

# 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 $10^{-1} \sim 10^3 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ 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<sup>[1,2]</sup>。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 $\sigma_t$ 和抗剪强度 $\sigma_c$ 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。

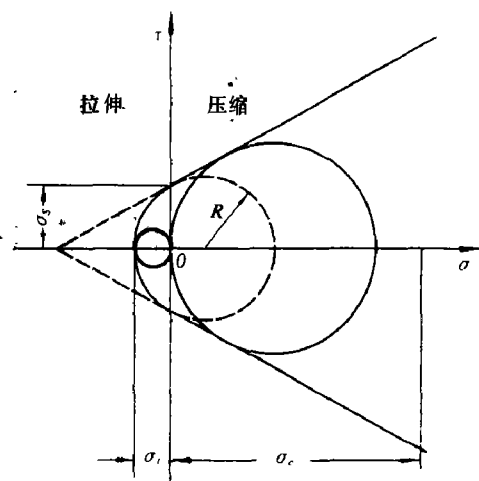


图1 修正的莫尔——库伦破坏判据

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<sup>[3]</sup>。

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<sup>[4]</sup>。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 $200 \text{ kg/cm}^2$ ;最大工作气压 $60 \text{ kg/cm}^2$ ;最大出力400吨;工作活塞最大行程 $25 \text{ mm}$ ;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 $170 \text{ kg/cm}^2$ ;最大气压 $50 \text{ kg/cm}^2$ ;最大出力40吨;工作活塞最大行程为 $17 \text{ mm}$ ;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

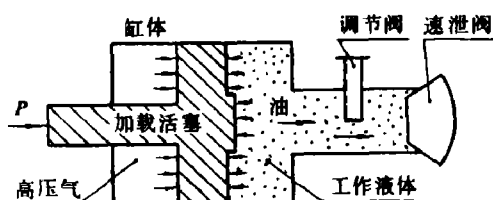


图2 动载机原理图

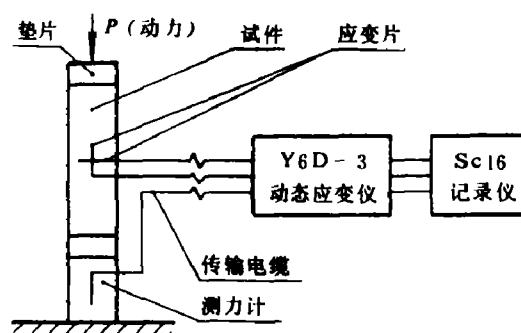


图3 动载抗压试验示意图

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 ( $r_1^{1-2}$ ) 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  $2.60 \text{ g/cm}^3$ , 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  $2.58 \text{ g/cm}^3$ , 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<br>$\sigma_2 = \sigma_3 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ | 平均最大轴应力<br>$\sigma_1 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ | 平均剪应力<br>$\tau \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ | 平均正应力<br>$\sigma \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ |
|-----|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 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 $\tau$ 为岩石剪切强度,  $\sigma$ 为施加于破坏面上的正应力,  $\sigma_0$ 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,  $\varphi$ 为内摩擦角. 试验获得 $\sigma_0 = 170 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\varphi = 42^\circ$

