

# 长输油管道砂沉积模拟实验及临界流速计算分析

王威<sup>1</sup> 鲁瑜<sup>1</sup> 罗峰<sup>1</sup> 郭庆<sup>1</sup> 张宗超<sup>1</sup>

**摘要:** 为了研究海底长输油管道运行过程中管道砂(泥)沉积特性及临界流速变化规律,以渤海某油田原油外输海管为例,通过砂(泥)沉积特性模拟实验及沉积临界流速理论计算,确认了海管内砂沉积特性及管道缩径的可能性,并得出非均匀颗粒砂沉积最大临界流速为0.463 m/s,均匀颗粒砂沉积临界流速为2.39 m/s。研究表明,海底长输油气管道在长期运行过程中,管线内泥砂沉积可能造成管线缩径,该研究结果可为海管内检测以及完整性管理提供理论指导。

**关键词:** 长输油管道;砂沉积;模拟实验;临界流速;计算分析

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.11.015

## Simulation Experiment of Sand Deposition and Calculation Analysis of Critical Velocity in Long Distance Oil Pipeline

Wang Wei, Lu Yu, Luo Feng, Guo Qing, Zhang Zongchao

**Abstract:** In order to study the variation of sand sedimentary characteristics and critical velocity in the running process of the Long distance oil pipeline. Take Bohai X Oilfield oil transportation pipeline as an example, through the sand sedimentary characteristics of simulation experiment and the theory calculation of critical velocity, the characteristics of sand deposition in the sea pipe and the possibility of reducing the diameter of the pipe are confirmed. It is concluded that non uniform granular sand deposition and maximum critical velocity is 0.463 m/s, uniform sand particles deposition critical velocity is 2.39 m/s. The research shows that in the long running process of the submarine long oil pipeline, the sediment deposition in the pipeline may cause the shrinkage of the pipeline. The research results can provide theoretical guidance for the detection and the integrity management of the submarine pipeline.

**Key words:** long distance oil pipeline; sand deposition; simulation experiment; critical velocity; calculation and analysis

海底长输油气管道的完整性对海上油田安全生产具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。然而,海底长输油气管道在长期运行过程中,输送介质中夹带少量杂质、污油泥等在管线内沉积<sup>[3-5]</sup>,使管道砂(泥)沉积特性、临界流速变化规律、流通面积、输送能力等预测更加复杂,给海底长输油管道内检测以及海上油田安全生产带来极大隐患<sup>[6-7]</sup>。因此,有必要对管道砂(泥)沉积特性及临界流速变化规律进行研究<sup>[8-9]</sup>。以渤海某油田原油外输海管为例,通过砂(泥)沉积特性模拟实验及沉积临界流速理论计算,探讨管道砂(泥)沉积特性及临界流速等变化规律,为海

管内检测以及完整性管理提供理论指导。

## 1 海管参数

### 1.1 设计参数

渤海某油田外输海管设计参数:长度69.5 km,容积12 455 m<sup>3</sup>,管道内管外径OD508 mm,外管外径OD660.4 mm/508 mm,内管壁厚15.9 mm,外管壁厚12.7 mm/15.9 mm (ID476.2 mm),内管钢级为API 5L X60,外管钢级为API 5L X52/API 5L X60,埋深1.5 m,设计压力12 MPa,最大操作压力8.8 MPa,最大操作温度75 °C,最大液体流量22 359.1 m<sup>3</sup>/d,水深31 m,海床温度-1.4~25.6 °C。

\*基金论文:渤海石油管理局生产科研项目(2012BHTJ-P-017)部分研究成果。

<sup>1</sup>中海石油(中国)有限公司天津分公司

## 1.2 运行参数

外输海管运行参数：输送介质为油水混输，入口压力为4.2 MPa，入口温度为69℃，出口压力为0.55 MPa，出口温度为65℃，输油量为18 300 m<sup>3</sup>/d，输水量为1 281 m<sup>3</sup>/d，含水率为7%。

