

# 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

喻西崇<sup>1,2</sup> 安维杰<sup>1</sup> 吴应湘<sup>2</sup> 李清平<sup>1</sup>

(1. 中海石油研究中心; 2. 中国科学院力学研究所)

**摘要** 利用相似准则和灰色关联分析相结合的方法对油气混输环道模拟试验数据进行了分析,建立起稳定平衡时间、总持液量与相似准则数之间的函数关系:在液体流量不变、气体流量增加或减小的过程中,稳定平衡时间主要与  $N_{gw}$ 、 $Re$ 、 $N_{gw}$  和  $N_{1w}$  有关;在气体流量不变、液体流量增加或减少的过程中,稳定平衡时间主要与  $N_{gw}$ 、 $N_{1w}$  和  $N_{1w}$  有关;影响总持液量的主要因素是  $N_{gw}$ 、 $N_{1w}$ 、 $Re$  和  $Eu$ 。以锦州 20-2 凝析气田为例,利用 OL GA2000 软件研究了相同条件下稳定平衡时间和总持液量的变化规律:瞬态过程中,管道沿线各点压力趋于稳定的时间小于整条管道总持液量趋于稳定的时间,没有发现各点压力出现过增或过减的现象,相反出现了总持液量过增或过减的现象。验证分析结果表明,用本文建立的函数关系式进行预测:稳定平衡时间与 OL GA2000 软件模拟结果吻合较好;总持液量比现场清出的液体量大,比 OL GA2000 软件模拟结果要小。简要分析了 3 种情况下总持液量不同的原因。

**关键词** 海底混输管道 瞬态过程 稳定平衡时间 总持液量 变化规律

在瞬态过程中,海底混输管道中流体的各个参数都会发生变化,然后慢慢过渡并稳定在新的平衡状态下。从原来的平衡状态过渡到新的平衡状态所需要的时间,就是该瞬态过程的稳定平衡时间。每一个稳定平衡状态都对应一个最大总持液量。研究海底混输管道瞬态过程中稳定平衡时间和总持液量的变化规律,对于海底混输管道的清管操作、清管周期的确定、终端段塞流捕集器的设计和安全运行,以及整条管道的生产调节等都有着重要的指导作用<sup>[1]</sup>。

目前,国内外对海底混输管道瞬态过程中稳定平衡时间和总持液量的变化规律进行系统研究的结果不多<sup>[2]</sup>,本文以室内模拟试验为手段,对此做了比较系统的研究。

本次试验是在石油大学(华东)多相流试验环道上完成的,其试验环道选用直径 76.2 mm 不锈钢管,全长 380 m,布置在 30 m × 70 m 的场区中,倾角变化范围为 -30° ~ +30°;气相试验介质为空气,液相试验介质为水、润滑油和柴油;气相流量变化范围

为 100 ~ 700 m<sup>3</sup>/h,液体流量变化范围为 0.5 ~ 5 m<sup>3</sup>/h;试验环道工作压力为 98 ~ 784 kPa。

为了更好地将从室内模拟试验中总结出来的变化规律应用到海底混输管道现场,笔者在试验数据处理过程中采用相似准则分析和灰色关联分析相结合的方法,分别在稳定平衡时间、总持液量和相似准则数之间建立起函数关系,使其更加接近于现场海底混输管道中稳定平衡时间和总持液量的变化规律,即:首先采用灰色关联分析方法,分析 9 个无因次相似准则数的影响权重,确定出起主要影响作用的相似准则数;然后分别在稳定平衡时间、总持液量和这些起主要影响作用的相似准则数之间建立起函数关系。

## 1 相似准则和灰色关联分析方法

### 1.1 相似准则分析方法

由于多相流的流动具有瞬态性、不稳定性、不确定性和参数不易测定等特点,所以很难从流体力学

第一作者简介:喻西崇,男,1973年生,2004年由中海石油研究中心博士后科研工作站出站,现在中海石油研究中心技术研究部工作。地址:北京市朝阳区东三环北路甲2号京信大厦2542室(邮编:100027)。电话:010-84522640。

