

文章编号: 1000-8241(2015)05-0500-07

天然气管道减压阀节流温降规律

尤泽广¹ 李玉坤¹ 陈晓红² 韩涛¹ 许立伟³ 陈建兴³

1. 中国石油大学(华东), 山东青岛 266580;
2. 中油管道廊坊投产运行公司, 河北廊坊 065000; 3. 中石油北京天然气管道有限公司, 北京 100101

摘要: 在给定组分条件下, 天然气水合物的生成与否主要取决于压力和温度, 正确地预测天然气节流后的温度, 可为水合物的防治提供技术依据。利用 FLUENT 有限元分析软件, 建立 RMG530 减压阀内流体有限元模型, 模拟不同工况条件下阀内流体的分输节流过程, 分析阀内流体流速、压力与温度变化规律, 比较入口压力、节流压降和环境温度等因素对减压阀节流温降过程的影响, 并利用分输站场节流温降测试数据验证模拟结果的正确性。结果表明: 节流分输过程阀内天然气流动复杂, 呈强湍流特性; 阀笼节流孔内流速激增, 但压力、温度骤降, 水合物析出在节流孔内完成; 环境温度、入口压力和节流压降是影响节流温降过程的主要因素, 节流温降随压降差值的增大而增大, 随入口压力和初始温度的增大而减小。(图 16, 表 1, 参 23)

关键词: 天然气; 减压阀; 有限元; 流场分析; 节流温降

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.05.009

Temperature drop mechanism for gas regulator of natural gas pipeline

YOU Zeguang¹, LI Yukun¹, CHEN Xiaohong², HAN Tao¹, XU Liwei³, CHEN Jianxing³

1. China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580; 2. Commissioning & Operation Company, China Petroleum Pipeline Bureau, Langfang, Hebei, 065000; 3. PetroChina Beijing Gas Pipeline Co. Ltd., Beijing, 100101

Abstract: Under the conditions of given components, generation of gas hydrate is decided by pressure and temperature. Accurate prediction of gas temperature after throttling can provide technical foundation for prevention and control of hydrates. In this regard, the finite-element model for fluids within RMG530 gas regulator was established with the finite-element analysis software FLUENT, in order to simulate distribution and throttling process of fluids within the gas regulator under different conditions. Specifically, the model was used to simulate the variation of internal fluid velocity, pressure and temperature, and analyze the effect of inlet pressure, pressure drop and ambient temperature on the temperature drop when gas flows through gas regulator. In addition, testing data for temperature drop obtained in gas offtake stations were used to verify the accuracy of simulation results. Research results show that the gas flow field in the regulator is complicated, with intense turbulent flow characteristics. In the gas throttling process, flow velocity increases sharply while pressure and temperature plunge, providing the suitable condition for precipitation of hydrates. Ambient temperature, inlet pressure and pressure drop are key factors for the temperature drop in throttling. The temperature drop increases as pressure drop increases, and decreases as inlet pressure and initial temperature increase. (16 Figures, 1 Table, 23 References)

Key words: natural gas, gas regulator, finite element, flow-field analysis, temperature drop when gas flowing through gas regulator

长输天然气管道运输过程中, 通常采用提高气体压力的方法降低运输成本。主管道的高压力天然气在经分输站进入相对低压管道时, 减压阀处由于摩擦耗能产生较大的节流压降和温降。我国的天然气长输管道(陕京管道和西气东输管道)沿线地区秋冬季节温度

较低, 减压阀分输过程中, 天然气流经节流部位时, 由于流通面积骤减, 流通受阻, 产生强烈的涡流, 同时由于节流效应温度降低, 压力波动剧烈, 天然气水合物极易在节流通道内析出凝结, 引起减压阀及其上下游管道形成严重的冰堵, 甚至导致管道停输。

