

# 非常规油气储层脆性评价与预测方法研究进展

曹东升<sup>1,2</sup>, 曾联波<sup>1,2\*</sup>, 吕文雅<sup>1,2</sup>, 徐翔<sup>1,2</sup>, 田鹤<sup>1,2</sup>

1 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

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

\* 通信作者, lbzeng@sina.com

收稿日期: 2020-12-08

国家自然科学基金委员会—中石化联合基金“页岩油气甜点预测的储层地质力学基础理论研究”(U1663203)资助

**摘要** 脆性对深层岩体工程和资源开发利用,特别是非常规油气资源开发具有重要意义。本文从脆性的内涵和影响因素入手,总结分析了脆性评价和预测的基本原理及研究进展。岩石的岩性组分、层理和损伤等结构特征、孔隙流体及其赋存状态、围压、温度、岩体测量尺度以及受力过程等都会对脆性有影响。高脆性非常规油气储层具有脆性矿物含量高、杨氏模量大、破裂前总应变小、应力—应变曲线峰前阶段耗散能以及峰后阶段断裂能小、低延性、内摩擦角大、破裂后易形成复杂缝网系统的特征。非常规油气储层脆性研究应该重点关注地层的可压性和形成复杂缝网系统的能力。按照评价资料类型,脆性评价主要有力学试验评价和基于测钻井资料评价两种方法,脆性预测主要通过叠前地震反演。脆性各向异性及主控因素研究有利于不同类型非常规储层评价预测方法的优选和改进。不同资料脆性研究思路和方法不同,适用性也有差异,多资料多方法相互融合、相互验证是未来重要发展方向。人工智能包括机器学习等算法可以有机融合多元数据,充分挖掘有效信息,具有更加高效精确的优势,在非线性多因素控制的脆性研究中,发展潜力较大。

**关键词** 非常规油气储层; 脆性影响因素; 脆性评价方法; 脆性预测方法; 脆性研究进展

## Progress in brittleness evaluation and prediction methods in unconventional reservoirs

CAO Dongsheng<sup>1,2</sup>, ZENG Lianbo<sup>1,2</sup>, LYU Wenya<sup>1,2</sup>, XU Xiang<sup>1,2</sup>, TIAN He<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting in China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 College of Geoscience, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

**Abstract** Brittleness is of great significance for deep rock engineering and resource development, especially for unconventional oil and gas resources. Brittleness evaluation, fundamental principles of its prediction and research progress are summarized and analyzed. The structural characteristics of rock such as lithologic composition, bedding and damage, pore fluid and its occurrence characteristics, confining pressure, temperature, rock mass measurement scale, and stress path all impact brittleness. High brittleness unconventional reservoirs are characterized by a high content of brittle minerals, high Young's modulus, small total strain before fracture, dissipated energy in the pre-peak stage of the stress-strain curve, little fracture energy in the post-peak stage, low ductility, large internal friction angle and easy formation of complex fracture network systems in hydraulic fracturing. Unconventional reservoir brittleness research should focus on the formation frangibility and the ability to form complex fracture

引用格式: 曹东升, 曾联波, 吕文雅, 徐翔, 田鹤. 非常规油气储层脆性评价与预测方法研究进展. 石油科学通报, 2021, 01: 31-45

CAO Dongsheng, ZENG Lianbo, LYU Wenya, XU Xiang, TIAN He. Progress in brittleness evaluation and prediction methods in unconventional reservoirs. Petroleum Science Bulletin, 2021, 01: 31-45. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.003

network systems. According to the types of data, brittleness evaluation methods mainly include mechanical experiment evaluation and evaluation based on logging and drilling data. Brittleness prediction is mainly based on prestack seismic inversion. The study of brittleness anisotropy and controlling factors help optimize and improve evaluation and prediction methods for different types of unconventional reservoirs. Due to the different research ideas and data sources, the applicability of different methods is also different. The integration and mutual verification of multiple data and methods is an important future development direction. Artificial intelligence, including machine learning algorithms, can organically integrate multiple data, collate effective information, and has the advantage of being more efficient and accurate. Artificial intelligence is promising in geological research controlled by multiple nonlinear factors such as reservoir brittleness.

**Keywords** unconventional reservoir; factors affecting brittleness; brittleness evaluation method; brittleness prediction method; progress in brittleness research

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.003

## 0 引言

进入 21 世纪,非常规油气勘探开发取得了一系列突破性进展,已成为全球油气生产的重要组成部分<sup>[1]</sup>。泥页岩、致密砂岩、致密灰岩等非常规油气储层的孔渗普遍非常低,一般条件下无自然产能或者自然产能很低,需要进行规模压裂改造,才能形成稳定的工业产量<sup>[2]</sup>。脆性是表示岩石可钻性、评价井壁稳定性和压裂效果的关键参数<sup>[3-4]</sup>,也是非常规油气储层重要评价指标<sup>[2]</sup>。

脆性是岩土(特别是深埋岩石)工程一种非常重要的力学性质,如岩爆主要发生在硬脆性围岩中,其脆性程度是决定岩爆风险的关键内因<sup>[5]</sup>。目前,全球资源开采和能源开发都向深部发展,国外开采超过 1000 m 的金属矿床将近百余座;我国铜陵狮子山铜矿、开滦赵各庄煤矿、某些核废料处置填埋库以及南水北调工程部分隧洞段埋深都达到 1000 m 左右<sup>[6]</sup>。

因此,从常规低孔低渗储层,到非常规泥页岩、致密砂岩、致密灰岩储层,甚至包括地热和干热岩等能源开采;从石油、煤炭及金属矿开采到交通水利工程、核工业废料填埋处理等,岩石脆性都是一项基础性研究,并在飞速发展。在非常规油气勘探开发过程中,特别是页岩和致密砂岩油气,储层脆性评价和预测更是不可或缺的研究内容。随着油气勘探普遍向深部地层发展,对应的地层温度升高、围压增加、流体环境也更加复杂,脆性受外部因素影响也更加明显,已有脆性评价方法适用性需要进一步分析明确。在知网以脆性为主题、地质和石油天然气范围内检索结果随时间变化表明:从 2011 年开始,脆性研究成果呈指数上升,到 2016 年达到峰值,成果数量约为 2011 年的 4 倍;此后又迅速下降,到 2020 年又回落到 2011 年的发表数量,脆性相关研究明显遇到了瓶颈(图 1)。

为更合理的评价预测非常规油气储层脆性特征,本文综合多学科研究成果,分析了脆性影响因素,对已有评价预测方法进行分类,并对典型方法进行分析对比,最后总结已有研究方法的特点,对脆性研究未来发展趋势进行分析展望。

## 1 脆性内涵及影响因素

在岩石力学研究中,脆性指物体受力变形很小时就发生破裂的性质;与之对应的是延性,指物体承受较大塑性变形而不丧失其承载力的性质;二者与弹性、塑性都属于岩石的变形特征<sup>[7]</sup>。这一定义并未被各研究领域广泛使用,不断有新定义被提出<sup>[4]</sup>,一定程度上说明脆性内涵较为丰富。

### 1.1 岩石脆性内涵

岩石脆性定义较多,展示出丰富的内涵<sup>[8]</sup>。很多文献都采用岩石破裂时总应变的大小来表征脆性<sup>[9-10]</sup>,工程上多采用这一标准,认为破裂时总应变大于 5%

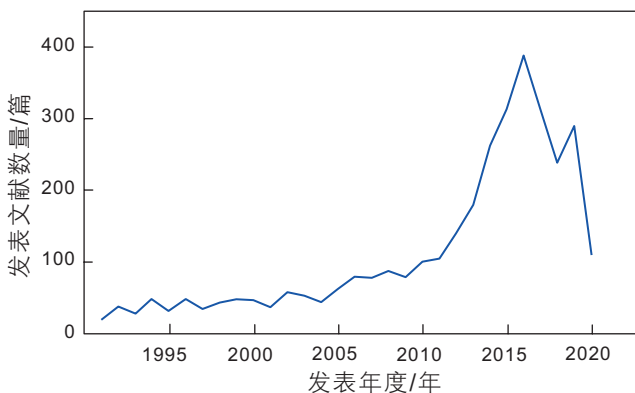


图 1 脆性相关文献发表量随年度变化趋势(知网检索结果)  
Fig. 1 The trend of brittleness related literature publication (search results from CNKI)

为塑性材料,反之为脆性材料;也有学者认为脆性是岩石材料断裂时黏聚力转化为内摩擦力的能力<sup>[11]</sup>或者岩石本征内聚力与其在某种加载方式下破坏时裂纹扩展阻力的比值<sup>[11]</sup>。脆性地层的主要特征为:高脆性岩层受力破裂后,其裂缝往往比较发育,对压裂作业非常敏感,能迅速形成复杂网状裂缝,而脆性指数低的储集层一般形成简单的双翼型裂缝<sup>[13-14]</sup>。高脆性岩石具有低应变时即发生破坏、低延性、内摩擦角大、硬度测试时裂纹发育完全、单轴抗压强度与巴西劈裂试验抗拉强度比值大等特征<sup>[4,15]</sup>。

