

非常规油气储层脆性指数测井评价方法研究进展

赖锦^{1,2}, 王贵文^{1,2*}, 范卓颖¹, 陈晶¹, 王抒忱¹, 周正龙¹, 范旭强¹

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, wanggw@cup.edu.cn

收稿日期: 2016-07-28

国家科技重大专项(2011ZX05020-008、2016ZX05019-005-007)、国家自然科学基金(41472115) 联合资助

摘要 非常规油气储层一般都需要进行压裂改造才能获得工业产能, 而岩石脆性指数测井评价是非常规油气储层压裂设计中应考虑的重要因素之一。目前国内外关于脆性指数定义众多、且计算方法各异, 在关于脆性指数的测井评价方法方面更是缺少一套完整的研究方法流程。本文回顾了油气储层脆性指数的研究历程, 明确了脆性指数定义的科学内涵, 归纳总结了脆性指数的测井评价方法。最后以鄂尔多斯盆地长7致密油储层为例, 探讨了主要的脆性指数测井评价方法计算流程及其有效性。在有纵、横波测井资料时, 可利用泊-杨法直接计算岩石脆性指数。同时也可通过元素俘获测井矿物成分比值法计算脆性指数。此外基于常规测井的最优化方法确定矿物组分, 利用矿物成分比值法也能计算脆性指数。通过X-射线衍射资料与岩性系数GR/Pe的回归拟合建立地区经验公式, 也可实现岩石脆性指数的测井评价。最后对脆性指数测井计算中存在的问题进行归纳总结, 并对未来发展方向做出展望。研究成果可为非常规油气储层钻井和压裂设计工作提供科学指导。

关键词 脆性指数; 非常规油气资源; 储层; 测井评价; 长7致密油

0 引言

伴随着世界油气需求的持续增长与常规油气产量的不断下降, 具有较大资源潜力的非常规油气逐渐成为勘探和开发的热点领域^[1-2]。井筒、水平井及分段压裂技术的日趋成熟促进了非常规油气的经济有效开发^[3]。所谓非常规油气资源, 是指用传统技术无法获得自然工业产量、需用新技术改善储层渗透率或流体黏度等才能经济开采、连续或准连续型聚集的油气资源的统称, 主要包括致密油、页岩油、油页岩油、致密气、页岩气、煤层气和天然气水合物等^[4-5]。非常规

油气地质学研究的重点是评价“岩性、物性、脆性、含油性、烃源岩特性、应力各向异性”6性及其匹配关系^[6-7]。其中, 脆性评价旨在优选利于规模压裂的高脆性储层段^[7]。因为非常规油气储层一般表现出岩性致密、基质孔隙度和渗透率低以及微观孔隙结构复杂的特征, 为了提高单井产量和稳产有效期, 一般都需要进行大规模压裂改造^[8-9]。而且并不是所有的层段都能获得理想的产能, 只有那些脆性比较强的层段在压裂过程中才可形成复杂的裂缝供油气渗流, 因此基于岩石脆性评价的压裂性分析对于优选可压裂层段、多级压裂设计和预测经济效益等将起到关键作用^[9-10]。

引用格式: 赖锦, 王贵文, 范卓颖, 陈晶, 王抒忱, 周正龙, 范旭强. 非常规油气储层脆性指数测井评价方法研究进展. 石油科学通报, 2016, 03: 330-341

LAI Jin, WANG Guiwen, FAN Zhuoying, CHEN Jing, WANG Shuchen, ZHOU Zhenglong, FAN Xuqiang. Research progress in brittleness index evaluation methods with logging data in unconventional oil and gas reservoirs. Petroleum Science Bulletin, 2016, 03: 330-341. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.028

岩石脆性是指岩石在受力破坏时所表现出的一种固有性质,表现为岩石在破裂前发生很小的塑性应变,而破裂时全部以弹性能的形式释放出来^[9,11-12]。对于油气储层而言,岩石脆性一般定义为岩石发生破裂前的瞬态变化难易程度,间接反映的是储层压裂后所形成裂缝的复杂程度,一般可通过脆性指数来定量表征^[9,13-15]。脆性指数是遴选高品质非常规油气储层的重要指标^[16-17],脆性能够显著影响井壁的稳定性和评价储层力学特性的关键指标,同时还对压裂的效果影响显著^[17]。通常脆性指数高的地层性质硬脆,可压裂性好,在压裂作业中能够迅速形成复杂的网状裂缝,有利于油气开发;反之,脆性指数低的储层在压裂过程仅形成简单的裂缝,不利于油气的渗流^[10,13]。因此,岩石的脆性评价是非常规油气储层压裂设计中应考虑的重要因素之一^[10,18]。一般而言,由岩石矿物成分等所决定的岩石弹性力学参数的高低可以反映岩石的易压裂性^[3]。因此,可从岩石的矿物组分和岩石力学参数两方面着手来评价储层可压裂性^[13-19]。基于测井资料可获取储层矿物组分、物性参数和总有机碳含量等基础资料,同时也可通过地层纵、横波时差等来计算岩石的杨氏模量、泊松比、破碎压力等力学参数^[20]。通过岩石物理实验与测井技术的结合,既能够获得直接的脆性参数,又能保证所取资料的连续性^[21],为非常规油气资源 6 性关系评价提供指导。

非常规油气储层脆性指数的研究受到国内外专家学者的普遍重视,不同的研究者归纳总结了脆性指数的定义,并提出了基于脆性矿物含量和岩石力学参数的不同脆性指数的定量计算方法,针对非常规储层岩石脆性指数测井评价方面也开展了大量研究工作^[10,14-19]。但总体而言,目前尚无统一的关于脆性指数的定义,在关于脆性指数的测井评价方法方面更是缺少一套完整的研究方法流程,非常规油气储层中有利压裂层段优选工作受到限制。本文回顾了近 20 年来脆性指数的研究历程,进一步论证了岩石力学参数与矿物组分之间的关系,同时对基于矿物组分和岩石力学参数的储层脆性指数测井定量评价方法进行了分类总结,并提出了适用于非常规油气储层的基于常规测井资料的脆性指数评价方法,以期为致密砂岩油气储层的工程“甜点”优选提供技术支持。

1 脆性指数计算方法

不同学科的专家学者基于不同的研究目的,提出了不同的脆性指数定义和计算方法^[16,22-23]。李庆辉

等人总结了国外计算脆性指数的相关定义和计算方法^[17]。就非常规油气储层可压裂性而言,脆性指数的计算方法大致上可分为两种,一是基于岩石力学参数的脆性指数计算方法,可通过杨氏模量和泊松比计算得到;二是基于脆性矿物(石英、长石、碳酸盐矿物等)含量的计算方法,可通过 X-衍射资料精确获得^[12-15,19,24-26],因此,脆性指数与岩石矿物成分、岩石力学性质等密切相关^[10,27-29]。

