

文章编号: 1000-8241(2014)05-0542-07

输气干线放空系统水力特性

娄晨¹ 宫敬¹ 林棋¹ 林金贤² 彭清华³

1. 中国石油大学(北京)油气管道输送安全国家工程实验室, 北京 102249;

2. 中国石油海外勘探开发公司, 北京 100034; 3. 中国石油塔里木油田油气运销部, 新疆库尔勒 841000

摘要: 高压输气干线放空管路内的介质属于非稳定流动, 其水力计算不能采用一般站场管路适用的达西公式。为此, 以 Fano 方程为基础, 运用流体力学及输气管路流动基础理论进行程序编写, 计算程序可实现对各时刻放空所对应的瞬时放空量、累计放空时间、截面压力及温度、储气量的求解。将程序计算结果与图解法计算结果进行对比, 误差在 2% 以内, 同时, 程序计算法弥补了图解法仅能求得瞬时放空量而无法求得其他参数的缺陷。基于放空系统算例模型, 对放空管路长度、管径、内壁粗糙度以及干线气体温度、压力等影响放空管路水力特性的主要因素进行分析, 结果表明: 放空管路长度和管径对放空系统影响较大, 其他因素影响较小。以上研究可为输气干线放空管路系统设计提供参考依据。(图 12, 表 2, 参 10)

关键词: 输气干线; 放空管路; 放空量; 放空时间; 水力特性; C 语言编程

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2014.05.019

Hydraulic characteristics of the blow-down system of gas trunk lines

LOU Chen¹, GONG Jing¹, LIN Qi¹, LIN Jinxian², PENG Qinghua³

1. National Engineering Laboratory of Transportation Safety of Oil & Gas Pipeline, China University of Petroleum (Beijing) Beijing, 102249; 2. China National Oil & Gas Exploration and Development Corporation, Beijing, 100034; 3. PetroChina Tarim Oilfield Marketing Dept, Korla, Xinjiang, 841000

Abstract: Medium in the blow-down pipeline of high-pressure gas trunk lines is non-steady flow, its hydraulic calculation should not adopt Darcy formula which is applicable to normal pipelines of pump station. For this reason, based on Fano equation, a program has been made according to fluid mechanics and basic flow theory of gas pipeline, which can calculate blow-down volume, cumulative blow-down time, pressure and temperature of section and gas storage volume at any moment. Comparison of the program results and graphical result shows the error is less than 2%, besides, the program calculation method makes up the defect of graphical method that only instant blow-down volume can be calculated. Based on blow-down system calculation cases, major factors affecting hydraulic characteristics of blow-down pipeline, such as pipeline length, diameter, wall roughness and gas temperature, pressure have been analyzed. The results show that the length and diameter of blow-down pipe affect blow-down system stronger than other factors. The study can provide a reference to the design of blow-down pipeline of gas trunk lines. (12 Figures, 2 Tables, 10 References)

Key words: gas trunk lines, blow-down pipeline, blow-down volume, blow-down time, hydraulic characteristics, C language programming

高压输气干线放空系统具有放空量大且放空时间长的特点, 特别是当放空管较短时, 其压降快、流速高、出口温度低, 管段沿线各流动参数随时间一直在变化, 属于典型的非定常流动。输气干线放空过程会经历 3 个阶段: 超临界流状态(即壅塞流状态)、临界流状态、亚音速流状态, 因而决定了输气干线放空系统水力特性与一般站场管路的不同^[1-3]。有关输气干线放空系

统水力特性及其计算, 国内教科书中相关论述及公式推导的内容较少, 目前国内设计院多采用一个没有依据的错误公式(管容/放空时间)来计算管道放空量, 计算结果比工程实际结果小很多, 从而造成工程设计与放空生产实际严重脱节, 使得投产后的某些事故工况放空过程可操作性差, 尤其是点火放空时, 该误差造成的安全隐患非常大^[4-6]。为此, 基于 Fano 方程, 利用 C

语言开发了输气干线放空系统水力特性的计算程序,并通过此程序进一步研究放空系统的水力特性,希冀为今后相关工程设计提供参考依据。

1 程序编写与计算

高压输气干线放空系统由干线内待放空管存气体、放空管路(包括管道、阀门、弯头和三通等)及外界大气组成(图 1)。

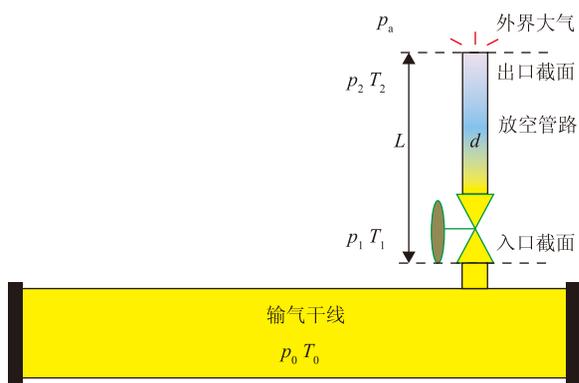


图 1 高压输气干线放空系统示意图

1.1 基本方程推导

基本控制方程(质量守恒方程、能量守恒方程及动量守恒方程)^[7-8]:

