

基于PVT相态图的凝析气井产出剖面测井解释

邓瑞¹, 郭海敏¹, 刘海军², 汪益², 伍红庆²

1. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100
2. 中国石油川庆钻探工程有限公司测井公司, 重庆 400021

摘要 针对国内凝析油气井数量日益增多而配套的动态监测技术却停滞不前的现状, 提出凝析气田生产测井产出剖面解释方法。通过分析凝析油气井内流体特性(井筒中气油比大), 传统方法使用受限, 提出基于相态图的凝析气井生产测井解释模型及相态变化模型, 解释的油、气单相误差8%以内, 为实现凝析气田产出剖面解释提供强有力的技术保证, 并取得了较好的应用效果。

关键词 凝析气田; 生产测井; 动态监测; 相态图; 产出剖面

中图分类号 P631.34

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.03.006

Production Profile Logging Interpretation Based on Condensate Gas Well of PVT Phase Diagram

DENG Rui¹, GUO Haimin¹, LIU Haijun², WANG Yi², WU Hongqing²

1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China
2. Well Logging Company Drilling Engineering Co., Ltd, CNPC, Chongqing 400021, China

Abstract As the number of domestic condensate gas wells increases, dynamic monitoring of production logging becomes more and more urgent. Because the traditional method is limited, an interpretation model based on condensate gas well of phase diagram is proposed by analyzing the characteristics of the fluid in the wellbore of the condensate gas well having a big steam oil ratio. The error of the interpretation of single-phase oil and gas well is within 8%, which evidently meets the application requirement.

Keywords condensate field; production logging; dynamic monitoring; phase diagram; production profile

凝析气藏是一种特殊、复杂的气藏, 具有埋藏较深、温度高、压力大、轻质烃含量高、平均分子量小等特点^[1-4]。当凝析油气藏地层压力高于饱和压力时, 地层流体为气态; 当地层压力降低至低于饱和压力时, 反而会从气相中凝析出凝析油, 即产生层内反凝析(反转现象)^[5, 6]。特别当采出地层之后, 随着温度和压力的变化, 井筒流体的相态也会发生复杂的变化, 常伴有液态烃析出。在开采过程中凝析油气体系在地层及管道中的流动伴随着复杂的相态变化, 在生产上表现为多相流动、相变特征复杂、井内流体相态变化大、气油比变化快、井筒积液与层间窜流和气窜等^[7-9]。

凝析气藏在世界气藏开发中占有重要的位置。据不完

全统计, 地质储量超过 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的巨型气田中凝析气田占 68%, 在储量超过 $1 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 的大型气田中则占 56%^[10, 11]。世界上富含凝析气藏的国家为俄罗斯、美国和加拿大。据初步统计, 中国现有凝析气藏 74 个, 探明的凝析气藏地质储量 $5.5175 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ^[10, 11]。仅塔里木盆地就探明牙哈、吉拉克、英买力、迪那等 13 个高压凝析气田, 占全国探明凝析油气总量的 40%^[10, 12, 13]。中国凝析油气开发步入规模化阶段, 但国内在凝析油气井动态监测研究方面还处于起步阶段, 严重影响了凝析油气井监测技术的发展和推广应用^[14-16]。

凝析油气井井筒中这种烃类相态的转变, 使得研究人员难以借助于已有模型进行产出剖面解释。因而, 有必要对凝

收稿日期: 2013-07-10; 修回日期: 2013-12-14

基金项目: 油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学)开放基金项目(K2013-02)

作者简介: 邓瑞, 讲师, 研究方向为油气藏动态监测与数值模拟, 电子邮箱: dunray@163.com

引用格式: 邓瑞, 郭海敏, 刘海军, 等. 基于PVT相态图的凝析气井产出剖面测井解释[J]. 科技导报, 2014, 32(3): 44-48.

