

酸气不同浓度单位换算数学模型的建立与应用

杨桦¹ 杨涛²

(1.中国石油勘探开发生产公司海外研究中心 2.中国石油西南油气田分公司采气工程研究院)

杨桦等.酸气不同浓度单位换算数学模型的建立与应用.天然气工业,2006,26(4):99-101.

摘 要 我国是拥有含酸气气藏最多的国家之一,天然气含酸气浓度是酸气治理、酸气气藏分类以及安全、合理、高效开发的重要技术决策资料。文章在介绍了不同国家(地区)有关含酸气浓度的不同术语和表示方法的基础上,指出了因术语表示方法多、应用不当所容易导致出现的主要问题;还从气体状态方程出发,首次系统、全面地推导了天然气含酸气质量浓度(g/m³)、体积百分浓度(%,体积分数)、10⁻⁶浓度(体积分数)、ppm 之间的单位换算数学模型,给出了相应的单位换算应用实例;所推导出的不同浓度单位换算数学模型,不仅适用于酸气,也适用于其它气体,特别对含酸气气藏的安全、合理、高效地开发具有十分重要的现实意义。

主题词 酸性气体 气藏 H₂S CO₂ 浓度 换算系数 数学模型

一、问题的提出

天然气中含 H₂S 在 1 g/m³ 以上或相当质量的 CO₂ 天然气气藏,统称为含酸气气藏。含酸气气藏在世界上主要分布在美国、法国、加拿大、前苏联、德国等国家和地区。我国也是拥有含酸气气藏最多的国家之一,仅在陆上已钻获的天然气中,近 50% 是酸性天然气,其中以川渝、长庆与塔里木气田尤为突出。

天然气中含酸气的浓度,是安全、合理、高效开发含酸气气藏的最重要的基础技术资料之一,它不仅是含酸气气藏分类和酸气分压计算的重要依据,而且也是防止酸气对人、生产装备、环境危害所制定一切措施的重要技术决策依据。鉴于含酸气气藏在世界上分布广泛,不同的国家、地区对天然气中含酸气这一术语的定义和量纲往往都不尽相同。美国、加拿大等国家用得最多的是百分浓度(即摩尔或体积百分数)、10⁻⁶ 体积分数、ppm(图 1)^[1];而我国采用的是 SI 国际单位制,浓度单位常用 g/m³ 或% (体积分数),这样不仅在应用不同国家有关文献的资料时,造成了单位换算的不便,而且鉴于酸性气体特别是 H₂S 气体,往往其浓度单位的换算差之毫厘,失之千里,会给人和生产带来的危害有巨大的差别(见表 1),加之国内目前尚未发现有任何书籍系统、全面

地介绍上述浓度单位之间的单位转换关系的公式及来源推导,就导致了应用这方面的资料时,不得不特别谨慎和小心。

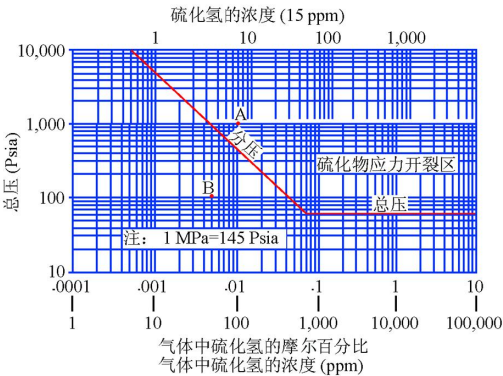


图 1 酸性气体系统图

实际上,在涉及有关含酸气浓度单位换算关系的国内文献中,常见的问题主要有:一是不知道怎样换算;二是将 ppm 误当成国际单位制中的浓度单位使用;三是将 ppm 换算为质量浓度时,把 ppm 当成换算通用常数,出现了类似将 1 ppm 误算为 1 mg/L 等错误。笔者不难指出在一些文献中单位换算错误的范例^[1],有的文献还出现了把 H₂S 的阈限值——临界浓度值 0.001%~0.01% 误换算为 10~100 mg/L (10~100 g/m³) 的错误^[2]。将 0.001%~0.01% 的 H₂S 正确的换算为质量浓度应为 15~150

作者简介: 杨桦,女,1971 年生,高级工程师,硕士;多次荣获中国石油天然气原总公司和北京市科技进步成果奖,现从事气井试采研究及管理工作。地址:(100083)北京市学院路 20 号 910 信箱。电话:(010)62098635。E-mail: yanghua@peotro-china.com.cn

mg/m^3 。显然,前者的误算是不利于天然气安全生产的。因此,笔者以建立酸气在含天然气中不同浓度单位换算数学模型为题进行了研究,以有利于正确掌握和应用不同酸气浓度单位换算数学模型,促进含酸气气藏的安全、合理、高效开发。

