

文章编号:0253-2697(2000)03-0089-06

天然气在盐溶液中的溶解机理及溶解度方程

付晓泰 王振平 卢双舫 祝孝华

(大庆石油学院 黑龙江安达 151400)

摘要: 无机盐对气体溶解度影响的主要机制是:无机离子的水合作用减少了游离水的量和降低了溶液的有效间隙度,从而使气体在盐溶液中的溶解度比在纯水中低。提出水分子与盐离子的理论配位模型,建立了盐溶液中游离水体积分数与盐的质量浓度的数学关系。在此基础上推导出与亨利定律和气体在纯水中溶解度方程具有良好相溶性的,更具一般意义的关于气体溶解度的基本方程。该方程既适用于任何浓度的盐溶液,也适用于纯水体系;适用的温度和压力范围分别为0~150℃和0~60MPa。亨利定律和气体在纯水中溶解度公式仅是本文公式在低压和盐浓度为零时的两种特例。

主题词: 天然气;地下水;盐水;溶解机理;溶解度;方程

中图分类号: TE357.42 **文献标识码:** A

1 前言

气体在水溶液中的溶解是常见的物理化学现象。在天然气地质学、天然气地球化学和天然气勘探工程中,经常会遇到天然气在地下水中的溶解问题。例如,在研究天然气的扩散^[1]、运移与聚集^[2]、成藏^[3]与破坏机制^[1]以及天然气资源评价,常需要天然气在地下水中的溶解度数据。特别是在天然气泡沫复合驱油研究中,确定天然气在油、水相中的分配,从而对开发方案的选择也具有一定意义。长期以来,人们一直依靠实验^[4]或使用回归方程^[5]来获取有关的溶解度参数,但是,这些方法都难以适应多变的地质条件。因此,只有在理论上有所突破,建立实用的理论方程,才能解决这个问题。

基于上述认识,作者曾对气体在水中的溶解机理进行了深入研究,提出了气体在纯水中溶解度的计算公式^[6]。但是,众所周知,气体在盐水中的溶解度随着盐浓度增大而降低,而地下水中的含盐量(矿化度)在不同地层变化很大(0~饱和)。因此,只有深入研究了无机盐对气体溶解的作用机理,才可能从理论上推导出包含温度、压力和矿化度变量的天然气在地下水中溶解度的理论方程,从而彻底解决天然气在地下水中溶解度的计算问题。

本文深入探讨了无机盐对天然气溶解的影响机理,推导出气体在盐溶液中溶解度的计算公式。该公式与亨利定律和气体在纯水中溶解度公式^[6]完全相容,更具有一般性。

2 盐对天然气溶解度的影响机理

2.1 基本假设

盐溶液中,水分子有两种存在形式。一部分水分子与离子作用形成水合离子,另一部分水分子称为游离水。在一定条件下,这两种水分子在宏观上处于平衡状态。根据热力学计算,在饱和NaCl溶液中,Na⁺、Cl⁻几乎全部以水合离子形式存在,而呈游离状态的水分子的浓度很低,约在10⁻⁶mol/L数量级。根据这种情况,提出如下假设:(1)盐溶液可看成是由一定体积的游离水与一定体积的饱和盐溶液混合而成,混合后体积的变化可以

基金项目:中国石油天然气集团公司石油科技中青年创新基金资助项目(1997年科字138号)。

作者简介:付晓泰,男,1957年11月生。1984年毕业于中国地质大学。现为大庆石油学院勘探系副教授。通讯处:黑龙江省安达市。

忽略不计,因此,天然气在盐溶液中的溶解量可以看成一部分来自溶液中的游离水,另一部分来自于饱和盐溶液;(2) 气体在盐溶液中的溶解仍然可以用水合作用机理和间隙填充机理^[6]描述;(3) 水合离子中的水分子不再对气体分子有水合作用。