在一定的压力条件下,温度是天然气水合物生成与否的关键因素。节流温度低于水合物的露点,天然气水合物析出;高于水合物的露点,已形成的水合物将会分解,因此准确预测减压阀分输过程中的节流温降趋势是防治天然气水合物生成的前提。目前,国内主要采取建立数学模型的方法预测节流温降过程,李颖川等^[1]基于能量守恒原理和范德华混合规则,采用 Peng-Robinson 方程建立了天然气节流温降机理模型。李玉星等^[2]从伯努利方程和绝热膨胀方程入手,结合 BWRS 方程给出了天然气节流温降计算方法。这两种方法都只能用于单相气体的节流温降计算,数学模型计算得到的是节流温降平均值。由于天然气分输减压阀结构复杂,节流过程温度分布极不均匀,因此采用数学建模预测节流温降规律的实际参考价值不大。

以 RMG530 减压阀为研究对象,建立阀内流体三维有限元模型,利用 FLUENT 有限元分析软件,获得了不同工况条件下分输过程流体流速、压力和温度的不均匀分布规律,分析得出了天然气入口压力、节流压降、天然气入口温度对节流温降的影响。该研究结果可为分输站冰堵的防治提供依据,降低防治成本,避免防治措施的盲目性。

1 节流降温效应

天然气流经减压阀阀笼时,流通面积骤缩,产生强烈的涡流,同时由于无法与周围环境进行充分的热量交换,造成阀内温度的骤降,该过程称为节流效应。节流效应(又称焦耳-汤姆逊效应)的大小通常用等焓过程中的温度变化与压力变化之比的极限表示,其值 μ_j 称为绝热节流系数。

$$\mu_j = \frac{\partial T}{\partial p} = -\frac{1}{c_p} \left[\frac{\partial \mu}{\partial p} \right]_T - \frac{1}{c_p} \left[\frac{\partial(\rho V)}{\partial p} \right]_T \quad (1)$$

式中: μ 为比热力学能, J/kg; c_p 为气体的比定压热容, J/(kg·K); T 为气体的热力学温度, °C; V 为比体积, m³/kg。

μ_j 由热力学能和流动功决定,其随压力、温度的变化而变化^[3-6]。当节流后温度降低时, $\mu_j > 0$, 产生节流冷效应;当节流后温度升高时, $\mu_j < 0$, 产生节流热效应;对于理想气体,节流前后温度不变, $\mu_j = 0$, 产生零效应。天然气分输过程中气体流经阀笼时流通面积骤缩,阀笼处产生强烈扰动和摩擦;分输后压力减小,分

子间距增大,必须通过吸收热量来克服分子间吸引力。摩擦和分子间位能的增加产生节流冷效应,造成分输气体温度的降低。

节流温降多采用绝热流动能量方程^[7-9]:

$$h_1 + \frac{1}{2}c_1^2 = h_2 + \frac{1}{2}c_2^2 \quad (2)$$

式中: h 为焓变; c 为流体流速, m/s。

节流前后距节流部位较远的位置,流体速度差值较小,节流动能差较焓值可以忽略,上式可简化为 $h_1 = h_2$, 节流前后为绝热等焓过程。然而,由于节流过程流通面积骤减,流体流动速度迅速增大,节流动能差较大,节流过程并非等焓过程,因此节流前后存在前降后升的焓变。如果按照绝热等焓过程计算分输节流温降,温度计算误差必然很大。建立流体有限元模型,可以模拟分输动态过程的温降情况,计算结果实际参考价值更大。

2 流体模型的建立

RMG530 减压阀由阀体、阀杆、阀盖、阀板、阀套、阀笼和阀密封等组成,在分输减压过程中通过调节阀杆带动阀套上下滑动,进而控制阀笼的开度,达到节流降压的目的。根据结构图纸建立等比例阀体模型,减压阀规格为 DN150/300, 阀体进口端直径为 150 mm, 出口端直径为 300 mm; 阀笼是分输减压阀节流部位,流体流通部位为直径 1 cm 的节流孔。为了减少网格划分的工作量和计算时间,并确保计算结果的准确性,对减压阀阀笼流通区域进行简化,按照实际孔的位置分布和大小,将阀笼的小圆孔简化成面积相等的长条状通路(图 1、图 2)。

