

# 长输天然气管道内涂层减阻试验研究

林 竹\* 袁中立 张丽萍 秦延龙

(中国石油天然气集团公司工程技术研究院)

翟建军

(北京大学湍流研究国家重点实验室)

林竹等. 长输天然气管道内涂层减阻试验研究. 天然气工业, 2002; 22(1): 75 ~ 79

**摘 要** 为了验证减阻型内涂层对天然气管道的减阻增输效果, 对专用减阻型涂层管、普通环氧类涂层管及无涂层普通工业管的空气动力性能进行了实验室模拟试验研究, 确定了其摩擦阻力系数及减阻涂层在长输气中使用时的减阻效果。试验证明, 在雷诺数  $Re$  为  $0.7 \times 10^5 \sim 2.28 \times 10^5$  的范围内, 使用 Colebrook 公式是正确的。研究结果认为, 低雷诺数下的光滑减阻规律与高雷诺数下的光滑减阻规律是相同的, 而且高雷诺数下的减阻效果比低雷诺数时的更明显。据此认为 Colebrook 公式也可用于极高雷诺数的情况。对于实际输气管线 ( $\Phi = 1\,016 \times 16.2 \text{ mm}$ ,  $Re = 4.32 \times 10^7$ ), 采用专用减阻涂层管与无涂层普通工业管相比, 其摩擦系数值减少 26.07%; 与普通环氧涂层管相比, 其摩擦系数减少 3.9%。因此在长输大口径天然气管道中采用专用内减阻涂层管减阻效果好, 节能潜力大, 值得广泛推广使用。

**主题词** 天然气管道 长输管道 内涂层 摩擦系数 摩擦损失

近年来减阻研究取得了较大的进展, 减阻技术的应用已扩展到离岸石油的勘探开采以及石油天然气的长距离管道输送等方面。就目前研究结果而言, 减阻方法大致可归纳为: 光滑减阻; 高分子稀溶液减阻; 弹性材料护面(柔顺边界)减阻; 形体减阻。理论分析表明, 对内流(即管内流动)而言, 光滑减阻的潜力是最大的。一些文献的实验结果揭示出<sup>[1]</sup>, 光滑减阻率能达到百分之十几甚至几十。由此可见, 光滑减阻的效果是惊人的。对管线而言, 要达到其内壁面光滑的方法很多, 目前从经济、实用

的角度而言, 内壁减阻涂层是有效方法之一<sup>[1,6,7]</sup>。

早在 1955 年, Tennessee Gas pipeline 公司就在美国首次将内涂敷管线投入了实际应用, Transcontinental Gas Pipeline 公司也于 1959 年将内涂敷管线投入实际应用。近年来, 发达国家的大多数长输管线都采用了内壁涂层技术。在 2000 年 4 月举行的气体输送技术研讨会<sup>[4]</sup>上, Elling 等人报道了在北海油田的现场实测与实验室试验相结合的研究结果, 证实了内涂层管道的优点及其经验公式估算办法。

国内在此方面虽然也进行了一些研究和有益的

方法可以互相弥补, 取长补短。无疑, 这对致密岩石的渗透率测定又增添了一项参考的依据。

## 符 号 说 明

$p_1$ 、 $p_2$  分别为岩样上、下流的压力, MPa;  $p_a$  为大气压力, MPa;  $Q_a$  为大气压下的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $V_1$ 、 $V_2$  分别为瞬时脉冲装置中岩样上、下流压力容器的体积,  $\text{m}^3$ ;  $p_i$  为上、下流容器  $V_1$ 、 $V_2$  达到压力平衡时的压力值, MPa;  $A$  为岩石样品的横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $L$  为岩石样品的长度,  $\text{m}$ ;  $\beta$  为流动介质的压缩率,  $1/\text{MPa}$ ;  $\mu$  为流动介质的粘滞系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $C$  为积分常数;  $t$  为上流容器  $V_1$  中的压力衰变时间,  $\text{s}$ ;  $K$  为气测渗透率,  $\mu\text{m}^2$ 。