2.2 水合离子的配位模型

为了计算单位体积盐溶液中游离水和饱和盐溶液的分体积,首先要考虑离子的配位数。根据文献数据^[7]整理,不同温度下,饱和 NaCl 溶液中,NaCl 的质量浓度(C_m)和水与 NaCl 的摩尔比见表 1。从表 1 可见,在常温下,水与 NaCl 的摩尔比近似等于 9。随着温度升高,水与 NaCl 的摩尔比降低。根据这一事实推测,常温下水合离子的配位方式可能为:6 个水分子中的氧原子与正离子(如 Na^+)形成八面体形的水合离子,而 3 个水分子中的 6 个氢原子与负离子(如 Cl^-)之间的作用,可能是借助弱氢键形成相对稳定的八面体形水合离子。(图 1)。当温度升高时,这种水合作用减弱,离子的配位数减小,从而使水与 NaCl 的摩尔比减小。

根据表 1 中的数据进行回归,得到 $0\sim 200^\circ\text{C}$ 范围内饱和盐溶液中水与 NaCl 的摩尔比 $r(t)$ 与温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 的关系为

$$r(t) = 9.1522 - 4.386 \times 10^{-3} \cdot t - 4.761 \times 10^{-5} \cdot t^2 + 7.2833 \times 10^{-8} \cdot t^3 \quad (1)$$

表 1 饱和溶液中 NaCl 的质量浓度(C_m)和

水与 NaCl 的摩尔比

Table 1 The mass concentration(C_m)of NaCl and mole ratio of H_2O with NaCl in saturated solution

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	质量浓度 $C_m(\text{g}/1000\text{gH}_2\text{O})$	摩尔比 ($\text{H}_2\text{O}/\text{NaCl}$)
0	35.65	9.100
20	35.81	9.058
40	36.33	8.929
60	37.06	8.753
80	38.01	8.535
100	39.12	8.292
118	39.73	8.155
140	42.11	7.705
160	43.62	7.438
180	44.89	7.227
200	46.20	7.022

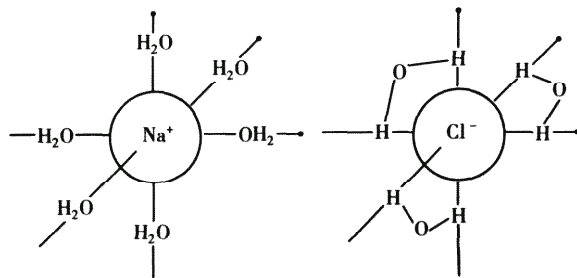


图 1 水合离子的配位模型

Fig. 1 Coordinating model for water molecules with ions

2.3 游离水体积分数

设体系由 1000g 水与 C_m 克盐组成溶液,其体积为 V_b ,密度为 $d_s(t)$ 。根据假设,游离水的分体积(V_{fw})定义为式(2),饱和盐溶液的分体积(V_s)为式(3)

$$V_{fw} = f \cdot V_b \quad (2) \quad V_s = (1 - f) \cdot V_b \quad (3)$$

式中 f 称为溶液的游离水体积分数。体系中,盐与水分子形成水合离子消耗的水的量为

$$m_w = \frac{C_m}{M_s} \cdot r(t) \cdot M_w = \frac{M_w}{M_s} \cdot r(t) \cdot C_m \quad (4)$$

式中 M_w 、 M_s 分别为水分子与盐的分子量。根据假设,游离水的量(m_{fw})应为

$$m_{fw} = 1000 - m_w = 1000 - \frac{M_w}{M_s} \cdot r(t) \cdot C_m \quad (5)$$

游离水的分体积(V_{fw})由式(6)计算,而溶液的体积由式(7)计算

$$V_{fw} = \frac{m_{fw}}{d_w(t)} \quad (6) \quad V_b = \frac{1000 + C_m}{d_s(t)} \quad (7)$$

由式(5)~(7)可导出游离水体积分数的表达式

$$f = \frac{V_{fw}}{V_b} = \frac{\left[1000 - \frac{M_w}{M_s} \cdot r(t) \cdot C_m\right] \cdot d_s(t)}{(1000 + C_m) \cdot d_w(t)} \quad (8)$$