的观点出发建立严格和准确的理论模型。基于此,本文采用相似原理和因次分析方法研究稳定平衡时间和总持液量的变化规律。

目前,国内外已经推导出了很多相似准则数,如雷诺数( $Re$ )、弗劳德数( $Fr$ )和欧拉数( $Eu$ )等<sup>[3-5]</sup>。本文选用了如下10个相似准则数,其表达式为

$$N_{gw} = v_{sg} \left( \frac{\rho_g}{g} \right)^{1/4}$$

$$N_{lw} = v_{sl} \left( \frac{\rho_l}{g} \right)^{1/4}$$

$$N_1 = \mu_1 \left( \frac{g}{\rho_l} \right)^{1/4}$$

$$N_d = D \left( \frac{g}{\rho_l} \right)^{1/2}$$

$$Re = \frac{D v_s}{\mu_1}$$

$$Fr = \frac{v_s^2}{gD}$$

$$We = \frac{\rho_l v_s^2}{gD^2(1-\rho_g)}$$

$$N_{gw} = v_{sg} \left( \frac{\rho_g}{g} \right)^{1/4}$$

$$N_{lw} = v_{sl} \left( \frac{\rho_l}{g} \right)^{1/4}$$

$$Eu = \frac{p}{H v_s^2}$$

其中:

$$H = \rho_g + (1 - \rho_g) \rho_l$$

$$v_s = v_{sg} + v_{sl}$$

在上列各式中: $p$ 为管道中的压力,Pa; $D$ 为管道直径,m; $g$ 为重力加速度常数, $m/s^2$ ; $v_{sg}$ 为气相折算速度, $m/s$ ; $v_{sl}$ 为液相折算速度, $m/s$ ; $v_s$ 为气相折算速度增量, $m/s$ ; $v_{sl}$ 为液相折算速度增量, $m/s$ ; $\rho_g$ 为气相密度, $kg/m^3$ ; $\rho_l$ 为液相密度, $kg/m^3$ ; $\mu_1$ 为表面张力, $N/m$ ; $\mu_1$ 为液相动力黏度, $N \cdot s/m^2$ 。

## 1.2 灰色关联分析方法

到目前为止,对各影响因素进行排序,即进行关联分析的方法主要是采用灰色关联分析方法<sup>[6]</sup>。其原理:

以管道各测试点 $j$ 的稳定平衡时间为参考因

素,其测试值序列为

$$\{x_0(j)\} = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(m)\}$$

$$(j = 1, 2, \dots, m)$$

以 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 中各因素 $u_i$ 为对比因素,其相应的测试序列为

$$\{x_i(j)\} = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(m)\}$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

为了保证参考因素与对比因素之间的可比性,按下式进行了无量纲化处理:

$$y_i(j) = \frac{x_i(j)}{\max_{j=1}^m x_i(j)}$$

$$(i = 0, 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m)$$

$y_i(j)$ 对于 $y_0(j)$ 在第 $j$ 个点的灰色关联系数 $i(j)$ 为

$$i(j) = \frac{\min_i \min_j |y_0(j) - y_i(j)| + B}{|y_0(j) - y_i(j)| + B}$$

$$B = 0.5 \max_i \max_j |y_0(j) - y_i(j)|$$

系数 $i(j)$ 的平均值为灰色关联度 $r_i$ ,即

$$r_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m i(j)$$

$r_i$ 反映了各因素的影响程度。对 $r_i$ 进行归一化处理,可得权向量 $A$ ,即

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$$

其中

$$a_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i}$$

## 2 不同瞬态条件下稳定平衡时间变化规律的灰色关联分析

### 2.1 液体流量不变,气体流量增加

由于影响稳定平衡时间的因素非常多,研究中用灰色关联理论确定出影响海底混输管道不同瞬态过程中稳定平衡时间的主要因素。表1为液体流量不变、气体流量增加过程中稳定平衡时间的灰色关联分析表。从表1中可以看出,在该条件下影响管道瞬态过程中稳定平衡时间的各个因素的影响程度顺序为: $N_{gw} > N_{gw} > Re > N_{lw} > Eu > We > N_d > N_1 > Fr$ 。

研究中,选择液体流量不变、气体流量增加过程中对稳定平衡时间影响最大的4个无因次数(即 $N_{gw}$ 、 $N_{gw}$ 、 $Re$ 和 $N_{lw}$ )进行了回归分析,其关系式如下:

$$t_s = \exp \left[ 4.6322 + \ln \left( \frac{N_{gw}^{0.284} Re^{0.3825}}{N_{gw}^{0.0658} N_{1w}^{0.1768}} \right) \right] \quad (1)$$

