

# 基于工业环道试验的启动压力波传递特性

崔秀国<sup>1</sup> 王龙<sup>1</sup> 柳建军<sup>1</sup> 郑月好<sup>2</sup> 张利军<sup>2</sup>

潘艳华<sup>2</sup> 武庆国<sup>2</sup> 马超<sup>2</sup> 孙海东<sup>3</sup> 张辉<sup>2</sup>

(1. 中国石油管道研究中心; 2. 中国石油管道公司秦京输油气分公司; 3. 中国石油管道公司)

崔秀国等. 基于工业环道试验的启动压力波传递特性. 油气储运, 2010, 29(7): 491-493.

**摘要:**利用 DN300 工业试验环道, 研究了启动压力波在管内原油中的传递规律。测量了不同操作条件下, 启动压力波在原油中的传递速度, 分析了启动流量、停输前油温、启输温度等因素的影响。试验和理论分析表明, 利用原油的析蜡点温度、管道停输油温以及启动油温等参数, 可更为直接地反映原油降温收缩性和胶凝原油本身的结构特性对启动压力波传递的影响规律。根据大型环道试验数据, 通过数学回归得到了形式简单的启动压力波传递速度计算模型。

**关键词:**原油管道; 启动压力波; 传递速度; 工业环道; 计算模型

如何确保管道停输再启动作业的安全, 一直是含蜡原油管道操作运行的核心技术问题。在以往的停输再启动研究中, 人们更多关注的是对原油触变性的研究以及管道启动过程的数学描述和计算方法的选择; 由于缺乏必要的研究手段, 对启动压力波传递的研究略显不足。

压力波传递速度是与启动过程密切相关的重要参数, 以往多采用弹性介质中的声波传递机理研究原油管道中的压力波速<sup>[1-2]</sup>。但试验研究表明, 压力波在胶凝原油中的传递速度随距离的延长有明显衰减, 其传递机理明显区别于声波在流体中的传递<sup>[3]</sup>。张国忠<sup>[4]</sup>考虑胶凝原油降温收缩对压力波传递的影响, 推导了热油管道停输后启动压力波速的计算公式。张足斌<sup>[5]</sup>认为胶凝原油的屈服应力会阻碍压力波的传递, 对张国忠推导的压力波计算公式进行了修正。由于启动压力波在胶凝原油中传递的复杂性, 很难通过理论计算进行精准的确定。李才<sup>[6]</sup>采用小型环道, 对启动过程中的压力波进行了测定, 并在理论分析的基础上, 依据试验数据回归得到了启动压力波计算公式。

由于小型环道在结构尺寸和运行参数等方面与现场管道存在一定差别, 因此得到的试验数据并不能准确反映工业管道的实际情况。利用 DN300 大型环道对启动压力波在原油中的传递过程进行研究, 可更准确地预测启动压力。

## 1 大型试验环道

大型试验环道(图 1)建于秦京输油管道宝坻泵站, 占地面积约 8 000 m<sup>2</sup>。试验环道由 DN150 和 DN300 两个测试段组成, 测试段的总长度为 671 m, 且均为埋地敷设, 设计压力为 2.5 MPa, 并配置有高准确度的压力和温度传感器。利用布置在环道不同位置的多个高准确度压力传感器, 可对启动过程中压力波在管道内的传递和衰减过程进行测量。

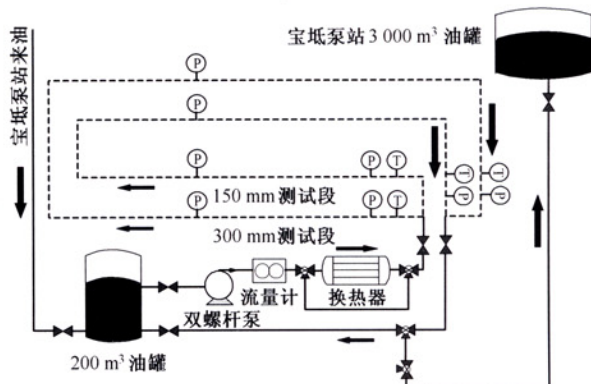


图 1 DN300 大型试验环道工艺流程

## 2 启动压力波速的测定

在启动试验中, 利用安装在环道测试段不同位置的高准确度压力传感器, 测量了不同启动工况下

科技攻关项目: 中国石油天然气集团公司科研项目, 2009D-5009-28, 2008B-2901。

作者简介: 崔秀国, 高级工程师, 1970 年生, 2005 年博士毕业于中国石油大学(北京)油气储运专业, 现主要从事原油输送工艺和管输原油流变学的研究工作。电话: 0316-2076109。E-mail: xgcui@petrochina.com.cn



