

含液对气体节流温降计算的影响

徐卜垒¹ 夏振² 陈飞³ 樊荣华³

1 兰州寰球工程公司 2 中国石油集团工程设计有限责任公司北京分公司 3 青海油田采油二厂

摘要: 气田采出气含有一定量的水,集输工艺为高压集气、站内多井加热节流,通过节流的方式达到气液分离的效果。节流后的温度可根据焦耳-汤姆逊效应定义的方法进行计算,但其只适用于纯气体,含液量较小时对其影响并不大,随着含液量的增多误差会越来越大。根据节流效应系数的计算公式,考虑过程的可变性,用积分的方法求解节流后的温度,最后通过编写C语言程序计算和查图法两种不同的方法对现场数据进行验算,检验当含液量超过多少时此方法不再适用。

关键词: 天然气; 节流温降; 焦耳-汤姆逊效应; 含液量

doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2015.12.005

气田采出气集输工艺可利用开发前期的高压能力,通过节流降温,回收凝析油和脱水,满足外输天然气烃露点、水露点的要求,这样投资少、能耗低、流程简单。根据焦耳-汤姆逊效应的定义可以计算纯气体的节流温降,方法简单、可操作性强、结果相对准确,适用于工程上的简易计算。

当前一些文献对焦耳-汤姆逊效应系数^[1]进行了计算,但没有涉及含液量对节流温降产生影响程度的相关计算,就焦耳-汤姆逊效应系数的计算而言,文献[2]给出了甲烷在某些温度压力条件下的焦耳-汤姆逊效应系数的部分实测数据,由于组分不同以及实测数据的不连续性,难以适应工程的需要;文献[3]的焦耳-汤姆逊效应系数是通过查图法确定或取为定值;文献[4]给出了用立方型状态方程计算焦耳-汤姆逊效应系数的方法;文献[5]给出了LKP状态方程计算焦耳-汤姆逊效应系数的方法;文献[6]用扩展的维里型状态方程以数值计算的方法研究了天然气的焦耳-汤姆逊效应系数,文献[7]用实验的方法研究了二氧化碳的焦耳-汤姆逊效应系数,以上方法中后几种过于复杂,有的受气体组分和温度压力范围以及实用性的限制,不适用于工程上的简单计算。

1 节流效应简介

气体在流道中经过突然缩小的断面(如管道上的针形阀、孔板等),产生强烈的涡流,使压力下降,这种现象称为节流。气体通过缩孔时流速很高与外界热交换一般很小(可忽略),节流过程视为绝热过程^[8]。在工程中绝热节流过程得到广泛应用,各种阀门和调压器就是利用节流过程来调节压力和控制流量的。气体节流过程如图1所示,在缩

孔附近流速增加,由热力学第一定律可知焓会下降,气流在通过缩孔时动能增加,由伯努利方程可知压力下降,同时会产生摩擦损失,摩擦产生的热能又被流体所吸收。但由于扰动和摩擦的不可逆性,气体节流后的状态不能恢复到节流前的状态,因此绝热节流是不可逆的过程,在节流过程中流体处于非平衡状态,没有确定的状态参数。但是可以研究节流前后流体处于平衡状态的情况,如距离节流足够远的两个截面1、2处,气体已为平衡状态,对于水平管气体位能不变,节流以后,流速增大,但总的来讲,动能变化不大可忽略,根据能量守恒可得节流前后(1、2处)气体的焓相等,即 $h_1 = h_2$ 。

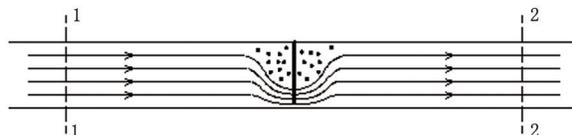


图1 气体节流过程

对于理想气体焓是温度的单值函数,但对真实气体还与压力有关,所以对真实气体而言,节流以后压力下降,通常也会造成温度下降,这称为节流正效应;当气体节流前温度 T_1 超过最大转变温度(约为临界温度的4.85~6.2倍)时,节流后压力下降,会造成温度上升,这称为节流负效应。