式中： $t_s$  为稳定平衡时间，s。

2.2 液体流量不变，气体流量减小

在对液体流量不变、气体流量减小过程中稳定

平衡时间的影响因素进行灰色关联分析时，选择了 9 个无因次数进行回归分析，分析结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出，在该条件下影响管道瞬态过程中稳定平衡时间的各个因素的影响程度顺序为： $N_{gw} > N_{gw} > Re > N_{1w} > Eu > N_d > We > N_1 > Fr$ 。

表 1 液体流量不变、气体流量增加过程中稳定平衡时间的灰色关联分析表

序号	影 响 因 素								
	$N_{gw}$	$N_{1w}$	$N_1$	$N_d$	$Re$	$Fr$	$Eu$	$We$	$N_{gw}$
1	83.17	1.331	0.015	30.23	165 227.1	236.17	59.92	0.001 1	49.90
2	133.07	1.331	0.015	30.23	262 802.2	597.48	40.86	0.001 1	66.53
3	83.17	0.898	0.015	30.23	164 381.5	233.76	80.03	0.001 1	49.90
4	133.07	0.898	0.015	30.23	261 956.5	593.65	52.96	0.001 1	66.53
...									
45	159.45	0.319	0.123	43.41	56 326.1	588.06	132.58	0.000 5	79.73
46	99.66	0.598	0.123	43.41	35 344.4	231.55	145.36	0.000 5	59.80
47	159.45	0.598	0.123	43.41	56 424.5	590.11	84.32	0.000 5	79.73
48	99.66	1.076	0.123	43.41	35 513.0	233.76	103.98	0.000 5	59.80
49	159.45	1.076	0.123	43.41	56 593.1	593.65	69.79	0.000 5	79.73
灰色关联度	0.831	0.661	0.530	0.537	0.762	0.245	0.567	0.557	0.786

表 2 液体流量不变、气体流量减小过程中稳定平衡时间的灰色关联分析表

序号	影 响 因 素								
	$N_{gw}$	$N_{1w}$	$N_1$	$N_d$	$Re$	$Fr$	$Eu$	$We$	$N_{gw}$
1	199.60	1.331	0.015	30.23	392 902.3	1 335.48	31.03	0.001 1	66.53
2	133.07	1.331	0.015	30.23	262 802.2	597.48	41.24	0.001 1	49.90
3	199.60	0.898	0.015	30.23	392 056.6	1 329.74	39.82	0.001 1	66.53
4	133.07	0.898	0.015	30.23	261 956.5	593.65	54.60	0.001 1	49.90
...									
31	159.45	0.319	0.123	43.41	56 326.1	588.06	132.60	0.000 5	59.80
32	239.18	0.598	0.123	43.41	84 531.4	1 324.45	63.65	0.000 5	79.73
33	159.45	0.598	0.123	43.41	56 424.5	590.11	92.03	0.000 5	59.80
34	239.18	1.076	0.123	43.41	84 700.0	1 329.74	48.97	0.000 5	79.73
35	159.45	1.076	0.123	43.41	56 593.1	593.65	67.08	0.000 5	59.80
灰色关联度	0.791	0.692	0.478	0.501	0.715	0.363	0.647	0.494	0.747

研究中，同样选择了液体流量不变、气体流量减小过程中对稳定平衡时间影响最大的 4 个无因次数（即  $N_{gw}$ 、 $N_{gw}$ 、 $Re$  和  $N_{1w}$ ）进行了回归分析，其关系式如下：

$$t_s = \exp \left[ -44.4305 + \ln \left( \frac{N_{gw}^{105.1931} Re^{10.5869}}{N_{gw}^{74.9652} N_{1w}^{0.3432}} \right) \right] \quad (2)$$

2.3 气体流量不变，液体流量增加

在对气体流量不变、液体流量增加过程中稳定平衡时间的影响因素进行灰色关联分析时，选择了 8 个无因次数进行回归分析，分析结果如表 3 所示。

从表 3 中可以看出，在该条件下影响管道瞬态过程中稳定平衡时间的各个因素的影响程度顺序为： $N_{1w} > N_{gw} > N_{1w} > Re > Fr > N_1 > We > N_d$ 。

