

准噶尔盆地腹部盆 1 井西凹陷超压研究

杨 智¹ 何 生¹ 李奇艳¹ 张勇刚³

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院石油系, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室 湖北 武汉 430074; 3. 中国石油勘探开发研究院杭州石油地质研究所, 浙江 杭州 310023)

摘要:准噶尔盆地腹部盆 1 井西凹陷存在明显的深部超压系统(4400 m 以下)。通过对超压段地质、钻井、地球物理特征的研究发现,超压段多为砂、泥岩互层,泥岩段大多几米到十几米厚,孔隙度在 8% 以下,已经过充分的压实,进入超压段,泥浆密度大幅增加,远大于 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$,砂岩、泥岩段同时具有高声波时差和低电阻率特征,井旁地震速度具有异常低值特征,超压顶面形态不规则,穿层分布,并且宏观上往往在一定的深度范围内。经过分析,欠压实以及煤层不是超压带低速的原因,烃类生成尤其是天然气生成对现今超压贡献最大。

关键词:准噶尔盆地腹部;盆 1 井西凹陷;超压

中图分类号:P618.13;P631 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2008)02-0239-07

超压带的形成是一种非常复杂的地质现象,鉴于其对钻探和油气成藏的重大影响作用^[1-3],对超压的形成机制^[4]研究、利用测井和地震资料识别和预测超压地层得到了不断的加强^[5,6]。

准噶尔盆地腹部盆 1 井西凹陷位于盆地中央坳陷的中北部,主体位于中石化登记区块的中部 I 区块,已钻庄 1 井、沙 1 井等 20 余口钻井,其中不少井钻遇超压,而且整个区块已 3D 地震连片覆盖,为研究本区超压提供了优越的条件。盆 1 井西凹陷存在明显的深部超压系统(4 400 m 以下),主要分布在侏罗系及其以下地层中。

1 地层压力数据来源及分类

分析地层压力的方法大体上分为两大类:推算压力和实测压力。推算压力是指从钻井资料、泥浆密度、测井和地震等资料分析推算间接得出的。实测压力是通过钻杆测试(DST)和电缆测试(如 RFT 和 MDT)直接测得地层压力,通过分析各种地压-时间测试曲线得到,这些测试一般只适用于渗透性岩层。

推算压力需要两个阶段的工作。一是对各种数据

可靠性的分析,二是数据特征与压力之间关系的解释。实测压力仅需要做好数据质量的分析解释即可,相对于推算压力使用的间接资料来说,实测压力的数据很少,但对标定间接资料和推算压力十分重要。

本次研究以准噶尔盆地腹部盆 1 井西凹陷超压体为研究对象,在对典型单井庄 1 井和沙 1 井超压段的地质、钻井、测井和井旁地震等特征响应分析的基础上,建立研究区超压层段识别的经验模型,并对超压成因进行了探讨。

2 盆 1 井西凹陷超压特征

2.1 庄 1 井超压带特征研究

庄 1 井位于盆 1 井西凹陷东南部,其钻遇超压并被 DST 测试所证实。

庄 1 井超压带顶界埋深约为 4 430 m 三工河组(J_{1s})中部(图 1),地温大约为 104°C ;顶界泥浆压力系数从 1.17 增加到 1.55;从 4431 m 到井底 4906 m,揭示的地层为 J_{1s} 和八道湾组(J_{1b}),泥浆压力系数为 1.44~1.57。该井在超压带的钻进过程中,井口仍多次出现溢流现象。DST 实测压力大于泥浆密度换算的地层压力,折算压力系数为 1.64~1.79。

收稿日期:2007-07-17;改回日期:2007-09-25

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20060491505)和美国石油地质学家学会(AAPG)2007 年科研基金共同资助。

