

幂函数型岩石强度准则研究

刘宝琛 崔志莲 涂继飞

(冶金工业部长沙矿冶研究院 长沙 410012)

摘要 论述了幂函数型的岩石强度准则。用我院的55种岩石岩样的单向压缩试验、三向压缩试验及巴西法试验所求得的结果,获得一种幂函数型强度准则。试验结果与强度准则的对比令人满意。

关键词 强度准则, 三向压缩试验, 巴西法试验

1 引言

岩石强度准则的试验研究及理论分析已有数十年的发展历史。到目前为止所提出过的各种各样的强度准则,都仅有其一定的应用范围,并往往不能普遍应用于同一种岩石的各种不同应力状态。目前相当广泛地应用的莫尔极限应力圆包络线强度准则,也同样存在上述缺点,而且不能把中间主应力的作用加以考虑。试验证明:中间主应力的变化可影响强度值达25%。

因此,探索新的更符合实际的强度准则的工作日益增多。本文以55种岩石的单向压缩试验,三向压缩试验及巴西法(即劈裂法)试验结果为基础,探索幂函数型强度准则的适用性及有关参数的求算方法。

2 幂函数型岩石强度准则的表达形式及特点

岩石的强度准则,可以从岩石破坏全过程的破坏机制来研究,也可以根据大量试验结果进行统计分析而得出。不论理论方法或试验方法,所提出的准则必须最近似地符合实际试验结果。此外,对于一种强度准则,还应该有以下几方面的要求:

- (1) 应该考虑3个主应力的综合影响;
 - (2) 应该包括适量的、由岩石性质来决定的参数,这类参数一般为两个;
 - (3) 应该尽可能地适用于多种应力状态,起码应该适用于单向压缩、三向压缩及剪切应力状态;
 - (4) 应该尽可能地适用于各种不同类型的岩石,各向异性岩石及含裂隙的岩石。
- 最为流行的强度准则是莫尔准则,即

$$\tau = f(\sigma) \quad (1)$$

根据本院对 55 种岩石试验结果的分析, 建议采用如下形式的幂函数型岩石强度准则。此种关系式曾为前人所使用^[1]:

$$\frac{\tau_m}{\tau_{m0}} = a \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{m0}} \right)^b \tag{2}$$

式中: τ_m ——三向应力状态岩石破坏时的最大剪应力;
 τ_{m0} —— 单向压缩岩石破坏时的最大剪应力;
 σ_m —— 三向应力状态岩石破坏时的平均法向应力;
 σ_{m0} —— 单向压缩岩石破坏时的平均法向应力;
 a, b —— 取决于岩石性质的系数。

并且
$$\tau_m = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3), \quad \tau_{m0} = \frac{1}{2} \sigma_0 \tag{3}$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad \sigma_{m0} = \frac{1}{3} \sigma_0 \tag{4}$$

式中: σ_0 —— 岩石单向压缩强度(压缩应力定为正值);
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ —— 岩石破坏时的最大主应力, 中间主应力及最小主应力, $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 。
强度准则(2)具有下列特点:

- (1) 当参数 a, b 取不同值时, 强度准则可以为线性($b = 1$) 及非线性($b \neq 1$), 灵活性较大;
- (2) 准则中包括两个与岩石性质有关的参数, 它与莫尔强度准则中所包含的参数数目相同;
- (3) 当 $\sigma_m < 0$ 时, 准则(2) 无意义, 即准则只适用于 $\sigma_m \geq 0$ 的情况, 由公式(4)得

$$\sigma_1 \geq (\sigma_2 + \sigma_3) \tag{5}$$

因此, 准则(2) 适用于下列应力状态:

- $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$ 三轴不等压压缩应力状态,
- $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$ 围压(σ_2) 作用下的三轴压缩应力状态,
- $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 = 0$ 双向压缩应力状态,
- $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 单向压缩应力状态,

$\sigma_1 > (-\sigma_2 - \sigma_3) = |\sigma_2 + \sigma_3|$ 一个方向为压缩, 另外两个方向为拉伸, 但两个拉伸应力和的绝对值小于最大压主应力。

巴西法试验, 即板状试件劈裂试验, 试样中的 σ_1 为压应力, σ_3 为拉应力, $\sigma_2 = 0$, 并且 $\sigma_1 \geq 3|\sigma_3|$ ^[2], 因此可以适用。

