

工程应力变化对岩石强度特性 影响的试验研究

尹光志 李 贺 鲜学福 许 江

(重庆大学采矿工程系)

提 要

本文根据矿山生产中所出现的三种应力变化,利用真三轴压力装置对须家河砂岩和嘉陵江石灰岩的强度特性进行了研究。得出了三种应力变化下砂岩和石灰岩的强度准则。本文所述的三种实验类型的研究结果还表明,岩石的强度特性是与应力变化有关的。因此,通过符合于实际工程应力变化的真三轴实验来研究岩石的强度特性是很有必要的。

一、前 言

研究岩石在三向应力状态下的强度特性对揭示岩石的破坏机理,评价岩体的稳定性具有重要的意义。国内外许多研究者对常规三轴压缩试验和真三轴试验中岩石的强度特性进行了研究。但迄今为止,各种理论和试验模式主要是建立在围压一定的条件下增加轴向压力使岩石发生破坏的三轴压缩试验基础上的。这些试验条件与矿山生产中所出现的某些应力变化是不相符合的。如在岩体中开挖坑洞后,坑洞周边岩体便由原来的三向应力转变为双向应力。在采矿中,当工作面推进时,原处于三向应力状态的岩体,在沿工作面推进方向上载荷降低的过程中发生破坏。此外,矿柱的形成过程也可看作是其水平方向的应力消失,矿柱岩体由三向应力状态转化为单向应力状态的过程。

1967年耶格(Jaeger)^[1]曾指出,岩石的强度与应力途径是否有关,这是一个还不十分清楚的问题。1971年斯旺森(Swanson)等^[2],1972年克劳奇(Crouch)^[3]对常规三轴试验和比例加载试验中岩石的强度特性进行了研究。陈颢、姚孝新、耿乃光、许东俊^[4-5]对在三种应力途径下岩石的力学特性也进行了研究。但是上述研究都是在常规三轴压力机上进行的,与矿山实际工程的应力变化仍有一定差异。因此,有必要根据矿山工程的应力变化,在真三轴试验中对岩石的强度特性进行研究。

二、试件和试验装置

试验所用的岩样取自四川省重庆市南桐矿区的比较均质的须家河砂岩和嘉陵江石灰岩。这样,可尽量避免因试验结果的分散而掩盖在各种应力变化下强度特性的差异。砂岩、石灰岩的物理力学参数如表1所示。

表1 砂岩、石灰岩的物理力学参数

物理力学参数	符号	砂岩	灰岩
容重(kN/m^3)	γ	25.7	26.7
孔隙率	n	0.0579	0.0055
弹性模量(GPa)	E	10.33	73.57
泊松比	ν	0.319	0.297
内摩擦角	ϕ	35.7°	38.2°
粘结力(MPa)	c	17.4	22.7
单轴抗压强度(MPa)	σ_c	65.4	78.7
单轴抗拉强度(MPa)	σ_t	2.76	2.55

砂岩、灰岩的试件为 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的长方体。加工后的试件保持自然含水状态。

为了产生三向不等压力($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$), 我们自制了岩石真三轴加压装置。该装置由YE-200A型材料试验机和一套水平加压装置(图1)组合而成。

自制的岩石真三轴加压装置(图2)其最大主应力 σ_1 由YE-200A型材料试验机施加, 中间主应力 σ_2 和最小主应力 σ_3 由水平加压装置施加。其加载能力为2 MN, 0.4 MN, 0.4 MN。

