

致密碎屑岩储层岩石破裂特征及脆性评价方法

王升^{1,2,3}, 柳波^{1,2}, 付晓飞^{1,2}, 赵万春^{1,2}

(1. 东北石油大学 非常规油气研究院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 东北石油大学 “非常规油气成藏与开发” 省部共建国家重点实验室培育基地, 黑龙江 大庆 163318; 3. 东北石油大学 电子科学学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 研究致密碎屑岩储层岩石破裂特征及脆性评价方法对致密油压裂优化设计具有重要意义。文章以辽河盆地沙河街组致密碎屑岩储层为例, 开展了不同岩性岩石的三轴压缩实验, 分析了宏观破裂行为和压后岩石显微裂缝的发育类型, 通过对比常规的弹性参数法和矿物组份法等脆性评价方法, 建立了基于三轴压缩破裂过程中能量守恒的新脆性评价方法。实验表明, 岩石破裂特征受控于岩石脆性和岩石所处的围压条件。一方面, 脆性较强的岩石主要发育穿晶张裂缝, 随着脆性程度减弱, 裂缝数量逐渐减少, 类型则以晶内裂缝为主; 另一方面, 随着围压增加, 压裂后岩石内部微裂缝类型从穿粒张裂缝向晶内裂缝过渡, 说明围压极大地抑制了微裂缝的扩展。传统弹性参数法表征的脆性结果与实验描述的脆性破裂特征相反(即脆性指数高, 而岩石破裂程度差), 而矿物组份法不能描述不同围压下岩石的脆性程度。本文提出的新脆性评价方法, 可以连续地描述岩石从超脆性到韧性变形的力学演化过程, 脆性指数不仅与峰前的杨氏模量有关, 而且还与峰后应力降梯度(软化模量)有关。利用该方法表征了不同围压下致密砂岩脆性程度, 其结果与实验描述岩石脆性破裂特征相符合, 证实了方法的可行性。

关键词: 脆性指数; 三轴压缩实验; 围压; 岩石破裂; 致密储层; 致密油

中图分类号: TE135

文献标识码: A

Evaluation of the brittleness and fracturing characteristics for tight clastic reservoir

Wang Sheng^{1,2,3}, Liu Bo^{1,2}, Fu Xiaofei^{1,2}, Zhao Wanchun^{1,2}

(1. Institute of Unconventional Oil & Gas, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. State Key Laboratory Base of Unconventional Oil and Gas Accumulation and Exploitation, College of Earth Science, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 3. College of Electronic Science, Northeastern Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: The way to evaluate the fracturing characters and brittleness of tight clastic reservoir is of significant value for optimizing hydraulic fracturing design of tight oil reservoir. We performed tri-axial compression experiments on rock samples of various lithologies taken from the tight clastic reservoir in the Shahejie Formation, Liaohe Basin, analyzed the macroscopic fracturing behaviours and the types of microscopic hydraulic fractures. After considering such brittleness evaluation methods as conventional elastic parameter method and mineral composition method, a new method to evaluate rock brittleness was proposed based on the conservation of energy during triaxial compression. The experimental results show that the fracturing characteristics of rocks are controlled by rock brittleness and its confining pressure. On the one hand, rocks with higher brittleness usually develop transgranular tension cracks, and as the brittleness declines, the number of cracks decreases and the cracks are mainly intragranular. On the other hand, the confining pressure greatly refrains the propagation of micro-fractures, since the transgranular tension cracks turn into intragranular cracks as the confining pressure increases. The brittleness obtained with conventional elastic parameter method is just opposite to that obtained through experiments (i. e. the brittleness is high, but the fracturing degree of rock is low), while the mineral composition method cannot be used to differentiate the degrees of rock brittleness under different confining pressures. The new method

收稿日期: 2018-01-04; 修订日期: 2018-08-20。

第一作者简介: 王升(1980—), 男, 副教授, 岩石力学。E-mail: wangsheng10@126.com。

通讯作者简介: 柳波(1983—), 男, 教授, 非常规油气地质。E-mail: liubo@nepu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472125); 国家自然科学基金重点基金项目(U1562214); 国家科技重大专项(2016ZX05024005006)。

proposed in this study can describe the complete mechanical evolution process of rocks transforming from super brittleness to ductility. The brittle indexes are correlated not only with pre-peak Young's modulus but also with post-peak stress gradient (softening modulus). All in all, the method can be used to describe the tight sandstone brittleness under different confining pressures, and the results coincide with the fracturing behaviours of rock obtained through experiments, verifying the feasibility of the method.

Key words: brittleness index, triaxial compression experiment, confining pressure, rock fracturing, tight reservoir, tight oil

致密油是继页岩气之后非常规油气藏探勘开发领域的又一新热点。致密油在我国分布广泛且潜力巨大,由于储集层致密、岩性复杂,均需采用压裂改造以获得工业产能^[1]。压裂的成功与否与岩体脆性密切相关,脆性程度越高,越有利于产生大量的压裂裂缝且很长一段时期内保持开启。脆性评价是体积压裂设计中首要考虑的重要因素之一,也是测井“七性关系”研究的重要内容之一^[2],我国学者将脆性评价列为非常规致密油气选区的五项关键评价技术之一,与优质烃源岩、优质储集层、地应力评价及地震属性综合预测技术同样重要^[3]。

不同学科关于岩石脆性的涵义有许多说法^[6-12], Morley^[6]和 Hetenyi^[7]将脆性定义为材料塑性的缺失; Ramsey^[8]认为,当岩石内的粘聚力丧失时,材料即发生脆性破坏; Obert 和 Duvall^[9]将脆性定义为类似铸铁和多数的岩石材料达到或稍超过屈服强度而破坏的性质;地质学及相关学科学者认为脆性系指材料断裂或破坏前表现出的极小或没有韧性变形的特征^[10]。脆性指标影响着岩石破裂及变形过程。根据脆性程度的不同,可以把岩石的变形特征划分为3个过程:脆性、脆-韧性性和韧性^[4]。 Heard^[5]依据岩石的应力-应变关系曲线,将岩石分为3种类型:一是脆性岩石,破坏点位于弹性极限附近,破坏前的线应变一般不超过3%;二是脆-韧性岩石,破坏点超过屈服强度,破坏前的线应变一般不超过5%;三是韧性岩石,破坏点距屈服强度很远,破坏前的线应变一般超过5%。但当前还没有标准的、统一的岩石脆性定义及测试方法。 Tarasov 等^[11-12]考虑岩石破裂后的行为,将脆性描述为岩石峰值后破裂的不稳定性程度。为此人们通过从岩石应力应变特征、矿物硬度、破裂强度以及变形过程中能量转化形式等方式来表征岩石的脆性程度(表1),然而夏英杰等^[13]通过物理实验数据论述了表1中列出众多种类的脆性表征方法都存在着局限性,为此提出一种基于峰后应力跌落速率及能量比的岩体脆性特征实验评价方法。国内外学者和各石油公司都非常重视岩石脆

