输气干线放空系统放空量计算软件开发

白　雪[1]　李自力[1]　姜海斌[2]　王爱玲[2]　翁浩铭[1]

1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院，　山东　青岛　266580；
2. 中国石油西南管道昆明输油气分公司，　云南　昆明　650000

摘　要：在进行放空系统设计时需要了解瞬时放空量，但输气干线放空系统中没有相应流量计对放空量进行计量，且目前关于放空量计算的公式大多没有依据。以范诺方程、输气管路流动理论为基础，同时考虑阀门开度对放空时间以及瞬时放空量的影响，通过程序语言对放空系统瞬时放空量计算进行编写，输入输气干线内气源压力、放空管规格和阀门开度等参数，即可求解出瞬时放空量，将程序计算结果与 SPS 软件模拟结果进行对比，误差较小。对比不同阀门开度下的瞬时放空量和放空压力，分析了阀门开度的影响，可为放空系统设计及现场放空提供理论指导。

关键词：输气干线；放空系统；瞬时放空量；阀门开度；软件开发

DOI：10. 3969 /j. issn. 1006 - 5539. 2015. 06. 003

0　前言

在进行放空系统设计时，常常需要了解瞬时放空量，根据瞬时放空量大小来确定放空系统是否设置放空火炬以及放空系统天然气扩散及热辐射范围，当瞬时放空量超过 4×10^4 m^3 /h 时，需要设置放空火炬[1]。目前对放空系统瞬时放空量的求解大多采用计算公式或图解法，其中具有代表性的是四川石油管理局勘察设计研究院编写的《输气干线手册》中放空量计算公式[2]，但这些计算公式的计算结果与工程实际有偏差，图解法也只能对放空量大小进行估算[3]，因此有必要对放空系统瞬时放空量进行研究，提出一种更符合工程实际的放空系统瞬时放空量计算方法。

1　天然气放空管路放空过程描述

输气干线放空系统包括气源、放空管道和大气环境三部分[3]，高压天然气放空系统见图 1。由于高压天然气放空系统放空管路距离短，压降大，放空管段沿途气体流动参数：温度 T、密度 ρ、流速 V、压力 p、气体马赫数 M_{ach} 等均随时间变化，且差异较大，该过程属于非定常流动[4-5]。

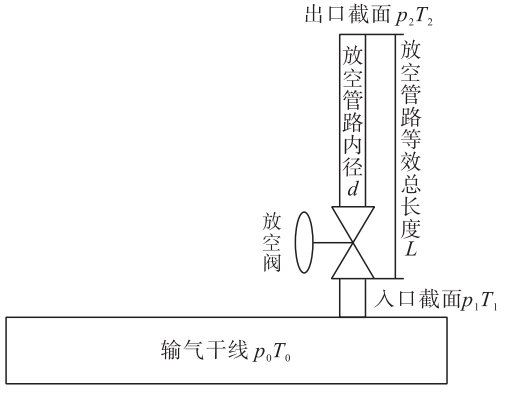

图 1　高压天然气放空系统示意图

放空过程需要经历临界流和亚临界流两种流态：

1)临界流状态：放空初始时刻，输气干线内气源压力 p_0 较高，使得放空管路入口截面压力 p_1 也较高，出口截面压力 p_2 远大于环境大气压力 p_a，出口截面气体流速达到临界流速，出口截面气体马赫数 M_{ach2} 等于 1，此时放

收稿日期：2015 - 06 - 15

基金项目：国家科技重大专项大型油气田及煤层气开发(2008 ZX 05017 - 04 - 01)；中央高校基本科研业务费专项资金资助(15 CX 06071 A)

作者简介：白　雪(1991 -)，女(蒙古族)，内蒙古通辽人，硕士研究生，主要从事油气储运系统安全工程技术研究。

空过程将达到最大瞬时放空量。出口截面的气体依靠剩余压力差(p_2-p_a)进行膨胀,直至p_2降至p_a。随着放空过程时间推移,p_0、p_1、p_2均逐渐减小,但在p_2降至p_a之前,放空过程均处于临界流状态,在新的压力条件下放空过程达到新的最大瞬时放空量[3,6-7]。

