

不同加载速率条件下花 岗岩的破坏判据

朱瑞赓 吴绵拔

(1983年6月2日收到)

本文应用岩石快速加载设备,系统地研究了加载速率在 $10^{-1} \sim 10^5 \text{kg/cm}^2/\text{sec}$ 范围内,花岗岩的抗压、抗拉和抗剪的破坏特征,得出强度随加载速率变化的规律。在此基础上结合常规三轴应力状态的试验结果,提出了花岗岩的动力破坏判据。

近年来,加载速率对岩石力学特性的影响问题已引起人们广为关注。许多材料的实验结果,使人们建立起“在快速加载条件下材料的抗力性能提高”的概念。然而,由于岩石性质复杂,不可能存在一个所谓的标准化试件,各自取得的资料都具有一定的局限性。另一方面,目前系统地研究岩石的各种动力破坏强度的资料尚不多见。结合实际工程需要,我们对花岗岩的抗压、抗拉和抗剪破坏强度随加载速率变化的规律进行了系统的探讨,结合常规三轴应力状态下的强度特性资料,提出了考虑加载速率的花岗岩动力破坏判据的经验公式

一、岩石破坏判据的概述

探讨岩石的强度特征和本构关系是岩石力学的基本命题之一。岩石在一定的应力,一定作用时间和一定温度条件下,具有特定的应力—应变关系和强度特性。这里,一定的应力系指岩石承受载荷作用的形式、大小;一定的作用时间系指岩石承受载荷的时间,即从开始受载到峰值及结束的时间;一定的温度系指岩石所处环境的冷热状态。本文讨论岩石在室温条件下的破坏判据。

1. 岩石静载破坏判据

当岩石承受的载荷是慢慢施加的,其加载速率大约为 $10^{-1} \sim 10^1 \text{kg/cm}^2/\text{sec}$ 时,通常称为静载。此时讨论岩石的破坏判据也称为静载破坏判据。

岩石的破坏理论很多,大体可分为两类⁽¹⁾⁽²⁾。一类是基于实验数据,把岩石视为均质材料,不考虑岩石内部的破坏机制,认为某一指标达到临界值时岩石将破坏,例如最大应变,最大应力,最大应变能,最大剪应力或修正的最大剪应力破坏判据等。另一类则基于岩石内部的破坏机制,认为岩石本身包含着裂缝,在外力作用下,由于应力集中,裂缝发展而导致破坏。属于这类有格里菲斯(Griffith)断裂判据或修正的格里菲斯断裂判据。

在研究岩石的脆性破坏时,库伦——纳维(Navier)判据能有效地预告压缩时的破坏,但不能预告拉伸时的破坏。而莫尔判据既能预告压缩应力状态下,剪应力与围压的关系,也能预告破坏面的方向;但在拉伸应力状态下,也不能预告其破坏。为了预告拉伸时的破坏,必须增添最大拉应力判据。因此,Chen, W. F., Fang, H. Y., 等提出了修正的库伦——莫尔破坏判据,即作一个连接抗拉强度 σ_t 和抗剪强度 σ_c 的圆,见图1。当然,上述这些破坏判据,都没有考虑到中间主应力对岩石破坏强度的影响,也没有考虑岩石内部的破坏机制。

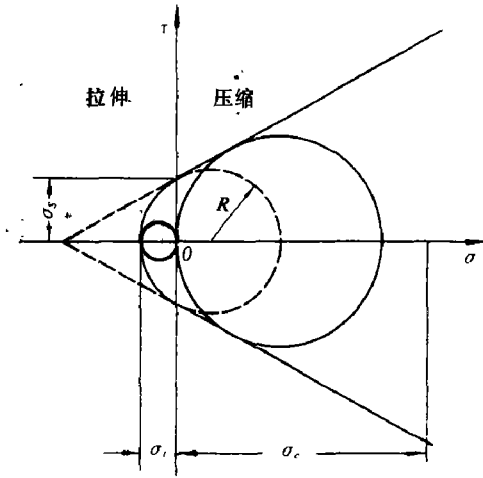


图1 修正的莫尔——库伦破坏判据

格里菲斯判据及其修正判据,论述了岩石微裂缝开始发生和发展时的应力状态,即开始扩容时的应力。但是,象岩石这样的非均质材料,在许多情况下,它们不能预告围压下,尤其是高围压下岩石的破坏情况。因此,它们的可适应性不太广。