在钢垫块与试件之间加入了0.4 mm厚的紫铜片, 以减小端部的摩擦效应。

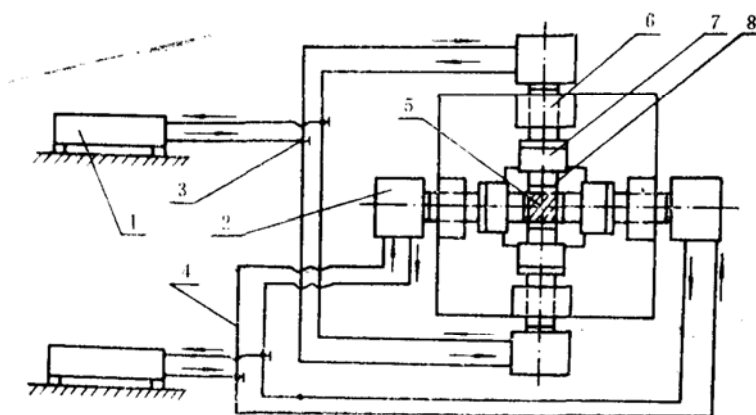


图1 水平加压装置示意图

1. 高压油泵 2. 油压千斤顶 3. 四通接头 4. 高压油管
5. 岩石试件 6. 定向器 7. 球铰 8. 钢垫块

三、试验方法

本文根据矿山工程中的三种应力变化对砂岩和石灰岩进行了三种类型的实验。

A型实验: ①在所有三轴方向上均匀加载到 σ_3 ; ②使一个水平轴向载荷保持定值 σ_3 , 继续增加其余两个方向的载荷直到 σ_2 ; ③使另一水平轴向载荷保持定值 σ_2 , 继续增加第三轴向

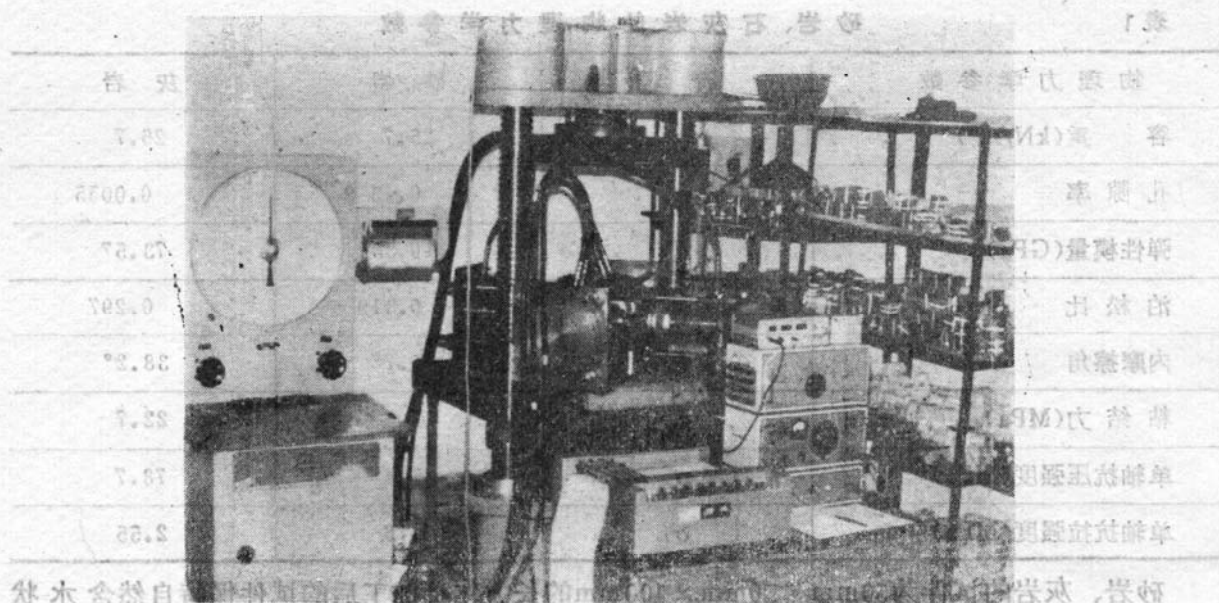


图2 岩石真三轴压力装置

载荷 σ_1 ，直到试件破坏。

B型实验：①、②与A型实验相同；③保持 σ_2 ， σ_3 恒定，将 σ_1 增加到A型实验下破坏载荷的70%时，停止加载；④在保持 σ_1 ， σ_2 不变的情况下，逐渐减小 σ_3 方向载荷，直到试件破坏。

