

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2014.01.003

碳酸盐岩地层异常压力随钻监测关键问题探讨 ——以川东北飞仙关组和长兴组地层为例

王志战¹, 秦黎明¹, 李启波², 陆黄生¹

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 中国石化勘探南方分公司勘探处, 四川成都 610011)

摘要: 在碳酸盐岩地层应用欠压实原理, 会使异常压力随钻监测成为威胁钻井安全的一道难题。为了解决该类地层异常高压随钻监测理论、异常高压识别、监测模型选择等关键问题, 以川东北飞仙关组和长兴组地层实测压力的纵深分布特征为基础, 通过与东营凹陷碎屑岩地层压力分布特征对比, 指出基于上覆压力梯度的地层压力随钻监测方法并不适用于碳酸盐岩地层。在理论探讨的基础上, 从岩石成分及应力敏感性角度, 解释了硫酸盐热化学还原反应和构造挤压是造成高压地层与常压地层识别标志差异的主要原因。孔隙型碳酸盐岩地层和裂缝性碳酸盐岩地层的压力演化历程不同, 其监测模型也不同, 为此对压力监测模型中的孔隙与裂缝识别、气层和水层识别给出了具体的区分方法。上述几个关键问题的探讨, 有助于提高对碳酸盐岩地层异常压力的认识与预测监测水平。

关键词: 碳酸盐岩 异常压力 上覆岩层压力 压力梯度 比值法 随钻监测

中图分类号: TE28⁺¹ 文献标识码: A 文章编号: 1001-0890(2014)01-0014-06

Key Problems in Abnormal Pressure Detection during Drilling in Carbonate Formation —— A Case Study of Feixianguan Formation and Changxing Formation in Northeastern Sichuan

Wang Zhizhan¹, Qin Liming¹, Li Qibo², Lu Huangsheng¹

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 2. Exploration Department, Sinopec Exploration Southern Company, Chengdu, Sichuan, 610011, China)

Abstract: Uncompaction theory is not suitable for carbonate formations, if this theory is used in carbonate formations, abnormal pressure detection while drilling will be wrong, bringing about threat to drilling safety. In order to solve abnormal pressure detection theory and methods, and monitoring model selection etc, based on the comparison between the vertical distribution of test pressure data in Feixianguan and Changxing Formation in Northeastern Sichuan Basin, and the distribution of formation pressure of clastic rocks in Dongying Sag, it was pointed out formation pressure detection while drilling based on the overburden pressure gradient was not suitable for carbonate formations. It was explained that the identification marks between high pressure layer and normal pressure layer were caused by TSR reaction and tectonic compression. The pressure detection models of porous-type reservoirs and fracture-type reservoirs were different due to different evolution course of formation pressure, so this paper provided the methods to distinguish porous and fracture carbonate reservoirs, gas layers and water layers. The study above could improve the recognition of carbonate formation pressure and the level of pressure prediction and detection.

Key words: carbonate rock; abnormal pressure; overburden pressure; pressure gradient; ratio method; detection while drilling

地层压力是井身结构和钻井液密度设计的重要依据, 提高地层压力随钻预测和监测的精度对于增强井壁稳定、保护油气层、保障钻井安全均具有十分重要的意义^[1-8]。地层压力随钻预测监测理论产生于碎屑岩地层的压实原理, 其主要方法是通过建立准确的正常压实趋势线, 采用等效深度法、伊顿法或比值法实现地层压力的计算^[9-10]。

收稿日期: 2013-09-01; 改回日期: 2013-12-21。

作者简介: 王志战(1969—), 男, 山东栖霞人, 1991 年毕业于西北大学岩矿及地球化学专业, 2006 年获西北大学矿产普查与勘探专业博士学位, 教授级高级工程师, 主要研究方向为低场核磁共振录井、地层压力随钻预测、监测及非常规油气储层快速评价技术。

联系方式: (010)84988382, wangzz.sripe@163.com。

基金项目: 中国博士后科学基金项目“东营凹陷异常压力分布区随钻预测方法研究”(编号: 20090461267) 和中国石化集团科技开发项目“综合录井随钻地层压力监测方法研究”(编号: JP09011) 资助。