2. 岩石动载破坏判据

爆炸物在岩体介质中爆炸,爆炸应力波迅速在岩体中传播,引起岩石汽化、液化、破坏、变形和振动。爆心处,岩石被高温高压所汽化,形成爆炸腔;在爆心近区,岩石被液化;距爆心一定距离处,岩石被压碎、剪裂和拉断,形成破坏区;距爆心远处,岩石没有因爆炸而破坏,形成振动区³⁾。

爆炸波在岩体介质中传播的规律,除受爆炸条件,诸如炸药性质和药包形式等因素的影响外,还受岩石介质“瞬间”的物理力学特性的影响。依据爆炸条件,距爆心的距离及地质条件,岩石在爆炸过程中分别可受到微秒级、毫秒级和秒级的动载作用。岩石承受动载作用时,它们的破坏强度不仅取决于应力状态,而且也依赖于加载速率。目前,考虑岩石在动载作用下的破坏判据很少,我们结合具体工程,系统地探讨了花岗岩的抗压、抗拉和抗剪破坏强度随加载速率的变化规律,以及在常规静载三轴应力状态下的强度特性,从而对花岗岩提出了考虑加载速率因素的经验的动载破坏判据,并与现场调查资料对比,取得较好的结果。

二、岩石动载试验设备及测量系统

为模拟爆炸应力波的加载过程,研制了岩石动载试验机。岩石动载机的特点是加载速率在一个很宽的范围内可调,以此实现了岩石试件在不同加载速率($10^{-1} \sim 10^3 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$)条件下的破坏试验研究。

动载机的原理如图2所示,它是采用液压气压联动系统实现对试件的快速加载⁴⁾。我们使用的动载机的基本性能如下:①400吨动载机:最大工作液压 200 kg/cm^2 ;最大工作气压 60 kg/cm^2 ;最大出力400吨;工作活塞最大行程 25 mm ;最短升压时间为8毫秒,即从开始加载到达总吨位的时间为8毫秒;最长升压时间与一般试验机相同。②、40吨动载机:最大工作液压为 170 kg/cm^2 ;最大气压 50 kg/cm^2 ;最大出力40吨;工作活塞最大行程为 17 mm ;最短

升压时间为3毫秒，最长升压时间与一般试验机相同。两部动载机升压时间均在最短与最长

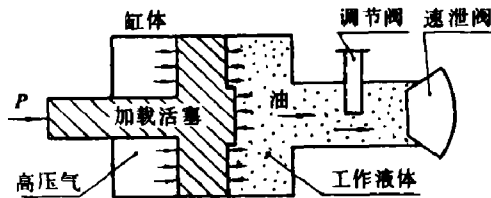


图2 动载机原理图

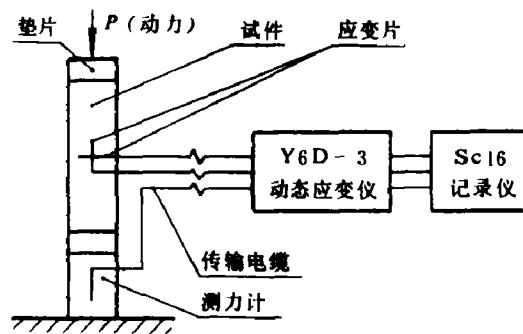


图3 动载抗压试验示意图

时间范围内可调，因而可获得对岩石试件在加载速率为 $10^{-1} \sim 10^5 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ 范围内进行强度试验。在加载过程中，每个试件在破坏前其加载速率基本上为一个常数。

使用动载机进行试验时，其测试系统如图3所示，即将动力测力计、电阻应变片连接到动态应变仪Y6D-3上，并用SC16型光线示波器进行记录，然后根据测得的波形，换算得岩石试件的动载应力、应变和破坏值。

