

低渗透砂岩储层裂缝特征及控制因素 ——以莺歌海盆地L气田黄流组为例

张冠杰¹, 吴孔友², 范彩伟³, 何小胡⁴, 刘敬寿¹, 雷新⁴

1 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室; 2 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院;

3 中海石油(中国)有限公司湛江分公司; 4 中海石油(中国)有限公司海南分公司

摘要 莺歌海盆地L气田含气层系为典型的低渗透砂岩储层。对中新统黄流组成像测井、钻井岩心以及薄片等不同尺度的裂缝进行研究,并结合全岩矿物分析、岩心孔渗分析等测试结果,明确了低渗透砂岩储层裂缝发育特征与主控因素。研究结果表明:①区内构造裂缝占80%以上,以剪性裂缝为主,张性裂缝次之;裂缝倾角以低角度和水平为主(占65%以上)。②影响裂缝发育程度的主要因素包括地层曲率、断裂位置、岩石力学参数、基质孔隙度和渗透率、岩性以及单砂体厚度。对于地层曲率较大的部位及断裂发育部位,以及粒度较小、脆性较高的岩石,裂缝发育程度较高;裂缝发育程度与单砂体厚度呈幂指数负相关,但当单砂体厚度大于4.7 m后,二者相关性逐渐变弱;随着基质孔隙度与渗透率的增高,裂缝发育程度呈现先增大后减小的趋势,当基质孔隙度介于8%~10%、基质渗透率介于 $(1.3\sim 1.5)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,构造裂缝最为发育;裂缝发育程度受岩石弹脆性和应变能影响,表现为随着岩石杨氏模量的增高,裂缝发育程度先增大后减小。③新近纪以来莺歌海盆地发生快速沉积,深层普遍存在强烈的欠压实,底辟构造广泛发育,较弱的层面上拱导致黄流组厚层泥质岩所夹的砂岩薄层集中产生独特的低角度裂缝。

关键词 低渗透砂岩; 裂缝; 控制因素; 黄流组; 莺歌海盆地

中图分类号: TE122.2 **文献标识码**: A

0 前言

随着我国油气勘探开发的快速发展,低渗透砂岩油气的重要性日益升高^[1]。低渗透砂岩储层常具有脆性高、厚度大以及岩相变化幅度较大和内部裂缝发育情况复杂的特点^[2],在注水开发过程中,常因裂缝发育段的高渗透性与基质的低渗透性产生矛盾^[3-4],而且储层裂缝是衔接地质甜点与工程甜点的桥梁^[1],所以针对低渗透砂岩储层裂缝的研究应贯穿整个勘探开发过程^[5]。

莺歌海盆地L气田^[6]是近年来我国海上勘探开发的重点气田,深部中新统黄流组是勘探的重点层位^[7]。L气田黄流组埋藏深、基质孔渗性差,裂缝对储层的改造至关重要,但关于区内储层裂缝综合表征及储层裂缝发育影响因素的分析研究还比较缺

乏。本文通过对成像测井、钻井岩心以及薄片等不同尺度裂缝的观察统计,结合全岩矿物和岩心孔渗分析,对黄流组低渗透砂岩储层裂缝特征进行了定量表征,研究了地层曲率、断裂位置、岩石力学参数、岩性、单砂体厚度以及基质物性对裂缝发育的影响,在此基础上进一步分析了不同盆地砂岩储层构造裂缝主控因素的差异性,以期对L气田的储层裂缝预测提供指导,并对L气田下一步的勘探开发提供参考。

1 区域地质概况

莺歌海盆地位于南海北部被动大陆边缘,是新生代走滑-伸展盆地^[8],经历了古近纪裂陷期和新近纪—第四纪裂后热沉降期^[9-10]。L气田位于莺歌海凹陷中央底辟带与莺东斜坡带之间的过渡区南部

收稿日期: 2021-05-10; 改回日期: 2021-12-08; 网络出版日期: 2022-08-09

本文受中国科学院先导科技A类专项“深层油气形成与分布预测”(编号:XDA14010301)、中国博士后面上基金“低渗透砂岩储层岩石力学表征方法研究”(编号:2019M662464)资助

第一作者: 张冠杰, 博士在读,从事地质构造与油气成藏研究。通信地址: 430074 湖北省武汉市中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室; E-mail: zgj199688@163.com

通信作者: 吴孔友, 博士, 教授, 从事地质构造与油气成藏研究。通信地址: 266580 山东省青岛市中国石油大学(华东)地球科学与技术学院; E-mail: wukongyou@163.com

(图1a),由多个岩性气藏组成(图1b),为近年来新发现的千亿方级大气田^[6,10-11]。受莺东断裂、1号断裂影响,气田区在断陷阶段发育箕状断陷,在坳陷阶段发育雁列式的大型底辟构造^[12];在底辟背斜形成过程中发育了一系列张性隐伏断裂^[13],断裂在剖

面上呈类花状分布,平面上以底辟为中心向四周呈放射状展布,将背斜分隔成不同断块。近年勘探发现,在底辟及周边深部存在大量微裂缝,它们构成了L气田高温高压背景下天然气运移的重要通道^[14]。

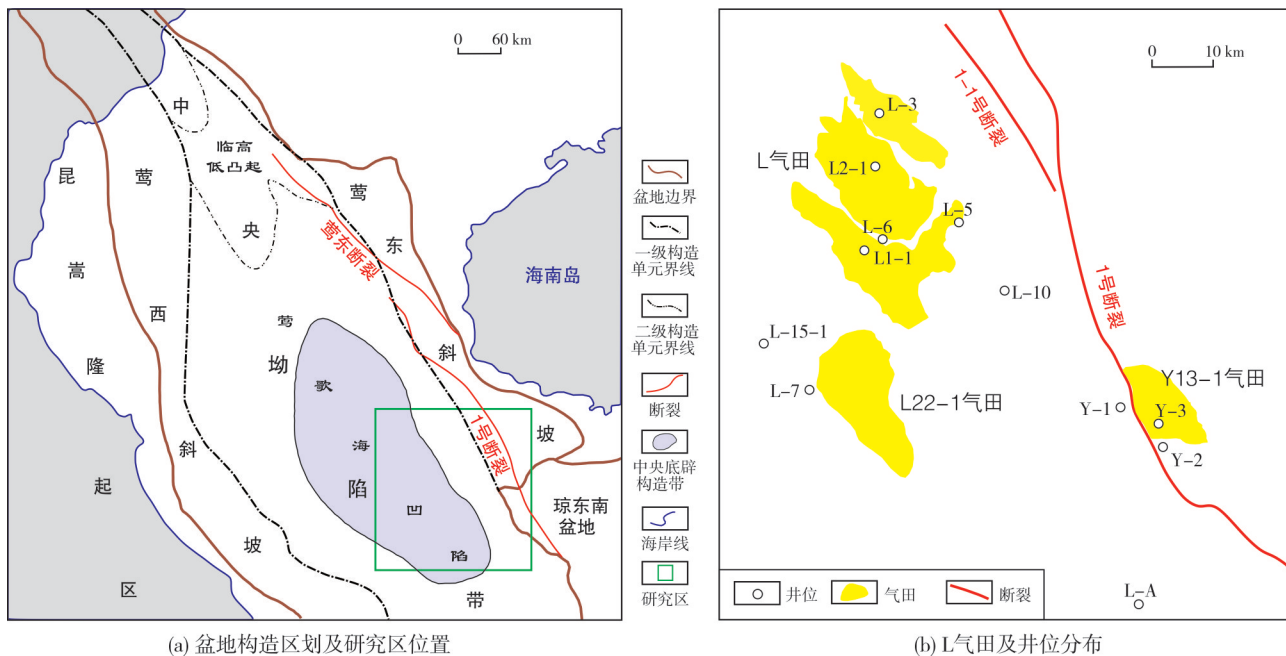


图1 莺歌海盆地L气田构造位置及钻井分布图(引自文献[6],有修改)

Fig. 1 Tectonic location and well distribution of L Gasfield in Yinggehai Basin (cited from reference [6], modified)

L气田钻遇的地层从下到上为渐新统崖城组、陵水组,中新统三亚组、梅山组、黄流组,上新统莺歌海组及第四系乐东组,主要的含气层位为黄流组、梅山组。本文研究的目的层为黄流组。黄流组主要发育浅海浊积扇,主要的沉积微相包括浊积水道、水道间漫溢沉积以及天然堤^[15],其中浊积水道砂岩为研究区主要的储集体。黄流组砂岩岩性主要为粉—细砂岩和中砂岩,单砂体厚度较薄,主要分布在0~30 m之间,储集空间主要为粒间孔、粒内溶孔以及微裂缝。岩样测试表明:黄流组砂岩孔隙度为8.5%~12.3%,渗透率为 $(0.04\sim10)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,储层物性较差,属特低—低渗储层^[16]。