但是,碳酸盐岩地层的化学胶结作用大于沉积压实作用^[11],将欠压实理论与方法应用于碳酸盐岩地层,则会给地层压力预测带来很大的误差,甚至得出完全错误的结论^[12]。如川东北地区飞仙关组和长兴组的孔隙型碳酸盐岩地层经历了以硫酸盐热化学还原(TSR)反应为主的降压机制,而裂缝性碳酸盐岩地层则经历了以构造挤压为主的增压机制^[13],将增压的监测方法应用于降压地层,会将常压监测成高压。可见,碳酸盐岩地层压力监测模型的建立表面上是一个工程问题,实则是一个地质问题,只有将二者有机结合,从异常压力的成因机制和演化历程出发,探索碳酸盐岩地层异常压力随钻监测的适用理论,才能建立科学的监测方法,取得良好的应用效果。为此,笔者针对碳酸盐岩地层异常压力随钻监测理论、异常压力随钻识别标志、异常压力随钻监测模型选择与应用等几个关键问题作进一步的探讨。

1 异常压力随钻监测理论

异常压力的成因机理和保存机理是异常压力随钻预测和监测的理论基础。异常高压和异常低压的成因机制各有 10 多种^[14],且相互关联,存在反向关系^[15]。异常压力的成因按作用机理可分为孔隙体积变化型、孔隙流体体积变化型、流体压力变化及流体运动型等 3 大类^[14]。因此,异常压力的随钻监测理论涵盖压力封存箱、岩石骨架(压实)、孔隙流体(烃类和水)等几个方面。

1.1 压力封存箱理论

异常地层压力之所以能够保存,得益于封闭层的存在。压力封闭层根据其封闭能力或厚度可分为突变型和渐变型 2 种^[16],前者的厚度较小(几米至几十米),多为蒸发岩或碳酸盐岩;后者的厚度较大(上百米至数百米),多为膏泥岩、灰质泥岩或泥页岩。压力封闭层的存在使异常压力随钻预测成为可能,但封闭层中的压力与超压仓内的压力并不总是相等^[17]:在泄压的情况下,超压仓内的压力低于封闭层的压力;在断层沟通深层流体的情况下,超压仓内的压力高于封闭层的压力。因而,需要结合区域构造及断层发育情况才能做出正确的判断。元坝地区飞仙关组和长兴组的异常高压封闭层分为蒸发岩和致密碳酸盐岩 2 种,具有明显的高矿化度特征,通过钻井液出、入口电导率的变化可以很好识别^[18]。

如图 1 所示,川东北地区的 YB4 井 6 618.00~6 675.00 m 井段的出口电导率明显大于入口电导率,呈现高矿化度的特征,为一封闭层;钻至井深 6 675.00 m 短起下钻时发生溢流;对 6 683.00~6 693.00 m 井段进行测试,压力系数为 2.13,为一高压水层。

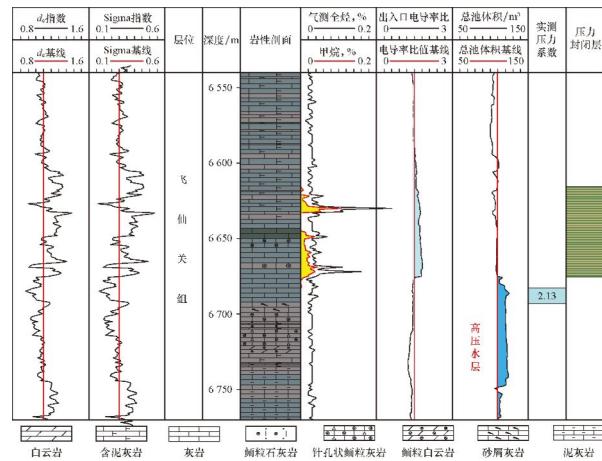


图 1 川东北地区 YB4 井地层压力随钻录井曲线

Fig. 1 Mud-logging chart of formation pressure detection while drilling of Well YB4 in Northeastern Sichuan

