

低渗透储层构造裂缝长度表征及应用

——以四川盆地磨溪—高石梯地区寒武系龙王庙组为例

孙珂^{1,2}, 徐珂³, 陈清华²

1. 中国石化石油勘探开发研究院 北京 102206;

2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

3. 中国石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000

摘要:为明确低渗透储层构造裂缝长度定量表征方法,以四川盆地磨溪—高石梯地区寒武系龙王庙组为例,综合采用岩心裂缝统计及岩石力学实验方法,从构造应力场的角度推导低渗透储层构造裂缝长度的关系式。该方法将裂缝长度与裂缝体密度、应变能密度及岩体应力状态联系起来,建立了裂缝长度与裂缝体密度之间的定量计算关系。结果表明:裂缝长度与裂缝数量呈负指数幂关系;裂缝体密度与应变能密度呈正比线性关系;裂缝长度与裂缝体密度呈负指数幂关系。将推导的裂缝长度公式应用于磨溪—高石梯地区龙王庙组,数值模拟结果显示:裂缝体密度值普遍介于 $1\sim 5\text{ m}^2/\text{m}^3$,最高为 $9\text{ m}^2/\text{m}^3$,高值区主要分布于断层及周边地区;裂缝长度主要介于 $1\sim 20\text{ m}$,断层及周边区域裂缝密而短,长度普遍小于 3 m 。

关键词:构造裂缝参数;裂缝长度;低渗透储层;龙王庙组;寒武系;磨溪—高石梯地区;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characterization of the length of structural fractures in low permeability reservoirs and its application:

a case study of Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti areas, Sichuan Basin

SUN Ke^{1,2}, XU Ke³, CHEN Qinghua²

1. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102206, China;

2. School of Geoscience, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;

3. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China

Abstract: In order to classify the quantitative characterization method of structural fracture length in low-permeability reservoirs, the Cambrian Longwangmiao Formation of Moxi-Gaoshiti areas in the Sichuan Basin is taken an example in this study. The relationship between structural fracture lengths of low-permeability reservoirs was derived from the perspective of structural stress field by the means of core fracture statistics and rock mechanical experiment. Quantitative relationships between fracture length and fracture volume density, strain energy density and rock mass stress state were established. Results showed a negative exponential power relationship between fracture length and number, a proportional linear relationship between fracture volume density and strain energy density, and a negative exponential power relationship between fracture length and volume density. The derived fracture length formula was applied to the Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti areas. Numerical simulation results showed that fracture density generally ranges from $1\sim 5\text{ m}^2/\text{m}^3$, and the highest value is $9\text{ m}^2/\text{m}^3$, mainly distributed in fault and its surrounding areas. Fracture length is mainly between $1\sim 20\text{ m}$. The fractures in fault and surrounding areas are dense and short, usually less than 3 m .

Key words: structural fracture parameter; fracture length; low permeability reservoirs; Longwangmiao Formation; Cambrian; Moxi-Gaoshiti areas; Sichuan Basin

收稿日期:2021-03-30;修订日期:2021-11-02。

作者简介:孙珂(1987—),男,博士,助理研究员,从事油气盆地分析、油气区构造解析研究。E-mail:sunke.syky@sinopec.com。

通信作者:徐珂(1991—),男,博士,高级工程师,从事油气区构造解析、油田地质力学研究。E-mail:xuke0505@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“缝洞型碳酸盐岩油藏精细描述与地质建模技术”(2016ZX05014-002)、中国博士后科学基金“博孜一大北区带地质力学对构造和储层影响机理研究”(2019M660269)联合资助。

低渗透储层通常具有低孔低渗、孔喉细小、孔隙结构复杂的特征^[1],非均质性且天然裂缝发育。裂缝是低渗透储层重要的储集空间和渗流通道,影响着油气分布及勘探开发^[2-3],它主要承载着气体储集空间和渗流通道两大功能^[4],是低渗透砂岩油藏勘探开发必须重视的地质因素之一^[5-6]。然而,储层裂缝是一个复杂、非均质、非线性的系统^[7],构造应力场、岩性、断层以及构造形态等多种因素影响裂缝的形成与分布^[8-10]。由于构造裂缝在低渗透储层中占主导,因此对于储层裂缝的定量研究可以从构造应力的角度出发^[11-14]。目前对天然裂缝的研究主要是从其密度(线密度、体积密度)、开度(宽度)、孔隙度以及渗透率等参数进行表征和预测^[15-17],但较少涉及裂缝长度的分析,特别是裂缝长度的定量研究。穆龙新等^[18]通过注水的方法使天然裂缝开启,根据注入量分析垂直裂缝的延伸长度;刘子雄等^[19]采用四维影像向量扫描裂缝监测预测了压裂裂缝的延伸方向和范围;张林等^[20]和尹丛彬等^[21]利用微地震监测方法计算压裂裂缝的延伸长度与高度,但受实验条件和成本的限制,上述方法均难以大规模开展。然而,裂缝长度作为表征裂缝规模和连通性的重要参数,对于裂缝性油气藏的开发和评价至关重

要。因此,本研究以岩心裂缝观察统计和岩石力学实验结果作为基础,以岩石能量和构造应力作为理论指导,结合断裂力学原理和方法,建立裂缝长度、裂缝数量、应变能密度、裂缝体密度及应力状态之间的关系,从而推导出构造裂缝长度的定量表征公式。本文以四川盆地磨溪—高石梯地区龙王庙组碳酸盐岩低渗透储层为例开展研究,所推导的构造裂缝长度公式及裂缝预测结果,可为磨溪—高石梯地区龙王庙组低渗透储层的开发方案制定提供参考和借鉴。

1 研究区概况

磨溪—高石梯地区位于四川盆地中部的川中古隆中斜平缓带轴部以东(图 1)^[22],总面积约 2 330 km²。构造总体呈北东东—南西西向延伸,比较平缓,褶皱强度弱,龙王庙组构造发育多高点,圈闭面积大,但闭合度小。该区经历了多期构造运动:晚震旦世古隆起已具雏形,主要发育在威远地区;早寒武世早期,受区域拉张活动控制,绵阳—长宁拉张槽继承性发育;志留纪末的加里东运动时期,古隆起定型,志留系被大面积剥蚀;海西—燕山早期,古隆起继承性演化并不断埋深;燕山晚期—喜马拉雅期,受威远构造快速隆升影响,古隆起西

