

应变率对岩石强度和变形性质的影响

冯遗兴 邱一平 李彰明*

(中国科学院武汉岩土力学研究所)

提 要

本文根据晶屑凝灰岩、石英砂岩、粉砂岩等在不同应变率下的压缩或拉伸试验结果,并结合国外的大量试验资料,得出岩石破坏强度发生显著变化的应变率范围 ϵ_d ;应变率小于 ϵ_d 时,随着应变率的变化,岩石强度无明显变化;应变率达到或超过 ϵ_d 时,岩石强度就有显著增长,对此用破裂传播速度作了理论分析和解释。另外根据岩石破坏前变形随应变率增大或减小的现象,提出了不同岩石具有不同的临界应变率。用该临界应变率可以确定岩石破坏后区的变形是随荷载的减小而呈增大或减小的变化趋势,并对此现象用破坏能的概念进行了探讨。本文还研究了软岩、硬岩对应变率的敏感度;并指出增大试件围压会使试件的应变率敏感度减弱,也就是说使试件趋于“硬化”。以上结论及理论分析不仅在理论上具有重要的意义,在岩石工程中也有实用意义。

一、引 言

应变率对岩石破坏强度和变形性质的影响,是岩石动力学最基本的也是最关键的课题之一。研究岩石的本构关系及应力波在岩体中传播的规律,就要用到不同应变率下岩石的变形和破坏特性的资料;在岩体工程中,钻探、凿岩和爆破等也需要这方面的资料。因此该问题的详细研究对学科发展及工程实用都有重要意义。

国内外不少学者用不同方法对这一问题作了研究,如布朗(Brown)、斯旺森(Swanson)和沃尔西克(Wawersik)^[1]、林霍尔姆(Lindholm)^[2]、戈尔史密斯, (Goldsmith)^[3]等人用霍布金森压力杆作了岩石动力试验(应变率为 $10^3/s$ 左右),并与静力试验结果进行了比较。斯特夫(Stave)和Ainsworth^[4]则研究了冲击加载,快速加载及静力加载时的岩石速率效应。以上研究往往只能作两种应变率时(包括静载)的数值比较。兰克福德(Lankford)^[5]、钟(Chong)等人^[6]及理查德(Richard)和艾德瓦尼(Advani)^[7]等人则研究了不同应变率下油页岩或页岩的强度特性。本所前几年也做过这方面的一些试验研究工作^[8]。在这些研究中,一般都试图用最小二乘法求出岩石的强度或变形随应变率变化的关系;在研究岩石的动力强度特性时,这种数据处理方法有时会忽视掉最本质的规律性。我们结合工程科研的项目,对一百余块晶屑凝灰岩、石英砂岩、粉砂岩试件进行了不同应变率下的力学试验,其中包括动力单轴压缩、动力三轴压缩、动力直接拉伸等试验。试图了解多大应变率时岩石强度发生明显变化?软岩和硬岩对应变率的灵敏性如何?围压下岩石性质的应变率响应有何变化?

* 吴亚平、王武林对本文也作了一定工作。

二、试验材料及试验结果

本研究中所使用的材料为晶屑凝灰岩、石英砂岩和粉砂岩。其中晶屑凝灰岩是一种深灰—青灰色的、具细粒结构、含一定细圆孔隙的较均质的岩石。其平均容重为 2.63g/cm^3 (25.8kN/m^3), 平均纵波速度为 5554m/s , 平均横波速度为 3258m/s 。

石英砂岩为中细粒结构、灰白色、裂隙发育, 裂隙中有深褐色铁锰氧化物充填, 含一定细圆孔隙的多裂隙岩石。其平均容重为 2.61g/cm^3 (25.6kN/m^3), 平均纵波速度为 5350m/s , 平均横波速度为 3100m/s 。

粉砂岩的层理清楚, 灰白色, 具深褐色条纹和一定裂隙, 结构较致密, 属于软岩。其平均容重为 2.54g/cm^3 (24.97kN/m^3), 平均纵波速度为 3077m/s , 平均横波速度为 2137m/s 。

动力单轴压缩、动力三轴压缩及动力直接拉伸试验主要在动力三轴试验仪或 10t 动载机上进行, 低应变率($10^{-5}/\text{s}$)的试验则在MTS电液伺服控制刚性试验机或长江-500型三轴仪上进行。一般每种岩石在每种应变率试验起码有四块试件, 取其平均值作为试验结果。应力、应变都用电阻应变片测量, 测试精度在 1% 以内。