性评价,但目前为止尚未见到系统、定性和有效的研究成果。主要应用于油田的评价方法有2种。

Jarvie 矿物组合法。岩石脆性是岩石力学性质的一种表现,矿物成分是影响力学性质的内部因素,因此岩石矿物成分与脆性之间必然有直接的相关性。 Jarvie 等^[30]根据页岩矿物组分来表征岩石脆性,认为页岩中石英脆性最强,方解石中等,粘土最差,提出矿物组分脆性指标(MBI):

$$MBI = \frac{V_{\text{石英}}}{V_{\text{石英}} + V_{\text{碳酸盐岩矿物}} + V_{\text{粘土}}} \quad (1)$$

式中: $V_{\text{石英}}$, 为岩样中石英矿物体积含量,%; $V_{\text{碳酸盐岩矿物}}$, 为碳酸盐岩矿物体积含量,%; $V_{\text{粘土}}$, 为粘土矿物体积含量,%。

在北美页岩气开发实践中,采用三端元图解^[31]分析有利区域页岩的矿物成分,并将结果录入数据库,通过统计方法来评价后续页岩的脆性^[25]。有些学者通过测试砂岩孔隙度和泥质含量以及砂岩中石英含量来评价脆性^[32]。但这类评价方法仍然缺乏可靠性,一方面岩石矿物组分多种多样,仅靠这两种矿物含量来表征显得精确性不够,且需要大量岩心分析资料进行刻度;另一方面,石英、泥质矿物随着地质条件的改变脆韧性是可以转化的,即使具有相同矿物组成的岩石,由于其力学环境的不同也可能表现出差异极大的脆性破裂特征,因此这种评价方法缺乏岩石物理基础^[33]。

Rickman 弹性参数法。一般认为杨氏模量越高,泊松比越低的岩石脆性更强^[34]。 Rickman^[25]专门针对北美 Barnett 页岩的岩石力学参数,计算归一化杨氏模量和泊松比平均值作为脆性指数(EBI)来评价岩石相对脆性程度。

$$EBI = \frac{1}{2} \left(\frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} + \frac{\nu_{\max} - \nu}{\nu_{\max} - \nu_{\min}} \right) \times 100 \quad (2)$$

式中: E 为岩石杨氏模量, GPa; ν 为岩石泊松比,无量纲; $E_{\max}$, $E_{\min}$ 分别为岩样中最大和最小泊松比值。

Moshe 等^[35]通过原子力显微镜测量出岩石内部每种矿物的杨氏模量和泊松比,从微观上精细地评价了脆性。但我国部分油田采用这种方法评价脆性时,

表 1 脆性指数的定义及分类
Table 1 Definition and classification of brittleness index

类型	脆性指数定义	描述	提出人
全应力 - 应变曲线	$B_1 = \varepsilon_{li} \cdot 100\%$	试样破坏时不可回复的轴应变。 $\varepsilon_{li} < 3\%$ 脆性; $3\% \sim 5\%$ 脆塑性; $> 5\%$ 塑性	George ^[14]
	$B_2 = \sin\varphi$	内摩擦角的正弦值	Hucka 等 ^[15]
	$B_3 = 45^\circ + \varphi/2$	破裂角关于内摩擦角 φ 的函数	
	$B_4 = \varepsilon_r/\varepsilon$	可恢复应变 ε_r 与总应变 ε 的比值	Aubertin ^[16]
	$B_6 = A_2/A_1$	峰值后变形模量为斜率所做斜线下的面积为 A_1 ; 加载曲线下的面积为 A_2	Hajiabdolmajid ^[17]
	$B_8 = (\varepsilon_f^p - \varepsilon_c^p)/\varepsilon_c^p$	ε_f^p 和 ε_c^p 分别为摩擦强度和粘聚力分别达到最终极限值时的塑性应变	Ajiabdolmajid ^[18]
	$B_9 = (\varepsilon_p - \varepsilon_r)/\varepsilon_p$	关于峰值应变 ε_p 与残余应变 ε_r 的函数	
硬度	$B_{11} = (H_m - H)/K$	H : 宏观硬度; H_m 微观硬度	Honda 等 ^[19]
	$B_{12} = H/K_C$	H : 硬度系数; K_C 断裂韧度	Lawn 等 ^[20]
	$B_{13} = K_{IC}/(\sigma_y h^{0.5})$	K_{IC} 为平面应变的断裂韧性, σ_y 为屈服应力, h 为试件的特征尺寸	Bazant 等 ^[21]
	$B_{14} = HE/K_{IC}^2$	H : 硬度系数; E : 杨式模量; K_{IC} 断裂韧度	Quinn ^[22]
	$B_{15} = F_{max}/P$	最大冲击荷载与贯入深度之比	Yagiz ^[23]
	$B_{16} = P_{dec}/P_{inc}$	增量荷载与衰减荷载的比值	Copur ^[24]
	$B_{20} = (1 - \varphi - V_{sh})/(1 - \varphi)$	孔隙度与泥质含量表征岩体脆性	Rickman ^[25]
强度	$B_7 = \alpha\sigma_c\varepsilon_f/\sigma_t\varepsilon_b$	σ_c 和 σ_t 分别为抗压和抗拉强度, ε_f 和 ε_b 分别为峰前、后应变, α 为调节参数	冯涛等 ^[26]
	$B_{21} = q\sigma_c$	q : 碎屑含量, σ_c 为单轴抗压强度	Protodyakonov ^[27]
	$B_{22} = (\tau_p - \tau_r)/\tau_p$	τ_p 为峰值强度, τ_r 为残余强度	Bishop ^[28]
	$B_{23} = \sigma_c/\sigma_t$	抗压强度 σ_c 与抗拉强度 σ_t 的比值	Hucka 等 ^[15]
	$B_{24} = (\sigma_c - \sigma_t)/(\sigma_c + \sigma_t)$	抗压强度 σ_c 与抗拉强度 σ_t 的函数	Altindag ^[29]
	$B_{25} = \sigma_c\sigma_t/2$	抗压强度与抗拉强度乘积的均值	
	$B_{26} = (\sigma_c\sigma_t/2)^{1/2}$	强度比值的函数	
能量	$B_{27} = Wr/W$	可恢复的应变能与总能量的比值	Hucka 等 ^[15]
	$B_{28} = L\sigma_t^2/(EG_F)$	G_F, E, σ_t 分别为断裂能、杨氏模量和 Hilleborg 特征长度	Bazant 等 ^[21]
	$B_{29} = EG_F/\sigma_t^2$		
	$B_{30} = dWr/dWe$ $= (E - M)/M$	dWr, dWe 分别为岩石破裂峰后断裂损伤能与峰前弹性应变能比值	Tarasov 等 ^[11-12]

