

基于VTI介质弹性参数的页岩脆性预测方法及其应用

徐天吉^{1,2},程冰洁^{3,4},胡斌^{1,2},江莹莹^{1,2},唐建明²

(1. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院物探三所,四川成都610041; 2. 中国石化多波地震技术重点实验室,四川成都610041; 3. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都610059; 4. 成都信息工程学院气象信息与信号处理四川省高校重点实验室,四川成都610225)

摘要:大量的科学研究表明,页岩的脆性对油气储层的各向异性、储集能力、渗透性和可改造性等具有重要的影响,因此岩石的脆性预测成为了评价页岩气藏的重要内容。实验测试分析也已经证实,页岩的脆性与岩石中的矿物含量和孔隙结构等影响力学性质的因素密切相关。Rickman等(2008)提出了基于弹性参数的脆性系数计算方法,融合了力学参数杨氏模量和泊松比。然而,目前计算杨氏模量和泊松比的方法均以各向同性介质为前提,受此局限,脆性系数计算公式必然不能精确地描述复杂介质中的脆性特征。为此,引入Thomsen(2013)提出的VTI介质弹性参数计算方法,推导出隐含了各向异性参数 ε 、 γ 和 δ 的脆性系数计算公式,从理论上直接把页岩的脆性和各向异性密切地联系了起来,较好地诠释了现实中脆性页岩存在各向异性的岩石物理特性。将该方法应用于四川盆地西部新场-孝泉地区须家河组五段页岩气的开发实践中,结果表明脆性系数高值异常区储层脆性较强,能有利于在优质储层中识别出“脆性甜点”储层。预测结果与现仅有的两口页岩气专层井吻合良好。

关键词:VTI介质;弹性参数;脆性;裂缝;页岩气

中图分类号:P631

文献标识码:A

Shale brittleness prediction based on elastic parameters of VTI media

Xu Tianji^{1,2}, Cheng Bingjie^{3,4}, Hu Bin^{1,2}, Jiang Yingying^{1,2}, Tang Jianming²

(1. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC Southwest Oil & Gas Company, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. SINOPEC Key Laboratory of Multi-Components Seismic Technology, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 4. Sichuan Province Key Laboratory of Meteorological Information and Signal Processing, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China)

Abstract: Numerous studies show that shale brittleness has great influences on the anisotropy, pooling capacity, permeability and fracability of oil and gas reservoirs, thus making the prediction of shale brittleness one of the hot spots in shale gas reservoirs evaluation. Lab analyses also confirmed a close relationship between shale brittleness and several factors like the mineral content and the pore structure that affect mechanical properties of shale rocks. Rickman et al (2008) proposed a method for brittleness coefficient calculation based on elastic parameters. The method combined Young's modulus and the Poisson ratio- two mechanical parameters that can only be calculated with an assumption that the reservoirs in concern are isotropous. Therefore, the method can not accurately describe the brittleness of complex media. To deal with the problem, we introduced the elastic parameter calculation method of VTI media proposed by Thomsen (2013), and developed a brittleness calculation formula comprised of anisotropic parameters ε , γ and δ . Theoretically, the formula links shale brittleness to anisotropy and offered a better way for anisotropic characterization of shale rocks. Application of the method to the study of the 5th member of the Xujiahe Formation in Xinchang-Xiaoquan gas field of Sichuan Basin indicated that shale reservoirs in areas with abnormally high brittleness coefficients have strong brittleness, thus it can be used to better identify "brittle sweet spots" within "geologic sweet spots". The brittleness prediction results coincide well with the drilling results of the only two shale gas wells.

Key words: VTI media, elastic parameter, brittleness, fracture, shale gas

收稿日期:2015-06-25;修订日期:2016-07-12。

第一作者简介:徐天吉(1975—),男,高级工程师,石油与天然气地震勘探方法及应用。E-mail: xu_tianji@126.com。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41574099);国家自然科学基金联合基金项目(U1262206)。

天然气在烃源岩及夹层粉砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩等地层中就近大规模储集,并原地成藏,形成了资源量极大的非常规页岩气藏。据统计^[1],全球页岩气储量约 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$,我国可采资源量约 $26 \times 10^{12} \text{ m}^3$,勘探开发潜力巨大。此外,页岩气具备清洁能源的燃烧特性和经济价值,正在成为 21 世纪日趋重要的接替能源。可见,当前页岩气勘探开发技术成为油气领域研究的热点属于必然趋势。

然而,目前人们对页岩气藏的认识程度尚低,尤其在页岩气富集机理、评价方法和开发技术等方面尚处于探索起步阶段。其中,页岩气藏的有效评价是决定开发成功与否的关键环节。这已经被勘探开发实践所证实,并引起了油气领域专家的普遍重视。常规油气藏的评价内容涵盖了“生、储、盖、运、圈、保”六大成藏要素,而融合了烃源、储层、盖层为一体的非常规页岩气藏,评价的关键环节主要集中在基础地质条件和储层条件两大方面^[1-3]。事实上,作为一类典型的沉积岩储集体,在石英、长石、粘土、有机质等复杂的碎屑成分及物理化学性质、薄页状或薄片层状的节理、孔隙、裂缝、脆性等影响下,不同类型页岩的生烃能力和天然气储集能力等必然差异明显。因此,对页岩地层的有效厚度、有机质丰度、热成熟度、矿物成分、物性和含气量等展开评价,已经成为页岩气储层条件评价的重点内容^[4-8]。储层条件不仅决定了页岩对天然气的储集能力,还涉及到天然气渗流疏导和地层压裂改造潜力等。实践证实,页岩的储集能力、渗透性、可改造性等与页岩的脆性特征密切相关。页岩的脆性越强,在内、外应力的作用下,就越容易产生各向异性并导致结构破碎,增加在页岩地层内部形成天然裂缝和诱导裂缝网络的可能性。这样,不仅有利于扩大天然气的存储空间,还有利于拓展天然气运移的喉道及增加渗流到井中的概率。可见,为了满足页岩气藏勘探开发需求,针对页岩脆性开展预测方法研究,显然十分必要。

