

$10^1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 应变率下花岗岩动态性能试验研究

张 华¹, 陆 峰²

(1. 河海大学 土木工程学院, 南京 210098; 2. 浙江省建筑设计研究院, 杭州 310006)

摘 要: 采用分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 上对花岗岩进行了 $10^1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 应变率段的动态压缩试验。试验主要做了以下3点改进: (1) 采用大直径变截面锥杆, 并严格限制试件长径比; (2) 选用退火紫铜片和药用胶布作为脉冲整形器; (3) 在入射杆与试件接触端面加设万向头。此外, 通过高一低应变率重复加载试验得到了花岗岩材料在变速重复冲击下特有的力学性能。结论表明, 在此应变率段花岗岩材料具有明显的应变率硬化效应, 峰值应力前应力-应变曲线的跃进特性。

关 键 词: 花岗岩; 分离式 Hopkinson 压杆; 应变率效应; 硬化效应

中图分类号: TU 458^{+.3}

文献标识码: A

Test research on dynamic properties of granite under strain rate from 10^1 to 10^2 s^{-1}

ZHANG Hua¹, LU Feng²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Zhejiang Provincial Architectural Design and Research Institute, Hangzhou 310006, China)

Abstract: The dynamic characteristics test on granite under impact loading of strain rate between 10^1 to 10^2 s^{-1} is carried out by split Hopkinson pressure bar (SHPB). Three improvements of SHPB are operated: (1) using large-size Hopkinson pressure bar with variable cross-section and strict slenderness ratio to specimen; (2) using impulse shaper which is made of medicinal adhesive and annealed red copper; (3) setting up universal joint between incident bar and specimen. And the dynamic characteristics of granite under repeated impact are obtained by carrying out varying speed loading test. The results show that the granite has strain rate effect, hardening effect and jumping behaviors of stress-strain curve.

Key words: granite; split Hopkinson pressure bar; strain rate effect; hardening effect

1 引 言

随着对冲击爆破的研究越来越深入, 工程材料在动态作用下的力学响应问题, 如混凝土、砂浆、岩石等工程常用材料在中高应变率下的动态力学性能逐渐受到工程界的重视。分离式 Hopkinson (SHPB) 压杆装置是研究材料动态力学性能的常用设备, 利用该设备对岩石材料研究主要集中在中应变率段 ($10^0 \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$) 和高应变率段 ($10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$), 往往高应变率段的研究较多^[1-4], 但对于中应变率段, 特别是从中应变率向高应变率过度的应变率范围 ($10^1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$) 段的岩石材料力学性能的研究却鲜见文献。

利用 SHPB 研究一般材料的动力性能时, 数据误差对试验的影响往往不大, 但对于像岩石等破坏应变只有千分之几的脆性材料, 由于压杆横向惯性效应引起的加载波弥散振荡和加载波上升沿时小等原因, 试验数据会产生较大误差, 严重影响了试验的精确性。文献[5]用 Fourier 分析法对弥散带来的误差进行了修正, 文献[6]讨论了 Hopkinson 压杆对小应变材料的数据处理方法, 其处理过程都相当复杂, 较难推广应用。国内也有对岩石这类脆性材料实施动态压缩试验^[2], 但未考虑加载波的上升沿时对试验精度产生的影响。文献[3]用预留间隙法有效地去除了加载波初始段的上升沿及弥散振荡对试验精度的影响, 获得了较为理想的结果, 但是, 这种

方法使初始上升沿时间变为了 0, 使岩石试件各截面在均匀受力前便达到应力峰值而发生破坏, 这样就无法满足试件中的应力均匀分布的假定。本文将改进常规试验方法, 利用波形整形器法研究花岗岩材料在 $10^1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的力学性能。

2 试验原理及改进

根据一维应力波理论, SHPB 装置的输入杆被子弹撞击后将产生矩形加载波, 但实际所测得的波形带有明显的振荡, 波头具有上升前沿, 这是由于压杆的横向惯性效应, 使得矩形加载波在杆中弥散传播造成的 (另外撞击杆和输入杆撞击面不平行也会影响加载波上升沿的陡峭程度), 并且这种影响随传播距离的增大而增大^[7]。对于一般材料可以这种影响借助数学工具光滑掉, 只会影响试验结果曲线的初始部分的精度。然而, 花岗岩材料的破坏应变很小, 仅千分之几, 因此其高应变率试验时试件达到破坏的历时将非常短, 与加载波的上升沿历时相当, 使得用 SHPB 压杆对其实施较高应变率变得很困难。目前可以通过波形整形的方法来解决这一问题^[8]。将一片很薄的圆片状材料贴放在入射杆的撞击端, 试验时这片材料首先受到子弹的撞击而屈服, 从而软化了撞击。这种软化可以增加脉冲的上升时间, 使入射波平滑化以尽量消除入射波的高频振荡, 以减小横向惯性效应。本文试验采用退火紫铜片及药用胶布作为整形材料。

