

文章编号: 0253-9985(2007)03-0390-05

利用核磁共振资料改善低孔低渗油藏 饱和度模型的精度

黄毅¹, 赵军¹, 程鹏飞¹, 赵维新²

(1. 西南石油大学 石油工程学院, 四川 成都 610500 2. 中国石化 中原油田分公司 地质科学研究院, 河南 濮阳 457500)

摘要: 用核磁共振测井来评价孔隙结构较传统的压汞毛管压力法具有独特的优势。在低孔、低渗油藏中, 孔隙结构的变化对饱和度指数 n 具有较大的影响。大孔占优时, n 值越小; 小孔占优时, n 值越大。利用核磁共振横向弛豫时间 T_2 的几何平均值与胶结指数 m 和饱和度指数 n 之间良好的相关性求取 m , n 值, 消除了因孔隙结构改变而造成的取值误差, 从而在建立饱和度模型后, 能求取到精确的含油饱和度 S_0 。通过对 TZ111 井的处理, 计算得出的孔隙度消除了扩径的影响, 含油饱和度更加接近试油结论, 提高了饱和度模型的精度, 在现场工作中得到了良好的验证。

关键词: T_2 几何平均值; 胶结指数; 饱和度指数; 孔隙结构; 核磁共振; 含油饱和度

中图分类号: TE122.2 **文献标识码:** A

Enhancing accuracy of saturation model of low-porosity and low-permeability reservoirs by using nuclear magnetic resonance logging data

Huang Yi¹, Zhao Jun¹, Cheng Pengfei¹, Zhao Weixin²

(1 School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500)

2 Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang, Henan 457500)

Abstract Nuclear magnetic resonance logging has an edge on the evaluation of porosity structures over the traditional mercury-injection capillary pressure method. For oil reservoirs with low-porosity and low-permeability, the variations in pore structures have a significant impact upon the saturation index ' n ', i.e., when big pores dominate, the ' n ' is small and when small pores dominate, the ' n ' is big. The good correlativity between ' T_2 ', the geometric mean of lateral relaxation time of nuclear magnetic resonance, ' m ', the cementation index, and ' n ', the saturation index, can be used to determine the values of ' m ' and ' n '. The errors of value assignment caused by changes of pore structures are eliminated, thus a more accurate value for ' S_0 ' (oil saturation) can be obtained from saturation model. The processing of the data in Well TZ111 yields a porosity free of influence of pore enlargement and a saturation closer to the testing results, greatly improving the accuracy of the saturation model.

Key words geometric mean of T_2 ; cementation index; saturation index; pore structure; nuclear magnetic resonance; oil saturation

核磁共振 (NMR) 测井是在 20 世纪 90 年代成熟并广泛用于地层评价的一种新方法。它是通过对地层孔隙流体中氢核 NMR 信号的观测, 获得用于地层评价的孔隙度、渗透率、孔径大小分布、流

体性质及含量等信息^[1,2]。低孔、低渗储集层成因机理复杂, 储集层性质是沉积、成岩、构造和流体改造作用的综合效应^[3,4]。由于受岩性、物性及孔隙结构多种因素的影响, 低孔、低渗储集层往往表

收稿日期: 2007-01-31

第一作者简介: 黄毅 (1982-), 男, 硕士研究生, 地球物理及测井

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目 (2004BA616A02-02-03-01)

现出非常复杂的电阻率变化规律, 给测井油气评价工作带来许多困难。岩石孔隙结构的差别是导致低孔、低渗储集层油气层电阻率测井响应复杂多变的主要原因之一, 所以研究微观孔隙结构和电阻率关系是求准饱和度的关键点之一^[5]。

1 方法原理

1.1 由核磁共振实验数据分析孔隙结构对饱和度指数 n 值的影响

传统研究孔隙结构的方法主要是实验室的常规压汞毛细管压力法。目前毛管压力曲线的测定仅限于实验室岩心分析, 常规方法有压汞法、隔板法等, 这些方法都具有一定的局限性。NMR 岩心分析及 NMR 测井正在发展成为一种非常重要的地球物理观测手段^[6]。由 NMR 横向

