

引用格式:徐波,王振华,宋婷,等.致密砂岩储层可压裂性测井评价方法[J].油气地质与采收率,2024,31(6):57-64.
XU Bo, WANG Zhenhua, SONG Ting, et al. Logging evaluation method of fracturability of tight sandstone reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(6): 57-64.

致密砂岩储层可压裂性测井评价方法

徐波¹,王振华²,宋婷³,张淑侠²,彭娇¹

(1.西安石油大学石油工程学院,陕西西安710065; 2.延长石油(集团)有限责任公司研究院,陕西西安710065;
3.中国石油长庆油田分公司第十一采油厂,甘肃庆阳745000)

摘要:储层的可压裂性是射孔选段和预测水力压裂效果的重要因素,但目前致密砂岩储层的可压裂性评价缺乏统一的方法和标准。以鄂尔多斯盆地东南部某油田长6油层组致密砂岩储层为例,基于常规测井资料优选岩石力学参数的表征模型,通过分析储层岩石脆性、断裂韧性和地应力差异系数与日产液量的关系,建立了致密砂岩储层的可压裂性评价模型及评价标准,获得了与测井曲线对应的压裂品质因子曲线,形成了一种精度较高的致密砂岩储层可压裂性测井评价方法。研究表明:①脆性指数与可压裂性呈正相关,断裂韧性和地应力差异系数与可压裂性呈负相关。②当压裂品质因子 ≥ 25 时,为I类储层,可压裂性最好,压裂时容易形成复杂的裂缝网络,属于优质的致密砂岩储层;当 $14 \leq$ 压裂品质因子 < 25 时,为II类储层,可压裂性中等,压裂时需要采用黏度较小的压裂液或控制较高的缝内净压力,才能形成较好的裂缝网络;当压裂品质因子 < 14 时,为III类储层,可压裂性差,压裂时通常不会形成理想的裂缝网络,且压裂后裂缝容易闭合。③致密砂岩储层的压裂品质因子越高,其压裂后的人工裂缝展布形态特征越好,压后产能越高,新建模型的评价结果与微地震裂缝监测结果及试油成果的符合率在80%以上。

关键词:致密砂岩;可压裂性;脆性指数;断裂韧性;地应力差异系数;鄂尔多斯盆地

文章编号:1009-9603(2024)06-0057-08

DOI:10.13673/j.pgre.202404005

中图分类号:TE319

文献标识码:A

Logging evaluation method of fracturability of tight sandstone reservoirs

XU Bo¹, WANG Zhenhua², SONG Ting³, ZHANG Shuxia², PENG Jiao¹

(1. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an City, Shaanxi Province, 710065, China;
2. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an City, Shaanxi Province, 710065, China;
3. No.11 Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Qingyang City, Gansu Province, 745000, China)

Abstract: The fracturability of reservoirs is an essential parameter for selecting perforation stages and predicting hydraulic fracturing effects, but fracturability evaluation for tight sandstone reservoirs lacks unified methods and standards. This paper studies Chang 6 tight sandstone reservoir in an oilfield in the southeastern part of Ordos Basin and optimizes the characterization model of rock mechanics parameters based on the conventional logging data. The paper analyzes the relationships among reservoir rock brittleness, fracture toughness, in-situ stress difference coefficient, and daily fluid production, establishes the fracturability evaluation model and evaluation standard for tight sandstone reservoirs, and obtains fracture quality factor curves corresponding to logging curves. As a result, a high-precision logging evaluation method for the fracturability of tight sandstone reservoirs was developed. The results indicate as follows: ① The brittleness index is positively correlated with the fracturability, and the fracture toughness and in-situ stress difference coefficient are negatively correlated with the fracturability. ② The fracturing quality factor is greater than 25 for

收稿日期:2024-04-02。

作者简介:徐波(1968—),男,陕西北宁人,教授,博士,从事油气田地质与开发方面的教学与科研工作。E-mail:xsyuxb@126.com。

通信作者:王振华(1971—),男,陕西宝鸡人,正高级工程师。E-mail:13571843652@163.com。

Class I reservoirs, indicating the best fracturability; it is easy to form a complex fracture network during fracturing and belongs to high-quality tight sandstone reservoirs. The fracturing quality factor ranges from 14 to 25 for Class II reservoirs, indicating medium fracturability; it is necessary to use fracturing fluid with low viscosity or keep high net pressure in fractures to form a better fracture network. The fracturing quality factor is less than 14 for class III reservoirs, indicating poor fracturability; an ideal fracture network is usually not formed during fracturing, and fractures are easy to close after fracturing. ③ Higher fracturing quality factors of tight sandstone reservoirs indicate better characteristics of artificial fracture morphologies and higher production capacity after fracturing. The evaluation results by the established model are more than 80% consistent with the microseismic fracture monitoring results and production testing results.