1.2 欠压实理论

对于颗粒支撑的碎屑岩地层,孔隙流体承受了上覆岩层的压力,埋深越深,孔隙压力越大;当地层沉降速率大于泥质岩类的排水速率时,便会产生欠压实特征^[15],导致地层压力大于正常压实地层。如东营凹陷的碎屑岩地层,埋深 2 000 m 以浅为正常压实地层,而埋深 2 000 m 以深地层异常高压广泛分布(见图 2(a));但碳酸盐岩地层以化学胶结作用为主,普光、元坝等地区 30 多口井飞仙关组和

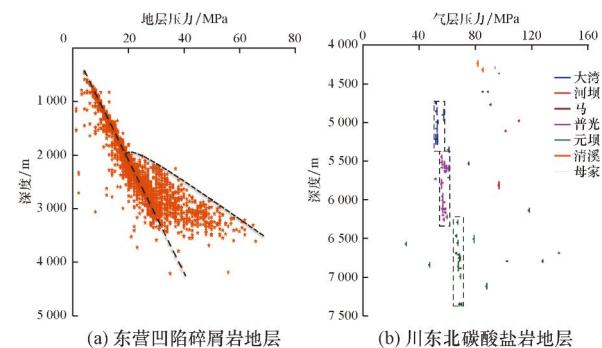


图 2 东营凹陷碎屑岩地层与川东北碳酸盐岩地层压力纵深分布的对比

Fig. 2 Comparison chart of formation pressure distribution between clastic rocks of Dongying Sag and carbonate rocks of Northeastern Sichuan

长兴组 120 余层的实测压力数据统计分析表明,其地层压力在一定的深度范围内并不随着地层埋深的增加而增大(见图 2(b),图中的线段表示试气井段,点表示平均井深),这说明孔隙流体并未承受上覆岩层的压力,欠压实原理及基于欠压实原理的地层压力随钻预测监测方法并不适用于碳酸盐岩地层。

1.3 生烃增压理论

生烃作用是一种超压形成机制^[14]。原因是,干酪根转化为烃类后的体积远远大于其自身的体积,因而属于孔隙流体体积变化型的超压成因机制。随着对页岩油气储层研究的深入,发现生烃过程中会消耗有机质,并形成有机孔。有机质的含量及其热成熟度越高,生烃作用所产生的孔隙度也就越大。由此可见,生烃作用不仅仅是一种孔隙流体体积增大机制,同时也是一种岩石孔隙体积增大机制,其所导致的孔隙体积变化与欠压实的响应特征是一致的^[19],只是作用的深度有所差别^[20]。碳酸盐岩跟泥页岩类似,也可以形成自生自储油气藏,但川东北地区飞仙关组和长兴组中的天然气是来自下伏龙潭组的泥质烃源岩^[21],因此生烃增压理论并不适用于该区域的碳酸盐岩地层。

1.4 盐度原理

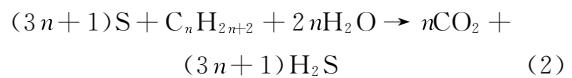
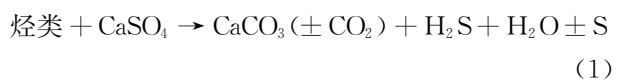
Overton 等人^[14]于 1969 年提出了盐度原理,即纯砂岩中水的盐度和相邻泥岩孔隙度的乘积为一常数。该原理揭示地层压力与地层水盐度之间存在一定的关系。地层不同压力成因机制不同,地层水盐度与压力系数之间的关系也不同。中国东西部的碎屑岩地层测试及录井资料表明,压力系数与地层水盐度呈正相关关系^[22];而川东北地区碳酸盐岩地层的测试资料表明,压力系数与地层水盐度之间呈负相关关系^[12]。

2 异常压力随钻识别标志

增压机制有烃类裂解和流体充注作用、构造挤压作用;降压机制有 TSR 反应、地层抬升剥蚀作用。这些作用在岩性、储集空间类型、储集流体成分与含量上的差异构成了超压的识别标志。这些标志可从 TSR 反应和应力敏感性 2 个方面进行解释。

