

文章编号:1673-0062(2009)02-0010-04

## 岩石动力学参数的随机性研究

单仁亮,耿慧辉,孔祥松

(中国矿业大学 力学与建筑工程学院,北京 100083)

**摘要:**通过单轴 SHPB 实验,对大量花岗岩和大理岩试样的动态抗压强度、纵波波速进行了测试,对实验数据的计算表明:抗压强度的离散性较小,偏离系数只有 20% 左右,纵波波速和动弹性模量的离散性较大,达到了 40% 以上。

**关键词:**花岗岩;大理岩;动态抗压强度;纵波速度;随机性

**中图分类号:**TD235 **文献标识码:**A

## Study on Randomicity of Rock Dynamic Parameter

SHAN Ren-liang, GENG Hui-hui, KONG Xiang-song

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on uniaxial SHPB experiment, the dynamic compressive strength and longitudinal wave speed were obtained for a large number of granite and marble samples. Calculation of experimental data exhibits only about 20% of deviation coefficient for the compressive strength and more than 40% for longitudinal wave speed and dynamic elastic modulus.

**Key words:** granite; marble; dynamic compressive strength; longitudinal wave speed; randomicity

### 0 引言

关于岩石组构和静态强度的随机性研究报道最近几年较多<sup>[1-2]</sup>,关于岩石动态力学参数的随机性研究报道较少。

岩石动载破裂特性早在上世纪 60 年代就有人开始研究,70 年代之后成为岩石动力学中的一个热点,至今这方面的文献有增不减。进入新世纪

的短短几年中,我国在岩石动力学参数的测试、理论分析等方面取得了显著进展:在 SHPB 实验技术方面,中国科大胡时胜等研究的预留间隙法<sup>[3]</sup>撤开了入射应力波不稳定的上升阶段,增加万向头方法<sup>[4]</sup>确保了试件和杆件的全面接触,它们对岩石等脆性材料的本构关系的测试具有重大意义,国防科大的卢芳云等<sup>[5]</sup>使用的波形整形方法对消除高频振荡、延长入射波的上升沿具有明显

收稿日期:2008-12-26

基金项目:高等学校博士学科点专项研究基金资助项目(20050290004)

作者简介:单仁亮(1964-),男,江苏大丰人,中国矿业大学力学与建筑工程学院教授,博士。主要研究方向:岩土工程。

效果. 岩石动态力学参数的应变率效应物理机制研究有了进一步的提高, 戚承志, 钱七虎认为<sup>[6]</sup>岩石等脆性材料动力强度的应变率依赖性热活化机制和宏观粘性机制并行存在、相互竞争的结果, 他们先前还将时效性成功的用于了剥落破坏的分析<sup>[7]</sup>; 李海波等研究认为裂纹的扩展速率和岩石断裂韧度的率相关特性, 导致了岩石的动态抗压强度随应变率的增加而增加<sup>[8]</sup>, 他们还应用滑移型裂纹模型, 根据裂纹扩展过程中的能量平衡原理建立了花岗岩的动态本构模型<sup>[9]</sup>. 可见, 人们对岩石的冲击(爆破)破碎已经有了比较广泛而深入的研究. 但是, 岩石冲击破碎中的随机性问题尚未得到应有的重视, 直接相关的文献相当少见, 一般只是将岩石/体看成包含若干随机分布的微裂纹, 也就是用分形理论或损伤力学的方法

来研究岩石的动载效应<sup>[10-13]</sup>. 令人欣慰的是, Sang Ho Cho 等最近的研究表明岩石材料的不均匀性对岩石动态抗拉强度的应变率依赖性有重要影响<sup>[14]</sup>.

## 1 实验方法简介

### 1.1 实验系统

实验系统以 SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar) 装置为核心, 包括: 使撞击杆加速运动的氮气瓶和弹膛组成的动力系统; 由撞击杆、岩石试样以及与试件两端紧密接触的入射杆和透射杆组成的载荷产生与传递系统; 由聚光灯泡, 光电管, 放大器, 计数器组成的测速系统; 由应变片, 超动态应变仪, CS2092 动态测试分析仪组成的应变测量系统. 如图 1 所示.