## 1.2 岩石脆性影响因素

岩石脆性影响因素较多,不仅由内部组分和结构控制,所处温压及流体条件对岩石脆性同样有很大影响。前人研究表明:岩石脆性影响因素主要有岩石组分、层理和损伤等先存弱面结构、孔隙流体及其压力、围压、温度、岩体测量尺度以及受力演化过程等。

岩性及矿物成份是不同岩石的本质区别,普遍认为沉积地层中白云石、石英和长石等矿物表现为脆性,黏土、岩屑和有机质表现为塑性<sup>[16-18]</sup>。脆性矿物含量越高,岩石脆性越大;反之,脆性较低。当其中若干种矿物含量有一定关系时,并不是所有矿物都符合这一规律,例如,海相页岩中硅质(石英)为生物成因时,硅质含量受有机质含量控制,不仅硅质含量与脆性为正相关,有机质含量与脆性也是正相关关系<sup>[18]</sup>。不同岩石中脆性矿物含量与岩石脆性定量关系及其机理仍是目前有待明确的问题<sup>[4,15,19]</sup>。

沉积地层和变质岩往往具有层理或先存软弱面,对岩石脆性影响较大(图2),这些先存软弱面结构使得抗剪强度和脆性产生各向异性<sup>[4,15,19-20]</sup>。例如层状砂岩脆性与层理夹角为幂指数关系<sup>[16]</sup>,页岩脆性随层理倾角增大表现为先降低后增加的趋势<sup>[8]</sup>。

自然条件下岩石为多孔介质,孔隙中往往会赋存流体,孔隙流体的存在降低孔隙可压缩性,为岩石提供附加刚度,在一定程度会改变应力应变曲线形态,使得岩石有效模量增大<sup>[23-24]</sup>,也是导致岩石动态杨氏模量大于静态杨氏模量的一个原因<sup>[25-26]</sup>,甚至影响工程中岩爆发生区域<sup>[27]</sup>。但在泥页岩和黏土骨架中,会发生水化作用,反而降低岩石脆性、杨氏模量和抗压强度<sup>[24,26]</sup>。进一步研究表明岩石强度取决于围压与孔隙流体压力之差,即有效围压<sup>[28]</sup>,也有文献指出脆性岩石强度与地层压力表现为非线性增加、线性增加、负相关三个阶段<sup>[6]</sup>,或者脆性是孔隙度的线性函数<sup>[29]</sup>。显然,由于岩性和孔隙流体压力差异,孔隙流体对脆

性的影响不是简单的线性关系。

岩石的力学性质是指岩石受力后表现出的力学特性,围压在地质研究中多指周围岩体对岩石施加的压力;在岩石力学试验中是柱样圆周上施加的环向压力。试验研究中发现随着围压增大,岩石脆性不断降低<sup>[7-8,16]</sup>。还有研究表明致密砂岩在低围压时,抗压强度随围压线性增大;当围压超过某一值后,为增长率减小的非线性增大;当围压到达40 MPa左右,抗压强度基本不再增加<sup>[30]</sup>。另外,真三轴覆压试验表明,中间主应力和最小主应力对岩石脆性也会有影响<sup>[7,31-32]</sup>,且关系较为复杂,表现为多区间多种函数关系<sup>[6]</sup>。

温度是很多试验过程不被考虑的因素,但对岩石力学性质及脆性也具有很大影响(图3)。围压约为50 MPa,温度由25 °C到200 °C的试验过程中,砂岩的弹性模量降低20%左右<sup>[33]</sup>。在温度增加过程中岩石峰值强度降低,弹性模量降低,线弹性阶段的应变减小,峰后阶段的应变增加<sup>[34]</sup>,峰后特性及残余强度表现出脆性降低的演化特点<sup>[35]</sup>。也有学者提出:在一定温度(150 °C左右)范围内,泥岩的弹性模量、泊松比、抗压强度的变化与温度没有明显函数关系,围压一定时,岩石力学参数保持相对一致<sup>[36]</sup>。温度对岩石力学性质的影响,存在多解性,很难用线性关系去概括。

此外,应力加载过程以及岩体非均质性造成的尺寸效应对岩石脆性也有影响<sup>[7,38]</sup>,因此国际岩石力

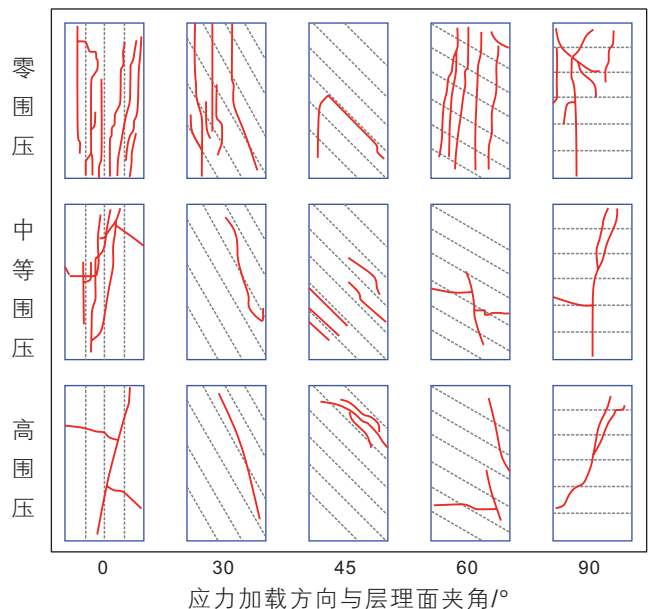


图2 不同围压和应力加载方向下页岩脆性破坏模式(据参考文献[21-22]修改)

Fig. 2 Brittle failure modes of shale under different confining pressures and stress loading directions(modified after reference [21-22])

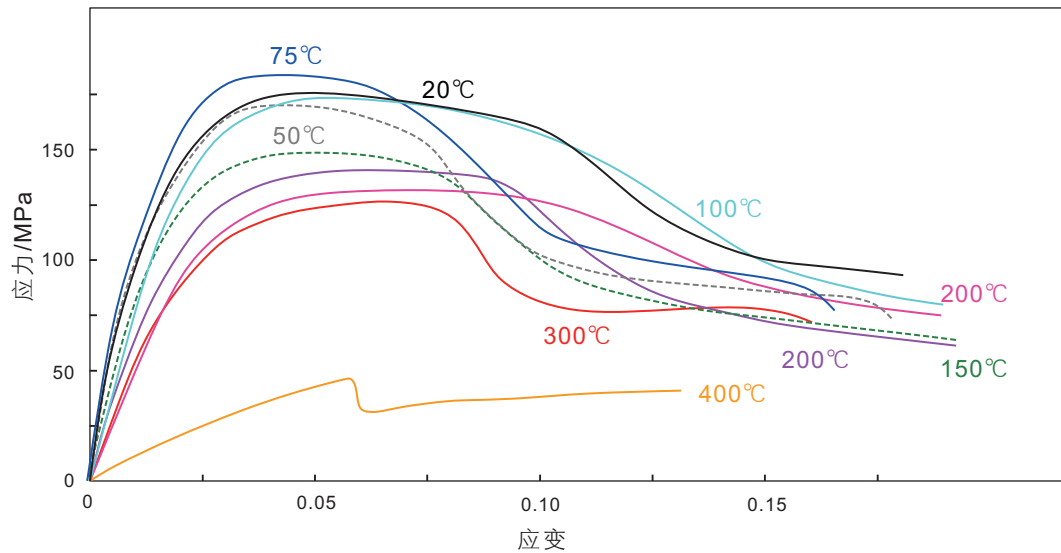


图3 不同温度黑色页岩应力—应变曲线(据参考文献[37]修改)

Fig. 3 Stress-strain curve of black shale at different temperatures(modified after reference [37])

学学会 ISRM 对岩石力学试验试样尺寸有一定的建议。例如,单轴抗压强度试验所使用的柱样高径比为 2.5~3.0,岩石试样的直径不少于 50 mm,含水颗粒岩石试件直径应大于岩石最大颗粒尺寸的 10 倍。

## 2 脆性评价方法

岩石脆性研究在很多行业及学科领域至关重要,特别随着低孔低渗、非常规致密油气的勘探开发,地下岩石脆性研究日益被重视,成为非常规储层评价重要指标。不完全统计,目前岩石脆性评价方法已有数十种<sup>[4, 39]</sup>。近年来脆性研究飞速发展,不断有新方法出现。为全面介绍前人研究成果,下文依据研究手段和评价思路对已有方法分类总结介绍(表 1)。

### 2.1 力学试验评价方法

实验室试样力学试验是最主要的脆性研究手段,目前试验研究装置主要有单轴、三轴压缩试验设备以及改进的刚性试验机、液压伺服系统等,声发射测试和声波速度测量也被一些学者结合使用<sup>[7]</sup>。

三轴压缩试验装置可以分为常规三轴和真三轴两种,真三轴试验装置可以施加任意大小的三个主应力,更加真实的模拟自然条件下复杂应力状态和应力过程。上世纪 70 年代出现了伺服控制刚性试验机,一方面增大了试验机的刚度,另一方面在试验过程中通过反馈系统控制样品的变形,可求得载荷变形全过程曲线。不同岩石种类的全应力—应变曲线<sup>[37]</sup>(图 4)及其计算

