

顺北油气田奥陶系断控体结构模式研究

卢志强, 杨 敏

(中国石油化工股份有限公司 西北油田分公司勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830011)

摘要:顺北油气田奥陶系目的层埋深普遍在8 000 m左右,三维地震资料采集面元25 m×25 m,地震资料分辨率较低,导致顺北油气田奥陶系鹰山组断控体油气藏难以精细刻画与表征。结合常规测井、电成像、远探测、取芯等资料,开展不同应力作用下断控体结构分析、断控体油气藏破碎裂缝带、破碎角砾带、断裂空腔分布研究。结果表明:断控体油气藏主要储集空间来自多期构造活动叠加改造形成的断裂空腔、角砾间孔隙、构造裂缝,不同应力机制决定断控体的发育程度,拉张背景易形成断裂空腔及裂缝带,挤压背景易形成破碎角砾带及裂缝带;断控体常发育典型的核带结构,裂缝带的宽度范围较大(0.35~1.64 km),且分布范围广,角砾带的宽度范围次之(0.44~0.93 km),且分布范围中等,断裂空腔的宽度范围最小(0.25~0.35 km),且分布范围小,主要集中在局部拉张应力区。

关键词:顺北油气田;断控体;裂缝带;角砾带;断裂空腔;测井

中图分类号:P631 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)19-0210-08

在碳酸盐岩地层中,发育一种特殊的受断裂影响的复杂缝洞系统,断裂是主控因素,在多期构造活动过程中形成新的断裂空腔、角砾间孔隙、构造裂缝,最终展现出的是断裂与不同类型储集体之间的关联关系,这类组合称为断控体。断控体成因-结构类型比较复杂,是指发育在巨厚致密碳酸盐岩内部,单纯由走滑断裂的构造运动作用所形成的裂缝和断裂“空腔”型储集体。其形成的机理是因块体的错动而发生的物质体积的调整。断控体油气藏近年来在塔里木盆地奥陶系地层有发现且这类断控体破碎程度高、储集体规模大、单井产量高。在此类碳酸盐岩地层,断控体的刻画与表征主要依托于地震高精度成像技术,在断裂带发育的类串珠反射特征可反映断控储集体的发育区域。随着开发的程度进一步深入,由于目的层埋深大(8 000 m),目前地震资料分辨率相对较低,断控体的刻画与表征精度制约了高效开发。本文基于常规测井、电成像、远探测、取芯等资料对顺北油气田奥陶系断控体油气藏进行研究,为断控体油气藏后期精细开发提供依据。

1 区域地质概况

顺北油气田位于新疆维吾尔自治区阿克苏地区沙雅县境内,构造位置位于塔里木盆地顺托果勒

低隆起西北部、沙雅隆起西南倾没端(图1)。在奥陶系鹰山组发育了一套厚度在450 m左右的碳酸盐地层,发育了多个油气藏性质不一样的断控体油气藏。

区域应力场背景控制了盆地演化、内部断裂体系及地质结构等的发育。如图2所示,寒武纪-早奥陶世,塔里木盆地周缘中天山块体、昆中块地及阿北块体等相对盆地呈离散状态,盆地周缘整体处于拉张背景,其区域主应力为拉张性质;中奥陶世-早志留世,盆地西南缘昆中地块和东南缘阿北地块、中阿尔金地块由南向北向盆地南缘之下俯冲,盆地南缘区域主应力性质由拉张转变为挤压;中志留世-中泥盆世,盆地东北缘洋壳由向北的单一俯冲转变为向南和向北的双向俯冲,导致盆地东北缘区域主应力由拉张转变为挤压;晚泥盆世-早石炭世,由于康西瓦洋的扩张,盆地西南缘区域主应力由挤压转变为拉张;早二叠世-中二叠世,由于中天山地块与塔里木盆地的拼合,盆地北缘区域主应力整体呈挤压性质;晚二叠世-三叠世,塔里木盆地进入陆内演化阶段,盆地周缘边界整体受造山带逆冲挤压影响,区域主应力性质为挤压背景。多期应力转换导致沿不同方向断裂带发育不同的断裂破碎结构,为

收稿日期:2023-05-23

基金项目:国家自然科学基金(U19B6003)。

作者简介:卢志强(1986—),男,山西朔州人,中国石油化工股份有限公司西北油田分公司勘探开发研究院,副研究员,研究方向为碳酸岩缝洞型油气藏勘探与开发;杨敏(1968—),男,吉林长春人,中国石油化工股份有限公司西北油田分公司,研究员,博士,研究方向为地质科研生产与管理。