## 参 考 文 献

- 1 高家碧, 孙良田, 王章瑞. 瞬时脉冲致密岩石渗透率测试仪的研制. 仪器仪表学报, 1991; 12(4): 365 ~ 371
- 2 葛家理. 油气层渗流力学. 北京: 石油工业出版社, 1982: 33 ~ 62
- 3 何更生. 油层物理. 北京: 石油工业出版社, 1994: 30 ~ 48
- 4 Thierry Bourbie, Joel walls. Pulse decay permeability: Analytical solution and experimental test. SPEJ, 1982: 719 ~ 721

(收稿日期 2001 - 10 - 18 编辑 韩晓渝)

\*林竹, 工程师, 1970 年生; 1991 年毕业于西南石油学院应用化学专业, 现从事油气田防腐蚀涂料的研究、开发和推广应用工作。已发表论文二十余篇。地址: (300451) 天津市塘沽区津塘公路 40 号。电话: (022) 66310283。

尝试,但主要集中在对防腐问题的研究上。笔者此次对减阻涂层进行的试验研究结果证实,内涂层能提高管线输送能力,经济性能好。

试验方法及设备

1) 三种试验管道 (  $\varnothing=114\times4.5\text{ mm}$  ) : AW—01 减阻涂层管\* (平均绝对粗糙度  $\Delta=5.5\text{ }\mu\text{m}$  ) ; 普通环氧涂层管 ( $\Delta=6.7\text{ }\mu\text{m}$  ) ; 普通工业管 ( $\Delta=45\text{ }\mu\text{m}$  ) 。

2) 压力测量仪器: 电子压力扫描阀,采用美国 Canivalve 公司的 Hyscan2000 电子扫描阀压力测量系统,扫描阀模块型号为 ZOC33; 倾斜式微压计二台; 倾斜式多管压力计一台。

试 验 研 究

1. 拟合的公式

前人通过理论推导及试验研究相结合,得到一系列、针对不同情况的摩阻系数计算公式。下面仅列出在天然气输运中常用的摩阻系数计算公式<sup>[3]</sup>。

$f=0.046\,577\,Re^{-0.094\,319}$  (1)

$f=0.010\,566\left(\frac{\Delta}{D}+\frac{7\,025\,791}{Re}\right)^{0.091\,74}$  (2)

$\frac{1}{\sqrt{f}}=-2.041\lg\left[\frac{2.28}{Re\sqrt{f}}+\frac{\Delta}{2.5D}\right]$  (3)

$\frac{1}{\sqrt{f}}=-\lg\left[\frac{\Delta}{3.7D}+\left(\frac{6.81}{Re}\right)^{0.9}\right]$  (4)

$\frac{1}{\sqrt{f}}=-2.01\lg\left[\frac{\Delta}{3.7D}+\frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right]$  (5)

式中:  $f$  表示摩阻系数;  $\Delta$  表示绝对粗糙度;  $D$  表示管线直径;  $Re$  表示雷诺数。

上述公式中,式(1)、式(2)为以四川油田正在运行中的输气管线上实测数据拟合而得;式(3)为适合于三个湍流阻力区的 Altshile 公式;式(4)为 Flancker 公式;式(5)为工业管线中广泛使用的 Colebrook 公式,也是我国输气管道设计规范 (GB50251-94) 中所使用的摩阻系数计算公式 (其适用雷诺数范围为  $10^4\sim10^8$ ) 。

2. 试验检验

本试验对上述五个公式进行了验证。

(1) 本试验的实测摩阻系数值

根据试验测得压降  $h_f$  后,用公式  $h_f=f_1\frac{LV^2}{D2g}$

计算得到的摩阻系数  $f_1$  详见表 1。

表 1 摩阻系数  $f_1$  实测值

| 流速  | 35 m/s   | 30 m/s   | 26 m/s   | 23 m/s   | 18 m/s   | 12 m/s   |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 减阻管 | 0.015 49 | 0.016 24 | 0.016 46 | 0.016 62 | 0.017 96 | 0.018 93 |
| 涂层管 | 0.016 22 | 0.016 76 | 0.017 01 | 0.017 04 | 0.018 21 | 0.019 66 |
| 工业管 | 0.018 49 | 0.018 55 | 0.018 86 | 0.019 03 | 0.020 25 | 0.020 78 |