基于岩石力学参数的脆性指数计算是将岩石力学参数中杨氏模量与泊松比的大小分别取 50% 的权值进行计算^[13,19]。其中,泊松比(ν)反映了岩石在外力作用下的破裂能力,而杨氏模量(E)反映了岩石破裂后的支撑能力^[14-15,19]。事实上,岩石脆性理论是泊松比和杨氏模量的综合体现^[21]。即可分别利用泊松比和杨氏模量按照式 1 和式 2 分别计算岩石的脆性指数,通过求取两者的平均值即可获得基于岩石力学特征的脆性指数(式 3)^[3]。不同的杨氏模量和泊松比的组合表示岩石具有不同的脆性^[30],一般,杨氏模量越高、泊松比越低,岩石的脆性越强,在压裂过程中越容易形成复杂的裂缝^[14,15,19,21]。静态杨氏模量和泊松比可在实验室条件下测量得到,而动态杨氏模量和泊松比可通过声波测井资料解释得到。

$$BI_E = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (1)$$

$$BI_\nu = \frac{\nu - \nu_{\max}}{\nu_{\min} - \nu_{\max}} \quad (2)$$

$$BI = \frac{BI_E + BI_\nu}{2} \times 100\% \quad (3)$$

式中, BI 为脆性指数,%; E 为岩石的杨氏模量,GPa; ν 为岩石泊松比,无量纲;下标 min 和 max 分别代表该参数在某个地层段内的最大值和最小值。 BI_E 和 BI_ν 分别为通过杨氏模量和泊松比所计算的脆性指数。

另外一种脆性指数的定性判定方法是通过 X-射线衍射 XRD 方法测定岩石的全岩矿物组分(质量分数),定性分析储层中脆性矿物(一般为石英、长石和碳酸盐矿物)与黏土矿物的相对含量^[13-15,19,31]。储层中脆性矿物的存在,控制了压裂过程中裂缝的发育程度^[32]。其中,石英、长石、碳酸盐矿物等脆性矿物含量高,是压裂时裂缝网络形成的内因,其他因素则是裂缝发育的外因^[33]。石英含量的增加将提高岩石的脆性,而碳酸盐矿物含量增加有利于后期改造,富含石英或者碳酸盐等脆性物质的储层有利于复杂缝网的产生,而黏土矿物含量高的塑性地层则不易形成复杂缝网^[34]。可以说,富含大量脆性矿物与否是非常规油气储层能

否通过压裂造缝获得高产的关键因素^[30]。因此,脆性矿物含量分析是了解岩石脆性的基础工作^[33]。

如若把石英、长石和碳酸盐岩都看成是脆性矿物,对页岩油气储层而言,其脆性指数可通过式4计算^[31,35-37]。此外,另有一些专家学者认为,与石英和碳酸盐矿物相比,长石的脆性相对较弱,尤其是针对一些石英和碳酸盐矿物相对含量较高的非常规油气储层(致密砂岩油气)而言,如若按式1计算,得到的脆性指数偏高,因此长石不被认为是传统意义上的脆性矿物,此时脆性指数的计算公式如下式5^[37]。

$$BI = \frac{Qz + Car + Fels}{Qz + Car + Fels + Clay} \times 100\% \quad (4)$$

$$BI = \frac{Qz + Car}{Qz + Car + Fels + Clay} \times 100\% \quad (5)$$

式中, BI 为脆性指数,%; Qz 为石英含量; Car 为碳酸盐矿物含量; $Fels$ 为长石含量; $Clay$ 为黏土总量。

一般来说,石英等脆性矿物含量越高,越容易引起相应的岩石力学参数变化(泊松比减小而杨氏模量增大)^[26]。矿物组分是其岩石力学性质的物质基础与内因,声学性质(纵、横波时差)则是岩石力学性质的外在表现形式^[30]。如下图1为鄂尔多斯盆地长7致密油储层的岩石力学参数与石英、碳酸盐矿物含量之和的对比,从图中可以看出,随着石英、碳酸盐矿物含量的增大,杨氏模量增大而泊松比减小,且二者具有良好的统计相关关系,代表石英和碳酸盐岩含量越高,岩石脆性越强,由此证明把石英和碳酸盐矿物当作脆性矿物是合理的(图1)。事实上,石英和碳酸盐岩是非常规油气储层中的主要脆性矿物,基本反映了其脆

性特征,决定了储层的可压裂性。

2 基于岩石力学特性的脆性指数测井评价方法

当测井资料齐全,有密度测井资料、阵列声波或偶极声波所测量的纵、横波时差时,即可通过泊-杨法计算岩石脆性指数^[21]。动态杨氏模量和泊松比可通过以下式6和式7计算获得。声波法计算脆性指数通过对泊松比、杨氏模量等岩石力学参数综合分析,是岩石整体力学的反映,相对能较精确地反映岩石的脆性^[21]。该方法的特点是具有较高的精度,是目前最可靠的脆性指数计算方法,缺点是成本较高,不适用于没有采集到阵列声波或者偶极声波的井。

$$E = \frac{\rho}{DT_s^2} \frac{3DT_s^2 - 4DT_p^2}{DT_s^2 - DT_p^2} \times 10^6 \quad (6)$$

$$\nu = \frac{DT_s^2 - 2DT_p^2}{2(DT_s^2 - DT_p^2)} \quad (7)$$

式中, E 为杨氏模量, GPa; ν 为岩石泊松比,无量纲; ρ 为体积密度, g/cm^3 , DT_p 为纵波时差, $\mu s/m$, DT_s 为横波时差, $\mu s/m$; 10^6 为将杨氏模量转换为以GPa为单位的系数。

在测井资料比较齐全时,泊-杨法是最常用的计算岩石脆性的方法,通常也被认为是相对比较精确的方法,但缺点是对资料的品质要求比较高,在缺少纵横波时差等资料时无法应用,因此泊-杨法并不具有普遍适用性,对于只有常规测井资料的井无法计算其脆性指数。