节流效应又称为焦耳-汤姆逊效应。定义温度下降的数值与压力下降的数值之比称为节流效应系数^[9],它表示在焓不变的条件下气体的温度随压力的变化率。根据热力学知识和麦克斯韦关系式可导出

$$D_i = \frac{1}{C_p} \left[\frac{T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_p}{\rho^2 \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T} - \frac{1}{\rho} \right] \quad (1)$$



式(1)中 D_i 为焦耳-汤姆逊系数 (K/kPa); C_p 为摩尔定压热容 [kJ/(kmol·K)]; p 为压力 (kPa); T 为温度 (K); ρ 为密度 (kmol/m³); 其中 C_p 、 ρ 均为未知参数, 通过积分可得

$$T_2 = T_1 + \int_{p_1}^{p_2} D_i dp \quad (2)$$

应用于计算焦耳-汤姆逊效应系数的状态方程有 RK 方程、SRK 方程、PR 方程、PT 方程、BWR 方程、BWRS 方程, 其中 BWRS 状态方程是目前认为用于描述天然气 PTV 性质的最精确的方程^[2], 适用性广泛, 计算精度高, 因此本文选用 BWRS 方程建立温降计算模型。

2 定压热容的计算

在高压下真实气体的定容比热和定压比热与理想气体的值差别很大^[10], 文献[2]给出了高压下的定容比热的详细计算方法; 文献[11]给出了理想气体状态下物质的热容与温度的经验关联式, 将热容定义为温度的单一函数; 文献[12]通过对天然气实验数据拟合得到的定压比热经验公式, 为了增强其对现场应用中的适应性, 通过对现场生产数据与公式计算结果偏差原因的分析, 对其公式中的参数进行了优化, 经验公式中的定压比热定义为温度、压力、混合气体摩尔质量的函数; 对于不同组分气体可直接利用实用热物理性质手册中的数据, 或者对其中的数据进行回归分析得出计算式, 例如甲烷, 通过回归分析得到比热计算式^[4,13]。

前两种方法均是先将实际气体理想化, 然后在按实际气体进行修正, 而且它的使用条件是高压条件, 显然对于实际气体而言, 在低压高温条件才接近理想气体, 在修正时又与高压条件不符, 从而使实际情况受到限制, 通过实际的验证显示只有在高温低压条件下计算结果比较准确, 而在其他情况下误差比较大; 第四种方法在使用时需要先查阅相关手册选取数据(纯组分)或者对数据进行回归分析, 这样不便于程序运算, 同时适用于纯组分; 故文中在计算 C_p 时采用的是第三种方法。

3 实例计算

3.1 程序计算法

根据气体含液量由少到多的情况对 10[#]站含液天然气节流温降进行分析, 含液量为月累计产液量 (m³) 与产气量 (m³) 的比值。结果见表 1。

表 1 10[#]站不同井不同含液量的对比结果

含液体积分数	压力/MPa		温度/°C	阀后温度/°C		偏差
	阀前	阀后	阀前	测量值	计算值	
1.94 × 10 ⁻⁵	6.4	5.53	8	5	4.5	-0.5
	7.6	5.36	18	9	9.6	0.6
	6	5.27	19	16	16.2	0.2
	6	5.12	21	17	17.7	0.7
2.18 × 10 ⁻⁵	7.6	5.33	16	9	7.3	-1.7
	6.5	4.92	23	15	16.0	1.0
	9	5.54	23	12	10.7	-1.3
	8.2	5.46	16	7	5.6	-1.4
3.41 × 10 ⁻⁵	5.8	5.54	11	10	9.8	-0.2
	5.8	5.53	13	12	11.7	-0.3
	5.5	5.27	8	8	6.9	-1.1
3.77 × 10 ⁻⁵	11.2	5.71	26	5	3.9	-1.1
	12.1	5.43	20	-6	-7.8	-1.8
	10.1	5.86	32	14	15.4	1.4
	10.2	5.21	43	23	24.6	1.6
4.02 × 10 ⁻⁵	8	5.27	18	9	5.6	-3.4
	7.7	5.33	30	25	20.2	-4.8
	6.6	5.86	5	5	1.4	-3.6
	7.9	5.36	19	11	7.6	-3.4
4.15 × 10 ⁻⁵	8.5	5.22	15	5	-0.2	-5.2
	9.2	5.1	11	-4	-8.6	-4.6
	10.0	5.86	15	1	-3.3	-4.3
	9.1	5.2	20	8	2.7	-5.3

