

青海油田某区块深层岩石可压性分析

范超强¹, 齐宏², 刘家魁², 田勇^{1,*}, 孙宏泰¹, 缪玉松¹

(1. 青岛理工大学理学院, 青岛 266525; 2. 中交(青岛)城市建设有限公司, 青岛 266300)

摘要: 油田地层的可压性评价是油田水力压裂施工中重点关注的问题, 它直接关系到最终的增产效果。对青海油田某区块的深层岩石开展可压性评价, 通过定义裂缝描述指数, 结合岩石力学参数和残余应力两种方法计算的脆性指数, 给出了脆性指标的表征算法; 利用塑性应变能定义了一种塑性指数计算方法, 结合岩石力学参数表示的塑性指数, 给出了塑性指标的表征算法; 在脆性指标和塑性指标相互验证的前提下, 基于这两种影响因素, 得到了可压性指数的计算公式, 利用 7 组试验岩芯的可压性结果对油田目标区块的水力压裂施工给出了指导性建议。

关键词: 油气田开发; 脆性指标; 塑性指标; 岩石可压性

中图分类号: TE327 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)05-0043-09

Compressive analysis of deep rock in a block of Qinghai Oilfield

FAN Chaoqiang¹, QI Hong², LIU Jiakui², TIAN Yong^{1,*}, SUN Hongtai¹, MIAO Yusong¹

(1. School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. CCCC (Qingdao) Urban Construction Co. Ltd., Qingdao 266300, China)

Abstract: Compressibility evaluation of oilfield formation is the key problem in hydraulic fracturing and is directly related to the final production increase. In this paper, the compressibility evaluation on the deep rock in one block of Qinghai Oilfield was carried out. Brittleness index was characterized quantitatively through defining the crack description index and combining it with two calculation methods of rock mechanics parameters and residual stress. Plasticity index was also characterized quantitatively through two calculation methods of plastic strain energy and rock mechanics parameters. Based on the above two factors, calculation formula of compressibility index was obtained in the premise of mutual verification with brittleness index and plasticity index, and the calculation results of 7 groups of test cores were used to put forward some suggestions to the hydraulic fracturing of target oilfield block.

Key words: oilfield development; brittleness index; plasticity index; rock compressibility

目前, 我国的油气田开发已逐渐进入中后期, 即开发重点由常规油气藏逐渐转向了特殊油气藏。进入 21 世纪以来, 裂缝性油气藏的产量占整个石油天然气产量一半以上, 如何提高裂缝性油气藏的勘探开发

收稿日期: 2023-06-05

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QE288); 教育部产学合作协同育人项目(220803009261616); 大学生创新创业项目(X202300627)

作者简介: 范超强(1997—), 男, 山东沂水人。硕士, 研究方向为油田岩石力学。E-mail: fcq2022021@163.com。

* 通信作者: 田勇(1987—), 男, 山东桓台人。博士, 讲师, 主要从事油田岩石力学方面的研究。E-mail: 20160015@upc.edu.cn。

效果,成为了石油工业领域中的重要研究方向。岩石可压性是油田地层在水力压裂过程中能否被有效压裂的关键评价参数之一,目前,国内外学者主要通过矿物组成、岩石力学参数、应力-应变曲线以及成岩作用等因素来表征岩石可压性^[1-5]。对于岩石的脆性评价,前人已取得了大量研究成果:HUCKA等^[6]根据岩石单轴抗压强度以及劈裂抗拉强度得到4种脆性指数的计算方法;高美奔等^[7]通过结合岩石峰前起裂脆性特征和峰后跌落脆性特征来表征脆性指数;李天斌等^[8]从岩石热-力-损伤本构模型出发,用其中的参数建立了新的脆性指数;夏英杰等^[9]在总结国内外岩体脆性指数计算方法及分析优缺点的基础上,提出了基于岩石峰后应力跌落速率和岩石破坏时所释放弹性应变能与峰前总能量比值来共同表征的脆性指标;周辉等^[10]利用岩石应力-应变曲线,建立了同时考虑塑性屈服特性和应力状态影响的脆性指标。由于油田深部地层岩石受多种因素影响,且局限于对其破裂机制的认识不足,所以深层岩石的可压性评价应趋向于多种因素综合分析,多种指标相互验证的方向发展,如刁海燕^[11]结合了弹性参数和矿物组成两种因素得到了一个新的岩石脆性计算公式。

