

并联孔板计量装置流量动态重分配规律研究

田 园¹ 李亚茜² 沈 群³

1. 重庆科技学院石油与天然气工程学院, 重庆 401331;
2. 中国石化西南油气分公司, 四川 成都 610041;
3. 中国石油西南油气田公司重庆气矿, 重庆 401331

摘 要:管输天然气多采用并联孔板计量装置进行计量,但定期清洗时,孔板提到上腔后,必然导致管路中流量动态重分配,产生计量误差,直接影响企业的经济效益。目前尚无针对流量动态重分配造成计量误差的主要影响因素及补偿方法的定性、定量分析研究,为此基于计算流体力学基本原理,应用 Fluent 软件构建了并联孔板计量装置内流场三维模型,分析了孔板周期清洗时的流量动态重分配规律。研究结果表明:1)流量补偿系数与压力、温度无关;2)相同孔径孔板流量计并联时补偿系数随总气量、管径、相对密度、并联管道数的增加而增大,随直径比的增加而减小,其中直径比是主控因素;3)不同孔径孔板流量计并联时补偿系数随总气量、管径、相对密度的增加而增大,随并联孔径比的增加而显著减小,其中并联孔径比是主控因素。依据研究结果构建了流量补偿系数修正方程,经现场测试,计量偏差显著降低,大大减少了因计量不准确带来的潜在利润流失。

关键词:并联孔板计量装置;动态重分配;流场模拟;计量偏差;补偿系数

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2023.03.002

Research on flow dynamic redistribution pattern of parallel orifice metering device

TIAN Yuan¹, LI Yaxi², SHEN Qun³

1. Institute of Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing, 401331, China;
2. Sinopec Southwest Oil and Gas Branch, Chengdu, Sichuan, 610041, China;
3. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company Chongqing Gas Mine, Chongqing, 401331, China

Abstract: The parallel orifice plate is usually used to measure natural gas transported by pipeline. However, when the orifice plate is raised to the upper chamber during periodic cleaning, it will inevitably lead to flow dynamic redistribution in the pipeline, resulting in measurement errors that directly affect the profit of the enterprises. At present, there is no qualitative and quantitative analysis and research on the influencing factors and compensation methods of measurement error caused by flow dynamic redistribution. Therefore, based on the basic principle of computational fluid dynamics, Fluent software was used to build a three-dimensional flow field model in the parallel orifice metering device, and analyze the flow dynamic redistribution pattern during the periodic cleaning of the orifice plate. The research results indicate the following. First, the flow compensation coefficient is independent of pressure and temperature. Second, in the parallel metering device with the same aperture, the compensation coefficient increases with the increase of total gas volume, pipe diameter, relative density, and the number of parallel pipes, and decreases with the increase of pipe diameter ratio, of which the pipe diameter ratio is the main controlling

收稿日期:2022-11-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目“剪切流场中稠油油滴聚并机理与数学模型研究”(51904051)

作者简介:田 园(1973-),男,四川营山人,副教授,博士,主要从事计算流体力学及油气储运技术方向研究。E-mail:swpu_tianyuan@126.com

factor. Third, in the parallel metering device with different apertures, the compensation coefficient increases with the increase of total gas volume, pipe diameter and relative density, and decreases significantly with the increase of parallel aperture diameter ratio, of which the parallel aperture diameter ratio is the main controlling factor. Furthermore, based on the research results, the flow compensation coefficient correction equation was developed, and the measurement deviation is significantly reduced by field test, which greatly reduces the potential profit loss caused by inaccurate measurement.

Keywords: Parallel orifice metering device; Dynamic redistribution; Flow field simulation; Measurement deviation; Compensation coefficient

0 前言

随着天然气产量大幅增加及用户对天然气需求量的持续增长,生产现场越来越多地采取并联孔板计量装置进行管输天然气的计量^[1-7]。由于并联孔板计量装置中高孔阀特定的结构和工作原理,以及天然气气质条件和气流冲刷磨损等原因,必须对高孔阀及节流元件进行定期清洗检查,以确保计量准确。然而,由于缺乏可靠的流量补偿方法,导致定期清洗期间出现较大的计量误差。经调研,某公司在并联孔板计量装置清洗检查期间,计量误差高达 50% 左右,严重影响流量计量的准确性,给企业及用户带来了极大的经济损失。

目前,针对孔板流量计的研究集中于孔板内流场数值计算及计量精度的影响因素、影响规律等方面,多局限于单孔板计量装置,对于并联孔板计量装置在清洗检查期间因流量动态重分配造成计量误差的影响因素及补偿方法鲜有研究报道^[8-15]。为解决这一问题,需对并联孔板计量装置内流场进行理论分析,探索清洗检查期间管内流量动态重分配规律,并结合现场数据提出控制和修正方法,减小因计量误差带来的潜在利润流失。

