

doi: 10.12029/gc20160416

韩杰, 袁源, 洪涛, 等. 轮古东走滑断裂破碎带结构及与油气关系[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1304–1316.

Han Jie, Yuan Yuan, Hong Tao, et al. The structure of crushed zone near the Lungudong strike slip fault and its relationship with the gas and oil[J]. Geology in China, 2016, 43(4): 1304–1316(in Chinese with English abstract).

## 轮古东走滑断裂破碎带结构及与油气关系

韩 杰<sup>1</sup> 袁 源<sup>1</sup> 洪 涛<sup>2,1</sup> 吴梅莲<sup>1</sup> 裴广平<sup>1</sup> 刘俊锋<sup>1</sup> 张 蕾<sup>3</sup>

(1. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;  
3. 中国石油东方地球物理公司研究院库尔勒分院, 新疆 库尔勒 841000)

**摘要:** 利用最新处理完成的轮古东 300 km<sup>2</sup> 叠前深度偏移地震资料, 多手段识别出轮古东气田发育 3 期 4 组断裂。断裂控制了裂缝走向与裂缝发育密度, 裂缝主要为高角度(45°~75°)构造窄裂缝, 沿裂缝存在溶蚀, 走向主要为 NE-SW。纵向上, 一间房组裂缝发育密度最大(14 条/100 m), 其次为鹰山组(6 条/100 m)和良里塔格组(4 条/100 m); 平面上, 裂缝主要分布在主干断裂周边 1 km 范围内, 随着距断裂距离增大, 裂缝发育强度(裂缝线密度)呈指数降低。在此基础上, 综合考虑主干断裂及伴生裂缝发育特征, 将轮古东断裂破碎带平面上划分为“羽状破碎带、转换破碎带、斜列破碎带、复合破碎带”4 种结构, 羽状破碎带分布面积最广, 是油气最富集的区域, 是目前高效井的集中分布区, 围绕羽状破碎带的钻探为走滑断裂控储控藏研究和寻找新的油气富集区域提供了新思路。

**关键词:** 轮古东; 奥陶系; 碳酸盐岩; 断裂; 凝析气藏

中图分类号: P542.3; P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)04-1304-13

## The structure of crushed zone near the Lungudong strike slip fault and its relationship with the gas and oil

HAN Jie<sup>1</sup>, YUAN Yuan<sup>1</sup>, HONG Tao<sup>2,1</sup>, WU Mei-lian<sup>1</sup>,  
PEI Guang-ping<sup>1</sup>, LIU Jun-feng<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, 841000, Xinjiang, China;  
2. College of Geoscience, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 3. Korla Branch of Research Institute, Bureau of Geophysical Prospecting INC, China National Petroleum Corporation, Korla 841000, Xinjiang, China)

**Abstract:** Using the latest seismic data of 300 km<sup>2</sup> depth migration before stack in Lungudong, the authors identified three stages and four groups of fractures in Lungudong gas field by various means. The strike and compactness of the fractures are controlled by faults. The fractures are mainly high angle (45°–75°) narrow fractures. Corrosion is developed along the fractures, and the dominant strike is NE–SW. In the longitudinal field, the fractures of Yijianfang Formation has maximum density (14 fractures per 100 m), followed by the compactness of the fractures of Yingshan Formation (6 fractures per 100 m) and the compactness of the fractures of

收稿日期: 2015-06-25; 改回日期: 2015-10-16

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技攻关专项“塔里木油田勘探开发关键技术研究及应用”(22121G20112001)资助。

作者简介: 韩杰, 男, 1979 年生, 硕士, 高级工程师, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事地质研究; E-mail: gshanjie@163.com。

Lianglitage Formation (4 fractures per 100 m). In the plane field, fracture is mainly distributed in the area within 1 km of the main faults. With the increasing distance from the fault, the degree of fracture development (linear density of fractures) decreases with the tendency of index number. On such a basis, the authors have comprehensively considered developmental characteristics of main fractures and accompanying fractures. In the plane field, crushed zones of Lungudong fault are divided into pinnate crushed zone, transform crushed zone, echelon crushed zone, and composite crushed zone. The area of pinnate crushed zones is the largest and most gas and oil spots are concentrated here, and high-efficiency wells are centrally distributed in this area at present. The exploration drill holes around the pinnate crushed zone offer a new train of thought for the study of strike slip fault controlling oil and gas reservoir and finding new rich domains of gas and oil.

**Key words:** Lungudong; Ordovician; carbonate rock; fault; condensate gas reservoir

**About the first author:** HAN Jie, male, born in 1979, master, senior engineer, majors in petroleum geology; E-mail: gshanjie@163.com.

**Fund support:** Supported by Science & Technology Major Project of China National Petroleum Corporation (No. 22121G20112001).

走滑断裂是沉积盆地中特殊而且力学机制复杂的断裂系统,走滑断裂及其破碎带本身是重要的储油气空间,同时,高角度的走滑断裂常常沟通地层深部流体,是油气运聚的输导体系,对储层的形成与油气的分布具有重要的控制作用。近期针对大型走滑断裂及其破碎带的直接钻探在塔里木盆地奥陶系层间岩溶区的塔中I号气田、哈拉哈塘油田和轮古东气田均取得了预期效果<sup>[1-4]</sup>,极大地拓展了油气勘探开发领域,也使得对塔里木盆地走滑断裂的研究与认识更进一步深化。一方面加强走滑断裂的识别、构造样式的刻画及力学机制的研究<sup>[1-7]</sup>;另一方面对走滑断裂破碎带结构的研究引起关注,张庆莲等<sup>[8]</sup>,潘文庆等<sup>[9]</sup>对塔里木盆地西北缘的柯坪—巴楚露头区野外裂缝地质建模明确走滑断裂控制的裂缝发育带具有明显的分带性,距断层由近及远可细分为“破碎带、劈理带、菱形裂缝带、稀疏裂缝带”;郭光辉等<sup>[10]</sup>通过野外与井下地质建模,指出塔里木盆地奥陶系沿走滑断裂带走向上断裂相具有分段性和差异性,可定性分为高渗透相和致密相区;孙东等<sup>[11]</sup>通过地震储层正演明确断层及断裂破碎带能产生串珠状反射。这些研究成果对认识走滑断裂破碎带在三维空间复杂结构及解译其与油气富集规律提供了新的思路和方法。

前期针对轮古东气田断裂系统的研究,由于受地震资料品质和勘探开发程度的限制,对走滑断裂的解释有待深入,对断裂破碎带及伴生裂缝发育特征研究较少<sup>[4]</sup>,本文以最新处理完成的轮古东 300 km<sup>2</sup>叠前深度偏移地震资料为基础,结合区域已有

钻井资料综合分析轮古东气田走滑断裂的识别、发育特征、断裂破碎带的组合方式以及控储控藏特征,以期为该区进一步勘探开发提供指导。

## 1 地质背景

轮古东气田地处新疆轮台县境内,构造上隶属于塔里木盆地塔北隆起轮南低凸起中部。奥陶纪地层发育齐全,可细分为上奥陶统桑塔木组、良里塔格组和吐木休克组(又称恰尔巴克组)、中奥陶统一间房组及中下奥陶统鹰山组和蓬莱坝组。

主要勘探目的层为一间房组和鹰山组,其次为良里塔格组,一间房组埋藏深度 5050~6700 m,厚度 10.5~42 m,发育台缘和台内丘滩复合体沉积,岩性以浅褐灰-灰褐色亮晶砂屑灰岩、亮晶鲕粒灰岩和亮晶藻屑砂屑灰岩为主,在 AG35、AG621 等井都发现托盘类生物礁。鹰山组自上而下可细分为 4 段:鹰一段(O<sub>1-2</sub>y<sup>1</sup>)、鹰二段(O<sub>1-2</sub>y<sup>2</sup>)、鹰三段(O<sub>1-2</sub>y<sup>3</sup>)和鹰四段(O<sub>1-2</sub>y<sup>4</sup>),本区绝大多数钻井仅钻揭鹰一段,主要发育亮晶砂屑灰岩、泥晶灰岩,为开阔台地相的台内滩和滩间海沉积。

研究区东邻草湖生油凹陷,南接满加尔生油凹陷,位于油气运移主要方向的前沿部位,构造位置十分有利。以近南北向轮东 I 号走滑断裂带为界,构造西缓东陡,总体为一东南倾大型斜坡(图 1),一间房组顶面构造高差 1650 m,奥陶系油气主力产层一间房组在西北部受剥蚀而尖灭。储层以裂缝孔洞型储层为主,发育少量洞穴型储层,整体表现为受断裂和沉积相带分割,局部断块含少量边、底水