弛豫时间 T_2 的分布评价岩石孔隙结构是 NMR 技术独特的优势之一, 并一直是应用研究的热点。与传统的毛管压力测量相比, NMR 测量具有快速、经济、无损害、大规模等特点, 并且可以在井筒中获得连续的地层信息。因此, 由 T_2 分布评价岩石孔隙结构具有广阔的应用前景, 为研究低孔、低渗储层孔隙结构影响电阻率性质提供了理论基础^[7~9]。下面从核磁实验数据与电阻率实验数据分析着手, 研究微观孔隙结构和电阻率的关系。

图 1 为 TZ58 井 3 块样品岩-电实验与 NMR 实验数据分析得到的关系。从图 1a 中可以看出, 对于孔隙度相等的 3 块样品, 其 T_2 谱分布不同, 说明其孔隙结构也不同。12 号样品为大孔隙部分占优, 16 号样品为小孔隙部分占优, 1 号样品居二者之间。从图 1b 中恰恰可以看出这 3 种孔隙结构对岩-电参数的影响。小孔隙部分占优的 16 号

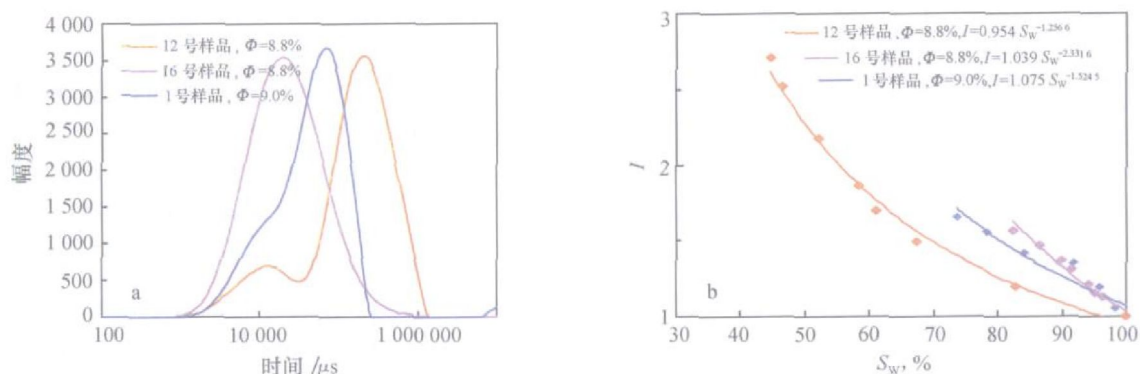


图 1 岩-电实验关系图

Fig. 1 Experimental litho-electric relationship

a. 储层样品的 NMR T_2 谱分布; b. 储层样品的 $I-S_w$ 实验关系

Φ . 孔隙度; I . 电阻率增大指数; S_w . 含水饱和度

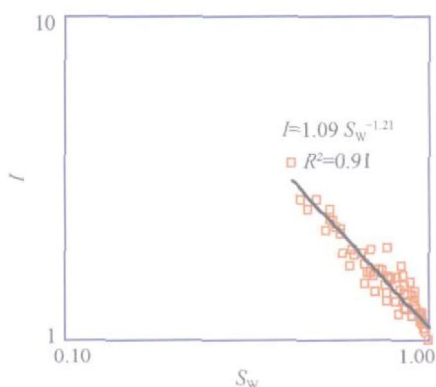


图 2 样品大、小孔隙不分开 $I-S_w$ 关系

Fig. 2 $I-S_w$ curve of total pores in samples

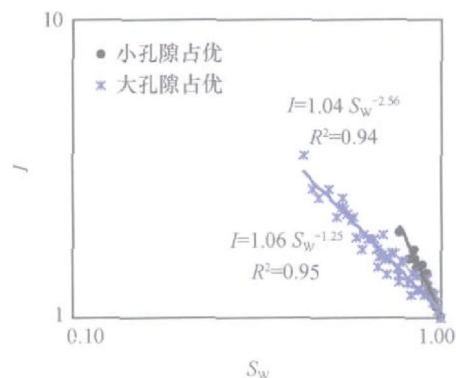
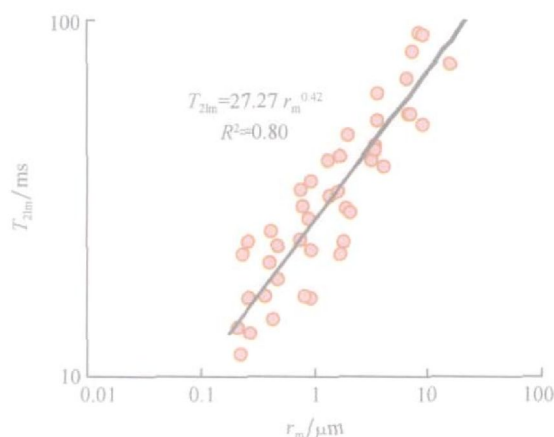


图 3 样品大、小孔隙占优分开的 $I-S_w$ 关系

Fig. 3 $I-S_w$ curve of large and small pores in samples

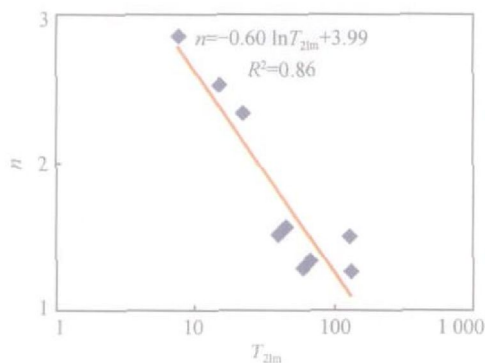
