

摩阻系数方程对比研究

苑伟民

中国石化天然气分公司广西液化天然气工程项目部, 广西 北海 536000

摘 要:重点介绍了 GERG(Groupe Européen de Recherches Gazières)公司提出的 GERG 摩阻系数方程,将该摩阻系数方程与 Weymouth 方程、Zegarola 方程、经典的 Colebrook-White 摩阻系数方程应用实际运行数据计算,经过对比分析得出:Weymouth 方程适用于管壁粗糙度 k 为 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 的管道;Zegarola 方程适用于从光滑管道粗糙管流态剧烈变化的摩阻系数计算;在进行当量粗糙度反算时,建议使用 Colebrook-White 方程,避免出现不合理的数值;当 GERG 摩阻系数方程中的可调节参数 $n=1$ 时与 Colebrook-White 摩阻系数方程计算结果接近;当 GERG 摩阻系数方程中的可调节参数 $n \geq 9$ 时,摩阻系数计算结果趋于稳定; n 值反映了流态的变化,其数值的设定与反映流态的雷诺数一致时结果准确。

关键词:摩阻系数;Weymouth 方程;Zegarola 方程;Colebrook-White 方程;GERG 方程;对比分析

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2014.06.005

0 前言

摩阻系数是用来描述固体表面和流体之间由于摩擦而产生的能量损失的经验参数。在输气管道中,管壁摩擦力是造成压力降的主导因素,摩阻系数是决定管道输气能力的一个关键参数。针对 Weymouth、Zegarola、Colebrook-White、GERG 这 4 个摩阻系数方程进行实例计算,进一步分析方程的特点、适用范围及其相互关系。

1 Weymouth 方程

$$\lambda = \frac{0.009407}{\sqrt[3]{D}} \quad (1)$$

式中: λ 为 Darcy-Weisban 摩阻系数,无量纲; D 为管道内径,m。

Weymouth 方程取管壁粗糙度 $k=0.0508 \text{ mm}$ (美国取 $k=0.02 \text{ mm}$,苏联取 $k=0.03 \text{ mm}$),该方程适用于管径小、输量不大、净化程度较差的矿区集气管网^[1]。

2 Zegarola 方程

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1.884 \cdot \log_{10} \frac{1.499}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \quad (2)$$

式中: λ 为 Darcy-Weisban 摩阻系数,无量纲; Re 为雷诺数,无量纲^[2]。

该式适用于 $3.2 \times 10^4 \leq Re \leq 3.5 \times 10^7$ 。

3 Colebrook-White 方程

在计算摩阻系数的方程中,Colebrook-White 方程(简称 CW 方程)最常用,是一个经验方程^[3]。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{k/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right) \quad (3)$$

式中: λ 为 Darcy-Weisban 摩阻系数,无量纲; k 为管道内壁粗糙度,m; D 为管道内径,m; Re 为雷诺数,无量纲。

4 GERG 方程

Colebrook-White 方程并不是适用于所有情况的准确计算摩阻系数的方程。Langelandsvik LI 等人^[4]在对挪威大陆架(Norwegian Continental Shelf)管道实验的结果得出摩阻对输量计算的影响,当流速较低时候,实验输量比理论计算的输量大,因为实际摩阻系数比 Colebrook-White 方程预测的小,实际摩阻系数偏离了 Colebrook-White 方程预测的曲线。

2002 年,Dr John Piggott, Norman Revell 和 Dr Thomas Kurschat 研究小组在 Groupe Europeen de Recherches Gazieres 赞助下^[3-4],提出了 GERG 方程。

1/√λ = -2/n log10 [(k/D)^n + (1.499 / (f·Re·√λ))^0.942·n·f] (4)

式中: f=(1/√λ)_f / (1/√λ)_f=1 ;λ 为 Darcy-Weisban 摩阻系数,无量纲;k 为管道内壁粗糙度,m;D 为管道内径,m;f 为阻力因子(等同于输送效率),无量纲;n 为幂指数,描述从光滑管到粗糙管转变的变化剧烈程度;Re 为雷诺数,无量纲。