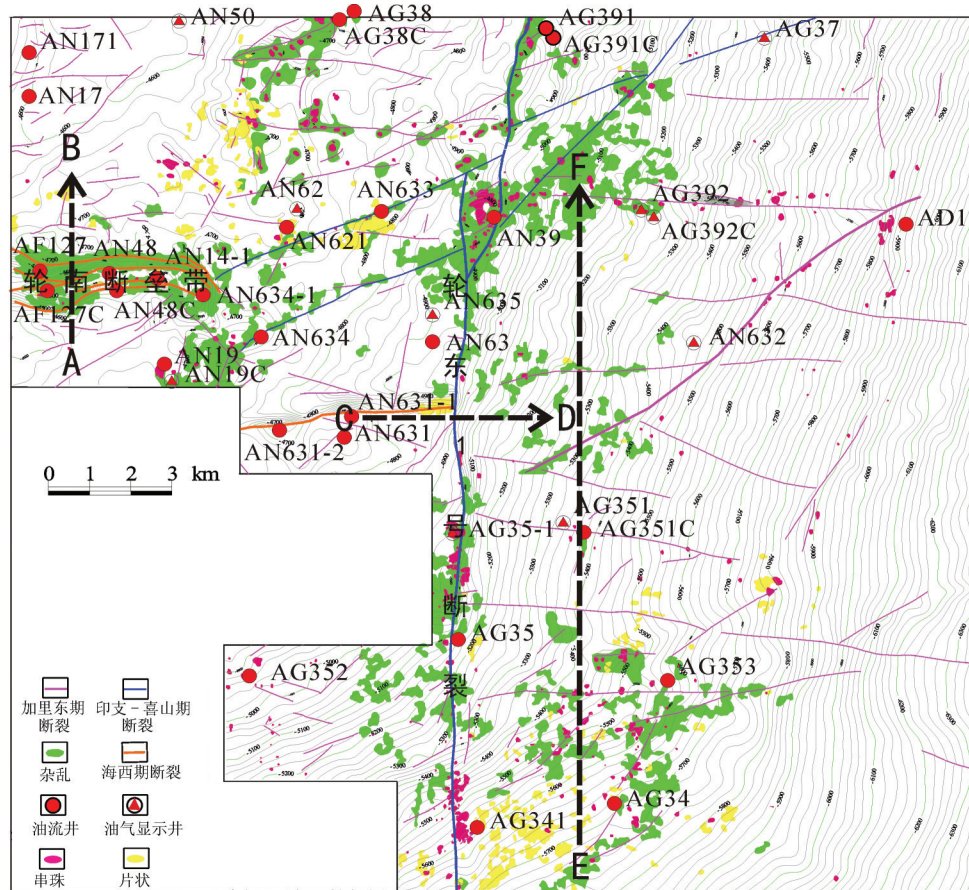


图1 轮古东气田构造断裂与储层预测叠合图

Fig.1 Overlapping figure of structural fault and reservoir forecasting in Lungudong gas field

的大型准层状凝析气藏<sup>[12-13]</sup>。

## 2 断裂与裂缝特征

### 2.1 地震资料断裂识别

平剖结合,多方法开展工区断裂解释,小断层产状较陡,主要根据上下地层即寒武系和良里塔格顶面存在断距和挠曲,以及地震同相轴存在变化进行识别<sup>[3]</sup>。在此基础上,通过沿层切片、相干属性等技术实现断裂与裂缝的平面识别,以垂直剖面为主精细解释断层。

#### 2.1.1 断裂平面识别

相干体技术是一种不连续的检测手段,当地下有断层、裂缝或地质异常体(如洞穴、河道、串珠等)时,地层产生横向不均匀现象,相邻地震道之间的反射波在振幅、频率及相位等方面都将发生不同程度的变化,进而达到检测断层、反映岩性异常体的

目的,相干体切片比常规切片能更好地表现断层和沉积特征。从沿层相干切片结果分析,中深层断裂平面上主要分4组:走滑断层主要呈近南北、北东和北西向3组断裂,且北东向断层错断北西向断层;逆冲断裂为近东西走向,主要位于工区西部(图2~图3)。石炭系以上以雁列式走滑断层和逆冲断裂为主,走滑断层主要发育近南北向以及两条近北东向断裂(图4)。

#### 2.1.2 断裂剖面识别

根据区域构造运动背景以及断层平剖面特征,研究区断裂可划分为3期4组。中晚加里东期走滑断裂、晚海西期逆冲断裂以及喜山期走滑断裂(图1、图5)。

早加里东期寒武系—中下奥陶统,塔北隆起稳定沉积,无大的构造活动,断裂不发育,沉积大套灰岩地层。中晚加里东期断裂开始活动,沉积地层由

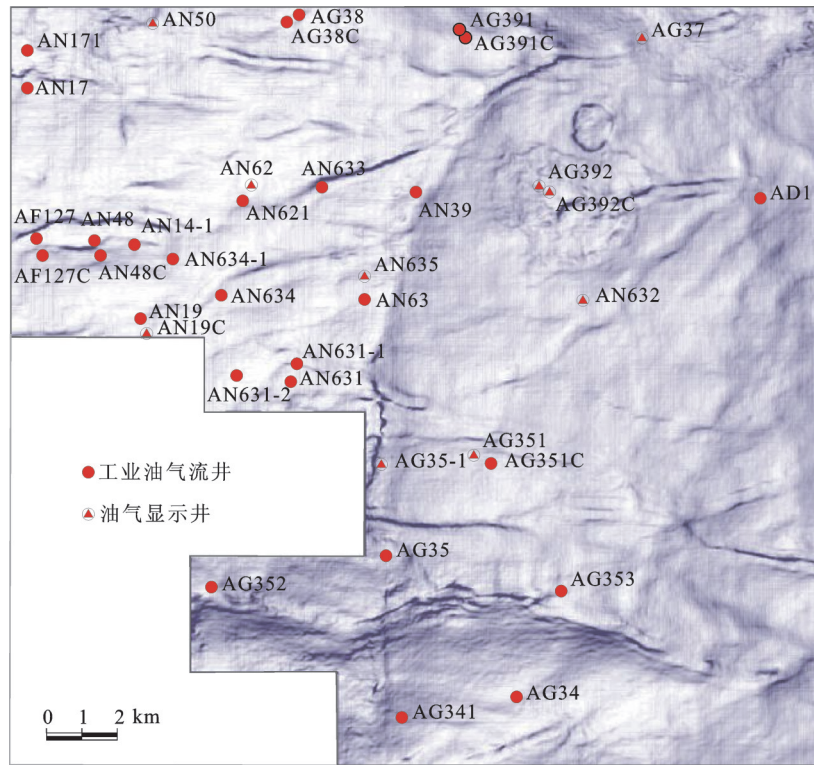


图2 轮古东气田下寒武统底面up-down 20 ms相干属性图  
Fig.2 Up-down 20 ms coherent property of Lower Cambrian basal surface in Lungudong gas field

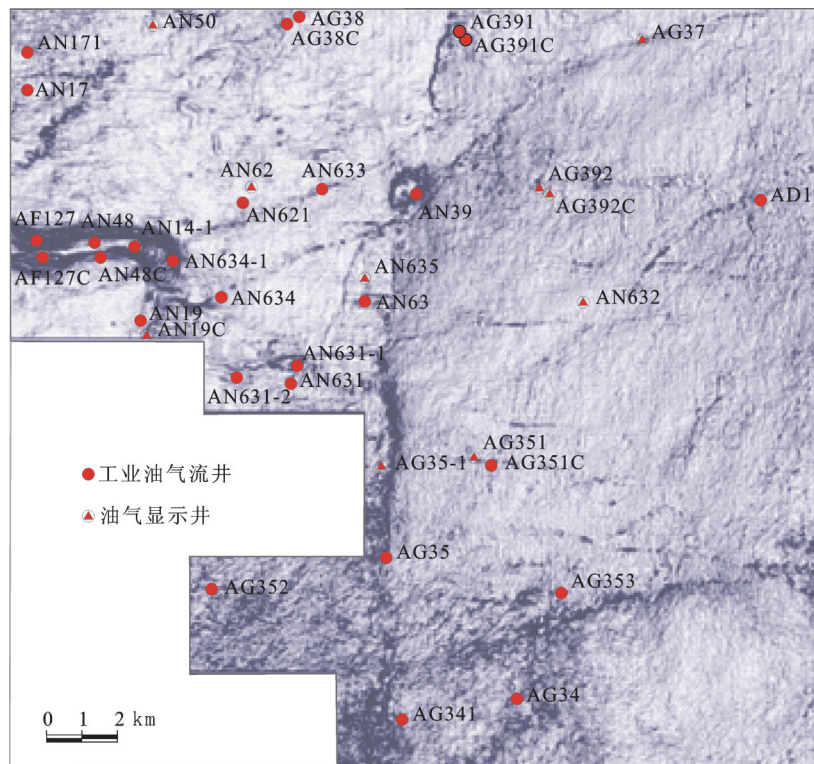


图3 轮古东气田一间房顶面up-down 20 ms相干属性图  
Fig.3 Up-down 20 ms coherent property of the top surface of Yijianfang Formation in Lungudong gas field

