

# 鄂尔多斯盆地页岩油缝网波及研究及其在体积开发中的应用

焦方正

(中国石油天然气集团有限公司,北京 100007)

**摘要:**鄂尔多斯盆地庆城油田是中国发现的首个页岩油10亿吨级大油田,水平井体积开发是页岩油效益开发的关键技术。文中提出了一种细分切割体积压裂缝网波及体积计算模型,应用多元线性回归的方法建立了关键地质工程参数与微地震覆盖体积关系式,进一步利用矿场实际产量数据对关系式进行校正,建立了缝网波及体积定量表征经验公式,进而绘制了其与产能的相关性图版,为体积压裂工程参数优化给予指导。研究表明:鄂尔多斯盆地页岩油体积改造裂缝总体呈现以主裂缝为主、分支缝为辅的条带状缝网形态,形似“仙人掌”。影响缝网波及体积的主控因素依次为入地液量、裂缝密度、排量、油层厚度和砂量。经矿场实践证实,该研究建立的经验公式及相关性图版预测结果准确、可靠,可为庆城油田页岩油水平井体积压裂优化设计及效果评价提供科学依据。

**关键词:**细分切割;缝网波及体积;水平井;体积开发;页岩油;延长组;庆城油田;鄂尔多斯盆地

**中图分类号:**TE19 **文献标识码:**A

## FSV estimation and its application to development of shale oil via volume fracturing in the Ordos Basin

Jiao Fangzheng

(China National Petroleum Corporation, Beijing 100007, China)

**Abstract:** Qingcheng oilfield in the Ordos Basin is the first shale oilfield with over one-billion tons of reserves discovered in China. Volume fracturing of horizontal well is a key technology for effective development of shale oil in the oilfield. In this study, a fracture network swept volume (FSV) model for volume fracturing is built, the relation between key geologic and engineering parameters and microseismic coverage volume is established by multivariate linear regression, actual production data are applied to correct the relation to get an empirical formula for quantitative calculation of FSV, and then the correlation template between FSV and productivity is plotted to guide the optimization of engineering parameters of volume fracturing. The results show that fractures created during the volume fracturing of shale oil reservoirs appear as a stripped fracture network dominated by main fractures together with branch fractures in the shape of cactus; and the main factors affecting FSV include fracturing fluid volume, fracture density, pumping rate, oil layer thickness, and proppant load. Field practices prove that the empirical formula and correlation template proposed in the study can predict FSV with accuracy and provide scientific basis for design optimization and effect evaluation of volume fracturing of horizontal shale oil well in Qingcheng oilfield.

**Key words:** dense cluster spacing, FSV, horizontal well, development via volume fracturing, shale oil, Yanchang Formation, Qingcheng oilfield, Ordos Basin

中国页岩油技术可采资源量可达  $145 \times 10^8$  t, 主要分布在鄂尔多斯、准噶尔、渤海湾和松辽等大型盆地,

开发潜力巨大<sup>[1]</sup>。水平井体积压裂技术实现了页岩油气商业化开发<sup>[2-3]</sup>, 2019年在鄂尔多斯盆地发现了中

收稿日期:2020-12-24;修订日期:2021-09-06。

作者简介:焦方正(1962—),男,博士,教授级高级工程师,油气勘探开发科研及科技管理。E-mail:jfz@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05069)。

国首个 10 亿吨级页岩油大油田——庆城油田<sup>[4-5]</sup>, 并进行了水平井体积压裂规模开发试验<sup>[6-7]</sup>, 建立了国家级页岩油开发示范基地。

多年来,长庆油田借鉴北美页岩油开发成功经验,立足盆地页岩油特征,攻关形成了长水平井超前蓄能细分切割体积压裂技术并大规模推广应用,有力助推了盆地页岩油效益开发<sup>[8-15]</sup>,但页岩层系人工缝网体积与单井产能的相关性不明确,针对缝网波及体积评价尚未形成成熟的定量表征方法。目前通过微地震监测是获取改造体积的主要手段<sup>[16-20]</sup>,而后期产能拟合证实微地震监测事件覆盖体积往往与实际的缝网波及体积差异较大,无法有效指导矿场实践。以更高产能为目标的压裂工艺优化亟需更准确合理的缝网波及体积评价方法进行有效支撑,开展缝网波及体积的评价与定量表征相关研究对页岩油的开发意义重大。

缝网波及体积评价在水力压裂领域一直被广泛关注<sup>[21-23]</sup>,除微地震监测方法,大量学者通过数值方法来模拟人工水力裂缝的形成过程,进而计算缝网改造体积<sup>[24-28]</sup>。然而,裂缝在储层中的扩展形态受储层岩石力学性质、天然裂缝以及人工压裂参数等多因素影响,机理十分复杂,且数值模拟假设条件较多,模拟结果需要用现场微地震监测数据进行校正,同时缺乏压后产能综合评价,应用性受限。本文以鄂尔多斯盆地南部(鄂南)延长组 7 油层组(长 7 油层组)页岩油西 233 区块为研究对象,基于矿场微地震监测和体积压裂改造参数大数据,旨在综合考虑地质工程关键参数,结合产能模拟方法,对微地震覆盖体积进行校正,建立更合理准确的缝网波及体积定量表征经验公式,为体积压裂效果评价提供依据。