当然,受页岩气藏勘探开发兴起时间及研究认识程度等因素的局限,见诸报道的页岩脆性预测方法极少。归纳起来,目前存在的方法主要有两大类^[9-13]。一类是矿物成分法,利用页岩中的脆性矿物(如石英、长石、方解石、菱铁矿等)与塑性矿物(主要指粘土矿物)之间的百分比,建立脆性特征表征参数,达到页岩地层脆性空间描述或预测的目的。这类方法在南襄盆地泌阳凹陷湖相页岩压裂中获得了应用,季泽普(2013)结合页岩类型、岩石结构、矿物组成及其含量、岩石微相特征等,归纳出钙质页岩“脆而不甜”、砂质页岩“既脆又甜”、黑色(粘土质)页岩“甜而不脆”等规律,为压裂选层、选点等提供了重要参考^[14]。另一类是力学参数法,基于应力与应变之间的数学-物理关

系,计算页岩在各类应力作用下产生拉伸、压缩、剪切等形变的概率,利用杨氏模量、体积模量、剪切模量、泊松比等弹性参数预测页岩的脆性特征^[15]。这类方法的应用,目前主要以岩心样品为分析对象,利用力学设备在实验室完成研究,针对储层的空间预测却鲜有报道。

本文所研究的页岩脆性预测方法隶属于力学参数法。在目前弹性参数计算方法以各向同性介质为基础的前提下,作者提出了以各向异性介质(主要研究了横向各向同性介质,Vertical Transverse Isotropic Media,简称 VTI 介质)中的弹性参数预测页岩脆性的新方法,并针对四川盆地新场地区须家河组五段页岩气藏目标地层开展了应用研究,取得了井-震吻合较好的预测效果。

1 理论基础

1.1 基于 VTI 介质弹性参数的岩石脆性系数

在材料科学中,视脆性(brittleness)和塑性(ductility)为固态物质的两种相反属性。对于脆性物质,当遭受外力时,将不会产生明显的形变;并且,即便其具有较高的强(硬)度,也容易在较少的能量下产生破裂。对于塑性物质,具有拉伸韧性或压缩韧性,发生形变或破碎时,则将吸收更多的能量。换言之,在相同应力作用下,脆性物质应变较小,吸收的能量较少,破碎概率更高。

如何表征物质的脆性呢?脆性物质的定义^[8]指出,当物质极限受力时突然破裂并释放全部弹性能量,且在破裂前仅产生很小的应变,此即为脆性物质。可见,物质的脆性与应力、应变、能量密切相关。Rickman 等(2008)采用脆性系数描述 Barnett 页岩的脆性,将脆性系数定义^[16]为

$$B = \left(\frac{E - 1}{14} + \frac{0.4 - \sigma}{0.5} \right) \times 100 \quad (1)$$

式中: B 为脆性系数,%; E 为杨氏模量, 10^4 MPa ; σ 为泊松比,无量纲。

在各向同性介质中,弹性参数 E 和泊松比 σ 的表达式^[17]分别为

$$E = \frac{\mu_0(3M_0 - 4\mu_0)}{M_0 - \mu_0} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{M_0 - 2\mu_0}{2(M_0 - \mu_0)} \quad (3)$$

式中:剪切模量 $\mu_0 = \rho v_{s0}^2$,纵波模量 $M_0 = \rho v_{p0}^2$,拉梅系数 $\lambda_0 = M_0 - 2\mu_0$,体积模量 $K_0 = M_0 - \frac{4}{3}\mu_0$, μ_0 , M_0 , λ_0 和 K_0 的量纲均为 10^4 MPa ; v_{p0} 和 v_{s0} 分别为纵波和横波速

度, m/s ; ρ 为介质密度, kg/m^3 。

在各向同性介质中, 利用杨氏模量表述的柔度矩阵为

$$C^{\text{iso}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\sigma}{E} & -\frac{\sigma}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\sigma}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\sigma}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\sigma}{E} & -\frac{\sigma}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\mu} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\mu} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\mu} \end{pmatrix} \quad (4)$$

在 VTI 介质中(坐标系及字母下标关系详见参考文献[18]), 该矩阵为

$$C^{\text{aniso}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\sigma_{12}}{E_{11}} & -\frac{\sigma_{13}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\sigma_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\sigma_{13}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\sigma_{13}}{E_{33}} & -\frac{\sigma_{13}}{E_{33}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\mu_{13}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\mu_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\mu_{12}} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: E_{11} 和 E_{33} 分别为水平方向和垂直方向的杨氏模量, 10^4 MPa ; μ_{12} , μ_{13} 和 σ_{12} , σ_{13} 分别是具有方向性的剪切模量 (10^4 MPa) 和泊松比。利用杨氏模量与速度、密度之间的数学关系^[18], 可将柔度矩阵(5)转换为刚度矩阵的形式, 即

$$S^{\text{aniso}} = \rho \begin{pmatrix} v_{p90}^2 & \frac{\lambda_{12}}{\rho} & \frac{\lambda_{13}}{\rho} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\lambda_{12}}{\rho} & v_{p90}^2 & \frac{\lambda_{13}}{\rho} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\lambda_{13}}{\rho} & \frac{\lambda_{13}}{\rho} & v_{p0}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_{s0}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & v_{s0}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & v_{s9090}^2 \end{pmatrix} \lambda_{12} \quad (6)$$

$$= \rho v_{p90}^2 - 2\rho v_{s9090}^2$$

式中: v_{p90} , v_{p0} 和 v_{s9090} , v_{s0} 分别为水平方向和垂直方向的纵、横波速度, m/s ; λ_{12} 和 λ_{13} 分别是具有方向性的拉梅系数, 10^4 MPa 。在该 6×6 的对称矩阵中, 33 分量为

