

几种岩石强度准则的对比分析

石祥超, 孟英峰, 李 皋

(西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500)

摘 要: 采用常规三轴试验数据, 以最小平均拟合差为评价指标定量地对比分析 5 种强度准则描述岩石非线性强度特征的适用性。结果表明: 直线型 Mohr-Coulomb 准则不能描述岩石强度的非线性特征; 抛物线型 Mohr-Coulomb 准则虽能描述岩石强度的非线性特征, 但拟合误差较大, 计算所得强度参数与事实不符, 不宜使用; 对于中低围压 ($\sigma_3 < \sigma_c$) 下岩石强度的非线性特征, 单参数 Bieniawski 准则拟合精度与 Hoek-Brown 准则相当或稍好, 拟合精度接近于指数强度准则, 均优于双参数 Bieniawski 准则; 在高围压下岩石强度非线性特征较为显著, 应用单参数 Bieniawski 准则或 Hoek-Brown 准则描述误差较大, 三参数 Bieniawski 准则和指数强度准则拟合误差较小, 可用于评价深部或特深部高应力状态下岩石的强度特征。

关 键 词: 岩石强度准则; 岩石非线性强度特征; 强度准则适用性; 最小平均标准拟合差

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Comparative analyses of several rock strength criteria

SHI Xiang-chao, MENG Ying-feng, LI Gao

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Least mean standard fitting deviation is used as an evaluation index; we analyze the applicability of five conventional triaxial strength criteria to describe the nonlinear strength characteristics of rocks based on test data of ten rocks cited from public literatures. It is obvious that linear Mohr-Coulomb criterion can't describe the nonlinear strength characteristics of rocks. Parabolic Mohr-Coulomb criterion can describe the nonlinearity feature of rock strength; but for the reason that the fitting error is very great and the parameters from calculation is not consistent with the real data; so it is not suitable to apply parabolic Mohr-Coulomb criterion in geotechnical engineering. For the nonlinear strength characteristics of rocks at low-to-moderate confining pressure level ($\sigma_3 < \sigma_c$), the Bieniawski criterion with a single parameter and Hoek-Brown Criterion is better than Bieniawski Criterion with two parameters; their fitting accuracy is close to exponential strength criterion with three parameters; but they can't be used at high confining level. When nonlinear strength characteristics are very significant under high confining pressure, the fitting deviations of Bieniawski criterion with three parameters and exponential strength criterion with three parameters are smaller; so they can be used to evaluate the strength under high geostress.

Key words: strength criterion of rocks; nonlinear strength characteristics of rocks; applicability of strength criterion; least mean standard fitting deviation

1 引 言

强度理论研究材料在复杂应力条件下的屈服和破坏规律, 作为岩石力学的基础理论^[1], 在水利、石油、地质等工程领域得到广泛应用, 用于岩石强度的预测和校核, 确定岩石处于某种应力状态下是否破坏。关于岩石的强度理论一直是岩土工程界研究的热点问题, 到目前为止, 已经提出了上百个模

型和准则, 有关强度准则的应用研究论文则数以万计并不断对已有的强度准则进行修正和改进。但至今普遍适用的强度准则尚未发现^[2], 几乎每个强度准则都有不足和缺陷, 现有的强度准则均有一定的适用范围和应用条件。因此, 需要深入研究各强度准则对岩石强度的描述精度, 探讨其适用性, 确保强度准则应用的客观性、科学性。

随着开挖和开采深度不断加大, 处于深部 (埋

收稿日期: 2010-12-21

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目气体钻井技术与装备 (No. 2006AA06A103); 国家重大专项低渗气藏特殊复杂地层高效钻井关键技术 (No. 2008ZX05022-005)。

第一作者简介: 石祥超, 男, 1981 年生, 博士, 主要从事石油工程岩石力学及气体钻井提速机制方面的研究。E-mail: sxcdream@163.com

深在 2 km 以下) 或者特深部的岩石, 其力学特征取决于地球物理场特征, 即主要是地应力场、地温场和地下水渗流场的变化特征^[3-4]。在高温、高应力条件下岩石强度特征更加复杂, 经典的强度准则能否真实地描述深部岩石的强度特征, 如何客观地描述深部高应力状态下岩石的强度特性, 成为近年来工程界关注的热点^[3-8]。

笔者采用 10 种岩石的常规三轴试验数据, 深入研究直线型 Mohr-Coulomb 准则、抛物线型 Mohr-Coulomb 准则、Hoek-Brown 准则、Bieniawski 幂函数型准则、指数强度准则的特征及其各种应力状态下的适用性, 期望能够恰当地应用岩石的强度准则, 在实际运用过程中能够更好地发挥材料的自身潜能。

