

文章编号: 0253-9985(2007)03-0324-05

柴达木盆地油泉子储油构造分析

莫午零, 郑亚东, 张文涛, 关平

(北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 通过对野外露头、地震反射剖面 and 钻井资料的综合分析, 查明柴达木盆地油泉子储油构造为共轭膝褶带夹持的不对称半箱状背斜, 具有北北东倾的平直转折端, 北翼为一宽超过 800 m 的大型膝褶带, 高角度倾向南南西, 带内岩层产状直立。带内岩层的旋转指示南侧沿膝褶带向北逆向剪切。南翼发育四条规模较小的膝褶带, 向南逆冲剪切, 导致该翼呈阶梯状产出, 总体南南西倾, 倾角约 20°。沿南北两翼膝褶带边界仅见小型高角逆断层, 膝褶带内裂隙发育, 主要为顺层张裂隙, 其次为与层理近垂直的张裂隙 (主要出现在坚硬的钙质粉砂岩中), 偶尔见有小型低角逆冲断层。这些断裂普遍被纤维状石膏充填, 并见少量油迹, 表明这些断裂为高流体压力下的产物。鉴于膝褶带及相关背斜高点为裂隙发育带, 具有油气运移和聚集的双重功能, 在缺乏足够理想的岩性储集层的情况下, 为寻找裂隙型油气藏提供了新途径。

关键词: 半箱状褶皱; 膝褶带; 裂隙型油藏; 油泉子构造; 柴达木盆地

中图分类号: TE112.3 **文献标识码:** A

Analysis of the Youquanzi oil-bearing structure in Qaidam basin

Mo Wuling Zheng Yadong Zhang Wentao Guan Ping

(School of Earth and Space Sciences Peking University, Beijing 100871)

Abstract On the basis of comprehensive analysis data on outcrop seismic reflection profiles and drilling the Youquanzi oil-bearing structure is confirmed to be an asymmetric half-box anticline retained by conjugate kink zones with a straight hinge dipping towards NNE. The northern limb is a large scale kink zone of over 800 m wide and dips towards SSW at a high angle with sub-vertical inner-bed in it. The rotation of the inner-beds indicates that the southern side shears reversely towards the north. Four small-scale kink zones are developed on the southern limb and shear reversely southward carving the limb into the step occurrence dipping SSW at 20° as a whole. Along the boundaries of the kink zones on both limbs there are merely a few small-scale high-angle reverse faults. Fractures, mainly bedding-separation fractures followed by separation fractures sub-normal to the bedding (mostly occurring in competent calcareous siltstones) and occasionally small-scale low-angle thrusts, are developed in the kink zones. These fractures are commonly filled with fiber gypsum and show locally some oil traces, indicating that these fractures are the products of high-pressure fluid. Seeing that the kink zones and relevant anticlinal highs are fractured and favorable for both oil-gas migration and accumulation, they can be a new way for finding fissure-type reservoirs with the absence of enough ideal lithologic-reservoirs.

Key words half-box fold; kink zone; fissure-type reservoir; Youquanzi structure; Qaidam basin

收稿日期: 2006-08-22

第一作者简介: 莫午零 (1978-), 男, 博士研究生, 岩石学、矿物学、矿床学与石油地质

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40573007)

1 地质概况

柴达木盆地位于青藏高原东北部, 其形成与演化与喜马拉雅运动密切相关。柴达木盆地西部几乎完全是一个新生代含油气盆地, 第三系油气分布主要集中在茫崖凹陷地区, 是柴达木盆地主要的油气富集区, 一直是勘探的重点^[1~3]。经过 50 年来的勘探, 目前发现了近十个油气田。柴达木盆地西部地区界于北侧阿尔金山和南侧昆仑山之间, 盆地构造的发育演化受南侧昆仑山逆冲推覆作用和北侧阿尔金山走滑作用的共同影响, 构造线以 WNW 向为主, 圈闭的背斜构造发育, 有利于油气的储集。从地层发育、接触关系、已知的产油层位和可能的生油层分析 (图 1), 该区有足够的生油层和理想的盖层, 然而却缺乏足够理想的储集层。区内第三系 ($N_2^2-E_3^2$) 砂岩储层多数为泥质粉砂岩, 少量为粉砂岩、钙质粉砂岩及少许细砂岩、鲕粒砂岩等。单层厚度在 0.5~2.0 m 者较多, 极少量达 3.0~4.0 m, 纵向分布较散, 夹于泥岩之中, 岩性较杂, 杂基填隙物较多, 孔隙类型主