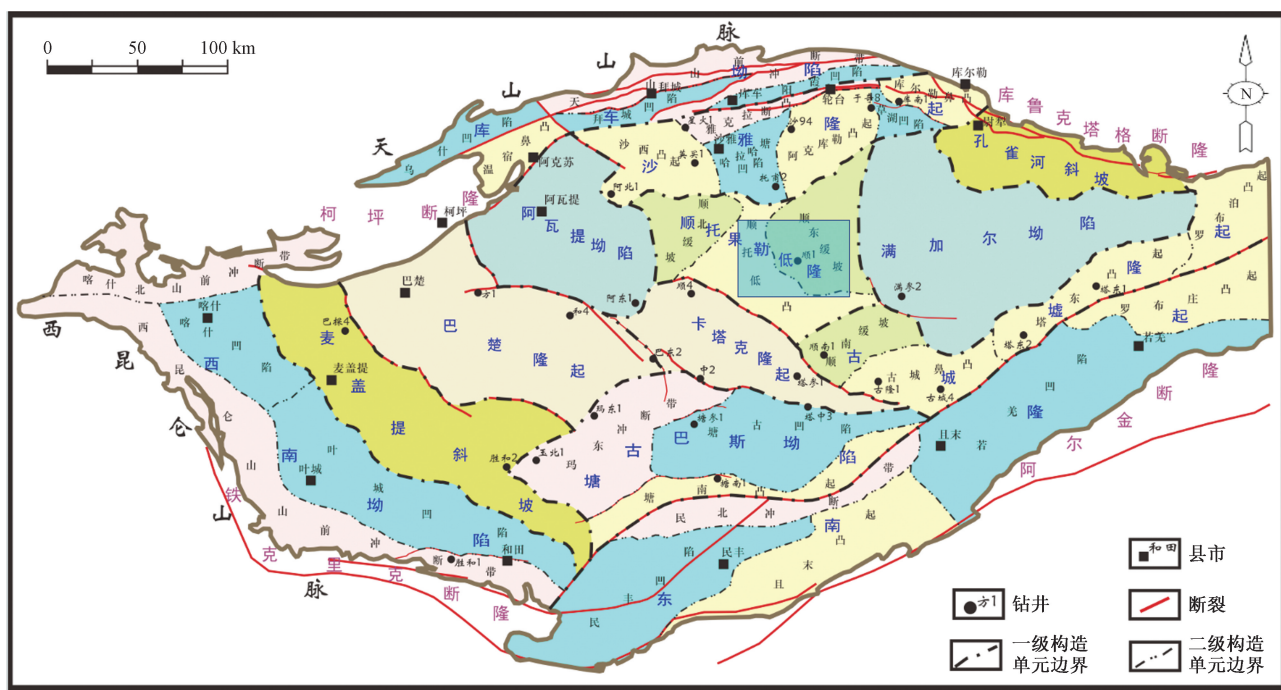


图1 研究区构造单元划分图

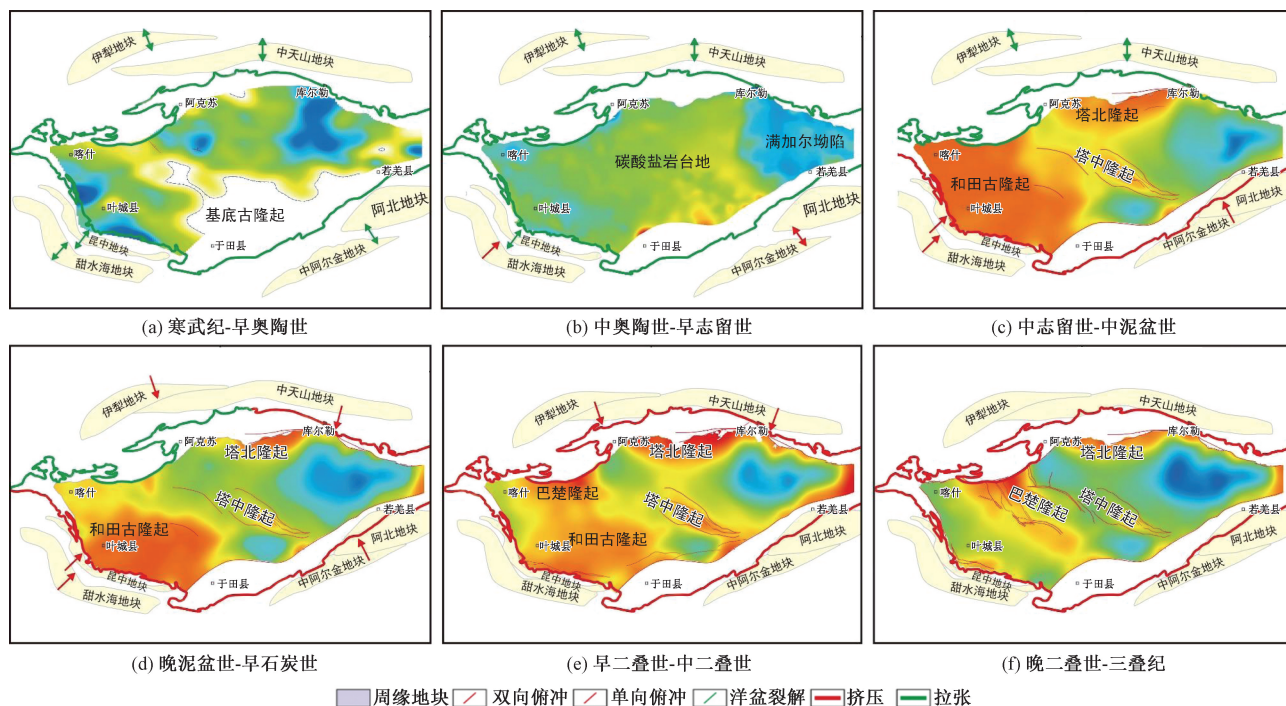


图2 塔里木盆地关键构造期边缘主应力性质图

断控体油气藏提供了良好的储集空间。

2 储层结构响应特征

2.1 野外露头特征

断裂受到多期错动破碎,在垂向上不完全是由上而下完全贯通的,往往由于岩石结构的差异(如岩性、节理发育程度、薄互层等)断裂的错接部位以及后期的充填胶结均导致了断控体储存空间的分

隔性。在断裂的核部主要发育错断的空腔洞穴和大量的裂缝,宽约1.5 m,缝洞在纵向上不连续分布[图3(a)]此类以断裂破碎为主的核带结构,其纵向沟通能力取决于裂缝开启性及开度,在中寒武统沙依里克组观察到弱挤压背景下典型的“核带”结构,断溶体岩相从左到右可分为:①未改造-弱改造的基岩带;②、③裂隙-破碎带-角砾带(角砾岩孔、残余孔

