

准噶尔盆地腹部侏罗系超压特征和测井响应以及成因

何生^{1,2}, 何治亮³, 杨智², 武恒志⁴, 王芙蓉², 石万忠^{1,2}

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

3. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083

4. 中国石油化工股份有限公司西南油气分公司, 四川成都 610051

摘要: 准噶尔盆地腹部地区深层钻井揭示侏罗系发育异常高压系统。根据 26 口井的 67 个钻杆测试(DST)和电缆测试(MDT)数据, 实测砂岩异常高压揭示深度约在 4 470~6 160 m, 剩余压力约为 11~57 MPa, 压力系数为 1.24~2.07, 砂岩段超压实测值主要分布在侏罗系, 少数出现在白垩系底部与侏罗系邻近地层, 1 个超压实测值位于下三叠统, 实测超压砂岩样品的孔隙度和渗透率范围分别为 3.20%~16.00% 和 $0.02 \times 10^{-3} \sim 14.40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 根据钻井、测井和测试资料的综合解释, 埋深在 4 430~6 650 m 的深部侏罗系流体超压带, 钻井泥浆密度明显增加, 泥页岩和砂岩共同具有相对于正常趋势的异常高声波时差和低视电阻率测井响应特征; 超压系统顶界埋深可能不浅于 4 400 m (地温约 104 °C), 有些钻井超压顶界可深达约 6 000 m (地温约 140 °C), 且超压带顶界深度随侏罗系埋深的增加而增大; 钻井揭示的侏罗系超压带烃源岩镜质体反射率(R_o , %)约为 0.7%~1.3%, 超压带分布深度受控于侏罗系成熟烃源岩层的埋深且两者深度分布的变化具有相关性; 研究认为腹部地区已被充分压实的侏罗系异常高压成因主要与其含煤岩系干酪根热演化及油气共生有关, 即生烃增压; 物理模拟实验表明, 由于高孔隙流体压力可导致岩石骨架颗粒间有效应力的减小, 从而直接引起通过岩石的声波速度降低, 即出现高声波时差响应; 在超压地层温度条件下, 高压液态水的电离常数可能明显增加, 从而减小地层电阻率, 进一步开展此种现象的相关探索性研究可望对超压带低电阻率异常的原因给出新的解释。

关键词: 超压(异常高压); 超压测井响应; 超压成因; 生烃增压; 侏罗系; 准噶尔盆地腹部。

中图分类号: P618.13; P631.8

文章编号: 1000-2383(2009)03-0457-14

收稿日期: 2008-10-21

Characteristics, Well-Log Responses and Mechanisms of Overpressures within the Jurassic Formation in the Central Part of Junggar Basin

HE Sheng^{1,2}, HE Zhi-liang³, YANG Zhi², WU Heng-zhi⁴, WANG Fu-rong², SHI Wan-zhong^{1,2}

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China

4. Southwest Branch Company, SINOPEC, Chengdu 610051, China

Abstract: The deep overpressured system occurs in the Jurassic Formation of the central area of Junggar basin. This has been confirmed by drill stem tests (DSTs) and modular dynamic formation tests (MDTs) with 67 measured formation pressures from 26 wells which reveal excessive pressures ranging from 11 MPa to 57 MPa with the pressure coefficients of 1.24 to 2.07 at depths between 4 470 m and 6 160 m. The measured overpressured values are mostly in the sandstone layers of Jurassic formation, only a few in the bottom of the Cretaceous formation and one in the Lower Triassic formation. The measured values of porosity and permeability of the overpressured sandstone samples range from 3.20% to 16.00% and $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ to $14.40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ respectively. This fluid overpressured zone over depths of 4 430—6 650 m is coincident with marked increase of the density of drilling mud, as well as the response of overpressured shales and sandstones to high sonic transit times and low

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20060491505); 中国石化西部新区勘探指挥部项目(XBKY03-35); 国家自然科学基金重点基金项目(No. 40739904)。

作者简介: 何生(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事油气地质方面的教学和科研工作。E-mail: shenghe@cug.edu.cn

resistivity values relative to their normal trends. The observed data suggest that the burial depth of the top of magnitude overpressured zone may not be smaller than 4 400 m with a formation temperature of about 104 °C, and the tops in some drilling wells are to reach as deep as about 6 000 m with a formation temperature of about 140 °C, and the depth of the top of the deep overpressured zone changes with the burial depth of the Jurassic formation. The values of vitrinite reflectance (R_o , %) in the deep overpressured zone of Jurassic formation range from about 0.7% to 1.3%, which suggests that the variations of depth distribution of the overpressured zone are controlled by the burial depth of mature source-rocks of the Jurassic formation. This study indicates that the main origin of abnormally high pressures in the full-compacted Jurassic formation is generation-related oil and gas of the kerogen from the coal-bearing source-rocks. The physical simulation experiments show that the effective stress of rock framework reduces due to high pore fluid pressure, which can directly lead to the decrease of velocity of acoustic wave through the shale and sandstone rocks. As a result, the higher interval transit times respond to overpressuring rather than higher porosities anomaly due to compaction disequilibrium. Under the temperature of the overpressured formations, the ionization constant of high-pressure liquid water (near-critical water) may be increased, which is likely to decrease formation resistivity. Further study on this phenomenon is expected to offer a reasonable explanation for the cause of low formation resistivity in the observed overpressured zone.

Key words: overpressure (abnormally high pressure); well-log response of overpressure; overpressure mechanism; hydrocarbon generation pressure; Jurassic formation; central part of Junggar basin.

准噶尔盆地是我国西部发育异常压力的大型含油气盆地。从异常压力的整体特征来看,盆地腹部和南部山前断褶带发育异常高压且存在多套超压层系;而盆地北部和边缘地区有程度不同的异常低压发育。钻杆和电缆测试获取的地压数据足以说明,盆地内石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系和第三系砂岩储层都有异常高压发育,实测压力揭示异常高压发育深度约 800~6 200 m。中国石油新疆油田 1990 年钻探的 PC2 井和随后钻探的 P4 井均在侏罗系钻遇异常高压(吴晓智和李策,1994)。2000 年以来,中国石化在该盆地腹部地区开展了较大规模的油气地震勘探和钻探,钻井揭示腹部侏罗系超压十分发育,最大压力系数可达 2.07(D6 井, J_1s)。准噶尔盆地钻遇的异常压力和多套超压层引起了许多学者的关注,从 1994 年至 2008 年公开发表的针对准噶尔盆地超压基本问题的研究成果有几十篇,本文仅列出有代表性的十几篇学术论文(吴晓智和李策,1994;刘得光,1998;查明等,2000;李忠权等,2001;曲江秀和查明,2003;王震亮等,2003;张勇刚,2003;赵桂萍,2003;罗晓容等,2004;张卫海等,2004;李民河等,2005;金爱民等,2006;吴孔友等,2006;邹华耀等,2006;Luo *et al.*, 2007;杨智等,2008)。这些学术论文的主要观察和研究内容涵盖了异常高压和异常低压特征、成因和形成条件,超压封闭机理,异常高压与声波时差和地震速度的关系,异常高压与碳酸盐和胶结物含量的关系,超压与油气分布和油气成藏相关性等。这些论文中主要研究腹部超压系统的文章有 9 篇(吴晓智和李策,1994;刘得光,1998;查明

等,2000;李忠权等,2001;曲江秀和查明,2003;金爱民等,2006;邹华耀等,2006;Luo *et al.*, 2007;杨智等,2008)。1994—2001 年对腹部地区异常高压研究(吴晓智和李策,1994;刘得光,1998;查明等,2000;李忠权等,2001)的基础资料主要来源于中国石油新疆油田钻探的 PC2 井、P4 井和 M2 井等。2003—2006 年中国石化西部勘探指挥部根据生产需要设立了新一轮的针对腹部地区异常高压的若干专项和综合性研究。2003 年以来的有关研究成果所用新的物探和钻井资料来源于中国石化在该区的油气勘探资料,已有十几篇学术论文发表,本文的参考文献中仅列举了若干有代表性的文章(张勇刚,2003;金爱民等,2006;邹华耀等,2006;杨智等,2008)。2003 年以来,新一轮腹部超压的研究使对其基本问题的观察和认识有了进一步的深化,提出的概念性认识和新的观察现象体现在以下几个方面:(1)认为超压成因主要是成岩作用和烃类生成作用;(2)利用地震速度计算的超压顶面深度变化大,大约埋深为 4 400~6 000 m;(3)开展了超压顶封层的成岩作用和封闭机理研究;(4)提出了超压与油气分布和成藏关系的某些统计性认识和推测。这些深入的观察、探讨和概念性的认识及机理上的推测为进一步寻找新的事实依据,深化腹部超压形成机制和分布规律的研究奠定了基础。在这个基础上,本文将聚焦腹部地区有足够证据的侏罗系超压层,对其超压的分布特征和成因进行详细的分析论证,深入讨论超压顶面深度的变化和超压地球物理响应的原因以及超压分布的规律性,提出新的观察资料和理论思考及研究成果,继

续提升对腹部地区侏罗系超压系统相关基本问题的研究水平.