$$\begin{cases} m = \rho_1 V_1 = \rho_2 V_2 = \text{const} \\ i_1 + V_1^2 / 2 = i_2 + V_2^2 / 2 = i_0 \\ \partial \rho / \rho + V \partial V + f V^2 \partial x / (2 d) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为单位面积质量流率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; ρ 为气体密度, kg/m^3 ; i 为单位质量气体热焓, J/kg ; d 为放空管内径, m ; f 为水力摩擦因数; V 为气体流速, m/s , 其中下角标 1 表示放空管路入口截面, 下角标 2 表示放空管路出口截面。

其他基础方程(气体状态方程及相关热力方程):

$$\begin{cases} \rho = pM / (RT) \\ i = c_p T \\ c_p = R\gamma / (\gamma - 1) \\ V = aM_{\text{ach}} \\ a = (\gamma RT / M)^{0.5} \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_i 为放空系统不同截面的气体温度, K ; γ 为气体的等熵指数; p_i 为放空系统不同截面的气体压力, Pa ; M_{ach} 为气体马赫数; M 为气体摩尔质量, kg/mol ; R 为气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; a 为放空系统所处的当地声速, m/s ; c_p 为气体的定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

将方程组(2)代入方程组(1)中的质量守恒方程可得关联方程组(3):

$$\begin{cases} p_1 / p_2 = M_{\text{ach}2} T_1^{0.5} / (M_{\text{ach}1} T_2^{0.5}) \\ \rho M M_{\text{ach}} \left(\frac{\gamma RT}{M} \right)^{0.5} \\ \rho V = \frac{\rho M M_{\text{ach}} \left(\frac{\gamma RT}{M} \right)^{0.5}}{RT} = \text{const} \end{cases} \quad (3)$$

同理,将方程组(2)代入方程组(1)中的能量方程式可得关系式:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{1 + (\gamma - 1) M_{\text{ach}2}^2 / 2}{1 + (\gamma - 1) M_{\text{ach}1}^2 / 2} \quad (4)$$

将式(4)代入关联方程组(3),可将其转化为马赫数与压力值的关系式:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{M_{\text{ach}2}}{M_{\text{ach}1}} \left[\frac{1 + 0.5(\gamma - 1) M_{\text{ach}2}^2}{1 + 0.5(\gamma - 1) M_{\text{ach}1}^2} \right]^{0.5} \quad (5)$$

同理,将方程组(2)代入方程组(1)中的动量守恒方程可得关系式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\rho} + 0.5 \gamma \partial M_{\text{ach}}^2 + 0.5 \gamma M_{\text{ach}}^2 \frac{\partial T}{T} \\ + 0.5 \gamma M_{\text{ach}}^2 f \frac{\partial x}{d} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

将方程组(3)及式(5)进行积分(气体等熵指数为常数),并将结果代入式(6)得:

$$\begin{aligned} f \frac{\partial x}{d} = \frac{0.5(\gamma + 1)}{\gamma} \frac{\partial [1 + 0.5(\gamma - 1) M_{\text{ach}}^2]}{[1 + 0.5(\gamma - 1) M_{\text{ach}}^2]} \\ - \frac{\gamma + 1}{\gamma} \frac{\partial M_{\text{ach}}^2}{M_{\text{ach}}^2} + \frac{2}{\gamma} \frac{\partial M_{\text{ach}}}{M_{\text{ach}}^3} \end{aligned} \quad (7)$$

管路摩擦因数取决于雷诺数 Re 及管内壁粗糙度 μ 。在放空管路中,高速泄压引发的高流速导致较高的雷诺数,使含雷诺数的项对管路沿线的摩擦因数影响很小,故简化方程(8),忽略雷诺数的影响,即认为管路摩擦因数仅由管内壁粗糙度决定^[9]。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.011 g \left(\frac{\mu}{3.71 d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \Rightarrow \\ f = \frac{1}{\left(2.011 g \left(\frac{\mu}{3.71 d} \right) \right)^2} \end{aligned} \quad (8)$$

