

页岩气储层脆性评价方法研究现状

张 宜

(建材成都地质工程勘察院有限公司,四川 成都 610052)

摘要:随着常规油气资源的不断开发,其存量资源越来越少。美国非常规油气资源的开发成功,为页岩气勘探开发奠定了技术基础。储层改造技术是决定页岩气开发成败的两大关键技术之一。而页岩气储层的脆性指数是评价页岩气储层可改造(可压裂)的关键指标。本文对国内外的页岩气储层脆性评价方法进行了广泛深入的研究,总结了岩石脆性的各种力学表征方法以及矿物成分对岩石脆性的影响,为我国页岩气储层脆性评价方法的研究提供了基础性参考资料。

关键词:页岩气;储层改造;可压裂性;脆性;脆性指数;脆性评价

中图分类号:P634;TE132.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)07-0051-06

Research status of shale gas reservoir brittleness evaluation method

ZHANG Yi

(Construction Materials Chengdu Geological Engineering Exploratory Institute Co., Ltd.,
Chengdu Sichuan 610052, China)

Abstract: With the continuous development of conventional oil and gas resources, its stock resources are becoming less and less. The successful development of unconventional oil and gas resources in the United States has laid the technical foundation for shale gas exploration and development. Reservoir reconstruction technology is one of the two key technologies to determine the success or failure of shale gas development. The brittleness index of shale gas reservoirs is a key indicator for evaluating the shale gas reservoirs that can be modified (fracturable). In this paper, extensive and in-depth research on shale gas reservoir brittleness evaluation methods at home and abroad is carried out, and various mechanical characterization methods of rock brittleness and the influence of mineral composition on rock brittleness are summarized. That provides basic reference materials for the study of shale gas reservoir brittleness evaluation methods in China.

Key words: shale gas; reservoir reconstruction; fracability; brittleness; brittleness index; brittleness evaluation

0 引言

随着社会经济的发展,我国能源需求量日益增长,能源缺口越来越大。由于环境污染的压力,煤炭资源的利用愈益受到限制,煤改气工作正在我国迅速推行,导致对天然气的依存度越来越高。美国页岩气商业开发的成功,引起了我国科技界与工业界对页岩气这种非常规天然气的高度关注。我国页岩气储量达 $23.5 \times 10^{13} \text{ m}^3$,与美国的 $28.3 \times 10^{13} \text{ m}^3$ 大致相当^[1]。加快页岩气资源的开发对于我国社会能源结构调整有着重大的战略意义。

页岩本身的低孔低渗特征,决定了只有经过大规模压裂改造才能获得商业产能。页岩气藏由于其特殊的成藏机理、赋存环境、岩石物理性质,使其压裂增产过程与常规砂岩、碳酸盐岩的压裂有很多不同。页岩气储层的压裂最重要的是实现“体积压裂”,即形成网状裂缝。为了评估页岩气储层改造的可能性与可行性,国内外学者提出“可压裂性”这一概念来表征页岩在水力压裂过程中能够被有效压裂的能力^[2-4]。

页岩可压裂性评价工作对于前期压裂可行性评

收稿日期:2019-06-09 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.07.009

作者简介:张宜,男,汉族,1962年生,工程师,探矿工程专业,从事钻探工程技术及管理工作,四川省成都市成华区航天路36号,zhangYi772k8@136.com。

引用格式:张宜.页岩气储层脆性评价方法研究现状[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(7):51-56.

ZHANG Yi. Research status of shale gas reservoir brittleness evaluation method[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(7):51-56.

