

川中地区震旦系灯影组碳酸盐岩天然裂缝特征及其对气井产能影响

史今雄^{1,2}, 赵向原³, 潘仁芳^{1,2}, 曾联波⁴, 朱正平^{1,2}

[1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 3. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 102206; 4. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249]

摘要:四川盆地中部地区震旦系灯影组碳酸盐岩是中国深层-超深层油气勘探开发的热点领域, 储层中普遍发育不同类型、不同尺度的天然裂缝, 对储层渗流规律和气井产能具有重要影响。以川中地区高石梯-磨溪区块灯影组四段(简称灯四段)为例, 综合利用岩心、薄片、成像测井、分析测试及试井分析等资料, 在明确天然裂缝成因类型和发育特征的基础上, 分析控制天然裂缝发育的主要地质因素, 并探讨天然裂缝对气井产能的影响。研究结果表明:①高石梯-磨溪地区灯四段碳酸盐岩储层主要发育构造裂缝和成岩裂缝, 其中构造裂缝包括剪切裂缝和张性裂缝, 成岩裂缝主要为层理缝和缝合线;②构造剪切裂缝为灯四段储层主要裂缝类型, 以高角度裂缝为主, 裂缝走向主要包括NNW-SSE向、近EW向、NE-SW向和近SN向;③裂缝有效性受控于裂缝形成时间、胶结和溶蚀作用、裂缝产状及现今地应力, NNW-SSE向和近EW向剪切裂缝有效性相对较好;④裂缝发育程度与储层岩性、岩石力学层厚度及断层等密切相关, 泥晶云岩中裂缝更为发育, 随岩石力学层厚度增加, 裂缝密度减小、规模增大, 主干走滑断层附近, 尤其是断层端部和叠合区域, 裂缝发育程度更高;⑤裂缝发育程度和有效性共同决定了气井产能, 不同产状、不同规模的有效裂缝相互交织形成裂缝网络, 使相对孤立、分散的溶蚀孔洞之间相互连通, 可极大改善储层渗流能力, 提高气井产能。高石梯-磨溪地区灯四段储层中, NNW-SSE向和近EW向剪切裂缝改善储层渗透性的能力明显高于其他组系裂缝, 对提升气井产能贡献较大。

关键词:气井产能; 天然裂缝; 碳酸盐岩; 灯影组; 深层-超深层油气藏; 川中地区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics of natural fractures in carbonate reservoirs and their impacts on well productivity in the Sinian Dengying Formation, central Sichuan Basin

SHI Jinxiong^{1,2}, ZHAO Xiangyuan³, PAN Renfang^{1,2}, ZENG Lianbo⁴, ZHU Zhengping^{1,2}

[1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 4. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: Carbonate reservoirs in the Sinian Dengying Formation, central Sichuan Basin, are a hot spot for hydrocarbon exploration and development in deep and ultra-deep sequences in China. Multi-type and multi-scale natural fractures are widely seen in the Dengying reservoirs, and of significant impacts on the seepage flow pattern and well productivity. In this study, the genetic types and developmental characteristics of natural fractures in the fourth member of Dengying Formation (Deng 4 Member), Gaoshiti-Moxi area, are clarified utilizing the cores, thin sections, image logs, experimental tests and production testing data. Major geological factors controlling the development of natural fractures are used to analyze the impact of natural fractures on well productivity. Results show that natural fractures in the Deng 4 Member reservoirs in Gaoshiti-Moxi area are mainly of tectonic and diagenetic types. The tectonic fractures can be

收稿日期:2022-07-06;修订日期:2023-01-05。

第一作者简介:史今雄(1989—),男,博士、讲师,储层裂缝表征与储层地质力学。E-mail: shijinxiong1988@126.com。

通讯作者简介:曾联波(1967—),男,教授、博士生导师,裂缝性储层和非常规油气储层评价与预测。E-mail: lbzeng@cup.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(U21B2062)。

divided into shear fractures and tension fractures, and the diagenetic fractures are mainly bedding fractures and stylolites, among others. The shear fractures dominate the Deng 4 Member reservoirs, and are mainly of high-angle ones and striking in the NNW-SSE, nearly EW, NE-SW and nearly SN directions. Factors controlling the shear fracture effectiveness include the timing of fracture formation, cementation, dissolution, fracture occurrence and current in-situ stress. The shear fractures in NNW-SSE and nearly EW orientation are more effective than others. The development degree of shear fractures is closely related to the lithology, mechanical layer thickness and faults. The shear fractures are more highly developed in micritic dolomites, and their density decreases and scale enlarges along with the increasing thickness of mechanical layers. The shear fractures near the main strike-slip faults, in particular within the tip and superimposed part of faults, are better developed. The development degree and effectiveness of fractures jointly determine gas well productivity. The effective fractures in different occurrences and scales can form fracture network, and get relatively isolated pores interconnected, which greatly improves the seepage capacity of reservoirs and elevate well productivity. In the Deng 4 Member reservoirs of Gaoshiti-Moxi area, the shear fractures in NNW-SSE and nearly EW orientation are of stronger ability to enhance reservoir permeability, and make greater contribution to the improvement of well productivity.

Key words: gas well productivity, natural fracture, carbonate rock, Dengying Formation, deep-ultra-deep reservoir, central Sichuan Basin

引用格式:史今雄,赵向原,潘仁芳,等. 川中地区震旦系灯影组碳酸盐岩天然裂缝特征及其对气井产能影响[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 393-405. DOI: 10. 11743/ogg20230211.

SHI Jinxiong, ZHAO Xiangyuan, PAN Renfang, et al. Characteristics of natural fractures in carbonate reservoirs and their impacts on well productivity in the Sinian Dengying Formation, central Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44 (2) : 393-405. DOI: 10. 11743/ogg20230211.

碳酸盐岩油气藏在全球油气储量、产量中占有极其重要的地位^[1-3]。近年来,深层-超深层油气勘探开发进入快速发展时期,逐步成为世界石油工业重要的接替领域之一^[4-5]。中国深层(4 500 ~ 6 000 m)和超深层(> 6 000 m)地层以海相碳酸盐岩为主,油气资源丰富,先后在四川盆地和塔里木盆地中分别发现了普光、元坝、安岳、塔河、塔中以及顺北等一批深层-超深层大型碳酸盐岩油气田,展现了巨大的油气勘探开发潜力^[6-7]。中国深层-超深层海相碳酸盐岩形成时代古老、埋藏深度大,同时受多期成岩作用和构造作用的叠加改造^[8-9],储层普遍表现出基质物性差、储集空间分布复杂、储层非均质性强的特征。由于较差的储集条件,天然裂缝作为有效储集空间和高效渗流通道,对深层-超深层海相碳酸盐岩的油气富集、储层物性及开发效果等具有重要影响。

震旦系灯影组碳酸盐岩是四川盆地中部地区(川中地区)重要的油气储集层,已在威远、资阳、高石梯、磨溪等地区发现大型气藏,并获得了工业气流。安岳气田高石梯-磨溪区块是川中地区震旦系灯影组气藏勘探开发的重点区域,为“十三五”期间四川盆地天然气增储上产的主体^[5, 9]。截至2020年底,该区灯影组碳酸盐岩储层探明地质储量近 $6\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,具有良

好的勘探开发前景^[5]。实钻资料显示,高石梯一磨溪地区灯影组碳酸盐岩储层基质致密,储集空间以次生溶孔、溶洞为主,天然裂缝普遍发育,储层非均质性极强。开发实践表明,该区灯影组碳酸盐岩储层流体渗流规律复杂,气井产能差异明显,一定程度上制约了该气藏的规模、高效开发。目前,针对川中地区震旦系灯影组碳酸盐岩,众多学者从沉积特征^[10-11]、成岩演化^[12-13]、古岩溶地貌^[14-17]、优质储层成因^[2, 18-19]、天然气成藏^[20-21]及储层识别预测^[22]等方面开展了大量研究,研究成果支撑了震旦系灯影组气藏的有利区评价和井位部署,但对于灯影组碳酸盐岩天然裂缝特征及其对气井产能的影响等方面的研究相对缺乏。

作为中国迄今已发现最古老的海相碳酸盐岩整装气藏,川中地区震旦系灯影组碳酸盐岩储层在四川盆地天然气勘探开发中发挥着极其重要的作用。本文以川中高石梯一磨溪地区震旦系灯影组四段(以下简称灯四段)碳酸盐岩储层为研究对象,综合岩心、薄片、成像测井、分析测试及试井分析等资料,在明确天然裂缝类型和发育特征的基础上,分析了天然裂缝发育的控制因素,讨论了天然裂缝对气井产能的影响,以期为该地区灯影组碳酸盐岩气藏的下一步勘探开发工作提供地质参考。