隙、裂隙); ④ 断控破碎体(空腔、构造缝等)
[图 3(b)]。

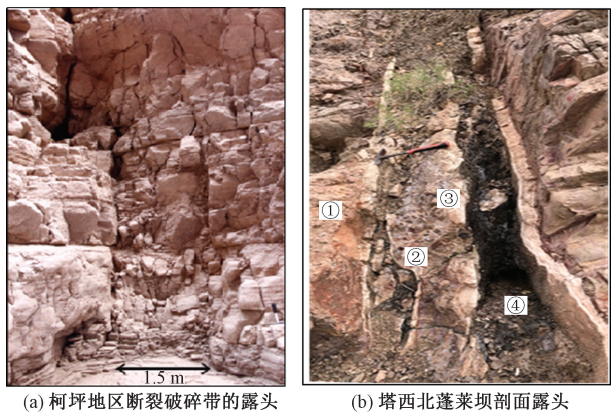


图 3 野外露头结构剖面图

2.2 地震响应及取芯特征

研究区近期投产的 16 口井的主要反射特征为串珠反射,其中共 13 口井发生放空漏失,平均漏失量 2 150 m³,其中放空井 4 口,平均单井放空长度 1.75 m(图 4)。

同样的串珠反射异常体内漏失位置差异大,在串珠中心、两侧均有漏失。

wellA 井断裂带内串珠反射内几米长度的芯,表现为基岩-破碎-基岩-破碎的多个核带结构(图 5)。

2.3 测井响应特征

2.3.1 常规测井特征

研究区近期投产的 16 口井中,断裂带内的串珠反射内发育 1 套或非连续发育多套角砾间孔隙带结构(图 6)。

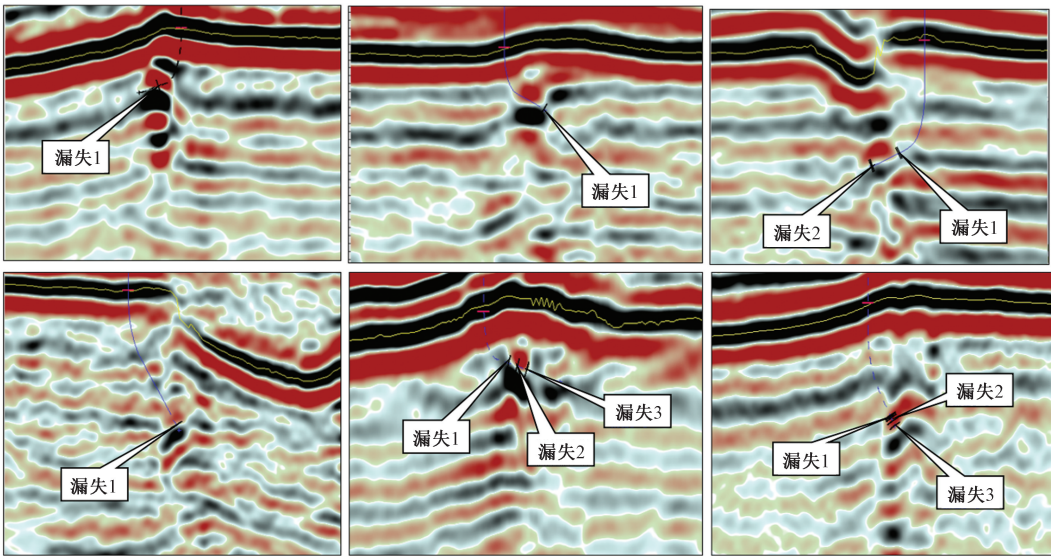


图 4 放空漏失典型剖面图

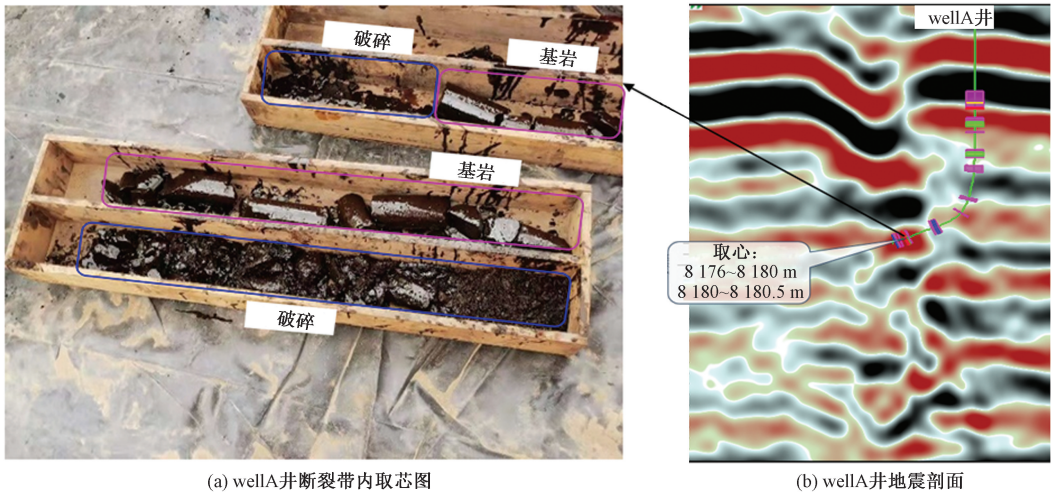


图 5 wellA 井取芯特征图

2.3.2 声波远探测(井周 0~45 m)

“串珠”内显示为未非连续异常条带,证实发育裂缝带为主。

wellD井:轨迹进入串珠体后(7 840 m之下)出现异常,与地震异常有一定对应关系,但明显异常条带主要发育在 8 000~8 030 m、8 050~8 100 m 井段,2 套储层在井筒均有揭示(2 段Ⅲ类储层),以裂缝储层为主(图 7)。