可对式(7)沿放空管路长度 L 进行积分得:

$$\begin{aligned} \frac{fL}{d} = \frac{0.5(\gamma + 1)}{\gamma} \ln \left(\frac{M_{\text{ach}1}^2}{M_{\text{ach}2}^2} \frac{1 + 0.5(\gamma - 1) M_{\text{ach}2}^2}{1 + 0.5(\gamma - 1) M_{\text{ach}1}^2} \right) \\ + \frac{1}{\gamma} \left(\frac{1}{M_{\text{ach}1}^2} - \frac{1}{M_{\text{ach}2}^2} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)即著名的 Fano 方程,计算程序基于关联方程式(4)、(5)、(9)及牛顿迭代计算进行编写(图 2)。

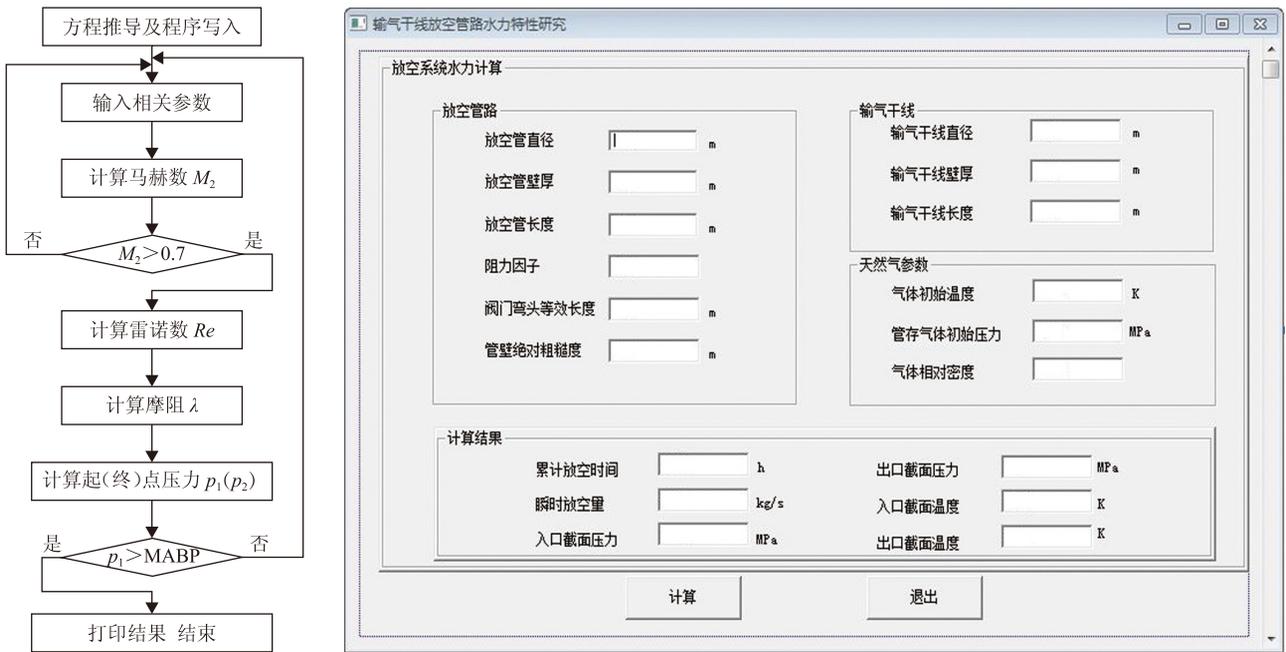


图2 输气干线放空系统水力特性计算流程及程序界面

1.2 算例分析

为检验程序的准确性,建立放空系统算例模型

(表1),并同时采用图解法求解^[10],将两者结果进行对比验证(表2)。

表1 放空系统程序算例基本参数

输气干线			放空管路			天然气参数	
管径/mm	管长/km	停输压力/MPa	管径/mm	管长/m	绝对粗糙度/ μm	相对密度	初始温度/ $^{\circ}\text{C}$
457×9	25	6.4	159×7	200	50	0.6	20

注:放空管路中阀门、弯头、三通等的等效长度取65 m,压降计算步长取1 kPa。

表2 放空系统部分计算结果汇总表

放空阶段	程序计算					图解法		
	p_0/MPa	p_1/MPa	T_1/K	p_2/MPa	T_2/K	累计放空时间 t/h	瞬时放空量 $W/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	瞬时放空量 $S/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$
超临界流	6.4	6.304 20	292.178	0.882 00	234.236	0	50.679 2	49.767 0
	4.5	4.431 00	292.178	0.620 30	239.030	0.414 56	35.010 7	34.765 6
	1.5	1.477 00	292.178	0.207 20	250.125	1.617 52	11.325 1	11.483 7
临界流	0.736 84	0.724 78	292.178	0.101 32	251.786	2.360 43	5.504 1	5.372 0
	0.684 96	0.675 40	292.178	0.101 32	256.243	2.433 01	5.127 5	5.045 5
亚音速流	0.235 46	0.232 40	292.293	0.101 32	287.986	3.544 65	1.640 5	1.656 9
	0.136 05	0.134 50	292.679	0.101 32	291.998	4.221 05	0.702 6	0.694 2
放空结束	0.101 32	0.101 32	293.150	0.101 32	293.150	4.812 07	0	0

