

页岩气储层评价新技术——甜度评价方法

蒋廷学^{1,2}, 卞晓冰^{1,2}

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘要: 在应用地质甜点与工程甜点对页岩气层产气能力进行评价时, 只能表明页岩气层压后产气可能性的大小, 而压后产气量的高低与该甜点指标的正相关性并不明显。为此, 提出了地质甜度及工程甜度的概念, 对地质甜点与工程甜点的“甜度”进行精确表征和量化, 并给出了其计算方法: 设置待评价区地质甜度及工程甜度最甜的标杆, 即涵盖一系列最佳地质参数与工程参数的集合体, 然后计算欧氏贴近度来表征待评价区参数集合与该标杆的相似度, 并将其作为地质甜度与工程甜度, 应用灰色关联方法确定地质甜度和工程甜度的权重分配后, 可计算得到综合的甜度指标。涪陵页岩气田焦石坝区块7口井的验证结果表明, 与地质甜点与工程甜点相比, 地质甜度与工程甜度与各段簇产气量的正相关性更强。研究与应用表明, 应用地质甜度与工程甜度可以实现页岩气层产气能力的定量评价, 增强了页岩气水平井分段压裂段簇位置优选的科学性与可靠性, 对页岩气开发的降本增效具有重要的现实意义。

关键词: 页岩气; 压裂; 地质甜度; 工程甜度; 压裂设计; 焦石坝区块; 涪陵页岩气田

中图分类号: TE357.1⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2016)04-0001-06

The Novel Technology of Shale Gas Play Evaluation— Sweetness Calculation Method

JIANG Tingxue^{1,2}, BIAN Xiaobing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 100101, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: The evaluation results of a shale gas play based on geologic and engineering sweet spots can only show the probability of gas production after shale gas fracturing, while the production capacity after fracturing has no significant positive correlation with the sweet spot indicator. For this reason, the concept of geologic and engineering sweetness is proposed and corresponding calculation method is also provided in order to develop a “sweetness index”. It is necessary to set the benchmark for the highest geologic sweetness and engineering sweetness of the area to be evaluated, namely the collection of a series of optimum geological parameter combinations and engineering parameters, then to calculate the Euclid approach degree to indicate the similarity between the parameter combinations and the benchmark. Taking it as the geologic sweetness and engineering sweetness, we need to determine weighted distribution of geologic sweetness and engineering sweetness by means of grey correlation in order to obtain the aggregative sweetness indicator, or a “sweetness index”. The concept was applied to seven wells in Jiaoshiha Block of Fuling Shale Gas Field and results showed that gas production of clusters from each segment has significant positive correlation with geologic sweetness and engineering sweetness. According to results of the study and applications, geologic sweetness and engineering sweetness can be used in the quantitative evaluation of the gas production capacity of a shale gas play, which improves rationality and reliability of segment cluster selection in staged fracturing of horizontal shale gas wells and results in significant cost reduction and effectiveness of shale gas fracturing.

Key words: shale gas; fracturing; geologic sweetness; engineering sweetness; fracturing design; Jiaoshiha Block; Fuling Shale Gas Field

国内外大量页岩气水平井分段压裂后的产气剖面结果证明, 页岩气井的产气量基本符合“三三三”原则, 即约三分之一的段簇贡献了约70%的产气量, 约三分之一的段簇贡献了约30%的产气量, 其余约三分之一的段簇无产气量。可见, 页岩气水平井分段压裂段簇位置的优选, 成为页岩气高效开发最为重要的技术之一。为此, 人们提出了页岩气地

收稿日期: 2016-06-28。

作者简介: 蒋廷学(1969—), 男, 江苏东海人, 1991年毕业于石油大学(华东)采油工程专业, 2007年获中国科学院渗流流体力学研究所流体力学专业博士学位, 教授级高级工程师, 中国石化集团公司高级专家, 主要从事水力压裂理论与技术方面的研究。系本刊编委。E-mail: lffy-jtx@sohu.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“页岩地层动态随机裂缝控制机理与无水压裂理论”(编号: 51490653)和中国石化科技攻关项目“涪陵区块页岩气层改造技术研究”(编号: P14091)资助。