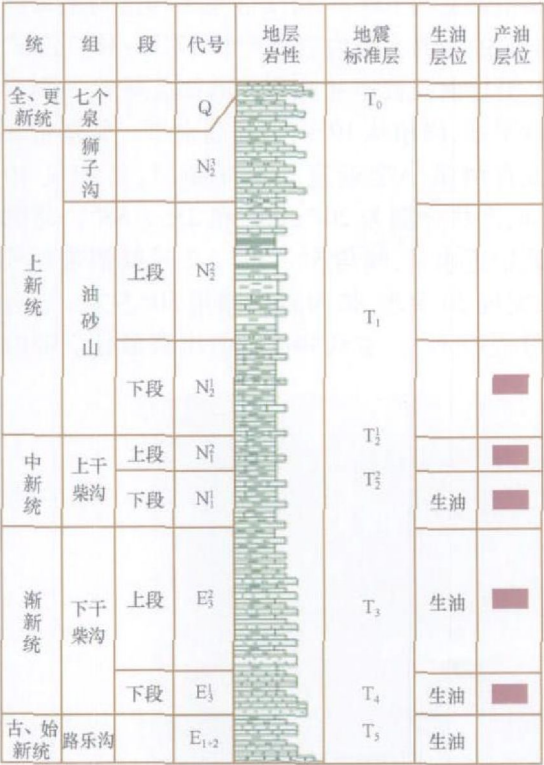


图 1 柴达木盆地柴西地区地层和产油层位

Fig. 1 Strata and oil layers in the western Qaidam basin

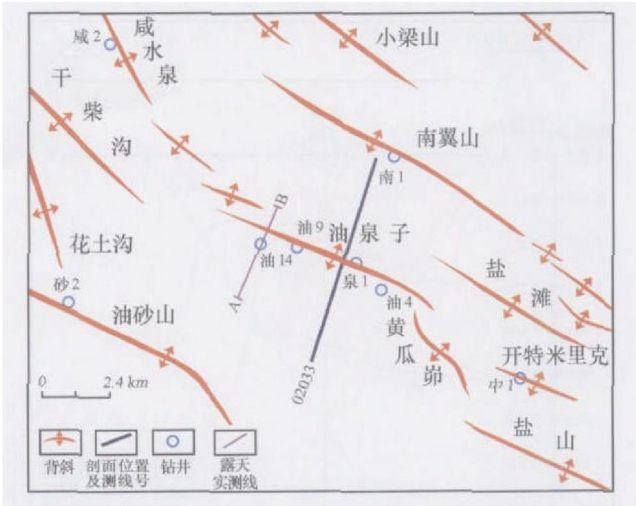


图 2 油泉子构造位置

Fig. 2 Location of the Youquanzi anticline

要为次生溶蚀孔隙及裂缝, 孔隙度平均为 4.47%, 多数属于致密储层。碳酸盐岩储层包括泥(质)灰岩和泥晶灰岩, 平均孔隙度为 7.03%, 多数也为致密储层。这很可能是迄今查明勘探储量与推测的油气远景资源量相距甚远的症结所在。寻找裂隙型油藏, 查明裂隙分布的规律是实现该区油气勘探突破的关键。为此, 以具代表性的油泉子构造作为切入点, 在地面构造详细研究的基础上, 结合地震反射剖面 and 钻井资料进行综合分析, 以期查明构造的形成机制和油气储集的有利部位。