2 几种强度准则的表达形式

2.1 Mohr-Coulomb 准则

自 1900 年 Mohr-Coulomb 强度准则建立 100 年来, Mohr-Coulomb 准则为人类工程结构的强度计算、设计和应用力学学科的发展做出了巨大贡献。现在, 它已成为岩石力学著作中最基本的内容之一^[9-10], 但仍然被国内外学者所发展、检验、探讨, 提出了一系列修正准则。

Mohr-Coulomb 准则认为岩石承载的最大剪应力 τ 由黏聚力 c 和内摩擦力 φ 确定, 直线型 Mohr-Coulomb 强度准则可表示为

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: σ 为正应力。

若用主应力表述可表示为

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为最大、最小主应力。

赵彭年^[11]、李春光^[12]、余成学^[13]分别以压拉强度比表征岩石的强度, 对抛物型 Mohr-Coulomb 准则进行了探讨, 其表达式为

$$\sigma = a\tau^2 + b \quad (3)$$

若以 σ_c 表示单轴抗压强度; σ_t 表示单轴抗拉强度 $\lambda = \sigma_c / \sigma_t$ 表示单轴压拉强度比, 则参数 a 、 b 可表示为

$$\left. \begin{aligned} a &= \left(\frac{1 + \sqrt{\lambda + 1}}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{\sigma_t} \\ b &= -\sigma_t \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

若用主应力表述可表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{a(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{4} &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \sigma_t - \frac{1}{4a} \quad \sigma_1 > -\sigma_t + \frac{1}{a} \\ \sigma_3 &= -\sigma_t \quad \sigma_1 \leq -\sigma_t + \frac{1}{a} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

如果把式 (5) 记作^[14]

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = A(\sigma_1 + \sigma_3) + C \quad (6)$$

可利用回归方法计算得到其中参数。

2.2 Hoek-Brown 准则

Hoek 和 Brown^[15]对岩石三轴试验数据和岩体现场试验成果进行统计分析, 提出了岩体经验强度准则, 用于评价岩石的脆性破坏, 被称为 Hoek-Brown 准则或狭义 Hoek-Brown 准则, 其关系式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{(m \sigma_3 / \sigma_c + 1)} \quad (7)$$

Hoek^[16-17]将其修正为广义 Hoek-Brown 经验强度准则:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c (m \sigma_3 / \sigma_c + s)^\kappa \quad (8)$$

式中: m 为经验参数; s 、 κ 为与岩体特征有关的常数。

式 (7) 可写为^[18]

$$y = m \sigma_c x + \sigma_c^2 \quad (9)$$

式中: $x = \sigma_3$; $y = (\sigma_1 - \sigma_3)^2$ 。

应用线性回归的方法可以确定式 (9) 中的 m 、 σ_c 。本文主要研究 Hoek-Brown 经验强度准则描述岩石强度非线性特征的适用性。

2.3 Bieniawski 幂函数准则

Murrell^[19]提出了幂函数形式的经验强度准则如下:

$$\sigma_1 = F \sigma_3^A + \sigma_c \quad (10)$$

式中: F 、 A 为常数。

Bieniawski^[20]提出了幂函数经验强度准则来估算岩石的强度特征, 其公式为

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = 1 + e \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right)^f \quad (11)$$

式中: e 、 f 为由试验确定的参数, Bieniawski 利用上式对 5 类岩石进行拟合后将 f 确定为常数 0.75, 此时则含有 1 个未知参数。

若将式 (11) 转化为式 (12), 则含有 2 个未知参数 e 、 f , 可利用线性回归方法确定其常数 e 、 f

$$\ln \frac{\sigma_1 - \sigma_c}{\sigma_c} = \ln e + f \ln \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right) \quad (12)$$

若对上式进行修正可作为 3 个参数 (e 、 f 、 g) 的强度准则

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = g + e \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right)^f \quad (13)$$

Bieniawski 准则应首先确定岩石的单轴抗压强度，再用拟合的方法来确定公式中的参数。

2.4 指数强度准则

You^[21-22]以最小拟合差定量地比较了 Coulomb、Mogi、Hoek-brown 等强度准则，基于围压和中间主应力对强度的影响特征，分别构造了两种指数公式联合表示岩石的真三轴强度准则

$$\sigma_1 = \sigma_s + H(\sigma_2 - \sigma_3, \sigma_3) \quad (14)$$

$$\sigma_s = \sigma_3 + Q_\infty - (Q_\infty - Q_0) \exp\left(-\frac{(K_0 - 1)\sigma_3}{Q_\infty - Q_0}\right) \quad (15)$$

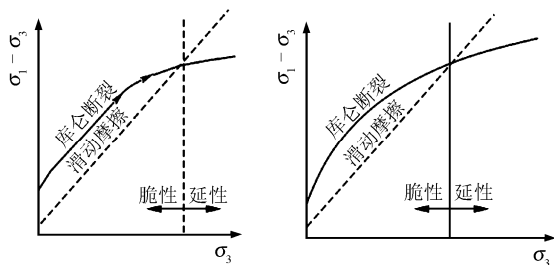
$$H(\sigma_2 - \sigma_3, \sigma_3) = Q_D \frac{\gamma(\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_s - \sigma_3} \exp\left[1 - \frac{\gamma(\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_s - \sigma_3}\right] \quad (16)$$