本文综合考虑岩石的脆性和塑性这两个互补的影响因素,开展青海油田某区块深层岩石的可压性评价。试验岩芯取样深度在4000 m以上,共进行7组岩芯的室内试验,通过首次提出的裂缝描述指数 F_1 和两种脆性指数计算结果来衡量岩石的脆性指标;通过岩石三轴压缩过程的塑性应变能分析结果和塑性指数计算结果来衡量岩石的塑性指标,最终通过脆性指标和塑性指标的相互验证综合评价目标区块的可压性情况。

1 岩石三轴压缩试验

本文岩石三轴压缩试验采用如图1所示的试验系统,该试验装置采用电液伺服控制,可精确实现恒应力加载、恒应力速率加载、恒位移加载和恒位移速率加载,轴向最大应力可加载到400 MPa,围压最大可加载到50 MPa。试验中岩芯的轴向应变通过轴向位移传感器测得,横向应变通过利用磁致伸缩液位计测得的压力室中液体体积变化量计算得到。

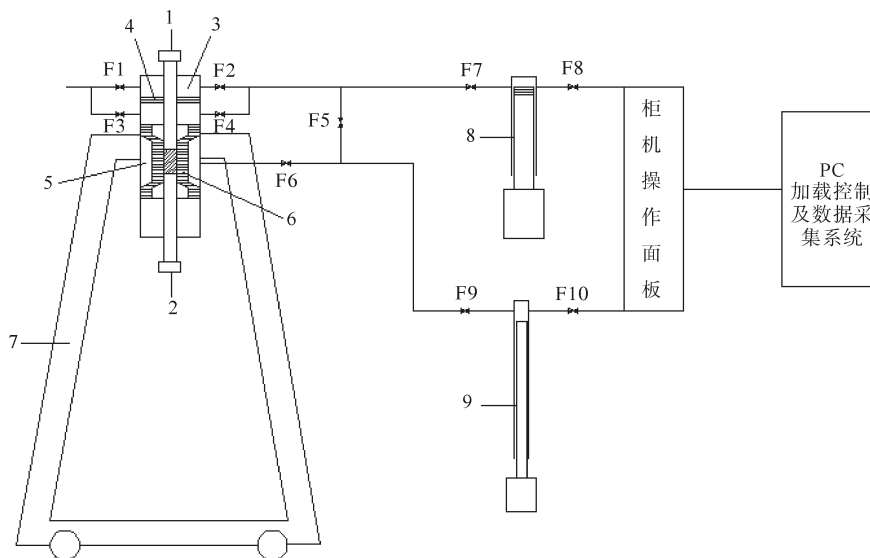


图1 岩石三轴压缩试验系统

1—上顶杆;2—下顶杆;3—轴压仓;4—活塞部件;5—围压仓;6—胶套;7—压力室支架;
8—活塞泵;9—柱塞泵;F1—F10为阀门开关

用取芯机从青海柴北缘地区取回的灰岩上钻取直径为25 mm的岩芯柱,将岩芯柱在切割机上切割成长度为50 mm的小岩芯,然后将小岩芯的两端面在磨平机上磨平,磨平后的两端面平行度公差不大于0.1 mm。本次试验共制得7组、22块小岩芯,将加工好的小岩芯装入压力室内,用橡胶套隔离密封,设置好轴压加载模式及速率后开始加载,直至试样加载破坏,试验结束。利用试验过程中自动记录的应力应变