1 地质概况

高石梯—磨溪地区位于四川盆地中部(图1),构造上属于川中古隆起平缓构造带的威远—龙女寺构造群,位于乐山—龙女寺古隆起轴部的东端、龙泉山断裂至华蓥山断裂之间,是古隆起背景上的一个大型背斜构造^[2],面积约 $2.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。高石梯—磨溪构造的形成与演化受川中及龙门山基底隆起控制,经历多期构造运动,具有一定继承性^[11]。在桐湾运动时期,高石梯—磨溪潜伏构造初具雏形,经历寒武纪—二叠纪前构造隆起发育阶段和二叠纪—中三叠世的稳定埋藏阶段,最终在喜马拉雅运动晚期定型^[19]。区内构造相对平缓,发育NW向、NE向和近EW向走滑断层^[23](图1)。

川中地区震旦系自下而上可划分为陡山沱组和灯影组,两者呈整合接触。灯影组是一套海侵退积式沉积序列,以碳酸盐镶边型台地沉积为主,包括台地边缘相、台内丘滩相、滩间海相和蒸发台地相等^[15,19]。根据岩石成分、构造和电性特征,将灯影组自下而上划分为4段,包括灯一段、灯二段、灯三段和灯四段。其中,灯

一段、灯二段和灯四段岩性主要为白云岩,灯三段为泥质白云岩夹泥页岩,灯二段和灯四段蓝藻菌相对富集^[10]。震旦系沉积后,受桐湾运动构造抬升影响,川中地区灯影组遭受多期不同程度的剥蚀,导致高石梯—磨溪地区灯二段与灯三段及灯四段与下寒武统筇竹寺组之间形成不整合接触。同时,由于桐湾运动I幕和II幕大规模表生岩溶作用,灯四段和灯二段发育大面积分布的规模岩溶储层^[19]。

高石梯—磨溪地区灯四段是在台地背景下发育的一套碳酸盐岩建造,主要发育丘滩相和滩间海沉积,岩性以砂屑云岩、藻凝块云岩、藻叠层云岩、泥晶云岩和泥质云岩为主。研究区灯四段埋深4 900~5 700 m,钻遇厚度150~380 m,总体呈南北均一、西厚东薄的特征^[14,17]。岩心、薄片和扫描电镜资料显示,灯四段碳酸盐岩原生孔隙基本不发育,储集空间主要包括次生溶孔(包括晶间溶孔、粒内溶孔、粒间溶孔和残余粒间孔等)、溶洞及天然裂缝。储层物性整体相对较差,岩心柱塞样品孔隙度集中分布在2.0%~4.0%,平均孔隙度为3.46%^[24];柱塞样渗透率变化较大,主要分布在 $10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下^[24],平均值为 $0.63 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

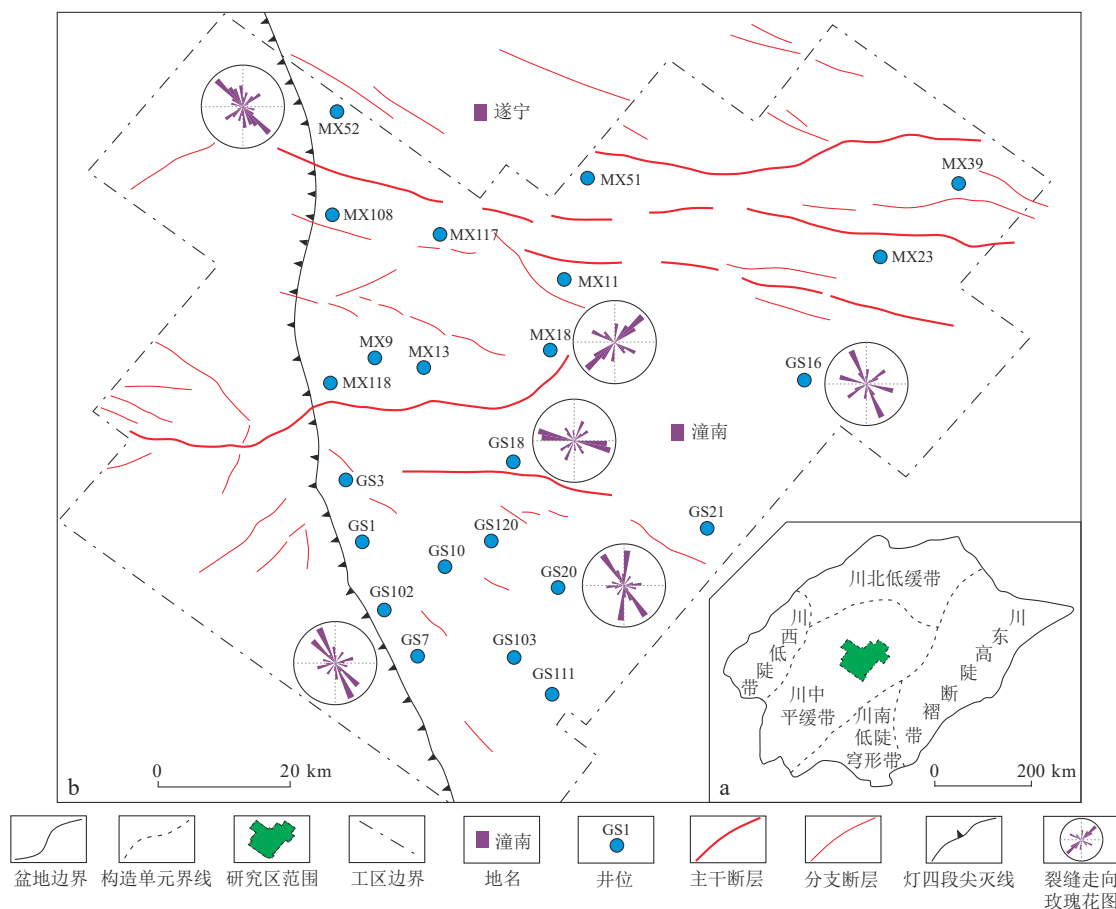


图1 四川盆地高石梯—磨溪区块位置(a)与构造简图(b)

Fig. 1 Map of the location (a) and tectonic features (b) of Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin

全直径岩心样品孔隙度小于6.0%的样品占比为82.1%^[2],渗透率主要介于 $(0.01 \sim 1.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为深层低孔-低渗碳酸盐岩储层。

2 天然裂缝成因类型

岩心、薄片观察及成像测井解释结果显示,高石梯—磨溪地区灯四段碳酸盐岩天然裂缝较为发育,其中裂缝发育段岩层厚度约占岩心观察段总厚度的42.6%。根据地质成因,研究区灯四段储层天然裂缝可划分为构造裂缝和成岩裂缝两大类,其中构造裂缝包括剪切裂缝和张性裂缝,成岩裂缝包括层理缝和缝合线。

构造裂缝是区域或局部构造应力超过岩石破裂强度时形成的一种裂缝类型,根据其力学性质可分为剪切裂缝和张性裂缝两类^[25-26]。其中,构造剪切裂缝是岩石在构造应力作用下发生剪破裂的结果,这类裂缝在高石梯—磨溪地区灯四段碳酸盐岩储层分布最为广泛,为最主要的裂缝类型。剪切裂缝常成组发育,规则分布(图2a,图3a),具有稳定产状、平滑缝面(图2b)及均匀开度。岩心上,有些裂缝缝面上可见擦痕和微小陡坎,表明岩石剪破裂的特征。薄片上,剪切裂缝形态规则平直,延伸长度缺失,可切穿矿物颗粒或生物构造(图3b),不同组裂缝之间常表现出相互切割、限制关系以及充填差异(图3c)。成像测井动态图像显示,这类裂缝通常为正弦、余弦曲线,图像颜色变化反映裂缝充填情况的差异,未充填裂缝

呈现暗色条带或条纹(图4a),裂缝被方解石或钙质充填时则呈亮色条带,常见多组不同产状的裂缝相交形成裂缝网络(图4b)。剪切裂缝发生溶蚀的现象较为普遍,导致裂缝规模增大、缝面不平整(图2c,图3d),但原剪切裂缝的形状和分布仍可分辨,即早期剪切裂缝受后期溶蚀改造而形成的裂缝。构造张性裂缝是岩石在压应力条件下垂直于最小主应力方向发生扩张形成的一类裂缝^[27]。不同于剪切裂缝,岩心中张性裂缝通常表现出产状不稳定、开度不均匀及缝面粗糙的特征,多垂直于或近垂直于岩层面发育(图2d)。镜下观察显示,张性裂缝多具有不规则的形态,开度变化较大(图3e)。研究区张性裂缝发育数量较少,仅在少数取心井中可以观察到,且多数裂缝被方解石等矿物完全充填。

