

# Bukit Timah 花岗闪长岩的 Hugoniot 状态方程\*

## The Hugoniot equation of state for Bukit Timah granite

赵 坚 赵宇辉

(新加坡南洋理工大学土工技术研究中心, Singapore, 639798)

尚嘉兰 沈乐天

(中国科学院力学研究所 LNM, 北京, 100080)

摘 在单级轻气炮上对花岗岩的激波状态方程进行了实验测定。最高撞击速度为 800 m/s, 相应的最高撞击压力是 7 GPa。锰铜应力计被用于测量撞击应力或平均激波速度。由实验结果拟合得到 Bukit Timah 花岗岩的 Hugoniot 线性关系式和多项式状态方程。

关键词 Hugoniot (雨贡尼奥), 状态方程, 花岗岩, 岩石性能

中图法分类号 TV 223.1

作者简介 赵坚, 男, 1960 年生, 1983 年于英国里兹大学土木工程系获学士学位, 1987 年获英国伦敦大学帝国学院工程岩石力学系博士学位。现为新加坡南洋理工大学土木结构工程学院土工技术研究中心高级讲师, 国际岩石力学学会、国际工程地质学会、美国土木工程学会、英国采矿和冶金学会等学会会员。

Zhao Jian Zhao Yuhui

(School of Civil and Structural Engineering, Nanyang Technological University, Singapore, 639798)

Shang Jialan Shen Letian

(LNM Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

Abstract The shock wave propagation characteristics of the Bukit Timah granite of Singapore have been measured by recording the shock wave profiles produced by the impact of projectiles accelerated in a light gas gun. The impact velocities in the experiments were from 65 to 800 m/s, and the corresponding peaks of impact stresses were from 0.5 to 7 GPa. The Hugoniot relation, expressed as the curve of shock wave velocity versus particle velocity, obtained from the experiments shows linearity in the testing stress range. The polynomial equation of state is obtained by regression of the experimental data.

Key words Hugoniot, equation of state, granite, rock properties

### 1 引 言\*

高速率加载条件下岩石的状态方程是岩石的基本力学性能之一。其与岩石动态本构关系一起构成了解决实际工程问题的重要数据, 例如, 设计和计算岩石结构的稳定性, 预测和改进岩石的破碎过程, 以及实现矿山和坑道的快速开挖等。虽然, 最近几十年以来, 随着炸药平面透镜、气炮技术的发展以及激波测量技术的进步, 很多材料的激波状态方程数据已经被测定<sup>[1~3]</sup>。但是有关岩石激波状态方程的报导还不很多<sup>[4~6]</sup>。

激波参数的计算是以 Rankine-Hugoniot 方程为基础, 其基本假设是把在高压下的固体视为流体, 认为那时材料的剪切模量为零。这样就用流体中的激波理论来处理高压下固体中的激波。

在激波波阵面之前, 压力为  $P_0$ , 密度为  $\rho_0$ , 质点是静止的; 在波阵面之后, 压力变为  $P$ , 密度变为  $\rho$ , 质点速度变为  $u_p$ , 激波波阵面的速度为  $U_s$ 。如果以波阵面作为参考中心, 观察者随波阵面一起运动, 就可建立 Rankine-Hugoniot 方程。

$$\text{质量守恒} \quad V = V_0 \left( 1 - \frac{u_p}{U_s} \right) \quad (1)$$

$$\text{动量守恒} \quad P = P_0 + \rho_0 u_p U_s \quad (2)$$

$$\text{能量守恒} \quad E = \frac{1}{2} (P + P_0) (V_0 - V) \quad (3)$$

式中  $P$  为压力,  $\rho$  为密度,  $V$  为比容,  $E$  为比内能,  $U_s$  为激波速度,  $u_p$  为质点速度, 下标“0”代表初始状态。

在方程(1)~(3)中, 共有五个变量。因此, 需要用实验方法来测得上述五个变量中某两个, 然后用 Rankine-Hugoniot 方程计算材料状态方程中的一个点。如确定了这样一组点, 则决定了材料受激波作用下, 从初始状态到达最终状态的轨迹。这就是 Hugoniot 状态关系, 一般用  $P-V$  或  $U_s-u_p$  平面上的一条曲线表示。