数据,可得到每块小岩芯的全应力-应变曲线,从而得出基本的岩石力学参数(弹性模量、泊松比、峰值强度、内聚力和内摩擦角),7组岩芯的三轴试验结果见表1。

表1 7组岩芯的三轴试验结果

编号	深度 h/m	围压 σ_3 / MPa	峰值强度 σ_1 / MPa	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ	内聚力 c / MPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
第1组	4172	20	330.3	29.38	0.36	33.5	43.3
		30	242.9	29.73	0.30		
		40	295.3	30.71	0.30		
第2组	4179	20	187.9	21.06	0.37	16.4	47.7
		30	239.6	25.68	0.36		
		40	311.8	32.51	0.44		
第3组	4496	10	300.7	21.71	0.41	66.5	37.2
		20	327.4	29.70	0.32		
		30	364.6	30.08	0.29		
第4组	4017	10	331.6	32.66	0.35	30.6	42.4
		20	414.3	32.70	0.25		
		30	393.0	32.90	0.32		
第5组	4024	5	359.3	17.27	0.44	74.6	37.3
		10	180.3	17.66	0.39		
		30	215.1	24.06	0.40		
		40	309.0	24.74	0.41		
第6组	4095	20	237.9	11.02	0.45	48.7	34.6
		30	339.1	20.62	0.37		
		40	290.3	21.66	0.31		
第7组	4003	5	347.2	30.81	0.29	58.8	36.2
		10	349.7	31.60	0.37		
		40	246.2	32.35	0.44		

2 岩石的脆性指标

岩石脆性的含义为岩石在发生破坏之前,应力-应变曲线基本上为直线段,或者说岩石的受力状态达到某种极限程度后,很快发生猛烈破坏。

2.1 裂缝描述指数 F_f

油田地层在水力压裂施工过程中,考虑滤失和初滤失的情况下,任一时刻 t 时的裂缝半长扩展模型可表示为^[12]

$$X_f(t) = \frac{q [\omega(x, t) + 2C_0]}{4\delta h_f C_i^2} \left[e^{x'^2} \operatorname{erfc}(x') + \frac{2x'}{\sqrt{\delta}} - 1 \right] \quad (1)$$

缝宽扩展模型可表示为

$$\omega(x, t) = \omega(0, t) \left\{ \frac{x}{X_f} \sin^{-1} \frac{x}{X_f} + \left[1 - \left(\frac{x}{X_f} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{\delta}{2} \frac{x}{X_f} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

$$\omega(0, t) = 4 \left[\frac{2(1-\mu)\mu_w q^2}{\delta^3 G C_i h_f} \right]^{\frac{1}{4}} t^{\frac{1}{8}} \quad (3)$$

式中: $x' = \frac{2C_t \sqrt{\delta t}}{w(x, t)}$, x 为沿缝长任意位置点与井筒的距离, m ; $\delta = \frac{\Delta t}{t_0}$, 为压裂施工过程滤失时间; $\operatorname{erfc}(x')$ 为误差余函数; C_t 为综合滤失系数, $m/\min^{0.5}$; C_0 为初滤失, m^3/m^2 ; h_f 为压裂缝高度, m ; q 为压裂液排量, m^3/\min ; μ 为泊松比; μ_w 为压裂液黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; X_f 为压裂施工结束后的裂缝半长; G 为剪切模量, MPa ; E 为弹性模量, MPa ; t 为任一压裂施工时间, \min 。

由此可通过压裂施工参数由下式获得裂缝半长和平均宽度:

$$X_f^2 = \frac{\eta q t E}{\pi \beta h_f P_{\text{net}} (1 - \mu^2)} \quad (4)$$

$$w(x, t) = \frac{\pi P_{\text{net}} (1 - \mu^2)}{2E} h_f \quad (5)$$

式中: η 为压裂液效率; P_{net} 为关井时井底净压力, MPa ; $\beta = (2n + 2)/(2n + 3 + a)$, n 为压裂液的流态指数, a 为压裂液抗降解系数, 当 $a = 1$ 时表示压裂液黏度从井底到缝端呈线性变化, $a = 0$ 表示压裂液黏度恒定。