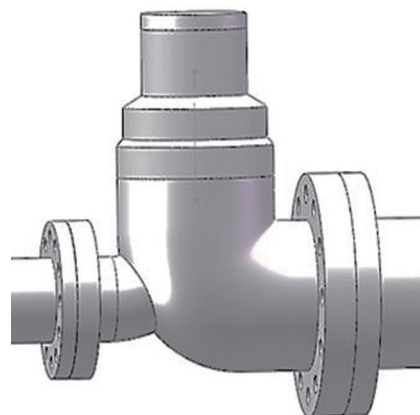


图 1 RMG530 减压阀外观图

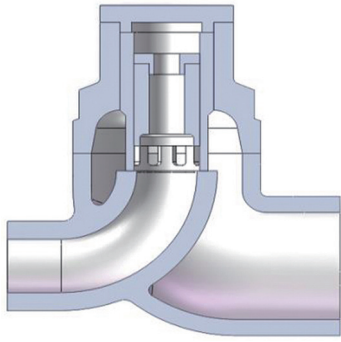


图2 RMG530减压阀内部结构图

考虑阀体运行的实际工况,减压阀运行调压范围为2~6 MPa。冬季工况条件下环境温度为-10℃,天然气入口压力为8 MPa,出口压力为2 MPa,流量为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$;夏季工况条件下环境温度为30℃,天然气入口压力为6 MPa,出口压力为3.5 MPa,流量为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$;不同的调压范围对应不同的阀体开度,根据节流降压范围,对3种开度条件下的节流分输过程进行模拟计算(图3)。

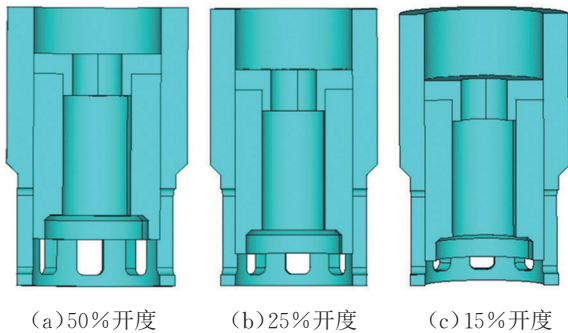


图3 不同开度下减压阀阀笼模型

利用 ANSYS ICEM CFD 建立流体模型。应用 O 形网格技术细化近表面的网格,可以显著提高曲率较大处网格质量,提高模拟计算的准确性(图4)^[10]。

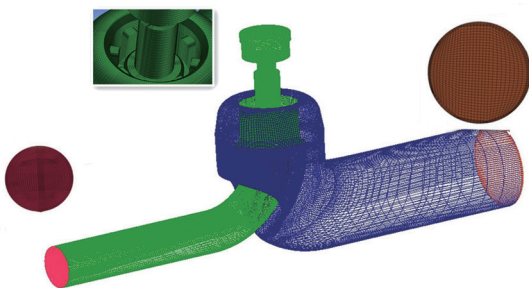


图4 减压阀内流体的网格模型

3 流体的节流效应分析

为了获得节流过程阀内流体的温度、压力分布规

律,对冬季工况的节流过程进行分析(图5~图11),环境温度为-10℃,减压阀入口压力为8 MPa,出口压力为2 MPa。模拟计算采用流体有限元软件 FLUENT,设置压力入口和出口边界条件。解的格式采用分离解和绝对速度,流体模型选用 $k-\epsilon$ 湍流模型。

根据工况条件下阀内流体的速度流线和阀笼处速度云图(图5、图6),减压阀内部流场非常复杂,在进气管段流体的流速分布较均匀,入口流速较低,当天然气流经阀笼时,节流孔流通面积突然减小,受节流效应的影响流体流速增大,快速流动的流体呈喷射状,节流通道内局部流速达到578 m/s。高速气流在喷射流的牵引下直接进入阀腔,在壁面的阻挡和摩擦力共同作用下,在阀笼周围形成数量众多的相同旋向的旋涡。阀笼部位流速变化剧烈,在远离阀笼部位的出口处流速大幅度下降。