由此可见: 准则(2) 适用于岩石工程中所能经常遇到的各种应力状态。

3 试验类型及方法

对 55 种岩石分别进行了下列几种应力状态下的强度试验。

3.1 单向压缩强度试验

试样的高为横向尺寸的两倍, 呈长方柱或长圆柱状。直径或横向尺寸为 5~ 7 cm, 高 10~ 14 cm。试验过程中, 岩样一直处于单向压应力状态(不计端部效应), 即:



$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \tag{6}$$

到试件破坏时:

$$\sigma_1 = \sigma_0$$

并由此求出 τ_{n0} 及 σ_{n0} 的值。

3.2 等围压三向压缩强度试验

试样的形状及尺寸与单向压缩试样相同。应力状态为

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_c = \text{const} \tag{7}$$

保持围压 σ_c 恒定。增加 σ_1 到 $\sigma_1 = \sigma_c$ 时岩样破坏。对不同的试样, σ_c 由小到大, 最大为 $\sigma_c = 150 \text{ MPa}$ 。试验使用长江-500 型三向应力试验机。

3.3 圆盘劈裂试验

使用圆盘状试样, 直径 5~7 cm, 厚度 1~3 cm 不等。在试样的破裂面上, 沿水平方向 (x 轴) 受均匀拉伸力 σ_3 作用, 而在垂直轴 (y 轴) 方向受不均匀压应力 σ_1 作用, 并且中心点处的压应力最小, 并为拉应力的 3 倍^[2], 即

$$\sigma_1 = 3 |\sigma_3|, \quad \sigma_2 = 0 \tag{8}$$

当外载 P 增大时, 应力 σ_1 及 σ_3 按 3 : 1 的比例增加, 直到试样破坏。此时 $\sigma_3 = \sigma_p$, 在此类试验中:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_3) = \frac{1}{3} (3\sigma_3 + \sigma_3) = \frac{2}{3} |\sigma_3| \\ \tau_n &= \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{1}{2} (3\sigma_3 - \sigma_3) = 2 |\sigma_3| \end{aligned} \tag{9}$$

对每一种岩石作上述 3 种试验, 少部分只作前两种类型试验, 试样最少为 6 个, 最多为 24 个。

4 55 种岩石的试验结果及数据处理

近 20 年来, 长沙矿冶研究院岩石力学试验室结合各项科研任务的需要, 先后对几十种岩石作了各种强度试验。下面选用其中的 55 种, 岩样采自全国各地。

以新疆石灰岩为例。单轴及三轴试验结果列于表 1, 其中也列入各项应力计算的结果。表 1 中的 σ_n 及 τ_n 按公式(3)计算。

表 1 新疆灰岩试验结果

Table 1 Testing results for Xinjiang limestone

侧向应力 σ_c / MPa	0	0	10	20	30	50	100
抗压强度 σ_c / MPa	34.58	68.78	141.89	182.74	233.16	291.53	378.43
平均应力 σ_n / MPa	11.53	27.93	53.96	74.25	97.72	130.51	192.81
最大剪应力 τ_n / MPa	17.29	34.39	65.95	81.37	101.58	120.77	139.22
σ_n / σ_{n0}	0.67	1.33	3.13	4.31	5.67	7.57	11.2
τ_n / τ_{n0}	0.67	1.33	2.55	3.15	3.93	4.67	5.39

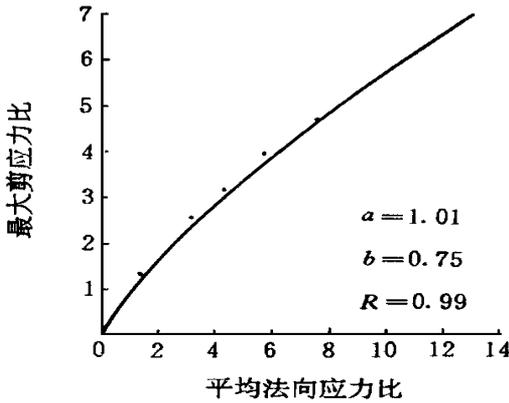


图1 新疆某地石灰岩强度准则曲线

Fig 1 Strength curve of limestone of Xinjiang

按照强度准则(2)编制了最小二乘电算程序求算灰岩的参数 a 及 b :

$$a = 1.01, \quad b = 0.75 \quad (10)$$

上式代入式(2)得出新疆石灰岩的强度准则为

$$\frac{\tau_m}{\tau_{m0}} = 1.01 \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{m0}} \right)^{0.75} \quad (11)$$

