

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2012.07.003

天然气高热值和华白数不同参比条件换算简析

□ 同济大学机械与能源工程学院 (201804) 张杨竣 秦朝葵

摘要: 天然气具有可压缩性, 其热值和华白数等物理特性计算受到不同参比压力和温度条件的影响。目前, 全球各国天然气热值和华白数计算所采用燃烧参比条件和体积计量参比条件并不完全相同。如欧美国家多采用15℃ (或者60°F) 的参比温度, 我国国标规定的参比温度为20℃, 这导致在天然气贸易和气质管理时势必和其他国家存在差别。另一方面, 国内一些燃气从业人员, 对于天然气热值和华白数计算需以参比条件为依据进行并没有明确的概念, 对不同参比条件下计算得到的数值差别很大并不了解或概念很模糊。本文通过系统的解释天然气高热值和华白数计算方法和不同参比条件下各计算结果的换算方法以及不同计量单位之间的换算, 得出各参比条件和计量单位之间的换算系数。从而利于今后相关人员更有效的管理天然气高热值、华白数等重要物理特性, 便于天然气的进口选择, 同时尽可能保证各气源气质管理, 使其进入城市燃气管网后彼此可互换而不引起高昂成本转化等问题。

关键词: 高热值 华白数 参比条件 换算系数

Analysis on Reference Condition for Natural Gas Conversions Including Wobbe Index and Superior Calorific Value Calculations

Mechanical Engineering College, Tongji University Zhang Yangjun, Qin Chaokui

Abstract: As the gas is compressible, thus its calorific value and Wobbe Index are computed by the reference conditions. At present, countries around the world use different reference conditions to calculate calorific value and Wobbe index of natural gas. Such as Europe and the United States which are like to define 15℃ or 60°F as reference temperature, while China's national standard specifies reference temperature of 20℃. So there are differences between each other, which will lead the trade of natural gas between China and these countries appearing some problems. On the other hand, in China some domestic gas practitioners are not very clear about the concept of reference conditions, and don't realize the calculation of natural gas calorific value and Wobbe index must under certain temperature and pressure. Therefore, this paper systemically analyzes the theory of conversion including wobbe index and superior calorific value calculation on different reference conditions and concludes the conversion factor of different reference conditions and different units for natural gas wobbe index and superior calorific value calculation. By these conclusions, it is conducive to more effective on natural gas trade and gas quality management in China, as well as possible to ensure that the gas sources which enter into the city gas network will be interchangeable with each other without incurring the high cost of conversion and other issues.

Keywords: Superior Calorific Wobbe Index Reference Condition Conversion Factor

1 引言

天然气作为一种常规一次能源，广泛地应用于各个领域，且近年来随着页岩气、煤层气、沿海海气的开发技术发展，包括LNG等在内的多气源天然气的开发技术发展，包括LNG等在内的多气源天然气不断被各大城市引进用于应对城市天然气供应压力，其种类组分趋于复杂。同其他气体一样，天然气也具有可压缩性，在体积计量方面受到压力和温度影响，如在0℃、1标准大气压下其体积量与15℃、1标准大气压下并不相等^[1]，在实际应用中，天然气的热值和华白数计算值受到体积计量参比条件的影响，如W（15℃，0℃，101.325kPa）和W（15℃，15℃，101.325kPa）数值差近3个单位。

目前全球各国天然气热值和华白数计算所采用燃烧参比条件和体积计量参比条件并不完全相同，表1列出了目前一些欧美亚国家采用的计量标准。相比于欧美国家，亚洲国家所采用的参比条件差别较大，而我国采用的参比条件与主流进出口LNG、天然气国家不同。天然气一些特定的物理特性数值很难统一，这势必给天然气贸易带来一定的不便。另一方面我国一些天然气相关行业人员，对于天然气的热值和华白数计算需以参比条件为依据进行，并没有明确的概念，对不同参比条件下计算得到的华白数和热值数值差别很大并不了解或概念很模糊。为了明确全球天然气贸易值，同时保证进入我国的天然气彼此尽量可互换，