得到的参数一定程度上可以代表岩石的脆性<sup>[9-10]</sup>。

目前,基于实验室力学试验数据的脆性评价方法可以分为:基于岩石力学参数(包括强度、弹性模量参数等)建立的脆性指数进行评价、基于应力—应变曲线形态的脆性评价、基于应力—应变能量的脆性指数评价以及通过声波速度求取力学参数后再进行脆性评价等四种主要的评价思路。

#### 2.1.1 岩石力学参数评价方法

研究普遍认为岩石弹性参数能够反映岩石在外界应力作用下发生破坏产生裂缝的能力,学者多利用弹性模量和泊松比来表征岩石脆性,弹性模量越大,泊松比越低,岩石脆性特征越明显,越容易压裂<sup>[17, 40-41]</sup>。此外还有很多基于力学试验参数及其组合来表征岩石脆性的方法(表 2)。

#### 2.1.2 基于应力—应变曲线形态评价方法

通过力学试验获得岩石破坏全过程的应力—应变曲线,不仅可以定量计算力学参数,还可以直接表征岩石在不同应力状态下脆性特性(表 3)。事实上,应力—应变峰前曲线反映了岩石破坏前抵抗非弹性变形的能力,而峰后曲线反应了岩石破坏后承载能力的大小,只考虑峰前或峰后曲线形态不能全面反映岩石脆性<sup>[46]</sup>。研究表明峰后应力降落速度、应力降落幅度等参数可以评价岩石脆性特征<sup>[4, 39]</sup>:峰后应力降越大,相同峰后应力降条件下应力跌落速度越快,脆性越强。

#### 2.1.3 基于应力—应变能量评价方法

岩石在变形到破坏过程中,往往伴随着能量积聚、耗散和释放,根据岩石破坏过程中能量的变化,就可

表 1 脆性评价预测方法及其分类

Table 1 The classification of brittleness' evaluation and prediction methods

研究方式	研究方法
力学试验评价	基于岩石力学参数评价
	基于应力—应变曲线形态评价
	基于应力—应变能量评价
	基于岩石声波速度评价
测井钻井评价	基于动态力学参数评价
	基于脆性矿物含量评价
	基于数学算法的统计回归评价
	基于压裂和钻井资料评价
地震反演预测	叠前反演波速和密度
	叠前直接反演脆性相关弹性阻抗
	基于各向异性等效介质理论模型的弹性参数反演
基于本构模型的数值模拟研究	

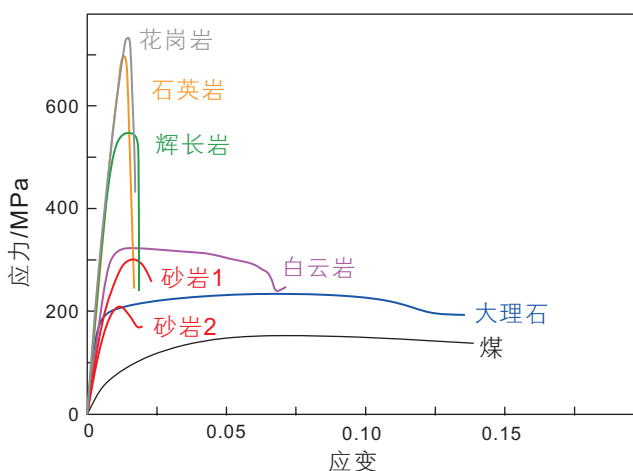


图 4 不同岩性应力—应变曲线图(据参考文献 [37] 修改)  
Fig. 4 Stress strain curves of different lithologies(modified after reference [37])

以表征岩石脆性特征<sup>[16, 49]</sup>。

以I型断裂为例(图 5), 根据能量守恒, 假设试验过程不与外界发生热交换, 外力做功在峰前阶段会转化为两部分能量: 峰前阶段耗散能 $S_{OABCE}$ (图 5 中 OABCE 围成的黄颜色部分的面积)和可恢复弹性应变能 $S_{ECF}$ (图 5 中三角形 ECF 面积)。在峰后阶段, 试样内部储存弹性能不足以维持试样完全断裂, 需要试验装置提供额外能量 $S_{CDHF}$ (蓝色点状线面积)来维持这个过程<sup>[16, 49]</sup>。陈昀<sup>[12]</sup>指出外界供能有限条件下, 峰前耗散能量越小, 可获得表面能就越大, 从而使得峰后断裂在数量上和长度上也越大。因此, 岩石峰前阶段耗散能以及峰后阶段用来维持裂纹扩展的断裂能越小, 岩石脆性程度越强, 理想脆性岩石在峰前阶段不存在

能量耗散过程。

可恢复弹性能和总应变能的比值<sup>[50]</sup>、峰前不可恢复应变能和峰前弹性应变能的比值<sup>[51]</sup>、单位体积变形能与单位面积断裂表面能之比<sup>[52]</sup>、断裂能增量和卸载弹性能增量的比值<sup>[53]</sup>等指标都可以反映岩石脆性特征。同样, 峰前耗散能和峰后断裂能分别反映了岩石抵抗非弹性变形和维持裂缝扩展的能力, 结合峰前耗散能和峰后断裂能可以同时反映岩石脆性破坏难易程度和脆性强弱, 描述不同岩石材料脆性随围压的变化<sup>[8]</sup>。

岩石声发射试验能够定量描述脆性岩石在受荷变形过程中内部晶格错位或微裂纹扩展演化规律, 其结果在一定程度上代表了脆性破裂过程中的能量释放和耗散程度。岩石破坏全过程声发射能量及演化规律也能反映岩石的脆性特征, 并且合理可靠<sup>[16]</sup>。

### 2.1.4 岩石声波速度评价方法

通过岩石纵、横波速度以及密度数据可以求出泊松比、杨氏模量等岩石力学参数, 也可以用来确定岩性和孔隙度、识别裂缝及流体性质等<sup>[54]</sup>。评价思路是将岩石的纵、横波速度转换成动态力学参数, 进一步校正得到静态力学参数, 然后采用基于岩石力学参数的方法进行评价<sup>[55]</sup>。

实验室基于力学试验的脆性评价方法较多, 但是大部分参数只能在实验室条件下获得, 多用于脆性评价, 不利于岩石在不同应力状态下的脆性研究应用<sup>[55]</sup>。

## 2.2 测井钻井评价方法

实验室获得的参数往往不连续, 而且成本较高。

表 2 基于岩石力学参数的脆性评价公式

Table 2 Brittleness evaluation formula based on laboratory data

脆性公式	参数含义	参考文献
$B_1 = \sigma_c \cdot \sigma_t / 2$	$\sigma_c$ 为单轴抗压强度, $\sigma_t$ 为劈裂抗拉强度	Altindag, 2002 <sup>[42]</sup>
$B_2 = \sigma_c / \sigma_t$	$\sigma_c$ 为单轴抗压强度, $\sigma_t$ 为劈裂抗拉强度	Hucka and Das, 1974 <sup>[15]</sup>
$B_3 = (\sigma_c - \sigma_t) / (\sigma_c + \sigma_t)$	$\sigma_c$ 为单轴抗压强度, $\sigma_t$ 为劈裂抗拉强度	Hucka and Das, 1974 <sup>[15]</sup>
$B_4 = E / C$	$E$ , 杨氏模量; $C$ , 抗剪强度	蔡国刚等, 2010 <sup>[20]</sup>
$B_E = \frac{(E - E_{\min})}{(E_{\max} - E_{\min})}; B_\sigma = \frac{(\sigma - \sigma_{\max})}{(\sigma_{\min} - \sigma_{\max})}$	$E_{\max}$ 和 $E_{\min}$ 是杨氏模量最大值、最小值, $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 是泊松比最大值和最小值, $B_E$ 和 $B_\sigma$ 是杨氏模量以及泊松比	Rickman et al., 2008 <sup>[41]</sup>
$B_5 = (B_E \cdot B_\sigma) / 2$ 或 $B_5 = (B_E + B_\sigma) / 2$	相关的中间参数	
$B_6 = 45^\circ + \varphi / 2$	$\varphi$ 是内摩擦角	Hucka and Das, 1974 <sup>[15]</sup>
$B_7 = \sin \varphi$	$\varphi$ 是内摩擦角	Hucka and Das, 1974 <sup>[15]</sup>
$B_8 = 0.918\sigma_c - 2.174\sigma_t - 0.913\rho - 3.807$	$\sigma_c$ 为单轴抗压强度, $\sigma_t$ 为劈裂抗拉强度, $\rho$ 为岩石密度	Yagiz et al., 2009 <sup>[15]</sup>
$B_9 = E / \nu$	$E$ 为杨氏模量, $\nu$ 为归一化泊松比, $\rho$ 为岩石密度	Zhang et al., 2013 <sup>[44]</sup>
$B_{10} = E \cdot \rho / \nu$		
$B_{11} = \frac{3\kappa - 5\lambda}{\lambda} = \frac{2\mu - 2}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} - 4$	$\kappa$ 为体积模量; $\lambda$ 为拉梅常数; $\mu$ 为剪切模量; $\nu$ 为泊松比	Huang et al., 2015 <sup>[45]</sup>

