

致密储层脆性特征及对天然裂缝的控制作用

——以鄂尔多斯盆地陇东地区长7致密储层为例

赵向原^{1,2},曾联波²,祖克威³,胡向阳¹,焦军⁴,朱利锋⁵,史今雄²

[1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249; 3. 中国石化中原油田分公司勘探开发科学研究院,河南 郑州 450018; 4. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院,陕西 西安 710018; 5. 山西省地质调查院,山西 太原 030006]

摘要:研究致密储层脆性特征及对天然裂缝的控制作用对天然裂缝定量预测具有重要意义。在总结了国内外脆性测试的20余种方法的基础上,重点论述了非常规油气中脆性评价方法的发展和应用情况,并以鄂尔多斯盆地陇东地区长7致密储层为例,在天然裂缝发育特征的基础上,对储层脆性特征进行评价,并探讨储层脆性对裂缝的控制作用。研究表明,陇东地区长7储层发育多组高角度构造裂缝,这些裂缝广泛分布在不同的岩性中。储层中不同岩性脆性特征差异性较大,其中砂岩脆性最大,含泥质砂岩次之,泥岩脆性最小,表现出随着泥质含量增加,脆性指数逐渐减小的特征。在特定的古构造应力背景下,储层脆性控制了天然裂缝的发育特征及发育程度。当岩层脆性指数大于某一值时更易发育高角度裂缝,而低于这一值时更易发育中-低角度裂缝。脆性也控制了储层自身的破裂能力。随着岩层脆性指数增大,在构造应力作用下岩层越易发生破裂导致裂缝发育程度较高;而脆性指数越低,岩层越易发生形变而非破裂,裂缝发育程度较弱或基本不发育。

关键词:脆性特征;天然裂缝;致密储层;延长组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Brittleness characteristics and its control on natural fractures in tight reservoirs: A case study from Chang 7 tight reservoir in Longdong area of the Ordos Basin

Zhao Xiangyuan^{1,2}, Zeng Lianbo², Zu Kewei³, Hu Xiangyang¹, Jiao Jun⁴, Zhu Lifeng⁵, Shi Jinxiang²

(1. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450018, China; 4. Exploration and Development Research Institute, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 5. Shanxi Geological Survey, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: Study of brittleness of tight reservoir and its effect on natural fractures is of great significance to quantitative prediction of natural fractures in tight reservoirs. This paper summarized more than 20 brittleness testing methods, focusing on the development and application of brittleness evaluation methods for unconventional oil and gas reservoirs. Moreover, it also evaluated the brittleness characteristics of tight reservoir and its effect on natural fractures in the Chang 7 tight reservoir in Longdong area of Ordos Basin. The results show that several groups of high angle structural fractures are developed widely in intervals of various lithologies in the Chang 7 reservoir in Longdong area. Sandstones show the highest brittleness, followed by shaly sandstones, and mudstones has the lowest brittleness. The brittleness decreases with the increase of shale content. On the specific paleo-structure stress background, rock brittleness controls the development characteristics and development degree of natural fractures. There is a brittleness threshold, above which high angle fractures are more likely to develop, while below which it is likely to develop low angle fractures. Brittleness also controls rock fracturing ability. When brittleness index is large, rock is easier to fracture under the structure stress, resulting in more fractures. In contrast, when it is low, rock deforms instead of fracturing, thus fractures are poorly developed and even not developed.

Key words: brittleness characteristics, natural fracture, tight reservoir, Yanchang Formation; Ordos Basin

收稿日期:2015-08-28;修订日期:2015-12-20。

第一作者简介:赵向原(1983—),男,博士,低渗透油气田开发地质。E-mail:auxus@sina.com。

通讯作者简介:曾联波(1967—),男,博士、博士生导师,储层裂缝形成与分布预测。E-mail:lbzeng@sina.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05013-004)。

近年来,致密油、致密气等非常规油气资源作为现实的油气接替资源,在美国、加拿大以及澳大利亚等国家成功实现了规模开发^[1-5],已经成为全球能源结构中的重要角色^[6]。美国致密油产量实现跨越式增长主要得益于借鉴了页岩气开发中的相关技术^[7],而我国致密油的发展起步较晚,总体来说仍处于准备和探索阶段^[1,8]。经过近几年的探索实践,我国在陆相致密油地质评价方法上取得了较为系统的认识^[7],致密油勘探取得了重要突破,在松辽盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、准葛尔盆地、渤海湾盆地、柴达木盆地、酒泉盆地、吐哈盆地等均发现了规模较为可观的致密油资源,分布范围较广、资源潜力较大,勘探前景十分广阔^[1-2,9-11]。

致密油是致密储层油的简称,赋存于致密砂岩、泥灰岩、白云岩等非常规储层中^[5,8]。这类非常规储层具有孔隙度小、渗透率低等特点,一般无自然产能,需要通过大规模压裂才能形成工业产能^[1]。开发实践表明,这类储层除储层物性较差以外,还普遍发育天然裂缝^[12-15],裂缝的发育情况是选取致密油“甜点”所要参考的一项重要指标^[16],因此,弄清天然裂缝的发育规律及控制因素,定量评价天然裂缝的发育程度对致密油的有效开发具有重要意义。笔者通过对鄂尔多斯盆地陇东地区长7致密油储层研究发现,天然裂缝的发育特征除了与岩性、岩层厚度、沉积微相和岩层非均质性等因素有关外^[17],还与储层脆性密切相关,储层脆性对天然裂缝的发育特征及发育程度均具有一定的控制作用。前人并未开展过储层脆性与天然裂缝发育特征的相关性研究,为此,本文利用岩心、测井及岩石力学测试等资料,以鄂尔多斯盆地陇东地区长7致密油储层为例,在总结了前人脆性相关成果的基础上,探讨储层脆性特征及其对天然裂缝的控制作用。

1 研究区概况

鄂尔多斯盆地是一个大型的陆内叠合克拉通拗陷盆地^[18-19],盆地可划分为6个一级构造单元,即北部伊盟隆起、西部天环坳陷和西缘冲断带、南部渭北隆起、东部晋西挠褶带和中部伊陕斜坡^[20-21],研究区位于伊陕斜坡的西南部(图1)。鄂尔多斯盆地演化过程中先后经历了吕梁、晋宁、加里东、海西、印支、燕山及喜马拉雅等多期构造运动旋回^[21]。从三叠纪开始,盆地进入内陆湖盆演化阶段,在三叠纪晚期,沉积了一套以大型内陆坳陷盆地为背景,以河流和湖泊相为主的陆源碎屑岩沉积体系^[22-23]。该套上三叠统延长组为一套灰绿色、灰色中厚层粉细砂岩、粉砂岩和深灰色、灰黑色泥岩沉积^[23],从上至下共分10个油层组(长1-