1 模型建立与网格剖分

1.1 模型建立

由于孔径的差异,并联孔板计量装置中会形成不同

的流场几何结构,依据输气站场并联孔板流量装置的孔径是否相等,将其分为相同孔径并联与不同孔径并联的情况讨论,其中相同孔径是指孔板流量计的孔径完全相同或大小相差小于 0.01%。由孔板流量计的工作原理可知,孔板流量计的计量精度与管道内径、气流速度和气体黏度密切相关^[16],因此在建立模型时,管路直径、流量、压力等需与实际情况保持一致。某输气站并联孔板计量装置基础参数见表 1。

表 1 某输气站并联孔板计量装置基础参数表

Tab.1 Basic parameter table of parallel orifice metering device of a gas station

类型	计量 编号	测量 管径 / mm	孔径 / mm	直径 比	供气 压力 / (10 ⁴ MPa	流量 / (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)
相同孔径 孔板并联	J-1	307.38	161.030	0.52	3.3	121
	J-2	307.44	161.048	0.52	3.3	123
不同孔径 孔板并联	J-1	307.38	128.011	0.42	3.3	100
	J-2	307.44	70.673	0.23	3.3	30

为提高计算效率,忽略管路中摩擦对压降的影响,在不影响流体流经孔板时流态的前提下,对几何模型中的管路长度进行了简化,具体相同孔径并联几何尺寸设置及计量系统内流场模型见图 1。

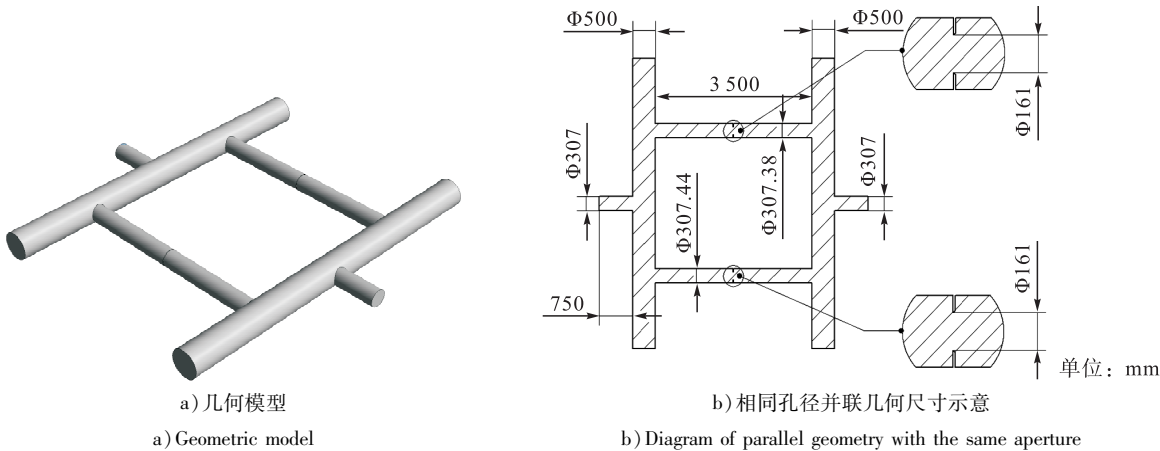


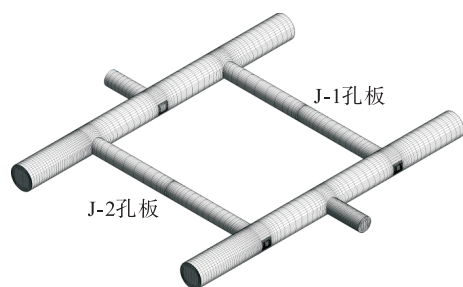
图 1 孔板流场几何模型图

Fig.1 Geometric model of orifice flow field

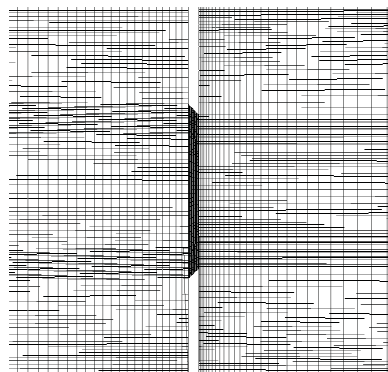
1.2 网格剖分

应用 Ansys ICEM 软件对所建几何模型进行结构化网格剖分,见图2。由于孔板处和管道交汇处的流动参数变化剧烈,因此针对该区域进行了局部网格加密,使网格的

疏密更好地适应流场的变化。经网格无关性验证,摒除了网格密度对计算结果的影响,最终得到的网格节点数为 1 357 634,六面体网格最小雅克比矩阵与最大雅克比矩阵比值均大于 0.6,网格质量较高,满足计算精度要求。