层理缝是在成岩过程中由于压实、压溶等地质作用沿层理面破裂形成的一类成岩裂缝^[25, 27]。研究区灯四段岩心中,这类裂缝一般平行或近平行于层面发育,横向连续性较差(图2e),延伸长度一般小于5 cm,伴有断续分布、末端分支等特征。缝合线是成岩阶段压溶作用形成的一类面状构造,为压应力作用(如上覆地层压力和构造挤压应力)下岩石中矿物组分发生选择性溶解的结果^[27-28]。根据其产状与岩层层面之间的关系,可划分为顺层缝合线(平行或近平行于岩层层面)和构造缝合线(斜交或垂直于岩层层面)。顺层缝合线在研究区灯四段碳酸盐岩中较为常见,多与岩层层面近平行或小角度斜交,一般呈锯齿状或不规则波状

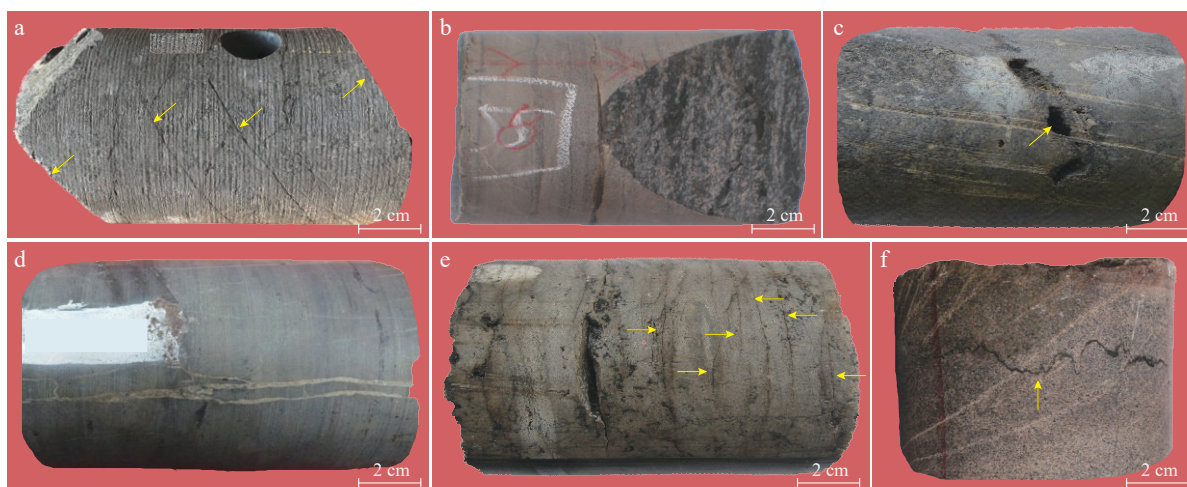


图2 高石梯—磨溪地区灯四段岩心观察天然裂缝特征照片

Fig. 2 Characteristics of natural fractures in cores from Deng 4 Member in Gaoshiti-Moxi area

a. 一组产状相同的构造剪切裂缝(黄色箭头),未充填,GS18井,埋深5 142.52 m; b. 构造剪切裂缝,缝面平直,产状稳定,未充填,MX11井,埋深5 141.23 m; c. 构造剪切裂缝被溶蚀(黄色箭头),沿裂缝面形成不规则溶蚀孔洞,GS20井,埋深5 240.13 m; d. 构造张性裂缝,近直立发育,被方解石全充填,GS102井,埋深5 182.00 m; e. 层理缝(黄色箭头),成组发育,水平延伸较短,裂缝尾端分叉,GS1井,埋深4 973.15 m; f. 顺层缝合线(黄色箭头),平行层面发育,缝面呈锯齿状,被沥青全充填,MX9井,埋深5 120.45 m

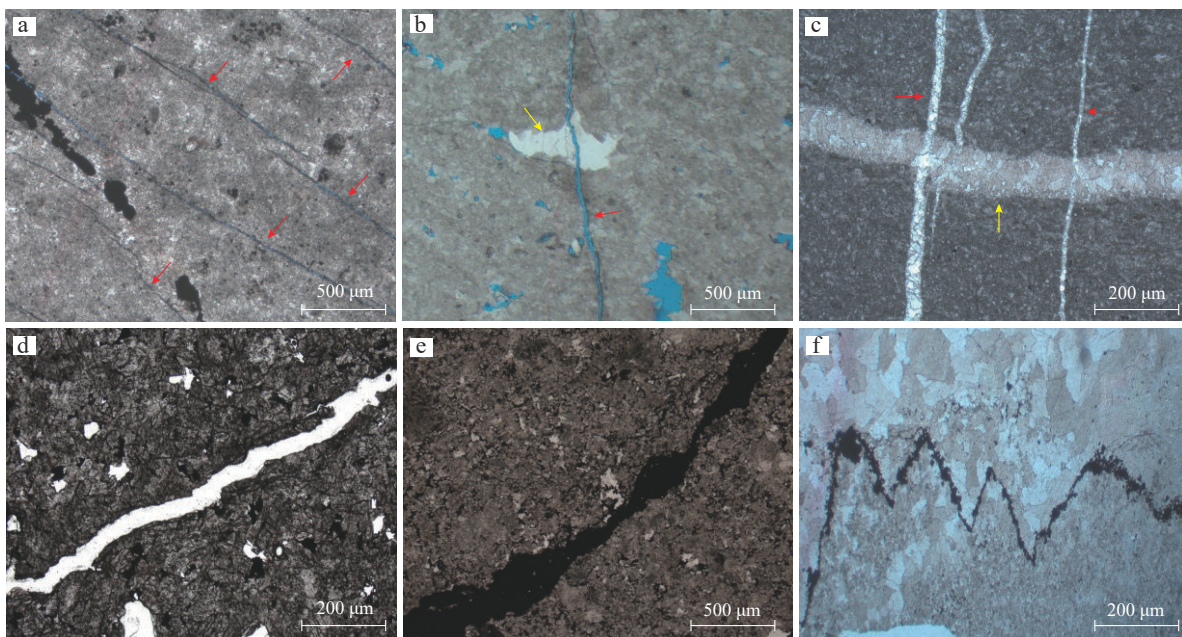


图3 高石梯—磨溪地区灯四段天然裂缝微观特征照片

Fig. 3 Microscopic characteristics of natural fractures in Deng 4 Member of Gaoshiti-Moxi area

a. 一组平行发育的构造剪切裂缝,未充填,GS102井,埋深5 138.60 m,铸体薄片;b. 构造剪切裂缝(红色箭头)切穿矿物(黄色箭头)发育,GS7井,埋深5 201.24 m,铸体薄片;c. 一组全充填剪切裂缝(红色箭头)切割另一组全充填剪切裂缝(黄色箭头),GS102井,埋深5 181.10 m,铸体薄片;d. 构造剪切裂缝发生溶蚀,裂缝开度增大,GS18井,埋深5 142.13 m,普通薄片;e. 构造张性裂缝,缝宽变化较大,沥青全充填,MX9井,埋深5 030.94 m,铸体薄片;f. 缝合线构造,锯齿状,沥青全充填,GS20井,埋深5 185.35 m,铸体薄片

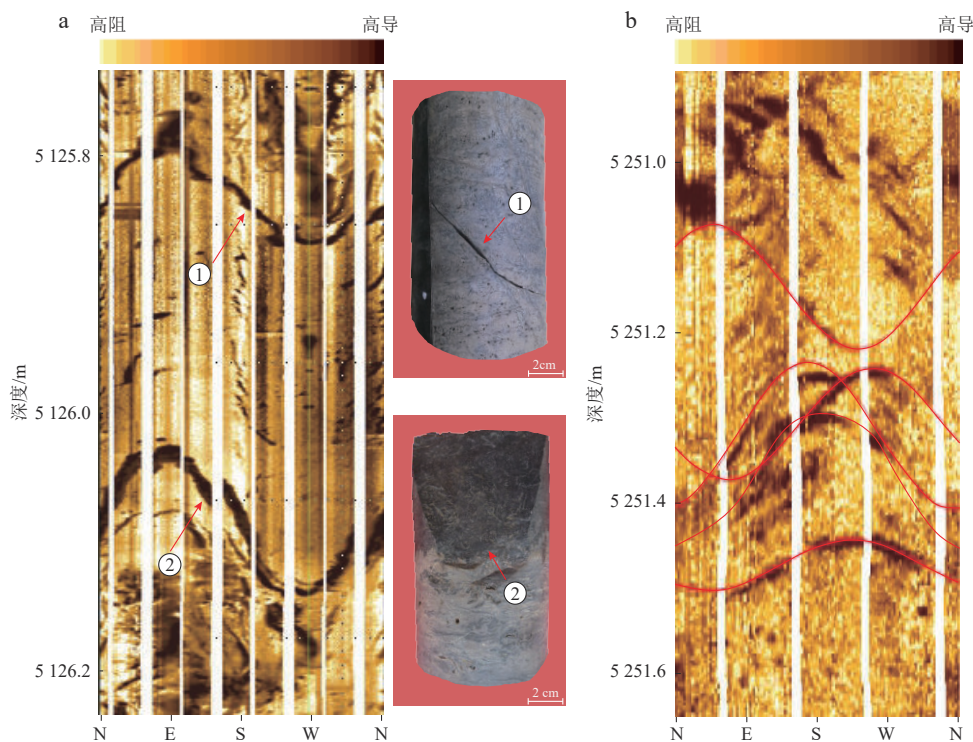


图4 高石梯—磨溪地区灯四段剪切裂缝成像测井解释结果

Fig. 4 Shear fractures interpreted by image logs in the Deng 4 Member of Gaoshiti-Moxi area

