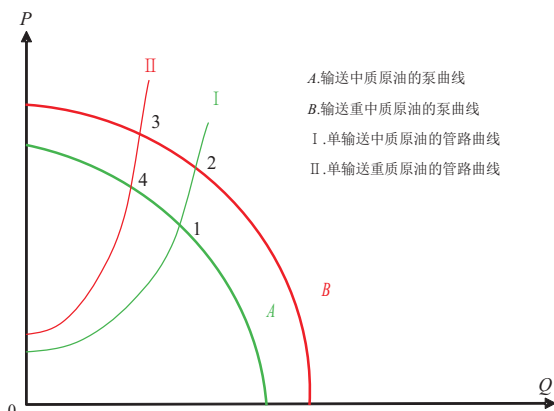


图 6 原油交替顺序输送时泵机组-管路系统工作点

Fig.6 Working points of pump versus pipeline in alternate batch transportation of crude oil

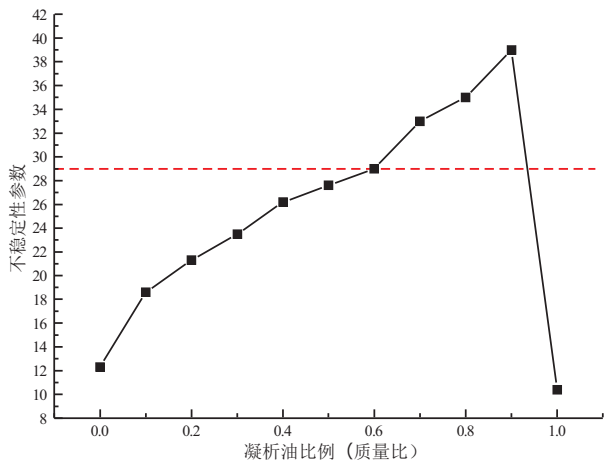


图 5 不同比例混合油不稳定性参数

Fig.5 Instability parameters of oil with different mixing ratios

表 5 混合油静置不同时间上下层密度

Table 5 Density of mixed oil with different time

| 编号 | 沉降时间   | 上层密度/<br>(g · cm <sup>-3</sup> ) | 下层密度/<br>(g/cm <sup>3</sup> ) |
|----|--------|----------------------------------|-------------------------------|
| 1  | 30 min | 0.929 9                          | 0.930 2                       |
| 2  | 5 h    | 0.930 5                          | 0.931 2                       |
| 3  | 1 d    | 0.931 3                          | 0.931 4                       |
| 4  | 2 d    | 0.931 6                          | 0.931 8                       |
| 5  | 3 d    | 0.931 8                          | 0.932 0                       |
| 6  | 4 d    | 0.932 6                          | 0.932 7                       |
| 7  | 5 d    | 0.929 9                          | 0.930 5                       |

注:在 20 °C 中测定

### 3 结论

(1)塔河外输重质油和凝析油的沥青质含量差别较大,但在一定条件下可形成稳定混合液体系,通过斑点实验方法,确定了混合体系处于相容状态时的混合范围,即混合体系中外输重质油质量分数大于 50%,这为今后外输重质油与凝析油掺混输送问题提供了理论指导。

(2)搅拌对于物性差异大的 2 种原油混合具有促进作用,外输重质油与凝析油比例为 6.5 : 1,分别加入后静置,凝析油迅速分异至上层,但通过搅拌混合后,形成密度 0.93 g/cm<sup>3</sup> 混合油体系可保证 5 d 的稳定。

#### 参考文献:

[1] 唐锋,李少萍,刘春花.原油混合对沉淀点的影响[J].化学世界,2007,(S):40-42.

[2] Nemana S, Kimbrell M R, Zaluzec E. Predictive crude oil compatibility model [P]. US7618822, 2009-11-17.

[3] Wiehe I A, Kennedy R J. The oil compatibility model and crude oil incompatibility [J]. Energy & Fuels, 2000, 14: 56-59.

[4] Wiehe I A, Rahimi P, Oh D Y, et al. Flocculation test for oils without asphaltenes [J]. Energy & Fuels, 2008, 22: 753-756.

[5] Jose de Jesus Rubio, Wen Yu. Modelling of crude oil blending via discrete time neural networks [C] // International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE) and X Conference on Electrical Engineering (CIE 2004), Acapulco, Guerrero, Mexico. September 8-10, 2004.

[6] Gandhi K A. Characterization of crude oils and their blends: A study of blending effects on solids precipitation properties [D]. Salt Lake City: University of Utah, 2005.

[7] ASTM D4740-04(2014). Standard Test Method for Cleanliness and Compatibility of Residual Fuels by Spot Test [S].

[8] 管秀鹏,田松柏.原油相容性及对蒸馏过程的影响[J].石油学报, 2009, 25 ( 2 ): 150-155.

[9] 彭飞,王小伟,王京,田松柏.原油胶体体系相容性研究进展[J].石化技术与应用, 2011, 1: 78-83.

[10] Asomaning S. Test methods for determining asphaltenes stability in crude oils, Petroleum Science and Technology, 2003, 21 (3): 581-590.

[11] Newberry M E and Barker K M. Organic formation damage control and remediation [J]. SPE International Symposium on Formation Damage Control, 23-24 February 2000, Lafayette, Louisiana (SPE 58723).

(编辑 叶德燎)

(上接第 103 页)

#### 参考文献:

[1] 康正凌,宫敬.管道顺序输送的混油研究[J].油气储运, 2002 (5): 21.

[2] 杨筱蘅,张国忠.输油管道设计与运行[M]. 山东东营: 中国石油大学出版社, 2006: 259-269.

[3] 王昆,陈保东,郭淑娟,等.管道顺序输送产生混油的问题研究[J].油气储运, 2007(8): 10-11.

[4] 吴红刚,靳春义,陈广清,等.原油顺序输送工艺在东黄复线上的应用[J].油气储运, 2004(12): 14-15.

[5] 杨金贤,王少波.应用螺杆泵工作特性曲线优化设计[J].内蒙古石油化工, 2009(16): 71.

(编辑 叶德燎)