油泉子构造位于柴达木盆地西部坳陷区茫崖凹陷亚区。西北与咸水泉、干柴沟等构造相邻; 北、西南分别与南翼山构造、油砂山构造以宽平的向斜相连; 东部与东南部为雁行状排列的盐滩、开特米里克和盐山构造 (图 2)。油泉子构造地面出露的地层由轴部向外围分别为下油砂山组 (N_2^1)、上油砂山组 (N_2^2) 和狮子沟组 (N_2^3)。背斜构造总体轴向 290° 。沿过油 14 井的地面实测剖面表明, 该构造为一不对称箱状背斜, 北翼为一大型膝褶带, 宽 800 m 以上。南翼发育 4 条规模较小的膝褶带, 构成阶梯状的南翼。南北两翼之间为宽约 1 km 的平整背斜转折端 (图 3)。沿剖面岩层产状的赤平投影构成三个明显的极密区, 表明背斜转折端岩层产状平缓北北东倾, 倾角 10° 左右, 北翼膝褶带岩层产状直立或倒转, 南翼膝褶带岩层产状南南西陡倾。油 4、油 9 井和油 14 井在同一背斜高点连线上。油 4、油 9 井和油 14 井的岩心倾角

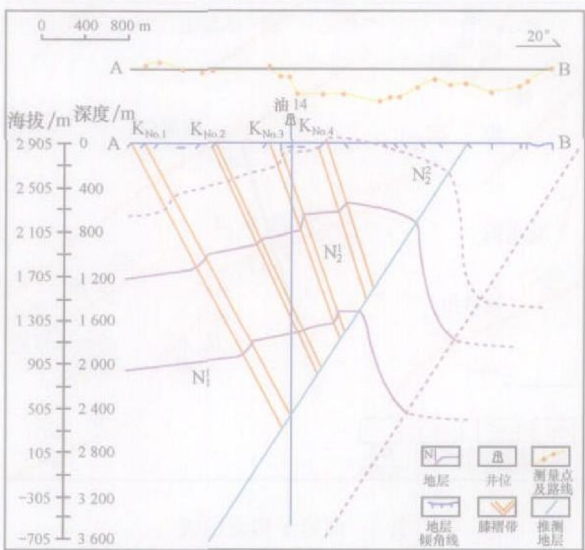


图 3 油泉子构造剖面

Fig. 3 Profile of the Youquanzi anticline

表明,油 4 井在 2 297~2 303 m 层段岩心倾角为 63°~90°,在 2 501~2 526 m 层段岩心倾角为 30°~53°。油 9 井在 2 568~2 666 m 层段岩心倾角为 55°~90°,油 14 井在 2 465~3 383 m 层段岩心倾角为 30°~90°,由此可以得知,油泉子背斜深部确实存在岩层陡立的膝褶带。

显然,膝褶带为油泉子构造的重要组成要素,有必要对其几何学、运动学特征及形成机制进行深入的分析。

2 油泉子膝褶带几何与运动学特征

油泉子北翼膝褶带总体走向 290°±10°,南南西倾,倾角约 50°。北缘被沙漠覆盖,可实测宽度为

800 m。通过油泉子构造的地震剖面表明,接近南翼山构造的岩层近水平,这说明北翼膝褶带与南翼山构造之间岩层产状存在着急剧转折,该膝褶带实际宽度应超过 800 m(图 4)。带内岩层产状一般直立,局部倒转(213°∠74°)。其南带外的岩层产状平缓北倾,倾角为 20°左右。这一带内外岩层产状的变化表明,带内岩层南部向北发生近 90°的旋转,指示膝褶带外两侧经历了逆冲方式的剪切作用,岩层间发育顺层充填的石膏脉,厚度可达 1.8 cm。石膏一般呈纤维状,与脉壁高角度相交。局部晶洞形成长 5 cm 的燕尾双晶,表明所充填的空间为张裂隙。沿走向向东的膝褶带,岩层走向 20°,倾角 60°。除发育 1.0~1.5 cm 厚的顺层石膏脉外,还发育一组向北缓倾的斜切层理的石膏脉,脉厚 4~9 cm,其中见有褐色油迹(图 5)。两组脉的石膏均为纤维状,并都与脉壁高角度相交,表明膝褶带形成时的体积增大和高水压力。根据石膏纤维与脉壁的角度关系,带内岩层上层相对下层向南逆冲,形成与这一剪切相关的向北缓倾的张裂隙。

南翼的膝褶带自南向北依次编号为 1~4。1 号膝褶带宽约 100 m,构成油泉子构造与英雄岭平底向斜的边界。带内岩层产状 177°~184°∠37°~55°,沿层面发育逆冲擦痕。南部英雄岭一侧岩层产状平缓,倾角从 19°向南渐趋水平。膝褶带北边界发育两条小型近直立逆冲断层,延伸仅 20~30 m,产状分别为 20°∠88°和 25°∠88°。北侧带外岩层近水平,倾角 5°~12°。2 号膝褶带规模最小,宽仅 20 余米,带内岩层倾角 50°左右。3 号膝褶带规模不大(宽约 30 m),但出露最佳。带内岩