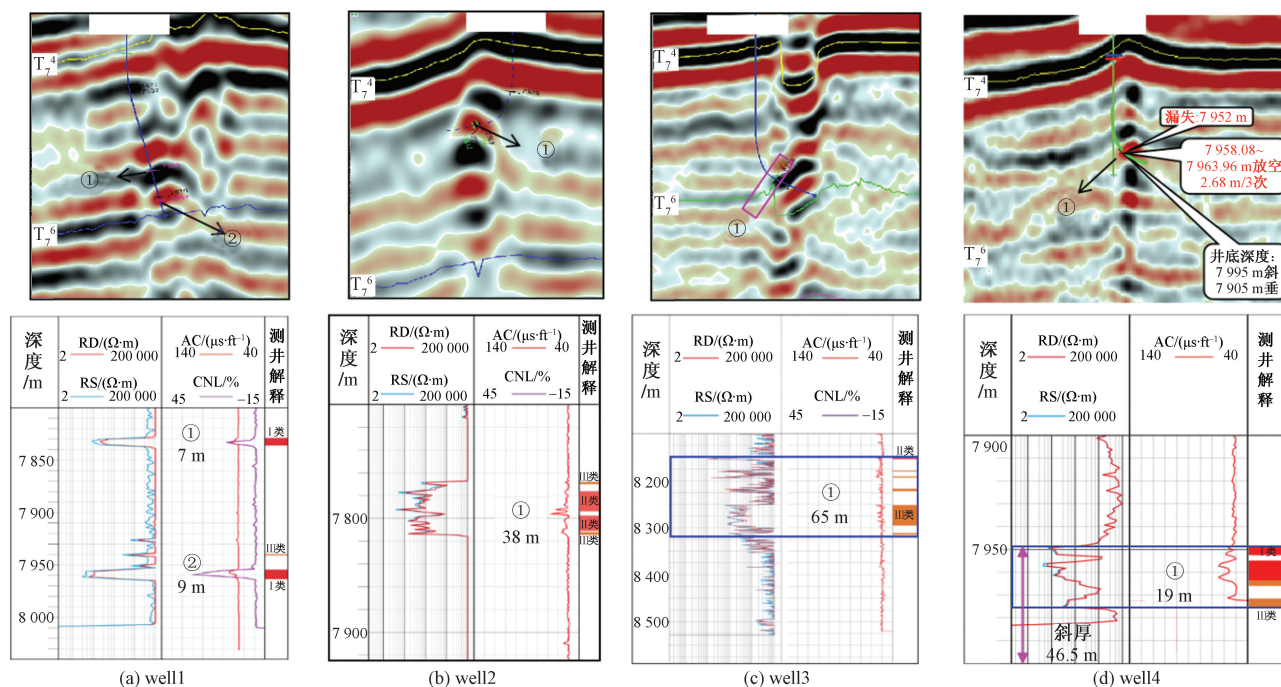
2.3.3 成像测井特征

wellB井成像测井显示放空、漏失处主要发育构造缝为主(图 8),wellC井成像测井显示漏失处主要发育断裂空腔为主(图 9)。

3 断控体结构模式

综合不同类型断溶体缝洞结构认识,结合前人对走滑断裂的研究,顺北走滑断裂体系下随着主滑动面控制的裂缝带与应力方向的不一致性大小,存在挤压型核带结构和拉分脱空结构两种主要缝洞结构。

在挤压应力环境下,由于地层被挤压发生破碎的两翼(或左右盘)应力大小和方向不同,往往形成核带结构模式,表现出主动盘一侧地层破碎变形严重。由断裂核部向外主要结构为断层角砾带、诱导缝发育区,最后过渡到围岩区(基岩区);而被动盘主要为断层滑动面向外,窄范围内诱导缝发育区,储集空间明显差于主动盘(图 10),此类结构中破碎岩块间孔隙