### 2 试验材料和试样制备

试验材料是一种花岗闪长岩。岩石呈浅灰色, 全晶

\* 本工作受新加坡南洋理工大学和中国科学院力学研究所所长择优基金资助

到稿日期: 1998-05-04

质、粒状。

岩石的主要矿物成分为斜长石、钾长石和石英等(见表1)。斜长石具有环带构造,呈宽板状,为更中长石。钾长石呈半自形板状,表面高岭土化。石英无色透明,呈它形粒状。暗色矿物以黑云母为主,还有角闪石和绿泥石。副矿物有榍石、锆石、磷灰石和磷铁矿。

岩石中大部分矿物呈半自形粒状。斜长石和钾长石呈半自形板状,石英呈它形粒状,角闪石呈半自形到它形柱状,黑云母呈半自形到它形,副矿物为全自形到半自形晶体散布在岩石中。各矿物互相镶嵌。矿物颗粒尺寸大小不等,从0.2~6 mm,形成全晶质半自形粒状似斑状结构。

岩石的蚀变倾向是,斜长石的钠长石化;角闪石的黑云母化;钾长石的高岭土化和绢云母化。

Bukit Timah 花岗岩的主要物理力学性能列于表2。

表1 Bukit Timah 花岗岩的成分组成

化学成分	试样1	试样2
石英	25.4	26.2
碱性长石	20.6	20.7
斜长石	41.7	42.7
黑云母	6.2	9.2
绿泥石化黑云母	5.0	1.1
绢云母	0.5	0.1
不透光物质	0.3	—
绿帘石	0.3	—
锆石	少量	—
磷灰石	少量	—
白云母	—	少量
方解石	—	少量
金红石	—	少量
高岭土	—	少量

表2 Bukit Timah 花岗岩的主要物理力学性能

密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2670
声速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	5820
杨氏模量/GPa	75.2
泊松比	0.16
单轴压缩强度/MPa	147.5
拉伸强度/MPa	16.1

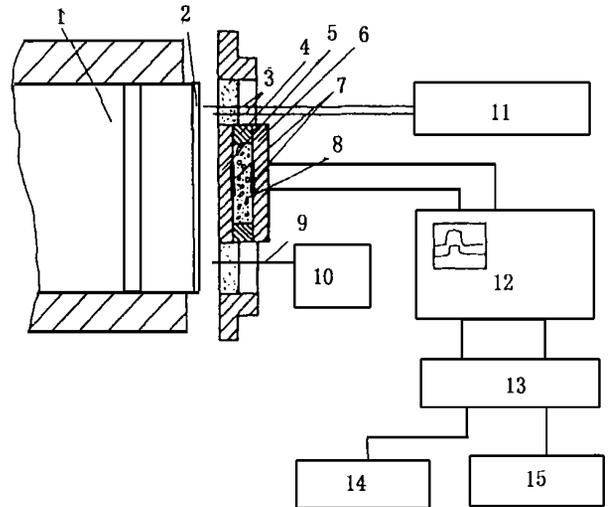
花岗岩试样的制备过程如下,首先从现场岩体中钻取直径为52 mm的岩样柱体。然后,用金刚石锯从岩样柱体上分别切取厚度为2,4,6,8 mm的圆片。圆片两平面保证有良好的平行度,并且被精心地磨平和抛光。

### 3 撞击试验

#### 3.1 轻气炮

试验装置是中国科学院力学研究所LNM动态测

试实验室的一台口径为101mm的单级轻气炮<sup>[7]</sup>。图1是轻气炮工作原理及测试系统的示意图。



1-子弹 2-飞板 3-速度探针 4-保护环 5-盖板 6-背板  
7-传感器和 8-靶 9-触发探针 10-电源 11-记录仪  
12-数字示波器 13-计算机 14-打印机 15-绘图仪

图1 实验原理和测试系统简图

Fig.1 Schematic of the test technology and measuring system

#### 3.2 技术细节

本实验选择2024A1作为飞板、盖板、背板和保护环的材料。这是因为2024A1的Hugoniot数据完全已知<sup>[2]</sup>;2024A1的阻抗与花岗岩的阻抗非常匹配。飞板厚度为4mm。两个纵向电探针测量撞击速度。两个锰铜应力计分别埋入花岗岩试样的前表面(应力计)和背表面(应力计)。撞击产生的应力波沿岩石试样的轴向由撞击面通过试样的前表面向试样的背表面运动。则锰铜应力计和分别记录得到岩石试样前后表面的撞击应力历史。这样,根据记录的撞击速度,锰铜应力计的应力幅值和2024A1的Hugoniot数据就可计算得花岗岩试样的Hugoniot状态方程上的一个状态点。通过一组不同速度的撞击试验,就可测定一组这样的状态点,从这些状态点拟合得花岗岩的Hugoniot状态方程。