三、不同加载速率条件下花岗岩的试验结果

1. 具体工程的花岗岩为燕山中期 (r_1^{-2}) 中粗粒似斑状花岗岩，灰白色，风化后褐灰色。花岗似斑状结构，块状构造，矿物成份以石英长石为主，含有少量黑云母；斑晶为斜长石，多自形，晶体长轴一般大于0.5厘米，最长者近3厘米，岩体中偶见有不大于10厘米的片麻岩捕虏体。依据坑道所处位置，取得的岩样分为A、B两类。A类花岗岩在地表较深处，岩芯较完整，呈灰白色，试件的平均容重为 2.60 g/cm^3 ，平均孔隙度为 1.88% ；B类花岗岩在地表浅处，岩芯分化较严重，试件的平均容重为 2.58 g/cm^3 ，平均孔隙度为 3.16% 。

2. 常规三轴试验

在加载速率为 $10^0 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ 的条件下，对 $\phi 90 \times 190 \text{ mm}$ 的A类花岗岩试件进行常规三轴试验，获得的结果列于表1。在压缩条件下，A类花岗岩的破坏判据如图4所示，此时有

表1 A类花岗岩常规三轴试验结果

试件数	围压 $\sigma_2 = \sigma_3 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	平均最大轴应力 $\sigma_1 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	平均剪应力 $\tau \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	平均正应力 $\sigma \text{ (kg/cm}^2\text{)}$
8	0	740	370	249
4	100	2265	1083	822
4	250	2849	1300	1116
4	400	3690	1645	1497
4	500	4660	2080	1887
4	600	5186	2293	2129

$$\tau = \sigma_0 + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

式中 τ 为岩石剪切强度, σ 为施加于破坏面上的正应力, σ_0 为岩石材料的表观剪切强度, 相当于“粘聚力”, 即在正应力为零时的抗剪强度, φ 为内摩擦角. 试验获得 $\sigma_0 = 170 \text{ kg/cm}^2$, $\varphi = 42^\circ$

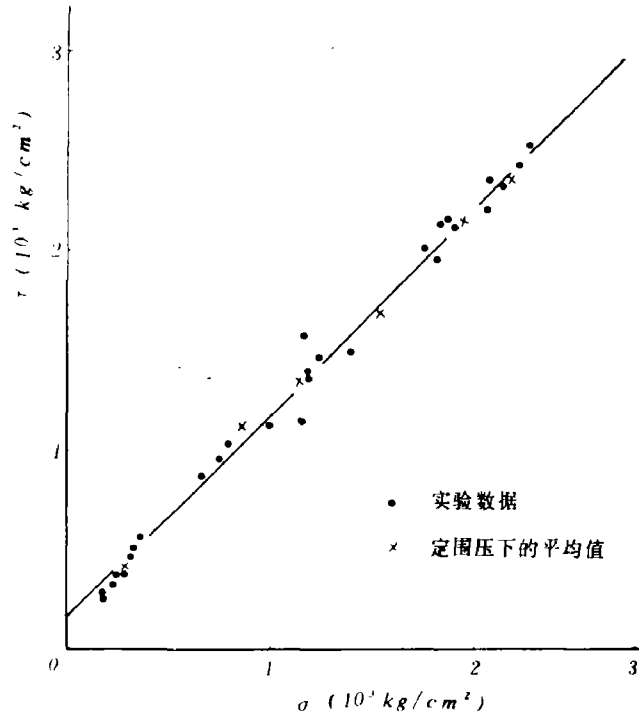


图4 A类花岗岩常规三轴破坏判据

3. 不同加载速率条件下花岗岩的破坏强度

单轴压缩、单轴拉伸和单轴剪切强度与加载速率的关系见表2和图5、6、7. 偏差系数与加载速率的关系见图8, 详见文献[5].