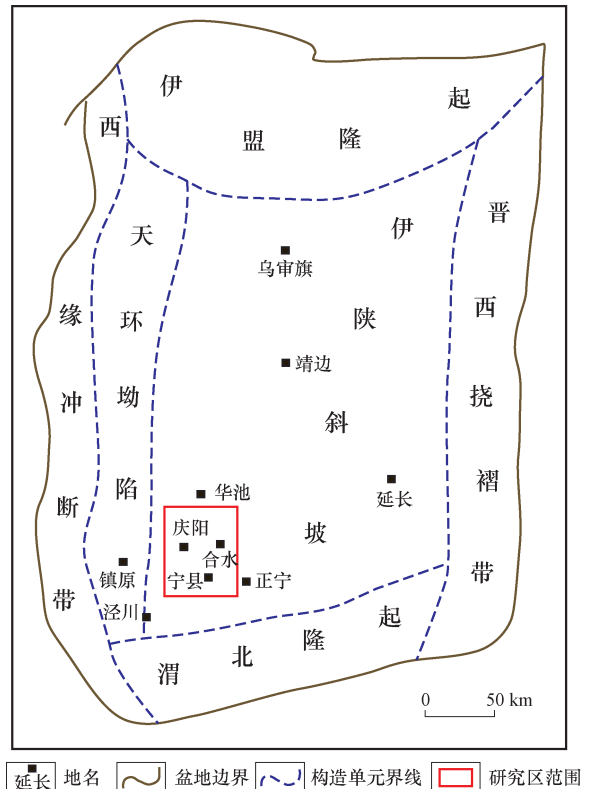


图1 鄂尔多斯盆地构造单元划分及研究区位置

Fig. 1 Schematic map of the Ordos Basin showing major tectonic units and location of the study area

长10),经历了完整的湖盆形成、发育、扩张、萎缩及消亡的沉积演化旋回^[23-26]。其中长7油层组又被划分为3个小层,从上至下分别为长7-1、长7-2、长7-3小层^[25],长7-3小层沉积时期为整个湖盆演化扩张阶段的最鼎盛时期,沉积了盆地中生界主要的烃源岩层,长7-2和长7-1小层沉积时期,由于湖水面积不断减少,湖侵作用逐渐减弱,发育一系列三角洲前缘砂体与半深湖-深湖浊积砂体^[25]。长7油层组储层致密,储集层空气渗透率一般小于 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为典型的致密油储层^[2,25,27]。延长组沉积以后,在后续的沉积、成岩演化过程中经历了燕山期和喜马拉雅期构造运动,岩心和露头观察表明,在这两期构造运动作用下,长7致密储层发育多组天然裂缝^[17,28]。

2 脆性的概念及度量方法

脆性既是一种变形特性又是一种材料特性^[29],它是岩石本身最重要的力学性质之一。目前,有关脆性的定义和度量还没有统一的说法,不同的学者先后从不同方面对于岩石的脆性进行了定义和描述^[30]。Morley^[31]和Hetényi^[32]定义脆性为岩石韧性的缺失。地质及其有关科学词汇(glossary of geology and related sciences)定义脆性为材料的一种属性,即发生破裂或断裂时很少或者没有发生塑性变形的特性^[33]。Obert

和 Duvall^[34] 认为, 铸铁或者岩石等材料达到或者超过屈服应力强度后便会产生细小裂纹或发生破裂, 那么这类材料被认为是脆的。Ramsay^[35] 认为, 当岩石的内聚力被破坏, 岩石就会发生脆性破坏。Hucka 和 Das^[36] 总结了前人对脆性的描述认为, 具有较高脆性的材料具有以下特征: 较低的延展性、断裂破坏、由细粒组分构成、较高的抗压与抗张强度比、高回弹能、较大的内摩擦角、压痕测试中裂缝发育。Goktan^[37] 认为脆性岩石与脆性较弱的岩石相比具有较低的比能 (specific energy)。李庆辉等^[38] 对页岩脆性破裂机制结合断裂特征定义脆性, 认为脆性是材料的综合特性, 是在自身天然非均质性和外在特定加载条件下产生内部非均匀应力并导致局部破坏, 进而形成多维破裂面的能力。

在脆性的度量方面, 由于脆性没有统一的定义, 所以脆性的度量方法也没有固定形式。Honda 和 Sana-

da^[39] 通过对试样进行室内测试, 提出了基于宏观和微观硬度差异的脆性评价方法; Protodyakonov^[40] 提出利用普氏强度系数和细粒物质的百分含量计算煤的脆性; Hucka 和 Das^[36] 对当时已有的衡量脆性的方法进行了总结, 并认为采用抗压强度和抗张强度的差异表示脆性适合评价像煤一样的易碎材料; Lawn 和 Marshall^[41] 基于硬度提出利用硬度和断裂韧性表征材料脆性; 李庆辉等^[38] 提出基于岩石应力-应变曲线峰后特性评价岩石脆性的指标。可以说, 随着岩石力学的不断发展, 众多学者结合各类试验和测试方法基于不同角度 (如强度、硬度、全应力-应变曲线、加卸载试验、内摩擦角、贯入试验、碎屑含量、矿物成分等) 并根据不同的目的和评价对象, 提出了多种度量脆性的方法 (表 1), 并应用于岩石、矿物材料的脆性评价及工程地质等方面。