图 4 T_{2lm} - r_m 关系图Fig. 4 Relationship between T_{2lm} and r_m

样品 n 值最大, 为 2.331 6 大孔隙部分占优的 12 号样品 n 值最小, 为 1.256 6 孔隙分布居二者之间的 1 号样品其 n 值也居二者之间, 为 1.524 2。这说明, 孔隙结构对 n 值也有影响。当大孔隙占优时, n 值越小; 当小孔隙占优时, n 值也就越大。

图 2 为这 11 块样品的电阻率增大指数 I 与含水饱和度 S_w 之间的关系, 图中数据点有些发散。图 3 是图 2 中数据按大孔隙占优和小孔隙占优分开表示的 I 与 S_w 之间的关系。从图中可以看出, 当大孔隙占优和小孔隙占优分开表示时, 二者之间相关性明显变好, 数据点集中。当大孔隙占优时, n 值为 1.25 当小孔隙占优时, n 值也就越大, 为 2.56。这进一步说明 n 值与孔隙结构有关。因此, 对于大孔隙占优和小孔隙占优的不同情况, 应当分开建模。

1.2 核磁共振横向弛豫时间 T_2 几何平均值与胶结指数 m 和饱和度指数 n 值的关系

由以上分析可知, n 值是与孔隙结构有关的参

图 5 $n-T_{2lm}$ 关系图Fig. 5 Relationship between n and T_{2lm}

数, 也就是与 T_2 谱的分布位置有关; 而 T_2 几何平均值 T_{2lm} 反映了这一信息。 T_{2lm} 与平均毛管半径 r_m 之间有很好的相关性 (图 4), 因而反映了孔隙结构信息。由此, 得到 n 值与 T_{2lm} 之间很好的相关关系 (图 5):

$$n = -0.60 \ln T_{2lm} + 3.99 \quad R^2 = 0.86 \quad (1)$$

而 m 值是众所周知的与孔隙结构有关的参数, m 值与 T_{2lm} 之间也有很好的相关关系 (图 6):

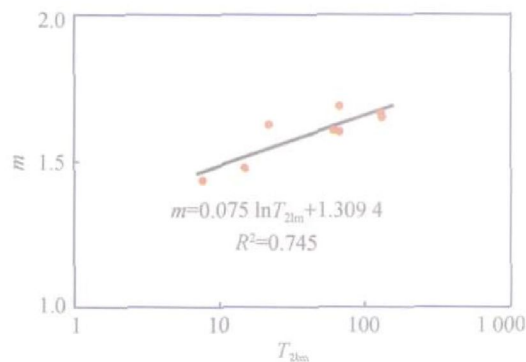
$$m = 0.075 \ln T_{2lm} + 1.3094 \quad R^2 = 0.745 \quad (2)$$