纵波模量 M_0 ; 11 和 22 分量控制纵波的水平速度; 44 和 55 分量控制垂向 S 波速度的水平极化; 66 分量控制水平 S 波速度的水平极化。

对比式(5)和(6)可知, 在各向异性介质中, 弹性参数与各向同性介质不同^[17-19]。在式(6)所示的各向异性介质的刚度矩阵中, 有 5 个独立参数, 12 分量、13 分量和 23 分量中, 展示出了 2 个不同的拉梅系数 λ_{12} 和 λ_{13} 。

利用式(7)~(9)所示 Thomsen 各向异性参数与速度的关系^[18]:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{p90}^2}{v_{p0}^2} - 1 \right) \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{s9090}^2}{v_{s0}^2} - 1 \right) \quad (8)$$

$$\delta = \frac{1}{v_{p0}^2} \left(\frac{\lambda_{13}}{\rho} + 2v_{s0}^2 \right) - 1 \quad (9)$$

可以推导出杨氏模量和泊松比的各向异性 (VTI) 表达式 (Thomsen, 2010^[20], 2013^[17]), 即

$$E_{11} = E + 2M_0(1 - \sigma)[\varepsilon(1 - \sigma) - \sigma\delta] + 8\sigma\mu_0\gamma(1 - \sigma) \quad (10)$$

$$E_{33} = E + 4M_0\sigma(2\varepsilon\sigma - \delta) - 8\sigma^2\mu_0\gamma \quad (11)$$

$$\sigma_{12} = \sigma + \frac{2M_0}{E}(1 - \sigma^2)[(1 - \sigma)\varepsilon - \sigma\delta] - 2\frac{1 - \sigma^2 + 2\sigma^3}{1 + \sigma}\gamma \quad (12)$$

$$\sigma_{13} = \sigma - (1 - \sigma)(4\sigma\varepsilon - \delta) + \frac{2\sigma - 6\sigma^2}{1 + \sigma}\gamma \quad (13)$$

由于 σ_{12} 和 σ_{13} 具有方向性, 便于计算, 这里取其平均值, 即

$$\sigma' = \frac{\sigma_{12} + \sigma_{13}}{2} \quad (14)$$

由此, 结合式(1), (10), (11) 和 (14), 可以推导出 VTI 介质中水平方向 (B_{11}) 和垂直方向 (B_{33}) 的岩石脆性系数 (%), 即

$$B_{11} = \left(\frac{E_{11} - 1}{14} + \frac{0.4 - \sigma'}{0.5} \right) \times 100 \quad (15)$$

$$B_{33} = \left(\frac{E_{33} - 1}{14} + \frac{0.4 - \sigma'}{0.5} \right) \times 100 \quad (16)$$

分析 E_{11} , E_{33} 和 σ' 的表达式可知, B_{11} 和 B_{33} 均隐含了 Thomsen 各向异性参数 ε , γ 和 δ , 说明岩石的脆性与各向异性密切相关。

基于式(15)和(16), 利用测井资料中的速度和密度数据就能够计算出岩石的脆性系数。如图 1 所示, 基于四川盆地西部须家河组五段 (简称须五段) 页岩气专层井 HF-2 中的纵波速度、横波速度和密度数据, 计算出了各向异性参数、杨氏模量、泊松比及脆性系数。由图 1 可见, B , B_{11} 和 B_{33} 总体趋势一致; 但是,

