

[文章编号] 1671-9727(2006)04-0360-05

岩石扩容过程中的体积应变与超声横波速度

刘维国¹ 单钰铭¹ 傅荣华²

(1. 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 成都 610059;

2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059)

[摘要] 通过对三轴实验中岩石体积应变与横波速度的分析, 揭示了在各种试验环境中岩样的抗压强度大于体积应变最大值点的差应力, 而体积应变最大值点的差应力大于横波速度最大值点的差应力, 说明抗压强度前岩石扩容现象是肯定存在的。试验结果表明: 不论应力应变曲线上的直线部分是否明显, 都可以用检测横波速度最大值的办法确定岩石的应力门槛值; 并建议对求岩石泊松比的常规方法有必要进行重新调整。

[关键词] 岩石; 扩容; 应力门槛值; 横波速度最大值

[分类号] TU458

[文献标识码] A

对岩石扩容过程中非弹性体积增加状态的研究, 是对岩石破裂前兆特征研究的基础性课题。20 世纪 60 年代发展起来的岩石脆性破裂扩容(dilatancy)模型^[1]就是其研究成果之一。大多数岩石在差应力作用下的应力应变全曲线^[2](图 1)给出了岩石变形过程中纵(ϵ_1)、横向($\epsilon_2 = \epsilon_3$)和体积应变(ϵ_v)随轴向差应力($\sigma_1 - \sigma_2$)的变化。

同一组岩石在相同测试条件下, 变形差异的主要原因是与其内部的微裂纹孔隙和孔隙流体差异相关。根据岩石在扩容过程中的微裂纹的初步压实、尖端扩展、发展和贯通等特点, 一般将轴向应力应变全曲线划分为五阶段(图 1): 压实阶段(0A); 直线部分的弹性阶段(AB); 微裂纹的稳定发展阶段(BC); 裂纹的非稳定性发展和岩石宏观破裂阶段(CD); 峰后承载能力下降阶段(DE)。

图 1 上的体积应力应变曲线与轴向应力应变全曲线具有相同的特点, 其各阶段的分界点的发生条件和特征是本文研究焦点。各阶段的分界点主要特点描述如下: A* 点是曲线直线段的起点; B* 点是曲线直线段的终点, 即岩石试件非弹性体积增加的开始处; 该点的差应力值等于 ϵ_1 上的 B

点值, σ_{B^*} 就是岩石的应力门槛值^[3]。假设岩石试件是一个完全的弹性体, 则其总体积的减小趋势将沿图中直线方向(A*F)发展; 但实际上过 B* 点 ϵ_v 就偏离了线性, 它说明这是岩石内部微裂纹的尖端发展或孔隙空间进一步变形所致; C* 点是体积应变的极大值点, 哈德利(1973 年)指出 C* 点所对应的差应力 σ_{C^*} 大约等于在剪切面上滑动所需的差应力, 它说明了微裂纹已具备开始面间滑动的差应力条件; H 点是轴向应力应变全曲线破裂峰前、后的体积应变分界点, 该点的差应力值与岩石极限强度 D 点相同; I 点是峰后 E 点对应的体积应变值。

本文试图利用典型岩石本构曲线理论, 通过岩石样品的应力应变参数和超声横波速度的实测结果分析, 来探讨上述各点的产生条件和特征。

1 样品和试验

1.1 岩石试样

主要包括砂岩、泥岩、白云岩、灰岩、花岗岩、凝灰岩、玄武岩等, 共计 73 块, 砂岩和灰岩样品较多。

[收稿日期] 2006-01-06

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(40472140)

[作者简介] 刘维国(1950—), 男, 副研究员, 主要从事岩石力学方面的科研、试验与教学工作。(E-mail: LIUWG@cdu.edu.cn)