1 基础地质概况

准噶尔盆地位于新疆北部,盆地周围被褶皱山系环绕,东西长约 700 km,南北宽约 370 km,面积为 $13.4\times 10^4\text{ km}^2$ (图 1). 该盆地是在前寒武纪结晶基底和海西褶皱基底之上发育起来的晚古生代至中生代的复合叠加盆地,经历了海西、印支—燕山、喜山 3 次大的构造运动,分别对应洋—陆转换阶段的裂陷—坳陷盆地、坳陷—小型前陆坳陷—坳陷盆地以及内陆坳陷—大型前陆盆地 3 个阶段(吴庆福, 1986;左龙凭等, 1999;曾广策等, 2002;陈发景等, 2005). 该盆地通常被划分为乌伦古坳陷、陆梁隆起、中央坳陷、西部隆起和东部隆起等 5 个一级构造单元,中央坳陷包括了 12 个二级构造单元. 本文提到的盆地腹部一般指中央坳陷的 P1 井西凹陷、东道海子北凹陷、昌吉凹陷、中拐凸起、莫北凸起和马桥凸起(图 1). 准噶尔盆地沉积盖层包括上古生界至新生界的石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系和新近系,沉积岩最大厚度达 14 000 m. 下—中侏罗统为河流沼泽相沉积,由砂岩、砾岩、泥页岩、碳质泥岩及煤层构成,最大厚度约上千米,为盆地腹部地区重要的煤系烃源岩;中侏罗统上部及上侏罗统为一套河流相厚层灰、灰绿色砂岩和砾岩为主的

沉积,厚约 200~1 600 m,但存在不同程度的剥蚀缺失;侏罗系与下伏三叠系白碱滩组 and 上覆白垩系吐谷鲁群之间为区域性不整合接触(图 2).

2 实测砂岩超压特征

获得原始地层压力的实测方法有两种:一是钻杆测试(DST),即试油或试气过程中的地层压力测试以及原始地层压力恢复;二是电缆测试(如 RFT 和 MDT 等). 地层压力实测方法一般仅适用于渗透性地层如砂岩层,渗透率大于 $0.01\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,实测压力是超压研究中直接反映超压现象的可靠证据.

准噶尔盆地腹部地区收集到 1990—2006 年有实测压力资料的探井为 26 口,其中钻遇高压的探井约有 20 口,实测压力数据共约 67 个;从表 1 可知,侏罗系高压测值 25 个;下白垩统高压测值 5 个,下三叠统高压测值 1 个,该表列出了这些异常高压数据的深度范围、剩余压力、地层水矿化度和压力系数. 由图 3 可知,DST 和 MDT 测试揭示的高压测值段中部深度一般分布在 4 470~6 160 m(地温约 106~143 $^{\circ}\text{C}$),剩余压力约为 11~57 MPa,压力系数(实测压力/静水压力)为 1.24~2.07;只有一个高压测值段的中部深度相对较浅,位于 SH1 井下侏罗统八道湾组,深度在 3 947 m(地温为 94 $^{\circ}\text{C}$, R_o 为 0.5 %);超压砂岩段主要分布在下一中侏罗统砂

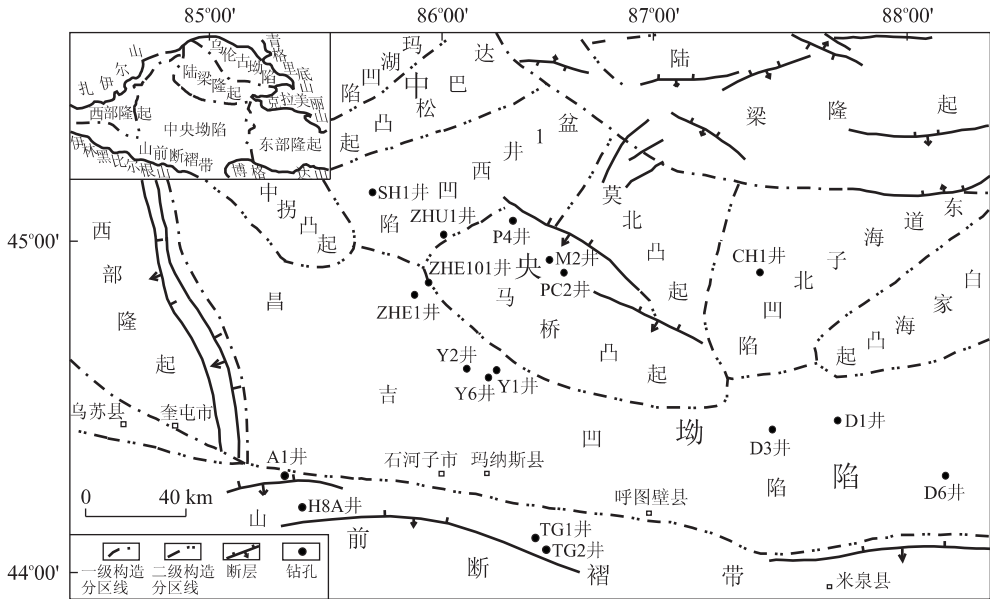


图 1 准噶尔盆地腹部地区构造分区及研究钻井井位

Fig. 1 Map showing the tectonic subdivisions and the studied well locations in the central part of Junggar basin

界 (代)	系 (纪)	统 (世)	地质 年龄 (Ma)	岩性地层		主要 能源 岩	盆地构造演化 陈发景等 (2005)
				组名(代号)	厚度(m)		
新生界	第四系 + 新近系	中-更新统	23.3	N+Q	448~2 150		大型前陆拗陷
	古近系	古-渐新统		E	549~1 360		内陆拗陷
中生界	白垩系	上统	65	东沟组 K _{2d}	323~670		挠曲拗陷
		下统	96	吐谷鲁群 K _{1t}	1 572~1 982		内陆拗陷
	侏罗系	上统	137	齐古组 J _{3q}	0~188		小型前陆拗陷
		中统	157	头屯河组 J _{2t}	0~760		伸展拗陷
			178	西山窑组 J _{2x}	0~726		
		下统		三工河组 J _{1s}	266~486		
				八道湾组 J _{1b}	664.5~866		
			205	白碱滩组 T _{3b}	223(SH1井)		挠曲拗陷
	三叠系	上统	227	克拉玛依组 T _{2k}	518(SH1井)		伸展拗陷
		中统	241	百口泉组 T _{1b}	85未穿(SH1井)		拗陷
		下统	250	上乌尔禾组 P _{3w}			挠曲拗陷
	二叠系	中统	257	下乌尔禾组 P _{2w}			伸展拗陷
				夏子街组 P _{2x}			
		下统	277	风城组 P _{1f}			陆内裂谷
				佳木河组 P _{1j}			
上古生界	石炭系	上统	295	太勒古拉组 C _{3t}			原裂陷槽
		中统	320	包固图组 C _{2b}			
			354				

图 2 准噶尔盆地腹部地区钻井揭示地层厚度及相关信息

Fig. 2 Formation thicknesses and some related information from the boreholes in the central part of Junggar basin

表 1 准噶尔盆地腹部地区实测异常高压数据信息统计

Table 1 Measured data of overpressure and some related information in the study area

地层	测点数	深度范围(m)	剩余压力(MPa)	矿化度(g/L)	压力系数
下白垩统吐谷鲁群	5	4 570.5~5 975.0	11.49~51.99	10.299~37.435	1.24~1.88
侏罗系	25	3 942.0~6 170.6	12.64~56.54	8.191~50.116	1.29~2.07
下三叠统百口泉组	1	5 450.0~5 457.8	56.96	9.325	2.04

注:压力系数=实测压力/静水压力;静水压力梯度按 0.01 MPa/m。

泥岩含煤层系中,个别钻井(Y6 井和 D1 井)在邻近侏罗系的下白垩统吐谷鲁群底部地层有 5 个实测高压值,SH1 井下三叠统百口泉组有 1 个实测高压值,实测地层破裂压力深度在 1 500~6 500 m,破裂压力梯度范围在 1.9~2.3 MPa/100 m 之间.由图 3 中地层水矿化度与深度的关系图可知,准噶尔盆地腹部地区地层水矿化度随埋深缓慢增加,埋深在 4 000~6 200 m 地层水矿化度一般不超过 50 g/L,地层水的密度范围一般在 $1.004\times 10^3\sim 1.05\times$

10^3 kg/m^3 ,由此可将压力系数等于 1.1 作为常压系统与高压系统的界限,当压力系数大于 1.1 时,可认为腹部地区地层孔隙流体处于超压状态.