Key words: tight sandstone; fracturability; brittleness index; fracture toughness; in-situ stress difference coefficient; Ordos Basin

致密砂岩储层一般具有物性差、非均质性强、岩性特征复杂、地层压力变化异常等特点,直接投产自然产能低或没有产能,必须经过水力压裂等改造,才能获得工业油流。而致密砂岩储层可压裂性测井评价对射孔选段、水力压裂设计和施工非常关键^[1-3]。目前,针对储层的可压裂性评价没有统一的方法和标准。早期研究储层可压裂性大多以脆性指数来表征,但脆性指数的概念混杂,目前评价方法有20多种^[4-5],大多停留在半定量估算的水平;脆性指数反映岩石本身的破裂性质,但不能反映储层裂缝网络分布情况,其适用性及准确度均存在较大的局限。为了克服利用脆性指数评价可压裂性的片面性,中外部分研究人员对储层的可压裂性开展了系统研究^[5-10]。袁俊亮等将杨氏模量、泊松比、单轴抗拉强度3项岩石力学参数作为可压裂性的影响因素,建立了可压裂性评价模型^[7];曾治平等将岩石储层脆性、断裂韧性、地应力环境和天然裂缝作为评价参数,利用层次分析法建立了致密砂岩储层可压裂性评价方法^[8];袁青松等考虑脆性矿物、岩石力学、天然裂缝和地应力差对可压裂性的影响,利用经验赋值、层次分析等方法,建立了页岩综合可压裂性定量评价模型^[9];肖剑锋等将矿物组分、抗压抗拉强度比和地应力差异系数作为影响因素,采用权重赋值建立可压裂性评价模型^[10]。但这些模型一方面使用不同参数建立了不同的评价方法,对致密砂岩储层可压裂性的评价结果不同,且存在较大差异,对工程人员的水力压裂设计、施工带来很大困扰^[11];另一方面,这些模型具有一个共同的特征,未考虑影响因素与可压裂性的正负相关性,使得所建模型的计算结果精度不够。为简便、准确地评价致密砂岩储层的可压裂性,笔者以鄂尔多斯盆地东南部某油田长6油层组致密砂岩储层为例,该油层组广泛发育水下分流河道、水下天然堤、河口坝沉积,属于低-特低孔、特低渗透-致密储层,含油性较好,可进一步分为长6₁-长6₂共4个油层亚组。依托常

规测井资料,综合考虑岩石的脆性指数、断裂韧性和水平应力差异系数与水力压裂效果的相关性对致密砂岩储层的可压裂性进行了研究,以满足致密砂岩油藏水力压裂设计和施工需求。

1 岩石力学参数求取

1.1 岩石脆性

岩石脆性是反映岩石在受到应力作用下发生破裂的一种重要的力学变形属性,是岩石物理性质的重要表现^[12]。脆性是岩石在很小的塑性变形下就发生破坏的性质,一般用脆性指数来表征,脆性指数越大,脆性越高,岩石就越容易破裂。针对岩石脆性的定义中外学者尚未达成一致的标准^[12-13]。作为评价岩石可压裂性的一项重要指标,用测井法确定岩石脆性指数,主要有岩石矿物计算法和常规测井法2种。

1.1.1 岩石矿物计算法

在实验室采用X-射线衍射测定岩石矿物含量,也可以用常规测井结合元素俘获能谱测井ESC确定^[14-15]。岩石矿物分为脆性矿物和延性矿物,致密砂岩储层中的脆性矿物包含硅酸盐脆性矿物(石英、长石、脆性云母等)和碳酸盐脆性矿物(方解石等);延性矿物主要是黏土矿物,属于塑性矿物,其含量越高,压裂时的能量损耗越大,不利于压裂^[15]。脆性指数可以利用脆性矿物在总矿物中的占比来表征:

$$BI = \frac{W_{QFM} + W_{CAR}}{W_{TOT}} \quad (1)$$

式中:BI为岩石脆性指数; W_{QFM} 为硅酸盐脆性矿物含量,%; W_{CAR} 为碳酸盐脆性矿物含量,%; W_{TOT} 为矿物总含量,%。

1.1.2 常规测井法

常规测井法是利用测量的横波时差和纵波时差,结合密度曲线,计算岩石的杨氏弹性模量和泊

松比。常规测井法解释脆性指数一般用Rickman公式^[16-17]。Rickman公式利用归一化的杨氏弹性模量和泊松比加权计算脆性指数,杨氏弹性模量主要反映岩石破裂后保持裂缝的能力,泊松比则反映岩石受力后自身抵抗破裂的能力;杨氏弹性模量与泊松比呈负相关,杨氏弹性模量越大,泊松比越小,反映岩石的脆性越强。常规测井法计算脆性指数的计算式为:

$$BI = \frac{\Delta E + \Delta\mu}{2} \quad (2)$$

$$\Delta E = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (3)$$

$$\Delta\mu = \frac{\mu - \mu_{\max}}{\mu_{\min} - \mu_{\max}} \quad (4)$$

式中: ΔE 为归一化的杨氏弹性模量; $\Delta\mu$ 为归一化的泊松比; E 为计算的杨氏弹性模量,GPa; μ 为计算的泊松比。

不同地区具有不同的 E_{\min} 、 E_{\max} 、 μ_{\max} 、 μ_{\min} 值,一般是通过建立杨氏弹性模量和泊松比的交会图,选取区域的韧度值和刚度值后得到这4个数值。韧度值表征塑性,即高泊松比和低杨氏弹性模量;刚度值表征脆性,即高杨氏弹性模量和低泊松比。

岩石动态杨氏弹性模量利用测井曲线的横波速度、纵波速度及密度计算^[18]:

$$E_d = \rho \times \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{(V_p/V_s)^2 - 1} \quad (5)$$

式中: E_d 为动态杨氏弹性模量,GPa; ρ 为密度,g/cm³; V_p 为岩石的纵波速度,m/ μ s; V_s 为岩石的横波速度,m/ μ s。

动态泊松比可以利用纵横波速度比值,根据岩石弹性波动理论得出^[19]:

$$\mu_d = \frac{0.5 \times (V_p/V_s)^2 - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1} \quad (6)$$