a) 网格划分整体情况
a) The whole grid situation



b) 局部加密的孔板处网格
b) The grid at the orifice

图2 孔板流场网格剖分图

Fig.2 Grid profile of orifice flow field

1.3 求解过程

由于孔板流量计内流场速度低于 0.3 倍音速,可认为是不可压缩流动,因此采用 Fluent 软件自带的基于压力的耦合求解器进行求解^[17]。流动介质选用甲烷,密度计算选用真实气体模型 P-R 状态方程,气体黏度应用 Sutherland 模型,考虑到气体流经孔板后会产生涡旋,流线弯曲程度大,因此选用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型^[18-19],壁面采用增强壁面函数,计算得到 y^+ 均在 1.2 ~ 5.3 之间。采用 Coupled 算法求解连续性方程、动量方程及能量方程, Courant 数设为 5。为了保证计算精度,对流项采用二阶迎风格式^[20]。模型出入口均为压力边界条件,入口压力为 3.30 MPa,出口压力为 3.29 MPa,壁面边界设为静止等温壁面,温度为 20 ℃。迭代终止条件残差值设为 1×10^{-5} ,迭代终止后,入口和出口质量流量相对误差均小于 0.5%,计算收敛^[21]。

1.4 流场分析

根据模拟结果可知,正常计量时整个管路系统内最大速度在孔板处,为 28.03 m/s,见图3;最大压差为 12 390.00 Pa,天然气出入口压差为 10 640.00 Pa,与现场实测数据 10 976.22 Pa 相比,相对误差为 3.16%,见图4。

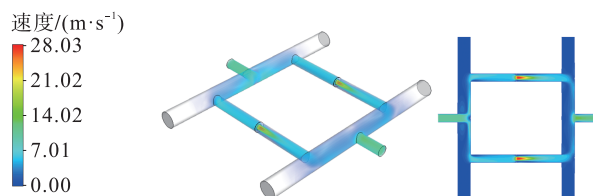


图3 正常计量时速度分布云图

Fig.3 Velocity distribution cloud image at metering

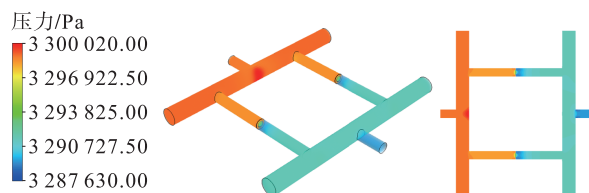


图4 正常计量时压力分布云图

Fig.4 Pressure distribution cloud image at metering

其中 1 个孔板正在清洗时整个管路系统内最大速度在汇管出口处,为 21.01 m/s,见图5;最大压差为 13 510.00 Pa,天然气出入口压差为 10 000.00 Pa,与现场实测数据 10 294.08 Pa 相比,相对误差为 2.94%,见图6。

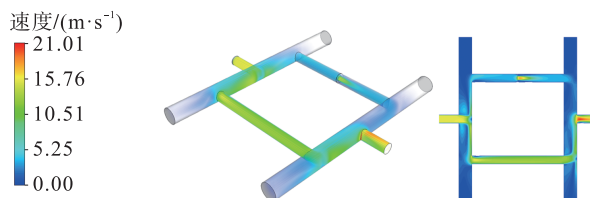


图5 正在清洗时速度分布云图

Fig.5 Velocity distribution cloud image at cleaning

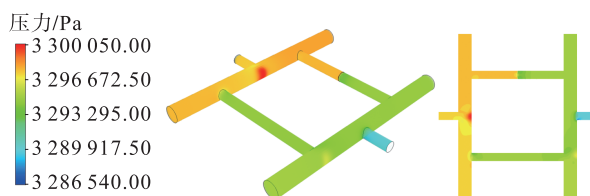


图6 正在清洗时压力分布云图

Fig.6 Pressure distribution cloud image at cleaning

综上所述,两种不同工况的相对误差都很小,说明所建模型能较准确地预测不同工况下孔板流量计内流场特征数据,因此可用来分析孔板清洗检查过程中的流量重分配规律和影响因素。

2 流量重分配规律与影响因素分析

2.1 影响因素确定

标准孔板流量计是基于节流原理,利用流体流经孔板时产生的压差来实现流量测量。孔板前后的压差与流量关系见式(1)。

$$Q_n = A_d \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} d^2 \varepsilon F_z \sqrt{\frac{1}{G_r T_1}} \sqrt{p_1 \Delta p} \quad (1)$$

