

天然气中水含量与水露点换算关系探讨

敬豪^{1,2,3} 曾文平^{1,2,3} 何斌^{1,2,3} 张镭^{1,2,3} 秦婧⁴

1. 中国石油西南油气田公司天然气研究院 2. 国家市场监督管理总局重点实验室(天然气质量控制和能量计量)
3. 中国石油天然气集团有限公司天然气质量控制和能量计量重点实验室 4. 中国石油西南油气田公司天然气净化总厂

摘要:目的 采用实验加数学拟合的方法开发一种新型天然气中水含量与水露点的换算方法,以提高换算精度并降低误差。

方法 综合应用气体标准物质、便携式冷镜仪以及数学软件 Matlab,采用三次样条插值技术建立了一种新型水含量与水露点换算方法。**结果** 利用三次样条插值技术建立拟合曲面方法进行水露点换算,该方法的平均绝对误差(MAE)为 1.16 °C,均方根误差(RMSE)为 2.28 °C,满足合理可接受的最大偏差为 2.8 °C。将该方法与国内外主流的换算方法进行比较分析,3种方法的平均绝对偏差分别为 0.46%(三次样条插值法)、0.69%(GB/T 22634—2008《天然气水含量与水露点之间的换算》)和 0.84%(ASTM D1142—95(2021)《露点温度法测定气体燃烧水蒸气含量的标准试验方法》),并分析探究了3种方法在不同水含量和压力段的适用情况。**结论** 通过与实验值的对比研究,当水的体积分数在 0~200×10⁻⁶ 范围内时,三次样条插值法相比标准方法具有更好的换算精度,可有效降低水含量与水露点的换算误差。

关键词:天然气;水含量;水露点;三次样条插值

DOI: 10.3969/j.issn.1007-3426.2024.03.019

引用格式:敬豪,曾文平,何斌,等. 天然气中水含量与水露点换算关系探讨[J]. 石油与天然气化工, 2024, 53(3): 123-129. JING H, ZENG W P, HE B, et al. Conversion relationship between water content and water dew point in natural gas[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2024, 53(3): 123-129.

Conversion relationship between water content and water dew point in natural gas

JING Hao^{1,2,3}, ZENG Wenping^{1,2,3}, HE Bin^{1,2,3}, ZHANG Pu^{1,2,3}, QIN Jing⁴

1. Research Institute of Natural Gas Technology, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan, China;
2. Key Laboratory of Natural Gas Quality Control and Energy Measurement for State Market Regulation, Chengdu, Sichuan, China;
3. Key Laboratory of Natural Gas Quality Control and Energy Measurement, CNPC, Chengdu, Sichuan, China;
4. Natural Gas Purification Plant General, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chongqing, China

Abstract: **Objective** Experimental and mathematical fitting methods are used to develop a new approach for converting water content to dew point in natural gas to enhance conversion accuracy and reduce errors. **Methods** This paper adopts the combined application of gas standard substances, portable dew point mirrors, and Matlab mathematical software. Using cubic spline interpolation technique, it establishes a novel method for converting water content to water dew point. **Results** By utilizing surface fitting for the conversion of water dew point, this method achieves a Mean Absolute Error (MAE) of 1.16 °C and a Root Mean Square Error (RMSE) of 2.28 °C, meeting the reasonably acceptable maximum deviation of 2.8 °C. By comparing this method with the domestic and international mainstream conversion methods, the average absolute deviation of the three methods are 0.46% (cubic spline interpolation), 0.69% (GB/T 22634—2008 *Conversion between water content and water dew point of natural gas*), and 0.84% (ASTM D1142—95(2021) *Standard test method for water vapor content of gaseous fuels by measurement of dew-point temperature*), respectively, and the applicability of the three methods under different water content and pressure ranges is analyzed and explored. **Conclusions** Through comparative studies with experimental values, the cubic spline interpolation method shows better conversion accuracy for water volume fractions from 0 to 200×10⁻⁶ compared to standard methods, effectively reducing the conversion error between water content and water dew point.

