

天然气管道内涂层工艺计算^{*}

苏欣 袁宗明 范小霞

(西南石油学院)

苏欣等.天然气管道内涂层工艺计算.天然气工业,2005;25(10):113~116

摘要 简介了天然气管道输气量、压降以及水力摩阻系数计算公式,综述了部分国家在手册与文献中提出的管子内表面绝对粗糙度数值;分别从输量、输送距离、管径和压缩机功率这4个方面对有无内涂层的天然气管道进行了比较计算。结果显示:涂敷了内涂层的管道输量将增加24%;压缩机站间距平均增长32.87%;管径也将减小;同时输气消耗功率降低15%~20%。因此,天然气管道涂敷内涂层将会改善和提高流动特性、减少增压站数量、延长清管周期、延长管道使用寿命、降低输送动力消耗和泵输成本,从而取得良好的经济效益。

关键词 输气管道 内涂层 水力 摩阻系数 管内壁 粗糙度 计算 输气量 管径 压缩机 功率

管道内涂层技术的优点虽已被广泛认可,但还需进行定量分析,以期更直观的表现内涂层对于管道输气量、输气压力等的影响。在此,主要对于干线输气管道流态和摩阻系数的确定进行了分析,并简单说明了内涂层管道的工艺计算。

一、输气量^[1]

1. 高程差小于200 m时输量公式

对于输气管道的任意两点间高程差小于200 m,稳态输送条件下,流量为:

$$Q = C \sqrt{\frac{(p_1^2 - p_2^2) D^5}{\lambda Z \Delta T L}} \quad (1)$$

式中: Q 表示天然气在标准状况下的体积流量, m^3/s ; p_1, p_2 分别表示计算管段起点、终点压力, MPa ; L 表示计算管段的长度, m ; D 表示管道内径, m ; T 表示管道中天然气的平均温度, K ; Δ 表示天然气相对密度; C 表示常数; λ 表示水力摩阻系数。

2. 考虑地形起伏时的输气量

$$Q = C \left\{ \frac{[p_1^2 - p_2^2 (1 + \alpha \Delta h)] D^5}{\lambda Z T \Delta L \left[1 + \frac{\alpha}{2L} \sum_{i=1}^n (h_i + h_{i-1}) L_i \right]} \right\}^{0.5} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{2g\Delta}{R_a Z T}$$

式中: R_a 表示空气气体常数; Δh 表示计算段起点与终点高程差, m ; g 表示重力加速度, 9.81 m/s^2 ; h_i, h_{i-1} 分别表示各计算段起点、终点高程, m ; n 表示计算段分段数。

从上述可知,问题的关键在于正确确定水力摩阻系数 λ 。

二、水力摩阻系数的确定^[1]

由于大多数干线输气管道都处于阻力平方区,因此,在此介绍常用推荐使用的阻力平方区公式。

1. 威莫斯(Weymouth)公式

$$\lambda = \frac{0.009407}{\sqrt[3]{D}} \quad (3)$$

该公式适用于管径小,输量不大,净化程度较差的矿区集气管网。

2. 潘汉德尔(Panhandle)A式

$$\lambda = \frac{1}{11.81 Re^{0.1461}} \quad (4)$$

该公式适用于管径从168.3 mm到610 mm,雷诺数 Re 范围从 5×10^6 到 14×10^6 的天然气管道。

3. 潘汉德尔(Panhandle)B式

$$\lambda = \frac{1}{68.03 Re^{0.0392}} \quad (5)$$

该公式适用于管径大于610 mm的输气管道。

* 本文受到四川省重点学科建设项目(SZD0416)的资助。

作者简介: 苏欣, 1982年生; 2004年本科毕业于西南石油学院油气储运专业, 现在西南石油学院攻读油气储运专业硕士学位。地址: (610500) 四川省成都市新都区西南石油学院硕士2004级2班。电话: (028) 67302441, 13880716387。E-mail: sx124@126.com

4.前苏联天然气研究所早期公式

$$\lambda = \frac{0.383}{\left(\frac{D}{2K}\right)^{0.4}} \quad (6)$$

5.前苏联天然气研究所近期公式

$$\lambda = \frac{0.03817}{D^{0.2}} \quad (7)$$

6.柯列勃洛公式

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{K}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}}\right) \quad (8)$$

根据各流态的特征可知,如果计算管道中气体的流态没有处于完全紊流状态,那么,加内涂层后就不经济。相反,如果气体流态处于完全紊流状态下,那么就要确定投资、运行费用和涂层费用之间的关系,进行方案对比,确定加内涂层的经济性。

三、管内壁粗糙度的取值^[2,3]