图1所示为强度准则(11)在自然数坐标中的表示, 它是一条曲线, 墨点为试验结果。

对每一种岩石, 都可以按以上步骤求算强度参数 a 及 b , 并绘制强度曲线与试验结果的对比图(图2~ 13)。各种岩石的 a, b , 相关系数 R 及应力状态列入表2。

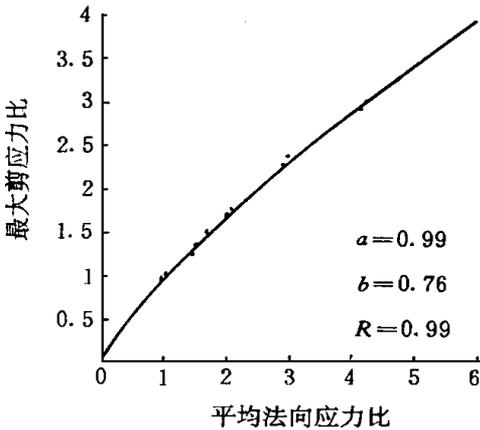


图2 锦屏云母磷灰岩强度准则曲线

Fig 2 Strength curve mica phosphate chalk

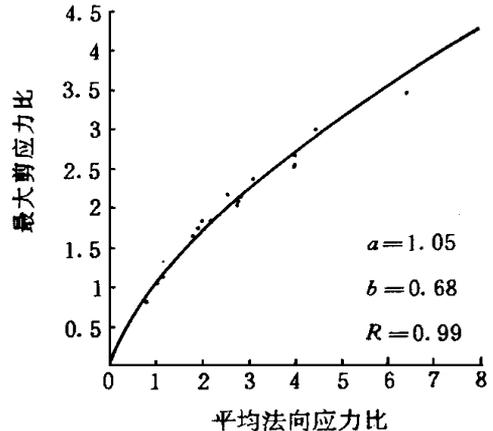


图3 大冶大理岩强度准则曲线

Fig 3 Strength curve of Daye marble

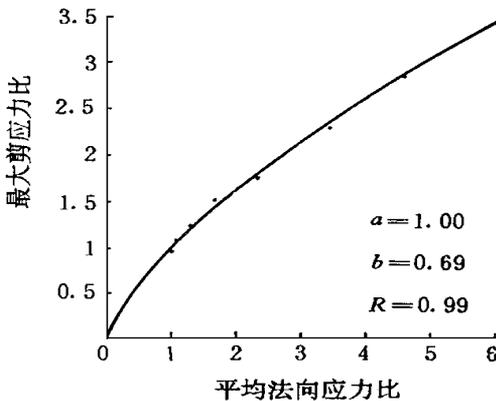


图4 金川橄榄岩(贫矿)强度准则曲线

Fig 4 Strength curve of low grad nickel ore

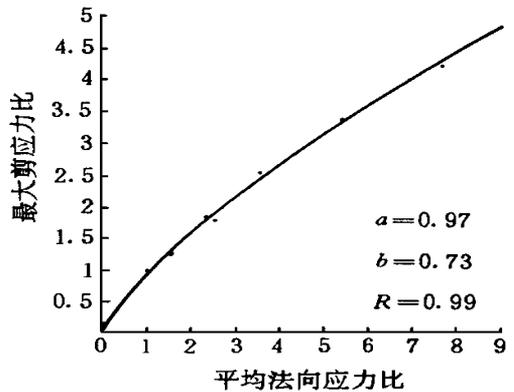


图5 湘衡紫红砂岩强度准则曲线

Fig 5 Strength curve of dark-red sandstone

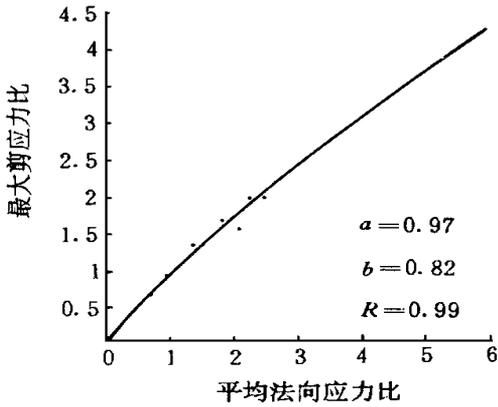


图 6 湘衡红色砂岩强度准则曲线

Fig 6 Strength curve of red sandstone

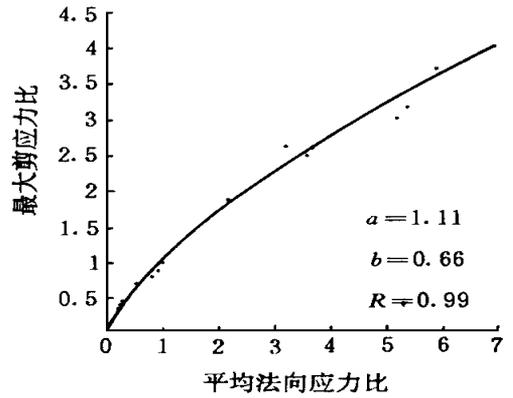


图 7 阳山条纹石灰岩强度准则曲线

Fig 7 Strength curve of Yangshan limestone

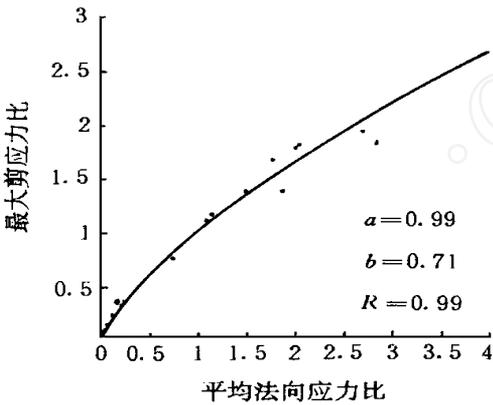


图 8 黄沙坪白云岩(二)强度准则曲线

Fig 8 Strength curve of dolomite (2)