(2) 利用式(1)至式(5)计算的摩阻系数  $f_2$  值详见表 2 至表 4。

表 2 由公式计算的减阻涂层管摩阻系数  $f_2$

| 流速     | 式(1)     | 式(2)     | 式(3)     | 式(4)     | 式(5)     |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 35 m/s | 0.014 55 | 0.014 27 | 0.015 04 | 0.015 58 | 0.015 54 |
| 30 m/s | 0.014 75 | 0.014 67 | 0.015 53 | 0.015 96 | 0.016 04 |
| 26 m/s | 0.014 96 | 0.014 86 | 0.016 04 | 0.016 39 | 0.016 46 |
| 23 m/s | 0.015 13 | 0.015 04 | 0.016 49 | 0.016 73 | 0.016 75 |
| 18 m/s | 0.015 46 | 0.015 35 | 0.017 35 | 0.017 47 | 0.017 55 |
| 12 m/s | 0.016 25 | 0.016 13 | 0.019 67 | 0.018 31 | 0.018 59 |

表 3 由公式计算的普通涂层管摩阻系数  $f_2$

| 流速     | 式(1)     | 式(2)     | 式(3)     | 式(4)     | 式(5)     |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 35 m/s | 0.014 55 | 0.014 47 | 0.015 18 | 0.015 69 | 0.015 96 |
| 30 m/s | 0.014 75 | 0.014 67 | 0.015 64 | 0.016 07 | 0.016 44 |
| 26 m/s | 0.014 96 | 0.014 86 | 0.016 14 | 0.016 48 | 0.016 55 |
| 23 m/s | 0.015 13 | 0.015 04 | 0.016 59 | 0.016 85 | 0.016 92 |
| 18 m/s | 0.015 46 | 0.015 35 | 0.017 43 | 0.017 55 | 0.017 89 |
| 12 m/s | 0.016 25 | 0.016 13 | 0.019 73 | 0.018 38 | 0.019 51 |

表 4 由公式计算的普通工业管摩阻系数  $f_2$

| 流速     | 式(1)     | 式(2)     | 式(3)     | 式(4)     | 式(5)     |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 35 m/s | 0.014 55 | 0.014 57 | 0.018 07 | 0.018 29 | 0.018 23 |
| 30 m/s | 0.014 75 | 0.014 67 | 0.018 53 | 0.018 54 | 0.018 58 |
| 26 m/s | 0.014 96 | 0.014 87 | 0.018 67 | 0.018 82 | 0.018 85 |
| 23 m/s | 0.015 13 | 0.015 04 | 0.018 96 | 0.019 07 | 0.019 34 |
| 18 m/s | 0.015 46 | 0.015 35 | 0.019 54 | 0.019 58 | 0.020 14 |
| 12 m/s | 0.016 26 | 0.016 13 | 0.021 78 | 0.020 21 | 0.020 48 |

(3) 比较摩阻系数试验测量值  $f_1$  与公式计算值  $f_2$  之间的相对误差值  $\left[\frac{f_1-f_2}{f_1}\times100\%\right]$ , 结果见表 5 至表 7, 其中表内的平均误差是所有误差取绝对值后再平均所得的误差值, 最大误差是其绝对值最大的