估、优选压裂层段、预测压裂效果有着重要意义。影响页岩气储层可压裂性的因素很多,如岩石脆性、天然裂缝发育程度、埋藏深度、水平应力差、成岩程度等。各种影响因素之间互相关联、互相作用,形成了复杂作用体系。研究认为,页岩的脆性不仅能够显著影响井壁稳定性,同时对压裂效果也有非常重要的影响^[5-6]。

页岩脆性好坏直接影响页岩储层压裂改造诱导裂缝的形成。脆性越好,改造中越易形成诱导裂缝。页岩脆性程度可以用岩石力学参数表征,也可以用脆性矿物含量表征。页岩脆性矿物含量是影响页岩基质孔隙度、微裂缝发育和可压性的重要因素,石英或长石等脆性矿物含量丰富有利于压裂改造产生诱导裂缝^[7]。

国内外的学者在研究岩石脆性时,提出了大量的脆性指数定义。Jarvie 和 Rickman 等提出了矿物组合法^[8-10]; Altindag、Hucka 等提出了岩石抗压抗拉强度法^[11-13]; 基于周辉、冯涛、Bishop、Hajiabdolmajid 等从岩石应力-应变曲线的形态^[14-17]、Tarasov、Aubertin、Munoz、Baron 等从岩石应力-应变曲线的能量关系^[18-21]的角度,提出了应力-应变曲线法。

本文在文献调研的基础上,对国内外有关岩石脆性的研究成果进行了总结与综述,以供我国从事油气资源(特别是页岩气)勘探开发的工程技术人员借鉴与引用,促进我国页岩气勘探开发进程。

1 岩石脆性的力学性能表征法

脆性是指当外力达到一定限度时,材料发生无先兆的突然破坏,且破坏时无明显塑性变形的性质。1963年 Heard 提出了根据材料受力破坏前的总应变大小及全应力-应变曲线上负坡的坡降大小来划分脆性与塑性的方法:破坏前总应变小、应力-应变曲线上负坡陡的为脆性;反之,破坏前总应变大、应力-应变曲线上负坡缓的为塑性。Heard 以3%和5%为界限,将总应变<3%的划为脆性岩石,总应变在3%~5%的划为半脆性或者脆-塑性岩石,总应变>5%的划为塑性岩石。工程上一般以5%为标准进行划分,总应变>5%者为塑性材料,小于5%者为脆性材料^[22]。国内外学者在研究材料性能时,采用了许多力学性能参数来表征材料的脆性。

1967年, Bishop 采用应力-应变测试方法,用峰

值强度和残余强度来表征脆性,用两者的差值与峰值强度的比值作为脆性指数^[15],其表达式见式(1):

$$B = (\tau_p - \tau_r) / \tau_p \quad (1)$$

式中: B ——脆性指数; τ_p ——峰值强度; τ_r ——残余强度。

1974年, Hucka 和 Das 总结对比不同岩石的应力-应变曲线,通过大量的试验研究,提出了5种不同的脆性指数表征方法与计算方法^[12]。

(1)用可恢复应变与总应变的比值表征脆性指数:

$$B = \epsilon_r / \epsilon_t \quad (2)$$

式中: ϵ_r ——可恢复应变; ϵ_t ——总应变。

(2)用可恢复应变能与总应变能的比值表征脆性指数:

$$B = W_r / W_t \quad (3)$$

式中: W_r ——可恢复应变能; W_t ——总应变能。

(3)用抗压强度和抗拉强度的比值表征脆性指数:

$$B = \sigma_c / \sigma_t \quad (4)$$

式中: σ_c ——抗压强度; σ_t ——抗拉强度。

(4)用抗压强度与抗拉强度之差和抗压强度与抗拉强度之和的比值表征脆性指数:

$$B = (\sigma_c - \sigma_t) / (\sigma_c + \sigma_t) \quad (5)$$

式中: σ_c ——抗压强度; σ_t ——抗拉强度。

(5)过莫尔应力圆计算岩石内摩擦角,用内摩擦角的正弦值表征脆性指数:

$$B = \sin \varphi \quad (6)$$

式中: φ ——内摩擦角。

1979年, Lawn 和 Marshall 在研究岩石的硬度、韧性与脆性关系时,提出基于硬度和韧性的脆性测试方法,用硬度和断裂韧度的比值表征脆性指数^[23]:

$$B = H / K_{IC} \quad (7)$$

式中: B ——脆性指数; H ——硬度; K_{IC} ——断裂韧度。

1997年 Quinn 和 Quinn 通过对陶制材料的实验测试,引入弹性模量这一参数来表征脆性,认为裂缝的形成能力与弹性模量在一定程度成正比,与断裂韧度成反比,并给出了脆性指数的具体计算方法^[24]:

$$B = HE / K_{IC}^2 \quad (8)$$

式中: H ——硬度; E ——弹性模量; K_{IC} ——断裂韧

度。

1999 年,Ingram 和 Urai 以土力学为基础,引入超固结率的概念,即历史最大垂向有效应力与现今最大垂向有效应力的比值,用固结率来表征脆性指数^[25]:

$$B = (\sigma_{vmax} / \sigma_v)^b \quad (9)$$

式中: σ_{vmax} ——历史最大垂向有效应力; σ_v ——现今最大垂向有效应力; b ——指数常数。

2003 年,Hajiabdolmajid 和 Kaiser 在莫尔-库仑准则的基础上,采用 CWFS 模型解释岩石的脆性破坏过程,并用应变值作为脆性表征参数。该模型很好地反映了岩石破坏过程中粘聚力的弱化和内摩擦力的强化机理^[17]:

$$B = (\epsilon_i^p - \epsilon_c^p) / \epsilon_c^p \quad (10)$$

式中: ϵ_i^p ——破坏时塑性切应变; ϵ_c^p ——破坏后残余塑性切应变。

Copur 在通过贯入实验研究岩石的切削性质和岩性之间关系时,提出用荷载增量与荷载减量作为脆性表征参数,用二者的比值作为脆性指数^[26]:

$$B = P_{inc} / P_{dec} \quad (11)$$

式中: P_{inc} ——荷载增量; P_{dec} ——荷载减量。

2 岩石脆性的矿物含量表征法

国内外一些学者认为,岩石的脆性是岩石力学性质的表现,而矿物成分又是影响力学性质的最主要因素,因此在矿物成分与脆性之间必然存在直接的相关性。在其他条件相似的情况下,石英、方解石、菱铁矿等脆性矿物含量的增大会使岩石的抗压强度和弹性模量呈上升趋势,而泊松比则呈下降趋势;随粘土矿物含量增加,岩样的抗压强度和弹性模量会明显降低,泊松比则呈上升趋势^[27]。

2012 年,才博等通过全岩分析实验分析页岩岩石中的各种矿物成分,认为一般储层中矿物组分主要有粘土矿物(高岭石、伊利石和蒙脱石等),石英、方解石、长石、白云石等矿物。当岩石中石英、碳酸盐岩等矿物含量较高时,表明脆性矿物质量分数较高,岩石的脆性特征强;当粘土矿物质量百分数较高时,岩石表现出塑性特征强。他提出用石英质量含量与石英、粘土、碳酸盐岩三者质量之和的比值作为脆性指数^[28](见式 12):