式中： σ_s 为常规三轴压缩强度 (MPa)； Q_0 单轴压缩强度 (MPa)； Q_∞ 为极限主应力差 (MPa)； K_0 为围压为 0 时对强度的影响系数； Q_D 为中间主应力对强度的最大影响值； γ 为达到最大强度的位置参数； $H(\sigma_2 - \sigma_3, \sigma_3)$ 为中间主应力强度影响函数。

You^[23]探讨了指数强度准则在常规三轴应力状态的特性，常规三轴压缩强度与 σ_s 围压 σ_3 的关系为式 (15)，需要确定 3 个参数 Q_∞ 、 Q_0 、 K_0 。

3 强度准则的对比分析

随着开采深度的不断增加，岩石的破坏机制也发生了改变，高地应力条件成为影响岩石强度、变形、破坏的主要特征^[24]，在低围压下的脆性岩石在高围压下转变为明显的延性特征。根据岩石脆-延性转化机制不同可将其分为两类^[25]（如图 1 所示），由于岩石的脆-延性转化的特征不同，岩石的强度曲线表现出明显差异，对于 A 类岩石存在明显的脆-延性转化点，B 类虽没有明显的转化点，但从脆性到延性依然表现出显著的非线性特征，无论 A 类还是 B 类，随着围压增加，强度增长率减少，峰值剪切强度^[26]和主应力差都将趋于常数^[21]，这些特征在



(a) A 类岩石强度-围压曲线 (b) B 类岩石强度-围压曲线

图 1 岩石的脆-延性转化特征

Fig.1 The characteristic of brittle-ductility transition of rock

强度-围压曲线上表现为显著的非线性特征。强度准则能否描述岩石强度的非线性特征值得探讨。因此，笔者采用 10 组常规三轴试验数据定量地分析了 5 种强度准则适用的应力范围及对岩石强度非线性特征描述的精度。

3.1 评价指标与数据来源

关于强度准则的评价指标，笔者采用最小平均标准拟合差

$$\eta = \sqrt{\frac{\sum_j (\sigma_{1,j}^{\text{calc}} - \sigma_{1,j}^{\text{test}})^2}{n}} \quad (17)$$

式中： $\sigma_{1,j}^{\text{test}}$ 为最大主应力的试验值 (MPa)； $\sigma_{1,j}^{\text{calc}}$ 为不同准则的计算值 (MPa)； j 为不同围压下试验点； n 为试验数据个数。

评价的试验数据引自文献，表 1 给出了岩石类型及数据来源。

表 1 岩石类型与数据来源
Table 1 Rock types and data sources

编号	数据点数	岩石类型	参考文献
1	26	Darley Dale 砂岩	[27]
2	29	Peannant 砂岩	[27]
3	11	Indiana 石灰岩	[16]
4	6	锦屏白山组大理岩	[25]
5	8	Tennessee 大理岩	[28]
6	6	大冶大理岩	[29]
7	11	Yamaguchi 大理岩	[30]
8	7	锦屏绿片岩	[6]
9	10	Westerly 花岗岩	[30]
10	9	红砂岩	[29]

3.2 脆性阶段岩石强度准则适应性分析

根据 Hoek 对脆-延性边界的划分原则^[18]： $\sigma_3 < \sigma_c$ 或 Mogi 对脆-延性边界的划分原则^[30]： $(\sigma_1 - \sigma_3) = 3.4\sigma_3$ ，Peannant 砂岩、Darley Dale 砂岩全部试验数据和 Indiana 石灰岩的 6 组试验数据处于脆性阶段，因此，以这 3 种岩石的试验数据评价强度准则在脆性阶段的描述精度。利用拟合方法得到直线型 Mohr-Coulomb 准则、抛物线型 Mohr-Coulomb 准则，Hoek-Brown 准则的计算参数，如表 2 所示，拟合曲线如图 2 所示。由表 2 和图 2 可以看出，即使在脆性阶段岩石强度仍然表现出一定的非线性特征，直线型 Mohr-Coulomb 准则对在脆性阶段拟合结果表现出较大的误差，利用拟合方法得到的抛物线型 Mohr-Coulomb 准则在低应力状态下明显高估了岩石的强度，其拟合误差比直线型 Mohr-Coulomb 准则还要大，并且由拟合得到的参数与实际相差太远，大多数岩石的压拉强度比在 15~35 之间^[22]，计算得到的 Peannant 砂岩压拉强度比为 73，这显然与事实不符。若单轴抗压强度采用试验