1. 晶屑凝灰岩在不同应变率下的单轴压缩试验结果见表1。

表1

应变率(s^{-1})	10^{-5}	3×10^{-2}	3.9×10^{-1}	1.4×10^0
抗压强度(MPa)	209.6	200.3	197.7	273.6
变形模量(GPa)	69.2	65.9	85.7	86.5

2. 在 90MPa 围压下晶屑凝灰岩不同应变率下的三轴压缩试验结果见表2。

表2

应变率(s^{-1})	10^{-6}	4.4×10^{-3}	2.1×10^0
破坏强度(MPa)	689.8	669.0	825.6
破坏前轴向应变($\mu\epsilon$)	6795	12095	14012

3. 石英砂岩在不同应变率下的单轴压缩试验结果见表3。

表3

应变率(s^{-1})	10^{-5}	10^{-2}	10^{-1}	10^0
抗压强度(MPa)	151.5	150.9	149.5	179.5

4. 粉砂岩在不同应变率下的单轴压缩试验结果见表4。

表 4

应变率(s^{-1})	10^{-5}	1.99×10^{-2}	1.04×10^0
破坏强度(MPa)	19.7	17.1	50.7
变形模量(GPa)	10.5	13.1	31.1

5. 粉砂岩在不同应变率下的直接拉伸试验结果见表 5。

表 5

应变率(s^{-1})	10^{-5}	10^{-2}	10^0
抗拉强度(MPa)	0.97	0.95	2.43

三、应变率对岩石强度的影响

仔细研究表 1 至表 5 的强度资料, 可以发现如下规律:

1. 应变率在 $10^{-5} \sim 10^{-1}/s$ 范围内, 所有 5 个表中的各种岩石的破坏强度基本一致, 其偏差一般在岩石力学试验规定允许的误差范围(10%)之内; 即在该应变率范围内, 岩石强度对应变率不敏感。

2. 当应变率达 $10^0/s$ 时, 5 个表中三种岩石的破坏强度都有明显增长: 坚硬的石英砂岩的单轴抗压强度增大了18.5%, 晶屑凝灰岩的增大30.5%; 软弱的粉砂岩的单轴抗压强度增大1.5倍左右。表 4 和表 5 的比较说明, 同样的岩石在抗拉与抗压时, 强度呈同样的应变率效应。

实际上, 文献[7]中粘土质页岩的试验资料也完全符合上述规律, 例如作用力垂直于层理方向所得的试验结果如表 6

表 6

应变率(s^{-1})	1.33×10^{-4}	1.33×10^{-3}	1.33×10^{-2}	1.33×10^{-1}	1.33×10^0
破坏强度(MPa)	57	52.8	56.6	56.6	68.7

他们的不同含水量的试验结果在定性上与表 6 的一致, 如图 1 所示。数据点的平均规律与我们上述的结果也是吻合的。他们试验的材料是横向各向同性体, 平行于层理方向所做的试验, 粗看起来数据离散较大, 规律性稍差, 但是若把其所有结果按不同应变率进行统计, 其规律性仍然很好, 如表 7 所示。但从图 1 中看出, 他们用最小二乘法把应变率效应归结成直线关系, 就掩盖了其真实的规律性。其他一些文献^{[5]、[6]}, 也有这种类似的情况。要能更逼真地模拟该规律性, 看来要借助于突变理论(Catastrophe Theory)。

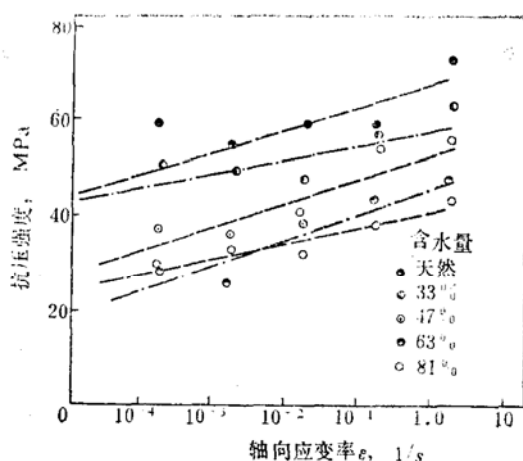


图1 应变率、含水量对粘土质页岩抗压强度的影响

表7

应变率(s^{-1})	1.33×10^{-4}	1.33×10^{-3}	1.33×10^{-2}	1.33×10^{-1}	1.33×10^0
抗压强度(MPa)	29.8	29.88	31.0	40.5	44.2