\*AW—01 减阻型涂料由中国石油天然气集团公司工程技术研究院研制并生产。

误差。

由表 5、6、7 可见,用式(5)即 Colebrook 公式计算的平均相对误差最小,最大误差也最小。同时,我

表 5 减阻涂层管实测摩阻系数与公式计算的相对误差 %

| 流速     | 式(1)  | 式(2)  | 式(3)  | 式(4)  | 式(5)   |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 35 m/s | 6.1   | 6.6   | 2.9   | - 0.6 | - 0.32 |
| 30 m/s | 9.1   | 9.7   | 4.3   | 1.6   | 0.62   |
| 26 m/s | 9.1   | 9.6   | 2.6   | 0.4   | 0.00   |
| 23 m/s | 8.8   | 10.5  | 0.8   | - 0.8 | 0.60   |
| 18 m/s | 13.9  | 14.5  | 3.47  | 2.7   | 1.28   |
| 12 m/s | 14.1  | 17.9  | - 3.9 | 3.2   | 1.79   |
| 平均误差   | 10.18 | 11.47 | 3.00  | 1.55  | 0.77   |
| 最大误差   | 14.1  | 17.9  | 4.3   | 3.2   | 1.79   |

表 6 普通涂层管实测摩阻系数与公式计算的相对误差 %

| 流速     | 式(1)  | 式(2)  | 式(3)  | 式(4) | 式(5) |
|--------|-------|-------|-------|------|------|
| 35 m/s | 10.3  | 10.8  | 6.4   | 3.2  | 1.60 |
| 30 m/s | 11.9  | 12.5  | 6.7   | 4.1  | 1.91 |
| 26 m/s | 12.1  | 12.6  | 5.1   | 3.1  | 2.12 |
| 23 m/s | 11.2  | 11.7  | 2.6   | 1.1  | 0.71 |
| 18 m/s | 15.1  | 15.7  | 4.3   | 3.6  | 1.75 |
| 12 m/s | 17.3  | 17.9  | - 0.4 | 6.5  | 0.76 |
| 平均误差   | 12.98 | 13.53 | 4.25  | 3.6  | 1.48 |
| 最大误差   | 17.3  | 17.9  | 6.7   | 6.5  | 1.75 |

表 7 普通工业管实测摩阻系数与公式计算的相对误差 %

| 流速     | 式(1) | 式(2)  | 式(3)   | 式(4)  | 式(5)   |
|--------|------|-------|--------|-------|--------|
| 35m/s  | 21.3 | 21.7  | 2.2    | 1.1   | 0.87   |
| 30 m/s | 20.5 | 20.9  | 1.19   | 0.1   | - 0.16 |
| 26 m/s | 20.6 | 21.1  | - 0.5  | - 1.1 | 0.01   |
| 23 m/s | 20.5 | 20.9  | 0.4    | - 2.1 | - 1.6  |
| 18 m/s | 23.7 | 24.2  | 3.5    | 3.3   | 0.5    |
| 12 m/s | 21.8 | 22.3  | - 0.05 | 2.7   | 1.44   |
| 平均误差   | 21.4 | 21.85 | 1.31   | 1.73  | 0.76   |
| 最大误差   | 22.5 | 23.0  | 4.9    | 4.7   | 1.6    |

国输气管道设计规范(GB50251 - 94)有关摩阻系数的计算,也采用 Colebrook 公式,即采用如下公式:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = - 2.01 \lg \left( \frac{\Delta}{3.71 D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

式中:  $f$  表示摩阻系数;  $\Delta$  表示管内绝对粗糙度;  $D$  表示管道内径;  $Re$  表示雷诺数。

由此可以得出结论:对于长输管道摩阻系数的确定,采用 Colebrook 公式的计算结果,在本文的试验雷诺数范围与试验值吻合程度最高,因此该方

程可成为随后进行理论分析的基础。通过下节光滑减阻分析,也证实了在极高雷诺数的情况下,我国输气管道设计规范(GB1350251 - 94)采用 Colebrook 公式计算摩阻系数值的决定是适宜和正确的。