析油气井产出剖面进行研究,建立凝析油气井产出剖面解释模型。

本文通过对目前技术方法调研,针对流型、传统解释方法的适用性,以及凝析油气流体特性进行分析,基于油藏工程中相态图的方法建立凝析气井产出剖面模型,实现凝析气井产出剖面解释技术,并为凝析油气井动态监测提供可靠的技术保证。

1 凝析气藏现阶段动态监测方法

凝析气藏开发过程中,准确的动态监测资料对取得好的开发效果十分重要^[5,17,18]。目前,凝析气田的产出剖面测井多使用多参数组合测井技术。多参数组合测井能够减少单参数解释的误差,同时测取不同深度地层、流体的物理特性。例如,塔里木凝析气田采用了美国哈里波顿公司生产的 Excell-2000 型数控生产测井组仪,主要包括井温仪、全井眼流量计、流体密度仪、高灵敏度晶体电子压力计、套管接箍定位器和声波测井仪等。一次可录取自然伽玛、磁定位、温度、压力、密度、持水率和流量 7 个参数。近年来国内开始采用英国 Sondex 公司研制的 8 参数生产测井仪器,除前述 7 参数外,还包含能够测量持气率的全井眼持气率计(GHT)。

2 传统解释方法适用性分析

传统方法能够利用现有的比较成熟的解释模型,如漂流、滑脱、均流模型,可以准确解决普通油气田产出剖面问题,但针对凝析气藏的特点,传统解释方法也有不适用的一面^[17-20]。

1) 滑脱模型和漂流模型,对于气液泡状流和段塞流具有较好的准确性;均流模型虽适用于环雾流,但要求井筒中介质达到热力学平衡,而热力学平衡中最重要的一点就是相平衡,而热力学平衡主要与温度压力有关。

2) 凝析油气井中的流体主要是天然气和从天然气中析出的凝析油,且天然气体积占绝对优势。当凝析油含量较少时,由密度资料计算出来的持率(持气率或持液率)资料并不可靠。

3 凝析气井的产出剖面解释

凝析气井解释的难点在于随着温度和压力的变化,井筒中流体的相态也在变化,可能由单相气体变为油气两相。PVT 相态图可以反映在一定温度、压力条件下油气混合物中油、气各占的比例。本文通过分析凝析气井的相态变化特征,建立 PVT 相态图解释模型,该模型综合了传统产出剖面解释方法与相态图的相关理论^[21-23]。

首先利用传统的产出剖面解释方法,求出测量井段混合流体总流量。然后通过相态图,获取在该井段所处温度压力条件下,油气混合流体中油气各占的比例。利用以上两步得到结果,可以求出测量井段油和气各自的流量。采用这种方法分别计算出两个测量井段的油气流量,将油气流量对应相减就可以求出中间射孔层的油气产量。

3.1 解释层总流量的计算

解释层总流量的计算,首先利用电缆速度与流量计读数,通过最小二乘法拟合出流体速度,但测量过程中仪器居中时,该流体速度反映的是套管中部的流速;如发生偏心,测量的是涡轮所在位置处的局部流速。所以涡轮流量计测量的是叶片旋转覆盖面积上的平均速度,简称视流体速度 V_a 。为确定通过套管截面上的平均流体速度 V_m 。引入速度剖面校正系数 C_v , C_v 的定义为 $C_v = V_m/V_a$,最后计算流量:

$$Q = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) C_v V_a \times 24 \times 60 \times 10^{-4} \quad (1)$$

式中, D 为套管内径, cm; d 为仪器外径, cm; V_a 为流体速度, m/min; Q 为单井总吸入量, m^3 。

3.2 PVT 相态图求解释层段油气的比例

相态图以温度为横坐标轴、压力为纵坐标轴,其中有多条实验确定的不同含液量线。通过测量井段温度与压力的点描在相态图上,利用内插值的方法来求油气摩尔体积比,如图 1 所示。

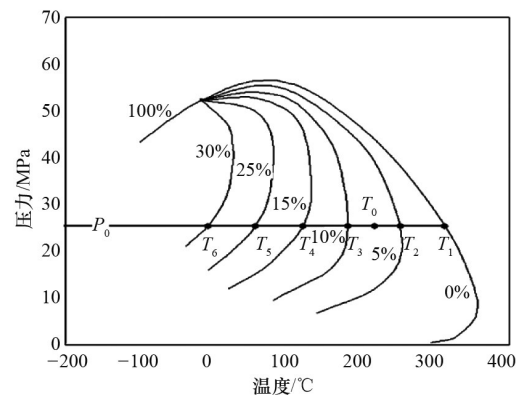


图 1 内插求含液量

Fig. 1 Interpolation of required amount of fluid containing

内插计算公式为

$$\frac{N_a - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} = \frac{T_a - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (2)$$

$$N_a = \frac{T_a - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} (N_{\max} - N_{\min}) + N_{\min} \quad (3)$$