质甜点与工程甜点的概念,来表征页岩气储层的产气潜力,目前已被业界广泛采纳,并被大量用于页岩气勘探开发实践中,尤其是在水平井分段压裂段簇位置的优选中。

所谓甜点,就是指地质上的含气性较好、压后产气概率较高的储层;或者工程上的岩石脆性程度较高,压裂裂缝容易起裂和延伸,最终容易形成体积裂缝的储层。显然,理想的甜点应是涵盖地质甜点与工程甜点的综合甜点(综合甜点计算中,地质甜点与工程甜点的权重分配应不一样)。在综合甜点位置进行射孔和压裂作业,可在实现体积裂缝的前提下,最大限度地发挥地质上的产气潜力。显然,如果甜点选择准确,页岩气开发可以达到事半功倍的效果,因此,甜点评价方法研究的现实指导意义非常重大。

地质甜点与工程甜点的评价方法很多,尤其是工程甜点的评价方法超过 20 种^[1-5],但各种评价方法的计算结果差异性较大,难以综合权衡确定最佳的甜点值,导致水平井分段压裂段簇位置的划分具有很大的不确定性。页岩气井实际生产数据的验证结果表明,气井压后产气量与甜点指标的正相关性并不强,因此,根据甜点指标进行的段簇位置优选仍具有一定的盲目性。此外,地质甜点和工程甜点的概念也有些宽泛,计算结果也只能是定性和半定量的居多。为此,笔者提出了地质甜度和工程甜度的概念,对地质甜点与工程甜点的“甜度”进行精确表征和量化,以进一步提高水平井分段压裂段簇位置优选的科学性和指导性,从而能更好地实现页岩气勘探开发“降本增效”的目标,进一步加速国内页岩气勘探开发的进程,并为国家“十三五”能源战略及美丽中国的早日实现,提供重要的技术支撑。

1 页岩气地质甜点与工程甜点的评价方法

页岩气地质甜点的评价参数主要包括总有机碳含量(TOC)、热成熟度(R_0)、含气量、孔隙度、天然裂缝特性参数及孔隙压力等^[6-9],工程甜点的评价参数主要包括岩石矿物组分及岩石力学参数等^[10-15]。

计算页岩气地质甜点时,常用最小-最大规范化方法对页岩关键地质参数进行归一化处理,采用专家打分法确定各参数权重,然后进行加权处理即可得到页岩气地质甜点指数,计算公式为:

$$S_{地质} = (S_1, S_2, \dots, S_n)(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T \quad (1)$$

式中: $S_{地质}$ 为页岩地质甜点指数; n 为地质参数的数量; S_i 为页岩地质参数的归一化值($i=0, 1, 2, \dots, n$); ω_i 为地质参数的权重因子($i=0, 1, 2, \dots, n$)。

最常用的 2 种页岩气工程甜点指数的计算公式为:

$$S_{工程} = \left[\frac{E_c - E_{cmin}}{E_{cmax} - E_{cmin}} + \frac{\mu_c - \mu_{cmax}}{\mu_{cmin} - \mu_{cmax}} \right] / 2 \quad (2)$$

$$S_{工程} = \frac{\text{脆性矿物含量}}{\text{全岩矿物含量}} \quad (3)$$

式中: $S_{工程}$ 为页岩气工程甜点指数; E_c 为综合测定的杨氏模量,MPa; E_{cmax} 和 E_{cmin} 分别为综合测定的最大杨氏模量和最小杨氏模量,MPa; μ_c 为综合测定的泊松比; μ_{cmax} 和 μ_{cmin} 分别为综合测定的最大泊松比和最小泊松比。

应用页岩气地质甜点指数和工程甜点指数,可以计算页岩气综合甜点指数:

$$S_{综合} = (S_{地质}, S_{工程})(\omega_{地质}, \omega_{工程})^T \quad (4)$$

式中: $S_{综合}$ 为页岩气综合甜点指数; $\omega_{地质}$ 和 $\omega_{工程}$ 分别为地质甜点和工程甜点的权重因子,基于涪陵页岩气田实际地质参数及工程参数,根据专家打分法确定两者权重值分别为 0.6 和 0.4。