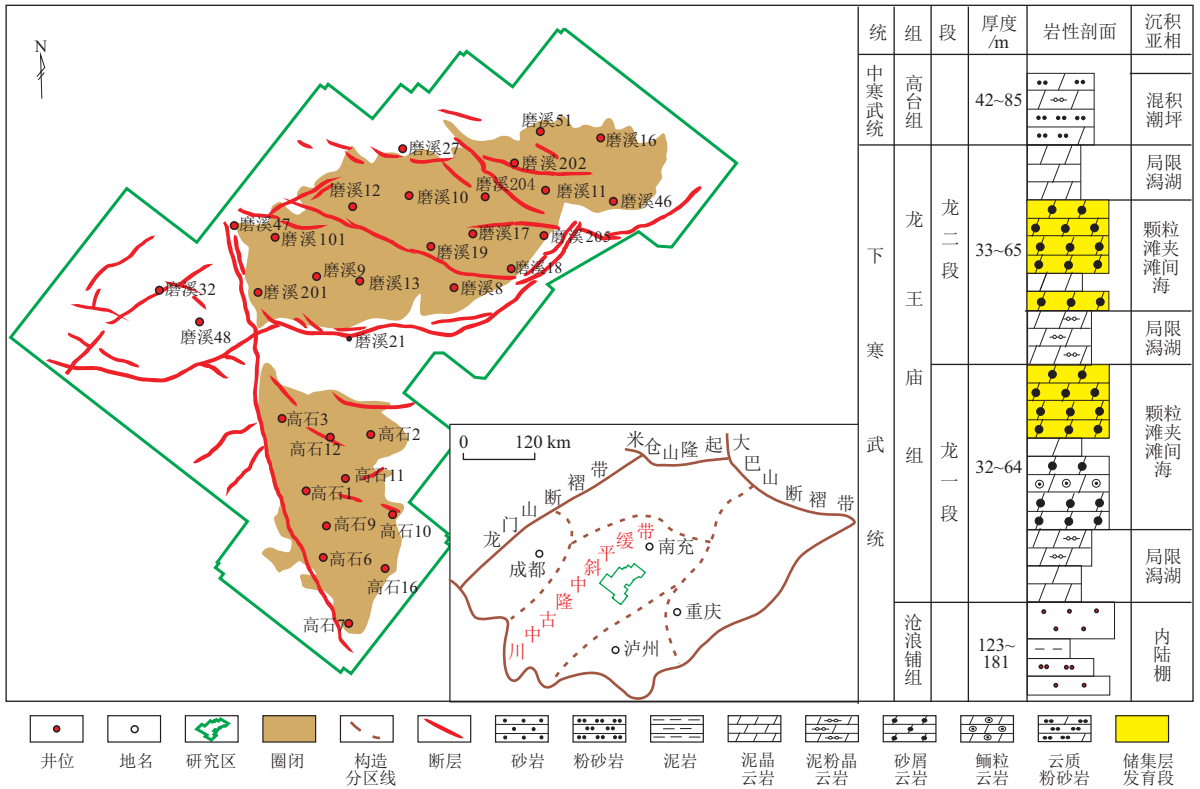


图 1 四川盆地磨溪—高石梯地区位置、构造及地层柱状图

Fig.1 Location, structure and stratigraphic histogram of Moxi-Gaoshiti areas in Sichuan Basin

段发生强烈构造变形,而东段构造变形微弱,使古隆起天然气保存条件呈现“东好西差”的格局,东段高石梯—磨溪—龙女寺构造带成为现今天然气聚集成藏最有利的地区^[23-25]。前期研究表明:磨溪—高石梯区块龙王庙组储层孔隙度约 3%~4%,渗透率约 $(0.6 \sim 1.2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于低孔低渗储层^[26]。储集空间包括溶蚀孔洞、粒间孔、晶间孔和裂缝^[27],而构造裂缝可有效沟通孔洞储集空间,改善储层渗流能力。

2 岩心裂缝表征

通过磨溪—高石梯地区 17 口取心井的岩心观察,共识别裂缝 660 条,可归纳为以下几种类型:①多期成因的张性网状缝,其中早期裂缝被泥质充填,晚期裂缝未充填一半充填,可见溶蚀孔洞及沥青残留(图 2a);②沿轴向延伸的中高角度未充填缝(图 2b);③斜交碳质充填裂缝与未充填的水平缝,可见溶蚀孔洞(图 2c);④开度较大的未充填近直立缝(图 2d);⑤碳质充填的小尺度裂缝(图 2e);⑥两期叠加的斜交裂缝,其中晚期泥质半充填裂缝切割早期碳质充填裂缝(图 2f)。

由于裂缝长度的特殊性,裂缝统计遵循以下原则:①优先统计高角度裂缝,即裂缝在岩心轴向上的延伸长度;②选择完整的裂缝,延伸范围超出岩心尺度的裂缝不做统计;③对于能明确识别切割关系的裂缝,估算其被切割前的完整长度,切割关系复杂的裂缝不做统计。根据以上原则,优选了 278 条裂缝进行长度的统计,统计精度为 1 cm。不同井筒岩心裂缝长度分布不同,据裂缝长度范围可分为 3 类,即小于 5 cm,5~10 cm 和大于 10 cm 的裂缝。其中小于 5 cm 的裂缝有 154 条,5~10 cm 的裂缝 67 条,大于 10 cm 的裂缝 57 条。取心井岩心描述统计高角度缝线密度为 0.17~1.24 条/m,平

均 0.69 条/m。裂缝走向近北东—南西向,与断层走向基本一致或呈较小夹角(小于 20°),且距断层越近,构造缝越发育。从裂缝长度与裂缝数量的拟合关系(图 2g)看出,二者呈负指数幂关系,即随着裂缝长度增加,裂缝数量减小。

3 岩石力学实验

岩心观察难以确定大裂缝的延伸终点,在统计时这类超过岩心尺度的裂缝不做考虑。另外,岩心观察中难以严格区分多期叠加裂缝,同样降低了定性分析的准确度。为避免以上缺陷,本研究借助于可视化高精度三维 CT 扫描技术,裂缝的延伸方位、长度及数量易于测量和统计,具有较高的准确性和可靠性。岩心测试统计的裂缝均由同一期应力产生,这就避免了裂缝遭受复杂的后期破坏、不同期次裂缝相互切割的影响。

采用取自磨溪—高石梯地区龙王庙组灰岩作为试样,开展岩石单轴抗压测试。在同一块岩样上将岩石加工成 6 块 $25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的柱塞样,可认为该 6 块样品性质基本一致。其中,①号样品不做岩石单轴抗压测试,直接进行三维 CT 扫描;②号样品进行单轴抗压测试,确定样品的抗压强度(σ_c),在其完全破裂后进行三维 CT 扫描,统计样品裂缝数量及长度;③~⑥号样品分别加载抗压强度(σ_c)50%、65%、85%及 100%的压力,测试完成后进行三维 CT 扫描,统计样品裂缝的数量和长度,并分析裂缝在不同应力承载比例下的发育规律。

岩石应力达到峰值强度前不断吸收外界的能量,而达到峰值后破坏则是能量不断释放的过程。对于受载岩石系统,其能量转化大致分为能量输入、积聚、耗散、释放四个过程^[28];岩石试样的压缩过程可划分为微裂隙压实阶段、弹性阶段、裂缝扩展阶段和宏观破坏阶段四个阶段(图 3a)^[29-30]。