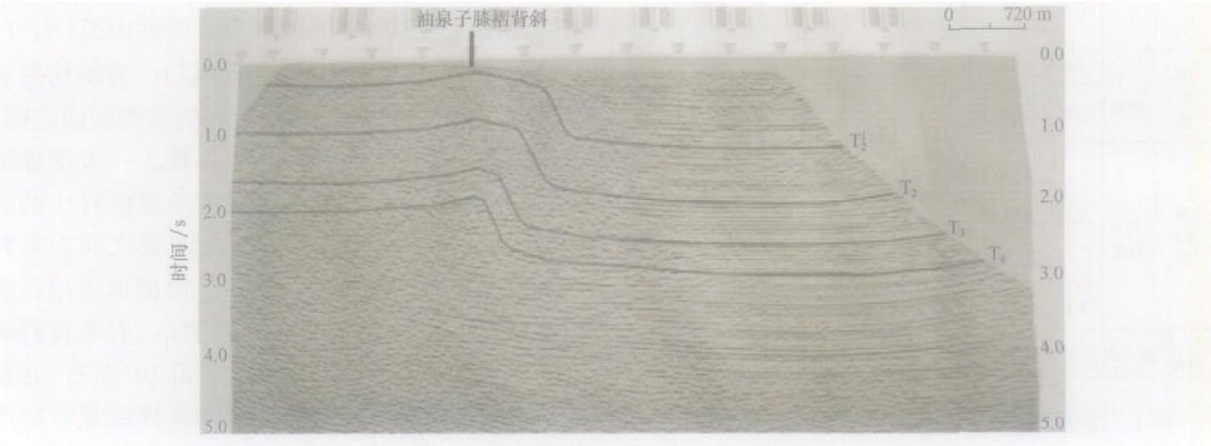


图 4 油泉子地震 02033 线构造解释剖面

Fig. 4 Interpretation profile of seismic line 02033 across the Youquanzi anticline



图 5 北翼膝褶带中的顺层与雁行状切层纤维石膏脉, 指示带内北侧向南顺层逆冲剪切

Fig. 5 Interlayer and echelon fiber gypsum veins in the northern kink zone, showing southward bed-parallel reverse shear in the northern part of the kink zone

层倾角 $49^{\circ} \sim 78^{\circ}$, 南北侧带外岩层倾角分别为 15° 和 5° 。膝褶带北边界发育 7 条以上小型沿倾向下侧斜列逆冲断层, 产状 $30^{\circ} \angle 72^{\circ}$ 。断层面发育逆冲擦痕。带内泥岩普遍发生层间剥离, 顺层充填宽 2~3 mm 的石膏脉。带内一小型向北缓倾逆冲断层, 斜向切割层理, 产状 $20^{\circ} \angle 36^{\circ}$, 断层面发育逆冲擦痕。沿断层充填 3 mm 的纤维状石膏脉, 纤维与断层面高角度相交。较坚硬的钙质粉砂岩除层间剥离外, 发育与层理近垂直的张裂隙, 其中充填纤维状石膏。膝褶带内外岩层产状的变化表明膝褶带是高角度向南逆冲剪切作用的产物, 带内发育的断裂系统则是相关剪切作用的产物。石膏脉的发育表明膝褶带形成时, 带内体积增大并处于高水压力环境。4 号膝褶带为油泉子构造南翼最大的膝褶带, 宽约 200 m。因油泉子背斜的向北倒向而构成该背斜的高点, 现有勘探钻井大多沿此高点一线附近进行。带内岩层产状 $209^{\circ} \angle 49^{\circ}$, 层间滑动和剥离现象显著, 顺层纤维状石膏脉发育。脉厚 3~5 mm, 间隔 5~6 cm。带外南北两侧岩层近水平, 微向北倾 ($20^{\circ} \angle 8^{\circ}$)。