2 储层裂缝发育特征

2.1 不同尺度视域下的裂缝特征

L气田黄流组低渗透砂岩储层发育不同级次的裂缝,本文从成像测井(FMI)、岩心、薄片镜下3个尺度进行研究。

2.1.1 FMI图像裂缝特征

根据研究区7口井FMI图像的正弦曲线形状、颜色以及形态特征,精确识别了天然裂缝的主要类型及其组合形式,并定量拾取出裂缝走向、倾角等信息。解释出的73条天然裂缝中主要发育高导缝(45条,占61.64%),其次为高阻缝(18条,占24.66%),再次为溶蚀缝(10条,占13.70%)。构造裂缝存在4种组合形式(图2):平行式(图2a),2条或2条以上裂缝产状近似;网状式(图2b),多条裂缝相互交织,产状无明显规律;共轭式(图2c),2条裂缝倾角大小相似,倾向相反、走向相同;“Y”字形(图2d),2组裂缝呈角度相交,平面上呈现“Y”字形。研究区主要发育低角度($15^\circ<\theta<45^\circ$)裂缝(54条,占73.97%),局部发育少量高角度($45^\circ<\theta<75^\circ$)裂缝(12条,占16.44%)和直立($\theta>75^\circ$)裂缝(3条,占4.11%)(图3a)。构造裂缝的走向以NW—SE向为主,少量为近E—W向、NE—SW向以及近S—N向,走向分布较为集中(图3b)。

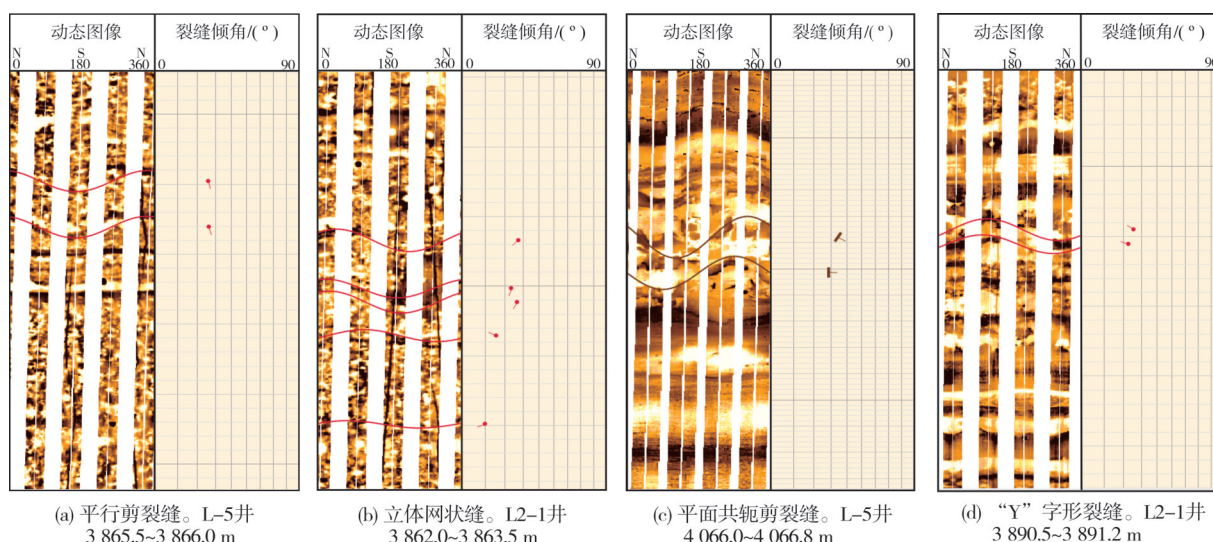
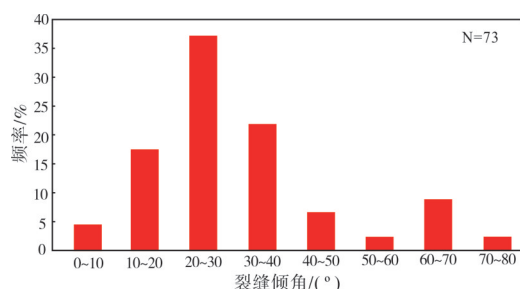
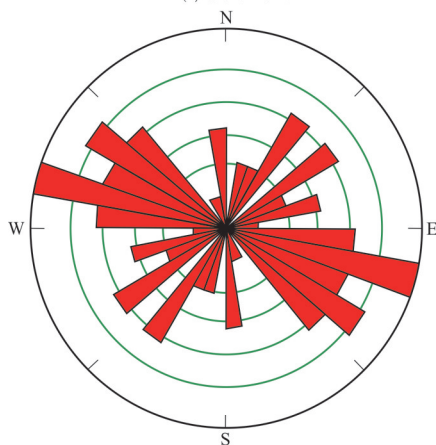


图2 莺歌海盆地L气田黄流组二段FMI图像构造裂缝发育特征

Fig. 2 FMI images showing structural fracture characteristics of the Huangliu Member 2 in L Gasfield, Yinggehai Basin



(a) 倾角直方图

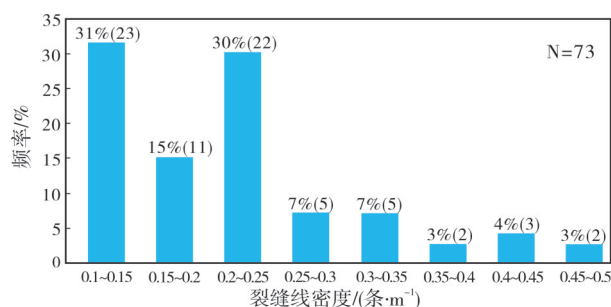


(b) 走向玫瑰花图

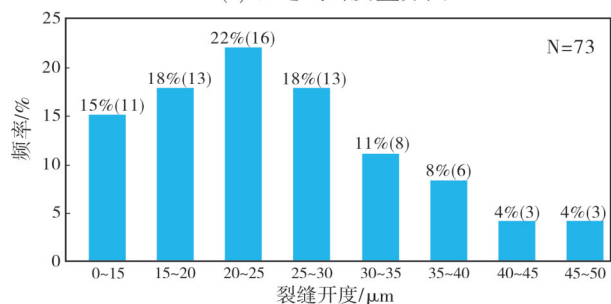
图3 莺歌海盆地L气田黄流组FMI图像构造裂缝产状统计图

Fig. 3 Statistics of structural fracture occurrence in FMI images of Huangliu Formation in L Gasfield, Yinggehai Basin

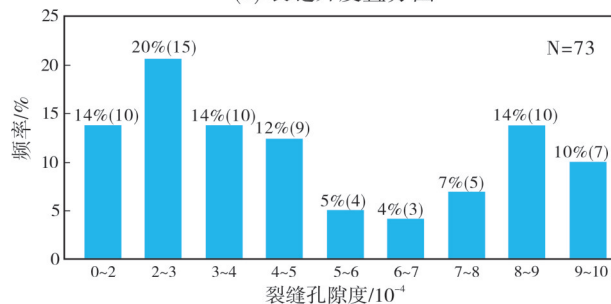
基于构造裂缝产状,对构造裂缝的线密度、视开度、孔隙度等特征参数进行了定量计算^[17]及统计分析(图4),可更为直观地了解区域裂缝发育程度,并为讨论裂缝发育的主控因素以及裂缝与含气性的关系提供准确的基础资料^[18]。



(a) 裂缝线密度直方图



(b) 裂缝开度直方图



(c) 裂缝孔隙度直方图

图4 莺歌海盆地L气田黄流组FMI图像构造裂缝特征参数直方图

Fig. 4 Histograms of structural fracture parameters in FMI images of Huangliu Formation in L Gasfield, Yinggehai Basin

裂缝线密度普遍偏低(图4a),大于0.25条/m的主要为局部密集发育的高导缝,小于0.2条/m的主要为高阻缝;裂缝视开度主要集中在0~50 μm 范围内(图4b),其中20~30 μm 范围内29条、占39.73%,0~20 μm 范围内24条、占32.88%,仅少部分大于35 μm ;裂缝孔隙度主要集中在0~0.1%之间(图4c),其中0.02%~0.05%范围内34条、占46.58%,0.08%~0.1%范围内17条、占23.29%,0.05%~0.08%范围内12条、占16.44%。

2.1.2 岩石裂缝特征

通过系统的岩心观察,可见L气田黄流组低渗透砂岩的裂缝类型主要包括构造裂缝与非构造裂

缝。构造裂缝以剪性裂缝为主,该类裂缝开度较小,裂缝倾角从水平、低、高到直立均有见到,其裂缝面较为平直,在岩心上的延伸长度变化较大(0~20 cm);充填程度较低,大部分未充填,仅少数呈半充填、全充填状态(图5a)。张性裂缝发育较剪性裂缝少,裂缝面弯曲不平,开度较剪性缝大,在岩心上呈波浪状延伸,产状变化较剪性裂缝大(图5b);可见裂缝被方解石、黄铁矿等矿物充填,并伴有少量的矿物溶蚀现象(图5c,5d)。非构造裂缝主要为成岩裂缝,包括溶蚀缝和层理缝。层理缝多被方解石充填,这种裂缝延伸有限,缝面弯曲呈不规则状,宽度较窄,对储层物性改善作用较小。

