

◀ 试井与开采 ▶

# 双金属复合管管流摩阻分析

王沫<sup>1</sup> 曾德智<sup>1,2</sup> 林元华<sup>1</sup> 卢亚峰<sup>1</sup> 施太和<sup>1</sup> 毕建伟<sup>3</sup>

(1. 西南石油大学 石油管柱力学与环境行为重点实验室, 四川 成都 610500; 2. 中国石油西南油气田分公司 天然气研究院, 四川 成都 610213; 3. 中国石化 天然气分公司, 北京 100011)

**摘要:**随着石油天然气勘探开发的发展,油气开采面临的腐蚀环境越来越恶劣,使石油管柱的腐蚀问题越来越突出,并直接影响到油气田勘探开发的经济效益。双金属复合管防腐性能可靠,材料成本较低,内径比目前使用的碳钢石油管内径小,其管流摩阻及与之相关的使用工艺性能可能发生改变。为此,对双金属复合管的管流摩阻问题进行了研究,并对其作为采气管和天然气输送管的相关工艺参数进行了分析计算。研究结果表明:在相同压降情况下,复合管输送量更大,输送距离更长;复合管内径的减小一般不会引起管流摩阻的增加,当内管厚度不大时,复合管的流动摩阻更小。双金属复合管不仅防腐性能可靠,而且水力摩阻小,是石油管防腐工程的极佳选择,值得推广应用。

**关键词:**油管;输气管道;管道腐蚀;摩擦

**中图分类号:**TE973    **文献标识码:**A    **文章编号:**1001-0890(2008)04-0071-04

石油天然气的勘探开发逐步走向深海和沙漠,油气开采面临的环境越来越恶劣,高含二氧化碳、硫化氢等的油气田相继出现,产液中腐蚀性物质含量较高而未经加工,使石油管道的腐蚀问题越来越突出,管道的日常维护费用特别高<sup>[1]</sup>。产液或气体中含有的有毒或污染环境的介质,还有可能导致重大安全事故和环境污染。目前油气管道的实用内防腐技术有添加缓蚀剂、使用内涂层和内衬管。使用耐蚀合金是石油管最为可靠的防腐技术措施,其中内衬复合管是在油田普遍使用的碳钢管内衬上一层耐蚀合金,形成双金属复合管。复合管的内径比目前使用的碳钢石油管内径小,这会引起管流摩阻的增加。另外,复合管内壁粗糙度比普通碳钢管小,其管流摩阻会减小。但其综合作用效果究竟如何?有必要对液压复合管的管流摩阻进行分析研究,以考察液压复合管在使用过程中对相关工艺的影响,笔者在此只考虑管内介质仅为天然气的情况。

## 1 采气用复合管的摩阻分析

### 1.1 复合管摩阻系数计算

流体在管内流动,往往使部分机械能转换为热能而造成不可逆的能量损失。在单相流动的情况下,不可逆损失主要是摩擦损失,包括由于流体粘滞

性产生的内部损失和管壁形成的外部损失。对于气井油管,管壁的相对粗糙度在  $10^{-6} \sim 10^{-2}$  范围内,管柱内气体流动的雷诺数在  $5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^8$  范围内,摩阻系数的计算可采用 Jain 显式公式<sup>[2]</sup>:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.14 - 2\lg\left(K_e + \frac{21.25}{Re^{0.9}}\right) \quad (1)$$

其中:

$$Re = 1.776 \times 10^{-2} \frac{q_{sc} \gamma_g}{d \mu_g} \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为流体在管中的摩阻系数,无因次;  $Re$  为雷诺数;  $q_{sc}$  为气体流量,  $m^3/d$ ;  $d$  为管内径,  $m$ ;  $\mu_g$  为气体粘度,  $mPa \cdot s$ ;  $\gamma_g$  为气体相对密度,无因次;  $K_e$  为绝对粗糙度与管子内径的比值,称为相对粗糙度,新油管内壁的绝对粗糙度推荐值为  $0.016 \text{ mm}$ <sup>[2]</sup>。

以重庆气矿高都 2 井为例对复合油管的工艺问题进行计算。该气井井深 3 501 m, 所用油管规格为  $\phi 73.0 \text{ mm} \times 5.51 \text{ mm}$ , 气井的地层原始压力为 30 MPa, 原始地层温度为 81.4 °C, 现在井口压力为 7.31 MPa, 井口温度 27 °C, 临界压力 4.6 MPa, 临界温度 205 K, 天然气相对密度 0.65, 气井的绝对无阻