图5 节流过程减压阀内流体速度流线图(m/s)

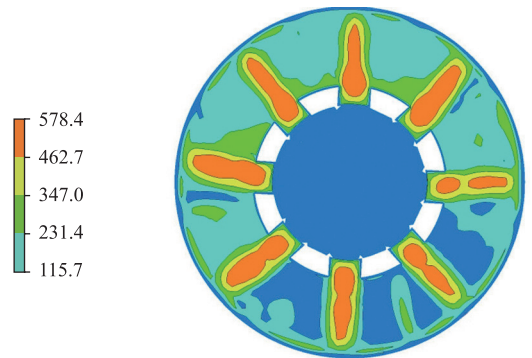


图6 减压阀阀笼处的速度云图(m/s)

根据工况条件下阀内流体的压力分布云图和阀笼处压力云图(图7、图8),压力波动主要出现在阀笼处,入口段压力保持在8 MPa,出口压力为2 MPa。阀笼处由于流通面积骤减,流体流通受阻,压力迅速下降。节流孔内压力由7.85 MPa迅速降至1.43 MPa,受高速喷射流体冲击的位置出现局部高压区,压力达到5.5 MPa。

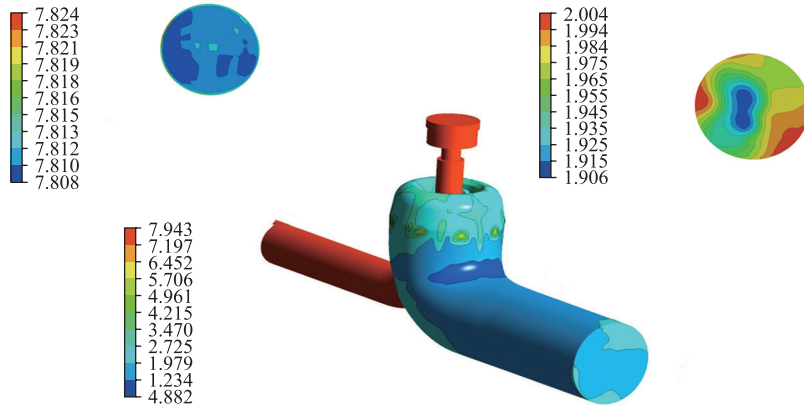


图7 节流过程减压阀内压力云图(MPa)

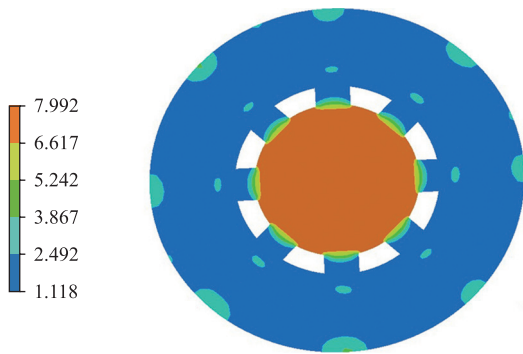


图8 减压阀阀笼处的压力云图(MPa)

根据节流过程的温度分布云图(图9~图11), 阀体入口温度为环境温度263 K, 出口最低温度为

212 K, 前后温差为51 K。阀笼是分输减压阀的节流部位, 天然气分输过程中由于节流效应, 阀笼处天然气流速加快, 压力骤降。流体的温度与流速压力分布规律一致, 节流孔为压力和温度变化最大、流速最快的位置; 阀笼处温度分布很不均匀, 温度最低达到184 K, 远离阀笼的位置温度缓慢回升, 距离减压阀出口0.5 m处温度已维持在210 K左右。节流过程温度显著低于节流压力下水合物的露点, 水合物在压力波动的激励下极易在节流孔内析出。计算结果显示, 水合物在节流孔出孔前已基本完全析出, 远离节流孔的位置压力和温度缓慢回升, 水合物析出较少^[11-14]。

