

气藏高矿化度地层水盐析相态及生产影响因素

王 彬

中石化西南油气分公司川东北采气厂, 四川 阆中 637400

摘 要:针对高温高压气藏高矿化度地层水开展了盐析相态和生产影响因素分析。由于地层水含有电解质,采用 Pitzer 模型表征固相氯化钠热力学平衡,建立气-凝析油-地层水-固体的四相平衡模型。高矿化度地层水在降压开采过程中,气中水含量增加,密度先增加后略微降低,密度极大值将降压过程分为“非盐析过程”和“盐析过程”,矿化度抑制地层水蒸发,却加速地层水盐析。储层渗透率越低、束缚水饱和度越高或矿化度越大,地层盐析量越大。生产动态分析中确定采气速度越大或井底压力越低,盐析发生时间越早,盐析量越大。地层水盐析对单井产能有较大影响,造成储层孔隙度和渗透率降低。研究成果为含高矿化度地层水的高温高压气藏盐析预测奠定了基础。

关键词:高温高压气藏;高矿化度地层水;盐析相态;影响因素

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2016.06.016

0 前言

随着天然气勘探开发不断向纵向发展,世界范围内陆续发现了许多高温高压气藏。由于高温高压特性,气藏储层物性、开采动态及相态特征均与常规气藏有一定的差别,特别是对于含高矿化度地层水气藏,生产过程中可能发生地层水盐析效应,减损井的产能^[1]。Kleinitz W 等人^[2]首次发现地层水盐析现象,评价了盐析效应对气井生产的影响。Zuluaga E 等人^[3]预测了实际气田盐析现象,认为北海油田地层水蒸发 40% 时氯化钠析出。汤勇等人^[4]开展了系列地层水蒸发和盐析的物理实验,定量描述了盐析对储层物性的影响。林启才等人^[5]分析了加重压裂液在储层改造中盐析的可能性。在实际生产中,中原油田文 23 气田 62% 的井均出现了结盐效应,严重威胁了气田的高效开发^[6-8]。对于地层水盐析,国内外研究主要以数学模型^[9-10]、物理实验^[11-14]和预防措施^[15]为主,较少研究相态特征和气井生产动态。

本文从气藏相态理论出发,对影响气藏生产的储层物性、生产动态进行因素分析,确定地层水盐析对单井

产能和储层物性的影响,为高效开发该类气藏奠定了基础。

1 高矿化度地层水盐析模型

对于气藏体系来说,考虑地层水盐析的相平衡模型最复杂的体系是存在凝析油的气液液固四相模型^[16]。由于痕量理论,不考虑固体在气相和凝析油相中的存在。将凝析油作为第一液相,地层水作为第二液相,建立物质平衡方程:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \frac{z_i(k_i^{VL} - k_i^{VW})}{Vk_i^{VL}k_i^{VW} + (1 - W - S - V)k_i^{VW} + Wk_i^{VL}} = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \frac{z_i k_i^{VL}(k_i^{VW} - 1)}{Vk_i^{VL}k_i^{VW} + (1 - W - S - V)k_i^{VW} + Wk_i^{VL}} - k_{NaCl}^{WS} = 0 \quad (2)$$

$$g_{NaCl}^S = \frac{g_{NaCl}^W}{k_{NaCl}^{WS}} = \frac{z_{NaCl} - S}{Wk_{NaCl}^{WS}} = 1 \quad (3)$$

式中:V、L、W、S 分别为平衡气、凝析油、地层水(电解质

收稿日期:2016-07-16

基金项目:国家自然科学基金项目“高温高压二氧化碳-原油-地层水三相相平衡溶解度规律”(51404037)

作者简介:王 彬(1990-),男,四川自贡人,助理工程师,硕士,主要从事天然气开发管理与设计工作。

溶液)和固态氯化钠的摩尔含量, mol ; $g_{\text{NaCl}}^{\text{S}}$ 和 $g_{\text{NaCl}}^{\text{W}}$ 表示氯化钠在固相和地层水相中的含量; k_i^{VW} 、 k_i^{WL} 、 k_i^{WS} 、 k_i^{VL} 分别为气相-地层水、凝析油-地层水、地层水-氯化钠、气相-凝析油的平衡; z_i 、 z_{NaCl} 分别为体系第 i 组分和氯化钠组分的总体系组成。