作者简介:杨智,男,1980 年生,博士生,主要从事成油体系与成藏动力学方面的研究;E-mail:cugyangzhi@126.com。

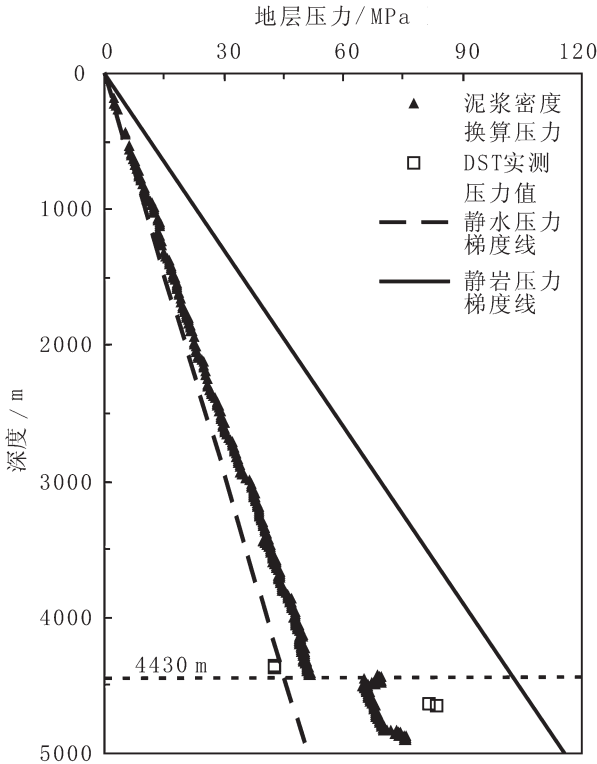


图1 庄1井泥浆换算压力、实测压力与深度关系
Fig.1 Relations of mud-converted pressures and measured pressures to depths in well Zhuang 1

庄1井砂岩、粉砂岩和泥岩的声波时差随深度的变化趋势有相似性(图2),在超压带内上述3种岩性的声波时差均出现偏离正常趋势的高异常;根

据岩性统计,超压段的泥岩百分含量 J_{1s} 约为57%, J_{1b} 约为35%,泥岩单层厚度多1至几米,而且该井在4744.74~4748.52 m的细砂岩的岩心绝对孔隙度测定为8.68%~9.93%,邻近井庄2井4359~4650.6 m超压段内,泥岩实测孔隙度在2.56%~6.59%,说明岩层已经过充分的压实。该井泥岩视电阻率数据来自深感应测井,其泥岩视电阻率在超压带偏离正常趋势,视电阻率值偏小。

庄1井泥岩的声波测井速度和井旁地震层速度在超压带内有较一致的变化趋势(图3),较正常压力层段速度明显变低,发生倒转。

2.2 沙1井超压带特征研究

沙1井在侏罗系未钻遇明显的超压,但在三叠系深度为5450~5457.8 m DST测试为超压,压力系数为2.04。沙1井超压带顶界约为4780 m,对应的地温约115℃,顶界泥浆压力系数为1.23,泥浆密度变化不明显,至深度5579 m增加到1.45,井底5580 m,泥浆压力系数增加到1.87(图4)。

沙1井砂岩和泥岩的声波时差约在4780 m以上与深度的关系为正常趋势,但在这一深度以下则明显高于正常趋势(图5);与此相对应,泥岩视电阻率在这一深度以下也明显的偏低。在4780 m以下地层为三叠系的白碱滩组(T_{3b})、克拉玛依组(T_{3k})和百口泉组(T_{3b});根据岩性统计,砂质岩百分含量, T_{3b} 为83%、 T_{3k} 为84%、 T_{3b} 为61%,泥岩呈薄层与砂岩互层,而且沙1井4860~5096 m的泥岩岩心实测孔