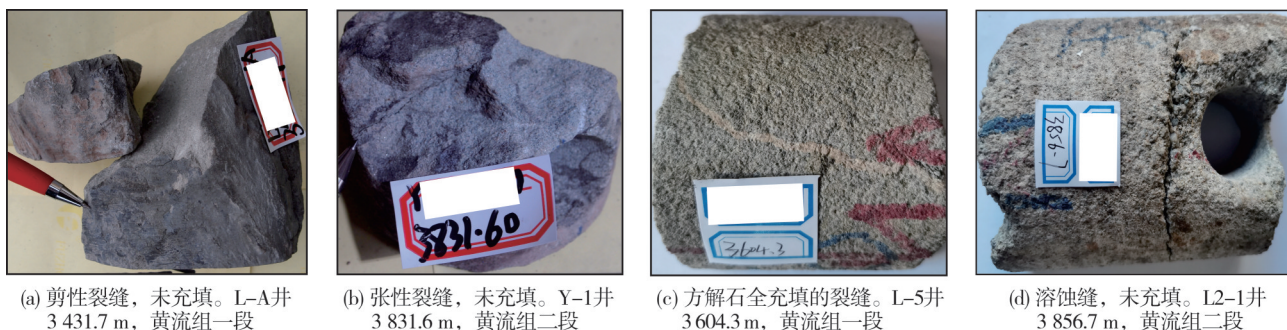


图5 莺歌海盆地L气田黄流组砂岩岩心裂缝特征

Fig. 5 Core photos showing fracture characteristics of sandstone of Huangliu Formation in L Gasfield, Yinggehai Basin

对观察到的23条岩心裂缝进行统计分析,结果表明:构造裂缝在岩心裂缝中的占比最大(82.33%),裂缝发育深度分布均匀,黄流组各段均有裂缝发育;以低角度裂缝为主(占比63.55%),高角度裂缝次之,水平以及直立裂缝发育较少;与成像测井解释结果相似,构造裂缝中剪性裂缝在岩心上延伸较长,长度区间分布较为均匀;受岩心尺寸限制,非构造裂缝开度较小,以0~1 mm为主,张性裂缝开度较大,主要集中在1~2 mm范围;以未充填、半充填为主,所占比例超过90%,充填物主要为泥质和方解石,石英、黄铁矿较少,且常与方解石共生。

2.1.3 薄片镜下裂缝特征

镜下微裂缝观察结果显示,黄流组以发育构造裂缝为主,可见明显的早期裂缝被后期裂缝切割的现象(图6)。构造裂缝中主要发育剪性裂缝(图6a),裂缝面较为平直,开度集中在0.02~15 μm 之间,延伸数十微米,多为宏观裂缝伴生或派生裂

缝;可见部分裂缝被方解石充填,并常在后期构造变形中被错断(图6b),多切穿石英、长石等矿物颗粒。少数样品中可观察到层理缝等非构造成因裂缝,其裂缝面弯曲,张开度较小,呈不规则的弯曲状(图6c)。此外,部分薄片上可以观察到裂缝密集发育,裂缝相互交切形成网状裂缝系统(图6d)。微裂缝对改善低渗透砂岩储层的储渗性能具有重要意义^[19],微裂缝集中发育大大增加了储层生产周期,使采收率更高。

2.2 裂缝充填程度

对L气田黄流组岩心以及镜下观察到的109条裂缝的充填类型进行统计,裂缝以未充填或半充填为主(图7),仅发育少量全充填裂缝。这与成像测井识别的高导缝占比较高、高阻缝占比较低相一致。从成因类型来看,剪切缝中的未充填裂缝所占比例最大(图7a);从裂缝倾角来看,低角度裂缝中的未充填裂缝所占比例最大,高角度裂缝中的半充填裂缝所占比例较高(图7b)。

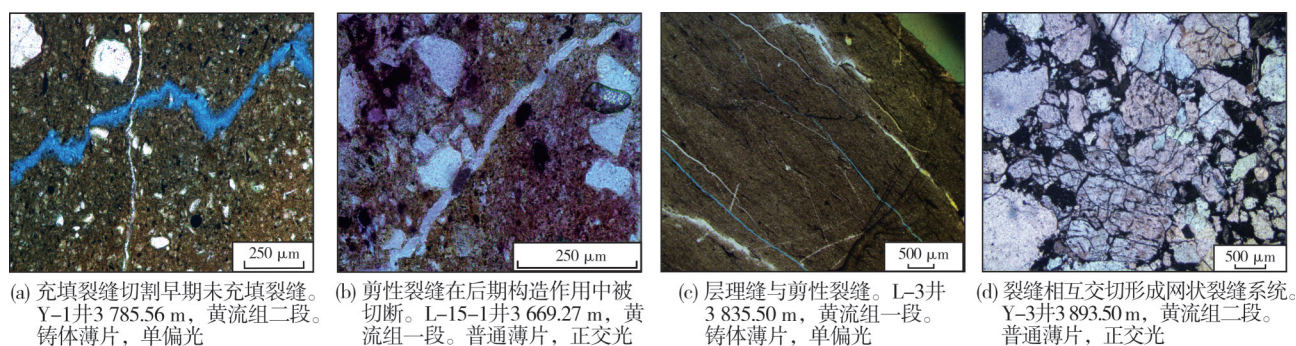


图6 莺歌海盆地L气田黄流组镜下微裂缝特征

Fig. 6 Microscopic characteristics of microfractures of Huangliu Formation in L Gasfield, Yinggehai Basin

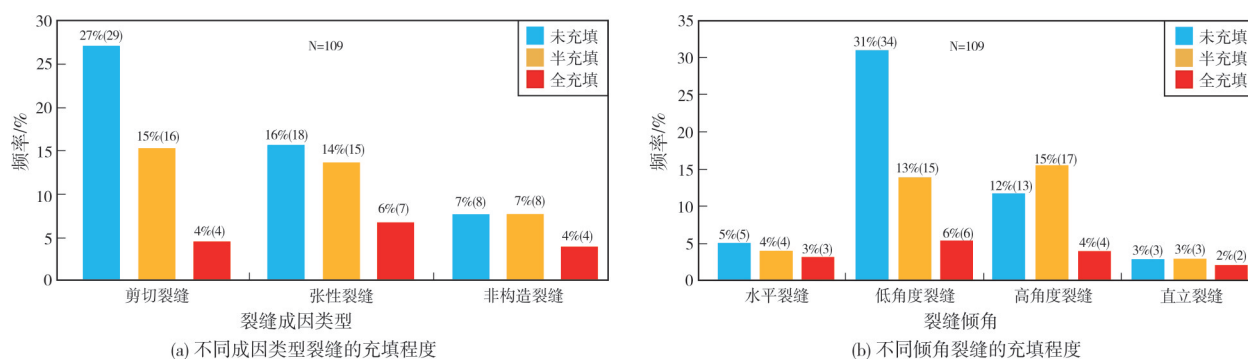


图7 莺歌海盆地L气田黄流组不同类型与产状裂缝的充填程度直方图

Fig. 7 Histograms of fracture filling degree of different types and occurrences in Huangliu Formation in L Gasfield, Yinggehai Basin

2.3 裂缝形成期次

基于岩心及薄片观察,根据裂缝之间的切割、组合关系判断裂缝形成的先后顺序,认为研究区至少存在2期天然裂缝(图6a,6d)。

裂缝充填物中的流体包裹体代表了裂缝形成时的原始流体样品(图8,主要范围)。

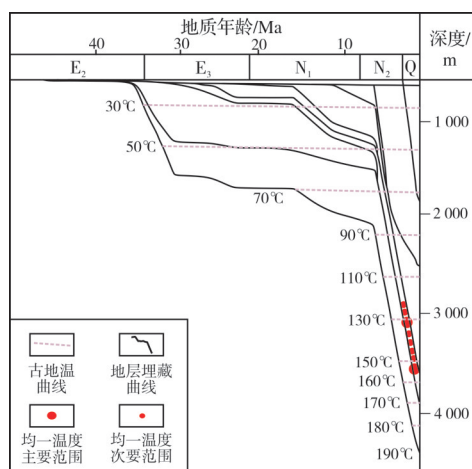


图8 莺歌海盆地Y-1井埋藏史曲线及流体包裹体均一温度分布范围

Fig. 8 Burial history curve and fluid inclusion homogenization temperature distribution in Well Y-1, Yinggehai Basin

观察发现:研究区黄流组砂岩裂缝中分布较多的气液两相盐水包裹体,形态呈椭圆状、不规则状,气液比为4%~7%。选取18个盐水包裹体样品进行流体包裹体测试,测得的均一温度主要有2期:第1期为120~135℃,第2期为150~160℃。进一步结合研究区构造演化和地层埋藏史,推测区内至少发育2期天然裂缝,形成期次分别为新近纪晚期—第四纪前,第四纪早期—中晚期。