试样组件中的2024A1保护环,是为了延迟侧边稀疏波到达岩石试样中心的时间,确保锰铜应力计在一维应变条件下完成整个测试过程。靶组件在组装前,飞板、盖板、背板以及花岗岩试样都要仔细地研磨和检测,确保各平面的平行度和平整度在可允许的误差范围之内。在2024A1盖板和背板与锰铜应力计之间各放置一层25 $\mu\text{m}$ 厚的Mylar膜,以确保良好的绝缘性能。

锰铜应力计是北京红星应变计厂生产的MBP50-6BD45型锰铜应力计,其敏感栅为直径6 mm的螺旋形栅,标称电阻50,基底材料是缩醛胶膜,应力计的整

体尺寸为 60 mm ×16 mm ×0.03 mm。测量应力范围是 0.05 ~ 20 GPa,其 值为

$$= 0.026 \text{ GPa}^{-1} \text{ (3 GPa 以下)}$$

$$= 0.0285 \text{ GPa}^{-1} \text{ (3 GPa 以上)}$$

图 2 是一个典型的由锰铜应力计记录的撞击应力历史波形。

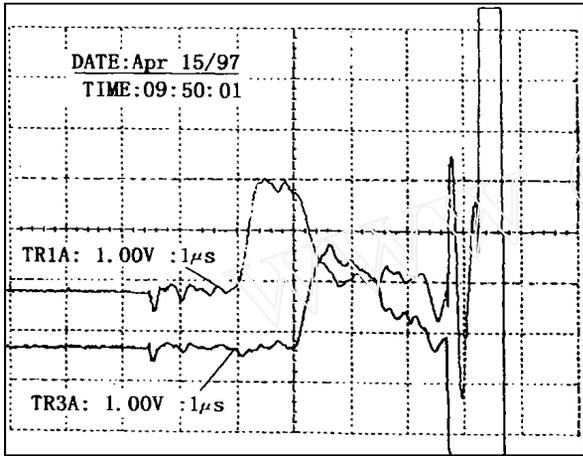


图 2 典型应力历史波形

Fig. 2 A typical stress history profile

### 4 实验结果

#### 4.1 Hugoniot 线性关系的测定

图 3 给出了两个典型的应力-时间图形。

绝大部分材料,在压力不太高的情况下,其激波速度  $U_s$  和质点速度  $u_p$  之间都有如下线性关系

$$U_s = C_0 + S u_p \tag{4}$$

式中  $C_0$  和  $S$  是两个材料常数。通过对花岗岩试样进行的 18 次撞击试验(有效次数),从实验中测量得的撞击速度  $V_i$ ,撞击压力  $P$  或岩石平均激波速度  $U_s$ ,就得到了一组花岗岩的  $U_s$  和  $u_p$  数据。本实验的撞击速度范围是 65 ~ 800 m/s,相应的撞击应力范围是 0.5 ~ 7 GPa。根据表 3 列出的实验结果,拟合得花岗岩的 Hugoniot 线性关系为

$$U_s = 5961 + 2.907 u_p \text{ (m/s)} \tag{5}$$

拟合回归系数  $r = 0.8935$ 。图 4 是花岗闪长岩的  $U_s - u_p$  关系曲线。

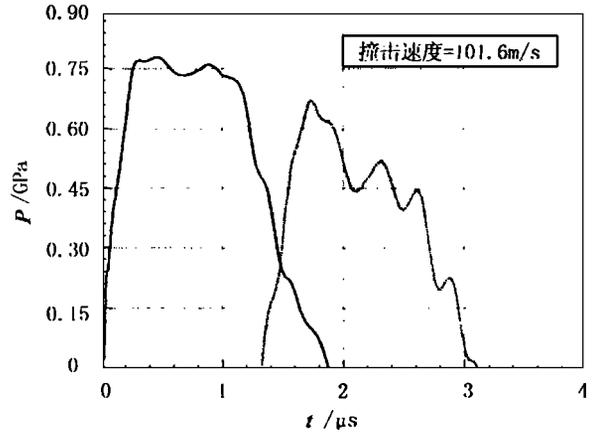
#### 4.2 Hugoniot 状态方程

根据表 3 列出的实验结果,用方程(1)和(2)可以得到 Bukit Timah 花岗岩的压力  $P$  和体应变  $\mu = 1 - V/V_0 = 1 - \rho/\rho_0$  的关系。表 3 中也列出了各实验点的  $\mu$  值。由实验值拟合得到的  $P - \mu$  多项式为