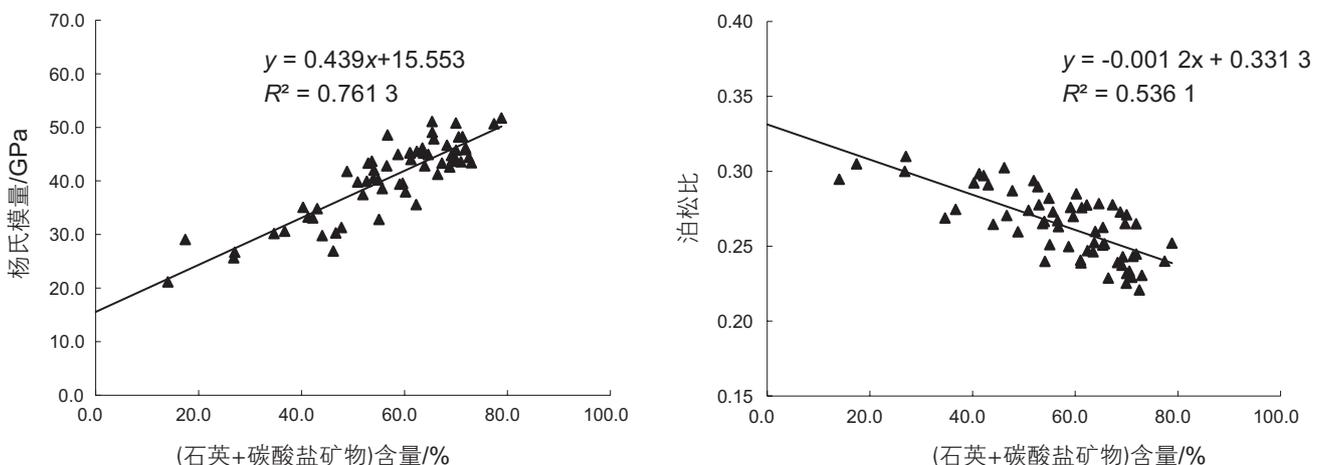


图1 岩石力学参数与石英、碳酸盐矿物含量之和的对比

Fig. 1 Comparison of geomechanical parameters and (Quartz + Carbonate) content

3 基于矿物组分的脆性指数测井评价方法

岩石矿物组分是岩石力学性质的内因,而声学、电学等性质是岩石力学性质的外在表现,也是利用测井曲线计算矿物组分和脆性指数的理论基础^[38]。偶极声波和阵列声波等可获得地层纵横波时差等测井曲线,但这两种测井资料成本较高,不可能每口井都能采集得到。事实上,大多数井可能只测量了常规测井,无法应用岩石弹性参数法来计算其脆性指数。因此当测井资料较少、无阵列声波测井时,可用矿物成分法去评价岩石脆性指数。实验室条件下,可通过X-射线衍射资料获得岩石的矿物组分并进一步定量计算岩石脆性指数,此外X-射线荧光录井测量的元素含量也可用于脆性指数的计算^[34]。这两种方法虽然被认为是比较可靠的通过矿物组分计算脆性指数的方法,但缺点是耗时耗力,缺点是过分依赖于取心井及其取心井段,且基本都是散点数据。要实现单井纵向上脆性指数的连续定量评价,还得依靠作为地下地质信息载体的测井资料。文献调研表明,除声波测井之外,元素俘获(ECS)测井和最优化方法确定矿物组分被广泛采用于非常规油气储层脆性指数的测井评价^[10]。

3.1 利用ECS测井计算碳酸盐等矿物含量

元素俘获谱测井仪器通过探测快中子与地层中的原子核发生非弹性散射碰撞及热中子被俘获产生的瞬发 γ 射线,通过解谱分析可获得地层中26种元素(Si、Al、Ca、Mg、Na、K、Fe等)的相对干重(质量)。进一步通过聚类分析、因子分析和氧化物闭合模型(即组成矿物的氧化物、碳酸盐含量百分数之和为100%)可定量求解地层中的黏土矿物(Clay)、煤(Coal)、砂质(Q-F-M,石英、长石、云母)、菱铁矿(Siderite)、黄铁矿(Pyrite)以及碳酸盐(Carbonate)矿物含量^[39-42]。目前ECS已经广泛运用于岩性识别、粘土矿物类型和含量确定、沉积环境的分析、复杂岩性变化评价等方面,同时在压裂酸化等工程应用方面也取得了较好的效果^[40-42]。

图2为鄂尔多斯盆地X井长7段致密油储层基于ECS测井所计算的脆性指数与泊-杨法所计算的脆性指数的对比,从图中可以看出,总体而言,利用ECS测井所获得的岩石矿物比值的方法所计算的脆性指数与泊-杨法所计算的脆性指数具有良好的一致性,总体上有利的压裂层段位于脆性指数较高的层段,如图2中的2430.5~2456.0 m深度段。因此通过ECS测井

能识别非常规储层中黏土、石英、碳酸盐岩、黄铁矿等成分的含量,再通过脆性矿物的比值,可确定单井纵向上连续的脆性指数分布。

3.2 最优化方法确定矿物组分

事实上ECS测井也由于较高的成本导致其在脆性指数评价中的应用受到限制。因此,对缺少阵列(偶极)声波和ECS测井资料的井而言,基于常规测井资料的脆性指数显得尤为重要。一般而言,可通过常规测井采用多矿物模型(最优化解)计算矿物成分,进一步利用矿物成分比值法确定脆性指数,即将复杂岩性非常规油气储层看成是由若干种骨架矿物、黏土矿物和孔隙流体等几部分组成,建立相关的非限定方程(式8),并采用最优化处理方法进行求解^[10]。以关键井主要岩性矿物组分(X-射线衍射结果)为依据建立合理的岩石体积模型,并采用最优化方法,通过不断迭代修正岩石体积模型中各矿物的含量,求解最接近实际的页岩矿物含量^[10,25]。此外,由于常规测井资料的多解性,因此基于多矿物模型计算的脆性指数需要实验室条件下X-射线衍射资料的刻度,以提高解释结果的准确性。

$$\left\{ \begin{array}{l} GR = GR_1V_1 + GR_2V_2 + GR_3V_3 + GR_4V_4 + \\ \quad GR_5V_5 + GR_6V_6 \\ \rho = \rho_1V_1 + \rho_2V_2 + \rho_3V_3 + \rho_4V_4 + \rho_5V_5 + \rho_6V_6 \\ \Phi_N = \Phi_{N1}V_1 + \Phi_{N2}V_2 + \Phi_{N3}V_3 + \Phi_{N4}V_4 + \\ \quad \Phi_{N5}V_5 + \Phi_{N6}V_6 \\ \Delta t = \Delta t_1V_1 + \Delta t_2V_2 + \Delta t_3V_3 + \Delta t_4V_4 + \Delta t_5V_5 + \\ \quad \Delta t_6V_6 \\ Pe = Pe_1V_1 + Pe_2V_2 + Pe_3V_3 + Pe_4V_4 + Pe_5V_5 + \\ \quad Pe_6V_6 \\ 1 = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6 \end{array} \right. \quad (8)$$

式中:GR、 ρ 、 Φ_N 、 Δt 、Pe分别为实测自然伽马(API)、密度(g/cm³)、中子孔隙度值(%)、声波时差(μ s/ft)和光电吸收截面指数(b/e)。V₁、V₂、V₃、V₄、V₅、V₆分别为黏土、石英、长石、碳酸盐岩、有机质和流体的体积,小数。GR₁~GR₆分别为粘土、石英、长石、碳酸盐矿物、有机质和流体的自然伽马测井响应值,其他的类似。

如下图3即为Y井长7段致密油储层应用最优化计算的岩石矿物组分割面和脆性指数与泊-杨法计算的脆性指数的对比。从图3中可以看出,采用两种方法计算的脆性指数也具有良好的一致性。当然由于非常规油气储层矿物组成比较复杂,除了常见的石英、长石、碳酸盐岩、黏土之外,还有一些模型中未考虑