表1 硫化氢浓度与危害程度对照表

硫化氢在空气中的浓度	危害程度
15 mg/m^3 (10ppm)	阈限值,超过阈限值浓度现场员工必须戴上正压安全空呼器。
75 mg/m^3 (50 ppm)	只允许直接接触 10 min
150 mg/m^3 (100 ppm)	损伤嗅觉神经,接触 4 h 以上可能导致死亡
300 mg/m^3 (200 ppm)	立即破坏嗅觉、视觉系统
750 mg/m^3 (500 ppm)	2~15 min 内呼吸停止,抢救措施不及时,可能导致死亡
1050 mg/m^3 (700 ppm)	很快失去知觉,停止呼吸,不立即采取措施抢救,将导致死亡
1500 mg/m^3 (1000 ppm)	立即失去知觉,造成死亡或永久性脑损伤,智力损毁
3000 mg/m^3 (2000 ppm)	吸一口气立即死亡,抢救较困难

注:1)根据美国《OSHA—职业保护与健康法案》;2)ppm 为原表浓度单位, mg/m^3 为经换算后的相应浓度单位。

二、质量与百分浓度换算 数学模型的推导

假设 1 m^3 天然气所含酸气或其它任何气体的质量浓度为 $m(\text{kg}/\text{m}^3)$,百分浓度为 $C\%$,体积百分数),则 1 m^3 天然气中所含酸气或其它体积的质量和浓度在数值上是相当的。因此,可建立如下气体状态方程^[4,5]:

$$pV = Z \frac{m}{M} RT \quad (1)$$

式中: p 为气体压力,MPa; V 为气体体积, m^3 ; m 为 1 m^3 天然气酸气或其它气体质量,kg,在数值上与质量浓度(kg/m^3)相当; M 为气体分子量, kg/kmol ,可从常见组分表中查得^[6]; R 为气体通用常数, $\text{MPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kmol} \cdot \text{K})$,可由式(2)确定。

$$R = \frac{p_{\text{sc}} V_{\text{m}}}{T_{\text{sc}}} \quad (2)$$

在 $p_{\text{sc}}=0.101325 \text{ MPa}$ 、 $T_{\text{sc}}=293.15 \text{ K}$ 的标准状况下, $Z_{\text{sc}}=1$ 、 $V_{\text{m}}=22.4 \text{ m}^3/\text{kmol}$,故由式(2)可

知:

$$V_{\text{m}} = \frac{RT_{\text{sc}}}{p_{\text{sc}}} = 22.4 \text{ m}^3/\text{kmol} \quad (3)$$

在标准状况下,由式(1)可得:

$$V = Z_{\text{sc}} \frac{m}{M} \frac{RT_{\text{sc}}}{p_{\text{sc}}} = Z_{\text{sc}} \frac{m}{M} V_{\text{m}} \quad (4)$$

将 Z_{sc} 、 V_{m} 值代入式(4)可得:

$$V = 1 \times \frac{m}{M} \times 22.4 = 22.4 \frac{m}{M} \quad (5)$$

故由假设可知,所建立的质量浓度和体积百分浓度单位换算关系的数学模型为:

$$C = V \times 100 = 22.4 \frac{m}{M} \times 100 = 22.4 \frac{m}{M} \times 10^3 \quad (6)$$

上式中 m 的质量浓度单位为 kg/m^3 ,若换算为常用的 g/m^3 为单位,则有:

$$C = 2.24 \frac{m}{M} \times 10^3 \times 10^{-3} = 2.24 \frac{m}{M} \quad (7)$$

根据式(7),只要代入质量浓度就可以求出相应的体积百分浓度,反之已知体积百分浓度时,则可由式(8)求相应的质量浓度:

$$m = \frac{MC}{2.24} \quad (8)$$

例1:某含酸气气藏中 H_2S 、 CO_2 的质量浓度皆为 $1 \text{ g}/\text{m}^3$,试求该气藏天然气中所含酸气的体积百分浓度?

解:由表3查知 $M_{\text{H}_2\text{S}}=34.076$ 、 $M_{\text{CO}_2}=44.010$,分列代入式(7),可得

$$C_{\text{H}_2\text{S}} = 2.24 \frac{m_{\text{H}_2\text{S}}}{M_{\text{H}_2\text{S}}} = 2.24 \frac{1}{34.076} = 0.0657\%$$

$$C_{\text{CO}_2} = 2.24 \frac{m_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}} = 2.24 \frac{1}{44.010} = 0.0509\%$$

例2:某含酸气气藏中 H_2S 、 CO_2 的体积百分浓度皆为 1% ,试求该气藏天然气中所含酸气的质量浓度?