Keywords: natural gas; water content; water dew point; cubic spline interpolation

在天然气的管输过程中,当管道中存在液态水时,天然气中的 H₂S 和 CO₂ 将会对管道及相关设备造成腐蚀,因此,管输过程中必须特别关注水含量/水露点的控制^[1-2]。GB/T 37124—2018《进入天然气长输管道的气体质量要求》给出水露点指标为“水露点应比输

送条件下最低环境温度低 5 °C”和“在输送条件下,当管道管顶埋地温度为 0 °C 时,水露点应不高于 -5 °C”^[3-4]。为使水露点指标符合要求,油气生产单位一般在现场安装在线水露点仪,用以监控天然气的水露点是否达到标准^[5]。目前,在线水露点仪的检测

基金项目:中国石油西南油气田公司科研项目“天然气水露点在线分析仪性能评价技术及应用研究”(20230308-04)

作者简介:敬豪,1995 年生,硕士,工程师,2021 年毕业于西南石油大学油气田开发工程专业,主要从事天然气分析测试技术及标准化工作。E-mail:779005535@qq.com

原理主要有冷镜法、石英晶体振荡法、激光法、光纤法、电解法以及阻容法,除光纤法外,均有相应的国家或行业标准对其进行规定(见表 1)^[6-8]。

表 1 我国水露点检测标准汇总		
序号	标准号	标准名称
1	GB/T 17283—2014	天然气水露点的测定 冷却镜面凝析湿度计法
2	GB/T 5832.4—2020	气体分析 微量水分的测定 第 4 部分:石英晶体振荡法
3	GB/T 27896—2018	天然气中水含量的测定 电子分析法
4	SY/T 7507—2016	天然气中水含量的测定 电解法
5	SY/T 7379—2017	天然气 水含量的测定 激光吸收光谱法
6	SY/T 6899—2022	天然气 水露点的测定 电容法

表 2 GB/T 22634—2008 的工作范围和不确定度				
压力范围/ MPa	露点范围/ ℃	组成 范围	工作范围内不确定度	
			由水含量 计算水露点/℃	由水露点计算水含量, $\rho/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$
$0.5\leq p\leq 10.0$	$-15\leq t\leq 5$ (可拓展至 $-50\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但其不确定度未知)	见表 3	± 2	$<580:0.14+0.021\times(\pm 20)$ $\geq 580:-18.84+0.053\ 7\times(\pm 20)$

①该计算方程适用于满足表 3 所列的天然气。

表 3 GB/T 22634—2008 的天然气组成限制使用条件			
化合物	摩尔 分数/%	化合物	摩尔 分数/%
甲烷	≥ 40.0	正丁烷	≤ 1.5
氮气	≤ 55.0	2,2-二甲基丙烷	≤ 1.5
二氧化碳	≤ 30.0	2-甲基丁烷	≤ 1.5
乙烷	≤ 20.0	正戊烷	≤ 1.5
丙烷	≤ 4.5	$\text{C}_6^{+}\text{①}$	≤ 1.5
2-甲基丙烷	≤ 1.5		

注:①作为正己烷处理。

ASTM D1142—95(2021)根据 IGT 研究报告 8 给出的天然气水含量平衡数据关联式进行水露点与水含量的换算,其计算公式见式(1)。该关联式根据 Raoult 定律修改完善,除在接近气体临界温度测定的露点外,该方式的准确度能够满足气体燃料工作的要求^[10]。

$$\rho_w=\frac{A}{p}+B\tag{1}$$

式中: A 为与温度有关的常数, $\text{mg}\cdot\text{MPa}/\text{m}^3$; p 为压

不同检测原理的在线水露点仪直接测得的数据不同,只有冷镜法和光纤法是直接测定得到温度值,其余原理均是先测得水含量,再通过不同的换算方法得到温度值。目前的换算方法主要有 ISO 18453:2004《天然气 水含量与水露点的相关性》中的“改进 PR 方程”和 ASTM D1142—95(2021)《露点温度法测定气体燃料水蒸气含量的标准试验方法》中的水含量与水露点的换算关联式方法^[9-10]。我国参考这两者制定了 GB/T 22634—2008《天然气水含量与水露点之间的换算》,该标准考虑到我国法规和工业的特殊需求,进行了相应的修改^[11]。GB/T 22634—2008 中水含量与水露点的关联关系也是基于改进的 PR 状态方程,并给出了方程的工作范围与不确定度(见表 2)。