数据, 压拉强度比 λ 分别设为: 4、8、12、16、24, 应用抛物线型 Mohr-Coulomb 准则绘制的 Mohr 包络线, 如图 3 所示, 可以看出, 抛物线 Mohr 虽然表现出非线性特征, 但与试验数据相差较大, 与直线型 Mohr-Coulomb 相比并不具有优势, 并且岩石在压应力下的破坏机制不同于岩石在拉应力下破坏的机制^[22], 压拉强度比存在随机性, 不适用于表述岩

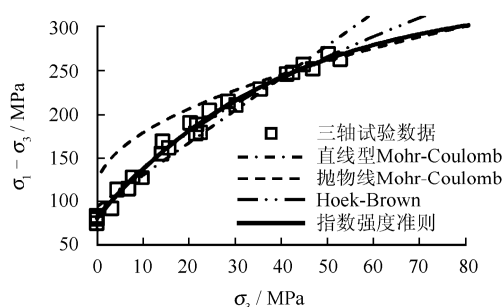
石的强度。对比 3 组拟合结果可以看出, 在岩石的脆性破坏阶段, Hoek-Brown 准则和指数强度准则均能取得较为满意的拟合效果, 指数强度准则优于 Hoek-Brown 准则。由图 2(c) 还可以看出, 对于 Indiana 石灰岩虽然只取了脆性阶段的 6 个数据进行拟合, 但指数强度准则与延性阶段的试验数据依然吻合良好。

表 2 4 种强度准则的拟合参数及最小平均标准拟合差

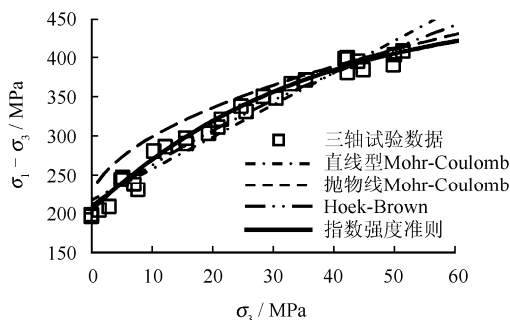
Table 2 Fitting parameters of four strength criteria and least mean standard fitting deviations for three rocks

岩石类别	σ_c /MPa	直线型 Mohr-Coulomb 准则			抛物线型 Mohr-Coulomb 准则				Hoek-Brown 准则			指数强度准则			
		c /MPa	φ (°)	η_{M-C} /MPa	a	b	λ	η_{PM-C} /MPa	m	σ_{Hc}	η_{H-B} /MPa	Q_0 /MPa	Q_∞ /MPa	K_0	η_{exp} /MPa
Darley Dale 砂岩	80	21.5	40.4	12.7	8.98×10^{-3}	-3.80	40	22.5	15.9	80.3	6.7	79	335	7.5	5.74
Peannant 砂岩	197	48.0	42.1	15.5	4.866×10^{-3}	-3.50	73	20.7	11.9	209.3	11.0	196	468	8.7	8.21
Indiana 石灰岩*	45	17.1	21.7	3.0	0.040×10^0	4.67	10	2.8	3.2	49.7	2.6	45	169	4.3	1.06

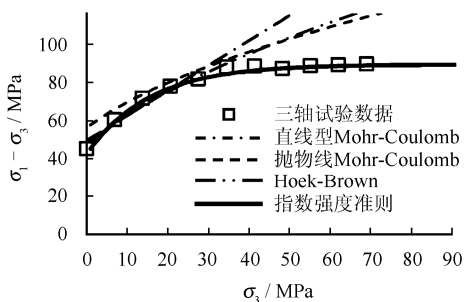
注: *表示 Indiana 石灰岩采用脆性阶段的 6 组数据进行拟合。 σ_{Hc} 为 Hoek-Brown 准则计算所得单轴抗压强度; η_{M-C} 、 η_{PM-C} 、 η_{H-B} 、 η_{exp} 分别为直线型 Mohr-Coulomb 准则、抛物线型 Mohr-Coulomb 准则、Hoek-Brown 准则、指数强度准则的最小平均标准拟合差。



(a) Darley Dale 砂岩



(b) Peannant 花岗岩



(c) Indiana 石灰岩

图 2 岩石常规三轴试验强度和 4 种强度准则拟合曲线

Fig.2 Conventional triaxial compression strengths of different rocks and fitting curves of four strength criteria

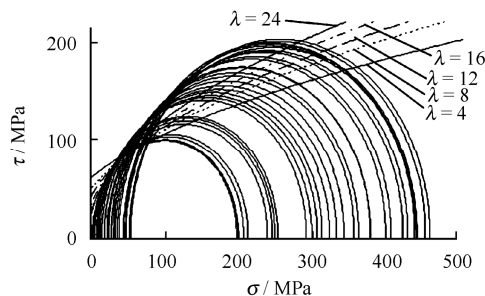


图 3 Peannant 砂岩 Mohr 应力圆和抛物线型 Mohr-Coulomb 准则包络线

Fig.3 Mohr stress circles and parabolic Mohr-Coulomb envelopes of Peannant sandstone