解:由式(8)可得

$$m_{\text{H}_2\text{S}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{S}} C_{\text{H}_2\text{S}}}{2.24} = \frac{34.076 \times 1}{2.24} = 15.2125 \text{ g}/\text{m}^3$$

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{M_{\text{CO}_2} C_{\text{CO}_2}}{2.24} = \frac{44.010 \times 1}{2.24} = 19.6473 \text{ g}/\text{m}^3$$

三、百分浓度、 10^{-6} 浓度与 ppm 换算数学模型的推导

国外含酸气气藏开发的许多文献,特别是美国石油学会有关酸气的许多标准,采用了 10^{-6} 浓度(体积分数)、ppm 作为酸气浓度计量单位^[1,7,8],但在我

国采用的国际单位制中是不纳入 ppm 作为浓度单位量纲的,这就要求能建立相应的数学模型,帮助我们方便的将 ppm 转换成在国际单位制中采用的体积百分浓度与质量浓度(g/m^3)。

1. 将 ppm 浓度转换为体积浓度的数学模型的推导

众所周知,ppm 是英文 parts per million(百分之几)的缩写,顾名思义有:

$$1\text{ ppm}=1\times 10^{-6}\text{ (体积分数)}\tag{9}$$

显然 ppm、 10^{-6} (体积分数)、体积百分浓度 C 可用式(10)转换三者关系:

$$C\times 10^4\text{ ppm}=C\times 10^4\text{ (}10^{-6}\text{, 体积分数)}=C\%\text{ (体积分数)}\tag{10}$$

如 $C=1\%$ (体积分数)浓度的 H_2S ,其相当的 10^{-6} ,体积分数与 ppm 由式(10)得出:

$$1\%=1\times 10^4\text{ (}10^{-6}\text{, 体积分数)}=1\times 10^4\text{ ppm}\tag{11}$$

2. 将 ppm 浓度转换为质量浓度(g/m^3)的数学模型推导

由式(8)、(10)联解,即可推导出将 ppm 转换为质量浓度 $m(\text{g}/\text{m}^3)$ 的数学模型:

$$m=\frac{MC}{2.24}=C\times 10^4\text{ ppm}\tag{12}$$

由式(12)可得:

$$1\text{ ppm}=\frac{M}{2.24}\times 10^{-4}\tag{13}$$

例 3:某含酸气气藏中 H_2S 、 CO_2 的含量分别为 1 ppm,试求该气藏天然气中所含酸气的质量浓度?解:由式(13)可得

$$\begin{aligned}1\text{ ppm H}_2\text{S}&=\frac{M_{\text{H}_2\text{S}}}{2.24}\times 10^{-4}=\frac{34.076}{2.24}\times 10^{-4}\\&=0.0015215\text{ g}/\text{m}^3=1.52125\text{ mg}/\text{m}^3\\1\text{ ppm CO}_2&=\frac{M_{\text{CO}_2}}{2.24}\times 10^{-4}=\frac{44.010}{2.24}\times 10^{-4}\\&=0.00196413\text{ g}/\text{m}^3=1.96473\text{ mg}/\text{m}^3\end{aligned}$$

四、应用实例

对含酸气气藏天然气中的酸气含量多少,四川盆地常采用质量浓度表示,其它油田与国外常采用百分浓度表示,有了上述换算数学模型,我们就非常容易进行换算。如对以质量浓度分类的含酸气气藏,我们依据式(7)就可方便地转换为相对应的以百分浓度分类的含酸气气藏分类表(见表 2)。

对于前述表 1 硫化氢在空气中的 ppm 浓度,也

正是我们利用式(12)所换算成了相应一目了然的质量浓度。此外,笔者推导的单位换算数学模型,不仅适用于酸气,而且也适用于其它气体的单位换算。

表 2 气藏按含酸性气体含量分类表

类型	H ₂ S		CO ₂	
	g/m ³	% (体积分数)	g/m ³	% (体积分数)
低含	0.02~<50	0.001~<0.3	0.2~<40	0.01~<2
中含	5~<30	0.3~<2.0	40~<200	2~<10
高含	30~<150	2~<10	200~<1000	10~<50
特高含	150~<750	10~<50	1000~<1400	50~<70

五、结 论

天然气中含酸气浓度是含酸气气藏分类和防止酸气对人、生产设备、环境危害所制定一切措施的主要决策技术依据之一。笔者首次较为系统、全面地推导了天然气含酸气体积百分浓度、体积 10^{-6} 浓度、质量浓度与 ppm 浓度之间的单位换算数学模型。应用这些数学模型可以避免单位换算常出现的错误,正确认识酸性气藏的性质,对安全、合理、高效开发含酸气气藏有着十分重要的现实意义。所推导的单位换算数学模型,不仅适用于酸气,也适用于其它气体的单位换算。

参 考 文 献

[1] Recommended practice for oil and gas well servicing and workover operations involving hydrogen sulfide[S].API RP68,1998.

[2] 曾庆恒.采气工程[M].北京:石油工业出版社,1999.

[3] 杨涛,杨桦.关于《气井试井工艺规程》的应用及探索[J].天然气工业,2005,25(10).

[4] CNAFT B C,Nawkins M F.Hpplied petrolevm reservoir engineering[R].Prentice Nall-Inc,Englewood Cliff New Jersey,1959.

[5] LKOKU C U.Natural gas production engineering[R].John Wiley & Sons,INC,1984.

[6] 杨川东.采气工程[M].北京:石油工业出版社,2001:12-13.

[7] Recommended practice for oil and gas producing plant operations involving hydrogen sulfide[S].API RP55,1995.

[8] Recommended practice for drilling and well servicing operations involving hydrogen sulfide[S].API RP49,2001.

(收稿日期 2006-01-13 编辑 韩晓渝)