力,MPa; B 为与温度有关的常数, mg/m^3 ; ρ_w 为水的质量浓度, mg/m^3 。

前期调研了中国石油西南油气田公司在线水露点仪的配置情况,并针对不同检测原理报出的结果及换算方法进行了统计(见表 4)。

表 4 在线水露点仪测试方法原理统计表			
测试 原理	仪器厂商	水露点/ 水含量	换算方法
石英晶体 振荡法	AMETEK	水含量	ASTM D1142—95(2021)
	Michel1	水含量	ISO 18453:2004(GB/T 22634—2008)
电解法	成都金阳科技	水含量	GB/T 22634—2008
冷镜法	VYMPEL	水露点	直接得到露点
激光法	E+H	水含量	ISO 18453:2004/ASTM D1142—95(2021)
	AMETEK	水含量	ASTM D1142—95(2021)
光纤法	Bartec 博大科	水露点	直接得到露点
电容法	MANALYTICAL	水含量	ASTM D1142—95(2021)

冷镜法作为水露点检测的仲裁方法相比其他方法具有快速响应和高准确性的优点,根据 GB/T 17283

—2014 规定在 $-25\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测量范围,该原理自动检测准确度可达 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,手动检测准确度可达 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[6]。因此,本研究采用便携式冷镜仪测定结果作为标准值,通过测量不同水含量甲烷中水气体标准物质在不同压力下的露点值,与上述两种换算方法得到的温度值进行比较。同时,采用数学软件 Matlab 通过三次样条插值技术建立一种新型水含量-水露点换算方法,并与前文叙述的两种换算方法进行比较,探讨其适用性。最后,计算不同方法在不同水含量及压力下的平均绝对偏差,给出相应的使用建议,以减少不同换算方法造成的误差。

1 水含量-水露点新换算方法的建立

1.1 实验材料

根据 GB/T 17283—2014 的规定,经处理的管输天然气水露点范围一般为 $-25\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,在相应的气体压力下,水的体积分数为 $(50\sim 200)\times 10^{-6}$ ^[5]。经调研,生产单位的气质压力多为 $4\sim 5\text{ MPa}$ 。因此,配制了 6 瓶 8 L 甲烷中水气体标准物质,水的体积分数为 $(10\sim 210)\times 10^{-6}$,制备压力为 $4.0\sim 9.0\text{ MPa}$ (见表 5)。

表 5 本次实验气体标准物质

序号	气瓶 容积/ L	制备 压力/ MPa	标准值, 水体积分数/ 10^{-6}	相对扩展 不确定度($k=2$)/ %
1	8	9.0	10.8	2
2	8	8.0	31.4	2
3	8	9.0	50.2	2
4	8	9.0	103.0	2
5	8	6.0	151.0	2
6	8	4.0	203.0	2

1.2 实验仪器

采用俄罗斯 VYMPEL 公司生产的 mini-SL 便携式冷镜露点仪,技术规格见表 6。冷镜法作为水露点

表 6 冷镜露点仪技术规格

测量 原理	测量 模式	测量 范围/ $^{\circ}\text{C}$	测量 精度/ $^{\circ}\text{C}$	分辨率/ $^{\circ}\text{C}$	工作 温度/ $^{\circ}\text{C}$	最大 压力/ MPa	流量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)
冷镜法	目测法	$-50\sim$ 环境温度	± 1	0.1	$-20\sim 50$	30	$0.2\sim 200$

检测仲裁方法具有在带压条件下不需要进行换算则可直接得到露点的优点,因此,以该装置的测定值作为准确值。

为了验证该仪器的准确度,将其送至中国测试技术研究院进行验证。使用标准水发生器在常压下发生出不同水含量的标准气,分别通入便携式冷镜露点仪和精密露点仪,再比较这两台仪器所得的数值,结果见表 7。