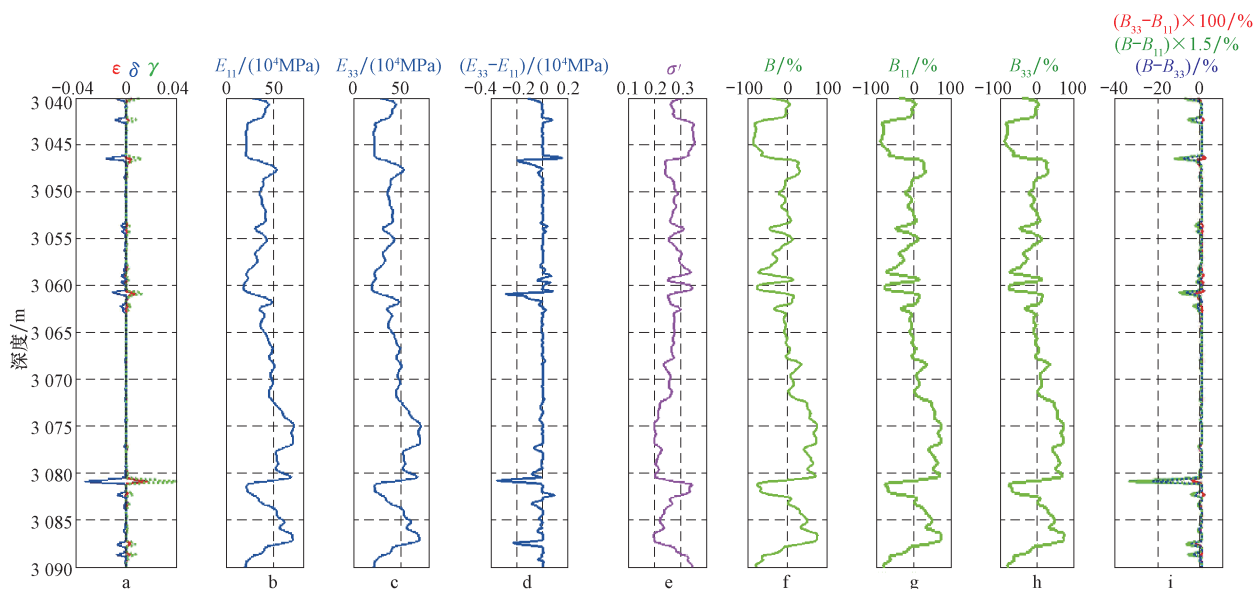


图1 川西须五段页岩专层井 HF-2 的各向异性、杨氏模量、泊松比及脆性系数等参数

Fig. 1 Parameters of well HF-2 in the 5th member of the Xujiahe Formation of the western Sichuan Basin, including anisotropy, Young's modulus, Poisson's ratio and brittleness coefficient

- a. Thomsen 各向异性系数 ε, δ 和 γ ; b, c. 杨氏模量 E_{11}, E_{33} ; d. 杨氏模量 E_{11} 和 E_{33} 之差; e. 各向异性条件下的泊松比 σ' ; f. 各向同性条件下的脆性系数 B ; g, h. 各向异性条件下的脆性系数 B_{11}, B_{33} ; i. 各向同性与各向异性条件下的脆性系数之差

当 Thomsen 各向异性参数 ε, γ 和 δ 变化较大时, $E_{11}, E_{33}, \sigma', B_{11}$ 和 B_{33} 均有比较明显的变化。对比图 1a 与 d、图 1a 与 i, 当 ε, γ 和 δ 变化较大时, $E_{11} - E_{33}, B_{33} - B_{11}, B - B_{11}$ 和 $B - B_{33}$ 均有相应的变化。其中, $E_{11} - E_{33}$ 变化较小, $B - B_{11}$ 和 $B - B_{33}$ 变化较大, 说明各向同性和各向异性条件下的脆性系数还是存在较大差异 (便于对比分析和显示, 将 $B_{33} - B_{11}$ 和 $B - B_{11}$ 分别放大 100 倍和 1.5 倍)。由此可见, VTI 介质中的 E_{11}, E_{33}, B_{11} 和 B_{33} 等参数均具有各向异性的特征。当 E_{11} 和 E_{33} 增加或减小时, B_{11} 和 B_{33} 呈现出相同的单调变化, 展现出了杨氏模量与脆性系数之间的正向变化特征, 这就是杨氏模量被用于预测岩石脆性的理论基础。当 σ' 增加或减小时, B_{11} 和 B_{33} 表现为相反的单调变化, 可见泊松比也在很大程度上影响岩石的脆性。泊松比越小 (岩石孔隙度可能越小、致密程度可能越高), 岩石脆性越强; 相反, 则塑性越强。

1.2 基于地震叠前反演的脆性系数计算思路

由岩石物理学可知, 弹性参数与介质密度和速度密切相关。在各向同性介质中, 利用速度、密度与弹性参数的数学关系, 可以把 Thomsen (2013) 所述杨氏模量和泊松比表达式^[16]公式 (2) 和公式 (3) 变换为

$$E = \frac{\rho v_{s0}^2 (3v_{p0}^2 - 4v_{s0}^2)}{v_{p0}^2 - v_{s0}^2} \quad (17)$$

$$\sigma = \frac{v_{p0}^2 - 2v_{s0}^2}{2(v_{p0}^2 - v_{s0}^2)} \quad (18)$$

利用速度、密度与阻抗的关系, 即纵波阻抗 $I_{p0} =$

ρv_{p0} 、横波阻抗 $I_{s0} = \rho v_{s0}$, 将弹性参数杨氏模量、泊松比、剪切模量和纵波模量表述为

$$E = \frac{I_{s0}^2 (3I_{p0}^2 - 4I_{s0}^2)}{\rho (I_{p0}^2 - I_{s0}^2)} \quad (19)$$

$$\sigma = \frac{I_{p0}^2 - 2I_{s0}^2}{2(I_{p0}^2 - I_{s0}^2)} \quad (20)$$

$$\mu_0 = \frac{I_{s0}^2}{\rho} \quad (21)$$

$$M_0 = \frac{I_{p0}^2}{\rho} \quad (22)$$

基于上述式 (19) — (22), 可以将式 (10) — (16) 所示的 $E_{11}, E_{33}, \sigma', B_{11}$ 和 B_{33} 的表达式变化为与岩石密度、纵横波阻抗及 Thomsen 各向异性参数 ε, γ 和 δ 有关的解析表达式。因而, 在计算脆性参数 B_{11} 和 B_{33} 时, 关键是首先获取 $\rho, I_{p0}, I_{s0}, \varepsilon, \gamma$ 和 δ 这 6 个参数。在实际应用中, 这些参数的计算能够通过地震反演获取^[21], 计算思路如图 2 所示。