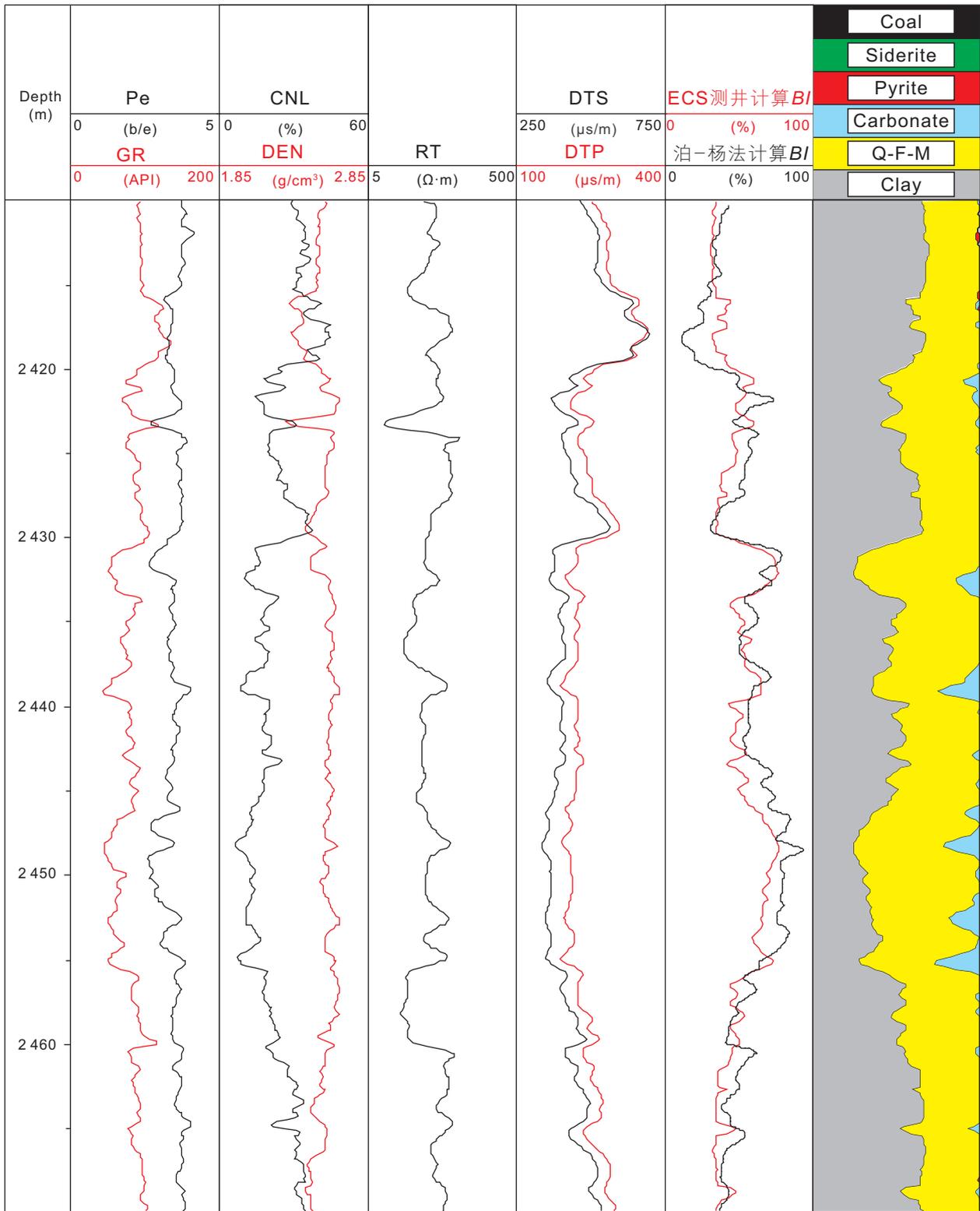


图2 X井泊-杨法计算脆性指数与ECS测井计算脆性指数对比(图中的Coal等含量来自于ECS测井)
 GR为自然伽马, Pe为光电吸收截面指数, CNL为中子测井, DEN为密度测井, RT为电阻率测井, DTS为横波测井, DTP为纵波测井。

Fig. 2 Comparison of brittleness index calculated by Young's modulus -Poisson's ratio and by ECS logs

的黄铁矿、菱铁矿等矿物，这些矿物的存在会影响多矿物模型所计算的岩石矿物组合剖面的准确性，从而进一步影响脆性指数的计算结果。从图 3 中看，确实

有局部层段通过多矿物模型最优化解计算的脆性指数与泊-杨法计算的脆性指数有一定差异。但总体而言，在无阵列声波测井资料情况下，基于常规测井多矿物

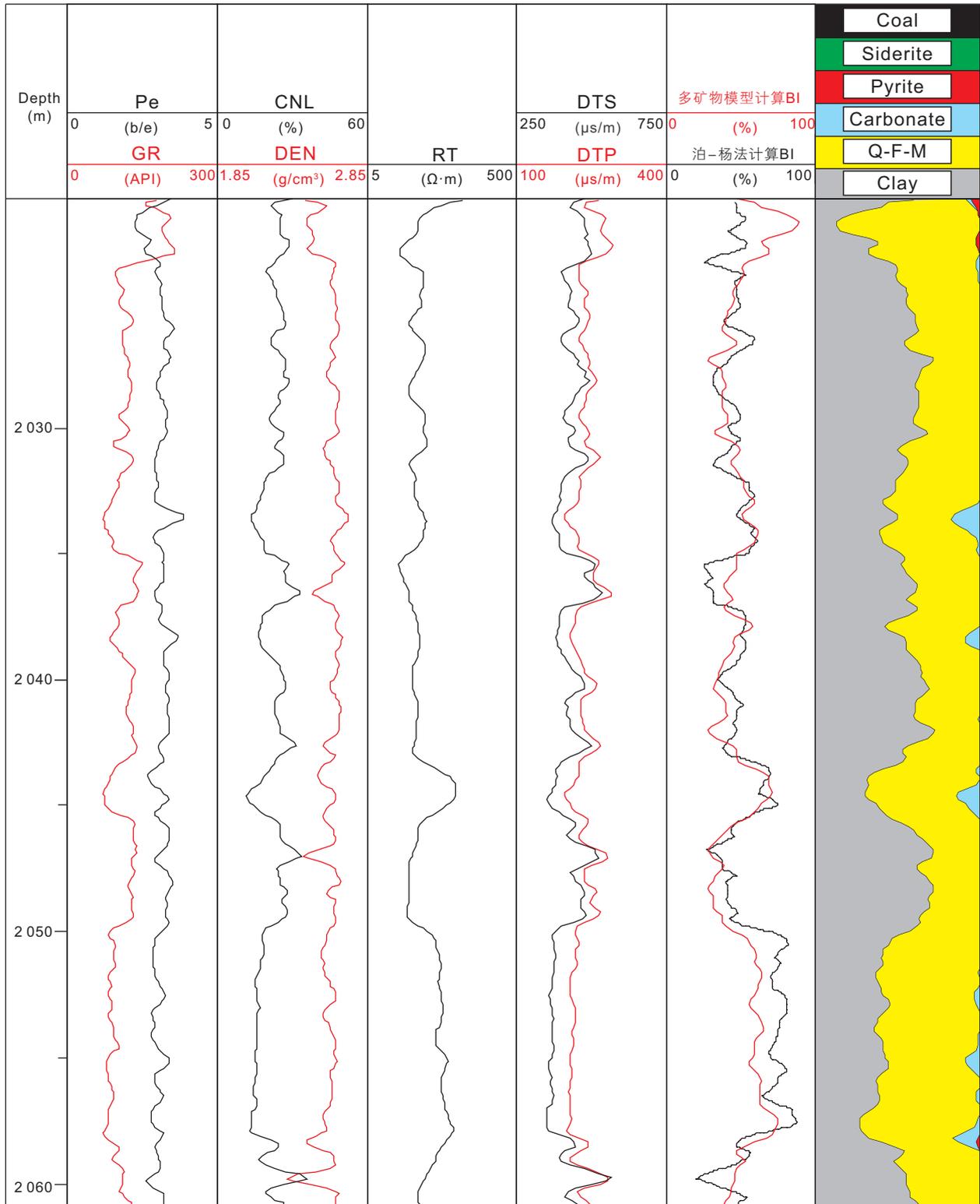


图 3 Y 井泊 - 杨法计算脆性指数与多矿物模型计算脆性指数对比

Fig. 3 Comparison of brittleness index calculated by Young's modulus-Poisson's ratio and by multiminerall model