表 7 精密露点仪与便携式冷镜露点仪差值

序号	$\varphi(\text{水})/10^{-6}$	水露点/ $^{\circ}\text{C}$		差值/ $^{\circ}\text{C}$
		精密露点仪	便携式 冷镜露点仪	
1	96.29	-42.48	-42.9	-0.42
2	97.41	-42.37	-42.5	-0.13
3	97.41	-42.33	-42.3	0.03
4	199.92	-36.02	-35.3	0.72
5	199.92	-35.94	-35.5	0.44
6	206.58	-35.60	-36.2	-0.60
7	243.04	-34.16	-35.2	-1.04
8	310.62	-31.92	-31.2	0.72
9	317.25	-31.66	-32.1	-0.44
10	317.25	-31.66	-32.3	-0.64
11	576.86	-25.86	-25.6	0.26
12	739.70	-23.37	-24.2	-0.83
13	739.70	-23.37	-24.2	-0.83
14	754.42	-23.19	-24.5	-1.31
15	754.42	-23.19	-24.5	-1.31
16	873.73	-21.64	-20.8	0.84
17	873.73	-21.64	-21.0	0.64
18	856.88	-21.85	-20.9	0.95

根据表 7 的数据,便携式冷镜露点仪与精密露点仪的差值绝对值基本在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,无超过 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况,平均差值为 $0.68\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明便携式冷镜露点仪的测量准确度能够保证,其实验值能够作为标准值进行研究。

1.3 实验方法及结果

将不同水含量的标准气在不同压力下以稳定流速通入便携式冷镜仪,以露点仪在该压力下初露点和消露点的平均值作为 1 次测定结果,连续测定 7 次,以 7 次的平均值作为最后结果(见表 8)。

表 8 不同水含量标准气在不同压力下的水露点实验结果

$\varphi(\text{水})/10^{-6}$	水露点/℃								
	0.5 MPa	1.5 MPa	2.5 MPa	3.5 MPa	4.5 MPa	5.5 MPa	6.5 MPa	7.5 MPa	8.5 MPa
10.8	-51.5	-41.5	-36.6	-33.1	-30.5	-28.4	-26.6	-25.0	-23.6
31.4	-41.8	-30.8	-25.3	-21.5	-18.6	-16.2	-14.2	-12.5	-10.9
50.2	-37.3	-25.8	-20.0	-16.0	-12.9	-10.5	-8.3	-6.5	-4.8
103.0	-29.9	-17.6	-11.3	-7.1	-3.8	-1.0	1.3	3.3	5.0
152.0	-25.7	-12.9	-6.4	-1.9	1.6	4.4	—	—	—
203.0	-22.4	-9.2	-2.5	2.1	—	—	—	—	—

注:“—”表示由于气体标物配制压力有限,因而未能检测到。

1.4 三次样条插值技术建立换算方法

将表 8 的实验数据作图,结果如图 1 所示。由图 1 可知,在同等测试压力下,水露点与水含量呈正相关,随着压力的升高,相同水含量标准气测得的水露点值不断升高,其增速逐渐放缓。

过解一个线性方程组来得到,该方程组关联了所有的数据点和插值条件。

每个 $S_i(x)$ 只在其对应的区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 内有效,不同区间的多项式 $S_i(x)$ 和 $S_{i+1}(x)$ 在 x_{i+1} 处的函数值、一阶导数和二阶导数都应相等,确保整个插值曲线的平滑性。这种方法让插值曲线在整个数据范围内具有很好的平滑性和适应性,适用于需要高精度和平滑曲线表达的多种场合。

对于二维数据(压力、水含量),插值函数会在两个方向拟合不同的关系式,可以通过在两个方向上各自应用三次样条插值来扩展这个方法。这意味着对于二维数据点集需要在 x 方向和 y 方向上分别进行三次样条插值。最终得到的插值函数可以表示为式(3),拟合曲面见图 2。

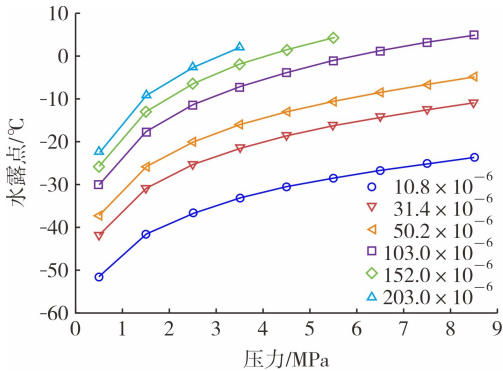


图1 不同标准气的水露点实验值

采集表 8 中水露点数据,并利用 Matlab 软件采用三次样条插值法进行处理,该技术拟合曲面具有平滑性、高精确度的特点,在许多物理系统中,平滑的变化比直线或折线更符合实际,三次样条插值能较好地模拟这些平滑过程^[12-14]。三次样条插值法并不能得到 1 个单一的数学关系式,而是在每相邻数据点区间上都有不同参数的分段多项式。对于一维三次样条插值,存在一系列的数据点,例如 $(x_0, y_0), (x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)$,通过这些点拟合一个平滑的曲线时,整个曲线会被分成 n 段,每一段都是一个独立的三次多项式,对于每个区间 $[x_i, x_{i+1}]$, $S_i(x)$ 定义为式(2):