分析式(4)、式(5)可知, 当压裂液效率 η 、压裂液排量 q 、压裂缝高度 h_f 以及关井时井底净压力 P_{net} 等参数一定时, 压裂施工结束后的裂缝半长的平方 X_f^2 与 $E/(1 - \mu^2)$ 成正比, 而裂缝平均宽度 w 则与 $E/(1 - \mu^2)$ 成反比。

基于岩石脆性的基本含义, 压裂后形成的裂缝越长, 缝宽越小, 则岩石脆性特征越强, 因此定义 $E/(1 - \mu^2)$ 为油田地层的裂缝描述指数, 用 F_1 表示, F_1 值越高, 表明地层压裂后的裂缝半长越长, 裂缝平均宽度越小, 即脆性指标越高。利用表 1 中试验数据计算的 7 组岩芯的裂缝描述指数 F_1 值见表 2。

表 2 脆性指标汇总

编号	裂缝描述指数 F_1	脆性指数 B_1	脆性指数 B_C	脆性指标 C_Z	平均偏差 A_D
第 1 组	30.4	55.8	56.4	47.5	11.4
第 2 组	26.5	51.2	54.3	44.0	11.7
第 3 组	36.7	66.4	71.7	58.3	14.4
第 4 组	29.2	52.7	55.6	45.8	11.1
第 5 组	35.8	64.7	69.9	56.8	14.0
第 6 组	20.6	47.8	48.7	39.0	12.3
第 7 组	30.8	53.8	56.8	47.1	10.9

2.2 岩石力学参数计算脆性指数

如何利用岩石物理力学参数之间的统计关系预测脆性特征, 是目前石油工业中重点关注的问题。多数学者的研究结论认为弹性模量和泊松比可以较好地反映岩石在应力作用和微裂缝形成时的破坏能力。岩石产生裂缝后, 泊松比可以反映应力的变化, 弹性模量反映维持裂缝扩展的能力。

本文采用 RICKMAN 等^[13]提出的脆性指数计算方法, 对弹性模量和泊松比进行归一化处理, 得到脆性指数计算公式:

$$B_1 = \frac{[(E - E_{\min}) / (E_{\max} - E_{\min})] + [(\mu_{\max} - \mu) / (\mu_{\max} - \mu_{\min})]}{2} \times 100 \quad (6)$$

式中: B_1 为脆性指数; E 为弹性模量, GPa ; E_{\min} 为最小弹性模量, GPa ; E_{\max} 为最大弹性模量, GPa ; μ 为泊松比; μ_{\max} 为最大泊松比; μ_{\min} 为最小泊松比。