GERG 方程有以下特点:

- a) 是使用在役管道的最新实验数据对方程进行拟合所得。
- b) 对于完全紊流区(阻力平方区),雷诺数非常大时,该方程与 Colebrook-White 方程等同。
- c) 对于水力光滑区(粗糙度 k=0),f=1,方程退化为 Zagarola 等人^[2,5]提出的传输系数定律,即式(2)。该定律基于 3.2×10^4<Re<3.5×10^7 的实验数据,这些数据来源于普林斯顿大学在 1998 年所做实验。对于水力粗糙管,当 f=1 时,GERG 方程同样退化为 Zagarola 方程,即式(2)。
- d) GERG 方程中 k=0 可以由 Zagarola 方程推导(将 √λ 替换为 f·√λ)。

5 摩阻系数方程的对比

5.1 反算当量粗糙度

5.1.1 计算实例

使用挪威天然气长输管道的运行数据进行分析对比,根据输送的实际压力、温度、流量,使用 CW、GERG 摩阻系数方程,反算整个管道的当量粗糙度,通过对比摩阻系数和当量粗糙度来讨论摩阻系数方程的适用性,

表 1 每根管道的实际运行数据

管道编号	管道长度 L/km	起点压力 P1/MPa	终点压力 P2/MPa	流量 Q0/10^6 (Sm^3·d^-1)	相对分子质量 Mw / (kg·kmol^-1)	管径 D/m	是否有内涂层防护
A	812.4	10.842	8.559	22.33	18.84	0.966 4	是
B	303.5	16.626	14.559	45.15	17.31	0.966 4	是
C	619	10.797	9.416	20.15	18.87	0.966 4	是
D	48.5	6.522	6.364	20.15	18.87	1.034	是
E	619	12.985	8.68	38.06	18.07	0.966 4	是
F	48.5	7.203	6.745	38.06	18.07	1.034	是
G	227	13.63	11.21	18.5	18.6	0.669 8	否
H	812.8	14.67	9.55	38.5	18.52	0.966 4	是

由于 Weymouth 方程只与管径有关,在此不作计算,同样 Zegarola 方程只与雷诺数有关,无法计算当量粗糙度。每根管道的实际运行数据见表 1,每根管道内输送的天然气组分见表 2,计算的管道平均数据见表 3,计算的雷诺数见表 4。

在反算摩阻系数时假设管道为水平,气体温度和压缩系数为常数,采用 Tian 和 Adewumi 在 1994 年提出的方程进行计算,即式(5)。

采用表 3 中的平均数值进行雷诺数、摩阻系数和当

表 2 每根管道输送的天然气组分

组分	管道编号							
	A	B	C	D	E	F	G	H
C1	83.50	93.13	82.85	82.85	88.282	88.282	83.37	87.42
C2	11.62	3.746	13.12	13.12	7.895	7.895	14.0	6.97
C3	2.43	0.615	1.44	1.44	1.264	1.264	0.83	2.13
iC4	0.17	0.338	0.097	0.097	0.215	0.215	0.03	0.30
nC4	0.23	0.065	0.19	0.19	0.127	0.127	0.05	0.25
iC5	0.027	0.065	0.023	0.023	0.037	0.037	0.01	0.06
nC5	0.022	0.015	0.02	0.02	0.019	0.019	0.01	0.03
C6+	0.008	0.108	0.023	0.023	0.071	0.071	-	0.10
N2	1.43	1.574	1.28	1.28	1.544	1.544	0.92	1.37
CO2	0.56	0.331	0.95	0.95	0.541	0.541	0.75	1.38
摩尔质量 M	18.84	17.31	18.87	18.87	18.07	18.07	18.60	18.52

表 3 管道计算数据(整个管道的平均值)