## 实验研究 492

压力波的传递过程(表1)。

表1 不同启动条件下的启动压力波速数据

停输前油温 / $^{\circ}\text{C}$	启动油温 / $^{\circ}\text{C}$	压力波速 / $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	启动流量 / $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$
37.8	34.1	535.3	200
39.8	33.1	349.6	300
41.4	31.1	167.5	200
40.9	31.0	154.6	100
38.2	31.1	129.7	200
39.6	31.0	148.9	200
36.3	31.2	121.8	200
36.4	32.1	160.8	200
37.4	34.0	365.5	200
43.0	31.0	251.3	100
40.0	31.0	121.8	100
38.0	31.0	105.8	100
39.5	32.0	191.4	200
41.5	33.0	675.0	200
36.5	33.0	287.1	200

### 3 启动压力波传递的影响因素分析

#### 3.1 启动流量

文献[4]和文献[5]提出:含蜡原油管道启动压力波的传递速度不仅与管道的弹性形变和油品的降温收缩性有关,启动流量的大小也会对其产生明显影响。但大型环道启动试验表明:在启动流量分别设定为 $200\text{ m}^3/\text{h}$ 和 $100\text{ m}^3/\text{h}$ 的条件下,当停输前油温约为 $43.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $41.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $38.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $36.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,启动油温约为 $31.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,压力波速相差值分别为 $11.2\text{ m/s}$ 、 $12.9\text{ m/s}$ 、 $23.9\text{ m/s}$ 和 $22.4\text{ m/s}$ (图2)。考虑到仪表准确度以及测量过程中所产生的误差,可以认为在相同的温度条件下,启动流量的大小对压力波速无明显影响。

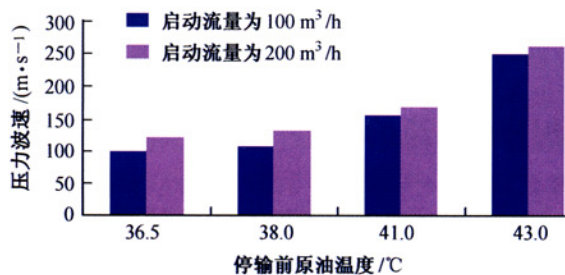


图2 DN300大型试验环道压力波速与启动流量的关系

#### 3.2 停输前运行油温

在相同启动油温下,若停输前初始油温不同,则

启动压力波在原油中的传递速度将存在明显差别(表2)。

表2 不同停输前油温对应的压力波速环道测量数据

停输前油温 / $^{\circ}\text{C}$	启动油温 / $^{\circ}\text{C}$	压力波速 / $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	停输前油温 / $^{\circ}\text{C}$	启动油温 / $^{\circ}\text{C}$	压力波速 / $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
43.0	31.0	251.3	38.2	31.0	129.7
40.9	31.0	154.0	36.3	31.0	121.8

以启动油温同为 $31.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例,停输前油温为 $43.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,启动压力波速的环道测试值为 $251.3\text{ m/s}$ ;停输前油温为 $36.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,启动压力波降低为 $121.8\text{ m/s}$ ,两者相差 $129.5\text{ m/s}$ 。由原油流变性相关理论可知,降温速率会对原油中蜡晶核形成速率和晶体生长速率产生影响,从而影响胶凝原油的结构性。停输前初始温度越低,则降低至相同启动油温所需的时间越短,进而原油结构对压力波的阻尼作用增强,故启动压力波速降低。停输前油温在很大程度上是原油结构性对于启动压力波速影响的反映,在研究中应着重考虑。

#### 3.3 启动油温

在停输前油温基本相同的条件下,随着原油启动温度的下降,压力波速在原油中的传递速度明显降低(表3)。

表3 不同启动油温下压力波速环道测量数据

停输前油温 / $^{\circ}\text{C}$	启动油温 / $^{\circ}\text{C}$	压力波速 / $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	停输前油温 / $^{\circ}\text{C}$	启动油温 / $^{\circ}\text{C}$	压力波速 / $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
36.5	34.0	574.3	36.4	32.1	160.8
36.5	33.0	287.1	36.3	31.2	121.8