3 储层构造裂缝发育的影响因素

3.1 构造因素

构造裂缝是由局部构造应力形成的,与构造样式、地层力学性质等密切相关^[20]。在众多断层相关褶皱中,地层曲率是影响构造裂缝发育程度的重要参数^[21-22]。对L气田不同井位处黄流组的地层曲率进行计算,依据成像测井资料计算测点处的裂缝平均线密度,对两者进行交会分析发现:研究区构造裂缝线密度与地层曲率之间具良好的线性相关关系(图9),地层的曲率越大,构造裂缝越发育。

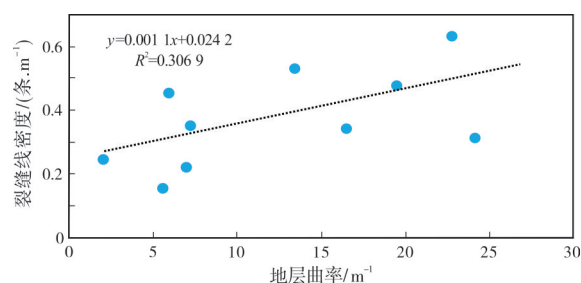


图9 莺歌海盆地L气田黄流组构造裂缝线密度与地层曲率关系图

Fig. 9 Relationship between structural fracture line-density and stratigraphic curvature of Huangliu Formation in L Gasfield, Yinggehai Basin

莺歌海盆地经历了多期构造运动,研究区发育一系列底辟断裂以及斜坡区的隐伏断裂,在断裂附近或断裂带的拐点、交切部位应力集中,构造裂缝发育。Y-1井、Y-2井靠近1号断裂,同时周边发育

多条四级断裂,构造裂缝的发育程度较高:2口井的构造裂缝密度分别为0.296条/m、0.345条/m;这2口井中碎裂带极其发育,并具有一定方向性,是剪应力与张应力共同作用的结果。

3.2 岩石力学参数

由于海上区块钻井取心较少,本文利用阵列声波测井资料计算岩石动态力学参数(图10)。进一步结合成像测井裂缝解释的结果,统计岩石力学参数与构造裂缝线密度之间的关系(图11)。统计发现:①研究区构造裂缝发育程度随杨氏模量增大呈现先增大后减小的趋势(图11a)。杨氏模量越大,岩石的弹脆性越强^[23]。在一定范围内,岩石具有较高杨氏模量时岩石显示出高脆性^[24],受

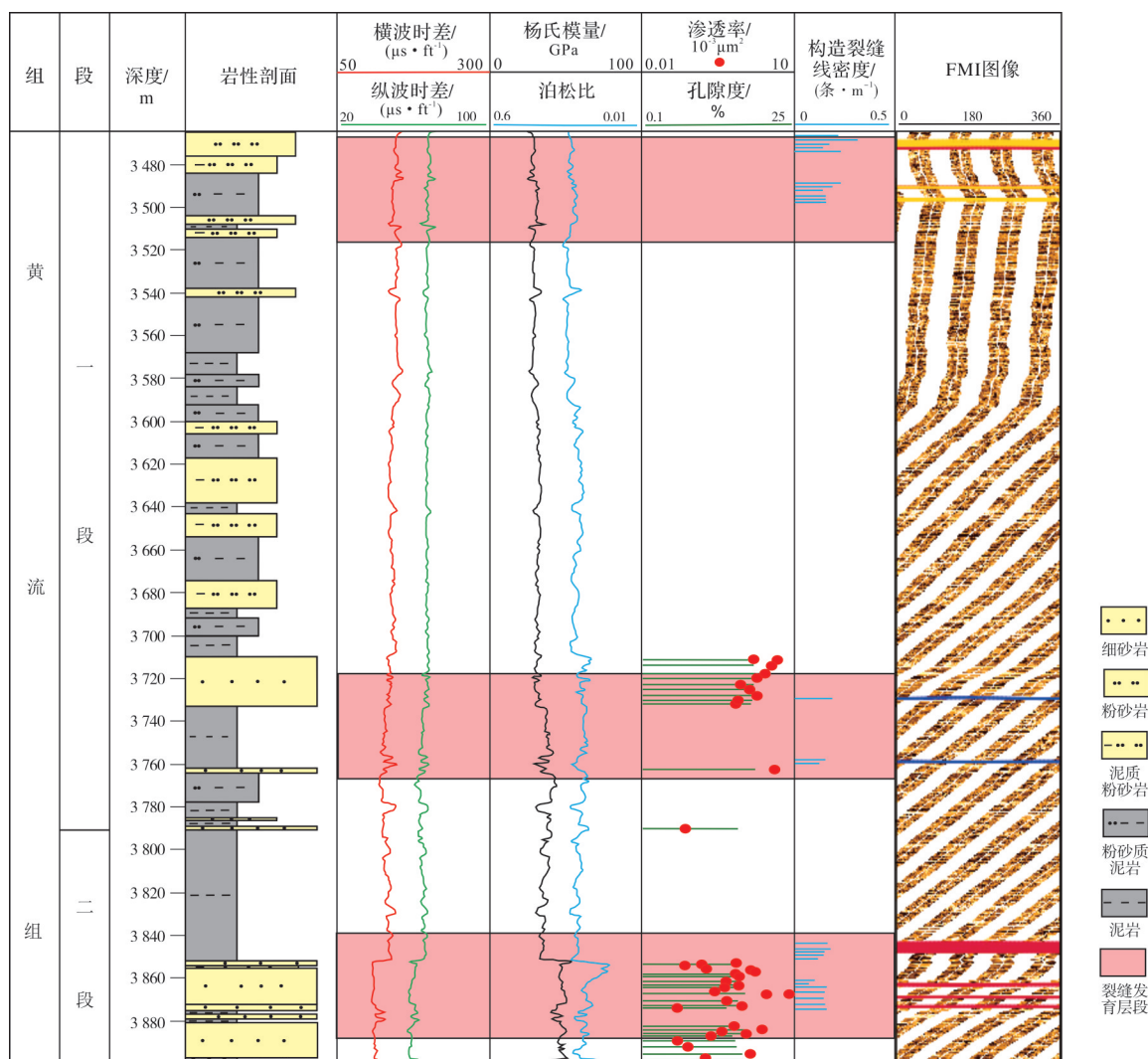


图10 莺歌海盆地L气田L-6井黄流组岩电综合柱状图

Fig. 10 Rock-electricity comprehensive column of Huangliu Formation in Well L-6 of L Gasfield, Yinggehai Basin

到相同构造应力时容易产生破裂。但当岩石杨氏模量过高时,岩石具有较高的应变能,在应力作用下,大量的能量用于快速突破围压做功,导致岩体破裂(由微裂缝转为较大裂缝,较大裂缝间常有较高的连通性,导致岩石产生宏观破碎,岩石基体破坏),因此构造裂缝发育程度呈现出随杨氏模量的增大而先增大后减小的规律。②研究区裂缝发育

程度与泊松比无明显规律(图 11b),在泊松比较高的情况下,也有较密集构造裂缝产生。根据岩石弹性力学研究,在受到相同的外部应力时,岩石的应变能与杨氏弹性模量和泊松比紧密相关,由于岩石泊松比的绝对数值较小,同一区域内岩石泊松比相差不大,因此岩石的应变能主要由杨氏模量决定。

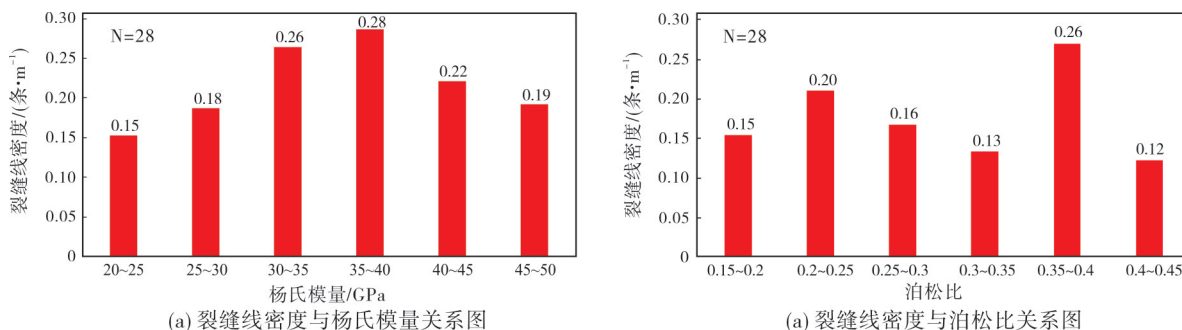


图 11 莺歌海盆地L气田黄流组砂岩杨氏模量、泊松比与构造裂缝线密度关系图

Fig. 11 Relationships of Young's modulus and Poisson's ratio with structural fracture line-density of sandstone of Huangliu Formation in L Gasfield, Yinggehai Basin

