

破坏准则在深层致密砂岩强度预测中的应用

洪成云 尹 帅 李关访

(成都理工大学能源学院,油气藏地质及开发工程国家重点实验室,成都 610059)

摘 要 为了预测深层致密砂岩的破坏强度,应用 Bieniawski 准则、Hoek-Brown 准则、Shoerey 准则、Ramamurthy 准则、Mogi 准则(1967)对实测三轴数据进行拟合,对未知系数进行赋值,同时探讨了各未知系数的含义、适用范围及取值方法,克服取值的随意性。最后对深层致密砂岩的破坏强度进行预测,结果表明各准则都具有一定精度,但 Hoek-Brown 准则的精度最高,五种破坏准则精度排序为 Hoek-Brown 准则 > Bieniawski 准则 > Shoerey 准则 > Mogi 准则(1967) > Ramamurthy 准则。

关键词 破坏准则 深层 致密砂岩 精度 应用

中图法分类号 P554; **文献标志码** A

目前国内外提出的岩石破坏准则接近上百种^[1],人们一直试图探索出一种最能体现岩石破坏特征的表达方式,但由于不同地区、不同类型岩石的差异,造成部分准则的应用具有局限性,很难做到某个准则在表达方式和实际结果上达到一致或统一^[2]。目前描述岩石破坏强度(抗压强度)的准则主要包括线性(如 Mohr-Coulomb 破坏准则^[3])和非线性(如 Hoek-Brown 准则^[4])准则,线性准则的应用较为普遍,而非线性准则其实也是在线性准则的基础上进行不断逼近,仍然不能完全一致。同时深层致密砂岩可储集异常丰富的油气^[5],是目前国家能源战略转移的重点,其破坏准则代表重要的岩石力学性质,在油气开发和压裂改造等方面举足轻重^[6]。现通过将 Hoek-Brown 准则、Bieniawski 准则、Shoerey 准则、Ramamurthy 准则、Mogi 准则(1967)应用到深层致密砂岩中,利用实验室三轴测试数据对准则中未知系数进行拟合,同时探讨各系数的含义、适用性及取值方法,克服取值的随意性,最后对各准则的表征效果进行评判和排序,找出最能体现深层致密砂岩力学性质的破坏准则。

1 破坏准则及强度参数赋值

1.1 样品信息

力学实验样品共分4组,为深层(>5 000 m)致密低孔、低渗砂岩,岩性为中-细粒长石岩屑石英砂岩、细-中粒长石岩屑砂岩及细粒长石岩屑砂岩。4组样品每组4个,孔隙中均含饱和水,温度按地温梯度2.5℃/100 m设置,三轴有效围压分别为0、22

MPa、44 MPa、65 MPa,岩样在各级有效围压下破坏时的抗压强度值在应力应变曲线上读出。

1.2 Bieniawski 准则

Bieniawski 准则在1974年提出^[7],该准则的表达形式如式(1), σ_1 为三轴抗压强度值, σ_3 为各级有效围压, C_0 为岩石单轴抗压强度,这几个参数均为已知参数,可通过设置或实验获得。 a_1 、 b_1 和 α 为未知参数,需通过拟合获得,实验最终拟合获得的三轴条件下致密砂岩 a_1 的取值范围是0.43~1.27(表1), b_1 的取值范围是2.66~4.71(表1),这与 Bieniawski 建议的 a_1 取值在0.75左右, b_1 取值在3~5的范围相一致^[7], α 取 Bieniawski 的建议值0.75。将拟合系数及第4级有效围压(65 MPa,地层条件下)代入 Bieniawski 准则公式中预测该条件下致密砂岩抗压强度(表1),将该预测值与实测值进行对比(表1),结果表明最小相对误差为-0.78%,最大相对误差为-8.9%,各误差均在工程误差允许范围以内(10%左右),除了第一个样品误差较大外,其他样品预测精度都较高。

$$\sigma_1 / C_0 = a_1 + b_1 (\sigma_3 / C_0)^\alpha \quad (1)$$

表1 Bieniawski 准则预测破坏强度

Table 1 Fracture strength predicting by Bieniawski rule

a_1	b_1	实测值 /MPa	预测值 /MPa	相对误差/%
0.433 2	4.712 7	298.95	272.34	-8.90
1.081 3	2.659 4	256.45	258.46	0.78
1.268 3	3.057 2	226.25	234.97	3.85
1.174 9	3.004 8	277.63	284.88	2.61