以停输前油温约为 $36.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例,虽然油温从 $33.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $31.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 仅下降了约 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,但压力波速却由 $287.1\text{ m/s}$ 降至 $121.8\text{ m/s}$ ,降幅接近 $58\%$ 。根据原油的物性特点,温度变化将直接导致胶凝原油体积形态和结构特性的变化,从而影响压力波速的传递。其主要原因在于胶凝原油具有很强的降温收缩性,而原油收缩使管道内产生一定的空隙,启动过程对这些空隙的压缩将对压力波的传递产生阻碍。油温越低、空隙越大,这种阻碍作用越明显。李才<sup>[6]</sup>的小型环道试验研究也证明了这一点。

### 4 启动压力波速计算模型

基于上述分析,原油的降温收缩性和结构特性

是影响启动压力波传递的两个重要因素,而停输前油温和启动油温可在一定程度上反映原油特性对启动压力波的影响,同时考虑到析蜡点温度也是反映原油流变特性的重要参量,故引入  $T_{TS}$ 、 $T_{QS}$ 、 $T_{XL}$  三个特征参数,对原油的收缩性和结构性进行量化表征,建立启动压力波传递速度计算模型(式(1)和式(2))。

$$a = A \exp(B\beta) \cdot V_L \quad (1)$$

$$V_L = \sqrt{\frac{K}{\rho[1 + KDC_1/(Ee)]}}$$

$$\beta = T_{TS}/(T_{XL} - T_{QS})$$

式中: $a$ 为低温压力波传递速度,m/s; $V_L$ 为理想流体中压力波的传递速度; $\beta$ 为温度影响系数; $A$ 、 $B$ 为通过环道试验确定的常数; $\rho$ 为流体密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $K$ 为液体体积弹性系数,Pa; $C_1$ 为管道约束系数; $E$ 为管体的弹性模量,Pa; $e$ 为管道壁厚,m; $T_{TS}$ 为停输温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $T_{XL}$ 为原油析蜡点温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $T_{QS}$ 为启输温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

根据环道启动压力波的测试数据,通过数学回归的方法确定式(1)中的参量,得到低温启动压力波传递速度计算模型:

$$a = 0.0015 \exp(1.2117\beta) \cdot V_L$$

$$= 0.0015 \exp(1.2117\beta) \sqrt{\frac{K}{\rho[1 + KDC_1/(Ee)]}} \quad (2)$$

根据大型环道试验建立的低温启动压力波传递速度计算模型,形式简单、参数少,同时通过温度影响系数表征了原油的结构性,避免了对原油结构性参数的复杂测量,因此对凝点附近胶凝原油初始启动波速的计算具有很强的实用性。启动压力波速的回归曲线与试验测试点符合程度很高,平均误差11.5%(图3)。

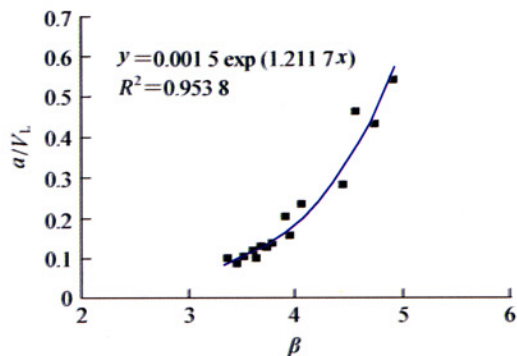


图3 试验数据点与波速回归曲线的对比

根据启动压力波传递机理的分析和环道启动试验,在不同的启输温度范围内压力波速的变化规律不同。因而,为更准确地确定启动压力波速,在低温(即  $T_{QS} < T_{XL} + 6^{\circ}\text{C}$ )时推荐采用计算式(2)进行计算;在高温(即  $T_{QS} \geq T_{XL} + 6^{\circ}\text{C}$ )时推荐采用式(1)进行计算。

#### 参考文献:

- [1] Cawkwell M G, Charles M E. An improved model for start-up of pipelines contained gelled crude oil[J]. Journal of Pipelines, 1987(7): 41-52.
- [2] Wyli E B, Streeter V H. Fluid transients[M]. Ann Arbor: Michigan, 1983: 45-47.
- [3] 李才, 张晓萍, 苏仲勋, 等. 热含蜡原油管道停输再启动压力研究[J]. 油气储运, 1998, 17(1): 10-14.
- [4] 张国忠, 安家荣. 热油管道停输后初始压力波速的计算[J]. 石油大学学报, 1999, 23(1): 72-73.
- [5] 张足斌, 张国忠. 低温原油管道中压力传递速度的计算[J]. 中国海洋油气, 2000, 12(5): 33-36.
- [6] 李才, 张晓萍, 苏仲勋. 胶凝原油管道再启动压力传递速度的研究[J]. 油气储运, 1998, 17(2): 6-10.

(收稿日期:2009-07-28)