对于二维数据(压力、水含量),插值函数会在两个方向拟合不同的关系式,可以通过在两个方向上各自应用三次样条插值来扩展这个方法。这意味着对于二维数据点集需要在 x 方向和 y 方向上分别进行三次样条插值。最终得到的插值函数可以表示为式(3),拟合曲面见图 2。

$$S(x,y)=\sum_{i,j}S_{ij}(x,y) \tag{3}$$

式中: $S(x,y)$ 为差值曲面函数,℃; x 为水的体积分数, 10^{-6} ; y 为压力,MPa; $S_{ij}(x,y)$ 表示一个分段三次多项式,用来对变量水含量与压力进行插值。

$$S_i(x)=a_i+b_i(x-x_i)+c_i(x-x_i)^2+d_i(x-x_i)^3 \tag{2}$$

式中: a_i 通常是直接通过在 x_i 点上的函数值得出; b_i 、 c_i 和 d_i 需要考虑到整体的连续性和边界条件,通常通

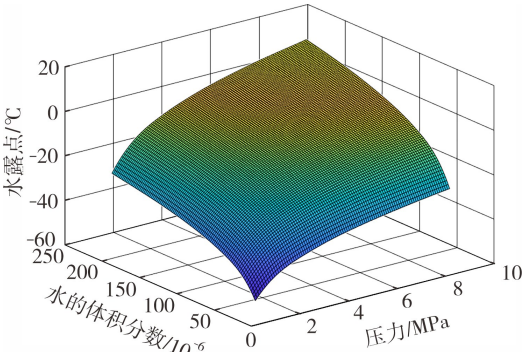


图2 三次样条插值法拟合曲面图

根据三次样条插值原理,本次建立的模型不能直接得到数学方程式。因此,采用留一交叉验证法计算

该模型的平均绝对误差和均方根误差,以对已建立的插值模型进行评估。留一交叉验证法涉及将数据集分为训练集和测试集,测试集只保留单点,每次移除该点后再用训练集的点建立插值曲面,最后预测被移除那个点的值。重复此过程,以便每个点都被预测过一次,最后计算所有预测值和实际值之间的误差。而平均绝对误差和均方根误差是衡量预测模型或拟合曲面准确性的常用统计量,这两个指标的值越小,表示预测的准确性越高。

该模型的平均绝对误差为 1.163 1 ℃,均方根误差为 2.278 4 ℃,相比于 GB/T 22634—2008 与 GB/T 17283—2014 所规定的水露点值准确度(±2 ℃)而言,该模型的误差是可以接受的。

2 分析和讨论

2.1 适用温度与压力

确定 3 种换算方法的适用温度与压力区间,如表 9 所列。

表 9 3 种换算方法的适用温度、压力范围

换算方法	温度范围/℃	压力范围/MPa
三次样条插值法	−50~5	0.5~8.5
GB/T 22634—2008	−15~5 (拓展范围 −50~40)	0.5~10.0 (拓展范围 0.1~30.0)
ASTM D1142—95	−40~121	0.1~34.5

2.2 分析讨论

基于 3 种不同的换算方法,参考表 9 确认换算方法适用范围,分别计算 6 种不同水含量的标气在不同压力下的换算水露点值,并由式(4)计算平均绝对偏差^[15-16],结果见表 10。

$$D=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N\left|\frac{(W_{\text{实验值}}-W_{\text{计算值}})}{W_{\text{实验值}}}\right|\times 100\% \quad (4)$$

式中: D 为平均绝对偏差,%; i 为第 i 组数据; N 为参与计算的组数; $W_{\text{实验值}}$ 为采用便携式冷镜仪测得的水露点,K; $W_{\text{计算值}}$ 为通过不同换算方法得到的水露点,K。