通过程序计算可求得放空系统各时刻气源压力值所对应的瞬时放空量、累计放空时间、单位质量流率、进出口截面压力与温度、各时刻管段储气量(部分结果参见表2)。由此可知:

(1) 累计放空时间随管存压力值的降低逐渐增大,放空时间的增长速率亦逐渐增大,且在亚音速流区域呈现出急速增长趋势(图3)。

(2) 瞬时放空量及单位质量流率在泄压放空过程中呈现出线性递减的变化趋势,与放空过程所经历的

3种流态形式没有关系(图3)。

(3) 放空管路入口截面压力 p_1 及输气干线管存储气量随干线压力的降低呈现出与累计放空时间相反的变化规律,在壅塞流区域急速下降,而在亚音速流区域下降趋势平缓(图4)。

(4) 放空管路出口截面压力 p_2 在壅塞流区域急速下降至大气压力 p_a ,然后在亚音速流区域维持该压力状态不变(图4)。

(5) 因入口截面处的微弱节流,放空管路入口截面

温度 T_1 略低于输气干线气体温度 T_0 , 在壅塞流区域维持温度不变, 在亚音速流区域缓慢升温至干线气体温度, 从而达到平衡(图 5)。

(6) 放空管路出口截面温度 T_2 受初始放空时刻的强烈节流效应影响, 温度急速下降至某一最低温度, 随放空的继续进行, 温度逐渐升高, 最终达到平衡: $T_2 = T_1 = T_0$ 。该升温过程在壅塞流区域上升幅度较小, 而在亚音速流区域呈现急速回温的变化趋势(图 5)。

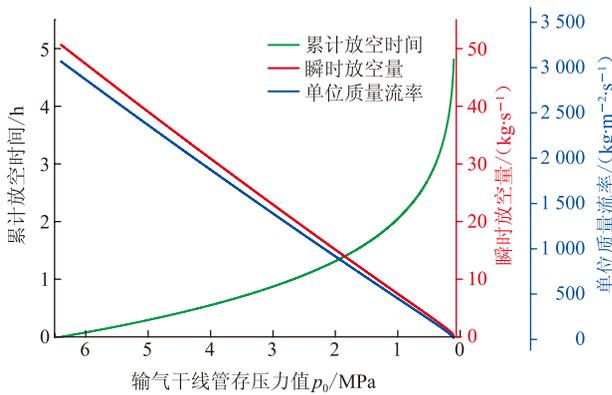


图3 放空时间、放空量、质量流率变化曲线

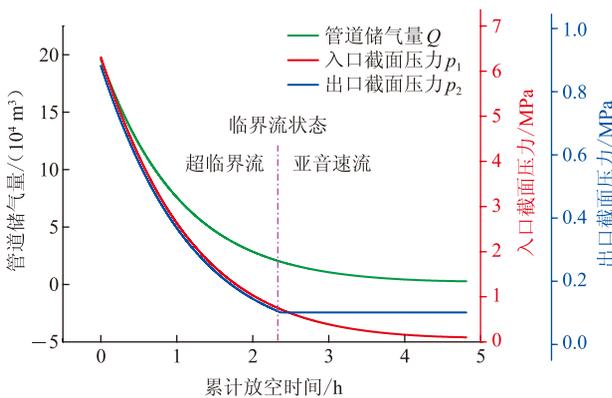


图4 储气量、进出口截面压力变化曲线

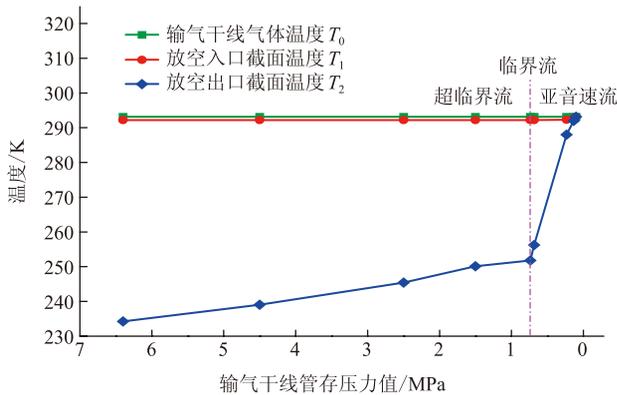


图5 放空系统内各温度变化曲线

(7) 在壅塞流状态下, 压降速率快, 压降变化值占整个放空过程总压力变化值的 90% 左右, 且持续时间

较短(小于累计放空时间的 50%), 瞬时放空量大, 导致放空管路出口处急剧降温, 初始瞬间可达 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 在亚音速流状态下, 压降速率缓慢, 压降变化值仅占整个放空过程压降变化值的 10% 左右, 但持续时间却大于壅塞流状态的持续时间, 放空完成时刻系统各压力值与大气压 p_a 一致。