以地层水为参考相, 体系中气体和凝析油相采用逸度系数计算热力学平衡; 由于地层水含盐, 地层水相采用 Pitzer 模型^[17] 修正。地层水相中的非盐组分用平衡水活度系数表示, 固相氯化钠采用单一固相组分逸度方式求取^[18-20]。

2 高矿化度地层水气藏相态特征

以西部 X 气藏为例, 气藏组成见表 1, 储层温度 150 °C, 储层压力 60 MPa, 以改变体系压力的方式分析该气藏的相态特征。

表 1 X 气藏组成

组成	CH ₄	C ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O	NaCl
摩尔含量/(%)	32.01	1.99	0.51	0.30	57.90	7.29

图 1 为体系降压过程气相和液相变化, 体系压力降低, 水相蒸发作用加强, 气相中水含量增加, 液相中甲烷含量略有增加。低压条件下, 固相氯化钠逐渐析出, 地层水中氯化钠逐渐减少, 地层水密度先增加后减小。图 2 为地层水密度变化曲线, 当体系压力降至 10 MPa 时, 地层水密度出现极大值, 并将降压过程分为“非盐析过程”和“盐析过程”, 压力继续下降, 地层水进一步蒸发, 氯化钠析出量逐渐增加。

忽略储层温度的影响, 另外一个影响地层水盐析的重要因素是矿化度。图 3 为不同矿化度体系气相中水蒸气含量变化, 矿化度越高, 气相中水含量越低, 说明矿化度对地层水蒸发有抑制作用。图 4 为不同矿化度体系液相密度, 随着不同体系中氯化钠的析出, 地层水矿化度逐渐接近, 液相密度和气相中水含量逐渐接近。