C型实验：①、②、③与B型实验相同；④在保持 σ_1 不变的情况下，以相同的速率同时减小 σ_2 ， σ_3 方向载荷，直到试件破坏。

上述实验都在常温下进行，加载速率为1 kN/s。A型、B型、C型三种实验中每种应力状态的试件数量为5~7块。

四、实验结果和分析

在一般应力状态($\sigma_1 > \sigma_2 \geq \sigma_3$)下，岩石的破坏准则可以表示为

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0 \quad (1)$$

也可以根据应力张量 σ_{ij} 的三个不变量 J_1 ， J_2 ， J_3 来表示，

$$f(J_1, J_2, J_3) = 0 \quad (2)$$

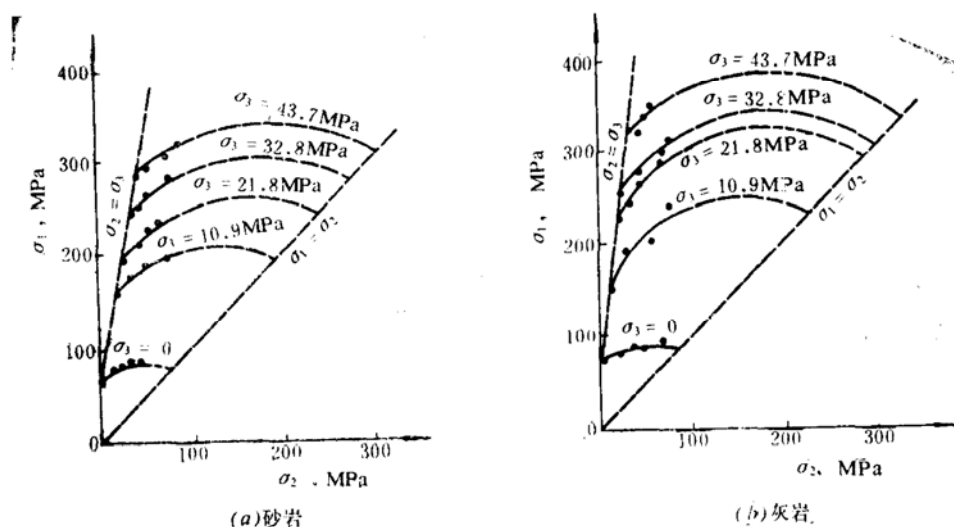
定义

$$J_1 = \sigma_{ii} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ji} = \frac{1}{2} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) \quad (j = 1, 2, 3) \quad (4)$$

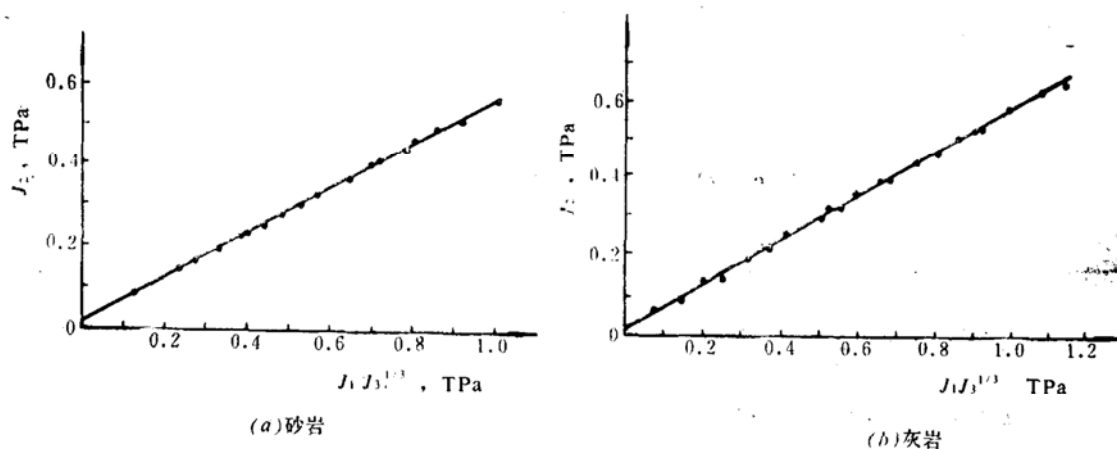
$$J_3 = \frac{1}{6} \sigma_{ij} \sigma_{jk} \sigma_{ki} = \frac{1}{6} (\sigma_1^3 + \sigma_2^3 + \sigma_3^3) \quad (k = 1, 2, 3) \quad (5)$$