RD、RS为电阻率;AC为声波时差;DEN为密度;CNL为井径

图 6 顺北地区已钻井特征和储层地震标定图

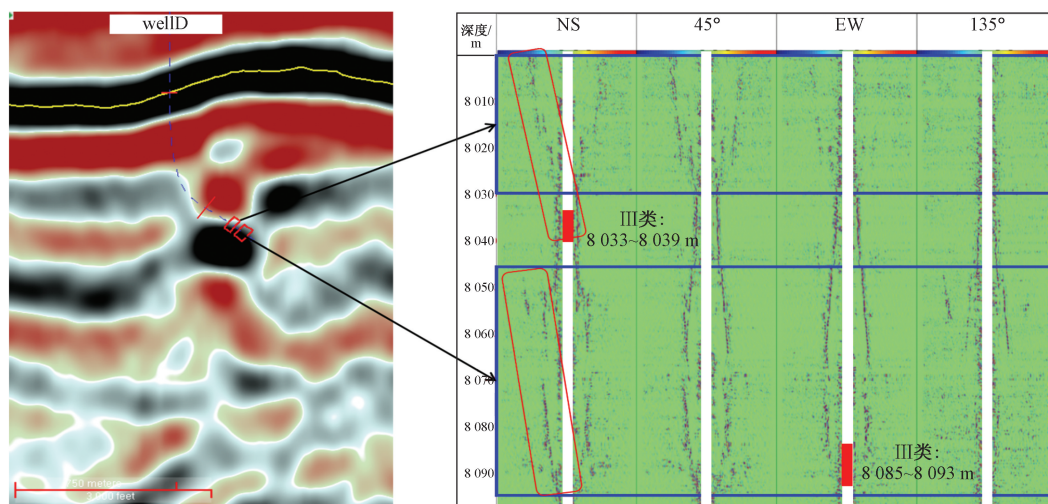


图 7 顺北地区 wellD 井地震剖面及对应深度的声波远探测图

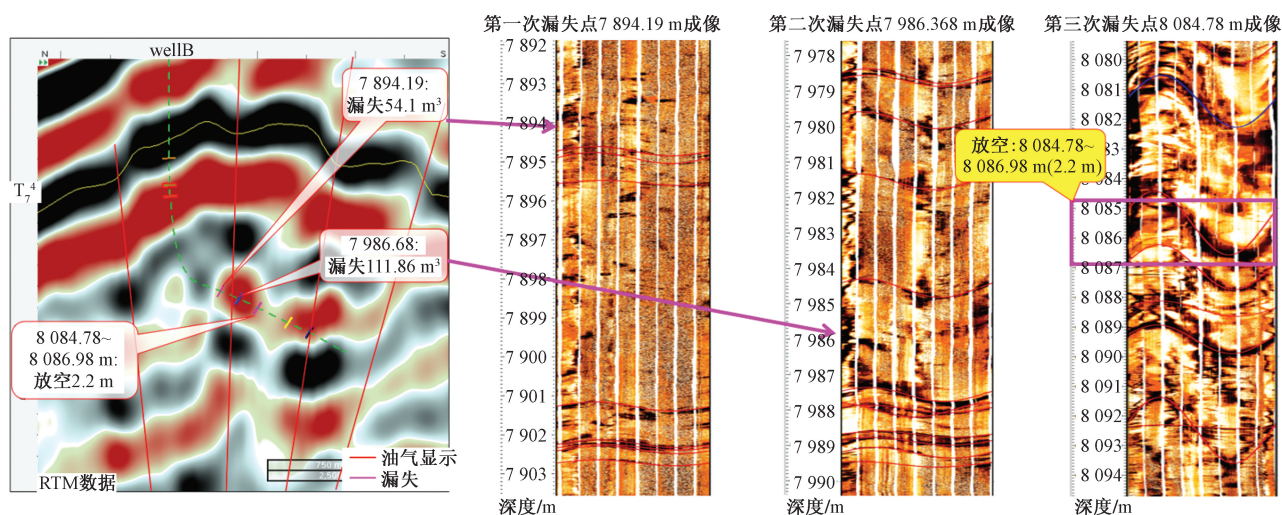


图 8 顺北地区 wellB 成像测井图

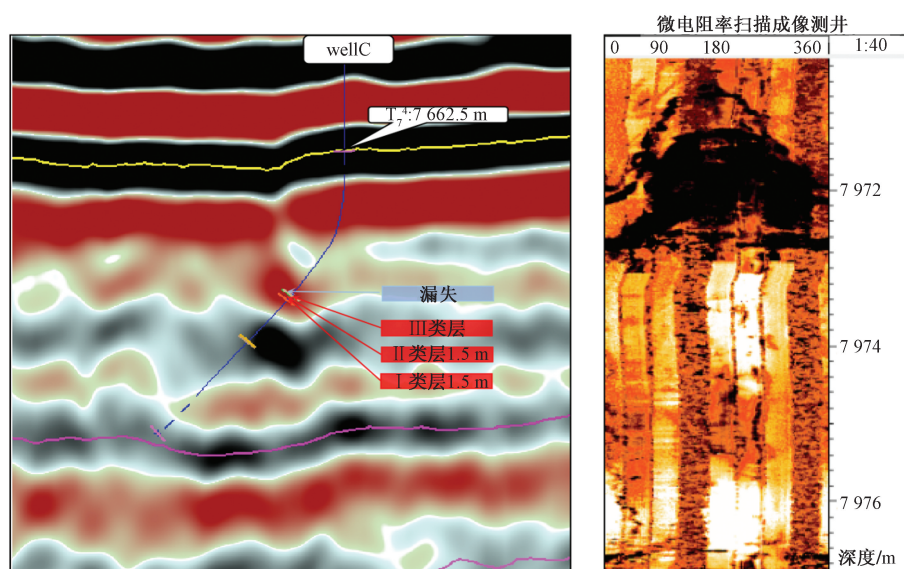


图 9 顺北地区 wellC 成像测井图

及裂缝为主要储集空间,低孔、中低渗,远井流动能力差,连通能力弱,油气储集空间较小,非均质性强,储量丰度低,生产井累产普遍低(0.2~6万t)。

拉张应力环境由于地层被张扭后,易在断裂带内形成脱空结构,通常表现出主动盘一侧地层拉张断脱,在断裂带内破碎空间中充填断层角砾,由断层滑动面向外,主要为断裂空腔+角砾岩、诱导缝发育区,最后过渡到围岩,有时会成对出现;而被动盘主要为断层滑动面+窄范围诱导缝发育区,储集空间明显差于主动盘(图 11),此类结构中破碎体主储、具类“洞穴”特征,网状缝立体连通,压力平衡能力强,纵横向连通性好,油气储集空间大,储量丰度大,生产井累产高(6万~15万t)。

4 裂缝带、角砾带和断裂空腔分布特征

断裂空腔主要发育在拉张背景下,为靠近断裂核心的区域,空腔洞穴型储集体发育,储层物性最

好;角砾带主要发育在挤压背景下,裂缝孔洞发育、储层物性较好;裂缝带一般与角砾带相邻,发育大量裂缝,储层物性为 3 种中最差。

4.1 裂缝带、角砾带和断裂空腔测井识别

根据测井资料,可有效判断断控体中的裂缝带、角砾带和断裂空腔,特别横穿断裂带的井对这 3 种破碎结构识别上更有优势(图 12)。断控体在测井上表现为:断裂空腔常规测井声波时差 AC 增大,电阻率 RD、RS 大幅度降低,测井解释为 I 类储层且测井解释孔隙度为 6~17,成像测井表现为 1 m 左右的洞穴;角砾带多发育裂缝-孔洞型储层,表现为 AC 小幅度增大,RD、RS 中等幅度降低,测井解释为 II 类储层且测井解释孔隙度为 2.4~6,成像测井表现为 0.5 m 左右的多组裂缝、孔洞组合;裂缝带以发育裂缝型储层为主,表现为 AC 小幅度锯齿状变化,RD、RS 小幅度降低,测井解释为 III 类储层