a. 一组产状相同的构造剪切裂缝(红色箭头),未充填,GS18井;b. 不同组系构造剪切裂缝相互交叉,形成裂缝网络,MX18井

(图2f,图3f),纵向起伏较小。成岩裂缝在研究区灯四段碳酸盐岩储层中发育较为广泛,但裂缝规模和开度

较小,且绝大部分层理缝和缝合线被方解石、石英、沥青等充填,裂缝渗透性较差。

3 裂缝发育特征与主控因素

高石梯—磨溪地区灯四段碳酸盐岩储层发育多种类型的天然裂缝,不同成因天然裂缝发育特征存在较大差异。天然裂缝的发育程度和有效性决定了裂缝能否作为储集空间、渗流通道及其改善储层物性能力的大小,同时也是导致储层渗流机制和天然气产出差异的重要因素^[29-31]。相比于张性裂缝、层理缝和缝合线,高石梯—磨溪地区灯四段储层中剪切裂缝总体上更为发育、规模更大、有效性更好,在改善储层质量方面所起到的作用远大于其他类型裂缝,对气井开发效果的影响也更为明显。因此,根据岩心(共9口井,累计取心长度219.25 m)、薄片(共5口井,其中常规薄片56块,铸体薄片83块)、成像测井(共6口井)等资料,本文主要针对构造剪切裂缝的产状、规模、有效性(充填程度和张开程度)、发育程度及主控因素展开研究。

3.1 裂缝产状与规模

成像测井裂缝解释结果显示,高石梯—磨溪地区灯四段构造剪切裂缝产状较为杂乱,裂缝走向主要包括4组,按其发育程度依次为NNW-SSE向、近EW向、

NE-SW向和近SN向,其他走向裂缝较少发育(图5a);裂缝倾向主要为SEE向和SSW向,分别占剪切裂缝总数的48.6%和30.3%(图5b)。岩心和成像测井资料统计结果显示,灯四段剪切裂缝倾角介于 $20^{\circ} \sim 90^{\circ}$ (图5c),主要分布于 $50^{\circ} \sim 80^{\circ}$ (约占78.9%)。结合研究区裂缝倾角分布情况和石油行业标准^[28],灯四段储层剪切裂缝可划分为低角度裂缝(倾角 $< 30^{\circ}$)、斜交裂缝(倾角介于 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$)和高角度裂缝(倾角 $> 60^{\circ}$)。高石梯—磨溪地区灯四段剪切裂缝以高角度裂缝为主(占总数量的62.3%),其次为斜交裂缝,低角度裂缝数量相对较少。岩心观察和成像测井解释结果表明,灯四段剪切裂缝纵向高度一般小于90 cm(约占93.7%),少量规模较大裂缝高度可达到米级(图5d)。

3.2 裂缝充填程度

高石梯—磨溪地区灯四段剪切裂缝的充填主要分为3种类型,即未充填、局部充填和全充填,裂缝有效性依次变差。岩心和薄片统计结果表明,研究区剪切裂缝以未充填为主,岩心和薄片未充填剪切裂缝分别占48.3%和58.2%,其次为全充填裂缝,局部充填的剪切裂缝相对较少发育。此外,结合灯四段成像测井资料对剪切裂缝充填程度进行分析可知:①总体上,

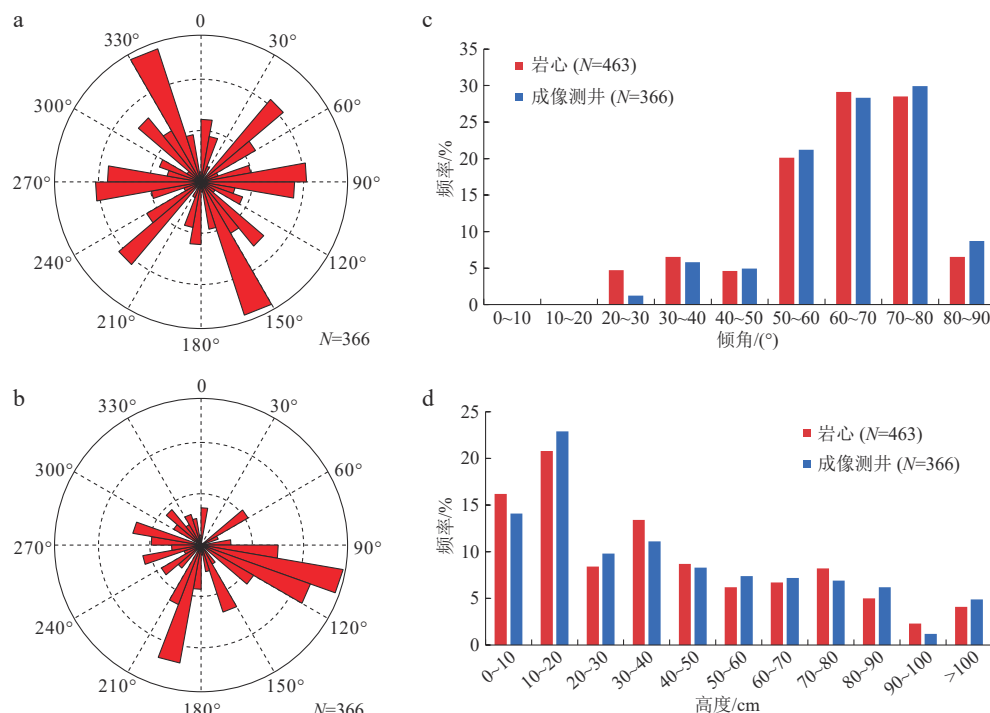


图5 高石梯—磨溪地区灯四段剪切裂缝参数特征

Fig. 5 Parameter characteristics of shear fractures in the Deng 4 Member of Gaoshiti-Moxi area

a. 剪切裂缝走向玫瑰花图(6口成像测井); b. 剪切裂缝倾向玫瑰花图(6口成像测井); c. 剪切裂缝倾角频率分布直方图(9口取心井, 6口成像测井); d. 剪切裂缝高度频率分布直方图(9口取心井, 6口成像测井)

大部分剪切裂缝未被充填(即高导缝,占52.6%),即研究区剪切裂缝以有效裂缝为主,这与岩心和薄片裂缝充填程度分析结果基本一致;②不同组系剪切裂缝充填程度存在较大差异(图6),研究区4组主要剪切裂缝中,NNW-SSE向和近SN向剪切裂缝以未充填为主(分别占61.2%和56.2%),其次为近EW向裂缝(未充填裂缝占43.5%),NE-SW向裂缝中全充填比例为66.2%,裂缝充填程度较高;③相比于远离断层的单井,位于断层附近的单井中未充填裂缝的占比较高。

储层形成演化过程中,伴随流体活动产生的矿物沉淀、胶结和重结晶等作用是导致裂缝充填的主要因素^[30-32]。早期开启裂缝可成为地下流体活动的疏导通道,在流体运移过程中,由于温度和压力条件的变化,流体中溶解的成岩矿物会达到过饱和,以沉淀物或胶结物的形式封堵裂缝内的渗流空间,降低裂缝有效性。裂缝形成时间越早,越容易被矿物充填而成为无效裂缝。岩心和薄片观察表明,高石梯—磨溪地区灯四段剪切裂缝多具有相互切割、限制关系,反映出裂缝多期形成的特点。前人研究成果表明^[33],研究区灯影组构造裂缝主要形成于桐湾期、加里东晚期和燕山期—喜马拉雅期3期构造运动,其中NE-SW向和近EW向构造裂缝主要形成于桐湾期和加里东晚期构造运动,NNW-SSE向和近SN向裂缝形成于燕山期—喜马拉雅期构造运动。由于NE-SW向和近EW向裂缝形成时间较早,其更容易因受地质历史时期流体活动影响而被矿物封堵,形成无效裂缝。相比之下,NNW-SSE向和近SN向裂缝形成较晚,其被充填的程度较低,有效性较高。此外,断层附近剪切裂缝充填程度较低,这主要是由于断层附近构造裂缝发育程度较高(详见3.4节),相互连通的裂缝网络为流体运移提供了高效通道,有