管道编号	P/MPa	T/K	ρ/(kg·m^-3)	m/(kg·s^-1)	相对密度 γ	μ/(μ Pa·s)	压缩因子 Z
A	9.70	280.15	109.84	205.5	0.652	14.7	0.72
B	15.593	280.15	158.66	383.5	0.598	19.2	0.73
C	10.107	281.15	114.32	185.4	0.651	15.1	0.71
D	6.443	283.15	63.62	185.4	0.651	12.1	0.81
E	10.833	282.15	112.66	334.1	0.624	15.2	0.74
F	6.974	284.15	64.78	334.1	0.624	12.4	0.82
G	12.42	280.65	145.4	167.6	0.642	17.6	0.68
H	12.11	278.65	138.9	348.4	0.639	16.9	0.70

表 4 计算的雷诺数

管道	Re=4 m/(μπD)
A	1.84 × 10^7
B	2.63 × 10^7
C	1.61 × 10^7
D	1.89 × 10^7
E	2.90 × 10^7
F	3.32 × 10^7
G	1.81 × 10^7
H	2.72 × 10^7

量粗糙度的计算。使用 GERG 方程计算时,按照 $n=1,2,3,\dots,10$ 分别计算,并向外推算值 $n=16$ 。

$$\left(\frac{P}{4}\right)^2 \frac{M_w}{m^2 ZRT} (P_1^2 - P_2^2) \frac{1}{\lambda} D^5 + \frac{D}{\lambda} 2 \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) - L = 0 \quad (5)$$

5.1.2 当量粗糙度结果分析

计算的摩阻系数和当量粗糙度见表 5,从计算结果可得:使用 GERG 方程在计算管道 A、C 当量粗糙度时,出现非合理数值,出现这种情况的原因有待进一步研究;使用 GERG 方程在计算管道 D、F、G 当量粗糙度时,当 $n < 9$,当量粗糙度 k 随着 n 的增加而增加;当 $n \geq 9$,当量粗糙度 k 趋于稳定;使用 GERG 方程在计算管道 B、E、H 当量粗糙度时,当量粗糙度 k 随着 n 的增加而增加。

5.2 计算摩阻系数

5.2.1 计算实例

使用表 2~4 中参数,给定当量粗糙度 k ,GERG 方程中 $n=1,2,3,\dots,10,f=1$ 进行求解^[6-7],见表 6。

5.2.2 摩阻系数结果分析

5.2.2.1 管道 A 的摩阻系数计算结果

a) Weymouth 方程计算的结果与当量粗糙度 $k=20\text{ }\mu\text{m}$ 时的 CW 方程和 $n=1$ 时的 GERG 方程计算结果相近。

b) Zegarola 方程计算结果与当量粗糙度 $k=20\text{ }\mu\text{m}$

时的 CW 方程计算结果相近,与 $n \geq 5$ 时的 GERG 方程的计算结果相同;当量粗糙度 $k=0.633\text{ }\mu\text{m}$,与 $n \geq 3$ 时的 GERG 方程计算结果相同。

c) GERG 方程求解摩阻系数时, $n \geq 7$ 时结果趋于稳定。

5.2.2.2 管道 D 的摩阻系数计算结果

a) Weymouth 方程计算的结果与当量粗糙度 $k=20\text{ }\mu\text{m}$ 时的 CW 方程和 $n=1$ 时的 GERG 方程计算结果相近。

b) Zegarola 方程计算结果与当量粗糙度 $k=20\text{ }\mu\text{m}$ 时的 CW 方程计算结果相近,与 $n \geq 5$ 时的 GERG 方程的计算结果相同;当量粗糙度 $k=0.633\text{ }\mu\text{m}$,与 $n \geq 3$ 时的 GERG 方程计算结果相同。

c) GERG 方程求解摩阻系数时候, $n \geq 5$ 时结果趋于稳定。

5.2.2.3 管道 G 的摩阻系数计算结果

a) Weymouth 方程计算的结果与当量粗糙度 $k=30\text{ }\mu\text{m}$ 时的 CW 方程和 $n=1$ 时的 GERG 方程计算结果相近。

b) Zegarola 方程计算结果与当量粗糙度 $k=0.633\text{ }\mu\text{m}$ 时的 CW 方程计算结果相近;与当量粗糙度 $k=2\text{ }\mu\text{m}$ 时, $n \geq 6$ 时的 GERG 方程的计算结果相同;当量粗糙度