(8) 利用图解法对算例进行求解, 发现瞬时放空量的程序计算结果与图解法计算结果偏差基本都控制在 2% 以内(图 6)。

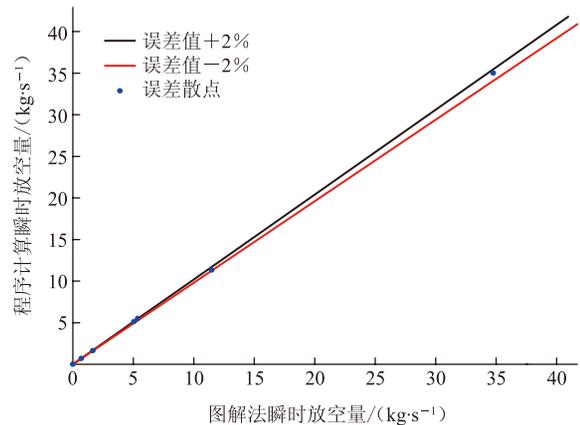


图6 瞬时放空量不同计算方法结果对比

2 影响因素分析

2.1 放空管路长度

选取放空管路长度分别为 100 m、200 m、300 m、400 m、500 m 的放空系统(其他参数采用表 1 数据), 进行水力特性影响分析。

计算结果表明: 放空管路越长, 所需的放空时间越长, 其瞬时放空量越小。放空管长为 100 m 时, 累计放空时间为 4.013 h, 初始瞬时放空量为 60.901 kg/s; 放空管长为 500 m 时, 累计放空时间为 6.898 h, 初始瞬时放空量为 36.662 kg/s, 累计放空时间和初始瞬时放空量均较管长为 100 m 时增加近两倍。相同管存压力条件下, 放空管越长, 出口截面压力越低, 出口截面温度越高, 但入口压力及温度基本不随放空管长度改变。同时, 放空管越长, 超临界流放空时间占累计放空时间的比例越小, 亚音速流则相反, 故其总体放空过程较为平缓(图 7)。说明在放空现场, 放空管过长将导致累计放空时间超过规定允许最长放空时间; 放空管过短则导致瞬时放空量过大, 一旦点火可能造成热负荷过大, 引发人员伤害, 而且出口温度过低, 对放空管材也