期刊主页: <http://xbzrkx.cdu.edu.cn>

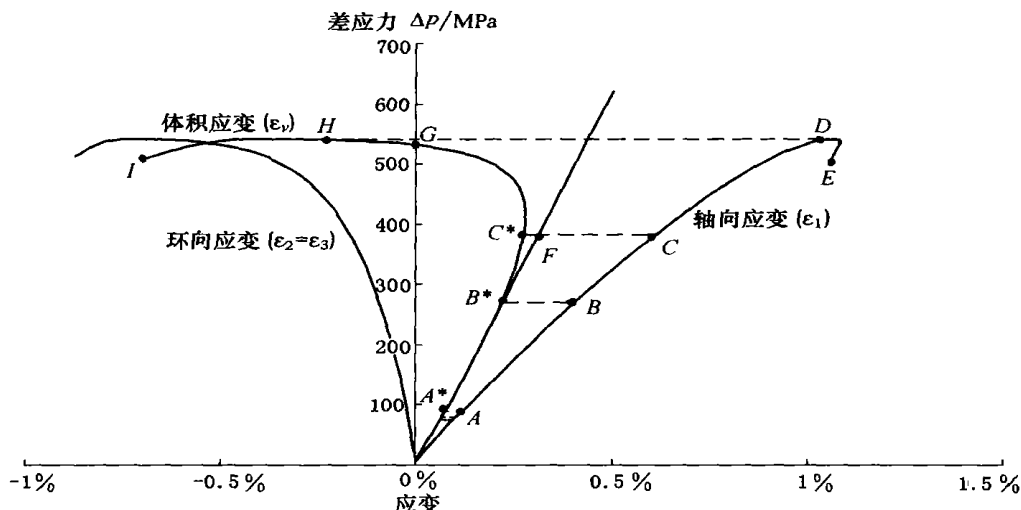


图 1 三轴实验中的岩石应力应变曲线
Fig. 1 The rock stress-strain curve of triaxial compression

样品尺寸: $\varnothing 25$ mm 和 $\varnothing 50$ mm 圆柱体, 高径比约为 2。

1.2 试验设备

试验在油气藏地质及开发工程国家重点实验室的 MTS 高温高压岩石物性测试系统上完成。轴向和环向应变分别为 MTS632.90c-12 型和 MTS632.92c-03 型(链条式)引伸计测量; 超声纵、横波参数是采用沿圆柱状样品母线的透射式测量; 应变、应力、横波速度和其他纵、横波参数的测量是同时进行的^[4]。孔隙流体为蒸馏水, 先将岩样抽真空饱和, 再加载孔隙压力进一步饱和。

1.3 实验方案和数据处理

方案 1: 由图 2 所示的 4 个阶段组成, JK 段: 保持轴向差应力和温度不变(简称: 定轴压定温

度), 同时增加孔压 (σ_p) 和围压 ($\sigma_2 = \sigma_3$); KL 段: 定轴压定围压定孔压增加温度(室温 - 170℃); LM 段: 定轴压定孔压定温度增加围压; MN 段: 定轴压定围压定温度增加孔隙压力, 在方案 1 过程中同时进行透射式超声纵、横波参数测试。

方案 2: 孔压为 0 时, 定围压加载轴压下进行应力-应变全曲线的测量, 并同时进行了多测点的超声纵横波参数的测试。

体积应变(ϵ_v)计算公式:

$$\epsilon_v = -\Delta V/V_0 = \epsilon_1 - 2\epsilon_2 = (\Delta l/l_0) - 2(\Delta S/S_0) \quad (1)$$

式中: ΔV 为样品体积增量; V_0 为样品原始体积; ϵ_1 为轴向应变(%); ϵ_2 为环向应变(%); Δl 为轴向应变计增量; l_0 为轴向应变计二卡针标距(25 mm); ΔS 为环向应变计增量; S_0 为样品原周长。

横波速度(v_s)计算公式:

$$v_s = l/t_s = l/(t_r - t_H) \quad (2)$$

式中: l 为测试声波时的样品长度, 即根据轴向应变修正后的长度; t_s 为超声波经过样品的旅行时间; t_r 为超声波在发射晶片到接收晶片之间(有样品)的旅行时间, 是波形图上的初至时间; t_H 是指没有样品时, 发射与接收探测器头对头时(无样品)超声波旅行时间。