南北两侧的膝褶带所指示的逆冲剪切方式相反, 构成共轭膝褶带, 其间的共轭夹角, 根据最大有效力矩准则, 对称共轭膝褶带间的理论共轭夹角为 $110^{\circ} \pm 20^{\circ}$ 。Ramsey 与 Huber (1987)^[4]给出的野外常见观测值为 120° 。实验获得的夹角为 $110^{\circ} \sim 120^{\circ}$ ^[5]。由于露头条件的限制, 大型膝褶带难以实测 α 值。根据附近南翼山、尖顶山等地震反射剖面, α 为 $63^{\circ} \sim 68^{\circ}$ 左右, 与油泉子构造出露良好的 2 号膝褶带实测的 70° 大致相同 (图 9)。

由此推算的实际共轭夹角为 $130^{\circ} \pm 10^{\circ}$, 比理论值略大。很可能是弯滑褶皱作用的参与, 膝褶带平整长翼中出现一些层间滑动, 共轭角有所增大。

3 膝褶带与油气聚集

可以看出, 油泉子构造中的膝褶带具有一般膝褶带的几何和运动学特征, 带内裂隙发育, 主要是顺层张裂隙, 其次为切层的张裂隙。这些裂隙一般充填纤维状石膏脉。纤维与脉壁近垂直, 其中见有无数的气液包裹体垂直纤维延伸方向平行排列。根据形成机制, Ramsey 将纤维脉称之为破裂-愈合脉^[6], 即纤维脉是在水压力的周期性波动下, 脉壁周期性打开和流体的流入, 矿物沉淀愈合裂隙而形成的。根据加拿大魁北克区含金高角逆冲剪切带与相关近水平纤维脉的研究, Sibson 等 (1988) 提出断层阀 (fault valve) 模式^[7]来解释高角逆断层带中的流体脉冲式流动行为, 即断层的活动伴生的断裂和地震导致扩容, 扩容引起流体压力下降, 周边的高压流体在泵吸作用下进入断裂带。进入断裂的流体因压力的骤然下降, 矿物质溶解度降低而开始沉淀, 并最终逐渐愈合了断裂, 导致水压力的逐渐回升。当水压力升至临界值便产生水压致裂和断层的重新活动。过程如此不断的反复, 形成破裂-愈合脉与断层、地震的交替周期性活动。断层阀模式合理地说明了断层活动、地震事件, 流体压力和矿物沉淀之间的密切关系及其周期性的活动规律。膝褶带虽与断层带不同, 但所引起的扩容和伴生的断裂同样会导致流体压力的骤然下降和吸入带外的流体。由于膝褶带的边界保持岩层的连续性, 未见大型贯穿性断层, 因而, 比断层带更有利于流体的运移与聚集。地面出露的膝褶带中见有残余的油迹, 钻井表明油 4、油 9 和油 14 井的岩层陡立带中存在油气显示。油 14 井有 31 层油气显示, 665~1 722 m 以油迹为主, 少量油斑, 见油浸; 1 722~2 540 m 含油级别为油斑; 2 540~3 500 m 以油迹为主, 少量荧光。油 4 井岩心中有以下深度含油: 298.00~305.36 m、630.25~640.31 m、1 215.99~1 225.97 m、1 703.02~1 707.65 m; 在井深 141~2 433 m, 砂样中均含油。油 9 井在井深 1 700~2 706 m 有 5 层泥浆气浸严重, 在 2 642.16~2 651.42 m 取心段岩心裂缝含油。这表明沿膝褶

带确实存在油气运移和聚集的过程。

油泉子地区的共轭膝褶带, 两组并非同等发育, 北翼仅有一条膝褶带, 然而规模巨大, 南翼发育 4 条, 规模却不大。表明缩短作用或主压应力的作用方向并非与层理完全一致, 其间存在小于 10° 左右的夹角, 导致该区上层相对下层的向北剪切和共轭膝褶带所夹持的半箱状背斜微向北倒。共轭膝褶带交汇处可能存在一拆离层。半箱状背斜北倒, 导致南翼 4 号膝褶带构成背斜的高点。相关膝褶带形成过程中, 不断抽吸带外两侧储层和烃源岩中的油气, 并将油气输送到高点岩性储层圈闭之中。因此, 油泉子构造高点, 不仅有利于形成一般与背斜高点有关的岩性油气藏, 而且有利于膝褶带裂隙油气藏的形成, 具有双重有利的构造部位^[8], 为油气勘探开发提供了最有利地带。