1 鄂南长 7 油层组页岩储层岩石力学特征

鄂尔多斯盆地晚三叠世发育典型的大型内陆拗陷型湖盆<sup>[29]</sup>,庆城油田位于盆地南部,主要含油层系为延长组,自上而下划分为长 1—长 10 共 10 个油层组,长 7 油层组为最大湖泛期的一套广覆式富有机质泥页岩与细粒砂质沉积,自生自储、源内成藏,为典型的陆相页岩油层。长 7 油层组自上而下划分为长 7<sup>1</sup>、长 7<sup>2</sup> 和长 7<sup>3</sup> 共 3 个甜点段,主要以半深湖—深湖亚相沉积为主<sup>[4-5]</sup>。

盆地页岩储层埋深为 1 600 ~ 2 200 m,基质渗透率为 $(0.11 \sim 0.14) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度为 6% ~ 12%,含油饱和度为 67.7% ~ 72.4%,压力系数为 0.77 ~ 0.84。通过对盆地 360 块井下岩心的 232 组岩石力学参数测试实验和 80 组地应力测试实验得出,研究区块页岩油样品脆性指数主要介于 35.0% ~ 45.0%,平均值为 43.3%,水平应力差主要介于 4.0 ~ 6.0 MPa,平均值为 5.1 MPa。对比北美二叠盆地和中国其他盆地的页岩油特征<sup>[30-32]</sup>,鄂尔多斯盆地页岩油具有岩石脆性指数低和水平应力差相对较高的特点(表 1)。

2 缝网波及体积模型的建立

2.1 定义及描述

通过将大规模压裂液注入页岩储层,实现水平井多段、多簇体积改造,形成复杂裂缝网络是有效动用页岩油的关键技术。井下微地震是目前广泛应用于矿场

表 1 鄂尔多斯盆地与国内外其他盆地页岩油特征参数对比

Table 1 Characteristic parameter comparison of the shale oil from Ordos Basin and that from other basins home and abroad

| 特征参数                                    | 鄂尔多斯盆地<br>延长组 | 准噶尔盆地<br>芦草沟组 | 三塘湖盆地<br>条湖组  | 松辽盆地<br>白垩系   | 北美<br>二叠盆地    |
|-----------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 沉积环境                                    | 湖相            | 湖相            | 湖相            | 湖相            | 浅海相           |
| 埋深/m                                    | 1 600 ~ 2 200 | 2 700 ~ 3 900 | 2 000 ~ 2 800 | 1 700 ~ 2 200 | 2 134 ~ 2 895 |
| 油层厚度/m                                  | 5 ~ 15        | 10 ~ 13       | 5 ~ 20        | 10 ~ 30       | 400 ~ 600     |
| 孔隙度/%                                   | 6.0 ~ 11.0    | 8.0 ~ 14.6    | 8.0 ~ 18.0    | 5.0 ~ 18.0    | 8.0 ~ 12.0    |
| 渗透率/ $(10^{-3} \mu\text{m}^2)$          | 0.110 ~ 0.140 | 0.010 ~ 0.012 | 0.100 ~ 0.500 | 0.020 ~ 0.500 | 0.010 ~ 1.000 |
| 含油饱和度/%                                 | 67.7 ~ 72.4   | 78.0 ~ 80.0   | 55.0 ~ 76.5   | 48.0 ~ 55.0   | 75.0 ~ 88.0   |
| 气油比/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$ | 75 ~ 122      | 18 ~ 22       | —             | —             | 50 ~ 140      |
| 原油粘度/ $(\text{mPa} \cdot \text{s})$     | 1.21 ~ 1.96   | 11.70 ~ 21.50 | 58.00 ~ 83.00 | 4.00 ~ 8.00   | 0.15 ~ 0.53   |
| 压力系数                                    | 0.77 ~ 0.84   | 1.20 ~ 1.60   | 0.90          | 1.10 ~ 1.32   | 1.05 ~ 1.50   |
| 水平应力差/MPa                               | 4 ~ 6         | 5 ~ 9         | 1 ~ 5         | 3 ~ 6         | 1 ~ 3         |
| 脆性指数/%                                  | 35 ~ 45       | 50 ~ 51       | 31 ~ 54       | —             | 45 ~ 60       |

注:“—”表示无数据。

的一项有效的裂缝监测技术,通过对水压裂过程中进行微地震事件实时动态监测,获得微地震覆盖体积(*SRV*,图1蓝色虚线区域所示),而大量矿场统计与产能验证得出体积压裂改造有效缝网区域与微地震覆盖体积差异较大。因此,为了更准确地评价体积压裂改造效果与指导压裂优化设计,本文定义水平井体积压裂形成的有效增产改造体积称为缝网波及体积(*FSV*,图1红色虚线区域所示),即在页岩储层建立有效的压力驱动系统,使得页岩油能够被有效、经济动用的缝网区域。

## 2.2 缝网形态实验表征

水力裂缝形态的准确表征是评价缝网复杂程度及改造效果的重要基础,在充分认识页岩油岩石力学参数和地应力分布规律的基础上,为了进一步揭示长庆油田页岩油体积压裂后的缝网形态,在中国率先开展真三轴大型水力压裂物模实验研究,将人工试件制成尺寸为300 mm×300 mm×300 mm样品(图2a),模拟水力裂缝起裂与扩展,获取物模试件剖面,定性观测水力裂缝形态剖面(图2b)。同时采用声波监测技术对水力裂缝实时扩展动态进行准确监测,获取不同方位水力裂缝形态图(图3)。