光滑减阻分析

为说明相对粗糙度( $\Delta/D$ )、雷诺数对摩阻系数的影响,现对 Moody 图进行分析,根据 Moody 图可定义光滑管与粗糙管相比,其摩阻系数减少值为:

$$\Delta f = \frac{f_{\text{粗}} - f_{\text{光}}}{f_{\text{粗}}} \times 100\%$$

式中:  $f_{\text{光}}$  为光滑区阻力系数,  $f_{\text{粗}}$  为同雷诺数下相应的粗糙管阻力系数,  $\Delta f$  代表由于光滑导致摩阻系数减少的百分数(为叙述方便,称其为光滑减阻率),由此可根据 Moody 图得图 1。

从图 1 中可见,在一定相对粗糙率下,光滑减阻

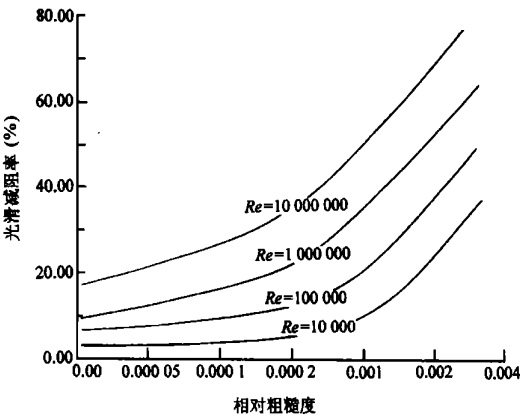


图 1 圆管光滑减阻率

率随雷诺数的增大而增大。这是由于随着雷诺数的增大,由于边界粗糙产生的临壁旋涡强度也增大,从而这部分流体能量散失值增大。而由于旋涡能量散失值增大,反映出光滑减阻率  $\Delta f$  值也增大。同时,在给定雷诺数的情况下,光滑减阻率也随相对粗糙率  $k/D$  值的增大而增大,这是由于  $k/D$  值愈大,由于边界突出产生的临底局部旋涡的几何尺寸也愈大。总之,雷诺数大小决定旋涡强度,而相对粗糙率则决定旋涡尺寸。

为弄清光滑减阻的机理,下面结合图 2 来分析一下粗糙度对阻力损失的影响(首先需要明确的是,管壁粗糙度为管壁粗糙凸出的平均高度)。

在工业管输流动中,管内流动几乎全部为湍流流动,管内壁凸出物附近的流体呈湍流状态,流体绕过凸出物时发生脱流现象,于是在凸出物的后面形

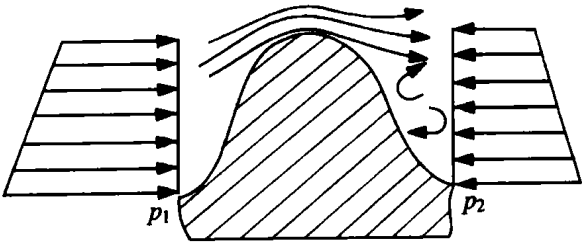


图 2 凸出物剖面压力分布图

成了涡流区。由于涡流区的存在,凸出物的前后产生较大压差,这个压差就是阻力损失,这个压差(阻力损失)的大小与涡流区的大小及涡流区涡流强度的大小有关,而涡流区的大小又与凸出物的凸起高度(即粗糙度)有关。理论与实践都证实:在其它条件不变时,凸出物的高度越大,涡流区就越大,从而产生的压差(阻力损失)也越大。光滑减阻的目的就是要减小凸出物的高度,减小涡流区的大小,从而达到减小凸出物前后压差的目的。输气管道采用内涂层就可大大减小管内壁凸出物(粗糙度)的高度,减小阻力损失,其机理如图 3、图 4 所示。