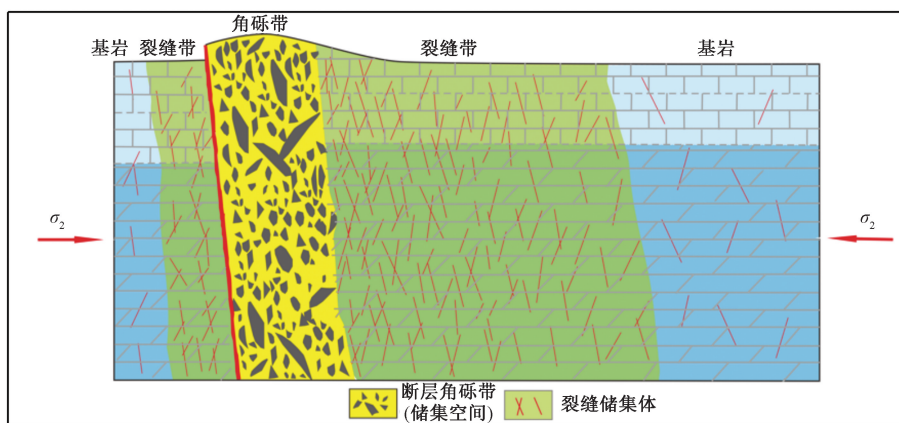


图 10 压扭应力背景下断裂储集空间的结构模式

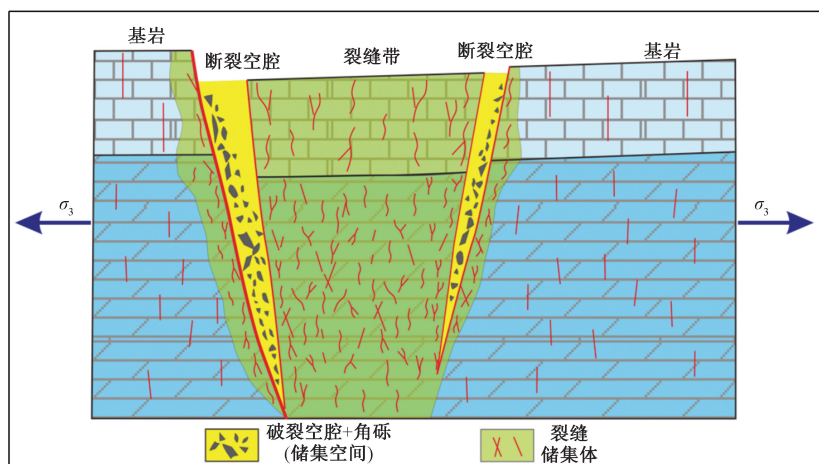


图 11 张扭应力背景下断裂储集空间的结构模式

且测井解释孔隙度在 0.6~2.4, 成像测井表现为 0.2 m 左右的间距不等的多组裂缝。

4.2 裂缝带、角砾带和断裂空腔平面分布

依托于顺北油气田 A 断裂带上投产的 16 口水平井的裂缝带、角砾带和断裂空腔测井识别结果, 并结合实钻井放空漏失、生产动态等资料, 绘制了该断裂带裂缝带、角砾带和断裂空腔的平面分布图 (图 13)。以 3 口典型投产井作为实例。

1) well1 井。在 7 958.08~7 959.03、7 961.21~7 961.87、7 962.89~7 963.96 m 发生放空, 共计漏失钻井液 2 709.01 m³, 测井解释 7 951.2~7 952.6、7 955.8~7 958、7 960.4~7 961.8 m 为洞穴型储层, 酸化完井后日产油 297 t/d, 产气 400 000 m³/d, 综合判断 well1 井钻遇断裂空腔, 网状缝立体连通, 压力平衡能力强, 纵横向连通性好, 油气储集空间大, 储量计丰度大, 已累计产油 15 万 t。

2) well2 井。在 8 331.85 m 处发生漏失, 共计漏失钻井液 1 383.65 m³, 测井解释 7 617.8~7 629.2、8 161.0~8 162.5 m 为孔洞型储层, 酸压完井后日产油 215 t/d, 产气 2 630 000 m³/d, 综合

判断 well2 井钻遇角砾带。

3) well3 井。在 8 442.57 m 处发生漏失, 共计漏失钻井液 483.16 m³, 测井解释 7 673.6~7 691.2、8 124.2~8 132.4、8 137.7~8 144.5 m 为裂缝型储层, 酸压完井后日产油 51 t/d, 产气 163 200 m³/d, 综合判断 well3 井钻遇裂缝带。

裂缝带、角砾带和断裂空腔的平面分布 (图 13) 结果显示: 裂缝带发育宽度大, 角砾带次之, 断裂空腔发育最窄。裂缝带、角砾带和断裂空腔在顺北 A 断裂带上不同段的横向分布特征差异较大, 裂缝带的宽度范围在 0.35~1.64 km, 角砾带的宽度范围在 0.44~0.93 km, 断裂空腔的宽度范围在 0.25~0.35 km。