式中: Q_n 为日标准体积流量, m^3/d ; A_d 为日流量系数,值为 4.703 391; β 为直径比, $\beta = \frac{d}{D}$, 其中 d 为孔板开口直径, mm, D 为管道内径, mm; ε 为天然气可膨胀系数; G_r 为天然气真实相对密度; T_1 为上游气流温度, K; p_1 为上游绝对静压力, MPa; Δp 为压差, Pa; C 为流出系数; F_z 为被测天然气的超压缩系数, 根据 GB /T 17747—2011《天然气压缩因子的计算》, 可通过式(2)计算。

$$F_z = \sqrt{Z_n / Z_1} \quad (2)$$

式中: Z_n 为标准参比条件下天然气的压缩因子; Z_1 为实际被测管道的压力、温度条件下天然气的压缩因子。 Z_1 可通过式(3)计算。

$$Z_1 = \frac{1}{1 + \frac{5.072 \times 10^6 p \times 10^{1.785 G_r}}{T^{3.825}}} \quad (3)$$

式中: T 为实际被测管道温度, K。

$$\varepsilon = 1 - (0.351 + 0.256\beta^4 + 0.93\beta^8) \left[1 - \left(\frac{p_1 - \Delta p}{p_1} \right)^{1/k} \right] \quad (4)$$

式中: k 为等熵指数, 根据 GB /T 2624—1993《流量测量节流装置》, k 采用 1.3。

将式(1)中的参数通过式(2)、(4)整合后, 基于标准孔板流量计的流量影响因素, 初定分析并联孔板计量装置清洗检查时流量动态重分配的主要影响因素包括总气量、温度、压力、管径、直径比、相对密度。

2.2 影响因素分析

为便于分析, 将孔板流量计清洗检查时的流量与正常计量时流量的比值定义为流量补偿系数, 现场实际计量过程中, 孔板清洗时流量补偿系数值取 1 即认为检修前后流量不变, 但孔板清洗时管路中流量分配会发生变化, 流量补偿系数值偏离 1 的程度即可表征计量偏差的大小。

2.2.1 相同孔径孔板流量计并联

以流量补偿系数为表征参数, 开展计量装置内流场

数值计算研究, 分析不同工况下孔板流量计清洗时管路中真实流量的分布情况, 得到清洗孔板所在管道的流量补偿系数不为 1, 其不随压力、温度的变化而变化, 随总气量、管径、相对密度、并联管道数目的增加而增大, 随直径比的增加而显著减小, 见图 7。

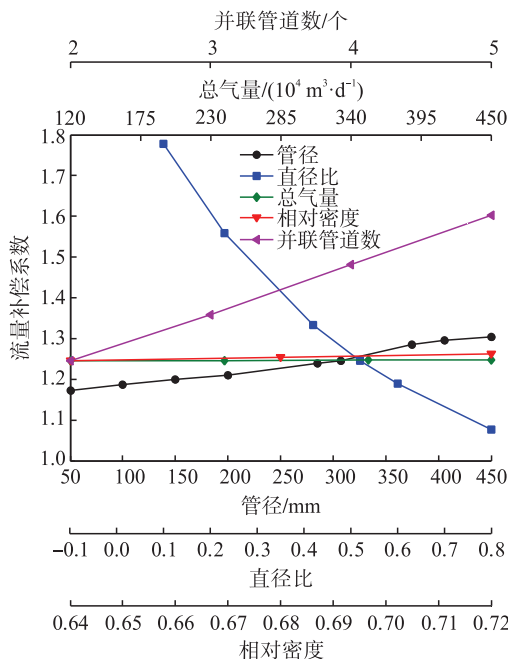


图 7 相同孔径时影响因素—流量补偿系数图
Fig. 7 Influencing factors-flow compensation coefficient for the same aperture

以不同影响因素分析时所得模拟数据为基础, 基于灰色关联模型可得到相同孔径并联计量装置中各主要影响因素与流量补偿系数之间的关联度^[22-24]。可以发现, 各主要影响因素的关联度均大于 0, 说明总气量、直径比、管径、相对密度和并联管道数等因素对流量补偿系数均有影响; 并且从关联度的数值上来看, 直径比的关联度最大, 为 0.89, 说明直径比是影响流量分配的主控因素, 见表 2。

表 2 相同孔径并联计量装置中各主要影响因素的关联度表

Tab.2 The correlation degree of each influencing factor in the parallel metering device with the same aperture

影响因素	关联度
总气量	0.74
直径比	0.89
管径	0.79
相对密度	0.81
并联管道数	0.86

2.2.2 不同孔径孔板流量计并联

由于并联孔板计量装置中孔板规格不一致, 因此不

同孔板清洗时所产生的流量补偿系数也不同,取 J-1 孔板孔径为 128.011 mm, J-2 孔板孔径为 70.673 mm,得到不同孔径并联计量装置与相同孔径并联计量装置中的