式中: n 为饱和度指数, 与油、气、水在孔隙中的分布状况有关, 其值在 1.0~4.3 之间, 常取 2.0 m 为胶结指数, 与岩石胶结情况和孔隙结构有关, 其值一般为 1.5~3.0 常取 2.0 T_{2lm} 为 T_2 的几何平均值, m , n 值是与孔隙结构有关的参数, 与反映孔隙结构信息的 T_2 几何平均值 T_{2lm} 之间有很好的相关性。

2 应用实例

阿尔奇公式作为计算含油饱和度的经典公式一直在测井解释中发挥着重要作用^[10-11]。本文应用 m , n 参数与 T_2 几何平均值 T_{2lm} 的关系评价饱和度。利用 T_{2lm} 与 m , n 参数之间的关系, 可以用变 m , n 法计算出与孔隙结构相关的含油饱和度。用此方法对 TZ111 井进行了处理 (图 7)。

图 7 为 TZ111 井的处理成果图。由于此井扩径严重, 图中第五道绿线为现场早期孔隙度模型计算的孔隙度 POR_{old} , 红线为我们校正后的孔隙度模型计算的孔隙度 POR_{new} , 对孔隙度进行校正后的扩径处的孔隙度不再受扩径影响。图中最后一道为计算的含水饱和度, 绿线 $S_{w, old}$ 为现场早