$$B = \frac{v_{石英}}{v_{石英} + v_{碳酸盐岩} + v_{粘土}} \quad (12)$$

式中: $v_{石英}$ ——泥页岩中的石英含量; $v_{碳酸盐岩}$ ——泥页岩中的碳酸盐岩含量; $v_{粘土}$ ——泥页岩中的粘土含量。

2013 年,陈吉等在研究南方古生界下寒武统、上奥陶一下志留统、上二叠统三套页岩时指出,南方古生界页岩矿物组成较为复杂,在计算脆性指数时采用(石英+长石+方解石+白云石)/(石英+长石+方解石+白云石+粘土矿物)的方法^[29]。李钜源在研究东营凹陷泥页岩矿物组分时,将石英/(石英+碳酸盐+粘土矿物)定名为石英脆性指数,将碳酸盐/(石英+碳酸盐+粘土矿物)定名为碳酸盐脆性指数,将(石英+碳酸盐)/(石英+碳酸盐+粘土矿物)定名为总脆性指数。通过对比碳酸盐脆性指数、石英脆性指数与总脆性指数的相关性,发现碳酸盐脆性指数与总脆性指数相关性明显高于石英,说明碳酸盐岩是决定此地区页岩脆性的主要因素^[30]。因此,页岩储层的脆性不仅与所含矿物类型有关,还与矿物含量多少有关。张新华等在分析研究鄂西渝东三口页岩井的页岩时,采用 X 荧光元素录井技术对岩屑粉末进行元素检测,考虑到元素检测成本,选择与所要解释的物质含量呈正相关的元素来计算该物质的含量,即用 Si 元素含量代表砂质含量,用 K+Al+Fe 元素含量代表泥质含量,用 Ca 元素代表灰质含量。除去具有特殊岩性(煤、石膏、火成岩等)的井段,其他页岩段默认为泥质含量+砂质含量+灰质含量=100%。通过对比分析 X 荧光元素检测结果与 ECS 测井、X 衍射数据,发现三者具有较好的相关性^[27],这为利用矿物组成进行脆性评价提供了另一种方法。

2013 年,刁海燕对比岩石力学脆性评价方法和矿物成分脆性评价方法,结合实验结果,发现岩石破裂时体积变形量随杨氏模量的增加而减小、随泊松比的增加而增大,即岩石脆性随杨氏模量的增加而增加、随泊松比的增加而减小。为了更加突出脆性强的岩石,提出了弹性参数与矿物成分组合法的脆性指数计算方法^[31]:

$$B = \frac{v_{石英} \left(\frac{YM_{石英}}{PR_{石英}} \right)}{v_{石英} \left(\frac{YM_{石英}}{PR_{石英}} \right) + v_{方解石} \left(\frac{YM_{方解石}}{PR_{方解石}} \right) + v_{粘土} \left(\frac{YM_{粘土}}{PR_{粘土}} \right)} \quad (13)$$

式中: v_* ——各种矿物的体积含量; YM_* ——各种

矿物的杨氏模量; PR 。——各种矿物的泊松比。

用该计算方法处理得到的脆性指数比矿物组分法的结果偏大。

3 矿物成分对脆性影响研究现状

不同矿物的物理力学性质有很大差异,而矿物组成是岩石力学表现的内在成因。以石英、方解石和伊利石为例,石英的泊松比明显低于方解石和伊利石,但杨氏模量却明显高于方解石和伊利石(参见表1)。

表1 3种矿物的弹性参数

Table 1 Elastic parameters of three minerals

矿物种类	杨氏模量/GPa	泊松比
石英	96.25	0.069
方解石	80.50	0.303
伊利石	43.88	0.236

2008年,Rickman等通过对Barnett页岩矿物组分进行XRD/LIBS分析,将矿物组分分为3类^[10]:石英矿物、碳酸盐矿物和粘土矿物,其中石英矿物包括石英、长石和黄铁矿,碳酸盐矿物包括方解石、白云石和菱铁矿,粘土矿物包括所有的粘土。图1是4口Barnett页岩井矿物组成的三元图。图中1号井页岩矿物组成中不含碳酸盐矿物,以石英和粘土矿物为主。2号井页岩矿物组成中以碳酸盐矿物为主,含少量石英和粘土矿物。3号井页岩矿物组成中以石英为主,含少量碳酸盐矿物和粘土矿物。4号井页岩矿物组成中以石英和粘土矿物为主,碳酸盐矿物含量变化范围比较大。

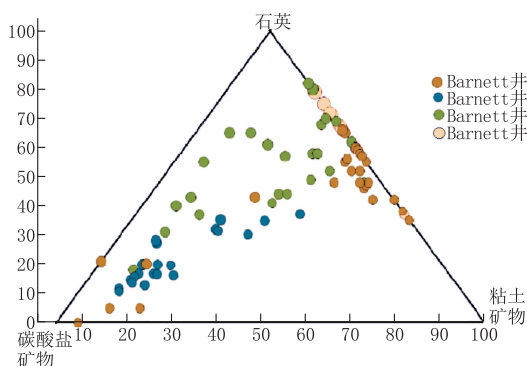


图1 Barnett页岩矿物成分三元图(据Rickman,2008)