是一个考验。因此,应综合考虑管长对放空系统的影响后,确定放空管路长度。

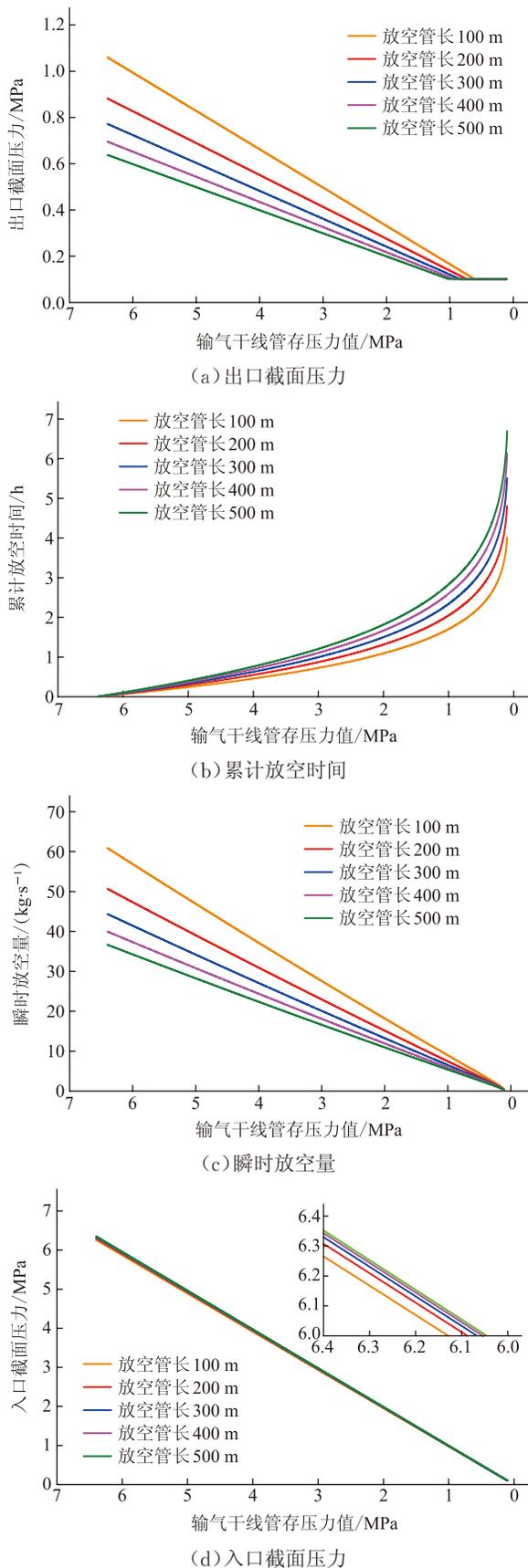


图7 放空管路长度对放空系统水力特性的影响曲线

2.2 放空管路管径

选取放空管路管径为 159×7 mm、168.3×7.1 mm、219.1×7.9 mm、273.1×8.7 mm 的放空系统(其他参数采用表 1 数据),进行水力特性影响分析。

相关计算结果表明:放空管路的管径越大,累计放空时间越短,瞬时放空量越大。当放空管路管径为 159×7 mm 时,累计放空时间为 4.812 h,初始瞬时放空量为 50.679 kg/s;当放空管路管径为 273.1×8.7 mm 时,累计放空时间为 1.180 h,初始瞬时放空量为 206.942 kg/s,说明相比放空管长,放空管径对放空系统的影响更大(图 8)。放空管径越大,超临界流放空时间占累计放空时间的比例越大,亚音速流则相反,故其总体放空过程更为剧烈。因此,应结合放空管长,综合考虑管径对放空系统的影响后,确定放空管路规格。

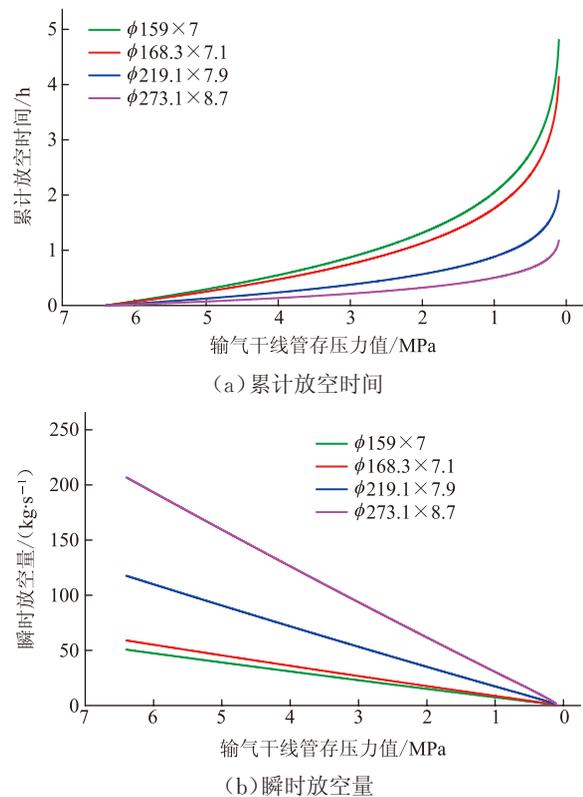


图8 放空管路管径对放空系统水力特性的影响曲线

2.3 放空管路内壁绝对粗糙度

选取放空管路内壁绝对粗糙度分别为 25 μm、50 μm、75 μm、100 μm 的放空系统(其他参数采用表 1 数据),进行水力特性影响分析。

计算结果表明:放空管路内壁绝对粗糙度越大,累计放空时间越长,瞬时放空量越小。管路绝对粗糙度为 25 μm 时,累计放空时间为 4.552 h,初始瞬时放空

量为 53.804 kg/s;绝对粗糙度为 100 μm 时,累计放空时间为 5.140 h,初始瞬时放空量为 47.451 kg/s,累计放空时间和初始瞬时放空量较绝对粗糙度为 25 μm 时的变化幅度均仅 10%左右(图 9)。我国输气管道内壁粗糙度通常取 50 μm,该程序计算的管道内壁粗糙度(25~100 μm)基本含盖了典型管道内壁粗糙度。因放空管内壁粗糙度对放空系统的影响较小,故在实际工程中,没有必要一味通过降低放空管内壁粗糙度来提高放空速率,缩短放空时间。

