

辽河盆地大民屯凹陷流体压力场研究

叶加仁 邵 荣 王连进

(中国地质大学资源学院, 武汉 430074)

摘要: 综合利用泥岩声波时差、实测地层压力和地震资料, 分析了辽河盆地大民屯凹陷的地下流体压力场特征. 研究表明: (1) 本区泥岩压实类型可划分为正常压实—常压型、单段欠压实—弱超压型和双段欠压实—强超压型三大类; (2) 油层压力梯度接近于 1, 多属正常压力系统; (3) 利用地震资料研究平、剖面压力场特征具有较高的可行性与可靠性; (4) 现今剖面压力系统由浅部正常压力、中部弱超压和深部强超压 3 个部分组成, 断裂系统、不整合面和相互连通的孔隙系统及底辟构造组成了凹陷内流体纵、横向输导的复杂网络系统; (5) 规模较大断层两侧的剩余压力和压力系数具较明显的差异性, 断层对压力的形成、演化与分布起着重要的控制作用; (6) 欠压实与烃类生成是本区超压形成的主导机制.

关键词: 压力场; 超压系统; 钻井资料; 地震资料; 大民屯凹陷.

中图分类号: TE122.2⁺3; P618.130.1 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2000)02-0127-05

作者简介: 叶加仁, 男, 副教授, 1966 年生, 1996 年毕业于中国地质大学(武汉), 获博士学位, 现主要从事油气地质的研究和教学工作.

大民屯凹陷位于辽河断陷盆地的东北部, 西距沈阳市 25 km, 下第三系分布面积约为 800 km². 沙四段和沙三段暗色泥岩是凹陷的主力烃源岩, 目前已在凹陷内发现 8 套含油气储集层, 其中前第三系潜山和下第三系砂岩是最重要的产层. 凹陷含油气丰度高, 是我国东部著名的“小而肥”含油凹陷, 也是闻名于世的高蜡高凝原油的生产基地.

大量的油气勘探与开发实践充分表明, 压力是油气排出、运移和聚集的前提与基础, 且与油气生成、保存及成岩—成矿流体的关系十分密切^[1]. 异常流体压力的研究是盆地模拟的主要内容之一, 已成为现今一系列石油地质理论问题的生长点. 据不完全统计, 世界上超压盆地有 180 多个, 其中 160 多个是富含油气的盆地, 超压油气田约占全球油气田的 1/3 左右^[2], 且随着油气勘探程度的逐渐提高和向深处勘探的不断进军, 必将发现更多的超压含油气盆地和油气田.

迄今为止, 可用于研究和预测地层压力的方法有很多, 但就其应用的广泛性和重要性而言, 以利用声波测井、实测地层压力(DST, RFT, FMT 等)和地震速度资料最为重要^[3,4]. 其中前两种方法仅适用

于已钻探地区, 虽然大民屯凹陷现有不少钻井, 但其实测压力资料比较零星, 区域连续性较差, 是利用其他资料预测地层压力的基础; 后者则可应用于凹陷深部和未钻探地区的压力研究和预测, 为钻探提供钻前预测服务, 并使研究区内压力场和超压系统的研究得以在盆地级规模上展开, 是一种具广阔应用前景和巨大发展潜力的方法. 本次对大民屯凹陷地下流体压力场的研究综合应用了上述三种方法.

1 钻井压力分析

1.1 利用声波测井资料研究地层压力场

综合大民屯凹陷 57 口代表性探井的泥岩声波时差资料, 可将本区钻井的泥岩压实类型分为正常压实—常压型、单段欠压实—弱超压型和双段欠压实—强超压型三大类. (1) 正常压实—常压型: 泥岩的声波时差值与深度间的关系呈对数正相关(图 1a), 单井压力状况为正常压力型. 大民屯凹陷的大部分钻井的泥岩压实状况属于该类型, 约占 72%. (2) 单段欠压实—弱超压型: 泥岩压实曲线表现为“单峰”型, 异常超压主要出现在沙三段下部和沙四段(图 1b), 且压力系数较小, 该类钻井约占 19%.