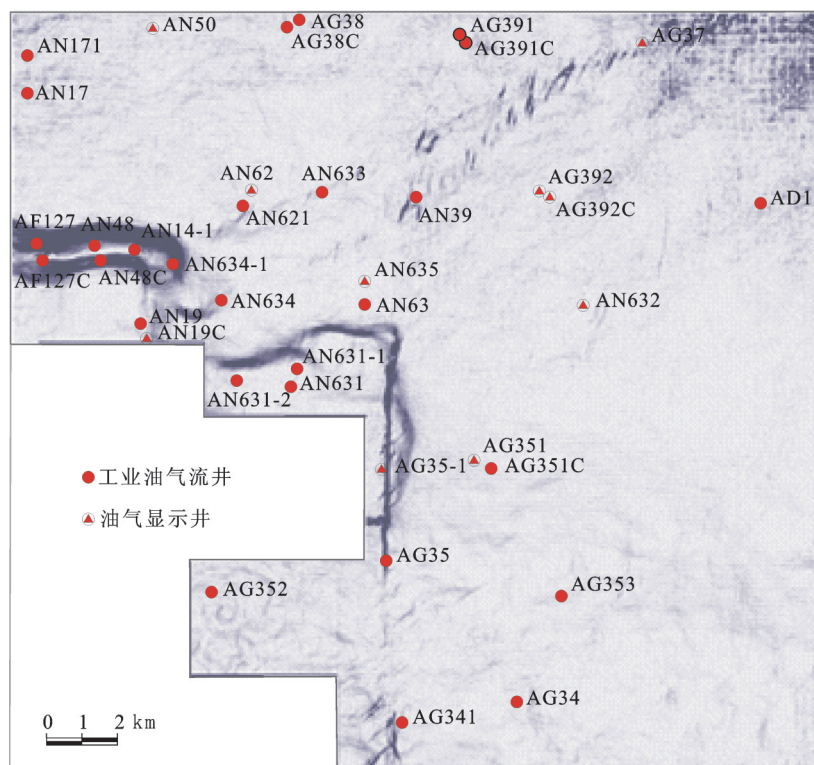


图4 轮古东气田石炭系双峰灰岩顶 up-down 20 ms 相干属性图

Fig.4 Up-down 20 ms coherent property of Carboniferous double peak limestone top surface in Lungudong gas field

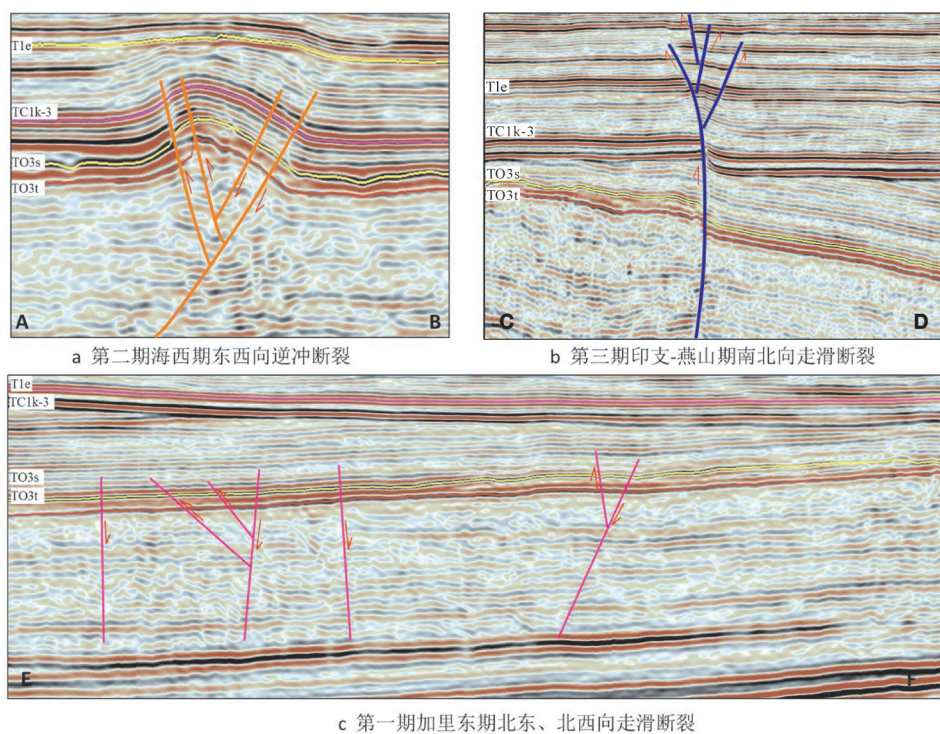


图5 轮古东气田3期断裂剖面图

Fig.5 Section of three stages of faults in Lungdong gas field

碳酸盐岩向碎屑岩过渡,发育近北西和北东向走滑断层,延伸距离约10~25 km,剖面上,断裂近乎陡直,向下断入震旦系,向上消失于奥陶系桑塔木组,断距一般小于100 m(图5-c)。该期断层是晚加里东期寒武系一下奥陶统烃源岩的原油充注的主要通道,沿断层分布形成古油藏。

晚海西期受区域性南北向挤压应力作用,工区西部发育两条近东西走向的逆冲断裂(桑塔木南断裂和桑塔木北断裂),剖面上呈“y”字形特征,其中桑塔木北断裂是一条主断裂,东西延伸约18 km,断距大,垂向断距最大达200 m,断开层位多,上至三叠系底,下至寒武系、震旦系;桑塔木南断裂是桑塔木北断裂的一条大的伴生断裂,断开层位少,上部仅断开石炭系,下部消失在奥陶纪地层中,垂向断距最大达150 m(图5-a)。桑塔木断裂控制了局部构造形态,构造脊部裂缝发育,井间连通性好。根据挤压应力的剪切分量分析,推测该时期南北向轮东1号走滑断裂已开始发育,整体表现为压扭性特征。

喜山期受张剪应力作用,贯穿工区的南北向轮东1号走滑断裂进一步活动,表现为右旋走滑特征,并伴生一些列北东-南西向次级走滑断裂,控制工区构造格局,轮东1号断裂区内延伸21.8 km,断开层位从基底至侏罗系,断距20~100 m。石炭系以下表现为压扭性质,在工区AG35和AG35-1井附近表现最为明显,奥陶系断面倾向多变,工区南部东倾,中部西倾,北部东倾,具有典型丝带状效应;同时平面上断层两盘高低关系一直在变化,具有明显海豚效应(图5-b)。石炭系及以上地层剖面上表现为负花状构造,断层性质由压扭转化为张扭性质,呈明显负反转构造,平面上表现为雁列式右旋走滑特征。轮东1号断裂是喜山期寒武系原油裂解气的主要充注通道,沿断裂走向裂缝发育,天然气富集。

## 2.2 岩心薄片裂缝特征

由于碳酸盐岩储层强非均质性,储层发育井段往往发生漏失,取心困难,岩心分析仅代表基质物性<sup>[1]</sup>。研究区岩心常规物性分析孔隙度样品1259块,渗透率样品963块,平均孔隙度1.615%,平均渗透率 $2.82 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。基质孔隙度差,次生的溶蚀孔、洞和裂缝是主要的储集空间,裂缝既是储集空间,又是渗滤通道。研究区9口井428.89 m岩心统计,共发育裂缝965条,其中未充填和半充填缝649