砂岩、石灰岩在A型实验中，对于不同的最小主应力 σ_3 的 σ_1 - σ_2 曲线如图3所示。

图3 不同最小主应力下的 σ_1 - σ_2 曲线

从图3中可以看出: 当 $\sigma_3 = 0$ 及 $\sigma_3 = \text{常数}$ 时, 随着 σ_2 的增加, σ_1 增大, 曲线向右上方移动。由此看来中间主应力 σ_2 对砂岩和石灰岩的强度影响是明显的。这些结果与许东俊、耿乃光^[6]等的研究结果是一致的。

砂岩和石灰岩的A型、B型、C型实验, 在 J_2 - $J_1 J_3^{1/3}$ 平面上的变化关系如图4~6所示。

图4 A型实验的 J_2 - $J_1 J_3^{1/3}$ 关系

采用最小二乘法对A型、B型、C型三种实验中的实验点进行拟合, 可得出其破坏准则, 如表2。

根据表2中方程(6)~(11), 可将砂岩、灰岩在A型、B型、C型实验条件下的破坏准则归纳为如下一般形式:

$$J_2 = a + b J_1 J_3^{1/3} \quad (12)$$

从方程(6)、(8)、(10)可以看出: 砂岩在A型、B型、C型实验中, 虽然其破坏准则都具有方程(12)的形式, 但三种实验所得的 a 值(即 $a_A = 11.4015 \text{ GPa}$, $a_B = 5.7703 \text{ GPa}$, $a_C = 5.319 \text{ GPa}$)差别较大, 而 b 值(即 $b_A = 0.5493$, $b_B = 0.5567$, $b_C = 0.5604$)虽有一定的

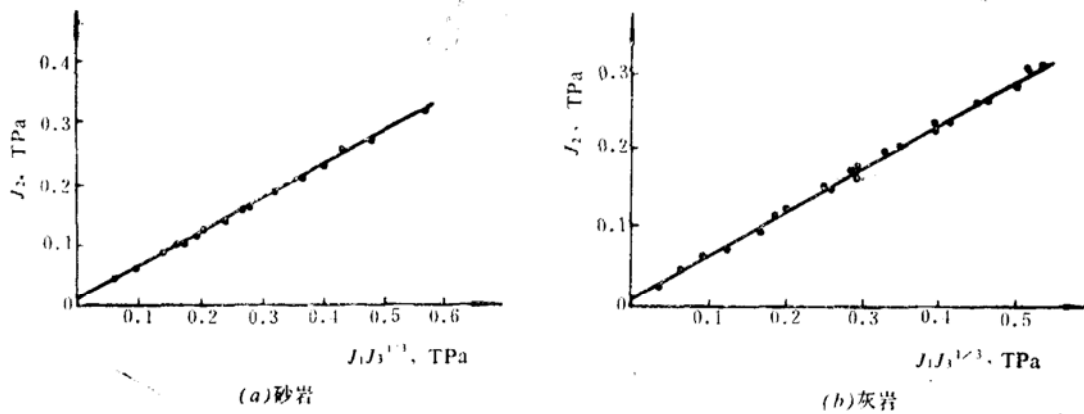
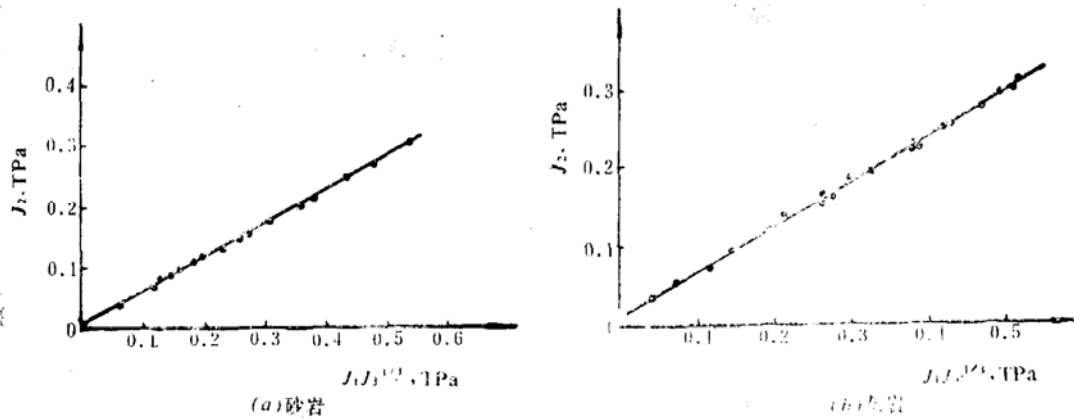
图5 B型实验的 J_2 - $J_1J_3^{1/3}$ 关系图6 C型实验的 J_2 - $J_1J_3^{1/3}$ 关系