TSR 反应(见式(1))形成的硫化氢溶于水后显

示出较强的酸性溶蚀作用,对白云岩的溶蚀效果等于同等条件下石灰岩的 1 155 倍^[13]。TSR 反应在增大储层孔隙体积的同时,消耗了大量的烃类,产生了硫化氢;消耗了地层水,对盐度进行了浓缩(见式(2))。孔隙体积增大、孔隙流体体积减小的双重作用导致压力降低,因此常压地层识别标志有:岩性以白云岩为主,储集空间以孔隙型为主,气体组分特征是甲烷含量低、硫化氢含量高,地层水特征是盐度较高。



孔隙型碳酸盐岩应力敏感程度弱,属于弹性形变;裂缝性碳酸盐岩应力敏感程度为中等偏强,属于塑性形变^[23]。在地层抬升剥蚀过程中,塑性地层的孔隙不能回弹,而弹性地层会发生回弹,从而增大孔隙空间。在构造挤压过程中,裂缝容易被压缩闭合,且由于连通有限,不易泄压。孔隙流体体积不变,孔隙体积减小,从而出现异常高压;而孔隙型储层对应力有一定均化作用,难以形成高压。可见,异常高压层主要发育于以裂缝性为主的、难以发生 TSR 反应的灰岩地层,由于没有发生 TSR 反应,甲烷含量高、不含或含极少量的硫化氢、地层水盐度低。

3 异常压力随钻监测模型的选择

3.1 异常压力随钻监测模型概况

在随钻监测理论的指导下,在定性识别的基础上建立定量监测模型,是解决碳酸盐岩地层压力随钻监测的主要思路。尽管等效深度法、伊顿法和比值法的计算模型不同^[24],但其核心都考虑了能够反应地层压力变化的实际参数偏离正常参数的程度^[25]。对比图 2(a)、图 2(b)可知,对于碳酸盐岩地层,反应压力变化的正常参数趋势线不是一条斜线,而是一条垂线(图 1 中的基线)。此外,这 3 个常用模型都仅考虑了基于岩石孔隙体积变化的压实参数,没有考虑孔隙流体体积变化的参数。川东北地区碳酸盐岩地层经历了多期的压力成因演化,增压机制与降压机制并存^[11],既有气层也有水层,需要在剖析不同压力成因贡献的基础上建立综合考虑不同类型参数、不同类型空隙、不同类型流体的压力监测模型。

笔者曾在文献[12]中给出了岩石孔隙体积变

化、孔隙流体体积变化及流体充注的压力贡献计算方法及孔隙型、裂缝性气层和水层的地层压力综合监测模型,见式(3)—(6)。

孔隙型碳酸盐岩气层的地层压力监测模型:

$$G = G_n \frac{d_c}{d_{cb}} \frac{Q_{out}}{O_{out-b}} + G_g \quad (3)$$

孔隙型碳酸盐岩水层的地层压力监测模型:

$$G = G_n \frac{d_c}{d_{cb}} \frac{(C_{out}/C_{in})_b}{C_{out}/C_{in}} + G_w \quad (4)$$

裂缝性碳酸盐岩气层的地层压力监测模型:

$$G = G_n \frac{\sigma_b}{\sigma} \frac{Q_{out}}{O_{out-b}} + G_g \quad (5)$$

裂缝性碳酸盐岩水层的地层压力监测模型:

$$G = G_n \frac{\sigma_b}{\sigma} \frac{(C_{out}/C_{in})_b}{C_{out}/C_{in}} + G_w \quad (6)$$

式中: G 为地层压力梯度, MPa/100m; G_n 为静水压力梯度, MPa/100m; d_c 为 d_c 指数; d_{cb} 为 d_c 指数基线; σ 为 Sigma 指数; σ_b 为 Sigma 指数基线; Q_{out} 为出口流量, L/s; O_{out-b} 为出口流量基线, L/s; C_{out}/C_{in} 为出入口电导率之比; $(C_{out}/C_{in})_b$ 为出入口电导率之比的基线; G_g 为气层的压力梯度补偿, MPa/100m; G_w 为水层的压力梯度补偿, MPa/100m。