收稿日期:2007-09-24; 改回日期:2008-02-19

作者简介:王沫(1984—),男,四川达州人,2006 年毕业于西南石油大学油气储运专业,油气井工程专业在读硕士研究生。

联系电话:(028)83034286

流量为  $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 气井配产  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。普通碳钢油管内壁的绝对粗糙度取  $0.016 \text{ mm}$ , 复合管内壁的绝对粗糙度取  $0.004 \text{ mm}$ 。复合管和普通碳钢油管摩阻系数的计算结果如图 1 所示。图 1 中, 复合管内管厚度为 0 即表示油管为普通碳钢管。

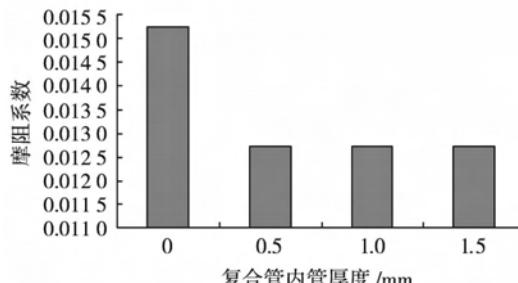


图 1 复合管与普通碳钢油管摩阻系数的对比

由图 1 可知, 复合管的摩阻系数均比普通碳钢油管低。当复合管的内管厚度在  $0.5 \sim 1.5 \text{ mm}$  时, 内管厚度对复合管摩阻系数的影响不大, 可在满足经济利益、可能的腐蚀余量和机械强度范围内选择合适的内衬厚度。

## 1.2 复合管对气井产量的敏感性分析

分析油管尺寸对气井产能的影响一般采用节点系统分析方法<sup>[3-4]</sup>。气井节点系统分析的基本思路是, 在气井生产系统中某部位设置节点将整个系统分离为两个相对独立的子系统, 以简化问题, 然后以压力和产量的变化为主线索, 把节点分隔的两部分联系起来, 以确定气井产量和油管尺寸等。

气井流入动态研究是进行气井节点系统分析的基础, 流入动态反映了气层向气井的供给能力, 流入动态曲线的形状与气藏的压力、渗透率、流体物性和含水率及完井状况等有关。流入动态曲线可由无因次 IPR 方程表示, 其表达式为<sup>[4]</sup>:

$$\left(\frac{p_{wf}}{p_r}\right)^2 = 1 - \alpha \frac{q}{q_{max}} - (1 - \alpha) \left(\frac{q}{q_{max}}\right)^2 \quad (3)$$

其中:

$$\alpha = \frac{\ln(r_d/r_w) + S}{\ln(r_d/r_w) + S + D_n q_{max}} \quad (4)$$

式中,  $\alpha$  为气井 IPR 特征参数, 它表示在所有非理想流动条件下的最大无阻(敞喷条件下)总表皮系数中, 与产量无关的表皮系数所占的份额;  $r_d$  为有效驱泄半径,  $\text{m}$ ;  $r_w$  为井眼半径,  $\text{m}$ ;  $S$  为表皮系数;  $D_n$  为非达西系数,  $10^{-4} \text{ d/m}^3$ ;  $p_{wf}$  为井底流压,  $\text{MPa}$ ;  $q$  为产气量,  $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $q_{max}$  为绝对无阻流量,  $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $p_r$  为目前平均地层压力,  $\text{MPa}$ 。

气井流出动态曲线反映了气体从井底沿井筒流

到井口的流动能力, 流出动态曲线的形状与井底流动压力、井口压力、油管组合和直径等有关。流出动态曲线的表达式为<sup>[2]</sup>:

$$p_{wf} =$$

$$\sqrt{p_{wh}^2 e^{2s} + 1.324 \times 10^{-18} \lambda (q_{sc} \bar{T} \bar{Z})^2 (e^{2s} - 1) / d^5} \quad (5)$$

其中:

$$s = \frac{0.034 \cdot 18 \gamma_g H}{\bar{T} \bar{Z}} \quad (6)$$

$$\bar{Z} = 1 - \frac{3.52 \bar{p}_r}{10^{0.9813 \bar{T}_r}} + \frac{0.274 \bar{p}_r^2}{10^{0.8157 \bar{T}_r}} \quad (7)$$