若用单参数 Bieniawski 准则, 即式 (11) 中的 $f = 0.75$, 双参数 Bieniawski 准则, 即式 (11) 中 f 未知, 三参数 Bieniawski 准则式 (13), 分别对 Peannant 砂岩、Darley Dale 砂岩、Indiana 石灰岩脆性破坏段的试验数据进行拟合, 结果如表 3 所示。对比 Hoek-Brown 准则、不同参数 Bieniawski 准则、指数强度准则, 可以看出, 以双参数 Bieniawski 准则拟合精度最低, 单参数和三参数 Bieniawski 准则对脆

表 3 Bieniawski 准则的拟合参数及最小平均标准拟合差

Table 3 Fitting parameters of Bieniawski criterion and least mean standard fitting deviations for three rocks

岩石 类别	Bieniawsk 准则								
	单参数		双参数			三参数			
	e_{B1}	η_{B1}	e_{B2}	f_{B2}	η_{B2}	e_{B3}	f_{B3}	g	η_{B3}
Darley Dal 砂岩	4.32	7.04	4.81	0.88	10.92	4.25	0.75	0.97	6.91
Peannant 砂岩	3.77	9.73	4.99	0.90	16.18	3.57	0.71	0.97	9.35
Indiana 石灰岩*	2.08	0.93	2.12	0.77	1.03	2.08	0.74	1.00	0.90

注: e_{B1} 、 η_{B1} 为单参数 Bieniawski 准则的模型参数及最小平均拟合差; e_{B2} 、 f_{B2} 、 η_{B2} 为双参数 Bieniawski 准则的模型参数及最小平均拟合差; e_{B3} 、 f_{B3} 、 g 、 η_{B3} 为三参数 Bieniawski 准则的模型参数及最小平均拟合差。

性阶段岩石强度描述精度与 Hoek-Brown 准则相当或稍好，与指数强度准则接近。需要指出的是 Bieniawski 准则使用了岩石的单轴抗压强度。

3.3 脆-延性阶段强度准则适应性分析

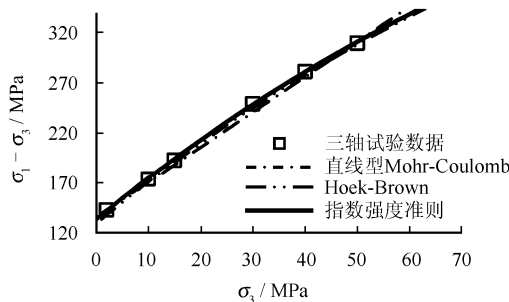
文献[5]中大理岩三轴试验数据虽然在应力-应变曲线上表现出明显的延性，但其强度曲线的非线性特征并不显著，如图 4(a)所示。文献[28-29]中的试验数据似乎与之相同，如图 4(b)、4(c)所示。对

于此种类型的岩石应用直线型线 Mohr-Coulomb 或 Hoek-Brown 准则进行描述似乎是可行的，指数强度准则对其拟合得到的曲线与 Hoek-Brown 准则基本重合，拟合误差相差不大，因此，张春生^[5]认为采用 Hoek-Brown 本构模型描述大理岩的脆-延-塑转换特征是可行的。但 Yamaguchi 大理岩的试验数据却不支持这样的观点，如图 4(d)，高围压下大理岩的强度依然表现出显著的非线性特征，此时采用 Hoek-Brown 准则进行拟合会表现出较大误差，而指数强度准则最小平均拟合偏差最小。因此，用 Hoek-Brown 准则描述高围压下大理岩的强度特征是否普遍适用，仍需仔细研究。

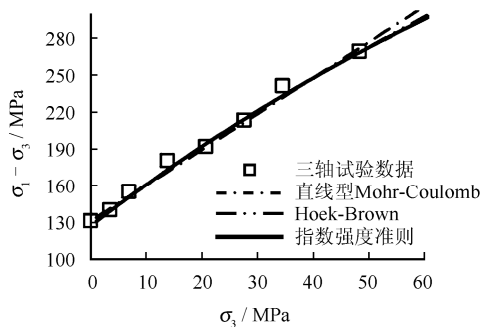
表 4 3 种强度准则对大理岩的拟合参数及最小平均标准拟合差

Table 4 Fitting parameters and least mean standard fitting deviations of marbles for three strength criteria