2)亚临界流状态:当放空过程越过临界流继续泄压时,气体进入亚临界流状态,p_1继续下降,p_2保持不变(仍等于p_a),出口流速逐渐减小,$M_{ach2}<1$,瞬时放空量也随之下降,在p_0降至p_a之前,该流态将持续进行,直至天然气放空系统内各压力值相等$p_0=p_1=p_2=p_a$,放空过程结束[3,6-7]。

2 放空系统放空量计算软件开发

2.1 天然气放空系统基本方程

输气干线放空系统放空量计算,以可压缩流体摩擦绝热一维流动的范诺方程和输气管路流动理论为基础进行求解。

2.1.1 放空管路摩阻系数

放空管路摩阻系数f与雷诺数Re及管内壁绝对粗糙度e有关,计算公式如式(1)。天然气放空系统进行放空时,气流速度较高,雷诺数Re较大,对放空管路摩阻系数影响很小,因此一般在计算时可忽略Re的影响[8]。

$$\frac{1}{\sqrt{f}}=-2.01\lg\left(\frac{e}{3.71d}+\frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \tag{1}$$

式中:f为放空管路摩阻系数;Re为雷诺数;e为管内壁绝对粗糙度,m;d为放空管路内径,m。

2.1.2 气体马赫数

气体马赫数需要采用迭代方法进行求解[6],迭代式如式(2)。入口截面气体马赫数M_{ach1}和出口截面气体马赫数M_{ach2}的大小均未知,需要单独进行求解:

1)M_{ach1}求解:将该迭代式转化为关于M_{ach1}的迭代计算式,假设M_{ach2}为定值,通过迭代求解出M_{ach1}。

2)M_{ach2}求解:将该方程式转化为关于M_{ach2}的迭代计算式,将上面求得M_{ach1}作为已知值代入,通过迭代求解出M_{ach2}。

重复1)、2)过程,当求得的M_{ach1}及M_{ach2}均达到稳定收敛时,稳定收敛迭代值即为所求的M_{ach1}和M_{ach2}[6,9]。

$$fL/d=\frac{0.5(\gamma+1)}{\gamma}\ln\left\{\frac{M_{ach1}^2[1+0.5(\gamma-1)M_{ach2}^2]}{M_{ach2}^2[1+0.5(\gamma-1)M_{ach1}^2]}\right\}+\left(\frac{1}{M_{ach1}^2}-\frac{1}{M_{ach2}^2}\right)\gamma \tag{2}$$

式中:M_{ach1}为入口截面气体马赫数;M_{ach2}为出口截面气体马赫数;L为放空管路等效总长度,m;$\gamma=C_P/C_V$为气体等熵指数,其中C_P为定压比热,J/(kg·K),C_V为定容比热,J/(kg·K)。

2.1.3 气体压缩因子

天然气压缩因子Z通常可以通过通用图、经验公式以及状态方程进行求解,为了应用于计算机求解以及得到较高精度的结果,而采用状态方程进行迭代求解,本文采用PR方程[10],迭代式为:

$$Z^3-(1-B)Z^2+(A-2B-3B^2)Z-(AB-B^2-B^3)=0 \tag{3}$$

式中:$A=\frac{ap}{R^2T^2}$,$B=\frac{bp}{RT}$,$a=0.457\ 24\frac{R^2T_c^2}{p_c}$,$b=0.077\ 80\frac{RT_c}{p_c}$;$R$为气体常数,kJ/(kg·K);$T_c$为气体临界温度,K;$p_c$为气体临界压力,kPa;$p$为气体压力,kPa;$T$为气体温度,K。

2.1.4 放空管路阻力因子

气体马赫数迭代计算式(2)左侧项fL/d为放空管路阻力因子,包括放空管路入口阻力因子、放空管路阻力因子以及放空管路出口阻力因子。放空管路入口、出口阻力因子可通过查阅相关文献获得[6],而放空管路阻力因子需要通过计算进行求解,首先需要计算出放空管路等效总长度L以及放空管路摩阻系数f,其中放空管路等效总长度L包括弯头、三通、阀门等效长度以及放空管段本身管长,然后根据fL/d即可求得放空管路阻力因子[3]。