由表 10 可知,在 3 种换算方法当中,采用三次样条插值法进行换算的平均误差最小,只有 0.46%,其次是采用 GB/T 22634—2008 的换算方法的平均误差,为 0.69%,最后是采用 ASTM D1142—95(2021)的换算方法进行换算的平均误差,为 0.84%。

表 10 不同换算方法的平均绝对偏差

$\varphi(\text{水})/10^{-6}$	压力/ MPa	热力学温度/K			
		实验值	计算值		
			三次样条插值法	GB/T 22634—2008	ASTM D1142—95 (2021)
10.8	1.0	226.14	227.55	230.05	— ^①
	2.0	236.26	234.45	236.25	233.95
	3.0	238.83	238.35	240.05	235.95
	4.0	240.48	241.45	242.75	238.15
	5.0	243.90	243.75	244.95	239.25
	6.0	246.69	245.65	246.75	240.35
	7.0	248.64	247.35	248.25	241.45
31.4	1.0	237.91	237.85	239.45	— ^①
	2.0	245.92	245.45	246.05	245.55
	3.0	248.61	249.85	249.95	248.75
	4.0	251.62	253.15	252.85	251.15
	5.0	255.69	255.75	255.05	252.25
	6.0	256.78	257.95	256.85	254.35
	7.0	258.01	259.85	258.35	255.45
50.2	1.0	246.76	242.55	243.85	244.35
	2.0	248.88	250.65	250.55	250.95
	3.0	256.62	255.25	254.65	254.75
	4.0	257.51	258.75	257.55	258.35
	5.0	260.16	261.45	259.75	259.25
	6.0	262.24	263.75	261.55	261.65
	7.0	264.82	265.75	263.15	261.95
103.0	1.0	252.69	250.35	250.85	252.55
	2.0	258.95	259.15	257.95	260.25
	3.0	263.22	264.05	262.25	264.55
	4.0	266.18	267.75	265.25	267.45
	5.0	271.58	270.85	267.45	269.65
	6.0	272.46	273.35	269.35	271.15
	7.0	275.00	275.45	270.85	272.35
152.0	1.0	256.23	254.95	254.85	257.85
	2.0	262.34	263.95	262.15	265.25
	3.0	269.95	269.15	266.45	269.65
	4.0	272.24	273.15	269.55	272.85
	5.0	274.81	276.15	271.85	275.15
	6.0	280.39	278.75	273.85	277.25
	7.0	280.39	278.75	273.85	277.25
203.0	1.0	260.72	258.45	257.95	257.45
	2.0	268.66	267.75	265.35	265.25
	3.0	273.02	273.05	269.75	270.05
	4.0	275.50	277.15	272.95	272.85
平均绝对偏差/%			0.46	0.69	0.84

注:①表示超出适用范围。

ASTM D1142—95(2021)的换算方法没有给出不确定度,GB/T 17283—2014 和 GB/T 22634—2008 采用 ISO 18453:2004 的 PR 方程换算方法的不确定度

均为 2°C , 两种换算方法合理可接受的最大偏差应为两者不确定度的平方和根, 即为 2.8°C 。将 3 种换算方法得到的露点值与实验值的差值的绝对值按照不同压力进行作图, 结果见图 3。

由图 3 可知, 采用三次样条插值法建立的换算模型在不同水含量、压力段下均基本满足在最大偏差以内的要求, 相比其他两种方法, 三次样条插值法的偏差都保持在比较稳定的状态。GB/T 22634—2008 方法在高水含量、高压段的平均绝对偏差已经超过了可接受范围, 但在水含量较低段的表现比较优异。ASTM D1142—95(2021) 在低水含量、高压段的偏差较高, 但在其余段都表现比较稳定。因此, 根据 3 种换算方法在不同水含量和压力段的平均绝对偏差进一步评估其

适用性, 具体数据见表 11。

由表 11 可知, 从整体趋势上来看, 采用三次样条插值法的平均绝对偏差都保持在相对较低的水平并维持稳定, 说明该方法建立的模型具有较好的适应性, 但其中水含量、低压段的表现还是不如其余两种方法。在低水含量段, GB/T 22634—2008 方法相比 ASTM D1142—95(2021) 具有更好的表现, 且压力越高, 其换算误差越低, 但是随着水含量的逐渐增加, 换算误差逐渐上升。ASTM D1142—95(2021) 在低水含量段的换算误差比较大, 但是随着水含量的不断上升, 其误差出现逐渐降低的趋势。根据对表 11 所列数据的分析, 得出在不同条件下使用的换算方法(见表 12), 以供工程人员使用, 以减少因不同换算方法所带来的误差。