图 1 大民屯凹陷泥岩 $\Delta t-h$ 关系

Fig. 1 Mudstone sonic log interval vs. depth in the Damintun depression
a. 前 8 井; b. 安 36 井; c. 安 10 井

(3)双段欠压实-强超压型:泥岩压实曲线表现为“双峰”型,异常超压主要出现在 E_{s3}^3 和 E_{s4} 中(图 1c),其压力系数较大,其中 E_{s4} 中的超压强度较大,而 E_{s3}^3 中的超压强度则相对较小,该类钻井约占 9%,且主要分布于凹陷沉积中心(荣胜堡洼陷)及其周围.层序地层及沉积条件分析表明,研究区 E_{s3}^4 属扇三角洲-滨浅湖沉积,其泥岩含量相对较低且岩性不纯;而 E_{s3}^3 属扇三角洲-深湖沉积,其泥岩含量较高,为本区主要的生烃层段之一.欠压实和烃类生成是研究区超压形成的两大主导机制,由此导致在沉积中心及其周围的异常超压主要出现在 E_{s3}^3 和 E_{s4} 中,从而表现为双段欠压实-强超压型特征.

1.2 利用钻井测试资料研究地层压力系统

根据工区内 152 口井 391 个测压点的测压资料,大民屯凹陷的油层压力梯度接近于 1(图 2),多属正常压力系统,但也有部分钻井的压力属异常压力,表现为正压或负压.需要指出的是,由于钻井测试的层位均为输导能力强的渗透性岩层,导致测试压力多表现为常压,实际上在渗透性差的岩层中仍然有异常高压的存在.另外,陈振岩^①曾运用等效深度法对辽河盆地东部凹陷、西部凹陷及大民屯凹陷四十多口井的声波时差测井资料进行了压力换算,其计算结果表明,东部凹陷、西部凹陷和大民屯凹陷内均有超压体系的存在,其中大民屯凹陷的超压体系



图 2 试油测试压力-深度关系

Fig. 2 Measured pressure vs. depth in the Damintun depression

主要发育于凹陷西侧,纵向上基本可分为上、下两层超压体系,钻井资料揭示的最大压力系数可达 1.74.

2 地震压力预测

大民屯凹陷的钻井资料无论在横向上的测点分布还是在纵向上的深度范围都不能满足剖面 and 平面压力模拟计算的精度要求.研究区地震施工条件良好,大部分地震剖面质量尚可,且已有速度谱的剖面分布基本满足地层压力剖面 and 平面模拟的精度要

^①陈振岩. 辽河盆地深层天然气远景评价. 辽河石油勘探与开发科学研究院,1995.

求.本次研究计算了工区内47条代表性剖面的地层压力、剩余压力和压力系数,以研究其平、剖面地下流体压力场特征.

2.1 地震压力预测方法

归纳起来,目前利用地震资料预测地层压力的方法主要有4种:经验曲线法、等效深度法、速度比值法和公式直接计算法^[5,6].比较而言,公式法无需求取往往难以确定的正常压实趋势线,而且精度最高,本次研究主要采用公式法来直接计算本区的地层压力.

公式法认为静水压力可由静水压力梯度乘以深度来表示,而上覆岩层的负荷压力则可由地层平均体积密度与静水压力的乘积而得.Fillippone^[5]提出的计算公式为:

$$p = \frac{v_{\max} - v_i}{v_{\max} - v_{\min}} \cdot d \cdot \bar{d}_s \quad (1)$$

式中: p 为预测的地层压力; v_i 为第*i*层的地震层速度; d 为地层埋深; $v_{\max}$ 为岩层绝对孔隙度接近于0时的纵波速度; $v_{\min}$ 为岩层刚性接近于0时的纵波速度; $\bar{d}_s$ 为研究区地层平均体积密度与纯水密度之比.