1.3 Hoek-Brown 准则

Hoek-Brown 在1995年修订的最终破裂准则公式为式(2)~式(4)^[4],该准则的未知参数有 GSI、

2013年9月10日收到

第一作者简介:洪成云(1958—),男,白族,四川省成都市人。E-mail:hong_chengyun@163.com。

m_b 、 s 、 D 和 a , GSI 和 m_b 均可代表岩石的内部连接程度、破碎程度或岩石的硬度等物性特征, GSI 的全称为 Geological Strength Index (地质强度指数)^[8], 该参数在 Hoek-Brown 准则中至关重要, 取值范围为 0 ~ 100, 当取值为 100 时代表完整、内部连接程度好的岩石, 而当取值为 0 时则代表破碎或节理缝等弱面十分发育的岩石, 过度类型岩石则在中间范围取值, Hoek 本人推荐采用地质观察的方法赋经验值, 本次实验拟合获得的致密砂岩 (三轴模拟地层条件) GSI 值在 70.8 ~ 100 的范围内 (表 2), 代表内部连接程度好的岩石, 与实际取芯及观察相符; m_b 一般也是上述物性的表征, 当 m_b 取值较大时代表脆性岩石, 往往具有较大的抗压强度, 当取值较小时, 代表塑性岩石, 往往抗压强度略小, 本次实验拟合结果如表 2, m_b 值变化较大, 但其与 GSI 和实测抗压强度均具有较好对应关系, 反映出该赋值的可信度较高。 D 的取值为 0 ~ 1, 代表岩体的受扰动程度, 一般严重受扰动时取 1, 未受扰动取 0, 现主要考虑未受扰动岩体, D 值取 0。系数 s 和 a 主要是用来调节强度包络线的形态, 可通过拟合进行获得, 两者变化不大, s 大致取 0.75, a 大致取 0.5。将拟合参数代入 Hoek-Brown 公式, 致密砂岩三轴强度预测值和实测值关系见表 2, 可以看出相对误差均在 4.4% 以下, 表明该准则预测的精度非常高, 具有较高应用价值。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + C_o (m_b \sigma_3 / C_o + s)^a \quad (2)$$

$$s = \text{Exp}[(GSI - 100)/(9 - 3D)] \quad (3)$$

$$a = 0.5 + \{[\text{Exp}(-GSI/15)] - [\text{Exp}(-20/3)]\} / 6 \quad (4)$$

表 2 Hoek-Brown 准则预测破坏强度

Table 2 Fracture strength predicting by Hoek-Brown rule

m_b	GSI	实测值 /MPa	预测值 /MPa	相对误差/%
24.4	100	298.95	294.58	1.46
6.2	70.8	256.45	252.34	1.6
7.96	78	226.25	220.03	2.75
7.89	77.8	277.63	265.41	4.4

1.4 Shoerey 准则

$$\sigma_1 = C_o (1 + \sigma_3 / \sigma_1)^\alpha \quad (5)$$

该准则也是非线性的, 不但考虑了无侧限条件下岩石抗压强度 C_o , 而且考虑了岩石单轴抗张强度 σ_1 , 因此也可以对抗张强度进行预测。将实验数据代入 Shoerey 准则公式, 拟合结果如表 3, 其中 β 的变化范围为 0.45 ~ 0.84, 拟合的 C_o 值 (表 3) 与实测值相比相对误差非常小, 两者相对误差分别为 5.3%、1.2%、4.9% 和 3.8%; σ_1 变化范围不大, 在 4.4 ~ 5.5 MPa 之间。将预测的参数代入 Shoerey 准

则准则公式对岩石抗压强度进行预测, 并与实测值进行对比 (表 3), 结果表明第 1 组精度较低, 其它 3 组评价效果较好。

表 3 Shoerey 准则预测破坏强度

Table 3 Fracture strength predicting by Shoerey rule

C_o /MPa	β	实测值 /MPa	预测值 /MPa	相对误差/%
31.04	0.838 9	298.95	263.04	-12.01
77.36	0.453 9	256.45	258.95	0.97
45.67	0.606	226.25	242.03	6.97
73.38	0.522 4	277.63	285.82	2.95

1.5 Ramamurthy 准则

Ramamurthy 公式的原始表达式为式 (6), 该公式需要的未知参数较多, Ramamurthy (1994) 认为对于大多数的岩石来说系数 b 可以取 2/3, B 可以取 $1.3C_o/\sigma_1^{1/3}$, 因此式 (6) 可以转化成为式 (7), 将三轴实验数据代入该式进行拟合, 最终结果见表 4, 第一组的误差非常大, 会对最后整体评价产生较大的不利影响。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_3 + \sigma_1) = B[C_o/(\sigma_3 + \sigma_1)]^b \quad (6)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 1.3C_o(1 + \sigma_3/\sigma_1)^{1/3} \quad (7)$$