表 1 计算岩石脆性 (B) 的经验公式

Table 1 List of empirical equations for computing rock brittleness

文献	公式	方法描述或变量说明 (括号内为对应变量单位)	方法基础
Honda 和 Sanada ^[39]	$B_1 = (H_\mu - H)/K$	宏观硬度 H 和微观硬度 H_μ 差异, K 为渗透率	基于硬度
Protodyakonov ^[40]	$B_2 = q\sigma_c$	q 为粒径小于 0.60mm 碎屑百分比, σ_c 为抗张强度, MPa	基于碎屑含量
Lawn 和 Marshall ^[41]	$B_3 = H/K_{IC}$	硬度 H 与断裂韧性 K_{IC} (MPa · m ^{1/2}) 之比	基于硬度
Hucka 和 Das ^[36]	$B_4 = \varepsilon_r/\varepsilon_t$	可恢复应变 ε_r 与总应变 ε_t 之比	基于加载、卸载试验
Hucka 和 Das ^[36]	$B_5 = W_r/W_t$	可恢复应变能 W_r (J) 与总应变能 W_t (J) 之比	基于加载、卸载试验
Hucka 和 Das ^[36]	$B_6 = \sigma_c/\sigma_T$	单轴抗压强度 σ_c (MPa) 与巴西抗拉强度 σ_T (MPa) 之比	基于强度特征
Hucka 和 Das ^[36]	$B_7 = (\sigma_c - \sigma_T)/(\sigma_c + \sigma_T)$	单轴抗压强度 σ_c (MPa) 与巴西抗拉强度 σ_T (MPa) 之比	基于强度特征
Hucka 和 Das ^[36]	$B_8 = \sin\varphi$	φ (°) 为莫尔包络线上 $\sigma_n = 0$ 时所对应的内摩擦角	基于内摩擦角
Hucka 和 Das ^[36]	$B_9 = 45 + \varphi/2$	φ (°) 破坏面与最大主应力作用面的夹角	基于内摩擦角
Bishop ^[42]	$B_{10} = (\tau_p - \tau_r)/\tau_p$	应力峰值强度 τ_p (MPa) 与残余强度 τ_r (MPa) 的函数关系	基于全应力-应变曲线
Andreev ^[29]	$B_{11} = \varepsilon_{ll} \times 100\%$	ε_{ll} 为试样破坏时不可恢复轴应变	基于加载、卸载试验
Quinn ^[43]	$B_{12} = HE/K_{IC}^2$	硬度 H 、杨氏模量 E (MPa) 和断裂韧性 K_{IC} (MPa · m ^{1/2}) 之间的函数关系	基于硬度
Quinn ^[43]	$B_{13} = S_{20}$	S_{20} 为粒径小于 11.2mm 碎屑百分比	基于碎屑含量
冯涛等 ^[44]	$B_{14} = \alpha\sigma_c\varepsilon_t/(\sigma_T\varepsilon_b)$	α 为调节参数, 一般为 0.1; σ_c (MPa) 和 σ_T (MPa) 分别为单轴抗压强度和抗张强度, ε_t 和 ε_b 分别为峰值前、后应变	基于强度特征
Altindag ^[45]	$B_{15} = \sigma_c\sigma_T/2$	单轴抗压强度 σ_c (MPa) 与单轴抗张强度 σ_T (MPa) 积的一半	基于强度特征
Hajiabdolmajid 和 Kaiser ^[46]	$B_{16} = (\varepsilon_t^p - \varepsilon_c^p)/\varepsilon_c^p$	ε_t^p 为摩擦强度达到稳定值的塑性极限, ε_c^p 为粘聚力达到残余值的塑性极限	基于全应力-应变曲线
Copur 等 ^[47]	$B_{17} = p_{inc}/p_{dec}$	载荷增量 p_{inc} (MPa) 与载荷减量 p_{dec} (MPa) 的比值	基于贯入试验
刘恩龙等 ^[48]	$B_{18} = 1 - e^{M/E}$	M 为软化模量, E (MPa) 为杨氏模量	基于应力-应变曲线
Yagiz ^[49]	$B_{19} = F_{max}/P$	载荷 F_{max} (MPa) 与贯入深度 P 之比	基于贯入试验
Greiser 等 ^[50]	$B_{20} = (E_{归-化} + \nu_{归-化})/2$	杨氏模量 E (MPa) 与泊松比 ν 归一化后的均值	基于全应力-应变曲线
Sondergeld 等 ^[51]	$B_{21} = W_{Qtz}/(W_{Qtz} + W_{Carb} + W_{Clays})$	脆性矿物含量 W_{Qtz} 占总矿物含量百分比	基于矿物成分含量
李庆辉等 ^[38]	$B_{22} = B'_1 + B'_2$	$B'_1 = (\varepsilon_{BRIT} - \varepsilon_n)/(\varepsilon_m - \varepsilon_n)$, $B'_2 = \alpha CS + \beta CS + \eta$, $CS = \varepsilon_p(\sigma_p - \sigma_r)/[\sigma_p(\varepsilon_r - \varepsilon_p)]$ 。其中, ε_{BRIT} 为峰值应变参数, ε_m 和 ε_n 为最大、最小峰值应变, α, β, η 分别为标准化系数	基于全应力-应变曲线

随着非常规油气资源在能源结构中所占的比例越来越大,尤其是页岩气、致密油气等资源,若要进行有效开发,必须对非常规储层进行压裂改造,因此,岩石的脆性研究变得越来越重要^[1,16,52-53]。除了从岩石力学等角度来评价岩石的脆性,有学者开始尝试从岩石矿物成分及含量等其他角度来研究和评价页岩的脆性程度。Jarvie等^[54]通过对Barnett页岩研究发现,其脆性与岩石中石英、碳酸盐及粘土矿物含量有关。Grieser等^[50]研究发现,页岩脆性对水力压裂缝的连通以及压裂缝的形态具有重要影响,脆性较小的页岩水力压裂缝几何形态相对较规则,一般产生两翼对称的单条缝或具有较少分支的多缝,而脆性较大的页岩压裂时则可产生复杂的缝网;同时,研究表明脆性大的页岩具有较大的杨氏模量和较小的泊松比,脆性较小的页岩一般具有较小的杨氏模量和较大的泊松比,并根据这一特性提出了计算页岩脆性指数的新方法(表1中 B_{20})。Rickman等^[52]在统计北美泥页岩相关数据基础上,根据上述方法对页岩的脆性指数进行了计算,并绘制了页岩杨氏模量、泊松比和脆性指数的交会图,同时根据脆性指数的大小并结合压裂的各项工艺参数,制作了“基于脆性指数及压裂工艺预测压裂缝形态综合表”。Sondergeld等^[51]综合Jarvie和Rickman等人的研究成果,认为脆性较大的页岩通常石英矿物含量较高,而脆性较小的页岩粘土矿物的含量较高,并从脆性岩石矿物含量角度定义了脆性指数的计算公式(表1中 B_{21}),同时利用 B_{20} 与 B_{21} 两种方法对加拿大地区Horn River(Muskwa)盆地的页岩储层进行了脆性计算,对比发现两种方法计算的脆性指数能很好的吻合。

上述求取脆性指数的方法主要用于页岩气的开发实践中,而对于致密砂岩储层来说,还没有专门的脆性指数计算方法。目前大部分专家均采用借鉴页岩脆性指数的计算方法,来评价致密砂岩储层脆性并取得了较好的效果^[1,16,55-57],即更多的采用表1中 B_{20} 和 B_{21} 两种方法。需要说明的是,在岩石脆性指数的众多评价方法中,依据岩石矿物含量来评价岩石的脆性为目前公认的比较可靠的方法,但在工程应用中因为油田数据的限制,该方法有一定的局限性,而从岩石力学实验角度来求取岩石的脆性,也因为实验条件及数据的不连续性限制了该方法在工程上的应用。为此,多数学者采用应用广泛且成本较低的常规测井资料求取动态岩石力学参数^[58],并通过岩石力学实验获得的静态岩石力学参数对其进行校正^[59],通过公式 B_{20} 求取脆性指数来进行致密储层可压性评价及“甜点”选取,也取得了较好的应用效果,并说明了方法的可靠性。为此,本文以鄂尔多斯盆

地陇东地区长7致密油储层为例,采用上述方法对储层脆性指数进行计算,进而评价脆性对裂缝的控制作用。

3 裂缝发育特征

根据野外相似露头及岩心观察可知,陇东地区长7致密砂岩储层主要发育构造裂缝,其次为近水平的成岩裂缝。构造裂缝又可分为砂岩中的构造裂缝(图2a)和泥质岩中滑脱裂缝(图2b),这类裂缝具有分布规则、延伸较长、产状稳定、缝面平直等特点;其中砂岩中的构造裂缝大多数为高角度,与层面近垂直,多成组出现,发育范围广。泥岩滑脱裂缝一般为中-低角度,缝面具有镜面特征,缝面上可见顺裂缝倾向的划痕及微小阶步。成岩裂缝主要包括砂岩中的近平理缝(图2c)及泥岩中顺岩层微层面发育的层理缝,其中砂岩中的成岩裂缝含油性较好,一般延伸几厘米,具有顺层理面弯曲、断续、尖灭的特点,但由于此类裂缝规模较小、连通性较差,且在上覆岩层压力作用下呈闭合状态,对油藏开发的影响较小。