模型计算矿物组分的方法也可实现非常规油气储层的脆性指数评价,也具有较好的计算精度,能够大致满足压裂设计的要求^[3]。该方法通过矿物解释结果能够获得全井段脆性指数剖面,实用性强,在实际应用中具有一定的优势^[17]。此外,基于矿物比值的脆性指数计算方法由于没有考虑成岩改造的影响,有时不能完全反应真实情况^[17,43]。范卓颖等利用Schlumberger公司的Geoframe软件中的Elan模块采用最优化方法对致密地层矿物含量进行了计算,从而通过常规测井资料实现了脆性指数的定量评价^[43]。

4 其他计算脆性指数方法

4.1 GR/Pe比值法计算脆性指数

一般而言,对储层岩性(矿物组分)响应较敏感的测井曲线为自然伽马GR、自然电位SP以及井径CAL等。此外,由于不同的造岩矿物的光电吸收截面指数(Pe)差异也很大,相比较而言,流体对Pe的影响较小。因此定义一个岩性指数:GR/PE(GR单位为API,Pe单位为b/e),即为自然伽马GR(API)与光电吸收截面指数Pe(b/e)的比值,作为表征储层矿物组分较好的参数。GR/Pe的物理意义为单位光电吸收截面指数下的GR测井值。GR/Pe系数能把矿物组分引起的岩性的变化进一步放大,进一步定量评价岩石中矿物组分的含量,确定脆性指数大小。一般GR/Pe值越小,岩性指数值越小,代表岩性越纯(石英等含量越高),脆性指数越大^[44]。因此可以通过X-射线衍射所获得的岩石矿物定量特征,首先利用式1或者式2计算相应的脆性指数,再通过岩心刻度测井的方法确定每一个岩样所对应的GR和Pe测井值,进一步通过回归分析确定脆性指数与GR/Pe值的对应关系,建立适合于研究工区目的层段的脆性指数经验拟合公式。Lai Jin等通过GR/Pe的方法计算了鄂尔多斯盆地陇东地区长7段的脆性指数^[44],如下图4即为Z井长7段致密油应用GR/Pe法和脆性指数与岩石力学参数计算脆性指数的对比结果。从图4中可以看出,采用两种方法计算的脆性指数也具有良好的对应性,说明该方法切实可行^[44]。因此在无阵列声波测井资料情况下,基于常规测井GR/Pe的方法也可实现岩石的脆性指数评价,为压裂设计提供指导。该方法的特点是成本较低,对于任何一口采集到了常规测井系列的井,均可以实现其脆性指数的计算,有利于单井脆性指数的评价与脆性指数平面成图。但同时也具有明显的地区适用性,如

欲推广至其他盆地其他层位的致密储层脆性指数精细评价,尚需进一步的分析与刻度工作。

4.2 其他脆性指数测井计算方法

目前并没有一套通用的脆性指数定义及其计算方法^[45-46],针对非常规油气储层而言,不同的专家学者提出了适合自己研究区目的层段的脆性指数表征以及测井评价方法^[44-49]。Guo等研究指出剪切模量 μ 、泊松比 ν 、 λ_p 乃至 V_p/V_s 均可作为表征页岩储层脆性指数的理想参数,因此在有纵横波测井资料的情况下,也可通过计算 V_p/V_s 等参数来实现脆性指数定量表征^[50]。常规测井系列测量的一般都包括纵波时差和密度测井资料,但由于横波波速测井成本高,多数井不一定可以采集到横波波速曲线,因此通过利用有限的常规测井数据构建出横波速度计算模型再通过泊杨法可以求取储层脆性指数^[51]。秦晓艳等通过横、纵波之间的关系建立了预测下寺湾地区延长组长7段的横波速度理论计算公式,并最终计算了相应的脆性指数^[51]。黄军平等优选对矿物组分较为敏感的声波时差、中子、密度、自然伽马和深、浅侧向电阻率6条测井曲线。首先对曲线进行标准化处理,利用多元回归分析方法,建立了致密岩石中矿物组分含量及脆性指数的定量评价模型^[38]。Martin等通过测井曲线基于泊杨法等计算了致密灰岩储层的脆性指数,并与成像测井解释的裂缝特征(裂缝密度和韧性等)相耦合,有效地预测了Mississippian致密灰岩中的有利压裂层段^[22]。Luan等指出杨氏模量与泊松比的比值可作为表征非常规油气储层脆性的理想参数,该值越大,代表其脆性越强^[52]。Chen等提出杨氏模量与拉姆系数(E/λ)的比值可作为表征页岩脆性的灵敏参数,同样该值越大,代表其脆性越强^[53]。Guo等以四川盆地须家河组页岩为例,首先分析了页岩破裂的力学机制,在不同的覆压条件下计算了相应的杨氏模量和泊松比值,并将二者与裂缝韧性耦合,且分别为 BI_E 和 BI_ν 赋予不同的权值,将二者加权平均值作为脆性指数,计算结果与微地震成像结果匹配良好,因此可作为较好的评价脆性指数的指标^[54]。

5 研究展望

总体上,不同的专家学者基于不同的原理和模型,提出了不同的脆性指数计算方法,这些脆性指数直接存在一定的差异^[45],但针对油气储层而言,主要的依据仍是泊-杨法以及脆性矿物含量比值法。当测井资

料齐全，有纵横波和密度测井资料时，可通过泊-杨法计算脆性指数^[45]。而当测井资料序列不全，未采集阵列声波及ECS测井时，基于最优化方法确定矿物组成的矿物成分比值法作为泊-杨法的补充，同样能够

较准确地评价岩石脆性指数。同时，通过构建横波速度再通过泊-杨法计算也是获得脆性指数的较好方法。此外，还可以通过探讨表征储层脆性的其他灵敏参数，如GR/Pe与基于X-衍射资料脆性矿物含量的关系，也