表2

砂岩、灰岩的破坏准则

实验类型	砂 岩		灰 岩	
	J_2 (GPa)	相关系数 r	J_2 (GPa)	相关系数 r
A	$J_2 = 11.4015 + 0.5493J_1J_3^{1/3}$ (6)	0.9998	$J_2 = 25.2809 + 0.5472J_1J_3^{1/3}$ (7)	0.9994
B	$J_2 = 5.7703 + 0.5567J_1J_3^{1/3}$ (8)	0.9996	$J_2 = 16.6401 + 0.5424J_1J_3^{1/3}$ (9)	0.9995
C	$J_2 = 5.319 + 0.5604J_1J_3^{1/3}$ (10)	0.9997	$J_2 = 18.4936 + 0.5484J_1J_3^{1/3}$ (11)	0.9988

注: J_1, J_3 的单位为GPa

差别, 但差别不大。

从方程(7)、(9)、(11)中也可以看出灰岩在三种实验下 a_A, a_B, a_C 及 b_A, b_B, b_C 的差异。

将砂岩、灰岩三种实验相应的 a_A, a_B, a_C 及 b_A, b_B, b_C 值比较可知: 灰岩的 a_A, a_B, a_C 值比砂岩的 a_A, a_B, a_C 值大, 而灰岩和砂岩的相应的 b 值虽有一些差别, 但差别不大。

砂岩、灰岩在A型、B型、C型实验中 π 平面上的破坏迹线如图7所示。

从图7可以看出:砂岩、灰岩的三种实验在 π 平面上的破坏迹线形状相似。在 $J_1 = 100\text{MPa}$ 的情况下,灰岩的三种实验破坏迹线比砂岩相应的破坏迹线大。这表明灰岩的强度比砂岩的强度大。而砂岩、灰岩在A型实验中的破坏迹线比B型、C型实验中的破坏迹线大;C型实验中的破坏迹线比B型的略大些。这表明:砂岩、灰岩在A型实验中所得的强度大于B型、C型相应的强度,而C型的又比B型的略大一些。我们对 $J_1 > 100\text{MPa}$ 时,砂岩、灰岩在 π 平面上的破坏迹线进行了分析。其结果表明:A型、B型、C型三种实验的破坏迹线的相对关系与 $J_1 = 100\text{MPa}$ 时的相同,且随着 J_1 的增大,其破坏迹线都相应地增大。