研究中，选择气体流量不变、液体流量增加过程中对稳定平衡时间影响最大的 3 个无因次数（即  $N_{1w}$ 、 $N_{gw}$  和  $N_{1w}$ ）进行了回归分析，其关系式如下：

$$t_s = \exp \left[ 5.6066 + \ln \left( \frac{N_{1w}^{1.6258}}{N_{gw}^{0.3019} N_{1w}^{0.4549}} \right) \right] \quad (3)$$

2.4 气体流量不变，液体流量减小

在对气体流量不变、液体流量减小过程中稳定平衡时间的影响因素进行灰色关联分析时，也选择

了 8 个无因次数进行回归分析,分析结果如表 4 所示。从表 4 中可以看出,在该条件下影响管道瞬态过程中稳定平衡时间的各个因素的影响程度顺序为:  $N_{1w} > N_{1w} > N_{gw} > Re > Fr > N_1 > We > N_d$ 。

表 3 气体流量不变、液体流量增加过程中稳定平衡时间的灰色关联分析表

序号	影 响 因 素							
	$N_{gw}$	$N_{1w}$	$N_1$	$N_d$	$Re$	$Fr$	$We$	$N_{1w}$
1	83.17	0.499	0.002	30.23	1 636 009	231.55	0.001 1	0.40
2	83.17	0.898	0.002	30.23	1 643 815	233.76	0.001 1	0.43
3	133.07	0.266	0.002	30.23	2 607 206	588.06	0.001 1	0.23
4	133.07	0.499	0.002	30.23	2 611 759	590.11	0.001 1	0.40
...								
45	207.18	0.932	0.002	32.57	3 256 635	1 329.74	0.000 9	0.45
46	207.18	0.518	0.002	32.57	3 250 151	1 324.45	0.000 9	0.41
47	207.18	0.932	0.002	32.57	3 256 635	1 329.74	0.000 9	0.45
48	138.12	0.518	0.002	32.57	2 169 469	590.11	0.000 9	0.41
49	138.12	0.932	0.002	32.57	2 175 953	593.65	0.000 9	0.45
灰色关联度	0.710	0.815	0.520	0.486	0.662	0.552	0.496	0.638

表 4 气体流量不变、液体流量减小过程中稳定平衡时间的灰色关联分析表

序号	影 响 因 素							
	$N_{gw}$	$N_{1w}$	$N_1$	$N_d$	$Re$	$Fr$	$We$	$N_{1w}$
1	83.17	1.331	0.002	30.23	1 652 271	236.17	0.001 1	0.43
2	83.17	0.898	0.002	30.23	1 643 815	233.76	0.001 1	0.40
3	83.17	0.499	0.002	30.23	1 636 009	231.55	0.001 1	0.23
4	133.07	1.331	0.002	30.23	2 628 022	597.48	0.001 1	0.43
...								
46	133.07	0.499	0.002	30.23	2 611 759	590.11	0.001 1	0.23
47	192.95	1.331	0.002	30.23	3 798 923	1 248.50	0.001 1	0.43
48	192.95	0.898	0.002	30.23	3 790 466	1 242.95	0.001 1	0.40
49	192.95	0.499	0.002	30.23	3 782 660	1 237.84	0.001 1	0.23
灰色关联度	0.654	0.882	0.363	0.113	0.508	0.449	0.278	0.769

研究中,同样选择了气体流量不变、液体流量减小过程中对稳定平衡时间影响最大的 3 个无因次数(即  $N_{1w}$ 、 $N_{1w}$ 和  $N_{gw}$ )进行了回归分析,其关系式如下:

$$t_s = \exp \left[ 6.177 7 + \ln \left( \frac{N_{1w}^{0.710 9} N_{gw}^{0.059 6}}{N_{1w}^{0.840 5}} \right) \right] \quad (4)$$

### 3 总持液量变化规律的灰色关联分析

混输管道中的平均持液率决定着通球过程最终清出的液体总量,对管道终端的各个处理设备(如段塞捕集器)的设计有着重要的指导作用。此次试验中,采用快速关闭阀门的方法测量管道中的总持液量,然后利用总持液量计算管道中的平均持液率。

试验中选择的影响管道中平均持液率的 8 个无因次数和相应的灰色关联分析结果如表 5 所示。从表 5 中可以看出,影响管道中平均持液率的各个因素的影响程度顺序为:  $N_{gw} > N_{1w} > Re > Eu > We > N_d > N_1 > Fr$ 。