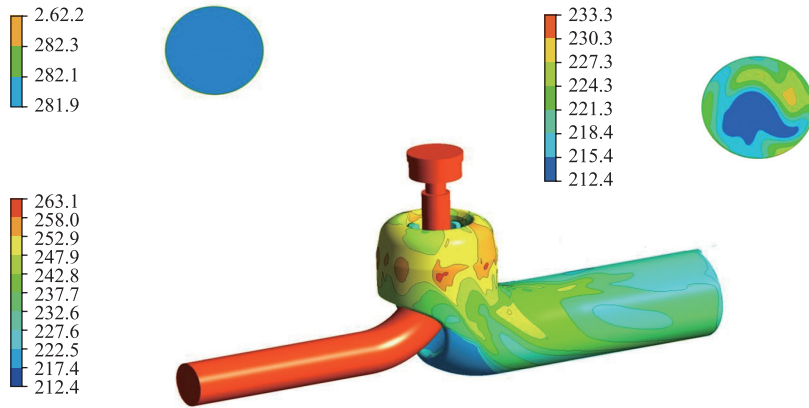


图9 节流过程减压阀壁面温度云图(K)

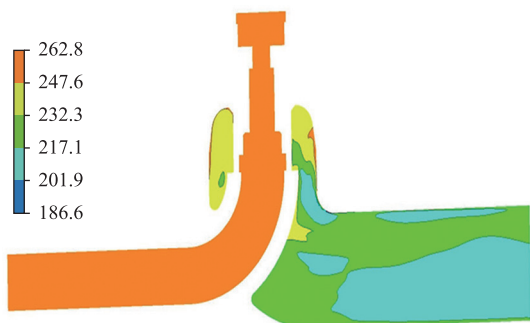


图10 减压阀对称面的温度云图(K)

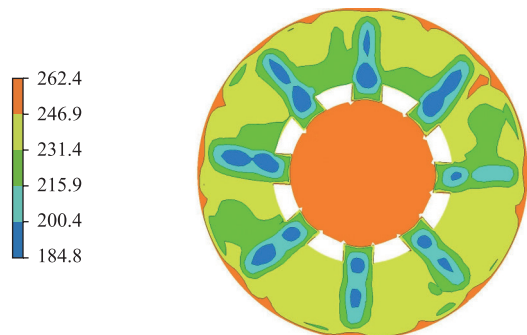


图11 减压阀阀笼处的温度云图(K)

4 节流温降规律

在一定的压力条件下,天然气水合物的生成与否主要取决于温度,准确预测减压阀分输过程节流温降规律是天然气水合物防治的前提。对一系列进口压力和阀体开度下RMG530减压阀的分输节流过程进行数值模拟,通过对环境温度、入口压力、节流压降等因素对节流温降的影响分析,获得了RMG530减压阀分输过程的节流温降规律,可为水合物的防治提供指导。

根据不同入口压力条件下节流后的天然气温度 T_2 与节流压降 Δp 的关系曲线(图12)可知,冬季工况,入口压力8 MPa,环境温度263 K,压降为6 MPa时,节流后温度为184 K,节流过程温降79 K;夏季工况,入口压力6 MPa,环境温度293 K,节流压降为3 MPa时,节流后温度为250 K,节流过程温降43 K。