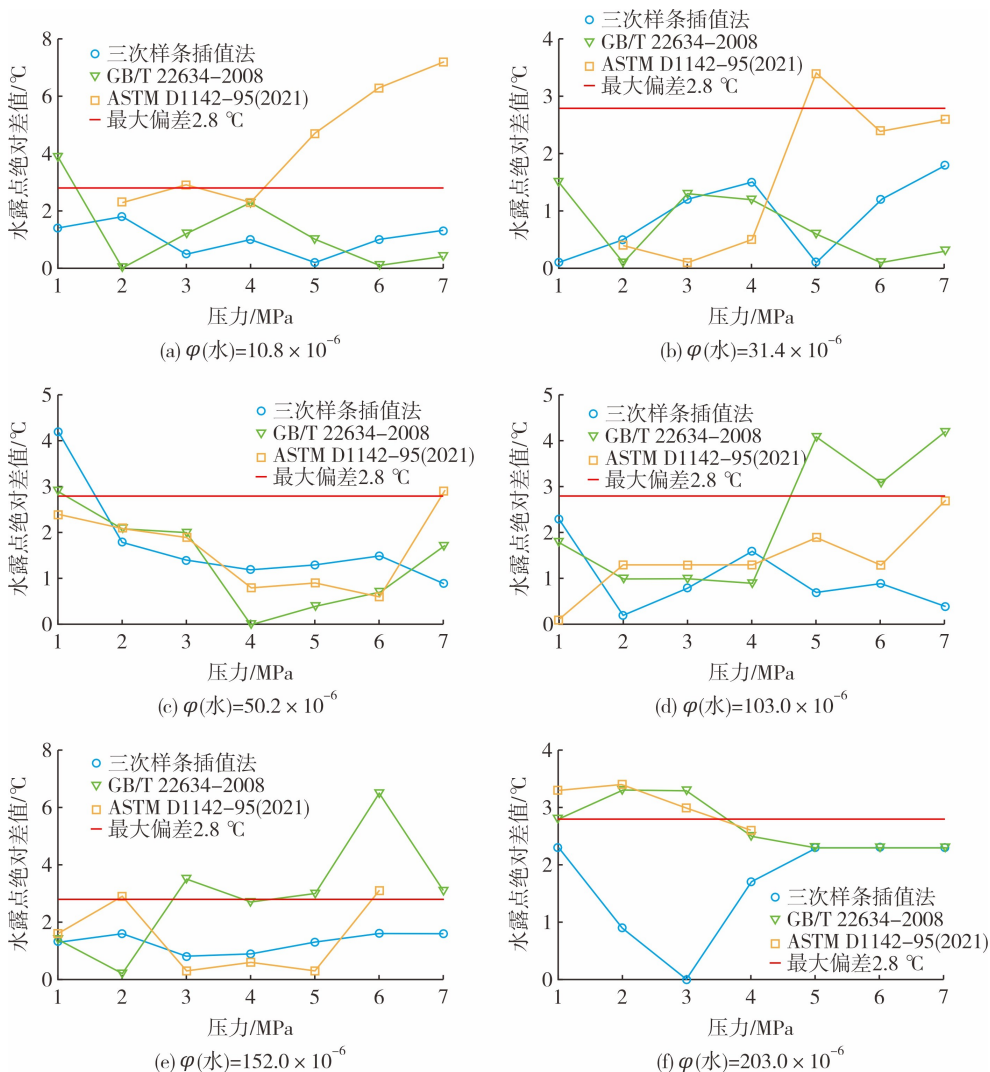


图3 不同压力下3种不同换算方法温度差值的比较图

表 11 不同换算方法在不同条件下的平均绝对偏差

$\varphi(\text{水})/10^{-6}$	压力/ MPa	平均绝对偏差/%		
		三次样条插值法	GB/T 22634—2008 方法	ASTM D1142—95 (2021)方法
0~50	1~3	0.38	0.58	0.60
	4~5	0.28	0.53	1.10
	6~7	0.53	0.08	1.85
50~150	1~3	0.71	0.68	0.60
	3~5	0.45	0.53	0.51
	6~7	0.50	1.08	0.81
150~200	1~3	0.44	0.90	0.91
	4~7	0.50	1.33	0.61