式中: μ_d 为动态泊松比。

基于测井曲线计算的杨氏弹性模量和泊松比是动态值,而实验室测定的是静态值,二者之间存在差异,主要是因为动态力学参数是指岩石在各种动载荷或周期变化载荷作用下所表现出的力学性质参数,而静态力学参数是在静载荷作用下岩石表现出的力学参数。一般情况下,岩石力学的动态值和静态值并不相等,岩石的静态杨氏弹性模量小于动态杨氏弹性模量,而动、静态泊松比的关系却不确定。本次研究的所有工程参数都是由测井资料计算所得,为了使用方便和结果的对比性,这里不做二者的动、静态转换,直接使用岩石的动态杨

氏弹性模量和动态泊松比值。

1.2 断裂韧性

断裂韧性是裂纹失稳扩展的临界状态所对应的应力强度因子,是在压裂过程中判断裂缝是否进入失稳状态的指标。韧性材料具有较大的断裂伸长值、较强的断裂韧性,而脆性材料一般断裂韧性较小。因此在压裂工程中,与储层脆性相反,断裂韧性是储层塑性的反映,影响着裂缝的起裂和延伸,可以作为水力压裂造缝能力的参量,对压裂施工的难易程度和压裂效果起指示作用。断裂韧性与围压呈线性关系,随着围压的增加断裂韧性快速增大^[20],在压裂过程中,过高的应力环境会增加水力裂缝的扩展难度^[21]。

通过对前人关于断裂韧性研究成果的对比分析,考虑使用的便捷性和评价结果的准确性,最终根据实验室分析数据确定的经验公式来计算砂岩和泥岩的断裂韧性^[18]:

$$K_{IC}^{\text{砂}} = 21.5 \times 10^{-6} E_d + 0.2468 \quad (7)$$

$$K_{IC}^{\text{泥}} = 3.672 \times 10^{-6} E_d + 0.45034 \quad (8)$$

式中: $K_{IC}^{\text{砂}}$ 为砂岩断裂韧性,GPa·m^{1/2}; $K_{IC}^{\text{泥}}$ 为泥岩断裂韧性,GPa·m^{1/2}。

由于上述断裂韧性模型的建立采用的是纯砂岩和泥岩,而在真实地层中纯砂岩较少,大多为泥质砂岩,因此对式(7)必须进行泥质校正,以准确表征地层的断裂韧性。

1.3 地应力差异系数

地应力是地层中没有受到外界环境作用下的天然应力,岩石形变破坏主要受到地应力作用,是评价储层可压裂性的关键参数。地应力的大小影响着水力压裂裂缝的主要形态,地应力差异系数可以表征裂缝网络的复杂程度,即地应力差异系数越大,形成的裂缝网络越简单,地应力差异系数越小,裂缝网络越复杂。通常认为地层中存在着3个方向的地应力:垂向地应力、最大水平主地应力和最小水平主地应力。

地应力差异系数的计算公式为:

$$K_h = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_h} \quad (9)$$

式中: K_h 为地应力差异系数; σ_H 为最大水平主地应力,MPa; σ_h 为最小水平主地应力,MPa。

垂向地应力的确定可以根据密度测井曲线,利用上覆岩层压力公式计算:

$$\sigma_v = 10^{-3} \int_0^H \rho(h) g dh \quad (10)$$

式中: σ_v 为垂向地应力,MPa; H 为目的层的深度,

m ; $\rho(h)$ 为上覆岩层的密度, g/cm^3 ; h 为目的层之上不同深度处的上覆岩层厚度, m ; g 为重力加速度, m/s^2 , 取值为9.81。

针对最大水平主地应力和最小水平主地应力, 中外已经形成了多种测量和计算方法。本次考虑测井解释的准确性和便利性, 优选黄荣樽模型^[22-23]进行计算, 该模型中的最大水平主地应力和最小水平主地应力方向的构造应力系数与具体区块有关, 但在同一区块内与深度和位置的变化几乎无关, 可以认为在同一区块内为定值, 利用压裂数据反算确定。

在鄂尔多斯盆地东南部某油田长6油层组, 根据多口井的压裂施工实测数据, 确定了研究区的最大和最小构造应力系数, 最终得到研究区基于黄荣樽模型的最大水平主地应力和最小水平主地应力计算公式分别为:

$$\sigma_H = \left(\frac{\mu_d}{1 - \mu_d} + 0.283 \right) (\sigma_v - \alpha p_p) + \alpha p_p \quad (11)$$

$$\sigma_h = \left(\frac{\mu_d}{1 - \mu_d} + 0.0438 \right) (\sigma_v - \alpha p_p) + \alpha p_p \quad (12)$$

式中: α 为有效应力系数(Boit系数); p_p 为地层孔隙压力, MPa。

Boit系数的计算公式为:

$$\alpha = 1 - \frac{\rho(3V_p^2 - 4V_s^2)}{\rho_{ma}(3V_{mp}^2 - 4V_{ms}^2)} \quad (13)$$

式中: ρ_{ma} 为岩石骨架密度, g/cm^3 ; V_{mp} 为岩石骨架纵波速度, m/s ; V_{ms} 为岩石骨架横波速度, m/s 。

2 可压裂性评价模型建立

储层可压裂性表征地层能被有效压裂的难易程度和产生网络状裂缝的能力, 为压裂效果预测的主要指标。可压裂性好, 表明储层易于压裂, 经水力压裂改造后, 地层中更容易形成复杂裂缝网络, 提高储层与导流通道的接触面积, 达到有效改造储层、提高产能的目的。可压裂性差, 表明储层的破裂压力高, 形成的裂缝形态单一, 仅有少数的主裂缝, 没有形成有效的裂缝网络, 储层增产效果差。