表 4 Ramamurthy 准则预测破坏强度

Table 4 Fracture strength predicting by Ramamurthy rule

σ_1 / MPa	实测值/ MPa	预测值/ MPa	相对误差/%
1.68	298.95	210.27	-29.7%
9.84	256.45	260.40	1.54%
2.51	226.25	234.52	3.66%
5.35	277.63	281.97	1.56%

1.6 Mogi 准则 (1967)

$$(\sigma_1 - \sigma_3)/2 = k[(\sigma_1 + \beta\sigma_2 + \sigma_3)/2]^\alpha \quad (8)$$

Mogi 准则 (1967) 如式 (8)^[9], σ_2 为中间应力, 本文中取 $\sigma_2 = \sigma_3$, k 、 β 和 α 为未知系数, 首先对所测 4 组数据进行拟合, 得出 4 组 k 、 β 和 α 值, 其中 β 值在 0.1 左右时代表岩性偏脆性, 当岩石具塑性时会显著减小^[9], 系数 β 主要用于调节 σ_2 对该经验准则的影响, 拟合结果表明实验中致密砂岩 β 值主要分布在 0.06 ~ 0.08, 变化范围不大, 主要是由于模拟地层条件后致密砂岩处于高温、高压、饱水环境, 因此会呈现一定弹 - 塑性。 k 和 α 拟合结果见表 5, k 值范围为 1.68 ~ 3.67, α 范围为 0.65 ~ 0.796, 两者变化范围都不大。将拟合系数代入模型公式之后, 在求解 σ_1 时由于带有小数次方, 因此可以利用泰勒级数对公式右侧进行展开, 只保留一次项求得近似解, 或根

据方程两侧曲线相交性求得最逼近值,本文采用第二种方法,最终三轴抗压强度预测值与实际值绝对误差分别为 1.3%、1.3%、0.1%、1.2%,误差较小,可近似代表方程式(8)的解,即预测的岩石三轴抗压强度值。将该预测强度与实测值进行对比,见表 5,第 1 组误差较大,其余 3 组相对误差低于 8%,整体来说该评价方法精度一般。

表 5 Mogi 准则(1967)预测破坏强度
Table 5 Fracture strength predicting by Mogi rule

k	α	实测值 /MPa	预测值 /MPa	相对误差/%
1. 68	0. 796 1	298. 95	259. 95	-13. 05
3. 67	0. 648	256. 45	268. 45	4. 68
2. 55	0. 704 5	226. 25	244. 25	7. 96
2. 96	0. 702	277. 63	291. 63	5. 04

2 评价效果对比

以上相对误差可代表各准则预测的精度,若要对所有准则的评价精度进行排序,则可根据关联公式(式(9))进行评价,其中 $r(x_0, y_i)$ 代表计算值与真实值之间的关联系数,该值范围为 $[-1, 1]$,其绝对值越大,表明模型预测精度越高; x_i 为预测值, y_i 为实测值。各准则对比结果见表 6, r 值与相对误差具有较好的对应关系,高 r 值对应较低的相对误差。对致密砂岩破坏准则评价中,各准则的评价精度排序为:Hoek-Brown 准则 > Bieniawski 准则 > Shoerey 准则 > Mogi(1967) 准则 > Ramamurthy 准则。

$$r(x_0, y_i) = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

表 6 各准则评价精度对比

Table 6 Comparison of evaluation accuracy of the rules

准则	r	平均相对误差/%
Bieniawski 准则	0. 863	4. 04
Hoek-Brown 准则	0. 992	2. 55
Shoerey 准则	0. 677	5. 73
Ramamurthy 准则	0. 148	9. 12
Mogi 准则(1967)	0. 511	7. 68

3 结束语

将深层致密砂岩三轴破坏强度数据应用到 5 种破裂准则中[Bieniawski 准则、Hoek-Brown 准则、

Shoerey 准则、Ramamurthy 准则、Mogi 准则(1967)],对经验准则中的未知系数进行赋值,明确各系数的含义、范围及赋值方法,避免了取值的随意性。最后对致密砂岩的破坏强度进行了预测,结果表明各准则都具有一定精度,但 Hoek-Brown 准则的精度最高,四种破坏准则精度排序为 Hoek-Brown 准则 > Bieniawski 准则 > Shoerey 准则 > Mogi(1967) 准则 > Ramamurthy 准则,该研究对明确深层致密砂岩破坏特征等力学性质方面及储层压裂改造方面具有一定应用价值,且在其它相关领域如断裂力学、裂纹延展、冲击载荷、非连续分叉等学科方面也具有一定参考价值。