以室内实验结论为基础,结合井下微地震监测技术,能够对水平井体积压裂后缝网形态、几何尺寸及方位等参数进行初步刻画,为矿场体积压裂效果评价和理论数值模拟提供重要依据。本文收集了庆城油田35口水平井366段体积压裂单段和全井段微地震监测事件的三维立体展布图(图4)。综合室内真三轴水力压裂物模实验及微地震监测大数据得出,研究区体积改造裂缝总体呈现以主裂缝为主、分支缝为辅的条

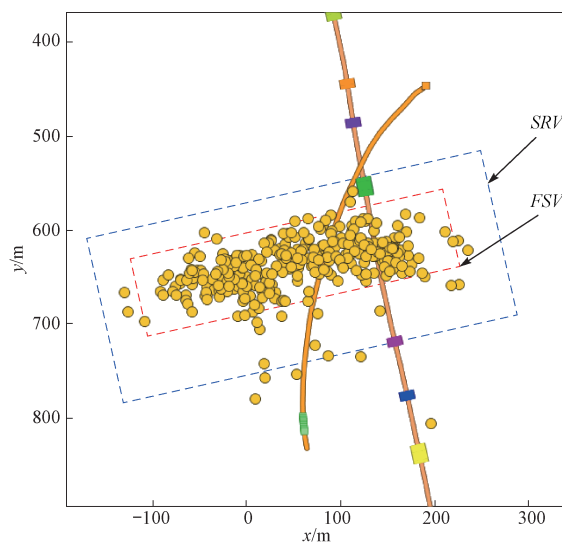


图1 水平井体积压裂微地震事件平面显示

Fig. 1 Planar map showing microseismic events of volume fracturing in horizontal wells

带状缝网形态,形似“仙人掌”,其复杂程度由天然裂缝发育程度、岩石力学参数和体积改造参数等共同决定。

## 2.3 缝网波及体积计算模型

灰色关联分析法是灰色理论中的重要内容,通过寻求系统中各因素的主次关系,确定影响各项评价指标的关键因素,在储层评价和油田增产改造方面广泛应用<sup>[31]</sup>。本文利用灰色关联分析法综合分析地质工程参数与微地震覆盖体积之间的相关性。首先基于大数据建立多因素评价矩阵,并对其标准化;其次通过计算灰色关联度定量评价各因素对微地震覆盖体积的影响程度,明确其主控因素及排序。

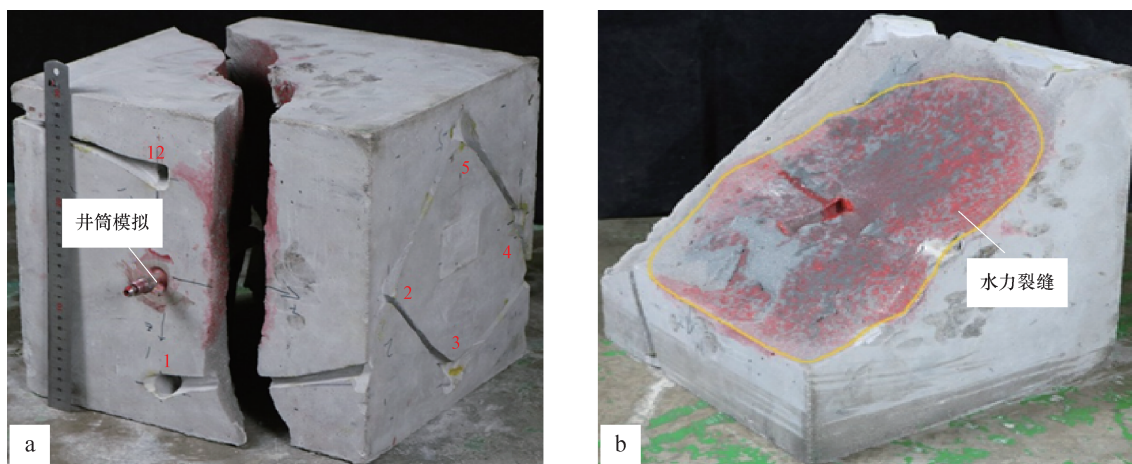


图2 真三轴水力压裂物模实验人工试件(a)与水力裂缝剖面(b)

Fig. 2 Artificial specimen (a) and hydraulic fracture profile (b) in the model test of true triaxial hydraulic fracturing  
(图2a中红色数字为井筒模拟点编号;图2b中红色痕迹为水力压裂裂缝扩展形态,黄色线为水力裂缝轮廓,呈椭圆形。)