3.3 基质孔隙度与渗透率

当基质孔隙度与渗透率处于合适的值域时,岩石的抗压强度、临界破裂值及微裂缝的延伸能力才能达到最优组合^[25],从而促进构造裂缝的发育。对研究区黄流组岩心物性与成像测井裂缝解释进行交会发现:构造裂缝线密度与基质孔隙度、渗透率均呈两段式关系(图 12)。如图 12a 所示:当基质孔

隙度小于9.1%时,孔隙度与构造裂缝发育程度呈正相关关系;当基质孔隙度大于9.1%时,两者呈负相关关系。如图 12b 所示:当基质渗透率小于 $1.34 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,渗透率与构造裂缝发育程度呈正相关关系;当基质渗透率大于 $1.34 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,两者呈弱负相关关系。总体看,当基质孔隙度介于8%~10%、基质渗透率介于 $(1.3 \sim 1.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,构造裂缝最发育。

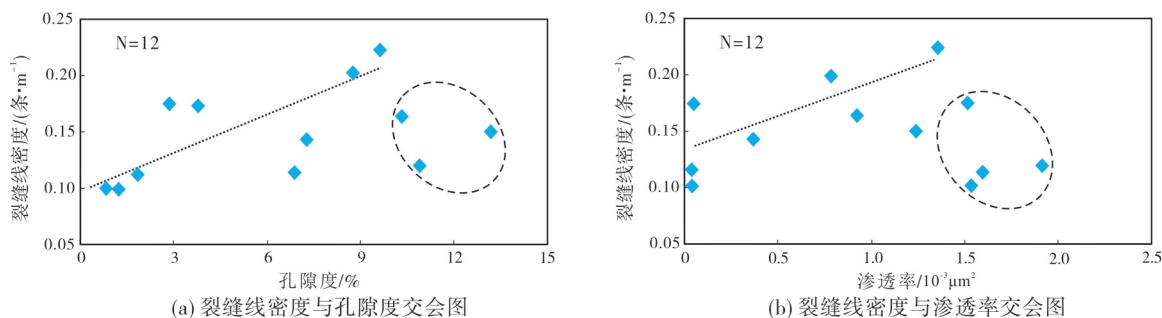


图 12 莺歌海盆地L气田黄流组砂岩基质孔隙度、渗透率与构造裂缝线密度关系图

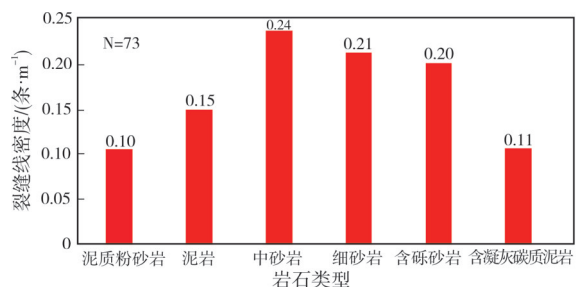
Fig. 12 Relationships of matrix porosity and permeability with structural fracture line-density of sandstone of Huangliu Formation in L Gasfield, Yinggehai Basin

3.4 岩矿特征

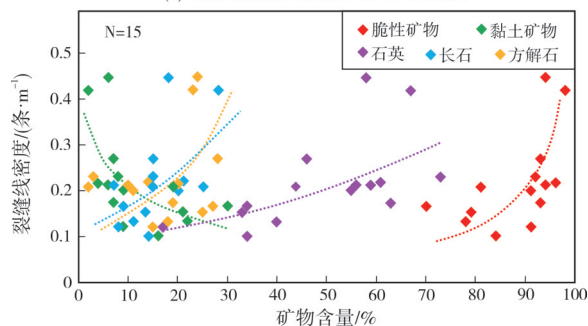
在低渗透砂岩储层中,岩石矿物组分、岩石结构决定了构造裂缝的发育程度^[26]。岩心、薄片观察发

现,L气田黄流组构造裂缝主要发育在中砂岩和细砂岩中(图 13a),其次为含砾砂岩和泥岩,含凝灰碳质泥岩和泥质粉砂岩中较少。全岩X衍射表明,研究区中砂岩的石英含量达到了50%~60%,方解石等碳酸盐

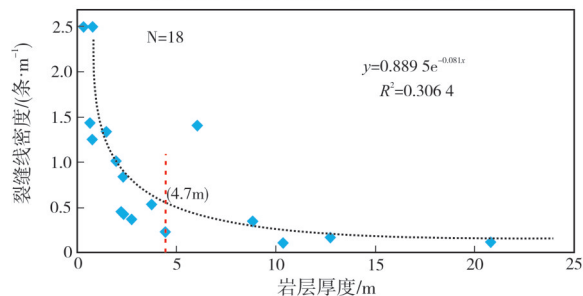
矿物含量达10%~30%,脆性矿物含量较高。而且,中砂岩层段较细砂岩层段更多地以薄层夹在两套厚泥岩层之间的方式发育,当受应力作用时,应力更易在中砂岩层段集中而产生破裂,造成构造裂缝发育。泥岩、泥质粉砂岩和含凝灰碳质泥岩含有较多的塑性成分,而且研究区常发育大套厚层的泥岩,当受应力作用时,大量能量消耗于岩石的塑性形变,且应力更为分散,不易产生破裂,对储层物性的改善作用较小。



(a) 构造裂缝线密度与岩性关系图



(b) 构造裂缝线密度与矿物含量关系



注:当岩层厚度从0.2 m增加到4.7 m时,裂缝线密度显著降低。

(c) 构造裂缝线密度与岩层厚度交会图

图13 莺歌海盆地L气田黄流组岩性、岩石组分、岩层厚度与构造裂缝线密度关系图

Fig. 13 Relationships of lithology, rock composition and stratum thickness with structural fracture line-density of Huangliu Formation in L Gasfield, Yinggehai Basin

随着石英、碳酸盐矿物等脆性矿物含量的增加,岩石脆性增强,岩石抗张强度、抗压强度降低,受应力作用时容易产生破裂,而且产生的裂缝更易扩张、延伸。据L-6井、L-5井、L-10井黄流组岩心样品X衍射矿物组分分析,矿物组分中石英质量分

数最大,方解石次之,黏土矿物最小。统计发现,研究区构造裂缝线密度与脆性矿物含量呈正相关关系(图13b),其中与石英含量呈较强正相关性,与长石、方解石含量呈弱正相关性,这表明岩石脆性越强,裂缝越发育。另外,石英具有特定的晶形且硬度较高,在后期的构造运动中可有效抵御外力作用,使前期形成的裂缝与孔隙得以保存。随着黏土矿物含量的增加,岩石的塑性逐渐增高,当受应力作用时,岩石的塑性形变消耗了大量应变能,导致裂缝发育程度降低(图13b)。

3.5 岩层厚度

对于同一类岩性,岩层厚度越大,在相同应力作用下岩石破裂发生的位置越分散^[27];随着裂缝发育段单层厚度的增加,不同构造裂缝的间距增大、密度减小^[28]。基于研究区成像测井解释结果,对岩层厚度与构造裂缝线密度进行交会,从图13c可以看出,随着岩层厚度的增加,构造裂缝线密度逐渐降低。当岩层厚度从0.2 m增加到4.7 m时,裂缝线密度显著降低,约从2.5条/m降低到0.2条/m;当岩层厚度大于4.7 m时,裂缝发育程度低,二者几乎无相关性。整体而言,当岩层厚度小于5 m时,构造裂缝较发育,裂缝线密度基本大于0.5条/m;当岩层厚度大于5 m时,构造裂缝不发育,裂缝线密度显著降低。

4 裂缝发育程度与油气产能的关系

在低渗透砂岩储层中,构造裂缝是沟通储层孔隙空间、增强基质连通性和渗透性的重要桥梁^[4],随着裂缝发育程度的增大,储层中流体的流动性变好、饱和度增大^[29]。L气田黄流组低渗砂岩含气量与构造裂缝发育程度的相关性分析(图14)表明:随着构造裂缝线密度的增加,总含气量呈上升趋势。

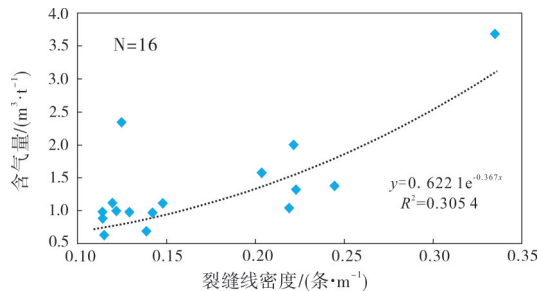


图14 莺歌海盆地L气田黄流组含气量与构造裂缝线密度关系图

Fig. 14 Relationship between gas content and structural fracture line-density of Huangliu Formation in L Gasfield, Yinggehai Basin