式中, N_a 为待求的测量井段液相物质的量分数, %; N_{\min} 为插值区间下界对应液相物质的量分数, %; N_{\max} 为插值区间上界对应液相物质的量分数, %; T_a 为测量井段温度值, °C; T_{\min} 为插值区间下界对应温度值, °C; T_{\max} 为插值区间上界对应温度值, °C。

计算出该点处液相摩尔百分数 N_a 后, 气相物质的量分数则可表示为 $1 - N_a$ 。为了方便生产测井解释, 还需要将物质的量分数换算成体积百分数:

液相体积百分数(含液率)为

$$V_l = \frac{1}{8.28 \times \frac{\rho_o}{M_o} \cdot \frac{T_a}{P_a} \cdot \frac{1 - N_a}{N_a} \cdot \frac{Z_a}{Z_o} + 1} \quad (4)$$

气相体积百分数(含气率)为

$$V_g = 1 - V_l \quad (5)$$

式中, M_0 为凝析油的平均分子量(由 PVT 分析报告上读取), D_a ; ρ_0 为凝析油密度(原油分析报告上读取), g/cm^3 ; P_a 为测量点的压力, MPa; T_a 为测量点的温度, $^{\circ}C$; N_a 为测量点处液相的摩尔百分数, %; Z_a 为测量点温度压力条件下凝析气的偏差因子; Z_0 为测量点 $^{\circ}C$ (273.15 K)、标准大气压 ($1 \text{ atm} = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$) 条件下凝析气的偏差因子。

3.3 各产层的油气产量

计算出上述油气的体积百分数后, 即可得到划定的解释层油气各相的流量, 上下层各相流量相减即可得对应产层的产量, 即

$$Q_{li} = Q_i \cdot V_{li} \quad (6)$$

$$Q_{gi} = Q_i \cdot V_{gi} \quad (7)$$

第 i 个产层对应的产量表示为

$$P_{gi} = Q_{gi} - Q_{g(i+1)} \quad (8)$$

$$P_{oi} = Q_{oi} - Q_{o(i+1)} \quad (9)$$

式中, Q_{gi} 、 Q_{oi} 分别为各解释层气、油的流量, m^3 ; P_{gi} 、 P_{oi} 分别为第 i 个产层气、油的产量, m^3 。

4 产气剖面的解释与分析

根据现场测试数据及油田提供的 PVT 分析资料(表 1), 测量段流压 31.3 MPa 小于露点压力 53.82 MPa, 说明在井下测量段已产生反凝析现象, 且测井资料显示 4970 m 处以上, 含气值为 0.78, 流体密度为 0.25 g/cm^3 , 小于理论计算油密度值并大于理论计算气密度值, 考虑井口产量及测井资料综合分析认为该井为油、气两相流。

表 1 X 井解释参数

Table 1 Well X interpretation parameter table

参数	压力/ MPa	气密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	温度/ $^{\circ}C$	油密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	饱和压 力/MPa
实验室条件	0.101	0.84×10^{-3}	20	0.7899	53.82
测量段平均值	31.3	0.178	131.35	0.56	53.82