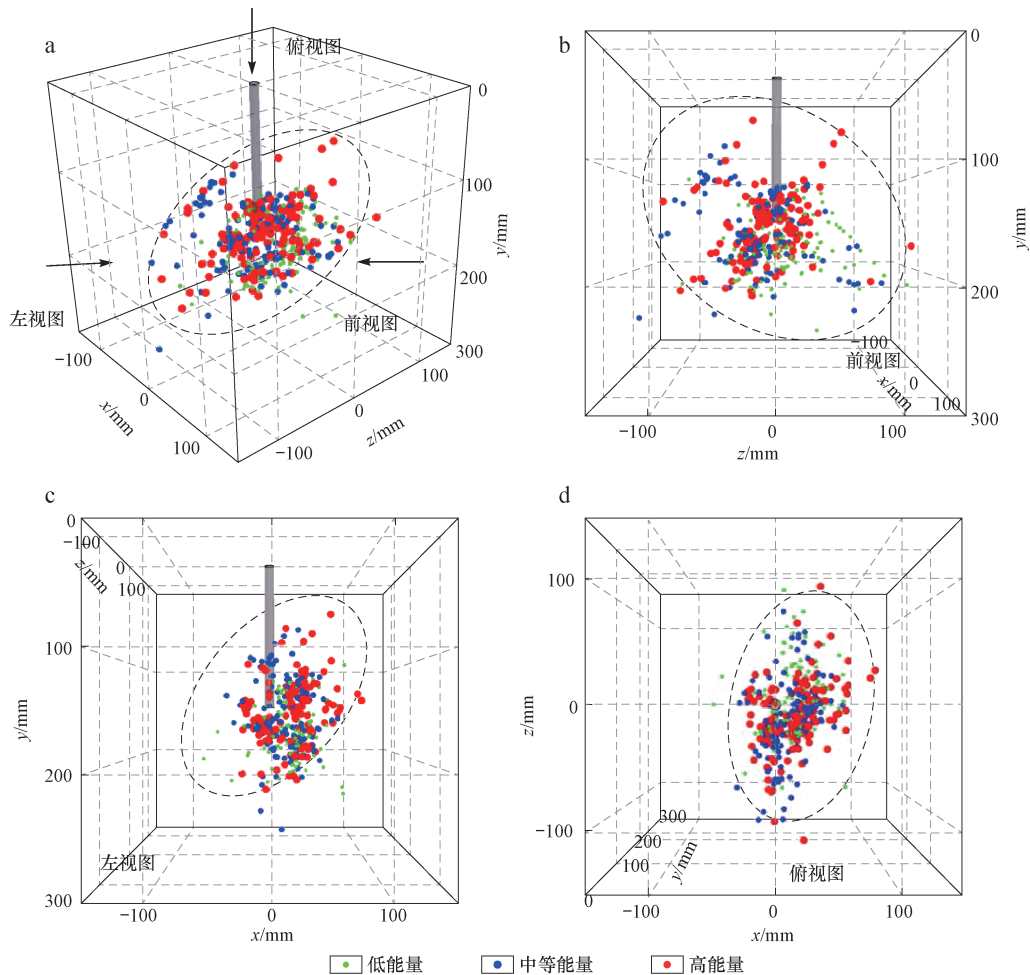


图 3 真三轴水力压裂物模实验声发射事件分布

Fig. 3 Acoustic emission event distribution of true triaxial hydraulic fracturing physical modeling experiment

a. 整体方位;b. 前视图;c. 左视图;d. 俯视图

(图中黑色虚线为水力裂缝形态,箭头表示不同方位声波事件分布。)

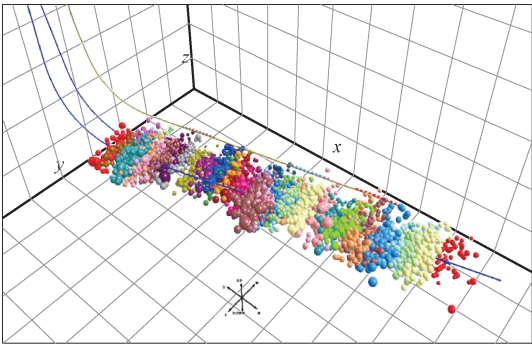


图 4 庆城油田长 7 油层组页岩油典型水平井体积压裂微地震事件 3D 显示图

Fig. 4 3D display of microseismic events during volume fracturing of typical horizontal wells in Chang 7 Member shale oil, Qingcheng oilfield

(图中不同颜色的圆点表示不同压裂段裂缝扩展微地震事件点。)

前期研究发现,研究区水平井钻遇储层的脆性指数和水平应力差相对集中,因此本文重点研究储层

物性参数与压裂工程参数对微地震覆盖体积的影响,将计算得到的相关系数大于 0.5 的 5 项主控因素进行排序为:入地液量、裂缝密度、排量、油层厚度和砂量(图 5)。

在微地震覆盖体积影响因素综合评价的基础上,利用多元线性回归法进一步对其进行定量表征。首先利用层次分析法建立多层次评价体系,其中目标层为微地震覆盖体积( $SRV$ ),子标准层为入地液量( $V_L$ )、裂缝密度( $n$ )、排量( $Q$ )、油层厚度( $h$ )、砂量( $V_P$ );其次根据各水平井压裂段参数集,建立线性回归矩阵;最后采用多元线性回归方法综合考虑地质工程参数建立微地震覆盖体积与各影响因素之间的计算模型。

运用多元线性回归方法,建立了研究区水平井单段微地震覆盖体积与关键地质工程参数耦合模型公式(1),进而得到单井压裂微地震覆盖体积公式(2)。



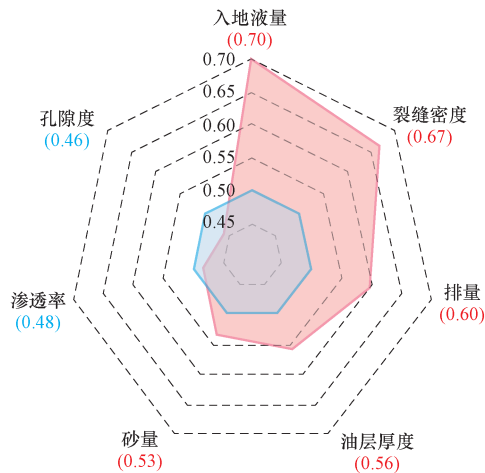


图5 微地震覆盖体积影响因素排序

Fig.5 Sequence diagram of factors affecting microseismic coverage volume

(蓝色线以内为非主控因素区域,红色和蓝色数字分别代表主控因素和非主控因素的灰色关联度。)

$$SRV = 0.27V_L + 35.38n + 0.87Q + 0.33V_p + 2.3h - 178.96 \quad (1)$$

$$SRV = \sum_{i=1}^k SRV_i \quad (2)$$

式中:  $SRV$  为微地震覆盖体积,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  $V_L$  为入地液量,  $\text{m}^3$ ;  $n$  为裂缝密度, 簇/ $\text{m}$ ;  $Q$  为排量,  $\text{m}^3/\text{min}$ ;  $V_p$  为砂量,  $\text{m}^3$ ;  $h$  为油层厚度,  $\text{m}$ 。