参 考 文 献

- 俞茂宏. 线性和非线性的统一强度理论. 岩石力学与工程学报, 2007;26(4):662—666
Yu Maohong. Linear and nonlinear unified strength theory. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007;26(4):662—669
- Colmenares L B, Zoback M D. A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002;(39):695—729
- 周文, 闫长辉, 王世泽, 等. 油气藏现今地应力场评价方法及应用. 北京:地质出版社, 2007
Zhou Wen, Yan Changhui, Wang Shize, et al. Evaluation method and application of the geostress field reservoir in nowadays. Beijing: Geology Publishing House, 2007
- Hoek E, Marinos P G, Marinos V P. Characterisation and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005;(42):277—284
- 尹帅, 单钰铭, 周文, 等. 统筹法在油气田开发中的应用. 桂林理工大学学报, 2013
Yin Shuai, Shan Yuming, Zhou Wen, et al. Application of PERT network in oil-gas field development. Journal of Guilin University of Technology, 2013;33(4):640—645
- 尹帅, 单钰铭, 谢润成, 等. 柯坪塔格组下砂岩段岩石力学参数特征分析及测井解释方法. 科学技术与工程, 2013;13(26):7768—7773
Yin Shuai, Shan Yuming, Xie Runcheng, et al. The parameter characteristics of lithomechanics and logging interpretation of the lower sandstone member of Kalpintag Formation. Science Technology and Engineering, 2013;13(26):7768—7773
- Bieniawski Z T. Estimating the strength of rock materials. Journal of South Africa Institute of Mine and Metall, 1974;4(8):312—319
- Marinos V, Marinos P, Hoek E. The geological strength index: applications and limitations. Bull Eng Geol Environ, 2005;64:55—63
- Mogi K. Effect of the intermediate principal stress on rock failure. Journal of Geophysical Research, 1967;(72):5117—5129

Application of Failure Criteria on the Deep Tight Sandstone Strength Prediction

HONG Cheng-yun, YIN Shuai, LI Guan-fang

(College of Energy Resource and State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploration, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, P. R. China)

[**Abstract**] In order to predict the strength of the deep tight sandstone, using Bieniawski Criteria, Hoek-Brown Criteria, Shoerey Criteria, Ramamurthy Criteria, Mogi Criteria(1967) to fit the measured three axis data, carry on the assignment, at the same time, the meaning of the unknown coefficient value are discussed, scope and its method, so the random optional values can be werconed. Finally forecast the destruction strength of the deep tight sandstone, the result shows that each criterion has a certain accuracy, Hoek Brown Criteria has the highest precision, the precision sort for the Criterias is: Hoek-Brown Criteria > Bieniawski Criteria > Shoerey Criteria > Mogi Criteria(1967) > Ramamurthy Criteria.

[**Key words**] failure criterion deep tight sandstone precision application.

(上接第 109 页)

The Application of Alumina Potective Coating in Rubidium Spectrum Lamp

FENG Hao¹, CUI Jing-zhong¹, LI Guan-bin², ZHANG Ling¹

(Lanzhou Space Technology, Institute of Physics¹, Lanzhou 730000, P. R. China;
Lanzhou University of Technology², Lanzhou 730000, P. R. China)

[**Abstract**] The rubidium spectrum lamp (Rb lamp) is the critical component of Rb gas cell atomic frequency standard. The interaction of rubidium with the glass and the rubidium reaction with impurities are the two main reasons of rubidium depletion and light degradation after long-term operation. The γ -AlOOH boehmite sol with grain size of 30 nm was prepared by sol-gel method using $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ and $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ as raw materials. A transparent nano-aluminum coating, which is fabricated with dip coating in the inner wall of lamp envelope by Sol-Gel method. The thickness of the alumina coating is 3 μm and the average visible and near-infrared light transmission up to 90%. Observations of SEM show that the inner wall of lamp envelope with a dense uniform and continuous coating. After 6 months operation about half of rubidium consumption of the coated lamp compare to the conventional lamp indicates that nano-aluminum coating is an effective barrier layer for blocking the interaction of rubidium with the glass and reaction with impurities.

[**Key words**] rubidium spectrum lamp alumina potective coating rubidium depletion