让行业相关人员在实际操作中对天然气特性参数计算更明确，在天然气贸易和天然气气质管理时，必须对天然气的一些特定物理特性参数进行明确规定和计量，并将国外的计算参比条件统一到我国所采用的计量标准。这样才有利于天然气进口的有效选择，利于天然气进口和气质管理。同时尽可能保证各气源进入城市燃气管网后彼此可互换而不引起高昂成本转化等问题。

2 概念介绍^[2-3]

高热值：规定量的气体在空气中完全燃烧时所释放出的热量。在燃烧反应发生时，压力 p_1 保持恒定，所有燃烧产物的温度降至与规定的反应物温度 t_1 相同的温度，除燃烧中生成的水在温度 t_1 下全部冷凝为液态外，其余所有燃烧产物均为气态。上述规定的气体由摩尔给出时，则热值表示为 $\bar{H}(t_1, p_1)$ ；当气体由体积给出时，则热值表示为 $H[(t_1, p_1), V(t_2, p_2)]$ ，其中 t_2 和 p_2 为气体体积计量参比条件。

华白数：在规定参比条件下的体积高热值除以在相同的规定计量参比条件下的相对密度的平方根。

$$W[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{H[t_1, V(t_2, p_2)]}{\sqrt{d(t_2, p_2)}} \quad (1)$$

压缩因子：在规定的压力和温度条件下，给定质量气体的实际（真实）体积除以相同条件下按理想气

表1 欧美亚主要国家计算天然气热值和华白数采用的参比条件^[1]

	燃烧参比温度 t_1	燃烧参比压力 p_1	计量参比温度 t_2	计量参比压力 p_2
中国	20℃	101.325kPa	20℃	101.325kPa
韩国	15℃	101.325kPa	0℃	101.325kPa
日本	0℃	101.325kPa	0℃	101.325kPa
澳大利亚	15℃	101.325kPa	0℃	101.325kPa
俄罗斯	25℃	101.325kPa	20/0℃	101.325kPa
加拿大	15℃	101.325kPa	15℃	101.325kPa
美国	15℃/60°F	101.325kPa	15℃/60°F	101.325kPa
英国	15℃/60°F	101.325kPa	15℃/60°F	101.325kPa
德国	25℃	101.325kPa	0℃	101.325kPa
法国	0℃	101.325kPa	0℃	101.325kPa
意大利	25℃	101.325kPa	0℃	101.325kPa
西班牙	0℃	101.325kPa	0℃	101.325kPa

体定律计算出的该气体的体积,即对非理想气体进行体积的压力和温度修正。

$$Z_{mix}(t_2, p_2) = 1 - \left[\sum_{j=1}^N X_j \cdot \sqrt{b_j} \right]^2 \quad (2)$$

式中:

x_j ——组分j的摩尔分数;

$\sqrt{b_j}(t_2, p_2)$ ——组分j不同体积计量参比条件对应的为求和因子;

$Z_{air}(t_2, p_2)$ ——干空气不同体积计量参比条件下的压缩因子。

燃烧参比条件:指规定的燃料燃烧时的温度 t_1 和压力 p_1 。计量参比条件:指规定的燃料燃烧时,体积计量的温度 t_2 和 p_2 。一般常用的燃烧参比温度 t_1 为:25℃、20℃、15℃及0℃;常用的计量参比温度 t_2 为:20℃、15℃及0℃;燃烧和计量参比压力一般为101.325kPa。

考虑到气体的理想性和非理想性,本文先对理想气体的高热值和华白数在不同计算参比条件下的换算关系进行分析计算,再从特殊到一般,总结出实际气体的换算关系。同时对不同计量单位在不同参比条件下的转换关系进行总结。