出现脆性指数相近,而压裂裂缝走向、微地震事件密度、改造储层体积等差异大的问题^[36]。为此,Guo 等^[37]考虑围压对张裂缝影响,对 Rickman 弹性参数法进行修正,而有的学者提出弹性参数与矿物成分组合法评价岩石脆性^[38]。

1 致密储层脆性破裂特征

针对辽河盆地沙河街组致密碎屑岩储层,选取不同埋深岩样 6 组,通过钻、切、磨,获取标准圆柱形试样 8 件,主要岩性为粉砂岩及泥岩。采用长春朝阳试验机有限公司生产的 TAW-2000 微机控制电液伺服岩石三轴试验机,在室温下开展不同围压三下轴压缩应力试验,围压采取应力加载,其速率为 0.05 MPa/s,轴压采取位移加载,其速率为 0.005 m/s。获取岩石全应力 - 应变

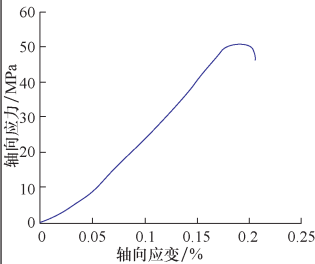
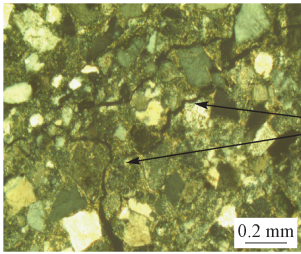
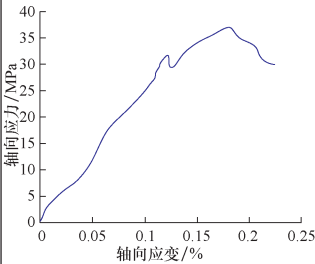
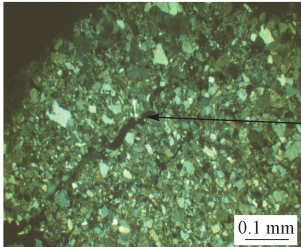
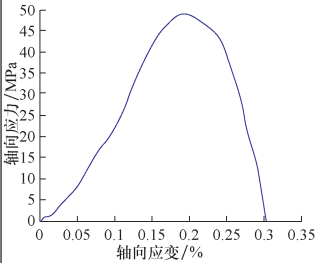
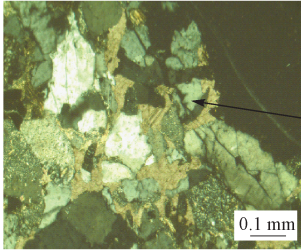
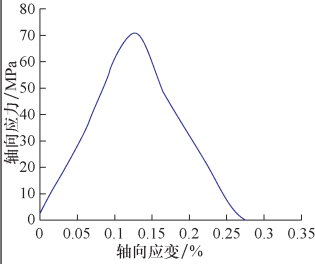
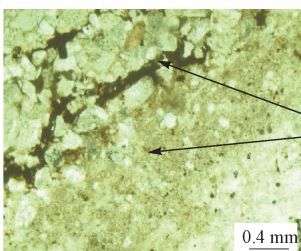
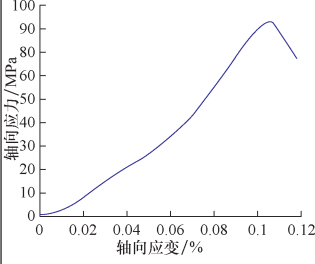
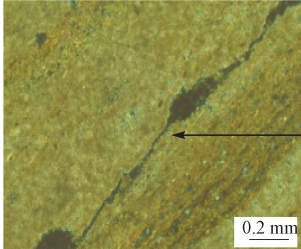
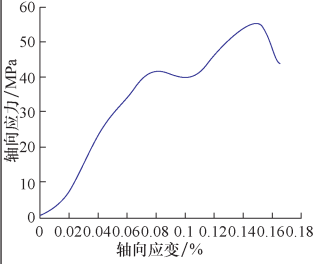
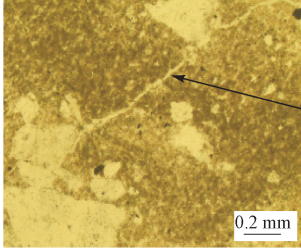
曲线、岩样的宏观破裂特征,对于压裂后样品,沿垂直断裂面方向制备薄片,在光学偏光显微镜下观察微裂缝的发育类型。

1.1 不同岩性的脆性破裂特征差异

在单轴应力压缩下,岩石破裂模式主要发育近劈裂缝,但在光学偏光显微镜下微裂缝却有显著的差异(表 2)。粉砂岩主要发育穿粒张裂缝,开度大,且延伸长度较长;而泥岩主要发育穿粒张剪切裂缝或穿粒剪切裂缝,裂缝形态为椭圆型裂缝与线型裂缝交替出现,或单纯发育开口较小的线型裂缝。需要注意的是, s-4 粉砂岩泥质含量较高,局部可见泥质纹层及储层沥青,镜下观察很难发现微裂缝。因此从岩石的微裂缝发育特征,可以判断出各岩性的脆性由大到小的排列顺序为粉砂岩(发育穿粒张裂缝)、泥岩

表 2 不同岩性的宏观破裂模式与微观显微裂缝的差异

Table 2 Differences between macroscopic fracturing patterns and microscopic microcracks for different lithologies

编号	深度/m	岩性	应力-应变曲线	单轴下破裂模式	单轴下显微裂缝	微裂缝特征
s-1	3 340	粉砂岩				穿粒张裂缝
s-2	3 341	粉砂岩				穿粒张裂缝
s-3	3 342	粉砂岩				穿晶张裂缝
s-4	3 354	碎屑岩				储层 沥青、 泥质带, 无裂缝
1-93	3 076	泥页岩				穿粒张剪 裂缝
1-97	3 023	泥页岩				穿粒剪 裂缝

(发育穿粒张剪裂缝或发育穿粒剪裂缝)、以及含储层沥青碎屑岩(发育泥质纹层、储层沥青,裂缝不发育)。表明岩石中的泥质成分极大的抑制着微裂缝的扩展,其含量越小,岩石越显脆性。