流量补偿系数变化规律相同,即流量补偿系数不随压力、温度的变化而变化,随总气量、管径、相对密度的增加而增大,随并联孔径比的增加而显著减小,见图 8。

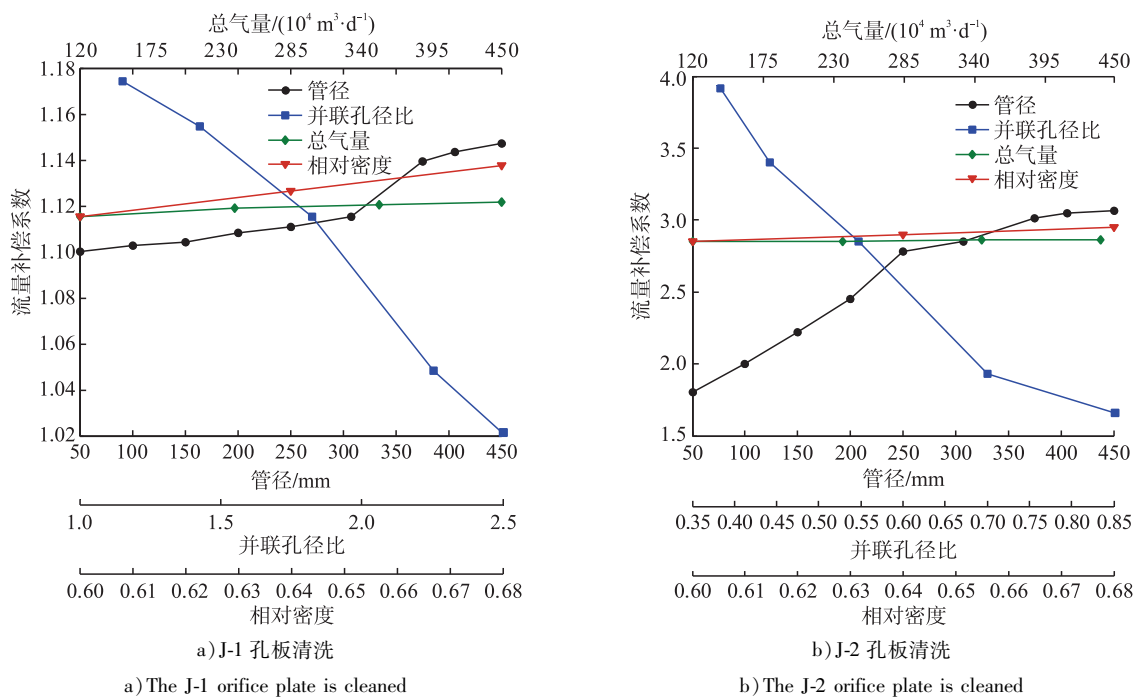


图 8 不同孔径时影响因素—流量补偿系数图

Fig. 8 Influencing factors-flow compensation coefficient for different apertures

同理,得到不同孔径并联计量系统中各主要影响因素与流量补偿系数之间的关联度,可以发现,总气量、并联孔径比、管径、相对密度等因素对流量补偿系数均有影响,其中并联孔径比是影响流量分配的主控因素,见表 3。

表 3 不同孔径并联计量系统中各影响因素的关联度表

Tab. 3 The correlation degree of each influencing factor in the parallel metering device with different apertures

影响因素	关联度
总气量	0.73
并联孔径比	0.91
管径	0.80
相对密度	0.83

2.3 流量补偿系数修正方程

2.3.1 相同孔径孔板流量计并联

定义流量补偿系数的目标函数形式见式(5):

$$C_f = x_1 D^{x_2} \beta^{x_3} Q^{x_4} \Delta^{x_5} n^{x_6} \quad (5)$$

式中: C_f 为流量补偿系数; Q 为总气量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; Δ 为相对密度; n 为并联管道数, 条; $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ 为待定系数。

结合不同影响因素下的流量补偿系数值, 进行数据回归, 得到最终表达式(6), 其回归统计见表 4。方程拟

合度高, 拟合度大于 0.98, 因此可用于孔板清洗检查时流量补偿系数的预测。

$$C_f = 0.7215 d^{0.0445} \beta^{-0.2342} Q^{0.00084} \Delta^{0.0993} n^{0.2583} \quad (6)$$

表 4 相同孔径孔板流量计并联回归统计表

Tab. 4 Regression statistics of the parallel metering device with the same aperture