根据研究,式(8)中纯水与溶液的密度方程分别为

$$d_w(t) = 0.99957 + 6.49934 \times 10^{-5}t - 7.99869 \times 10^{-6}t^2 + 4.45101 \times 10^{-8}t^3 - 1.23575 \times 10^{-10}t^4 \quad (9)$$

$$d_s(t) = a \cdot C_m + d_w(t) \quad (10)$$

式(8)中 $d_w(t)$ 为水的密度。式(10)中 a 是与盐的离子构形有关的常数, t 为温度($^{\circ}\text{C}$)。A(1)B(1)、A(1)₂B(1)和 A(1)B(1)₂ 三种离子构型的无机盐的 a 值分别为 0.00059、0.00072 和 0.00077^[8]。当 $C_m=0$ 时,应有 $d_s(t)=d_w(t)$, $f=1$,这是纯水的情况;当盐浓度达到饱和时,应有 $f=0$,这是饱和盐溶液的情况。须指出的是,式(10)中的 C_m 仍取质量浓度。

2.4 盐浓度对气体水合常数的影响

研究表明,气体在盐溶液中的溶解量不等于 V_w 体积的水和 V_s 体积的饱和盐溶液对气体溶解量的简单加和。显然是因为实际盐溶液中水合离子的存在,对游离水与气体形成水合分子有一定的影响。根据研究,天然气组分在水中的水合常数均可以用下式表示^[9]

$$K_i = A_i \cdot e^{-\Delta H_i/RT} \quad (11)$$

设气体的水合热 ΔH 不变,相对纯水而言,由于单位体积盐溶液中游离水的体积分数由 1(纯水)变为 f ,根据化学动力学碰撞理论,气体与水分子碰撞才能形成水合分子。但在溶液中由于气体分子周围不完全是游离水,根据假设(3),气体与水合离子之间的碰撞是无效的,因此,有效碰撞的方位因子也相应地由 1(纯水)减小为 f 。所以,在盐溶液中,气体的水合常数应为

$$K_{si} = f \cdot A_i \cdot e^{-\Delta H_i/RT} = f \cdot K_i \quad (12)$$

式中 K_i 为气体 i 中纯水中的水合常数。天然气主要成分的水合常数参见文献[9]。

2.5 无机盐种类的影响

现代量子力学证明,离子所带电荷不是定域的。因此,不同盐的水合离子可能有相似的结构。所以,由 NaCl 溶液得到的数学模型也可能适用于其它无机盐溶液。据文献[5]报导,当溶液的矿化度(g/L)相等时,天然气在 NaCl、NaHCO₃、CaCl₂、Na₂SO₄ 四种盐溶液中的溶解度十分接近,说明盐的种类对溶解度的影响不显著。这一性质为地质上计算天然气在地层水中的溶解度提供了极大方便。即只需考虑盐的质量浓度,而不必考虑盐的种类。

2.6 无机盐影响气体溶解度的机理

大量实验事实表明,气体在溶液中的溶解度随盐浓度的增大而减小。根据假设,由于只有游离水才对气体有水合作用,而盐溶液中游离水随着盐浓度的增大而减少(图 2),因此,气体的溶解度必然随着盐浓度的增大而减小。另一方面,盐溶液的密度比纯水大,说明盐溶液的有效间隙度比纯水小。分析认为,盐的离子本身要占据一部分间隙,而离子与水分子形成相对紧密的水合离子,也会使有效间隙度减小。因此,上述两种因素是气体在盐溶液中溶解度降低的根本原因。

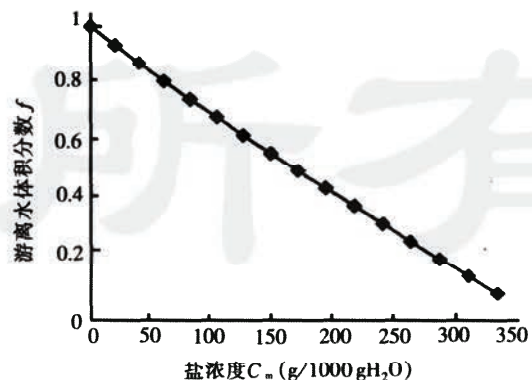


图 2 25℃时 NaCl 溶液中游离水体积分数与盐浓度的关系

Fig. 2 The relationship between the volume fraction of free water and the concentration of NaCl at 25℃