条,占裂缝总数的67.3%,以倾角 $>75^\circ$ 的高角度缝为主,缝密度1.22条/m(图6~图7)。

根据形成机理,裂缝分为构造缝、压溶缝和溶蚀缝。构造缝约占区内裂缝总数的60%,缝宽一般小于5 mm,主要为剪切缝,其次为张性缝。构造缝以垂直缝最为发育,早期构造缝平行排列,局部呈枝叉状和雁行状,多数已被方解石、泥质和沥青质全充填或半充填,局部区域多期不同产状的裂缝相互交切形成网状裂缝。压溶缝是由沉积负荷引起的压实作用和压溶作用形成,主要表现为缝合线,产状多与层面平行,呈锯齿状和肠状弯曲延伸,常被泥、铁质半充填或全充填,约占裂缝总数的20%。溶蚀缝主要由地表水和地下水沿早期的裂缝系统溶蚀扩大产生,呈弯曲分布,延伸短,缝宽一般 $>1 \text{ mm}$ ,沿断裂面上生长晶形完好的方解石晶体或晶簇,约占裂缝总数的15%(图6~图7)。

## 2.3 成像测井裂缝特征

成像测井是识别井周裂缝发育条数、产状和有效性等的直接手段。构造缝形成后,在后期应力和溶蚀改造下,会不断改变赋存状态,其中多期应力的改造作用目前测井技术不能有效识别,后期溶蚀作用造成的裂缝形态变化则能较好地由井壁图像上识别并确定<sup>[14-15]</sup>。

利用工区完钻32口井的成像测井资料,成像测井可识别的裂缝主要为构造缝、溶蚀缝和钻井诱导缝。构造缝主要为构造应力成因,裂缝形态完整,轨迹闭合;溶蚀缝由后期扩溶作用形成,缝面基本闭合,多不完整,呈不规则扩溶特征;钻井诱导缝为人工裂缝,由钻具机械诱导和地层应力释放造成,多为无效裂缝(图8)。

平面上,工区裂缝以高角度( $45^\circ \sim 75^\circ$ )裂缝为主,走向以NE-SW为主。有效裂缝具有更强的岩石切割破坏能力,裂缝宽度和密度越大,取心收获率越低,裂缝有效性越好。纵向上,良里塔格组裂缝发育受岩性控制,裂缝发育密度与自然伽马值(泥质-泥灰质含量)成反比,自然伽马值增大,泥质-泥灰质含量增高,裂缝发育密度降低,良里塔格组内部自然伽马值从约11 API变化到60 API以上,泥质-泥灰质含量从5%上升至40%以上,当自然伽马值达到45 API,泥质-泥灰质含量超过30%时,裂缝不发育。良里塔格组裂缝平均4条/100 m,以不

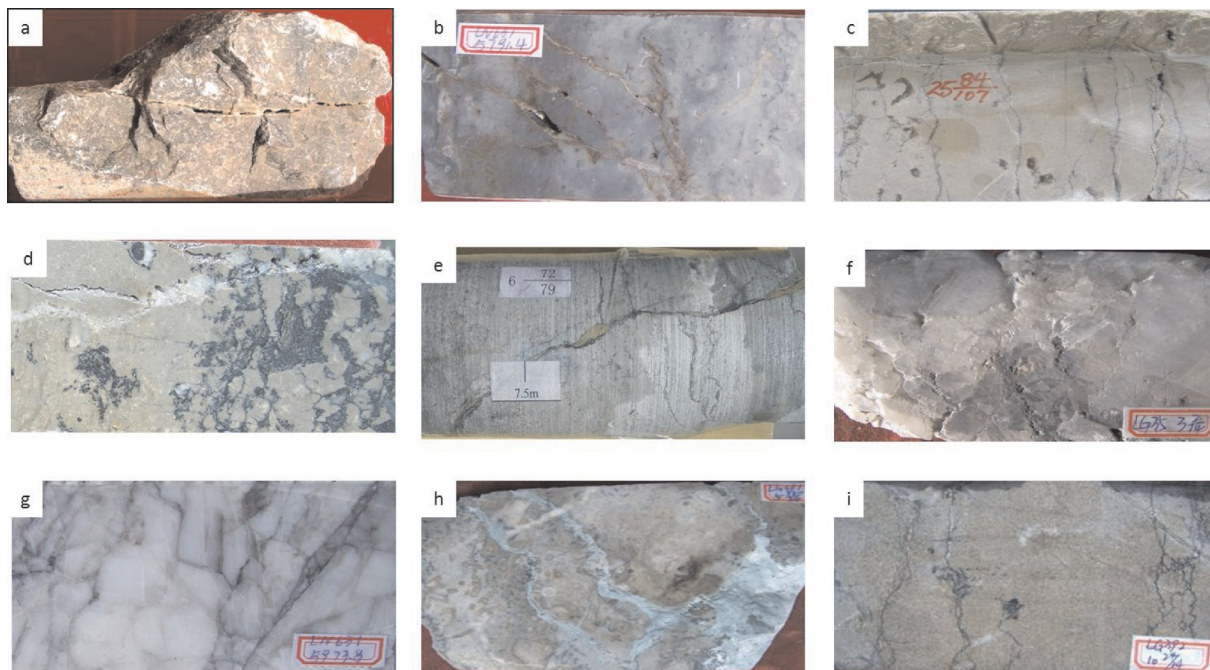


图6 轮古东气田奥陶系碳酸盐岩岩心照片

a—AF127井, 5569.8 m,  $O_{1-3y}$ , 泥晶灰岩, 高角度构造缝, 缝宽2~4 mm, 沿缝部分充填方解石; b—AN631井, 5791.5 m,  $O_{3t}$ , 亮晶生屑灰岩, 二组构造缝斜交, 沿裂缝溶蚀和充填, 缝面见氧化边; c—AN62井, 5782.3 m,  $O_{1-3y}$ , 颗粒灰岩, 晚期水平裂缝切割早期缝合线, 沿晚期裂缝部分溶蚀; d—AG392井, 6264.5 m,  $O_{3y}$ , 藻粘结砂砾屑灰岩, 高角度构造缝, 半充填方解石, 岩心上见构造缝不连续延伸; e—AN621井, 5766.2 m,  $O_{3t}$ , 颗粒灰岩, 早期缝合线被晚期高角度构造缝切割, 半充填泥质; f—AG35井, 6158.4 m,  $O_{3t}$ , 砂屑生屑灰岩, 早期溶洞充填角砾与巨晶方解石, 晚期裂缝切割早期裂缝, 沿晚期裂缝扩溶; g—AN631井, 5973.1 m,  $O_{1-3y}$ , 早期网状裂缝呈龟背状充填方解石, 晚期沿部分宽缝充填泥质, 岩心部分大理岩化; h—AG391井, 5817.2 m,  $O_{3l}$ , 生物砾屑灰岩, 生物为珊瑚和藻类, 为洞穴充填角砾, 砾间充填泥质; i—AG392井, 6345.7 m,  $O_{1-3y}$ , 亮晶颗粒灰岩, 缝合线发育

Fig.6 Core photos of Ordovician carbonate rock in Lungudong gas field

a—Well AF127, 5569.8 m,  $O_{1-3y}$ , cryptite, high angle structural fracture, width of fracture 2–4 m, partly filled with calcite along fractures; b—Well AN631, 5791.5 m,  $O_{3t}$ , calcsparite bioclastic limestone, two groups of structural fractures obliquely crossing, corroded and filled along fractures, oxidation edge distributed in fracture panel; c—Well AN62, 5782.3 m,  $O_{1-3y}$ , grained limestone, late period horizontal fractures cutting early stage furrow lines, partly corroded along late period fractures; d—Well AG392, 6264.5 m,  $O_{3y}$ , algal bound gritty limestone, high angle structural fracture, half filled with calcite, structural fractures discontinuously extending in core; e—Well AN621, 5766.2 m,  $O_{3t}$ , grained limestone, late period high angle structural fractures cutting early stage furrow lines, half filled with shale; f—Well AG35, 6158.4 m,  $O_{3t}$ , gritty bioclastic limestone, early period limestone cave filled with rubble giant crystal calcite, late period fractures cutting early period fractures. corroded along late period fractures; g—Well AN631, 5973.1 m,  $O_{1-3y}$ , early period calcite filling fractures like turtleback, late period part of broad fractures filled with shale, core partly marbleized; h—Well AG391, 5817.2 m,  $O_{3l}$ , bioclastic calcirudite, bioclasts consisting of coral and algae, cave filled with rubble stone, shale filling inter gravel; i—Well AG392, 6345.7 m,  $O_{1-3y}$ , calcsparite grained limestone, developing furrow lines