2 应用实例

在四川盆地西部新场—孝泉地区, 须家河组五段 (简称须五段) 主要发育辫状河三角洲沉积体系, 向南逐渐过渡为三角洲前缘—前三角洲水下扇—滨浅湖沉积环境。该地区须五段地层主要以泥页岩为主, 层间夹 (深) 灰色粉砂岩及细—中粒岩屑砂岩互层; 地层厚度自西向东呈减薄趋势, 平均厚度达 460 m; 埋深自西向东呈加深趋势, 顶部埋深 2 000 ~ 4 000 m。广泛发

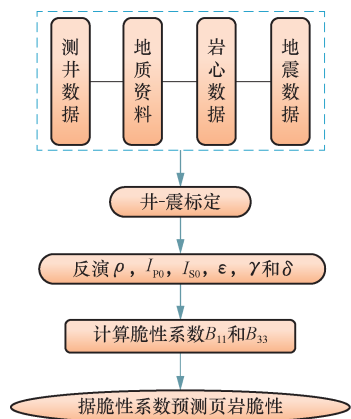


图2 脆性系数及其计算思路

Fig. 2 Brittleness coefficient and its calculation workflow

育的泥页岩作为烃源岩,为生成大规模的天然气提供了充足的物质基础。受应力作用,在脆性较强的页岩和薄砂层内部,容易形成孔隙和裂缝,加之顶、底板地层完整、断层不发育和封盖良好等利好因素,为该地区天然气的解吸、渗透和富集创造了有利条件。在良好的储运空间中,生成的天然气经短距离运移到砂岩互层,就近成藏,形成了川西陆相须五段典型的自生自储的“近源或源内”式连续型非常规天然气藏。

勘探实践表明,在新场-孝泉地区的须五段页岩气探区,存在“富砂型”、“富页岩”和“砂页岩互层型”三大类有利岩性组合,岩层非均质性较强、各向异性特征明显。在致密砂岩中,天然气以“游离态”的形式存在;在页岩中,天然气以“吸附态”、“游离态”和“溶解态”3种形式赋存。在岩层孔隙度、各向异性、裂缝密度、有机碳含量、热成熟度等物性与地化指标相对优越的区域,易形成天然气富集的优质“地质甜点”储层。当“地质甜点”储层广泛发育脆性岩石时,这类储层亦为“工程甜点”储层,更利于天然气的渗流富集和开发改造。区内 HF-1 井(“富页岩”)和 HF-2 井(“富砂型”)是页岩气专层井,通过储层压裂改造,在相对较大的孔隙、天然裂缝和人造裂缝的疏导下,加速了地层

内部游离气和吸附气的渗流,最终获得了天然气工业产能。

就地震响应特征而言,受岩性组合、岩层厚度、有机碳含量、含气性、脆性及各向异性等多种复杂因素的影响^[22],该地区须五段砂岩阻抗高于泥页岩阻抗,厚度较大的泥页岩地层段和砂泥薄互层段产生较弱的地震反射,夹有较厚砂层的泥页岩产生低频、强波峰-强波谷“亮点”型地震反射。图3分别为该区过 HF-1 井和 HF-2 井的须五段地震反射剖面,展示了地震波传播经过目标层(蓝色曲线)后,呈现出低频强反射响应特征。图4分别为 HF-1 井和 HF-2 井目标层的振幅属性,展示了滨浅湖沉积相中振幅较强的地震反射区域为有利储层分布区。

基于本文所述的页岩脆性系数计算原理,利用新场-孝泉地区的测井、地震和地质等综合资料,计算出了须五段水平方向和垂直方向的岩石脆性系数 B_{11} 和 B_{33} (图5,图6)。

图5显示,在 HF-1 井的目标层(图5b中蓝色曲线对应地层),岩石脆性系数高值异常区(黄-红色)分布并不广泛,预示着该层强脆性岩石分布范围有限,不利于天然缝隙的规模发育和后期压裂改造。分析图5可见,尽管强振幅异常分布广泛、有利储层(“甜点”)面积较大(图5a),但储层脆性仅局部较强,大部分区域可能是“甜”而“不脆”。在该区储层十分致密(平均孔隙度约4%)的背景下,如果岩层脆性不强,则无论拉伸、压缩还是剪切作用均难以使岩层产生破碎,必然不利于岩层孔隙、喉道的进一步扩张和天然裂缝网络的大规模发育。尽管 HF-1 井目标层泥页岩厚度较大、有机碳含量较高(约2.3%)、热成熟度适中,有利于天然气的生成,有机碳向天然气转化过程中也有利于扩大有机质孔隙,但是在储层脆性欠发育的背景下,地层压力不足以使天然气聚集的空间和运移的通道有效增加,也不利于天然气向厚泥页岩中的薄粉砂夹层解吸与渗流富集。同时,由于岩层脆性欠发育,

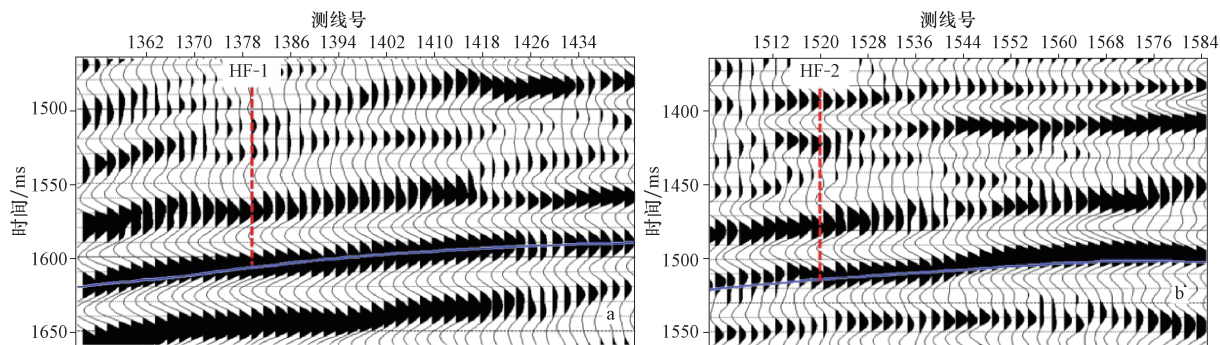


图3 川西新场-孝泉地区 HF-1 井(a)和 HF-2 井(b)须五段地震反射剖面

Fig. 3 Seismic reflection profiles of well HF-1(a) and HF-2(b) in the 5th member of the Xujiahe Formation of Xinchang-Xiaoquan area in the western Sichuan Basin