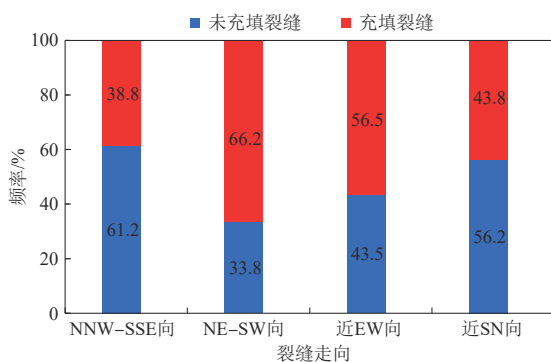


图6 高石梯—磨溪地区灯四段剪切裂缝充填程度

Fig. 6 Filling degree of shear fractures in the Deng 4 Member of Gaoshiti-Moxi area
(6口成像测井,裂缝条数366。)

利于外部流体的进入和溶解物质的排出,抑制溶解矿物发生原地沉淀和胶结。

3.3 裂缝张开程度

张开程度(开度)是反映裂缝有效性的另一重要参数。裂缝开度可以通过岩心进行直接测量,但当岩心自地下取至地面时,由于压力释放岩心上实测裂缝开度通常大于裂缝地下保存状态下的真实开度。因此,本文在利用成像测井资料对高石梯—磨溪地区灯四段剪切裂缝进行识别的基础上,根据成像测井中裂缝造成的电导异常计算获取裂缝地下开度^[34]。统计结果表明:①总体来看,研究区灯四段剪切裂缝开度主要在80 μm以内,少数裂缝开度可超过100 μm,平均为28.6 μm;②不同倾角剪切裂缝开度具有差异(图7a),总体上表现为高角度缝开度较大(平均值为37.5 μm),斜交缝开度次之(平均值为25.3 μm),而低角度缝开度相对较小(平均值为17.3 μm);③不同走向剪切裂缝开度差异较大(图7b),其中NNW-SSE向和近EW向裂缝开度较大,平均值分别为40.3 μm和31.2 μm,其次为近SN向裂缝(平均值为25.8 μm),NE-SW向裂缝开度相对较小。

裂缝地下开度与现今地应力密切相关,取决于裂缝产状与现今地应力之间的关系。裂缝倾角不同,其

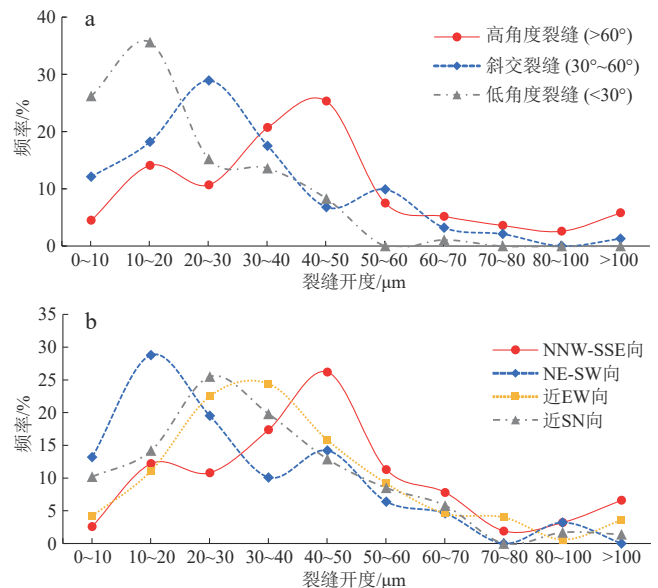


图7 高石梯—磨溪地区灯四段不同倾角(a)及不同组系(b)剪切裂缝开度分布特征

Fig. 7 Aperture distribution of different dip angles (a) and orientations (b) for shear fractures in the Deng 4 Member of Gaoshiti-Moxi area
(6口成像测井,裂缝条数366。)

受上覆地层静岩压力作用有所差异。裂缝倾角较小时,较强的上覆地层静岩压力导致裂缝开度减小,甚至趋于闭合;反之,裂缝倾角较大时,静岩压力对裂缝影响较小,裂缝通常具有较大的张开程度。对于不同走向的高角度裂缝而言,其开度主要与现今水平最大主应力相关,取决于裂缝走向与水平最大主应力方向之间的夹角。这个夹角越大,作用于裂缝缝面之上的有效应力越强,在其作用下裂缝开度趋于减小。根据4口成像测井资料反映的诱导裂缝(图8a)和井径崩塌(图8b)方位,高石梯—磨溪地区灯影组现今水平最大主应力为NNW-SEE至NW-SE向,优势方向为 310° 。研究区NNW-SSE向和近EW向裂缝走向与水平最大主应力方向夹角较小,缝面所受有效应力作用较弱,裂缝张开程度较大。然而,NE-SW向剪切裂缝与水平最大主应力方向近垂直,受较强有效应力作用,其裂缝开度整体较小。

3.4 裂缝发育程度

岩心、薄片裂缝观察及成像测井裂缝解释结果显示,高石梯—磨溪地区灯四段构造剪切裂缝发育程度具有极强的非均质性特征,不同单井、同一单井不同层位中剪切裂缝发育程度存在较大差异,裂缝密度从0.26条/m到8.61条/m不等。综合分析认为,研究区灯四段构造剪切裂缝的发育程度主要受岩性、岩石力学层厚度及局部构造等多种因素影响。

岩性是储层裂缝发育的基础,也是影响构造裂缝发育特征的重要内因之一。不同岩性岩石由于矿物组成、颗粒粒度、岩石结构等方面的差异,影响着相同应力条件下岩石的破裂方式和破裂能力,进而控制了不同岩性岩石中构造裂缝的发育程度。大量岩石力学实验表明,岩石中脆性矿物含量越高、颗粒粒度越细、岩

石结构越均匀,在应力作用下越易发生破裂变形形成构造裂缝。受海平面频繁升降和微生物活动影响,高石梯—磨溪地区灯四段储层岩石类型复杂多样,根据成因类型主要可分为藻白云岩(包括藻叠层、藻纹层、藻凝块云岩等)、泥晶云岩、泥质云岩和硅质云岩,发育程度依次减弱,岩层厚度分别占总取心长度的41.6%、35.8%、13.2%和9.4%。研究区9口取心井岩心裂缝密度统计结果表明,灯四段不同岩性内剪切裂缝发育程度具有较大差异(图9a),其中泥晶云岩中剪切裂缝最为发育,平均裂缝线密度为3.38条/m,其次为硅质云岩和藻白云岩,平均裂缝线密度分别为2.30条/m和1.62条/m,泥质云岩中裂缝发育程度相对较差。

岩石力学层是影响构造裂缝形成和分布的另一重要内在因素,是指一套岩石力学性质相同或相近的岩层,由岩石力学界面和岩石力学单元构成^[35-36]。岩石力学层通常与单一岩性层相对应,有时也由多个岩性层构成,其性质决定着岩层的变形行为,进而控制构造裂缝的发育特征,主要表现为:①岩石力学层界面制约构造裂缝的纵向延伸,将构造裂缝限制在单一岩石力学层内发育,进而控制裂缝规模;②岩石力学层厚度控制构造裂缝的发育强度,在一定厚度范围内,岩层厚度越大,其发生破裂所需能量越多,相同应力条件下岩层内构造裂缝间距越大、密度越小。基于研究区取心资料,结合岩性和裂缝发育差异对灯四段岩石力学层进行了识别和划分,在此基础上统计分析了岩石力学层厚度(指同一岩性岩层中裂缝化岩层的厚度)与剪切裂缝密度之间的关系。结果表明,灯四段储层剪切裂缝发育程度受岩石力学层控制明显,岩石力学层厚度与裂缝密度之间呈现较好的负相关关系(呈对数函数,相关系数 R^2 为0.24),在岩石力学层厚度小于3.0m的范

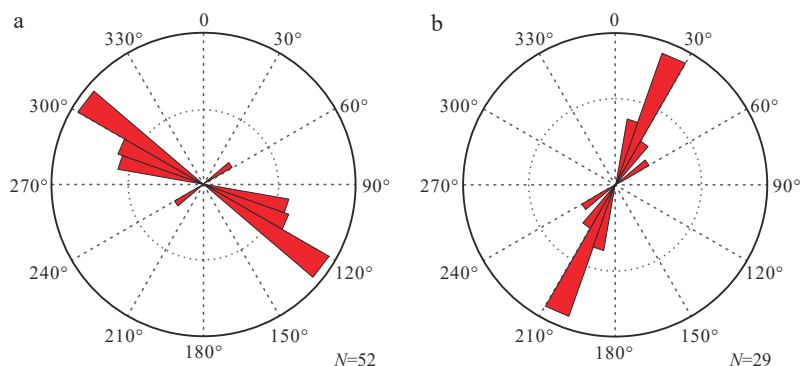


图8 高石梯—磨溪地区灯四段钻井诱导裂缝(a)及井径崩塌(b)走向玫瑰花图

Fig. 8 Rose diagrams of drilling-induced fractures (a) and borehole breakout (b) orientations in the Deng 4 Member of Gaoshiti-Moxi area