式(3)—(6)已在钻井现场应用 4 口井,应用结果

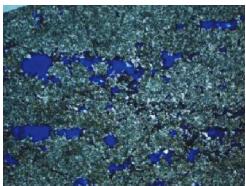
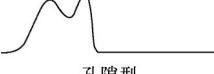
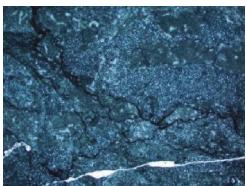
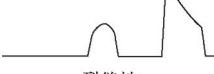
表明,地层压力当量密度的随钻监测误差从原来的 0.77 g/cm^3 降至 0.02 g/cm^3 。但在具体应用过程中,还存在如何区分孔隙与裂缝、气层与水层的困难,尤其在二者都存在的情况下该如何分清主次关系变得更为困难。针对这些问题,以下作进一步的探讨。

3.2 孔隙与裂缝的识别方法

裂缝识别是碳酸盐岩储层评价的重点。作为在钻井现场对实物进行直接观测与探测的技术,录井可通过多种手段识别孔隙与裂缝。除了对岩心、岩屑进行直接观察外,还可通过气测曲线、核磁共振、功指数^[26]等手段进行识别(见表 1)。裂缝性储层的气测值成刺刀状尖峰,而孔隙型地层的气测值则成指状或箱状,根据二者的匹配关系便可区分裂缝与孔隙的主次。核磁共振 T_2 谱能够定量区分孔隙与裂缝,一般情况下,裂缝的宽度大于孔喉直径,所以弛豫时间相对较长。表 1 中分别给出了孔隙型、裂缝-孔隙型、孔隙-裂缝性、裂缝性储层的 T_2 谱特征。对岩样的观察、鉴定及气测、核磁共振等裂缝识别手段都具有滞后性,采用功指数的方法具有实时性,但识别精度需要进一步验证。

表 1 孔隙型与裂缝性储层的录井识别方法

Table 1 Mud logging identification method for porous-type reservoirs and fracture-type reservoirs

储层类型	肉眼观察	镜下观察	气测特征	核磁共振 T_2 谱特征
孔隙型				 孔隙型
裂缝性				 裂缝性
				 孔隙-裂缝性
				 裂缝-孔隙型

3.3 气层与水层的识别方法

识别评价油、气、水层是录井的主要任务。气层和水层的录井响应特征具有明显的差异性——气层具有高气测值的特征,而水层则具有

低电导率的特征^[12]。对川东北地区 114 层试气结果的分析可知,气层的含气率都为 100%,含气水层的含气率均不超过 20%(见图 3)。所以,不存在气、水各占 50% 左右、且压力监测模型难以选择的情况。