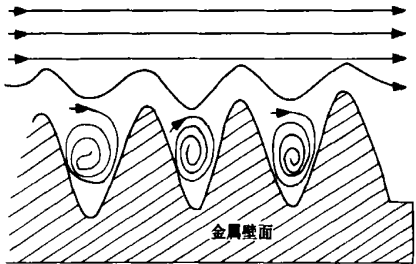


图 3 无涂层时涡流区示意图

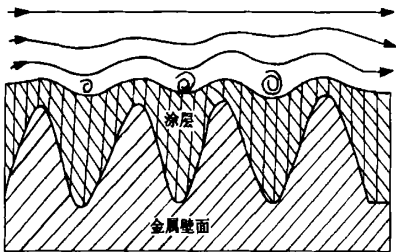


图 4 有涂层时涡流区示意图

从图 3、4 中可以看出:管道内壁未涂涂层时,其内壁凸起物的高度(粗糙度)大,在其后形成的涡流区也大,于是就产生了较大的阻力损失;而管道内壁涂有涂层时,由于涂层表面的光滑度较未涂涂层时要大得多,即其凸起物的高度(粗糙度)较未涂涂层时要小得多,也就是说,有涂层时在凸起物后形成的

涡流区也较未涂涂层时小得多,因此涂有涂层时的阻力损失也要小得多。但由于各种涂层材料不同,其凸起物的高度(粗糙度)也不尽相同,凸起物的高度(粗糙度)小的,阻力损失就小,由此也说明了试验中两种不同材料的涂层,其阻力损失不相同的根本原因。

由此可见,管内壁(边界)的光滑程度对阻力系数的影响是很大的,而本实验所用 AW—01 减阻涂层管能大大提高边界的光滑程度,从而达到减阻的目的。综上所述,在雷诺数或相对粗糙度增大时,其光滑减阻率也增大,由此也从理论上证实:光滑减阻是十分有效的。另外,本次试验是在小口径、低雷诺数下完成的,但从图 1 可以得知,低雷诺数下的减阻规律与高雷诺数下的减阻规律不仅是相同的,而且在高雷诺数下其减阻效果比低雷诺数时的更大。因此,可以得出结论:在低雷诺数下由试验得到的减阻规律完全可以递推到高雷诺数的情况,这也与前述理论分析与试验检验的结果是符合的。因此在试验、比较及理论分析的基础上对摩阻系数计算公式的确定(Colebrook 公式)是可行的,进而认为使用 Colebrook 公式计算大口径、高雷诺数的实际管线的摩阻系数也是适宜的。

实际输气管道摩阻系数的确定

由上述可知,用 Colebrook 公式计算摩阻系数基本上是可靠的。故对于“西气东输”实际输气管道( $\varnothing=1\,016\times16.2\text{ mm}$ ,  $Re=4.32\times10^7$ )的情况,采用不同涂层及使用无涂层普通工业管,我们建议其摩阻系数可由 Colebrook 公式计算确定,具体结果见表 8。

表 8  $\varnothing=1\,016\text{ mm}$  各种情况下的摩阻系数

| 名 称   | 绝对粗糙度    | 摩阻系数     |
|-------|----------|----------|
| 减阻涂层管 | $5.5\mu$ | 0.007 63 |
| 普通涂层管 | $6.7\mu$ | 0.007 94 |
| 普通工业管 | $45\mu$  | 0.010 32 |

由此可以得到采用不同涂层及使用普通工业管线输气时其摩阻系数的变化值。

1) AW—01 减阻涂层管与普通工业管相比,摩阻系数减少值为:

$$\frac{f_{\text{普}} - f_{\text{AW}}}{f_{\text{普}}} \times 100 \% = 26.07 \%$$

2) AW—01 减阻涂层管与普通环氧涂层管相

比,摩阻系数减少值为:

$$\frac{f_{\text{环}} - f_{\text{AW}}}{f_{\text{环}}} \times 100\% = 3.9\%$$

## 结 论

1) 本试验的摩阻系数是在雷诺数为  $0.7 \times 10^5 \sim 2.28 \times 10^5$  范围内通过实测取得的,实测结果与 Colebrook 公式计算的值基本一致。因此,在此范围内,试验证实了使用 Colebrook 公式是正确的;同时,通过前面的论述,我们知道低雷诺数下的光滑减阻规律与高雷诺数下的光滑减阻规律是相同的,而且高雷诺数下的减阻效果比低雷诺数时的更为明显。据此认为 Colebrook 公式也可用于极高雷诺数的情况。