围内,除个别统计数据外,裂缝密度随着厚度增加逐渐减小;但当岩石力学层厚度大于3.0 m时,岩石力学层厚度与裂缝密度之间不再具有明显相关性(图9b)。

构造是影响构造裂缝发育和分布的主要外界因素,局部构造控制下的构造应力场差异分布是造成构造裂缝发育程度和分布规律不同的根本原因。断层是影响构造裂缝发育特征的重要构造类型之一,其形成演化过程中会发生应力扰动,导致断层附近的构造应力分布具有分带性,进而控制着断层不同部位构造裂缝的发育与分布。前人研究表明,断层对构造裂缝的影响程度主要与断层性质、规模和活动性等因素相关^[27, 29]。受桐湾期、加里东期及喜马拉雅期构造运动影响,高石梯—磨溪地区震旦系发育NE向、NW向和近EW向走滑断层。结合岩心观察和成像测井解释资料,对研究区不同构造位置的剪切裂缝特征进行了统

计分析。结果表明,灯四段剪切裂缝发育受走滑断层控制明显,主要表现在:①走滑断层附近,剪切裂缝的优势裂缝方位与其临近的走滑断层走向基本一致或呈小角度相交(图1),可推断其多为断层伴生裂缝;②走滑断层两侧剪切裂缝相对发育,随到断层距离的增加,裂缝密度呈幂指数趋势减小(相关系数 R^2 为0.35),对于多数走滑断层,其对剪切裂缝的控制范围主要局限在1 000 m内(图9c);③走滑断层规模越大,其对剪切裂缝发育程度的控制作用越明显,研究区主干断层控制区内裂缝平均密度为3.88条/m,而次级断层控制范围内裂缝平均密度为1.91条/m(图9c);④相比于走滑断层线性发育段,断层端部和叠合区内剪切裂缝发育程度更高。

4 天然裂缝对气井产能的影响

川中高石梯—磨溪地区震旦系灯四段碳酸盐岩储层在形成演化过程中经历了成岩作用和构造作用的复杂改造。受强烈压实和胶结作用影响,储层基质中原生孔隙基本被破坏殆尽,基质物性较差。灯四段碳酸盐岩储层的储集空间主要由不同类型、不同规模的次生溶孔、溶洞和天然裂缝构成,其中溶蚀孔洞为油气提供了主要的富集空间,天然裂缝为流体渗流提供了主要渗流通道,控制着储层中流体的渗流规律,进而影响气井的生产能力和开发效果。如前所述,不同类型天然裂缝发育特征存在较大差异,决定了其对碳酸盐岩气藏产气的贡献。高石梯—磨溪地区灯四段碳酸盐岩储层内,构造张性裂缝发育数量极少且多被矿物完全充填,基本不具有改善储层渗透性的能力。层理缝和缝合线发育数量较多,但裂缝规模较小且绝大多数裂缝被充填,即使有少数层理缝和缝合线未被充填,但由于此类裂缝多平行或近平行于岩层层面延伸(即近水平发育),在上覆地层压力作用下裂缝张开程度较小甚至趋于闭合,对储层渗流能力的贡献较小。相比之下,构造剪切裂缝在裂缝规模、发育程度及有效性方面均明显好于其他类型裂缝,其对储层渗透性和气藏开发的影响也更为明显。

同时,受构造、岩性及成岩作用等多种地质因素综合影响,研究区灯四段碳酸盐岩储层构造剪切裂缝发育具有较强的非均质性,导致气井产气能力存在较大差异性。为明确构造剪切裂缝差异发育对气井产能影响,结合岩心、成像测井、物性测试及试井分析资料,对比分析了研究区14口单井17个试气层段内储层发育情况和构造剪切裂缝发育特征(表1)。对比结果表

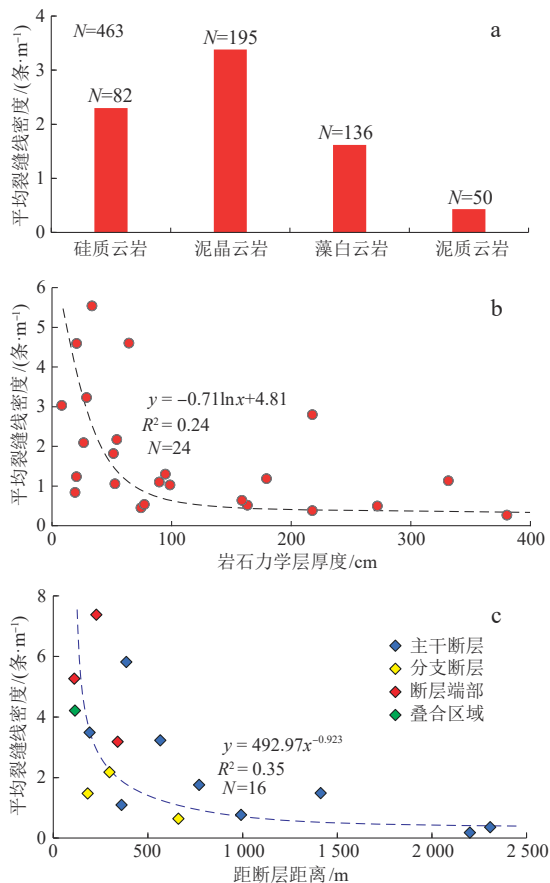


图9 高石梯—磨溪地区灯四段剪切裂缝发育程度与岩性、岩石力学层厚度及断层的关系

Fig. 9 Relationships of lithology, mechanical layer thickness, and faults with the development degree of shear fractures in the Deng 4 Member of Gaoshiti-Moxi area

a. 不同岩性剪切裂缝平均线密度柱状图(9口取心井); b. 岩石力学层厚度与平均裂缝密度交会图(虚线为趋势线); c. 单井到断层距离与平均裂缝密度交会图(虚线为趋势线)

表1 高石梯—磨溪地区灯四段试气层段储层、剪切裂缝发育特征及试井结果

Table 1 Characteristics of reservoirs, shear fractures and well test results in the Deng 4 Member in Gaoshiti-Moxi area

测试井号	平均孔隙度/%	裂缝发育情况			试井解释 有效渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	试气产量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
		平均线密度/ (条· m^{-1})	未充填比例/%	平均开度/ μm		
GS10	4.22	0.68	42.7	—	0.51	11.3
GS103	4.02	1.66	38.3	16.7	0.76	13.9
GS111	3.72	1.52	42.3	20.3	—	21.3
GS120	3.34	0.42	23.6	—	0.22	5.3
GS16	—	4.68	30.3	9.2	1.15	18.8
GS18	3.29	2.63	65.2	20.6	6.28	46.6
GS20-A	3.52	2.17	30.8	18.7	0.91	6.8
GS20-B	—	1.76	32.8	—	1.05	10.2
GS21	2.66	1.35	27.6	11.3	—	3.6
GS3	3.63	6.17	53.8	—	8.73	96.8
GS7-A	3.69	2.98	23.0	26.1	0.23	7.6
GS7-B	3.52	3.41	67.1	27.5	3.47	45.8
GS7-C	3.68	3.02	57.4	22.5	2.05	32.5
MX13	4.18	2.85	39.6	—	2.18	30.2
MX117	3.51	2.98	19.7	13.5	0.49	14.5
MX118	2.98	5.06	52.1	27.2	9.38	61.3
MX23	3.52	3.82	43.1	24.1	4.21	42.5

注:“—”为无数据。

明:①试气低产段和试气高产段储层孔隙度均较高且差异较小,平均孔隙度通常大于3.0%,岩心和成像测井资料显示储层中溶蚀孔洞均较为发育;②试气高产段剪切裂缝发育程度一般较高,试气低产段剪切裂缝发育程度具有较大差异,一些试气低产段剪切裂缝密度较低(如GS10井和GS120井),而某些试气低产段剪切裂缝发育程度较高,平均裂缝密度甚至大于试气高产段,如GS16井试气层段裂缝平均线密度为4.68条/m,高于GS18和MX117两口试气高产井;③相比于试气低产段,试气高产段中剪切裂缝的充填程度较低,裂缝开度较大,即裂缝有效性较好,如MX118井中未充填裂缝占比约52.1%,平均裂缝开度为27.2 μm ;④不同试气层段内,有效裂缝以NNW-SSE向和近EW向剪切裂缝为主,近SN向和NE-SW向裂缝占比相对较少,如GS7井试井层段内,有效裂缝中NNW-SSE向和近EW向裂缝总占比均高于70%(图10);⑤低产段和高产段储层渗透性存在较大差异,试井解释的高产层段有效渗透率明显大于低产层段。

上述对比结果表明,构造剪切裂缝的发育程度、充填程度及张开程度共同决定了其对碳酸盐岩储层渗透性的贡献能力,影响着气井的产气水平。碳酸盐岩储层中,有效剪切裂缝是改善储层渗流能力的关键,特别