笔者应用涪陵页岩气田的地质参数及工程参数,对其页岩气综合甜点指数进行了计算,并与气井实际生产数据进行了相关性分析,发现综合甜点指数与压后产量的相关性不强。例如,图 1 为某井各段综合甜点指数与其产气贡献率的统计结果,由图 1 可以看出,综合甜点指数与产气量并无明显的相关性。

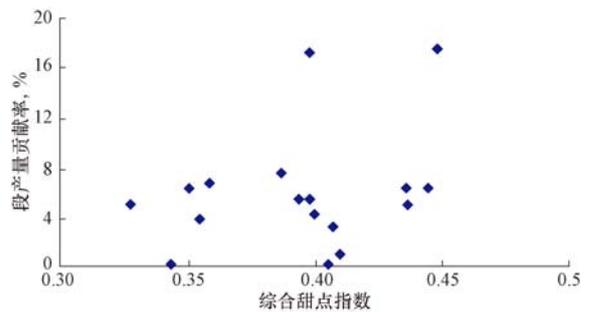


图 1 焦石坝区块某井综合甜点指数和产气贡献率的关系
Fig. 1 Relation between comprehensive sweet spot and corresponding production contribution results for one shale gas well in Jiaoshiba Area

综上所述,为了更好地指导页岩气井压裂设计与施工,实现页岩气的高效开发,有必要研究一种新的评价指标来代替甜点指标,对页岩气储层的产气潜力进行更为准确的评价。

2 页岩气地质甜度及工程甜度的定义

页岩气地质甜点和工程甜点的概念,只能说明页岩气层压后产气可能性的大小,而压后产能的高低与甜点指标的正相关性并不明显。地质甜度和工程甜度则表征了甜点程度的大小,与压后产能的高低具有较好的正相关性。也就是说,甜点可以对页岩气层的产气能力进行定性评价,而甜度可以实现页岩气层产气能力的定量评价。

在对某一区块的甜度进行评价时,首先要找出该区块甜度最高的标杆,该最高值可设置为 1。该标杆是地质甜点与工程甜点中所有相关独立性参数的集合,且各个参数值均最有利于压后产气,由于部分参数与压后产气量可能具有负相关性,因此所选参数值不一定是最大值。显然,标杆是某个区块或水平段中假想的最佳甜点位置,不存在或存在的概率非常低。

有了标杆的假设,可利用欧氏贴进度来表征水平井筒某个位置处的参数集合与上述标杆的相似度:相似度越高,表明该处页岩属性越接近标杆,甜度越高;反之,该处页岩属性与标杆差距越大,甜度也越低。换言之,可用与标杆的欧氏贴进度代替某页岩气层的地质甜度和工程甜度。

3 页岩气地质甜度与工程甜度的计算

根据甜度的定义,在精细评价页岩地层各项地质参数及工程参数的基础上,严格分析各参数的相关性,确定彼此独立的地质参数与工程参数作为评价参数。例如,总有机碳含量(TOC)和含气量都可以描述页岩含气性,但是 TOC 主要用来评价页岩的生烃能力,含气量主要用来评价目前页岩的实测含气数值,TOC 高并不代表含气量高,而含气量高 TOC 往往会较高。所以,可以说二者有一定联系,相互间并不独立,因此评价参数只选用了含气量,没有选用 TOC。

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\min_{1 \leq i \leq n} \min_{1 \leq k \leq N} |x'_0(k) - x'_i(k)| + \rho \max_{1 \leq i \leq n} \max_{1 \leq k \leq N} |x'_0(k) - x'_i(k)|}{|x'_0(k) - x'_i(k)| + \rho \max_{1 \leq i \leq n} \max_{1 \leq k \leq N} |x'_0(k) - x'_i(k)|} \quad (6)$$

式中: ρ 为分辨系数,其取值范围为 $[0, 1]$,通常取 0.5; $\xi_{0i}(k)$ 为关联系数,反映第 i 个比较序列 \mathbf{X}_i 与参考序列 \mathbf{X}_0 在第 k 个位置的关联程度。

综合所有的关联系数,可求取各比较序列与参考序列间的关联度:

基于评价参数之间具有独立性的原则,对页岩气甜点评价参数进行筛选,初步筛选的独立地质参数有脆性矿物含量、黏土矿物含量、页岩厚度、总孔隙度、有机质孔隙度、热演化程度、总含气量、游离气比例、基质渗透率、天然裂缝发育程度、压力系数、杨氏模量和泊松比;工程参数有脆性指数(基于施工曲线中脆性区和弹性区的面积及对应的排量计算)、施工液量和加砂量。

3.1 关键地质参数的评价

初步筛选的地质参数已有成熟的评价方法,包括露头观测(可获得天然裂缝发育程度)、岩心试验(可获得页岩矿物组分、总孔隙度、含气量、杨氏模量和泊松比等大部分地质参数)、测井及录井资料解释(可获得矿物组分、页岩厚度、含气量、杨氏模量和泊松比等大部分地质参数)等,并结合同区块邻井数据进行校正,则可以得到单井或区域性的连续性地质参数。

3.2 关键地质参数权重的确定

由于地质参数一般为近井参数,可通过计算气井压后初产与关键地质参数间的灰色关联度,并对计算结果进行归一化处理后可得到各参数权重分配。

设置各地质参数为比较序列 $\mathbf{X}_i = \{x_i(1), x_i(2), x_i(3), \dots, x_i(N)\}$, ($i=1, 2, 3, \dots, n$), 压后初产为参考序列 $\mathbf{X}_0 = \{x_0(1), x_0(2), x_0(3), \dots, x_0(N)\}$, 由于各参数具有不同的量纲,因此,要进行无量纲化处理。笔者采用均值化法对数据进行无量纲化处理,得到无量纲化处理后的序列 \mathbf{X}'_i 与 \mathbf{X}'_0 , 计算公式为:

$$x'_i(k) = \frac{x_i(k)}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_i(k)} \quad (5)$$

式中: $i=0, 1, 2, \dots, n$; $k=1, 2, \dots, N$; N 为变量序列的长度。

将序列 \mathbf{X}'_i 与 \mathbf{X}'_0 做如下变换:

$$r_{0i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_{0i}(k) \quad (7)$$

式中: r_{0i} 为各比较序列与参考序列间的关联度。

r_{0i} 值越大,说明比较序列 \mathbf{X}'_i 与参考序列 \mathbf{X}'_0 的关联程度越好。

将各参数的关联程度视为一个整体,其中某一参数的权重可通过该参数的关联度与各参数关联度集合间的比值求得:

$$\omega_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{0i} \quad (8)$$

式中: ω_i 为第 i 个参数的权重。

按照该方法,根据涪陵页岩气田实际获得的地质数据(某些地质参数不全,如压力系数等),求得关键地质参数的权重:总孔隙度的权重为 0.083,基质渗透率的权重为 0.107,黏土矿物的权重为 0.096,总含气量的权重为 0.225,天然裂缝发育程度的权重为 0.123,杨氏模量的权重为 0.113,泊松比的权重为 0.125,脆性矿物含量的权重为 0.128。

3.3 甜度(欧氏贴近度)的计算

贴近度是描述 2 个模糊集合相似或者贴近程度的一个重要指标,笔者用欧式贴近度来表征实际井甜度与标杆甜度之间的接近程度,即实际井甜度的大小。欧式贴近度的计算方法如下:

设 \mathbf{A} 为由 $n-1$ 个待评价区 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_{n-1}$ 及标杆 A_n^* 组成的集合, \mathbf{P} 为对应于待评价区 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_{n-1}$ 及标杆 A_n^* 的 m 个特征参数 P_1, P_2, \dots, P_m 组成的集合,按最大最小法求取由集合 \mathbf{A} 到集合 \mathbf{P} 的模糊矩阵 \mathbf{R} :

$$\begin{cases} \mathbf{R} = [r_{ij}]_{n \times m} & i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \\ r_{ij} \in [0, 1] \end{cases} \quad (9)$$

$$r_{ij} = \mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_1 \\ \frac{(x - a_1)}{(a_2 - a_1)} & a_1 < x < a_2 \\ 1 & x \geq a_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: r_{ij} 表示待评价区 A_i 具有参数 P_j 特征的隶属度; x 为待评价区或标杆的任一特征参数; a_1 为待评价区或标杆的任一特征参数的最小值; a_2 为待评价区或标杆的任一特征参数的最大值。