利用该井当年最新 PVT 相态图(图 2), 将解释层温度压

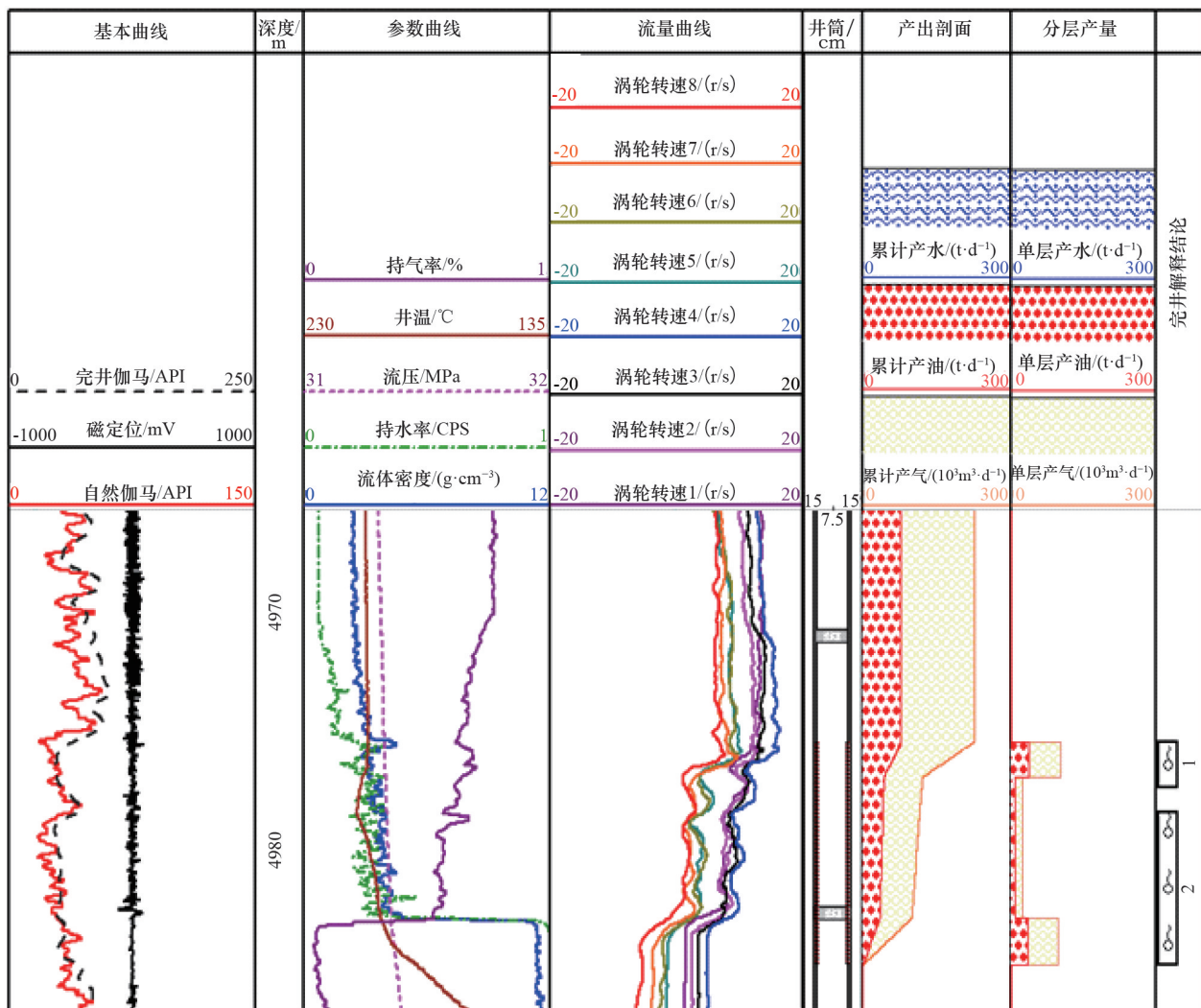


图 2 X 井产出剖面测井结果

Fig. 2 Well X production profile logging result chart

力读入,插值得到摩尔含液量,再换算成体积含液量。然后用计算出的视流体速度 V_a 与速度剖面校正系数 C ,得到混合流体平均速度 V_m ,计算管子常数 P_c ,最后计算混合流体总流量 Q 。那么井下油气的产量分别为 $Q_o=Q \cdot V_o$, $Q_g=Q-Q_o$,计算出油气的体积系数,从而得到井口的油、气产量为78.3 t, $2.24928 \times 10^5 \text{ m}^3$,地面记录的油、气产量分别为75.9 t, $2.4 \times 10^5 \text{ m}^3$,相对误差分别为3.16%、-6.28%(表2)。

表2 X井解释成果

Table 2 Well X interpretation result table

射孔层位/m	单层日产量			产气强度/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
	气/ m^3	油/t	气相对产 量/%	
4975.5~4977.0	103934	36.20	46.21	69289
4977.0~4983.0	22430	7.80	9.97	3738
4983.0~4985.0	98564	34.30	43.82	49282
合计	224928	78.30	100.00	23677

5 结论

针对凝析气井特点,常规油气两相解释模型误差较大,特别是密度计量弱相(油相)随机性比较大,而将油藏工程中的PVT相态图用于产出剖面的计算中。介绍了相态图计算产出剖面的原理和方法,并据此对一个区块的产出井进行处理,取得了较好的效果,并形成如下认识。

- 1) 针对凝析气藏的特点提出了基于相态图的解释方法。
- 2) 该解释方法在实际资料处理应用中能够满足研究区产气剖面测井资料解释的要求,到达了预期的解释精度。
- 3) 凝析气井的解释精度与PVT紧密相关,所以应根据油田的生产实际及时更新PVT参数。

参考文献(References)

[1] 郭海敏. 生产测井导论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 117-135.
Guo Haimin. Production logging introduction[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 117-135.