表 5 计算的摩阻系数 λ 和当量粗糙度 k

管道编号	A	B	C	D	E	F	G	H
计算的摩阻系数 λ	7.541×10^{-3}	7.643×10^{-3}	7.755×10^{-3}	8.810×10^{-3}	7.305×10^{-3}	8.022×10^{-3}	9.189×10^{-3}	7.462×10^{-3}
CW 方程反算 k 值/ μm	0.633 0	2.932 9	1.214 6	12.634 2	1.426 1	6.792 2	11.515 8	2.004 6
GERG 方程反算 k 值/ μm								
$n=1$	-1.256	1.508	-0.851	10.765	0.080	5.546	10.286	0.601
$n=2$	4.161i	4.286	3.679i	16.528	0.899	8.973	14.319	2.581
$n=3$	2.820 + 4.884 i	5.525	2.724 + 4.718 i	17.664	1.825	9.724	14.945	3.812
$n=4$	4.511 + 4.511 i	6.099	4.553 + 4.553i	17.949	2.526	9.931	15.071	4.500
$n=5$	5.489 + 3.988 i	6.394	5.686 + 4.131 i	18.032	3.031	9.996	15.100	4.908
$n=6$	6.084 + 3.512 i	6.560	6.409 + 3.700 i	18.058	3.399	10.019	15.108	5.166
$n=7$	6.464 + 3.113 i	6.659	6.892 + 3.319 i	18.067	3.674	10.027	15.110	5.337
$n=8$	6.720 + 2.783 i	6.720	7.227 + 2.993 i	18.070	3.884	10.030	15.110	5.457
$n=9$	6.897+ 2.510 i	6.759	7.467+ 2.718 i	18.071	4.050	10.031	15.110	5.542
$n=10$	7.025+ 2.282 i	6.785	7.644 + 2.484 i	18.071	4.182	10.032	15.110	5.605
$n=11$	7.119 + 2.090 i	6.803	7.778 + 2.284 i	18.071	4.289	10.032	15.110	5.652
$n=12$	7.120 + 1.926 i	6.815	7.881 + 2.111 i	18.071	4.377	10.032	15.110	5.688
$n=13$	7.244+ 1.785 i	6.823	7.962 + 1.962 i	18.071	4.451	10.032	15.110	5.716
$n=14$	7.286 + 1.663 i	6.829	8.026 + 1.832 i	18.071	4.514	10.032	15.110	5.738
$n=15$	7.320+ 1.556 i	6.833	8.077 + 1.717 i	18.071	4.567	10.032	15.110	5.756
$n=16$	7.347 + 1.461 i	6.836	8.120 + 1.615 i	18.071	4.613	10.032	15.110	5.770

表 6 摩阻系数计算对比

管道 编号	当量粗糙 度 $k/\mu\text{m}$	$\lambda_{\text{Weymouth}}/10^{-3}$	$\lambda_{\text{Zagarola}}/10^{-3}$	$\lambda_{\text{CW}}/10^{-3}$	$\lambda_{\text{GERG}}/10^{-3}$									
					$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$	$n=8$	$n=9$	$n=10$
A	50.8			10.805	10.861	10.649	10.635	10.634	10.634	10.634	10.634	10.634	10.634	10.634
	20			9.405	9.510	9.142	9.078	9.063	9.060	9.059	9.058	9.058	9.058	9.058
	30	9.515	7.740	9.953	10.035	9.738	9.703	9.698	9.698	9.697	9.697	9.697	9.697	9.697
	2			7.759	8.013	7.778	7.747	7.741	7.740	7.740	7.740	7.740	7.740	7.740
	0.633			7.541	7.831	7.744	7.740	7.740	7.740	7.740	7.740	7.740	7.740	7.740
D	50.8			10.682	10.740	10.523	10.508	10.506	10.506	10.506	10.506	10.506	10.506	10.506
	20			9.313	9.421	9.048	8.980	8.964	8.960	8.958	8.958	8.958	8.958	8.958
	30	9.303	7.712	9.849	9.933	9.630	9.593	9.587	9.586	9.586	9.586	9.586	9.586	9.586
	2			7.717	7.973	7.747	7.718	7.713	7.712	7.712	7.712	7.712	7.712	7.712
	0.633			7.509	7.799	7.715	7.712	7.712	7.712	7.712	7.712	7.712	7.712	7.712
G	50.8			11.499	11.543	11.376	11.369	11.368	11.368	11.368	11.368	11.368	11.368	11.368
	20			9.901	9.985	9.678	9.640	9.635	9.633	9.633	9.633	9.633	9.633	9.633
	30	10.752	7.757	10.532	10.596	10.356	10.338	10.336	10.335	10.335	10.335	10.335	10.335	10.335
	2			7.898	8.135	7.834	7.777	7.763	7.759	7.757	7.757	7.757	7.757	7.757
	0.633			7.604	7.886	7.765	7.757	7.757	7.757	7.757	7.757	7.757	7.757	7.757