表 3 基于应力应变曲线形态脆性评价公式

Table 3 Brittleness evaluation formula based on stress strain curve shape

脆性公式	参数含义	参考文献
$B_{12} = \varepsilon_{rs} / \varepsilon$	$\varepsilon_{rs}$ 表示可恢复(弹性)应变, $\varepsilon$ 是总应变	Hucka and Das, 1974 <sup>[15]</sup>
$B_{13} = \varepsilon_{irs}$	$\varepsilon_{irs}$ 不可恢复的轴向应变	Andreev, 1995 <sup>[23]</sup>
$B_{14} = (\varepsilon_p - \varepsilon_r) / \varepsilon_p$	$\varepsilon_r$ 为残余应变, $\varepsilon_p$ 是峰值应变	Hajiabdolmajid, 2003 <sup>[47]</sup>
$B_{15} = (\tau_p - \tau_r) / \tau_p$	$\tau_p$ 为峰值剪切强度, $\tau_r$ 是剪切残余强度	Bishop, 1967 <sup>[48]</sup>

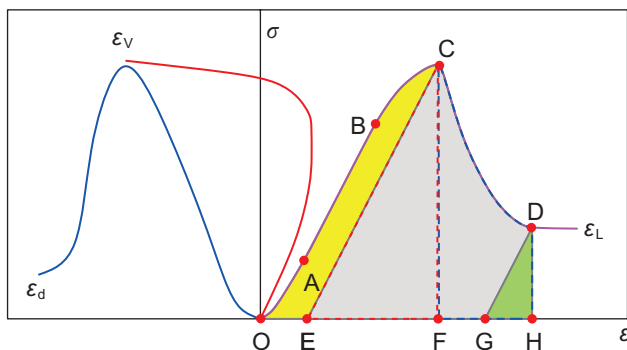


图 5 典型应力—应变曲线示意图(据参考文献[7]修改)

Fig. 5 Typical stress-strain curve diagram(modified after reference [7])

地球物理测井响应包含着岩石矿物成分、岩石力学性质等信息,并且可以获得相对连续的矿物组分和岩石力学参数数据。目前测井数据评价岩石脆性的方法可以分为四类:基于动态力学参数(通过声波测井获得)的脆性评价、基于脆性矿物含量的脆性评价、基于压裂和钻井资料评价以及不考虑力学成因的基于数学算法统计回归评价方法。

2.2.1 基于动态力学参数评价方法

声波测井获得的波速资料需要转化成岩石力学参数,才能对岩石脆性进行评价。岩石的各向异性及非均质性、孔隙流体<sup>[25]</sup>、黏土含量与有效压力<sup>[26]</sup>、密度和围压<sup>[26]</sup>等因素造成动态杨氏模量大于静态杨氏模

量, 导致岩石动态力学参数和静态力学参数有一定差别<sup>[58-59]</sup>。动态参数需要转换成静态力学参数才可用于脆性评价; 在应用过程中, 大部分文献采用线性回归拟合关系来实现杨氏模量和泊松比的动静态转换<sup>[60]</sup>。

值得注意的是工业应用中横波资料相对较少, 阵列声波、偶极和多极声波测井费用相对较高, 应用不是很广泛; 井中的横波信息需要通过其他测井曲线求取, 不同地区各种岩性采用的模型差异较大<sup>[61-62]</sup>, 需要针对性计算求取。

### 2.2.2 基于矿物含量评价方法

复杂孔隙结构的非常规储层是由若干种骨架矿物、胶结物和孔隙流体等几部分组成, 测井值就是这几部分的综合响应。元素俘获谱测井(ESC)是最常用的识别地层矿物组成的一种测井方法, 通过记录所发射中子碰撞产生的伽马射线能谱, 计算出元素含量, 然后依据常见造岩矿物元素种类和百分含量确定出岩石矿物类型<sup>[63]</sup>。也有学者将X射线荧光元素分析技术应用于录井工作中, 可以获取连续的矿物成分含量<sup>[64]</sup>。脆性指数计算公式一般和研究者定义的脆性矿物有关(表4), 其思路仍是用脆性矿物百分含量来表征储层脆性。

以上两种基于测井数据评价方法都可以获得连续的脆性评价结果, 对于钻后射孔段选取具有重要意义。但是, 可直接提供参数的测井方法较为少用, 实际应用中都需要通过普通测井资料求取; 因此, 优选数学算法获得高精度弹性参数和脆性矿物含量成为脆性研究的一个重要方向<sup>[67-69]</sup>。已有学者尝试通过人工神经网络<sup>[70]</sup>、反向传播人工神经网络和超限学习机<sup>[71]</sup>、自适应模糊神经推理系统<sup>[72]</sup>等数学方法建立常规测井与

岩石脆性的对应关系, 并取得较好的应用效果; 在数学模型基础上解释其物理意义是亟需解决的科学问题, 也是进一步优化模型的基础<sup>[73]</sup>。

包括压裂和随钻资料也可以用于脆性评价。例如, 细粒颗粒含量与抗压强度<sup>[74]</sup>、现今垂向有效应力与历史最大垂向有效应力的比值<sup>[75]</sup>、可钻性指数<sup>[42]</sup>、断裂韧性<sup>[13]</sup>、贯入试验中最大贯入力和相应贯入深度之比<sup>[43]</sup>也可以评价岩石的脆性。还有不少学者正在探索综合多种测井资料评价思路共同评价岩石脆性<sup>[4, 30]</sup>, 在多参数综合过程中使用最近邻支持向量机、神经网络等人工智能算法可以提高评价效果<sup>[44, 71]</sup>。

## 3 脆性预测方法

脆性研究方法很多, 但是目前能指导实践生产的预测方法主要是基于地震资料反演的预测方法。进一步可以分为叠前反演波速和密度、叠前直接反演脆性相关弹性阻抗、基于各向异性岩石物理等效介质理论模型弹性参数反演三种主要方法。

叠后地震数据只能反演出纵波阻抗, 而叠前反演则可应用多个叠前数据体联立反演, 同时获得纵、横波速度和密度3个参数, 然后计算弹性参数, 对地下岩层脆性进行评价。

上世纪90年代末, 弹性阻抗(EI)反演被提出<sup>[76]</sup>, 用来反映岩性(图6)和流体检测; EI反演具有更强的抗噪能力, 同时反演精度更高, 可以对岩性和流体进行有效的预测<sup>[77]</sup>。通过直接反演弹性参数预测岩石脆性避免了小角度入射情况下密度反演结果的不稳定性, 并减少由纵横波速向动静态弹性参数转换过程, 使得

表4 基于脆性矿物含量脆性评价公式

Table 4 Brittleness evaluation formula based on brittle mineral contents

脆性公式	参数含义	应用地区	参考文献
$B_{16} = \frac{V_{\text{石英}} + V_{\text{白云石}}}{V_{\text{石英}} + V_{\text{白云石}} + V_{\text{方解石}} + V_{\text{黏土}}}$	$V_{\text{矿物名称}}$ 是对应矿物的含量	蜀南地区页岩	徐赣川等, 2014 <sup>[65]</sup>
$B_{17} = \frac{K \cdot V_{\text{石英}} \cdot 100\%}{V_{\text{石英}} + V_{\text{白云石}} + V_{\text{方解石}} + V_{\text{黏土}}}$	$V_{\text{矿物名称}}$ 是对应矿物的含量; $K$ , 地区修正系数	鄂尔多斯盆地陇东地区长7段致密砂岩	李华阳等, 2014 <sup>[14]</sup>
$B_{18} = \frac{a \cdot V_{\text{石英}} + b \cdot V_{\text{长石}}}{V_{\text{石英}} + V_{\text{长石}} + V_{\text{岩屑}} + V_{\text{黏土}}}$	$a$ 和 $b$ 为石英、长石的脆性权重系数, $V_{\text{矿物名称}}$ 是对应矿物的含量	鄂尔多斯盆地东北部致密砂岩	周雪晴等, 2017 <sup>[66]</sup>
$K_c = \sum_{i=1}^N K_{ci} \cdot W_i$ ; $B_{19} = \frac{K_{c_{\max}} - K_c}{K_{c_{\max}} - K_{c_{\min}}}$	$K_c$ , 岩石的综合断裂韧度; $K_{ci}$ , 第 $i$ 种矿物的断裂韧度; $W_i$ 为第 $i$ 种矿物的体积分数; $K_{c_{\max}}$ 和 $K_{c_{\min}}$ 分别岩石断裂韧度的最大值和最小值	页岩	廖东良等, 2014 <sup>[63]</sup>

反演精度提高的同时,简化了计算流程。Altamar<sup>[78]</sup>研究发现 $\lambda\rho$ (拉梅第一参数与密度乘积)与 $\mu\rho$ (拉梅第二参数与密度乘积)的交会图可以反映非常规油气储层中石英、黏土和钙质矿物(白云石)的相对含量(图6),进而表征储层脆性。通过EI反演得到的弹性参数<sup>[79-80]</sup>或者弹性阻抗<sup>[78]</sup>来预测地层脆性的新方法不断涌现,预测结果与微地震检测<sup>[78]</sup>、压裂效果<sup>[81]</sup>、动态生产数据<sup>[82]</sup>等较吻合,取得了较好的应用效果。