表 2 给出了准噶尔盆地腹部地区实测超压井段砂岩样品孔渗测定数据的统计结果,这些超压砂岩层的岩性主要是粉—细砂岩和细砂岩,个别为细—中砂岩和中—粗砂岩,各测试井段的孔隙度范围为 3.20%~16%,平均孔隙度范围在 3.90%~13.97%;各测试井段的渗透率范围为 $0.02\times 10^{-3}\sim$

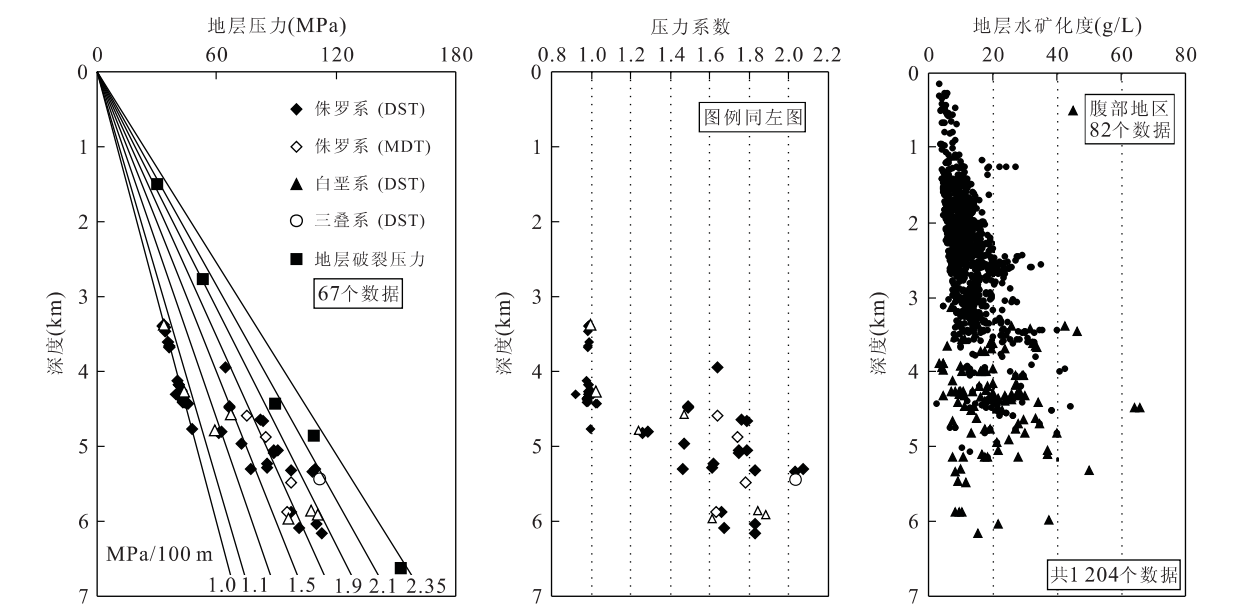


图 3 准噶尔盆地腹部地区实测地压、压力系数和地层水矿化度与深度的关系

Fig. 3 Profiles of measured pore pressures, pressure coefficients and total dissolved solids versus depth in the central part of Junggar basin

表 2 实测超压井段中砂岩的实测孔隙度和渗透率以及岩性特征统计

Table 2 Measured porosity and permeability of sandstone samples in the overpressured layers

井号	测试井段 (m)	层位	地层压力 (MPa)	压力系数	孔隙度 (%)	水平渗透率 (10 ⁻³ μm ²)	岩性
SH1 井	3 942. 0~3 952. 5	J ₁ b	64. 56	1. 64	8. 2~10. 7	0. 09~0. 45	细砂岩
					9. 49(17)	0. 24(17)	
	5 450. 0~5 457. 8	T ₁ b	111. 50	2. 04	8. 8~16. 0	0. 02~5. 02	粉—细砂岩
ZHE1 井	4 788. 4~4 797. 0	K ₁ t	59. 42	1. 24	13. 97(12)	0. 74(10)	粉砂岩
					5. 1~12. 7	0. 07~2. 64	
	4 808. 5~4 812. 5	J ₁ s	62. 27	1. 29	8. 95(26)	0. 95(20)	粉—细砂岩
ZHE101 井	5 053. 4~5 057. 4	J ₁ b	90. 46	1. 79	5. 3~11. 3	0. 13~3. 58	粉—细砂岩
					8. 93(10)	1. 02(6)	
					3. 6~15. 5	0. 05~3. 30	粉—细砂岩
Y1 井	5 873. 4~5 888. 1	J ₂ x	97. 45	1. 66	6. 78(8)	0. 49(8)	细砂岩
					6. 3~13. 1	0. 38~2. 82	
	5 858. 4~5 869. 7	K ₁ t	107. 78	1. 84	9. 38(6)	0. 92(6)	细砂岩
Y6 井	6 026. 3~6 037. 5	J ₂ x	110. 41	1. 83	8. 5(1)	0. 23(1)	中—粗砂岩
					6. 7~8. 5	0. 13~0. 77	
					7. 46(9)	0. 40(9)	粉—细砂岩 (邻层)
D1 井	4 570. 5~4 573. 2	K ₁ t	67. 18	1. 47	4. 3~13. 4	0. 14~14. 4	粉—细砂岩 (邻层)
					10. 27(20)	3. 10(20)	
	4 954. 5~4 957. 4	J ₂ t	72. 63	1. 47	3. 2~5. 1	0. 04~0. 26	粉—细砂岩 (邻层)
D6 井	5 292. 5~5 299. 8	J ₁ s	109. 50	2. 07	3. 90(4)	0. 11(4)	细—中砂岩
					7. 4~8. 8	0. 21~0. 73	
					8. 39(8)	0. 45(8)	

注:孔隙度和渗透率两列分子为数值范围,分母为平均值,括号内为样品数.

14. 40×10⁻³ μm²,平均渗透率范围在0. 11×10⁻³~3. 10×10⁻³ μm²,实测超压砂岩样品物性主要为低—特低孔渗.

3 超压带钻井泥浆密度和测井响应特征

钻杆测试只能在试油气层段获得压力数据,电缆测试可得到渗透性地层的压力,但由于施工费用高,往往测压层段少即压力数据有限. 钻井泥浆液柱

表 3 准噶尔盆地腹部 4 口代表性井的超压顶界面的相关参数

井名	构造单元	顶面深度(m)	顶面温度(℃/100 m)	顶面地层	顶面 R_o (%)
ZHU1 井	P1 井西凹陷	4 450	105	J_1s	0.7
PC2 井	马桥凸起	4 430	105	J_1s	0.7
Y1 井	昌吉凹陷西部	5 820	136	$K_1t \sim J_2x$ 交界	1.0
D3 井	昌吉凹陷东部	5 340	125	J_2q	0.85

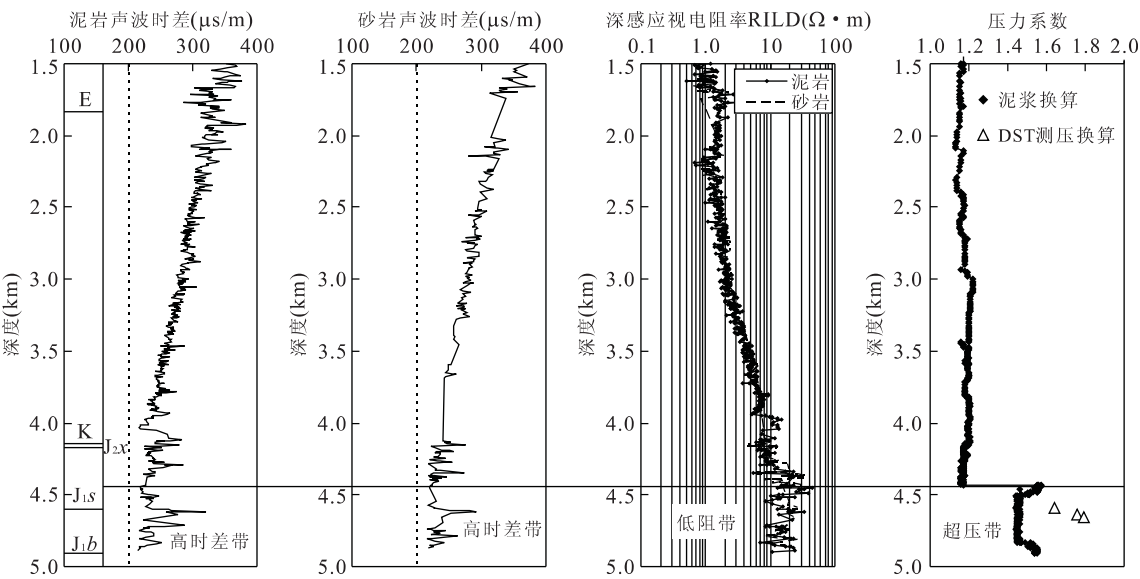


图 4 ZHU1 井测井泥岩、砂岩声波时差和视电阻率以及压力系数与深度关系

Fig. 4 Profiles of sonic, resistivity well-log data of mudstones and sandstones and pressure coefficients versus depth in the ZHU1 well