1.2 围压对致密储层脆性破裂的影响

为了研究围压对致密储层脆性破裂的影响,针对粉砂岩 s-1 样品在室温下开展了不同围压的三轴压缩试验,获取岩石破裂模式和应力-应变曲线(图 1 所示)以及岩石力学参数(表 3)。

从破裂模式上,随着围压的增大,破裂剪切角增大,剪切缝长度减小,因此围压效应抑制岩石脆性破裂。同时从表 3 中可以看出,围压越大,岩石杨氏模量越大。在偏光显微镜下也可以明显看出,当围压为零时,发育穿晶张裂缝(图 2a),当围压增加为 15.24 MPa 时,局部发育多条晶内裂缝(图 2b),但当围压增加为 35.9 MPa

的时,在薄片上很难发现裂缝,或只发育单一晶内剪裂缝(图 2c)。因此对于致密储层,围压变化,极大地影响了岩石的脆性破裂模式。

2 致密储层脆性评价方法

2.1 常规方法表征致密储层脆性

基于岩石力学参数的测试和全岩分析,利用各大油田常用的弹性参数法[式(1)]和矿物组分析法[式(2)],分别评价上述 6 组样品在单轴压缩下的脆性指标(表 3)。对于弹性参数脆性指标(EBI),只能描述表 3 中 6 组样品的相对脆性。表 3 中,碎屑岩(s-1, s-2, s-3)脆性指标小于含储层沥青碎屑岩(s-4),该结果与上述宏观破裂模式和微观显微裂缝分析结果相反,因此利用弹性参数法不能准确表征该区域致密储层的脆性,可能原因是该岩石样品中粘土体积含量 $V_{clay} <$

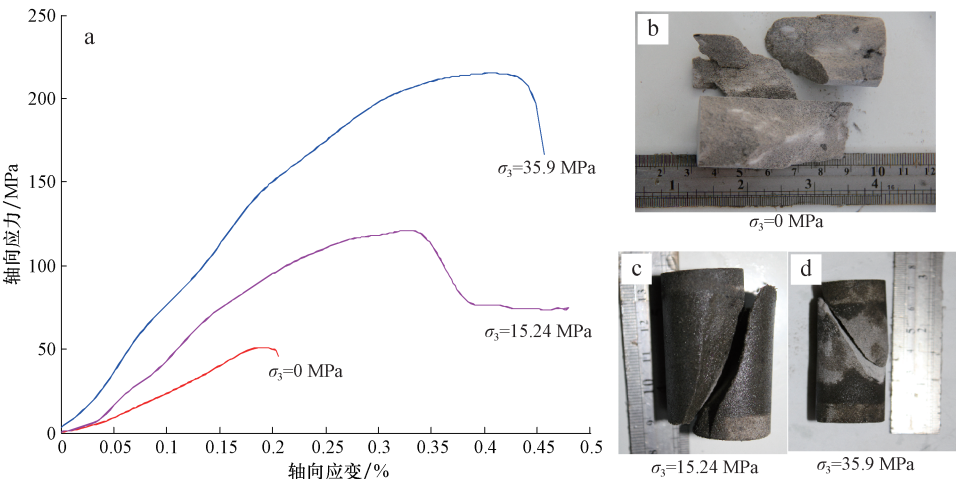


图 1 样品 s-1 三压缩下的应力-应变曲线和宏观破裂模式

Fig. 1 Stress-strain curves and macroscopic fracturing modes of sample s-1 under triaxial compression
a. 应力-应变曲线; b. $\sigma_3 = 0$ MPa 时的宏观破裂模式; c. $\sigma_3 = 15.24$ MPa 时的宏观破裂模式; d. $\sigma_3 = 35.9$ MPa 时的宏观破裂模式

表 3 基于致密储层岩石力学参数与全岩分析计算脆性指标

Table 3 Brittleness index calculated by rock mechanical parameters and whole rock analysis for tight reservoir

编号	岩性	弹性模量/GPa	泊松比	全岩组分含量/%							脆性指数 <i>EBI</i>	脆性指数 <i>MBI</i>	
				石英	钾长石	斜长石	方解石	铁白云母	白云石	菱铁矿			粘土矿物
s-1	粉砂岩	29.4	0.12	36.0	18.4	34.9	1.2		1.1		8.4	44.62	0.77
s-2	粉砂岩	24	0.1	39.0	18.9	27.3	3.4		1.4		9.9	43.02	0.73
s-3	粉砂岩	27.8	0.04	38.4	13.2	30.9	1.1	2.2				52.76	0.72
s-4	碎屑岩	63.2	0.16	34.5	15.0	27.6	9.1	1.9			12.0	64.53	0.62
1-93	泥页岩	69.7	0.10	33.2		14.2	6.7	19.9			26.1	93.02	0.50
1-97	泥页岩	80.6	0.47	22.6			26.3	8.7	6.8	7.8	27.8	46.15	0.40

注:脆性指数 $EBI = \frac{1}{2} \left(\frac{E - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} + \frac{\nu_{max} - \nu}{\nu_{max} - \nu_{min}} \right)$, E_{max} , E_{min} 分别为上述岩样中最大和最小杨氏模量值; ν_{max} , ν_{min} , 分别为上述岩样中最大和最小泊松比值。

脆性指数 $MBI = \frac{V_{石英}}{V_{石英} + V_{碳酸盐岩} + V_{粘土}}$, $V_{石英}$, $V_{碳酸盐岩}$, $V_{粘土}$ 分别为上述各岩样石英含量、碳酸盐岩、粘土的在总矿物中体积含量。