2 试验结果分析

2.1 应力应变曲线上的特征点统计分析

a. 在体积应变曲线(图 1)上各点相应的差应

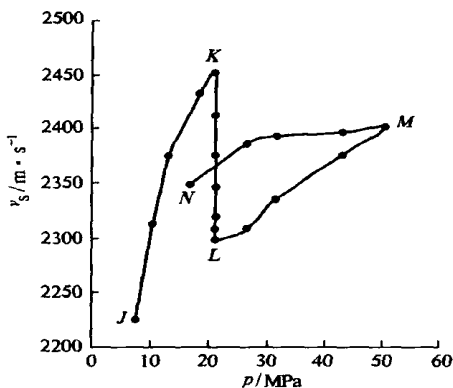


图 2 有效应力与横波速度的关系
Fig. 2 The relationship between effective stress and shear wave

力呈现 $\sigma_H > \sigma_{C^*} > \sigma_{B^*}$, 即对应抗压强度点 H 值大于体积应变最大值点 (C^*) 的差应力, 而 C^* 点的差应力大于横波速度最大值点 (B^* , 亦称 $v_{S,max}$ 点) 的差应力。而且 $\sigma_H - \sigma_{C^*} \neq \sigma_{C^*} - \sigma_{B^*}$, 即二点相互之间的应力差亦不同。 $v_{S,max}$ 的差应力水平在 28%~93% 抗压强度之间; 特别是如图 3 那样, $v_{S,max}$ (O) 都与轴向应力应变曲线上直线段尾端的 B 点对应, 而 B 点相当于材料力学^[5] 上的弹性极限。 $\sigma_H > \sigma_{C^*} > \sigma_{B^*}$ 现象, 说明了在差应力作用下, 岩石中的微裂纹是由微裂纹尖端和孔隙形状的变化, 向裂纹的面滑动到裂纹贯通、破裂发展的应力条件。

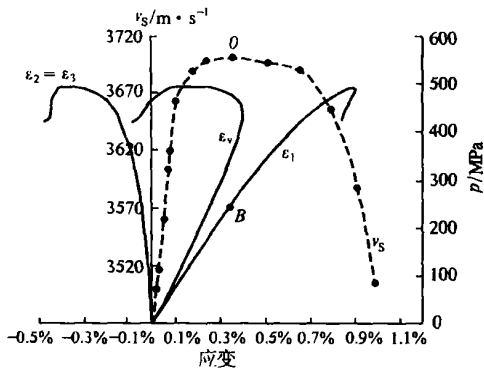


图 3 应力应变与横波速度关系图
Fig. 3 The relationship between shear wave velocity and stress-strain

同组样品的泊松比进行比较: $\mu_H > \mu_{C^*} > \mu_{B^*}$ 。即 H 点的泊松比大于 C^* 点的泊松比, C^* 点的泊松比大于 B^* 点的泊松比。这也进一步说明了试样的松散和破碎程度随差应力的增加而增加。

b. 图 1 中 B 点岩石就开始扩容, 该点可用测量 $v_{S,max}$ 方法确定。在体积应变曲线上的 B^* 点与 B 点对应, 从 B^* 开始体积应变曲线偏离代表完全弹性体体积应变的直线 A^*F , 同一差应力下的直线上体积应变与曲线体积应变之差 (例如: 图中 FC^* 直线段长) 被认为是岩石扩容程度的量度。图 1 中可清楚地看出, 随着差应力的增加, 该线段的长度亦是增加的。 C^* 点是由体积应变的最大值来确定, FC^* 直线长度是在差应力 σ_{C^*} 下, 微裂纹面滑动时具有的非线性体积应变值。

根据体积应变公式(1) 可以看出, 随差应力增加到 C^* 时, 从单位时间应变的快慢(应变率)来看, C^* 点之前轴向应变率大于环向应变率, C^*

点之后反之。这说明差应力之下的岩石试件的破裂遵循: 先在轴向上压短、环向上缓慢扩张→裂纹面产生滑动→轴向上缓慢压缩、环向“涨肚子”→主破裂面形成→宏观破裂的规律。

c. 图 1 上体积应变值从正到负转变的 G 点比较复杂, 该点是体积应变曲线与纵坐标轴的交点。G 点出现在轴向应力应变曲线上破裂峰前(图 1)、峰后或不出现(图 4)的概率各占 45%, 28%, 27%。

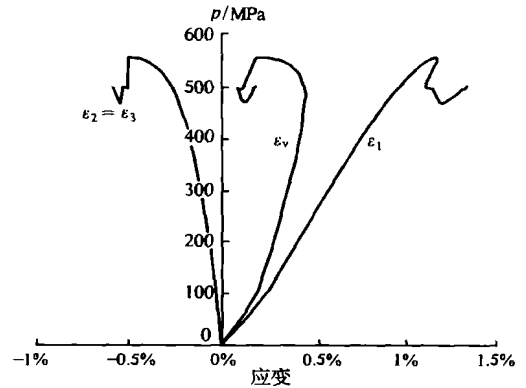


图 4 长石岩屑砂岩应力应变曲线
Fig. 4 The stress-strain curve of sandstone

根据公式(1), G 点不论在峰前、峰后出现, 都意味着试样的横向应变对体积应变的贡献大于轴向应变。这时试样的体积的增加以横向扩容为主, 这是与岩石的结构有关的性能; 不出现 G 点的现象可能与岩石的主破裂面的滑动较小和环向应变计在实验过程中因岩样崩裂影响其运行不正常等有关。