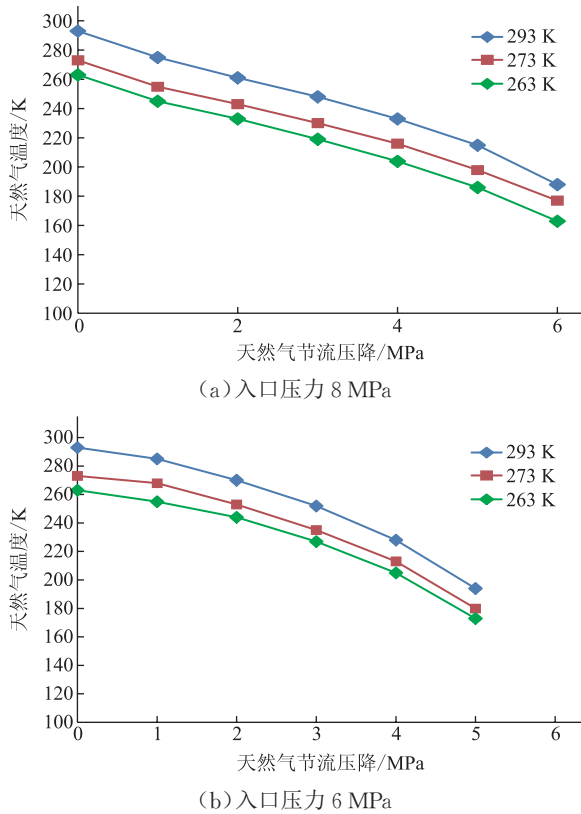


图12 不同环境温度下节流后的天然气温度 T_2 与节流压降 Δp 的关系曲线

相同的入口压力下,节流压降越大,节流温降越大。在温度降到最低点之前,节流孔内压力与温度分布规律具有一致性,水合物析出多在节流温度降到最低值之前完成。随节流压降的增大,节流后出口压力减小,节流温度最低点的位置距节流孔出口越近,水合物析出量越多。入口压力一定时,出口压力越高,节流

温降越小,水合物析出量越少。为防止天然气水合物的析出应采用多级降压,降低每一级压降的差值^[15-17]。

根据高压天然气节流前压力 p_1 、节流压差 Δp 与温降 ΔT 的关系曲线(图13),当环境温度变化时,天然气节流温降规律具有一致性:相同压降条件下入口压力越低,节流温降越大;相同的入口压力下,节流压降越大,节流温降越大。当入口压力和压降条件一定时,环境温度越小,节流温降越大。增大环境温度可有效减小天然气水合物的析出,环境温度升高,阀内整体温度增高,相同压降条件下水合物的露点不变,水合物开始析出的位置距节流孔出口越近,析出时间越短,水合物的析出量越少。

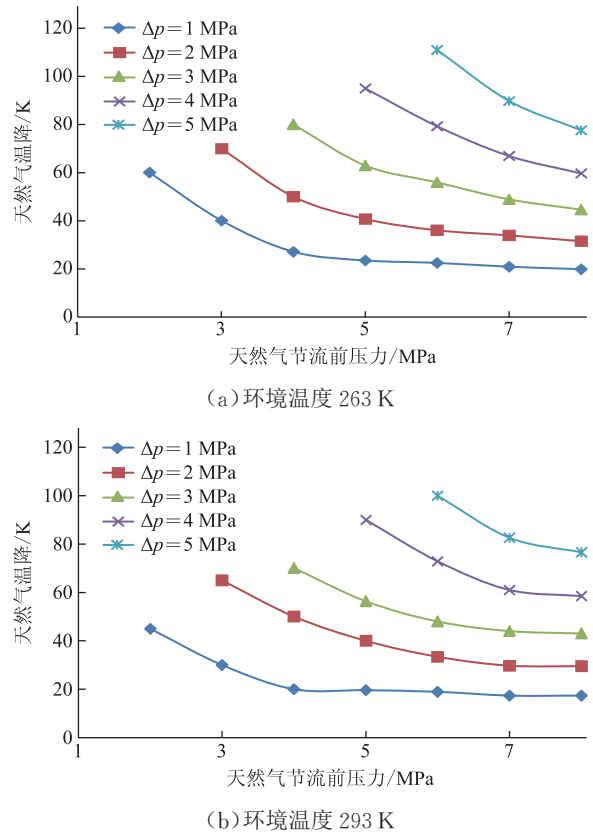


图13 高压天然气节流压差与温降的关系曲线

绝热节流系数 μ_j 为下降单位压力时温度的变化值,其随入口压力、环境温度和节流压差的变化而变化。绝热节流效应多用平均节流系数 μ_j 表示, μ_j 越大,节流温降越严重。考虑减压阀的实际运行工况,分析入口压力为8 MPa时,平均节流系数随环境温度、节流压差的变化情况(图14),入口压力和环境温度一定的状态下,节流压降越大,平均节流系数越大;入口压力和节流压降一定的状态下,环境温度越低,平均节流系数越大。