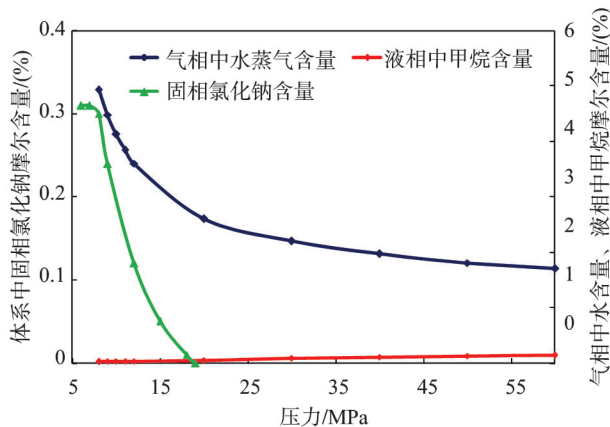


图 1 降压过程中气相及液相变化

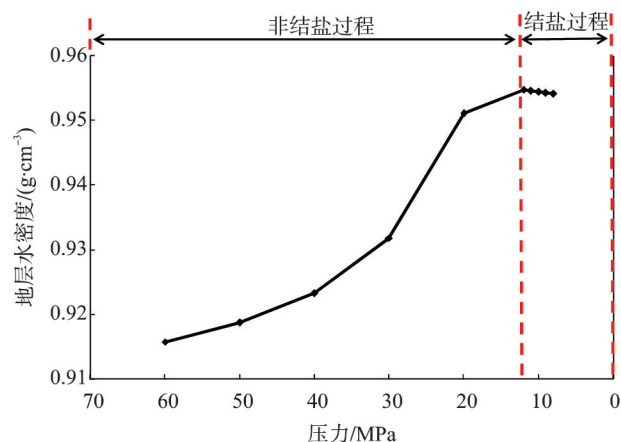


图 2 气藏体系变化过程中地层水密度变化

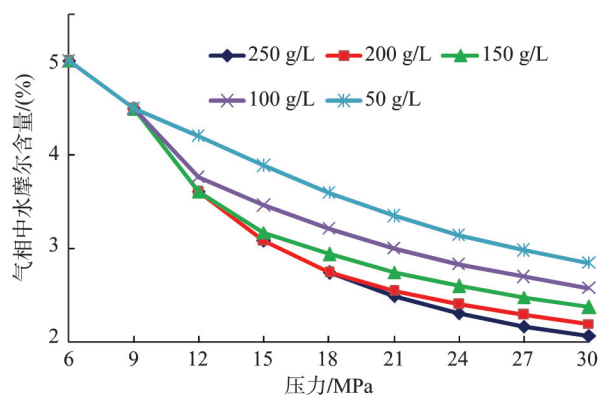


图 3 不同矿化度体系气相中水含量

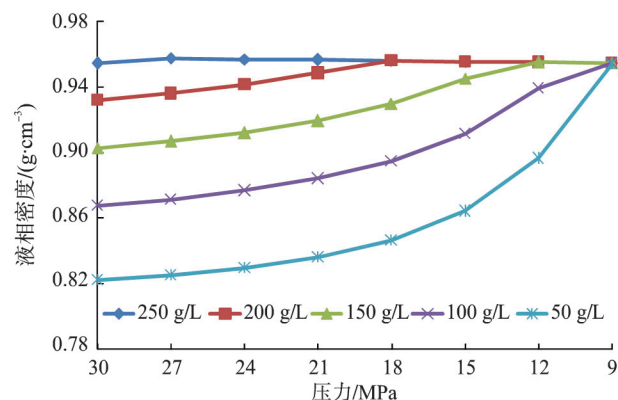


图 4 不同矿化度体系液相密度

3 储层物性对地层水盐析的影响

以西部 X 气藏为例, 气藏组成见表 1, 基础参数见表 2, 建立单井数值模拟模型, 模型网格 $19 \times 1 \times 5$, 模型考虑氯化钠的溶解平衡。单井定产气量 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 最小井底压力 6 MPa, 模拟开始时间 2000 年 1 月 1 日, 预测生产 30 a。

3.1 储层渗透率的影响

分别设置储层渗透率为 10×10^{-3} 、 20×10^{-3} 、 $30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 预测时间 9 a, 其他参数保持不变。图 5 为不同渗透率方案气相中水含量, 储层渗透率越低, 单位时

间内压降越大,蒸发作用越明显,气相中水蒸气含量越大。图6为不同渗透率方案地层盐析产量,渗透率越低,盐析效应越明显,结盐速度越大,盐析产量越大。

表2 X气藏基础参数

储层参数	数值	储层参数	数值
储层深度/m	6 000	储层压力/MPa	60
孔隙度/(%)	15	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	20
储层厚度/m	50	地层水矿化度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	200