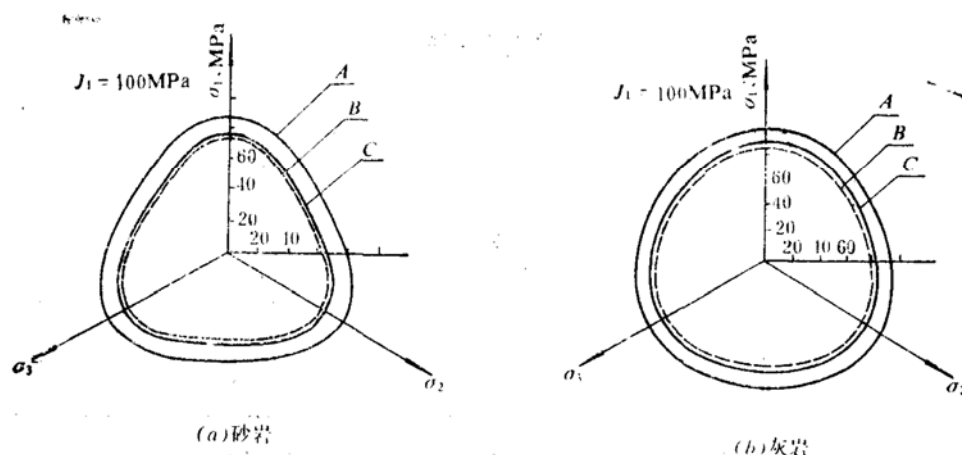


图7 A型、B型、C型实验中 π 平面上的破坏迹线

实验表明:当砂岩、灰岩处于一定的初始应力状态 $(\sigma_1^i, \sigma_2^i, \sigma_3^i)$ 时(初始应力状态即为B型、C型实验中开始卸载时的应力状态),A型实验中使岩石破坏所需的 σ_1 的应力增量 $\Delta\sigma_1$ 与B型、C型实验中使岩石破坏所需的 σ_3, σ_2 的减小量 $\Delta\sigma_3, \Delta\sigma_2$ 也是不相同的。其中 $\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_1^i, \Delta\sigma_2 = \sigma_2^i - \sigma_2, \Delta\sigma_3 = \sigma_3^i - \sigma_3$; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为A型、B型、C型实验中岩石破坏时的最大主应力、中间主应力、最小主应力。在A型实验中 $\Delta\sigma_2 = 0, \Delta\sigma_3 = 0$;在B型实验中 $\Delta\sigma_2 = 0, \Delta\sigma_1 = 0$;在C型实验中 $\Delta\sigma_1 = 0, \Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$ 。砂岩、灰岩的 $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3$ 的部分实验结果的比较分别如表3、表4所示。

从表3、表4中可以看出:

对于砂岩

$$\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_3} > 3.0 \sim 4.2 \quad (\text{A型与B型比较})$$

$$\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_2} > 3.3 \sim 5.6 \quad (\text{A型与C型比较})$$

对于灰岩

$$\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_3} > 3.1 \sim 5.4 \quad (\text{A型与B型比较})$$

$$\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_2} > 3.4 \sim 6.9 \quad (\text{A型与C型比较})$$

表3 砂岩在三种实验中的 $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3$ 的比较

初始应力状态			A型与B型比较	A型与C型比较
$\sigma_1^i(\text{MPa})$	$\sigma_2^i(\text{MPa})$	$\sigma_3^i(\text{MPa})$	$\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_3}$	$\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_2} = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_3}$
126.8	21.8	21.8	3.8	3.6
135.8	32.8	21.8	4.2	5.4
144.3	43.7	21.8	3.2	3.3
167.5	65.5	21.8	3.3	4.7
149.4	32.8	32.8	3.2	4.1
172.0	43.7	32.8	3.0	5.1
185.6	54.6	32.8	2.4	4.3
194.7	65.5	32.8	2.6	5.0
199.2	76.5	32.8	3.9	5.0
217.3	43.7	43.7	3.1	5.5
226.3	54.6	43.7	3.2	4.5