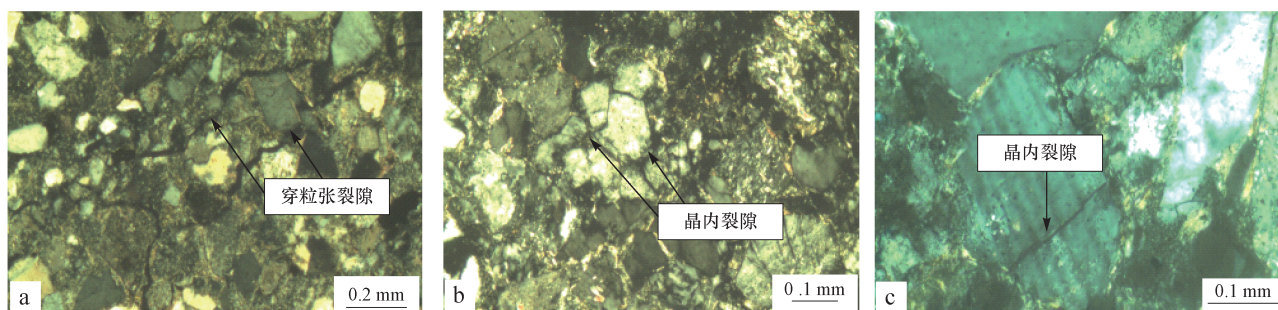


图2 光学显微镜下的压裂后样品 s-1 内显微裂缝发育

Fig. 2 Microscopic observation of micro-cracks in samples s-1 after fracturing

a. $\sigma_3 = 0$ MPa; b. $\sigma_3 = 15.24$ MPa; c. $\sigma_3 = 35.9$ MPa

15%, 颗粒支撑岩石, 粘土矿物对岩石弹性参数无贡献^[39], 但粘土矿物的存在极大抑制了岩石裂缝扩展; 对于矿物组分脆性指标 (MBI), 粉砂岩的脆性指标大于含储层沥青碎屑岩和泥页岩, 与实验描述相符合, 但含储层沥青碎屑岩的脆性指标大于泥页岩, 与实验描述不吻合。各矿物在不同成岩作用下或地应力下, 可能表现出差异极大的脆性破裂特征^[33], 正如上述实验表明随围压的增加, 岩石脆性破裂受到明显的限制 (图2)。

2.2 基于峰值后能量守恒原理评价岩石脆性

2.2.1 新脆性指标的提出

脆性是岩石一种重要的力学变形属性, 反应岩石在应力作用下的破裂作用和断裂程度。岩石宏观断裂行为直接反应了岩石脆性程度, 而这种断裂行为在三轴压缩实验中主要体现为峰值后的力学变形特征, 其变形机理实质上是能量转化的过程。

在三轴压缩实验中, 完整岩石在加载过程中首先发生弹性变形, 到达屈服强度后, 岩石将经历不可恢复的非弹性变形, 直到峰值破裂强度 (即破裂临界点), 岩石开始破裂, 这个过程中岩石始终在积累弹性势能, 其弹性形变性质用弹性模量 $E = d\sigma/d\varepsilon$ 来表征。达到峰值强度后岩石破裂, 并向外界释放能量。能量释放形式与

峰值后破裂行为有关, 其力学特征体现在峰值后应力-应变行为的变化, 岩石达到峰值强度后, 应力随应变开始减小, 直到岩石完全破裂 (剩余应力为残余应力), 并形成断裂面开始滑动岩, 在这个过程中 (图3中BC段), 岩石破裂越明显, 峰值后应力减小程度越显著 (应力释放)。为此, 本中把峰值后单位应变内应力降强度变化 ($d\sigma/d\varepsilon$), 定义为峰值后软化模量 M , 该值越大, 表征破裂过程中, 形成断裂裂缝的宽度越大, 或数量越多, 向外释放能量越多, 岩石越显脆性。例如当 M 为负无穷, 那就意味岩石破裂后应力立即降为零, 并向外界释放大量能量, 把这种变形称为理想的脆性变形。

峰值后软化模量 ($M = d\sigma/d\varepsilon$) 形式有两种 (见图3), 第一种破裂行为 $M < 0$, 表示岩石在破裂过程中, 不断向外界吸收能量, 即应力对岩石做正功; 第二种破裂行为 $M > 0$, 表示岩石在破裂过程中, 不断向外界释放能量, 即岩石向外界做功, 应力对岩石做负功。根据峰值后破裂过程中能量守恒原理^[12], 岩石破裂过程中所需的破裂能 ΔW_r 为消耗的弹性能 ΔW_e 与岩石向外界吸收能 ΔW_a 之和:

$$\Delta W_r = \Delta W_a + \Delta W_e \quad (3)$$

式中: ΔW_r 为峰值后岩石完全破裂所需的破裂能, J; ΔW_a 为峰值后岩石完全破裂外界向系统提供的吸收

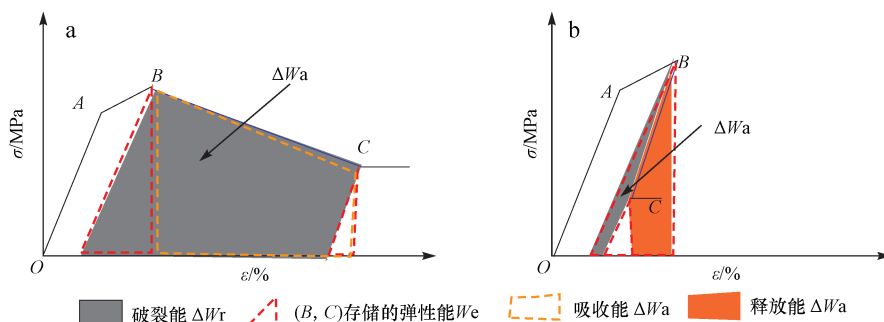


图3 岩石加载过程中的应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve during rock loading

a. 第一种破裂行为 ($M < 0$); b. 第二种破裂行为 ($M > 0$)

能, J ; ΔW_e 为峰值后岩石完全破裂所消耗的弹性能, J 。

公式(3)中, 对于第一种破裂行为 $\Delta W_a > 0$, 表示岩石在应力作用下从外界吸收能量; 第二种破裂行为 $\Delta W_a < 0$ 表示岩石以热能或碎片的动力学形式向外界释放能量。

图3中 A 为岩石屈服点; B 为岩石峰值破裂临界点, 岩石积累最大弹性势能; C 点为岩石完全破裂对应的临界点, 岩石存在残余弹性能。假设 B 、 C 点的杨氏模量相等, 都等于未加载时完整岩石的弹性模量, 即加载到 B 点或 C 点时, 然后卸载, 卸载的应力路径的曲线斜率认为与 OA 段加载的路径斜率相等。红色点线围成的三角形的面积为 B 或 C 点的弹性能, $B-C$ 过程中消耗的弹性能 ΔW_e 为两三角形面积差; $B-C$ 过程中岩石吸收能 ΔW_a 为 BC 曲线与应变轴围成的面积(第一种破裂特征为黄色点线围成梯形框的面积; 第二种破裂特征为黄色区域的面积); $B-C$ 过程中岩石完全破裂所需的能量 ΔW_r 为灰色区域的面积。因此可以通过应力应变曲线, 计算相应面积来表示岩石 $B-C$ 破裂过程中所涉及的能量。