2.2 变化围限有效应力与加温下的横波速度

图 2 中 JK 段: 围压增加量大于孔压增加量时, 使围限有效应力(即: 围压与孔压之差)上升, 横波速度增大; KL 段: 围限有效应力保持不变增加温度, 横波速度降低; LM 段: 定温定孔压增加围压使围限有效应力增加, 横波速度也同步增加; MN 段: 保持围压不变是以增加孔压来降低围限有效应力, 横波速度亦跟随降低。

值得注意有下二点: 一是 JK 与 LM 段, 波速变幅明显不同。JK 段在室温下采用同时增加围压和孔压来增加围限有效应力, 虽只增加 20 MPa, 但横波速度的增加幅度比 LM 段定孔压增加围压方式来增加围限有效应力的横波速度增加幅度要大一些, 这可能与 LM 段是在 170℃ 的温

度有关。二是 LM 段与 MN 段相比较来看, LM 段是定孔压增围压方式增加围限的有效压力, 而 MN 段是定围压增加孔压, 以降低其围限有效应力, 就围限有效应力而言是一个互为逆过程。由于孔隙流体介质不能承受剪切力, 因此孔隙流体介质的存在不会影响横波的传播。那么试样中普遍存在着 MN 段横波速度高于 LM 段, 我们认为这种现象应该是岩样经压实后, 以增加孔压方式降低围限有效应力时, 岩样存在弹性恢复滞后造成的。

2.3 温度对超声波速度的影响

图 5 是方案 1 中 KL 段的定轴压定围压定孔压加温过程中, 横波与纵波速度的实测结果。试样孔隙内水已饱和, 加温开始到结束, 纵波、横波速度平均分别降低 5.6% 和 4.3%, 比有些文献报道的 3% 左右大些。超声波速度的降低与岩石的孔隙度大小有关, 孔隙度大的样品, 超声波速度降低稍大些。

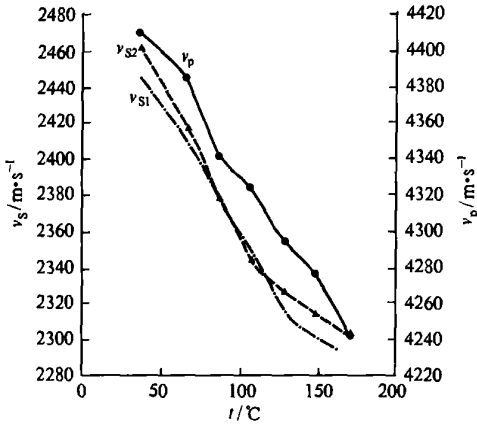


图 5 书馆超声波速度与温度关系图
Fig. 5 The relationship between wave velocity and temperature

2.4 超声波速度与横波初至时间

图 6 和图 7 表示的是同一横坐标 (ϵ_1) 上的纵、横波速度, 横波初至时间和样品长度的关系。二图对照分析: 横波速度曲线与横波的初至时间曲线互呈镜像, 如图 6 上横波速度极大值点 (O) 和图 7 上的横波初至时间的极小值点 (O*) 呈对应关系。

图 7 上的样品长度在轴向应变增大的过程中总是缩短的 (0.534 mm)。在图 6 上 O 点以前, 随着样品长度的稍为缩短, 图 7 上 O* 前的初至时

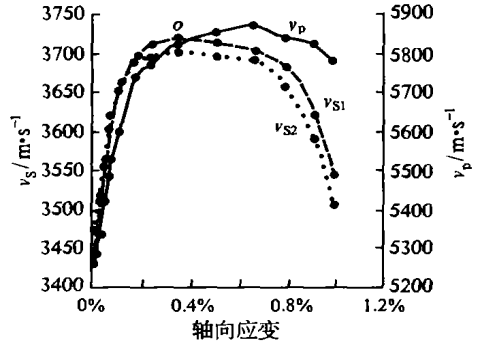


图 6 书馆超声波速度与应变
Fig. 6 The relationship between wave velocity and strain

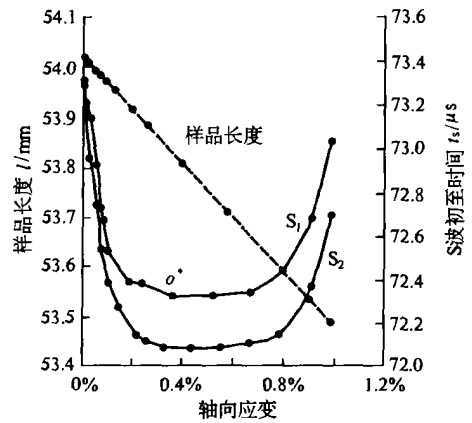


图 7 横波初至时间与应变
Fig. 7 The relationship between shear wave first arrival time and strain