研究中,选择对平均持液率影响最大的 4 个无因次数(即  $N_{gw}$ 、 $N_{1w}$ 、 $Re$  和  $Eu$ )进行了回归分析,其关系式如下:

$$H_1 = 0.345 3 - 0.023 4 \lg(N_{gw}) + 0.365 \lg(N_{1w}) - 0.009 8 \lg(Re) + 0.012 3 \lg(Eu) \quad (5)$$

式中:  $H_1$  为平均持液率,无因次。

表 5 平均持液率的灰色关联分析表

序号	影响 因素							
	$N_{gw}$	$N_{lw}$	$N_1$	$N_d$	$Re$	$Fr$	$Eu$	$We$
1	83.17	1.331	0.002	30.23	1 652 271	236.17	59.37	0.001 1
2	133.07	1.331	0.002	30.23	2 628 022	597.48	40.81	0.001 1
3	199.60	1.331	0.002	30.23	3 929 023	1 335.48	13.38	0.001 1
4	83.17	0.898	0.002	30.23	1 643 815	233.76	80.26	0.001 1
...								
60	239.18	0.598	0.123	43.41	84 531	1 324.45	61.00	0.000 5
61	99.66	1.076	0.123	43.41	35 513	233.76	106.94	0.000 5
62	159.45	1.076	0.123	43.41	56 593	593.65	69.01	0.000 5
63	239.18	1.076	0.123	43.41	84 700	1 329.74	48.68	0.000 5
灰色关联度	0.740	0.679	0.484	0.531	0.656	0.437	0.617	0.536

## 4 稳定平衡时间和总持液量变化规律的软件模拟

以锦州 20-2 凝析气田海底混输管道为例,利用瞬态多相流商业软件 OLGA2000,研究了海底混输管道瞬态过程中稳定平衡时间和总持液量的变化规律。

在软件模拟过程中,始终保持终端压力为 4 MPa、终端温度为 1 不变。分别取距南高平台 300 m 处(为  $P_1$  点)、中心平台立管顶部(为  $P_2$  点)和距终端 7 500 m 处(为  $P_3$  点)3 个典型点,分析 4 种瞬态条件下稳定平衡时间和总持液量的变化规律。

### 4.1 液体流量不变,气体流量增加

模拟条件:保持液体流量为 18 398 kg/h 不变,用 50 s 把气体流量由 53 288 kg/h 增加到 100 288 kg/h。这一条件下管道中的总持液量和  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  点压力随时间的变化关系曲线如图 1 所示。

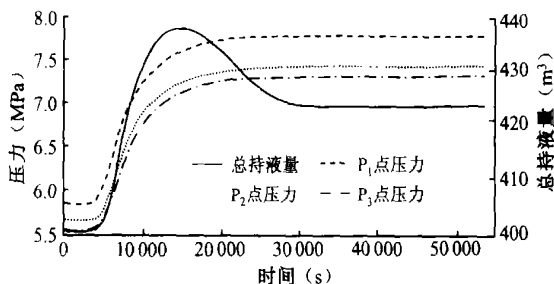


图 1 管道中的总持液量和  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  点压力随时间的变化关系曲线

(在液体流量不变、气体流量增加的模拟条件下)

从图 1 中可以看出:

(1) 在该模拟条件下,  $P_1$  点的平衡时间为 21 301 s(即 5.917 h),  $P_2$  点的平衡时间为 22 011 s

(即 6.114 h),  $P_3$  点的平衡时间为 23 519 s(即 6.553 h)。

(2) 在该模拟条件下,管道中总持液量达到新的稳定状态所需要的时间为 29 021 s(即 8.06 h)。原来状态下的总持液量为 401.7 m<sup>3</sup>,新的稳定状态下的总持液量为 424.4 m<sup>3</sup>。这说明,在液体流量保持不变、气体流量增加的过程中,虽然管道沿线各点的压力达到了平衡,但是总持液量没有达到平衡。沿线各点压力是否达到平衡主要是由压力波在各点的传播情况所控制,而总持液量是否达到平衡主要是由空隙波(密度波)控制。因此,上述结果还说明,在液体流量保持不变、气体流量增加的过程中,空隙波的传播速度小于压力波的传播速度。

(3) 管道沿线各点的压力几乎是同时上升的,并没有出现像试验过程中各点压力依次上升的现象(即离入口近的测试点压力先上升,离入口远的测试点压力后上升)。可见,OLGA2000 软件没有考虑压力波在管道中的传播问题。