图 6 $m-T_{2lm}$ 关系图Fig. 6 Relationship between m and T_{2lm}

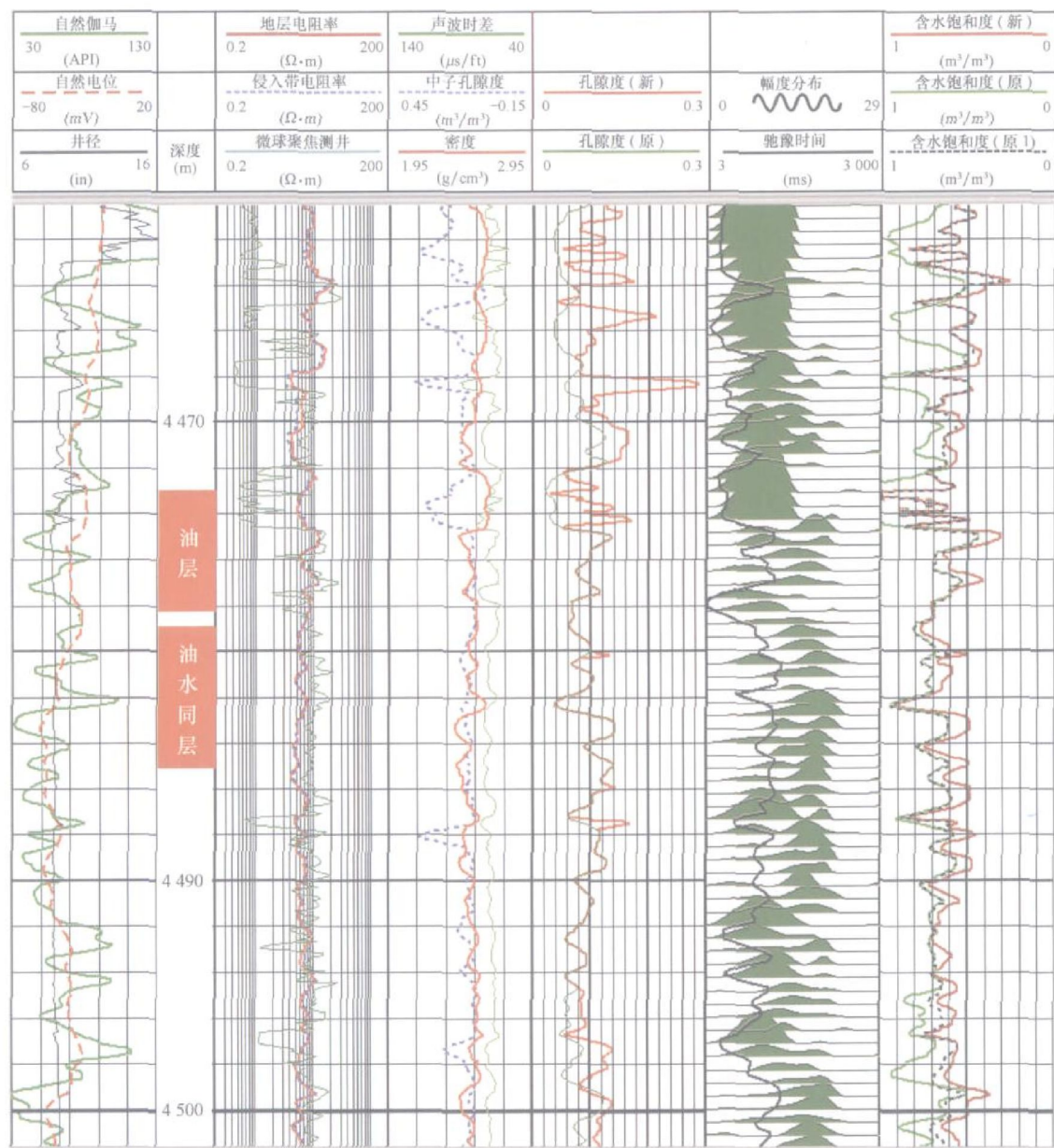


图 7 TZ111井测井解释处理成果

Fig. 7 Interpretation of logging data from Well TZ111

期老的饱和度模型计算的含水饱和度, 红线 $S_{w, new}$ 为新方法计算的含水饱和度 (另外由于此井扩径严重, 黑线 $S_{w, old}$ 为老的饱和度模型用校正后的孔隙度计算的含水饱和度)。

在 4 473~ 4 478 m 深度段内, 现场早期的饱和度和模型计算的含水饱和度 $S_{w, old}$ 在 55% 左右, 而用新方法计算的含水饱和度 $S_{w, new}$ 在 60% ~ 70%, 试油结论为低产油层。在 4 482~ 4 488 m 深度段内, 现场早期的饱和度方法计算的含水饱和度 $S_{w, old}$ 在 40% 左右, 而用新方法计算的含水饱和度 $S_{w, new}$ 在 50%, 试油结论为油、水同层。由此

可以看出, 新方法对饱和度的计算有改进。

3 结论

据核磁共振实验数据分析, 孔隙结构对 n 值有较大的影响。当大孔隙占优时, n 值越小; 小孔隙占优时, n 值也就越大。这说明 n 值是与孔隙结构有关的参数, 也就是与 T_2 谱的分布位置有关。而 T_2 几何平均值 T_{2m} 与毛管半径有很好的相关性, 说明 T_{2m} 反映了孔隙结构信息。由实验数据分析可知, n 值与 T_2 几何平均值 T_{2m} 之间

有很好的关系。利用反映孔隙结构信息的 T_2 几何平均值 $T_{2\text{ln}}$ 与 m , n 参数之间的关系, 得到与孔隙结构相关的饱和度模型。但是采用这种方法要考虑到每个地区的实际情况。对于不同的地区, T_2 几何平均值 $T_{2\text{ln}}$ 与 m , n 参数之间的关系不同。

参 考 文 献

- 1 肖立志, 柴细元, 孙宝喜, 等. 核磁共振测井资料解释与应用导论 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 36~41
- 2 肖立志. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1998. 67~72
- 3 谢然红, 肖立志, 邓克俊. 核磁共振测井孔隙度观测模式与处理方法 [J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1567~1572
- 4 李江龙, 黄孝特, 张丽萍. 塔河油田 4 区奥陶系缝洞型油藏特