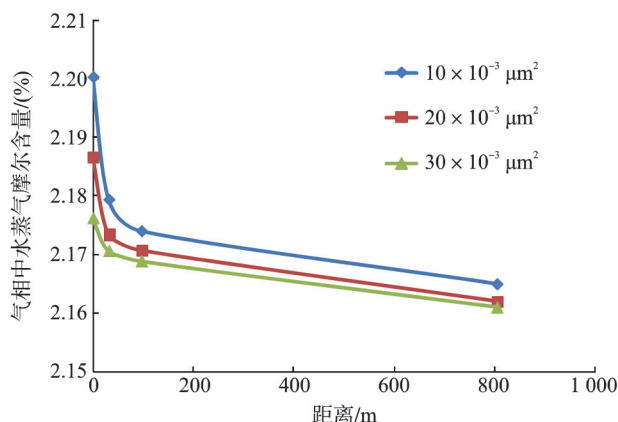


图5 不同渗透率方案气相中水含量

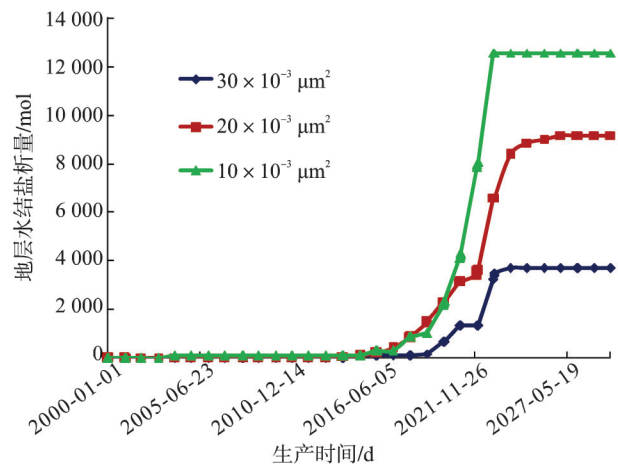


图6 不同储层渗透率方案盐析产量

3.2 束缚水饱和度的影响

分别设置束缚水饱和度为0.35、0.30和0.25,其他参数保持不变。束缚水饱和度的大小决定了气体流动空间,进而影响气相流动过程。图7为不同束缚水地层盐析产量,相同产气量情况下,束缚水饱和度越高,气藏压力下降越多,地层水蒸发作用越强,气相中水蒸气含量越大,盐析时间越早,盐析量越大。

3.3 地层水矿化度的影响

分别设置地层水矿化度为100 g/L、200 g/L和300 g/L,其他参数保持不变。图8为不同矿化度方案盐析产量,矿化度越高,地层水密度越大,地层蒸发作用越不明显,但地层结盐量越大,说明地层水矿化度对储层盐析具有促进作用。地层水自身性质对盐析的影响大于水蒸发

对盐析的影响。

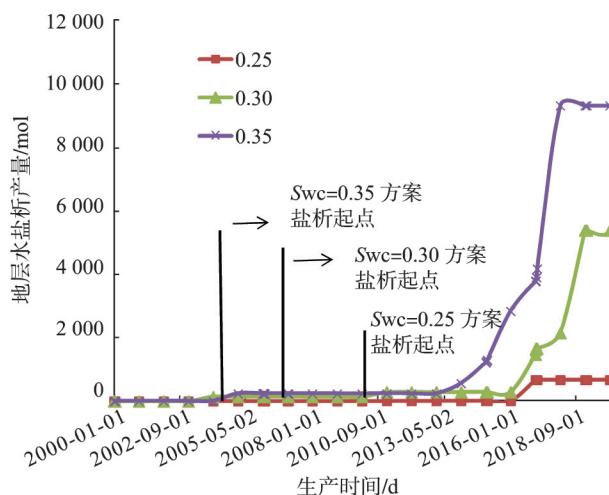


图7 不同束缚水方案的地层盐析产量

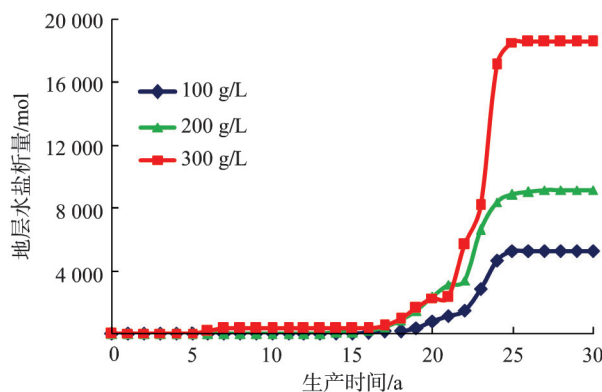


图8 不同地层水矿化度方案盐析量

4 生产动态对地层水盐析的影响

4.1 产气速度的影响

设置日产气量为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $12 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $9 \times 10^4 \text{ m}^3$,其他条件保持不变,图9为网格(3,1,1)的气相中水蒸气含量变化,产气速度越大,气体流动速度越大,单位时间内压降也越大,液相表面蒸汽压降低越多,气中水含量越大,地层水蒸发作用越明显。图10为不同产气量方案结盐量,产气速度越大,盐析量越大。