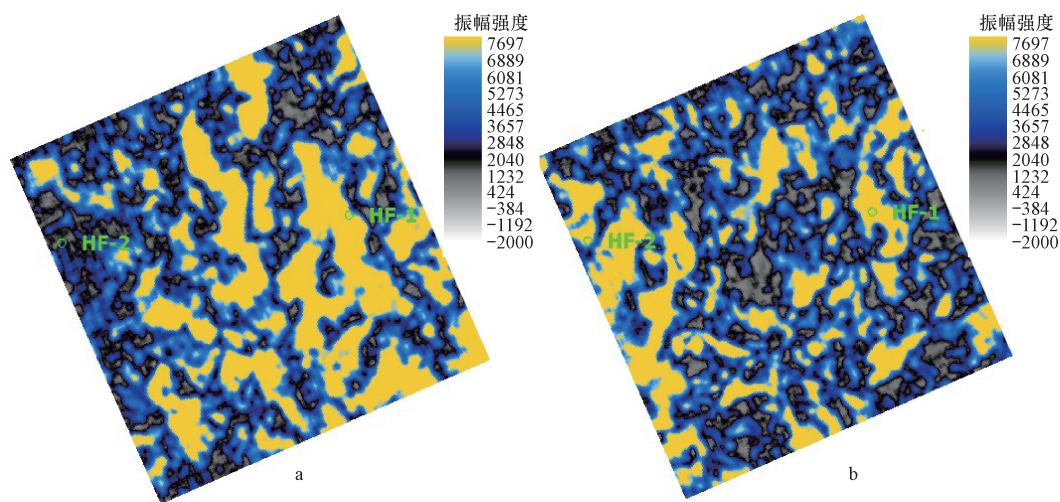


图 4 川西新场-孝泉地区须五段 HF-1 井(a)和 HF-2 井(b)目标层地震振幅属性

Fig. 4 Amplitudes of layers of interest in well HF-1(a) and HF-2(b) in the 5th member of the Xujiahe Formation of Xinchang-Xiaoquan area in the western Sichuan Basin

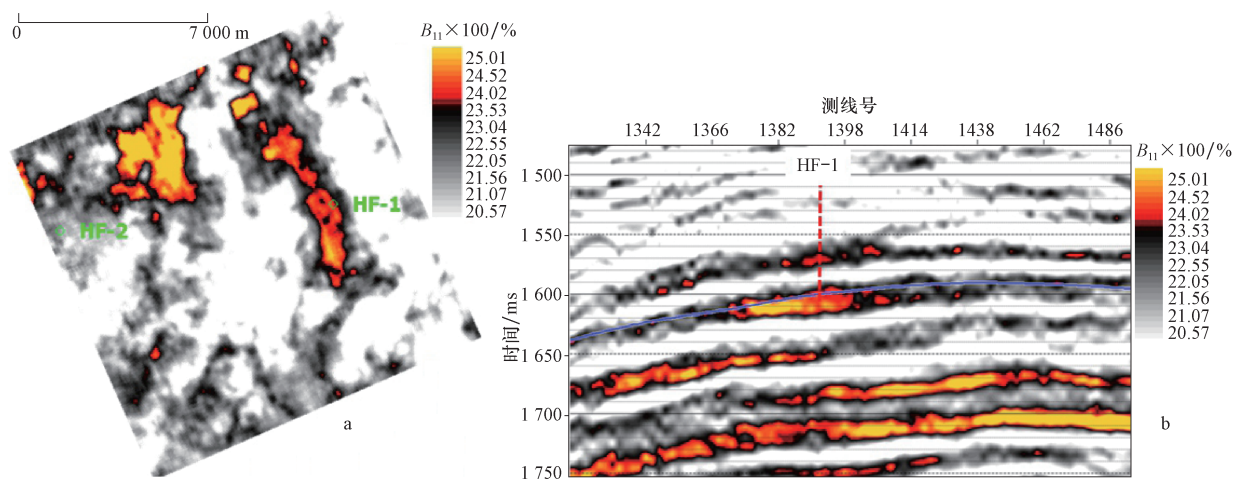


图 5 川西新场-孝泉地区须五段岩石脆性系数 B_{11} 沿 HF-1 井目标层(a)及剖面(b)分布

Fig. 5 Distribution of brittleness coefficient B_{11} along layers of interest (a) and profiles (b) in well HF-1 of the 5th member of the Xujiahe Formation of Xinchang-Xiaoquan area in the western Sichuan Basin