2) 依据我国输气管道设计规范中的摩阻系数计算公式(Colebrook 公式)求得结果:对于实际输气管线( $\varnothing = 1\,016 \times 16.2 \text{ mm}$ ,  $Re = 4.32 \times 10^7$ ),采用 AW—01 减阻涂层管与无涂层普通工业管相比,其摩阻系数值减少 26.07%;采用 AW—01 减阻涂层管与普通环氧涂层管相比,其摩阻系数减少 3.9%。

对输气管道采用内涂层时的经济评价问题,国内外已发表不少文章,其中有关数据认为采用内涂层后,可增加 5%~20% 的天然气输量,其经济效益十分可观。通过试验研究我们认为:AW—01 减阻

涂层管减阻增输效果好,节能潜力大,值得广泛推广使用。

## 参 考 文 献

- 1 郑洽馥,鲁钟琪. 流体力学. 北京:机械工业出版社,1980:162~163
- 2 奚国仁. 紊流力学. 北京:高等教育出版社,1987:25~32
- 3 郑勇刚,王明浩等. 四川油田输气管线摩阻系数计算公式. 石油学报,1999;20(6):77~81
- 4 G T 叶姆采夫. 工程流体力学. 北京:高等教育出版社,1990:209
- 5 周亨达. 工程流体力学. 北京:冶金工业出版社,1983:116
- 6 沈善策. 输气管道采用内壁覆盖层时的工艺设计问题. 油气储运,2000;19(7):19~24
- 7 Sletfjerding Elling *et al.* Friction factor in gas pipelines in the North Sea. Gas Technology Symposium, Apr 3~5, 2000:459~467
- 8 Qu Liang, Huang Guibo, Chen Xiaoyu. On-site experimental study of intern anticorrosion coating performance of the  $H_2S$ -bearing gas pipeline in Sichuan gas fields. Tianranqi Gongye/Natural Gas Industry, 1999;19(2):95~98
- 9 张宗荣. 国内外管道内壁涂层技术综述. 油气储运,1985;(6):41

(收稿日期 2001-08-06 编辑 居维清)

## 文东油田半闭式、间歇式气举增产显著

文东油田属极复杂断块性油气藏,具有异常高温、高压、高油气比、高矿化度和埋藏深等特点。现共有气举井 110 口,其中日产液量在 30 吨以下的占 60%以上。经采用半闭式气举和柱塞气举工艺新技术,效果显著。

半闭式气举是通过下入封隔器,实现气举井半闭式管柱生产。它可以有效降低注入气对地层造成的回压,还可以避免洗井对气举阀造成伤害。2001 年共采用 18 井次,平均单井日增液 26 吨,日增油 12 吨,平均延长检阀周期 80 天以上。柱塞气举是一种特殊类型的间歇气举方式,是靠柱塞推动上部的液柱向上运动,防止气体窜流和减少液体的回落,提高气体举升效率,今年共应用 5 井次,平均单井日增液 18 吨,日增油 11 吨,增产效果显著。

陈敏 摘自《石油商报》

permeability can be tested by use of high-pressure stationary flow method under the formation conditions simulated. In testing process, the confined pressures demanded for the testing might be up to 30.0 ~ 60.0 MPa and pore pressures 5.0 ~ 15.0 MPa, and the permeabilities of less than  $10 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$  might be measured under such a high pressure. Meanwhile, the instantaneous pulse technique, a well-developed vital method of measuring the permeabilities of low-permeability rocks, was fully examined. Through contrast and analysis, it is found that the permeability value measured by the instantaneous pulse method is very close to that measured by the improved conventional permeability testing method. Because the instantaneous pulse method is based on unsteady-state theory and the high-pressure conventional testing on steady flow technique, the two methods may be mutually repairable to make up deficiencies. Through a great number of experiments, it is proved that the relative error of the permeability values measured by the two methods is very small, the difference between the both being less than 10%. It fully proves that the improved conventional permeability test device is of reasonableness.