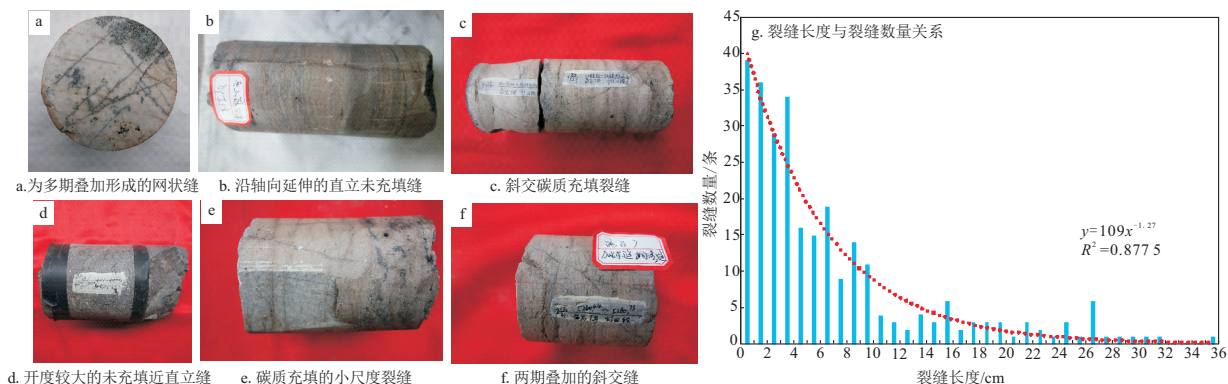


图 2 四川盆地磨溪—高石梯地区岩心裂缝特征及裂缝长度与数量的关系

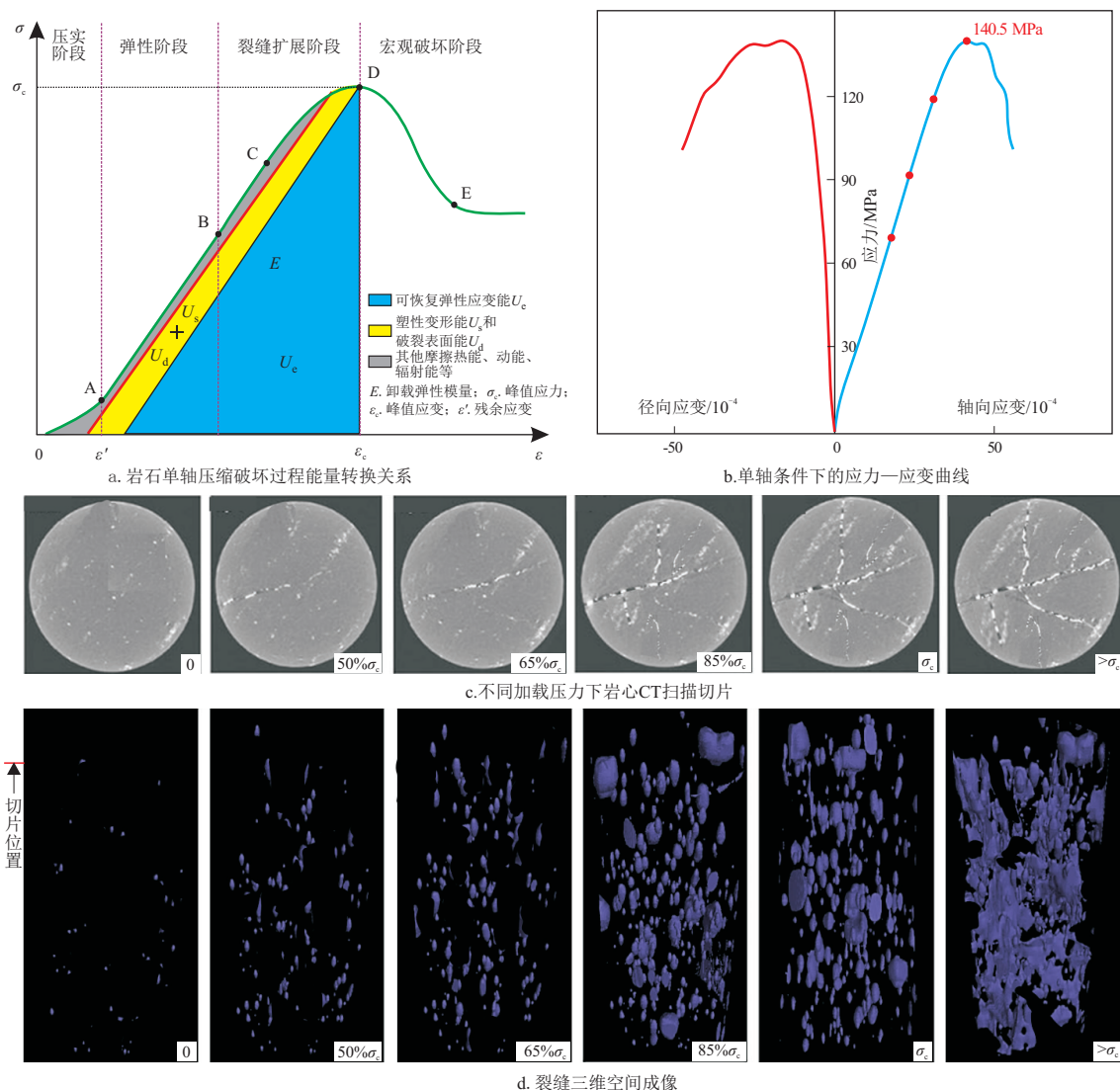


图 3 四川盆地磨溪—高石梯地区岩心裂缝数字形态及单轴下的应力—应变曲线

Fig.3 Digital form of core fractures and stress strain curves under uniaxial condition in Moxi-Gaoshiti areas, Sichuan Basin

当压力增大为 165.8 MPa 时,样品完全破裂,据应力—应变曲线可知,样品的单轴抗压强度为 140.5 MPa(图 3b)。从裂缝 CT 扫描结果可见(图 3c,d),未加压的试样中先存微裂隙数量不多,而且多数长度小于 3 mm(表 1)。对不同应力阶段下

试样的观测发现(图 3c,d,表 1),在 0~50%σ_c 应力区间内,长度小于 2 mm 的微裂隙呈增长趋势,同时也产生了 3~4 mm 的裂缝;在 50%~65%σ_c 应力区间内,小于 2 mm 的微裂隙数量增长不明显,但 4~6 mm 的裂缝大幅增多;在 65%~85%σ_c 区间内,

表 1 四川盆地磨溪—高石梯地区不同应力承载比例下裂缝长度及数量

Table 1 Fracture length and quantity under different stress levels in Moxi-Gaoshiti areas, Sichuan Basin

承载比例 (σ/σ _c)	裂缝长度/mm							长度平均值
	<2	2~3	3~4	4~6	6~8	8~10	>10	
0	72	16	2	0	0	0	0	1.32
0.50	133	40	7	1	0	0	0	1.45
0.65	142	42	7	4	0	0	0	1.49
0.85	188	43	8	8	2	1	0	1.52
1.00	232	52	18	16	5	4	4	1.90
1.18	286	73	23	18	6	5	5	1.88
裂缝条数均值	175.5	43.3	10.8	7.8	2.2	1.7	1.5	

