

粗粒花岗闪长岩中应力波的传播衰减规律

尚嘉兰 沈乐天

赵 坚

(中国科学院力学研究所 LNM 北京 100080) (新加坡南洋理工大学土工技术研究所 新加坡 639798)

摘要 利用轻气炮平板碰撞试验,对新加坡 Bukit Timah 花岗岩试样进行冲击压缩试验研究,根据实验数据研究了应力波的传播,用四次多项式表示了应力波峰值随传播距离的衰减规律,讨论了应力波峰值的衰减率 和不同应力范围的衰减指数。

关键词 花岗岩,平面应力波,衰减规律,衰减指数

分类号 TU459+.3

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2001)03-0212-04

1 引言

应力波的传播衰减规律是爆破工程、防护工程设计、地球物理勘探及地震研究等多方面的理论分析和工程应用的基本问题,为工程界和力学界共同关切。国内外曾对岩石和岩体中的应力波的传播和衰减作过不少工作。如文[1]曾进行大量岩石冲击试验,讨论应力波传播衰减规律。近年,文[2]在研究岩石冲击压缩之后,又扩展到脆性材料的冲击性能研究。前苏联曾进行了类似的工作,如文[3]给出了峰值压力与传播距离的关系。国内也在该领域作过不少努力,如中国科学院力学研究所郭汉彦、寇绍全、江瑜书等用数值模拟计算强爆炸远区的应力波衰减规律,文[4]进行了吨级爆炸试验,研究了应力波峰值的衰减系数。本文为了工程实际和理论研究的需要,对一种粗粒花岗闪长岩进行一维应变动态试验研究。根据实验数据探讨了应力波在该花岗岩中的传播和衰减规律,以及波形振荡的产生和规律、用四次多项式表示应力波峰值随传播距离的衰减规律,给出并讨论了应力波峰值的衰减率 和不同应力范围的衰减指数。

2 实验

试样为新加坡的 Bukit Timah 花岗岩,岩石矿物岩相分析表明,岩石为全晶质半自形粒状似斑状构

造花岗闪长岩。其中含量在 80% 以上的斜长石、钾长石、石英的粒径为 3~6 mm;含量约 10% 的黑云母粒径为 0.2 mm。花岗岩的主要物理力学参数列于表 1。

表 1 花岗闪长岩的主要物理力学参数

Table 1 The mechanical and physical parameters of Bukit Timah granite

/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	C		E / GPa	c / MPa	t / MPa
	/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$				
2 670	5.82	0.16	75.2	147.5	16.1

实验在中国科学院力学研究所 LNM 实验室一级轻气炮上进行。试件为一组直径为 52 mm,厚度分别为 2, 4, 6, 8 mm 的圆片(1~4 片)。圆片两面经研磨抛光,以保证其平行度、平整度和光洁度。岩石试样每片前后预埋锰铜压阻应力计(MBP50-6BD-45),用于记录受到冲击加载时试件中应力计所在位置的应力-时间历程。用与应力传感器和岩石试件阻抗匹配的环氧胶粘贴,胶层厚度 0.01 mm,对应力波的影响可以忽略。每次试验应力波传到最后一个传感器的时间加上波的持续时间均远小于边界稀疏波传到后一个传感器的时间,因而测量结果不会受边界稀疏波的干扰。实验的技术细节参阅文[5, 6]。

3 试验结果和初步分析

得到有效记录的试验共 25 次。其中测到 4 个应力

1999 年 8 月 12 日收到初稿,1999 年 10 月 20 日收到修改稿。

* 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项目。

作者 尚嘉兰 简介:女,62 岁,1963 年毕业于中国科学技术大学近代力学系爆炸力学专业,现任副研究员,主要从事爆炸力学和材料动态力学性能方面的研究工作。

表 2 Bukit Timah 花岗岩冲击压缩试验结果一览表
Table 2 The results of impact compressure test for Bukit Timah granite