规则网状交切微细裂缝为主要特征, 裂缝开度较小, 少见大开度(窄缝以上)的构造缝, 平均缝宽  $26.9 \mu\text{m}$ , 中缝及宽缝(石油行业标准 SY/T 6286—1997)发育率 6.9%。一间房和鹰山组岩性较纯, 自然伽马值普遍低于 25 API, 平均约 16.8 API, 层组内泥质—泥灰质含量没有明显变化, 泥质含量平均约 2.3%。裂缝发育主要受断裂(应力强度)及构造控制, 岩性控制不明显, 裂缝发育程度高, 开度相对较大, 缝面溶蚀特征明显, 一间房组 14 条/100 m, 平均缝宽  $44.5 \mu\text{m}$ , 中缝及宽缝发育率 9.1%; 鹰山组 6 条/

100 m, 平均宽度  $37.5 \mu\text{m}$ , 中缝及宽缝发育率 9.8%。

## 2.4 地震预测裂缝特征

裂缝的存在会造成地震波频率随方位角变化, 在裂缝的法线方向, 频率随方位角的衰减不同于裂缝的走向方向, 地震波的衰减强度与裂缝的密度成正比, 裂缝越发育, 频率随方位角变化就越明显, 频率椭圆扁率的大小代表了频率的各向异性强度, 并且用这种强度来指示裂缝发育的强度。为得到准确的裂缝密度信息, 多井结合约束裂缝密度发育门槛, 利用研究区取心和成像测井对裂缝发育井和不

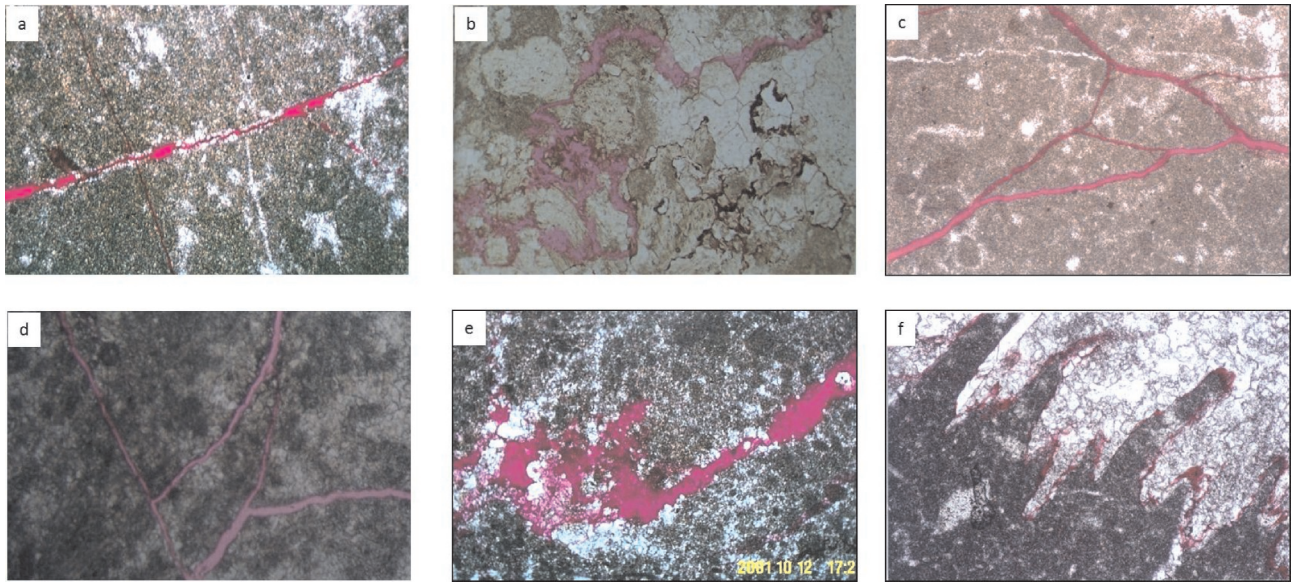


图7 轮古东气田奥陶系碳酸盐岩储层铸体薄片

a—AN48井, 5548.5 m,  $O_3y$ , 泥粉晶灰岩, 构造缝交织分布, 沿缝见扩溶现象, 红色铸体; b—AN621井, 5778.3 m,  $O_1-2y$ , 亮晶颗粒灰岩, 压溶和溶蚀缝, 红色铸体; c—AN14井, 5335.6 m,  $O_3l$ , 泥粉晶灰岩, 构造缝交织分布, 红色铸体; d—AG18井, 5540.2 m,  $O_3y$ , 粉晶灰岩, 构造缝交织分布, 红色铸体; e—AG39井, 5832.5 m,  $O_3y$ , 泥—亮晶颗粒灰岩, 沿构造缝扩溶后, 部分方解石充填, 红色铸体; f—AG391井, 5810.1 m,  $O_3l$ , 泥—亮晶颗粒灰岩, 压溶缝, 红色铸体

Fig. 7 Cast slice of Ordovician carbonate reservoir in Lungudong gas field

a—Well AN48, 5548.5 m,  $O_3y$ , powder micrite limestone, structural fractures interleave, expanded corrosion along fractures, red cast; b—Well AN621, 5778.3 m,  $O_{1-2}y$ , calcsparite grained limestone, pre-solution and corroded fractures, red cast; c—Well AN14, 5335.6 m,  $O_3l$ , powder micrite limestone, structural fractures interleave, red cast; d—Well AG18, 5540.2 m,  $O_3y$ , crystal powder limestone, structural fractures interleave, red cast; e—Well AG39, 5832.5 m,  $O_3y$ , micrite-calcsparite grained limestone, after expanding corrosion along fractures, partly filled with calcite, red cast; f—Well AG391, 5810.1 m,  $O_3l$ , micrite-calcsparite grained limestone, pre-solved fractures, red cast

发育井共同约束, 得到最终的裂缝预测数据体并进行裂缝平面预测(图9)。

研究区一间房组裂缝最发育, 利用成像测井资料约束, FRS叠前裂缝预测表明, 现今最大水平主应力方向、裂缝走向、裂缝分布范围及发育密度主要受断裂控制。

现今最大水平主应力方向指示地层岩石所承受的最大应力方向, 在同样的地层岩性、相似岩石机械强度条件下, 走向平行于最大水平主应力方向的裂缝系统在力学上最容易保存, 与之相交或垂直的裂缝则趋于闭合。轮古东气田成像测井解释仅AN171、AG38C井周边由于应力的复杂, 裂缝走向与主应力走向存在较大夹角, 其余区域裂缝走向与主应力走向基本一致, 裂缝走向以NE-SW向为主, 指示轮古东斜坡断裂系统更容易保持开启, 也更容易获得高产。不同期次、走向的断裂控制的裂缝走向略有差异, 南北向轮古东I号走滑断裂周边井裂

缝走向主要为NE 30°~50°; 北东向走滑断裂周边井裂缝走向主要为NE 30°~80°。

平面上, 裂缝主要分布在断裂周围1 km范围内, 成像测井及FRS叠前裂缝预测表明, 随着井点距断裂距离增大, 裂缝发育强度(裂缝线密度)呈指数降低, 当井点距断裂距离< 0.25 km, 裂缝发育密度快速增加, 当井点距断裂距离> 1 km, 裂缝发育差或不发育(图9, 图10), 与塔里木盆地西北缘柯坪—巴楚露头区多条走滑断裂的调查结论类似, 即随着距断裂距离的增大, 断裂控制的裂缝密度与距断裂距离呈指数递减关系<sup>[8-9]</sup>。