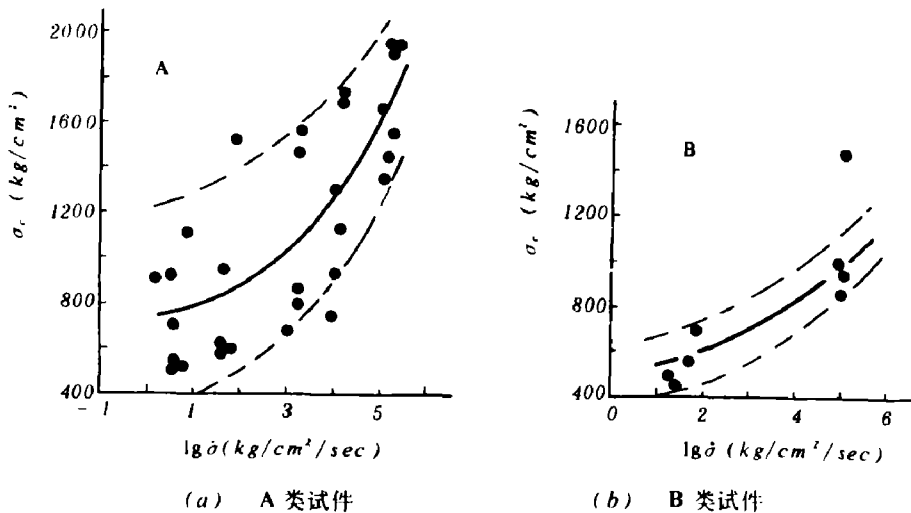
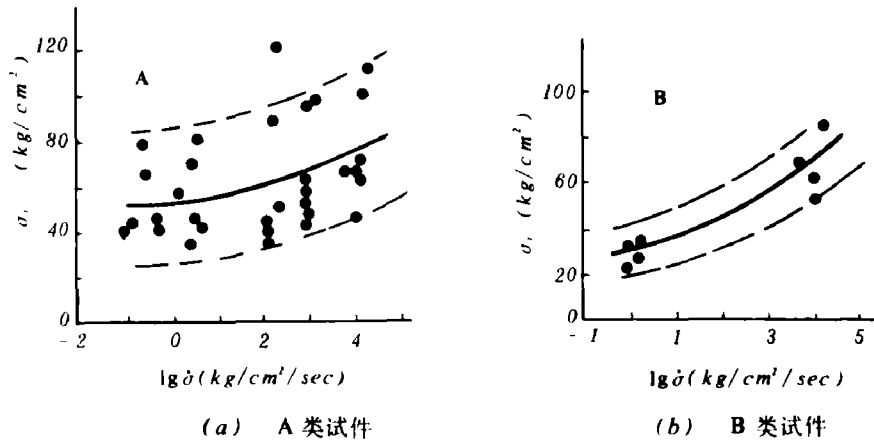