将模糊矩阵 \mathbf{R} 划分为 n 个次级模糊矩阵 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_{n-1}$ 及 \mathbf{R}_n^* , 计算 $\mathbf{R}_j (j=1, 2, \dots, n-1)$ 与 \mathbf{R}_n^* 的接近程度,即欧氏贴近度:

$$\rho(\mathbf{R}_j, \mathbf{R}_n^*) = 1 - \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [\mathbf{R}_j(i) - \mathbf{R}_n^*(i)]^2} \quad (11)$$

3.4 工程甜度的计算

页岩气井压裂施工中的压力曲线形态及施工规模是页岩可压性最真实的反映,笔者以文献[4]提出的脆性指数和远井可压性指数评价方法为基础,通

过压裂施工破裂压力曲线形态计算得到近井工程甜点,通过计算总的加砂量与总的入井压裂液量的比值而得到远井工程甜点,两者的权重采用 2.2 中灰色关联度的计算方法确定。页岩的工程甜度即定义为考虑近井工程甜点和远井工程甜点的综合指标。

3.5 综合甜度的计算

有了地质甜度及工程甜度后,最终的甜度应是综合考虑地质甜度与工程甜度的折中结果,这涉及到地质甜度与工程甜度的权重分配问题。同样,根据 2.2 中灰色关联度的计算方法,考察压后产量与上述地质甜度及工程甜度的灰色关联度,按归一化原理求得各自的权重。则最终的甜度为:

$$S = (S_G, S_E)(\omega_G, \omega_E)^T = S_G \omega_G + S_E \omega_E \quad (12)$$

式中: S 为页岩综合甜度; S_G 为地质甜度; S_E 为工程甜度; ω_G 为地质甜度的权重因子; ω_E 为工程甜度的权重因子。

4 计算实例

将涪陵页岩气田焦石坝区块页岩气井的甜度计算结果与产气量进行对比分析,来说明甜度评价方法的适应性。

4.1 标杆(段簇)的确定

根据焦石坝区块的地质参数与工程参数评价结果,确定标杆的参数集合为:地质参数{总孔隙度 5.79%,基质渗透率 0.26 mD,黏土矿物含量 22%,总含气量 3.49 m³/t,天然裂缝发育程度 0.43,杨氏模量 51.3 GPa,泊松比 0.17,脆性矿物含量 66.8%},工程参数{脆性指数 0.51,施工液量 1 400 m³,加砂量 90 m³}。

4.2 单井综合甜度分析

焦石坝区块 7 口井的页岩气甜度计算结果如表 1 所示。

表 1 焦石坝区块 7 口井页岩气甜度计算结果

Table 1 Calculation results of sweetness for 7 shale gas wells in Jiaoshiba Block

井名	地质甜度	工程甜度	综合甜度	无阻流量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)
A 井	0.26	0.29	0.28	10.13
B 井	0.36	0.62	0.51	16.74
C 井	0.40	0.66	0.55	27.60
D 井	0.34	0.52	0.44	41.32
E 井	0.56	1.00	0.82	81.92
F 井	0.39	0.74	0.59	102.29
G 井	0.39	0.72	0.58	155.83

由表 1 可以看出,该气田页岩气甜度与无阻流量具有正相关性。

图 2 为焦石坝区块部分页岩气井无阻流量与计算的页岩气地质甜点和综合甜度的关系。

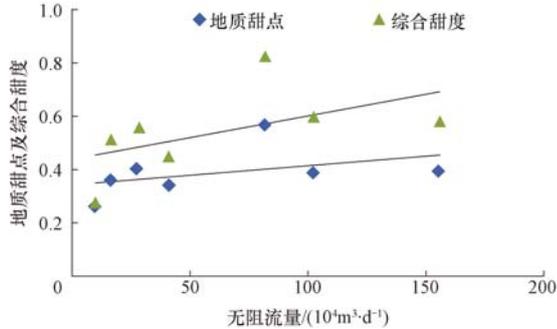


图 2 焦石坝页岩气田部分井无阻流量与页岩气甜点和综合甜度的关系

Fig. 2 Relation of open flow capacity with sweet spot and sweetness for shale gas wells in Jiaoshiba Area