3 气体在盐溶液中的溶解度方程

根据假设,气体在盐溶液中的总溶解度为游离水与饱和盐溶液的贡献之和

$$C_b = C_w + C_s \quad (13)$$

气体 i 在水中的溶解度公式为^[6]

$$C_i = \left(K_i + \frac{\phi_i}{RT + b_i p_i} \right) \cdot p_i - \frac{b_i p_i^2 K_i}{RT + b_i p_i} \quad (\text{mol/m}^3) \quad (14)$$

式(15)中 C_i 、 p_i 分别为气体 i 的溶解度(mol/m^3)和分压(Pa); ϕ_i 为水对气体 i 的间隙度。 b_i 为气体 i 的范德华体积(m^3/mol)。对甲烷而言,其值为 $4.28 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{mol}$ 。 R 、 T 分别为气体常数和温度(K)。

因为单位体积盐溶液中游离水分体积为 f ,并考虑到方位因子,所以,盐溶液中游离水对气体溶解度的贡献为

$$C_w = \left[\left(f \cdot K_i + \frac{\phi_i}{RT + b_i p_i} \right) \cdot p - \frac{b_i p_i^2 f \cdot K_i}{RT + b_i p_i} \right] \cdot f \quad (\text{mol/m}^3) \quad (15)$$

在饱和盐溶液中,由于游离水浓度近似等于零,可认为气体仅以间隙填充方式存留于饱和盐溶液中。根据前文的推导^[6],气体以间隙填充方式的溶解量为

$$n_i = \frac{p_i V_j}{RT + b_i p_i} \quad (\text{mol}) \quad (16)$$

式中 V_j 为盐溶液相对于气体 i 的有效间隙体积。若饱和盐溶液的体积为 V_s ,有效间隙度为 ϕ_{si} ,则 V_j 的表达式为式(17)。设 V_b 为单位体积,将式(17)代入式(16),得饱和盐溶液的贡献为式(18)

$$V_j = V_s \cdot \phi_{si} = (1 - f) V_b \cdot \phi_{si} \quad (17) \quad C_s = \frac{p_i (1 - f) \cdot \phi_{si}}{RT + b_i p_i} \quad (\text{mol/m}^3) \quad (18)$$

将式(15)、(18)代入式(13)中,最后得到气体在盐溶液中溶解度方程的一般形式为

$$C_{si} = \left[\left(f \cdot K_i + \frac{\phi_i}{RT + b_i p_i} \right) \cdot p_i - \frac{b_i p_i^2 f \cdot K_i}{RT + b_i p_i} \right] \cdot f + \frac{p_i (1 - f) \cdot \phi_{si}}{RT + b_i p_i} \quad (\text{mol/m}^3) \quad (19)$$

式(19)是气体在盐溶液中的溶解度基本方程。其中, ϕ_i 、 ϕ_{si} 、 K_i 这三个参数与温度的关系分别为

$$\phi_i = \alpha_i \cdot (0.00969683 + 3.16392 \times 10^{-5} t - 1.257929 \times 10^{-6} t^2 + 2.19631 \times 10^{-8} t^3) \quad (20)$$

$$\phi_{s(\text{CH}_4)} = 0.005068 + 1.0047 \times 10^{-5} t + 1.5632 \times 10^{-9} t^2 + 1.4706 \times 10^{-11} t^3 \quad (21)$$

$$K_{(\text{CH}_4)} = e^{-18.561} \cdot e^{2133.89/RT} \quad (22)$$

式(21)中 α_i 是气体的分子体积因子,其值等于 He 与气体 i 的范德华体积之比^[6](He 的范德华体积为 $2.37 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{mol}$)。工业上有时用单位体积溶液溶解的气体在标准状况下的体积来表示溶解度,这时,只需将式(20)乘以一摩尔气体在标准状况下的体积即可,即

$$R_s = 0.0224 C_s \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (23)$$

ϕ_i 、 ϕ_{si} 、 K_i 是与气体种类有关的参数,对甲烷而言,分别用式(20)~式(22)确定。天然气主要成分的水合常数参见文献[9]。水与饱和盐溶液对其它气体的有效间隙度可由气体 i 与甲烷的范德华体积校正得到

$$\phi_i = \frac{b_{(\text{CH}_4)}}{b_i} \cdot \phi_{(\text{CH}_4)} \quad (24)$$

4 结果与讨论

4.1 气体在盐溶液中的溶解度公式与其它溶解度公式的相容性

从理论上讲,一个合理的溶解度公式在低压下应服从亨利定律,而在盐浓度为零时应服从气体在水中的溶

解度公式。将式(19)与式(14)比较,可以看出,当盐溶液的浓度等于零时($f=1$),液相成为纯水体系,这时式(19)还原为式(14),即气体在水中的溶解度公式。说明式(14)只是式(19)在盐浓度等于零时的一个特例。