微裂缝逐渐连通, 4~8 mm 的裂缝快速增长; 在 85%~100% σ_c 区间内, 裂缝数量急剧增长, 裂缝交会、连通, 开始产生大于 8 mm 的裂缝; 当压力超过岩体的抗压强度时, 裂缝完全贯穿样品。

对不同应力承载比例下的裂缝长度及数量做了统计(表 1, 图 4), 同期应力会引起不同长度裂缝产生, 随着应力增强, 裂缝不断产生、扩展。裂缝平均长度与平均数量呈负幂指数关系, 裂缝长度小于 2 mm 的数量所占比重始终最大(图 4a); 随应力承载比例增大, 在达到破裂极限之前, 裂缝数量呈持续增加趋势(图 4b)。

4 裂缝长度关系式推导

单井岩心裂缝观测和岩石力学测试表明, 裂缝长度与数量之间呈负指数幂关系, 本文从能量角度出发, 以应变能密度、裂缝体密度等参数为桥梁, 对裂缝长度进行推导。对于脆性致密岩体, C 点是岩石的屈服极限, 应力超过该值后, 内部的微裂缝数目猛增(图 3a), 当应力达到 σ_c 的 82%~85% 时^[31], 裂缝扩展延伸; 当应力达到峰值应力时(D 点), 发生宏观破裂。在轴向应力为 0~85% σ_c 时, 应力—应变曲线服从胡克定律, 变形时在其内部只能积聚弹性应变, 其大小可用应变能密度来衡量, 如下式:

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (1)$$

式中: $\bar{\omega}$ 为应变能密度, J/m^3 ; E 为弹性模量, GPa; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为最大、中间和最小主应力, MPa; μ 为泊松比。

当岩石内部积累的弹性应变能释放率等于产生单位面积裂缝体表面所需要的能量时, 发生脆性断裂, 塑性能在此破裂阶段仅占不到 5%^[32-33], 可以忽略, 据此有:

$$\bar{\omega}_f V = S_f J \quad (2)$$

式中: $\bar{\omega}_f$ 为裂缝应变能密度, J/m^3 ; V 为裂缝体积, m^3 ; S_f 为新增裂缝的表面积, m^2 ; J 为裂缝表面能, J/m^2 。

由于线密度和面密度受流动方向的影响, 往往不能充分反映裂缝的发育, 本文选取裂缝体密度作为表征裂缝密集程度的参数。裂缝体密度表达式为^[18]:

$$D_{vf} = \frac{S_f}{V} = \frac{\bar{\omega}_f}{J} = \frac{\bar{\omega} - \bar{\omega}_e}{J} = \frac{\bar{\omega}}{J} - \frac{\bar{\omega}_e}{J} = a \bar{\omega} + b \quad (3)$$

式中: D_{vf} 为裂缝体密度, m^2/m^3 ; $\bar{\omega}_e$ 为产生裂缝必须克服的弹性应变能密度, J/m^3 ; a, b 为系数。 $J, \bar{\omega}_e$ 的值可通过对实验应力、应变数据拟合(表 2), 系

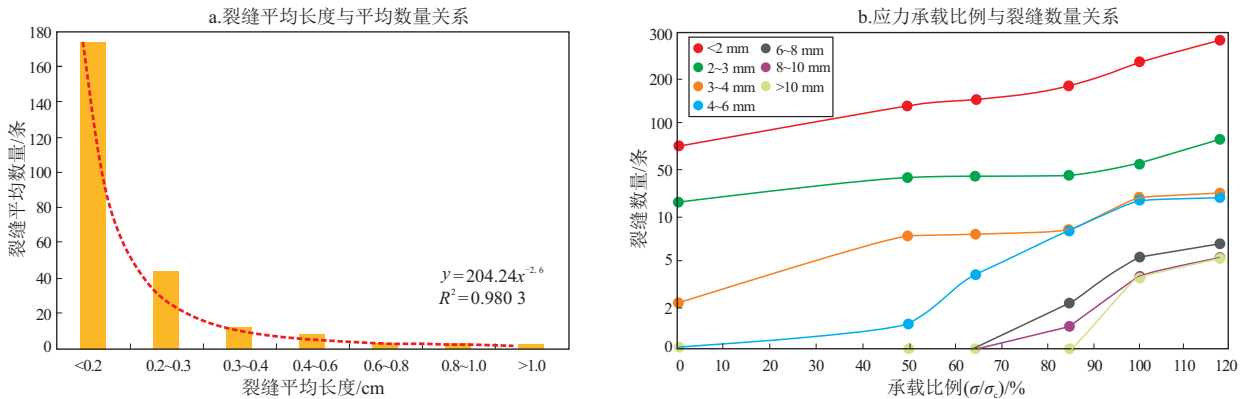


图 4 四川盆地磨溪—高石梯地区裂缝平均长度与平均数量关系以及应力承载比例与裂缝数量关系
Fig.4 Correlation of average fracture length and average fracture number, stress level and fracture number in Moxi-Gaoshiti areas, Sichuan Basin

表 2 四川盆地磨溪—高石梯地区龙王庙组样品实验参数
Table 2 Experimental parameters of samples from Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti areas, Sichuan Basin

试样编号	实验应力 σ / MPa	实验应变 ϵ / 10^{-4}	承载比例 (σ/σ_c)	裂缝体密度 D_{vf} / ($m^2 \cdot m^{-3}$)	应变能密度 $\bar{\omega}$ / ($J \cdot m^{-3}$)	样品状态
②	165.8	53.0	1.18	44.0	439 370.0	完全破碎
③	70.3	17.7	0.50	3.2	62 215.5	发育微裂缝
④	91.3	24.3	0.65	6.6	110 929.5	发育微裂缝
⑤	119.4	31.7	0.85	13.4	189 249.0	产生宏观裂缝
⑥	140.5	42.5	1.00	40.6	298 562.5	宏观裂缝扩展

数可用数学方法求出。

J 、 $\bar{\omega}_e$ 的值通过实验获取,样品的单轴抗压强度 $\sigma_c = 140.5 \text{ MPa}$ (图 3b),实验状态下的应变能密度为:

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2} \sigma_c \varepsilon_c \quad (4)$$

这里,产生裂缝必须克服的弹性应变能密度 $\bar{\omega}$ 大致为 $85\% \sigma_c$ 时的应变能密度,即:

$$\bar{\omega}_e = \frac{1}{2} (0.85 \sigma_c \times 0.85 \varepsilon_c) \quad (5)$$