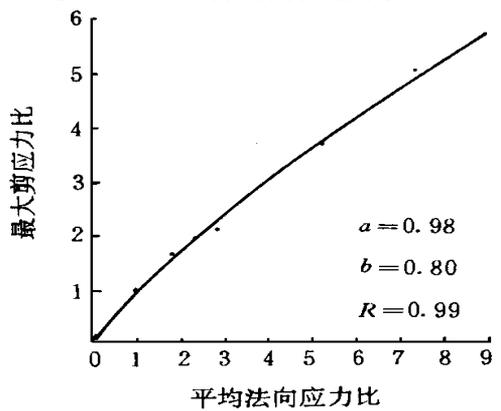


图 9 厂坝花岗岩强度准则曲线

Fig 9 Strength curve of Changba granite

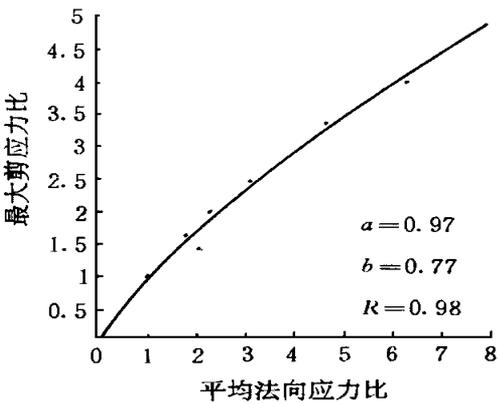


图 10 紫红色块状铝土矿强度准则曲线

Fig 10 Strength curve of dark-red bauxite

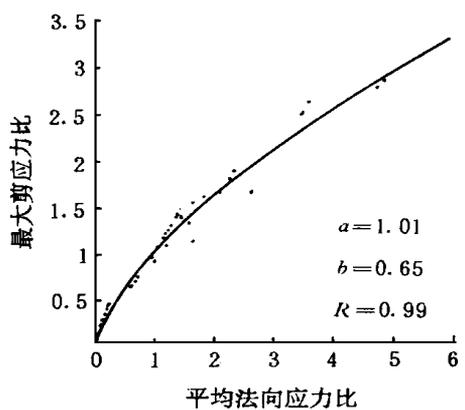


图 11 永平混合岩强度准则曲线

Fig 11 Strength curve of Yongping mixed rock

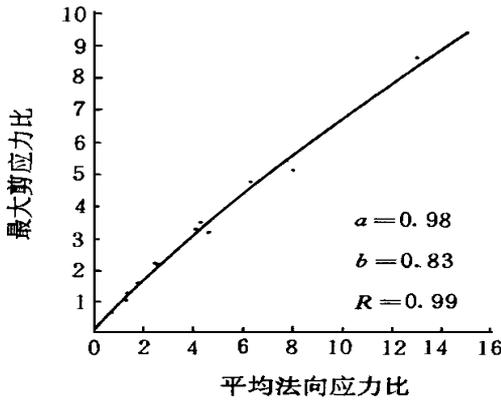


图 12 金川大理岩强度准则曲线

Fig 12 Strength curve of Jinchuan marble

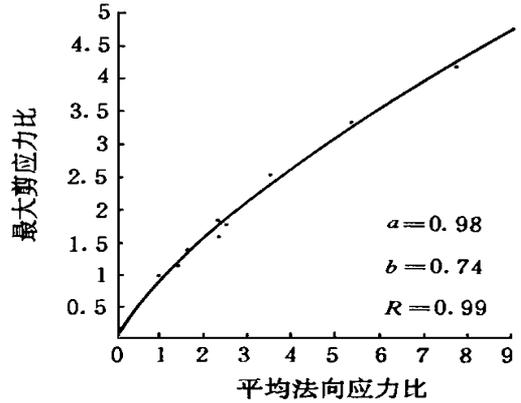


图 13 紫红色砂岩强度准则曲线

Fig 13 Strength curve of dark-red sandstone

表 2 各种岩石的有关参数

Table 2 Strength parameters for different kinds of rock material

岩石名称	产地	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	σ_0 / MPa	$\sigma_{\text{max}} / \text{MPa}$
蚀变千枚岩(一)	江西德兴铜矿	0.94	0.73	0.97	64.90	70
蚀变千枚岩(二)	江西德兴铜矿	0.72	0.97	0.96	166.5	70
凝灰岩	江西德兴铜矿	0.94	0.64	0.94	155.60	70
混合岩	江西永平铜矿	1.01	0.65	0.99	117.02	80