2.1.5 放空阀入口截面参数

放空气体通过输气干线管道进入放空管路($p_0T_0\rightarrow p_1T_1$)的过程可视为一个典型的等熵热膨胀过程[4,6],因此根据热力学基本公式可以得出输气干线内气源压力与放空阀入口截面压力、输气干线内气源温度与放空阀入口截面温度计算关系式(4)、(5),结合流体流动基本方程和基本热力学方程,可以得出放空阀入口截面压力与出口截面压力、入口截面温度与出口截面温度计算关系式[4](6)、(7):

$$\frac{p_0}{p_1}=[1+0.5(\gamma-1)M_{ach1}^2]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{4}$$

$$\frac{T_0}{T_1}=\left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}=1+0.5(\gamma-1)M_{ach1}^2 \tag{5}$$

$$\frac{p_1}{p_2}=\frac{M_{ach2}T_1^{0.5}}{M_{ach1}T_2^{0.5}} \tag{6}$$

$$\frac{T_1}{T_2}=\frac{1+(\gamma-1)M_{ach2}{}^2/2}{1+(\gamma-1)M_{ach1}{}^2/2} \tag{7}$$

式中:p_0为输气干线内气体压力,MPa;p_1为放空阀入口截面压力,MPa;T_0为输气干线内气源温度,K;T_1为放空阀入口截面温度,K;p_2为放空阀出口截面压力,MPa;T_2为放空阀出口截面温度,K。

2.1.6 瞬时放空量

放空系统设计时需要根据瞬时放空量大小确定放

空系统是否设置放空火炬，放空量大小通过调节阀门开度控制，控制的瞬时放空量越小，放空系统设计处理量越小[11]。瞬时放空量计算公式[3]为：

$$W = \frac{\pi d^2}{4} M_{ach1} p_1 \left(\frac{\gamma M}{RT_1 Z_1}\right)^{0.5} \tag{8}$$

式中：W 为瞬时放空量，kg/s；M 为气体摩尔质量，kg/mol；Z_1 为截面处天然气压缩因子。

2.1.7　累计放空时间

放空时间受阀门开度、输气干线内气源压力等影响，需要通过调节放空阀开度来控制放空时间，紧急情况下输气干线 2 个阀室之间线路放空时，需要在 10 ~ 12 h 内完成[12]。目前国内外关于放空时间计算方法较少[7]，对于管径较大的输气干线在事故状态下两端阀室截断进行放空时，放空时间的计算可采用式(9)进行计算[13]：

$$t = \frac{V}{\mu F} \sqrt{\frac{\frac{M}{ZRT}}{\gamma g \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}} \ln \frac{p_{01}}{p_{02}} \tag{9}$$

式中：t 为累计放空时间，s；p_{01}、p_{02} 为放空前、后管道内气体绝对压力，MPa；V 为放空管段容量，m^3；μ 为阀门开启度；F 为放空阀全开时截面积，m^2；g 为重力加速度，N/kg，取 9.8；T 为管道温度，K。

2.2　软件程序计算流程

首先根据式(1)确定放空管路摩阻系数以及放空管路等效总长度，从而得出放空管路阻力因子 fL/d，用于气体马赫数迭代计算，然后根据气体所处的不同流态进行瞬时放空量的计算。

2.2.1　临界流状态下瞬时放空量

随着 p_2 逐渐减小，当 p_2 降至 p_a 时，临界流结束，此时根据式(4)求得临界气源压力 p_{0c}，即当气源压力降至临界气源压力之前放空气体均处于临界流状态。临界流状态下放空管出口截面气体流速达到临界流速，$M_{ach2}=1$，根据式(2)迭代计算出 M_{ach1}，将其代入式(4)、(5)，即得放空管入口截面压力 p_1 以及入口截面温度 T_1，再根据式(8)计算求得临界流状态下瞬时放空量。

2.2.2　亚临界流状态下瞬时放空量

亚临界流状态下 M_{ach2} 大小未知，需先假设 $M_{ach2}=1$，根据式(2)迭代计算出 M_{ach1}、M_{ach2}，将其代入式(4)、(5)，即得放空管入口截面压力 p_1 以及入口截面温度 T_1，再根据式(8)计算求得亚临界流下瞬时放空量。