式中: ε_c 为 σ_c 下的应变,计算得到 $\bar{\omega}$ 为 $1.89 \times 10^5 \text{ J}$ 。由公式(3)可得:

$$J = \frac{\bar{\omega} - \bar{\omega}_e}{D_{vf}} \quad (6)$$

据图 3 和表 2,⑥号样品应力状态对应单轴下应力应变曲线的 D 点,形成了宏观裂缝,且能量耗散不大,是计算 J 的较理想数据,计算得出 $J = 2\,692.45 \text{ J/m}^2$,代入公式(6),得到系数 a 为 3.71×10^{-4} ,系数 b 为 -70.29 。因此对于磨溪—高石梯地区的灰岩,在单轴压缩时,裂缝体密度与应变能密度的关系为:

$$D_{vf} = 3.71 \times 10^{-4} \bar{\omega} - 70.29 \quad (7)$$

裂缝的产生还与围压有关,脆性岩体在三向压力下的裂缝体密度为^[11-13]:

$$D_{vf} = \frac{\bar{\omega}_f}{J} = \frac{(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3)}{2(J_0 + \Delta J)} - \frac{0.85^2 \sigma_1 \varepsilon_1}{2(J_0 + \Delta J)} \quad (8)$$

式中: J_0 是零围压下(单轴)的裂缝表面能, J/m^2 ; ΔJ 是围压产生的附加表面能, J/m^2 ; ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别对应最大、中间和最小主应变。

磨溪—高石梯地区裂缝形成期存在弱张扭特性,该状态下的裂缝体密度与应变能的关系为:

$$D_{vf} = \frac{1}{J} (\bar{\omega} - \bar{\omega}_e) = \frac{1}{J} (\bar{\omega} - \frac{1}{2E} \sigma_1^2) \quad (9)$$

式中: σ_1 为岩石抗张强度, MPa 。从公式(7)——(9)可以看出,无论是单轴、三向压应力,还是张应力状态,裂缝体密度和应变能密度均表现为线性关系。因此,应变能密度越大,裂缝体密度越大。

基于前文和邻区数据^[34],拟合了三轴条件下裂缝长度(L)、应变能密度、体密度以及应力承载比例之间的关系,相关系数大于 0.9,认为拟合结果可靠(图 5)。

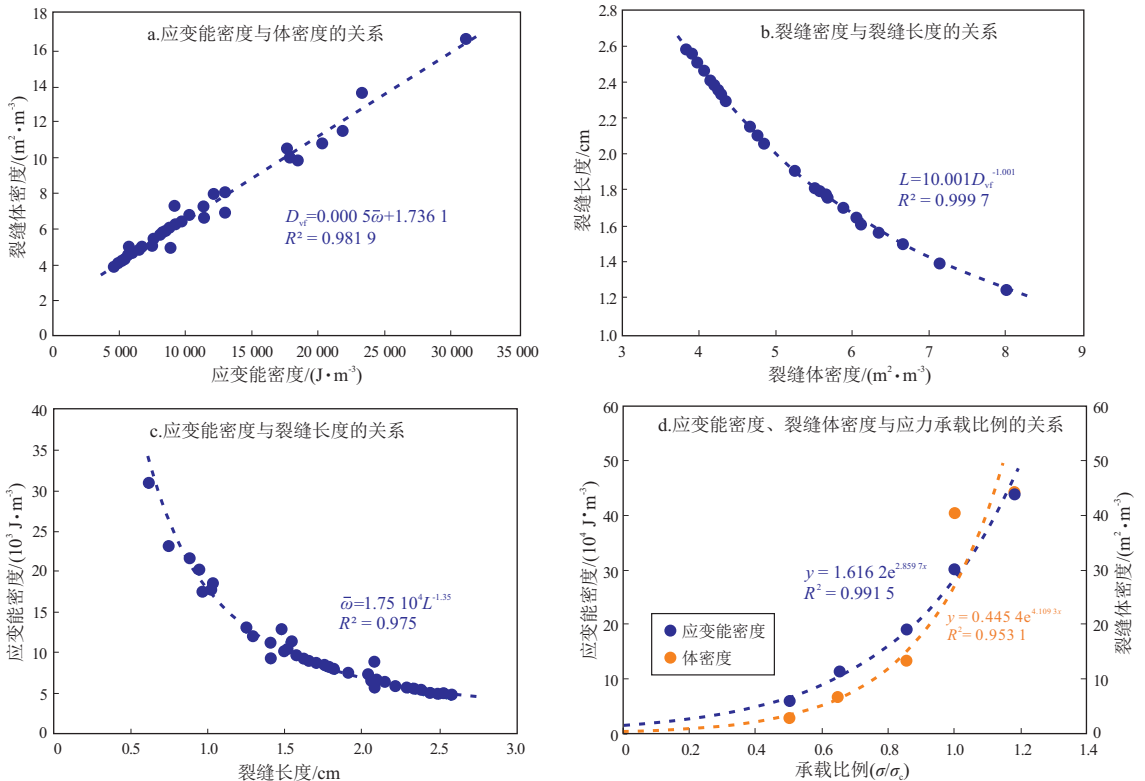


图 5 四川盆地磨溪—高石梯地区裂缝应变能密度、裂缝体密度、裂缝长度及应力承载比例之间的关系

Fig.5 Relationships among strain energy density of fracture, fracture volume density, fracture length and stress level in Moxi-Gaoshiti areas, Sichuan Basin

由图 5a 可见,三轴状态下裂缝体密度与单轴压缩实验相比低了很多,说明围压对裂缝产生起阻挡作用。由图 5b、c 可以看出,裂缝长度与裂缝体密度、应变能密度均呈负指数幂关系,随着裂缝长度增大,裂缝应变能、体密度降低。裂缝应变能密度、体密度与应力承载比例呈正指数幂关系,随应力承载比例升高,应变能密度和体密度增大(图 5d)。

从岩心统计出的是裂缝线密度与平均裂缝长度,裂缝线密度(D_{lf})与体密度之间具有线性关系,可通过下式换算:

$$D_{lf} = \begin{cases} \frac{2D_{vf}L_1L_3\sin\theta\cos\theta - L_1\sin\theta - L_3\cos\theta}{L_1^2\sin^2\theta + L_3^2\cos^2\theta}, & \sigma_3 > 0, \text{ 或 } \sigma_3 \leq 0 \text{ 且 } (\sigma_1 + 3\sigma_3) > 0 \\ D_{vf}, \sigma_3 \leq 0 \text{ 且 } (\sigma_1 + 3\sigma_3) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: L_1 和 L_3 分别为表征单元体在 σ_1, σ_3 方向的边长; θ 为裂缝走向与 σ_1 方向的夹角, ($^\circ$)。从岩石力学测试可以得到应变能密度并计算出裂缝体密度,但是岩石力学测试很难大规模开展,因此本研究将两种数据综合分析。

综上提出裂缝长度的一般推导公式:

$$L = aD_{vf}^k + b \quad (11)$$

公式(11)裂缝体密度(D_{vf})可根据公式(8)和(9)求得; a, b 和 k 为系数,当 $a = 10, b = 0, k = -1$ 时,即得到研究区龙王庙组裂缝长度公式。