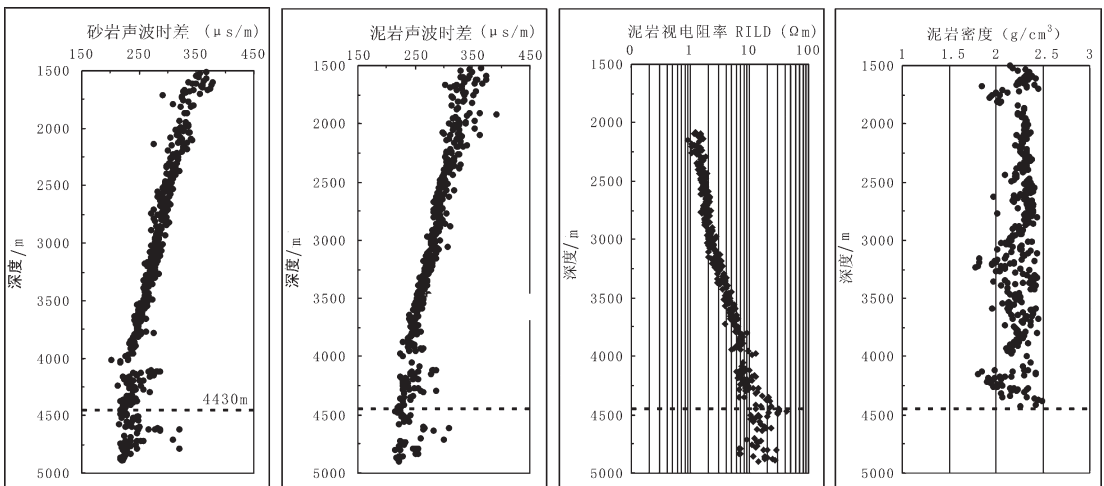


图2 庄1井砂岩、泥岩声波时差、泥岩视电阻率和泥岩密度
Fig.2 Scatter plot of the acoustic transit time of sandstone and mudstone and apparent resistivity and density of mudstone in well Zhuang 1

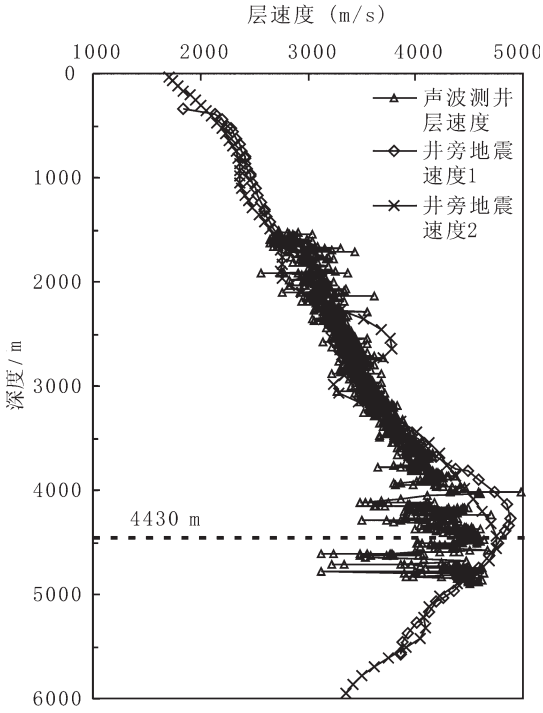


图 3 庄 1 井泥岩声波测井层速度和井旁地震层速度对比
Fig.3 Scatter plot of the acoustic interval velocity of mudstone and seismic interval velocity near well Zhuang 1

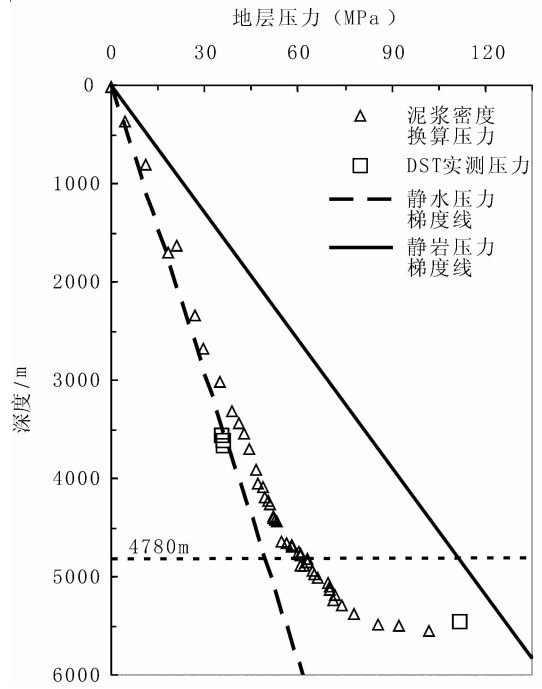


图 4 沙 1 井泥浆换算压力、实测压力与深度关系
Fig.4 Relations of mud-converted pressures and measured pressures to depths in well Sha 1