2.2 剖面压力特征

综合分析各剖面的地层压力、剩余压力和压力系数等值线图,总结出大民屯凹陷的剖面压力特征:(1)总体上,沙一段及其以上地层一般为正常压实,地层压力为静水压力,压力系数多小于1.2;沙三段上部(E_{s3}^1 和 E_{s3}^2)内发育弱异常高压带,其最大压力系数多小于1.4;沙三段下部和沙四段地层内发育相对强异常高压带,最大压力系数可达1.7.(2)超压带的横向稳定性较差,往往被断层切断而复杂化,大部分呈彼此孤立的“山包”状,多发育于断层下降盘.这说明异常压力在不少地区由于释放而消失了,断层可能是主要的垂向泄压通道.(3)纵向上,自地表往地下深处压力增加,上部为静水压力,只是到一定深度后才出现异常高孔隙流体压力,这与我国东部诸新生代含油气盆地的压力分布特点是相一致的.出现异常高孔隙压力的深度在靠近凹陷中心部位要比斜坡部位的深.(4)靠近凹陷中心部位的高孔隙流体压力和剩余高孔隙流体压力带厚度大,压力高;往斜坡部位其厚度逐渐减小,变为正常压力.毋庸置疑,凹陷深部位发育的异常高压对本区油气运移与聚集具重要的影响作用,不整合面和相互连通的孔隙系统是油气横向运移的主要通道.(5)横向

上,前当堡断裂对剖面压力起着重要的分割作用,其南多发育有异常压力,而其北则均处于正常压力场之中.(6)剖面上侧局部发育有一定强度的剩余流体压力,反映了一定规模的热流体活动,在特定的条件下也具备油气成藏的物质基础.(7)底辟构造内部往往发育有较高的剩余流体压力,其与围岩间存在着较为明显的速度与压力差异,底辟构造是地壳内部流体重要的泄压通道之一.

总之,研究区剖面现今流体压力的发育状况自上而下依次为正常压力、弱超压和强超压系统,超压的强度与规模比渤海湾盆地内其他凹陷(如渤中凹陷、歧口凹陷和辽东湾地区等)的小得多^[7],断层的发育特征对超压的分布具明显且重要的控制作用.上第三系、东营组和沙一段地层埋藏较浅,泥质岩含量较低,且有机质成熟度较低,地层压实均衡,其排水、泄压通道顺畅,超压难以积累和保持;下部沙三段和沙四段地层由于地层埋深大,生烃能力强,增压因素多,泥质岩含量较高,其形成异常高压的条件优越.但下构造层内断裂较发育且受构造运动影响显著,由于断层的泄压作用,使得剖面现今的异常压力横向分布连续性差,而呈孤立的“山包”状.断裂系统、不整合面和相互连通的孔隙系统及底辟构造组成了大民屯凹陷内流体纵、横向输导的复杂网络系统.

2.3 平面压力系统分布特征

重点对凹陷内的与油气运聚密切相关的 E_{s1} 、 E_{s3}^1 、 E_{s3}^2 、 E_{s3}^3 、 E_{s3}^4 和 E_{s4} 底面的剩余压力和地层压力系数作了平面顺层“切片”研究,并对各界面的压力展布特征进行对比分析.

大民屯凹陷各地质-物理界面的地下流体压力场既有一定的相似性,又具较强的规律变化性(表1):(1)各界面超压带覆盖范围总体较小, E_{s4} 底的超压带范围最小, E_{s3}^3 底的超压带范围最大,但也仅占1/8,这与典型超压盆地的发育特征有较明显的差异;本区沙四期—沙三早期断裂发育,由于断裂的垂向泄压作用,导致 E_{s3}^4 和 E_{s4} 超压系统的横向连续性差,面积变小;(2)自浅至深,虽然各界面的平面平均压力系数较接近,但最大压力系数依次变大,反映超压强度的逐渐加强;(3)各界面上超压带的连续性总体较差,其中以 E_{s3}^3 底界面上的超压带连续性相对较好,且具一定的区域展布方向,而 E_{s1} 底和 E_{s4} 底界面上的超压带连续性均较差,无明显的区域走向;(4)各界面靠近凹陷沉降中心部位的剩余压力值大于靠近斜坡部位的值,总体具东低西高的特点;(5)

表 1 大民屯凹陷平面压力系统参数对比

Table 1 Parameter correlation of plane pressure system in the Damintun depression