实验 编号 No.	撞击速度 $V/m \cdot s^{-1}$	实测应力峰值 / MPa				应力峰值衰减率 $i_j = \frac{\sigma_i - \sigma_j}{\sigma_i}$ MPa/mm			实验 编号 No.	撞击速度 $V/m \cdot s^{-1}$	实测应力峰值 / MPa				应力峰值衰减率 $i_j = \frac{\sigma_i - \sigma_j}{\sigma_i}$ MPa/mm		
		1	2	3	4	12	23	34			1	2	3	4	12	23	34
60	36.7	167	89.2	88.6	80.8	19.0	0.64	1.44	49	77.9	1 008	959		942	23.9	3.94*	
62	37.9	185	87.3	79.4		23.9	1.91		29	207.2	156.6	1 353			34.9		
78	76.4	256	159	189	150	47.5	15.7*	9.71	81	503.0#	1 743	1 584	1 275	1 113	19.6	146.9	39.7
23	65.1	534	511			2.85			32	300.0	2 492	2 303			30.9		
69	103.9	565	380	353	335	46.3	6.72	4.35	80	342.2	3 189	2 830	2 566	2 472	150.5	122.2	34.4
52	157.8	551	444	420	410	49.3	11.0	4.46	86	422.7	3 722	3 018	2 552	2 435	80.4	137.5	20.6
22	71.6	599	506			14.8			38	505.5	4 157	3 816			55.3		
36	92.1	696	611			14.5			88	567.0	4 806	4 166	3 628	3 658	79.4	265.7	83.4*
31	91.2	710	609			12.7			82	516.5	5 025	3 303	4 123	3 596	216.0	89.3*	133.1
73	201.6	763	679	647	658	44.3	15.1	3.41*	48	627.4	5 261	4 690			137.4		
30	101.6	782		685		11.7*			84	742.9	5 307	5 505	4 911	4 020	39.6	270.4	215.7
25	102.6	858	724			16.6			89	797.3	6 598	6 022	6 287	5 255	72.8	30.6*	250.4
77	246.0#	1 043	811	653	583	103.3	77.5	17.3									

注：# 使用有机玻璃(PMMA)为飞板，其他实验均用 2024A1 飞板。

* i_{12} 为 1 ~ 2 的衰减率，* i_{23} 为 2 ~ 3 的衰减率，* i_{34} 为 3 ~ 4 的衰减率。

波形的 13 次；测到 3 个应力波形的 2 次；测到 2 个应力波形的 10 次。实验数据和结果列于表 2 中。

下面讨论所观测到的应力波在 Bukit Timah 花岗岩中传播的一些物理现象。

3.1 应力波波幅的衰减规律

由表 2 可以看到，每次实验的应力峰值随传播距离的增加而下降。每毫米传播距离的衰减率 $i_j = \frac{\sigma_i - \sigma_j}{\sigma_i}$ (MPa/mm)，随应力峰值的下降而下降。其中 $i_j = i - j$ ，为第 i, j 个应力计之间的距离，即试片厚度。用以下方法将所有测量得到的应力峰值和传播距离的关系绘于图 1 中。从所测得到的最高应力峰值 No. 89 的 $\sigma_1 = 6598$ MPa 为起点，用线性插值计算 No. 84 的 $\sigma_1 = 5307$ MPa 所在的位置，它距离起点应为 17.06 mm。依次类推，得到了所有测点与起点的距离。这样，便得到应力波峰值在该材料中的传播特性和衰减规律。

图 1 给出了应力波峰值随传播距离增加而衰减的规律，它可用四次多项式表示：

$$\sigma_m = A_0 + A_1 \bar{x} + A_2 \bar{x}^2 + A_3 \bar{x}^3 + A_4 \bar{x}^4 = \sum_{i=0}^4 A_i \bar{x}^i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

式中： $A_0 = 6830$ ， $A_1 = -92.1$ ， $A_2 = 0.282$ ， $A_3 = 8.05 \times 10^{-4}$ ， $A_4 = -3.70 \times 10^{-6}$ ，系数 A_i 的单位为 MPa； σ_m 为应力峰值； $\bar{x} = \frac{x}{x_0}$ 为应力波传播的相对距离，由于岩石粒径为毫米量级，取 x_0 为单位距离 (1 mm)， x 为到应力峰值 6598 MPa 处的距离。

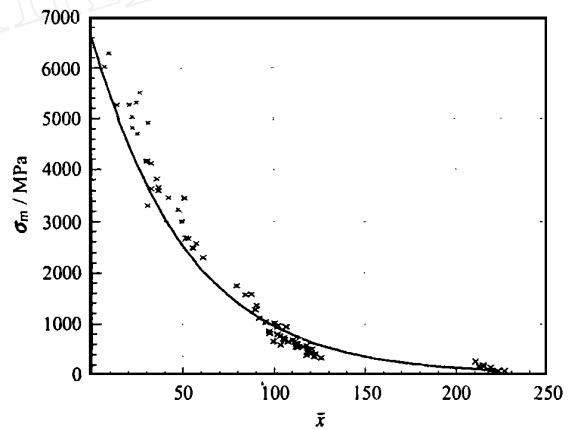


图 1 应力波峰值 σ_m 随传播距离 \bar{x} 而衰减

Fig. 1 The attenuation of stress peak σ_m with propagation distance \bar{x}

3.2 应力峰值的衰减率

表 1 的后三行列出应力峰值的衰减率，是应力波从第 i 个传感器传播到第 j 个传感器的过程中，每 1 mm 距离应力峰值的下降值。应力峰值的衰减率 i_j 由式(2)定义如下：