基于计算获取的  $SRV$ , 运用油藏数值模拟方法预测水平井累产油, 与实际产能进行标定, 建立  $FSV$  与  $SRV$  的相关性表达式。选取研究区生产满 1 年的 64 口水平井, 利用公式(2)计算单井  $SRV$ , 对单井预测产量与实际第 1 年累产油量做差异系数区间概率分析(图 6a), 发现  $SRV$  与  $FSV$  差异系数主要集中在 0.20, 0.22 和 0.24, 总概率约为 80%。因此, 利用 3 个差异

系数的平均值 0.22 作为研究区  $SRV$  与  $FSV$  的校正系数, 得到  $FSV$  定量表征公式如下:

$$FSV = 0.22SRV \quad (3)$$

式中:  $FSV$  为缝网波及体积,  $10^4 \text{ m}^3$ 。

利用公式(3)计算的  $FSV$  进行产能预测, 结果显示与实际累产油具有较高的拟合度(图 6b), 因此表明该公式能较精确地表征人工缝网对储层的有效波及程度。

同时, 基于  $FSV$  公式, 定义缝网波及系数为:

$$E_{FSV} = \frac{FSV}{V_r} \quad (4)$$

式中:  $V_r$  为油藏体积,  $\text{m}^3$ ;  $E_{FSV}$  为缝网波及系数, %。

利用公式(1)~(3)计算 48 组压裂水平井的  $FSV$ , 建立单井第 1 年累产油与  $FSV$  的相关性图版(图 7)。研究表明, 单井第 1 年累产油与  $FSV$  具有较强的正相关性, 相关系数达到 0.78。同时, 当缝网波及体积超过一定值时也表现出累产油量增加幅度逐渐减小的趋势, 因此对于研究区水平井体积改造存在技术经济最优的  $FSV$ 。

### 3 模型验证及现场应用

#### 3.1 矿场监测数据验证

利用公式(1)计算研究区水平井 101 段的  $SRV$ , 与实际微地震监测数据进行对比, 整体拟合程度较好(图 8), 相对误差在 10% 以内, 表明该计算方法具有较高的精度和适用性, 具备在矿场推广应用的價值。

#### 3.2 典型平台应用

庆城油田在华 H6 平台开展整体压裂试验, 平台

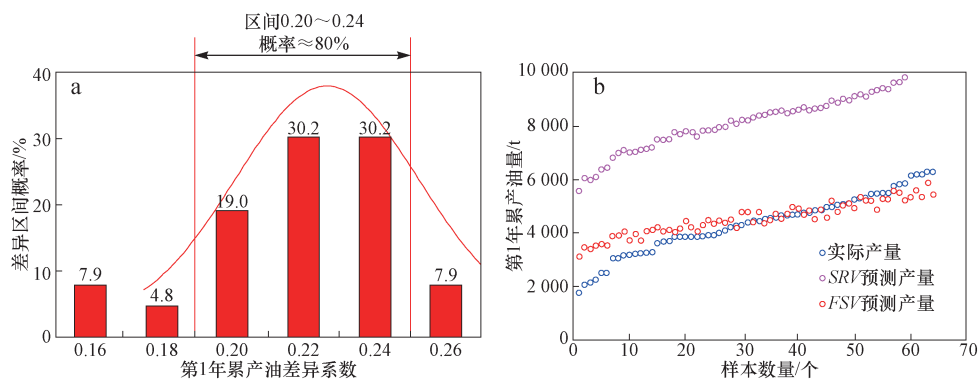


图6 庆城油田页岩油水平井年产油差异系数区间概率分布(a)与产量拟合图(b)

Fig.6 Interval probability distribution of annual oil production difference coefficient of horizontal wells (a) and production fitting diagram (b) for the shale oil in Qingcheng oilfield

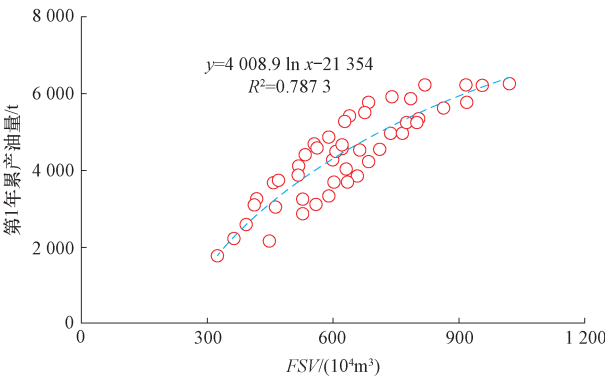


图 7 庆城油田页岩油水平井第 1 年累产油与缝网波及体积相关性

Fig. 7 Correlation diagram between accumulated oil production and FSV in horizontal wells for shale oil during the first year in Qingcheng oilfield