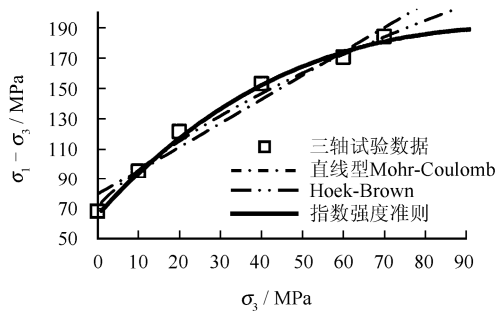
岩石类别	直线型 Mohr-Coulomb 准则			Hoek-Brown 准则			指数强度准则			
	c /MPa	φ /(°)	η_{M-C} /MPa	m	σ_{Hc} /MPa	η_{H-B} /MPa	Q_0 /MPa	Q_∞ /MPa	K_0	η_{exp} /MPa
Tennessee 大理岩	39.24	29.27	4.26	5.15	130.77	3.50	130.79	585.11	4.46	3.47
大冶 大理岩	24.80	26.13	8.08	5.51	74.18	4.04	68.56	368.14	4.95	2.24
锦屏白山组 大理岩	37.30	33.70	3.29	7.64	131.60	1.50	133.50	653.20	5.30	0.98
Yamaguchi 大理岩	45.71	16.35	21.44	2.37	120.78	16.98	86.60	259.10	3.82	3.59



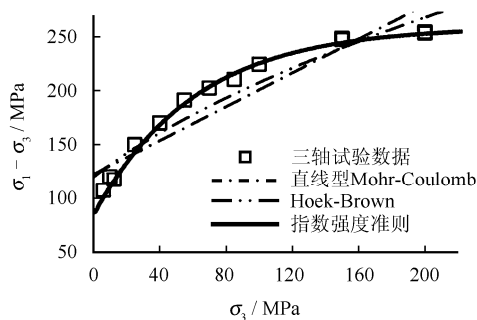
(a) 锦屏白山组大理石



(b) Tennessee 大理岩



(c) 大冶大理岩



(d) Yamaguchi花岗岩

图 4 大理岩常规三轴试验强度和不同强度准则拟合曲线
Fig.4 Conventional triaxial compression strengths of marbles and fitting curves of three strength criteria

图 5 为指数强度准则与含有不同参数的 Bieniawski 准则对 4 种围压下岩石三轴强度数据的拟合曲线，表 5 为拟合参数及最小平均标准拟合差。由图 5 和表 5 可以看出，当岩石强度由脆性向塑性转化表现出显著的非线性时，用单参数 Bieniawski 准则进行描述会产生较大误差，主要是由于参数 e_{Bi} 由式 $(\sigma_1 - \sigma_c)/\sigma_c$ 与 $(\sigma_3/\sigma_c)^{0.75}$ 回归得到，随着围压的增加， $(\sigma_1 - \sigma_c)/\sigma_c$ 的变化率将减小，与 $(\sigma_3/\sigma_c)^{0.75}$ 的线性关系变差，若将回归得到的系数 e_{Bi} 带回到 Bieniawski 准则中，拟合曲线产生了较大误差。双参数 Bieniawski 准则拟合误差较大的原因同属此类。但若强度曲线的非线性特征并不显著时，单参数 Bieniawski 准则、三参数 Bieniawski 准则与指数强度准则均能取得较好的拟合效果，如图 5 所示。当岩石的强度非线性特征非常显著时，三参数 Bieniawski 准则与指数强度准则均能对强度特征进行较好的描述。由于 Bieniawski 准则属经验模型，模型参数没有明确的物理含义，需要谨慎使用。指数强度准则参数物理含义明确、拟合精度较高，优于三参数 Bieniawski 准则。