静压力代表了渗透性地层的孔隙压力随深度变化的大体趋势,因为在平衡钻进过程中,通过改变泥浆密度实现大致平衡地层压力。但实际上,在异常高压层段,由于各种复杂的地质和工程因素使得通过调整钻井液密度以求保持与地层压力的动态平衡较为困难,欠平衡和过平衡常会出现。另外,在钻遇高压含气层段时,高压天然气可侵入泥浆液导致要求更高的泥浆密度来平衡地层压力,使得根据泥浆密度换算的泥浆液柱静压力偏高。所以,利用泥浆密度换算的视地层压力等参数仅代表实际地层压力随深度变化的趋势,而这种趋势一般指示渗透性地层的孔隙流体压力随深度变化的响应特征。

对于极低渗透率小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的泥页岩层,由于其孔隙流体压力难以实测,泥页岩层是否处于超压状态通常需利用声波时差、视电阻率和地震速度等对超压响应特征来加以研究和预测。例如 Eaton(1972,1976)和 Fillippone(1979,1982)分别提出经验公式,利用测井和地震资料研究并估算和预

测超压。因此,认识腹部地区纵向上连续的砂岩和泥页岩孔隙压力变化特征需利用钻井、测试、测井和地震等多种资料来加以综合研究。

本次利用钻井泥浆换算压力、测井声波时差和视电阻率等资料研究砂岩和泥页岩纵向上连续的超压响应特征。视电阻率数据从深感应测井(RILD)和深侧向测井(R_t)获取,深感应测井不受泥浆性质影响,探测深度可大于 1.5 m,且当地层电阻率小于 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 时,地层视电阻率测值接近其真实电阻率(Asquith and Gibson,1997)。研究区 ZHU1 井、PC2 井、Y1 井和 D1 井等 4 口钻井的超压层段资料齐全,测井和钻井液密度响应具有代表性(表 3,图 4~图 7)。这 4 口井在超压层段没有明显的扩径影响。从图 4~图 7 可知,钻井揭示的超压带主体均发育在侏罗系,解释的钻井液和测井对超压的响应层段都有实测超压数据佐证。表 3 中地温和镜质体反射率(R_o ,%)值是根据实测数据换算或模拟获得的。结合其他钻井泥浆和测井地震响应资料,钻井侏罗

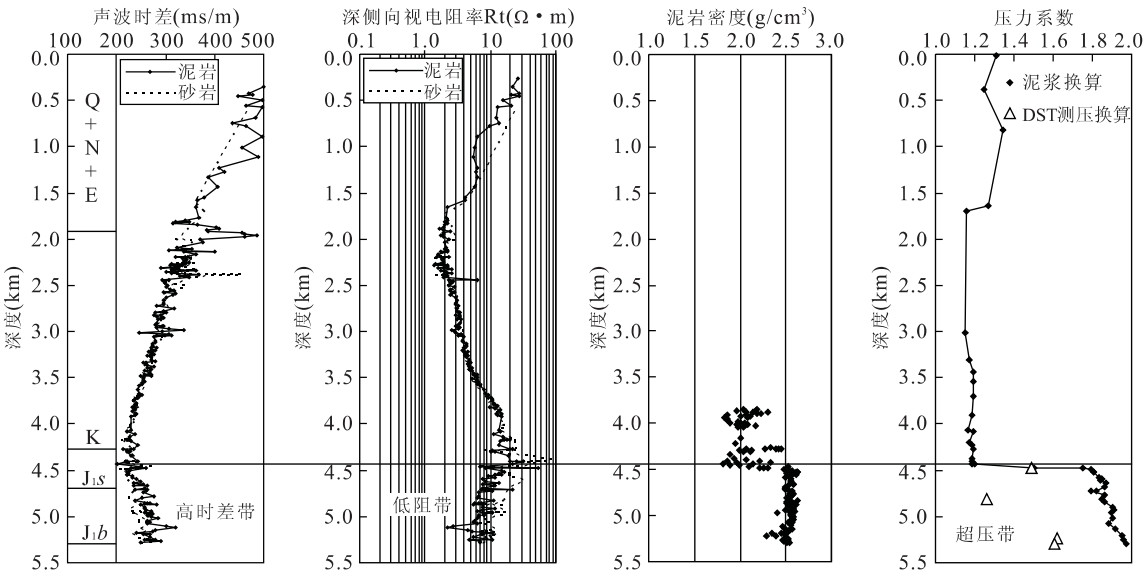


图 5 PC2 井测井泥岩、砂岩声波时差和视电阻率, 泥岩密度以及压力系数与深度关系

Fig. 5 Profiles of sonic and resistivity well-log data of mudstones and sandstones, density of mudstones and pressure coefficients versus depth in the PC2 well

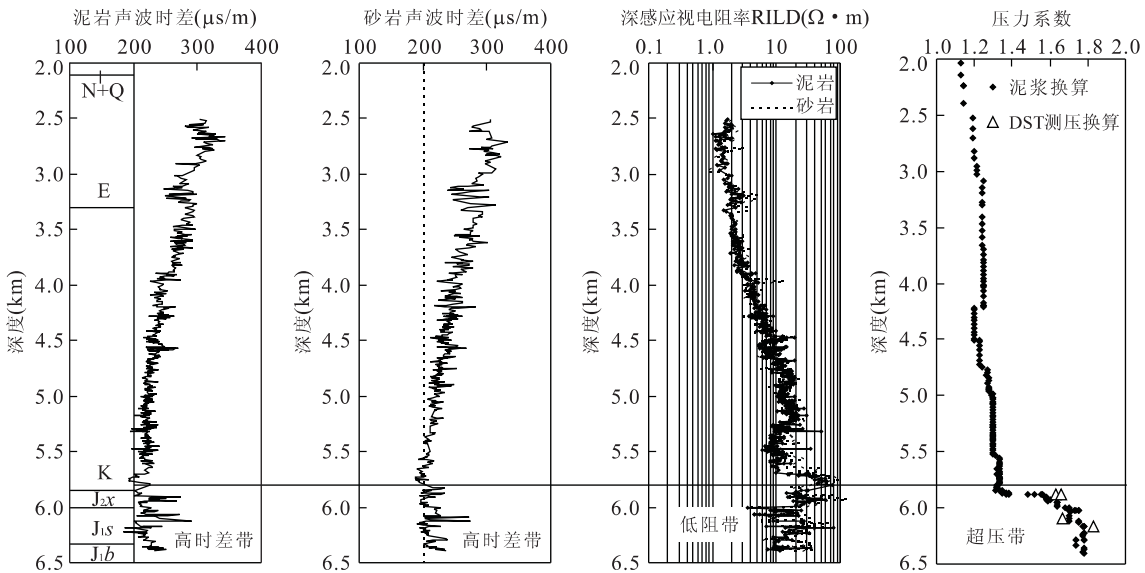


图 6 Y1 井测井泥岩、砂岩声波时差和视电阻率以及压力系数对比

Fig. 6 Profiles of sonic, resistivity well-log data of mudstones and sandstones and pressure coefficients versus depth in the Y1 well

系大套超压层段 R_0 。分布在 $0.7\% \sim 1.3\%$, 这说明超压层段与进入大量油气生成阶段的侏罗系烃源岩层有明显的对应关系, 腹部地区侏罗系大套超压带的顶界深度可能不浅于 $4\,400\text{ m}$ (地温约 $104\text{ }^{\circ}\text{C}$), 钻井揭示的顶界最大埋深约达 $6\,000\text{ m}$ (地温约 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$); 埋深在约 $4\,400\text{ m}$ 以下的侏罗系, 不同井的超压顶界深度和温度与侏罗系的埋深有关, 即超压顶界面顺侏罗系顶界或白垩系底界深度分布, 且超