在致密透砂岩油藏中,构造裂缝在注水开发中起到的作用最大^[60]。根据相似露头、定向岩心及成像测井资料统计,陇东地区长7致密储层主要发育4组构造裂缝,分别为NEE-SWW向,近E-W向,近S-N向,NW-SE向,其中以发育前三组裂缝为主,发育程度依次减弱。大部分构造裂缝纵向延伸高度小于0.8 m,裂缝主要在单岩层内发育,极少发育穿层裂缝,相同组系、相同规模的裂缝在岩层内呈等间距分布(图2d);平面上单条裂缝延伸长度一般不超过20 m,露头观察若干条单缝呈雁列式排列构成一条延伸较远的裂缝带,但相邻裂缝间并不互相连通,而是存在较小的间距(图2e)。研究区绝大多数构造裂缝为有效裂缝,裂缝被充填情况较少,其中仅有2.7%的裂缝被方解石全充填(图2f),裂缝在致密油藏开发过程中可作为优势渗流通道进而影响注水开发效果。

4 储层脆性特征对裂缝的控制

研究表明,在鄂尔多斯盆地陇东地区特定地质历史时期的构造应力背景下,长7致密砂岩储层构造裂缝发育特征及发育程度与储层脆性密切相关,主要表现在以下两个方面。

4.1 储层脆性控制裂缝的发育特征

按照岩性分类,研究区长7储层下部(主要是长7-3小层)沉积一套泥页岩(不作为本论文研究对象),其

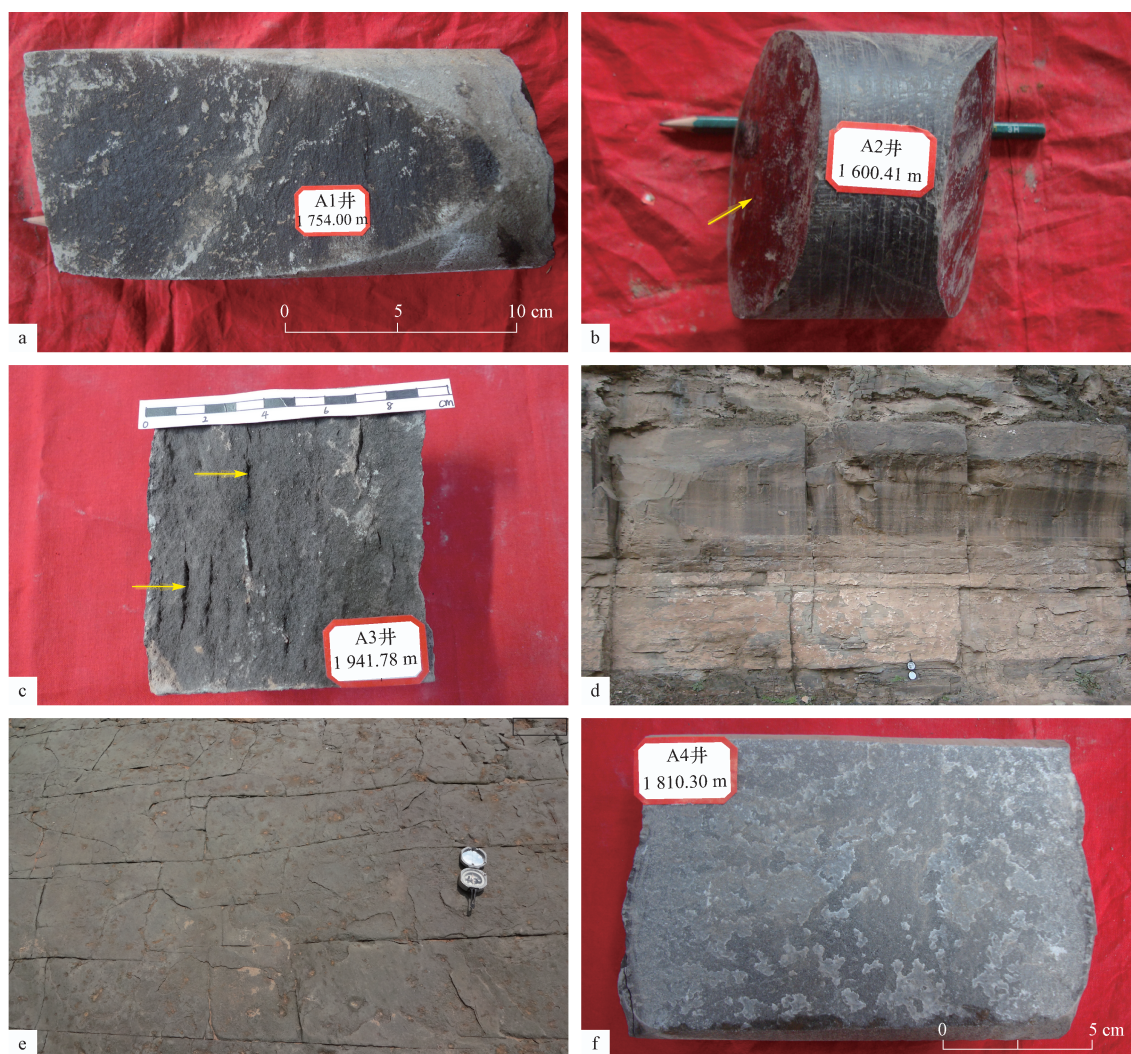


图2 陇东地区长7致密储层裂缝特征

Fig. 2 Characteristics of the fractures in the Chang 7 tight reservoir in Longdong area

a. A1井,深度1754.00 m,细砂岩,岩心可见一条缝面规则的高角度构造裂缝,且裂缝面被石油充填;b. A2井,深度1600.41 m,泥岩,岩心可见泥岩中发育两条低角度滑脱裂缝,缝面光滑,具有镜面特征;c. A3井,深度1941.78 m,细砂岩,岩心可见近水平层理缝,顺微层理面发育且延伸距离较短;d. 延河剖面,观察长7地层发育一组高角度构造裂缝,裂缝在单岩层内发育,具有明显的等间距特征;e. 延河剖面,观察岩层平面上近E-W向裂缝呈雁列式排列,两条相邻裂缝首位之间并不相互连通而是存在较小的间距;f. A4井,深度1810.30 m,细砂岩,岩心可见一条被方解石充填了的高角度构造裂缝

中上部(长7-1、长7-2小层)主要沉积细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩等类型。为方便研究,本文将细砂岩与粉砂岩统一称为砂岩,将泥质粉砂岩与粉砂质泥岩统一称为含泥质砂岩。通过对研究区50余口井目的层的岩心裂缝统计发现(图3),绝大多数高角度构造裂缝(倾角 $\geq 60^\circ$)发育在砂岩中,占裂缝总数的77.9%;而中-低角度裂缝(倾角 $< 60^\circ$)在各类岩性中均有发育,但就每一种岩性来看,与高角度裂缝相比,中-低角度裂缝在泥岩中和含泥质砂岩中所占比例较大,其中泥岩内中-低角度裂缝占泥岩裂缝数量的达一半以上。上述特征反映了不同岩性中天然裂缝发育特征差异性较大,为此论文首先对不同岩性的脆性特征进行评价,进而探讨储层脆性与裂缝发育特征之间的关系。