由于非常规油气储层非均质性较强,且微裂缝等结构弱面发育,其脆性非均质也较明显;无论是理论模型<sup>[84]</sup>,还是力学试验结果<sup>[8, 19, 45, 85-87]</sup>,均表明非常规油气储层(特别是页岩和致密砂岩)不同方位岩石力学参数以及脆性指数差异达到数倍,是不可忽略的因素。由于沉积时微观矿物颗粒或有机质的定向排列、压实成岩过程中颗粒差异变形(一般垂向更易于被“压扁”)、扁平状的孔隙结构、横向分布的微裂缝或者层理(页理)面、次生矿物的定向排列等作用,使得地层垂向与横向的弹性参数及脆性产生较大差异<sup>[88]</sup>。学者提出了基于各向异性岩石物理等效介质理论模型反演不同方向弹性参数,进而计算不同方向脆性<sup>[45, 88]</sup>;通过这一方法计算的脆性指数对弹性性质变化更为敏感,具有较高的脆性敏感性,可以更好地预测致密储层甜点的脆性特征<sup>[45]</sup>。

#### 4 基于本构模型的脆性数值模拟研究

随着计算机技术发展,本构模型及数值分析可模拟的力学性质越来越多,更加接近自然条件下岩石特性,为了更加真实地模拟岩石力学行为,基于不同强度准则的岩石弹塑性以及损伤断裂本构模型或者二者

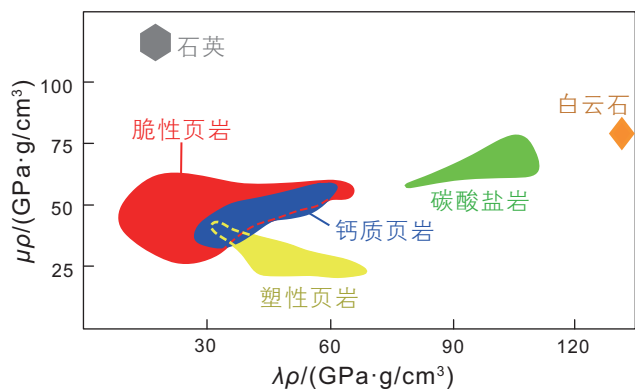


图6 不同脆性储层岩石及矿物的弹性阻抗交会图(据参考文献[83]修改)

Fig. 6 The crossplot of different brittle reservoir rocks and minerals(modified after reference [83])

耦合的本构模型不断被提出,可以反映岩石力学及破坏性质随应力变化规律。为合理表达岩石介质的弹性系数随变形发展变化,殷有泉等<sup>[89]</sup>提出了弹塑性耦合的应变软化本构模型。Han等<sup>[90]</sup>提出了塑性断裂理论来模拟岩石材料不可逆变形和刚度减小的力学行为。黄书岭<sup>[6]</sup>结合渗流理论和应力状态影响,提出了针对脆性岩石的非定常黏弹塑流变本构计算模型。张凯<sup>[91]</sup>综合岩石材料弹塑性耦合特性、硬化软化特性、剪胀特性以及应力状态对屈服过程的影响建立了弹塑性耦合力学模型,可以较好地反映脆性岩石主要力学特性、高地应力条件下损伤破坏特征以及卸围压应力路径下岩石变形和强度特性。这些研究在浅层岩体工程中,可以很好的描述脆性岩体的力学行为,指示围岩变形、损伤区和应力演化规律,较好地给出了破坏区的位置和范围。对非常规油气储层的脆性研究具有一定的借鉴意义。

#### 5 讨论

非常规油气储层已成为全球油气的重要来源,脆性评价预测对非常规油气储层的经济开发至关重要。受多种因素耦合控制,脆性影响因素较多,评价参数种类繁多,有诸多难点需要研究解释。

##### 5.1 脆性、延性与可压性(易压裂性)

岩石力学中的脆性是指受力变形很小时岩石就发生破裂的性质<sup>[7]</sup>,并不强调受力的大小;根据岩石力学的定义,脆性与延性是对应的概念,延性的评价预测也可以优选有利压裂目标<sup>[92]</sup>。综合前人基于不同资料的脆性指数研究,可以发现高脆性地层具有以下几个较明显的特征:脆性矿物相对含量高,杨氏模量较大,破裂前总应变小,应力—应变曲线峰前阶段耗散能以及峰后阶段维持裂纹扩展的断裂能较小,低延性,内摩擦角大,破裂后易形成复杂的缝网系统。在非常规油气储层勘探开发中,脆性研究主要目的是寻找在同样工艺条件下,容易破碎形成复杂缝网系统,压裂效果较好的储层。虽然脆性与易压裂性大部分情况下是一致的,其本质还是有差异的;在实际应用中,会出现高脆性指数地层不具有良好压裂效果的矛盾<sup>[29]</sup>。因此,在非常规储层研究中,应该更多的关注地层的可压性和压裂后形成复杂缝网系统的能力。目前已有脆性指数在岩性、温度及压力条件相似的范围内可以反映非常规储层的可压性,在岩性和应力场变化较大的地层中,脆性指数不宜做为可压性的唯一



评价指标。

## 5.2 脆性各向异性

前面已经提到学者基于各向异性岩石物理等效介质模型,使用叠前地震数据反演脆性,但已有研究往往基于横向各向同性的岩石物理模型进行求解,忽略了地层横向各向异性。巩磊等研究表明横向不同方位致密砂岩的岩石力学参数(图7)以及计算得到的脆性指数也存在较大差异<sup>[86]</sup>,很可能是由于沉积时水动力使得颗粒组分定向排列或者横向不同方向地应力的差异压实形成。当地层倾角较小时,脆性的横向各向异性与应力场方向会控制天然裂缝及压裂缝的发育特征,对非常规油气储层勘探开发的影响同样较大,显然需要更多重视和研究。

## 5.3 不同类型非常规油气储层脆性评价方法

目前,在非常规油气储层中页岩的脆性研究相对发展较快,很多致密砂岩脆性研究多引用页岩研究方法。但是在实际应用中,地球物理预测在页岩的“甜点”预测中效果较好<sup>[41, 70, 78]</sup>,是由于黏土矿物物理性质与脆性矿物(石英、白云石等)物理性质差异较大,有利于脆性矿物的检测。在致密砂岩储层中,成岩作用占主导因素,成岩非均质性较大时,矿物成分对岩石脆性影响相对较小,基于脆性矿物含量的评价预测效果会变差。

不同类型非常规油气储层的脆性各向异性也会不同。页岩往往在相对静水条件下沉积,层(页)理更发育,横向各向异性会比强水动力下形成的沉积物弱,垂向与横向的力学性质差异更加明显。致密砂岩形成的水动力条件强,力学性质横向各向异性比较突出。

非常规油气储层类型较多,脆性特征及控制因素差异较大,研究探索脆性的主控因素,有利于评价预测方法的优选和改进。

## 5.4 非常规油气储层脆性评价预测方法适用性及其发展趋势

前文列举的脆性评价方法都具有局限性和适用条件<sup>[4, 39, 46, 56]</sup>。油气勘探开发实践中,往往通过测井和地震方法对深部岩石脆性进行评价预测;测井资料理论上可以获取分辨率较高、连续的脆性相关数据,但其预测范围局限在井轨迹路径上,储层横向非均质弱、应力状态相似时,可以表征一定范围的储层;三维地震数据对岩石脆性的平面和垂向分布都有一定预测能力,但是其精度有待提高。地震资料适用于钻前优选脆性较大、易于压裂作业的“甜点”,而基于测井数据的脆性评价更适合为完钻后压裂段的选取提供依据。应用较广的是基于动态弹性参数方法(包括测井和地震)和基于脆性矿物含量方法,二者忽略压力状态和围压,在构造起伏较大或者应力场复杂的地区适用性会变差。

实验室基于力学试验的脆性评价表征应用领域最广泛,资料种类最多,脆性指数公式也是最多的,但是没有统一的脆性评价标准。由于沉积背景、成岩改造及构造变形等因素影响,岩石非均质性强、应力状态复杂,加上储层埋深较大、地下高温高压、孔隙流体组成复杂、样品在采样过程中发生不可逆改变等,实验室样品通过力学试验得到的脆性程度代表性有限。作为最基础、精度最高的研究手段,在试验数据基础上明确岩石脆性影响因素及其对脆性影响大小,以及单因素或多因素耦合与脆性的函数关系是非常重要的

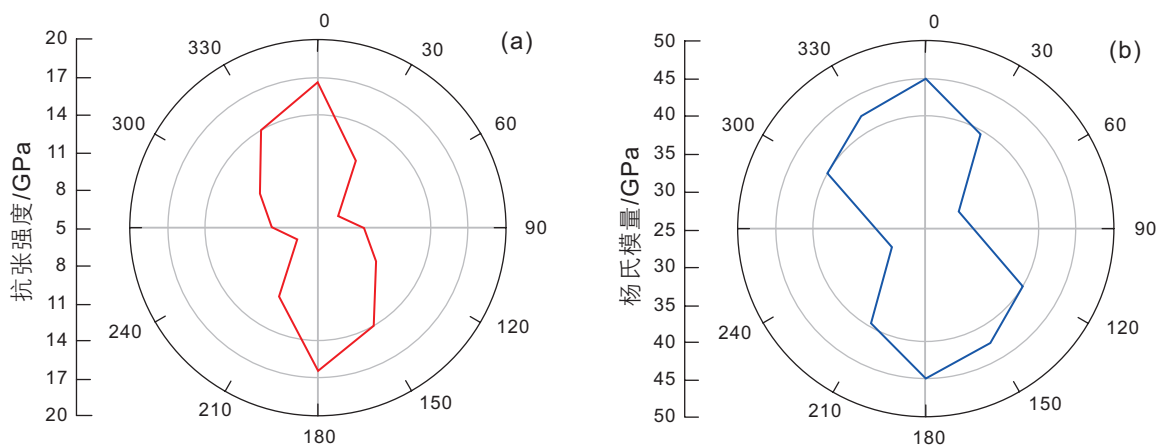


图7 砂岩弹性参数的横向各向异性(据参考文献[86]修改)