压带顶界深度随侏罗系埋深的增加而增大; 如 P1 井西凹陷 ZHU1 井, 侏罗系顶界深度为 $4\,143\text{ m}$, 而该口井的超压顶界深度约在 $4\,450\text{ m}$; 昌吉凹陷西部 Y1 井, 侏罗系顶界深度为 $5\,843\text{ m}$, 而该口井的超压顶界深度大体在 $5\,820\text{ m}$; 昌吉凹陷东部 D3 井, 侏罗系顶界深度为 $5\,292\text{ m}$, 而该口井的超压顶界深度约在 $5\,340\text{ m}$; 进一步讲, 不同井的超压顶界埋深变化如此之大不是因为地温梯度的变化所导致的 (腹

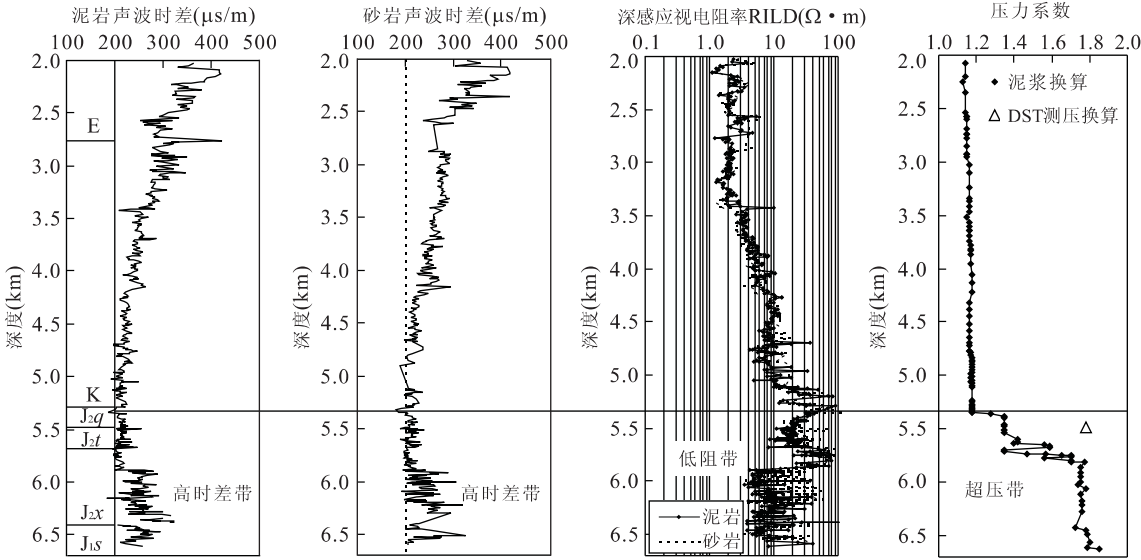


图 7 D3 井测井泥岩、砂岩声波时差和视电阻率以及压力系数对比

Fig. 7 Profiles of sonic, resistivity well-log data of mudstones and sandstones and pressure coefficients versus depth in the D3 well

部地区实测平均地温梯度为 2.2℃/100 m, 年平均地表温度约为 7.5℃), 很显然腹部地区钻井揭示的大套超压带分布深度与作为成熟烃源岩层系的侏罗系埋深变化大体具有一致性。本次有关超压顶界面的深度和温度的研究和认识是对 Hunt(1990)曾提出的超压流体封存箱顶界深度和温度分布描述的有意义的补充。

本文展示的钻遇超压的 4 口井(图 4~图 7)埋深约在 4 430~6 650 m 侏罗系超压地层的地球物理测井响应特征为:

(1)相对于正常的声波时差变化趋势,泥页岩和砂岩的声波时差值共同具有高时差异常,砂岩的高时差异常幅度相对于泥岩一般偏小,但 D3 井超压带的砂岩高时差异常幅度也较大,泥页岩和砂岩的声波时差的响应幅度可能某种程度上反映了两者自身超压程度的差异,在没有深部传递型超压影响时,砂岩内的超压一般小于或可能接近于相邻作为超压源的泥页岩内的超压;(2)相对于正常视电阻率变化趋势,泥页岩和砂岩的视电阻率明显低异常,这可能说明了两者的低电阻率响应与超压有成因联系。

4 超压主要成因和测井响应原因解释

4.1 超压主要成因

已被大多数学者接受的含油气盆地中大规模超压的主要成因有 3 种:(1)快速沉积引起的大套泥质岩层的欠压实,即高孔隙度;(2)埋藏增温导致的沉

积有机质热成熟生烃;(3)构造应力侧向挤压。其次,水热增压或流体热膨胀增压可能进一步加强了系统中的异常高压(Martinsen,1995)。此外,压力传递是超压分布的一个重要的控制因素,它造成了地下剩余压力的重新分布(Swarbrick and Osborne,1998; Yardley and Swarbrick,2000),超压传递是通过孔隙—裂缝系统、运载层以及断层和不整合面等通道实现地下剩余压力的重新分布。刘晓峰等(2008)根据储层超压形成与超压源的空间位置关系将其分为接触式传递和连通式传递。当渗透性地层如砂岩层中流体输导不畅或封闭有效时,超压传递就会导致其中的孔隙流体压力明显增加形成超压层。

在沉积岩层系中,异常高压多起源于泥页岩,对深埋地层来讲,其超压源是富含有机质且具有成熟生烃能力的源岩层;当然储层中油热裂解成气也可自身产生超压。超压是一种非平衡状态,总是要向压力相对较低的渗透性地层或不整合面和断层等通道传递,以便使得系统趋向压力平衡状态,从而导致渗透性岩层超压接近相邻源岩层中的超压,有时可叠加深部传递的超压流体,可能致使储层超压高于相邻泥页岩层中的超压,而与深部超压源趋于平衡。根据输导条件和传递方式及能力可将超压源与储集层的基本组合区别为两类:(1)由岩性互层和侧变形成二者的面—体状直接接触使高压流体从泥页岩排出注入储集层;(2)经断裂和不整合面等通道以及输导层间接沟通深部—异地高压源形成二者的线—带状输通使超压流体注入储集层,通常断裂作用是深部

超压热流体垂向注入浅部储集层的重要条件。而后者有时可在超压烃源岩范围以外即常压环境中形成孤立的渗透性超压层,也就是超压储层周围的泥页岩不具超压状态,若仅形成小规模薄储层超压,则其地球物理响应可能不明显。另外,深部塑性超压体整体向浅层侵入将会导致超压边界的大规模调整和剩余压力的重新分布。

构造挤压应力可能是准噶尔盆地南缘山前断褶带超压的主要成因之一(罗晓容等,2004;杨智等,2006;Luo *et al.*, 2007),而在腹部地区构造挤压应力不可能只选择在侏罗系或紧邻侏罗系的白垩系底部引起超压现象,换言之它不可能是腹部地区主要的超压成因。钻井揭示的SH1井5 450.0~5 457.8 m下三叠统百口泉组的含油砂岩超压(111.5 Ma,压力系数为2.04,DST)可能与邻近下伏的二叠系烃源岩的生烃超压沿断层向上输导注入有关;D1井4 871.2~4 873.0 m中侏罗统头屯河组的油气层超压(84.81 Ma,压力系数为1.74,MDT)可能是较深部的侏罗系含烃高压流体垂向沿断层向上传递的结果,因为根据测井资料解释该超压砂岩薄层上下的泥页岩没有超压测井响应。

这里研究的腹部地区侏罗系超压成因是指其泥页岩为超压状态,砂岩与暗色泥页岩及烃源岩互层或侧变式接触,砂岩周围具有原地超压环境的侏罗系大套砂泥互层超压带的起因。Lee and Deming (2002)认为欠压实机制通常适用于解释新生代盆地中由于快速沉积在低渗透率泥页岩中形成的异常高压,这个压实不平衡过程持续的地质时间相对较短(一般认为小于10~20 Ma)。Hunt (1998)根据Powley (1993)的研究,介绍了得克萨斯Sheridan油气田某井发育在深度约3 350 m以下的超压流体封存箱对应的实测泥岩孔隙度(约10%)和密度(约2.4~2.5 g/cm³)为相对常数,即没有欠压实特征。通过实测泥岩孔隙度可知,腹部地区10块埋深在4 330~5 300 m侏罗系泥岩样品的孔隙度分布在2.5%~7%之间;PC2井(图5)、Y1井和D3井的泥岩密度测井数据在侏罗系超压层段没有出现与欠压实有关的减小等明显的异常变化。腹部地区侏罗系烃源岩 R_o 约为0.7%~1.3%,这从侧面说明了侏罗系超压带成因与烃类生成有关;试油结论也显示超压砂岩层为油层、油气层和含油水层,油为轻质油(原油密度:(0.776 8~0.896 2)×10³ kg/m³),并且完井报告记载在钻遇超压带时常遇到烃类气体气侵现象。所以,有理由相信腹部地区深部侏罗系超压带