式中,  $p_{wh}$  为气井井口流压,  $\text{MPa}$ ;  $s$  为无因次指数;  $H$  为井深(油管的长度),  $\text{m}$ ;  $\bar{Z}$  为井筒或(井段)平均偏差因子;  $\bar{T}$  为井筒或(井段)平均温度,  $\text{K}$ ;  $\bar{p}_r$  为平均对比压力, 其值为气体的平均绝对工作压力 0.5 ( $p_{wh} + p_{wf}$ ) 与临界压力  $p_c$  之比;  $\bar{T}_r$  为平均对比温度, 其值为气体的平均绝对工作温度  $\bar{T}$  与临界温度  $T_c$  之比。

对上述气井进行节点分析, 可得同一规格油管不同内管厚度的流出曲线(如图 2 所示)。由图 2 可知, 在气井产量相对较小的情况下, 复合管和普通油管对气井产量的影响几乎不存在差别; 但是随着气井产量的增加, 复合管的优势越来越明显, 在同一井底流动压力下, 复合管可以增加气井的流动效率, 提高气井产量, 随着复合管内管厚度的增加, 它与普通油管的差距也越来越小。

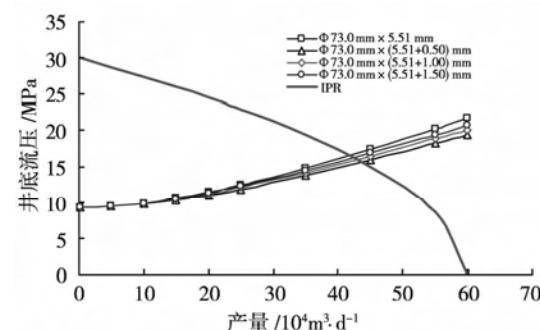


图 2 气井节点分析曲线

## 2 输气用复合管线的摩阻分析

### 2.1 输气用复合管摩阻系数计算

不同工况输送管的摩阻可按不同公式计算, 笔者按我国输气管道工程设计规范对水力摩阻系数进行了计算, 其计算式为<sup>[5]</sup>:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.01 \lg \left( \frac{K'_e}{3.71d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (8)$$

式中,  $K'_e$  为钢管内壁绝对粗糙度, mm。

考虑复合管内管的厚度和内壁的粗糙度时, 复合管水力摩阻系数计算式为:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_0}} = -2.01 \lg \left[ \frac{K_{e0}}{3.71(d-2t)} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda_0}} \right] \quad (9)$$

式中,  $\lambda_0$  为流体在复合管中流动时的摩阻系数, 无因次;  $K_{e0}$  为复合管内壁相对粗糙度, mm;  $t$  为复合管内管壁厚, mm。

按输送管粗糙度的取值范围<sup>[6-9]</sup>, 普通碳钢输送管内壁绝对粗糙度取 0.04 mm, 复合管内壁绝对粗糙度取 0.004 mm。其余参数为: 管道输量 50 m<sup>3</sup>/s (在实际应用中, 不同规格的管子有不同的经济输量, 为便于比较, 此处取相同的输量); 天然气相对密度为 0.58; 输送压力为 10 MPa; 工作温度为 40 °C。输送管内壁绝对粗糙度对摩阻系数的影响计算结果如图 3 所示。

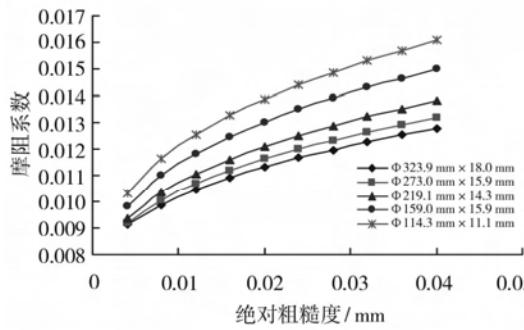


图 3 内壁绝粗糙度对输送管摩阻系数的影响

从图 3 可看出, 输送管内壁的绝对粗糙度对输送管摩阻影响较大。当管道内壁不采取防腐措施时, 管道内壁粗糙度随工作时间的增加而增大, 采取防腐措施后管壁粗糙度基本不变<sup>[9]</sup>。因此, 复合管在使用期间的平均摩阻系数将比普通碳钢管大大减小。