注: 偏差=阀后温度计算值-阀后温度测量值

由以上计算结果与测量结果对比情况可以看出, 当含液体积分数达到 3.77 × 10⁻⁵ 时平均温度偏差 0.2 °C/MPa, 当含液体积分数达到 4.02 × 10⁻⁵ 时, 平均温度偏差 2.4 °C/MPa, 偏差已经很大, 此方法不再适用。

3.2 查图法

根据文献[3]对现场数据进行验证, 该曲线是根据含液体积分数在 11.3 × 10⁻⁶ (GPA 标准) 条件下得出来的, 以 11.3 × 10⁻⁶ 为标准, 每增减 5.6 × 10⁻⁶, 应有相应的 ± 2.8 °C 的温度修正值, 含液体积分数最高达 28.3 × 10⁻⁶, 高于此值曲线不再适用。对于不在曲线上的点采取内插法进行计算。计算结果见表 2。

由表 2 计算结果可以看出, 当含液体积分数达到 1.41 × 10⁻⁵ 时, 偏差开始增大, 当含液体积分数达到 1.73 × 10⁻⁵ 时, 温度平均偏差为 3.2 °C, 查图法不宜使用。

3.3 结果分析

(1) 程序计算法。当含液量比较少的时候, 在节流过程中对其阀后温度的影响不大, 产生的偏差一方面由于现场测量的组分当中含有少量的空气、氮气、氩气、氢气, 而 BWRS 方程没有对其他数据相关联的 k_j 数据, 所以在计算过程没有考虑, 使



表2 查图计算结果与现场数据对比情况

含液体 积分数	压力/MPa		温度/°C		偏差	
	阀前	阀后	阀前	测量值 计算值		
1.06×10^{-5}	7.3	5.29	5	-4	-3.6	0.4
	8	5.34	4	-8	-7.3	0.7
	7.9	5.02	7	-5	-4.9	0.1
	8.2	5.13	9	-4	-3.5	0.5
1.20×10^{-5}	11.2	5.46	15	-6	-6.7	-0.7
	10.0	5.3	15	-4	-3.9	0.1
	10.0	5.28	15	-2	-3.9	-1.9
	9.8	5.28	15	-1	-2.9	-1.9
1.31×10^{-5}	11.4	5.01	22	-1	-1.8	-0.8
	11.8	5.46	15	-8	-8.3	-0.3
	8.9	5.63	10	-2	-3.7	-1.7
	11.1	5.22	12	-11	-10.6	0.4
1.41×10^{-5}	10.0	5.49	22	6	3.2	-2.8
	15.1	5.78	6	-9	-11.1	-2.1
	11.7	5.28	18	-5	-6.2	-1.2
	11.0	5.28	17	-4	-5.7	-1.7
1.73×10^{-5}	10.0	5.34	20	3	-0.8	-3.8
	10.6	5.02	13	-8	-11.0	-3.0
	14.4	5.29	22	-9	-12.1	-3.1
	13.0	5.72	25	0	-3.1	-3.1
2.18×10^{-5}	7.6	5.33	16	9	1.2	-7.7
	6.5	4.92	23	15	11.3	-3.7
	9.0	5.54	23	12	3.9	-8.1
	8.2	5.46	16	7	-1.1	-8.1