与泥页岩的欠压实无关,而主要与油气共生相关,这与侏罗系含煤烃源岩所经历的地温和热演化成熟生烃特征是一致的。研究区深部侏罗系超压系统形成过程可大致理解为:在白垩纪至第三纪持续埋藏过程中,侏罗系热演化大量生烃之前埋深达3 000~4 000 m已被较充分压实,在成岩作用晚期阶段和深成作用早期阶段(水—岩和有机—无机相互作用)侏罗系进一步成岩、胶结、致密化并形成有效的封闭条件,随着侏罗系继续埋深至4 400 m以下,埋藏增温作用使侏罗系含煤烃源岩热成熟度 R_o 达到0.7%~1.3%,大量的油气共生引起系统内部孔隙流体体积持续增加和流体热膨胀,从而形成侏罗系以及与其有关的砂岩层超压。

4.2 超压测井响应原因解释

超压带中泥岩的异常高的声波时差和低电阻率在解释由欠压实引起的异常高压现象时符合了人们对这种物理现象因果关系的一般理解(Wyllie *et al.*, 1958; Magara, 1978),因为泥岩压实不平衡意味着对应高孔隙度、低岩石密度和高地层水含量。早在20世纪70~80年代,许多学者利用测井响应成功地解释了由欠压实导致的异常高压现象(Magara, 1968; Fertl, 1976; Chilingar *et al.*, 2002)。Hermanrud *et al.* (1998)和 Teige *et al.* (1999)在研究挪威岸外以及北海侏罗系超压与孔隙度和测井响应关系时发现深部超压带中泥页岩的孔隙度和密度未发生异常变化,即泥页岩为正常压实,但在超压带同样存在异常高的声波时差和低电阻率。于是有学者将与泥岩欠压实无关的而与油气生成有关的非欠压实型超压称为沉积压实后的超压(Slavin and Smirnova, 1998);美国Anadarko盆地古生界异常高压的成因被认为是天然气生成和气—水两相界面毛细管力的有效封闭,并称为静态的超压(Lee and Deming, 2002)。Hermanrud *et al.* (1998)试图解释为什么与油气生成有关的超压带中泥页岩仍具有高声波时差和低电阻率。他们指出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,并解释了压实地层超压带出现高声波时差(低纵波速度)和低电阻率响应的原因:(1)超压带中泥岩的高声波时差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;(2)超压带中泥岩的低电阻率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而致使电阻率降低。

值得注意的是,研究区深部侏罗系超压带的高声波时差不仅仅是泥页岩具有的特征,砂岩也是如此,只不过砂岩的异常幅度相对较小,但是也不尽然,如图 7, D3 井超压带砂岩和泥岩的高声波时差幅度相当. 为进一步解释本区非欠压实超压带的高声波时差原因,该研究利用砂岩岩心样品开展了孔隙流体压力与纵波速度关系的物理模拟实验,仪器为成都理工大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室的“MTS 岩石物理参数综合测试系统”,砂岩样品为中砂岩取自 ZHU1 井 4 380. 55~4 382. 50 m, 三工河组(J_{1s})岩心总孔隙度 19. 08%、有效孔隙度 14. 75%, 样品饱含水, 水的矿化度按地层水的矿化度配备, 样品规格为 25 mm(直径)×50 mm(高度), 实验模拟时温度为 20 ℃. 分别开展了 4 组不同围压条件下孔隙流体压力与纵波速度关系的物理模拟实验, 结果见图 8. 图 8 显示, 不同围压条件下的起始纵波速度随围压的增加而增加, 不同围压条件下纵波速度均随孔隙流体压力的增加而减小, 随有效应力的减小而降低. 该物理模拟实验说明, 岩石中的高孔隙流体压力可直接导致通过岩石的声波速度降低. 物理模拟实验还说明, 流体超压可导致岩石骨架颗粒间有效应力的减小, 从而引起通过岩石的声波速度降低. 所以, 盆地深部侏罗系与油气共生有关的超压带的高声波时差即低声速异常可能主要是孔隙流体超压导致颗粒间有效应力减小直接引起的; 进一步讲, 该深部超压带与低速带为因果关系, 与压实不平衡引起的孔隙度异常无关. 当然, 影响纵波速度变化的因素是复杂的, 比如孔隙流体性质的变化, 如含气可能造成声波速度有所降低, 不同孔隙度条件

下同样的超压强度引起的声波速度响应可能有区别, 纵波速度有随温度升高而降低的趋势, 但是这些都不能影响上述物理模拟实验给出的超压与低速关系趋势的定性分析和认识, 这是利用地震速度预测超压的基础和前提条件.

为什么非欠压实型超压带的视电阻率相对于同样深度正常趋势表现为低异常呢? 含油气盆地中非欠压实型超压带的这种低电阻率现象可能广泛存在, 例如在北海盆地的侏罗系 (Teige *et al.*, 1999) 和澳大利亚西北陆架 Carnarvon 盆地的侏罗系 (He and Middleton, 2002) 等超压带都存在这种现象. 但到目前为止, 还没有给出令人满意的解释和实验证据. 一般地讲, 影响地层电阻率的主要因素是孔隙度和地层水的矿化度, 但是孔隙度的影响可能超过矿化度的影响, 因而地层电阻率随埋深及孔隙度和地层水的减少而增加 (Magara, 1978). 在本区深部超压带尤其是泥岩的孔隙度变化不大, 地层水的矿化度不高 (<50 g/L) (图 3), 由于大量的生烃作用, 地层孔隙系统中的烃类饱和度将增加, 从而应该使地层的电阻率进一步增大, 但是恰恰相反, 其电阻率反而偏离正常趋势而明显偏小. 这里提出一个可能值得注意和开展研究的问题, 即近临界水的一种特性似乎可使该现象得到较好的解释. 近临界水的这种特性就是它的离解度很大, 所电离出来的 H^+ 和 OH^- 离子浓度很大 (Marshall and Frank, 1981; Chandler *et al.*, 1997; Krammer and Vogel, 2000), 因而可增加地层水的电导率即降低电阻率; 另外, 近临界水具有非常好的溶解有机物的性能, 但降温降压便可与水分离 (陈晋阳等, 2006). 所谓近临界水

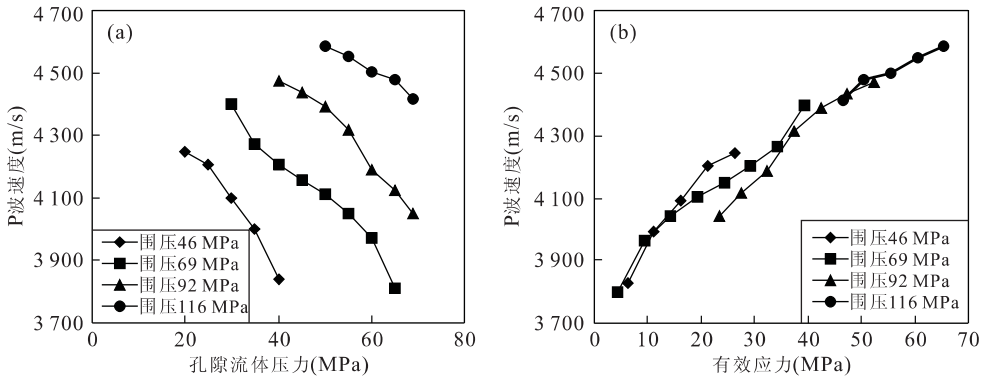


图 8 不同围压条件下饱含水砂岩样品(中砂岩,总孔隙度 19. 08%、有效孔隙度 14. 75%)的纵波速度与孔隙流体压力和有效应力关系的物理模拟实验(实验温度 20 ℃)结果

Fig. 8 Profiles of relationships between P-wave velocity and pore fluid pressure/effective stress using water saturated sandstone samples (middle sandstone, with a total porosity of 19. 08% and effective porosity of 14. 75%) within different conditions of surrounding pressures with the temperature of 20 ℃ from the results of physical simulation experiments

(near-critical water)通常是指在一定压力条件下, 200~350 °C 之间的压缩液态水(Kuhlmann, 1994; 吕秀阳等, 2003, 2004). 与烃类生成有关的深部超压带的地下温度一般在 100~200 °C, 尽管地下深部超压带的温度相对仍然较低, 一般其顶界埋深约 3 000 m, 地温约 100 °C (地温梯度约 3.0 °C/100 m), 本区其顶界埋深约 4 400~6 000 m, 地温约 104~140 °C (地温梯度约 2.2 °C/100 m), 但该带孔隙流体压力一般在大于 30~120 MPa. 研究表明增加压力也能进一步增加水的电离常数, 即电离常数随压力的增加而增大, 因为增加压力可以增加水的密度, 也就是对水的离解度来讲, 温度和压力的作用可以互补(吕秀阳等, 2003, 2004). 所以, 在埋深大于 3 000 m (100 °C) 的超压带, 孔隙水的状态可能为地层温度条件下的高压液态水. 在地下油气生成的温压条件下, 近临界水的这种特性是否可能就是非欠压实型深部超压带能够出现低电阻率现象的真正原因呢? 值得深入探讨. 结合油气地质条件开展近临界水与油气地质有关的理论和实验研究, 对于酪根生烃过程中氢的来源问题, 催化作用以及油气初次运移等相关的诸多问题的研究可能将具有十分重要的意义.