因此,准确预测裂缝发育段,可以为压裂开发作业以及构造裂缝发育段储层的保护性开采等提供有利依据。

5 与陆上盆地的对比

为了更系统地认识构造裂缝的主控因素,对陆上三大盆地(四川盆地三叠系,鄂尔多斯盆地三叠系,塔里木盆地白垩系)的相关研究成果^[30-39]进行了调研分析(图15):①在各盆地砂岩储层中通常发育高角度裂缝或垂直裂缝^[25](图15a)。例如,鄂尔多斯盆地三叠系高角度裂缝和垂直裂缝占80%以上^[30-34],塔里木盆地白垩系占到了70%以上^[25,29,35-36]。②岩性是影响裂缝发育的重要因素。一般认为细砂岩因颗粒较细,岩石脆性较强,构造裂缝较为发育,如塔里木盆地大北气田细砂岩构造裂缝线密度达到了7.4条/m(图15b),而颗粒较粗的中砂岩构造裂缝线

密度仅为4.2条/m^[25],这一现象具有一定的普遍性。通常认为泥岩因含有较多的塑性矿物成分,受应力作用时不易破裂,但在塔里木盆地库车坳陷的大北气田、克深气田,白垩系泥岩、泥质粉砂岩中构造裂缝更发育(图15b),裂缝线密度超过细砂岩、中砂岩。③构造裂缝线密度随岩层厚度增大皆存在先快速下降后基本稳定的趋势(图15c)。尽管不同盆地的岩层厚度尺度不同,但存在岩层厚度小于2 m时,构造裂缝普遍较为发育这一规律,如鄂尔多斯盆地三叠系的绝大部分油田^[30-34]。④构造裂缝发育程度随基质孔隙度的增大呈现先增大后减小的趋势(图15d),但是不同地区的趋势转折点的基质孔隙度值有所不同,一般小于2%,裂缝发育程度即开始有下降趋势。⑤构造机制上,陆上各盆地燕山期以来经历了多期强挤压应力改造,主要形成与褶皱、断层有关的裂缝^[31,35,37]。

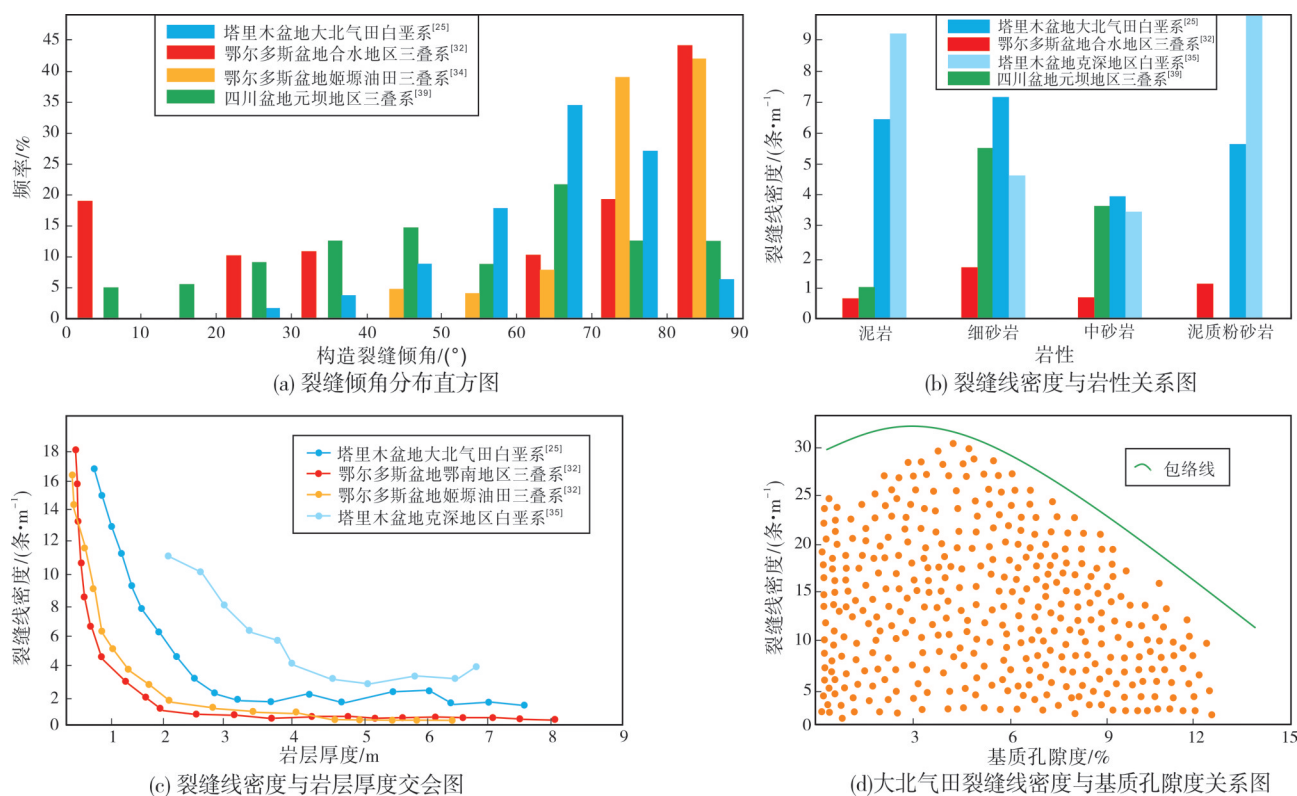


图15 陆上三大盆地构造裂缝倾角及主控因素对比

Fig. 15 Comparisons of dips and main control factors of structural fracture of the three major continental basins in China

如前所述,莺歌海盆地新近系黄流组构造裂缝以低角度为主(图3a),与陆上盆地相比具有一定特殊性,这与近海海域的构造-沉积背景密切相关。新近纪以来南海海域进入拗陷期,莺歌海盆地

发生快速沉积,深层普遍存在强烈的欠压实(超压作用),底辟构造广泛发育。底辟构造一般上拱幅度较低,其剖面形态为低幅度背斜,由于底辟活动时上拱作用力较弱,上覆巨厚地层在局部刺穿事件

中会产生裂缝;此外,在盆地边界断层晚期右旋走滑伸展的作用下,底辟活动及地层拱张形成了局部张性应力场,发育部分伴生的张性裂缝。莺歌海盆地黄流组发育大套的砂岩、泥岩层(图10),平均厚度为5~20 m,厚层泥质岩中多见砂岩薄夹层。构造裂缝主要发育于中砂岩、细砂岩等脆性矿物含量高的岩类(图13a),特别是厚层泥质岩所夹的砂岩薄层,在相同构造应力作用下破裂较为集中。在岩层厚度小于4.7 m时,构造裂缝发育程度随层厚的增加快速降低(图13c);在砂岩基质孔隙度大于10%的情况下,裂缝发育程度有明显下降(图12a)。综合分析可知,区别于陆上盆地燕山期以来多期次的强烈挤压改造,南海海域莺歌海盆地新近纪以来进入快速沉降期,缺少大规模的断层、褶皱活动,而快速沉积造成的地层欠压实则导致深层底辟活动广泛发育,相对较弱的地层上拱作用导致低角度裂缝发育,且集中于脆性的砂岩夹层中。

6 结 论

(1)通过观察分析不同尺度(成像测井、岩心、薄片镜下)的裂缝特征,揭示莺歌海盆地L气田黄流组低渗透砂岩储层主要发育构造裂缝,构造裂缝主要包括剪性裂缝和张性裂缝,裂缝倾角以低角度为主,非构造裂缝主要为溶蚀缝,部分裂缝被方解石、黄铁矿等矿物充填。

(2)构造裂缝随着地层曲率的增大,发育程度逐渐增高;受断裂影响,在断裂附近构造裂缝发育程度较高;中砂岩中的构造裂缝最为发育,其次为细砂岩和含砾砂岩;当单层厚度小于4.7 m时,单层厚度与构造裂缝发育程度呈显著负相关,大于4.7 m后几乎无相关性;当基质孔隙度介于8%~10%、渗透率介于 $(1.3\sim 1.5)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 时,构造裂缝最为发育;构造裂缝发育程度受岩石弹脆性和应变能影响,表现为随着岩石弹性参数杨氏模量的增高,裂缝发育程度具有先增高后降低的规律。储层裂缝对油气产能有一定的提升作用,但在油气开发过程中,需对储层采取保护,以避免产能快速下降。