[2] 王乐之, 王海霞, 戚志林. 深层致密凝析气藏可动性分析及开发技术对策[J]. 中国矿业, 2013, 22(6): 78-81.
Wang Lezhi, Wang Haixia, Qi Zhilin. The recoverability analysis and development strategies research in deep tight condensate gas reservoir [J]. China Mining Magazine, 2013, 22(6): 78-81.

[3] 朱光有, 杨海军, 张斌, 等. 塔里木盆地迪那2大型凝析气田的地质特征及其成藏机制[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2479-2492.
Zhu Guangyou, Yang Haijun, Zhang Bin, et al. The geological feature and origin of Dina 2 large gas field in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2479-2492.

[4] 梁利侠, 邵光玉, 周小平, 等. 雅克拉-大涝坝凝析气藏油-气-水三相体系相态特征研究[J]. 天然气勘探与开发, 2012, 35(3): 57-59.
Liang Lixia, Shao Guangyu, Zhou Xiaoping, et al. Research of oil-gas-water multi-phase behaviors of the Yakela-dalaoba condensate gas reservoir[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2012, 35(3): 57-

59.

[5] 王志伟, 李相方, 程时清, 等. 多孔介质凝析气相变的影响因素[J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 90-92.
Wang Zhiwei, Li Xiangfang, Cheng Shiqing, et al. Influential factors on phase change of condensate gas in porous media[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(1): 90-92.

[6] 杜建芬, 李士伦, 孙雷. 多孔介质吸附对凝析油气相平衡的影响[J]. 天然气工业, 1998, 18(1): 33-36.
Du Jianfen, Li Shilun, Sun Lei. Effect of porous medium adsorption on condensate gas phase equilibrium[J]. Natural Gas Industry, 1998, 18(1): 33-36.

[7] 张广垠, 杨顺辉, 豆宁辉, 等. 沙特高温高压低渗凝析气井全过程欠平衡设计与应用[J]. 科技导报, 2012, 30(34): 41-44.
Zhang Guanggen, Yang Shunhui, Dou Ninghui. Total underbalance drilling design and application for hthp low permeability gas-condensate well in Sandi Arabia[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(34): 41-44.

[8] 焦玉卫, 谢伟, 邸宝智, 等. 凝析气藏循环注气过程流体相态特征[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(6): 704-707.
Jiao Yuwei, Xie Wei, Di Baozhi, et al. Gas condensate phase behavior in process of cyclic gas injection[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(6): 704-707.

[9] 常志强, 肖香姣, 朱忠谦, 等. 高温高压气井-凝析气井井筒及近井地带的压力变化规律[J]. 天然气工业, 2012, 32(10): 47-51.
Chang Zhiqiang, Xiao Xiangjiao, Zhu Zhongqian, et al. Pressure change law at the wellbore and well adjacent zone of a HTHP or condensate gas well[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(10): 47-51.

[10] 黄汝昌, 李景明, 谢曾业, 等. 中国凝析气藏的形成与分布[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(3): 237-242.
Huang Ruchang, Li Jingming, Xie Zengye, et al. Formation and distribution of condensate gas pools in China[J]. Oil & Gas Geology, 1996, 17(3): 237-242.

[11] 韩剑发, 张海祖, 于红枫, 等. 塔中隆起海相碳酸盐岩大型凝析气田成藏特征与勘探[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 769-782.
Han Jianfa, Zhang Zuhai, Yu Hongfeng, et al. Hydrocarbon accumulation characteristic and exploration on large marine carbonate condensate field in Tazhong Uplift[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 769-782.

[12] 刘长林, 张茂林, 梅海燕, 等. 凝析气藏流体相态及其影响因素[J]. 新疆石油天然气, 2007, 3(3): 62-66.
Liu Changlin, Zhang Maolin, Mei Haiyan, et al. The phase state and character of condensate gas reservoirs fluids and the influence factors [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2007, 3(3): 62-66.

[13] 汪周华, 郭平, 钟兵, 等. 低渗透多孔介质对高含凝析油型凝析气相态影响[J]. 钻采工艺, 2009, 32(3): 56-59.
Wang Zhouhua, Guo Ping, Zhong Bing, et al. Effect of low permeability porous medium on phase state system with high condensate oil content of gas condensate[J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(3): 56-59.