图5 花岗岩的抗压强度与加载速率的关系



(a) A类试件 (b) B类试件
图6 花岗岩的抗拉强度与加载速率的关系

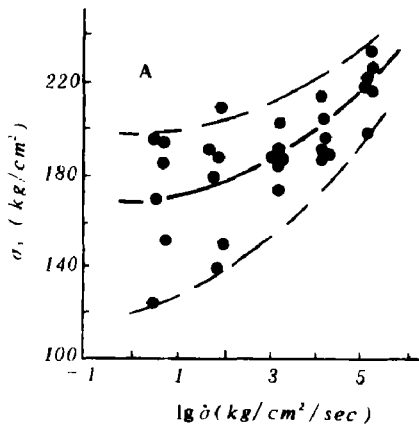


图7 A类花岗岩的抗剪强度与加载速率的关系

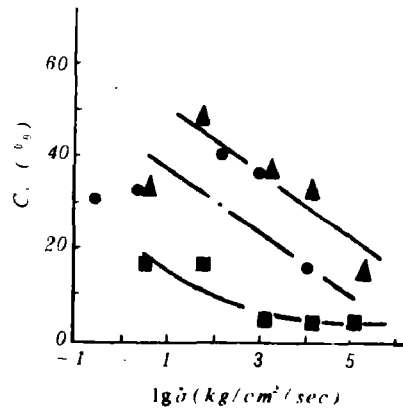


图8 偏差系数与加载速率的关系
▲——抗压, ●——抗拉, ■——抗剪

表2 花岗岩的破坏强度与加载速率的关系

岩类	抗 压			抗 拉			抗 剪					
	试件数	平均加载速率 $\dot{\sigma}$ (kg/cm ² /sec)	平均抗压强度 σ_c (kg/cm ²)	偏差系数 C_v (%)	试件数	平均加载速率 $\dot{\sigma}$ (kg/cm ² /sec)	平均抗拉强度 σ_t (kg/cm ²)	偏差系数 C_v (%)	试件数	平均加载速率 $\dot{\sigma}$ (kg/cm ² /sec)	平均抗剪强度 σ_s (kg/cm ²)	偏差系数 C_v (%)
A类	6	3.78×10^0	747	32.7	6	2.50×10^{-1}	53.0	30.5	6	3.53×10^0	169	16.5
	6	4.80×10^1	848	47.9	6	2.60×10^0	55.3	32.8	6	6.37×10^1	175	17.6
	5	1.72×10^1	1074	36.9	6	1.55×10^2	62.7	56.0	6	1.36×10^1	187	5.0
	6	1.20×10^4	1250	32.3	7	1.04×10^1	64.5	36.8	6	1.36×10^4	196	5.4
	7	1.67×10^5	1681	14.8	7	1.17×10^4	73.4	15.0	6	1.26×10^5	214	5.6
B类	4	2.75×10^1	540	23.8	4	1.25×10^0	28.4	17.3	/	/	/	/
	4	1.02×10^5	1062	14.6	4	9.78×10^1	60.5	21.4	/	/	/	/

四、花岗岩的动载破坏判据

1. 单轴应力状态

实验表明：花岗岩的破坏强度不仅取决于应力状态及其量值，而且还与加载速率有关；花岗岩的单轴抗压、抗拉、抗剪破坏强度随加载速率的提高而提高。我们可以把花岗岩的破坏强度表为

$$\sigma_l = \sigma_{l_0} \left[1 + c_1 \lg \frac{\dot{\sigma}_l}{\dot{\sigma}_{l_0}} + c_2 \left(\lg \frac{\dot{\sigma}_l}{\dot{\sigma}_{l_0}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中 $\dot{\sigma}_l > \dot{\sigma}_{l_0}$ ，下标 l 表示实验条件，即抗压、抗拉或抗剪。下标 0 表示静载条件。这里只取了前三项来描述强度与加载速率的关系。由实验数据的平均值，按上述公式逼近求出 c_1 和 c_2 列于表 3 中。

表 3 公式(2)中的常数值

常 数	抗 压	抗 拉	抗 剪
c_1	0.075	0.050	0.025
c_2	0.030	0.007	0.010

2. 组合应力状态

在现场爆炸应力波的传播过程中，岩体承受三向动应力的作用。当动应力达到或超过岩石某个强度指标（临界值）时，岩石将发生破坏。例如，爆破压缩波达到岩石抗压破坏强度值时，岩石将被压碎；当拉伸波达到岩石拉伸破坏强度值时，岩石被拉断；当剪切波达到岩石抗剪破坏强度值时，岩石被剪裂。所以我们拟用此三个单轴动载破坏强度值为基点，企图用它们来描述组合应力状态下花岗岩的动载破坏区域。本文的实验结果与修正的库伦——莫尔破坏判据比较相符。在压缩应力条件下，公式(1)成立，由于

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) = \frac{\sigma_c}{2\sigma_s} \quad (3)$$

所以有

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sigma_c^2 - 4\sigma_s^2}{4\sigma_s \sigma_c} \quad (4)$$