(3)新近纪以来莺歌海盆地快速沉降,深层的底辟构造广泛发育,较弱的地层上拱导致黄流组厚层泥质岩所夹的砂岩薄层集中产生独特的低角度裂缝。

参 考 文 献

- [1] 刘敬寿, 丁文龙, 肖子亢, 等. 储层裂缝综合表征与预测研究进展[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(6): 2283-2300.
LIU Jingshou, DING Wenlong, XIAO Zikang, et al. Advances in comprehensive characterization and prediction of reservoir fractures[J]. Progress in geophysics, 2019, 34(6): 2283-2300.
- [2] 李理, 桑晓彤, 陈霞飞. 低渗透储层裂缝研究现状及进展[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(6): 2472-2484.
LI Li, SANG Xiaotong, CHEN Xiafei. Research and progress on fracture of low-permeability reservoir[J]. Progress in geophysics, 2017, 32(6): 2472-2484.
- [3] 吕文雅, 曾联波, 刘静, 等. 致密低渗透储层裂缝研究进展[J]. 地质科技情报, 2016, 35(4): 74-83.
LÜ Wenyua, ZENG Lianbo, LIU Jing, et al. Fracture research progress in low permeability tight reservoirs[J]. Bulletin of geological science and technology, 2016, 35(4): 74-83.
- [4] 曾联波. 低渗透砂岩油气储层裂缝及其渗流特征[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 11-17.
ZENG Lianbo. Fissure and its seepage characteristics in low-permeable sandstone reservoir[J]. Chinese journal of geology (scientia geologica sinica), 2004, 39(1): 11-17.
- [5] 刘敬寿, 戴俊生, 邹娟, 等. 裂缝性储层渗透率张量定量预测方法[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 1022-1029.
LIU Jingshou, DAI Junsheng, ZOU Juan, et al. Quantitative prediction of permeability tensor of fractured reservoirs[J]. Oil & gas geology, 2015, 36(6): 1022-1029.
- [6] 杨计海, 黄保家. 莺歌海凹陷东斜坡L气田天然气成因及运移模式[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 450-460.
YANG Jihai, HUANG Baojia. Origin and migration model of natural gas in L gas field, eastern slope of Yinggehai Sag, China[J]. Petroleum exploration and development, 2019, 46(3): 450-460.
- [7] 杨计海, 黄保家, 陈殿远. 莺歌海盆地坳陷斜坡带低孔特低渗气藏形成条件及勘探潜力[J]. 中国海上油气, 2018, 30(1): 11-21.
YANG Jihai, HUANG Baojia, CHEN Dianyuan. Accumulation condition and exploration potential of low porosity and ultra-low permeability sandstone gas reservoirs on the depression slope belt of Yinggehai Basin[J]. China offshore oil and gas, 2018, 30(1): 11-21.
- [8] 朱伟林, 张功成, 高乐. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 1-9.
ZHU Weilin, ZHANG Gongcheng, GAO Le. Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea[J]. Acta petrolei sinica, 2008, 29(1): 1-9.
- [9] 张建新, 党亚云, 何小胡, 等. 莺歌海盆地乐东东区峡谷水道成因及沉积特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(5):

- 29–36.
- ZHANG Jianxin, DANG Yayun, HE Xiaohu, et al. Origin and sedimentary characteristics of canyon channels in Ledong area of Yinggehai Basin[J]. Marine geology & Quaternary geology, 2015, 35(5): 29–36.
- [10] 谢玉洪. 莺琼盆地区中央峡谷源头沉积特征及油气勘探前景[J]. 地质科技通报, 2020, 39(5): 69–78.
- XIE Yuhong. Sedimentary characteristics and hydrocarbon exploration potential of the upstream of the Central Canyon in the Yinggehai and Qiongdongnan basins[J]. Bulletin of geological science and technology, 2020, 39(5): 69–78.
- [11] 王振峰, 裴健翔. 莺歌海盆地中深层黄流组高压气藏形成新模式: DF14井钻获强超压优质高产天然气层的意义[J]. 中国海上油气, 2011, 23(4): 213–217.
- WANG Zhenfeng, PEI Jianxiang. A new accumulation model of high pressure gas in Huangliu Formation of the middle-deep interval in Yinggehai Basin: the significance of discovering a good-quality gas pay with overpressure and high production in Well DF14[J]. China offshore oil and gas, 2011, 23(4): 213–217.
- [12] 李绪深, 裴健翔, 李彦丽. 莺歌海盆地乐东气田天然气成藏条件及富集模式[J]. 天然气工业, 2013, 33(11): 16–21.
- LI Xushen, PEI Jianxiang, LI Yanli. Gas play conditions and accumulation patterns of the Ledong gas fields, Yinggehai Basin[J]. Natural gas industry, 2013, 33(11): 16–21.
- [13] 周家雄, 刘巍. 乐东气田断层分布特征及其对产能的影响[J]. 天然气工业, 2013, 33(11): 56–61.
- ZHOU Jiaxiong, LIU Wei. Fault distribution characteristics and their impacts on the yield of the Ledong gas 15–1 field, Yinggehai Basin[J]. Natural gas industry, 2013, 33(11): 56–61.
- [14] 刘志杰, 卢振权, 张伟, 等. 莺歌海盆地中央泥底辟带东方区与乐东区中深层成藏地质条件[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(4): 49–61.
- LIU Zhijie, LU Zhenquan, ZHANG Wei, et al. Assessment of accumulation conditions for medium-deep oil in Ledong area of the central diapir belt, Yinggehai Basin[J]. Marine geology & Quaternary geology, 2015, 35(4): 49–61.
- [15] 廖计华, 王华, 甘华军, 等. 莺歌海盆地东方区中新统黄流组一段高精度层序地层特征与隐蔽油气藏预测[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(2): 241–253.
- LIAO Jihua, WANG Hua, GAN Huajun, et al. High resolution sequence stratigraphy and prediction of subtle reservoir in the first section of Miocene Huangliu Formation, Dongfang area of Yinggehai Basin, South China Sea[J]. Natural gas geoscience, 2017, 28(2): 241–253.
- [16] 尤丽, 招湛杰, 代龙, 等. 莺-琼盆地中新统高温超压储层特征及形成机制[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2654–2664.
- YOU Li, ZHAO Zhanjie, DAI Long, et al. Reservoirs characteristics and formation mechanism of high temperature and overpressure reservoirs from Miocene in Ying-Qiong Basin[J]. Earth science, 2019, 44(8): 2654–2664.
- [17] 黄继新, 彭仕宓, 王小军, 等. 成像测井资料在裂缝和地应力研究中的应用[J]. 石油学报, 2006, 27(6): 65–69.
- HUANG Jixin, PENG Shimi, WANG Xiaojun, et al. Applications of imaging logging data in the research of fracture and ground stress[J]. Acta petrolei sinica, 2006, 27(6): 65–69.
- [18] 吴建发, 赵圣贤, 范存辉, 等. 川南长宁地区龙马溪组富有机质页岩裂缝发育特征及其与含气性的关系[J]. 石油学报, 2021, 42(4): 428–446.
- WU Jianfa, ZHAO Shengxian, FAN Cunhui, et al. Fracture characteristics of the Longmaxi Formation shale and its relationship with gas-bearing properties in Changning area, southern Sichuan[J]. Acta petrolei sinica, 2021, 42(4): 428–446.
- [19] 丁文龙, 许长春, 久凯, 等. 泥页岩裂缝研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(2): 135–144.
- DING Wenlong, XU Changchun, JIU Kai, et al. The research progress of shale fractures[J]. Advances in earth science, 2011, 26(2): 135–144.
- [20] 宋永东, 戴俊生. 储层构造裂缝预测研究[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(6): 9–13.
- SONG Yongdong, DAI Junsheng. Research on the forecast of reservoir structural fractures[J]. Petroleum geology and recovery efficiency, 2007, 14(6): 9–13.
- [21] 曲国胜, 李亦纲, 陈杰, 等. 柯坪塔格推覆构造几何学、运动学及其构造演化[J]. 地学前缘, 2003, 10(增刊1): 142–152.
- QU Guosheng, LI Yigang, CHEN Jie, et al. Geometry, kinematics and tectonic evolution of Kepingtage thrust system[J]. Earth science frontiers, 2003, 10(S1): 142–152.
- [22] 赵文韬, 侯贵廷, 鞠玮, 等. 库车东部碎屑岩地层曲率对裂缝发育的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(6): 1059–1068.
- ZHAO Wentao, HOU Guiting, JU Wei, et al. Influence of layer curvature on the fracture growth of clastic rock in East Kuqa[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 51(6): 1059–1068.
- [23] 丁文龙, 李超, 李春燕, 等. 页岩裂缝发育主控因素及其对含气性的影响[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 212–220.
- DING Wenlong, LI Chao, LI Chunyan, et al. Dominant factor of fracture development in shale and its relationship to gas accumulation[J]. Earth science frontiers, 2012, 19(2): 212–220.
- [24] 岳喜伟, 戴俊生, 王珂. 岩石力学参数对裂缝发育程度的影响[J]. 地质力学学报, 2014, 20(4): 372–378.
- YUE Xiwei, DAI Junsheng, WANG Ke. Influence of rock mechanics parameters on development of fracture[J]. Journal of geomechanics, 2014, 20(4): 372–378.
- [25] 王珂, 杨海军, 李勇, 等. 塔里木盆地大北气田超深层致密