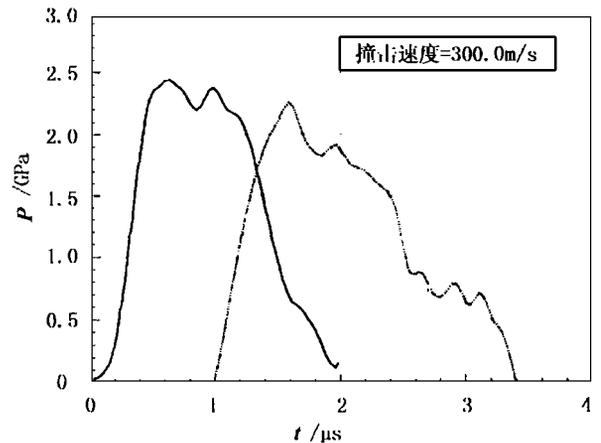
$$P = 95.0\mu + 613.3\mu^2 + 1249.4\mu^3 \tag{6}$$

式中 压力  $P$  的单位为 GPa。图 5 是 Bukit Timah 花岗

岩的  $P - \mu$  关系曲线。可以看出实验点的明显分散性,这是由于花岗岩是非均匀多相介质,且平均颗粒度亦较大所致。图 5 中的点划线是方程(6)的拟合曲线,实线是根据方程(1),(2)和(5)画出。两条曲线吻合很好。



(a) No. 97-30(1997. 04. 11)



(b) No. 97-32(1997. 04. 15)

图 3 典型应力-时间图形

Fig. 3 Typical stress-time profiles

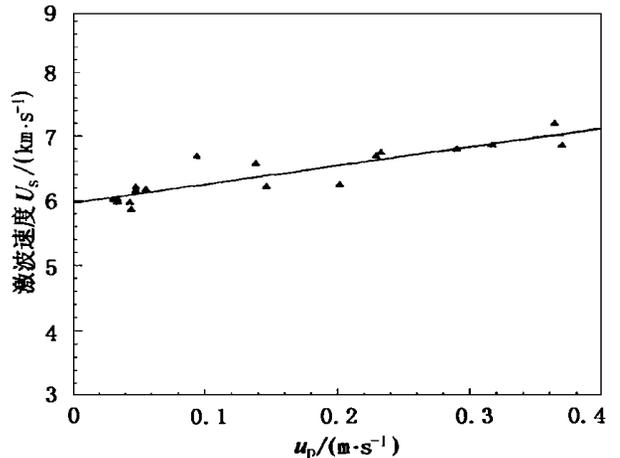


图 4 Bukit Timah 花岗岩的  $U_s - u_p$  关系

Fig. 4 Linear Hugoniot relation of the Bukit Timah granite

表3 试验结果

Table 3 Experimental results

实验号	撞击速度 / (m s <sup>-1</sup> )	试样厚度 / mm	激波走时 / μs	撞击应力 / MPa	激波速度 $U_s$ / (m s <sup>-1</sup> )	质点速度 $u_p$ / (m s <sup>-1</sup> )	$\mu = 1 - \frac{V}{V_0}$ / (×10 <sup>-4</sup> )
97 - 23	65.1	7.94	1.32	496	6 011	30.9	51.41
97 - 22	71.6	6.04	1.00	544	5 975	34.1	57.07
97 - 26	71.8	5.78	0.96	548	6 019	34.1	56.65
97 - 31	91.2	7.88	1.30	694	5 971	43.5	72.90
97 - 36	92.1	5.82	0.96	695	5 863	44.4	75.73
97 - 30	101.6	8.02	1.30	785	6 151	47.8	77.71
97 - 25	102.6	8.00	1.30	796	6 211	48.0	77.28
97 - 24	118.3	7.98	—	916	6 170	55.6	90.11
97 - 29	207.2	6.04	0.92	1 676	6 684	93.9	140.51
97 - 32	300.0	6.06	0.96	2 422	6 564	138.2	210.54
97 - 34	308.2	8.00	1.28	2 426	6 215	146.2	235.24
97 - 42	422.6	4.02	—	3 357	6 240	201.5	322.92
97 - 44	495.7	4.00	0.60	4 092	6 690	229.1	342.45
97 - 38	505.5	6.08	0.92	4 192	6 744	232.8	345.20
97 - 48	627.2	4.06	0.60	5 261	6 795	290.0	426.78
97 - 41	685.0	5.96	—	5 791	6 853	316.5	461.84
97 - 46	793.9	5.98	—	6 760	6 856	369.3	538.65
97 - 47	801.3	6.04	—	6 990	7 202	363.5	504.72