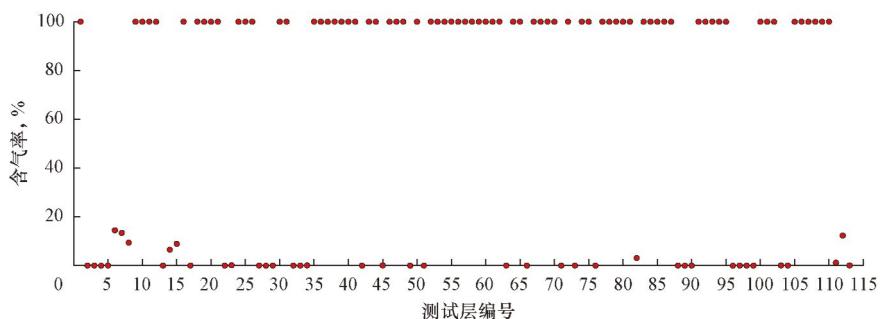


图 3 川东北地区测试层的含气率统计

Fig. 3 Gas percentage of test layers in Northeastern Sichuan Basin

4 结 论

1) 欠压实理论及生烃增压理论并不适用于川东北地区的碳酸盐岩地层, 而盐度原理及压力封存箱理论是适用的。

2) 川东北地区碳酸盐岩异常高压层主要发育以裂缝性为主的地层, 岩性以灰岩为主, 且具有甲烷含量高、不含或含极少量硫化氢、地层水盐度低等特征。

3) 识别孔隙与裂缝、气层与水层是建立或选择地层压力随钻监测模型的基础, 通过录井手段或录井参数可以很好地解决这些识别问题。

参 考 文 献

References

- [1] Atashbari V, Tingay M. Pore pressure prediction in carbonate reservoirs [R]. SPE 150835, 2012.
- [2] 张新旭, 魏学成, 李延伟. 河坝 1 井高压含硫气层井控技术 [J]. 石油钻探技术, 2005, 33(4): 16-19.
Zhang Xin Xu, Wei Xue Cheng, Li Yan Wei. Well control technology for high pressure gas zone containing sulfide in Heba 1 Well [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(4): 16-19.
- [3] Li Qiuguo, Denis H, Zhao Liangxiao, et al. Abnormal pressure detection and wellbore stability evaluation in carbonate formation of East Sichuan [R]. IADC/SPE 59125, 2000.
- [4] 樊洪海, 张传进. 复杂地层地层孔隙压力求取新技术 [J]. 石油钻探技术, 2005, 33(5): 40-43.
Fan Honghai, Zhang Chuanjin. New methods for calculation of pore pressure in complex geologic environment [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(5): 40-43.
- [5] 姚约东, 李相方. 动静态结合预测调整井地层压力的方法 [J]. 石油钻探技术, 2009, 37(4): 32-34.
Yao Yuedong, Li Xiangfang. Using static and dynamic data to predict adjustment well formation pressure [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(4): 32-34.
- [6] 易浩, 白彬珍, 赵志国, 等. 玉北地区深井快速钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2011, 39(6): 27-30.
Yi Hao, Bai Binzheng, Zhao Zhiguo, et al. Faster drilling technology in Yubei Area [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(6): 27-30.
- [7] 崔治军, 赵少伟, 杨进, 等. 渤海油田科学探索井地层压力预测技术 [J]. 断块油气田, 2011, 18(5): 656-659.
Cui Zhijun, Zhao Shaowei, Yang Jin, et al. Prediction technique of formation pressure for scientific exploration well in Bohai Oilfield [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2011, 18 (5): 656-659.
- [8] 刘建立, 陈会年, 高炳堂. 国外随钻地层压力测量系统及其应用 [J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(1): 94-98.
Liu Jianli, Chen Huinian, Gao Bingtang. Foreign measurement system for formation pressure while drilling and its application [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32 (1): 94-98.
- [9] 王志战, 盖姗姗, 许爱生. 基于 d_c 指数的 2 种异常压力随钻预测新方法 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(4): 1429-1433.
Wang Zhizhan, Gai Shanshan, Xu Aisheng. Two new methods based on d_c exponent for abnormal pressure prediction and detection during drilling [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(4): 1429-1433.
- [10] 陈学国. 三维地层压力预测方法及应用研究 [J]. 石油钻探技术, 2005, 33(3): 13-15.
Chen Xueguo. Technology and applications of 3D formation pressure prediction [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(5): 40-43.
- [11] 王存武. 川东北地区碳酸盐岩层系超压发育演化与成因机制 [D]. 武汉: 中国地质大学资源学院, 2008.
Wang Cunwu. Study on the overpressure development, evolvement and origin mechanism in the carbonate reservoir of the Northeast Area, Sichuan Basin [D]. Wuhan: China University of Geosciences, Faculty of Earth Resources, 2008.
- [12] 王志战. 川东北碳酸盐岩地层异常压力随钻监测方法 [J]. 石油学报, 2012, 33(6): 1068-1075.
Wang Zhizhan. Detection of abnormal pressure while drilling in carbonate formations of Northeastern Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(6): 1068-1075.