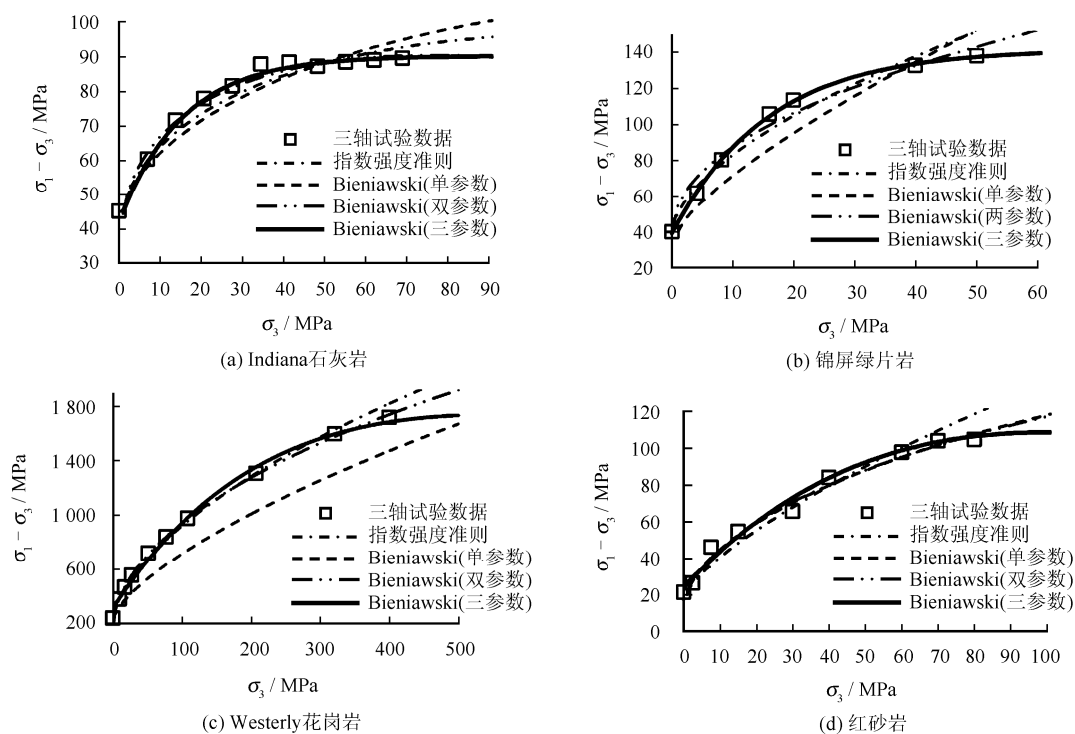


图 5 岩石常规三轴试验强度和不同强度准则拟合曲线

Fig.5 Conventional triaxial compression strengths of different rocks and fitting curves of strength criteria

表 5 Bieniawski 准则与 M.You 准则 5 种岩石的拟合参数及最小平均标准拟合差

Table 5 Fitting parameters of Bieniawski and M.You criteria and least mean standard fitting deviation for four rocks

岩石类别	指数强度准则				Bieniawski 准则 (单参数)		Bieniawski 准则 (双参数)			Bieniawski 准则 (三参数)			
	Q_0/MPa	Q_∞/MPa	K_0	η/MPa	e_{B1}	η_{B1}	e_{B2}	f_{B2}	η_{B2}	e_{B3}	f_{B3}	g	η_{B3}
Indiana 石灰岩	47	187	3.76	1.58	1.918	3.97	1.94	0.67	2.60	2.01	0.610	0.92	1.60
锦屏绿片岩	39	141	7.51	0.80	2.410	11.80	2.44	0.59	7.35	2.37	0.468	0.95	5.36
Westerly 花岗岩	354	2 676	9.11	24.20	5.688	76.31	5.88	0.67	36.90	5.91	0.610	0.87	14.02
红砂岩	24	294	4.11	3.80	2.904	3.44	2.73	0.85	6.57	2.68	0.760	0.98	3.40

4 结论和建议

岩石常规三轴强度表现出非线性特征, 围压越高, 非线性特征越显著, 这显然是直线型 Mohr-Coulomb 准则所不能描述的。虽然抛物线型 Mohr-Coulomb 准则能够描述岩石强度的非线性特征, 但曲线形状主要受到压拉强度比的控制, 用于描述岩石的强度存在较大误差, 且拟合所得参数与事实不符。单参数 Bieniawski 准则和三参数 Bieniawski 准则对中低围压下 ($\sigma_3 < \sigma_c$) 岩石强度的描述精度与 Hoek-Brown 准则相差不大, 单参数 Bieniawski 准则、三参数 Bieniawski 准则和 Hoek-Brown 准则能用于描述岩石在脆性阶段的强度特征。对于大多数岩石, 在高围压下呈现延性状态, 其强度曲线将表现出显著的非线性特征, Hoek-Brown 准则不能用于描述非线性较显著的强

度曲线, 三参数 Bieniawski 准则和指数强度准则对描述非线性特征显著的强度曲线具有明显优势, 以指数强度准则最优, 三参数 Bieniawski 准则属经验模型, 其参数为经验参数, 使用时应谨慎。基于“随着围压的增大, 主应力差趋于常数, 或者说岩石所能承受的最大剪切力将趋于常数”^[21]的推论, 指数强度准则控制了拟合曲线的走向, 对高应力状态下岩石的强度特征表现出更高的拟合精度, 可用于评价处于高应力状态下岩石强度特征。

本文只是探讨了几种强度准则对岩石常规三轴 ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) 强度进行描述的适用性, 并未考虑岩石强度的中间主应力效应。针对深部岩石强度特征的特殊性, 文献[7-8]提出了考虑 3 个主应力的强度准则, 但是是否具有普遍推广的意义仍然需要进一步研究。

致谢: 本文在撰写期间得到西南石油大学韩林老师、姚军朋博士的帮助, 谨致谢意!