具体程序计算流程见图 2，根据该计算流程编制放空量计算软件，可实现通过在该窗体中“输入参数”中输入基本参数以及阀门开度、输气干线气源压力等参数，即可计算得到不同流态下气源压力对应的入口截面压力、入口截面温度、瞬时放空量以及累计放空时间的功能。

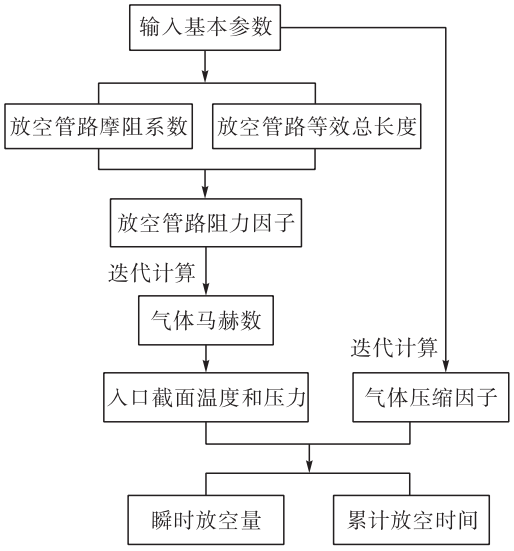

图 2　程序计算流程图

2.3　实例计算

使用编制软件对事故状态下输气干线两端阀室截断时放空量进行计算，放空系统基本参数见表 1，程序计算结果见表 2。将计算结果与 SPS 软件模拟瞬时放空量[14]进行对比，检验计算软件结果的准确性。

通过对计算结果分析可知：

1)在放空过程中瞬时放空量与放空压力值呈线性递减变化关系，与放空气体所处流态无关，见图 3。

2)输气干线内气体压力值 p_0 及放空管路入口截面压力 p_1 均随放空时间的增大而逐渐降低，其降低速率也逐渐减小，在临界流区域急速下降，压降变化值较大，而在亚临界流区域下降幅度平缓，压降变化值较小，见图 4。

3)利用 SPS 软件对算例瞬时放空量进行计算，发现程序计算结果与模拟得到的结果误差较小，验证了软件的准确性。

表 1　放空系统程序计算实例基本参数

输气干线			放空管路			气源参数		
管径规格/(mm×mm)	管长/km	气源初始压力/MPa	管径规格/(mm×mm)	管长/km	绝对粗糙度/μm	阀门开度	初始温度/℃	摩尔质量/(g·mol^{-1})
φ 1 016×17.5	32	7	φ 312×6	200	50	全开	20	18.9

表 2　放空系统部分计算结果汇总表

气体流态	p_0 /MPa	p_1 /MPa	T_1 /K	累计放空时间 /h	编程计算 W /(kg·s^{-1})	SPS 模拟 W /(kg·s^{-1})
临界流	7	6.84	292.49	0	312.88	310.75
	5	4.88	292.49	0.63	218.78	216.49
	3	2.94	292.49	1.57	129.17	131.25
	1	0.98	292.49	3.6	42.27	40.86
	0.584	0.571	292.56	4.3	24.59	23.66
亚临界流	0.4	0.388	292.63	4.95	16.85	16.17
	0.3	0.29	292.75	5.83	12.58	13.15
	0.191	0.187	292.93	6.67	8.01	7.69
放空结束	0.101	0.101	293.15	7.93	0	0