可压裂性是储层本身的一种特性, 受储层脆性、断裂韧性和地应力差异系数这些地层固有属性的综合影响, 为了精确评价储层的可压裂性, 考虑与之相关的影响因素, 建立可压裂性评价模型。由于研究区缺少微地震裂缝检测测井资料, 这里将地层压裂后的日产液量作为可压裂性的评价指标。

2.1 岩石力学参数与可压裂性相关性分析

2.1.1 脆性指数与日产液量的关系

利用式(2)一式(6)计算研究区82口井长6₁油层亚组储层的脆性指数, 长6₁油层亚组储层由于孔隙度小、渗透率低, 射孔后没有自然产能, 均需水力压裂改造。统计研究区长6₁油层亚组储层压裂改造后的试油试采数据, 分析脆性指数与日产液量的关系(图1), 可以看出数据点比较分散, 脆性指数与日产液量之间的相关性较差, 表明储层的可压裂性不仅与岩石脆性有关, 还有其他的影响因素, 不能仅利用脆性指数直接表征储层的可压裂性。脆性指数与日产液量的关系显示出二者之间的变化趋势, 随着脆性指数的增大, 储层压裂改造后的日产液量增加, 说明储层脆性指数越高, 储层的可压裂性越好。因此, 岩石的脆性指数与储层的可压裂性呈正相关。

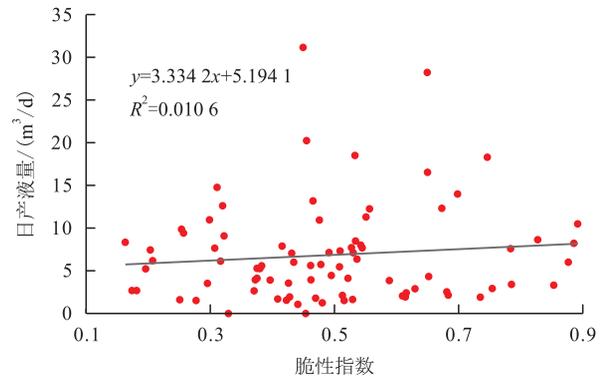


图1 脆性指数与日产液量的关系

Fig.1 Relationship between brittleness index and daily fluid production

2.1.2 断裂韧性与日产液量的关系

将式(5)与式(7)结合, 计算研究区79口井长6₁油层亚组储层的断裂韧性, 统计这些井的试油试采资料, 日产液量为压裂改造后的试油试采数据, 分析断裂韧性与压裂改造后日产液量之间的关系。结果(图2)表明, 断裂韧性与日产液量的相关性较差, 但拟合趋势线显示储层压裂后的日产液量随断裂韧性的增加而减小, 这主要是因为随着断裂韧性的增加, 裂缝宽度和高度增加, 裂缝长度减小^[24], 地层中主要形成主裂缝, 而次生裂缝较少, 裂缝网络简单, 不能成为最大可能地沟通裂缝与孔隙内流体的通道。断裂韧性与日产液量的关系表明, 断裂韧性与储层的可压裂性呈负相关, 断裂韧性越大, 储层的可压裂性越差。

2.1.3 地应力差异系数与日产液量的关系

利用式(5)、式(6)、式(9)一式(13), 计算研究区73口井长6₁油层亚组储层的地应力差异系数, 并

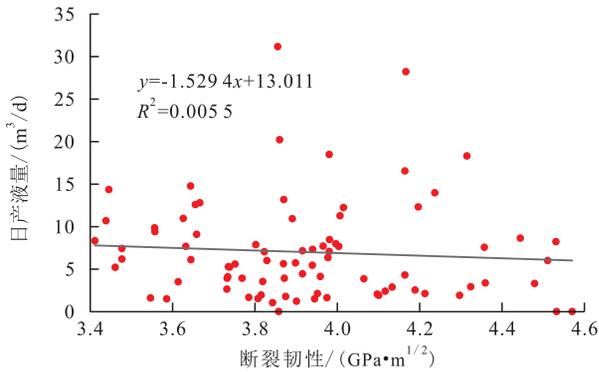


图2 断裂韧性与日产液量的关系

Fig.2 Relationship between fracture toughness and daily fluid production

与其压裂改造后的日产液量数据结合,分析地应力差异系数与日产液量之间的关系。结果(图3)表明,随着地应力差异系数的增大,压裂后的日产液量减小,说明压裂效果变差。地应力差异系数指示压裂后地层形成裂缝网络的难易程度,地应力差异系数越大,地应力对压裂裂缝的控制作用越大,压裂裂缝主要沿最大水平主地应力方向扩展,裂缝形态单一;当地应力差异系数减小,压裂裂缝易沿多个方向延伸,有利于形成复杂的裂缝网络。因此,根据地应力差异系数与日产液量的关系可以得出,地应力差异系数与储层的可压裂性呈负相关。

从图1—图3的脆性指数、断裂韧性和地应力差异系数与日产液量的关系可知,致密砂岩储层的可压裂性与脆性指数、断裂韧性和地应力差异系数的单相相关性较差,为这3种岩石特性的综合表现。砂岩储层的脆性指数与储层可压裂性呈正相关,断裂韧性和地应力差异系数与储层的可压裂性呈负相关。