由图 2 可以看出,页岩气甜度与无阻流量的相关性高于地质甜点与无阻流量的相关性。因此,可优先选用甜度指标对目标区块页岩可压性进行评价。

4.3 单井不同段簇甜度分析

以焦页 H 井为例,分别在地面计量产量为 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工作制度下进行水平井 FSI 产气剖面测试,测试结果与甜度的对应关系见图 3。由图 3 可以看出,在两种工作制度下,综合甜度指标与气井单段产气量具有较好的正相关性,产量变化较大的压裂段为第 1、第 2、第 7、第 10 和第 13 段,其余压裂段产气量变化不大。该井仅第 4 段和第 11 段没有产量贡献,压裂产气有效段簇占比达 88.2%,高于国外有效段簇的比例(1/2~2/3),

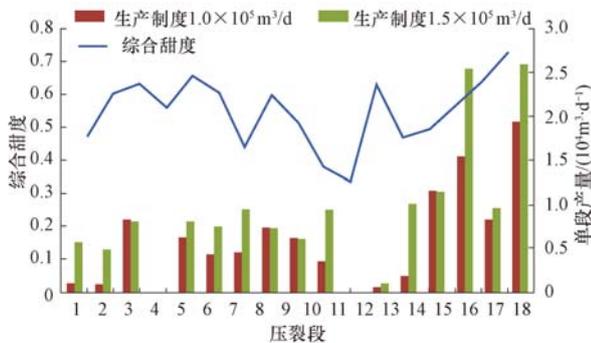


图 3 焦页 H 井产出剖面解释成果与甜度的关系

Fig. 3 Relation between interpretation results of production profile and calculated sweetness for JY H shale gas well

获得了较好的储层改造效果。

以 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 工作制度为例,焦页 H 井单段产量与页岩气甜点和综合甜度的关系如图 4 所示。

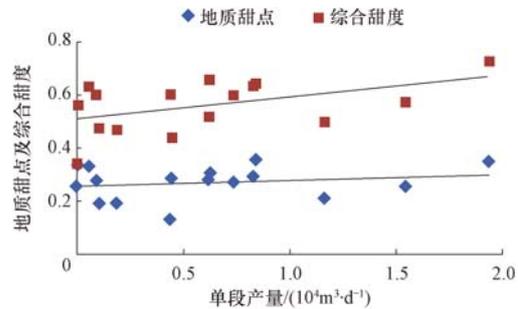


图 4 焦页 7-1HF 井单段产量与页岩气甜点和甜度的关系
Fig. 4 Relation of staged production with sweet spot and sweetness for JY H shale gas well

由图 4 可以看出,随着综合甜度的增加,该井单段产量有增大的趋势,且综合甜度与单段产量的正相关性比地质甜点与单段产量的正相关性更强。因此,应用综合甜度进行段簇设计,有利于提高页岩气水平井分段压裂效果。

5 结论与建议

1) 在地质甜点与工程甜点的基础上,提出了更具量化特征的地质甜度及工程甜度的概念及计算方法,这对页岩气水平井分段压裂段簇位置的优选和最终的降本增效具有重要的现实意义。

2) 在计算甜度时,采用灰色关联度法确定各相关独立参数的权重分配,计算待评价区与标杆的相似度,即欧氏贴近度,并将其作为待评价区的地质甜度和工程甜度,再用灰色关联度法确定地质甜度和工程甜度的权重分配后,可计算出综合的甜度指标。

3) 涪陵页岩气田焦石坝区块 7 口水平井的计算分析结果表明,与页岩气甜点相比,页岩气甜度与气井压后产量的正相关性更强。因此,可应用页岩气甜度来指导水平井分段压裂段簇位置的优选。