- 砂岩储集层构造裂缝发育特征及其影响因素[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2018, 37(1): 111-120.
- WANG Ke, YANG Haijun, LI Yong, et al. Characteristics and controlling factors of structural fractures in ultra-deep tight sandstone reservoir, Dabai gas field, Tarim Basin [J]. Bulletin of mineralogy, petrology and geochemistry, 2018, 37(1): 111-120.
- [26] 张学敏, 尹帅, 史长林. 沁水盆地南部山西组致密砂岩裂缝发育特征及控制因素[J]. 海相油气地质, 2018, 23(3): 43-52.
- ZHANG Xuemin, YIN Shuai, SHI Changlin. Developmental characteristics and controlling factors of fractures in tight sandstone of Shanxi Formation, southern Qinshui Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2018, 23(3): 43-52.
- [27] 王珂, 戴俊生, 贾开富, 等. 库车拗陷A气田砂泥岩互层构造裂缝发育规律[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(2): 63-70.
- WANG Ke, DAI Junsheng, JIA Kaifu, et al. Research on development regularity of structural fractures in sand-mud interbed of A gas field, Kuqa Depression [J]. Journal of Southwest Petroleum University(science & technology edition), 2013, 35(2): 63-70.
- [28] 赵文韬, 侯贵廷, 孙雄伟, 等. 库车东部碎屑岩层厚和岩性对裂缝发育的影响[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(4): 603-610.
- ZHAO Wentao, HOU Guiting, SUN Xiongwei, et al. Influence of layer thickness and lithology on the fracture growth of clastic rock in East Kuqa [J]. Geotectonica et metallogenia, 2013, 37(4): 603-610.
- [29] 曾联波, 谭成轩, 张明利. 塔里木盆地库车拗陷中新世代构造应力场及其油气运聚效应[J]. 中国科学: D辑 地球科学, 2004, 34(增刊1): 98-106.
- ZENG Lianbo, TAN Chengxuan, ZHANG Mingli. The Mesozoic Cenozoic tectonic stress field and its hydrocarbon migration and accumulation effect of Kuche Depression in Talimu Basin [J]. Scientia sinica(terrae), 2004, 34(S1): 98-106.
- [30] 鞠伟, 侯贵廷, 冯胜斌, 等. 鄂尔多斯盆地庆城—合水地区延长组长 6_3 储层构造裂缝定量预测[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 310-320.
- JU Wei, HOU Guiting, FENG Shengbin, et al. Quantitative prediction of the Yanchang Formation Chang 6_3 reservoir tectonic fracture in the Qingcheng-Heshui Area, Ordos Basin [J]. Earth science frontiers, 2014, 21(6): 310-320.
- [31] 曾联波, 李忠兴, 史成恩, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 174-180.
- ZENG Lianbo, LI Zhongxing, SHI Chengen, et al. Characteristics and origin of fractures in the extra low-permeability sandstone reservoirs of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. Acta geologica sinica, 2007, 81(2): 174-180.
- [32] 赵向原, 曾联波, 王晓东, 等. 鄂尔多斯盆地宁县—合水地区长6、长7、长8储层裂缝差异性及其开发意义[J]. 地质科学, 2015, 50(1): 274-285.
- ZHAO Xiangyuan, ZENG Lianbo, WANG Xiaodong, et al. Differences of natural fracture characteristics and their development significance in Chang 6, Chang 7 and Chang 8 reservoir, Ningxian-Heshui area, Ordos Basin [J]. Chinese journal of geology, 2015, 50(1): 274-285.
- [33] 马瑶, 李文厚, 欧阳征健, 等. 鄂尔多斯盆地南梁西区长6油层组砂岩低孔超低渗储层特征及主控因素[J]. 地质通报, 2013, 32(9): 1471-1476.
- MA Yao, LI Wenhui, OUYANG Zhengjian, et al. Reservoir characteristics and main control factors of Chang 6 oil-bearing formation in Western Nanliang area of Ordos Basin [J]. Geological bulletin of China, 2013, 32(9): 1471-1476.
- [34] 刘格云, 黄臣军, 周新桂, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组裂缝发育程度定量评价[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(4): 444-453.
- LIU Geyun, HUANG Chenjun, ZHOU Xingui, et al. Quantitative evaluation of fracture development in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum exploration and development, 2015, 42(4): 444-453.
- [35] 王珂, 张荣虎, 王俊鹏, 等. 超深层致密砂岩储层构造裂缝分布特征及其成因: 以塔里木盆地库车前陆冲断带克深气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 338-353.
- WANG Ke, ZHANG Ronghu, WANG Junpeng, et al. Distribution and origin of tectonic fractures in ultra-deep tight sandstone reservoirs: a case study of Keshen gas field, Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin [J]. Oil & gas geology, 2021, 42(2): 338-353.
- [36] 曾联波, 周天伟. 塔里木盆地库车拗陷储层裂缝分布规律[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 23-25.
- ZENG Lianbo, ZHOU Tianwei. Reservoir fracture distribution law of Kuche Depression in Talimu Basin [J]. Natural gas industry, 2004, 24(9): 23-25.
- [37] 范存辉, 秦启荣, 李虎, 等. 四川盆地元坝中部断褶带须家河组储层构造裂缝形成期次[J]. 石油学报, 2017, 38(10): 1135-1143.
- FAN Cunhui, QIN Qirong, LI Hu, et al. Formation stages of structural fractures of Xujiahe Formation in the fault-fold belt of central Yuanba area, Sichuan Basin [J]. Acta petrolei sinica, 2017, 38(10): 1135-1143.
- [38] 范存辉, 郭彤楼, 王本强, 等. 四川盆地元坝中部地区须家河组储层裂缝发育特征及控制因素[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(5): 52-54.
- FAN Cunhui, GUO Tonglou, WANG Benqiang, et al. Characteristics and controlling factors of reservoir fractures in Xujiahe Formation, central Yuanba of Sichuan Basin [J]. Petroleum geology and recovery efficiency, 2013, 20(5): 52-54.

- [39] 王本强, 秦启荣, 范存辉, 等. 元坝地区中部珍珠冲段储层裂缝特征及主控因素[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(24): 6996-7001, 7007.
- WANG Benqiang, QIN Qirong, FAN Cunhui, et al. Character-

istic of reservoir fractures and main controlling factors in Zhenzhuchong Formation in the central Yuanba area[J]. Science technology and engineering, 2013, 13(24): 6996-7001, 7007.

编辑:董庸

Characteristics and controlling factors of fractures in low-permeability sandstone reservoirs: a case study of the Miocene Huangliu Formation in L Gasfield, Yinggehai Basin

ZHANG Guanjie, WU Kongyou, FAN Caiwei, HE Xiaohu, LIU Jingshou, LEI Xin

Abstract: L Gasfield is a 100 billion cubic meters gasfield discovered in the Miocene of Yinggehai Basin, and its gas bearing formation is a typical low-permeability sandstone reservoir. In order to provide a basis for the quantitative prediction of reservoir fractures in L Gasfield and the next exploration and development, the fractures of different scales such as imaging logging, drilling cores and thin sections in Huangliu Formation are studied. Combined with the test results of whole rock mineral analysis and core porosity and permeability analysis, the development characteristics and main controlling factors of fractures in low-permeability sandstone reservoirs were clarified. The results show that: (1) The structural fractures account for more than 80% of fractures in the study area, of which shear fractures are mainly developed, followed by tensile fractures, and the fracture dip angle is mainly low angle and horizontal (accounting for more than 65%). Imaging logging images show that the fractures are mainly composed of parallel, reticular, conjugate and Y-shaped combinations, and some fractures are partially or fully filled by calcite and argillaceous materials. (2) The main influence factors on fracture development include stratum curvature, fracture position, rock mechanical parameters, matrix porosity and permeability, lithology, and thickness of single sandbody. Fractures are highly developed in areas with large stratum curvature, in fracture-developed areas, and in rocks with low granularity and high brittleness. Hence, the fracture development degree is negatively and exponentially correlated with single sandbody thickness, but when the single sandbody thickness is greater than 4.7 m, the correlation between the two weakens. With the increase in matrix porosity and permeability, the fracture development degree first increases and then decreases. When matrix porosity is 8%–10% and matrix permeability is $(1.3-1.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, structural fractures are most developed. The fracture development degree is affected by rock brittleness and strain energy, which shows that with the increase of Young's modulus of rocks, the fracture development degree first rises and then declines. (3) Since Neogene, Yinggehai Basin has undergone rapid sedimentation, with strong undercompaction in the deep layer, widely developed diapir structures, and weak strata arching together to produce unique low angle fractures in the thin sandstone layer sandwiched by thick argillaceous rocks in the Huangliu Formation.

Key words: low-permeability sandstone; fractures; controlling factors; Huangliu Formation; Yinggehai Basin

ZHANG Guanjie, First author: PhD candidate, mainly engaged in research on geological structure and hydrocarbon accumulation. Add: Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China

WU Kongyou, Corresponding author: PhD, Professor, mainly engaged in research on geological structure and hydrocarbon accumulation. Add: School of Earth Science and Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 622580, China