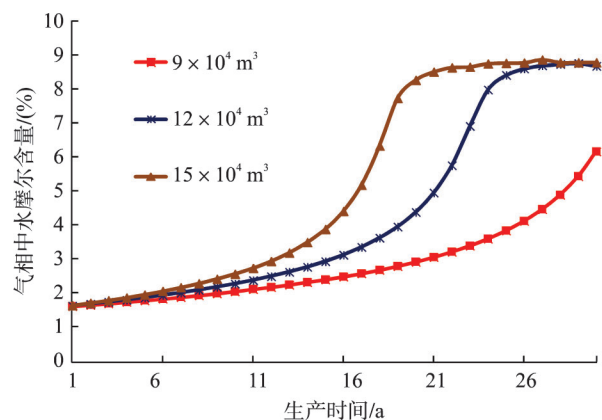


图9 不同产气速度方案气相中水含量

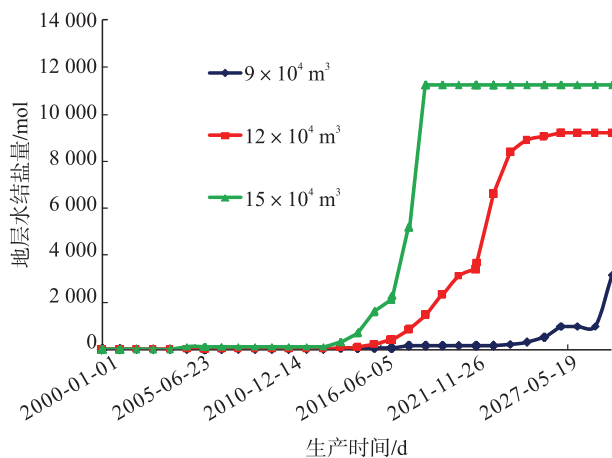


图 10 不同产气速度方案地层结盐量

4.2 井底压力的影响

分别设置井底压力为 10、8 和 6 MPa, 气井初期以定产气量生产, 生产一段时间后变为控制最小井底压力, 单井产量出现差异。井底压力越低, 气相中水蒸气的变化越快, 地层水蒸发量越大, 矿化度变化越大, 地层盐析情况越严重, 见图 11。盐析产量出现差异的时机即为生产制度改变的时机, 生产制度对地层结盐动态有较大影响。

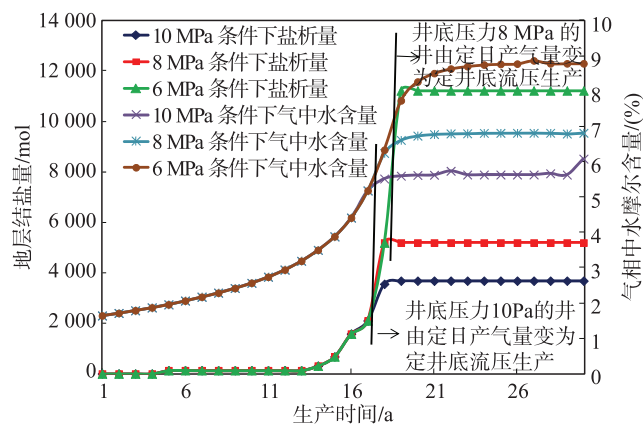


图 11 不同井底压力方案地层结盐量和气相中水含量

5 地层水盐析对气井生产的影响

5.1 对单井产能的影响

分别模拟地层发生盐析和未发生盐析时单井产能, 方案均定最小井底压力 20 MPa。模拟结果表明, 发生盐析的方案单井初期产能降低了 60% 左右, 说明盐析对单井的生产具有严重影响, 后期产量逐渐接近, 但未盐析气井产量始终高于发生盐析气井, 见图 12。

5.2 对储层孔隙度的影响

储层发生结盐, 盐颗粒可能发生沉降、桥堵或者捕获, 堵塞孔隙和喉道, 造成储层孔隙体积减小, 损伤储层物性。图 13 为不同距离地层盐析造成孔隙度减小的情况, 模型孔隙体积降低了 3.14%, 不同距离, 孔隙度的减