- 征及开发对策 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 630~633
- 5 李海燕, 彭仕宓. 应用遗传神经网络研究低渗透储层成岩储集相 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 111~116
- 6 何雨丹, 毛志强, 肖立志, 等. 利用核磁共振 T_2 分布构造毛管压力曲线新方法 [J]. 吉林大学学报, 2005, 35(2): 177~181
- 7 运华云, 赵文杰, 周灿灿, 等. 利用 T_2 分布进行岩石孔隙结构研究 [J]. 测井技术, 2002, 26(1): 18~21
- 8 刘贵宴, 王绍民, 傅容珊, 等. 核磁共振谱的岩石孔喉结构分析 [J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(3): 328~333
- 9 吴海燕, 朱留方. 成像、核磁共振测井在埕北裂缝性储层评价中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 45~48
- 10 李秋实, 周荣安, 张金功, 等. 阿尔奇公式与储层结构的关系 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 364~367
- 11 翁爱华, 李舟波, 王雪秋, 等. 油水双相饱和孔隙模型核磁特性理论研究 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(4): 553~560

(编辑 李 军)

(上接第 354 页)

参 考 文 献

- 1 Dahlstrom C D A. Structural geology in the eastern margin of the Canada Rocky mountain [J]. Bull of Canadian Petroleum Geology, 1970, 18: 332~406
- 2 Wilkerson M S D differential transport and continuity of thrust sheets [J]. Journal of Structural Geology, 1992, 14(6): 712~725
- 3 陈发景, 贾庆素, 张洪年. 传递带及其在砂体发育中的作用 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 144~148
- 4 Morley C K, Nelson R A, Patton T L. Transfer zone in the East African Rift system and the their relevance to hydrocarbon exploration in rifts [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 1234~1253
- 5 Flauds J E, Varga R J. The role of accommodation zones and transfer zones in the regional segmentation of extended terranes [A]. In Flauds J E, Stewart J H, eds. Accommodation zones and transfer zones the regional segmentation of the basin and range province [C]. Boulder: Colorado Geological Society of America Special Paper 323, 1998. 1~45
- 6 刘剑平, 汪新伟, 汪新文. 临清拗陷变换构造研究 [J]. 地质科技情报, 2004, 23(4): 51~54
- 7 张光亚, 陈发景, 汪新文. 塔北地区变形样式及其分布规律 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1994, 19(6): 755~758
- 8 李玉喜, 庞雄奇, 汤良杰, 等. 柴西地区近南北向构造系统及其控油作用分析 [J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 65~68
- 9 郭光辉, 郑多明. 塔里木北部地区北北西向构造变换带特征及对石油勘探的启示 [J]. 地质科学, 2004, 39(4): 551~560

- 10 吴奇之, 王同和, 李明杰, 等. 中国油气盆地构造演化与油气聚集 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 219~226
- 11 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 等. 天山两侧前陆冲断系构造模式与前陆盆地演化 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1994, 19(6): 727~740
- 12 邓起东, 冯岳岳, 张培震, 等. 乌鲁木齐山前拗陷逆断裂—褶皱带及其形成机制 [J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 191~200
- 13 赵桂萍. 准噶尔盆地南缘异常高压及其与油气成藏的关系 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 327~331
- 14 孙自明, 何治亮, 牟泽辉. 准噶尔盆地南缘构造特征及有利勘探方向 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 216~221
- 15 郭召杰, 方世虎, 张锐, 等. 生长地层及其在判断天山北缘前陆冲断褶皱带形成时间上的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(4): 475~481
- 16 陈发景, 汪新文, 汪新伟. 准噶尔盆地的原型和构造演化 [J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 77~89
- 17 汪新伟, 汪新文, 刘剑平, 等. 准噶尔盆地南缘褶皱—逆冲断层带分析 [J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 411~421
- 18 吴孔友, 查明, 曲江秀, 等. 博格达山隆升对北三台地区构造形成与演化的控制作用 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2004, 28(2): 1~5
- 19 吴建华, 向书政, 吴晓智, 等. 准噶尔盆地南缘东部构造样式与形成机制 [J]. 新疆石油地质, 2002, 23(3): 208~210
- 20 李涛, 王宗秀, 周高志, 等. 新疆博格达山分段及深浅构造转换关系 [J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 103~114

(编辑 高 岩)

的终止与重新发育等现象,从而形成相应的横向构造变换带;而主干断层在倾向上沿多层次滑脱层的变化及其所形成的前断坡,可能是导致冲断-褶皱带在纵向上具分带性的重要原因(图 6)。