### 3 断裂破碎带结构与油气关系

#### 3.1 断裂破碎带结构

走滑断裂构造样式, 一般由一系列产状陡倾的大型—巨型平移断层及其间的断夹块体组成, 平面上表现为雁列式、斜列式或帚状构造样式, 在剖面



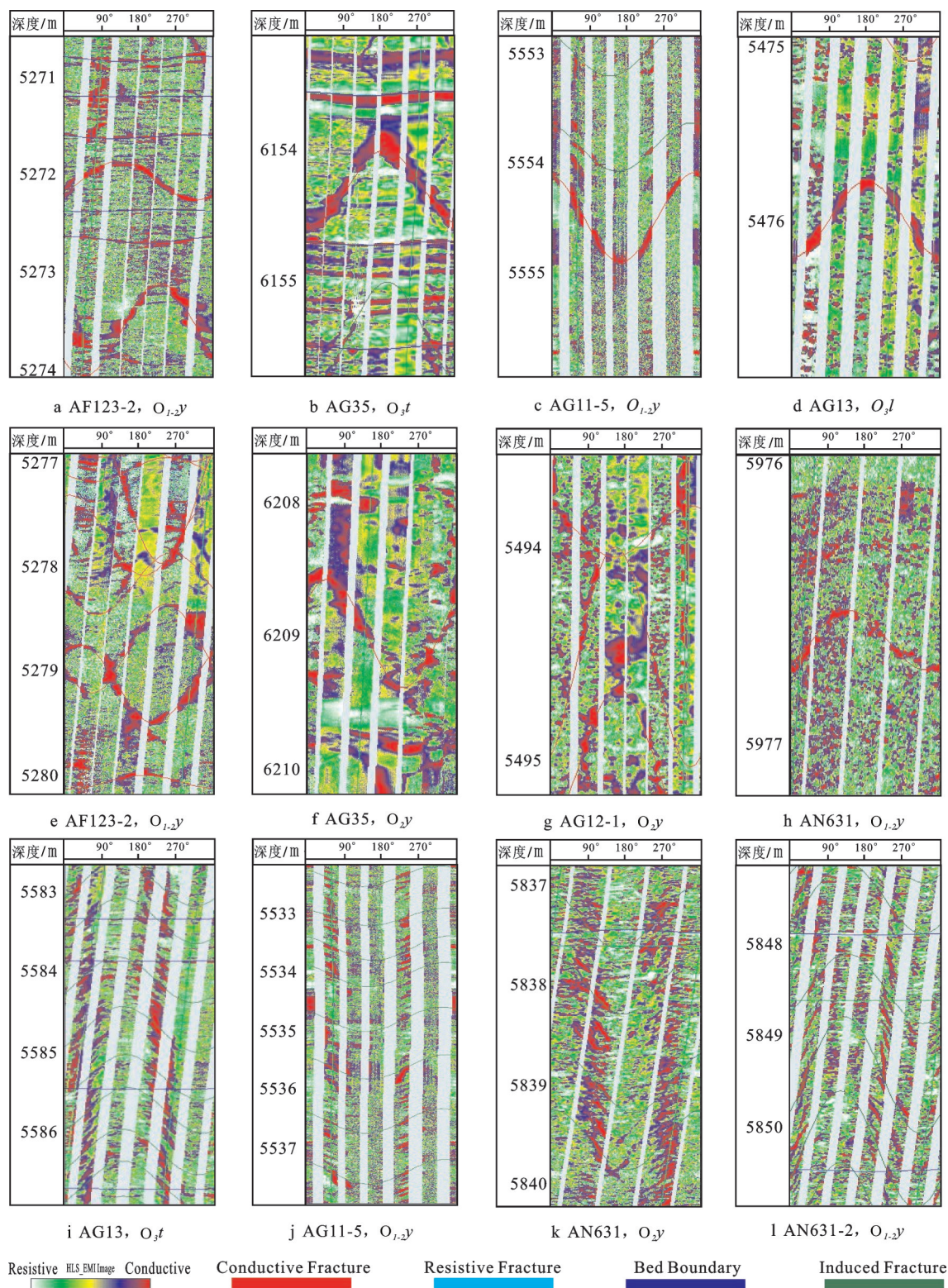


图8 轮古东气田奥陶系碳酸盐岩测井裂缝发育特征

a、b、c、d—高角度构造窄裂缝,缝面形态基本完整,轨迹闭合;e、f、g、h—高角度构造窄裂缝,沿缝不规则扩溶;i、j、k、l—斜交羽状诱导微裂缝

Fig. 8 Ordovician carbonate logging fracture development characteristics in Lungudong gas field

a, b, c, d—High angle structural narrow fracture, fracture plane form is mostly intact, track closed; e, f, g, h—High angle structural narrow fracture, irregular broaden corrosion; i, j, k, l—Obliquely crossing pinnate lead tiny fracture

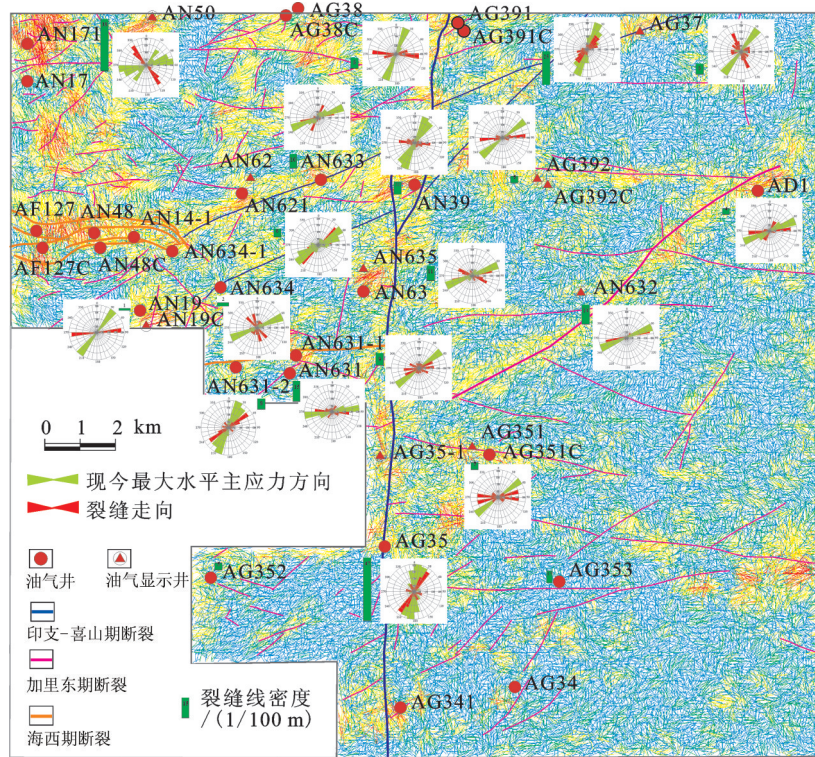


图9 轮古东——间房组FRS叠前裂缝预测与测井裂缝走向、密度叠合图

Fig.9 Overlapping figure of Lungudong–Yijianfang Formation FRS pre-stack fracture forecasting and strike and density of logging fracture

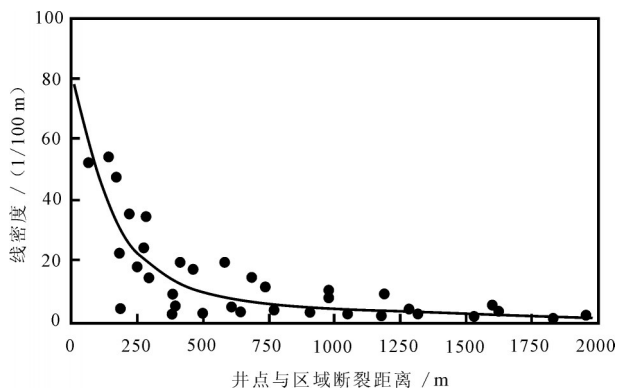


图10 轮古东气田距走滑断裂距离与裂缝发育密度关系图

Fig.10 The relationship between the distance by strike slip fault and fracture development density in Lungudong gas field

上表现为陡立的断层带或断夹块的相间排列<sup>[16-19]</sup>。由于力学机制复杂,走滑断裂构造样式的差异造成走滑断裂破碎带在三维空间具有复杂的结构,对断裂破碎带组合方式的刻画对储层与油气运聚关系密切<sup>[8-11,16-19]</sup>。针对研究区气藏特征,以主干走滑断

裂为主线,以次级和微断裂为骨架,以裂缝为脉络,将研究区断裂破碎带平面上划分为“羽状破碎带、转换破碎带、斜列破碎带、复合破碎带”4种组合模式(图11)。

“羽状破碎带”指次级和微断裂发育,储层沿破碎带呈散开状发育,剖面上为正花状断裂,平面上次级裂缝沿主干断裂呈羽状分布。羽状破碎带为有利的储层发育区,轮古东目前AG341、AG353、AG391C等高产井钻探区域为羽状破碎带。AG391井钻探断裂下盘的羽状破碎带,取心和成像测井证实,鹰山组发育II类裂缝孔洞型储层51.5 m/8层,平均孔隙度2.83%;III类孔洞型储层13 m/1层,孔隙度1.8%。鹰山组裂缝发育,为高角度的窄缝,以构造剪切缝为主,底部存在少量的构造张性缝,且沿裂缝有扩溶作用,该井累产油 $0.16 \times 10^4$  t,累产气 $0.25 \times 10^8$  m<sup>3</sup>;AG391C井钻探临近的断裂上盘的羽状破碎带,效果要好于AG391井,目前已累产油 $0.55 \times 10^4$  t,累产气 $0.61 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,一方面表明羽状破碎带局部构造高点油气更为富集;另一方也证实,羽状破碎带