Fig.1 Ternary diagram of mineral constituent of Barnett shale (after Rickman, 2008)

统计结果显示^[10]:随着石英矿物含量的增多,脆性指数增大;随着粘土矿物含量的增多,脆性指数

减小;随着碳酸盐矿物的增多,脆性指数在一个适中的范围内变化。也即碳酸盐矿物对脆性指数的影响小于石英矿物。

刁海燕在研究大庆油田齐家—古龙地区青山口组泥页岩储层岩石力学性质和脆性评价时,采用数值模拟的方法模拟了杨氏模量和泊松比随石英和方解石含量变化的规律^[31](参见图2)。结果显示随石英含量增加,杨氏模量增加,泊松比减小,意味着脆性越来越强;随方解石含量增加,杨氏模量减小,泊松比增加,意味着脆性越来越弱。因此,页岩的脆性主要由石英含量来体现。

4 问题与建议

(1)从理论上讲,应力-应变曲线反映了岩石在外力作用下从开始变形到破坏的全过程,每段曲线的物理意义明确。可以通过曲线形态来描述岩石受力特性,利用能量关系对岩石脆性破裂过程进行衡量。但是曲线形态不能完备地对岩石脆性进行描述;应力-应变曲线下每一部分面积所代表能量的物理意义还存在争议。因此,应用应力-应变曲线来表征岩石脆性时可能会得出与实际情况相矛盾的结论。建议通过更深入的研究建立完备的简化模型描述复杂的实际曲线,统一应力-应变曲线下每一部分面积所代表能量的物理意义。

(2)采用抗压强度和抗拉强度表征脆性指数的方法,计算方法简单。但由于岩石的抗压与抗拉强度之间呈正相关关系,即抗压强度大的岩石,抗拉强度也大。因此计算数值差异小、定量计算不敏感。因此,建议采用特殊的数学处理方法来扩大计算数值差异,提高定量计算的敏感度。

(3)利用弹性模量表征岩石脆性的方法,数据获取比较容易,可分别通过压缩实验测得、或利用声波测井数据或超声波测量计算得到杨氏模量。但由于杨氏模量的最大值、最小值具有明显的地域局限性,因此建议在采用这种方法时,需区分地域进行大量样本实验和参数的归纳与分析。

(4)岩石脆性的矿物含量表征法计算方法简单已经在国内外一些地区取得了一定程度的应用效果,但是这种方法忽略了成岩作用的影响。在不同的地区,即使矿物成分完全相同,由于成岩压力、孔隙结构等的不同,脆性指数也可能存在较大差异。因此建议研究不同成岩作用下相同矿物含量岩石的