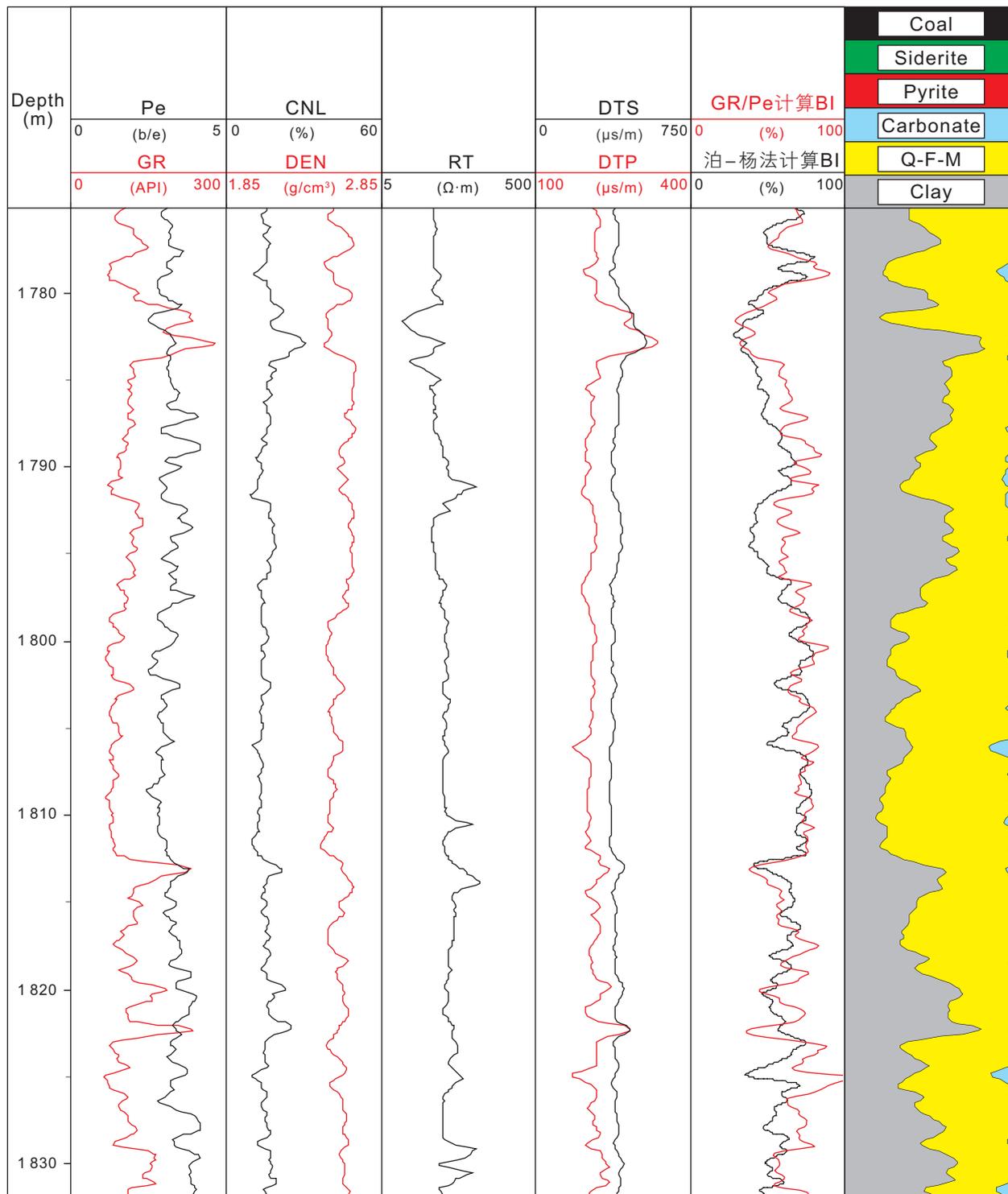


图4 Z井泊-杨法计算脆性指数与多矿物模型计算脆性指数对比

Fig. 4 Comparison of brittleness index calculated by Young's modulus -Poisson's ratio and by GR/Pe

可以建立脆性与其他弹性常数如 λ_p 乃至 V_p/V_s 的关系,同样也能够获得精度较高的脆性指数。

岩石脆性方面的研究以指导非常规油气储集层压裂改造为主要目的,目前没有直接测井岩石脆性的方法^[11,45],但脆性指数的计算与岩石力学特性是密切相关的,一般情况下,结合单轴抗压强度和单轴抗张强度实验分析,当脆性指数大于60%时,岩石具有较高脆性,而当脆性指数小于40%,则指示较低的脆性^[8]。因此通过岩石力学特征参数、脆性矿物成分含量结合测井数据,即可计算非常规油气储集层脆性指数^[55]。国外测井服务公司如贝克休斯和哈里伯顿等一般应用纵波-杨法来计算岩石脆性程度,并通过岩石脆性程度来选择水平着陆点以及压裂、射孔层段。斯伦贝谢公司除采用阵列声波法外,还采用更先进的声波扫描测井来评价岩石力学特征,并在纵横波时差基础上通过最小水平应力来优选水平着陆点和压裂、射孔层段^[56]。而应用常规测井资料评价岩石脆性指数可以弥补由于阵列声波(或声波扫描)测井采集井数较少难以开展脆性指数平面分布研究的不足^[10]。

科学立足岩石脆性断裂和破坏的力学机制,并以实验室高精度分析化验数据为依托,首先充分利用好关键井阵列声波和ECS测井资料分别以泊-杨法和矿物成分比值法实现关键井脆性指数定量评价。进一步通过岩心分析化验资料与常规测井曲线标定与拟合,建立适合于研究区目的层段的脆性指数经验计算公式,可最终实现研究区各单井非常规油气储层的脆性指数测井定量评价,达到为压裂设计提供科学指导的目的。需要说明的是,由于岩石的非均质性,通常导致其动态力学参数和静态力学参数有一定差别,实验室条件

下分析的用于脆性评价的岩石力学研究所依据的主要是三轴压缩实验确定的静态力学参数,因此最好的方法是利用静态力学参数来标定测井解释的动态力学参数,使脆性评价更好地指导钻井和压裂等工程应用实践^[39]。

6 结论

(1)就非常规油气储层可压裂性而言,脆性指数的计算方法可分为3种,一是基于岩石力学参数的泊-杨法;二是基于脆性矿物(石英、长石、碳酸盐岩等)含量计算矿物成分比值法;三是经验公式法。

(2)当测井资料齐全,有密度测井资料、阵列声波或偶极声波所测量的纵、横波时差时,即可通过泊-杨法计算岩石脆性指数。

(3)利用ECS测井矿物成分比值的方法也能计算储层较精确的脆性指数。对只有常规测井资料的井而言,可使用多矿物模型最优化处理方法计算出不同的矿物组分含量,并进一步计算其脆性指数。

(4)脆性指数与GR/Pe值一般具有良好统计相关关系,因此可通过回归分析建立适合于研究区目的层段的脆性指数计算公式,实现脆性指数的测井评价。此外,通过提取 V_p/V_s 等表征储层脆性比较灵敏的参数也可以由测井方法计算储层脆性指数。

(5)科学立足岩石脆性断裂和破坏的力学机制,并以实验室高精度分析化验数据为依托,利用静态力学参数来标定测井解释的动态力学参数,可使脆性评价更好地指导钻井和压裂等工程应用实践。

参考文献

- [1] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望—以中国致密油和致密气为例[J].石油学报,2012,33(2):173-187.[ZOU C N, ZHU R K, WU S T, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.]
- [2] 宋岩,姜林,马行陟,等.非常规油气藏的形成及其分布特征[J].古地学期刊,2013,15(5):605-614.[SONG Y, JIANG L, MA X S, et al. Formation and distribution characteristics of unconventional oil and gas reservoir[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 605-614.]
- [3] 杨雪冰,李庆峰,李文志,等.声波测井技术在非常规致密油藏储层评价中的应用[J].应用声学,2014,33(1):16-22.[YANG X B, LI Q F, LI W Z, et al. The application of acoustic logging technologies in the unconventional dense reservoir[J]. Journal of Applied Acoustics, 2014, 33(1): 16-22.]
- [4] 胡文瑞,鲍敬伟,胡滨.全球油气勘探进展与趋势[J].石油勘探与开发,2013,40(4):409-413.[HU W R, BAO J W, HU B. Trend and progress in global oil and gas exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 409-413.]
- [5] 邱振,邹才能,李建忠,等.非常规油气资源评价进展与未来展望[J].天然气地球科学,2013,24(2):238-246.[QIU Z, ZOU C N, LI J Z, et al. Unconventional petroleum resources assessment: Progress and future prospects[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(2): 238-246.]