在拉伸应力条件下，作一个通过点 σ_c 和 σ_s ，并与压缩应力条件下的包络线相切的圆，其半径 R 为

$$R = \frac{\sigma_s^2 + \sigma_c^2}{2\sigma_s} \quad (5)$$

因而在通常的静载条件下，可获得如下的破坏判据

$$\begin{cases} \tau = \sigma_s + \sigma \frac{\sigma_c^2 - 4\sigma_s^2}{4\sigma_s \sigma_c} & \text{当 } \sigma \geq 0 \text{ 时 (压缩区)} \\ \tau^2 = \sigma_s^2 + \sigma \frac{\sigma_s^2 - \sigma_c^2}{\sigma_s} - \sigma^2 & \text{当 } \sigma < 0 \text{ 时 (拉伸区)} \end{cases} \quad (6)$$

由于 σ_c , σ_t , σ_s 都随加载速率的提高而提高, 因而, 动载条件下的破坏判据可表为

$$\begin{cases} \tau(\dot{\sigma}_{ii}) = \sigma_{s0} K_3 + \sigma \frac{\sigma_{c0}^2 K_1^2 - 4\sigma_{t0}^2 K_3^2}{4\sigma_{c0} K_1 \sigma_{s0} K_3} & \text{当 } \sigma > 0 \text{ 时 (压缩区)} \\ [\tau(\dot{\sigma}_{ii})]^2 = \sigma_{s0}^2 K_3^2 + \sigma \frac{\sigma_{c0}^2 K_3^2 - \sigma_{t0}^2 K_2^2}{\sigma_{c0} K_2} - \sigma^2 & \text{当 } \sigma < 0 \text{ 时 (拉伸区)} \end{cases} \quad (7)$$

式中

$$K_1 = 1 + 0.075M + 0.030M^2, \quad K_2 = 1 + 0.050M + 0.007M^2$$

$$K_3 = 1 + 0.025M + 0.010M^2$$

$$M = \lg \frac{\dot{\sigma}}{\dot{\sigma}_0}, \quad \dot{\sigma}_{ii} \geq \dot{\sigma}_{0ii}$$

将上述的各值代入公式(7), 并画成图9, 各有关参数见表4。由于 K_1 比 K_2 和 K_3 随 M 的变化增长快, 所以预告动载时的内摩擦角比静载时的内摩擦角大。

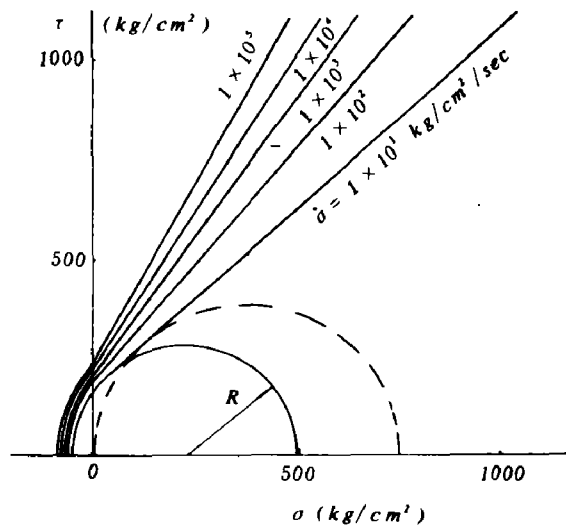


图9 不同加载速率下A类花岗岩的破坏判据

表4 岩石动载试验资料表

$\dot{\sigma} (kg/cm^2/sec)$	1×10^0	1×10^1	1×10^2	1×10^3	1×10^4	1×10^5
$\sigma_c (kg/cm^2)$	669	771	979	1153	1372	1638
$\sigma_t (kg/cm^2)$	50	57	64	69	75	81
$\sigma_s (kg/cm^2)$	165	170	184	195	210	228
$R (kg/cm^2)$	297	285	297	310	332	361
φ (度)	41.6°	42.0°	49.5°	54.0°	58.4°	60.5°

五、工程应用

根据岩性、爆源特性、位置、药量的大小及形状等，我们应用上述的动载资料及所提出的破坏准则，估算现场的破坏区域。同时，在爆后进行开挖、实地调查，以确定破坏分区^[3]。