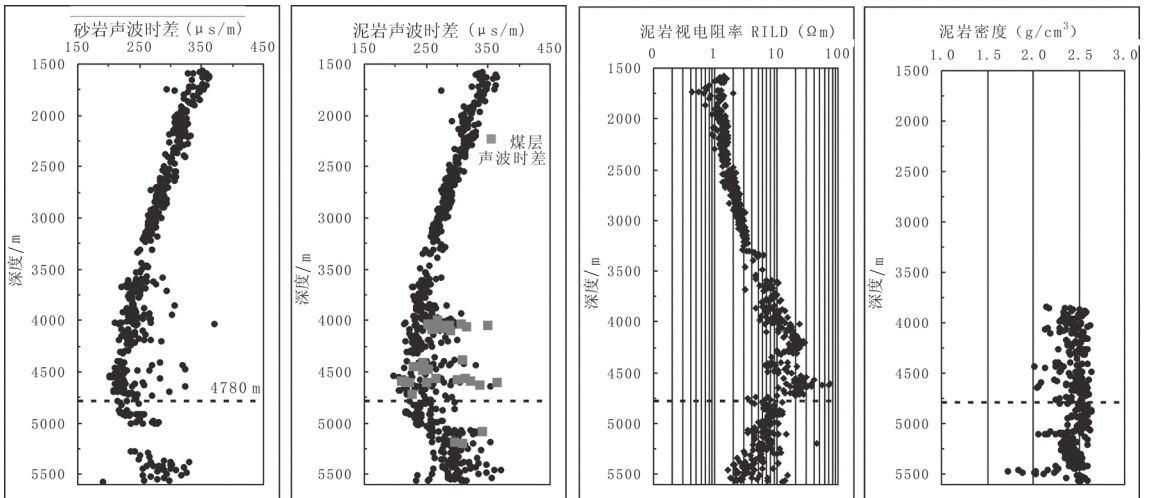


图 5 沙 1 井砂岩和泥岩声波时差、泥岩视电阻率和泥岩密度
Fig.5 Scatter plot of the acoustic transit time of sandstone and mudstone and apparent resistivity and density of mudstone in well Sha 1

隙度为 6%~8%，已经过充分的压实。一般煤层具有较高的声波时差即低速和较高的视电阻率值。根据钻井揭示，该井在侏罗系八道湾组 3 996 m 至白垩系

克拉玛依组 5197 m 钻遇 35 层薄煤层，薄煤层单层厚度为 0.5~4 m。在 4 780 m 以上的砂岩和泥岩的正常压实带，虽然含煤层段主要在 3 996 m 至 4 726 m，

但煤夹层的高时差和高视电阻率并未改变砂岩和泥岩的整体的正常压实趋势；而在图 5 中沙 1 井砂岩和泥岩声波时差、泥岩视电阻率和泥岩密度图 4 780 m 以下，仅含有 3 层 1 m 厚的薄煤层，因此，砂岩和泥岩的整体高声波时差和泥岩低视电阻率趋势并非由煤层引起；值得注意的是，白垩系泥质岩含量较高，但从图 5 中可看出，泥岩密度偏低的层段是由煤层和扩径导致的，泥岩密度并未显示与偏离正常趋势的高声波时差对应的偏离。由此判断，4 780 m 以下的砂岩和泥岩的高时差和低泥岩视电阻率带可能与超压有更直接的关系。

图 6 展示了沙 1 井泥岩的声波测井层速度和井旁地震层速度随埋深的变化以及与煤层声波层速度的对比。井旁地震层速度与声波测井层速度变化总趋势大体相同。泥岩的声波测井速度和井旁地震层速度在 4 780 m 以下均显示低速异常。