5 实例应用

5.1 裂缝参数的数值模拟

基于磨溪—高石梯地区龙王庙组地层、断层发育特征建立了地质模型,模型中地层包含龙一段、龙二段以及两段泥质夹层,主干断层与次级断层共 23 条(图 6a)。采用最符合储层岩石力学特性的

表 3 四川盆地磨溪—高石梯区块地质模型的岩石力学参数

Table 3 Rock mechanical parameters of geological model in Moxi-Gaoshiti areas, Sichuan Basin

岩体	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
断层(古)	85	0.30	2 780
断层(今)	50	0.19	2 200
储集体	79	0.29	2 744
夹层	65	0.31	2 600
围岩	80	0.28	2 750

Solid45 单元对地质模型进行网格划分,共划分 90 423 个节点和 725 860 个单元(图 6b)。

依据对磨溪—高石梯的岩心三轴岩石力学测试,对测定的密度、弹性模量、泊松比、抗压强度等参数做平均处理,并参考相关资料^[31]共同确定各层的岩石力学参数(表 3)。根据研究区造陆期构造运动背景,对模型施加相应的约束和载荷,其中北部和南部边界施加 120 MPa 挤压应力,东西向施加 108 MPa 挤压应力,得到研究区现今应力场状态。裂缝形成时期的等效古应力场通过井点裂缝参数的约束获取。借助于地质力学原理,优选破裂准则,通过实验和理论推导的方法,得到应力场—能量和裂缝参数的计算方法^[16-18],进而得到裂缝体密度分布。

模拟结果显示,磨溪—高石梯地区的裂缝体密度值大多为 1~5.0 m^2/m^3 ,最高约 9.0 m^2/m^3 ,高值基本分布于断层带附近;远离断层的区域,裂缝体密度逐渐降低,普遍在 0.5 m^2/m^3 以下(图 7a)。应用公式(11)得出裂缝长度分布,可以看出,长度小于 3 m 的裂缝主要分布在断层带周围,长度大于 20 m 的裂缝一般均远离断层,大于 50 m 的长裂缝零星分布(图 7b)。对裂缝模拟结果进行统计,裂缝长度小于 1 m 的节点占全部节点的 35%,裂缝长度大于 100 m 的节点仅约 1%(图 7c)。

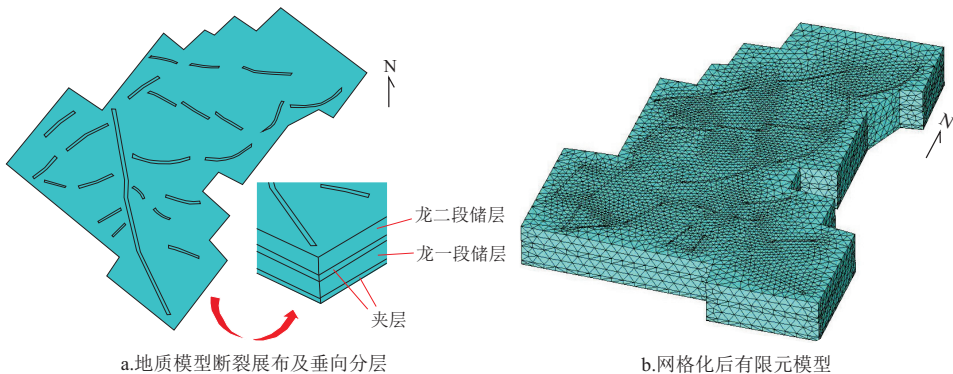


图 6 四川盆地磨溪—高石梯地区地质模型和网格划分后的有限元模型

Fig.6 Geological model and finite element model after meshing in Moxi-Gaoshiti areas, Sichuan Basin

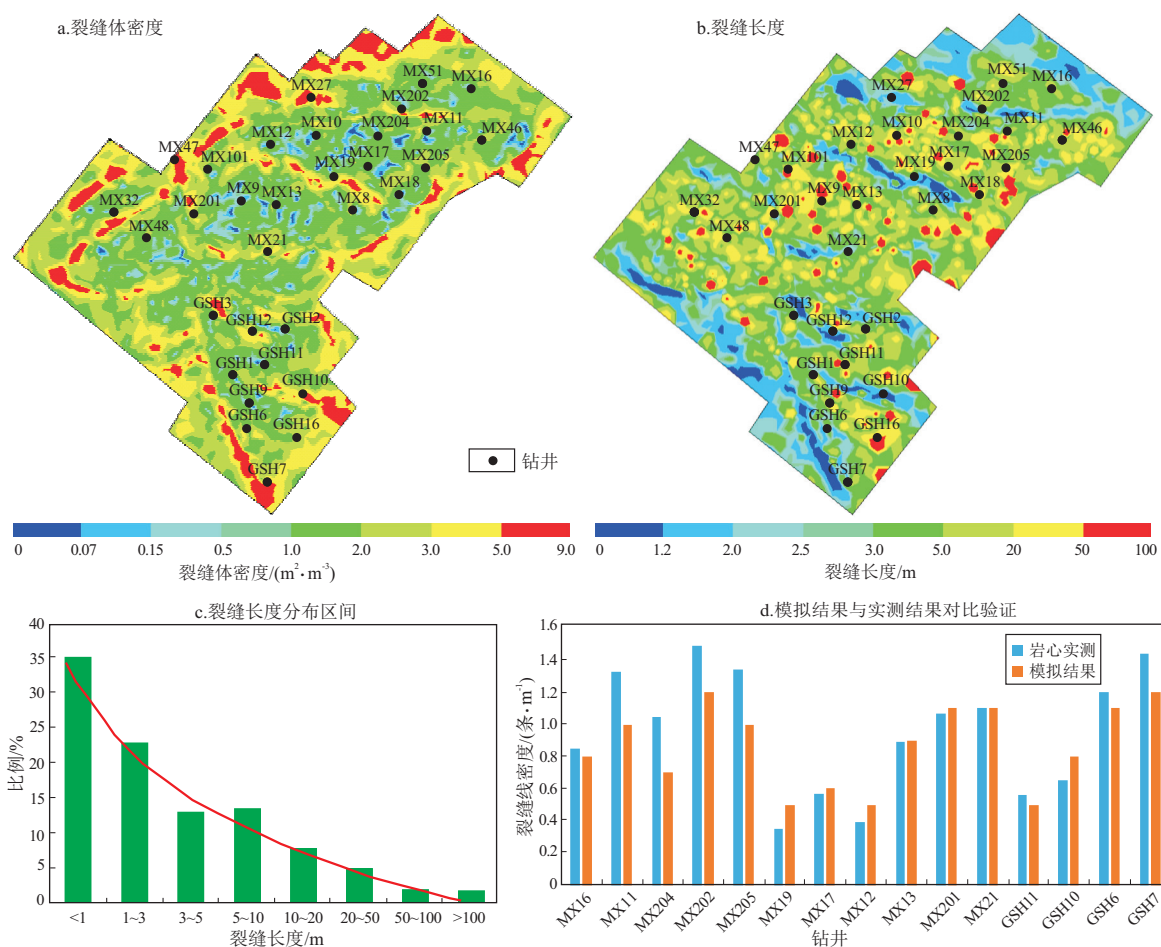


图 7 四川盆地磨溪—高石梯地区裂缝体密度和裂缝长度模拟结果及数据分析

Fig.7 Simulation results and data analysis of fracture volume density and fracture length in Moxi-Gaoshiti areas, Sichuan Basin