将式(19)变换为亨利定律的形式

$$C_s = \left[f^2 K_i + \frac{f \cdot \phi_{wi}}{RT + b_i p_i} - \frac{b_i p_i f^2 K_i}{RT + b_i p_i} + \frac{(1-f) \cdot \phi_{si}}{RT + b_i p_i} \right] \cdot p_i \quad (\text{mol/m}^3) \quad (25)$$

可见盐溶液的亨利常数由四项构成,且与 T 、 p_i 和盐浓度有关。其中 $f < 1$,当温度与盐浓度确定后有定值。 K_i 在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 数量级, b_i 在 10^{-5} 数量级,因此,在压力不太高时第三项可以忽略不计。而 $b_i p_i$ 相对于 RT 也可以忽略。所以,在压力不太高时式(25)成为

$$C_s = \left[f^2 K_i + \frac{f \cdot \phi_{wi}}{RT} + \frac{(1-f) \cdot \phi_{si}}{RT} \right] \cdot p_i = K'_i \cdot p_i \quad (\text{mol/m}^3) \quad (26)$$

式(26)中的 K'_i 只与温度和盐浓度有关。显然,这就是经典意义上的亨利定律。

上述讨论证明,本文导出的公式在低压下与亨利定律具有完全相同的形式。换句话说,经典的亨利定律也是式(19)在低压下的一个特例。

综上所述,式(19)是比式(14)和亨利定律更具有普遍意义的计算气体溶解度的理论方程。该方程不仅适用于常温、常压,更重要的是适用于高温、高压。尤其是可适用于任何浓度的盐溶液,这对天然气勘探中计算天然气的运聚参数与扩散参数具有重要的实用价值。

4.2 溶解度方程的验证

以甲烷为例,由式(8)、式(20)~式(22)计算有关参数,代入基本方程式(19)或式(23),即可计算任何温度、压力和盐浓度条件下甲烷的溶解度。表2、表3是甲烷在NaCl溶液中溶解度的理论计算值与文献值^[10]的比较。从表2、表3可见,理论结果与实验结果基本一致。证明由气体溶解机理和无机盐作用机理导出的溶解度方程是合理、可靠的。

表2 甲烷在NaCl溶液中的溶解度理论值与实验值的比较(m^3/m^3)

Table 2 Comparison of calculation values with experimental data for the solubility of CH_4 in NaCl solution

矿化度 (g/L)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	压力 (MPa)											
		5		10		15		20		25		30	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
20	20	1.374	1.232	2.543	2.098	3.543	2.775	4.425	3.305	5.193	3.740	5.873	4.103
	40	0.949	0.995	1.764	1.668	2.472	2.225	3.091	2.710	3.639	3.122	4.126	3.648
	60	0.726	0.812	1.355	1.455	1.905	1.988	2.390	2.423	2.821	2.812	3.206	3.131
	80	0.636	0.763	1.191	1.388	1.680	1.912	2.113	2.348	2.500	2.712	2.848	3.027
100	20	0.837	0.755	1.548	1.322	2.161	1.757	2.693	2.100	3.161	2.407	3.575	2.648
	40	0.613	0.603	1.139	1.101	1.595	1.495	1.995	1.810	2.348	2.083	2.663	2.305
	60	0.499	0.541	0.930	1.031	1.308	1.328	1.641	1.704	1.936	1.983	2.201	2.201
	80	0.463	0.502	0.866	0.945	1.222	1.318	1.537	1.642	1.818	1.905	2.071	2.124
200	20	0.404	0.433	0.748	0.791	1.044	1.081	1.302	1.301	1.528	1.443	1.727	1.552
	40	0.339	0.339	0.630	0.641	0.883	0.899	1.104	1.101	1.300	1.259	1.474	1.343
	60	0.309	0.302	0.577	0.583	0.810	0.819	1.017	0.998	1.200	1.152	1.363	1.255
	80	0.309	0.281	0.580	0.547	0.817	0.781	1.028	1.061	1.216	1.108	1.384	1.209
300	20	0.229	0.269	0.422	0.478	0.590	0.657	0.734	0.781	0.862	0.876	0.974	0.912
	40	0.222	0.247	0.414	0.439	0.580	0.608	0.726	0.724	0.854	0.808	0.969	0.842
	60	0.220	0.228	0.411	0.407	0.579	0.578	0.726	0.697	0.857	0.778	0.973	0.820
	80	0.224	0.201	0.420	0.387	0.591	0.548	0.774	0.678	0.881	0.762	1.003	0.793