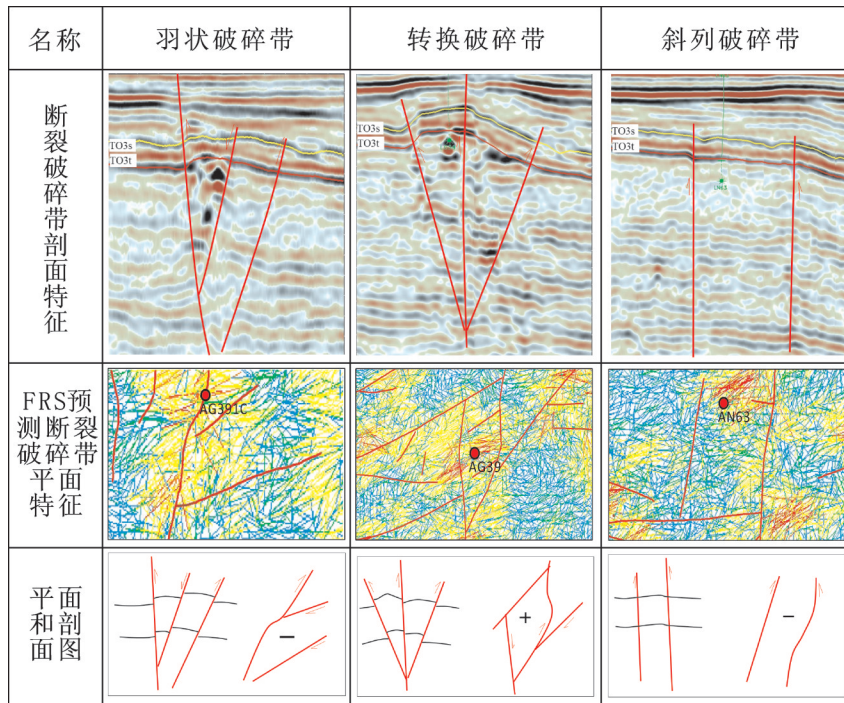


图11 轮古东气田断裂破碎带结构

Fig.11 The structure of fault crushed zone in Lungudong gas field

内部结构复杂,断裂上盘和下盘之间存在油气的侧向封堵。目前塔里木盆地塔中I号气田Z15井区已通过水平井穿主干断裂钻探羽状破碎带的多个串珠集合体,完钻13井取得预期效果,已建成黑油年产能 $25 \times 10^4 \text{ t}^2$ 。

“转换破碎带”指走滑断裂转换部位,应力从一条断层逐渐转至另一条断层,特定部位同时发育两条走滑断裂,裂缝主要发育于两断层叠置的转换破碎带内。研究区仅AG39井发育,剖面上为正花状断裂,平面上轮东1号断裂AG39构造分段转换形成局部构造,主要的构造变形层系位于中上奥陶统,石炭系地层无明显的构造变形,上奥陶统良里塔格组地层厚度没有明显变化。AG39井钻探构造高点,实钻证实储层发育,上奥陶统良里塔格组与下奥陶统鹰山组均发育储层且测试均获得高产,成相测井解释储层以裂缝孔洞型储层为主,II类储层2.5 m/1层,孔隙度3%,III类储层66.5 m/7层,平均孔隙度1.63%,裂缝主要集中发育于良里塔格组表层,以构造张性缝为主,扩溶现象明显,裂缝走向为东西向,应力走向为北东向,与裂缝走向存在 $40^\circ$ 夹角。该井良里塔格试采,已累产油 $0.94 \times 10^4 \text{ t}$ ,累产气 $1.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

“斜列破碎带”指裂缝在主干和次级断裂集中

发育,储层沿走滑断裂呈线性分布,剖面上次级断裂与主干断裂近平行排列,呈近直立状,平面上次级断裂和裂缝分布于主干断裂的二侧,呈大角度斜交。目前轮古东区块仅轮古35-1钻遇该破碎带,测井解释II类储层4.5 m/1层,孔隙度2.7%;III类储层36 m/5层,平均孔隙度1.72%。由于该井井下落鱼未能投产,产能情况有待后续评价。

“复合破碎带”指走滑断裂和逆冲断裂相互作用,裂缝在断裂交汇部位集中发育。研究区仅发育在桑塔木断垒带东部,由于东西向的逆断裂形成于海西期,控制了桑南断垒带的构造形态,构造高部位裂缝发育且断裂的多期活动,油气多期充注与调整,该区为复式油气聚集区,已经在奥陶系、石炭系和三叠系多个层段获得工业产能,建成黑油年产能规模30万 $\text{t}^{[1]}$ 。奥陶系碳酸盐岩以裂缝孔洞型储层为主,除个别井分析困难外,近20多年的开发已基本证实,构造高部位整体连通。

### 3.2 断裂破碎带与油气关系

轮古东奥陶系碳酸盐岩凝析气藏优质储层的发育主要受控于岩溶作用与断裂活动,羽状破碎带以高角度断裂及伴生微裂缝发育为主,多期多组断裂裂缝叠加,是岩溶储层发育最有利部位,分布面

积最广,是油气最富集的区域。

在加里东晚期,轮古东东倾斜坡形成,顺层岩溶开始发育;晚加里东末期—早海西期的地层抬升过程中,构造运动产生了大量裂缝,部分裂缝沟通地表水,顺层溶蚀形成大量次生溶蚀孔、洞和缝;在海西末期—印支初期的第二次抬升中,断裂活动形成的众多断裂及伴生裂缝,可能会使早期充填的裂缝重新开启,对储集体的改造起重要作用;燕山—喜山期,轮古东内幕储层被迅速埋藏,从中生代晚期开始的有机质热演化所产生的酸性水沿裂隙渗入,内幕原有的孔、洞、缝发生扩溶。可见,加里东期地层短期暴露,加里东期走滑断裂及其破碎带是岩溶作用的先期通道,增加了地表水及地下水与碳酸盐岩的接触面积和溶蚀范围,甚至在碳酸盐岩内部形成一个连续的淡水溶蚀系统,再加之海西期构造运动使部分裂缝开启,极大的改善了碳酸盐岩的渗滤能力<sup>[20-21]</sup>。

轮古东气田天然气主要来源于寒武系,原油主要来源于中—上奥陶统<sup>[13]</sup>。“十五”以来,中石油塔里木油田分公司针对奥陶系碳酸盐岩的科技攻关及勘探开发实践已经证实,油气的远距离和超远距离及水平运聚难度较大,主要以“原地垂向立体网状运移”为主要特征。轮古东走滑断裂及其破碎带以高角度断裂为主,沟通下部烃源岩,是油气运移的主要输导体系。由于断裂的多期活动和断层性质的相互转化,轮古东走滑断裂附近集中了未饱和凝析气藏并控制了垂向上含气饱和度的变化,天然气晚期充注时,沿断裂向上运移的大量天然气的气侵作用造成油气相态分异,从而造成轮古东现今油气分布状况,即以轻质油和天然气为主,局部缝洞体中含有早期充注的中质和重质原油。中质和重质原油主要分布于北西向次级走滑断裂及伴生裂缝不发育且晚期气侵作用较弱区域。此外,盖层控制了轮古东气田相态的保存,轮古东地区上奥陶统桑塔木组泥岩横向分布稳定,纵向上分布较集中,厚度490~660 m,且岩性致密,垂向断层对气藏的破坏作用较弱,封隔条件较好,是中下奥陶统储层的良好盖层。

## 4 结 论

(1)轮古东气田主干断裂分3期4组。第一期为中晚加里东期近北东、北西向走滑断裂;第二期为晚海西期近东西向逆冲断裂;第三期为喜山期近

南北、北东向走滑断裂。

(2)裂缝主要为高角度(45°~75°)构造窄裂缝,沿缝存在溶蚀,走向主要为NE-SW。纵向上,裂缝发育密度与自然伽马值(泥质-泥灰质含量)成反比,一间房组裂缝发育密度最大(14条/100 m),其次为鹰山组(6条/100 m)和良里塔格组(4条/100 m);平面上,裂缝主要分布在主干断裂周边1 km范围内,随着距断裂距离增大,裂缝发育强度(裂缝线密度)呈指数降低。

(3)断裂破碎带平面上划分为“羽状破碎带、转换破碎带、斜列破碎带、复合破碎带”4种结构。走滑断裂及其破碎带是油气的主要输导体系,控制了油气的富集与油气相态的分异,羽状破碎带分布面积广,是油气最富集的区域。