3 计算分析

3.1 理想气体

对于给定摩尔组分的理想燃气组分,在燃烧温度 t_1 和压力 p_1 、计量温度 t_2 和压力 p_2 时的理想体积高热值计算公式如下:

$$H^0[t_1, V(t_2, p_2)] = \bar{H}^0(t_1) \times \frac{p_2}{R \cdot T_2} \quad (3)$$

式中:

$H^0[t_1, V(t_2, p_2)]$ ——理想混合气体体积高热值;

$\bar{H}^0(t_1)$ ——理想混合气体摩尔高热值;

R ——摩尔气体常数;

T_2 ——绝对温度($T_2 = t_2 + 273.15$)。

由于理想摩尔高热值的数值不受压力限制,因此,在理想气体情况下燃烧参比压力 p_1 与其无关,且认为真实摩尔高热值与理想摩尔高热值相等^[2-3]。同时,从式(3)可以看出,当计量参比压力 p_2 不变时,理想气体体积高热值与理想摩尔高热值成正比,

与体积计量参比绝对温度成反比。已知各燃烧参比温度条件下,理想摩尔高热值换算关系如表2所示。

理想气体比重计算公式:

$$d^0 = \sum_{j=1}^N X_j \cdot \frac{M_j}{M_{air}} \quad (4)$$

式中: M_j ——组分j的摩尔质量;

M_{air} ——干空气摩尔质量(28.9626kg/mol)。

表2 不同燃烧参比温度理想摩尔高热值换算系数^[2-3]

燃烧参比温度℃	25	25	25	20	20	15
	20	15	0	15	0	0
理想摩尔高热值换算系数	1.0005	1.0010	1.0026	1.0015	1.0020	1.0016

理想气体华白数计算公式:

$$W^0[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{H^0[t_1, V(t_2, p_2)]}{\sqrt{d^0}} \quad (5)$$

因此,根据式(3)–(5),对于给定组分的理想燃气,当体积计量压力 p_2 不变时,理想气体华白数 $W^0[t_1, V(t_2, p_2)]$ 只与气体摩尔高热值成正比,与体积计量参比温度 T_2 成反比,即:

$$W^0[t_1, V(t_2, p_2)] \propto \frac{\bar{H}^0(t_1)}{T_2} \quad (6)$$

通过公式(6)和表2给出的理想摩尔高热值不同燃烧温度换算系数,可以计算得到,当压力保持1Atm不变,不同参比温度条件下的理想气体体积高热值和华白数的换算系数,列于表3。

3.2 真实气体

理想气体和真实气体的区别在于前者严格遵从气体状态方程 $pV=nRT$,而后则并不完全遵从。因此,考虑到真实气体的非理想性,在计算真实气体的体积高热值、比重和华白数时,需要对气体体积进行修正,一般通过使用真实气体的压缩因子 Z_{mix} 来修正。真实气体体积高热值、比重、华白数计算公式分别如下:

$$H[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{H^0[t_1, V(t_2, p_2)]}{Z_{mix}(t_2, p_2)} \quad (7)$$

$$d(t_2, p_2) = d^0 \cdot \frac{Z_{air}(t_2, p_2)}{Z_{mix}(t_2, p_2)} \quad (8)$$

$$W[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{H[t_1, V(t_2, p_2)]}{\sqrt{d(t_2, p_2)}} \quad (9)$$

表3 不同参比温度条件下理想气体体积高热值和华白数换算系数 (压力为101.325kPa)