项目	数值
Multiple R	0.987
R Square	0.974
Adjusted R Square	0.968
标准误差	0.018

现场实验中管路系统总流量为 $244 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 正常计量时, J-1 孔板所在管路瞬时流量为 $121 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, J-2 孔板所在管路瞬时流量为 $123 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。10:00 至 10:20 清洗 J-1, 其中 10:01 至 10:19 孔板位于上阀腔, J-1 孔板所在管路处于清洗补偿状态, 此时 J-2 孔板所在管路瞬时流量下降至 $96 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 处于正常计量状态。10:22 至 10:42 清洗 J-2, 其中 10:23 至 10:41 孔板位于上阀腔, J-2 孔板所在管路处于清洗补偿状态, 此时 J-1 孔板所在管路瞬时流量下降至 $92 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 处于正常计量状态, 见图 9。

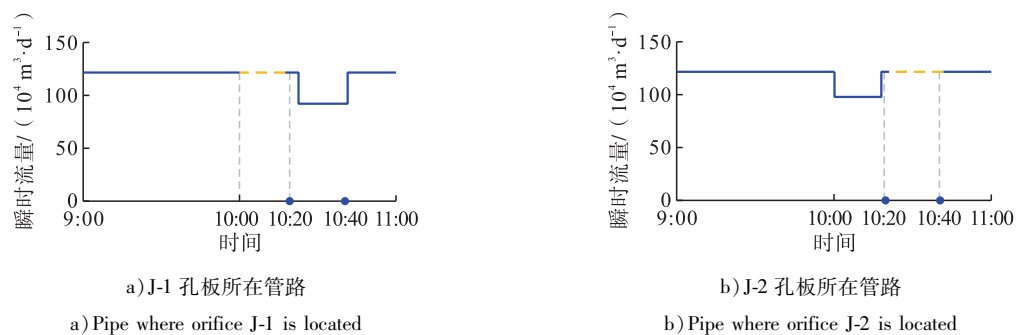


图 9 相同孔径孔板清洗时瞬时流量变化曲线图

Fig. 9 Instantaneous flow change when orifice with the same aperture cleaning

将清洗孔板所在管路参数代入流量补偿系数方程，板流量计并联时,运用流量补偿系数修正方程后,可有效降低计量偏差,见表 5。

表 5 相同孔径孔板流量计并联计量偏差修正表

Tab. 5 Measurement deviation correction of the parallel metering device with the same aperture

项目	J-1 清洗时		J-2 清洗时	
	J-1	J-2	J-1	J-2
真实流量 / (10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)	148	96	92	152
计量流量 / (10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)	121	123	121	123
计量偏差	22. 31%	21. 95%	23. 97%	23. 58%
修正后计量流量 / (10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)	150. 9	93. 1	90. 6	153. 4
修正后计量偏差	2. 40%	2. 36%	1. 16%	1. 14%

2. 3. 2 不同孔径孔板流量计并联

同理得到不同孔径孔板流量计流量补偿系数最终表达式(7),其回归统计见表 6。方程拟合度高,拟合度大于 0. 97,因此可用于孔板清洗检查时流量补偿系数的预测。

$$C_f = 0. 894 4 d^{0. 132 6} k^{-0. 725 6} Q^{0. 024 5} \Delta^{0. 41} \quad (7)$$

表 6 不同孔径孔板流量计并联回归统计表

Tab. 6 Regression statistics of the parallel metering device with different apertures

项目	数值
Multiple R	0. 978
R Square	0. 956
Adjusted R Square	0. 952
标准误差	0. 102

现场实验中管路系统总流量为 130 × 10⁴ m³ /d, 正常计量时,J-1 管路瞬时流量为 100 × 10⁴ m³ /d,J-2 管路瞬时流量为 30 × 10⁴ m³ /d。8:40 至 9:00 清洗 J-1,其中 8:41 至 8:59 孔板位于上阀腔,J-1 孔板所在管路处于清洗补偿状态,此时 J-2 孔板所在管路瞬时流量下降至 18. 7 × 10⁴ m³ /d,处于正常计量状态。9:02 至 9:22 清洗 J-2,其中 9:03 至 9:21 孔板位于上阀腔,J-2 孔板所在管路处于清洗补偿状态,此时 J-1 孔板所在管路瞬时流量下降至 43 × 10⁴ m³ /d,处于正常计量状态,见图 10。

J-1 孔板清洗时,孔径比为 1. 826 1,代入 J-1 管路参数至流量补偿系数方程,得到流量补偿系数为 1. 128 6; J-2 孔板清洗时,孔径比为 0. 547 6,计算得到的流量补偿