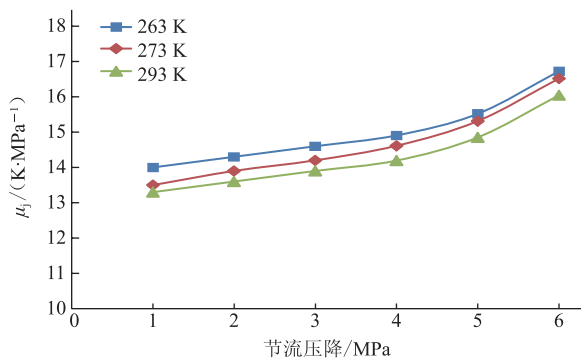


图 14 不同环境温度下平均节流系数与压降关系曲线

绝热节流系数越小,节流温降越缓慢,对冰堵的防治越有利^[18-23]。天然气分输过程中,根据分析获得的节流温降规律,可通过控制分输过程的温度、入口压力、压降等参数降低平均节流系数。采取提高入口温度,减小节流压降,适当提高气体的入口压力等措施,可有效地防止天然气水合物的析出,对防治冰堵,保障天然气分输过程的正常运营意义重大。

5 模拟结果验证

为了验证建立的节流温降模拟结果的准确性,将模拟结果与分输站测试温度结果进行对比。秦皇岛分输站和唐山分输站作为陕京线沿线的主要分输站场,秋冬季节环境温度较低,节流冰堵问题较严重。根据模拟获得节流过程阀内温度分布规律,分别对两分输站场内 RMG530 减压阀的节流温度进行测试(图 15、图 16),获得了不同季节,不同节流压降环境下的节流温降结果(表 1,其中夏季天然气需求量较小,流量为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$,天然气入口压力为 6 MPa,出口压力为

3.5 MPa;冬季天然气需求量较大,流量为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$,天然气入口压力为 8 MPa,出口压力为 2 MPa)。

现场测试温度与模拟结果对比发现,温降模型模拟结果与现场测试结果吻合良好,节流过程温度最低点位于阀笼处,与模拟结果一致;最低温度与出口温度测试结果与模拟结果差值较小,误差在 5% 以内。说明建立的节流温降模型计算结果准确,可为天然气水合物的防治提供必要的技术手段。



图 15 秦皇岛分输站温降现场测试



图 16 唐山分输站温降现场测试

表 1 模拟温度与测试温度结果对比

分输站	运行工况	最低温度/°C		最低温度误差 %	出口温度/°C		出口温度误差 %
		现场测试	模拟		现场测试	模拟	
秦皇岛	冬季工况	-83	-89	3.26	-53	-61	3.77
	夏季工况	-23	-28	2.04	-1	-8	2.64
唐山	冬季工况	-85	-89	2.17	-53	-61	3.77
	夏季工况	-20	-28	3.26	-4	-8	1.51

6 结论

(1) 环境温度、入口压力和节流压降是影响节流温降过程的主要因素。相同压降条件下,入口压力越小,节流温降越大;相同的入口压力下,节流压降越大,节流温降越大;相同入口压力和压降条件下,初始温度越小,节流温降越大。

(2) 水合物析出在节流孔内完成,环境温度的升高和节流压降的降低会减缓节流温降,进而缩短水合物凝聚析出时间,减少节流过程水合物的析出量。

(3) 天然气节流温降伴随着水合物的析出与水合物凝结累积过程,后续研究需要建立水合物析出与液滴的并聚模型,分析分输过程液滴分布与冰堵形成过程,为分输阀体的冰堵防治提供指导。

参考文献:

[1] 李颖川, 胡顺渠, 郭春秋. 天然气节流降温机理模型[J]. 天然气工业, 2003, 23(3): 70-72.