### 4.2 液体流量不变,气体流量减小

模拟条件:保持液体流量为 18 398 kg/h 不变,用 50 s 把气体流量由 53 288 kg/h 减小到 33 288 kg/h。这一条件下管道中的总持液量和  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  点压力随时间的变化关系曲线如图 2 所示。从图 2 中可以看出:

(1) 在液体流量保持不变、气体流量减小的瞬态过程中,原来状态下较大的总持液量(为 401.75 m<sup>3</sup>)变化为新的稳定状态下较小的总持液量(为 390.7 m<sup>3</sup>);由管道中总持液量的变化趋势所确定的稳定平衡时间为 48 743 s(即 13.53 h)。由此可见,在液体流量不变的条件下,气体流量减小瞬态过程

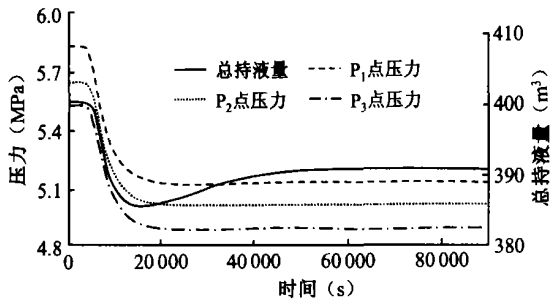


图 2 管道中的总持液量和  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  点压力  
随时间的变化关系曲线

(在液体流量不变、气体流量减小的模拟条件下)

的稳定平衡时间要比气体流量增加瞬态过程的稳定平衡时间长一些。也就是说,在液体流量不变的条件下,气体流量减小瞬态过程更难达到稳定平衡。

(2) 在液体流量保持不变、气体流量减小的瞬态过程中,压力达到稳定平衡的时间要比整条管道总持液量达到平衡的时间小得多,即压力波的传播速度要比空隙波的传播速度快得多。

#### 4.3 气体流量不变,液体流量增加

模拟条件:保持气体流量为 53 288 kg/h 不变,用 50 s 把液体流量由 18 398 kg/h 增加到 23 398 kg/h。这一条件下管道中的总持液量和  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  点压力随时间的变化关系曲线如图 3 所示。

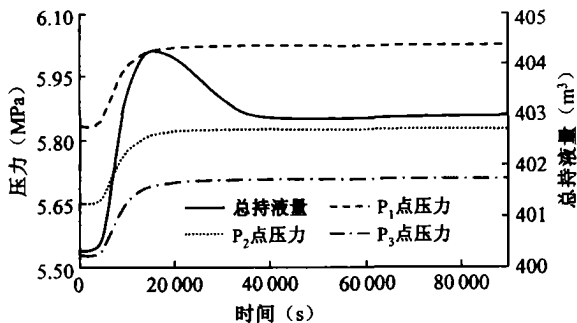


图 3 管道中的总持液量和  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  点压力  
随时间的变化关系曲线

(在气体流量不变、液体流量增加的模拟条件下)

从图 3 中可以看出:

(1) 在气体流量保持不变、液体流量增加的瞬态过程中,总持液量由原来状态下的  $400.75 \text{ m}^3$  增加到新的稳定状态下的  $403.1 \text{ m}^3$ ;由管道中总持液量的变化趋势确定的稳定平衡时间为 36 342 s (10.095 h)。由此可见,在气体流量不变、液体流量增加的条件下,管道中总持液量达到稳定的时间比

沿线各点压力达到稳定的时间长,即压力波的传播速度大于空隙波的传播速度。

(2) 在气体流量不变、液体流量增加的条件下,没有出现压力过增现象,而出现了总持液量过增现象。

#### 4.4 气体流量不变,液体流量减小

模拟条件:保持气体流量为 53 288 kg/h 不变,用 50 s 把液体流量由 23 398 kg/h 减小到 18 398 kg/h。这一条件下管道中的总持液量和  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  点压力随时间的变化关系曲线如图 4 所示。

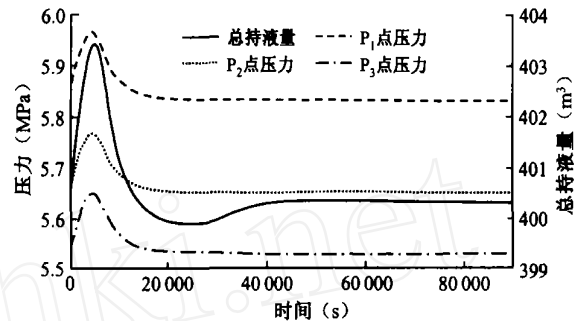


图 4 管道中的总持液量和  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  点压力  
随时间的变化关系曲线