## 2.2 复合管对输气能力的敏感性分析

平坦地区输气管道的体积流量计算式为<sup>[10]</sup>:

$$Q = C_g \sqrt{\frac{(p_q - p_z) d^5}{\lambda Z_g \gamma_g T L}} \quad (10)$$

地形起伏地区输气管道的体积流量计算式为<sup>[10]</sup>:

$$Q = C_g \sqrt{\frac{[p_q^2 - p_z^2(1 + a\Delta h)]d^5}{\lambda Z_g \gamma_g T L \left(1 + \frac{a}{2L}\right) \sum_{i=1}^n (h_i + h_{i-1}) L_i}} \quad (11)$$

其中:

$$a = \frac{2g\gamma_g}{R_a Z_g T} \quad (12)$$

式中,  $Q$  为天然气在标准状况下 ( $p_0 = 0.101325$  MPa,  $T_0 = 293$  K) 的体积流量, m<sup>3</sup>/s;  $p_q$ 、 $p_z$  分别为输气管道起点和终点压力, MPa;  $C_g$  为常数, 为  $0.384 \times 10^5$  m<sup>2</sup> · s · K<sup>1/2</sup>/kg;  $L$  为输气管道长度, m;  $Z_g$  为气体压缩因子, 无因次;  $T$  为输气管道内气体的平均温度, K;  $R_a$  为空气的气体常数, 在标准状况下,  $R_a = 287.1$  m<sup>2</sup>/(s<sup>2</sup> · K);  $\Delta h$  为计算段起点与终点高程差, m;  $h_i$ 、 $h_{i-1}$  分别表示各计算段起点、终点高程, m;  $L_i$  为各计算管段长度, m;  $n$  为计算段分段数;  $g$  为重力加速度, 9.81 m/s<sup>2</sup>。

若记  $Q_0$  为复合管的输送量, 在其它条件不变的情况下, 由式(10)和式(11)可得复合管的输送量  $Q_0$  和普通碳钢输送管的输送量  $Q$  之比为:

$$\frac{Q_0}{Q} = \sqrt{\frac{(d-2t)^5 \lambda}{d^5 \lambda_0}} \quad (13)$$

由式(13)可计算出复合管内管厚度对管道输送量的影响程度, 结果如图 4 所示。

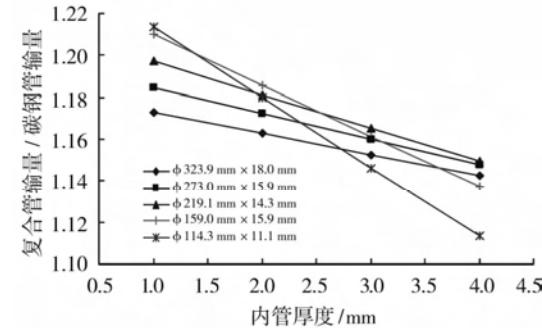


图 4 复合管内管壁厚对输送量的影响

由图 4 可知, 尽管复合管内径减小了, 但其输送能力却比普通碳钢管高 11%~21%。随着复合管内管壁厚的增加, 管道输送量减小, 当管道直径较小时, 输送量减小更明显。

若记  $L_0$  为复合管的输送距离, 当其他条件不变时, 由式(10)和式(11)可得复合管的输送距离  $L_0$  和普通碳钢输送管的输送距离  $L$  之比为:

$$\frac{L_0}{L} = \frac{(d-2t)^5 \lambda}{d^5 \lambda_0} \quad (14)$$

由式(14)和式(13)的计算结果可知, 输送管采用复合管后其输送距离可以提高 23%~46%。

## 3 结 论

1) 对采气用复合管和普通碳钢油管的管流摩阻进行了分析研究。研究结果表明, 复合管内径的减小一般不会引起管流摩阻的增加。当内管厚度不大时, 复合管的流动摩阻更小, 但随着复合管内管厚度