2.2 模型建立

储层可压裂性好,须具有高的脆性指数、低的断裂韧性和地应力差异系数^[25-26]。由于目前对储层的可压裂性评价没有统一的方法和标准,本次根据

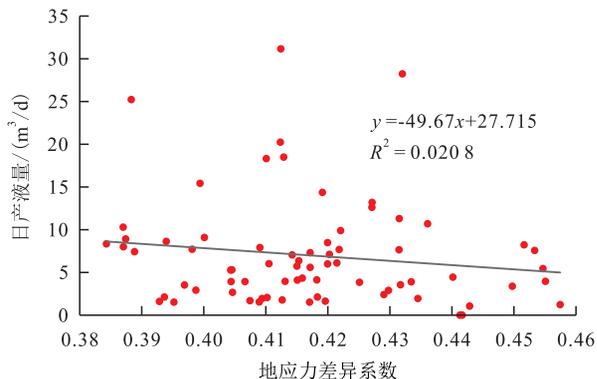


图3 地应力差异系数与日产液量的关系

Fig.3 Relationship between in-situ difference coefficient and daily fluid production

可压裂性与脆性指数、断裂韧性和地应力差异系数的相关性,建立致密砂岩储层压裂品质因子模型:

$$FI = \frac{BI}{K_{IC}K_h} \quad (14)$$

式中:FI为压裂品质因子,1/(GPa·m^{1/2});K_{IC}为岩石断裂韧性,GPa·m^{1/2}。

本次建立的模型,充分考虑了可压裂性评价中各参数的影响,减弱负向参数的影响,增大正向参数的贡献,克服了原来评价储层可压裂性时采用单一的脆性指数评价的片面性,或者虽然考虑了其他影响因素,但仅给各参数赋予权重,而未考虑各因素对评价结果的正负向影响所造成的误差增大问题。

2.3 分类标准

为了准确评价致密砂岩储层的可压裂性,利用压裂品质因子模型计算出研究区83口井的压裂品质因子,以日产液量为判别标准,结合开采产出的含水率及合理的经济评价要求,将可压裂性分为3个级别。当压裂品质因子≥25时,为I类储层,可压裂性好,在压裂时容易形成复杂的裂缝网络,属于优质的致密砂岩储层;当14≤压裂品质因子<25时,为II类储层,可压裂性中等,压裂时需要采用黏度较小的压裂液或控制较高的缝内净压力,才能形成较好的裂缝网络;当压裂品质因子<14时,为III类储层,可压裂性差,压裂时通常不会形成理想的裂缝网络,且压裂后裂缝容易闭合。

统计研究区256口井的评价结果发现,建立的可压裂性评价模型和分类标准的符合率超过80%,可以满足油田开发中对工程参数的精度要求。

3 应用评价

以鄂尔多斯盆地东南部某油田D井长6油层组储层为例,对建立的可压裂性评价模型进行应用评价。由目的层段常规测井资料计算得到岩石力学参数如杨氏弹性模量、泊松比、脆性指数、断裂韧性和地应力差异系数,再利用新建立的可压裂性评价模型,按测井曲线标识的深度逐点计算压裂品质因子,最后将岩石力学参数及压裂品质因子与常规测井资料绘制在同一幅曲线图中,构成D井目的层段的可压裂性评价解释成果(图4)。研究结果克服了实验室评价储层可压裂性时数据不连续、以点带面的缺陷,可以为致密砂岩储层压裂前评价以及增产改造效果预测等提供直接依据。