5 结论

1) 顺北油气田奥陶系鹰山组断控体油气藏储集空间主要为多期构造运动形成的断裂空腔、角砾间孔隙、构造裂缝, 结合野外露头特征、地震响应及取芯特征、测井响应特征 (常规测井、成像、远控测), 研究区极少井发育断裂空腔, 主要以大量发育角砾带和裂缝带。

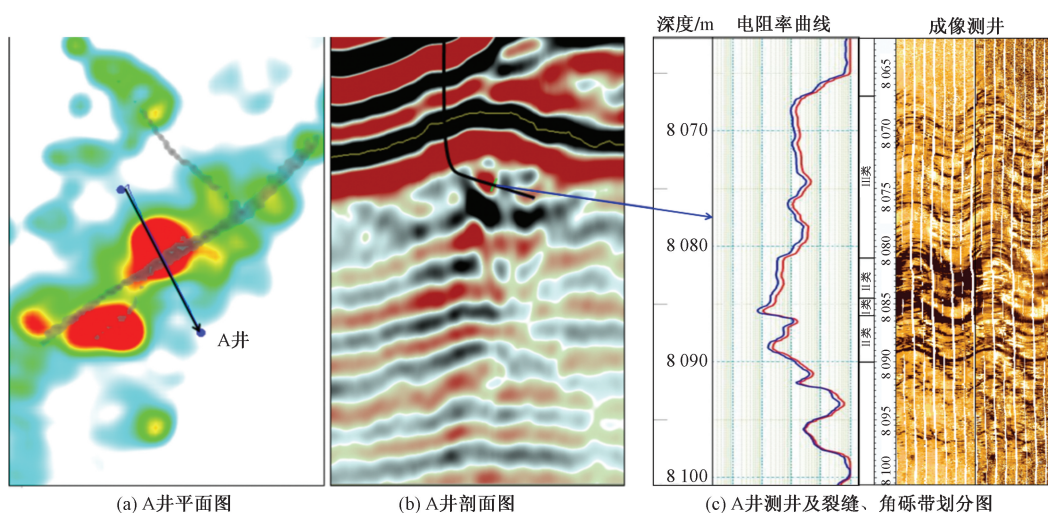


图12 裂缝、角砾带测井识别图

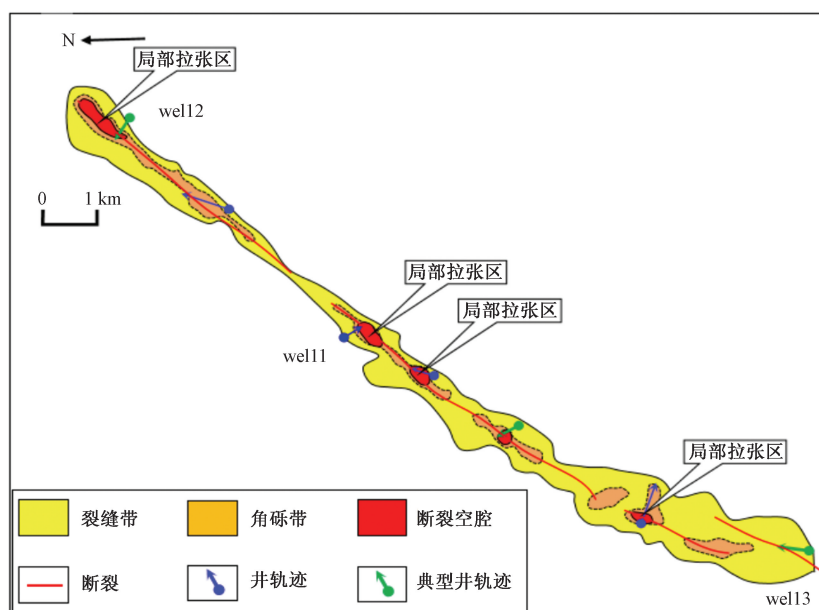


图13 顺北A断裂裂缝带、角砾带和断裂空腔平面分布图

2)不同应力形成不同断裂带结构,在挤压应力环境下,易形成断层角砾带、诱导缝,被动盘储集空间明显差于主动盘,此类结构中破碎岩块间孔隙及裂缝为主要储集空间,低孔、中低渗,远井流动能力差,连通能力弱,油气储集空间较小,非均质性强,储量丰度低,生产井累产普遍低(0.2万~6万t),此类结构井轨迹设计与断裂带小角度斜交,一井多控体,动用角砾及裂缝带储量,可提高油气产能。拉张应力环境下易在断裂带内形成脱空结构,断裂空腔+角砾岩、诱导缝发育,同样被动盘储集空间明显差于主动盘,此类结构中破碎体主储、具类“洞穴”特征,网状缝立体连通,压力平衡能力强,纵横向连通性好,油气储集空间大,储量丰度大,生产井累产高(6万~15万t),此类结构为井轨迹设计及

高效动用提供了支撑,主要采用垂直断裂带直接动用角砾带储量,可获得高油气产能。

3)断控体中裂缝带、角砾带、断裂空腔的平面分布范围差异明显:裂缝带的宽度范围较大(0.35~1.64 km),且分布范围广,角砾带的宽度范围次之(0.44~0.93 km),且分布范围中等,断裂空腔的宽度范围最小(0.25~0.35 km),且分布范围小,主要集中在局部拉张应力区,基于这3种结构,为了更好获得较高油气产能,一般采用多穿多控裂缝带、角砾带及断裂空腔,分段酸压完井方式提高产能。

参考文献

- [1] 马永生,蔡勋育,云露,等.塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展[J].石油勘探与开发,2022,49(1):1-17.