$$i_j = \frac{\sigma_i - \sigma_j}{\sigma_i} \quad (2)$$

式中： i_j 为第 i 个传感器到第 j 个传感器的距离 (mm)。图 2 给出了应力峰值与应力峰值衰减率的关系。虽然 i_j 数据较为分散，但随着应力峰值的上升，应力峰值衰减率 i_j 增加的趋势仍很明显。

3.3 应力峰值的衰减指数

通常在介质中的应力峰值随传播距离的变化可表述为

$$\sigma_m = \sigma_0 \bar{x}^{-\alpha} \quad (3)$$

式中： σ_0 为岩石中某一点的应力， \bar{x} 的定义与 3.1 相同。

平面应变状态下，应力峰值在线弹性体中的衰减指数 $\alpha = 0$ 。然而本试验得到的衰减指数 α 却是一个随着应力峰值降低(或传播距离增加)而变化的值。应力峰值与传播距离 \bar{x} 的变化大体上可分成三个阶段。图 3 给出分三个阶段拟合的衰减指数。当应力峰值 $\sigma_m = 6\ 800 \sim 2\ 250$ MPa 时， $\alpha = 0.516$ ；当应力峰值降低到 $\sigma_m = 1\ 742 \sim 335$ MPa 时， α 逐渐上升， $\alpha = 3.50$ ；当应力峰值 $\sigma_m = 226 \sim 70$ MPa 时，

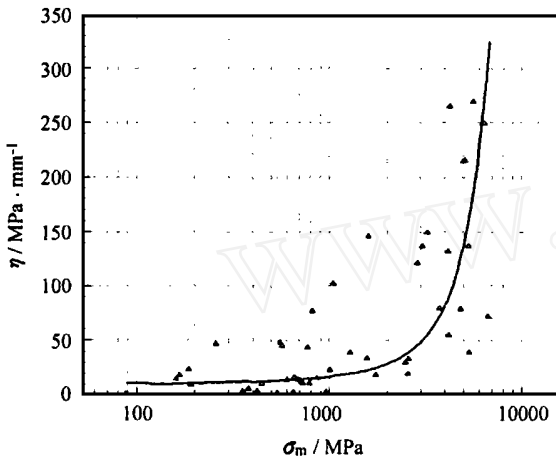


图 2 应力波峰值衰减率 η 随应力峰值 σ_m 的上升而增长
Fig. 2 The attenuation rate η of stress peak increases with raising of stress peak σ_m

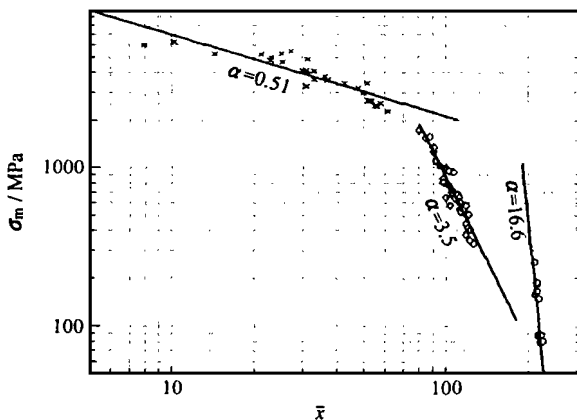


图 3 应力波峰值的衰减指数
Fig. 3 The attenuation law of stress wave peak in the granite and the attenuation index

逐渐上升， $\alpha = 16.6$ 。该种岩石一维应变条件下的 Hugoniot 弹性极限 $\sigma_H = 182$ MPa，因此可以认为上述第三阶段为弹性阶段。

上述变化的原因可能是，岩石是孔隙材料，在受压过程中经历弹性变形、微裂纹闭合、孔隙坍塌及碎裂错动等一系列压缩变形过程，使应力波能量大量消耗。应力波幅值随传播距离的增加而逐渐下降，在物理上是合理的。由于应力波衰减常取决于卸载波追赶从而吃掉峰值，而方波具有应力峰值平台，其应力峰值较无峰值平台的应力波衰减慢。本研究是将多次轻气炮试验的结果综合讨论，每次试验的入射波都是较规范的方波。其应力峰值的衰减规律必定有别于一个应力波在介质中远距离传播的情况。