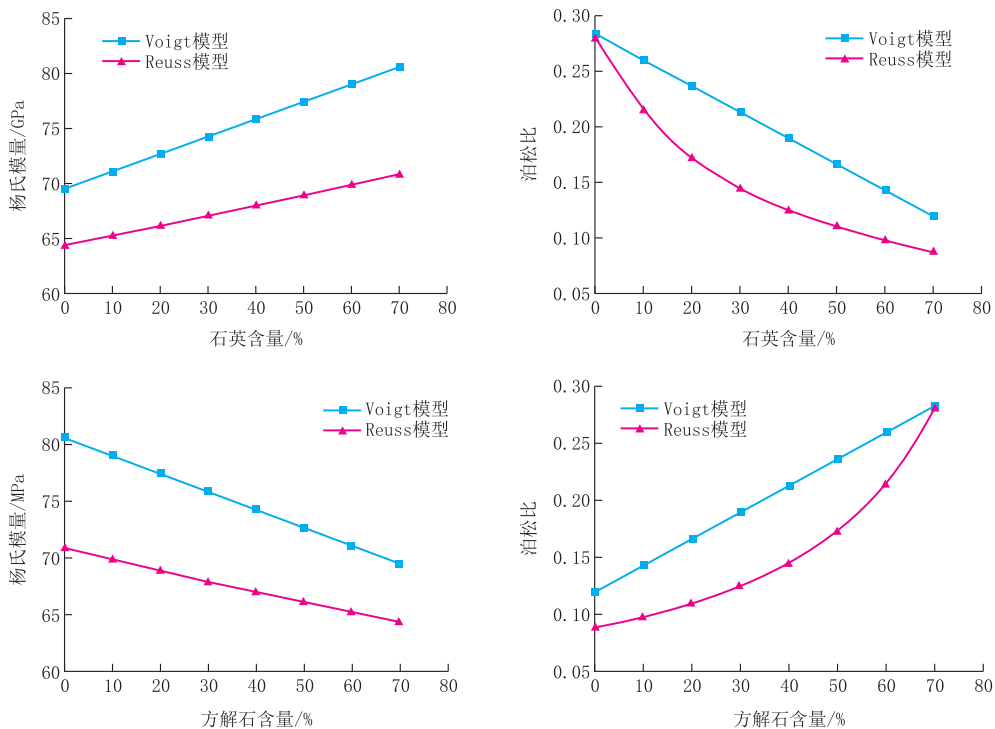


图 2 弹性参数随石英、方解石含量的变化(据刁海燕,2013)

Fig.2 Elastic parameters versus quartz & calcite content (after DIAO Haiyan, 2013)

脆性差异,完善矿物含量表征法。

(5) 裂缝发育程度对脆性评价影响的相关研究比较少。裂缝往往构成岩体的结构弱面,能大幅降低岩体的强度,降低幅度甚至可以达到 50%。同时在压裂过程中,通过控制合理的施工工艺可以有效利用天然裂缝诱导产生次生裂缝,形成体积压裂。裂缝的发育程度不仅影响岩体力学强度,也影响压裂过程裂缝网络的形成。

(6) 地应力环境(埋深)对页岩抗压强度、弹性模量、泊松比等物理性质的影响作用缺乏系统研究。页岩储层埋深通常在数百米至数千米范围内,上覆岩石产生的巨大压力和高地应力环境、以及大埋深产生的高温环境对岩石的物理力学性质会产生很大影响。目前国内相关研究尚不多见,而国外相关方面研究系统成果也鲜见报道。就我国的页岩气储层地质条件来说,其埋深比北美地区更深,不仅给勘探开发增加了难度,另一方面也对储层脆性的科学评价提出了挑战。

参考文献 (References):

[1] 张金川,徐波,聂海宽,等.中国页岩气资源勘探潜力[J].天然气工业,2008,28(6):136-140.
ZHANG Jinchuan, XU Bo, NIE Haikuan, et al. Exploration

potential of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2008,28(6):136-140.

- [2] 吴奇,胥云,王腾飞,等.增产改造理念的重大变革——体积改造技术概论[J].天然气工业,2011,31(4):7-12.
WU Qi, XU Yun, WANG Tengfei, et al. The revolution of reservoir stimulation: an introduction of volume fracturing[J]. Natural Gas Industry, 2011,31(4):7-12.
- [3] 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 Ying, XING Yun, LI Lezhong, et al. Influence factors and evaluation methods of the gas shale fracability[J]. Earth Science Frontiers, 2012,19(5):356-363.
- [4] 赵金洲,任岚,胡永全.页岩储层压裂缝成网延伸的受控因素分析[J].西南石油大学学报(自然科学版),2013,35(1):1-9.
ZHAO Jinzhou, REN Lan, HU Yongquan. Controlling factors of hydraulic fractures extending into network in shale formations[J]. Journal of Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013,35(1):1-9.
- [5] 李庆辉,陈勉,金衍,等.页岩气储层岩石力学特性及脆性评价[J].石油钻探技术,2012,40(4):17-22.
LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Rock mechanics characteristic and brittleness evaluation of shale gas reservoir [J]. Petroleum Drilling Technology, 2012,40(4):17-22.
- [6] 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 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):1680-1685.
- [7] 刘曰武,高大鹏,李奇,等.页岩气开采中的若干力学前沿问题