	Es ₁	Es ₃ ¹	Es ₃ ²	Es ₃ ³	Es ₃ ⁴	Es ₄
最大剩压/MPa	11.3	20.83	24.74	32.24	33.88	59.66
平均剩压/MPa	2.14	3.03	3.48	4.16	4.41	5.00
最大压力系数	1.57	1.83	1.75	1.75	1.87	2.03
平均压力系数	1.16	1.17	1.15	1.15	1.14	1.12
超压占总面积	1/10	1/10	1/11	1/8	1/11	1/12

大民屯凹陷的现今地下流体超压场以沙三段下部和沙四段内最为显著,沙三段上部及其以上地层内的超压强度较弱;(6)规模较大断层两侧的剩余压力和压力系数具较明显的差异性,断层对压力的形成、演化与分布起着重要的控制作用;(7)利用地震资料预测的地层压力与根据钻井测试测得的实测压力变化趋势基本一致。

2.4 用地震资料研究超压系统的可行性和可靠性

(1)工区地震地质条件.一个地区地震地质条件的好坏直接影响到地震剖面、速度谱的质量与精度.本区主要地质界面和大部分地震剖面的反射质量尚可,且地震资料覆盖面广,这为利用地震资料准确预测地层压力奠定了良好的地震地质基础.在已模拟计算的各条地震剖面中,各测线的 v_r-t_0 回归方程的相关系数均大于 0.85,且 v_{r0} 和 K 值(斜率)的离差均较小,这从一个侧面反映了利用地震资料预测工区地层压力分布状况的可行性和科学性.另外,在时间小于 2.5 s,深度小于 4 000 m 的范围内,其速度

数据点较集中(图 3),计算的地层压力结果具较高的可靠性。

(2)计算压力与实测压力的对比分析.对比本区 6 口钻井的 DST 实际测量压力与邻近 CDP 点的计算压力(表 2),8 个点的相对误差均小于 $\pm 20\%$,其中多在小于 $\pm 10\%$ 的允许误差范围之内,说明计算压力与实测压力间具一定的可比性,二者的变化趋势具明显的一致性。

3 超压形成机制探讨

对于异常压力的形成机制,虽然目前有许多因素还难以全面、定量表述,但比较流行或基本得到确认的机制有快速沉积负荷、水热增压、粘土矿物转化、干酪根成烃、构造作用和化学渗析作用等^[8~10].在上述机制中,快速沉积负荷长期以来被认为是超压形成的主要因素,这是因为快速沉积引起沉积物的压实和孔隙流体排出之间的不平衡.地质上连续性好、分布较广的厚泥岩层的存在,常是其下形成超压的重要条件,如果负荷过程极其迅速,即使在排泄速度高的环境中也能形成高压;但是,若要使超压在地质时期内得以保持,必须有良好的限制流体外泄的封闭条件.此外,在封闭的多孔岩石系统内,增温必然导致超压,这是因为水、油、气的膨胀系数比颗粒的膨胀系数大得多,流体受热膨胀后引起的体积增大是不容忽视的,且伴随温度的升高,有助于解脱岩石中被吸附的烃类、降低流体粘度、降低油水间的界面张力和加速油气在水中的溶解等;在干酪根降解成烃过程中,生成大量的烃类和非烃类的液态与气态产物,其密度都比固态干酪根的密度低,使得烃源岩孔隙流体体积和压力增加,且在干酪根主成气阶段,由于干酪根成气和石油裂解成气等都可使气态烃的体积增大,使得增压现象更加显著,这无疑是含油气盆地中异常流体压力形成的又一主要因素;粘土矿物在成岩作用过程中,由于热力作用,使蒙脱石转变为伊利石,并同时释放出粘土矿物的结晶格架水;构造应力对流体压力也有较大的影响.需要指出的是,影响超压形成与演化的因素众多、机制复杂,不同地质背景下的盆地的超压形成机制各异,影响因素不一,应予以区别对待。