间也很快减小, 根据公式 (2), 这是图 6 上横波速度增加的主要原因; 图 7 上 O* 点以后的样品长度继续缩短但横波初至时间反而增大, 这种现象似乎意味着超声波在样品上的真实旅行距离比样品的实际长度要大些。其原因可能是: 根据超声横波只能在连续固体介质中传播的特点, 试样从横波速度极大值点 (图 6 中 O 点) 开始, 岩石微裂纹发生新的扩展, 破坏了原横波的传播路径而使其在样品的旅行时间变长; 亦可能是横波衰减机制和其他原因造成的, 有待进一步探索。

3 结语

(1) $\sigma_H > \sigma_C^* > \sigma_B^*$, 说明岩石试样在差应力作用下, 抗压强度锋前岩石扩容现象是肯定存在的。

(2) 试验结果说明: 不论应力应变曲线上的直线部分是否明显, 都可以用超声横波检测办法

确定 $v_{S\max}$;亦可以用测量横波初至时间极小值的办法确定岩石的应力门槛值。

(3) 利用超声横波反映固体介质中微裂纹尖端发展、衍生、演化和宏观破裂是很灵敏的。如果采用岩石损伤力学标量 D 来描述,则:

$$D = 1 - (v_{St}/v_{S\max})^2$$

式中 v_{St} 为某一损伤状态下的横波速度, $v_{S\max}$ 为横波速度最大值。由图 3 可以看出: $v_{S\max}$ 之后的横波速度是单调减少的,那么 D 值随着岩石裂纹进一步的发展而越来越大。

如果采用主动横波震源进行透射式(或反射式)横波速度或初至时间的连续测量,对比前后测量结果的变化,如果横波速度增加即指被测固体在差应力作用下被压实,横波速度减小则说明固体中有新的微裂纹的发展和产生。用此原理可进行固体介质的裂纹快速检测^[6]。

(4) 体积应变的最大值 C^* 点,我们认为:这时微裂纹具有了面滑动的差应力条件。虽然非稳定性发展阶段意味着微裂纹面的滑动,但是否可定为裂纹的稳定性发展阶段与非稳定性发展阶段的分界点,还有待进一步研究。目前在超声波运动学方面没有显著的特点,还应加强如频率域、衰减等超声波动力学方面的探索。

(5) 体积应变的正负转变 G 点,因其出现在

峰前,峰后和不出现的情况很不稳定,但可以很清楚地反映在宏观破裂峰前后的样品轴向与环向应变的变化情况。

(6) $v_{S\max}$ 的应力水平在 28%~95% 抗压强度之间。在 50% 抗压强度处求岩石泊松比的常规有必要进行重新考虑调整。

[参 考 文 献]

- [1] SCHOLZ C H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990: 433.
- [2] 陈颢,黄庭芳. 岩石物理学[M]. 北京:北京大学出版社,2001:105.
- [3] 刘维国,单钰铭,徐国盛,等. 加温三轴试验中砂岩的微裂纹与横波速度[J]. 成都理工学院学报,1999,26(4):392—395.
- [4] 刘树根,单钰铭,刘维国,等. 地层条件下油气储集层多参数同时测试[J]. 成都理工学院学报,1998,25(4),480—486.
- [5] 北京科技大学,东北大学. 工程力学材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,1997: 21.
- [6] 刘维国,单钰铭,傅荣华,等. 岩石扩容现象与超声波特征参数相互关系研究评述[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2003,30(1):87—91.

A study of the relationship between the volumetric strain and the ultrasonic S-wave velocities in dilatancy of rocks

LIU Wei-guo, SHAN Yu-ming, FU Rong-hua

State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Based on the triaxial tests, the relationship between the volumetric strain and the S-wave velocities in the dilatancy of different rocks is presented in the paper. The test results show that the stress value of the maximum volumetric strain is greater than the stress of the peak of the S-wave velocity but less than that of the compressive strength. Whatever the straight line part of the stress-strain curve may be, it is always possible to find out the rock stress threshold by the peak value of the S-wave velocity. The authors suggest that the method to calculate Poisson's ratio of rocks needs to be reconsidered.

Key words: rock; dilatancy; stress threshold; peak value of S-wave velocity