利用式(6)求得的本文 7 组试验岩芯的 B_1 值见表 2。

2.3 残余应力计算脆性指数

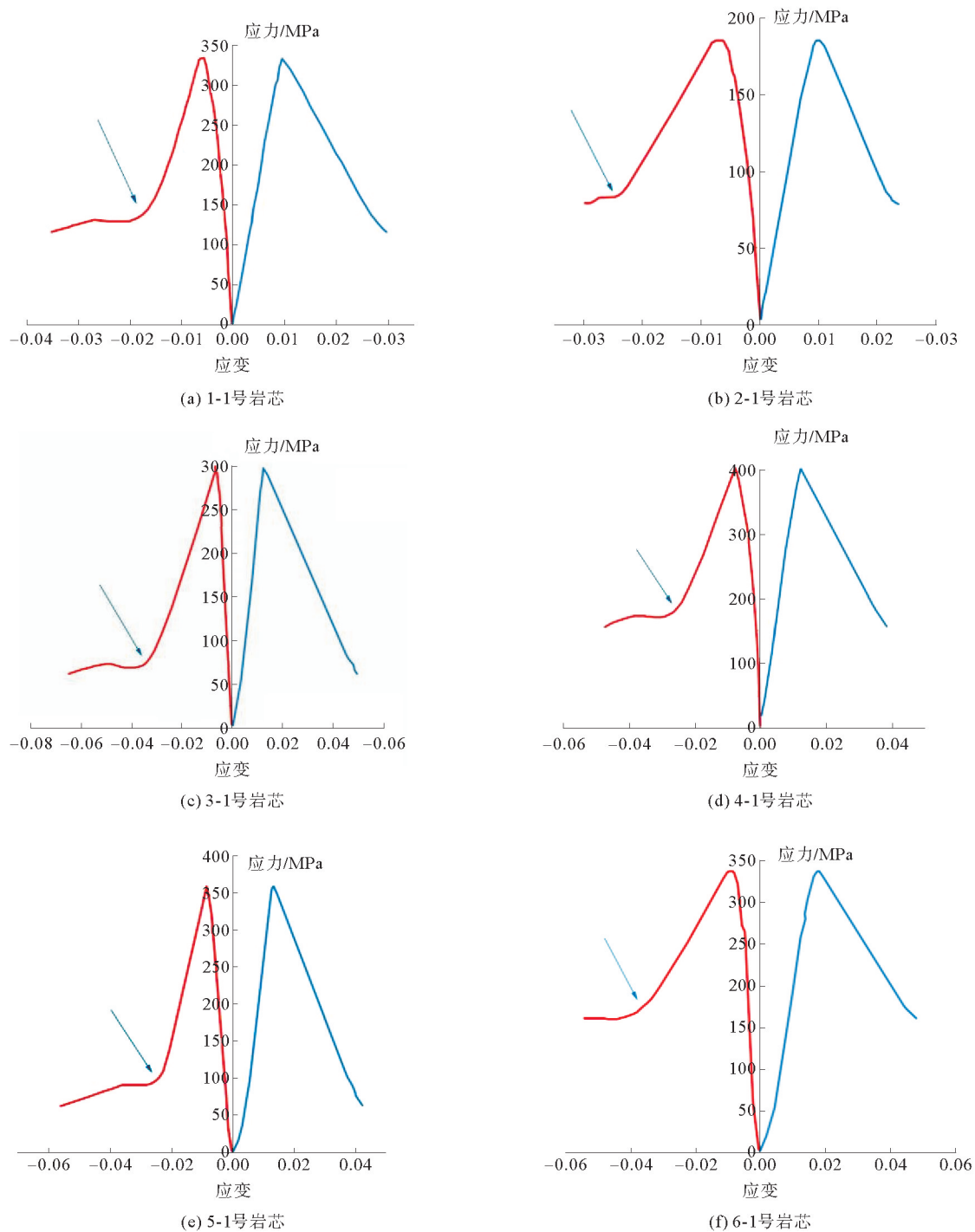
岩石三轴压缩试验获得的全应力-应变曲线是分析岩石脆性最直观有效的一种方法, 国内外学者建立了多种基于全应力-应变曲线计算脆性指数的方法。本文采用残余应力法, 即岩石峰后应力跌落幅度大

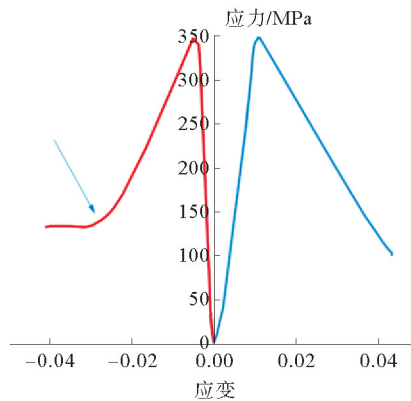
者,脆性强,具体计算公式见式(7):