- [6] 邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术—兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 385-400. [ZOU C N, ZHANG G S, YANG Z, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 385-400.]
- [7] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 常规—非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 14-27. [ZOU C N, YANG Z, ZHANG G S, et al. Conventional and unconventional petroleum “orderly accumulation” : Concept and practical significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 14-27.]
- [8] GUO T, ZHANG S, GE H, et al. A new method for evaluation of fracture network formation capacity of rock [J]. Fuel, 2015, 140: 778-787.
- [9] 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 J M, HAN Z L, QIN R B, et al. Log evaluation method of fracturing performance in tight gas reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1): 74-80.]
- [10] 李华阳, 周灿灿, 李长喜, 等. 致密砂岩脆性指数测井评价方法—以鄂尔多斯盆地陇东地区长7段致密砂岩储层为例[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(5): 593-597. [LI H Y, ZHOU C C, LI C X, et al. Logging evaluation and application of brittleness index in tight sandstone reservoir—a case study of Chang 7 tight sandstone reservoir in Longdong area of Ordos basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(5): 593-597.]
- [11] YAGIZ S. Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24: 66-74.
- [12] GOKTAN R M, YILMAZ N G. A new methodology for the analysis of the relationship between rock brittleness index and drag pick cutting [J]. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2005, 105: 727-733.
- [13] 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, 2014, 34(3): 523-527. [YUAN J L, DENG J G, ZHANG D Y, et al. Fracability evaluation of shale-gas reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 34(3): 523-527.]
- [14] 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[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, 21-24 September, 2008.
- [15] SONDERGELD C H, NEWSHAM K E, COMISKY J T, et al. Petrophysical considerations in evaluating and producing shale gas resources[C]. SPE Unconventional Gas Conference, Pittsburg, Pennsylvania, USA, 23-25 February, 2010.
- [16] 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, 9(9): 3300-3306. [DIAO H Y. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale reservoir[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 9(9): 3300-3306.]
- [17] 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 Q H, CHEN M, JIN Y, et al. Indoor evaluation method for shale brittleness and improvement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1680-1685.]
- [18] GUO Z Q, LI X Y, LIU C, et al. A shale rock physics model for analysis of brittleness index, mineralogy and porosity in the Barnett Shale[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2013, 10(2):25006-25015(10).
- [19] 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): 29-33. [ZHANG K S, LIU S, JIANG J F, et al. Calculation method about brittleness index in Chang 7 dense reservoir and its field application [J]. Well Testing, 2014, 23(5): 29-33.]
- [20] 杨小兵, 张树东, 钟林, 等. 复杂多矿物组分的页岩气储层横波时差预测方法[J]. 天然气工业, 2015, 35 (3):36-41. [YANG X B, ZHANG S D, ZHONG L, et al. The S-wave time- difference prediction method for complicated mineral shale gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35 (3): 36-41.]
- [21] 徐赣川, 钟光海, 谢冰, 等. 基于岩石物理实验的页岩脆性测井评价方法[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 38-45. [XU G C, ZHONG G H, XIE B, et al. Petrophysical experiment-based logging evaluation method of shale brittleness[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 38-45.]
- [22] MARTIN J. A geomechanical approach to evaluate brittleness using well logs: Mississippian limestone, Northern Oklahoma[D]. Texas: The University of Texas at Arlington, 2015.
- [23] ZHANG D, RANJITH P G, PERERA M S. The brittleness indices used in rock mechanics and their application in shale hydraulic fracturing: A review[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 143: 158-170.
- [24] 石道涵, 张兵, 何举涛, 等. 鄂尔多斯长7致密砂岩储层体积压裂可行性评价[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2014, 29(1): 52-56. [SHI D H, ZHANG B, HE J T, et al. Feasibility evaluation of volume fracturing of Chang-7 tight sandstone reservoir in Ordos Basin [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2014, 29(1): 52-56.]
- [25] GRIESER B, BRARY J. Identification of production potential in unconventional reservoirs[C]. Production and Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, 31 March-3 April, 2007.
- [26] 唐颖, 邢云, 李乐忠, 等. 页岩储层可压裂性影响因素及评价方法[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 356-363. [TANG Y, XING Y, LI L Z, et