4) 建议扩大页岩气甜度评价方法的应用规模,不断修正和完善该评价方法,以更好地提高页岩气水平井分段压裂效果,实现页岩气开发降本增效的目的。

致谢:在本文的撰写过程中,中国石化石油工程技术研究院测录井研究所刘双莲博士及储层改造所苏媛同志给予了大量帮助,在此表示诚挚的谢意。

参 考 文 献

References

- [1] 黄进,吴雷泽,游园,等.涪陵页岩气水平井工程甜点评价与应用[J].石油钻探技术,2016,44(3):16-20.
HUANG Jin,WU Leize,YOU Yuan,et al. The evaluation and application of engineering sweet spots in a horizontal well in the Fuling Shale Gas Reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques,2016,44(3):16-20.
- [2] 蒋廷学.页岩油气水平井压裂裂缝复杂性指数研究及应用展望[J].石油钻探技术,2013,41(2):7-12.
JIANG Tingxue. The fracture complexity index of horizontal wells in shale oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques,2013,41(2):7-12.
- [3] QUINN J B,QUINN G D. Indentation brittleness of ceramics: a fresh approach[J]. Journal of Materials Science,1997,32(16):4331-4346.
- [4] 蒋廷学,卞晓冰,苏媛,等.页岩可压性指数评价新方法及应用[J].石油钻探技术,2014,42(5):16-20.
JIANG Tingxue,BIAN Xiaobing,SU Yuan,et al. A new method for evaluating shale fracability index and its application[J]. Petroleum Drilling Techniques,2014,42(5):16-20.
- [5] 王汉青,陈军斌,张杰,等.基于权重分配的页岩气储层可压性评价新方法[J].石油钻探技术,2016,44(3):88-94.
WANG Hanqing,CHEN Junbin,ZHANG Jie,et al. A new method of fracability evaluation of shale gas reservoir based on weight allocation[J]. Petroleum Drilling Techniques,2016,44(3):88-94.
- [6] HOWELL J V. Glossary of geology and related sciences[M]. Washington:American Geological Institute,1957:99-102.
- [7] JARVIE D. Finding bypassed or overlooked pay zones using geochemistry techniques[R]. IPTC 12918,2008.
- [8] WANG F P,REED R M. Pore networks and fluid flow in gas shales[R]. SPE 124253,2009.
- [9] RICKMAN R,MULLEN M J,PETRE J E,et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett Shale[R]. SPE 115258,2008.
- [10] 蒋廷学,卞晓冰,王海涛,等.页岩气水平井分段压裂排采规律研究[J].石油钻探技术,2013,41(5):21-25.
JIANG Tingxue,BIAN Xiaobing,WANG Haitao,et al. Flow back mechanism study of multi-stage fracturing of shale gas horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques,2013,41(5):21-25.
- [11] 杨建,付永强,陈鸿飞,等.页岩储层的岩石力学特征[J].天然气工业,2012,32(7):12-14.
YANG Jian,FU Yongqiang,CHEN Hongfei,et al. Rock mechanical characteristics of shale reservoirs[J]. Natural Gas Industry,2012,32(7):12-14.
- [12] 李庆辉,陈勉,金衍,等.页岩气储层岩石力学特性及脆性评价[J].石油钻探技术,2012,40(4):17-22.
LI Qinghui,CHEN Mian,JIN Yan,et al. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale gas reservoir [J]. Petroleum Drilling Techniques,2012,40(4):17-22.
- [13] 李庆辉,陈勉,金衍,等.页岩脆性的室内评价方法及改进[J].岩石力学与工程学报,2012,31(8):1680-1685.
LI Qinghui,CHEN Mian,JIN Yan,et al. Indoor evaluation method for shale brittleness and improvement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(8):1680-1685.
- [14] 蒋廷学,卞晓冰,袁凯,等.页岩气水平井分段压裂优化设计新方法[J].石油钻探技术,2014,42(2):1-6.
JIANG Tingxue,BIAN Xiaobing,YUAN Kai,et al. A new method in staged fracturing design optimization for shale gas horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques,2014,42(2):1-6.
- [15] 卞晓冰,蒋廷学,贾长贵,等.基于施工曲线的页岩气井压后评估新方法[J].天然气工业,2016,36(2):60-65.
BIAN Xiaobing,JIANG Tingxue,JIA Changgui,et al. A new post-fracturing evaluation method for shale gas wells based on fracturing curves[J]. Natural Gas Industry,2016,36(2):60-65.

[编辑 陈会年]