## 2 沉积特性实验

### 2.1 在水中的沉积

#### 2.1.1 实验仪器与药品

(1) 仪器。250 mL量筒1支、250 mL细口瓶1支、秒表1个、天平（精度0.000 1 g）1台、分液漏斗1支。

(2) 药品。南堡油田清管砂样、清水。

#### 2.1.2 实验方案

(1) 量筒量取500 mL水，砂的垂直沉降距离为25 cm。

(2) 将1.0 g砂同时放入水中，利用秒表对砂的沉积时间进行计量。

(3) 对上述实验过程进行多次实验测量，研究砂的沉积速度。

(4) 利用斯托克斯公式对实验结果进行理论验证。

#### 2.1.3 实验数据

砂在水中的沉积实验结果见表1。

表1 砂在水中沉积实验结果

实验编号	砂量/g	水量/mL	沉积时间/s
1	1.0	500.0	7.53
2	1.0	500.0	8.47
3	1.0	500.0	7.40
4	1.0	500.0	6.75
5	1.0	500.0	6.84
6	1.0	500.0	7.18
7	1.0	500.0	8.07
8	1.0	500.0	22.97
9	1.0	500.0	6.78

实验结果表明，砂在水中的沉积时间为6.75~22.97 s。

### 2.2 在油水中的沉积

#### 2.2.1 实验仪器与药品

(1) 仪器。250 mL量筒1支、250 mL细口瓶1支、秒表1个、天平（精度0.000 1 g）1台、分液漏斗1支、酒精灯1台、坩埚钳1支、铁架台1台、蒸发皿1个。

(2) 药品。南堡油田清管砂样、原油样品、石油醚。

#### 2.2.2 实验方案

量筒量取100 mL水，50 mL油样，放入坩埚。用天平称取10.0 g砂样。

(1) 将油水混合样加热到70℃，然后将砂样投入混合液中，搅拌均匀。

(2) 将油、水、砂混合液立即转入分液漏斗，静置后分离。

(3) 利用石油醚对分离出的砂样进行清洗。

(4) 对清洗后的砂样进行干燥、称量。

#### 2.2.3 实验结果

砂在油水中的实验结果见表2。

表2 砂在油水中的实验结果

实验编号	砂量/g	水量/mL	油样/mL	沉积砂质量/g	沉积比例/%
1	10.0	100.0	50.0	5.43	54.3
2	10.0	100.0	50.0	8.26	82.6

实验结果表明，在油水混合物中，砂在水中的沉积量为总砂量的54.3%~82.6%；原油中砂的悬浮量为17.4%~45.8%。由此可知，海管底部水相中可能存在砂的沉积。

## 3 管内砂沉积临界流速分析

选取2012年5月10日海管运行数据作为砂沉积计算参数（表3）。

表3 砂沉积计算参数

油流量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	水流量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	入口压力/ MPa	入口温度/ ℃	出口压力/ MPa	出口温度/ ℃
17 710	5 593	4.15	71	0.49	68

目前，对非均质流临界流速的计算主要依靠经验公式，分为均匀颗粒和非均匀颗粒沉积流速计算2类<sup>[5-8]</sup>。影响砂沉积临界流速的主要因素包括管径、砂的浓度、密度、颗粒级配、大小及形状等，使用经验公式时必须符合其适用范围。现针对渤海某油田外输海管的具体情况，对砂沉积的临界流速做详细计算。

参量描述：管道内径476.24 mm；水密度为1 000 kg/m<sup>3</sup>；砂为花岗岩材质，密度取2.7 × 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>，体积浓度C<sub>v</sub>为0.003%，砂粒粒径取0.06 mm。

### 3.1 按照非均匀颗粒计算的临界流速

分别采用与砂粒粒径无关的卡察斯基公式和舒克公式，以及与砂粒粒径有关的王可钦公式进行临界流速计算。

#### 3.1.1 卡察斯基公式

$$\left[ \frac{U_{cr}}{(gD)^{\frac{1}{4}}} \right]^{1-z^{\frac{1}{3}}} = 0.73 + 0.04C_w^{1.21} e^{0.055C_w} + 1.678 \times 10^{14} C_w^7$$

式中:  $U_{cr}$ ——砂非均质流临界流速, m/s;

$Z$ ——指数, 取 0.28;

$D$ ——管内径, 476.24 mm;

$g$ ——重力加速度, 取  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。

$C_w$ ——砂粒质量浓度, %。

$C_w$ 按下式计算

$$C_w = \frac{\gamma_s}{\gamma_m} C_v = 0.0081$$

式中:  $C_v$ ——体积浓度, 即浆体中固体颗粒的体积与浆体体积之比, %;

$\gamma_s$ ——固体颗粒容重,  $\text{g/cm}^3$ ;