的增加,复合管的管流摩阻可能等于或大于碳钢油管的摩阻。

2)对复合管和普通碳钢输送管的管流摩阻进行了比较分析。结果表明,复合管摩阻比普通碳钢输送管摩阻小,在相同压降情况下,复合管输送量更大、输送距离更长。

3)利用双金属复合管防腐相对于加注缓蚀剂有“一劳永逸”的效果,而且水力摩阻小,是石油防腐工程的极佳选择,值得推广应用。

## 参 考 文 献

- [1] 刘伟,蒲晓林,白小东,等.油田硫化氢腐蚀机理及防护的研究现状及进展[J].石油钻探技术,2008,36(1):83-86.
- [2] 李士伦.天然气工程[M].北京:石油工业出版社,2000.
- [3] 王承陆,胡辉,陈艳辉.洛带气田采气管柱优选应用研究[J].钻采工艺,2004,27(1):32-34.

- [4] 雷振中.气井无因次 IPR 关系式的推导及图版绘制[J].钻采工艺,1996,19(1):33-35.
- [5] 油气田及管道建设设计专业标准化委员会.GB50251—2003 输气管道工程设计规范[S].北京:中国计划出版社,2003.
- [6] Ben Aaante, Eng P. Justification for internal coating of natural gas pipeline: OMAE '95: 14th International Conference on offshore Mechanics & Arctic Engineering June 18-22, 1995[C]. Copenhagen, Denmark.
- [7] Pipeline & Gas Journal Staff. Internal pipe coating are wise investment[J]. Pipeline & Gas Journal, 1993, 220(3): 67-69.
- [8] 王喜安,刘雯,张世斌,等.国内外天然气管道绝对当量粗糙度的设计取值[J].油气储运,2000,19(10):8-10.
- [9] 苏欣,袁宗明,范小霞.天然气管道内涂层工艺计算[J].天然气工业,2005,25(10):113-116.
- [10] 李长俊.天然气管道输送[M].北京:石油工业出版社,2000.

[审稿 李子丰]

## Analysis of Pressure Drop of Flow in Dual-Metal Pipe

Wang Mo<sup>1</sup> Zeng Dezhi<sup>1,2</sup> Lin Yuanhua<sup>1</sup> Lu Yafeng<sup>1</sup> Shi Taihe<sup>1</sup> Bi Jianwei<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Mechanical and Environmental Behavior of Tubular Goods, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China; 2. Natural Gas Technology Research Institute, Southwest Branch Oil and Gas Field, Chengdu, Sichuan, 610213, China; 3. Natrual Gas Company, Sinopec, Beijing, 100011, China)

**Abstract:** With the development of exploration and exploitation of oil and gas, the corrosive environment faced is worsening, making pipe corrosion an increasingly striking problem and directly affecting the economic efficiency of the oil and gas field. Dual metal pipe, a new reliable technology for corrosion resistance, is a low cost anti-corrosion. Its inner diameter is smaller than that of carbon steel pipe commonly used. Therefore, the pipe flow friction and the performance associated may be different. Studies on the pipe flow friction of dual metal pipe were conducted. The related technical parameters of dual metal pipe for tubing and pipeline were calculated. The results show that the dual metal pipe's transmission distance is longer and its transmission capacity is bigger under same pressure drop; the decrease of the dual metal pipe's inner diameter generally will not increase in the flow friction; the flow friction is even smaller with smaller pipe thickness. Dual metal pipe's corrosion resistance is reliable along with smaller hydraulic friction. It is good for anti-corrosion and is worthy of application.

**Key words:** tubing; gas pipeline; pipeline corrosion; friction

## 中原油田文 51-189 井重复压裂获成功

文 51-189 井在 2007 年 2 月压裂后增油效果明显,但随着生产时间的延长,油气井生产能力不断下降,需要重复压裂以提高产能。重复压裂的难点在于该次压裂的规模既要大于上次压裂,又要防止压裂水层。技术人员通过重复压裂模拟计算,优选施工参数,最后确定了卡封分层、控制裂缝长度的压裂方案,同时考虑到压裂层分散,提出采用支撑剂沉降技术暂堵原有的大孔隙裂缝,以提高前置液的造缝能力。

该井在压裂加砂的过程中,由于压力上升幅度较大,为防止出现砂堵,少加砂 1 m<sup>3</sup>。停止加砂后进行顶替,携砂液全部顶入地层,压裂圆满成功。目前,该井采用 φ3 mm 油嘴自喷生产,日产液 27.1 t,日产油 9.3 t,含水仍有下降趋势。