

复杂断裂带富民油田构造描述方法

苏书震 张建宁 (江苏扬州江都真武镇采油一厂地质研究所, 江苏 扬州 225265)

摘要: 针对本区低级序断层发育、火成岩岩墙地震剖面特征不清晰等构造描述难点, 开展了以“断裂模式分析、低级序小断层地震响应正演模拟、火成岩岩墙发育特征及识别方法研究”等为重点的构造描述。研究表明: 地震同相轴微扭、微错、同相轴分叉合并、产状突变等是低级序小断层地震识别的主要标志; 火成岩刺穿地层侵入和顺断裂面侵入是富民北地区岩墙形成的两种方式, 岩墙对油气富集起较好控制作用。研究成果对富民地区滚动勘探开发具有较好指导意义。

关键词: 正演模拟; 低级序断层; 火成岩岩墙; 复杂小断块

1 研究区概况

细化构造再认识, 寻找可接替开发资源对油田稳产具有重要意义。富民油田构造位于苏北盆地高邮凹陷深凹带中东部, 受南北深大断裂活动影响, 富民油田断层发育, 成典型碎、小特征, 加上地震资料品质差 (主频 20Hz), 低级序小断层识别难。另一方面, 工区北部火成岩发育, 火成岩岩墙地震剖面特征不清晰, 岩墙识别难, 岩墙分布特征及对油气富集影响作用认识不清。

2 富民复杂断裂带构造描述

2.1 断裂样式

2.1.1 构造应力分析

区域拉张作用和同沉积作用是断陷盆地形成的两大基本特征, 铲式、铲式扇是拉张应力主要断层特征^[1-2]。从富民地区南部的富 4 断层具有明显铲式形态, 并与下降盘伴生次级断层形成铲式扇组合; 富民地区北西向主要受拉张应力作用。从富民地区东西向发育负花状构造^[3-4], 富 4 断层上盘, 次生断层向上分支并构成向形构造, 主断层及分支断层多具有下滑距, 散开的断层间成“花状”展开; “花状”断层是断层走滑活动^[5-6]的主要特征, 富民地区北东方向主要受张扭走滑应力作用。

2.1.2 断层剖面组合样式

阶梯状、“Y”字、地堑、地垒等断层组合^[7-8]常见于拉张、张扭走滑应力环境, 也是本区断层剖面主要组合样式。

阶梯状断层在断陷盆地的边缘较发育。呈阶梯状排列的各条断层向下延伸可交叉于主断层, 也可以交叉于某一水平滑动面, 后者可被水平滑动面相切。规模较小的阶梯状断层向下延伸不深便自行消失。图 1 中富民南部, 富 4 断层上升盘 F1、F2、F3 共同形成阶梯状组合形态。富民次生断层发育, 不同掉向的次生断层交错相交形成复杂“Y”字型, 图 1 中, 富 4 断层下降盘 F4、F5、F6 与 F7 断层形成同向、反向“Y”字型组合。富民中部地区南掉、北掉断层均有发育, 在地震剖面上形成地堑、地垒式组合形态。图 1 中 F4、F6 形成地堑, F8、F9 形成地垒; F10 与两边的 F11、F12 断层形成垒-堑-垒复合组合。

根据应力分析及断层活动特征, 富民地区断层解释

中, 南北向应用“铲式、铲式扇”断裂样式, 东西向应用“负花状”断裂样式, 以阶梯状、“Y”字、地堑、地垒等断层组合梳理断层空间关系, 较好地指导了本区断层解释。

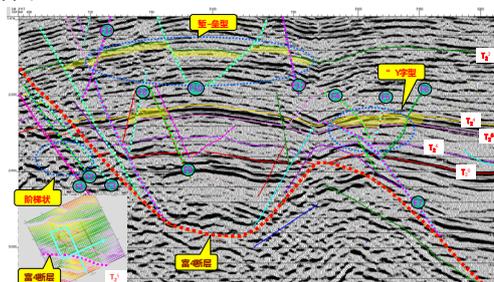


图 1 富民地区随机线地震解释剖面

2.2 低级序小断层识别

针对本区低级序小断层识别难点, 开展了小断层地震响应特征分析及相干体小断层检测。低级序断层对剩余油的富集也起到一定控制作用^[9-13]。沿富民地区近南北向地震剖面分析, 南掉、北掉断层均发育, 剖面呈现堑、垒块组合特征。结合本区地质需求及实际地震资料主频, 设计断距为 20m、10m 的堑、垒块断层组合地质模型; 模型中砂岩地震波的速度为 3000m/s, 泥岩地震波的速度为 2600m/s; 对设计的地质模型, 应用射线追踪正演算法开展小断层地震响应正演模拟^[12-13]。正演结果表明: 当断距 20m 时, 地震波组可见明显错断; 当断距 10m 时, 小断层可见地震同相轴细微扭动或微错地震响应特征。