D井射孔油层为第15号层,射孔深度为495.0~496.5 m,射孔长度为1.5 m,射孔段补偿声波平均值

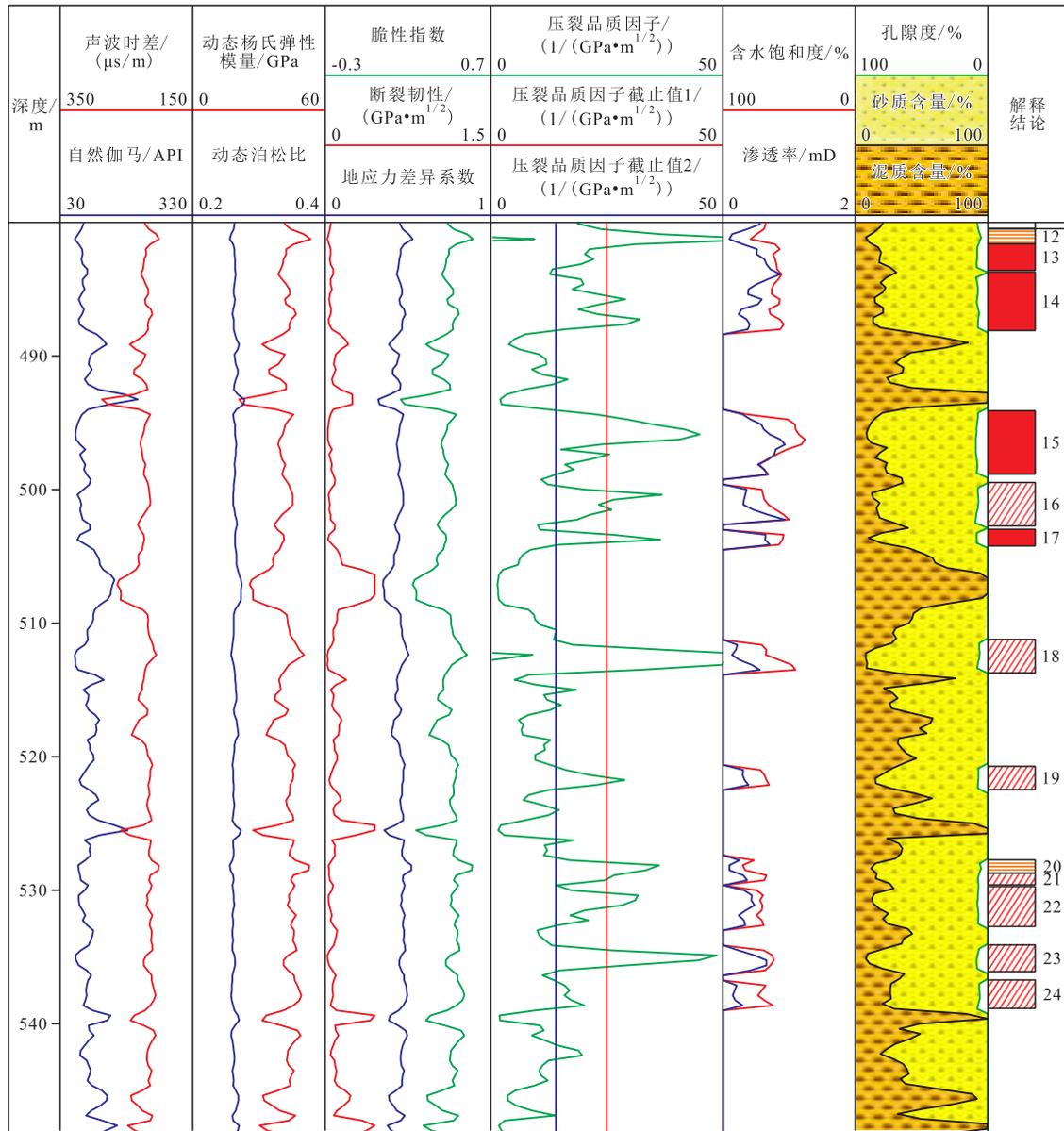


图4 鄂尔多斯盆地东南部某油田D井可压裂性评价解释成果

Fig.4 Results of fracturability evaluation and interpretation of D Well in an oilfield in southeastern part of Ordos Basin

为224.9 $\mu\text{s}/\text{m}$,孔隙度平均值为8.6%,渗透率平均值为0.711 mD,含油饱和度平均值为46.11%,属于致密砂岩储层,但为该井物性和含油性最好的储层。利用式(5)、式(6)、式(2)、式(7)计算的动态杨氏弹性模量、动态泊松比、脆性指数、断裂韧性的平均值分别为41.16 GPa、0.26、0.43、0.038 $\text{GPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。利用式(5)、式(6)和式(9)一式(13)确定地应力差异系数为0.453,利用式(14)计算的压裂品质因子平均值为27.7 ($\text{GPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)⁻¹,说明该射孔段从工程方面评价属于I类储层,可压裂性好。对D井压裂过程进行了微地震裂缝实时监测,结果(图5)表明,左翼裂缝长度为53.82 m,右翼裂缝长度为64.59 m,总裂缝长度为118.41 m,裂缝高度为20.95 m,裂缝方位为NW方向47.5°,为水平裂缝。压裂后试油,最高日

产液量为20.30 m^3/d ,日产油量为4.3 m^3/d ,含水率为78.71%,表明人工压裂缝很好地沟通了油藏中的基质孔隙与天然微裂缝,大大改善油藏流体的渗流能力并提高油井的产量,使得致密砂岩油藏得到有效开发。微地震裂缝实时监测结果和试油成果与本文可压裂性评价新方法的评价结论完全吻合,验证了新建模型的可靠性。

4 结论

(1)致密砂岩储层的可压裂性与3种岩石力学参数密切相关,脆性指数与可压裂性呈正相关、断裂韧性和地应力差异系数与可压裂性呈负相关,形成了耦合3种岩石力学参数的致密砂岩储层可压裂