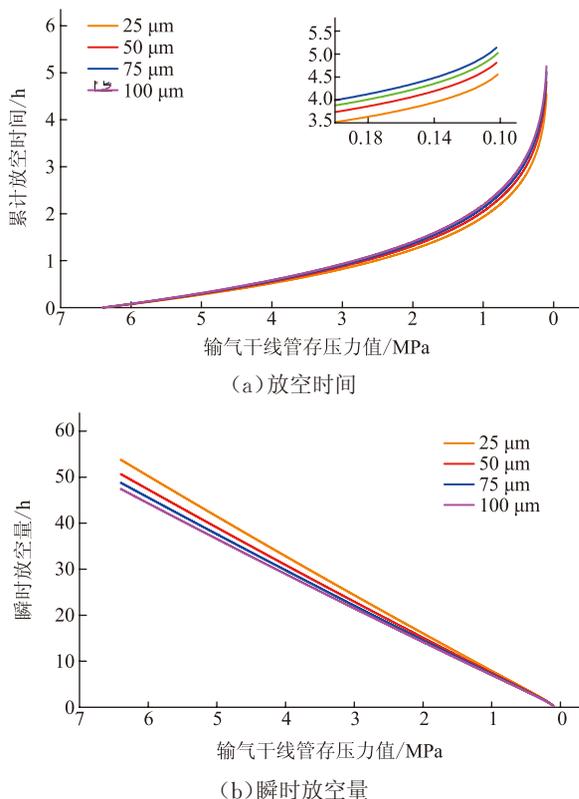


图 9 放空管路内壁粗糙度对放空系统水力特性的影响曲线

2.4 输气干线天然气温度

选取不同干线管存气体温度(冬季: -15 °C、-10 °C、-5 °C、0 °C;夏季: 20 °C、25 °C、30 °C、35 °C),进行放空系统水力特性影响分析(其他参数采用表 1 数据)。

计算结果表明:无论是冬季或夏季,干线气体温度越高,累计放空时间越短,冬季 -15 °C 和 0 °C 时累计放空时间分别为 5.276 h、5.055 h,夏季 20 °C 和 35 °C 时累计放空时间分别为 4.812 h、4.658 h,冬季累计放空时间随温度降低的增率略大于夏季,但两季节的变化幅度均在 5%以内(图 10~ 图 11),说明干线气体温度对放空系统影响很小。在实际可操作的前提下,建议将放空过程选择在当天温度较高的时段执行。

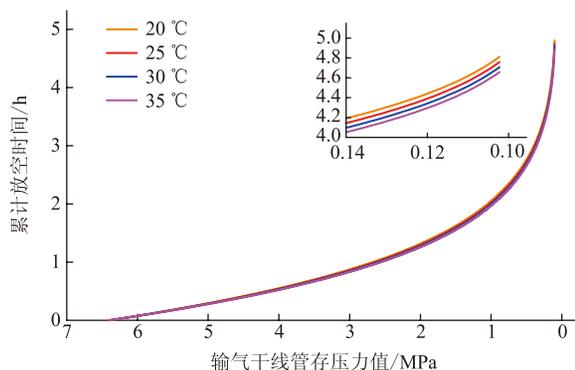
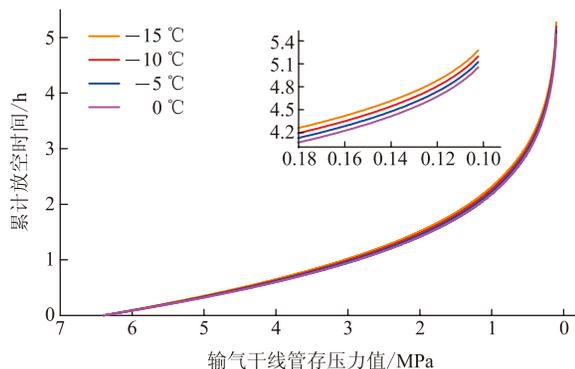


图 10 累计放空时间随干线管存压力的变化曲线

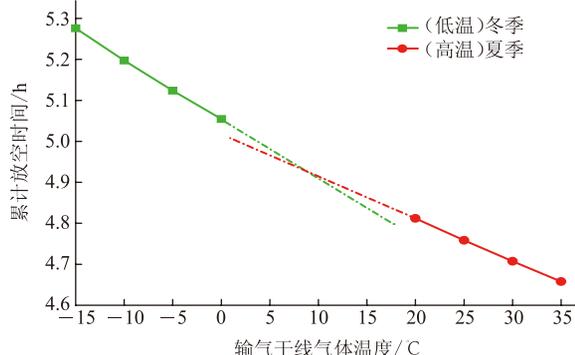


图 11 干线气体温度对累计放空时间的影响曲线

2.5 输气干线初始压力

选取输气干线初始压力分别为 6.4 MPa、8 MPa、10 MPa、12 MPa 的放空系统(其他参数采用表 1 数据),进行水力特性影响分析。

计算结果表明:对于不同的输气干线压力等级,压力等级越高,累计放空时间越长。压力为 6.4 MPa 和 12 MPa 时,累计放空时间分别为 4.812 h、5.543 h,增幅为 15.2%。但在相同管存压力条件下,不同工况对应的瞬时放空量相同,即对于相同的放空管路,其放空过程是一样的,不会随输气干线初始压力而改变(图 12)。故在累计放空时间增幅可接受的条件下,一条放空管路可以用于不同压力等级的输气干线放空作业。