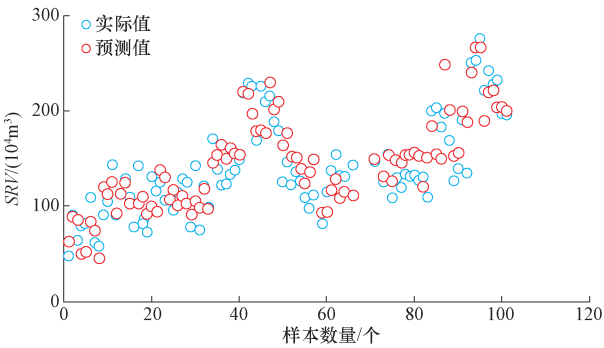


图 8 庆城油田页岩油水平井单段缝网波及体积预测值与实际值对比

Fig. 8 Comparison between predicted value and actual value of single-sage FSV in horizontal wells for shale oil in Qingcheng oilfield

表 2 庆城油田华 H6 平台水平井压裂参数及开发效果预测

Table 2 Fracturing parameters and development effect prediction of horizontal wells on Hua H 6 pad, Qingcheng oilfield

| 井号        | 水平段长度/<br>m | 压裂段数/<br>簇数 | 加砂强度/<br>(t · m <sup>-1</sup> ) | 进液强度/<br>(m <sup>3</sup> · m <sup>-1</sup> ) | FSV/<br>(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ) | E <sub>FSV</sub> /% | 累产油/<br>(10 <sup>4</sup> t) | 产量强度/<br>(t · m <sup>-1</sup> ) |
|-----------|-------------|-------------|---------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 华 H6 - 1  | 1 529       | 22/107      | 3.2                             | 24.0                                         | 451                                       | 41.0                | 1.6                         | 21.8                            |
| 华 H6 - 2  | 1 564       | 25/127      | 3.3                             | 22.7                                         | 411                                       | 41.7                | 1.2                         | 8.1                             |
| 华 H6 - 3  | 1 468       | 23/120      | 4.4                             | 27.9                                         | 515                                       | 46.8                | 1.6                         | 29.1                            |
| 华 H6 - 4  | 1 260       | 19/102      | 4.2                             | 27.0                                         | 260                                       | 34.4                | 0.9                         | 11.6                            |
| 华 H6 - 5  | 1 323       | 19/94       | 3.7                             | 24.2                                         | 505                                       | 55.3                | 1.7                         | 22.1                            |
| 华 H6 - 6  | 2 029       | 27/165      | 5.6                             | 33.4                                         | 628                                       | 49.1                | 1.4                         | 8.2                             |
| 华 H6 - 7  | 1 588       | 23/92       | 5.7                             | 24.1                                         | 653                                       | 65.3                | 1.6                         | 15.3                            |
| 华 H6 - 8  | 2 110       | 26/157      | 6.6                             | 39.2                                         | 649                                       | 42.7                | 1.5                         | 7.5                             |
| 华 H6 - 9  | 1 959       | 28/191      | 4.8                             | 28.5                                         | 678                                       | 50.2                | 2.3                         | 8.5                             |
| 华 H6 - 11 | 1 252       | 16/89       | 3.5                             | 19.6                                         | 361                                       | 40.0                | 1.2                         | 17.7                            |
| 华 H6 - 12 | 1 191       | 19/98       | 3.7                             | 23.7                                         | 470                                       | 65.8                | 1.4                         | 14.8                            |
| 总平台平均值    | 1 570       | 23/122      | 4.4                             | 26.7                                         | 5 580                                     | 48.4                | 16.5                        | 15.0                            |

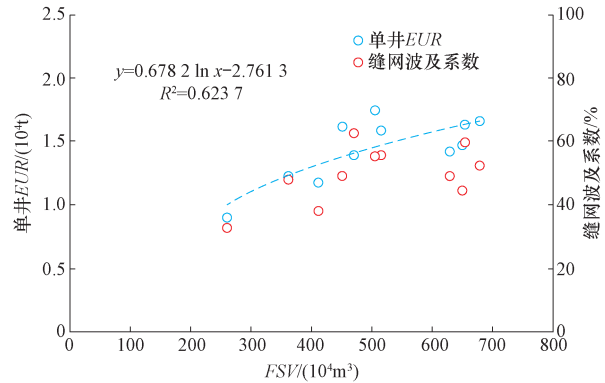


图 9 庆城油田华 H6 平台单井 EUR 与缝网波及体积相关性

Fig. 9 Correlation diagram of single well EUR and FSV on Hua H6 pad, Qingcheng oilfield

部署 11 口水平井,累计压裂 247 段 1 342 簇,入地液量  $37.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、砂量  $3.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,平台控制储量  $166.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。单井第 1 年平均累产油达 4 245 t,目前平台已累产油  $5.2 \times 10^4 \text{ t}$ ,预测累产油  $16.5 \times 10^4 \text{ t}$ 。利用本文研究成果评价华 H6 平台改造及开发效果(表 2),可以发现,预测产量与实际产量吻合度较高,随着缝网波及体积的增大,单井 EUR(预估最大可采储量)显著提高(图 9),但在后期增幅有放缓趋势。该平台缝网波及系数介于 34.4%~65.8%,平均值为 48.3%,说明缝网波及体积仍有进一步扩大的必要。