**致谢:**感谢塔里木油田分公司勘探开发研究院敬兵和胡太平高级工程师的指导和帮助,感谢审稿专家提出的宝贵修改意见。

## 参考文献(References):

- [1] 张丽娟, 马青, 范秋海, 等. 塔里木盆地哈6区块奥陶系碳酸盐岩古岩溶储层特征识别及地质建模[J]. 中国石油勘探, 2012, (2): 1-7. Zhang Lijuan, Ma Qing, Fan Qiuhai, et al. Paleokarst reservoir recognition and geology modeling of Ordovician Carbonate of block Ha 6 in Tarim basin[J]. China Petroleum Exploration, 2012, (2): 1-7(in Chinese with English abstract).
- [2] 韩杰, 江杰, 张敏, 等. 断裂及其裂缝发育带在塔中碳酸盐岩油气勘探中的意义[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(2): 11-20. Han Jie, Jiang Jie, Zhang Min, et al. Significance of fault and fracture developing area in carbonate oil and gas exploration of Tazhong[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Natural Sciences Edition), 2015, 37(2): 11-20(in Chinese with English abstract).
- [3] 王福焕, 王振宇, 张云峰, 等. 轮古东奥陶系断裂特征及其对油气成藏的控制[J]. 中国石油勘探, 2011, 1: 15-20. Wang Fuhuan, Wang Zhenyu, Zhang Yunfeng, et al. Fault characteristics and their controlling roles to hydrocarbon pool-formation of Ordovician in eastern Lungu[J]. China Petroleum Exploration, 2011, 1: 15-20(in Chinese with English abstract).
- [4] 邬光辉, 成丽芳, 刘玉魁, 等. 塔里木盆地寒武奥陶系走滑断裂系统特征及其控油作用[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(3): 239-243. Wu Guanghui, Cheng Lifang, Liu Yukui, et al. Strike-slip fault system of the Cambrian-Ordovician and its oil-controlling effect in Tarim basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(3): 239-243(in Chinese with English abstract).
- [5] 赵文智, 朱光有, 杨海军, 等. 中国海相油气多期充注与成藏聚集

- 模式研究——以塔里木盆地轮古东地区为例[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 709–721.
- Zhao Wenzhi, Zhu Guangyou, Yang Haijun, et al. Study on the multi-stage charging and accumulation model of Chinese marine petroleum: Example from eastern Lungu area in the Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 709–721(in Chinese with English abstract).
- [6] 李本亮, 管树巍, 李传新, 等. 塔里木盆地塔中低凸起古构造演化与变形特征[J]. 地质论评, 2009, 55(4): 521–529.
- Li Benliang, Guan Shuwei, Li Chuanxin, et al. Paleo-tectonic evolution and deformation features of the lower uplift in the Central Tarim Basin[J]. Geological Review, 2009, 55(4): 521–529 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李传新, 贾贵造, 李本亮, 等. 塔里木盆地塔中低凸起北斜坡古生代断裂展布与构造演化[J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1065–1073.
- Li Chuanxin, Jia Chengzao, Li Benliang, et al. Distribution and tectonic evolution of the Paleozoic fault system, the north slope of Tazhong uplift, Tarim basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(8): 1065–1073(in Chinese with English abstract).
- [8] 张庆莲, 侯贵廷, 潘文庆, 等. 新疆巴楚地区走滑断裂对碳酸盐岩构造裂缝发育的控制[J]. 地质通报, 2010, 29(8): 1160–1167.
- Zhang Qinglian, Hou Guiting, Pan Wenqing, et al. Development of fractures in carbonate rocks under the influence of strike-slip faults in Bachu area, Xinjiang, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(8): 1160–1167(in Chinese with English abstract).
- [9] 潘文庆, 侯贵廷, 齐英敏, 等. 碳酸盐岩构造裂缝发育模式探讨[J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 188–196.
- Pan Wenqing, Hou Guiting, Qi Yingmin, et al. Discussion on the development models of structural fractures in the carbonate rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(5): 188–196(in Chinese with English abstract).
- [10] 郭光辉, 李启明, 肖中尧, 等. 塔里木盆地古隆起演化特征及油气勘探[J]. 大地构造与成矿学, 2009, (1): 18–23.
- Wu Guanghui, Li Qiming, Xiao Zhongyao, et al. The evolution characteristics of palaeo-uplifts in Tarim basin and its exploration directions for oil and gas[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, (1): 18–23(in Chinese with English abstract).
- [11] 孙东, 潘建国, 雍学善, 等. 碳酸盐岩储层垂向长串珠形成机制[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1): 101–106.
- Sun Dong, Pan Jianguo, Yong Xueshan, et al. Formation mechanism of vertical “long string beads” in carbonate reservoir[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(1): 101–106 (in Chinese with English abstract).
- [12] 刘静江, 刘池洋, 孙洪海. 塔里木盆地轮南地区奥陶系沉积储层研究新进展[J]. 中国地质, 2007, 34(3): 515–521.
- Liu Jingjiang, Liu Chiayang, Sun Honghai. New advances in the study of Ordovician sedimentary reservoirs in Lunnan, Tarim basin[J]. Geology in China, 2007, 34(3): 515–521(in Chinese with English abstract).
- [13] 杨海军, 郝芳, 韩剑发, 等. 塔里木盆地轮南低凸起断裂系统与复式油气聚集[J]. 地质科学, 2007, 47(4): 795–811.
- Yang Haijun, Hao Fang, Han Jianfa, et al. Fault systems and multiple oil-gas accumulation play of the Lunnan lower uplift, Tarim basin[J]. Chinese Journal of Geology(Scientia Geologica Sinica), 2007, 47(4): 795–811(in Chinese with English abstract).
- [14] 祁兴中, 潘懋, 潘文庆, 等. 轮古碳酸盐岩储层测井解释评价技术[J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 49–52.
- Qi Xingzhong, Pan Mao, Pan Wenqing, et al. Well logging interpretation and evaluation technologies of Paleozoic carbonate reservoir in Lunnan[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(1): 49–52 (in Chinese with English abstract).
- [15] 吴兴能, 肖承文, 张承森, 等. 基于交会技术的碳酸盐岩多矿物处理新方法[J]. 测井技术, 2014, 38(2): 228–233.
- Wu Xingneng, Xiao Chengwen, Zhang Chengsen, et al. New interpretation method of carbonate multi-minerals reservoir based on crossplot technology[J]. Well Logging Technology, 2014, 38(2): 228–233(in Chinese with English abstract).
- [16] 高红芳, 王衍棠, 郭丽华. 南海西部中建南盆地油气地质条件和勘探前景分析[J]. 中国地质, 2007, 34(4): 592–598.
- Gao Hongfang, Wang Yantang, Guo Lihua. Petroleum geological conditions and prospects in the Zhongjiannan basin in the western South China Sea[J]. Geology in China, 2007, 34(4): 592–598(in Chinese with English abstract).
- [17] 孙丰月, 王力, 霍亮, 等. 黑龙江乌拉嘎大型金矿床流体包裹体特征及矿床成因研究[J]. 中国地质, 2008, 35(6): 1267–1273.
- Sun Fengyue, Wang Li, Huo Liang, et al. Fluid inclusion study on Wulaga gold deposit in Heilongjiang Province and implications for ore genesis[J]. Geology in China, 2008, 35(6): 1267–1273(in Chinese with English abstract).
- [18] 王平. 为什么二、三级断层对油气聚集起控制作用——复杂断块油气田形成条件系列论文之四[J]. 断块油气田, 1994, 1(5): 1–5.
- Wang Ping. The controlling mechanism of second or third-class faults on hydrocarbon migration and accumulation[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1994, 1(5): 1–5(in Chinese with English abstract).
- [19] 兰晓东, 吕修详, 朱炎铭, 等. 走滑断裂与盖层复合成藏模式——以塔中东部中古51井区鹰山组为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 107–115.
- Lan Xiaodong, Lv Xiuxiang, Zhu Yanming, et al. Hydrocarbon accumulation pattern jointly controlled by strike-slip faults and cap rocks: a case from Yingshan Formation in ZG-51 wellblock of eastern Tazhong area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 107–115(in Chinese with English abstract).
- [20] 王晓梅, 张水昌. 轮南地区天然气分布特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 204–209.
- Wang Xiaomei, Zhang Shuichang. Distribution and genesis of natural gas in Lunnan area[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(2): 204–209(in Chinese with English abstract).
- [21] 康玉柱. 塔里木盆地塔河大油田形成的地质条件及前景展望[J]. 中国地质, 2002, 30(3): 315–319.
- Kang Yuzhu. Geological characteristics of the formation of the large Tahe oilfield in the Tarim basin and its respects[J]. Geology in China, 2002, 30(3): 315–319(in Chinese with English abstract).