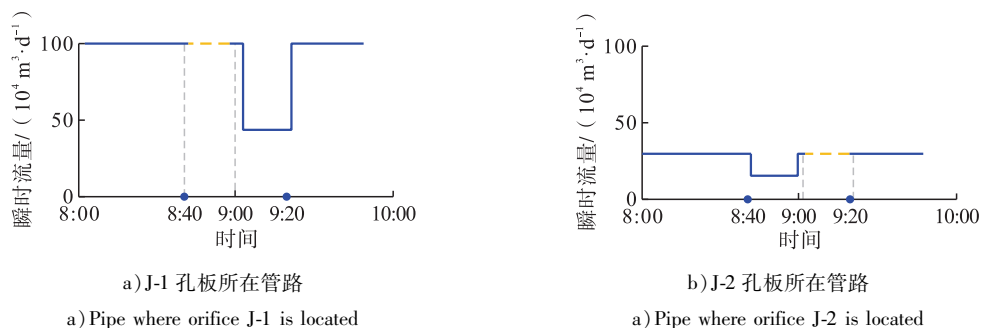


图 10 不同孔径孔板清洗时瞬时流量变化曲线图

Fig. 10 Instantaneous flow change when orifice with different apertures cleaning

系数为2.704。可以发现,当不同孔径孔板流量计并联时,运用流量补偿系数修正方程后,可有效降低计量偏差,见表7。

表7 不同孔径孔板流量计并联计量偏差修正表

Tab.7 Measurement deviation correction of the parallel metering device with different apertures

项目	J-1 清洗时		J-2 清洗时	
	J-1	J-2	J-1	J-2
真实流量 / ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	111.3	18.7	43.0	87.0
计量流量 / ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	100	30	100	30
计量偏差	10.2%	60.4%	132.6%	65.5%
修正后计量流量 / ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	112.86	17.14	48.88	81.12
修正后计量偏差	1.4%	8.3%	13.7%	6.8%

3 结论

1)以流量补偿系数来表征真实流量与计量流量之间的偏差,其数值越偏离1,说明计量误差越大。

2)流量补偿系数与压力、温度无关,相同孔径孔板流量计并联时随总气量、管径、相对密度、并联管道数的增加而增大,随直径比的增加而显著减小,其中直径比是主控因素;不同孔径孔板流量计并联时随总气量、管径、相对密度的增加而增大,随并联孔径比的增加而显著减小,其中并联孔径比是主控因素。

3)得到的流量补偿系数修正方程拟合度分别为0.987和0.978,精度较高。将其应用于现场计量,计量误差显著降低,可实现对孔板清洗检查时计量误差的有效控制。

参考文献:

- [1] 周少玺. 孔板流量计在瓦斯抽采计量中的误差来源分析[J]. 能源与环保, 2018, 40(2):128-130.
ZHOU Shaoxi. Error source analysis of orifice flowmeter in gas extraction measurement[J]. China Energy and Environmental Protection, 2018, 40 (2): 128-130.
- [2] 朱小龙, 韩涛翼. 典型槽式孔板流量计的数值模拟研究[J]. 能源化工, 2018, 39(2):7-12.
ZHU Xiaolong, HAN Taoyi. Study on numerical simulation of the typical slotted orifice flowmeter[J]. Energy Chemical Industry, 2018, 39 (2): 7-12.
- [3] 吴 鸿. 周期检查并联节流装置的计量偏差分析与控制[C] //中国石油学会天然气专业委员会. 2018年全国天然气学术年会论文集. 成都: 中国石油学会天然气专业委员会, 2018.
WU Hong. Analysis and control of measurement deviation of periodic inspection parallel throttling device [C] //Natural

Gas Committee of Chinese Petroleum Society. Proceedings of the 2018 National Academic Annual Conference of Natural Gas. Chengdu: Natural Gas Committee of Chinese Petroleum Society, 2018.

- [4] XU Shu, NIXON M, BEALL J, et al. Process variability reduction in flow control and wedge flowmeter performance evaluation [J]. Control Engineering Practice, 2021, 110: 104780.
- [5] FENG Guozeng, GUO Yuejiao, SHI Dachuan, et al. Experimental and numerical study of the flow characteristics of a novel olive-shaped flowmeter (OSF) [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2020, 76: 101832.
- [6] BEKRAOUI A, HADJADJ A. Thermal flow sensor used for thermal mass flowmeter[J]. Microelectronics Journal, 2020, 103: 104871.
- [7] SHEIKH N, SINGH S N. Discus flowmeter: A new concept [J]. Measurement, 2020, 164: 108104.
- [8] MAAMARI N, KREBS A, WEIKERT S, et al. Stability and dynamics of an orifice based aerostatic bearing with a compliant back plate [J]. Tribology International, 2019, 138: 279-296.
- [9] MEHMOOD M A, IBRAHIM M A, ULLAH A, et al. CFD study of pressure loss characteristics of multi-holed orifice plates using central composite design[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 70: 101654.
- [10] MOOSA M, HEKMAT M H. Numerical investigation of turbulence characteristics and upstream disturbance of flow through standard and multi-hole orifice flowmeters[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 65: 203-218.
- [11] DAYEV Z A. Application of artificial neural networks instead of the orifice plate discharge coefficient[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2020, 71: 101674.
- [12] DAYEV Z A, KAIRAKBAEV A K. Modeling of coefficient of contraction of differential pressure flowmeters[J]. Flow