(在气体流量不变、液体流量减小的模拟条件下)

从图 4 中可以看出:

(1) 在气体流量不变、液体流量减小的瞬态过程中,管道中总持液量达到稳定的时间也远比沿线各点压力达到稳定的时间长,即压力波的传播速度大于空隙波的传播速度。

(2) 在气体流量不变、液体流量减小的条件下,没有出现压力过减现象,而出现了总持液量过减现象。

## 5 稳定平衡时间和总持液量关系式的验证分析

将用本文提出的稳定平衡时间和总持液量关系式进行计算的结果与用 OL GA2000 软件模拟结果和锦州 20-2 凝析气田现场测试结果做了对比分析。锦州 20-2 凝析气田上岸管道采取定期的清管方式,时间频率大致保持在 2~3 个月进行一次。

### 5.1 稳定平衡时间关系式计算结果与 OL GA2000 软件模拟结果的比较

4 种瞬态过程的稳定平衡时间分别用式(1)~(4)计算。由于锦州 20-2 凝析气田没有稳定平衡时间数据,所以仅将本文关系式计算结果与 OL GA2000 软件模拟结果进行了比较(表 6)。

表 6 本文提出的稳定平衡时间关系式的计算结果与 OL GA2000 软件模拟结果的比较

管流状态	瞬态变化过程	稳定平衡时间		
		本文关系式 计算结果(h)	OL GA2000 软件 模拟结果(h)	相对误差 (%)
保持液体流量 18 398 kg/h 不变	用 50 s 把气体流量由 53 228 kg/h 增加到 100 288 kg/h	8.060	7.23	- 10.30
	用 50 s 把气体流量由 53 228 kg/h 减少到 33 288 kg/h	13.530	11.58	- 14.41
保持气体流量 53 288 kg/h 不变	用 50 s 把液体流量由 18 398 kg/h 增加到 23 398 kg/h	10.095	8.78	- 13.03
	用 50 s 把液体流量由 23 398 kg/h 减少到 18 398 kg/h	11.332	10.05	- 11.31

从表 6 中可以看出,利用相似准则和灰色关联分析相结合的方法建立的稳定平衡时间关系式所计算的稳定平衡时间比用 OL GA2000 软件模拟得到的稳定平衡时间要短,但误差都在 - 15% 以内。因此可以认为,利用本文提出的关系式进行稳定平衡时间计算是基本可行的,但其计算结果与现场测试数据是否一致,还有待今后的进一步验证和研究。

## 5.2 总持液量关系式计算结果与现场清管结果及 OL GA2000 软件模拟结果的比较

分别将用式(5)计算的总持液量与现场清管清出的液体量和 OL GA2000 软件模拟结果进行了比较(表 7),可以看出,利用相似准则和灰色关联分析

表 7 用 3 种不同方式得到的总持液量结果的比较  $m^3$ 

清管日期	现场清出的 液体量	OL GA2000 软件预测的 总持液量	利用本文提出的 关系式计算的 总持液量
2003-02-11	80	235	121
2003-04-22	90	198	145
2003-08-07	100	201	161
2003-12-10	110	220	187

相结合的方法建立的总持液量关系式所计算的总持液量比现场清出的液体量要大,而比 OL GA2000 软件模拟得到的总持液量要小。

分析认为,造成这种差异的主要原因是:现场清管时没有将管道内的液体完全清除干净,而且清管前管道内液体可能没有达到稳定状态,实际清出来的液体是非稳定状态下的积液;而 OL GA2000 软件模拟得到的总持液量是在假定管道内的积液全部清除干净的情况下得到的,因此,OL GA2000 软件模拟得到的液体量肯定要比现场清管清出的积液量多。

另外,在室内模拟试验清管中,由于清管球用过一段时间后会不同出现不同程度的磨损,清管球和管壁之间存在不规则的空隙,所以只能清出一部分液体量,从而导致清出的液体量小于 OL GA2000 软件模拟得到的液体量。