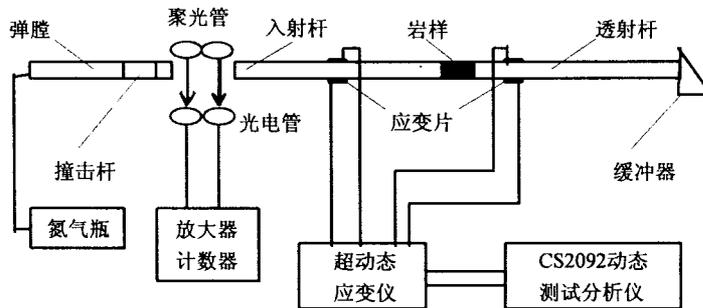


图 1 单轴 SHPB 测试系统

Fig. 1 Experimental system of uniaxial SHPB

载荷产生与传递系统的所有杆件直径均为 30 mm, 但撞击杆长 266 mm, 入射杆长 790 mm, 透射杆长 595 mm.

实验采用了大理岩和花岗岩两种岩石, 它们

基本的物理力学参数平均值见表 1, 岩样的直径  $D$  均为 30 mm, 长径比 ( $L:D$ ) 有三种, 其中每种岩石长径比为 1 的试样 50 个, 长径比为 1.5 的试样 40 个, 长径比为 2 的试样 10 个.

表 1 实验岩石的基本物理力学参数

Table.1 Basic physical and mechanical parameters of experimental rock

岩石名称	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	声波波速 $V_p / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	动弹性模量 $E_d / 10^4 \cdot \text{MPa}$	单轴抗压强度 $\sigma / \text{MPa}$	单轴抗拉强度 $\sigma_t / \text{MPa}$	弹性模量 $E_s / 10^4 \cdot \text{MPa}$	泊松比 $\mu$
大理岩	2.68	5 758	8.9	41	4.4	5.78	0.20
花岗岩	2.74	3 864	4.1	165	7.8	6.80	0.25

应变测量系统先由应变片和超动态应变仪将应变信号转变为电信号, 再由 CS2092 动态测试分析仪将电信号转变为离散信号存储起来, 留待测试完毕后统一进行分析和处理.

### 1.2 实验原理

由氮气瓶提供的高压气体在弹膛迅速膨胀, 推动撞击杆加速运动并以一定的速度撞击入射

杆, 在入射杆中产生右传的入射波  $\varepsilon_1$ , 当  $\varepsilon_1$  传至 1-1 界面时, 一部分反射回入射杆, 产生反射波  $\varepsilon_R$ , 另一部分通过试件传给透射杆, 产生透射波  $\varepsilon_T$ , 如图 2 所示. 根据波传播理论和均匀化假设, 应用实际量测的入射波、反射波和透射波波形, 利用以下三式可以确定岩样的应力  $\sigma$ 、应变  $\varepsilon$  和应变率  $\dot{\varepsilon}$ .

$$\sigma = \frac{A_0}{A} E_0 \varepsilon_T \quad (1)$$

$$\varepsilon = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_R dt' \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R \quad (3)$$

以上各式中: $A_0$ 、 $E_0$ 、 $C_0$  分别为入射杆和透射杆的横截面积,弹性模量,纵波速度; $A$ 、 $L$  分别为岩石试件的横截面积和长度.

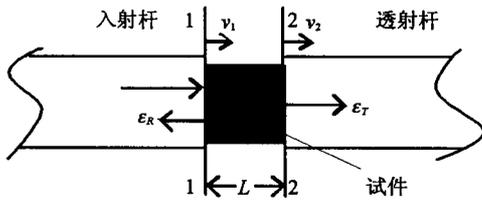


图2 SHPB 实验原理图  
Fig.2 The principal chart of SHPB test

数为 43%;大理岩的冲击强度的均值为 118.98 MPa,方差为 25.00 MPa,偏离系数为 21%,纵波速度的均值为 3230.86 m/s,方差为 1 311.04 m/s,偏离系数为 41%,弹性模量的均值为  $3.18 \times 10^4$  MPa,方差为  $2.04 \times 10^4$  MPa,偏离系数为 64%.