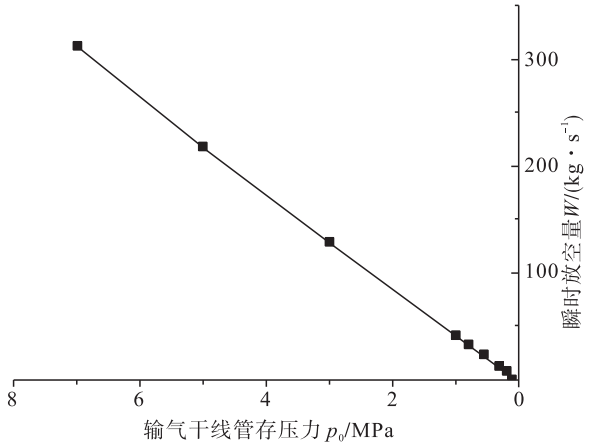

图 3　瞬时放空量与输气干线内气体压力变化关系曲线

2.4　阀门开度影响分析

阀门开度不同所对应的放空管路阻力因子也不同，由式(2)可知，放空管路阻力因子影响气体马赫数，进而影响阀门入口截面压力以及放空量大小。由式(9)可知，阀门开度影响气源压力，进而影响管道内气体临界流动状态。因此，放空系统中放空阀与管道流动的关系与相互影响是通过阀门开度影响气体马赫数以及气源压力而建立的。天然气放空过程中常需要通过调节阀门开度来控制放空压力、放空量以及放空时间，有必要对阀门开度的影响进行分析，使用编制软件对表 1 算例在不同阀门开度下进行计算，得出输气干线气体压力与放空时间关系以及放空初始时刻最大瞬时放空量与阀门开度的关系见图 4 ~ 5，由此可知：

1)阀门开度对放空过程中输气干线内气体压降及放空时间有较大影响，随着阀门开度的增大，压降将显著增大，因此一般在放空开始时，为避免压降过大导致温度急剧降低，造成冰堵，放空阀的开度应较小。

2)随着阀门开度的增大，最大瞬时放空量逐渐增大，当阀门开度增大至 0.4 后，最大瞬时放空量与阀门开度成线性递增变化关系，变化幅度较小，由此可见在放空过程中通过调节阀门开度控制放空量时，阀门开度在 0.4 以下时能够更有效调节放空量大小。

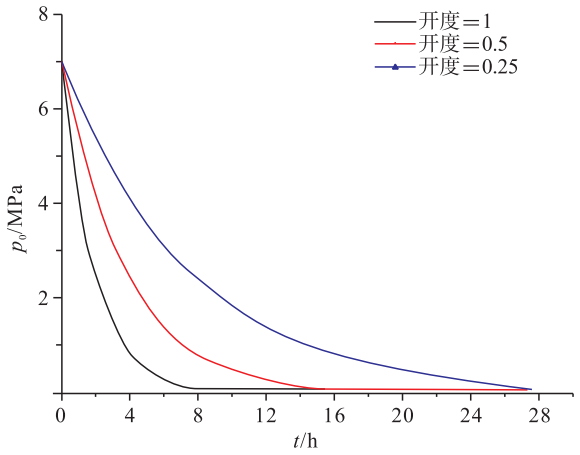

图 4　不同阀门开度下输气干线内气体压力随放空时间变化

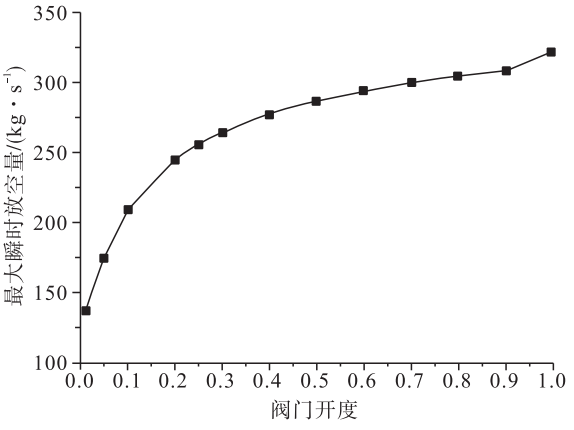

图 5　瞬时放空量随阀门开度变化

3　结论

1)基于程序语言编写天然气放空系统放空量计算软件，可实现输入气源压力、放空管规格和阀门开度等参数，求解出不同气源压力对应的瞬时放空量，根据计算得到的最大瞬时放空量来确定是否设置放空火炬，为

放空系统设计提供参照。

2)瞬时放空量与放空压力值呈线性递减变化关系,与放空气体所处流态无关。随着阀门开度的增大,最大瞬时放空量逐渐增大,当阀门达到一定开度后瞬时放空量增大幅度较小,该阀门开度以下能够更有效地调节放空量大小。