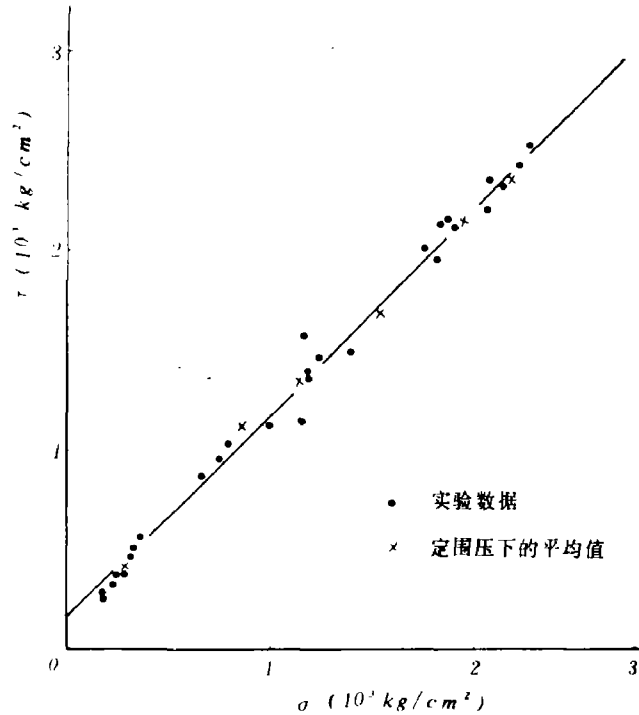


图4 A类花岗岩常规三轴破坏判据

### 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].

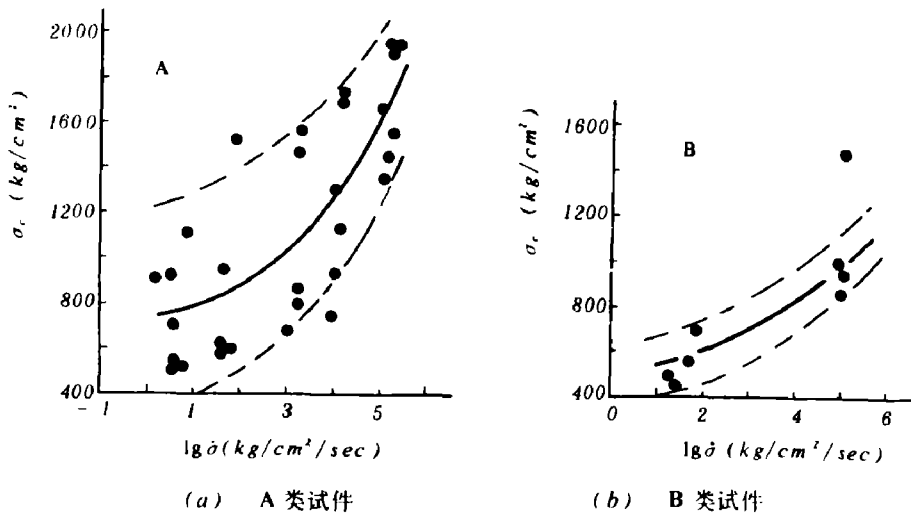


图5 花岗岩的抗压强度与加载速率的关系

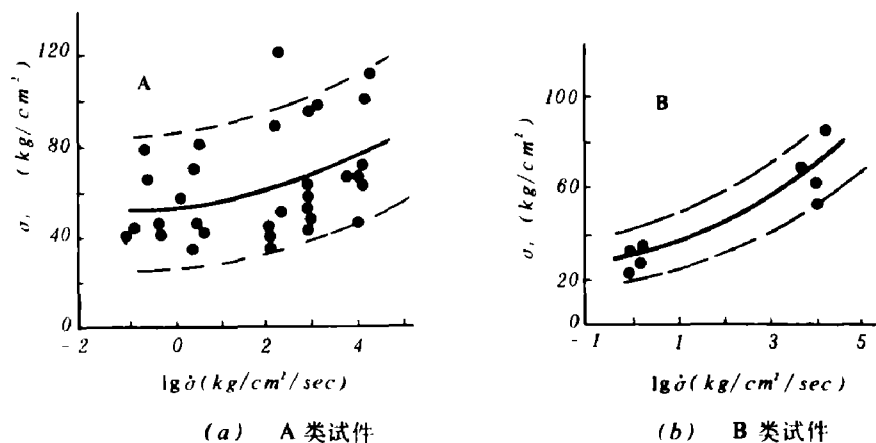


图6 花岗岩的抗拉强度与加载速率的关系

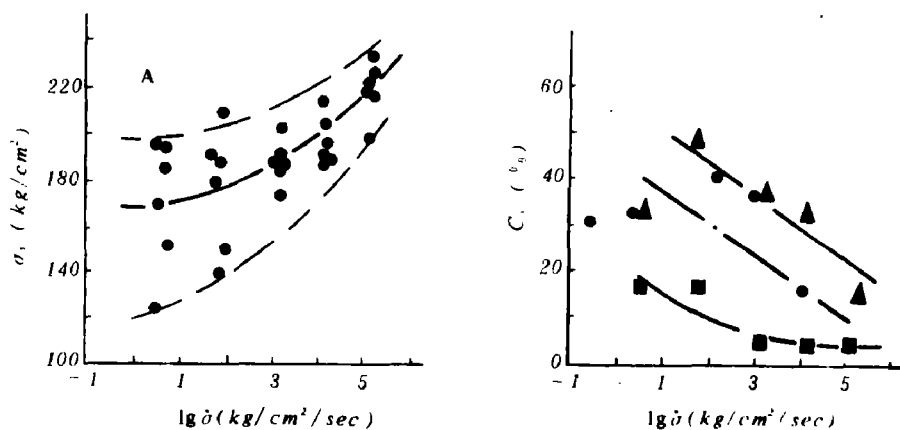


表2 花岗岩的破坏强度与加载速率的关系

| 岩<br>类     | 抗 压         |                                                            |                                                    |                          | 抗 拉         |                                                            |                                                    |                          | 抗 剪         |                                                            |                                                   |                          |
|------------|-------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------|-------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------|-------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------|
|            | 试<br>件<br>数 | 平均加载<br>速 率<br>$\dot{\sigma}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> /sec) | 平均抗压<br>强 度<br>$\sigma_c$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 偏差<br>系数<br>$C_c$<br>(%) | 试<br>件<br>数 | 平均加载<br>速 率<br>$\dot{\sigma}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> /sec) | 平均抗拉<br>强 度<br>$\sigma_t$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 偏差<br>系数<br>$C_t$<br>(%) | 试<br>件<br>数 | 平均加载<br>速 率<br>$\dot{\sigma}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> /sec) | 平均抗<br>剪强度<br>$\sigma_s$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 偏差<br>系数<br>$C_s$<br>(%) |
|            |             |                                                            |                                                    |                          |             |                                                            |                                                    |                          |             |                                                            |                                                   |                          |
| A<br><br>类 | 6           | $3.78 \times 10^{-2}$                                      | 747                                                | 32.7                     | 6           | $2.50 \times 10^{-1}$                                      | 53.0                                               | 30.5                     | 6           | $3.53 \times 10^{-2}$                                      | 169                                               | 16.5                     |
|            | 6           | $4.80 \times 10^1$                                         | 848                                                | 47.9                     | 6           | $2.60 \times 10^{-2}$                                      | 55.3                                               | 32.8                     | 6           | $6.37 \times 10^1$                                         | 175                                               | 17.6                     |