综上，根据上述两口钻遇超压井的分析，盆 1 井西凹陷发育超压地层的地质、钻井、地球物理特征为：(1)超压顶界温度为 100~115℃(相当于 $R_o=0.7\% \sim 0.8\%$)，超压段多为砂、泥岩互层，泥岩段大多几米到十几米厚，孔隙度在 8% 以下，已经过充分的压实；(2)泥浆密度大幅增加，远大于 $1.2g/cm^3$ ；(3)相对于正常的声波时差趋势，砂岩、粉砂岩和泥岩的声波时差值共同具有高时异常；(4)相

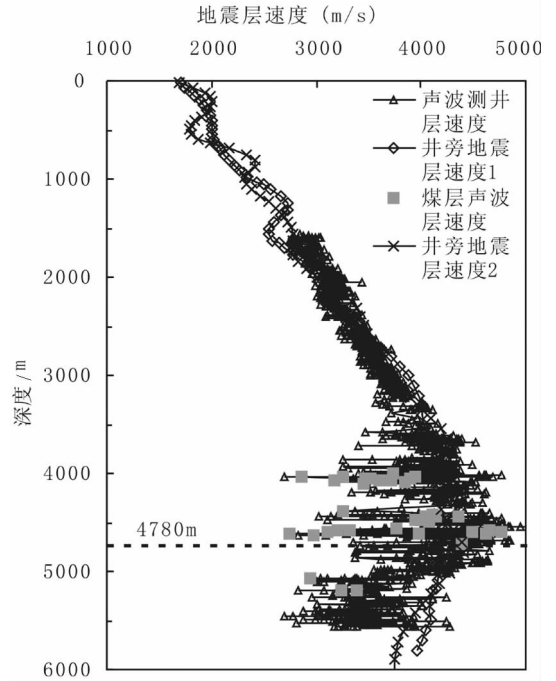


图 6 沙 1 井泥岩声波测井层速度、煤层声波层速度和井旁地震层速度对比
Fig.6 Scatter plot of the acoustic interval velocity, coal bed acoustic interval velocity and seismic interval velocity of well Sha 1

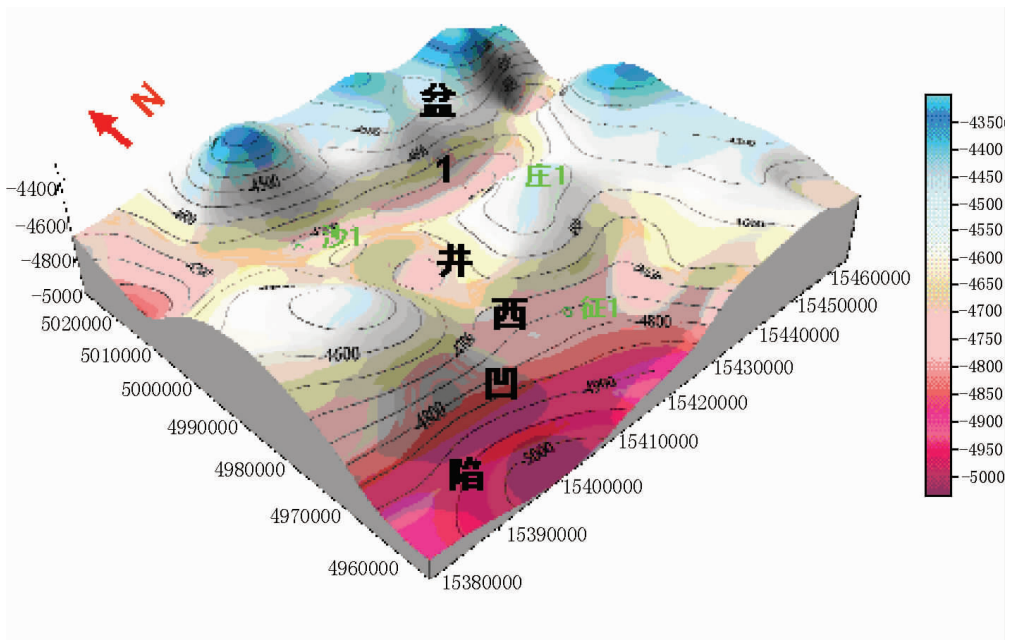


图 7 盆 1 井西凹陷超压顶面深度等直线图
Fig.7 Depth contours of the top of the overpressure interval in the Well Pen-1 West subbasin