## 4 结论

1) 庆城油田页岩油体积改造裂缝总体呈现以主裂

缝为主、分支缝为辅的条带状缝网形态,形似“仙人掌”。影响水平井体积压裂缝网波及体积主控因素依次为:入地液量、裂缝密度、排量、油层厚度和砂量。

2) 单井缝网波及体积与累产油具有较强的正相关性,相关系数达到0.78。当缝网波及体积超过一定值时也表现出累产油量增加幅度逐渐减小的趋势,存在技术经济最优的缝网波及体积。将研究成果应用于庆城油田华H6典型平台,对水平井进行压裂参数优化设计和产能预测,经证实预测产能与实际产量吻合度较高,能够为页岩油体积压裂设计提供快捷有效的理论支撑。

3) 基于矿场微地震监测大数据,应用多元线性回归方法建立了微地震覆盖体积与关键地质工程参数的拟合模型,并通过产能校正建立了缝网波及体积定量表征经验公式,经矿场实际井验证预测结果准确可靠,是值得推广的一种新方法。

### 参 考 文 献

- [1] 焦方正,邹才能,杨智. 陆相源内石油聚集地质理论认识及勘探开发实践[J]. 石油勘探与开发,2020,47(6):1-12.  
Jiao Fangzheng, Zhou Caineng, Yang Zhi. Geological theory and exploration & development practice of hydrocarbon accumulation inside continental source kitchen[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1-12.
- [2] 焦方正. 页岩气“体积开发”理论认识、核心技术与实践[J]. 天然气工业,2019,39(5):1-14.  
Jiao Fangzheng. Theoretical insights, core technologies and practices concerning "volume development" of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(5): 1-14.
- [3] Fu S, Yu J, Zhang K, et al. Investigation of multistage hydraulic fracture optimization design methods in horizontal shale oil wells in the Ordos Basin[J]. Geofluids, 2020, 65(1): 1-17.
- [4] 付锁堂,姚泾利,李士祥,等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组陆相页岩油富集特征与资源潜力[J]. 石油实验地质,2020,42(5):699-710.  
Fu Suotang, Yao Jingli, Li Shixiang, et al. Enrichment characteristics and resource potential of continental shale oil in Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(5): 699-710.
- [5] 付金华,李士祥,牛小兵,等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油地质特征与勘探实践[J]. 石油勘探与开发,2020,47(5):870-883.  
Fu Jinhua, Li Shixiang, Niu Xiaobing, et al. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 870-883.
- [6] Zhang K, Zhuang X, Tang M, et al. Integrated optimisation of fracturing design to fully unlock the Chang 7 tight oil production potential in Ordos Basin[C]//SPE. Asia Pacific Unconventional Resources Technology Conference. Brisbane, Australia: SPE, 2019.
- [7] Zhang K, Tang M, Du X, et al. Application of integrated geology and geomechanics to stimulation optimization workflow to maximize well potential in a tight oil reservoir, Ordos Basin, Northern Central China [C]. 53rd U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 23-26 June, New York City, New York 2019. ARMA 19-2187.
- [8] 付金华,牛小兵,淡卫东,等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油地质特征及勘探开发进展[J]. 中国石油勘探,2019,24(5):601-614.  
Fu Jinhua, Niu Xiaobing, Dan Weidong, et al. The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang 7 Member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 601-614.
- [9] Bai X, Zhang K, Tang M, et al. Development and application of cyclic stress fracturing for tight oil reservoir in Ordos Basin [C]. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference 2019. SPE-197746-MS.
- [10] 慕立俊,赵振峰,李宪文,等. 鄂尔多斯盆地页岩油水平井细分切割体积压裂技术[J]. 石油与天然气地质,2019,40(3):626-635.  
Mu Lijun, Zhao Zhenfeng, Li Xianwen, et al. Fracturing technology reservoir volume with subdivision cutting for shale oil horizontal wells in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 626-635.
- [11] 吴顺林,刘汉斌,李宪文,等. 鄂尔多斯盆地致密油水平井细分切割缝控压裂试验与应用[J]. 钻采工艺,2020,43(3):53-55.  
Wu Shunlin, Liu Hanbin, Li Xianwen, et al. Fracturing test and application of subdivided cutting fracture in tight oil horizontal wells in Ordos Basin [J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(3): 53-55.
- [12] 李忠兴,屈雪峰,刘万涛,等. 鄂尔多斯盆地长7段致密油合理开发方式探讨[J]. 石油勘探与开发,2015,42(2):217-221.  
Li Zhongxing, Qu Xuefeng, Liu Wantao, et al. Development modes of Triassic Yanchang Formation Chang 7 Member tight oil in Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 217-221.
- [13] 张矿生,王文雄,徐晨,等. 体积压裂水平井增产潜力及产能影响因素分析[J]. 科学技术与工程,2013,13(35):10475-10480.  
Zhang Kuangsheng, Wang Wenxiong, Xu Cheng, et al. Analysis on stimulation potential and productivity influencing factors of network fractured horizontal well [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(35): 10475-10480.
- [14] 李宪文,樊凤玲,杨华,等. 鄂尔多斯盆地低压致密油藏不同开发方式下的水平井体积压裂实践[J]. 钻采工艺,2016,39(3):34-36.  
Li Xianwen, Fan Fengling, Yang Hua, et al. Volumetric fracturing technology of low-pressure tight oil reservoirs horizontal wells under different development conditions in Ordos Basin [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(3): 34-36.
- [15] 王文东,赵广渊,苏玉亮,等. 致密油藏体积压裂技术应用[J]. 新疆石油地质,2013,34(3):345-348.  
Wang Wendong, Zhao Guangyuan, Su Yuliang, et al. Application of network fracturing technology to tight oil reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(3): 345-348.
- [16] 舒志恒,方栋梁,郑爱维,等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组一段上部页岩气层地质特征及开发潜力[J]. 天然气地球科学,2020,31(3):393-401.  
Su Zhiheng, Fang Dongliang, Zhen Aiwei, et al. Geological character-