3 对花岗岩的改进冲击试验

3.1 试验方案

本次试验采用 $\phi 50 \text{ mm}$ 的变截面杆, 对花岗岩进行不同应变率下的动态压缩试验, 试验共做 6 组 (其中包括 1 组重复冲击试验), 每组各做 5 个试件, 分别在 4 种气压下冲击。通过调整波形整形器、触发压力可以调节试验应变率。动态压缩试验的控制参数见表 1, 表中的铜片整形器为圆形 (直径×厚度)。

表 1 花岗岩冲击试验的控制参数

Table 1 Controlling parameter of granite impact test

试件尺寸 /(mm×mm)	气压 /MPa	速度 /(m/s)	SHAPER /(mm×mm)	应变率 /(s ⁻¹)
3×24	0.1、0.15、 0.2、0.3	7.5、10、 13、16	5 层药用胶布; 铜片 (13×0.5)	10~120

重复冲击试验加载气压分别为 0.1、0.2 MPa 和 0.3 MPa, 整形器采用铜片 (直径×厚度为 13 mm×0.5 mm)。

3.2 试验结果及分析

图 1 给出了高速 (0.3 MPa 气压, 铜片整形) 冲击下的 SHPB 应变波形曲线。图 2 为低速 (0.1 MPa 气压, 铜片整形) 冲击下的 SHPB 应变波形曲线。

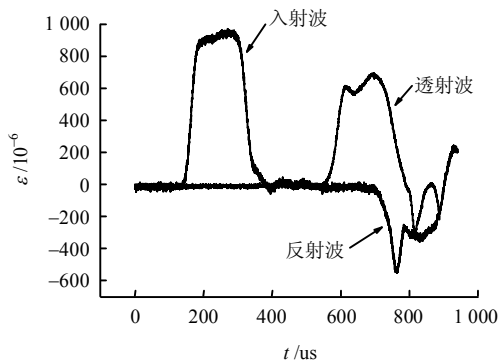


图 1 高速冲击试验测得的花岗岩波形曲线

Fig.1 Granite waveform measured in the high speed impact test

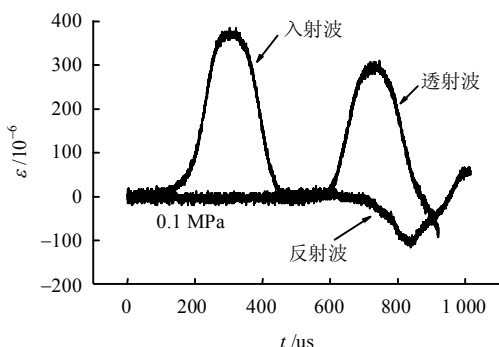


图 2 低速冲击试验测得的花岗岩波形曲线

Fig.2 Granite waveform measured in the low speed impact test

通过加设不同的整形器, 可以得到理想的加载波形, 但是, 花岗岩的材料特点和加载速度的大小决定了同种岩石的反射波和透射波具有不同的形态。通过试验发现, 加载速度大的试验波形常如图 1 所示, 反射波一般是先拉后压, 破碎试样一般会产生“W”形的拉应变反射波, 其中的两个波谷特别是第 2 个波谷的深浅能够较好地反映破碎的严重程度, 第 2 波谷越深, 破碎得越严重。加载速度不大的试验波形常见图 2, 反射波成倒三角 (大部分为拉应变), 试件只产生几条微裂缝。低速冲击下透射波与入射波形较为一致, 在到达极值之后很

快就会立即沿一条直线衰减。而高速冲击下的试件, 透射波往往在上升阶段有一个较小的突降然后再升高的过程, 说明岩石试件先发生了微破碎, 当到达峰值后发生了较严重的破碎。图 3 为了经过低速冲击 (0.1 MPa 气压, 铜片整形) 的试件, 在高气压下第 3 次加载 (0.3 MPa 气压, 铜片整形) 的 SHPB 应变-波形曲线。由图可以看出, 反射波第 2 个波谷深度非常大, 试件破坏很严重; 透射波的应变幅值小于图 1 透射波的幅值, 也大于图 2 透射波的幅值, 说明低速冲击过的试件在高速冲击下还能承担较多的应力。在透射波峰值之后, 下降段呈现阶梯形下降, 与图 1、2 有所不同, 这一现象有待进一步研究。