Fig. 7 Transverse anisotropy of elastic parameters in sandstone(modified after reference [86])

研究内容。只有在此基础上,才能明确脆性的内涵,建立相对应的脆性指数表达式,进而可以标定或者检验其它研究手段脆性评价预测结果。

测井评价方法中具有理论依据的主要有基于动态力学参数和基于脆性矿物含量两种方法,但能直接提供相关参数的测井方法在实际工作中都较少使用,往往需要通过常规测井反演得到;基于数学算法的方法是建立已有测井数据与脆性的函数关系。因此,在今后的研究中,需要新测井方法或者改良已有测井设备以更经济便捷的获得动态力学参数和地层矿物含量。另一方面,通过常规测井计算得到更加准确的弹性参数是目前最有应用价值的研究,可以看到,一些人工智能方法已经显示出很好的应用前景<sup>[44, 70-72]</sup>,寻找更好的数学模型及算法是研究关键。

通过地震数据评价脆性由最早反演声波速度和密度,到直接反演弹性阻抗参数,再到考虑脆性各向异性三维叠前反演,其精度已经在逐步提高,但是受到地震数据采集尺度的限制,研究表征尺度较大,其精度仍有待提高。精度更高、计算速度更快的叠前反演方法创新是地球物理和地质研究者共同努力方向,寻找与脆性相关性更好的弹性阻抗参数及其组合也是目前最可行方法之一。

数值计算作为一种新方法,已成功解决了众多复杂岩石工程和岩石力学问题。但是在非常规储层脆性研究中应用较少,建立适用于地层条件下岩石的本构模型,并与实验室试验、测钻井及地震数据结合,应用到储层脆性评价和预测中,是一个重要的交叉学科研究方向。

岩石脆性评价往往是脆性预测的基础工作,基于单种资料的脆性评价和预测结果得不到充分检验;综合多资料、多研究方法,可以相互约束验证,提高预测精度。多种手段相互融合共同研究脆性,是今后一个重要的发展方向;从实验室的单点脆性评价到测井的井轨迹剖面,以及地震中平面和三维立体脆性表征,其预测范围、尺度、精度都有所差异,只有多种方法联立,才能减少地质多解性。

储层脆性是由多因素共同控制的非线性问题,在不同类型资料和测试手段中表现出各自的特征,将其整合统一,给脆性以明确的定义,还有很长的路要走。基于单个成因机理(例如脆性矿物含量)建立的脆性评价指数很难兼顾其他控制因素;因此,目前的评价方法都存在一定的局限性。人工智能算法包括机器学习等是解决此类问题很好的方法,可以直接建立多种原始数据与脆性的对应关系,充分挖掘数据中与脆性相关的有

效信息。在实际应用中,有研究分别应用基于神经网络(ANN)和极限学习机(ELM)两种人工智能方法整合矿物含量和常规测井数据对页岩储层进行高精度的连续脆性剖面分析。与常规回归算法比较,人工智能算法精度更高,而且运算速度具有很大潜力<sup>[44, 70-72]</sup>。Kaunda等<sup>[70]</sup>利用科罗拉多矿院30多年积累的岩石物理测试数据建立人工神经网络模型比传统基于破坏强度试验和多元回归技术的方法能更好的预测岩石脆性。Kivi等<sup>[72]</sup>基于常规测井资料使用自适应神经模糊推理系统(ANFIS)预测页岩脆性也取得很好效果。这些人工智能算法并没有通过原理分析或者控制因素约束脆性的预测,但是可以融合多种类型数据<sup>[44, 71]</sup>,最大限度的挖掘数据中脆性相关信息,往往更加精确高效,具有较大的实践应用价值。但是,从发表文献数量来看,相关研究较少,未来发展潜力巨大。

## 6 结论

脆性是岩石非常重要的力学性质,科学合理评价岩石脆性特征,对深部岩体工程建设和资源开发利用具有重要意义。脆性影响因素较多,岩石的岩性组分、层理和损伤等结构特征、孔隙流体及其赋存状态、围压、温度、受力时间和路径以及测量尺度等均会对脆性有影响。脆性较高的非常规油气储层具有以下几个特征:脆性矿物含量高,杨氏模量大,破裂前总应变小,应力—应变曲线峰前阶段耗散能以及峰后阶段用来维持裂纹扩展的断裂能较小,低延性,内摩擦角大,破裂后易形成复杂的缝网系统。非常规油气储层脆性研究应该重点关注地层可压性和形成复杂缝网系统的能力。

目前,脆性评价方法按照评价资料类型主要有力学试验评价和基于测井钻井资料评价两种方法。按照评价思路实验室力学试验评价方法可以进一步分为:基于岩石力学参数评价、基于应力—应变曲线形态评价、基于应力—应变能量评价、基于岩石声波速度评价等多种方法。基于测井资料的脆性评价方法主要有基于动态力学参数、基于脆性矿物含量、基于数学算法和基于压裂钻井资料评价4种方法。脆性预测主要通过地震反演方法,根据发展过程和思路流程可以进一步分为叠前反演波速和密度、叠前直接反演脆性相关弹性阻抗、基于各向异性等效模型的弹性参数反演3种方法。

脆性的各向异性,特别是致密砂岩的脆性横向异性对非常规油气储层勘探开发的影响较大,需要更多

的重视和研究。

非常规油气储层类型较多,脆性特征及控制因素也有较大差异,研究探索脆性的主控因素,有利于评价预测方法的优选和改进。

脆性评价和预测研究仍在发展过程中,不同资料决定了评价思路和方法不同,适用的范围也不一样。多

资料多方法相互融合、相互验证是今后重要发展方向。

人工智能包括机器学习等算法可以有机融合多元数据,直接建立多种原始数据与脆性的对应关系,充分挖掘已有数据有效信息;具有更加高效精确的优势,发展潜力较大。

## 参考文献

- [1] 邹才能,杨智,朱如凯,等.中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J].地质学报,2015,89(06):979-1007. [ZOU C N, YANG Z, ZHU R K, et al. Progress in China's unconventional oil gas exploration and development and theoretical technologies[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(06): 979-1007.]
- [2] 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 C N, TAO S Z, HOU L H, et al. Unconventional petroleum geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.]
- [3] 赖锦,王贵文,范卓颖,等.非常规油气储层脆性指数测井评价方法研究进展[J].石油科学通报,2016,1(03):330-341. [LAI J, WANG G W, FAN Z Y, et al. Research progress in brittleness index evaluation methods with logging data in unconventional oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 03: 330-341.]
- [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):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 & Engineering, 2012, 31(8): 1680-1685.]
- [5] 张镜剑,傅冰骏.岩爆及其判据和防治[J].岩石力学与工程学报,2008,27(10):2034-2042. [ZHANG J J, FU B J, Rockburst and its criteria and control [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2034-2042.]
- [6] 黄书岭.高应力下脆性岩石的力学模型与工程应用研究[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2008. [HUANG S L. Study on mechanical model of brittle rock under high stress condition and its engineering applications [D]. Wuhan: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of rock and soil mechanics), 2008.]
- [7] 赵文.岩石力学[M].长沙:中南大学出版社,2010. [ZHAO W. Rock mechanics[M]. Changsha: Central South University Press, 2010.]
- [8] 张军,艾池,李玉伟,等.基于岩石破坏全过程能量演化的脆性评价指数[J].岩石力学与工程学报,2017,36(6):1326-1340. [ZHANG J, AI C, LI Y W, et al. Brittleness evaluation index based on energy variation in the whole process of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2017, 36(6): 1326-1340.]
- [9] HEARD H C. Effect of large changes in strain rate in the experimental deformation of Yule marble[J]. Journal of Geology, 1963, 71(2): 162-195.
- [10] 徐开礼,朱志澄.构造地质学(第二版)[M].北京:地质出版社,1989. [XU K L, ZHU Z C. Structural geology (Second Edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989.]
- [11] RAMSAY J G. Folding and fracturing of rocks[M]. New York: Mc Graw Hill Book Company, 1967.
- [12] 陈响,金衍,陈勉.基于能量耗散的岩石脆性评价方法[J].力学学报,2015,47(6):984-993. [CHEN Y, JIN Y, CHEN M. A rock brittleness evaluation method based on energy dissipation [J]. Chinese Journal of Theoretical & Applied Mechanics, 2015, 47(6) : 984-993.]
- [13] KAHRAMAN S, ALTINDAG R. A brittleness index to estimate fracture toughness[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(2):343-348.
- [14] 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段致密砂岩储集层为例[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.]
- [15] HUCKA V, DAS B. Brittleness determination of rocks by different methods[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1974, 11(10): 389-392.
- [16] 侯鹏,高峰,张志镇,等.基于声发射和能量演化规律评价岩石脆性的方法[J].中国矿业大学学报,2016,45(4):702-708. [HOU P, GAO F, ZHANG Z Z, et al. Evaluation method of rock brittleness based on acoustic emission and energy evolution[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(4): 702-708.]
- [17] 秦晓艳,王震亮,于红岩,等.基于岩石物理与矿物组成的页岩脆性评价新方法[J].天然气地球科学,2016,27(10):1924-1932, 1941. [QIN X Y, WANG Z L, YU H Y, et al. A new shale brittleness evaluation method based on rock physics and mineral composi-