5.2 可靠性检验及误差分析

预测裂缝长度不易直接检验,但线密度便于从岩心获取。裂缝数值模拟是针对裂缝体密度进行的,而岩心实测一般得到裂缝的线密度,通过公式(10)进行转换。通过对比磨溪—高石梯区块 15 口井处龙王庙组裂缝密度预测值与岩心统计值,可知预测结果与实际岩心统计值吻合度较高,总体平均误差控制在 15% 以内,最大误差约 29% (图 7d),认为预测结果较可靠。

裂缝预测误差可能源自于以下原因:①地质模型力学参数、约束条件与实际地质条件存在一定差异;②由于难以获取真实古应力大小,实际模型加载应力为“等效古应力”;③基于岩心统计裂缝的过程中存在人为误差,特别是在岩心破碎部位,这种误差可能会偏高;④受取心井离散度限制,对于井距较大的区域,裂缝预测的数据约束性较差,误差偏大。

本文关于裂缝长度的研究处于探索性阶段,基于岩心观察和岩石力学实验初步建立了其与应变

能等相关参数的定量关系。受岩心尺度和裂缝长度统计的局限,研究过程存在理想化的假设,制约了预测结果的精度。但从应变能角度出发的构造裂缝预测思路和方法是科学合理的,可为低渗透致密储层的构造裂缝研究提供重要参考。

6 结论

(1) 同期应力会引起不同长度裂缝产生,随着应力的增强,裂缝不断产生并扩展,裂缝平均数量随长度增大而减小;随应力承载比例增大,在达到破裂极限之前,裂缝数量持续增大;裂缝长度与裂缝数量呈负指数幂关系。

(2) 据裂缝长度推导公式可知,裂缝长度与应变能密度、体密度呈负指数幂关系,裂缝应变能密度与体密度呈正比线性关系,三者之间可通过公式相互计算。

(3) 磨溪—高石梯地区裂缝体密度值普遍介于 $1 \sim 5 \text{ m}^2/\text{m}^3$, 最高为 $9 \text{ m}^2/\text{m}^3$, 高值区主要分布于断层及周边地区。裂缝长度主要介于 $1 \sim 20 \text{ m}$,

断层及周边区域裂缝密而短,长度普遍小于 3 m。

(4) 裂缝长度作为表征裂缝规模和连通性的重要参数之一,其表征方法及分布规律对于裂缝型低渗透储层的开发方案制定具有指导意义。本文旨在提供一种裂缝长度的研究思路,具有合理性与可靠性,可为低渗透储层的裂缝研究提供参考。

致谢:在此衷心感谢论文评审过程中匿名审稿人提供的宝贵建议,同时感谢中国石油勘探开发研究院廊坊分院为本文研究提供的资料和支持。

参考文献:

- [1] 赵思远,贾自力,吴长辉,等.低渗透油藏注水诱发裂缝实验研究:以鄂尔多斯盆地吴起吴仓堡 9 油藏为例[J].非常规油气,2021,8(3):73-79.
ZHAO Siyuan, JIA Zili, WU Changhui, et al. Experimental study on waterflood induced fractures simulation in low permeability reservoir: a case study from Chang 9 reservoir in Wuqi Wucangbao, Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(3): 73-79.
- [2] OLSON J E, LAUBACH S E, LANDER R H. Natural fracture characterization in tight gas sandstones: integrating mechanics and diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(11): 1535-1549.
- [3] 吕文雅,曾联波,张俊辉,等.川中地区中下侏罗统致密油储层裂缝发育特征[J].地球科学与环境学报,2016,38(2):226-234.
LV Wenya, ZENG Lianbo, ZHANG Junhui, et al. Development characteristics of fractures in the Middle-Lower Jurassic tight oil reservoirs in central Sichuan Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(2): 226-234.
- [4] 霍健,王星皓,罗超,等.川南地区龙马溪组页岩储层裂缝特征[J].工程地质学报,2021,29(1):171-182.
HUO Jian, WANG Xinghao, LUO Chao, et al. Fracture characteristics of Longmaxi shale in southern Sichuan[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(1): 171-182.
- [5] 黎静容,朱桦,冯晓明,等.川东北陆相储层裂缝特征差异性及对产能的影响[J].石油实验地质,2016,38(6):742-747.
LI Jingrong, ZHU Hua, FENG Xiaoming, et al. Differences of fracture characteristics and the influence on productivity in the northeastern Sichuan continental basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(6): 742-747.
- [6] 梅丹,胡勇,王倩.裂缝对气藏储层渗透率及气井产能的贡献[J].石油实验地质,2019,41(5):769-772.
MEI Dan, HU Yong, WANG Qian. Experimental study on fracture contribution to gas reservoir permeability and well capacity[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(5): 769-772.
- [7] 彭红利.碳酸盐岩油气藏构造裂缝分布预测及定量参数场形成初步研究[D].南充:西南石油大学,2005.
PENG Hongli. The preliminary research on carbonate gas reservoir structural fracture prediction and the quantitative parameter field formation[D]. Nanchong: Southwest Petroleum University, 2005.
- [8] 蒋有录,李明阳,王良军,等.川东北巴中—通南巴地区须家河组致密砂岩储层裂缝发育特征及控制因素[J].地质学报,2020,94(5):1525-1537.
JIANG Youlu, LI Mingyang, WANG Liangjun, et al. Characteristics and controlling factors of tight sandstone reservoir fractures of the Xujiahe Formation in the Bazhong-Tongnanba area, northeast Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(5): 1525-1537.
- [9] 董少群,吕文雅,夏东领,等.致密砂岩储层多尺度裂缝三维地质建模方法[J].石油与天然气地质,2020,41(3):627-637.
DONG Shaoqun, LU Wenya, XIA Dongling, et al. An approach to 3D geological modeling of multi-scaled fractures in tight sandstone reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 627-637.
- [10] 鞠玮,尤源,冯胜斌,等.鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组致密砂岩储层层理缝特征及成因[J].石油与天然气地质,2020,41(3):596-605.
JU Wei, YOU Yuan, FENG Shengbin, et al. Characteristics and genesis of bedding-parallel fractures in tight sandstone reservoirs of Chang 7 oil layer, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 596-605.
- [11] 季宗镇,戴俊生,汪必峰,等.构造裂缝多参数定量计算模型[J].中国石油大学学报(自然科学版),2010,34(1):24-28.
JI Zongzhen, DAI Junsheng, WANG Bifeng, et al. Multi-parameter quantitative calculation model for tectonic fracture[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(1): 24-28.
- [12] 戴俊生,冯建伟,李明,等.砂泥岩间互地层裂缝延伸规律探讨[J].地学前缘,2011,18(2):277-283.
DAI Junsheng, FENG Jianwei, LI Ming, et al. Discussion on the extension law of structural fracture in sand-mud interbed formation[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(2): 277-283.
- [13] 冯建伟,戴俊生,马占荣,等.低渗透砂岩裂缝参数与应力场关系理论模型[J].石油学报,2011,32(4):664-671.
FENG Jianwei, DAI Junsheng, MA Zhanrong, et al. The theoretical model between fracture parameters and stress field of low-permeability sandstones[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 664-671.
- [14] 丁中一,钱祥麟,霍红,等.构造裂缝定量预测的一种新方法:二元法[J].石油与天然气地质,1998,19(1):1-7.
DING Zhongyi, QIAN Xianglin, HUO Hong, et al. A new method for quantitative prediction of tectonic fractures: two-factor method[J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(1): 1-7.
- [15] 李辉,林承焰,任丽华,等.基于岩相—断层破碎带耦合约束的构造裂缝预测研究:以博兴洼陷大芦湖油田沙三中亚段为例[J].中国矿业大学学报,2020,49(2):305-317.
LI Hui, LIN Chengyan, REN Lihua, et al. Tectonic fracture prediction based on the coupling constraint of lithofacies and fault damage zone: a case study of the 2nd sand group of middle Es³ member in Daluhu Oilfield, Boxing Subsg[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(2): 305-317.
- [16] 李蒙,商晓飞,赵华伟,等.基于 likelihood 地震属性的致密气藏断裂预测:以四川盆地川西坳陷新场地区须二段为例[J].石油与天然气地质,2020,41(6):1299-1309.