[14] 郭平, 王娟, 刘伟, 等. 缝洞型凝析气藏衰竭开采动态实验研究[J]. 石油钻采工艺, 2013(2): 67-70.
Guo Ping, Wang Juan, Liu Wei, et al. Dynamic experiment study on depletion development of condensate gas reservoir with fracture and cave[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013(2): 67-70.

[15] 甘军, 张迎朝, 邓志勇, 等. 文昌A凹陷古近系低渗凝析气藏成藏特征与成藏模式[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(6): 1060-1069.

- Gan Jun, Zhang Yingchao, Deng Zhiyong, et al. Reservoir - forming characteristic and model of the palaeogene condensate gas reservoir with low permeability in Wenchang a sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(6): 1060-1069.
- [16] 何同均, 王柳. 低渗凝析气藏开发方案研究[J]. 吐哈油气, 2012(2): 159-162.
He Tongjun, Wang Liu. Study on development program of low-permeability condensate gas reservoir[J]. Tuha Oil & Gas, 2012(2): 159-162.
- [17] 戴家才, 郭海敏, 王界益, 等. 多相流生产测井井斜影响试验研究[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(3): 69-71.
Dai Jiakai, Guo Haimin, Wang Jieyi, et al. Experimental study on effect of multiphase flow well production logging[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(3): 69-71.
- [18] 史云清. 含水汽凝析气藏开发动态分析方法研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2005.
Shi Yunqing. Research on the method of dynamic water vapor condensate gas reservoir development[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2005.
- [19] 肖强, 战雕, 敬伟, 等. 确定凝析气偏差因子的新方法[J]. 石油化工应用, 2012, 32(4): 37-40.
Xiao Qiang, Zhan Diao, Jing Wei, et al. A new method for determining z-factor of condensate gas[J]. Petrochemical Industry Application, 2012, 32(4): 37-40.
- [20] 虞兵, 赵军, 刘文强, 等. 携液凝析气井的解释方法研究[J]. 国外测井技术, 2013, 34(1): 27-28.
Yu Bing, Zhao Jun, Liu Wenqiang, et al. Interpretation method for fluid carrying gas-condensate wells[J]. World Well Logging Technology, 2013, 34(1): 27-28.
- [21] 郭海敏, 范川, 田祖红, 等. 基于相态图的凝析油产出剖面解释方法研究[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(6): 119-122.
Guo Haimin, Fan Chuan, Tian Zuhong, et al. Study on the interpretation method based on the phase diagram of the condensate oil production profile[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(6): 119-122.
- [22] 宋洪才, 靳焯. 凝析气藏相态参数实验研究[J]. 齐齐哈尔大学学报: 自然科学版, 2012, 28(3): 79-82.
Song Hongcai, Jin Ye. Experimental study on phase state parameters of gas condensate reservoir[J]. Journal of Qiqihar University: Natural Science Edition, 2012, 28(3): 79-82.
- [23] 何书梅, 熊钰, 孙丽萍, 等. 复杂断块带油环凝析气藏流体相态重构[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(1): 186-189.
He Shumei, Xiong Yu, Sun Liping, et al. Fluid phase state reconstruction for complex block gas condensate reservoir with oil ring [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(1): 186-189.

(编辑 季超)

·学术动态·



《中国学术期刊文摘》数据库网络检索平台正式开通

《中国学术期刊文摘》(半月刊,创刊于1994年)和《中国学术期刊文摘(英文版)》(月刊,创刊于2006年)是由中国科学技术协会主管,中国科协学会学术部支持,科技日报社主办的中国唯一的综合性检索类科技期刊。

为了顺应数字出版时代发展,2014年1月1日,《中国学术期刊文摘》开通了网络数据库,网址为<http://www.csciabs.org.cn>,实现了纸版期刊网络化的变革。通过访问数据库,读者能够快速查询到自己所需要的内容。数据库还增加了如热点词、关键词、相关文章等多项学科检索功能,每篇文章的参考文献可以通过DOI号直接访问。读者还可以随时查看到每个期刊的出版内容、审稿时间、学科分布等期刊信息。

文摘数据库网络检索平台的开通,使《中国学术期刊文摘》(中、英文版)从过去仅出版纸质期刊,改为纸版和网络数据库同时出版,大大增加了科技论文信息的收录量,提高了传播速度。

文摘数据库还在进一步维护和完善中,将陆续推出多项服务,努力为中国科研成果的传播、科技期刊的发展做出贡献。