- [13] 过敏, 李仲东, 杨磊, 等. 川东北飞仙关组异常压力演化与油气成藏[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(1): 175-182.
Guo Min, Li Zhongdong, Yang Lei, et al. Evolution of abnormal pressure and hydrocarbon accumulation in Feixianguan Formation in the Northeastern Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2010, 32(1): 175-182.
- [14] Chilingar G V, Serebryakov V A, Robertson J O Jr. Origin and prediction of abnormal formation pressures[M]. Amsterdam: Elsevier Science B V, 2002: 21-64.
- [15] 王志战. 沉积盆地异常压力体系及其预监测: 以济阳坳陷为例[D]. 西安: 西北大学地质学系, 2006.
Wang Zhizhan. Abnormal pressure regimes in sedimentary basins and their prediction and detection: a case study of Jiayang Depression[D]. Xi'an: Northwest University, Department of Geology, 2006.
- [16] 郭秀蓉, 刘晓峰. 压力封闭层的类型及成因刍议[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(5): 31-34.
Guo Xiurong, Liu Xiaofeng. Primary discussion on types and origins of pressure seals[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(5): 31-34.
- [17] 解习农, 李思田, 刘晓峰. 异常压力盆地流体动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2006: 18-21.
Xie Xinong, Li Sitian, Liu Xiaofeng. Basin fluid dynamics in abnormally pressured environments[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2006: 18-21.
- [18] 王志战, 许小琼. 储层含水性与有效性的录井识别方法: 以东营凹陷北部陡坡带为例[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(2): 67-69, 73.
Wang Zhizhan, Xu Xiaoqiong. Research on reservoir aquosity and reservoir validity identification based on mud-logging method-case of northern slope belt of Dongying sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(2): 67-69, 73.
- [19] 王志战, 张炜, 杜焕福, 等. 生烃超压随钻预监测方法[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 53-57.
Wang Zhizhan, Zhang Wei, Du Huanfu, et al. Prediction and detection while drilling of abnormal high pressure origin from hydrocarbon generation[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 53-57.
- [20] 张善文, 张林晔, 张守春, 等. 东营凹陷古近系异常高压的形成与岩性油藏的含油性研究[J]. 科学通报, 2009, 54(11): 1570-1578.
Zhang Shanwen, Zhang Linye, Zhang Shouchun, et al. Formation of abnormal high pressure and its application in the study of oil-bearing property of lithologic hydrocarbon reservoirs in the Dongying Sag[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(11): 1570-1578.
- [21] 马永生, 傅强, 郭彤楼, 等. 川东北地区普光气田长兴-飞仙关气藏成藏模式与成藏过程[J]. 石油实验地质, 2005, 27(5): 455-461.
Ma Yongsheng, Fu qiang, Guo Tonglou, et al. Pool forming pattern and process of the upper permian-lower triassic, the Puguang Gas Field, Northeast Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2005, 27(5): 455-461.
- [22] 王志战. 利用核磁共振和离子色谱参数开展随钻压力检测的探讨[J]. 录井工程, 2007, 18(1): 1-4.
Wang Zhizhan. The discussion on carrying out pressure detection while drilling by using the parameters of the nuclear magnetic resonance and ion chromatography[J]. Mud Logging Engineering, 2007, 18(1): 1-4.
- [23] 何健, 康毅力, 刘大伟, 等. 孔隙型与裂缝-孔隙型碳酸盐岩储层应力敏感研究[J]. 钻采工艺, 2005, 28(2): 84-86, 93.
He Jian, Kang Yili, Liu Dawei, et al. The stress sensitivity research on porous and fractured porous carbonate reservoirs[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(2): 84-86, 93.
- [24] 王志战, 陆黄生. 异常高压随钻预测理论与方法[J]. 录井工程, 2011, 22(3): 37-41.
Wang Zhizhan, Lu Huangsheng. The theories and methods for the abnormal high pressure prediction while drilling[J]. Mud Logging Engineering, 2011, 22(3): 37-41.
- [25] 王志战, 慈兴华. 东营凹陷异常压力随钻预测与监测[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 83-96.
Wang Zhizhan, Ci Xinghua. Prediction and detection of abnormal pressure in Dongying Sag[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 83-96.
- [26] 陈清贵, 潘小东. 致密砂岩储集层裂缝综合录井识别技术研究[J]. 录井工程, 2006, 17(3): 6-9, 23.
Chen Qinggui, Pan Xiaodong. Research on fracture recognition in tight sand reservoir with comprehensive mud logging techniques[J]. Mud Logging Engineering, 2006, 17(3): 6-9, 23.

[编辑 令文学]