- LI Meng, SHANG Xiaofei, ZHAO Huawei, et al. Prediction of fractures in tight gas reservoirs based on likelihood attribute: a case study of the 2nd member of Xujiahe Formation in Xinchang area, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(6): 1299-1309.
- [17] 任启强, 金强, 冯振东, 等. 和田河气田奥陶系碳酸盐岩储层关键期构造裂缝预测 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(6): 1-13.
- REN Qiqiang, JIN Qiang, FENG Zhendong, et al. Prediction of key period fractures of Ordovician carbonate reservoir in Hetianhe Gas Field [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2020, 44(6): 1-13.
- [18] 穆龙新, 赵国良, 田中元, 等. 储层裂缝预测研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- MU Longxin, ZHAO Guoliang, TIAN Zhongyuan. The research of natural fracture for low permeability reservoirs [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [19] 刘子雄, 常菁铨, 李新发, 等. 基于裂缝监测的致密储层压裂裂缝走向预测 [J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(6): 846-854.
- LIU Zixiong, CHANG Jingxuan, LI Xinfu, et al. Fracturing direction prediction based on fracturing monitoring of tight gas reservoir [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(6): 846-854.
- [20] 张林, 赵喜民, 刘池洋, 等. 沉积作用对水力压裂裂缝缝长的限制作用 [J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(2): 201-204.
- ZHANG Lin, ZHAO Ximin, LIU Chiyang, et al. Deposition confines hydraulic fracture length [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(2): 201-204.
- [21] 尹从彬, 李彦超, 王素兵, 等. 页岩压裂裂缝网络预测方法及其应用 [J]. *天然气工业*, 2017, 37(4): 60-68.
- YIN Congbin, LI Yanchao, WANG Subing, et al. Methodology of hydraulic fracture network prediction in shale reservoirs and its application [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(4): 60-68.
- [22] 王翔. 川中高石梯—磨溪地区震旦系灯影组储层评价 [D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- WANG Xiang. Reservoir evaluation of Sinian Dengying Formation in the Gaoshiti-Moxi area, middle Sichuan Basin, China [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [23] 刘树根, 孙玮, 罗志立, 等. 兴凯地裂运动与四川盆地地下组合油气勘探 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(5): 511-520.
- LIU Shugen, SUN Wei, LUO Zhili, et al. Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from Upper Sinian to Cambrian strata in Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(5): 511-520.
- [24] 钟勇, 李亚林, 张晓斌, 等. 川中古隆起构造演化特征及其与早寒武世绵阳—长宁拉张槽的关系 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(6): 703-712.
- ZHONG Yong, LI Yalin, ZHANG Xiaobin, et al. Evolution characteristics of central Sichuan palaeouplift and its relationship with Early Cambrian Mianyang-Changning intracratonic sag [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2014, 41(6): 703-712.
- [25] 李宗银, 姜华, 汪泽成, 等. 构造运动对四川盆地震旦系油气成藏的控制作用 [J]. *天然气工业*, 2014, 34(3): 23-30.
- LI Zongyin, JIANG Hua, WANG Zecheng, et al. Control of tectonic movement on hydrocarbon accumulation in the Sinian strata, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(3): 23-30.
- [26] 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 等. 四川盆地高石梯—磨溪古隆起构造特征及对特大型气田形成的控制作用 [J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(3): 257-265.
- WEI Guoqi, YANG Wei, DU Jinhu, et al. Tectonic features of Gaoshiti-Moxi paleo-uplift and its controls on the formation of a giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(3): 257-265.
- [27] 田兴旺, 杨岱林, 钟佳倚, 等. 基于 CT 成像技术的白云岩储层微观表征: 以川中磨溪—龙女寺台内地区震旦系灯影组四段为例 [J]. *沉积学报*, 2021, 39(5): 1264-1274.
- TIAN Xingwang, YANG Dailin, ZHONG Jiayi, et al. Microscopic characterization of dolomite reservoirs by CT imaging: a case study of the Dengsi Formation in Moxi-Longnsvi area, central Sichuan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(5): 1264-1274.
- [28] 张志镇. 岩石变形破坏过程中的能量演化机制 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- ZHANG Zhizhen. Energy evolution mechanism during rock deformation and failure [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [29] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(9): 1729-1740.
- XIE Heping, JU Yang, LI Liyun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(9): 1729-1740.
- [30] 陈颀, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学 [M]. 北京: 中国科技大学出版社, 2009.
- CHEN Yong, HUANG Tingfang, LIU Enru. Rock physics [M]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2009.
- [31] 赵建生. 断裂力学及断裂物理 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.
- ZHAO Jiansheng. Fracture mechanics and fracture physics [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003.
- [32] 孟庆彬, 王从凯, 黄炳香, 等. 三轴循环加卸载条件下岩石能量演化及分配规律 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(10): 2047-2059.
- MENG Qingbin, WANG Congkai, HUANG Bingxiang, et al. Rock energy evolution and distribution law under triaxial cyclic loading and unloading conditions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(10): 2047-2059.
- [33] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学基础 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- CHEN Mian, JIN Yan, ZHANG Guangqing. Fundamentals of rock mechanics in petroleum engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [34] 宋惠珍. 裂缝性储集层研究理论与方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- SONG Huizhen. Theory and method of fractured reservoir research [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.