对大民屯凹陷而言,沙河街组三段下部和沙四段地层沉积埋藏速度较快,泥质岩含量较高(一般占 60% 以上),且其埋藏较深,作为大民屯凹陷的主力



图 3 大民屯凹陷 F176.7 测线 v_r-t 关系

Fig.3 Root-mean-square velocity vs. seismic transmit time of the Line F176.7 in the Damintun depression

表 2 计算压力与实测压力对比

Table 2 Correlation of calculated pressures and measured pressures in the Damintun depression

序号	测试深度/m	实测压力/MPa	地震剖面深度/m	计算压力/MPa	相对误差/%	计算点	井号
1	1 984.5	19.84	1 940.37	20.13	1.46	F167.1 CDP238	前 3
2	2 059.4	16.39	1 968.15	18.85	15.00	F167.1 CDP268	前 11
3	2 704.0	36.80	2 764.00	35.16	4.46	F181.5 CDP358	胜 20
4	2 377.5	23.00	2 338.13	22.90	0.44	F181.5 CDP434	静 101
5	2 110.3	21.00	2 148.73	21.04	0.19	F181.5 CDP434	静 101
6	2 858.3	29.78	2 859.04	31.68	6.38	F176.0 CDP467	沈 172
7	2 888.1	28.67	2 920.01	29.95	4.47	F176.0 CDP467	沈 172
8	2 907.5	22.39	2 863.90	20.50	8.44	F176.0 CDP765	沈 154

烃源岩其热成熟演化程度较高,已有大量油气的生成,粘土矿物也已大量脱水、转化,为超压的形成提供了雄厚的物质基础,尤其是上第三系地层的快速深埋和沙三、沙四段的烃类生成对其超压积累起了重要的影响作用,下第三系沉积末的地壳抬升剥蚀运动与断裂的发育对研究区超压的演化起着输导、分割和破坏的作用;而沙三段上部地层自身形成超压的能力远比起其下部和沙四段的差,其沉积埋藏深度相对较浅,泥质岩含量较低,有机质热演化程度也较低,生烃能力较差,其在埋藏压实过程中排水、泄压较通畅,断层的发育沟通了底部沙河街组流体的上涌.另外,在局部地区(如 F167.1 测线),泥岩的底辟刺穿对超压的形成与演化也起了一定的影响作用.因此,沙三段下部和沙四段内的强超压为“自源超压系统”,而沙三段上部地层内的弱超压可能以“它源传递超压”为主.由快速沉降负荷所导致的地层欠压实与烃类生成是本区超压形成的主导机制.

参考文献:

[1] 叶加仁,杨香华,孙永传,等.歧南断阶带温度压力场研

究[J].中国海上油气(地质),1997, 11(3): 161~167.

[2] 杜栩,郑洪印,焦秀琼.异常压力与油气分布[J].地学前缘,1995, 2(3~4): 137~148.

[3] 陈发景,田世澄.压实与油气运移[M].武汉:中国地质大学出版社,1989.

[4] 张博全.压实与油气勘探中的应用[M].武汉:中国地质大学出版社,1992.

[5] Fillippone W R. On the prediction of abnormally pressured sedimentary rocks from data [J]. OTC 3662, 1979: 2667~2676.

[6] 真柄钦次.压实与流体运移[M].陈荷立译.北京:石油工业出版社,1982.

[7] 陆克政,漆家福,戴俊生,等.渤海湾新生代含油气盆地构造模式[M].北京:地质出版社,1997.

[8] 费尔特.异常地层压力[M].宋秀珍译.北京:石油工业出版社,1982.

[9] Reike H H, Chilingarian III G V. 泥质沉积物的压实[M].徐怀大译.北京:地质出版社,1984.