$$B_c = \frac{\sigma_1 - \sigma_r}{\sigma_1} \times 100 \quad (7)$$

式中: B_c 为脆性指数; σ_1 为峰值强度,MPa; σ_r 为残余强度,MPa。

本文试验岩芯共有 7 组,从每一组中选取最低围压下进行试验的岩芯进行全应力-应变曲线分析,7 块岩芯的全应力-应变曲线见图 2。





(g) 7-1号岩芯

图2 7块岩芯的全应力-应变曲线

— 径向应变；— 轴向应变

通过分析图2可以得到7块岩石的残余强度分别为144、86、85、184、108、174和150 MPa,然后利用残余应力法计算得7块岩芯的脆性指数 B_C 值。

将上述3种脆性指标描述方法的计算结果汇总于表2中,通过对比 F_1 、 B_1 和 B_C 这3种指数可看出,它们具有较高的统一性,如裂缝描述指数 F_1 的最大值出现在第3组岩芯,而同时第3组岩芯的脆性指数 B_1 和 B_C 值也是7组岩芯中最大的,所以采用这3种指数的计算结果来共同表征岩石的脆性特征是合理可行的。本文定义岩石的脆性指标 C_Z 为这3种指数(F_1 、 B_1 和 B_C)的平均值,并定义 A_D 为每组数据相对于脆性指标 C_Z 的平均偏差,用来说明数据的稳定性,具体计算结果见表2。

由表2可知:每组试验数据的平均偏差都大于10.0,是由于裂缝描述指数 F_1 与其他脆性指数评价标准不一样,但都稳定在11.5左右,只有个别超过14.0,说明试验数据十分稳定,用裂缝描述指数 F_1 和脆性指数 B_1 、 B_C 来共同表征脆性指数具有可行性。

3 岩石的塑性指标

岩石塑性的含义为,岩石在压缩破坏前的应力-应变曲线并非直线段,其斜率逐渐变小,或者说岩石压缩破坏前有较大变形,不会发生突然破坏。

3.1 塑性应变能分析

岩石的压缩破坏过程伴随着原有裂缝的扩展、新裂缝的形成及贯通等,其中裂隙面的产生以及颗粒间的错位运动等都消耗能量,因此,研究岩石破坏过程的能量变化状态对于揭示岩石性能具有重要意义。

岩石在三轴压缩过程中,岩样实际吸收的能量并不等于三轴压缩机对岩样施加的能量,这是因为岩样在径向的膨胀要对液压油做功。因此,岩石在等围压三轴压缩破坏过程中实际消耗的能量 K 可表示为^[14-15]

$$K = \int \sigma_1 d\epsilon_1 + 2 \int \sigma_3 d\epsilon_3 \quad (8)$$

式中: K 为能量, MJ/m^3 ; ϵ_1 和 ϵ_3 分别为轴向应变和径向应变,且径向应变 ϵ_3 为负值。

将泊松比 $\mu = -\epsilon_3/\epsilon_1$ 代入式(8)可得

$$K = \int (\sigma_1 - 2\mu\sigma_3) d\epsilon_1 \quad (9)$$

利用式(9)对本文试验中7组岩芯的应力应变数据进行计算,可得到每组岩芯在压缩破坏前的塑性应变能和总应变能,结果见表3。本文从岩石塑性的基本含义出发,定义塑性指数 P_N 为

表3 塑性应变能分析结果

编号	塑性应变能 $K_S/$ ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	总应变能 $K_Z/$ ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	P_N
第1组	0.36	1.65	21.64
第2组	0.43	1.49	28.86
第3组	0.36	2.65	13.58
第4组	0.43	1.60	26.56
第5组	0.32	2.03	15.64
第6组	0.94	2.88	32.64
第7组	0.42	1.79	23.59

岩石压缩破坏前塑性应变能占总应变能的百分数, $P_N = (K_S/K_Z) \times 100$, P_N 值越大, 表明岩石塑性变形越大, 越不易被压裂。

3.2 塑性指数计算

夏英杰等^[16]的研究结果表明, 岩石脆性指数与声发射模式之间存在内在关系, 而岩石声发射信号与内摩擦角之间的关系已有研究成果报道^[17], 所以本文认为采用考虑了岩石内聚力和内摩擦角影响因素的式(10)来计算塑性指数^[18]合理性更高, 7 组岩芯的塑性指数计算结果见表 4。

$$P_C = \frac{[(c_{\max} - c)/(c_{\max} - E_{\min})] + [\partial(\varphi_{\max} - \varphi)/(\varphi_{\max} - \varphi_{\min})]}{2} \times 100 \quad (10)$$