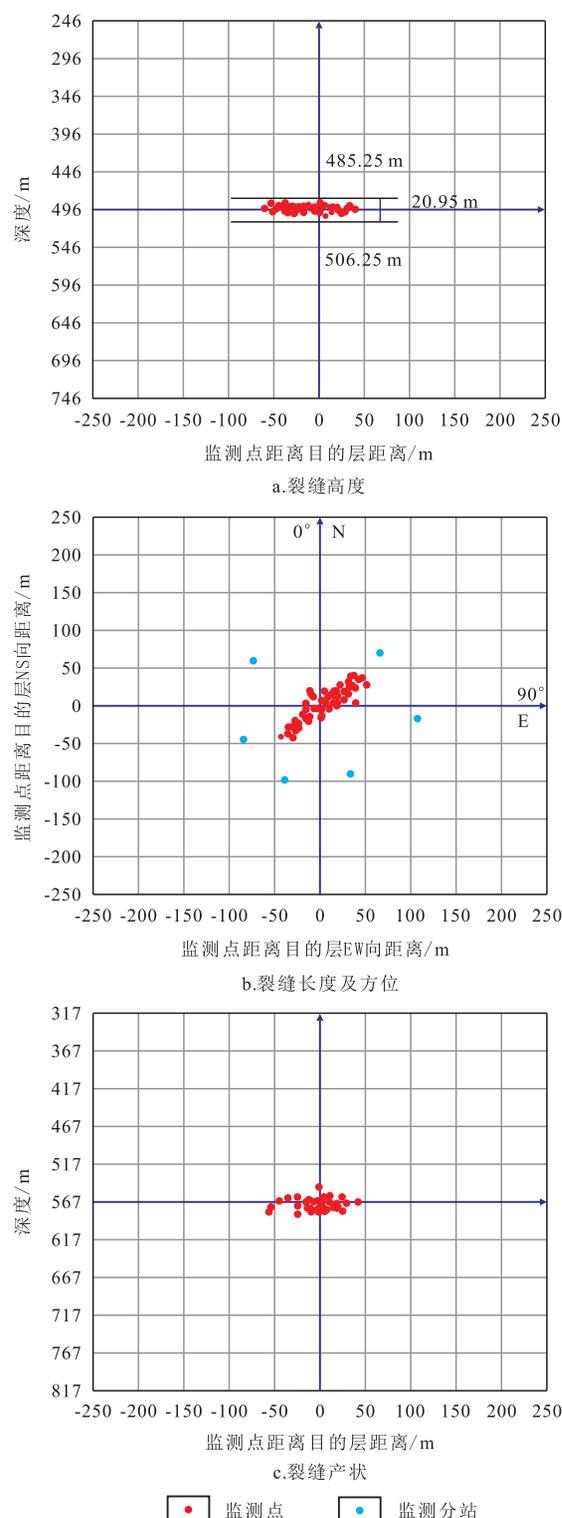


图5 鄂尔多斯盆地东南部某油田D井微地震裂缝实时监测结果

Fig.5 Microseismic real-time fracture monitoring results of D Well in an oilfield in southeastern part of Ordos Basin

性评价模型和定量评价方法。

(2)基于鄂尔多斯盆地东南部某油田长6油层组常规测井资料,按测井曲线标识的深度逐点计算压裂品质因子,获得与测井曲线对应的压裂品质因子曲线,能够统一和便捷地评价致密砂岩储层的可

压裂性,克服了实验室评价储层可压裂性时数据不连续、以点带面的潜在缺陷。

(3)建立了储层可压裂性分类标准,根据压裂品质因子将储层的可压裂性分为3个级别。当压裂品质因子 ≥ 25 时,为I类储层,可压裂性最好;当 $14 \leq$ 压裂品质因子 < 25 时,为II类储层,可压裂性中等;当压裂品质因子 < 14 时,为III类储层,可压裂性差。新方法对致密砂岩储层可压裂性评价的符合率在80%以上,完全满足对水力压裂工程设计参数的精度要求。

参考文献

[1] 孙建孟,韩志磊,秦瑞宝,等.致密气储层可压裂性测井评价方法[J].石油学报,2015,36(1):74-80.
SUN Jianmeng, HAN Zhilei, QIN Ruibao, et al. Log evaluation method of fracturing performance in tight gas reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1): 74-80.

[2] 杜书恒,关平,师永民,等.低渗透砂岩储层可压裂性新判据[J].地质前缘,2017,24(2):257-264.
DU Shuheng, GUAN Ping, SHI Yongmin, et al. New fracturing criteria on low permeability sandstone reservoirs [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(2): 257-264.

[3] 侯静.致密油水平井多簇裂缝扩展数值模拟研究[J].油气地质与采收率,2024,31(3):137-146.
HOU Jing. Numerical simulation studies on multi-cluster fracture propagation in tight-oil horizontal wells [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(3): 137-146.

[4] 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):1 680-1 685.
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): 1 680-1 685.

[5] 窦亮彬,杨浩杰,XIAO Yingjian,等.页岩储层脆性评价分析及可压裂性定量评价新方法研究[J].地球物理学进展,2021,36(2):576-584.
DOU Liangbin, YANG Haojie, XIAO Yingjian, et al. Probability study of formation brittleness and new quantitative evaluation of fracability for shale reservoirs [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(2): 576-584.

[6] 杨宏伟,李军,柳共慧,等.基于测井数据的页岩可压性定量评价[J].断块油气田,2017,24(3):382-386.
YANG Hongwei, LI Jun, LIU Gonghui, et al. Quantitative evaluation of shale fracability based on logging data [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(3): 382-386.

[7] 袁俊亮,邓金根,张定宇,等.页岩气储层可压裂性评价技术[J].石油学报,2013,34(3):523-527.
YUAN Junliang, DENG Jingen, ZHANG Dingyu, et al. Fracability evaluation technology of shale-gas reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 523-527.

[8] 曾治平,刘震,马骥,等.深层致密砂岩储层可压裂性评价新方法[J].地质力学学报,2019,25(2):223-232.