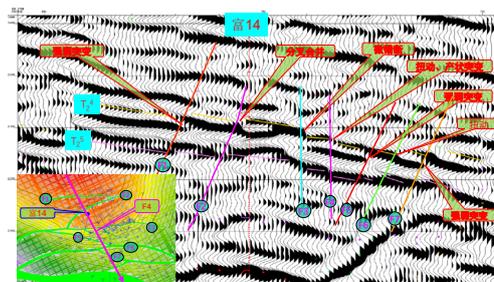
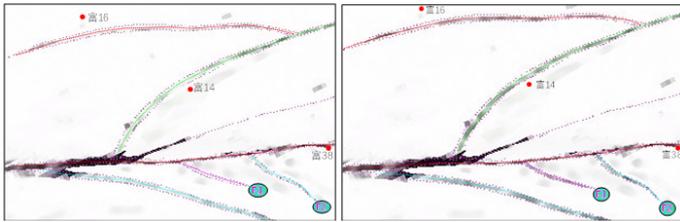


图 2 富民地区小断层地震剖面识别示意图

图 2 为研究区小断层地震识别示意图, 图中 F3 小断层地震剖面上可见同相轴微错断, F4 小断层地震剖面上可见同相轴扭动、产状突变现象, F7 小断层可见地震反射强弱突变现象, 根据地震剖面这些细微变化可指导

小断层地震识别解释，提高断层解释精度。

根据小断层地震响应正演模拟，当断距小于10m时，小断层在地震剖面上只有微弱迹象，构造解释中很容易漏失。为提高微小断层地震分辨能力，相干过程中，综合考虑地层倾角、时窗等参数采用抗大倾角干扰的相干优化处理^[14-15]。图3为普通相干与优化相干地震处理切片图，优化相干切片中小断层F1、F2的清晰度明显改善。图4中F1断层只有微弱波形扭动，F2断层T₂⁴波组可见波形扭动，但T₂⁵波组同相轴连续，剖面解释中F1、F2小断层容易漏失解释；F1、F2断层在优化处理的相干切片中具有较好响应，结合地震剖面中微弱波形变化，识别出F1、F2；这些小断层在油藏开发后期剩余油富集起较重要控制作用。



(a) 普通相干切片 (b) 优化相干切片

图3 富民地区普通相干体与优化相干体切片对比图

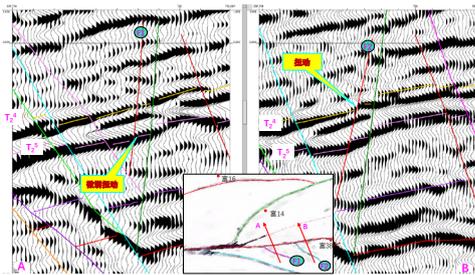


图4 富民地区三维地震测线解释剖面

2.3 断层平面展布特征

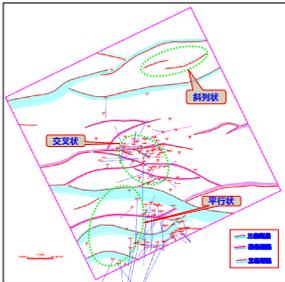


图5 富民地区E₂d₁²顶(T₂⁵反射层)断层平面分布图

图5为富民地区戴南组戴一二亚段(E₂d₁²)顶断层平面分布图，研究区断层发育。按断层活动规模及对构造、沉积等控制作用大小，研究区断层可分为三、四、五等四个级别。三级断层活动强、断距大、延伸远，对构造形成发育起控制作用，平面呈北西、北东向弧弯展布，具有较好规律性；研究区四级断层发育，具有一定分布规律性，主要呈北西展布；五级断层分布规律性差，其形成的应力环境复杂多变，五级断层多为三四级断层次生断层，平面多交于三四级断层；五级断层活动强度弱，断距小、延伸短，不控制油气成藏，但对局部油藏起分割、碎化作用。从图中可见，富民地区断层平