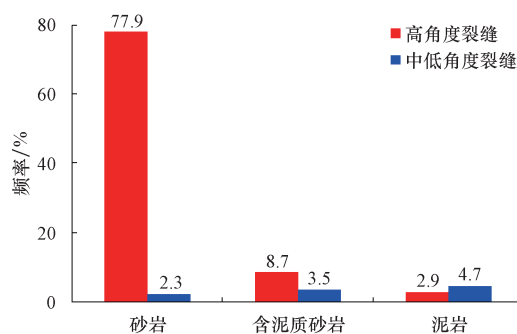


图3 岩心观察陇东地区长7致密储层不同岩性、不同产状裂缝数量频率分布

Fig. 3 Frequency histogram of fractures with different occurrence and in different lithology in cores of the Chang 7 tight reservoir in the Longdong area

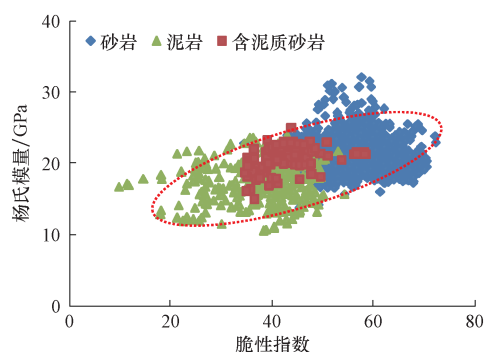


图4 陇东地区长7致密储层不同岩性杨氏模量和脆性指数交会图

Fig. 4 Cross plot of Young's Modulus vs. brittleness index of different lithologies in the Chang 7 tight reservoir in the Longdong area

岩心观察的50口井中有14口具有常规测井资料,在进行岩心与测井相互标定之后,利用表1中公式 B_{20} 的方法对各井目的层段的脆性指数进行了计算,分别统计砂岩、含泥质砂岩及泥岩3种不同岩性的脆性指数,绘制了不同岩性杨氏模量(E)与脆性指数($Brit$)交会图(图4)。研究发现,砂岩具有较大的杨氏模量和脆性指数,泥岩的杨氏模量和脆性指数值均较小,而含泥质砂岩的情况居于上述两者之间,且按照砂岩、含泥质砂岩、泥岩的顺序,即随着泥质含量的增加,不同岩性大致表现出脆性指数逐渐减小序列,即说明砂岩脆性最大,含泥质砂岩次之,泥岩脆性最小(图4)。结合图3中的认识,可初步认为脆性较大的砂岩中更容易发育高角度构造裂缝,而随着脆性逐渐减小,越来越表现为发育中-低角度裂缝。但情况是否如上述认识呢?笔者通过岩心裂缝描述标定测井计算脆性指数结果,精确统计了发育不同倾角裂缝的岩层脆性指数,分别绘制了发育高角度裂缝的岩层脆性指数分布图(图5a)和发育中-低角度裂缝的岩层脆性指数分布图(图5b),结果表明,发育高角度裂缝的岩层的脆性指数主要分布在50~70,而发育中-低角度裂缝的岩

层的脆性指数主要分布在30~50。由此可见,岩层的脆性对发育裂缝的倾角特征具有一定的控制作用,即当岩层脆性大于某一值时更易发育高角度裂缝,而低于这一值时更易发育中-低角度裂缝。

需要说明的是,尽管不同岩性因为脆性指数存在上述界限值而导致裂缝的发育特征不同,但是裂缝倾角与发育裂缝的岩层的脆性指数之间可能并不一定具有连续的线性关系。如在研究区,当岩层脆性指数大于50时,绝大多数裂缝以 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的倾角发育,而倾角为 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 的裂缝数量则较少,这说明脆性指数大于某一界限的岩层一旦发生破裂,便会更多地以高角度的形式发育裂缝,储层的脆性指数与裂缝倾角之间并不呈一定的正相关关系,这一观点有待在以后的工作中继续开展研究并加以论证。

4.2 储层脆性控制储层自身的破裂能力

本文所指的储层破裂能力主要是指储层在外界应力的作用下发生破裂的难易程度,它控制了储层天然裂缝的发育程度,储层破裂能力与储层本身所具有的脆性指数大小密切相关。根据对A1井长7-1小层的脆性指数所做的计算结果与岩心裂缝观察描述结果进行匹配后发现(图6),裂缝几乎全部发育在储层脆性指数较高的部位,两者具有很好的对应关系,而脆性指数较低的部位并不发育裂缝。这说明在构造应力的作用下,脆性指数大的岩层更易发生破裂,而脆性指数小的岩层不易发生破裂。

为了进一步论证上述观点,再次通过岩心与测井相互标定,利用常规测井资料对研究区所有岩心观察井目的层段的脆性指数进行了计算,并得到不同岩性层的平均脆性指数,在此基础上,统计分析裂缝性岩层所占比例(图7,图8)。从图7中可以看出,长7储层不同岩性层平均脆性指数分布在20~70,主要分布在30~60(占86.4%),其中裂缝性岩层比例占所有岩层数量的14.4%,主要分布在平均脆性指数大于30的

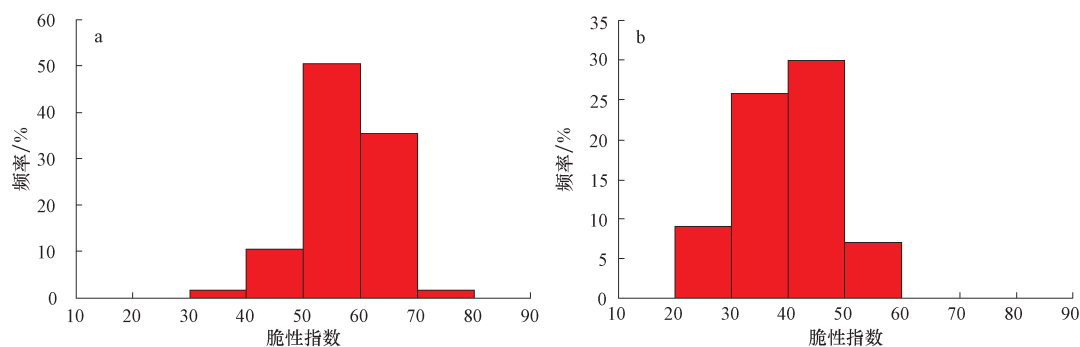


图5 长7储层发育不同倾角裂缝岩层的脆性指数分布

Fig. 5 Frequency histogram of brittleness index of layers with fractures of different angles in the Chang 7 reservoir