5 结论

准噶尔盆地腹部地区实测砂岩异常高压揭示深度一般在 4 480~6 160 m, 砂岩段实测超压值主要在侏罗系, 少数属白垩系底部与侏罗系邻近地层, 1 个超压实测值在下三叠统, 剩余压力约为 11~57 MPa, 压力系数为 1.24~2.07; 实测超压砂岩样品以粉—细砂岩为主, 孔隙度范围为 3.20%~16.00%, 渗透率范围为 $0.02 \times 10^{-3} \sim 14.40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 物性多为低—特低孔渗.

在深部流体超压带钻井泥浆密度明显增加, 相对于正常时差和电阻率趋势, 埋深在 4 430~6 650 m 的侏罗系超压带中的泥页岩和砂岩共同具有异常高声波时差和低视电阻率响应特征; 钻井泥浆和测井响应揭示的侏罗系大套超压层段的 R_0 分布在 0.7%~1.3%; 超压带的顶界深度可能不浅于 4 400 m, 地温约 104 °C, 钻井揭示的超压顶界最大埋深约达 6 000 m, 地温约 140 °C, 超压带顶界深度随侏罗系埋深的增加而增大; 腹部地区钻遇和测井解释的超压带主要分布在作为成熟烃源岩层系的侏

罗系以及邻近侏罗系的白垩系底部地层, 所以超压带的分布深度与侏罗系埋深相关且变化具有大体一致性.

腹部地区侏罗系泥页岩已被充分压实, 深部大套超压成因与泥页岩欠压实和构造应力挤压无明确关系, 而主要与油气共生有因果关系, 这与侏罗系含煤烃源岩有机质热成熟生烃特征有成因联系, 这也可从超压砂岩层为油气层或含油层和泥浆中的气侵显示等得到佐证.

物理模拟实验说明, 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, 而与孔隙度无关, 其原因是高孔隙流体压力可导致岩石骨架颗粒间有效应力的减小, 从而直接引起通过岩石的声波速度减小, 即出现高声波时差响应; 已知近临界水的性质可能说明, 在超压地层的温度条件下, 高压液态水的电离常数可能明显增加, 所电离出来的 H^+ 和 OH^- 离子浓度很大, 因而可能明显增加地层水的导电能力, 使其电阻率减小, 这个现象的进一步研究可望对与欠压实无关的深部超压带低电阻率异常的原因给出新的解释, 对油气地质的相关研究也有重要意义.

References

- Asquith, G., Gibson, C., 1997. Basic well log analysis for geologists (third printing). AAPG, Tulsa, 41—44.
- Chandler, K., Deng, F. H., Dillow-Angela, K., et al., 1997. Alkylation reactions in near-critical water in the absence of acid catalysts. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36(12): 5175—5179.
- Chen, F. J., Wang, X. W., Wang, X. W., 2005. Prototype and tectonic evolution of the Junggar basin, northwestern China. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 77—89 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. Y., Zhang, H., Zheng, H. F., et al., 2006. In situ visualization of pyrolysis of organic matter in high-temperature and high-pressure water—Taking kerogen and asphalt as an example. *Petroleum Geology & Experiment*, 28(1): 73—77 (in Chinese with English abstract).
- Chilingar, G. V., Serebryakov, V. A., Robertson, J. O., 2002. Origin and prediction of abnormal formation pressures. Elsevier Scientific Publishing Company, 123—150.
- Eaton, B. A., 1972. Graphical method predicts geopressure worldwide. *World Oil*, 6: 51—56.
- Eaton, B. A., 1976. Graphical method predicts geopressures worldwide. *World Oil*, 183(1): 100—104.

- Fertl, W. H. , 1976. Abnormal formation pressures. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Fillippone, W. R. , 1979. On the prediction of abnormally pressured sedimentary rocks from seismic data. *OTC*, 3662:2667—2676.
- Fillippone, W. R. , 1982. Estimation of formation parameters and the prediction of overpressure from seismic data. Presented at the research symposium on geopressures studies, SEG Meeting, Dallas, TX, Paper R1. 4, Oct. , 17—21.
- He, S. , Middleton, M. , 2002. Pressure seal and deep overpressure modelling in the Barrow sub-basin, Northern Carnarvon basin of the North West Shelf, Australia. In: Keep, M. , Moss, S. J. , eds. , The sedimentary basins of western Australia, 3:531—549.
- Hermanrud, C. , Wensaas, L. , Teige, G. M. G. , et al. , 1998. Shale porosities from well logs on Haltenbanken (Offshore Mid-Norway) show no influence of overpressuring. In: Law, B. E. , Ulmishek, G. F. , Slavin, V. I. , eds. , Abnormal pressures in hydrocarbon environments. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 70:65—85.
- Hunt, J. M. , 1990. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments. *AAPG Bulletin*, 74(1):1—12.
- Hunt, J. M. , Whelan, J. K. , Eglinton, L. B. , et al. , 1998. Relation of shale porosities, gas generation, and compaction to deep overpressures in the U. S. Gulf Coast. In: Law, B. E. , Ulmishek, G. F. , Slavin, V. I. , eds. , Abnormal pressures in hydrocarbon environments. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 70:87—104.
- Jin, A. M. , Cao, F. F. , Lou, Z. H. , et al. , 2006. Distribution and origin of the super pressure in the Mahu-Penyijingxi multi-source petroleum systems, Junggar basin. *Journal of Zhejiang University (Sciences Edition)*, 33(4):469—474 (in Chinese with English abstract).
- Krammer, P. , Vogel, H. , 2000. Hydrolysis of esters in subcritical and supercritical water. *J. Supercritical Fluids*, 16(3):189—206.
- Kuhlmann, B. , Arnett, E. M. , Siskin, M. , 2002. Classical organic reactions in pure superheated water. *J. Org. Chem.*, 59(11):3098—3101.
- Lee, Y. M. , Deming, D. , 2002. Overpressures in the Anadarko basin, southwestern Oklahoma: Static or dynamic? *AAPG Bulletin*, 86(1):145—160.
- Li, M. H. , Li, Z. , Liao, J. D. , 2005. Analysis of ground stress in the southern part of Junggar basin and discussions of the related issues. *Xinjiang Geology*, 23(4):343—346 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. Q. , Chen, G. S. , Guo, J. Y. , et al. , 2001. Basic geologic characters of the abnormal formation overpressure in the western part of southern fringe of Junggar basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 23(1):47—51 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. G. , 1998. Over pressure origin and hydrocarbon pool forming mode of Maqiao uplift in Junggar basin. *Petroleum Exploration and Development*, 25(1):21—26 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. F. , Xie, X. N. , Zhang, C. , 2008. Characteristics and generation of the reservoir overpressure in Bozhong Depression, Bohai Bay basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(3):337—341.
- Luo, X. R. , Xiao, L. X. , Li, X. Y. , et al. , 2004. Overpressure distribution and affecting factors in southern margin of Junggar basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(4):404—412 (in Chinese with English abstract).
- Luo, X. R. , Wang, Z. M. , Zhang, L. Q. , et al. , 2007. Overpressure generation and evolution in a compressional tectonic setting, the southern margin of Junggar basin, northwestern China. *AAPG Bulletin*, 91(8):1123—1139.
- Lü, X. Y. , He, L. , Zheng, Z. S. , et al. , 2003. Green chemical processes in near critical water. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 22(5):477—481 (in Chinese with English abstract).
- Lü, X. Y. , Zheng, Z. S. , He, L. , et al. , 2004. An apparatus for determination of mutual solubilities in near-critical water. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 18(5):537—541 (in Chinese with English abstract).
- Magara, K. , 1968. Compaction and migration of fluids in Miocene mudstone, Nagaoka plain, Japan. *AAPG Bulletin*, 52(12):2466—2501.
- Magara, K. , 1978. Compaction and fluid migration-practical petroleum geology. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Marshall, W. L. , Frank, E. U. , 1981. Ion product of water substance, 0—1 000 °C, 1—10 000 bars, new international formulation and its background. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, (10):295—304.
- Martinsen, R. S. , 1994. Summary of published literature on anomalous pressures: Implications for the study of pressure compartments. In: Ortoleva, P. J. , ed. , Basin compartments and seals. *American Association of Petroleum*