- al. Influence factors and evaluation methods of the gas shale fracability[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 356-363.]
- [27] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of northcentral Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 475-499.
- [28] TANG X M, XU S, ZHUANG C, et al. Assessing rock brittleness and fracability from radial variation of elastic wave velocities from borehole acoustic logging[J]. *Geophysical Prospecting*, 2016, 64(4): 958-966.
- [29] 唐晓明, 许松, 庄春喜, 等. 基于弹性波速径向变化的岩石脆裂性定量评价[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(3): 417-424. [TANG X M, XU S, ZHUANG C X, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness and fracability based on elastic-wave velocity variation around borehole. *Petroleum Exploration and Development* 2016, 43(3): 417-424.]
- [30] 董宁, 许杰, 孙赞东, 等. 泥页岩脆性地球物理预测技术[J]. *石油地球物理勘探*, 2013, 48(增刊 1): 69-74. [DONG N, XU J, SUN Z D, et al. Shale brittleness prediction by geophysical methods [J]. *Oil Geophysical Prospecting* 2013(Supplement 1): 69-74.]
- [31] WANG D, GE H, WANG X, et al. A novel experimental approach for fracability evaluation in tight-gas reservoirs[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 23: 239-249.
- [32] ROSS D J K, MARC B R. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(6): 916-927.
- [33] 王玉满, 董大忠, 李建忠, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征[J]. *石油学报*, 2012, 33(4): 551-561. [WANG Y M, DONG D Z, LI J Z, et al. Reservoir characteristics of shale gas in Longmaxi Formation of the Lower Silurian, southern Sichuan [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(4): 551-561.]
- [34] 黄锐, 张新华, 秦黎明. 基于元素含量的页岩矿物成分及脆性评价方法[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(2): 85-90. [HUANG R, ZHANG X H, QIN L M. Method for Evaluation of Shale Mineral Components and Brittleness on Basis of Element Content[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(2): 85-90.]
- [35] 原园, 姜振学, 喻宸, 等. 柴北缘中侏罗统湖相泥页岩储层矿物组成与脆性特征[J]. *高校地质学报*, 2015, 21(1): 117-123. [YUAN Y, JIANG Z X, YU C, et al. Mineral compositions and brittleness of the Middle Jurassic lacustrine shale reservoirs in Northern Qaidam Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2015, 21(1): 117-123.]
- [36] 陈吉, 肖贤明. 南方古生界 3 套富有机质页岩矿物组成与脆性分析[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(5): 822-826. [CHEN J, XIAO X M. Mineral composition and brittleness of three sets of Paleozoic organic-rich shales in China South area [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(5): 822-826.]
- [37] WANG M, WILKINS R W T, SONG G, et al. Geochemical and geological characteristics of the Es3L lacustrine shale in the Bonan Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 138: 16-29.
- [38] 黄军平, 张智盛, 杨占龙, 等. 致密岩石矿物组分含量及脆性指数多元回归定量预测[J]. *新疆石油地质*, 2016, 37(3): 346-351. [HUANG J P, ZHANG Z S, YANG Z L, et al. Quantitative Prediction of Mineral Component Content and Brittleness Index in Tight Rocks Based on Multivariate Regression Analysis[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2016, 37(3): 346-351.]
- [39] MALIVA R G, CLAYTON E A, MISSIMER T M. Application of advanced borehole geophysical logging to managed aquifer recharge investigations[J]. *Hydrogeology Journal*, 2009, 17(6): 1547-1556.
- [40] 罗宁, 唐雪萍, 刘恒, 等. 元素俘获谱测井在储层评价中的应用[J]. *天然气工业*, 2009, 29(6): 43-48. [LUO N, TANG X P, LIU H, et al. Application of Elementary Capture Spectroscopy (ECS) log to the reservoir evaluation [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(6): 43-48.]
- [41] 刘绪纲, 孙建孟, 郭云峰. 元素俘获谱测井在储层综合评价中的应用[J]. *测井技术*, 2005, 29(3): 236-240. [LIU X G, SUN J M, GUO Y F. Application of Elemental Capture Spectroscopy to Reservoir Evaluation [J]. *Well Logging Technology*, 2005, 29(3): 236-240.]
- [42] 马建海, 杨雷, 杨品, 等. 元素俘获测井(ECS)在杂斯库勒油藏描述中的应用[J]. *测井技术*, 2007, 31(6): 596-599. [MA J H, YANG L, YANG P, et al. Application of ECS logs in reservoir description of Gasikule Block [J]. *Well Logging Technology*, 2007, 31(6): 596-599.]
- [43] 范卓颖, 林承焰, 王天祥, 等. 致密地层岩石脆性指数的测井优化建模[J]. *石油学报*, 2015, 36(11), 1411-1420. [FAN Z Y, LIN C Y, WANG T X, et al. Logging optimization on brittle index of tight formation rocks. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(11), 1411-1420.]
- [44] LAI J, WANG G W, HUANG L, et al. Brittleness index estimation in a tight shaly sandstone reservoir using well logs[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 27: 1536-1545.
- [45] ALTINDAG R. Assessment of some brittleness indexes in rock-drilling efficiency[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(3): 361-370.
- [46] MENG F, ZHOU H, ZHANG C, et al. Evaluation methodology of brittleness of rock based on Post-Peak Stress-Strain curves[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(5):1787-1805.
- [47] HOLT R M, FJÄR E, STENEBRÄTEN J F, et al. Brittleness of shales: Relevance to borehole collapse and hydraulic fracturing[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 23(1):200-209.
- [48] RYBACKI E, REINICKE A, MEIER T, et al. What controls the mechanical properties of shalerocks? – Part I: Strength and Young's

- modulus[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 135:702-722.
- [49] RYBACKI E, MEIER T, DRESEN G. What controls the mechanical properties of shale rocks?— Part II: Brittleness. *Journal of Petroleum Science and Engineering*[J]. 2016:39–58.
- [50] GUO Z Q, LI X, LIU C, et al. A shale rock physics model for analysis of brittleness index, mineralogy and porosity in the Barnett Shale[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2013, 10(2):25006-25015(10).
- [51] 秦晓艳, 王震亮, 于红岩, 等. 基于岩石力学特征的陆相泥页岩脆性地球物理测井评价—以鄂尔多斯盆地东南部下寺湾地区延长组长7段为例[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(2): 0762-0769. [QIN X Y, WANG Z L, YU H Y, et al. Geophysical well logging in brittleness evaluation based on rock mechanics characteristic—a case study from the member 7 shale of Yanchang Formation in southeast Ordos Basin[J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(2): 0762-0769.]
- [52] LUAN X, DI B, WEI J, et al. Laboratory measurements of brittleness anisotropy in synthetic shale with different cementation[C]. SEG Annual Meeting, Denver, Colorado, USA, 26-31 October, 2014.
- [53] CHEN, J, ZHANG G, CHEN H, et al. The construction of shale rock physics effective model and prediction of rock brittleness[C]. SEG Annual Meeting, Denver, Colorado, USA, 26-31 October, 2014.
- [54] GUO J C, ZHAO Z, HE S, et al. A new method for shale brittleness evaluation[J]. *Environmental Earth Science*, 2015, 73(10):5855-5865.
- [55] 杨建, 付永强, 陈鸿飞, 等. 页岩储层的岩石力学特性[J]. *天然气工业*, 2012, 32(7): 12-15. [YANG J, FU Y Q, CHEN H F, et al. Rock mechanical characteristics of shale reservoir. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(7): 12-15.]
- [56] 郝建飞, 周灿灿, 李霞, 等. 页岩气地球物理测井评价综述[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(4): 1624-1632. [HAO J F, ZHOU C C, LI X, et al. Summary of shale gas evaluation applying geophysical logging. *Progress in Geophysics*[J], 2012, 27(4): 1624-1632.]

Research progress in brittleness index evaluation methods with logging data in unconventional oil and gas reservoirs

LAI Jin¹, WANG Guiwen^{1,2}, FAN Zhuoying¹, CHEN Jing¹, WANG Shuchen¹, ZHOU Zhenglong¹, FAN Xuqiang¹

1 College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract Unconventional oil and gas reservoirs typically require fracturing to achieve industrial capacity. Logging evaluation for rock brittleness is one of the important factors that should be considered in the design of fracturing for unconventional oil and gas reservoirs. At home and abroad, the brittleness index is defined variably and calculated by different methods. However, there is a lack of a complete research method flow for brittleness index evaluation with logging data. This paper reviews the history of the oil and gas reservoir brittleness index, provides a scientific evaluation of brittleness index definitions and summarizes brittleness index calculation methods. Finally, the Chang 7 tight oil reservoir in Ordos Basin is taken as an example for discussing the calculation processes and effectiveness of logging evaluation methods for brittleness index. When there are comprehensive wave and shear wave logging data, the rock brittleness index can be calculated directly by Poisson's ratio and Young's modulus method or by using mineral composition which could be gained from either Elemental Capture Spectroscopy (ECS) logging curves or optimization method based on conventional logging data. X-ray diffraction data and regression of GR/Pe can also be used to establish an empirical formula for the brittleness index which is suitable for the target study layers to achieve logging evaluation of the brittleness index. Finally, the problems existing in the brittleness index evaluation with logging data are discussed, and the future development direction is put forward. The research results can provide scientific guidance for drilling and fracturing layer optimization of unconventional oil and gas reservoirs.

Keywords brittleness index; unconventional oil and gas resources; reservoirs; logging evaluation; Chang 7 tight oil

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.028