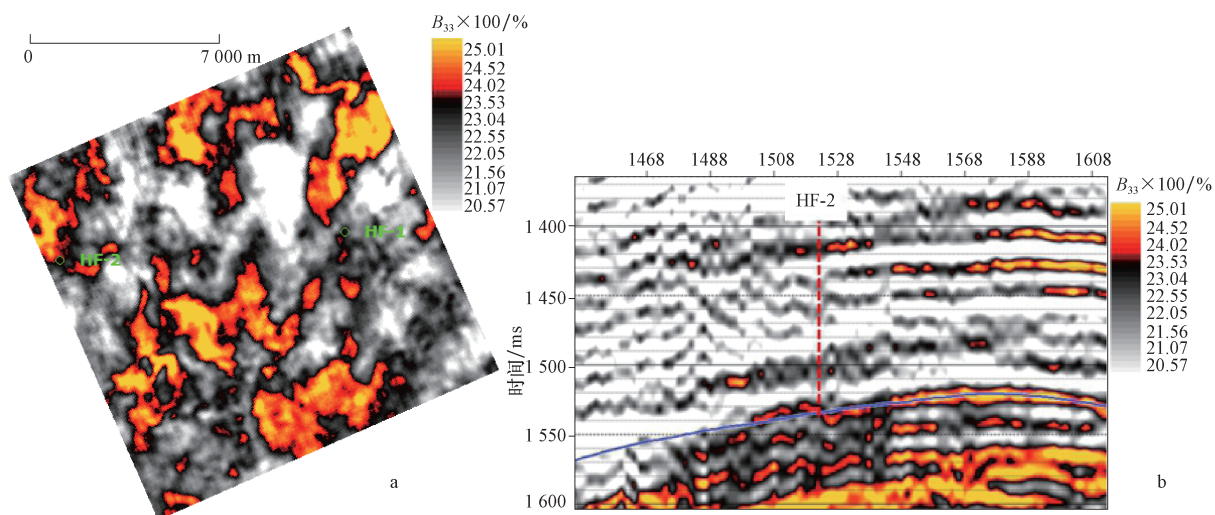


图 6 川西新场-孝泉地区须五段岩石脆性系数 B_{33} 沿 HF-2 井目标层(a)及剖面(b)分布

Fig. 6 Distribution of brittleness coefficient B_{33} along layers of interest (a) and profiles (b) in well HF-2 of the 5th member of the Xujiahe Formation of Xinchang-Xiaoquan area in the western Sichuan Basin

表1 川西新场-孝泉地区须五段 HF-2 井岩心样品
主要矿物含量

Table 1 Contents of the main minerals in core samples
from well HF-2 in the 5th member of the Xujiahe Formation of
Xinchang-Xiaoquan area in the western Sichuan Basin

岩性	主要矿物含量/%	
	粘土矿物	脆性矿物(石英、长石等)
黑色页岩	35.1	60.5
	47.8	46.0
	50.3	43.9
	54.0	42.0
	39.9	56.1
	41.0	53.0
	42.5	52.2

在后期的储层压裂改造过程中难以使闭合缝有效开启、难以使微裂隙进一步扩张、难以产生多组随机裂缝网络系统,最终不能将储层中聚集的天然气大规模地疏导到开发井中。在这些因素的制约下, HF-1 井仅获得了较低的天然气工业产能。

图6显示,在 HF-2 井的目标层(图6b中蓝色曲线对应地层),岩石脆性系数高值异常区(黄-红色)沿层广泛展布,预示着该层大部分岩石脆性较强,抗压、抗张和抗剪的能力较差,在外力作用下容易断裂破碎,有利于裂缝发育。此外,该岩层段以页岩、粉砂岩等粒度较细的致密岩性组合为主,岩层孔隙度低且含石英、长石等脆性成分较高(表1),使岩石的强度和弹性模量增加,在相同应力作用下,更容易产生形变破裂;即使岩石发生较小的应变,也容易产生裂缝,增加裂缝的发育密度。在后期的压裂改造过程中,压裂的脆性岩层中产生了人工裂缝,沟通了储层中不同组系的高角度构造缝、近水平成岩缝、小断裂伴生缝等,组成了裂缝网络系统,使泥页岩的隔挡能力变差、渗透性变强,有利于天然气向薄粉-细砂岩层中大规模聚集,进而令该井获得了较高的天然气工业产能。

总之,针对 HF-1 井和 HF-2 井的目标层,基于 VTI 介质弹性参数的脆性系数(B_{11} 和 B_{33})较好地反映了这两类储层的力学性质——脆性特征。应用结果表明,在新场-孝泉地区须五段,预测脆性较差的岩层,存在“甜”而“不脆”的特征,天然裂缝不发育、裂缝密度低,后期改造作用难以有效沟通裂缝网络;相反,预测脆性较强的岩层,具备既“甜”又“脆”的特征,易于被压裂改造,天然裂缝与人工裂缝能有效组合,并形成利于烃源岩中天然气解吸和渗流的通道,最终获得天然气工业产能。

3 结论与认识

1) 在各向异性条件下,弹性参数(杨氏模量、泊松

比)与 Thomsen 参数 ϵ , γ 和 δ 有关。本文推导的页岩脆性系数计算公式实质上包含了 Thomsen 参数。因此,该公式直接把页岩的脆性和各向异性密切地联系了起来,丰富了现实中脆性页岩存在各向异性的岩石物理基础理论。

2) 在新场-孝泉地区须五段,脆性系数高值异常区,能较好地反映储层脆性特征。正是在广泛分布的较强脆性储层的影响下,使具有较高有机碳丰度的优质页岩储层同时具备了“地质甜点”和“工程甜点”的有利条件,促使储层孔隙、各向异性和裂缝等进一步发育,为天然气的解吸、渗流、富集和储层后期压裂改造创造了有利条件。