- Measurement and Instrumentation, 2019, 66: 128-131.
- [13] 马英. 差压式节流装置的数值模拟与实验验证[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- MA Ying. Numerical simulation and experimental validation of differential pressure throttle devices [D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [14] 张宪, 刘钢. 新型孔板流量计的流出系数实验研究[J]. 当代化工, 2019, 48(6): 1217-1220.
- ZHANG Xian, LIU Gang. Experimental study on outflow coefficient of new orifice flowmeter [J]. Contemporary Chemical Industry, 2019, 48 (6): 1217-1220.
- [15] GUO Zhiping, SUN Xihuan, DONG Zhiyong. PIV analysis and high-speed photographic observation of cavitating flow field behind circular multi-orifice plates[J]. Water Science and Engineering, 2020, 13 (2): 145-153.
- [16] 李思达. 孔板流量计准确度影响因素分析[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
- LI Sida. Analysis of affecting factors for the accuracy of orifice flowmeter [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018.
- [17] 唐家鹏. ANSYS FLUENT 16.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- TANG Jiapeng. ANSYS FLUENT 16.0 super learning manual[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2016.
- [18] 胡坤, 李振北. ANSYS ICEM CFD 工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- HU Kun, LI Zhenbei. ANSYS ICEM CFD engineering examples in detail[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014.
- [19] 朱崎峰, 靳洋洋, 薛东东, 等. V形凹槽间距对微通道流动及换热特性的影响[J]. 机械工程师, 2021 (8): 12-14.
- ZHU Qifeng, JIN Yangyang, XUE Dongdong, et al. Effects of V-shaped grooves distance in sidewall on fluid flow and heat transfer characteristics in microchannel[J]. Mechanical Engineer, 2021(8): 12-14.
- [20] 李亚茜, 田园, 邓俊哲. 基于CFD的输气管道射流清管器喷嘴类型优选[J]. 石油机械, 2021, 49 (2): 126-132.
- LI Yaxi, TIAN Yuan, DENG Junzhe. Optimization of jet pig nozzle type for gas pipeline based on CFD [J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49 (2): 126-132.
- [21] 李小江. 多场耦合下二氧化碳压裂流动传热与岩石损伤特性研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- LI Xiaojiang. Research on flow-heat transfer and rock damage during CO₂ fracturing based on multiphysics coupling [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [22] 邓心茹. 长庆油田集输管道内腐蚀直接评价技术(MP-ICDA)研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- DENG Xinru. Study on Multiphase Flow Pipeline Internal Corrosion Direct Assessment (MP-ICDA) in Changqing oilfield [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [23] 龙学渊. 基于超音速流相变凝结机理的天然气液化技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- LONG Xueyuan. Research on natural gas liquefaction technology based on supersonic flow phase transition condensation mechanism [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [24] 伍鸿飞, 敬加强, 靳文博, 等. 原油族组成及碳数分布对其低温流动特性的影响[J]. 油气储运, 2014, 33(1): 42-45.
- WU Hongfei, JING Jiaqiang, JIN Wenbo, et al. Effects of crude oil family composition and carbon number distribution on its low temperature flow characteristics [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33 (1): 42-45.

我国首口万米科探井鸣笛开钻 标志着我国深地探测系列技术跨入世界前列

2023年5月30日11时46分,我国首口万米科探井——中国石油深地塔科1井在新疆塔克拉玛干沙漠鸣笛开钻,标志着我国向地球深部探测系列技术跨入世界前列。

这口井设计井深11 100米,预计钻井周期457天,肩负科学探索和油气发现两大使命,旨在深入探索地球内部结构和演化规律,完善万米深层油气成藏理论。这是中国石油深入贯彻落实习近平总书记“能源的饭碗必须端在自己手里”等重要指示精神,坚决行动,也是建设国家战略科技力量和世界能源与化工创新高地的标志性工程。

世界新增油气储量的60%来自深部地层,我国83%的深地油气仍有待探明开发。深地塔科1井所处的塔里木盆地,是我国最大的深地油气富集区。向地球深部进军,成为石油战线保障国家能源安全的必由之路。

(杨寒 摘编自中国石油新闻中心)