式中: P_C 为塑性指数; c_{\max} 为最大内聚力, MPa; c 为内聚力, MPa; E_{\min} 为最小弹性模量, GPa; φ 为内摩擦角; φ_{\max} 为最大内摩擦角; φ_{\min} 为最小内摩擦角。

表 4 塑性指标

编号	塑性指数 P_N	塑性指数 P_C	塑性指标 S_Z
第 1 组	21.64	49.27	35.5
第 2 组	28.86	62.44	45.7
第 3 组	13.58	33.18	23.4
第 4 组	26.56	58.15	42.4
第 5 组	15.64	39.67	27.7
第 6 组	32.64	68.79	50.7
第 7 组	23.59	54.96	39.3

将上述 2 种塑性指数的计算结果汇总于表 4 中, 通过对比这 7 组岩芯的 P_N 和 P_C 值可看出, 它们具有较高的统一性, 如塑性指数 P_N 的最大值出现在第 6 组岩芯, 同时第 6 组岩芯的塑性指数 P_C 值也是 7 组岩芯中最大的, 所以采用这两种塑性指数来共同表征岩石的塑性特征是合理可行的。本文定义岩石的塑性指标 S_Z 为这 2 种指数(P_N 和 P_C)的平均值, 具体计算结果见表 4。

4 岩石的可压性指标

上文通过对岩石脆性指标和塑性指标的分析, 得出了两者的定量表征算法。由于深层岩石的可压性评价受多种因素影响, 本文尝试通过脆性指标和塑性指标的相互验证, 来对岩石可压性进行综合评价。通过对文中试验岩芯的脆性指标 C_Z 和塑性指标 S_Z 的计算结果研究发现, 两者之间呈很高的负线性相关关系, 具体结果见图 3。

从图 3 可看出, 本文计算的 7 组岩芯的脆性指标和塑性指标可以很好地相互验证, 表明本文选用的岩石脆性指标和塑性指标的代表方法是合理可行的。岩石脆性指标高, 表明在水力压裂施工时, 工作压力上升较快, 岩石裂开后形成的裂缝半长较大, 缝宽较小, 可压性较好; 岩石塑性指标高, 表明在水力压裂施工时, 工作压力上升较慢, 岩石裂开后形成的裂缝半长较小, 缝宽较大, 可压性较差。本文综合考虑脆性指标和塑性指标这两种影响因素, 通过定义可压性指数 C_1 来定量评价岩石可压性:

$$C_1 = \frac{C_Z - S_Z}{S_Z} \times 100 \quad (11)$$

式中: C_1 为可压性指数; C_Z 为脆性指标; S_Z 为塑性指标。

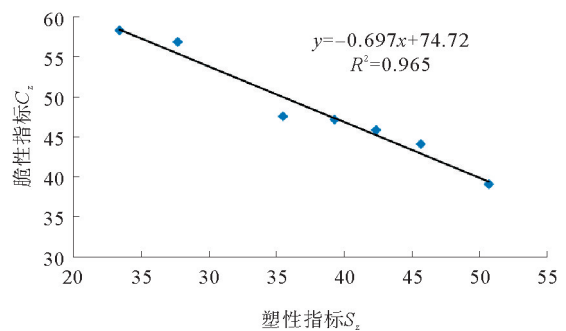


图 3 7 组岩芯的脆性指标和塑性指标关系

利用式(11)计算的7组岩芯的可压性指数结果见表5。从表5中数据可看出:第2组和第6组岩芯的可压性指数较低,不易被压裂;第3组和第5组岩芯的可压性指数较高,易被压裂,因此可参考作为水力压裂施工的甜点区。