消耗的弹性能 ΔW_e :

$$\Delta W_e = \frac{\sigma_B^2 - \sigma_C^2}{2E} \quad (4)$$

吸收能 ΔW_a :

$$\Delta W_a = \frac{\sigma_C^2 - \sigma_B^2}{2M} \quad (5)$$

破裂能 ΔW_r :

$$\Delta W_r = \Delta W_e + \Delta W_a = \frac{(\sigma_B^2 - \sigma_C^2)(M - E)}{2EM} \quad (6)$$

式中: E 为岩石的杨氏模量(OA 曲线段斜率), GPa ; M 为峰值后平均软化模量(BC 曲线段斜率), GPa ; σ_B 和 σ_C 分别为峰值应力和残余应力, GPa 。

值得注意的是如果吸收能为负($\Delta W_a < 0$), 那意味着岩石破裂前积累的弹性能大于岩石的破裂能, 即 $\Delta W_e > \Delta W_r$ 。表明 ΔW_e 中一部分能量导致形成大量裂缝, 同时一部分能量从裂缝中以热能或运动学形式释放出去, 其值为 $|\Delta W_a|$ (释放能)。释放能 $|\Delta W_a|$ 能协助岩石破裂, 有独自维持破裂的能力, 一旦岩石开始破裂, 其破裂行为不可控制, 因此此能量越大, 岩石脆性越强。如果吸收能为正($\Delta W_a > 0$), 那意味着岩石破裂前积累的弹性能小于岩石破裂能, 即 $\Delta W_e < \Delta W_r$, 此时岩石储存的弹性能不能促使岩石形成裂缝而完全破裂, 因此需要应力对岩石做功, 从外界吸收能量 ΔW_a , 降低破裂能, 最终使岩石发生宏观破裂。因此在破裂过程中, 消耗的弹性能在

破裂能中所占比例越大, 岩石越显脆性。当 $\Delta W_e = \Delta W_r$, 表示理想脆性, $\Delta W_e > \Delta W_r$ ($\Delta W_a < 0$) 为超脆性^[12]。为此提出评价岩石脆韧指标(BDI)为:

$$BDI = \frac{\Delta W_e}{\Delta W_r} \quad (7)$$

把式(5)和(6)代入式(7)

$$BDI = \frac{M}{M - E} \quad (8)$$

由式(8)可知, 岩石脆韧性即依赖于完整岩石的弹性模量 E , 也依赖于峰值后的岩石破裂行为, 即软化模量 M 。弹性模量是表征岩石固有属性的物理量, 由岩石内在因素决定, 与岩石的矿物成分、粒径、孔隙度与岩石结构等有关; 软化模量不仅与岩石的内在结构有关, 还对外界因素(例如围压、温度与孔隙流体压力)很敏感^[40]。因此一般认为岩石的脆韧性受控于岩石内部结构和外在因素。

根据能量与脆韧性之间的内在关系, 构建新的脆性指标 BDI 厘定岩石从超脆性到应变硬化韧性变形的演变过程。可将岩石变形特征定量地划分为4个阶段(图4)。超脆性阶段($BDI > 1$), $M > 0$, ($\Delta W_e > \Delta W_r$, $\Delta W_a < 0$), 岩石破裂过程向外释放能量, 具有独立维持破裂的能力, 破裂过程不可控制; $M = \infty$, ($\Delta W_e = \Delta W_r$, $\Delta W_a = 0$)时, $BDI = 1$, 表征理想脆性。脆性变形阶段($0.5 < BDI < 1$): 岩石破裂过程消耗的弹性能 ΔW_e 大于破裂能 $\Delta W_r/2$, 应力降较明显, 岩石宏观上容易发生剪切破裂; $E = -M$ ($\Delta W_e = \Delta W_r/2$)时, $BDI = 0.5$, 表征半脆性(脆性向脆-韧性转化临界状态)。脆-韧性转换阶段($1 < BDI < \infty$): 消耗的弹性能 ΔW_e 小于破裂能 $\Delta W_r/2$, 应力降较小, 岩石宏观上破裂不明显; $M = 0$, ($\Delta W_e = 0$, $\Delta W_a = \Delta W_r$)时, $BDI = 0$, 应力降为零, 为理想塑性(脆-韧性向韧性变形转化临界状态)。韧性变形($BDI < 0$): 无应力降, 岩石不发生宏观破裂, 为应变硬化过程。

2.2.2 新方法评价致密储层的脆性程度

由峰值后软化模量的定义, 通过峰值后应力-应变曲线的斜率即可得到软化模量的大小 $M = d\sigma/d\varepsilon$, 实际力学测试中峰值后应力-应变曲线不是直线, 因此不同应变处对应的软化模量值不同, 这样通过 M 的变化可以精细的评价岩石峰值后破裂演化过程。但文中假设峰值后应力-应变曲线为直线(图3中 BC 段), 基于峰值能量守恒推导出脆韧性指标(式8), 为此实际应用中, 式(8)中 M 应表示峰值后平均软化模量, 定义为:

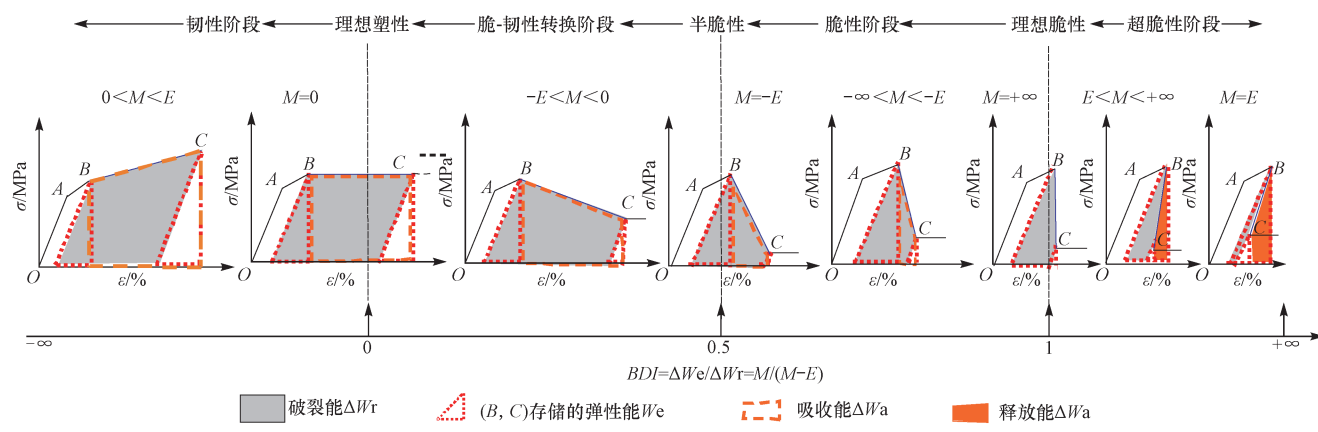


图 4 脆韧性指标 (BDI) 连续厘定岩石从绝对脆性向韧性变形的演化过程

Fig. 4 Brittleness and ductility index (BDI) continuously describing the evolution process of rock from super brittleness to ductile deformation

$$\int_{\varepsilon_B}^{\varepsilon_C} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{\sigma_c^2 - \sigma_B^2}{2M} \quad (9)$$