- um *Geologists Memoir*, 61: 27—38.
- Qu, J. X., Zha, M., 2003. Origin and characteristics of abnormal pressure in the Junggar basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 25(4): 333—336 (in Chinese with English abstract).
- Slavin, V. I., Smirnova, E. M., 1998. Abnormally high formation pressure: Origin, prediction, hydrocarbon field development, and ecological problems. In: Law, B. E., Ulmishek, G. F., Slavin, V. I., eds., Abnormal pressures in hydrocarbon environments. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 70: 105—114.
- Swarbrick, R. E., Osborne, M. J., 1998. Mechanisms that generate abnormal pressures: An overview. In: Law, B. E., Ulmishek, G. F., Slavin, V. I., eds., Abnormal pressures in hydrocarbon environments. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 70: 13—34.
- Teige, G. M. G., Hermanrud, C., Wensaas, L., et al., 1999. The lack of relationship between overpressure and porosity in North Sea and Haltenbanken shales. *Marine and Petroleum Geology*, 16(4): 321—335.
- Wang, Z. L., Sun, M. L., Geng, P., et al., 2003. The development features and formation mechanisms of abnormal high formation pressure in southern Junggar region. *Petroleum Exploration and Development*, 30(1): 32—34 (in Chinese with English abstract).
- Wu, K. Y., Zha, M., Zhong, J. H., 2006. Distribution and evolution of overpressure systems in the Junggar basin. *Chinese Journal of Geology*, 41(4): 636—647 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Q. F., 1986. Structural evolution and prospects of Junggar basin. *Xinjiang Geology*, 4(3): 1—19 (in Chinese with English abstract).
- Wu, X. Z., Li, C., 1994. Abnormal pressure and hydrocarbon accumulation in Mosuowan area of hinterland of Junggar basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 15(3): 208—213 (in Chinese with English abstract).
- Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., Gardner, G. H. F., 1958. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media. *Geophysics*, 23(3): 459—493.
- Yang, Z., He, S., He, Z. L., et al., 2008. Study on overpressure stratum distribution and its relationship with petroleum accumulation in central part of Junggar basin. *Acta Petroleum Sinica*, 29(2): 199—205, 212 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., He, S., Wu, H. Z., et al., 2006. Geophysical response relationship study on characteristics and mechanisms of overpressure in southern Junggar basin. *West China Petroleum Geosciences*, 2(3): 286—288, 293 (in Chinese with English abstract).
- Yardley, G. S., Swarbrick, R. E., 2000. Lateral transfer: A source of additional overpressure? *Marine and Petroleum Geology*, 17(4): 523—537.
- Zeng, G. C., Wang, F. Z., Zheng, J. P., et al., 2002. Study of pyroxene in Junggar basin basement volcanic rock and its indicator to basin basement characteristics. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(1): 13—18 (in Chinese with English abstract).
- Zha, M., Zhang, W. H., Qu, J. X., 2000. The character and origin of overpressure and its explorational significance in Junggar basin. *Petroleum Exploration and Development*, 27(2): 31—35 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. H., Zha, M., Qu, J. X., 2004. Overpressure and mechanisms of hydrocarbon accumulation in Tertiary of southern Junggar basin. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 28(1): 10—12 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. G., 2003. The abnormal pressure researches in central depression of Junggar basin. *Journal of Xinjiang Petroleum Institute*, 15(4): 26—29 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. P., 2003. Overpressure and its relation to petroleum accumulation in southern edge of Junggar basin. *Oil & Gas Geology*, 24(4): 327—331 (in Chinese with English abstract).
- Zou, H. Y., Hao, F., Zhang, B. Q., et al., 2006. Petrologic feature and sealing mechanism for the pressure seal in the center of Junggar basin. *Acta Petrologica Sinica*, 22(8): 2213—2219 (in Chinese with English abstract).
- Zuo, L. P., Li, T., Tian, S. M., 1999. Superrficial views on the ancient basement problem in Zhunger basin. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 38(3): 112—117 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈发景, 汪新文, 汪新伟, 2005. 准噶尔盆地的原型和构造演化. 地学前缘, 12(3): 77—89.
- 陈晋阳, 张红, 郑海飞, 等, 2006. 高温高压下水中有机质降解过程的原位观测——以干酪根和沥青质为例. 石油实验地质, 28(1): 73—77.
- 金爱民, 曹飞凤, 楼章华, 等, 2006. 准噶尔盆地玛湖——P1井西复合含油气系统地层高压分布与成因. 浙江大学学报(理学版), 33(4): 469—474.
- 李民河, 李震, 廖健德, 2005. 准噶尔盆地南缘地应力分析及相关问题探讨. 新疆地质, 23(4): 343—346.

- 李忠权,陈更生,郭冀义,等,2001. 准噶尔盆地南缘西部地层异常高压基本地质特征. 石油实验地质,23(1):47—51.
- 刘得光,1998. 准噶尔盆地马桥凸起异常高压成因及油气成藏模式. 石油勘探与开发,25(1):21—26.
- 刘晓峰,解习农,张成,2008. 渤海湾盆地渤中坳陷储层超压特征与成因机制. 地球科学——中国地质大学学报,33(3):337—341.
- 罗晓容,肖立新,李学义,等,2004. 准噶尔盆地南缘中段异常压力分布及影响因素. 地球科学——中国地质大学学报,29(4):404—412.
- 吕秀阳,何龙,郑赞胜,等,2003. 近临界水中的绿色化工过程. 化工进展,22(5):477—481.
- 吕秀阳,郑赞胜,何龙,等,2004. 近临界水中溶解度测定装置的研制. 高校化学工程学报,18(5):537—541.
- 曲江秀,查明,2003. 准噶尔盆地异常压力类型及成因探讨. 石油实验地质,25(4):333—336.
- 王震亮,孙明亮,耿鹏,等,2003. 淮南地区异常地层压力发育特征及形成机理. 石油勘探与开发,30(1):32—34.
- 吴孔友,查明,钟建华,2006. 准噶尔盆地超压系统分布及其演化. 地质科学,41(4):636—647.
- 吴庆福,1986. 准噶尔盆地构造演化与找油领域. 新疆地质,4(3):1—19.
- 吴晓智,李策,1994. 准噶尔盆地莫索湾地区异常地层压力与油气聚集. 新疆石油地质,15(3):208—213.
- 杨智,何生,何治亮,等,2008. 准噶尔盆地腹部超压层分布与油气成藏. 石油学报,29(2):199—205,212.
- 杨智,何生,武恒志,等,2006. 准噶尔盆地南缘超压地球物理特征与成因响应关系研究. 中国西部油气地质,2(3):286—288,293.
- 曾广策,王方正,郑建平,等,2002. 准噶尔盆地基底火山岩中的辉石及其对盆地基底性质的示踪. 地球科学——中国地质大学学报,27(1):13—18.
- 查明,张卫海,曲江秀,2000. 准噶尔盆地异常高压特征、成因及勘探意义. 石油勘探与开发,27(2):31—35.
- 张卫海,查明,曲江秀,2004. 准噶尔盆地南缘古近系—新近系异常高压系统与油气成藏机理. 石油大学学报(自然科学版),28(1):10—12.
- 张勇刚,2003. 准噶尔盆地中央坳陷异常压力研究. 新疆石油学院学报,15(4):26—29.
- 赵桂萍,2003. 准噶尔盆地南缘异常高压及其与油气成藏的关系. 石油与天然气地质,24(4):327—331.
- 邹华耀,郝芳,张伯桥,等,2006. 准噶尔盆地中部超压封闭层的岩石学特征与封闭机理. 岩石学报,22(8):2213—2219.
- 左龙凭,李铁,田素敏,1999. 对准噶尔盆地古老基底问题的一些浅见. 石油物探,38(3):112—117.