面主要有平行状、交叉状、斜列状三种组合方式。

2.4 岩墙发育特征及地震识别

富民北部地区，富134、富131A等多口井在戴南、三垛组钻遇火成岩。图6为过富131A井的近南北向三维地震剖面，富131A井在戴南组戴二段(E₂d₂)地层内钻遇火成岩，在火成岩附近地震剖面上可见弱反射特征，分析为火成岩刺穿地层形成的岩墙地震响应，该井在戴南组戴一段(E₂d₁)形成油藏，分析可能为火成岩岩墙封挡形成油气聚集。但由于地震剖面上并没有明显岩墙反射，因此岩墙识别也是富民地区研究重要内容之一。

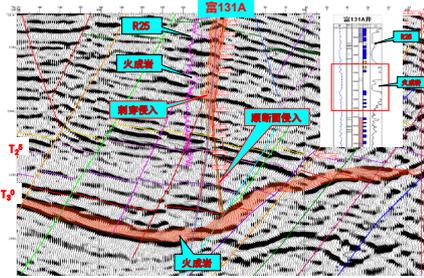


图6 富民地区过富131A井地震解释剖面

富民地区发育火成岩，主要在阜宁组阜四段(E₁f₄)顺层或窜层侵入，并形成早期岩床，岩床在后期构造内力作用下，向上刺穿地层或沿断裂面向上侵入，据图6中分析，富民北部地区岩墙具有刺穿地层侵入和顺断层面侵入两种方式。

瞬时相位能更好地反映地层几何形态的细节，因此可用瞬时相位剖面分析地震反射相位间角度接触关系，辅助岩墙识别^[16]。图7为联合瞬时相位剖面与相干体剖面开展富民地区富18块岩墙地震识别示意图。左图瞬时相位剖面中，岩墙附近可见低角度地层(淡蓝实线)与高角度岩墙(绿色实线)外散面之间存在相位角度交错特征，外散面中间为杂乱相位特征；根据火成岩活动形成的这些相位反射特点，可辅助进行火成岩岩墙的剖面识别、解释。右图中，相干体剖面中岩墙附近可见断续状非相干反射特征，局部可见火成岩外溢处形成的不规则烘烤扩散面；这些不规则烘烤面的存在也是辅助区分岩墙与断层的重要参照。

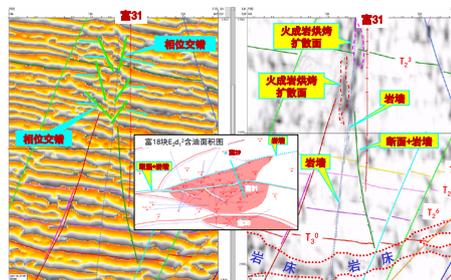


图7 富民地区火成岩岩墙地震剖面识别示意图

3 结论

①通过断裂样式分析、低级序小断层解释、岩墙识别等综合研究，理顺了断层平面组合关系，提高了断层及岩墙描述精度；

②通过以上研究，富18块共发育两条岩墙，加强富民地区火成岩活动规律及岩墙识别方(下转第51页)

Na^+ 的截留率随着运行压力的升高而呈下降趋势, 而 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 及 SO_4^{2-} 的截留率随着 NF 装置运行压力的升高而缓缓上升, 因此采用 NF 装置过循环水时, 在压力允许范围内提升运行压力可提高成垢离子的截留率, 并有助于二价离子的透过, 进而促使循环水达到盐量平衡。通过对表 3、图 3 及图 4 对比分析, 发现在近似相同工况下, 采用 NF 过滤循环水时, 较低离子浓度的离子截留率比较高离子浓度的离子截留率高。

3 结论

①循环水经 NCBR 装置过滤后, 产水浊度 $< 1\text{NTU}$, $\text{SS} < 1\text{mg/L}$, $\text{SDI} < 1$, 满足 NF 装置的进水水质指标, 并且 NCBR 装置操作简单、价格低廉, 反洗水量少, 既可替代多介质过滤器处理循环水, 也可作为 NF 装置前端预处理系统; ②循环水中含有 SiO_2 等固体颗粒物, 因平板陶瓷膜孔道是非对称结构, 该类颗粒物进入膜孔道后, 气擦洗及化学清洗难以将其彻底清除, 所以平板陶瓷膜经过清洗后膜通量不能恢复到初始通量; ③在近似同等工况下, 循环水中成垢离子浓度越低, 纳滤膜对成垢离子的截留率越高; ④当 $T=25^\circ\text{C}$ 、 $\text{pH}=7.5$ 及 $P=0.5\text{MPa}$ 时, 纳滤膜对循环水中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 及 SO_4^{2-} 的截留率高达 85% 以上, 对 Cl^- 及 Na^+ 的透过率高达 65% 以上; 当温度与 pH 一定时, 在允许范围内提升运行压力, 纳滤膜对循环水中成垢离子的截留率及一价离子的