式中: σ_B 和 σ_C 分别为峰值应力和残余应力, GPa; ε_B 和 ε_C 分别为峰值应变和残余应变; M 为峰值后平均软化模量, GPa。

通过岩石力学测试的应力-应变曲线数据即可计算出峰值后平均软化模量(M),以及杨氏模量(E),利用等式(8),计算岩石脆韧性指标(BDI),表征岩石的脆性程度(表4)。由表4,对于单轴压缩,粉砂岩平均脆性指标 $BDI_{\text{粉砂岩}} = 0.73$,泥页岩的平均脆性指标 $BDI_{\text{泥页岩}} = 0.63$ 都处于脆性变形阶段;含储层沥青的粉砂岩脆性指标 $BDI_{\text{含储层沥青碎屑岩}} = 0.59$ 接近于岩石半脆性点,由此可见, $BDI_{\text{粉砂岩}} > BDI_{\text{泥页岩}} > BDI_{\text{含储层沥青碎屑岩}}$;而对于三轴压缩,s-1样品随着围压增加, BDI 减小,岩石脆性减弱;这些理论结果与与实验测试岩石宏观破裂模式和显微裂缝分析相一致。另外,从微观破裂特征与脆性指标 BDI 对应关系分析,对于含油性碎屑岩(s-4)与围压为 35.9 MPa 的粉砂岩(s-1)脆性指标相同为 0.59,其微观变形特征都表现为少见裂隙;而对于单轴压缩下的样品(s-1,s-2,s-3),脆性指标相近约 0.7 左右,对应显微变形特征都发育穿晶张裂隙,本文提出脆性指标更能表征岩石脆性破裂特征。对于传统表征方法(表3),样品(s-1,s-2,s-3,l-93)的微观破裂特征都发育明显穿晶张裂隙,但对应的脆性指标 EBI 值存在很大差异(分别为 44.62, 43.02, 52.76, 93.02)。而且含油性碎屑岩(s-4)的 $EBI = 64.53$,大于粉砂岩样品(s-1,s-2,s-3)的脆性指标,显然表征结果与实验测试脆性破裂特征不相符。因此本文提出新脆性指标是合理的,可以用来准确的评价辽河盆地致密储层脆性程度。

表 4 新方法表征岩石的脆性程度						
Table 4 Rock brittleness described with the new method						
编号	深度/m	岩性	围压/ MPa	杨氏模量 (E)/GPa	软化模量 (M)/GPa ⁴	$BDI =$ $M/(M - E)$
s-1	334 0	粉砂岩	0	29.4	-92.2	0.76
			15.24	61.9	-105.9	0.63
			35.9	73.2	-107.1	0.59
s-2	334 1	粉砂岩	0	24	-64.9	0.73
s-3	334 2	粉砂岩	0	27.8	-61.9	0.69
s-4	335 4	碎屑岩	0	63.2	-90.2	0.59
l-93	307 6	泥页岩	0	69.7	-153.8	0.69
l-97	302 3	泥页岩	0	80.6	-101.8	0.56

3 结论

- 1) 从岩石破裂模式描述,脆性较强岩石表现为发育多条较小剪切破裂角(压缩方向与破裂面的夹角)、开度较大的断裂缝;从岩石微观显微裂缝类型分析,脆性较强岩石压裂后内部发育穿粒张裂缝,而脆性较弱岩石内部发育晶内微裂缝或不发育裂缝。
- 2) 粉砂岩为脆性较强岩石,单轴压缩试验后,宏观破裂明显,内部发育穿粒张裂缝;发育泥质纹层和储层沥青会降低粉砂岩的脆性,使其在光学显微镜下很难发现微裂缝。
- 3) 围压极大的抑制了微裂缝的扩展,随着围压增加,压裂后岩石内部微裂缝从穿粒张裂缝向晶内裂缝转换。
- 4) 本文分析岩石在三轴应力压缩破裂过程中能量与脆性的内在关系,基于峰值后的能量守恒原理,提出新的脆韧性指标 [$BDI = M/(M - E)$],其结果与岩石宏观破裂和显微裂缝特征分析有很好的 consistency。