在条形药包爆炸的实际工程中，当坑道的中心轴垂直于条形药包的长轴并通过它的中心时，估算该坑道破坏分区可用如下公式

$$D = 0.018 C_p \sqrt{\frac{\rho A}{\rho_1 g \sigma_1}} \quad (9)$$

其中 D 是距爆心的距离 (米)， ρ 为岩石的容重 (公斤/米³)， C_p 为围岩声波的纵波的波速 (米/秒)， g 为重力加速度 (米/秒²)， A 为单位装药长度的装药量 (公斤/米)， ρ_1 为炸药的容重 (公斤/米³)。

实际调查结果可将坑道破坏区分为：I. 完全破坏区——坑道围岩以压碎为主，伴有剪切破坏。此区内爆炸冲击波或应力波的强度大于或等于岩石的动力抗压强度。II. 严重破坏区——坑道围岩以剪切破坏为主，伴有拉伸破坏。在此区范围内围岩承受的应力波强度小于岩石的动抗压强度，但大于或等于岩石的动力抗剪强度。III. 中等破坏区——以拉伸破坏为主，兼有剪切破坏。此区内围岩承受的应力波强度小于岩石的动力抗剪强度，但大于或等于岩石的动力抗拉强度。IV. 轻微破坏区——坑道围岩有部份裂缝扩展。这是裂缝尖端的应力作用因子达到或超过临界应力强度因子所致。

表 5 给出了按本文方法估算和现场实测的坑道破坏分区值。

表 5 实测与估算的坑道破坏分区

破坏分区	A 类 岩 石			B 类 岩 石		
	实测值(m)	估算值(m)	误差(%)	实测值(m)	估算值(m)	误差(%)
完全破坏区 D_1	/	18.91	/	/	5.92	/
严重破坏区 D_2	35	33.19	5	12	9.30	22
中等破坏区 D_3	75	60.07	20	29	34.23	-18
轻微破坏区 D_4	165	164.28	0	55	48.30	12

六、结论和讨论

在 $10^{-1} \sim 10^3 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ 加载速率条件下，通过对花岗岩进行系统的试验研究和现场研究，我们获得如下的结论：

1. 花岗岩的单轴抗压、抗拉和抗剪破坏强度均随加载速率的提高而明显提高，其规律可用所得公式(2)来表示。

2. 在组合应力条件下，包含着加载速率因素的花岗岩的动载破坏判据，可用公式(7)来表征。即可用动载单轴抗压、抗拉和抗剪的强度指标来描述。

3. 应用本文的动力强度资料，估算了实际工程坑道的爆破破坏分区，获得较满意的结果。

本文是应用单轴动载试验的结果，作为探讨岩石动载破坏判据的依据。岩石动载破坏判据随着动载三轴设备的研制成功，将获得进一步完善。

参 考 文 献

- (1) Vutukuri, V.S., Lama, R.D. et al., *Handbook on Mechanical Properties of Rock*, Vol. 1, Trans. Tech., USA and Canada, (1974), p. 44 - 50, 91 - 95, 175 - 254.
- (2) Liebowitz, H., *Fracture*, Vol. 7, Ch. 3, Leonard, Obert, New York and London, (1972), p. 94 - 155.
- (3) 朱瑞庚, 岩土力学, (2) (1979), 39 - 58.
- (4) 吴绵拔、徐兆有等, "材料动载试验设备原理及其应用", 爆破与安全, 湖北人民出版社, (在印刷中).
- (5) 吴绵拔, 岩土工程学报, 4(2) (1982), 97 - 106.

FAILURE CRITERION OF GRANITE AT DIFFERENT LOADING RATES

Zhu Ruigeng Wu Mianba

Abstract

By a fast loading equipment for rock mechanics test, a systematic investigation on the breaking behavior of granite specimens in compression, tensile and shear tests respectively, has been conducted at different loading rates within the range of $10^{-1} \sim 10^5 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$. It has been found that the strength of granite specimens increases with the increasing loading rates. Based on it and some results from conventional triaxial and stress tests, a criterion of dynamic failure of granite has been presented.