对于正常视电阻率趋势,泥岩视电阻率明显低异常;
(5)地震层速度在深部超压带明显倒转偏低。

另外,庄 2 井、征 1 井等钻井超压段也具有类似的特征。值得注意的是,位于凹陷南端的征字号井超压顶面地层为白垩系土谷鲁群底部(约 4 730 m),结合庄字号井揭示的超压顶面地层为侏罗系中部,沙字号井为三叠系顶部,可初步得出盆 2 井西凹陷超压顶面穿层分布,从南往北,超压顶面层位由白垩系底部逐渐过渡到三叠系顶部,超压顶面的深度大体一致,为 4 400~4 800 m。

为什么超压带中泥岩具有高声波时差和低的视电阻率?笔者认为超压泥岩中的声波时差和视电阻率可能反映了超压引起的泥岩本身的结构变化,并可能是流体超压的直接响应,而不是高孔隙度异常 的响应。超压带中泥岩高的声波时差值(低层速度)可能是由于超压泥岩中含气和水的微裂隙降低了声波的传播能力。超压带中泥岩的低电阻率值可能是因为超压导致泥岩中形成大量的微裂隙,从而增加了超压泥岩中束缚水的相互联系^[7]。

物理模拟实验也表明,岩石中的高孔隙流体压力可直接导致通过岩石的速度降低^[8]。从理论上,根据有效应力的概念,超压可导致岩石中颗粒之间有效应力的减少,从而引起通过岩石的声波速度减小。

如上所述,基于井旁地震层速度与声波测井层速度较好的相应关系,可以将层速度发生倒转作为超压带与常压带识别的界线,也即超压顶界面的界线,

由此可以计算出盆 1 井西凹陷各个 CDP 叠加速度谱点的超压顶面深度,得到如图 7 所示的超压顶面等值线图。可以看出超压顶面形态十分不规则,起伏不平,穿层分布,凹陷西缘最深,分布在一定的深度范围内,为 4 400~5 000 m。

4 超压成因探讨

前人研究表明含油气盆地中超压的成因主要有:(1)构造应力挤压^[9];(2)粘土脱水-蒙脱石转化为伊利石^[10];(3)快速沉积导致大套泥质沉积物的欠压实^[11];(4)热作用导致的有机质的热演化、油气生成和流体热膨胀等^[12-13]。

盆 1 井西凹陷地处准噶尔盆地腹地,断层普遍不发育(多为层间或层内小断层),所受到的构造挤压并不强烈,因此构造挤压对本区超压的影响非常有限。

庄 1 井 3 968~4 900 m 深度段超压带以上和超压带内的伊利石的含量变化表明,该区深部超压带的成因与粘土转化无关(图 8)。

根据上文,庄 1 井和沙 1 井超压带中泥岩的密度均属正常,庄 2 井和沙 1 井超压段内泥岩实测孔隙度均很低(小于 8%),已经过了充分的压实,说明盆 1 井西凹陷现今超压并非由泥岩的欠压实引起。

盆 1 井西凹陷深部超压系统的纵向分布受油气生成和封压有效的深度控制并有穿层的特点,其本质是与主要受地温控制下的烃源岩中有机质热演化成烃作用达到某种程度的埋深范围大体一致,其顶