5.4 沉积相和岩性差异

沉积相和岩性差异不仅影响着逆冲断层带的形成,而且控制着逆冲断层带的分段。在一个挤压收缩的构造环境中,相邻地层的相变区往往是横向变换带容易形成的场所,它引起了不同层位上滑脱面的变形,产生侧断坡、横向断层以及位移转换带等一系列横向变换构造,从而截切逆冲断层前断坡沿走向的延伸,造成了逆冲断层带沿走向和倾向上的分段、分带现象,如研究区的二级横向构造变换带(图 1)。

5.5 挤压力的作用方式

主要表现在方向上的差异,即当同一地质体在受到不同方向上但具同时性的应力场作用时,在一些构造薄弱带,就会产生应力集中,表现出应力的合力作用,具体到逆冲断层带中就会产生与区域缩短方向呈高角度相交的横向构造,构成横向变换构造带。如研究区的东、西两侧古隆起边缘的深大断裂型变换构造带,其走向与近东西向的区域变形构造线高角度相交(图 1)。

当然,应把涉及到岩石变形行为的各种因素综合起来,这样才能真实有效地从岩石力学的角度来解释研究区褶皱-逆冲断层带产生分带、分段、分层构造的原因。

6 油气勘探意义

研究区内构造变换的纵向分带、横向分段作用,控制了褶皱-冲断带不同区带、区段的变形样式,从而控制了油气勘探的有利构造分布。从横向构造变换带的分段作用上看,主要有: 1) 在研究区西部四棵树地区,受车排子东缘-巴音沟东一级横向构造变换带的影响,逆冲推覆带推覆距离大、基底卷入带窄小,致使逆冲推覆带几乎盖在基底卷入带之上。因此,逆冲推覆带的下盘构造因保存条件好,是一个较有前景的勘探领域(图 2

④)。2) 在中部玛纳斯地区,沉积层厚、烃源岩优越,而变形时期形成的构造变换带因地势低即为

后期沉积时砂体的注入带,如能有储集性能好的辫状河三角洲前缘砂体与构造圈闭相匹配,则可有效地降低勘探风险。3) 在东部博格达山-柴窝堡地区,北东向的横向构造变换带是受早二叠世裂谷系控制、经印支期挤压而发生正反转的构造带,属印支期古隆起,是二叠系烃源岩排烃时油气运移的指向区,因此,受后期构造运动影响较小、保存条件较好的圈闭如哈拉房子背斜、七道湾背斜等,是有利的勘探方向。

从纵向变换带的分带性上看,基底卷入型褶皱-冲断带与盖层滑脱型褶皱-冲断带的浅层构造,因背斜形成的主控断层断开盖层、出露地表,油气多已散失,至多形成残留型油气藏;而盖层滑脱带的深层构造因埋藏较深、保存条件好,是油气勘探的最有利目标。

7 结论

1) 根据横向构造变换带对区域构造分段作用的规模,可将研究区的横向构造变换带划分出为 3 个级别,其中,一级构造变换带的分段作用使相邻区块的构造-沉积演化、褶皱-冲断带的变形方式和变形程度、构造线展布等方面均存在着较大差别;二级构造变换带则在相邻变形区块构造格局大体一致的情况下使其构造样式与变形强度有所不同,其影响范围受一级变换区带的制约;三级构造变换带调节了局部构造变形差异,影响范围仅局限于本二级变换带所限定的区块内。

2) 研究区内的纵向变换带主要以主逆冲断层和背斜系斜列分布、逆冲位移纵向斜列传递为特征。

3) 研究区横向变换带的类型有隆起基底边缘型、横向走滑断层型、斜向走滑-逆冲断层型及掀断层与侧断坡等;纵向变换带的类型主要有褶皱型与走向斜坡。

4) 构造变换带的形成主要与基底构造、先存构造、滑脱断层在走向和倾向上沿多层次滑脱的转变、沉积相和岩性差异以及挤压力的作用方式等有关。

5) 构造变换带的纵向分带、横向分段作用,控制了褶皱-冲断带不同区带、区段的变形样式,从而控制了油气勘探的有利构造分布。

(下转第 394 页)