少程度不一样, 随着生产时间的增加, 损伤程度扩大, 平均损伤程度为 1%。

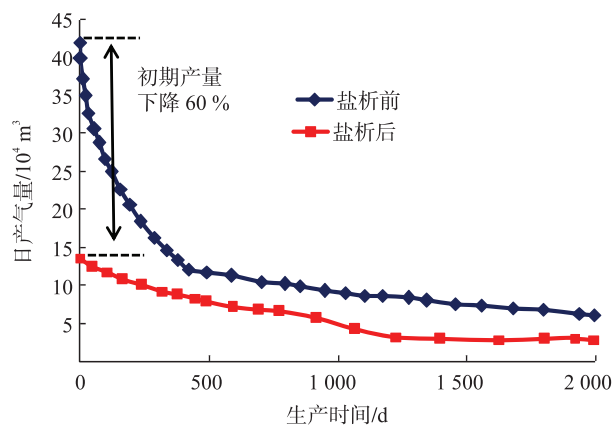


图 12 盐析前后单井产能对比

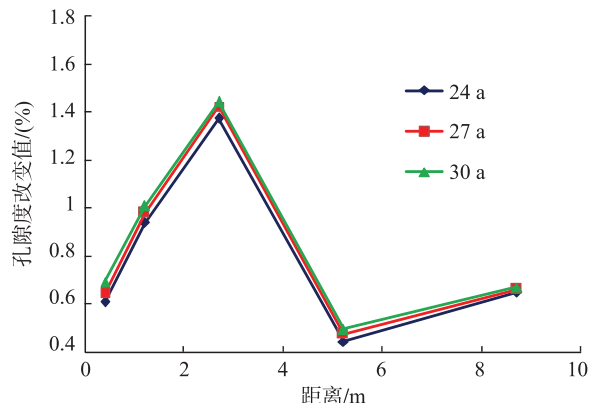


图 13 高温高压气藏地层水盐析孔隙度改变

5.3 对储层渗透率的影响

储层渗透率受到孔隙度的影响, 满足 Kozeny-Carman 方程, 图 14 为盐析过程中渗透率变化情况, 储层渗透率随着生产的进行, 逐渐向外扩展, 盐析半径在 10 m 左右, 储层渗透率的损伤程度在 2.5%~8.5% 之间, 与相关文献基本一致^[5]。

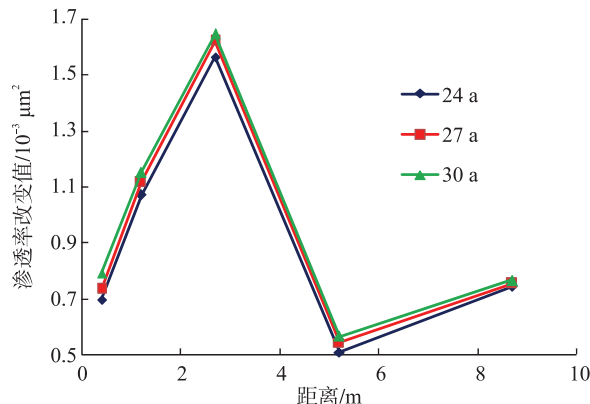


图 14 高温高压气藏地层水盐析渗透率改变

6 结论

1) 含高矿化度地层水气藏降压过程中, 气中水含量

增加,地层水密度先增加后略微降低,密度极大值将降压过程分为:“非盐析过程”和“盐析过程”;压力降落促进地层水蒸发和盐析,而矿化度抑制地层水蒸发,促进地层水盐析。

2) 储层渗透率越低、束缚水饱和度越高或者矿化度越高,盐析量越大。储层渗透率和束缚水饱和度与地层水蒸发呈正相关。

3) 采气速度越大,地层盐析量越大;井底压力越低,盐析时间越早,盐析量越大,说明生产制度影响地层结盐。

4) 地层水盐析影响单井产能,造成储层孔隙度降低,渗透率下降;对于含高矿化度地层水气藏开发,需要关注地层水盐析效应的影响。

参考文献:

- [1] 汤 勇,杜志敏,张哨楠,等. 高温气藏近井带地层水蒸发和盐析研究[J]. 西南石油大学学报,2007,29(2):96-99.
Tang Yong, Du Zhimin, Zhang Shaonan, et al. Formation Water Vaporization and Salt Out at Near Well Bore Zone in High Temperature Gas Reservoirs [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(2): 96-99.
- [2] Kleintz W, Koehler M, Dietzsch G. The Precipitation of salt in Gas Producing Wells [C]. Paper SPE68953 Presented at the SPE European Formation Damage Conference Held in the Hague, the Netherlands, 21-22 May 2001.
- [3] Zuluaga E, Lake L W. Semi-Analytical Model for Water Vaporization in Gas Producers [C]. Paper SPE93862 Presented at the Western Regional Meeting Held in Irvine, California, USA March 30-April, 2005.
- [4] 汤 勇,杜志敏,蒋红梅,等. 高温高压气藏地层水盐析引起的储层伤害[J]. 石油学报,2012,33(5):859-863.
Tang Yong, Du Zhimin, Jiang Hongmei, et al. Reservoir Damage Caused by Formation Salt Precipitation in High Pressure and High Temperature Gas Reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(5): 859-863.
- [5] 林启才,林应之,李建忠. 加重液在高温高压气藏增长作业中的盐析伤害及预防措施[J]. 天然气工业,2012,32(5):30-35.
Li Qicai, Lin Yingzhi, Li Jianzhong. Saltout Damage Resulting from Weighting Drilling Fluid and Countermeasures in the Stimulation Operation of HTHP Gas Reservoir [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(5): 30-35.
- [6] 李 闽,郭 平,张茂林,等. 气液固三相相平衡热力学模型与计算方法[J]. 断块油气田,2002,9(5):33-36.
Li Min, Guo Ping, Zhang Maolin, et al. A Thermodynamic Model of Vapor/Liquid/Solid Three Phase Equilibrium and Its Modeling Technique [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2002, 9(5): 33-36.
- [7] 吕 蓓,马 庆,陈文龙,等. 凝析气田注气吞吐解除近井污染可行性研究[J]. 天然气与石油,2013,31(1):60-62.
Lv Bei, Ma Qing, Chen Wenlong, et al. Feasibility Study on Removing Near Wellbore by Gas Injection in Gas Condensate Field Development [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(1): 60-62.
- [8] 汤 勇,杜志敏,孙 雷,等. 考虑地层水存在的高温高压凝析气藏相态研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2010,25(4):28-31.
Tang Yong, Du Zhimin, Sun Lei, et al. Study on the Effect of Formation Water on the Phase Behavior of the Hydrocarbon Water System in High Temperature and High Pressure Condensate Gas Reservoir [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2010, 25(4): 28-31.
- [9] Kleintz W, Dietzsch G, Kohler M. Halite Scale Formation in Gas-Producing Wells [J]. Institution of Chemical Engineers, 2003, 81(3), 352-358.
- [10] 熊 健,于路均,郭 平. 非线性渗流低渗气藏压裂井的产能方程[J]. 天然气与石油,2012,30(6):42-45.
Xiong Jian, Yu Lujun, Guo Ping. Analysis on Productivity Equation of Fractured Well in Low Permeability Gas Reservoir with Non-Linear Seepage [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(6): 42-45.
- [11] 栾艳春,汪 海,汪召华,等. 文23气田清防盐工艺技术[J]. 断块油气田,2010,17(4):506-508.
Luan Yanchun, Wang Hai, Wang Zhaozhua, et al. Technology of Salt Deposit Elimination and Prevention in Wen 23 Gas Field [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(4): 506-508.
- [12] 文守成,何顺利,陈正凯,等. 气田地层结盐机理实验研究与防治措施探讨[J]. 钻采工艺,2010,33(1):86-89.
Wen Shoucheng, He Shunli, Chen Zhengkai, et al. Experimental Research on the Mechanism of Salt Precipitation and Its Influential Factor Analysis in Gas Field [J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(1): 86-89.
- [13] 顾岱鸿,文守成,汪 海. 气田地层结盐机理实验研究[J]. 大庆石油地质与开发,2008,27(2):94-96.
Gu Daihong, Wen Shoucheng, Wang Hai. The Experimental Study of Salt Deposit Mechanism in Formation of Gas Field [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(2): 94-96.
- [14] 石德佩,孙 雷,刘建仪,等. 高温高压含水凝析气相态特征研究[J]. 天然气工业,2006,26(3):95-97.