## 6 结论

(1) 利用相似准则和灰色关联分析相结合的方法,对 4 种瞬态过程中的相似准则数进行排序,筛选出影响较大的 3 种或 4 种相似准则数,然后在稳定平衡时间与较大的相似准则数之间建立起函数关系。在液体流量不变、气体流量增加或减少的瞬态过程中,稳定平衡时间主要与气相折算速度准数、雷诺数、气相折算速度准数增加值以及液相折算速度准数有关;而在气体流量不变、液体流量增加或减少的瞬态过程中,稳定平衡时间则主要与气相折算速度准数、液相折算速度准数增加值以及液相折算速度准数有关。

(2) 利用相似准则和灰色关联分析相结合的方法分析认为,影响总持液量的主要影响因素是气相折算速度准数、液相折算速度准数以及雷诺数,并建立了总持液量与主要影响因素之间的函数关系。

(3) 用 OL GA2000 多相流软件模拟了锦州 20-2 凝析气田海底混输管道在 4 种瞬态过程中的总持液量和稳定平衡时间的变化规律,并和室内模拟试验过程中总结出来的变化规律进行了对比与分析。

(4) 依据本文建立的稳定平衡时间关系式计算的稳定平衡时间比 OL GA2000 软件预测得到的稳定平衡时间要短,但误差都在 - 15% 以内;依据本文建立的总持液量关系式计算的总持液量比现场清出

的液体量大, 而比 OL GA2000 软件预测得到的总持液量要小。

### 参 考 文 献

- 1 何利民. 水平和微起伏油气混输管道中段塞流流动特性研究:[博士学位论文]. 西安:西安交通大学, 2001
- 2 江延明. 管内气液两相流瞬态特性研究:[博士学位论文]. 山东东营:石油大学(华东), 2003
- 3 Chin Y D, Xu Z G. Dynamic processes of multiphase flow in subsea flowline/riser systems during ESD valve shut-down. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, SPE 69418, 2001
- 4 Taitel Y, Dukler K. Slug-tracking model for hilly terrain pipelines. SPE Journal, 2000, 5(1): 102 ~ 108
- 5 Ezzeddine Hadj-Taieb, Taieb Lili. The numerical solution the transient two-phase flow in rigid pipelines. Int. J. Numer. Meth. Fluids, 1999, 29(5): 501 ~ 514
- 6 邓聚龙. 灰色系统理论教程. 武汉:华中化工学院出版社, 1985

收稿日期:2004-07-16 改回日期:2004-10-08

(编辑:崔护社 张金棣)

### Study on variation rule of stabilized equilibrium time and total liquid inventory in transient flow process in sub-sea multiphase pipeline

Yu Xichong<sup>1,2</sup> An Weijie<sup>1</sup>  
Wu Yingxiang<sup>2</sup> Li Qingping<sup>1</sup>

- (1. CNOOC Research Center, Beijing, 100027;
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

**Abstract:** The methods which similarity criterion analysis is integrated with gray relation analysis are used to analysis the data from multiphase cycle

pipelining simulation for establishing functional relations of stabilized equilibrium times and total liquid inventory with similarity criterion numbers. The results show that the stabilized equilibrium time is mainly affected by  $N_{gw}$ ,  $Re$ ,  $N_{gw}$  and  $N_{lw}$  in the process of gas flow rate increase or decrease with liquid flow rate constant, while the stabilized equilibrium time is mainly affected by  $N_{gw}$ ,  $N_{lw}$  and  $N_{lw}$  during the process of liquid flow rate increase or decrease with gas flow rate constant. Simultaneously total liquid inventory is mainly affected by  $N_{gw}$ ,  $N_{lw}$ ,  $Re$  and  $Eu$ . Exemplified by JZ20-2 condensate gas field, OL GA2000 software is used to simulate variation rule of stabilized equilibrium times and total liquid inventory at the same condition and the simulation results show that, in the transient process, the time of pressure being stabilized is less than that of total liquid inventory being stabilized along the pipeline and pressure overshoot or undershoot are not observed, but the overshoot or undershoot of total liquid inventory is appeared. The results of check analysis show that stabilized equilibrium time are basically consistent with the results of OL GA2000, but the results of total liquid inventory are less than those of OL GA 2000 while bigger than those of field tests. Finally, the reasons of total liquid inventory variation on three conditions are analyzed briefly.

**Key words:** sub-sea multiphase pipeline; transient flow process; stabilized equilibrium time; total liquid inventory; variation rule