3)临界流区域压降速度快,压降变化值较大;而亚临界流区域压降速度缓慢,压降变化值较小。阀门开度对放空过程中气体的压降影响较大,随着阀门开度增大,压降将显著增大。在放空开始时,为避免压降过大导致温度急剧降低,造成冰堵,放空阀的开度应较小。

4)软件计算结果与 SPS 软件模拟结果进行对比,误差较小,符合现场工程实际。

参考文献:

[1] 晏　伟. 输气站场放空系统设计思路[J]. 石油工程建设,2012,38(6):39 - 43.
Yan Wei. Venting System Design Thinking of Gas Transmission Station[J]. Petroleum Engineering Construction, 2012, 38 (6): 39 - 43.

[2] 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.
Ye Xueli. Solving Instantaneous Venting Volume of Natural Gas by Graphical Method[J]. Natural Gas and Oil, 1999, 17 (2): 1 - 3.

[3] 娄　晨,林　棋. 基于天然气放空系统的水力计算软件开发[J]. 石油工业技术监督,2014,(4):1 - 6.
Lou Chen, Lin Qi. Software Development of Hydraulic Calculation Based on Gas Venting System[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2014, (4): 1 - 6.

[4] 娄　晨,宫　敬,林　棋,等. 输气干线放空系统水力特性[J]. 油气储运,2014,33(5):542 - 548.
Lou Chen, Gong Jing, Lin Qi, et al. Hydraulic Characteristics of Gas Transmission Line Venting System[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2014, 33 (5): 542 - 548.

[5] Xiong Yi, Zhang Liping, Zhu Tingting. Research of Emergency Venting Time in Natural Gas Pipeline Accidents with SPS[J]. Procedia Engineering, 2014, (84): 927 - 932.

[6] 叶学礼. 天然气放空管路水力计算[J]. 天然气工业,1999,19(3):77 - 81.
Ye Xueli. Hydraulic Calculation of Natural Gas Venting Pipeline[J]. Natural Gas Industry, 1999, 19 (3): 77 - 81.

[7] 吴　渊,金　金. 天然气输气管道放空时间的计算[J]. 辽宁化工,2014,43(9):1207 - 1209.
Wu Yuan, Jin Jin. Venting Time Calculation of Natural Gas Transmission Pipeline [J]. Liaoning Chemical Industry, 2014, 43 (9): 1207 - 1209.

[8] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京:石油工业出版社,2009:123 - 127.
Yuan Enxi. Engineering Fluid Mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 123 - 127.

[9] Joseph M, Brian A M. Direct Calculation of The Average Local Mach Number in Converging - diverging Nozzles [J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 24 (1): 111 - 115.

[10] 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,2009:33 - 35.
Li Yuxing, Yao Guangzhen. Gas Pipeline Design and Management [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2009: 33 - 35.

[11] 余　洋,黄　静,陈　杰,等. 天然气站场放空系统有关标准的解读及应用[J]. 天然气与石油,2011,29(5):11 - 14.
Yu Yang, Huang Jing, Chen Jie, et al. Interpretation and Application of Standard Relative to Flare Systems at Natural Gas Stations[J]. Natural Gas and Oil, 2011, 29 (5): 11 - 14.

[12] 蒲丽珠,陈利琼,杨文川. 天然气管道放空设置方式探讨[J]. 天然气与石油,2014,32(1):50 - 52.
Pu Lizhu, Chen Liqiong, Yang Wenchuan. Setting of Natural Gas Vent Pipe[J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32 (1): 50 - 52.

[13] 谢跃辉,吴东容. 长距离输气管道放空时间计算方法研究[J]. 化学工程与装备,2015,(2):128 - 130.
Xie Yuehui, Wu Dongrong. Study on Venting Time Calculation Method for Long Distance Gas Transmission Pipeline [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2015, (2): 128 - 130.

[14] 刘　俊,张　磊,程小姣. 基于 SPS 天然气管道紧急放空的动态模拟[J]. 石油化工应用,2013,32(11):81 - 83.
Liu Jun, Zhang Lei, Cheng Xiaojiao. Based on Dynamic Simulation of Natural Gas Pipeline Emergency Blow-Down SPS[J]. Petrochemical Industry Application, 2013, 32 (11): 81 - 83.