- istics and development potential of upper shale gas reservoirs of the 1st member of Longmaxi Formation in Jiaoshiha area, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(3): 393–401.
- [17] 刘博, 徐刚, 纪拥军, 等. 页岩油水平井体积压裂及微地震监测技术实践[J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(6): 172–180.
- Liu Bo, Xu Gang, Ji Yongjun, et al. Practice of volume fracturing and microseismic monitoring technology in horizontal wells of shale oil [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(6): 172–180.
- [18] 刘尧文, 廖如刚, 张远, 等. 涪陵页岩气田井地联合微地震监测气藏实例及认识[J]. *天然气工业*, 2016, 36(10): 56–62.
- Liu Yaowen, Liao Rugang, Zhang Yuan, et al. Application of surface-downhole combined microseismic monitoring technology in the Fuling shale gas field and its enlightenment [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(10): 56–62.
- [19] 黄小贞, 谷红陶. 井中微地震监测技术在平桥南页岩气区块应用效果分析[J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(1): 43–48.
- Huang Xiaozhen, Gu Hongtao. Microseismic monitoring technology of shale gas block in the southern part of Pingqiao [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(1): 43–48.
- [20] 李德伟, 杨瑞召, 张都, 等. 水力压裂微地震事件分布趋势分析——以MY1井微地震监测为例[J]. *断块油气田*, 2019, 26(3): 346–349.
- Li Dewei, Yang Ruizhao, Zhang Dou, et al. Distribution trend analysis of hydraulic fracturing events; taking MY1 Well microseismic monitoring as an example [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2019, 26(3): 346–349.
- [21] 赵金洲, 任岚, 沈骋, 等. 页岩气储层缝网压裂理论与技术研究新进展[J]. *天然气工业*, 2018, 38(3): 1–14.
- Zhao Jinzhou, Ren Lan, Shen Cheng, et al. Latest research progresses in network fracturing theories and technologies for shale gas reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(3): 1–14.
- [22] 张矿生, 樊凤玲, 雷鑫. 致密砂岩与页岩压裂缝网形成能力对比评价[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(14): 185–189.
- Zhang Kuangsheng, Fan Fenglin, Lei Xin, et al. Comparing evaluation of the ability of forming fracture network in tight sand reservoir and shale reservoir [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(14): 185–189.
- [23] 刘子雄, 王艳红, 高杰, 等. 基于压裂返排数据的有效破裂体体积计算方法[J]. *石油地质与工程*, 2019, 33(2): 112–115.
- Liu Zixiong, Wang Yanhong, Gao Jie, et al. New calculation method of effective fracture volume based on fracture flowback data [J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2019, 33(2): 112–115.
- [24] 任岚, 赵金洲, 林然, 等. 页岩压裂水平井增产改造体积的动态演化模型[J]. *应用数学与力学*, 2018, 39(10): 1100–1113.
- Ren Lan, Zhao Jinzhou, Lin Ran, et al. A dynamic evolution model for the stimulated reservoir volume of the staged fractured horizontal well in shale gas reservoir [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, 39(10): 1100–1113.
- [25] Weng X, Kresse O, Cohen C, et al. Modeling of hydraulic fracture network propagation in a naturally fractured formation [J]. *SPE Production & Operations*, 2011, 26(4): 368–380.
- [26] Wu K, Olson J. Simultaneous multifracture treatments; fully coupled fluid flow and fracture mechanics for horizontal wells [J]. *SPE Journal*, 2015, 20(2): 337–346.
- [27] 路千里, 刘壮, 郭建春, 等. 水力压裂致套管剪切变形机理及套变量计算模型[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(2): 394–401.
- Lu Qianli, Liu Zhuang, Guo Jianchun, et al. Study on mechanism of hydraulic fracturing induced casing shear deformation and prediction model of casing deformation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 394–401.
- [28] 赵博, 胡铭寰, 武天海, 等. 一种适用于水力裂缝扩展的混合位移不连续单元法[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(6): 104–111.
- Zhao Bo, Hu Minghuan, Wu Tianhai, et al. A hybrid displacement discontinuity element method for hydraulic fracture propagation [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(6): 104–111.
- [29] 李士祥, 牛小兵, 柳广弟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7段页岩油形成富集机理[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(4): 719–729.
- Li Shixiang, Niu Xiaobing, Liu Guangdi, et al. Formation and accumulation mechanism of shale oil in the 7th member of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(4): 719–729.
- [30] 许琳, 常秋生, 杨成克, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油储层特征及含油性[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 535–549.
- Xu Lin, Chang Qiusheng, Yang Chengke, et al. Characteristics and oil-bearing capability of shale oil reservoir in the Permian Lucaogou Formation, Jimusaer sag [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 535–549.
- [31] Zeng F, Cheng X, Guo J, et al. Hybridising human judgment, AHP, grey theory, and fuzzy expert systems for candidate well selection in fractured reservoirs [J]. *Energies*, 2017, 10(4): 47–450.
- [32] 陶亮, 郭建春, 李凌铎, 贺娜, 李鸣. 致密油藏体积压裂水平井产能评价新方法[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(3): 89–93.
- Tao Liang, Guo Jianchun, Li Lingze, He Na, Li Ming. New productivity evaluation of horizontal well with volume-fracturing in tight oil reservoir [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(3): 89–93.

(编辑 张玉银)