$k=0.633\text{ }\mu\text{m}$,与 $n\geq 3$ 时的 GERG 方程计算结果相同。

c) GERG 方程求解摩阻系数时, $n\geq 6$ 时结果趋于稳定。

由于雷诺数决定了流态,GERG 方程中的系数 n 反映了流态的变化,故在用 GERG 方程求解摩阻系数时候, n 在某一个值时结果趋于稳定。从文中数据分析可得,管道 A、D、G 的雷诺数在 1.84×10^7 左右,故摩阻系数稳定在某一数值时 n 的值也比较接近。

6 结论

6.1 Weymouth 方程

从本研究来看,Weymouth 方程适用于管壁粗糙度 k 为 $20\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ 的管道。

6.2 Zagarola 方程

与 GERG 方程相比,Zagarola 具有如下特点:

a) GERG 方程中系数 $k=0$ 时就转化为 Zagarola 方程,可以说 Zagarola 方程是 GERG 方程的一个特例。因此,GERG 方程具有更广泛的适用性。

b) Zagarola 方程计算的结果和 GERG 方程中 n 值较大时相同,可以认为,Zagarola 方程适用于计算从光滑管到粗糙管流态剧烈变化时的摩阻系数。

6.3 Colebrook-White 方程

a) 在进行当量粗糙度反算时,建议使用 CW 方程,避免出现不合理的数值。

b) CW 方程形式简单,且可以用数值计算软件(如

MATLAB)直接计算,无需编程迭代。

c) CW 方程仍是目前使用最广的摩阻系数方程之一。

6.4 GERG 方程

当粗糙度或当量粗糙度已知时,使用 GERG 方程计算摩阻系数,具有以下特点:

a) 由于其方程中含有参数 n ,其调整范围在 $1\sim 10$,使得 GERG 方程适用范围更广。

b) n 值在大于某一个值时摩阻系数计算结果趋于稳定。

c) n 值反映了流态的变化,其数值的设定与反映流态的雷诺数一致时结果准确。

d) 方程中输送效率系数 f 可调整方程的适用性。

e) 形如 GERG 方程的摩阻系数方程在不断发展之中,有待于进一步研究。

参考文献:

[1] 李长俊.天然气管道输送[M].北京:石油工业出版社,2008.73-75.
Li Changjun. Pipeline Transmission of Natural Gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008,73-75.
[2] Gersten K, Papenfuss H D, Kurschat T, Genillan P, et al. New Transmission Factor Formula Proposed for Gas Pipelines[J]. Oil & Gas Journal, 2000, 98(7):58-62.