透过率也随之升高; ⑤ NCBR 装置与 NF 装置组合工艺技术在循环水高效过滤及成垢离子截留方面的应用上初步取得成功。

参考文献:

- [1] 仪名山. 循环水系统节能研究 [J]. 山东化工, 2021, 50(10):158-159.
- [2] 张兰云. 循环水节水运行工艺技术应用研究 [J]. 氮肥与合成气, 2021, 49(07):16-19+21.
- [3] 李慧. 甲醇厂循环冷却水系统运行状况分析 [J]. 化学工程与装备, 2021, 4(06):193-194.
- [4] Yang Yan, Gu Qi Yuan, Yuan Xue Tao. Corrosion Inhibition of Brass by Biochemical Process in Circulating Cooling Water System [J]. Materials Science Forum, 2021, 61(5):110-112.
- [5] 张馨. 陶瓷平板膜分离技术在水处理中的应用研究 [J]. 节能, 2016, 35(01):53-55+3.
- [6] 张栋强, 陈彦安, 张晶晶, 赵静, 苏娜, 段润豪. 纳滤-反渗透技术用于高盐废水中 NaCl 的回收 [J]. 兰州理工大学学报, 2021, 47(03):64-69.
- [7] GB/T11901-1989. 水质悬浮物的测定重量法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [8] ASTM D4189-2007. 水的淤泥密度指数 (sdi) 的标准试验方法 [S]. 美国: 美国材料与试验协会 (US-ASTM), 2007.

(上接第 48 页) 法研究, 寻找盐墙及断层 + 岩墙控制的圈闭, 是富民地区下步寻找剩余勘探目标重要工作方法。

参考文献:

- [1] 吴林, 陈清华. 苏北盆地高邮凹陷基底断裂构造特征及成因演化 [J]. 天然气地球科学, 2015, 26(4):689-699.
- [2] 陈强. 铲式断层的构造力学分析 [J]. 地质学报, 1987(4): 296-305.
- [3] 甄素静, 汤良杰, 李宗杰, 等. 塔中北坡顺南地区走滑断裂样式、变形机理及石油地质意义 [J]. 天然气地球科学, 2015, 26(12):2315-2324.
- [4] 刘晓峰, 董月霞, 王华. 渤海湾盆地南堡凹陷的背形负花状构造 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2010, 35(6):1029-1034.
- [5] 夏义平, 刘万辉, 徐礼贵, 等. 走滑断层的识别标志及其石油地质意义 [J]. 中国石油勘探, 2007, 12(1):17-23.
- [6] 张承泽, 于红枫, 张海祖, 等. 塔中地区走滑断裂特征、成因及地质意义 [J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(5):22-26.
- [7] 王伟, 李瑞磊, 赵洪伟, 等. 松辽盆地南部断陷群控陷断层组合样式及其对油气成藏的影响 [J]. 非常规油气, 2016, 3(5):14-20.
- [8] 陈哲, 张昌民, 侯国伟, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖组断层组合样式及其控砂机制石油与天然

气, 2020, 41(4):824-836.

- [9] 王军, 戴俊生. 复杂断块内低级序断层的预测方法 [J]. 西部探矿工程, 2006(增刊):164-166.
- [10] 曾祥平, 杨海中, 王宏, 等. 低序级断层识别技术在复杂断块油藏注采调整中的运用 [J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(5):614-618.
- [11] 赵红兵, 严科. 深度开发油藏低级序断层综合识别方法及应用 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2010, 32(5):54-57.
- [12] 苏朝光, 韩文功, 等. 济阳拗陷地震资料断层分辨力模型正演模拟 [J]. 油气地球物理, 2006, 4(2):22-26.
- [13] 李志祥. 地震模型正演在盐下构造中的应用 [J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(8):55-59.
- [14] 王大伟, 等. 地震相干技术的进展及其在油气勘探中的应用 [J]. 地质科技情报, 2005, 24(2):71-76.
- [15] 刘畅, 朱振宇, 张琴. 基于抗大倾角干扰的第三代相干体分析技术及应用 [J]. 地球物理学进展, 2015, 30(5): 2193-2198.
- [16] 乐友喜, 江凡, 问雪, 等. 用于地震反射界面识别的瞬时相位复合属性 [J]. 物探化探计算技术, 2012, 34(5): 505-509.

作者简介:

苏书震 (1982-), 工程师, 工学学士, 现主要从事油气开发研究及管理工作。