**SUBJECT HEADINGS:** Stationary flow, Testing, Instantaneousness, Pulse, Permeability, Error

**Yang Mingsong** (Master), born in 1965, graduated in petroleum engineering at the Southwest petroleum Institute in 1985, received his master's degree in 1992 and won two ministerial and provincial prizes. Now he is mainly engaged in the research on oil and gas production. Add: Nanchong, Sichuan (637001), China Tel: (0817) 2643342

mined. The testing results proves that it is correct to adopt Colebrook formula as the Reynolds number is in the range of  $0.7 \times 10^5 \sim 2.28 \times 10^5$ . Through research, it is shown that the smoothing drag-reduction law at smaller Reynolds number is the same with that at larger Reynolds number; and the drag-reducing effect at larger Reynolds number is more obvious than that at smaller Reynolds number. Accordingly it is considered that the Colebrook formula may be also used for the largest Reynolds number. By taking an actual gas pipeline ( $\Phi = 1016 \times 16.2 \text{ mm}$ ,  $R_e = 4.32 \times 10^7$ ) as an example, in comparing the special drag-reducing internal coating pipeline with the common coating-free industrial pipeline, the friction resistance coefficient of the former is 26.07% less than that of the latter; and in comparing the one with the ordinary epoxy internal coating pipeline, the friction resistance coefficient of the former is 3.9% less than that of the latter. The drag-reducing effect of the special drag-reducing internal coating pipe used for the long-distance large-aperture gas pipeline is very good and its energy-saving potential is considerable, therefore it is worth while to widely popularize this technique.

**SUBJECT HEADINGS:** Natural gas pipeline, Long-distance pipeline, Internal coating, Coefficient of friction, Friction loss

**Lin Zhu** (engineer), born in 1970, graduated in applied chemistry at the Southwest Petroleum Institute in 1991 and published more than twenty articles. Now he is engaged in the research, development and popularization of the corrosion prevention coating materials of oil and gas field. Add: No. 40 Jintang High Way, Tanggu District, Tianjin (300451), China Tel: (022) 66310283

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE DRAG REDUCTION BY INTERNAL COATING IN LONG-DISTANCE NATURAL GAS PIPELINE

Lin Zhu, Zhang Liping and Qin Yanlong (Research Institute of Engineering and Technology, CNPC) and Zhai Jianjun (Beijing University). *NATURAL GAS IND.* v. 22, no. 1, pp. 75 ~ 79, 1/25/2002. (ISSN1000 - 0976; In Chinese)

**ABSTRACT:** In order to examine the effect of the drag-reducing internal coating on raising natural pipeline throughput, a laboratorial simulation test study was carried out for measuring the aerodynamical properties of drag-reducing internal coating pipe, ordinary epoxy internal coating pipe and common coating-free industrial pipe respectively. On the basis of this, their friction resistance coefficients and the effects of the drag-reducing coating applied in long-distance natural gas pipeline were deter-

## WATER JACKET HEATER OF OIL AND GAS FIELD

Gary H. Palmer, P. Wendland and Zhang Huayan (Maloney Industries Inc., Canada). *NATURAL GAS IND.* v. 22, no. 1, pp. 80 ~ 84, 1/25/2002. (ISSN1000 - 0976; In Chinese)

**ABSTRACT:** The water jacket heater is an oil & gas fired equipment widely applied to oil and gas field. Along with the oil and gas price rising steadily year after year and an increasingly strict demand for environmental protection, how to improve the existing fired equipment to reduce fuel consumption so as to protect the environment against pollution is followed with interest by the petroleum engineers day by day. Through introducing the basic factors and criteria which should be taken into account in designing the water jacket heater in oil and gas field, the methods of raising the thermal efficiency of the water jacket heater