是当有效裂缝大量发育时,不同产状、不同规模的裂缝相互交织可构成较大空间范围的裂缝网络,使相对孤立、分散的溶蚀孔洞之间较好地相互连通,可极大提升储层渗透性,为天然气产出提供有利条件,提高气井产能。对于高石梯—磨溪地区灯四段碳酸盐岩储层,NNW-SSE向和近EW向剪切裂缝具有较低充填程度和较大开度,表现出较好的裂缝有效性,其改善储层渗透性的能力明显高于其他组系裂缝,对提升气井产能具有相对较大的贡献。

5 结论

1) 高石梯—磨溪地区灯四段碳酸盐岩储层天然裂缝按照地质成因可分为构造裂缝和成岩裂缝,其中构造裂缝包括剪切裂缝和张性裂缝,成岩裂缝主要为层理缝和缝合线。构造剪切裂缝是灯四段储层中主要的裂缝类型,裂缝倾角多大于 50° ,裂缝走向包括NNW-SSE向、近EW向、NE-SW向和近SN向,发育程度依次减弱。

2) 灯四段碳酸盐岩储层中构造剪切裂缝有效性和发育程度存在较大差异。其中,裂缝有效性主要受控于裂缝形成时间、胶结和溶蚀作用、裂缝产状及现今地应力等因素,研究区NNW-SSE向和近EW向剪切裂

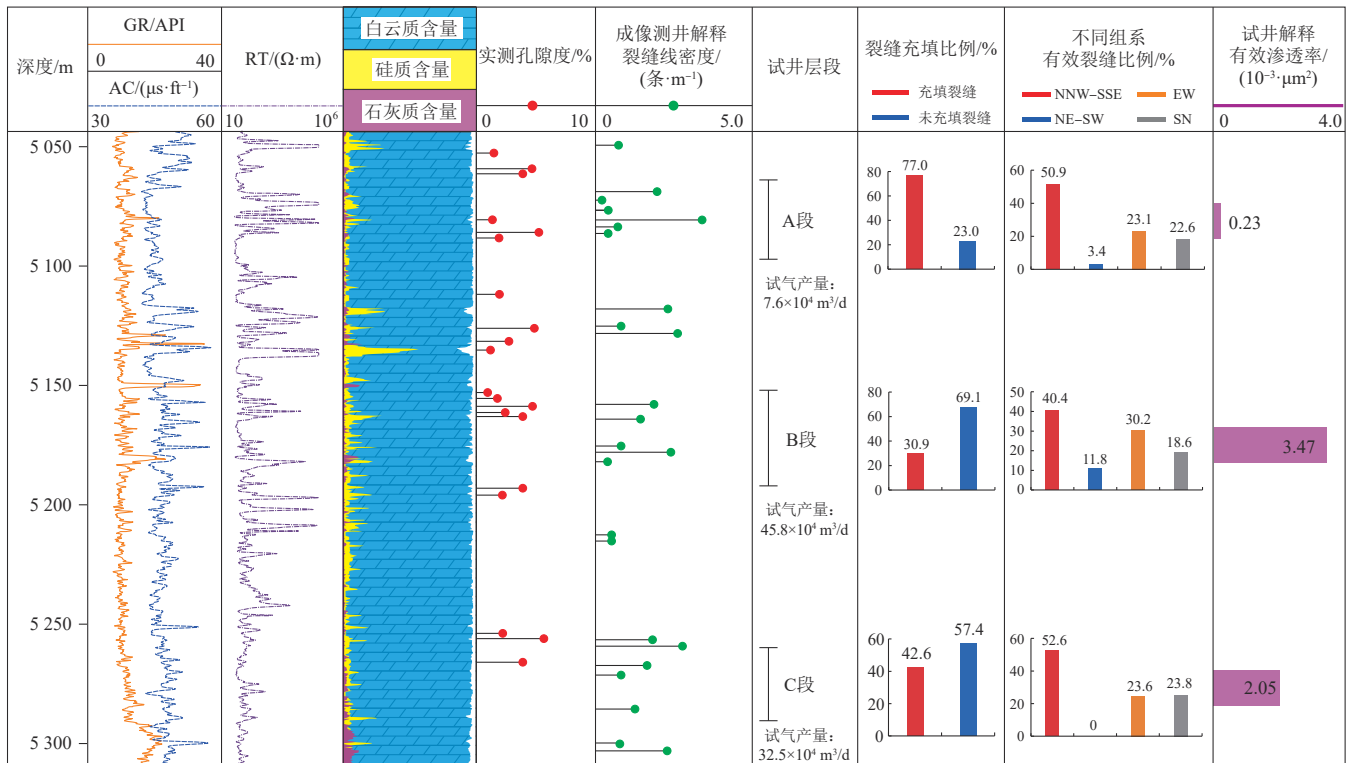


图10 高石梯—磨溪地区GS7井灯四段裂缝发育特征及试井结果

Fig. 10 Fracture characteristics and well test results of the Deng 4 Member in well GS7, Gaoshiti-Moxi area

缝有效性相对较好。裂缝发育程度与储层岩性、岩石力学层厚度及断层等因素密切相关,泥晶云岩中裂缝相对较为发育;随岩石力学层厚度增加,裂缝密度减小、规模增大;主干走滑断层附近,尤其断层端部和叠合区域,裂缝发育程度更高。

3) 构造剪切裂缝为灯四段碳酸盐岩储层中流体流动提供了主要渗流通道,其发育程度和有效性共同决定了对流体渗流规律的控制程度,进而影响气井产能。高石梯—磨溪地区灯四段碳酸盐岩储层中,NNW-SSE向和近EW向剪切裂缝充填程度低、裂缝开度大,具有较好的有效性,其改善储层渗透性的能力明显高于其他组系裂缝,对提升气井产能具有相对较大的贡献。

参 考 文 献

- [1] 何治亮, 马永生, 朱东亚, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层理论技术进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 533-546.
HE Zhiliang, MA Yongsheng, ZHU Dongya, et al. Theoretical and technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 533-546.
- [2] 马新华, 闫海军, 陈京元, 等. 四川盆地安岳气田震旦系气藏叠合岩溶发育模式与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1281-1294, 1333.
MA Xinhua, YAN Haijun, CHEN Jingyuan, et al. Development patterns and constraints of superimposed karst reservoirs in Sinian Dengying Formation, Anyue Gas Field, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1281-1294, 1333.
- [3] RASHID F, HUSSEIN D, LAWRENCE J A, et al. Characterization and impact on reservoir quality of fractures in the Cretaceous Qamchuqa Formation, Zagros folded belt[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 113: 104117.
- [4] 马永生, 何治亮, 赵培荣, 等. 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): 1415-1425.
MA Yongsheng, HE Zhiliang, ZHAO Peirong, et al. A new progress in formation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(12): 1415-1425.
- [5] 谢军, 郭贵安, 唐青松, 等. 超深古老白云岩岩溶型气藏高效开发关键技术——以四川盆地安岳气田震旦系灯影组气藏为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(6): 52-59.
XIE Jun, GUO Guian, TANG Qingsong, et al. Key technologies for the efficient development of ultra-deep ancient dolomite karst gas reservoirs: A case study of the Sinian Dengying Formation gas reservoir in the Anyue Gas Field of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(6): 52-59.
- [6] 沈安江, 陈娅娜, 张建勇, 等. 中国古老小克拉通台内裂陷特征及石油地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 15-25.
SHEN Anjiang, CHEN Yana, ZHANG Jianyong, et al. Characteristics of intra-platform rift in ancient small-scale cratonic platform of China and its implications for hydrocarbon exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 15-25.