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—以中致密油和致密气为例[J]. 石油学报,2012,33(2):173-187.
Zou Caineng, Zhu Rujai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulate Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2):173-187.
- [2] 赵政璋,杜金虎. 致密油气[M]. 北京:石油工业出版社,2013.
Zhao Zhengzhang, Du Jinhu. Tight oil and gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [3] 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.
- [4] Marte G, Runar N. Shear failure and brittle to ductile transition in shales from p-wave velocity (C) // The 42nd US Rock Mechanics Symposium and; 2nd U. S.-Canada Rock Mechanics Symposium, 2008, 08-198.
- [5] Heard H C. Rock deformation [M]. New York: Geolgy Society of America, 1960, 193-226.
- [6] Morley A. Strength of materials [M]. London: Longmans Green, 1954; 532.
- [7] Hetenyi M. Handbook of experimental stress analysis [M]. New York: Wiley, 1966; 15.
- [8] Ramsey J G. Folding and fracturing of rocks [M]. London: McGraw-Hill, 1967; 289.
- [9] Obert L, Duvall W I. Rock mechanics and the design of structures in rock [M]. New York: Wiley, 1967; 278.
- [10] Howell J V. Glossary of geology and related sciences [M]. Washington D. C.: America Geological Institute, 1960; 99-102.
- [11] Tarasov B, Randolph M F. Superbrittleness of rocks and earthquake activity[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48: 888-898.
- [12] Tarasov B, Potvin Y. Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining, 2013, 59: 57-69.
- [13] 夏英杰,李连崇,唐春安,等. 基于峰后应力跌落速率及能量比的岩体脆性特征评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6): 1141-1154.
Xie Yingjie, Li Lianchong, Tang Chunan, et al. Rock brittleness evaluation based on stress dropping Rate after peak stress and energy ratio [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(6): 1141-1154.
- [14] George E A. Brittle failure of rock material test results and constitutive models [M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995; 123-128.
- [15] Hucka V, Das B. Brittleness determination of rocks by different methods[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1974, 11: 389-392.
- [16] Antonellini M, Aydin A, Pollard D D. Microstructure of deformation bands in porous sandstones at Arches National Park, Utah [J]. Journal of Structural Geology, 1994, 16: 941-959.
- [17] Hajiabdolmajid V, Kaiser P. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunnelling [J]. Tunnell Undergr Space Technol, 2003, 18: 35-48.
- [18] Ajiabdolmajid V, Kaiser P. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18: 35-48.
- [19] Honda H, Sanaday. Hardness of coal [J]. Fuel, 1956, 35: 451.
- [20] Lawn B R, Marshall D B. Hardness, toughness and brittleness: an indentation analysis [J]. Journal of American Ceramic Society, 1979, 62: 347-350.
- [21] Bazant Z P, Kazemi M T. Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete [J]. International Journal of Fracture, 1990, 44: 111-131.
- [22] Quinn J B, Quinn G D. Indentation brittleness of ceramics: a fresh approach [J]. Journal of Materials Science, 1997, 32: 4331-4346.
- [23] 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.
- [24] 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]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003, 103(9): 589-600.
- [25] 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, 2008, 115258.
- [26] 冯涛, 谢学斌. 岩石脆性及描述岩爆倾向的脆性系数 [J]. 矿冶工程, 2000, 20: 18-20.
Feng Tao, Wang Wenxing, Xie Xuebin, et al. Brittleness of rocks and brittleness indexes for describing rockburst proneness [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2000, 20: 18-20.
- [27] Protodyakonov M M. Mechanical properties and drillability of rocks [C] // Proceedings of the 5th Symposium on Rock Mechanics. Twin Cities, USA: University of Minnesota Press, 1963: 103-118.
- [28] Bishop A W. Progressive failure with special reference to the mechanism causing it [C] // Oslo: Proceedings of the Geotechnical Conference, 1967: 142-150.
- [29] Altindag R. The correlation of specific energy with rock brittleness concept on rock cutting [J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003, 103: 163-171.
- [30] 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.
- [31] Andreas H, Christophe R, Eric P, et al. Gas shale characterization Results of the mineralogical, lithological and geochemical analysis of cuttings samples from radioactive Silurian shales of a Palaeozoic Basin, SW Algeria [C] // North Africa Technical Conference & Exhibi-

- tion, Cairo, Egypt, SPE, 2013; 164695.
- [32] 李华阳, 周灿灿, 李长喜, 等. 致密砂岩脆性指数测井评价方法[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(5): 293–297.
- Li Huayang, Zhou Cancan, Li Changxi, 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]. Xingjiang Petroleum Geology. 2014, 35(5): 293–297.
- [33] Sidharth S, Qiu F, Neal M, et al. Critical comparative assessment of a novel approach for multi-mineral modeling in shale gas; results from an evaluation study of Marcellus Shale [C] // Unconventional resources conference and exhibition-Asia Pacific held in Brisbane, Australia, SPE, 2013; 167037.
- [34] Grieser B, Bray J. Identification of production potential in unconventional reservoirs[J]. SPE, 2007, 106623.
- [35] Moshe E, Simon E, Ruarri J D S, et al. Mechanical properties of organic matter in shales mapped at the nanometer scale[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 59: 294–304.
- [36] 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 Junliang, Deng Jingen, Zhang Dingyu, et al. Fracability evaluation of shale gas reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 523–527.
- [37] Guo J C, Zhao Z H, He S G, et al. A new method of shale brittleness evaluation[J]. Environmental Earth Science. 2015, 73: 5855–5865.
- [38] 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.
- [39] Plumb R A. Influence of composition and texture on the failure properties of clastic rocks[J]. SPE, 1994, 28022.
- [40] Murrell S A F. The effect of triaxial stress systems on the strength of rocks atmospheric temperatures[J]. Geophysical Journal International, 1965, 10: 231–281.

(编辑 董立)

(上接第1254页)

- [7] 高振中, 何幼斌. 中国油气勘探的一个新领域—深水牵引流沉积[J]. 海相油气地质, 2002, 7(4): 1–7.
- Gao Zhenzhong, He Youbin. A new field of petroleum exploration in China; deep-water traction current deposits[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2002, 7(4): 1–7.
- [8] 王玉柱, 王海荣, 高红芳, 等. 等深流作用机制和沉积的研究进展[J]. 古地理学报, 2010, 12(2): 141–150.
- Wang Yuzhu, Wang Hairong, Gao Hongfang, et al. Contour current dynamics process and deposits: a review[J]. Journal of Paleogeography, 2010, 12(2): 141–150.
- [9] 高剑超, 李明. 浅谈等深流及等深流沉积特征[J]. 地下水, 2014, 36(4): 230–237.
- Gao Jianchao, Li Ming. A preliminary analysis of contour current and its character[J]. Underground Water, 2014, 36(4): 230–237.
- [10] J C Faugeres, T Mulder. Contour currents and contourite drifts[J]. Developments in Sedimentology, 2011: 150–213.
- [11] 王青春, 鲍志东, 贺萍. 内波沉积中指向沉积构造的形成机理[J]. 沉积学报, 2005, 23(2): 255–259.
- Wang Qingchun, Bao Zhidong, He Ping. The generational mechanism of orientating sedimentary structure by internal waves[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(2): 255–259.
- [12] C S Fulthorpe, R M Carter. Continental-shelf progradation by sediment-drift accretion[J]. Geological Society of America Bulletin, 1991, 103(2): 300–309.
- [13] Jean Claude Faugeres, Dorrik A V Stow Patrice Imbert, et al. Seismic features diagnostic of contourite drifts[J]. Marine Geology, 1999(162): 1–38.
- [14] 何幼斌, 高振中. 塔中地区中—上奥陶统内波内潮汐沉积与油气勘探[J]. 海相油气地质, 2002, 7(4): 33–40.
- He Youbin, Gao Zhenzhong. Middle-upper ordovician internal-wave and internal-tide deposits and their significance of petroleum geology in the central tarim basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2002, 7(4): 33–40.
- [15] 何幼斌, 高振中, 罗顺设, 等. 陕西陇县地区平凉组三段发现内潮汐沉积[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(4): 28–33.
- He Youbin, Gao Zhenzhong, Luo Shunshu, etc. Discovery of internal tide deposits from the third member of pingliang formation in longxian area, shaanxi province[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(4): 28–33.
- [16] 丁海军. 贺兰拗拉谷北段奥陶系等深流沉积[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(1): 58–64.
- Ding Haijun. Ordovician contourites in northern helan aulacogen, northern china[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(1): 58–64.

(编辑 董立)