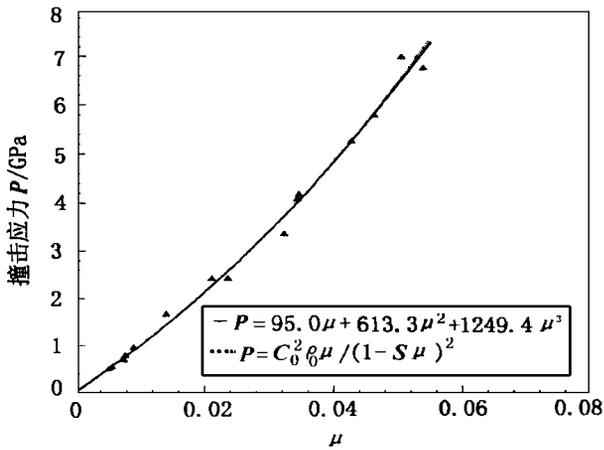


图5 Bukit Timah 花岗岩的  $P-\mu$  关系曲线

Fig.5 Curve of impact stress versus bulk strain for Bukit Timah granite

### 5 结 论

用轻气炮平板碰撞实验技术,对 Bukit Timah 花岗岩的 Hugoniot 状态方程进行了实验测定。撞击速度范围为 65 ~ 800 m/s,相应的撞击应力范围是 500 MPa ~ 7 GPa。得到 Bukit Timah 花岗岩激波速度  $U_s$  和质点速度  $u_p$  的 Hugoniot 线性方程为

$$U_s = 5961 + 2.907 u_p \quad (\text{m/s})$$

拟合得的 Bukit Timah 花岗岩的撞击应力  $P$  与体应变  $\mu = 1 - V/V_0 = 1 - \rho/\rho_0$  的二次多项式状态方程为

$$P = 95.0\mu + 613.3\mu^2 + 1249.4\mu^3 \quad (\text{GPa})$$

拟合得的 Bukit Timah 花岗岩的撞击应力  $P$  与体应变

$\mu = 1 - V/V_0 = 1 - \rho/\rho_0$  的二次多项式状态方程为

$$P = 95.0\mu + 613.3\mu^2 + 1249.4\mu^3 \quad (\text{GPa})$$

本工作得到白以龙院士的指点,参加实验工作的还有陈淑霞、邓雅莉、李中,岩相分析由北京大学地质系朱炜炯完成,在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- McQueen R G, Marsh S P, Taylor J W, et al. The equation of state of solid from shock wave studies. In: Kinslow ed. High Velocity Impact Phenomena. New York: Academic Press, 1970. 293 ~ 417
- Meyers M A, Murr L E. Essential equations on shock waves and how to obtain Rankine-Hugoniot plots for metals. In: Meyers M A, Murr L E eds. Shock Waves and High-strain-rate Phenomena in Metals. New York and London: Plenum press, 1981. 1042 ~ 1078
- Johnson J D, Bennett B. T-4 Handbook of material properties data bases Vol. 1c equation of state, Los Alamos National Laboratory, edited by Hilian KS, 1985
- Murri W J, Grady D E, Mahrer K D. Equation of State of Rocks (SRI Report). 1975
- Butcher B M, Stevens A L. Shock wave response of window rock coal. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1975(12): 147 ~ 155
- 信礼田, 颜潮兴. 砂岩冲击压缩和卸载特性. 岩土工程学报, 1987, 9(5): 57 ~ 66
- 赵士达, 沈乐天, 赵双录. 用于材料动态能实验的单级轻气炮. 兵工学报, 1985(4): 49 ~ 55