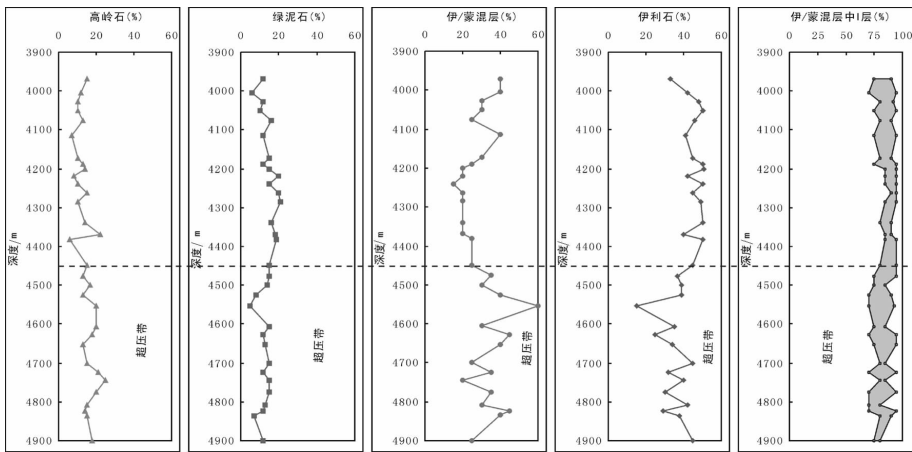


图 8 庄 1 井泥岩中粘土矿物含量变化剖面

Fig.8 Section showing the variation in clay mineral content in mudstone of well Zhuang 1

界成熟度 R_o 为 0.7%~0.8%, 地温 100~115°C, 埋深 4 400~4 800 m, 至少作为一个主要的原因, 这就是为什么这类深部超压带的顶界埋深宏观上往往在一定的深度范围内。从已知现今超压带地层的地质演化过程和超压形成阶段来看, 白垩系沉积后, 下侏罗统形成超压层。晚白垩世二叠系烃源岩已开始进入高成熟阶段, 古一新近纪时中下侏罗统煤系地层进入大量生气阶段。该深部超压带的成因与烃类生成尤其是天然气的生成关系密切。在排除其他 3 个因素后, 烃类生成对盆 1 井西凹陷超压影响最大。

5 结 语

准噶尔盆地腹部盆 1 井西凹陷侏罗系及其以下地层普遍发育的深层超压系统具有以下特征: 泥浆密度大于 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$, 超压段地层多为砂、泥岩互层, 泥岩段厚度较薄, 孔隙度在 8% 以下, 砂、泥岩段同时具有高声波时差和低电阻率特征, 井旁地震速度具有低速特征, 超压顶面穿层分布, 从南往北, 超压顶面层位由白垩系底部逐渐过渡到三叠系顶部, 深度为 4 400~5 000 m, 温度为 100~115°C (相当于 $R_o=0.7\%\sim 0.8\%$)。

经过探讨分析, 欠压实以及煤层不是产生超压的原因, 烃类生成尤其是天然气生成对本区超压影响最大, 超压与这些特征具有非常好的响应关系, 这一模型为刻画盆 1 井西凹陷超压体甚至整个准噶尔盆地腹部提供了依据。

参考文献 (References):