注：偏差=阀后温度计算值-阀后温度测量值

得计算会有一些的偏差。从计算结果可以看出，当含液体积分数高于 4.02×10^{-5} 时，所有的偏差均为负，随着含液量的增多，液体对阀后温度的影响越来越大，原因在于液体在节流过程中由于摩擦温度会略有上升，而气体经过节流以后会产生温降，节流后的气体温度与水的温度不同，必然会产生热交换，从而使得整个体系的温度要比纯气体节流后的温度偏高，而计算过程中并未考虑水的影响，直接按纯气体的情况进行考虑，所以使得计算结果要比实际结果偏低。由含液体积分数为 3.77×10^{-5} 、 4.02×10^{-5} 计算结果可看出，两者节流压降不同，前者大，后者小，节流后的气体在与液体进行换热时，液体对气体温度的提升作用，压降小的要比压降大的明显。

(2) 查图法。曲线图并未给出具体的组分信息，计算不同组分的天然气温降时必然会引入误差，查表过程也会人为的引入一定的读数误差，此外，曲线图上不同的压降曲线并非均匀分布，而采用内插法则是按均匀分布的方式计算的，由此也会引入一定的误差。当含液体积分数高于 1.41×10^{-5} 时，偏差开始增大，误差增大的原因在于曲线图所描述的体系不同于现场的体系，查图后的温度修正

不能弥补液体对气体的温升作用。

4 结论

通过焦耳-汤姆逊效应系数定义的方法和查图的方法计算不同含液量的气体经过节流后的温度与现场测量的实际温度对比可得出以下结论：

(1) 当含液体积分数低于 1.41×10^{-5} 时，两种方法计算的温度偏差基本在 1°C 左右，均可用于计算阀后的温度。

(2) 当含液体积分数介于 $1.41 \times 10^{-5} \sim 3.77 \times 10^{-5}$ 之间时，查图法计算结果偏差较大，宜采用焦耳-汤姆逊效应系数定义的方法计算阀后的温度。

(3) 当含液体积分数超过 3.77×10^{-5} 时，利用焦耳-汤姆逊效应系数定义的方法计算的温度偏差有所增大，而当含液体积分数超过 4.02×10^{-5} 时，平均温度偏差 3.2°C ，该方法不再适用。原因在于含液量的上升使得节流后气体与其的热交换加强，温升变大，导致计算结果偏差较大。

参考文献

- [1] FRANCIS M A. Advance equations for natural gas flow prediction[C]. Las Vegas: Society of Petroleum Engineers, 1973: 1-20.
- [2] 李玉星, 姚光镇. 输气管道设计与运行[M]. 第2版. 东营: 中国石油大学出版社, 2009: 63-64.
- [3] 张良鹤. 天然气集输工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 104-105.
- [4] 毛伟, 张立德. 焦耳-汤姆逊效应系数计算方法研究[J]. 特种油气藏, 2002, 9 (5): 44-46.
- [5] 谢大浩. 计算焦-汤系数的LKP方法[J]. 天然气工业, 1991, 11 (2): 48-50.
- [6] MARIC IVAN. The Joule-Thomson in natural gas flow-rate measurements[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005, 16 (6): 387-395.
- [7] NOVIKOV L L. Joule-Thomson coefficient in carbon dioxide[J]. High Temperature, 1976, 14 (3): 456-458.
- [8] 李玉星, 邹德永. 气嘴流动特性及温降计算方法[J]. 油气储运, 2002, 21 (2): 15-19.
- [9] 李长俊. 天然气管道输送[M]. 2版. 北京: 石油工业出版社, 2008: 26-27.
- [10] 汪志诚. 热力学·统计物理[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2013: 77-78.
- [11] 郭天民. 多元气液平衡和精馏[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 134.
- [12] 堇科, 梁中红. 焦-汤系数的优化计算及在高压气井节流生产中的应用[J]. 石油地质与工程, 2008, 22 (1): 89-91.
- [13] 吴玉国, 陈保东. BWRS方程在天然气物性计算中的应用[J]. 油气储运, 2003, 22 (10): 16-21.

[第一作者简介]徐卜垒：工程师，硕士研究生，主要从事油气田地面工程设计工作。

18693076864、xubulei@cnpc.com.cn

收稿日期 2015-04-02

(栏目主持 李艳秋)