- ZENG Zhiping, LIU Zhen, MA Ji, et al. A new method for fractuability evaluation in deep and tight sandstone reservoirs [J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(2): 223-232.
- [9] 袁青松,朱德胜,汪超,等.南华北盆地海陆过渡相煤系页岩地质特征及可压性分析——以中牟区块太原组为例[J].*河南理工大学学报:自然科学版*,2023,42(1):62-70.
- YUAN Qingsong, ZHU Desheng, WANG Chao, et al. Geological characteristics and fracability analysis of marine-continental transitional facies coal measures shale in Southern North China Basin: a case of Taiyuan Formation, Zhongmu Block [J]. *Journal of Henan Polytechnic University :Natural Science*, 2023, 42(1): 62-70.
- [10] 肖剑锋,胡鹏杰,韩烈祥,等.川南威远地区筇竹寺组页岩力学性质及可压性评价[J].*钻采工艺*,2022,45(2):61-66.
- XIAO Jianfeng, HU Pengjie, HAN Liexiang, et al. Mechanical properties and compressibility evaluation of Qiongzhusi Shale in Weiyuan Area in Southern Sichuan [J]. *Drilling & Production Technology*, 2022, 45(2): 61-66.
- [11] JIN Xiaochun, SHAH S N, ROEGIERS J C, et al. Fracability evaluation in shale reservoirs: an integrated petrophysics and geomechanics approach [R]. SPE 168589, 2014.
- [12] 丁然,张峰,王勇,等.准中深层砂岩脆性及其对岩石破裂模式的影响规律[J].*油气地质与采收率*,2024,31(3):54-62.
- DING Ran, ZHANG Feng, WANG Yong, et al. Brittleness of deep sandstone in central Junggar Basin and its influence on fracture modes of rocks [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2024, 31(3): 54-62.
- [13] 隋丽丽,杨永明,杨文光,等.胜利油田东营凹陷区页岩可压裂性评价[J].*煤炭学报*,2015,40(7):1 588-1 594.
- SUI Lili, YANG Yongming, YANG Wenguang, et al. Comprehensive evaluation of shale fracability in Dongying subsidence zone of Shengli oilfield [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(7): 1 588-1 594.
- [14] 王松,杨洪志,赵金洲,等.页岩气井可压裂性综合评价方法研究及应用[J].*油气地质与采收率*,2016,23(2):121-126.
- WANG Song, YANG Hongzhi, ZHAO Jinzhou, et al. Research and application of comprehensive evaluation on fracability of shale gas wells [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(2): 121-126.
- [15] 翟文宝,李军,周英操,等.基于测井资料的页岩储层可压裂性评价新方法[J].*岩性油气藏*,2018,30(3):112-123.
- ZHAI Wenbao, LI Jun, ZHOU Yingcao, et al. New evaluation method of shale reservoir fracability based on logging data [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(3): 112-123.
- [16] 朱颜,韩向义,岳欣欣,等.致密砂岩储层脆性测井评价方法研究及应用——以鄂尔多斯盆地渭北油田为例[J].*物探与化探*,2021,45(5):1 239-1 247.
- ZHU Yan, HAN Xiangyi, YUE Xinxin, et al. Research and application of brittleness logging evaluation method to tight sandstone reservoirs: exemplified by Weibei oilfield in Ordos Basin. [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(5): 1 239-1 247.
- [17] 张矿生,刘顺,蒋建方,等.长7致密油藏脆性指数计算方法及现场应用[J].*油气井测试*,2014,23(5):29-32.
- ZHANG Kuangsheng, LIU Shun, JIANG Jianfang, et al. Calculation method about brittleness index in Chang 7 dense reservoir and its field application [J]. *Well Testing*, 2014, 23(5): 29-32.
- [18] 陈治喜,陈勉,金衍.岩石断裂韧性与声波速度相关性的试验研究[J].*石油钻采工艺*,1997,19(5):56-60, 75.
- CHEN Zhixi, CHEN Mian, JIN Yan. Experimental study on the correlation between rock fracture toughness and acoustic velocity [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 1997, 19(5): 56-60, 75.
- [19] 汪志浩,陈嗣,李厚霖,等.泥页岩气层脆性特征的地球物理测井方法研究[J].*工程地球物理学报*,2016,13(1):7-13.
- WANG Zhonghao, CHEN Si, LI Houlin, et al. The interpretation methods of geophysical well logging for the brittle characteristics of shale gas reservoirs [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2016, 13(1): 7-13.
- [20] 朱海燕,龚丁,张兵.致密砂岩气储层多尺度“地质-工程”双甜点评价新方法[J].*天然气工业*,2023,43(6):76-86.
- ZHU Haiyan, GONG Ding, ZHANG Bing. A multi-scale geology-engineering sweet spot evaluation method for tight sandstone gas reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(6): 76-86.
- [21] 郭建春,赵志红,路千里,等.深层页岩缝网压裂关键力学理论研究进展[J].*天然气工业*,2021,41(1):102-117.
- GUO Jianchun, ZHAO Zhihong, LU Qianli, et al. Research progress in key mechanical theories of deep shale network fracturing [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(1): 102-117.
- [22] 黄荣樽,庄锦江.一种新的地层破裂压力预测方法[J].*石油钻采工艺*,1986,8(3):9-13.
- HUANG Rongzun, ZHUANG Jinjiang. A new prediction method of formation fracture pressure [J]. *Petroleum Drilling and Production Technology*, 1986, 8(3): 9-13.
- [23] 杨红,许亮,何衡,等.利用测井、压裂资料求取储层地应力的方法[J].*断块油气田*,2014,21(4):509-512.
- YANG Hong, XU Liang, HE Heng, et al. Method for obtaining ground stress of reservoir using logging and fracturing data [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2014, 21(4): 509-512.
- [24] 姚飞.水力裂缝延伸过程中的岩石断裂韧性[J].*岩石力学与工程学报*,2004,23(14):2 346-2 350.
- YAO Fei. Fracture toughness in hydraulic fracture propagation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(14): 2 346-2 350.
- [25] 万有余,王小琼,雷丰宇,等.柴达木盆地英雄岭E₃²页岩油可压性评价及应用[J].*非常规油气*,2024,11(3):120-129.
- WAN Youyu, WANG Xiaoqiong, LEI Fengyu, et al. Compressibility evaluation and application of E₃² shale oil in Yingxiongling Area, Qaidam Basin [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2024, 11(3): 120-129.
- [26] 刘之的,李高仁,张伟杰,等.致密储层可压裂性测井评价方法研究[J].*测井技术*,2017,41(2):205-210.
- LIU Zhidi, LI Gaoren, ZHANG Weijie, et al. On evaluation method of fracturing tight reservoir using log data [J]. *Well Logging Technology*, 2017, 41(2): 205-210.