注:*a*为本文计算值;*b*为实验值^[10]。

表 3 甲烷在 NaCl 溶液中的溶解度理论计算值与文献值的比较(m^3/m^3)Table 3 Comparison of calculation values with literature data for the solubility of CH_4 in NaCl solution

矿化度 (g/L)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	压 力 (MPa)											
		17.68		21.09		24.61		28.12		35.15		42.1	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
58.5	77.11	1.657	1.839	1.901	2.069	2.134	2.281	2.355	2.486	2.737	2.853	3.074	3.183
	104.44	1.785	1.937	2.053	2.207	2.309	2.449	2.553	2.699	2.977	3.063	3.355	3.406
	137.78	2.554	2.331	2.943	2.646	3.319	2.948	3.677	3.240	4.305	3.770	4.868	4.221
175.5	77.11	1.021	1.160	1.171	1.306	1.314	1.439	1.450	1.569	1.685	1.800	1.894	2.008
	104.44	1.180	1.222	1.357	1.392	1.526	1.545	1.687	1.648	1.968	1.933	2.217	2.149
	137.78	1.724	1.471	1.987	1.669	2.240	1.860	2.482	2.644	2.906	2.379	3.286	2.663
292.5	77.11	0.683	0.732	0.784	0.824	0.881	0.908	0.972	0.990	1.129	1.136	1.269	1.267
	104.44	0.760	0.771	0.874	0.878	0.983	0.975	1.087	1.062	1.268	1.219	1.428	1.356
	137.78	1.005	0.928	1.158	1.053	1.306	1.147	1.447	1.290	1.695	1.501	1.916	1.681

注:*a* 为本文计算值;*b* 为文献值^[10]。

5 结 论

1. 无机盐降低气体溶解度的主要原因是无机离子的水合作用减少了游离水的量;其次是降低了溶液的有效间隙度。

2. 气体在盐溶液中的溶解度方程式与亨利定律具有良好的相容性,即亨利定律只是式(19)在低压下的一个特例。

3. 式(19)与气体在水中的溶解度方程式(14)也具有良好的相容性,即气体在水中的溶解度方程是式(19)在盐浓度等于零时的一个特例。

4. 对甲烷而言,式(19)适用的温度、压力范围(温度: $0\sim 150^{\circ}\text{C}$;压力: $0\sim 60\text{MPa}$)较之亨利定律的适用范围已大大扩展,同时突破了气体在水中的溶解度方程只适用于纯水的限制条件(适用的盐浓度范围: $0\sim$ 饱和),使之成为具有一般意义的溶解度方程。为天然气勘探中资源评价和天然气驱油的动态数值模拟提供了一个实用的数学公式。