表 12 不同换算方法的使用建议表

$\varphi(\text{水})/10^{-6}$	压力/MPa	建议采用方法
0~50	1~3	三次样条插值法
	3~5	三次样条插值法
	5~7	GB/T 22634—2008
50~150	1~3	ASTM D1142—95
	3~5	三次样条插值法
	5~7	三次样条插值法
150~200	1~3	三次样条插值法
	3~7	三次样条插值法

3 结论

1) 目前,天然气中水含量与水露点的换算关系主要参考的是 GB/T 22634—2008 与 ASTM D1142—95 (2021),这两个标准在目的和方法上侧重点不同,GB/T 22634—2008需要求解天然气气液两相平衡状态方程而计算水露点,而 ASTM D1142—95(2021)则提供了一种换算公式求解水露点,该方法虽不知准确度,但计算速度快,永远有解。

2) 基于三次样条插值法建立了一种水含量与水露点的换算方法,并将该方法与标准方法进行对比,三者平均误差从低至高分别为 0.46%(三次样条插值法)、0.69%(GB/T 22634—2008)和 0.84%(ASTM D1142—95(2021))。相比其他两种标准方法,该方法在一定的温压范围内具有更好的准确度和稳定性。因此,该方法可作为一种新型快速的水含量、水露点换算方法。

3) 通过对比 3 种换算方法在不同水含量及压力段的平均绝对偏差,给出了 3 种换算方法的建议使用区间,可供工程人员进行参考,以降低因不同换算方法而造成的误差。

参考文献

- [1] 曾文平,王伟杰,蒲长胜,等. 天然气及类似气体产品标准水露点指标解读[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(6): 108-114.
- [2] 李晓红,周理,何斌,等. 中国、ISO 和俄罗斯天然气水露点测定标准方法比对[J]. 石油与天然气化工, 2019, 48(1): 99-103.
- [3] 全国天然气标准化技术委员会(SAC/TC 244). 进入天然气长输管道的气体质量要求: GB/T 37124—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [4] 蔡黎,周代兵,谢羽,等.《进入天然气长输管道气体质量要求》国家标准解读[J]. 石油与天然气化工, 2019, 48(2): 95-98.
- [5] 何斌,迟永杰,罗勤,等. 在线水露点仪的比对研究[J]. 石油与天然气化工, 2011, 40(增刊 1): 72-74.
- [6] 中国石油天然气集团公司. 天然气水露点的测定 冷却镜面凝析湿度计法: GB/T 17283-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [7] 中国石油和化学工业联合会. 气体分析 微量水分的测定 第 4 部分: 石英晶体振荡法: GB/T 5832.4—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [8] 全国天然气标准化技术委员会(SAC/TC 244). 天然气中水含量的测定 电子分析法: GB/T 27896—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [9] Natural gas-correlation between water content and water dew point: ISO 18453: 2004[S]. 2004.
- [10] Standard test method for water vapor content of gaseous fuels by measurement of dew-point temperature: ASTM D1142—95(2021)[S]. 2021.
- [11] 中国石油天然气集团公司. 天然气水含量与水露点之间的换算: GB/T 22634—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [12] MathWorks, Inc. Curve fitting toolbox: for use with MATLAB®: user's guide[M]. MathWorks, 2002.
- [13] ROVENSKI V. Modeling of Curves and Surfaces with MATLAB®[M]. Springer Science & Business Media, 2010.
- [14] POURKARIMI L, YAGHOUBI M A, MASHINCHI M. Efficient curve fitting: an application of multiobjective programming [J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(1): 346-365.
- [15] 诸林,范峻铭,诸佳,等. 非酸性天然气含水量的公式化计算方法及其适应性分析[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 117-122.
- [16] 诸林,李璐伶,覃丽,等. 酸性天然气含水量的公式化计算方法及其适应性分析[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 123-129.

收稿日期:2023-12-05;编辑:钟国利