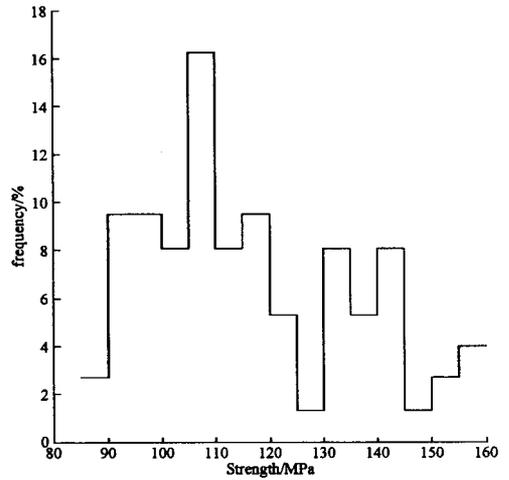


图4 大理岩强度分布  
Fig.4 Distribution of marble compression strengths

## 2 实验结果与分析

图3~图8分别给出了试验花岗岩和大理岩的强度频率分布,纵波速度频率分布以及弹性模量的频率分布.

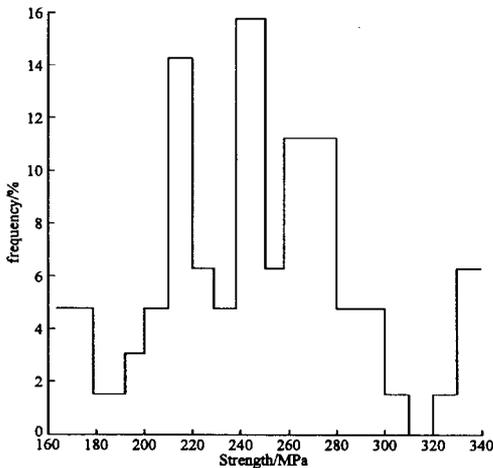


图3 花岗岩强度分布  
Fig.3 Distribution of granite compression strengths

经过计算得到花岗岩的冲击强度的均值为 251.12 MPa,方差为 50.44 MPa,偏离系数为 20%,纵波速度的均值为 3 329.95 m/s,方差为 1 444.35 m/s,偏离系数为 43%,弹性模量的均值为  $4.51 \times 10^4$  MPa,方差为  $1.94 \times 10^4$  MPa,偏离系

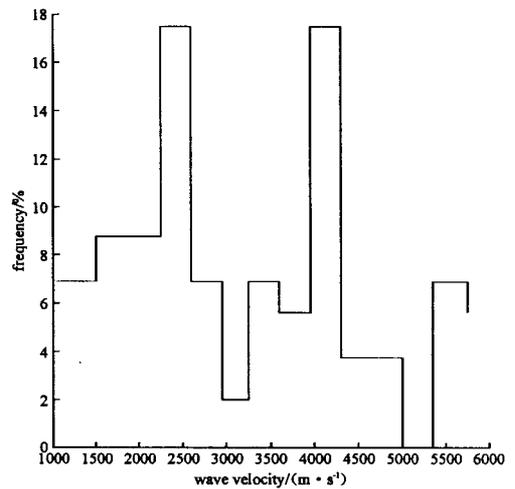


图5 花岗岩纵波速度分布  
Fig.5 Distribution of longitudinal wave speed of granite samples

可以看出:岩石的动态强度和纵波速度的分布并不遵循某一规律,弹性模量的分布却表现出一定的规律性,花岗岩的弹模比较接近均匀分布,大理岩的弹模分布比较接近威布尔(Weibull)分布.但是它们的数字特征表明,强度分布比较集中,偏差较小,而纵波波速和弹性模量的随机性较

大, 偏离系数较大.

上面只是分析给出了岩石的冲击强度, 纵波波速以及弹性模量的随机分布特性. 其实正如第三章所讲, 岩石的峰后随机性最为强烈, 研究和刻画岩石峰后的随机性具有重要的理论意义和应用价值, 本论文由于时间所限, 未作这方面的研究.