(1)俄罗斯和美国有关绝对当量粗糙度取值见表 1、表 2。

表 1 俄罗斯气体管道绝对粗糙度的估计值表

种 类	管子的状况	绝对粗糙度(平均值)
无缝钢管	新而清洁	10~20(14) μm
无缝钢管	使用数年后	15~30(20) μm
焊接钢管	新而清洁	30~100(50) μm
焊接钢管	轻微腐蚀,经处理	100~200(150) μm
焊接钢管	中等锈蚀	300~700(500) μm
焊接钢管	旧而生锈	800~1500(1000) μm
焊接钢管	严重生锈	2000~4000(3000) μm

表 2 美国气体管道绝对粗糙度的估计值表(1990 年)

管道条件	粗糙度(μm)
新的干净裸管	12.7~19
在大气中暴露 6 个月后	25.4~31.8
在大气中暴露 12 个月后	31.8
在大气中暴露 24 个月后	44.4~50.8
喷砂处理过的钢管	7.6~12.7
用清管器清过的钢管	5.1~7.6
用环氧或丙烯酸内涂后的钢管	7.6~12.7

(2)表 3 为 1975 年第一届国际管子内外保护会议资料中介绍的绝对当量粗糙度取值范围。

(3)法国手册

清除后的裸管:K 取 20~50 μm

未清除的裸管:K 取 30~50 μm

有内覆盖层:K 取 5~10 μm

表 3 涂敷和未涂敷管道的绝对粗糙度取值表

管道条件	粗糙度(μm)
新管(涂敷沥青后)	10~20
新管裸管	40~100
沥青较松散	80~100
轻微结壳	100~200
用过的管子清扫后	100~200
全部锈蚀	150~400
中度结壳	500~1000
重度结壳	1000~3000
氧化橡胶涂层	7
双组分聚氨酯	1

(4)加拿大努发公司

裸管:K 取 19.1 μm

大气中暴露 12 个月:K 取 36 μm

有内覆盖层:K 取 6.4 μm

根据上述数据和现场实际对于裸管粗糙度取值 30~45 μm 应是合理的,而施加内涂层后管路的粗糙度明显小得多,一般在 7~10 μm 内取值。

四、内涂层管道的工艺计算^[4~10]

1.内覆盖层与输送量的关系

在工作压力、输送距离及管道其他条件不变的情况下,有、无内覆盖层管道与输量的关系如下。

将式(3)代入式(1)可得:

$$\frac{Q_0}{Q} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{0.5} \quad (9)$$

将式(4)代入式(1)可得:

$$\frac{Q_0}{Q} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{0.5394} \quad (10)$$

将式(5)代入式(1)可得:

$$\frac{Q_0}{Q} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{0.51} \quad (11)$$

其中:带 0 角标的表示加内涂层,没带角标的表示不加内涂层。可以看出,无论用何种公式得出的流量比都有 $\lambda_0 < \lambda$,所以 $Q_0 > Q$ 。

据有关文献报道当管内表面粗糙度减小时,管内摩阻将降低。对于敷设前内表面粗糙度为 45 μm 的钢管,当粗糙度减少 90%,摩阻系数将减少 33%,输量提高 24%。

2.内覆盖层与输送距离的关系

在输量、工作压力及其他因素不变的情况下,由式(1)可得:

$$\frac{L_0}{L} = \frac{\lambda}{\lambda_0} \quad (12)$$

同样因为 $\lambda < \lambda_0$, 故 $L_0 > L$ 。随着输送距离的增加, 据有关资料统计, 增压站站间距平均拉长32.87%。这就意味着可以减少增压站的数量, 据国外资料统计, 增压站数量可以减少1/5。

3. 内覆盖层与管径的关系

在流量和压力不变的情况下, 有、无内覆盖层管道的管径比分别为:

威莫斯方程:

$$\frac{D_0}{D} = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{0.1875} \quad (13)$$

潘汉德尔 A 式:

$$\frac{D_0}{D} = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{0.2059} \quad (14)$$

潘汉德尔 B 式:

$$\frac{D_0}{D} = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{0.226} \quad (15)$$

由此可知, 由于 $\lambda < \lambda_0$, 所以 $D_0 < D$ 。这样减小了管径, 节省了管材投资费用。但由于不能使管径减小一个等级, 故此优点很少被利用。

4. 内覆盖层与压缩机功率的关系

输气管道输气成本的重要部分是压气机的动力消耗费用, 动力消耗根据压气机功率计算。依据《输气管道工程设计规范》(GB50251-2003) 压气站宜选用离心式压缩机, 在站压较高、输量较小时宜选往复复式压缩机。

(1) 离心式压缩机

$$N = 9.807 \times 10^{-3} q_g \frac{K}{K-1} R Z T_1 \left(\epsilon^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right) \frac{1}{\eta} \quad (16)$$

式中: N 表示压缩机轴功率, kW; T_1 表示压缩机进口气体温度, K; R 表示气体常数; Z 表示气体平均压缩系数, $Z = \frac{Z_1 + Z_2}{2}$; η 表示压缩机效率; q_g 表示天然