|            | 5           | $1.72 \times 10^3$                                         | 1074                                               | 36.9                     | 6           | $1.55 \times 10^2$                                         | 62.7                                               | 56.0                     | 6           | $1.36 \times 10^3$                                         | 187                                               | 5.0                      |
|            | 6           | $1.20 \times 10^4$                                         | 1250                                               | 32.3                     | 7           | $1.04 \times 10^3$                                         | 64.5                                               | 36.8                     | 6           | $1.36 \times 10^4$                                         | 196                                               | 5.4                      |
|            | 7           | $1.67 \times 10^5$                                         | 1681                                               | 14.8                     | 7           | $1.17 \times 10^4$                                         | 73.4                                               | 15.0                     | 6           | $1.26 \times 10^5$                                         | 214                                               | 5.6                      |
| B<br><br>类 | 4           | $2.75 \times 10^1$                                         | 540                                                | 23.6                     | 4           | $1.25 \times 10^0$                                         | 28.4                                               | 17.3                     | /           | /                                                          | /                                                 | /                        |
|            | 4           | $1.02 \times 10^5$                                         | 1062                                               | 14.6                     | 4           | $9.78 \times 10^3$                                         | 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

$$\sigma_l = \sigma_{l0} \left[ 1 + c_1 \lg \frac{\dot{\sigma}_l}{\dot{\sigma}_{l0}} + c_2 \left( \lg \frac{\dot{\sigma}_l}{\dot{\sigma}_{l0}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中  $\dot{\sigma}_l > \dot{\sigma}_{l0}$ ，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

$$\operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) = \frac{\sigma_c}{2\sigma_1} \quad (3)$$

所以有

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sigma_c^2 - 4\sigma_1^2}{4\sigma_1\sigma_c} \quad (4)$$