- tions[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(10): 1924–1932, 1941.]
- [18] 邹雨茜. 海相页岩气与陆相页岩油地质特征对比研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018. [WU Y Q. The contrastive study between marine shale gas and continental shale oil geological characteristics. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2018.]
- [19] GONG F, ZENG L B, DI B R, et al. The effect of stress on brittleness of synthetic shale with different types of clay minerals[C]//79th EAGE Conference and Exhibition 2017. European Association of Geoscientists & Engineers. 2017.
- [20] 蔡国刚, 童亨茂. 太古宇潜山不同岩石类型裂缝发育潜力分析——以辽河西部凹陷为例[J]. *地质力学学报*, 2010, 16(3): 260–270. [CAI G G, TONG H M. Analysis on fracture potential for different types of rocks in archean buried hill: A case study of Liaohe western sag[J]. *Journal of Geomechanics*, 2010, 16(3): 260–270.]
- [21] 陈天宇, 冯夏庭, 张希巍, 等. 黑色页岩力学特性及各向异性特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(9): 1772–1779. [CHEN T Y, FEN X T, ZHANG X W, et al. Experimental study on mechanical and anisotropic properties of black shale[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(9): 1772–1779.]
- [22] 张晨晨, 董大忠, 王玉满, 等. 页岩储集层脆性研究进展[J]. *新疆石油地质*, 2017, 38(1): 111–118. [ZHANG C C, DONG D Z, WANG Y M, et al. Research progress on brittleness of shale reservoirs[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2017, 38(1): 111–118.]
- [23] ANDREEV G E. Brittle failure of rock materials: Test results and constitutive models[M]. Amsterdam: A A Balkema Publishers, 1995.
- [24] 路保平, 林永学, 张传进. 水化对泥页岩力学性质影响的试验研究[J]. *地质力学学报*, 1999, 5(1): 65–70. [LU B P, LIN Y G, ZHANG C J. Laboratory study on effect of hydration to shale mechanics[J]. *Journal of Geomechanics*, 1999, 5(1): 65–70.]
- [25] 葛洪魁, 陈颀, 林英松. 岩石动态与静态弹性参数差别的微观机理[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2001, 25(4): 34–36. [GE H K, CHEN Y, LIN Y S. Microscopic mechanism of difference between static and dynamic elastic parameters of rock[J]. *Journal of the University of Petroleum China*, 2001, 25(4): 34–36.]
- [26] 王欢. 致密砂岩、静态岩石物理特征试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016. [WANG H. The tight sandstone's static and dynamic rock physical characteristics experimental study[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.]
- [27] 单冶钢. 锦屏二级水电站长隧洞的岩爆分析与防治[J]. *成都理工学院学报*, 2001, 28(z1): 446–450. [SHAN Z G. Analyses and prevention of rockburst for the long tunnel of Jinping II hydroelectric project[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2001, 28(z1): 446–450.]
- [28] HANDIN J, HAGER R V J, FRIEDMAN M, et al. Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: pore pressure tests[J]. *Bulletin of the American Association Petroleum Geologists*, 1963, 47(5): 717–755.
- [29] JIN X, SHAH S N, ROEGIERS J C, et al. Fracability evaluation in shale reservoirs – An Integrated petrophysics and geomechanics approach[J]. *SPE Journal*, 2014, 20(3): 518–526.
- [30] 王伟明, 李勇, 汪正江, 等. 致密砂岩储层岩石脆性评价及相关因素分析[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(6): 50–57. [WANG W M, LI Y, WANG Z J. valuation of rock brittleness and analysis of related factors for tight sandstone reservoirs[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(6): 50–57.]
- [31] MOGI K. Effect of the intermediate principal stress on rock failure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1967, 72(20): 5117–5131.
- [32] 杨继华, 刘汉东. 岩石强度和变形真三轴试验研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(3): 66–68. [YANG J H, LIU H D. True triaxial experimental study on rock strength and deformation[J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy & Hydroelectric Power*, 2007, 28(3): 66–68.]
- [33] HUGHES D S, MAURETTE C. Variation of elastic wave velocities in granites with pressure and temperature [J]. *Geophysics*, 1956, 21(2): 277–284.
- [34] 曹峰. 温度对深部岩石力学性质的影响[J]. *重庆科技学院学报: 自然科学版*, 2012, 14(5): 83–85. [CAO F. Review of temperature impact of mechanical properties of deep rock[J]. *Journal of Chongqing University of Science & Technology*, 2012, 14(5): 83–85.]
- [35] 夏小和, 王颖轶, 黄醒春, 等. 高温作用对大理岩强度及变形特性影响的试验研究[J]. *上海交通大学学报*, 2004, 38(6): 996–998. [XIA X H, WANG Y Y, HUANG X C, et al. Experimental study on high temperature effects on the strength and deformation quality of marble[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2004, 38(6): 996–998.]
- [36] 李双建, 金之钧, 袁玉松, 等. 模拟地层条件下泥岩三轴应力试验及其油气意义[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(4): 598–605. [LI S J, JIN Z J, YUAN Y S, et al. Triaxial stress experiment of mudstone under simulated geological conditions and its petroleum significance[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(4): 598–605.]
- [37] RYBACKI E, MEIER T, DRESEN G. What controls the mechanical properties of shale rocks Part II: Brittleness [J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2016, 144: 39–58.
- [38] HEUZE F E. Scale effects in the determination of rock mass strength and deformability[J]. *Rock Mechanics*, 1980, 12(3–4): 167–192.
- [39] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 基于应力–应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(6): 1114–1122. [ZHOU H, MENG F Z, ZHANG C Q, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness based on stress-strain curve[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering*, 2014, 33(6): 1114–1122.]
- [40] MAKOWITZ A, MILLIKEN K L. Quantification of brittle deformation in burial compaction, Frio and Mount Simon Formation

- sandstones[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(6): 1007–1021.
- [41] 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 Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2008.
- [42] ALTINDAG R. The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hole drills[J]. *Journal— South African Institute of Mining and Metallurgy*, 2002, 102(1): 61–66.
- [43] YAGIZ S. Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2009, 24(1): 66–74.
- [44] ZHANG B, ZHAO T, JIN X, et al. Brittleness evaluation of resource plays by integrating petrophysical and seismic data analysis[J]. *Interpretation*, 2015, 3(2): T81–T92.
- [45] HUANG X R, HUANG J P, LI Z C, et al. Brittleness index and seismic rock physics model for anisotropic tight-oil sandstone reservoirs[J]. *Applied Geophysics*, 2015, 12(1): 11–22.
- [46] 王会向. 泥质疏松砂岩脆性指数及物理模型研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014. [WANG H X. Study on Brittleness Index and Physical Model of Muddy Loose Sandstone[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.]
- [47] HAJIABDOLMAJID V, KAISER P, Martin C D. Mobilized strength components in brittle failure of rock[J]. *Géotechnique*, 2003, 53(3): 327–336.
- [48] BISHOP A W, LITTLE A L. 1967. The influence of the size and orientation of the sample on the apparent strength of the London clay at Maldon, Essex[C]//Proc Geotech Conf. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute. 1967.
- [49] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(15): 2603–2608. [XIE H P, PENG R D, JU Y, et al. On energy analysis of rock failure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering*, 2005, 24(15): 2603–2608.]
- [50] BARON L I. Determination of properties of rocks[M]. Moscow: Gozgotekhizdat, 1962.
- [51] KIDYBIŃSKI A. Bursting liability indices of coal[J]. *International Journal of Rock Mechanics & mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1981, 18(4): 295–304.
- [52] LAWN B R, MARSHALL D B. Hardness, toughness, and brittleness: An indentation analysis[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1979, 62(7–8): 347–350.
- [53] TARASOV B G, RANDOLPH M F. Superbrittleness of rocks and earthquake activity[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2011, 48(6): 888–898.
- [54] 姚秀云, 赵德斌, 赵鸿儒. 纵、横波速度与其它物性参数关系[J]. *地球物理学进展*, 1989, 4(2): 7–20. [YAO X Y, ZHAO D B, ZHAO H R. The relationship between the velocity of longitudinal and transverse wave and other physical parameters[J]. *Progress in Geophysics*, 1989, 4(2): 7–20.]
- [55] 梁豪. 页岩储层岩石脆性破裂机理及评价方法[D]. 成都: 西南石油大学, 2014. [LIANG H. Rupture mechanism of rock brittleness in shale reservoir and Brittle fracture mechanism and evaluation method of shale gas reservoir[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2004.]
- [56] 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.]
- [57] 盛英帅, 张玉广, 顾明勇, 等. 原位条件下致密储层岩体力学动静参数校正[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(1): 109–116. [SHENG Y S, ZHANG Y G, GU M Y, et al. Static and dynamic mechanical parameter calibration of tight reservoir rock mass under in-situ condition[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(1): 109–116.]
- [58] HARRIS N B, MISKIMINS J L, MNICH C A. Mechanical anisotropy in the Woodford Shale, Permian Basin: Origin, magnitude, and scale[J]. *Leading Edge*, 2011, 30(3): 284–291.
- [59] 宋连腾, 王赞, 刘忠华, 等. 不同围压和流体饱和状态下致密砂岩弹性各向异性特征[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(9): 3401–3411. [SONG L T, WANG YT, LIU Z H, et al. Elastic anisotropy characteristics of tight sands under different confining pressures and fluid saturation states[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(9): 3401–3411.]
- [60] 边会媛, 王飞, 张永浩, 等. 储层条件下致密砂岩动静弹性力学参数试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34: 3045–3054. [BIAN H Y, WANG F, ZHANG Y H, et al. Experimental study of dynamic and static elastic parameters of tight sandstones under reservoir conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering*, 2015, 34: 3045–3054.]
- [61] HU R, VERNIK L, NAYVELT L, et al. Seismic inversion for organic richness and fracture gradient in unconventional reservoirs: Eagle Ford Shale, Texas[J]. *Leading Edge*, 2015, 34(1): 80–84.
- [62] YENUGU M, VERNIK L. Constraining seismic rock-property logs in organic shale reservoirs[J]. *Leading Edge*, 2015, 34(11): 1326–1331.
- [63] 廖东良. 页岩地层ECS测井资料解释新方法及其应用[J]. *石油钻探技术*, 2015(4): 102–107. [LIAO D L. Interpretation and application of ECS logging data in shale formations[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015(4): 102–107.]