为什么应变率在 $10^0/s$ 左右时岩石的破坏强度会发生明显增大呢？我们认为可以根据断裂力学观点进行分析。例如，变质凝灰岩的裂隙扩展速度为 $1870m/s^{[9]}$ ，因而岩石试件中的微裂纹不稳定扩展，并相互衔接成较长的裂隙，继而扩展形成宏观破坏面，其时间过程经估算约需数百微秒。众所周知，岩石加载变形至破坏可分为四个阶段：裂隙闭合、线弹性变形、稳定破裂传播和不稳定破裂传播；其中不稳定破裂传播阶段对岩石破坏强度有更直接和更关键的影响，该阶段中宏观破坏与时间关系较大。该阶段所经历的时间一般不到整个试验时间的十分之一（见文献[10]）。应变率为 $10^0/s$ 时，试验加载上升时间（荷载从零加到试件破坏时的最大值的时间）一般为 $2 \sim 3ms$ ，因而不稳定破裂传播阶段仅占200多微秒，略小于前面由破裂扩展速度估算的破坏时间过程，因而破坏强度值显示明显增大就不足为奇了。而应变率小于 $10^{-1}/s$ 时，其加载上升时间在数十毫秒以上，不稳定破裂传播阶段因而在数毫秒以上，远比前面估算的破坏时间过程要大，因此应变率在 $10^{-5} \sim 10^{-1}/s$ 范围内岩石的破坏强度无明显变化。应当指出的是，不同岩石的破裂扩展速度不同，象软岩中扩展速度显然要小些，因而使强度起显著变化的应变率也要降低。象文献[7]的粘土质页岩在一定含水量条件下，在 $1.33 \times 10^{-1}/s$ 的应变率时，强度已有明显增大（见图1及表7）。

3. 表1与表2的比较说明，同种岩石（晶屑凝灰岩）在不同围压下强度随应变率变化的规律基本一致；但在定量上，围压增大时，强度随应变率增加而增大的幅度要变小，即从零围压时的30.5%的增长率，变成90MPa围压时的19.7%的增长率。也就是说增大围压会使岩石对应变率的敏感度变弱。

4. 三种不同硬度的岩石的破坏强度随应变率增长幅度的比较说明，岩石愈坚硬，破坏强度随应变率增大而增长的幅度愈小；反之，岩石愈软，则强度增长幅度就愈大。也就是说，岩石愈软，则其应变率的敏感度愈高。

四、应变率对岩石变形的影响

由表1、表2和表4的岩石变形资料可以看出:

1. 岩石的变形模量随应变率增大而增长, 其中软岩的增长幅度更为显著, 而硬岩增长幅度小一些。如应变率从 10^{-5} 增至 $10^0/s$, 粉砂岩的变形模量, 增大近二倍。而晶屑凝灰岩的只增大25%左右。这也表明软岩的应变率敏感度较高。我们对一种疏松的泥炭质泥岩进行试验时, 发现其动、静变形模量可相差两个数量级左右。

2. 随应变率增大, 岩石破坏前的最大变形值也增大, 如表2中所看到的。应该指出的是, 这种规律仅适用于 $10^{-5}/s$ 以上的应变率范围; 在更小的应变率范围, 即应变率小于 $10^{-6}/s$ 时, 岩石破坏前的变形值随应变率减小却反而增长(见参考文献[11])。

应变率大于 $10^{-4}/s$ 时, 岩石破坏前的变形随应变率而增大的现象, 可根据岩石变形破坏的特征及破坏时所需能量的角度来解释。如图2所示, 岩石脆性破坏后, 位移随荷载减小而减小, 且随应变率增加, 其减少幅度也趋显著; 而要使破坏能(图2曲线所包面积)保持不变的话, 破坏前的位移必然要随应变率而增加, 如图2中曲线I和II所示。应变率在 $10^{-5}/s$ 以下时, 岩石破坏后位移随荷载减小而增大, 而其破坏强度随应变率减小而减小。如图2中曲线III所示, 试件破坏前随着应变率减小, 位移反而增大。当然, 对于不同的岩石, 使试件破坏前变形增大或减小的临界应变率是不同的, 不一定是 $10^{-5}/s$, 象大理岩为 $10^{-4}/s$, 而花岗岩则为 $10^{-6}/s$ 。

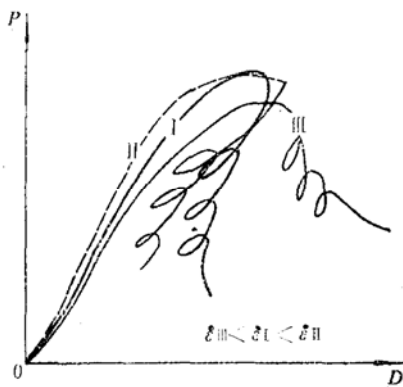


图2 不同应变率下的荷载位移曲线

五、结 论

根据一百多块晶屑凝灰岩、石英砂岩及粉砂岩试件在不同应变率下变形与强度的试验结果, 可以得出如下主要结论:

1. 应变率在 $10^{-1}/s$ 以下, 岩石的破坏强度随应变率变化不明显, 应变率达 $10^0/s$ 附近时, 岩石的破坏强度有显著增长。对其原因可根据破裂扩展速度用断裂力学观点进行分析和解释。

2. 岩石的变形模量随应变率增大而提高。应变率在 $10^{-5}/s$ 以上, 岩石破坏前的变形量也随应变率而增大。

3. 软岩的力学性质对应变率更为敏感, 硬岩则敏感性较差。增加试验时的围压会使应变率效应趋于变小, 也就是说使试件“硬化”。

综上所述, 在 $10^{-5} \sim 10^{-1}/s$ 范围内, 岩石的变形模量和破坏前最大变形随应变率的增大而增长, 但岩石破坏强度并无明显变化, 应变率在 $10^0/s$ 附近时, 岩石破坏强度则显著增长。这一使岩石强度显著增大的应变率的下限值 $\dot{\epsilon}_d$ 可能是岩石动力学的一个重要指标; 今后若对各种岩石试验测定其 $\dot{\epsilon}_d$ 值是有意义的。岩石钻探工程中, 可以根据 $\dot{\epsilon}_d$ 值资料对不同岩石

采用不同钻机转速, 就有可能提高凿岩效率和进度。

本文由冯遗兴、邱一平执笔。刘远惠、黄理兴、林卓英、任文忠等同志参加了部分试验工作, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Brown, W. S., Swanson, S. R. and Waweresik, W. R., Influence of Dynamic Loading, Biaxial Loading and Pre-fracturing on the Stress-strain and Fracture Characteristics of Rocks, AD-734029, DASA2713, 1973.
- [2] Lindholm, V. S., Yeakley, L. M. and Nagy, A., The Dynamic Strength and Fracture Properties of Dresser Basalt, Int., J. Rock Mech. and Min. Sci., Vol. 11, No. 5, 1974.
- [3] Goldsmith, W., et al., Static and Dynamic Fracture Strength of Barre Granite, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., Vol. 13, 1976, p. 303.
- [4] Stowe, R. L. and Ainsworth, D. L., Effect of Rate of Loading on Strength and Young's Modulus of Elasticity of Rock, Proc. U. S. Tenth Symposium on Rock Mechanics, 1968, pp. 3-34.
- [5] Lankford Jr. J., Dynamic Strength of Oil Shale, J. Soc. Petrol Engs., pp. 17-22, 1976.
- [6] Chong, K. P., Hoyt, P. M., Smith, J. W. and Paulsen, B. Y., Effect of Strain Rate on Oil Shale Fracturing, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech., Vol. 15, 1980, pp. 263-265.
- [7] Richard, T. G. and Advani, S. H., An Experimental Investigation of the Combined Effects of Strain Rate and Moisture Content on Shale, ISSUES in Rock Mechanics 23rd Symposium on Rock Mechanics, Edited by R. E. Goodman and F. E. Heuze, 1982.
- [8] 朱瑞赓、吴绵拔, 不同加载速率条件下花岗岩的破坏判据, 爆炸与冲击, Vol. 4, No. 1, 1984年。
- [9] 陶振宇编, 水工建筑物中岩石力学的国外实例与经验数据, 表3-61, 水利电力出版社, 1975年, p. 123.
- [10] 冯遗兴、徐光华, 花岗岩的本构方程的试验研究, 防护工程科研成果文集, 国防出版社, 1981年。
- [11] 林卓英、吴玉山, 815-03型电-液伺服控制岩石试验机及其应用, 岩土力学, Vol. 6, No. 1, 1985.

The Effect of Strain Rate on Strength and Deformability of Rock

Feng Yixin, Qiu Yiping, and Li Zhanming

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Academia sinica, Wuhan)

Abstract

Compressive or tensile tests were conducted on crystal tuff, silicarenite, and siltstone samples under different strain rates, and also a great amount of literature consulted, it was found that the strength of rock remains constant when strain rate varies from

10^{-4} (sec.^{-1}) to 10^{-1} (sec.^{-1}), and above 10^{-1} or 10^0 (sec.^{-1}), the strength will increase obviously, and the cause of which can be explained by analyzing the fracture propagation in rock specimen.

According to the phenomena that the pre-failure deformation increases or decreases with strain rate, a critical strain rate conception was postulated for studying the post-failure properties of rock.

Also, the strain rate sensitivity for both hard rock and soft rock was examined. It was found that the strain rate sensitivity will decrease with the increase of confining pressure on rock.