[10] Osborne M J, Swarbrick R E. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: a reevaluation [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 1023~1041

RESEARCH INTO FLUID PRESSURE FIELD IN
DAMINTUN DEPRESSION, LIAOHE BASIN

Ye Jiaren Shao Rong Wang Lianjin
(Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The mudstone sonic log interval, measured stratigraphic pressure and seismic data are integrated to analyze the underground fluid pressure fields in Damintun depression, Liaohe basin. The

(下转 208 页)

核磁共振找水方法的应用效果

袁照令 潘玉玲 万 乐 李振宇 董浩斌 张 兵

(中国地质大学地球物理系, 武汉 430074)

近年来,世界上出现了一种新的直接找水的方法,即核磁共振(nuclear magnetic resonance, 简称 NMR)找水方法. 目前俄罗斯和法国是利用 NMR 技术找水研究水平较高并能生产仪器的国家. 1997 年底,中国地质大学(武汉)引进了法国 IRIS 公司生产的 NUMIS 核磁共振找水系统,经验收试验表明,这台仪器性能稳定可靠,在已知水井上试验结果和钻井资料吻合较好^[1,2].

1 NUMIS 系统的工作原理

法国生产的 NUMIS 系统^①是前苏联生产的名为“Hydroscope”仪器的改进型,其工作原理框图见图 1. 工作过程是由直流变换器将 24 V 的电瓶电压转换成 380 V 电压供给发送机,在计算机控制下,以拉莫尔频率向铺在地面上的线圈(天线)供入脉冲电流,形成激发磁场(瞬间最大输出电压可达 2 500 V,最大输出电流可达 300 A,脉冲持续时间 40 ms);供电停止后,使用同一线圈测量 NMR 信号,可灵敏地测出几个 nV($1\text{ nV} = 10^{-9}\text{V}$)的电磁信号.

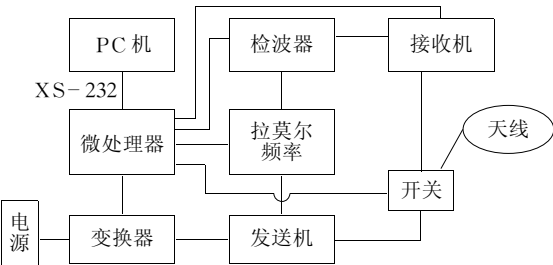


图 1 NUMIS 系统工作原理框图

Fig. 1 NUMIS system block diagram

2 工区水文地质情况及 NMR 方法的技术参数

NUMIS 系统首次应用是在武汉市鼎力公司农牧开发区^②. 从区域上看,主要地层及岩性为:中上



图 2 电测深资料解释结果

Fig. 2 Resistivity sounding interpretation result

志留统砂页岩、上泥盆统五通组中细石英砂岩、石炭系、二叠系及三叠系灰岩、白云质灰岩,地表仅见零星露头,大都掩埋在沟谷低洼处,呈近东西向展布,上覆为第四系中更新统粘土. 区内构造发育,向斜、背斜轴向近东西. 从已有水文地质资料看,工作地点处在非含水区,加之构造复杂,使得寻找地下水的工作难度很大.

在进行核磁共振找水工作中,配合使用了电阻率联合剖面法及电阻率测深法,目的是为了查明断裂的展布和地下岩层电阻率的垂向分布(图 2). 了解岩层电阻率的垂向分布,既有助于确定含水层的类型,又可以提高 NMR 资料反演的精度.

在测点上, NMR 方法的技术参数和测量结果为:(1)线圈类型,圆形,直径 100 m;(2)发射频率, 2 100.9 Hz;(3)测量范围, 5 000 nV;(4)记录长度, 250 ms;(5)脉冲矩个数, 18;(6)叠加次数, 128;(7)噪声水平, 570~1 120 nV;(8)干扰较稳定,信号较好. 从以上可见,测点处的噪声水平偏高,但尚能满足测量要求($<1\,500\text{ nV}$);干扰变化比较稳定,在 5 000 nV 的测量范围内仪器能正常采集数据;从干扰水平看,信号叠加的次数再多一些效果会更好.

3 资料解释结果及找水的效果

图 3 是 NMR 测量的解释结果. 从图 3 可见,在

(下转 158 页)

收稿日期: 1999-03-03
①法国 IRIS 公司. 地面核磁共振找水系统操作手册. 万乐, 曲赞, 董浩斌译. 1998.
②潘玉玲, 袁照令. 武汉鼎力公司农牧开发区地下水勘查报告. 1998.