参 考 文 献

- [1] 王文广,付广. 泥质岩盖层对水溶性天然气的封闭作用及研究方法[J]. 勘探家,1997,(4):47~50.
- [2] Price L C. Aqueous solubility of petroleum as applied to its origin migration[J]. AAPG Bull,1976,60(2):213~243.
- [3] 孙永祥. 初探地下水溶解气及其对气藏形成的影响[J]. 石油勘探与开发,1992,(2):41~47.
- [4] Bonham L C. Solubility of methane in water at elevated temperature and pressure[J]. AAPG Bull,1978,62(12):2478~2481.
- [5] 郝石生,张振英. 天然气在地层水中的溶解度变化特征及地质意义[J]. 石油学报,1993,14(2):12~21.
- [6] 付晓泰,王振平,卢双舫. 气体在水中的溶解机理及溶解度方程[J]. 中国科学(B辑),1996,(2):127~132.
- [7] H Stephen, T Stephen. Solubility of Inorganic and Organic Compound[M]. Pergamon Press, Oxford, London. 1963:108~109.
- [8] 付晓泰,王振平,祝孝华. 无机盐溶液的密度方程[J]. 大庆石油学院学报,1998,(2):6~9.
- [9] 付晓泰,王振平,夏国朝. 天然气组分的水合热、水合常数及理论溶解度[J]. 石油学报,1998,18(1):79~84.
- [10] B. N. 拉林著,天然气聚集过程定量评价[M]. 徐树宝等译. 北京:石油工业出版社,1992:7~12.

(收稿日期 1998-06-26 修订日期 1999-03-19 编辑 张君娥)

with higher accuracy of the well bore designing data. The actual application has been completed in 5 segments of 2 wells, Jianghan Oil Field. The method can guide the field construction.

Key words: directional well; 3-D; design; azimuth; theory

CALCULATION OF INTERFERENCE CORROSION ON STEEL STRUCTURES NEAR CATHODIC PROTECTION SYSTEM ACTA 2000,21(3):83~88.

WENG Yong-ji et al. (*Petroleum University, Beijing*)

The interference corrosion of external steel structures located next to cathodically protected (CP) systems was evaluated based on electric field theory of stable currents. The parameters in the evaluation were from (1) peripheral electrical field modeling of CP systems, (2) location of external structures, and (3) polarization of the surface of metal structures. The equations of potential shift on structures were derived in typical cases, such as on pipes near the CP pipeline, or surface structures near the CP storage tanks or well casing. An example was given for a complex CP system. The interference potential and current density on pipeline near several CP storage tanks were calculated analytically, and the results were agreement those by numerical methods.

Key words: cathodic protection; interference corrosion; potential; current density; calculation

MECHANISM OF NATURAL GAS DISSOLVING IN BRINES AND THE DISSOLVING EQUATION ACTA 2000,21(3):89~94.

FU Xiao-tai et al. (*Daqing Petroleum Institute*)

The influential mechanism of inorganic salt for the solubility of natural gas is investigated. The solubility of natural gas in salt solution is less than that in pure water, which results from the consumption of free water and the decrease of the effective interspace due to the aquation of inorganic ions. The theoretical coordination models of water molecules with the inorganic ions are proposed. A mathematical relationship between the volume fraction of free water and the concentration of salt is established. Base on the work above, a more general model for calculating gas solubility is proposed, which can be applied to both pure water system and brines with any concentration. This model can be applied in the temperature range of 0~150°C and pressure 0~60MPa. From this model, it can be verified that the classical Henry's law and the solvating model of gas in pure water are the two particular cases under low pressure or when the concentration of salt is equal to zero.

Key words: natural gas; brines; ground water; solubility; solvating mechanisms; Solvating model

ANALYSIS OF DISTORTION POWER AND POWER FACTOR IN FREQUENCY VARIATION SPEED-REGULATION SYSTEM ACTA 2000,21(3):95~99.

CAO Yu-quan (*Daqing petroleum Institute*)

In the frequency variation speed-regulation system, the high frequency harmonic current leads to distortion power N , and the power factor of the system, the input power factor of the inverter, is calculated by the ratio of the active power to the apparent power or by the cosine of the angle included between fundamental harmonic current and source voltage. The calculation usually results in a deviation from the actual power factor. This paper gives a new concept of the power quadrangle made up of S , P , Q and N , presenting the formula to calculate the actual power factor, demonstrating the numerical value relation among actual, total and displacement power factor. The conclusion in this paper has been proved by the field data measured from the oil transferring system with frequency variation speed-regulation in Daqing No. 2 Oil Plant.

Key words: frequency variation speed-regulation system; harmonic; distortion power; power factor; power quadrangle; field data