石灰岩	江西永平铜矿	1.19	0.67	0.99	50.44	40
变质砂岩	江西铁山垅钨矿	0.89	0.72	0.89	122.50	60
花岗岩	江西铁山垅钨矿	0.90	0.78	0.97	162.50	100
绿泥岩	江西上珠岭铁矿	1.02	0.79	0.98	40.30	80
白云岩(一)	湖南黄砂坪锌铅矿	1.10	0.62	0.97	108.16	40
白云岩(二)	湖南黄砂坪锌铅矿	0.99	0.71	0.99	114.07	40
石英斑岩	湖南黄砂坪锌铅矿	1.02	0.66	0.98	168.00	40
砂岩	湖南黄砂坪锌铅矿	0.99	0.54	0.92	88.12	40
铅锌矿石	湖南黄砂坪锌铅矿	1.07	0.66	0.99	103.75	40
钙质粉砂岩	湖南湘衡盐矿	1.09	0.73	0.99	16.14	20
红色砂岩	湖南湘衡盐矿	0.97	0.82	0.99	118.90	40
灰色砂岩	湖南湘衡盐矿	1.08	0.65	0.99	143.15	20
紫红色砂岩	湖南湘衡盐矿	0.97	0.73	0.99	121.00	140
花岗岩	湖南湘衡盐矿	1.02	0.78	0.99	133.20	120
砂质泥岩	湖南牛与司煤矿	1.11	0.60	0.97	32.63	20
砂岩(一)	湖南牛与司煤矿	0.99	0.68	0.99	86.6	30
砂岩(二)	湖南牛与司煤矿	1.16	0.65	0.98	59.48	20
大理岩	湘北大冶铁矿	1.05	0.68	0.99	80.53	80
变质粉砂岩	福建行洛坑钨矿	1.08	0.48	0.97	104.55	40
黑云母长石石英砂岩	福建行洛坑钨矿	1.05	0.66	0.99	209.85	40
变质长石石英砂岩	福建行洛坑钨矿	0.99	0.72	0.99	176.70	40

表 2 各种岩石的有关参数(续)

Table 2 Strength parameters for different kinds of rock material(continued)