- [1] 马启富, 陈思忠, 张启明, 等. 超压盆地与油气分布[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
Ma Qifu, Chen Sizhong, Zhang Qiming, et al. Overpressured Basin and Oil-gas Distribution[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 1-29 (in Chinese).
- [2] 王莉娟, 朱和平. 新疆准噶尔盆地西缘哈图金矿成矿流体 [J]. 中国地质, 2006, 33(3): 666-671.
Wang Lijuan, Zhu Heping. Ore-forming fluid of the Hatu gold deposit on the western margin of the Junggar basin, Xinjiang [J]. Geology in China, 2006, 33(3): 666-671 (in Chinese with English abstract).
- [3] 李圣强, 孙青, 罗立强, 等. 中国大陆科学钻探主孔流体异常与其附近 2 次 ML3.9 级地震的关系 [J]. 中国地质, 2005, 32(2): 330-335.
Li Shengqiang, Sun Qing, Luo Liqiang, et al. Anomalous fluid compositions in mud of the CCSD main well and their relations to two nearby earthquakes of ML 3.9 [J]. Geology in China, 2005, 32(2): 330-335 (in Chinese with English abstract).
- [4] 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: 1-178.
Xie Xinong, Li Sitian, Liu Xiaofeng. Basin Fluid Dynamics in Abnormally Pressured Environments [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2006: 1-178 (in Chinese with English abstract).
- [5] 张传进. 初探井地层孔隙压力预测方法 [J]. 石油钻探技术, 2003, 30(3): 13-14.
Zhang Chuanjin. Prediction of formation pore pressure in wild cat wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 30(3): 13-14 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张传进. 地震层速度预测地层压力研究 [J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(2): 14-18.
Zhang Chuanjin. Study of formation pressure prediction with seismic interval velocity [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1999, 20(2): 14-18 (in Chinese with English abstract).
- [7] Hermanrud C, Wensaas L, Teige G M G, et al. Shale porosities from well logs on Haltenbanken (Offshore Mid-Norway) show no influence of overpressuring [C] // Law B E, Ulmishek G F, Slavin V I, et al. Abnormal pressures in hydrocarbon environments: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1998, 70: 65-85.
- [8] 李亚林, 谢贤鹏, 贺振华, 等. 岩石孔隙流体对纵横波速度影响的实验研究及意义 [J]. 矿物岩石, 1998, 18(增刊): 188-191.
Li Yalin, Xie Xianpeng, He Zhenhua, et al. The laboratorial studying on the influence of pore fluid in rock to compressional and shear waves velocity and its significance [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1998, 18(supp): 188-191 (in Chinese with English abstract).
- [9] 吴孔友, 查明, 钟建华. 准噶尔盆地超压系统分布及其演化 [J]. 地质科学, 2006, 41(4): 636-647.
Wu Kongyou, Zha Ming, Zhong Jianhua. Distribution and evolution of overpressure systems in the Junggar Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2006, 41(4): 636-647 (in Chinese with English abstract).
- [10] Barker C. Thermal Modelling of Petroleum Generation: Theory and Applications [M]. New York; Amsterdam: Elsevier, 1996.
- [11] Magara K. Compaction and fluid migration: practical petroleum geology [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 1978, 47-85.
- [12] Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressure fluid compartments [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1990, 74: 1-12.
- [13] 郝芳. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 239-267.
Hao Fang. Kinetics of Hydrocarbon Generation and Mechanisms of Petroleum Accumulation in Overpressured Basins [M]. Beijing: Science Press, 2004: 239-267 (in Chinese with English abstract).

Overpressure in the well Pen-1 West subbasin in the interior of the Junggar basin

YANG Zhi¹, HE Sheng^{1,2}, LI Qi-yan¹, ZHANG Yong-gang³

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources (China University of Geosciences Wuhan), Ministry of Education, Wuhan 430074, Hubei China; 3. Hangzhou Institute of Petroleum Geology, CNPC, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: A noticeable deep overpressure system occurs below 4,400 m depth in the well Pen-1 West subbasin in the interior of the Junggar basin. Studies of the geological, well log and geophysical data in the area show the following: the overpressure interval consists mostly of alternating beds of sandstone and mudstone; the mudstone interval is mostly a few to more than ten meters thick with a porosity of <8% and has been fully compacted; the slurry density increases greatly, being far higher than 1.2 g/cm³; both the sandstone and mudstone intervals have higher acoustic transit time and lower resistivity, and the stack seismic velocities near the wells also have abnormally lower values; the top of the overpressure interval is irregular in shape and penetrates the bed and macroscopically usually in a certain depth range. Analysis indicates that the lack of compaction and coal beds are not the cause for the lower velocity in the overpressure interval and that hydrocarbon, especially natural gas, generation makes the greatest contribution to the present overpressure generation.

Key words: interior of the Junggar basin; Well Pen-1 West subbasin; overpressure

About the first author: YANG Zhi, male, born in 1980, doctor, engages in the study of overpressure, basin modeling and hydrocarbon accumulation mechanisms; E-mail: cugyangzhi@126.com.