a. 发育高角度裂缝岩层的脆性指数分布;b. 发育中-低角度裂缝岩层的脆性指数分布

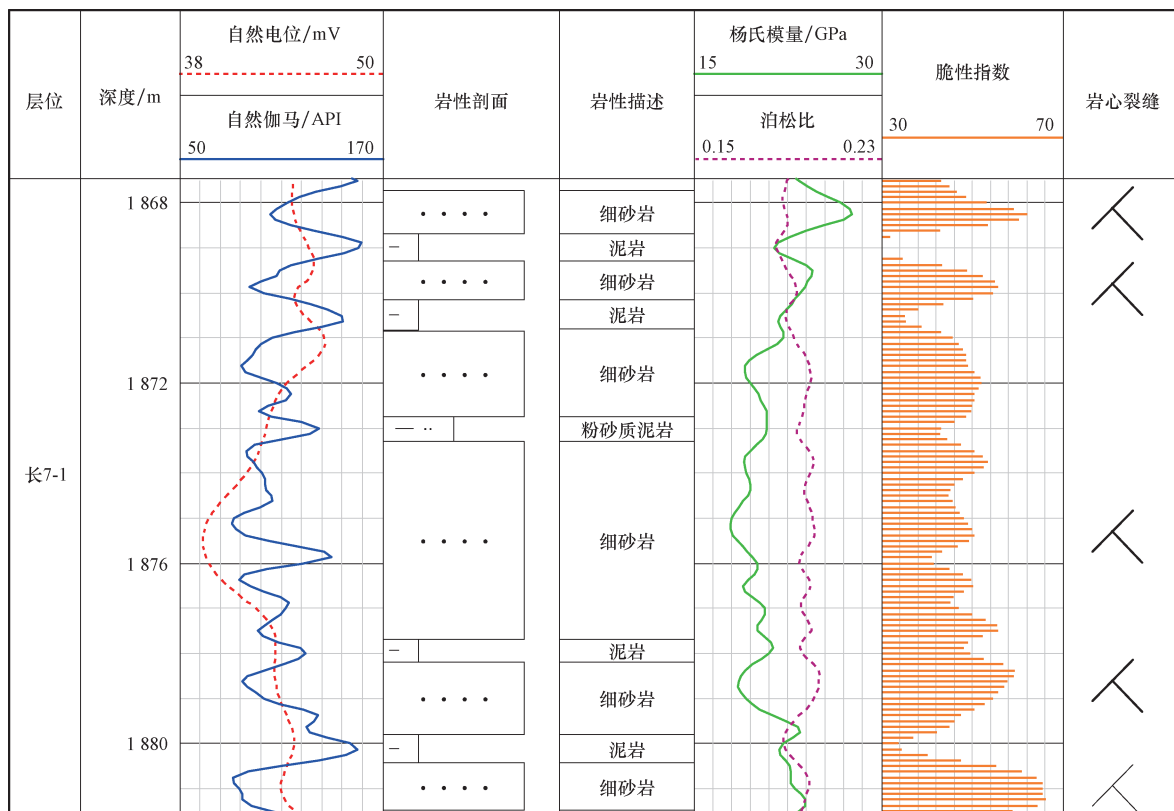


图6 陇东地区A1井长7-1小层脆性指数与岩心裂缝关系

Fig. 6 Relationship between brittleness index and fractures in cores from the Chang 7-1 thin layer in A1 well in the Longdong area

岩层中。从图8可以看出,平均脆性指数为10~20的岩层中没有裂缝性岩层发育,平均脆性指数为20~30的岩层中裂缝性岩层占10.6%,平均脆性指数为30~40的岩层中裂缝性岩层占4.1%,平均脆性指数为40~50的岩层中裂缝性岩层占5.2%,平均脆性指数为50~60的岩层中裂缝性岩层占26.8%,平均脆性指数为60~70的岩层中裂缝性岩层占47.3%,平均脆性指数为70~80的岩层中裂缝性岩层占87.5%。上述结果表现出当岩层平均脆性指数大于50时,裂缝性岩层所占比例突然增大,且随着脆性指数越大,裂缝性岩层所占比例越高的特征,而当岩层平均脆性指数分布在20~50时,裂缝性岩层所占比例较小,但当岩层平均脆性指数小于30时,裂缝性岩层所占比例反而增大。这是由于当岩层平均脆性指数大于50时,岩层内主要发育高角度裂缝,且随着脆性指数越大,裂缝越发育,而当岩层平均脆性指数小于50时,岩层内主要发育中-低角度裂缝,尤其是当岩层的脆性指数小于30时,泥岩中中-低角度滑脱裂缝最为发育,但若岩层平均脆性指数再次减小(<20时),构造应力更多的是使岩层发生变形而不是破裂,裂缝基本不再发育。这充分说明,岩层脆性指数越小,其发生破裂的情况越少,而随着脆性指数的增大,岩层越易发生破裂,脆性控制了岩层自身的破裂能力,进而控制了不同脆性岩层内的裂缝发育程度。

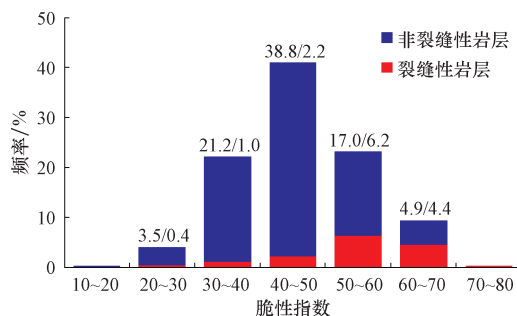


图7 陇东地区岩心观察井长7储层不同岩层平均脆性指数分布

Fig. 7 Frequency histogram of average brittleness index of different rock layers in the Chang 7 reservoir of the cored wells in the Longdong area

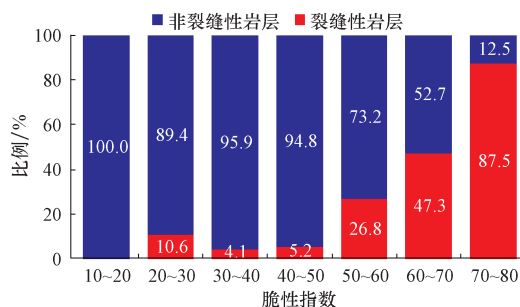


图8 陇东地区岩心观察井长7储层内不同脆性指数岩层中裂缝性岩层所占比例

Fig. 8 Percentage of fractured layers in intervals with different brittleness index in of Chang 7 reservoir of the cored wells in the Longdong area

5 讨论

由于脆性指数的定义和评价方法没有统一固定的内容和形式,因此有学者对部分脆性评价方法之间的相关性进行过深入研究,结果表明不同的评价方法之间在脆性评价的结果上确实存在较大差别^[30,36]。本文在评价致密砂岩储层脆性过程中并没有对上述各类方法进行优选,而是直接选取了大家普遍采用的方法,总结在实际工作中的应用情况看,该方法在评价储层脆性特征及与裂缝发育特征的关系上能够较好的反映出规律性,从侧面也反映了这种方法的可行性。

脆性是岩石的重要力学性质之一,影响着岩石力学行为,因此与裂缝发育特征密切相关。论文初步讨论了储层脆性对裂缝的控制作用,但笔者认为尚有许多问题有待深入研究。如在致密储层脆性评价方法上,可综合相关力学试验及材料微观测试分析等研究手段提出新的评价方法;在储层脆性与天然裂缝发育特征的关系上可开展两者之间的定量评价,其成果还可进一步应用到储层天然裂缝的定量预测及裂缝三维建模中。

6 结论

1) 脆性既是一种变形特性又是一种材料特性,目前关于脆性的概念还没有公认而统一的说法,在脆性的度量方法上也没有固定形式。应尽快发展一种适用于致密砂岩储层的脆性评价方法,以更好的指导实践。