岩石名称	产地	a	b	R	σ_c / MPa	$\sigma_{cmax} / \text{MPa}$
条纹石灰岩	福建阳山铁矿	1.11	0.66	0.99	55.08	40
变质泥岩	福建阳山铁矿	1.05	0.74	0.99	110.08	40
砂卡岩	福建阳山铁矿	1.16	0.65	0.98	110.48	40
辉石磁铁矿	福建阳山铁矿	1.07	0.73	0.99	101.20	40
辉石砂卡岩	福建阳山铁矿	1.20	0.73	0.97	72.06	40
变质粉砂岩	福建阳山铁矿	1.21	0.68	0.98	77.73	40
细粒磷灰岩(一)	江苏新浦磷矿	1.03	0.75	0.99	45.90	40
细粒磷灰岩(二)	江苏新浦磷矿	0.99	0.87	0.99	57.86	20
微科长石片麻岩	江苏新浦磷矿	1.07	0.66	0.99	117.50	10
云母磷灰岩	江苏锦屏磷矿	0.99	0.76	0.99	94.56	40
砾石片岩	江苏锦屏磷矿	0.96	0.76	0.99	33.14	20
大理岩	江苏锦屏磷矿	1.00	0.70	0.98	105.10	20
石英砂岩	安徽铜官山铜矿	1.02	0.60	0.96	144.60	40
石英砂岩	安徽新桥铜矿	0.95	0.69	0.85	112.31	80
橄榄岩(富矿)	甘肃金川镍矿	0.93	0.71	0.98	173.70	80
橄榄岩(贫矿)	甘肃金川镍矿	1.00	0.69	0.99	206.55	120
大理岩	甘肃金川镍矿	0.98	0.83	0.99	82.90	120
大理岩	甘肃厂坝铅锌矿	1.16	0.62	0.98	154.81	20
铅锌矿	甘肃厂坝铅锌矿	0.97	0.61	0.99	192.13	20
石英片岩	甘肃厂坝铅锌矿	1.00	0.68	0.98	159.85	20
黑云母石英片岩	甘肃厂坝铅锌矿	1.10	0.65	0.99	107.73	20
花岗岩	甘肃厂坝铅锌矿	0.98	0.80	0.99	154.00	120
灰绿色块状铝土矿	某铝土矿	0.98	0.62	0.96	135.80	140
豆状铝土矿	某铝土矿	0.99	0.52	0.98	148.10	140
块状铝土矿	某铝土矿	1.03	0.78	0.99	170.90	140
紫色块状铝土矿	某铝土矿	0.97	0.77	0.98	175.00	140
紫红色砂岩	某铝土矿	0.94	0.74	0.99	121.00	140
灰黑色石灰岩	新疆某地	1.02	0.62	0.98	110.26	80
石灰岩	新疆某地	1.01	0.75	0.99	51.68	100
砂岩	新疆某地	1.03	0.63	0.99	217.50	150

5 结论

通过对 55 种岩石力学试验结果的对比, 幂函数型强度曲线能够符合岩石的实际情况, 它所适用的应力状态较广, 能够符合许多岩石工程的实际情况, 因此可以应用于工程设计计算。

参 考 文 献

- 1 Ryunoshin Yoshinaka & Tadashi Yamabe A strength criterion of rocks and rock masses In: Proc of the International Symposium on Weak Rock Tokyo: 1981, 613~ 618
- 2 刘宝琛 多向应力状态下测定岩石弹性参数的探讨 有色金属, 1980, (1): 7~ 12

A STUDY OF STRENGTH CRITERION IN POWER FUNCTION FOR ROCK MATERIAL

Liu Baochen Cui Zhilian Tu Jifei

(Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, Changsha 410012)

Abstract Based on the testing results of uniaxial compression test, triaxial compression test and Brazilian test for 55 kinds of rock materials within Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, a strength criterion in power function for rock material is obtained in this paper. The comparison of testing results with the power function criterion is satisfactory.

Key words strength criterion, triaxial compression test, Brazilian test

新书简介

《岩土深基坑喷锚支护法原理·设计·施工指南》由曾宪明、曾荣生、陈德兴、王作民编著, 同济大学出版 1997 年 1 月出版, 32 开, 213 页, 定价 16.00 元。该书以研究成果为基础, 以大量工程实践为背景, 从原理、设计、施工、监控、机具、检测诸方面, 全面、系统地概述了一种岩土深基坑支护新方法——喷锚网支护法。此方法高效、低耗、安全, 该书是应用此方法进行设计、施工、监理的实用指南, 可供建筑投资者、建管部门、勘察、设计、施工、监理、质检、安检部门的工程技术人员参考。