气质量流量, kg/s; K 表示气体比热比, $K = \frac{C_p}{C_v}$, 其中 C_p 表示定压比热, C_v 表示定容比热; ϵ 表示压比, $\epsilon = \frac{p_1}{p_2}$ 。

(2) 往复式压缩机

$$N = 16.745 p_1 q_g \frac{K}{K-1} \left(\epsilon^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right) \frac{Z_1 + Z_2}{2 Z_1} \times \frac{1}{\eta} \quad (17)$$

式中: p_1 表示压缩机进气压力, MPa; q_g 表示进气条件下压缩机排量, $m^3/\min$; Z_1 、 Z_2 分别表示压缩机进、排气条件下的气体压缩系数; 其余参数同上式。

现以离心式压缩机功率计算式(16)为例分析内覆盖层对功率的影响。

由管道流量式(1)可得平原地带管道压力与摩擦系数的关系式:

$$\frac{p_1^2 - (p_2)_0^2}{p_1^2 - p_2^2} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (18)$$

将式(20)左端分子分母同时除以 p_1 得:

$$\frac{1 - \frac{1}{\epsilon^2}}{1 - \epsilon^2} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (19)$$

将式(21)整理得有内覆盖层管的压比:

$$\epsilon = \epsilon \sqrt{\frac{\lambda}{\epsilon^2 (\lambda - \lambda_0) + \lambda_0}} \quad (20)$$

对地形起伏较大的地带, 从式(5)可得:

$$\frac{p_1^2 - (p_2)_0^2 C}{p_1^2 - p_2^2 C} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (21)$$

其中: $C = 1 + \alpha \Delta S$

同理可得有内覆盖层管道的压比为:

$$\epsilon = \epsilon \sqrt{\frac{C \lambda}{\epsilon^2 (\lambda - \lambda_0) + C \lambda_0}} \quad (22)$$

由式(16)可得出有无内覆盖层管道压气机轴功率之比:

平原地带:

$$\frac{N_0}{N} = \frac{\epsilon^{\frac{K-1}{K}} - 1}{\epsilon^{\frac{K-1}{K}} - 1} = \frac{\epsilon^{\frac{K-1}{K}} \left[\frac{\lambda}{\epsilon^2 (\lambda - \lambda_0) + \lambda_0} \right]^{\frac{K-1}{2K}} - 1}{\epsilon^{\frac{K-1}{K}} - 1} \quad (23)$$

地形起伏较大地带:

$$\frac{N_0}{N} = \frac{\epsilon^{\frac{K-1}{K}} - 1}{\epsilon^{\frac{K-1}{K}} - 1} = \frac{\epsilon^{\frac{K-1}{K}} \left[\frac{C \lambda}{\epsilon^2 (\lambda - \lambda_0) + C \lambda_0} \right]^{\frac{K-1}{2K}} - 1}{\epsilon^{\frac{K-1}{K}} - 1} \quad (24)$$

$$C = 1 + \alpha \Delta S$$

同理可推出往复压缩机有无内覆盖层的管道压气机轴功率之比。据国外资料报道, 使用内涂层后, 输气功率消耗可降低15%~20%。

五、结 论

综上可明显看出, 对完全紊流的管道采用内涂层有以下优点^[4~9]: ①改善和提高流动特性; ②减少增压站的数量; ③延长清管周期; ④延长管道使用寿命; ⑤降低输送动力消耗和泵输成本。

管道采用内涂层具有明显良好的经济效益, 国外已经广泛采用此技术, 并且得到了良好的效益, 我国应尽快掌握管道内涂层技术, 这将有利于我国天然气工业的发展。

参 考 文 献

- 1 李长俊.天然气管道输送.北京:石油工业出版社,2000
- 2 刘广文等.天然气管道内涂层减阻技术.北京:石油工业出版社,2001
- 3 胡士信等.天然气管道减阻内涂层技术.北京:化学工业出版社,2003
- 4 权忠兴.研究与应用输气管道内壁涂层技术是明智之举.油气储运,2000;19(9)
- 5 葛国防.管道内涂层经济可行性分析.油气储运,2003;22(2)
- 6 焦如义等.天然气长输管道内涂层应用技术研究.油气储运,2000;19(11)
- 7 Raymond H Crowe. Internal coating of gas pipeline. Oil & Gas Journal, 1959;(4)
- 8 Ben Aaante, Eng P. Justification for internal coating of natural gas pipeline. OMAE, Volume V, Pipeline Technology, ASME, 1995
- 9 Staff. Internal pipe coating are wise investment. Pipeline Gas J,1992;200(3)
- 10 GB50251—200:输气管道工程设计规范.北京:中国计划出版社,2003

(修改回稿日期 2005-08-22 编辑 居维清)