- [2] 马永生. 深层-超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J]. 石油学报, 2019, 40(12): 1-10.
- [3] 漆立新. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 102-111.
- [4] 焦方正. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 831-839.
- [5] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 207-216.
- [6] 张长建, 吕艳萍, 张振哲. 塔里木盆地塔河油田西部斜坡区中下奥陶统古岩溶洞穴发育特征[J]. 石油实验地质, 2022, 44(6): 1008-1017, 1047.
- [7] 陈华鑫, 康志宏, 康志江. 塔河油田碳酸盐岩油藏古岩溶洞穴层状结构与形成机理[J]. 现代地质, 2022, 36(2): 695-708.
- [8] 刘宝增, 漆立新, 李宗杰, 等. 顺北地区超深层断溶体储层空间雕刻及量化描述技术[J]. 石油学报, 2020, 41(4): 412-420.
- [9] 云露. 顺北东部北东向走滑断裂体系控储控藏作用与突破意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 41-52.
- [10] 刘军, 李伟, 龚伟, 黄超. 顺北地区超深断控储集体地震识别与描述[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 238-244.
- [11] 吕海涛, 韩俊, 张继标, 等. 塔里木盆地顺北地区超深碳酸盐岩断溶体发育特征与形成机制[J]. 石油实验地质, 2021, 43(1): 14-22.
- [12] 邓尚, 李慧莉, 张仲培, 等. 塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 878-888.
- [13] 邓尚, 李慧莉, 韩俊, 等. 塔里木盆地顺北 5 号走滑断裂中段活动特征及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 990-998, 1073.
- [14] 鲍典, 张慧涛. 塔河油田碳酸盐岩断溶体油藏分隔性描述方法研究[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(1): 25-30.
- [15] 伍齐乔, 李景瑞, 曹飞, 等. 顺北 1 井区奥陶系断溶体油藏岩溶发育特征[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 444-449.
- [16] 徐嘉宏, 康志宏, 蓝茜茜. 塔河奥陶系油藏岩溶储层类型、洞穴结构和发育模式: 以塔河油田 7 区 T615 缝洞单元为例[J]. 现代地质, 2020, 34(6): 1181-1192.
- [17] 刘军, 任丽丹, 李宗杰, 等. 塔里木盆地顺南地区深层碳酸盐岩断裂和裂缝地震识别与评价[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 703-710.
- [18] 马乃拜, 金圣林, 杨瑞召, 等. 塔里木盆地顺北地区断溶体地震反射特征与识别[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(2): 398-403.
- [19] 曹自成, 路清华, 顾忆, 等. 塔里木盆地顺北油气田 1 号和 5 号断裂带奥陶系油气藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 975-984.
- [20] 林波, 张旭, 况安鹏, 等. 塔里木盆地走滑断层构造变形特征及油气意义: 以顺北地区 1 号和 5 号断层为例[J]. 石油学报, 2021, 42(7): 906-923.
- [21] 林波, 云露, 张旭, 等. 一种板内小尺度走滑断层平面分段研究方法: 以塔里木盆地顺北 5 号断层中北段为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4): 1006-1018.
- [22] 黄诚. 叠合盆地内部小尺度走滑断层幕式活动特征及期次判别: 以塔里木盆地顺北地区为例[J]. 石油实验地质, 2019, 41(3): 379-389.
- [23] 张文彪, 段太忠, 赵华伟, 等. 断控岩溶体系空间结构差异性与三维建模: 以顺北 1 号断裂带为例[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(28): 12094-12108.
- [24] 邓光校, 马永强, 谢玮. 碳酸盐岩小缝洞群储集体地震表征方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(8): 3038-3042.
- [25] 曹飞, 卢志强. 相约束贝叶斯同时反演技术及其应用: 以塔里木盆地顺北地区 5 号断裂带北段为例[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(10): 1702-1711.
- [26] 姜晓宇, 张研, 甘利灯, 等. 散射成像数据洞穴预测技术[C]//SPG/SEG 南京 2020 年国际地球物理会议论文集(中文). 北京:《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司, 2020: 4.
- [27] 曹飞, 侯吉瑞, 闻宇晨, 等. 缝洞型油藏泡沫驱效果及缝洞结构动用机理[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(29): 12813-12825.

Study on Structural Model of Ordovician Fault-controlled Volume in Shunbei Oil and Gas Field

LU Zhiqiang, YANG Min

(Research Institute of Exploration and Production, Northwest Branch of SINOPEC, Urumqi 830011, China)

Abstract: The depth of target layer of ordovician in Shunbei oil and gas field is about 8 000 m, 3d seismic data acquisition panel is 25 m × 25 m, the resolution of seismic data is low, it is difficult to describe and characterize the ordovician Yingshan fault-controlled reservoir in Shunbei oil and gas field. Based on the data of conventional logging, electrical imaging, remote detection and coring, the structure analysis of fault-controlled body, the fracture zone, fracture breccia zone and the distribution of fracture cavity in fault-controlled body reservoir under different stress were carried out. The study shows that the main reservoir space of fault-controlled body oil and gas reservoir comes from fault cavity, breccia pore and structural fracture formed by multi-stage structural activity, and different stress mechanism determines the development degree of fault-controlled body, the fracture cavity and fracture zone are easily formed in the tension background, and the broken breccia zone and fracture zone are easily formed in the compression background. The typical nuclear zone structure is often developed in the fault-controlling body, and the fracture zone has a wide width (0.35~1.64 km) and a wide distribution, the width of breccia belt is the next (0.44~0.93 km), and the range of distribution is moderate. The width of fracture cavity is the smallest (0.25~0.35 km), and the range of distribution is small, mainly concentrated in the area of local tensile stress.

Keywords: Shunbei Oil and Gas Field; fault-controlled body; fracture zone; breccia zone; fault cavity; well logging