$\gamma_m$ ——浆体容重, 即单位体积的浆体所具有的质量,  $\text{g/L}$ 。

$$\gamma_m = \gamma + (\gamma_s - \gamma) C_v = 1\ 000.051$$

公式适用范围为煤及矿砂等材料; 密度范围  $1.385 \sim 5.25 \text{ g/cm}^3$ ; 管径范围为  $98 \sim 800 \text{ mm}$ 。故满足上述条件, 将参数数值代入, 可得

$$U_{cr} = 0.463$$

### 3.1.2 舒克公式

$$U_{cr} = 2.43 \left[ 2gD \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \frac{C_v^{\frac{1}{3}}}{C_d^{\frac{1}{4}}}$$

式中:  $\rho_s$ ——固体颗粒密度,  $\text{g/cm}^3$ ;

$\rho$ ——浆体密度,  $\text{g/L}$ ;

$C_d$ ——固体颗粒阻力因数, 取为常数 0.45。

将参数数值代入, 可得

$$U_{cr} = 0.246$$

### 3.1.3 王可钦公式

$$U_{cr} = 9.6 \left[ gD \left( \frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma_m} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \left( C_v \frac{d}{D} \right)^{\frac{1}{4}}$$

式中:  $d$ ——砂粒粒径, 取  $0.06 \text{ mm}$ 。

将参数数值代入, 可得

$$U_{cr} = 0.212$$

## 3.2 按照均匀颗粒计算的临界流速

采用杜兰德公式进行计算, 沉积临界速度的计算与粒径有关

$$U_{cr} = (Fr)_L \left[ 2gD \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中:  $(Fr)_L$ ——固体颗粒及体积浓度的函数, 可查表。

将参数数值代入, 可得临界流速

$$U_{cr} = 2.39$$

按照非均匀颗粒计算可得砂沉积的最大临界流速为  $0.463 \text{ m/s}$ , 按照均匀颗粒计算可得砂沉积的临

界流速为  $2.39 \text{ m/s}$ 。而模拟计算水相的流速约  $1.04 \text{ m/s}$ , 大于非均匀颗粒沉积临界流速, 而小于均匀颗粒下的沉积临界流速。因此, 管线内存在砂沉积的可能。

## 4 结论

(1) 在油水混合物中, 砂在水中的沉积量为总砂量的  $54.3\% \sim 82.6\%$ ; 原油中的砂悬浮量为  $17.4\% \sim 45.8\%$ 。由此可知, 渤海某油田外输海管底部水相中可能存在砂的沉积。

(2) 非均匀颗粒砂沉积的最大临界流速为  $0.463 \text{ m/s}$ , 均匀颗粒砂沉积的最小临界流速为  $2.39 \text{ m/s}$ 。模拟计算水相的速度大于非均匀颗粒砂沉积临界速度, 而小于均匀颗粒砂沉积临界流速, 进一步验证了渤海某油田原油外输海管内存在砂沉积现象。

## 参考文献

- [1] 关中原, 高辉, 贾秋菊. 油气管道安全管理及相关技术现状[J]. 油气储运, 2015, 34 (5): 457-463.
- [2] 王维斌. 长输油气管道大数据管理架构及应用[J]. 油气储运, 2015, 34 (3): 229-232.
- [3] 喻西崇, 吴九军. 海底混输管道清管过程的数值模拟研究[J]. 中国海上油气, 2005, 17 (3): 203-207.
- [4] 冯庆善. 管道完整性管理实践与思考[J]. 油气储运, 2014, 33 (3): 229-232.
- [5] 丁浩, 李玉星, 冯叔初. 水平气液混输管路清管操作的数值模拟[J]. 石油学报, 2004, 25 (3): 24-27.
- [6] 李玉星, 寇杰, 唐建峰, 等. 多相混输管路清管技术研究[J]. 石油学报, 2002, 23 (5): 101-105.
- [7] 李玉星, 冯叔初, 王新龙. 气液混输管路清管时间和清管球运行速度预测[J]. 天然气工业, 2003, 23 (4): 99-102.
- [8] 喻西崇, 任彦兵, 邬亚玲. 海底混输立管段瞬态流动规律及其敏感性分析[J]. 中国海上油气, 2007, 19 (2): 60-64.
- [9] 喻西崇, 安维杰, 吴应湘, 等. 海底混输管道瞬态过程中稳定平衡时间和总持液量变化规律研究[J]. 中国海上油气, 2004, 16 (6): 414-421.

## 作者简介

王威: 博士, 2013年毕业于西南石油大学矿产普查与勘探专业, 主要从事油气地质、油气田开发与开采、油气集输与处理工艺等方面的研究, 18702230169, 804367605@qq.com, 天津市滨海新区经济技术开发区泰华路75号天威工业园9号楼, 300452。

收稿日期 2016-03-25

(栏目编辑 张秀丽)