参 考 文 献

- [1] 俞茂宏. 强度理论百年总结[J]. 力学进展, 2004, 34(4): 529—560.
YU Mao-hong. Advance in strength theories for materials under complex stress state in the 20th century[J]. *Advance in Mechanics*, 2004, 34(4): 529—560.
- [2] 尤明庆. 岩石的力学性质[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [3] 何满潮, 吕晓俭, 景海河. 深部工程围岩特性及非线性动态力学设计理念[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 12(8): 1215—1224.
HE Man-chao, LÜ Xiao-jian, JING Hai-he. Characters of surrounding rock mass in deep engineering and its non-linear dynamical design concept[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 12(8): 1215—1224.
- [4] 何满潮. 深部开采工程岩石力学现状及其展望[C]//第八次岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004.
- [5] 张春生, 陈祥荣, 侯靖, 等. 锦屏二级水电站埋深大理岩力学特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1999—2010.
ZHANG Chun-sheng, CHEN Xiang-rong, HOU Jing, et al. Study of mechanical behavior of deep-buried marble at Jinping II hydropower station[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(10): 1999—2010.
- [6] 汪斌, 朱杰兵, 邬爱清, 等. 高应力下岩石非线性强度特性的试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 542—548.
WANG Bin, ZHU Jie-bing, WU Ai-qing, et al. Experimental validation of nonlinear strength property of rock under high geostress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(3): 542—548.
- [7] 咎月稳, 俞茂宏, 赵坚, 等. 高应力状态下岩石非线性统一强度理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2143—2148.
ZAN Yue-wen, YU Mao-hong, ZHAO Jian, et al. Nonlinear unified strength theory of rock under high stress state[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(13): 2143—2148.
- [8] 周小平, 钱七虎, 杨海清. 深部岩体强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 117—124.
ZHOU Xiao-ping, QIAN Qi-hu, YANG Hai-qing. Strength criteria of deep rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1): 117—124.
- [9] WITTKKE W. Rock mechanics: Theory and applications with case histories[M]. Berlin: Springer Verlag, 1990.
- [10] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [11] 赵彭年. 二次抛物线型极限曲线的巷道围岩应力及位移[J]. 有色金属, 1979, (1): 41—44.
ZHAO Peng-nian. Stress and displacement of adjacent rock of tunnel under two-parameter parabolic form[J]. *Nonferrous Metal*, 1979, (1): 41—44.
- [12] 李春光, 郑宏, 葛修润, 等. 双参数抛物线 Mohr 强度准则及其材料破坏规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4428—4434.
LI Chun-guang, ZHENG Hong, GE Xiu-run, et al. Research on two-parameter parabolic Mohr strength criterion and its damage regularity[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(24): 4428—4434.
- [13] 余成学, 刘杰. 基 Mohr 强度理论的双参数抛物线型屈服准则[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(1): 31—35.
SHE Cheng-xue, LIU Jie. Two-parameter parabolic-type yield criterion based on Mohr strength theory[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2008, 41(1): 31—35.
- [14] 尤明庆. 岩石强度准则的数学形式和参数的确定的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2172—2185.
YOU Ming-qing. Study of mathematical equation and parameter determination of strength criteria for rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(11): 2172—2185.

- [15] HOEK E, BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1980, 106(GT9), 1013—1035.
- [16] HOEK E. Strength of rock and rock masses[J]. **International Society of Rock Mechanics News Journal**, 1994, 2(2): 4—16.
- [17] HOEK E, KAISER P K, BAWDEN W F. Support of underground excavations in hard rock[M]. Rotterdam: Balkema, 1995.
- [18] HOEK E. Strength of jointed rock masses[J]. **Geotechnique**, 1983, 33(3): 187—223.
- [19] MURRELL S A F. The effect of triaxial stress systems on the strength of rock at atmospheric temperatures[J]. **Geophysical Journal International**, 1965, 10(3): 231—281.
- [20] BIENIAWSKI Z T. Estimating the strength of rock materials[J]. **Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**, 1974, 4(8): 312—320.
- [21] YOU M Q. True-triaxial strength criteria for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2009, 46 (1): 115—127.
- [22] 尤明庆. 岩石指数型强度准则在主应力空间的特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1541—1552.
- YOU Ming-qing. Characteristics of exponential strength criterion of rock in principal stress space[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(8): 1541—1552.
- [23] YOU M Q. Mechanical characteristics of the exponential strength criterion under conventional triaxial stresses[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2010, 46(2): 195—204.
- [24] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 91—99.
- ZHOU Hong-wei, XIE He-ping, ZUO Jian-ping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths[J]. **Advances in Mechanics**, 2005, 35(1): 91—99.
- [25] MERVYN S P, WONG T F. Experimental rock deformation—the brittle field[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [26] BARTON N. The shear strength of rock and rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1976, 13: 255—279.
- [27] FRANKLIN J A, HOEK E. Developments in triaxial testing technique[J]. **Rock Mechanics**, 1970, 2: 223—228.
- [28] WAWERSIK W R, FAIRHURST C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1970, 7(5): 561—575.
- [29] 林卓英, 吴玉山, 关玲俐. 岩石在三轴围压下脆-延性转化的研究[J]. 岩土力学, 1992, 13(2/3): 45—53.
- LIN Zhuo-ying, WU Yu-shan, GUAN Ling-li. Research on the brittle-ductile transition property of rocks under triaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1992, 13(2/3): 45—53.
- [30] MOGI K. Experimental rock mechanics[M]. London: Taylor & Francis Group, 2007.