- [7] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 181-192.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 181-192.
- [8] 赵文智, 汪泽成, 姜华, 等. 从古老碳酸盐岩大油气田形成条件看四川盆地深层震旦系的勘探地位[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 1-10.
ZHAO Wenzhi, WANG Zecheng, JIANG Hua, et al. Exploration status of the deep Sinian strata in the Sichuan Basin: Formation conditions of old giant carbonate oil/gas fields [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 1-10.
- [9] 魏国齐, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区震旦系—寒武系大型气藏特征与聚集模式[J]. 石油学报, 2015, 36(1): 1-12.
WEI Guoqi, DU Jinhu, XU Chunchun, et al. Characteristics and accumulation modes of large gas reservoirs in Sinian-Cambrian of Gaoshiti-Moxi region, Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1): 1-12.
- [10] 文龙, 王文之, 张健, 等. 川中高石梯—磨溪地区震旦系灯影组碳酸盐岩岩石类型及分布规律[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1285-1294.
WEN Long, WANG Wenzhi, ZHANG Jian, et al. Classification of Sinian Dengying Formation and sedimentary evolution mechanism of Gaoshiti-Moxi area in central Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1285-1294.
- [11] 宋金民, 刘树根, 李智武, 等. 四川盆地上震旦统灯影组微生物碳酸盐岩储层特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 741-752.
SONG Jinmin, LIU Shugen, LI Zhiwu, et al. Characteristics and controlling factors of microbial carbonate reservoirs in the Upper Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin, China [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 741-752.
- [12] 杨威, 魏国齐, 赵蓉蓉, 等. 四川盆地震旦系灯影组岩溶储层特征及展布[J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 55-60.
YANG Wei, WEI Guoqi, ZHAO Rongrong, et al. Characteristics and distribution of karst reservoirs in the Sinian Dengying Fm, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(3): 55-60.
- [13] 朱东亚, 张殿伟, 张荣强, 等. 中国南方地区灯影组白云岩储层流体溶蚀改造机制[J]. 石油学报, 2015, 36(10): 1188-1198.
ZHU Dongya, ZHANG Dianwei, ZHANG Rongqiang, et al. Fluid alteration mechanism of dolomite reservoirs in Dengying Formation, South China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(10): 1188-1198.
- [14] 金民东, 谭秀成, 童明胜, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区灯影组岩溶古地貌恢复及地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 58-68.
JIN Mindong, TAN Xiucheng, TONG Mingsheng, et al. Karst paleogeomorphology of the fourth Member of Sinian Dengying Formation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin, SW China: Restoration and geological significance [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 58-68.
- [15] 汪泽成, 姜华, 王铜山, 等. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 305-312.
WANG Zecheng, JIANG Hua, WANG Tongshan, et al. Paleogeomorphology formed during Tongwan tectonization in Sichuan Basin and its significance for hydrocarbon accumulation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 305-312.
- [16] 李启桂, 李克胜, 周卓铸, 等. 四川盆地桐湾不整合面古地貌特征与岩溶分布预测[J]. 石油天然气与地质, 2013, 34(4): 516-521.
LI Qigui, LI Kesheng, ZHOU Zhuozhu, et al. Palaeogeomorphology and karst distribution of Tongwan unconformity in Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 516-521.
- [17] 闫海军, 彭先, 夏钦禹, 等. 高石梯—磨溪地区灯影组四段岩溶古地貌分布特征及其对气藏开发的指导意义[J]. 石油学报, 2020, 41(6): 658-670, 752.
YAN Haijun, PENG Xian, XIA Qinyu, et al. Distribution features of ancient karst landform in the fourth Member of the Dengying Formation in the Gaoshiti-Moxi region and its guiding significance for gas reservoir development [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(6): 658-670, 752.
- [18] 王国芝, 刘树根, 李娜, 等. 四川盆地北缘灯影组深埋白云岩优质储层形成与保存机制[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 667-678.
WANG Guozhi, LIU Shugen, LI Na, et al. Formation and preservation mechanism of high quality reservoir in deep burial dolomite in the Dengying Formation on the northern margin of the Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(3): 667-678.
- [19] 罗冰, 杨跃明, 罗文军, 等. 川中古隆起灯影组储层发育控制因素及展布[J]. 石油学报, 2015, 36(4): 416-426.
LUO Bing, YANG Yueming, LUO Wenjun, et al. Controlling factors and distribution of reservoir development in Dengying Formation of paleo-uplift in central Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(4): 416-426.
- [20] 魏国齐, 王志宏, 李剑, 等. 四川盆地震旦系—寒武系烃源岩特征、资源潜力与勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(1): 1-13.
WEI Guoqi, WANG Zhihong, LI Jian, et al. Characteristics of source rocks, resource potential and exploration direction of Sinian and Cambrian in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(1): 1-13.
- [21] 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 278-293.
ZOU Caineng, DU Jinhu, XU Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 278-293.
- [22] 曾富英, 杨威, 孙爱, 等. 四川盆地川中地区震旦系灯影组台地边缘相带地震识别及其分段特征[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1079-1086.

- ZENG Fuying, YANG Wei, SUN Ai, et al. Seismic recognition and zonation of the platform margin facies of the Sinian Dengying Formation in central Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(6): 1079–1086.
- [23] 马德波, 汪泽成, 段书府, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区走滑断层构造特征与天然气成藏意义[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 795–805.
- MA Debo, WANG Zecheng, DUAN Shufu, et al. Strike-slip faults and their significance for hydrocarbon accumulation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 795–805.
- [24] 谷一凡, 周路, 蒋裕强, 等. 四川盆地高石梯区块震旦系灯影组四段储层类型及气井产能模式[J]. *石油学报*, 2020, 41(5): 574–583.
- GU Yifan, ZHOU Lu, JIANG Yuqiang, et al. Reservoir types and gas well productivity models for Member 4 of Sinian Dengying Formation in Gaoshiti block, Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(5): 574–583.
- [25] 曾联波, 高春宇, 漆家福, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区特低渗透砂岩储层裂缝分布规律及其渗流作用[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2008(S1): 41–47.
- ZENG Lianbo, GAO Chunyu, QI Jiafu, et al. The distribution low and seepage effect of natural fractures in ultra-low permeability sandstone reservoir in Longdong area, Ordos Basin [J]. *Science in China(Series D: Earth Sciences)*, 2008(S1): 41–47.
- [26] LAUBACH S E, OLSON J E, CROSS M R. Mechanical and fracture stratigraphy [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(11): 1413–1426.
- [27] 巩磊, 高铭泽, 曾联波, 等. 影响致密砂岩储层裂缝分布的主控因素分析——以库车前陆盆地侏罗系—新近系为例[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(2): 199–208.
- GONG Lei, GAO Mingze, ZENG Lianbo, et al. Controlling factors on fracture development in the tight sandstone reservoirs: A case study of Jurassic-Neogene in the Kuqa foreland Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(2): 199–208.
- [28] 油气田开发专业标准化委员会. 碳酸盐岩储层精细描述方法: SY/T 6286–1997[S]. 北京: 中国石油天然气总公司, 1997.
- Standardization Committee of Oil and Gas Field Development Discipline. Detail description method for carbonate reservoir: SY/T 6286–1997 [S]. Beijing: China National Petroleum Corporation, 1997.
- [29] 赵向原, 胡向阳, 肖开华, 等. 川西彭州地区雷口坡组碳酸盐岩储层裂缝特征及主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(1): 30–39, 152.
- ZHAO Xiangyuan, HU Xiangyang, XIAO Kaihua, et al. Characteristics and major control factors of natural fractures in carbonate reservoirs of Leikoupo Formation in Pengzhou area, western Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(1): 30–39, 152.
- [30] 史今雄, 曾联波, 谭青松, 等. 沁水盆地南部煤岩储层天然裂缝有效性及对煤层气开发的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 617–626.
- SHI Jinxiong, ZENG Lianbo, TAN Qingsong, et al. Effectiveness of natural fractures in CBM reservoirs and its influence on CBM development in the southern Qinshui Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 617–626.
- [31] 赵向原, 胡向阳, 曾联波, 等. 四川盆地元坝地区长兴组礁滩相储层天然裂缝有效性评价[J]. *天然气工业*, 2017, 37(2): 52–61.
- ZHAO Xiangyuan, HU Xiangyang, ZENG Lianbo, et al. Evaluation on the effectiveness of natural fractures in reef-flat facies reservoirs of Changxing Fm in Yuanba area, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(2): 52–61.
- [32] 曾联波, 巩磊, 祖克威, 等. 柴达木盆地西部古近系储层裂缝有效性的影响因素[J]. *地质学报*, 2012, 86(11): 1809–1814.
- ZENG Lianbo, GONG Lei, ZU Kewei, et al. Influence factors on fracture validity of the Paleogene reservoir, western Qaidam Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(11): 1809–1814.
- [33] SHI Jinxiong, ZHAO Xiangyuan, PAN Renfang, et al. Natural fractures in the deep Sinian carbonates of the central Sichuan Basin, China: Implications for reservoir quality [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 216: 110829.
- [34] PONZIANI M, SLOB E, LUTHI S, et al. Experimental validation of fracture aperture determination from borehole electric microresistivity measurements [J]. *Geophysics*, 2015, 80(3): D175–D181.
- [35] 曾联波, 吕鹏, 屈雪峰, 等. 致密低渗透储层多尺度裂缝及其形成地质条件[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 449–454.
- ZENG Lianbo, LYU Peng, QU Xuefeng, et al. Multi-scale fractures in tight sandstone reservoirs with low permeability and geological conditions of their development [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 449–454.
- [36] 赵向原, 曾联波, 祖克威, 等. 致密储层脆性特征及对天然裂缝的控制作用——以鄂尔多斯盆地陇东地区长7致密储层为例[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(1): 62–71.
- ZHAO Xiangyuan, ZENG Lianbo, ZU Kewei, et al. Brittleness characteristics and its control on natural fractures in tight reservoirs: A case study from Chang 7 tight reservoir in Longdong area of the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(1): 62–71.

(编辑 张 晟)