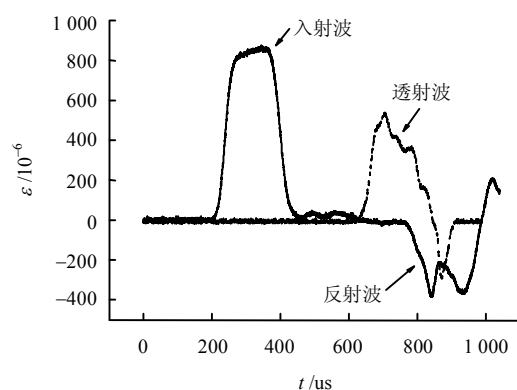


图 3 变速重复冲击试验测得的花岗岩波形曲线
Fig.3 Granite waveform measured in the varying repeated impact test

图 4 为不同应变率下花岗岩试件的应力-应变曲线, 图 5 为经低速冲击 (0.1 MPa 气压) 后试件在高速冲击下 (0.2 MPa 和 0.3 MPa 气压) 重复加载两次得到的花岗岩重复冲击应力-应变曲线。

在本试验应变率范围 (冲击速度 7.3~16.2 m/s, 应变率 $27 \sim 120 \text{ s}^{-1}$) 内, 花岗岩的应力-应变曲线 (图 4) 在峰值应力前大多具有跃进特性, 上升到第 1 个峰值后, 随着应变的增加应力往往先降低至极小值, 然后再升高至最大值。在第一极大值之后, 特别是在峰值应力之后, 应力-应变曲线与加载速度和试件的破坏程度密切相关, 其形态有较大的差异。当冲击速度较低时, 应力-应变曲线在峰后很快的卸载, 此时撞击后的试件仍然保持完整仅出现几条可见微裂缝; 当冲击速度很高时, 应力-应变曲线在峰值后应力不再增加而变形持续增加, 甚至应力持续一段恒定, 应变仍然在增加。应变增加到一定程度也有相应减小, 此时撞击后的试件周边已经完全破

碎, 岩芯位置开始碎裂但还保持完整, 具有一定的抵抗力, 说明试件在变形后期仍具有一定的硬化效应。应变率在 11 s^{-1} 的曲线表现出线弹性上升, 并直接到达峰值, 之后立即卸载, 这与其他曲线有所不同。

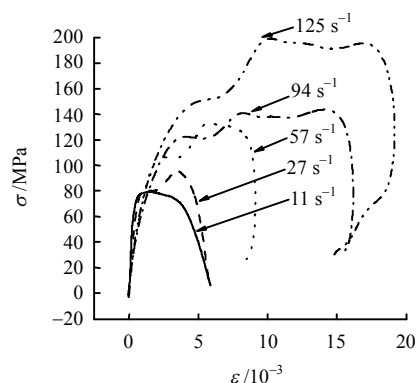


图 4 花岗岩应力-应变曲线
Fig.4 Stress-strain curve of granite

通过不同应变率下应力-应变曲线的比较, 发现花岗岩材料强度具有明显的应变率效应。关于破坏强度应变率效应目前尚没有比较合理的解释。有的学者认为, 这是材料由一维的应力状态向一维的应变状态转换过程中的力学响应^[9]; 又有学者提出应变率效应并非仅仅由于应力状态的转变产生的, 从能量方面考虑^[10-11], 岩石破坏需要大量的能量, 高应变率加载状态下能量的增加只能够通过增加应力的方法达到, 从而导致随着应变率的增加, 强度随之增长, 试件破碎得越彻底。

从图 5 高应变率曲线可以看出: 变速重复加载的花岗岩, 从开始加载到出现峰值应力, 不具有跃进特性, 前半段类似于低应变率加载情况 (如 11 s^{-1} 曲线), 但应力峰值仍然很高, 抗力并不低于完整试件, 这与花岗岩材料组成物质有关。花岗岩是由较硬的石英和较软的云母等颗粒组成的混合物, 低速撞击使较软颗粒发生塑性变形, 内部颗粒间的裂纹逐渐压实, 虽然外表面在低速加载后出现了几条微裂缝, 但整体上岩石的质量得到了改善, 抗力得到了提高。后半段卸载曲线显现出不同程度的波动, 随着应变的增加应力出现第 2 个峰值, 说明试件在达到破坏应力之后还具有一定的抗力, 材料内部的破坏并非崩溃性的, 类似于一个先破碎后挤紧再破碎的过程。这一现象在一次单独加载的试验中也有显现, 但现象没有图 5 那么明显。具体的原因还需进一步的细观研究。