参 考 文 献

- [1] 肖钢,唐颖.页岩气及其勘探开发[M].北京:高等教育出版社,2012:5-6.
Xiao Gang, Tang Ying. Shale gas and exploration and development [M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [2] 杨振恒,韩志艳,李志明,等.北美典型克拉通盆地页岩气成藏特征、模式及启示[J].石油与天然气地质,2013,34(4):463-470.
Yang Zhenheng, Han Zhiyan, Li Zhiming, et al. Characteristics and patterns of shale gas accumulation in typical North American cratonic basins and their enlightenments[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4):463-470.
- [3] 王鹏万,陈子焯,贺训云,等.桂中坳陷泥盆系页岩气成藏条件与有利区带评价[J].石油与天然气地质,2012,33(3):353-363.
Wang Pengwan, Chen Ziliao, He Xunyun, et al. Shale gas accumulation conditions and play evaluation of the Devonian in Guizhong Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3):353-363.
- [4] 聂海宽,唐玄,边瑞康.页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J].石油学报,2009,30(4):484-491.
Nie Haikuan, Tang Xuan, Bian Ruikang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4):484-491.
- [5] Bowker K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):523-533.
- [6] Burnaman M D, Xia Wenwu, Shelton J. Shale gas play screening and evaluation criteria[J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14(3):51-64.
- [7] Jarive D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north central Texas as one model for thermogenic shale gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):475-499.
- [8] 涂乙,邹海燕,孟海平,等.页岩气评价标准与储层分类[J].石油与天然气地质,2014,35(1):153-157.
Tu Yi, Zou Haiyan, Meng Haiping, et al. Evaluation criteria and classification of shale gas reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1):153-157.
- [9] 张新华,邹筱春,赵红艳,等.利用X荧光元素录井资料评价页岩脆性的新方法[J].石油钻探技术,2012,40(5):92-95.
Zhang Xinhua, Zou Xiaochun, Zhao Yanhong, et al. A new method of evaluation shale brittleness using X-ray fluorescence element logging

- data[J]. Petroleum Drilling Technique, 2012, 40(5): 92–95.
- [10] Leroueil S. Natural slopes and cuts; movement and failure mechanisms[J]. Geotechnique, 2001, 51(3): 197–243.
- [11] 夏宏泉, 杨双定, 弓浩浩, 等. 岩石脆性实验及压裂缝高度与宽度测井预测[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(4): 81–89.
- Xia Hongquan, Yang Shuangding, Gong Haohao, et al. Research on rock brittleness experiment and logging prediction of hydraulic fracture height & width[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35(4): 81–89.
- [12] 刁海燕. 泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价[J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 3300–3306.
- Diao Haiyan. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale reservoir[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(9): 3300–3306.
- [13] 刘恩龙, 沈珠江. 岩土材料的脆性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3449–3453.
- Liu Enlong, Shen Zhujiang. Study on brittleness of geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3449–3453.
- [14] 季泽普. 泌阳凹陷湖相页岩的岩相特征及其脆性甜点区的选取原则[J]. 录井工程, 2013, 24(2): 8–13.
- Ji Zepu. Facies features of lacustrine facies shale in Miyang sag and principle of selecting good brittle area[J]. Mud Logging Engineering, 2013, 24(2): 8–13.
- [15] 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, 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, 40(4): 17–22.
- [16] Rickman R, Mullen M, Erik P E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett shale[J]. SPE 115258, 2008.
- [17] Thomsen L. On the use of isotropic parameters λ, E, ν, K to understand anisotropic shale behavior[C]. SEG, 2013: 320–324.
- [18] Thomsen L. Weak elastic anisotropy: Geophysics[J]. 1986, 51(10), 1954–1966.
- [19] Sayers C M. The effect of anisotropy on the Young's moduli and Poisson's ratios of shales[C]. SEG, 2010: 2606–2611.
- [20] Thomsen L. Weakly anisotropic elastic compliance[C] // The 72nd Annual International Conference and Exhibition. EAGE, 2010.
- [21] 袁书坤, 陈开远, Bob A Hardage, 等. 纵波-转换横波联合反演技术在页岩气藏勘探中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 168–174.
- Yuan Shukun, Chen Kaiyuan, Hardage B A, et al. Application of joint PP and PS inversion to the exploration of shale-gas reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 168–174.
- [22] 徐天吉, 闫丽丽, 程冰洁, 等. 川西坳陷须五段页岩气藏地震各向异性[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(2): 319–329.
- Xu Tianji, Yan Lili, Cheng Bingjie, et al. Seismic anisotropy of shale gas reservoirs in the 5th member of the Xujiahe Formation in western depression of Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 319–329.

(编辑 李 军)

《石油与天然气地质》获 “2016 中国国际影响力优秀学术期刊”称号

2016 年 11 月 22—23 日, “2016 中国学术期刊未来论坛”在北京会议中心举行。论坛期间, 发布了“2016 中国学术期刊国际、国内影响力研究报告”, 《石油与天然气地质》期刊以国际影响力指数 CI32.533 荣获“2016 中国国际影响力优秀学术期刊”称号, 标志着期刊进入 TOP10% 行列。



此次论坛由中国期刊协会、中国科学技术期刊编辑学会、中国高校科技期刊研究会、全国高等学校文科学报研究会和《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社联合发起。论坛围绕“转型, 融合, 发展”安排了一系列主题报告, 并组织了六个主题论坛、一个专场报告会和一个座谈会。我国自然科学领域和社会科学领域的 3 000 多名期刊界代表参加了本次论坛。

(供稿 李 军)