在拉伸应力条件下，作一个通过点  $\sigma_c$  和  $\sigma_1$ ，并与压缩应力条件下的包络线相切的圆，其半径  $R$  为

$$R = \frac{\sigma_c^2 + \sigma_1^2}{2\sigma_1} \quad (5)$$

因而在通常的静载条件下，可获得如下的破坏判据

$$\begin{cases} \tau = \sigma_1 + \sigma \frac{\sigma_c^2 - 4\sigma_1^2}{4\sigma_1\sigma_c} & \text{当 } \sigma \geq 0 \text{ 时 (压缩区)} \\ \tau^2 = \sigma_1^2 + \sigma \frac{\sigma_c^2 - \sigma_1^2}{\sigma_1} - \sigma^2 & \text{当 } \sigma < 0 \text{ 时 (拉伸区)} \end{cases} \quad (6)$$

由于 $\sigma_c$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ 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

$$\begin{cases} \tau(\dot{\sigma}_{11}) = \sigma_{10} K_3 + \sigma \frac{\sigma_{c0}^2 K_1^2 - 4\sigma_{10}^2 K_3^2}{4\sigma_{c0} K_1 \sigma_{10} K_3} & \text{当 } \sigma \geq 0 \text{ 时 (压缩区)} \\ [\tau(\dot{\sigma}_{11})]^2 = \sigma_{10}^2 K_3^2 + \sigma \frac{\sigma_{c0}^2 K_3^2 - \sigma_{10}^2 K_2^2}{\sigma_{10} K_2} - \sigma^2 & \text{当 } \sigma < 0 \text{ 时 (拉伸区)} \end{cases} \quad (7)$$

式中

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

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

$$M = \lg \frac{\dot{\sigma}}{\dot{\sigma}_0}, \quad \dot{\sigma}_{11} \geq \dot{\sigma}_{011}$$

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。

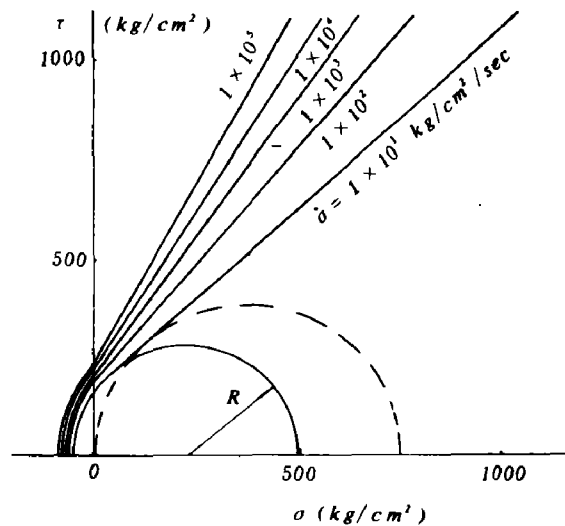


图9 不同加载速率下A类花岗岩的破坏判据

表4 岩石动载试验资料表

| $\dot{\sigma} (\text{kg/cm}^2/\text{sec})$ | $1 \times 10^0$ | $1 \times 10^1$ | $1 \times 10^2$ | $1 \times 10^3$ | $1 \times 10^4$ | $1 \times 10^5$ |
|--------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $\sigma_c (\text{kg/cm}^2)$                | 669             | 771             | 979             | 1153            | 1372            | 1638            |
| $\sigma_1 (\text{kg/cm}^2)$                | 50              | 57              | 64              | 69              | 75              | 81              |
| $\sigma_3 (\text{kg/cm}^2)$                | 165             | 170             | 184             | 195             | 210             | 228             |
| $R (\text{kg/cm}^2)$                       | 297             | 285             | 297             | 310             | 332             | 361             |
| $\varphi$ (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<sup>[3]</sup>。

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), $\rho$ 为岩石的容重(公斤/米<sup>3</sup>), $C_p$ 为围岩声波的纵波的波速(米/秒), $g$ 为重力加速度(米/秒<sup>2</sup>), $A$ 为单位装药长度的装药量(公斤/米), $\rho_1$ 为炸药的容重(公斤/米<sup>3</sup>)。

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, Ober, 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.