(下转第 34 页)

碳/硫比过高)时,可考虑以自循环式络合铁(Lo-Cat)法装置替代克劳斯法硫黄回收装置。

f) 膜分离、低温分馏和变压吸附等三大物理分离脱碳技术具有良好的发展前景,特别是膜分离法应用于 EOR 伴生气脱碳,与其它工艺相比具有明显的技术经济优势,建议充分重视此工艺的技术开发。

参考文献:

- [1] 陈赓良. 克劳斯法硫黄回收工艺技术发展评述[J]. 天然气与石油, 2013, 31(4): 23-28.
Chen GengLiang. Review of Claus Sulfur Recovery Process Technology Development[J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(4): 23-28.
- [2] 韩淑怡, 王 科, 黄 勇, 等. 醇胺法脱硫脱碳技术研究进展[J]. 天然气与石油, 2014, 32(3): 19-22.
Han Shuyi, Wang Ke, Huang Yong, et al. Progress of Research on Sulfur Removal and Decarbonization Technology with Amine System [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32(3): 19-22.
- [3] 周明宇. 我国天然气净化厂酸气处理技术新思考[J]. 天然气与石油, 2012, 30(1): 32-35.
Zhou Mingyu. New Thinking of Gas Purification Plant Sour Gas Treatment Technology in Our Country[J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(1): 32-35.
- [4] 朱利凯, 陈赓良. 天然气处理与加工[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 59.
Zhu Likai, Chen Gengliang. Gas Treatment and Processing [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997. 59.
- [5] 王开岳. 天然气净化工艺[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005. 8.
Wang Kaiyue. Gas Purification Process [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005. 8.
- [6] 陈赓良, 朱利凯. 天然气处理与加工工艺原理及技术进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010. 19.
Chen Gengliang, Zhu Likai. Technology Development of Gas Treatment and Processing [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010. 19.
- [7] 陈赓良, 常宏岗. 配方型溶剂应用与气体净化工艺的发展动向(第二版) [M]. 北京: 石油工业出版社, 2009. 189.
Chen Gengliang, Chang Honggang. Formulated Solvent Application and Trend of Gas Purification Process Development (Rev.2) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009. 189.
- [8] 师春元, 黄黎明, 陈赓良. 机遇与挑战——二氧化碳资源开发与利用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2006. 89.
Shi Chunyuan, Huang Liming, Cheng Gengliang. Opportunity and Challenge—Carbon Dioxide Resource Development and Utilization [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006. 89.
- [9] 陈赓良, 缪明富, 马 卫. 天然气中有机硫化物脱除评述[J]. 天然气工业, 2007, 27(10): 120.
Chen Gengliang, Miao Mingfu, Ma Wei. Review of Organic Sulfide Removal in Natural Gas [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(10): 120.
- [10] 曾树兵, 陈文峰, 郭 洲, 等. MDEA 混合胺法脱碳在珠海天然气液化项目中的应用 [J]. 石油与天然气化工, 2007, 36(6): 485.
Zeng Shubing, Chen Wenfeng, Guo Zhou, et al. Application of MDEA Mixed Method for Decarbonization in Zhuhai Gas Liquefaction Project [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2007, 36(6): 485.

(上接第 24 页)

- [3] Rogers J R, Fredrich A J. Environmental and Water Resources History [M]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2002. 34-43.
- [4] Langelandsvik L I, Postvoll W, et al. An Evaluation of the Friction Factor Formula Based on Operational Data [C]. San Antonio: PSIG Annual Meeting, 2005.
- [5] John P, Norman R, Thomas K. Taking the Rough with the Smooth—a New Look at Transmission Factor Formulae. Taking the Rough with the Smooth—a New Look at Transmission Factor Formulae [C]. Oregon: PSIG Annual Meeting, 2002.
- [6] 苑伟民, 青 青, 袁宗明, 等. Colebrook-White 方程显式公式对比研究[J]. 天然气与石油, 2010, 28(4): 5-7.
Yuan Weimin, Qing Qing, Yuan Zongming, et al. Comparative Study on Explicit Formula of Colebrook-White Equation [J]. Natural Gas and Oil, 2010, 28(4): 5-7.
- [7] 苑伟民, 贺 三, 袁宗明, 等. 求解 BWRS 方程中压缩因子的数值方法[J]. 管道技术与设备, 2009, 16(3): 14-16.
Yuan Weimin, He San, Yuan Zongming, et al. Numerical Methods of Using BWRS Equation of State in Calculating Compressibility Factor of Natural Gas [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2009, 16(3): 14-16.