2) 鄂尔多斯盆地陇东地区长7致密砂岩储层天然裂缝较为发育,裂缝发育特征及发育程度与储层脆性密切相关。长7储层中砂岩脆性最大,含泥质砂岩次之,泥岩脆性最小,表现出随着泥质含量的增加,脆性指数逐渐减小的特征;脆性控制了裂缝的倾角特征,表现在当岩层脆性大于某一值时更易发育高角度裂缝,而低于这一值时更易发育中-低角度裂缝;同时脆性也控制了储层自身的破裂能力,即随着岩层脆性指数增大,岩层越易发生破裂。

参 考 文 献

- [1] 赵政璋,杜金虎. 致密油气[M]. 北京:石油工业出版社,2012.
Zhao Zhengzhang, Du Jinhui. Tight oil and gas reservoirs [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [2] 姚涇利,邓秀芹,赵彦德,等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J]. 石油勘探与开发,2013,40(2):150-158.
Yao Jingli, Deng Xiuqin, Zhao Yande, et al. Characteristics of tight oil

- in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 150-158.
- [3] 林森虎,邹才能,袁选俊,等. 美国致密油开发现状及启示[J]. 岩性油气藏,2011,23(4):25-30.
Lin Senhu, Zou Caineng, Yuan Xuanjun, et al. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication [J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 25-30.
- [4] 宋岩,姜林,马行陟. 非常规油气藏的形成及其分布特征[J]. 古地学报,2013,15(5):605-614.
Song Yan, Jiang Lin, Ma Xingzhi. Formation and distribution characteristics of unconventional oil and gas reservoirs [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 605-614.
- [5] 邹才能,陶士振,侯连华,等. 非常规油气地质[M]. 北京:地质出版社,2011.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. Unconventional oil and gas geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [6] 杨华,李士祥,刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报,2013,34(1):1-11.
Yang Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 1-11.
- [7] 杜金虎,刘合,马德胜,等. 试论中国陆相致密油有效开发技术[J]. 石油勘探与开发,2014,41(2):198-205.
Du Jinhui, Liu He, Ma Desheng, et al. Discussion on effective development techniques for continental tight oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 198-205.
- [8] 贾承造,邹才能,李建忠,等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报,2012,33(3):343-350.
Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343-350.
- [9] 黄薇,梁江平,赵波,等. 松辽盆地北部白垩系泉头组扶余层致密油成藏主控因素[J]. 古地学报,2013,15(5):635-644.
Huang Wei, Liang Jiangping, Zhao Bo, et al. Main controlling factors of tight oil accumulations in the Fuyu Layer of Cretaceous Quantou Formation in northern Songliao Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 635-644.
- [10] 廖群山,胡华,林建平,等. 四川盆地川中侏罗系致密储层石油勘探前景[J]. 石油与天然气地质,2011,32(54):815-822.
Liao Qunshan, Hu Hua, Lin Jianping, et al. Petroleum exploration prospect of the Jurassic tight reservoirs in central Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(54): 815-822.
- [11] 付锁堂,张道伟,薛建勤,等. 柴达木盆地致密油形成的地质条件及勘探潜力分析[J]. 沉积学报,2013,31(4):672-681.
Fu Suotang, Zhang Daowei, Xue Jianqin, et al. Exploration Potential and Geological Conditions of Tight Oil in the Qaidam Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 672-681.
- [12] 白斌,邹才能,朱如凯,等. 川西南部须二段致密砂岩储层构造裂缝特征及其形成期次[J]. 地质学报,2012,86(11):1841-1846.
Bai Bin, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. Characteristics and formation stage-times of structure fractures in tight sandstone reservoir of the 2nd Member of Xujiahe Formation in Southwestern Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(11): 1841-1846.
- [13] 巩磊,曾联波,张本健,等. 九龙山构造致密砾岩储层裂缝发育的控制因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(6):

- 6-12.
- Gong Lei, Zeng Lianbo, Zhang Benjian, et al. Control factors for fracture development in tight conglomerate reservoir of Jiulongshan structure[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2012, 36(6): 6-12.
- [14] 邢振辉, 程林松, 周新桂, 等. 鄂尔多斯盆地北部塔巴庙地区上古生界致密砂岩气藏天然裂缝形成机理浅析[J]. 地质力学学报, 2005, 11(1): 33-42.
- Xing Zhenhui, Cheng Linsong, Zhou Xingui, et al. Mechanism of natural fracture formation in the Upper Paleozoic tight sand gas reservoirs in the Tabamiao area, north Ordos Basin[J]. Journal of Geomechanics, 2005, 11(1): 33-42.
- [15] 李义军, 李进步, 杨仁超, 等. 苏里格气田东二区致密砂岩储层裂缝与含气性的关系[J]. 天然气工业, 2012, 32(6): 28-30.
- Li Yijun, Li Jinbu, Yang Renchao, et al. Relationship between gas bearing capacity and reservoir fractures of tight sand reservoirs in the eastern block 2 of the Sulige Gas Field[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(6): 28-30.
- [16] 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(1): 14-27.
- Zou Caineng, Yang Zhi, Zhang Guosheng, et al. Conventional and unconventional petroleum “orderly accumulation”: Concept and practical significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 14-27.
- [17] 王晓东, 祖克威, 李向平, 等. 宁合地区长7致密储集层天然裂缝发育特征[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(4): 394-397.
- Wang Xiaodong, Zu Kewei, Li Xiangping, et al. The characteristics of natural fractures in tight sandstone reservoirs of Chang-7 Member in Ningxian-Heshui area, Ordos Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(4): 394-397.
- [18] 李士祥, 邓秀芹, 庞锦莲, 等. 鄂尔多斯盆地中生界油气成藏与构造运动的关系[J]. 沉积学报, 2010, 28(4): 798-807.
- Li Shixiang, Deng Xiuqin, Pang Jinlian, et al. Relationship between petroleum accumulation of Mesozoic and tectonic movement in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(4): 798-807.
- [19] 吴崇筠, 薛书浩. 中国含油气盆地沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- Wu Chongjun, Xue Shuhao. Sedimentology of Petroliferous Basins in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993.
- [20] 武富礼, 李文厚, 李玉宏, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组三角洲沉积及演化[J]. 古地理学报, 2004, 6(3): 307-315.
- Wu Fuli, Li Wenhui, Li Yuhong, et al. Delta sediments and evolution of the Yanchang Formation of Upper Triassic in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(03): 307-315.
- [21] 赵振宇, 郭炎如, 王艳, 等. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展[J]. 特种油气藏, 2012, 19(5): 15-20.
- Zhao Zhenyu, Guo Yanru, Wang Yan, et al. Study progress in tectonic evolution and paleogeography of Ordos Basin[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2012, 19(05): 15-20.
- [22] 刘自亮, 朱筱敏, 廖纪佳, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘上三叠统延长组层序地层学与砂体成因研究[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 1-9.
- Liu Ziliang, Zhu Xiaomin, Liao Jijia, et al. Sequence stratigraphy and genesis of sand bodies of the Upper Triassic Yanchang Formation in the southwestern margin of Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 1-9.
- [23] 喻建, 杨亚娟, 杜金良. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组湖侵期沉积特征[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 181-187.
- Yu Jian, Yang Yajuan, Du Jinliang. Sedimentation during the transgression period in Late Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(02): 181-187.
- [24] 陈全红, 李文厚, 高永祥, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组深湖沉积与油气聚集意义[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2007, 37(增刊I): 39-48.
- Chen Quanhong, Li Wenhui, Gao Yongxiang, et al. The deep lacustrine sedimentary and its importance of oil-gas accumulation of Yanchang Formation in Late Triassic of Ordos Basin[J]. Science in China (Series D), 2007, 37(1): 39-48.
- [25] 杨华, 窦伟坦, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7沉积相分析[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 254-263.
- Yang Hua, Dou Weitan, Liu Xianyang, et al. Analysis on sedimentary facies of member 7 in Yanchang Formation of Triassic in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2): 254-263.
- [26] 李文厚, 庞军刚, 曹红霞, 等. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组沉积体系及岩相古地理演化[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2009, 39(3): 501-506.
- Li Wenhui, Pang Jungang, Cao Hongxia, et al. Depositional system and paleogeographic evolution of the late Triassic Yanchang Stage in Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2009, 39(3): 501-506.
- [27] 付锁堂, 邓秀芹, 庞锦莲. 晚三叠世鄂尔多斯盆地湖盆沉积中心厚层砂体特征及形成机制分析[J]. 沉积学报, 2010, 28(6): 1081-1089.
- Fu Suotang, Deng Xiuqin, Pang Jinlian. Characteristics and mechanism of thick sandbody of Yanchang Formation at the centre of Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(6): 1081-1089.
- [28] 曾联波, 李忠兴, 史成恩, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 174-180.
- Zeng Lianbo, Li Zhongxing, Shi Chengen, et al. Characteristics and origin of fractures in the extra low-permeability sandstone reservoirs of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Acta Geological Sinica, 2007, 81(02): 174-180.
- [29] Andreev G E. Brittle failure of rock materials; test results and constitutive models[M]. Netherlands: A. A. Balkema Press, 1995.
- [30] Kahraman S, Altindag R. A brittleness index to estimate fracture toughness[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004(41): 343-348.
- [31] Morley A. Strength of materials[M]. London: Longman Green, 1944.
- [32] Hetényi M. Handbook of experimental stress analysis[M]. New York: John Wiley, 1966.
- [33] Jesse V H. Glossary of geology and related sciences[M]. Washington D. C.: American Geological Institute, 1960.
- [34] Obert L, Duvall W I. Rock mechanics and the design of structures in rock[M]. New York: John Wiley, 1967.
- [35] Ramsay J G. Folding and fracturing of rocks[M]. London: McGraw-Hill, 1967.
- [36] Hukka V, Das B. Brittleness determination of rocks by different methods[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining

- Sciences and Geomechanics Abstracts, 1974, 11(10): 389–392.
- [37] Goktan R M. Brittleness and micro scale rock cutting efficiency[J]. Mining Science Technology, 1991, 13: 237–241.
- [38] 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): 1681–1685.
- 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): 1681–1685.
- [39] Honda H, Sanada Y. Hardness of coal[J]. Fuel, 1956, 35: 451.
- [40] Protodyakonov M M. Mechanical properties and drill-ability of rocks[C]//Proceedings of the 5th Symposium on Rock Mechanics. Twin Cities, USA: University of Minnesota Press, 1963: 103–118.
- [41] Lawn B R, Marshall D B. Hardness, toughness and brittleness: an indentation analysis[J]. Journal of American Ceramic Society, 1979, 62(7/8): 347–350.
- [42] Bishop A W. Progressive failure with special reference to the mechanism causing it[C]//Oslo: Proceedings of the Geotechnical Conference, 1967: 142–150.
- [43] Quinn J B, Quinn G D. Indentation brittleness of ceramics: a fresh approach[J]. Journal of Materials Science, 1997, 32(16): 4331–4346.
- [44] 冯涛, 谢学斌, 王文星, 等. 岩石脆性及描述岩爆倾向的脆性系数[J]. 矿冶工程, 2000, 20(4): 18–19.
- Feng Tao, Xie Xuebin, Wang Wenxing, et al. Brittleness of Rocks and Brittleness Indexes for Describing Rockburst Proneness[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2000, 20(4): 18–19.
- [45] Altindag R. The role of rock brittleness on analysis of percussive drilling performance (in Turkish)[J]. Proceedings of 5th National Rock Mech, 2000, 105–112.
- [46] Hajiabdolmajid V, Kaiser P. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(1): 35–48.
- [47] Copur H, Bilgin N, Tuncdemir H, et al. A set of indices based on indentation test for assessment of rock cutting performance and rock properties[J]. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003, 103(9): 589–600.
- [48] 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.
- [49] Yagiz S. An investigation on the relationship between rock strength and brittleness[C]//Proceedings of the 59th Geological Congress of Turkey. Ankara, Turkey: MTA General Directory Press, 2006: 352.
- [50] Grieser B, Bray J. Identification of production potential in unconventional reservoirs[J]. SPE 106623, 2007.
- [51] Sondergeld C H, Newsham K E, Comisky J T, et al. Petrophysical considerations in evaluating and producing shale gas resources[J]. SPE 131768, 2010.
- [52] Rickman R, Mullen M, Petre 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.
- [53] 郭海萱, 郭天魁. 胜利油田罗家地区页岩储层可压性实验评价[J]. 石油实验地质, 2013, 35(3): 339–346.
- Guo Haixuan, Guo Tiankui. Experimental evaluation of crushability of shale reservoirs in Luoia area, Shengli Oilfield[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(3): 339–346.
- [54] Jarvie 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.
- [55] 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): 52–55.
- Shi Daoan, Zhang Bing, He Jutao, 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): 52–55.
- [56] 马旭, 郝瑞芬, 来轩昂, 等. 苏里格气田致密砂岩气藏水平井体积压裂矿场试验[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(5): 742–747.
- Ma Xu, Hao Ruifen, Lai Xuanang, et al. Field test of volume fracturing for horizontal wells in Sulige tight sandstone gas reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(5): 742–747.
- [57] 梁浩, 李新宁, 马强, 等. 三塘湖盆地条湖组致密油地质特征及勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(5): 563–572.
- Liang Hao, Li Xinning, Ma Qiang, et al. Geological features and exploration potential of Permian Tiaohu Formation tight oil, Santanghu Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(5): 563–572.
- [58] 归榕, 万永平. 基于常规测井数据计算储层岩石力学参数[J]. 地质力学学报, 2012, 18(4): 418–424.
- Gui Rong, Wan Yongping. Rock mechanics parameter calculation based on conventional logging data: A case study of Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. Journal of Geomechanics, 2012, 18(4): 418–424.
- [59] 林英松, 葛洪魁, 王顺昌, 等. 岩石动静力学参数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 216–222.
- Lin Yingsong, Ge Hongkui, Wang Shunchang, et al. Testing study on dynamic and static elastic parameters of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 216–222.
- [60] 王平. 有天然裂缝的砂岩油藏的开发[J]. 石油学报, 1993, 14(4): 69–75.
- Wang Ping. Development of sandstone reservoir with naturel fractures[J]. Acta Petrolei Sinica, 1993, 14(04): 69–75.

(编辑 董立)