状态互换 (t ₁ /t ₂)	理想气体体积高热值和华白数 (MJ/m ³)								
	25/20	25/15	25/0	20/20	20/15	20/0	15/15	15/0	0/0
25/20	1.0000	0.9829	0.9318	0.9995	0.9825	0.9313	0.9820	0.9308	0.9294
25/15	1.0174	1.0000	0.9479	1.0168	0.9995	0.9475	0.9990	0.9470	0.9455
25/0	1.0732	1.0549	1.0000	1.0727	1.0544	0.9995	1.0539	0.9990	0.9974
20/20	1.0005	0.9834	0.9322	1.0000	0.9829	0.9318	0.9815	0.9304	0.9299
20/15	1.0179	1.0005	0.9484	1.0174	1.0000	0.9479	0.9985	0.9465	0.9461
20/0	1.0738	1.0554	1.0005	1.0732	1.0549	1.0000	1.0533	0.9985	0.9980
15/15	1.0184	1.0010	0.9489	1.0189	1.0015	0.9494	1.0000	0.9479	0.9464
15/0	1.0743	1.0560	1.0010	1.0748	1.0565	1.0015	1.0549	1.0000	0.9984
0/0	1.0760	1.0577	1.0026	1.0754	1.0570	1.0020	1.0566	1.0016	1.0000

根据式 (5) 和 (9) 可以得到真实华白数与理想华白数的关系为:

$$W[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{W^0[t_1, V(t_2, p_2)]}{\sqrt{Z_{mix}(t_2, p_2) \cdot Z_{air}(t_2, p_2)}} \quad (10)$$

$$= \frac{W^0[t_1, V(t_2, p_2)]}{\sqrt{\left[1 - \left(\sum_{j=1}^N X_j \cdot \sqrt{b_j(t_2, p_2)}\right)^2\right] \cdot Z_{air}(t_2, p_2)}}$$

标准组成的干空气在3个常用体积计量参比条件下的压缩因子取值为^[2-3]:

$$Z_{air}(273.15K, 101.325kPa) = 0.99941kg/m^3;$$

$$Z_{air}(288.15K, 101.325kPa) = 0.99958kg/m^3;$$

$$Z_{air}(293.15K, 101.325kPa) = 0.99963kg/m^3.$$

天然气各主要组分在不同体积计量参比条件下的求和因子下表4所示。

由于天然气组分主要以甲烷为主, 占总组分的80%~100%, 而C3~C7等重烷烃组分比例很小, 因而, 结合表4和空气压缩因子Z_{air}(t₂, p₂)数值, 可以将式(10)简化为:

$$W[t_1, V(t_2, p_2)] \approx W^0[t_1, V(t_2, p_2)] \quad (11)$$

因此, 可以认为真实气体华白数不同参比条件下的换算系数与理想气体华白数相同, 即可按表3对不同参比条件下的真实气体华白数进行换算。

3.3 各计量单位换算

国际上常用的计量体积单位有m³、scf等; 计量温度单位有℃、°F、K等; 计量压力单位有psi、Pa、

bar、Atm等; 计量能量单位有J、kWh、Btu、kcal等^[4]。各单位之间的换算关系如表5所示。

表4 天然气主要组分不同体积计量参比条件下的求和因子 (压力为101.325kPa)^[2-3]

天然气 组要成分	求和因子		
	0℃	15℃	20℃
CH ₄	0.0490	0.0447	0.0436
C ₂ H ₆	0.1000	0.0922	0.0894
C ₃ H ₈	0.1453	0.1338	0.1288
n-C ₄ H ₁₀	0.2069	0.1871	0.1783
i-C ₄ H ₁₀	0.2049	0.1789	0.1703
n-C ₅ H ₁₂	0.2864	0.2510	0.2345
i-C ₅ H ₁₂	0.2510	0.2280	0.2168
C ₆	0.3286	0.2950	0.2846
CO	0.0265	0.0224	0.0200
H ₂	-0.0040	-0.0048	-0.0051
CO ₂	0.0819	0.0748	0.0728
He	0.0006	0.0002	0.0000
N ₂	0.0224	0.0173	0.0173

表5 国际常用单位计量换算关系^[4]

单位	体积	温度	压力	能量
换算 关系	1m ³ =38.04scf	1°F=32+9°C/5	1bar=14.50psi	1kWh=3 600kJ
		0°C=273.15K	1Atm=101.325kPa 1psi=6.895kPa	1Btu=1.055kJ 1kcal=4.187kJ