- [J].力学进展,2019,49(1):1-236.
- LIU Yuewu, GAO Dapeng, LI Qi, et al. Mechanical frontiers in shale-gas development[J]. Advances in Mechanics, 2019,49(1):1-236.
- [8] 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.
- [9] 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, Colorado USA: 2008.
- [10] 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.
- [11] Altindag R. Assessment of some brittleness indexes in rock-drilling efficiency[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010,43(3):361-370.
- [12] Hucka 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.
- [13] Altindag R. Correlation of specific energy with rock brittleness concepts on rock cutting[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003,103(3):163-171.
- [14] 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,2013,33(6):1114-1122.
- ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness based on stress-strain curve[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,33(6):1114-1122.
- [15] Bishop A W. Progressive failure with special reference to the mechanism causing it[C]. Oslo;Proceedings of the Geotechnical Conference, 1967;142-150.
- [16] Hajiabdolmajid V, Kaiser P K, Martin C D. Modelling brittle failure of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002,39(6):731-741.
- [17] Hajiabdolmajid V, P.Kaiser. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003,18:35-48.
- [18] Tarasov B, Potvin Y. Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013,59(4):57-69.
- [19] Aubertin M, Gill D E, Simon R. On the use of the brittleness index modification (BIM) to estimate the post peak behavior of rocks[C]// Proceedings of the 1st North American Rock Mechanics Symposium. A. A. Balkema, Rotterdam, 1994: 945-952.
- [20] Munoz H, Taheri A, Chanda E K. Rock drilling performance evaluation by energy dissipation based rock brittleness index [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016,49(8): 3343-3355.
- [21] Baron L I. Determination of Properties of Rocks. Gozgotekhizdat, Moscow, 1992:784-795.
- [22] 刘佑荣,唐辉明.岩体力学[M].武汉:中国地质大学出版社, 1999.
- LIU Yourong, TANG Huiming. Rockmass Mechanics[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press,1999.
- [23] 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.
- [24] Quinn J B, Quinn G D. Indentation brittleness of ceramics: a fresh approach[J]. Journal of Materials Science, 1997,32(16):4331-4346.
- [25] 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, 1999,158:125-135.
- [26] Copur H, Bilgin N, uncedemir H, et al. A set of indices based on indentation test for assessment of rock cutting performance and rock properties[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003,103(9):589-600.
- [27] 张新华,邹筱春,赵红艳,等.利用X荧光元素录井资料评价页岩脆性的新方法[J].石油钻探技术,2012,40(5):92-95.
- ZHANG Xinhua, ZOU Xiaochun, ZHAO Hongyan, et al. A new method of evaluation shale brittleness using X-ray fluorescence element logging data[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012,40(5):92-95.
- [28] 才博,丁云宏,卢拥军,等.非常规储层体积改造中岩石脆性特征的判别方法[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2012,14(5):86-88.
- CAI Bo, DING Yunhong, LU Yongjun, et al. Study of rock brittleness for stimulated reservoir volume fracturing technology[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2012,14(5):86-88.
- [29] 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 Ji, XIAO Xianming. 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.
- [30] 李钜源.东营凹陷泥页岩矿物组成及脆度分析[J].沉积学报, 2013,31(4):616-620.
- LI Juyuan. Mineral composition and brittleness analysis of shale in Dongying Sag[J]. Journal of Sedimentology, 2013, 31(4):616-620.
- [31] 刁海燕.泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价[J].岩石学报, 2013,29(9):3300-3306.
- DIAO Haiyan. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale reservoir [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013,29(9):3300-3306.