4 结论

柴达木盆地油泉子储油构造为共轭膝褶带夹持的不对称半箱状背斜。具有北北东倾的平直转折端, 北翼为宽超过 800 m 的大型膝褶带, 高角度倾向南南西, 带内岩层产状直立。带内岩层的旋转指示南侧沿膝褶带向北逆向剪切。南翼发育四条规模较小的膝褶带, 向南逆冲剪切, 导致该翼呈阶梯状产出, 总体南南西倾, 倾角约 20° 。沿南北两翼膝褶带边界仅见小型高角逆断层, 膝褶带内裂隙发育, 主要为顺层张裂隙, 其次为与层理近垂直的张裂隙 (主要出现在坚硬的钙质粉砂岩中), 偶尔见有小型低角逆冲断层。这些断裂普遍被纤

维状石膏充填, 并见少量油迹, 表明这些断裂为高流体压力下的产物。鉴于膝褶带为裂隙发育带, 具有油气运移和聚集的双重功能, 在缺乏足够理想的岩性储集层的情况下, 为寻找裂隙型油气藏提供了新途径。

致谢: 本研究是在青海油田公司勘探开发研究院提供的资助下完成的, 衷心感谢所提供使用地质、地震、钻探资料和先期研究成果的方便。完成过程中得到该院领导和有关人员的热情支持和鼓励, 在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- 1 李鹤永, 刘震, 党玉琪, 等. 柴西地区地温-地压系统特征及其与油气分布的关系 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 37~43
- 2 方向, 江波, 张永庶. 柴达木盆地西部地区断裂构造与油气聚集 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 56~61
- 3 张明利, 金之钧, 万天丰, 等. 柴达木盆地应力场特征与油气运聚关系 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 674~679
- 4 郑亚东, 莫午零, 张文涛, 等. 柴达木盆地油气勘探新思路 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 34(1): 13~18
- 5 Ramsay J G, Huber M I The techniques of modern structural geology (Vol 2): folds and fractures [M]. London: Academic Press, 1987. 392
- 6 Ramsay J G. Crack-seal mechanism of rock deformation [J]. Nature, 1980, 284: 135~137
- 7 Sibson R H, Robert F, Poulsen K H. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling and mesothermal gold-quartz deposits [J]. Geology, 1988, 16(6): 551~555
- 8 丁道桂, 翟常博, 吕俊祥, 等. 鄂西-渝东区膝折构造 [J]. 石油实验地质, 2005, 27(3): 205~210

(编辑 武新民)

(上接第 319 页)

- 8 张玲, 史建忠, 游秀玲. 缝洞型潜山油藏储量计算方法研究 [J]. 石油大学学报, 2005, 29(6): 17~21
- 9 阎相宾. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(3): 262~266
- 10 刘学利, 焦方正, 翟晓先, 等. 塔河油田奥陶系缝洞型油藏储量计算方法 [J]. 特种油气藏, 2005, 12(6): 26~28
- 11 陈君莉, 赵峰, 谭承军. 塔河油田碳酸盐岩油藏动用储量及采收率标定方法探讨 [J]. 新疆石油学院学报 [J], 2004, 16(1): 63~66
- 12 郎兆新. 油藏工程基础 [M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1991. 51~65
- 13 金之钧, 蔡立国. 中国海相油气勘探前景、主要问题与对策 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 722~730
- 14 翟晓先. 塔河大油田新领域的勘探实践 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 751~761
- 15 韩革华, 漆立新, 李宗杰, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层预测技术 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 860~870

(编辑 高 岩)

4) 缝洞单元动用储量

根据单井动用储量计算公式计算出每口井的动用地质储量, 进而累加获得缝洞单元内的动用地质储量。

3 实例应用

塔河油田投入开发最早的缝洞单元为 S48 缝洞单元, 属于裂缝溶洞型储层^[13~15], 弹性驱动特征明显 (图 2)。含油面积 26.95 km^2 , 地质储量 $3.750 \times 10^4 \text{ t}$; 储量丰度 $124 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 。流体性质均一, 地面原油密度为 $0.94 \sim 0.96 \text{ g/cm}^3$, 地面原油粘度在 $500 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。该单元内有 57 口井, 累计生产原油 $400 \times 10^4 \text{ t}$ 。