- Shi Depei, Sun Lei, Liu Jianyi, et al. High Behavior of Wet Condensate Gas at High Temperature and Pressure [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26 (3): 95-97.
- [15] 王利生. 高矿化度油气藏流体相平衡的模型化研究进展[J]. 化工学报, 2015, 66(11): 4297-4303.
- Wang Lisheng. Progress in Modeling Study on Phase Equilibrium of High Salinity Reservoir Fluids [J]. CIESC Journal, 2015, 66 (11): 4297-4303.
- [16] 陈欢庆, 胡永乐, 田昌炳. CO₂ 驱油与埋存研究进展[J]. 油田化学, 2012, 29(1): 116-121.
- Chen Huanqing, Hu Yongle, Tian Binchang. Advances in CO₂ Displacing Oil and CO₂ Sequestered Researches [J]. Oilfield Chemistry, 2012, 29 (1): 116-121.
- [17] 彭 壮, 汪国琴, 徐 磊, 等. 水平井筒气水两相流动降压规律研究[J]. 天然气与石油, 2015, 46(3): 74-78.
- Peng Zhuang, Wang Guoqin, Xu Lei, et al. Study on Pressure Drop Regularity of Gas/Water Two Phase Flows in Horizontal Well [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 46 (3): 74-78.
- [18] 汤 勇, 孙 雷, 杜志敏, 等. 注干气吞吐提高凝析气井产能研究[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(5): 85-87.
- Tang Yong, Sun Lei, Duzhimin, et al. Study on Improving Gas Condensate Well Productivity by Huff and Puff Dry Gas Injection [J]. Journal of Oil and Gas Technology (J. JPI), 2006, 28 (5): 85-87.
- [19] 王 彬, 周 彪, 王新宇, 等. 沁水盆地柿庄南区块煤层气藏自改造动态分析[J]. 石油化工应用, 2016, 35(2): 20-23.
- Wang Bin, Zhou Biao, Wang Xinyu, et al. Coal Gas Reservoir Self-Transformation Dynamic Analysis in Shizhuang South Block of Qinshui Basin [J]. Petrochemical Industry Application, 2016, 35 (2): 20-23.
- [20] 王长权, 杜志敏, 汤 勇, 等. 气藏中 CO₂ 封存过程气水互溶特性实验研究[J]. 特种油气藏, 2013, 20(3): 118-122.
- Wang Changquan, Du Zhimin, Tang Yong, et al. Experimental Study on Gas-Water Mutual Solubility During CO₂ Storage in a Gas Reservoir [J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2013, 20 (3): 118-122.

龙 004-X 1 井试采地面工程 1 标段顺利通过中交验收

龙 004-X 1 井试采地面工程 1 标段是中国石油西南油气田公司重点工程, 打造“一体化建站、模块化建厂”的样板。2016 年 11 月 4 日, 龙 004-X 1 井试采地面工程 1 标段顺利通过了川西北气矿组织的预中交验收, 12 月 13 日, 通过正式中交验收。

该项目由中国石油集团工程设计有限责任公司西南公司(简称 CPE 西南分公司)担任施工图设计, 是 CPE 西南分公司首个全三维协同设计项目, 主要工程包括: 新建 MDEA 脱硫装置 1 套, 装置的设计处理能力 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 络合铁液相氧化法硫黄回收装置 1 套, 规模为潜硫量 2.5 t/d; 以及配套的火炬及放空系统(含高、低压火炬)1 座、燃料气系统 1 套、空压站 1 座、导热油系统 1 套、脱盐水系统 1 套、新鲜水系统、生产污水及气田水处理系统等辅助生产设施。另设分析化验室 1 座, 为全厂主体装置提供分析化验服务。该项目于 2016 年 3 月 14 日开工, 10 月 30 日达到投产条件, 按期完成了合同要求。

该项目不仅为九龙山气田建设以及整体开发提供可靠的基础数据, 而且对促进九龙山气田二叠系气藏天然气资源的勘探开发, 缓解下游用气紧张局面, 带动苍溪、阆中、仪陇地区、巴中地区的经济发展, 改善能源结构, 加大环境治理力度, 加快开发利用优质能源的建设步伐, 具有重要意义。

(刘冬梅 供稿)