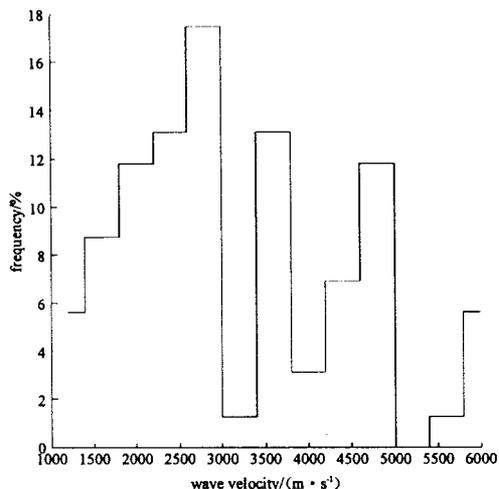


图 6 大理岩纵波速度分布

Fig. 6 Distribution of longitudinal wave speed of marble samples

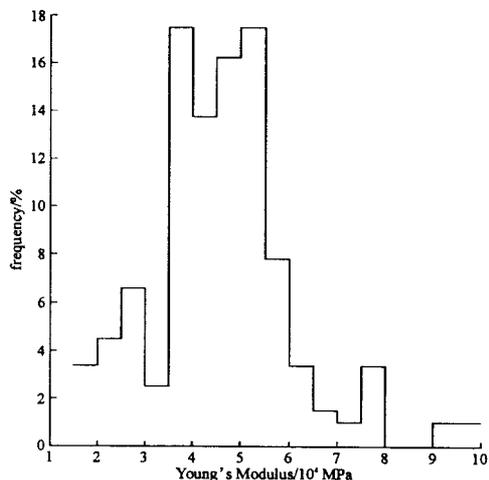


图 7 花岗岩弹性模量分布

Fig. 7 Distribution of dynamic elastic moduli of granite samples

### 3 结论

对花岗岩和大理岩单轴 SHPB 实验所得的冲击抗压强度、纵波波速的随机分布计算表明: 抗压强度的离散性较小, 偏离系数只有 20% 左右, 纵波波速和动弹性模量的离散性较大, 达到了 40% 以上.

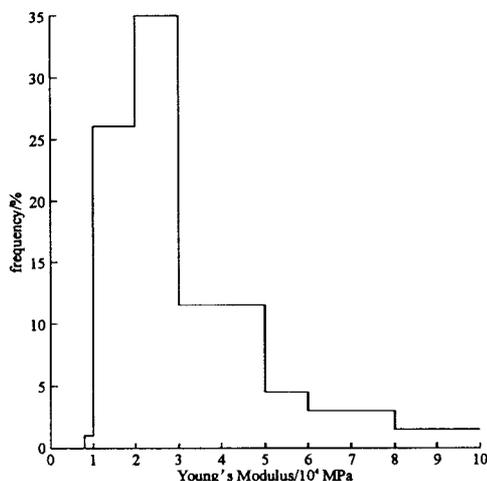


图 8 大理岩弹性模量分布

Fig. 8 Distribution of dynamic elastic moduli of marble samples

### 参考文献:

- [1] 陈剑平. 岩体随机不连续面三维网络数值模拟技术[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 397-402.
- [2] 王 鹏, 李安贵, 蔡美峰, 等. 基于随机-模糊理论的岩石抗剪强度参数的确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 547-552.
- [3] 刘剑飞, 胡时胜, 王道荣. 用于脆性材料的 Hopkinson 压杆动态实验新方法[J]. 实验力学, 2001, 16(3): 283-290.
- [4] 孟益平, 胡时胜. 混凝土材料冲击压缩试验中的一些问题[J]. 实验力学, 2003, 18(1): 108-112.
- [5] 卢芳云, Chen W, Frew D J. 软材料的 SHPB 设计[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(1): 15-19.
- [6] 戚承志, 钱七虎. 岩石等脆性材料动力强度依赖应变率的物理机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 177-181.
- [7] 戚承志, 钱七虎. 考虑到时效的一维剥离破坏及损伤破坏机理[J]. 解放军理工大学学报, 2000, 1(5): 1-6.
- [8] 李海波, 赵 坚, 李廷芥. 滑移型裂纹模型在研究岩石动态单轴抗压强度中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 315-319.
- [9] 李海波, 赵 坚, 李俊如, 等. 基于裂纹扩展能量平衡花岗岩动态本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1683-1688.
- [10] 张 奇. 岩石爆破作用的分形研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 8-13.
- [11] 戴 俊, 杨永琦, 罗艾民. 周边爆破对围岩损伤的分形研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 265-269.
- [12] 刘 慧, 冯叔瑜. 炸药单耗对爆破块度影响的理论探讨[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(4): 359-362.
- [13] 杨小林, 王树仁. 岩石爆破损伤及数值模拟[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 19-23.
- [14] Sang Ho Chao, Yuji Ogata, Katsuhiko Kaneko. Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 40(5): 763-777.