利用建立的动用储量计算方法对 S48 缝洞单元动用储量进行计算, 不同油井钻遇的储层厚度、孔隙度、饱和度等参数以测井解释成果参数为基础, 充分考虑放空漏失井段对储层参数的影响。有效孔隙度与对应的有效厚度进行加权平均, 进而得到单井各类储层平均有效孔隙度。孔洞部分的含油饱和度与对应的有效孔隙体积进行加权平均, 得到单井孔洞部分的平均含油饱和度; 裂缝部分的含油饱和度根据国内外经验取值为 90%。利用每口井的生产动态数据进行递减分析, 获得每口井控制的可采储量 (表 1)。

利用公式 (15) 分别计算每口井的动用储量 (表 1)。通过计算 S48 缝洞单元的动用地质储量为 $3.679 \times 10^4 \text{ t}$ 。此方法计算的储量强调溶洞和裂缝内易动用的地质储量, 而忽略了基质内连通性较差的难动用储量, 因而提供的储量数值可能偏小, 但此储量数值对开发更有意义。由表 1 中计算获得的单井控制的动用储量表明, 不同油井动用的地质储量规模差异很大, 动用储量最大的 S48 井达 $641 \times 10^4 \text{ t}$; 而该井的累积产油量已达 $67 \times 10^4 \text{ t}$; 动用储量较小的井储量规模小于 $10 \times 10^4 \text{ t}$ 。在储量计算的过程中, 在其他参数取值一定的情况下, 用单元内某单井可采储量占整个单元可采储量的比例确定井控面积来计算动用储量。而单井动用面积同样差异很大, 体现了油井钻遇储集体的严重差异导致单井开发效果的巨大差异。

为了进一步验证方法的可行性, 利用动态法计算了该单元的动用地质储量, 包括弹性物质平

衡法、采收率类比反推法。

弹性物质平衡法求得动用地质储量为 $3.534 \times 10^4 \text{ t}$ 。根据递减分析预测的可采储量, 类比获得一次采油的采收率为 15.3%, 反推动用地质储量为 $3.876 \times 10^4 \text{ t}$ 。通过动态法计算的动用地质储量对新方法计算的动用储量进行对比表明, 相对物质平衡法的相对误差为 5%, 相对类比采收率外推法的相对误差为 4%, 说明这种方法计算的动用储量是比较可信的。

4 结论

1) 针对缝洞型油藏储集体严重非均质特点, 综合利用开发动静态资料建立了单井动用面积和单井动用储量的计算方法, 为此类油藏储量的动用评价提供了理论依据。

2) 新建立的动用储量计算方法不仅充分应用了单井钻遇缝洞储集体的测井、钻井等静态地质资料, 更进一步充分应用了油井的生产动态资料, 达到了从开发、静态两个角度共同评价油藏开发效果的目的, 评价结论更贴近油藏实际。

3) 利用动态法计算的动用储量规模与新方法计算的结果比较接近, 误差小于 5%, 表明该方法是基本可行的。

4) 该方法主要适用于油藏开发早期处于弹性驱动阶段的储量动用程度的评价, 而对油藏处于活跃底水驱动阶段的动用储量评价有待进一步探讨。

参 考 文 献

- 1 陈元千. 油田可采储量计算方法 [J]. 新疆石油地质, 2000, 21 (2): 130~137
- 2 俞启泰. 油田可采储量计算方法的改进建议 [J]. 河南石油, 2000, 14(1): 18~21
- 3 冉启佑, 胡向阳, 赵庆飞, 等. 新区经济可采储量计算方法 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 83~86
- 4 陈志海, 刘常红, 杨坚, 等. 缝洞性碳酸盐岩油气藏开发对策 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 623~628
- 5 李培廉, 张希明, 陈志海. 塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏开发 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003. 202~259
- 6 张希明, 杨坚, 杨秋来, 等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏描述及储量评估技术 [J]. 石油学报, 2004, 25(1): 13~19
- 7 陈志海, 郎兆新. 缝洞性碳酸盐岩油藏储渗模式及其开采特征 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3): 101~105

(下转第 328 页)