[2] 李玉星, 邹德永. 气嘴流动特性及降温计算方法[J]. 油气储运, 2010, 21(2): 15-19.

[3] 聂廷哲, 段常贵. 高压天然气绝热节流系数的确定[J]. 煤气与热力, 2004, 24(2): 61-64.

[4] 吴政. 减压阀流量压力特性的分析与探讨[J]. 阀门, 2002, 17(2): 17-19.

[5] 李颖川, 王志彬, 钟海. 油套环空放空防止气井筒生成水合物技术[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 318-321.

[6] 刘陈伟, 李明忠, 王卫阳, 等. 输气管道天然气水合物段塞形成机理[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 151-157.

[7] 田贯三, 马一太, 杨昭. 天然气节流过程水化物的生成与消除[J]. 煤气与热力, 2003, 23(10): 583-586.

[8] 宓亢琪. 天然气长输管道中水化物生成的分析与控制[J]. 煤气与热力, 2002, 22(5): 396-399.

[9] 杜亚和, 郭天民. 天然气水合物生成条件预测[J]. 石油学报, 1988, 4(3): 82-92.

[10] 纪兵兵, 陈金瓶. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.

[11] 余晓明, 茅忠明, 孔彪龙. 减压阀性能试验与内部流场数值计算[J]. 上海理工大学学报, 2009, 31(2): 187-189.

[12] 庞可, 潘诚. 汽轮机速关阀不同开度下的流动特性数值研究[J]. 节能技术, 2011, 29(4): 301-305.

[13] 于碧涌. 燃气调压器数值模拟与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

[14] 彭震中, 丁祝顺, 王璋奇, 等. 调节阀阀体三维瞬态温度场及应力场分析[J]. 热能动力工程, 2002, 17(4): 80-83.

[15] 柳海, 吕孝飞, 张锋, 等. 节流阀内天然气组分凝结规律研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 139-144.

[16] 吕孝飞, 常春, 白博峰. 节流阀中己烷凝结流动数值模拟[J]. 化工学报, 2011, 62(9): 2447-2454.

[17] 吕孝飞, 常春, 白博峰. 正戊烷节流凝结规律研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(16): 133-138.

[18] PARRISH W R, PRAUSNITZ J M. Dissociation pressures of gas hydrates formed by gas mixtures[J]. IEC Chemical Process Design and Development, 1972, 11(1): 26-33.

[19] HENGJOO N, ROBINSON D B. Measurement and prediction of hydrate format on liquid hydrocarbon water systems[J]. IEC Fundamentals, 1976, 15(4): 293-298.

[20] 王定军, 宋会玲, 白少卿, 等. 减压阀节流口流场仿真和分析[J]. 火箭推进, 2009, 35(6): 42-46.

[21] 李树勋, 周世豪, 张兴, 等. 高压先导轴流式天然气减压阀性能优化研究[J]. 液压与气动, 2013(4): 77-83.

[22] 李颖川, 王志彬, 唐嘉贵, 等. 气井气水两相节流降温模型[J]. 天然气工业, 2010, 30(3): 57-59.

[23] 刘海红, 李玉星, 王武昌, 等. 水合物聚集影响因素及正交试验研究[J]. 油气储运, 2013, 32(11): 1232-1236.

(收稿日期: 2014-04-23; 修回日期: 2015-02-09; 编辑: 潘红丽)



基金项目: 中国石油天然气股份有限公司技术开发项目“分输减压阀降温与振动规律及其安全可靠研究”, KY-KJ-13-052.

作者简介: 尤泽广, 在读硕士生, 1990年生, 2012年毕业于中国石油大学(华东)材料成型及控制工程专业, 现主要从事天然气分输减压阀的安全可靠性研究。

YOU Zeguang, reading master, born in 1990, graduated from China University of Petroleum (Huadong), material shaping and control engineering, in 2012, engaged in the research of safety and reliability of gas regulator for natural gas distribution.

Tel: 18266630175, Email: 943107907@qq.com