表5 可压性指数计算结果

编号	塑性指标 S_z	脆性指标 C_z	可压性指数 C_1
第1组	35.5	47.5	33.8
第2组	45.7	44.0	-3.7
第3组	23.4	58.3	149.1
第4组	42.4	45.8	8.0
第5组	27.7	56.8	105.1
第6组	50.7	39.0	-23.1
第7组	39.3	47.1	19.8

5 结论

1) 基于岩石力学参数影响油田地层压裂裂缝形态的原理,定义了裂缝描述指数 F_1 ,计算得到了7组试验岩芯的 F_1 值,并结合另外两种脆性指数的计算方法,给出了综合表征岩石脆性指标 C_z 的算法。

2) 从能量角度出发,给出了利用塑性应变能计算塑性指数 P_N 的方法,结合另一种合理性较高的塑性指数计算方法,给出了综合表征岩石塑性指标 S_z 的算法,得到了7组试验岩芯的塑性指标值。

3) 通过岩石脆性指标和塑性指标的相互验证,在综合考虑这两种影响因素的前提下,定义了可压性指数 C_1 ,根据其计算公式得出了文中7组岩芯的可压性指数结果,对目标区块的水力压裂施工给出了指导意见。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] LEROUEIL S. Natural slopes and cuts: Movement and failure mechanisms[J]. Geotechnique, 2001, 51(3): 197-243.
- [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] 董浩, 王立婷, 王丽娜, 等. 页岩气藏体积压裂数学模型研究[J]. 断块油气田, 2014, 21(6): 755-758.
DONG Hao, WANG Liting, WANG Lina, et al. Mathematical model research of volume fracturing for shale gas reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(6): 755-758.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 高美奔, 李天斌, 陈国庆, 等. 基于岩石峰前起裂及峰后特征的脆性评价方法[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(4): 762-768.
GAO Meiben, LI Tianbin, CHEN Guoqing, et al. Brittleness evaluation method based on pre-peak crack initiation and post-peak characteristics of rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(4): 762-768.
- [8] 李天斌, 高美奔, 陈国庆, 等. 基于热-力-损伤本构参数的硬岩脆性评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S1): 2593-2602.
LI Tianbin, GAO Meiben, CHEN Guoqing, et al. A method for evaluating brittleness of hard rocks based on thermal-mechanical damage constitutive parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S1): 2593-2602.
- [9] 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.

- XIA Yingjie, LI Lianchong, TANG Chun'an, 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.
- [10] 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 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, 2014, 33(6): 1114-1122.
- [11] 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.
- [12] 仲冠宇, 王瑞和, 周卫东, 等. 水力深穿透射孔对压裂裂缝形态影响的数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版) 2016, 40(5): 79-86.
ZHONG Guanyu, WANG Ruihe, ZHOU Weidong, et al. Numerical simulation of hydraulic deep jet perforation on fracture propagation and orientation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(5): 79-86.
- [13] 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/OL]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, September 2008. [2023-06-05]. <https://doi.org/10.2118/115258-MS>.
- [14] 田勇, 俞然刚. 不同围压下灰岩三轴压缩过程能量分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 118-122.
TIAN Yong, YU Rangang. Energy analysis of limestone during triaxial compression under different confining pressures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 118-122.
- [15] 朱维申, 程峰. 能量耗散本构模型及其在三峡船闸高边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 261-264.
ZHU Weishen, CHENG Feng. Constitutive model of energy dissipation and its application to stability analysis of ship-lock slope in Three Gorges project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 261-264.
- [16] 夏英杰, 李连崇, 唐春安, 等. 储层砂岩破坏特征与脆性指数相关性影响的试验及数值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 10-28.
XIA Yingjie, LI Lianchong, TANG Chun'an, et al. Experiment and numerical research on failure characteristic and brittleness index for reservoir sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 10-28.
- [17] YU Rangang, TIAN Yong, WANG Xiaoxue. Relation between stresses obtained from kaiser effect under uniaxial compression and hydraulic fracturing[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(1): 397-401
- [18] 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.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)