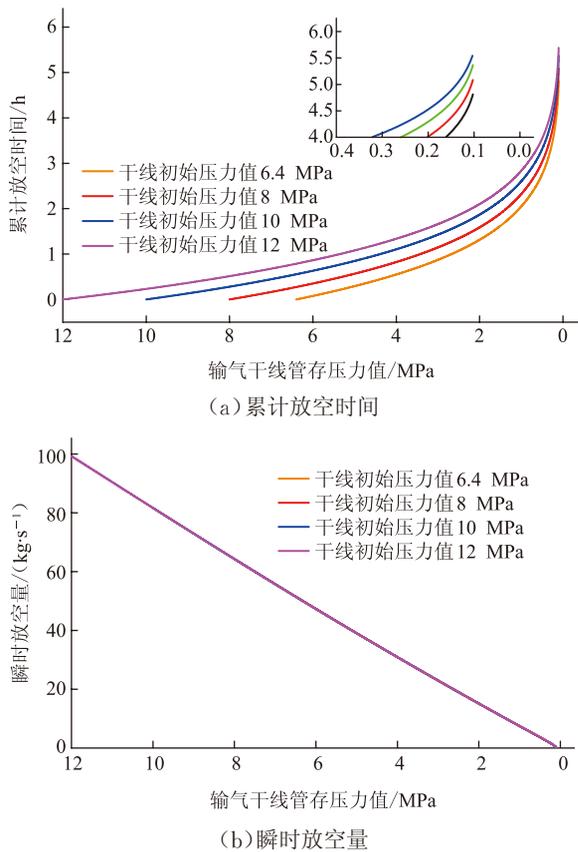


图 12 干线初始压力对放空系统水力特性的影响曲线

3 结论

(1) 基于 C 语言编写的输气干线放空系统水力特性计算程序,操作方便、计算速度快、准确性高,与图解法计算结果进行对比,误差在 2% 以内。

(2) 在输气干线放空的 3 个阶段中,超临界流状态下压降速率快,压降占整个放空过程总压降的比例大,持续时间较短,瞬时放空量大,使得放空管路出口急剧降温;亚音速流状态下压降速度缓慢,压降占整个放空过程总压降的比例小,但持续时间较长,当放空系统内各压力值与大气压一致时,放空结束。

(3) 放空管路长度和管径是影响输气干线放空系统水力特性的主要因素,放空管内壁粗糙度、干线气体温度和初始压力对放空系统水力特性的影响很小。

(4) 在累计放空时间增幅可接受的条件下,同一条放空管路可适用于不同初始放空压力输气干线的放空作业,不必针对不同压力等级而设计不同的放空管路。

(5) 可通过现场事故工况的放空数据,进一步检验计算程序及放空系统水力特性研究结果的准确性。

参考文献:

[1] 周雪漪. 计算水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

[2] American Society of Mechanical Engineers. ASME B31.8-2010 Gas transmission and distribution piping systems[S]. New York: ASME, 2010.

[3] American Petroleum Institute. API RP521 Guide for pressure relieving and depressuring system[S]. Washington D C: API, 2007.

[4] Shell DEP. DEP80.45.10.10 Gen Pressure relief, emergency depressuring, flare and vent systems[S]. Hague: Royal Dutch/Shell Group of Companies, 1996.

[5] 中华人民共和国建设部. GB 50183—2004 石油天然气工程设计防火规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.

[6] 油气田及管道建设设计专业标准化委员会. GB 50251—2003 输气管道工程设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.

[7] 宫敬, 邱伟伟, 赵建奎. 输气管道断裂过程中减压波传播特性研究[J]. 天然气工业, 2010, 30(11): 70-73.

[8] 吴岩, 宫敬. 智能控制方法在天然气管道中的应用研究[J]. 油气储运, 2006, 25(8): 29-32.

[9] 李玉星, 姚光镇. 输气管道设计与管理[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2009.

[10] 叶学礼. 图解法求天然气瞬时放空量[J]. 天然气与石油, 1999, 17(2): 1-3.

(收稿日期:2013-11-04;修回日期:2014-01-25;编辑:关中原)



基金项目: 国家科技重大专项资金资助项目“煤层气田集输系统优化技术”, 2011ZX05039-002; “煤层气田地面集输系统运行在线模拟与预测技术”, 2011ZX05039-004-006.

作者简介: 娄晨, 在读硕士生, 1990 年生, 2012 年毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事长输油气管道仿真计算的研究工作。

LOU Chen, reading master, born in 1990, graduated from China University of Petroleum (Beijing), oil & gas storage and transportation engineering, in 2012, engaged in the research of long-distance oil and gas pipeline simulation.

Tel: 15101148827, Email: louchen1990@petrochina.com.cn