- [64] 孙祥荣. XRF元素录井在武隆区块页岩气勘探开发中的应用[J]. 录井工程, 2017, 28(2): 33–38. [SUN X R. Application of XRF element logging to shale gas exploration and development in Wulong block. *Mud Logging Engineering*, 2017, 28(2): 33–38.]
- [65] 徐赣川, 钟光海, 谢冰, 等. 基于岩石物理试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 H, 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.]
- [66] 周雪晴, 张占松, 张超谟, 等. 基于矿物组分和成岩作用的致密砂岩储层脆性评价方法——以鄂尔多斯盆地东北部某区块为例[J]. 油气地质与采收率, 2017, 5: 10–16. [ZHOU X Q, ZHANG Z S, ZHANG C M, et al. A new brittleness evaluation method for tight sandstone reservoir based on mineral compositions and diagenesis: A case study of a certain block in the northeastern Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Recovery Efficiency*, 2017, 5: 10–16.]
- [67] 孙建孟, 姜东, 尹璐. 地层元素测井确定矿物含量的新方法[J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 42–47. [SUN J M, JANG D, YIN L. A method for determining mineral content by formation element logging[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(02): 42–47.]
- [68] 肖佃师, 卢双舫, 陆正元, 等. 辽河拗陷大民屯凹陷沙四段页岩油层矿物组分含量反演方法及应用[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 37–44. [XIAO D S, LU S F, LU Z Y, et al. Inversion method of shale oil reservoir mineral component content and its application in the Fourth Member of the Shahejie Formation in the Damintun Sag, Liaohe Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(1): 37–44.]
- [69] 燕继成, 文政, 夏宏泉. 基于多矿物模型分析的最优化测井解释在X油田中的应用研究[J]. 国外测井技术, 2008, 6: 18–20. [YAN J C, WEN Z, XIA H Q. Application of the optimized well logging interpretation in x oilfield based on multiminerall model analysis[J]. *World Well Logging Technology*, 2008, 6: 18–20.]
- [70] KAUNDA R B, ASBURY B. Prediction of rock brittleness using nondestructive methods for hard rock tunneling[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(4): 533–540.
- [71] SHI X, LIU G, CHENG Y F, et al. Brittleness index prediction in shale gas reservoirs based on efficient network models[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2016, 35: 673–685.
- [72] KIVI I R, ZARE-REISABADI M, SAEMI M, et al. An intelligent approach to brittleness index estimation in gas shale reservoirs: A case study from a western Iranian basin[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2017, 44: 177–190.
- [73] 吴健, 胡向阳, 何胜林. 多矿物模型在复杂岩性地层中的应用[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(30): 9018–9024. [WU J, HU X Y, HE S L. Application of multi-mineral analysis model in complex lithology formation[J]. *Science Technology & Engineering*, 2013, 13(30): 9018–9024.]
- [74] 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.
- [75] INGRAM G M, URAI J L. Top-seal leakage through faults and fractures: the role of mudrock properties[J]. *Muds and mudstones: Physical and fluid flow properties Geological Society London Special Publications*, 1999, 158(1): 125–135.
- [76] CONNOLLY P. Elastic impedance [J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(4): 438–452.
- [77] CAMBOIS G. AVO inversion and elastic impedance[J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2000, 142–145.
- [78] ALTAMAR R P, MARFURT K J. Identification of brittle ductile areas in unconventional reservoirs using seismic and microseismic data: Application to the Barnett Shale[J]. 2015, 3(4): 233–243.
- [79] 刘勇, 方伍宝, 李振春, 等. 基于叠前地震的脆性预测方法及应用研究[J]. 石油物探, 2016, 55(3): 425–432. [LIU Y, FANG W B, LI Z C, et al. Brittleness prediction and application based on pre-stack seismic inversion[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2016, 55(3): 425–432.]
- [80] 宗兆云, 印兴耀, 张峰, 等. 杨氏模量和泊松比反射系数近似方程及叠前地震反演[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3786–3794. [ZONG Z Y, YIN X Y, ZHANG F, et al. Reflection coefficient equation and pre-stack seismic inversion with Young's modulus and Poisson ratio[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(11): 3786–3794.]
- [81] 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 J L, DENG J G, ZHANG D Y. Fracability evaluation of shale-gas reservoirs[J]. *Acta Petroleum Sinica*, 2013, 34(3): 523–527.]
- [82] 李澈, 李雨澈, 郭佳. 地球物理技术在页岩储层脆性评价中的应用[J]. 当代化工, 2014, 5: 732–735. [LI C, LI Y C, GUO J. Application of geophysical technologies in the evaluation of brittleness of shale gas reservoir[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2014, 5: 732–735.]
- [83] GOODWAY, B. PEREZ, M. VARSEK, J, et al. Seismic petrophysics and isotropic-anisotropic AVO methods for unconventional gas exploration[J]. *Lead. Edge*, 2010, 29 (12): 1500–1508.
- [84] 张晓语, 杜启振, 马中高, 等. 各向异性页岩储层脆性特征分析[J]. 物探与化探, 2016, 40(03): 541–549. [ZHANG X Y, DU Q Z, MA Z G, et al. Brittleness characteristics of anisotropic shale reservoirs[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 40(3): 541 — 549.]
- [85] GONG F, DI B R, DING P B. et al. Experimental investigation of the effects of clay content and compaction stress on the elastic properties and anisotropy of dry and saturated synthetic shale Velocity and mechanical properties[J]. *Geophysics*, 2018, 83(5): 195–208.

- [86] GONG L, FU X, WANG Z, et al. A new approach for characterization and prediction of natural fracture occurrence in tight oil sandstones with intense anisotropy[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(6): 1383–1400.
- [87] 艾池, 仇德智, 张军, 等. 页岩力学参数测试及脆性各向异性研究[J]. 断块油气田, 2017, 24(05): 647–651. [AI C, QIU D Z, ZHANG J, et al. Measurements of mechanical parameters and brittleness anisotropy of shale. [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(05): 647–651.]
- [88] 钱恪然. 各向异性页岩岩石物理建模及储层脆性评价[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016. [QIAN K R. Anisotropic rock physics modeling and brittleness analysis of shale reservoir[D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2016.]
- [89] 殷有泉, 张宏. 断裂带内介质的软化特性和地震的非稳定模型[J]. 地震学报, 1984, 2: 17–27. [YIN Y Q, ZHANG H. Softening characteristics of medium in fault zone and unstable model. [J]. Acta Sismologica Sinica, 1984, 2: 17–27.]
- [90] HAN D J, CHEN W F. Strain-space plasticity formulation for hardening-softening materials with elastoplastic coupling[J]. International Journal of Solids & Structures, 1986, 22(8): 935–950.
- [91] 张凯. 脆性岩石力学模型与流固耦合机理研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2010. [ZHANG K. Study on mechanical model and fluid-solid coupling mechanism for brittle rock[D]. Wuhan: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of rock and soil mechanics, 2010.)
- [92] GLASER C, MAZZA J, FRAME J. Empowering completion engineers to calibrate petrophysical facies models to hydraulic fracturing treatment responses[C]//Unconventional Resources Technology Conference, Denver, Colorado, 22–24 July 2019.

(责任编辑 刘冬冬 编辑 付娟娟)