表4 灰岩在三种实验中的 $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3$ 的比较

初始应力状态			A型与B型比较	A型与C型比较
$\sigma_1^i(\text{MPa})$	$\sigma_2^i(\text{MPa})$	$\sigma_3^i(\text{MPa})$	$\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_3}$	$\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_2} = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_3}$
158.4	21.8	21.8	3.3	5.3
172.0	32.7	21.8	4.3	6.9
181.0	43.7	21.8	4.4	6.0
194.7	54.6	21.8	5.3	5.8
181.1	43.7	32.8	3.3	3.9
190.1	54.6	32.8	3.1	3.4
203.2	65.5	32.8	4.0	4.2
217.3	76.5	32.8	4.6	4.7
212.8	43.7	43.7	3.0	5.0
221.8	54.6	43.7	3.1	4.3
239.9	65.5	43.7	3.6	5.4

这也说明：在B型、C型实验中，只要 σ_3, σ_2 方向的载荷略为降低即有可能导致岩石破坏。

五、结 论

1. 砂岩、石灰岩在A型、B型、C型实验中, 其强度准则可表示为

$$J_2 = a + bJ_1J_3^{1/3}$$

但是砂岩、石灰岩在三种类型的实验中, 其 a 值差别较大 b 值基本不变。 a 值的变化还与岩石的强度有关, 岩石强度高, a 值变化大, 同时砂岩 $a_B > a_C$, 石灰岩却 $a_B < a_C$ 。如果用强度更高的岩石($\sigma_c = 150 \sim 210 \text{ MPa}$)进行试验, 或许可进一步显示出强度对 a 、 b 的影响。

2. 砂岩、石灰岩在所述的三种试验中, 它们在 π 平面上的破坏迹线形状相似, 但其大小存在着差异, 表明砂岩、石灰岩的强度是与应力变化有关的。

3. 当砂岩、石灰岩处于一定的应力状态时, 在A型实验中使岩石破坏的增量 $\Delta\sigma_1$ 比B型、C型实验中使岩石破坏所需的减小量 $\Delta\sigma_3$, $\Delta\sigma_2$ 大。

4. 本文试验结果表明, 根据实际工程的应力变化来研究岩石的强度特性是很有必要的。

参 考 文 献

- [1] Jaeger, J. C., Brittle Fracture of Rocks, Proceedings of the Eighth Symposium on Rock Mechanics, Port City Press, Baltimore, 1967, pp. 3~57.
- [2] Swanson, S. R. and Brown, W. S., An Observation of Loading Path Independence of Fracture in Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 8, 1971, pp. 277~281.
- [3] Crouch, S. L., A Note on Post-failure Stress-strain Path Dependence in Norite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 9, 1972, pp. 197~204.
- [4] 陈颙、姚孝新、耿乃光, 应力途径、岩石的强度和体积膨胀, 中国科学, 1979年第11期, 第1093~1100页。
- [5] 耿乃光、许东俊, 应力途径对砂岩力学性质的影响, 地球物理学报, 第25卷, 第4期, 1982年, 第401~403页。
- [6] 许东俊、耿乃光, 中等主应力变化引起的岩石破坏与地震, 地震学报, 第6卷, 第2期, 1984年, 第159~166页。

The Experimental Study of the Influence of Engineering Stress Changes on Strength Characteristics of Rocks

Yin Guangzhi, Li He, Xian Xuefu and Xu Jiang

(Chongqing University)

Abstract

The strength characteristics of rocks under three kinds of stress changes which probably occur in mining practice have been investigated by using a true triaxial

testing machine. The strength criterion has been presented. Two rock types, Xujiuhe sandstone and Jialingjiang limestone were used for all tests. It is shown by tests that the strength characteristics of rocks depend on the stress changes. Therefore, it is necessary to apply true triaxial test to study the characteristics of rock so that the stress process can be consistent with the actual stress changes of in engineering project.