目前, 各国用于计量天然气热值和华白数的常用单位有MJ/m³、kWh/m³、Btu/scf, 根据表5可以计算上述3种计量单位彼此之间的换算关系, 列于表6。

表6 三种计量单位换算关系

	MJ/m ³	kWh/m ³	Btu/scf
MJ/m ³	1.00		
kWh/m ³	0.28	1.00	
Btu/scf	24.92	89.70	1.00

在计算热值和华白数时, 有些地区和国家常采用的参比条件为60°F、60°F、14.73psi, 由表5可以换算为15.6°C、15.6°C、101.586kPa, 通过气体状态方程 $pV=nRT$ 计算, 基本可以认为该参比条件等同于15°C、15°C、101.325kPa。因此在实际应用中, 建议直接用后者进行不同参比条件的换算。

4 结论

本文通过对天然气高热值和华白数的计算方法以及各参比条件等概念的梳理分析, 得出在计算不同参比条件和不同计量单位的天然气高热值和华白数时, 真实气体华白数和高热值在不同参比条件下的换算关系可以等同于理想气体的换算, 各不同参比条件下天然气华白数和高热值的换算关系列于表3, 不同计量

单位在不同参比条件下的换算关系列于表7。

各国计算热值和华白数的参比条件并不统一, 在天然气贸易时有必要将国外计算所用的参比条件换算成我国目前国标规定的, 这有利于天然气进网的有效选择, 一定程度上可以控制气源组分差异较大而引发的互换性问题; 另一方面, 各不同参比条件的换算方法仍未被深刻和广泛地认识。因此有必要对其进行认真细致地学习和理解。

参考文献

- 1 Council of Standards Australia. AS ISO 13443—2007 Natural gas—Standard reference conditions [S]. 2007; 12: 1–11
- 2 European Committee for Standardization. BS EN ISO 6976:2005 Natural gas – Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe index from composition [S]. 2003; 5: 1–45
- 3 国家质量技术监督局. GB/T 11062–1998天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法[S]. 1998; 6: 1–24
- 4 Individual Thermal Solutions with Boldness & Care. Conversion US · UK · METRIC · SI units for thermal engineers [S]

表7 不同计量单位在不同参比条件的换算系数 (压力为101.325kPa)

状态互换 (t ₁ /t ₂)		MJ/m ³				kWh/m ³			Btu/scf		
		25/0	20/20	15/15	0/0	25/0	15/15	0/0	25/0	15/15	0/0
MJ/m ³	25/0	1.0000	1.0727	1.0539	0.9974	3.6000	3.7939	3.5907	0.0401	0.0423	0.0400
	20/20	0.9322	1.0000	0.9815	0.9299	3.3561	3.5333	3.3477	0.0374	0.0394	0.0373
	15/15	0.9489	1.0189	1.0000	0.9464	3.4160	3.6000	3.4071	0.0381	0.0401	0.0380
	0/0	1.0026	1.0754	1.0566	1.0000	3.6094	3.8038	3.6000	0.0402	0.0424	0.0401
kWh/m ³	25/0	0.2778	0.2980	0.2927	0.2771	1.0000	1.0539	0.9974	0.0111	0.0117	0.0111
	15/15	0.2636	0.2830	0.2778	0.2629	0.9489	1.0000	0.9464	0.0106	0.0111	0.0106
	0/0	0.2785	0.2987	0.2935	0.2778	1.0026	1.0566	1.0000	0.0112	0.0118	0.0111
Btu/scf	25/0	24.9176	26.7287	26.2597	24.8530	89.7035	94.5351	89.4709	1.0000	1.0539	0.9974
	15/15	23.6441	25.3880	24.9176	23.5828	85.1189	89.7035	84.8981	0.9489	1.0000	0.9464
	0/0	24.9824	26.7956	26.3281	24.9176	89.9368	94.7810	89.7035	1.0026	1.0566	1.0000