4 结 论

综上所述，对平面应力波在新加坡 Tukit Timah 花岗岩中的传播规律有如下几点认识：

- (1) 平面应力峰值随传播距离而衰减，应力峰值 σ_m 可用传播距离 \bar{x} 的四次多项式表示。其应力幅值为 7.0 ~ 0.08 GPa。
- (2) 在传播过程中，随着应力峰值的下降，应力峰值的衰减率 η 也下降。
- (3) 应力峰值的衰减指数随应力峰值的降低而增大。在三个应力峰值 7.0 ~ 2.0, 1.8 ~ 0.33, 0.30 ~ 0.08 GPa 范围中有三个不同的衰减指数，即 $\alpha = 0.516, 3.50, 16.6$ 。

致谢 本工作由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。岩样由新加坡南洋理工大学岩土工程实验室提供。参加实验工作的还有陈淑霞、邓雅莉、和李中。本工作曾得到白以龙院士的关心和指导。曾与寇绍全教授进行过有益的讨论。在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Grine D R. Shock wave and the mechanical properties of solids[R]. Menlo Park, California: Stanford Research Institute, 1971
- 2 Dennis Grady. Shock-wave properties of brittle solids[R]. Sandia: Experimental Impact Physics Dept., Sandia National Lab., Technical Memorandum TMDG0695, 1995
- 3 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国译. 北京: 科学出版社, 1987, 183 ~ 235
- 4 陆遐龄. 岩体中爆炸应力波的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(4): 364 ~ 372
- 5 尚嘉兰, 沈乐天, 赵宇辉等. Bukit Timah 花岗岩动态本构关系的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 634 ~ 641

- 6 赵 坚, 赵宇辉, 尚嘉兰等. Bukit Timah 花岗岩的 Hugoniot 状态方程[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 315~318

ATTENUATION LAW OF STRESS WAVE IN THE BUKIT TIMAH GRANITE

Shang Jialan¹, Shen Letian¹, Zhao Jian²

(¹ LNM Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

(² School of Civil and Structural Engineering, Nanyang Technological University, 639798 Singapore)

Abstract The impact compressional tests of Bukit Timah granite of Singapore were conducted using a light gas gun. The plane stress waves were observed in the sample and polynomial equation representing propagation and attenuation law under the state of one-dimensional strain in the granite is obtained by regression of the experimental data. The attenuation rate of stress peak is discussed and the attenuation indexes within different stress range are given.

Key words granite, plane stress wave, attenuation law, attenuation index

书 评

李树刚著《综放开采围岩活动及瓦斯运移》 2000 年中国矿业大学出版社出版

由西安科技学院李树刚博士所著的《综放开采围岩活动及瓦斯运移》一书,理论联系实际,并开创了治理、开发矿井瓦斯的新思路,是一本值得一读的好书。该书的创造性表现在:

(1) 指出当采场上覆关键层作“O-X”型板块破断时,在其交点处形成导气通道,使离层裂隙中聚集的瓦斯通过“O-X”破断裂隙挤入采场,说明综放面瓦斯大量快速涌出是矿山压力的一种显现。

(2) 综放面上方覆岩采动裂隙呈椭圆抛物带分布,当主关键层切割椭抛带时呈椭球台状,层面仍展布椭圆型圈裂隙区域。此裂隙带的发生、发展受关键层层位及其形成砌体梁结构的变形、破断和失稳形态的制约。

(3) 综放开采时在覆岩采动裂隙带内卸压瓦斯涌出具有升浮和扩散两种运移方式。若煤层的渗透系数很低,则在椭抛带内卸压瓦斯的渗流速度及瓦斯涌出量将随采动而剧增,为瓦斯抽排提供便利。

(4) 探讨了综放开采覆岩关键层下支承压力的分布及变化,首次进行了全应力应变过程数控的渗透系数变化的试验,分析了支承压力的作用下煤体渗透特性变化规律及煤体瓦斯运移的力学特征。

(5) 根据研究取得的理论成果,总结并提出富含瓦斯厚煤层综放开采时,以矿压监测为主的连续危险源非接触式预测方法,以及煤与瓦斯安全共采的技术途径。

时值国家能源建设重点西移、大力开发清洁能源之际,作为矿山四大灾害之一的瓦斯,若能变害为宝,实现煤与瓦斯资源共采,其社会、经济效益无疑将十分显著。本书的发行,将为改善环境污染、探索开发新能源、实现煤炭工业可持续发展作出重要贡献。

中国矿业大学教授

李鸿昌

2000 年 11 月 7