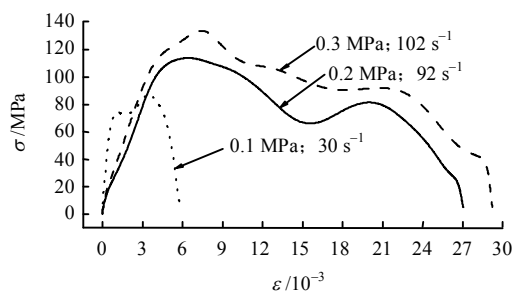


图5 变速重复试验得到的花岗岩应力-应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves of granite obtained by varying repeated impact test

比较图4和图5曲线可以发现,在不同应变率下花岗岩的弹性模量将发生不同的变化,图4中应力-应变曲线第1个峰值前曲线大多近似为直线,说明在这一阶段花岗岩具有较好的线弹性,其弹性模量 E (斜率)一般在40~100 GPa,但比较 11 s^{-1} 和 27 s^{-1} 两条曲线发现,花岗岩的弹性模量减小近1/3,这与通常认为材料弹性模量随应变率提高而提高的规律相反,但 27 s^{-1} 之后的几条曲线的弹性模量仍随应变率增大不断增大。比较图5中的3条曲线也可以看出,花岗岩在低速冲击一次后弹性模量先急剧减小而后又增大,本文认为弹性模量的这一现象主要是受到SHPB试验精度的影响,脆性材料破坏应变仅为千分之几,在较短的加载时间里,应力-应变初始阶段应力波还未能能在试件中反射多次,试件内应力还未能达到均匀,所以,利用应力-应变曲线的初始段确定材料动态弹性模量时还需考虑试验误差。

4 结 论

(1) 本文采用的波形整形器法。通过改变加载波形,减少了波形弥散带来的误差,延长了应力加载时间,让弹性波在试件中有充分时间来回反射,使应力在试件破坏前达到均匀,保证了试验的准确性。

(2) 应变率在 $10^1\sim 10^2\text{ s}^{-1}$ 范围内花岗岩的应力-应变曲线在峰值应力前大多具有跃进特性,同时表现出明显的强度硬化效应(这一原因可以从能量角度加以分析)。

(3) 在本试验应变率段内花岗岩的弹性模量发生先骤减后随应变率增大逐渐增大的现象,考虑到SHPB试验精度的影响,利用应力-应变曲线的初

始段来确定材料弹性模量还需考虑试验误差。

(4) 在变速重复加载下,花岗岩试件表现出明显的硬化现象和卸载段跳跃现象,这与花岗岩材料组成物质有关,具体原因还需进一步从细观角度加以研究分析。

参 考 文 献

- [1] 信礼田. 强冲击载荷下岩石的力学性质[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 61—68.
- [2] 于亚伦, 金科学. 高应变率下的矿岩特性研究[J]. 爆炸与冲击, 1990, 10(3): 266—271.
- [3] 刘建飞, 胡时胜, 胡元育, 等. 花岗岩材料的动态压缩试验和力学性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 618—621.
- [4] 李刚, 陈正汉, 谢云, 等. 高应变率条件下三峡工程花岗岩动力特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1833—1840.
- [5] FOLLANSBEE P S, FRANTZ C. Wave propagation in the split Hopkinson pressure bar[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1983, 105(1): 61—66.
- [6] ZHAO Han, Gary Gerard. On the use of SHPB techniques to determine the dynamic behavior of materials in the range of small strains[J]. *Int. J. Solids Structures*, 1996, 33(23): 3363—3375.
- [7] 王礼立, 王永刚. 应力波在用 SHPB 研究材料动态本构特性中的重要作用[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(1): 17—25.
- [8] 宋博, 姜锡权. 霍普金森压杆试验中的脉冲整形技术[C]//第三届爆炸力学试验技术学术会议论文集. 合肥: [s.n.], 2004: 74—144.
- [9] BRACE W F, JONES A H. Comparison of uniaxial deformation in shock and static loading of three rocks[J]. *Geophysics Research*, 1971, 76(20): 4913—4921.
- [10] 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, 21(2): 177—181.
- [11] LI Q M, MENG H. About the dynamic strength enhancement of concrete-like materials in split Hopkinson pressure bar test[J]. *Int. J. Solids Struct*, 2003, 40: 343—60.