

岩石破坏状况的实验研究

姚孝新 赖德伦 张来凤
(国家地震局地球物理研究所)

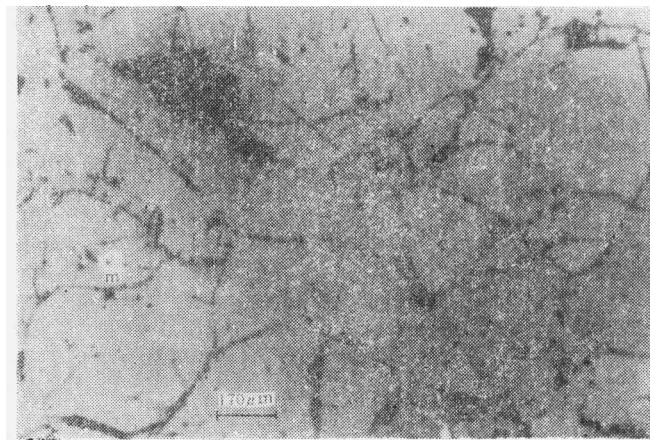
摘要

在单轴压缩下,轴向应变速率由 $10^{-2}/s$ — $10^{-8}/s$, 以及在恒定压力下辉长岩破坏样品的微观观察发现: 辉长岩的破坏状况有较大的变化。显示出作用于岩石上的外力, 由初始上升到岩石完全破坏的时间间隔 Δt 的长短, 它会影响着岩石内部的破坏状况。并预示出: 对这一现象的深入研究, 必将会增进我们对震源孕育过程的认识。

关键词 应变序列;微观观察;震源

一、引言

一般岩石是由数种不同的矿物晶体组成^[1], 并且这些矿物晶体的力学性质有不同程度的差异。由于这些差异体的组合, 使得岩石内不可避免的存在着各种裂隙和孔洞(特别是在晶界处, 照片 1)。这种力学性质上有差异的矿物晶体组合成的岩石, 致使岩石材料与金属材料的力学性质上有很大的差异。例如: 当作用于岩石上的压应力由初始上升阶段, 岩石内的裂隙及孔洞处于闭合阶段, 此时的应力-应变曲线是非线弹性的。随着压力的继续上升, 岩石的应力-应变曲线是线弹性的。当压力继续上升到某一压力 $\sigma_1 - \sigma_3 >$



照片 1 天然辉长光片的显微照片。

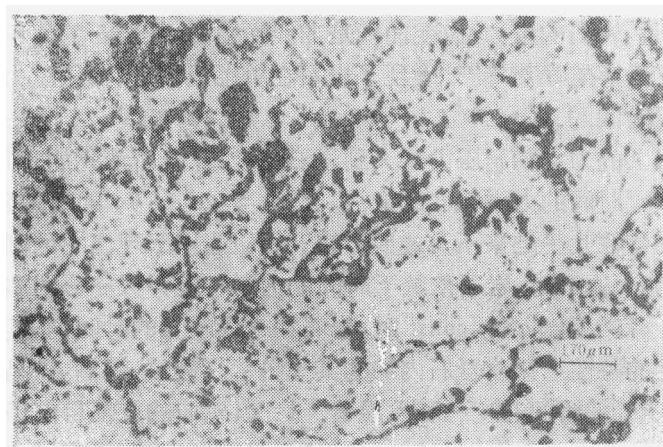
$C'(\sigma_2 = \sigma_3 \approx 0)$ 时, 岩石的应力-应变曲线是非线弹性的, 且岩石的体积出现非线弹性膨胀的现象^[2-3]。1986 年姚孝新等^[4-5]发现了岩石在单轴压缩下, 当压应力 $\sigma_1 > C_0^1$ 时, 岩石的变形是依赖于时间的。

当作用于岩石上的力由初始压力增大到岩石完全破坏(所消耗的时间用 Δt 表示)时, 由于岩石具有依赖于时间的力学特性的缘故, 因此, 当 $\Delta t \rightarrow 0$, 即向无穷小迫近时, 这时岩石与时间有关的特性几乎是来不及施展出来, 所以岩石表现出它的刚性性质^[4-5]。当 $\Delta t \rightarrow \infty$, 即向无穷大迫近时, 岩石依赖于时间的力学特性得以充分的施展。特别是在恒压的实验中, 即当 $\sigma_1 > C_0^1$, $\sigma_1 = \text{const}$ 时, 岩石在一段较长的时间内, 其应变的速率非常的稳定。这种稳定的特性意味着岩石内部的某些机体(裂纹、孔洞、矿晶力学性质的差异性等)在缓慢且稳定的随时间在变化和发展着。然而, 它们的机理目前仍不清楚, 尚待进一步深入研究。

在生活中, 我们经常看到岩石被破坏的现象。人们多数采用作用力的时间 $\Delta t \rightarrow 0$ 的方式把岩石破坏掉。很少见到用 $\Delta t \rightarrow \infty$ 的方式进行破坏(实验室用伺服试验机的实验, 目前只做了持续时间为 7 天^[6])。采用上面的两种办法, 岩石都能被破坏掉。时间跨度由 $\Delta t \rightarrow 0$ 到 $\Delta t \rightarrow \infty$ 这样宽的时间域里。岩石都被外作用力所破坏掉。然而, 它们的破坏状况能否相同? 深入探索岩石的这一力学特性, 势必会促进对工程学、地质学和地震科学的发展。由于实验条件的限制, 我们只得到了辉长岩在单轴压缩下, 应变速率由 $10^{-2}/\text{s} - 10^{-8}/\text{s}$ ($\Delta t = 0.3\text{s} - \Delta t = 25\text{h}$) 和恒压力下(稳态时应变速率 $1.3 \times 10^{-8}/\text{s}$, $\Delta t = 19\text{h}$)的破坏样品。并制成了岩石的光片。利用光学显微镜观察了破坏样品内的破裂状况。观察表明: 应变速率跨度为 6 个数量级上变动时, 破坏的辉长岩样品内的微破裂状况有明显的变化。通过对这一现象的探讨, 增进了对地震孕育过程的认识。

二、实验样品

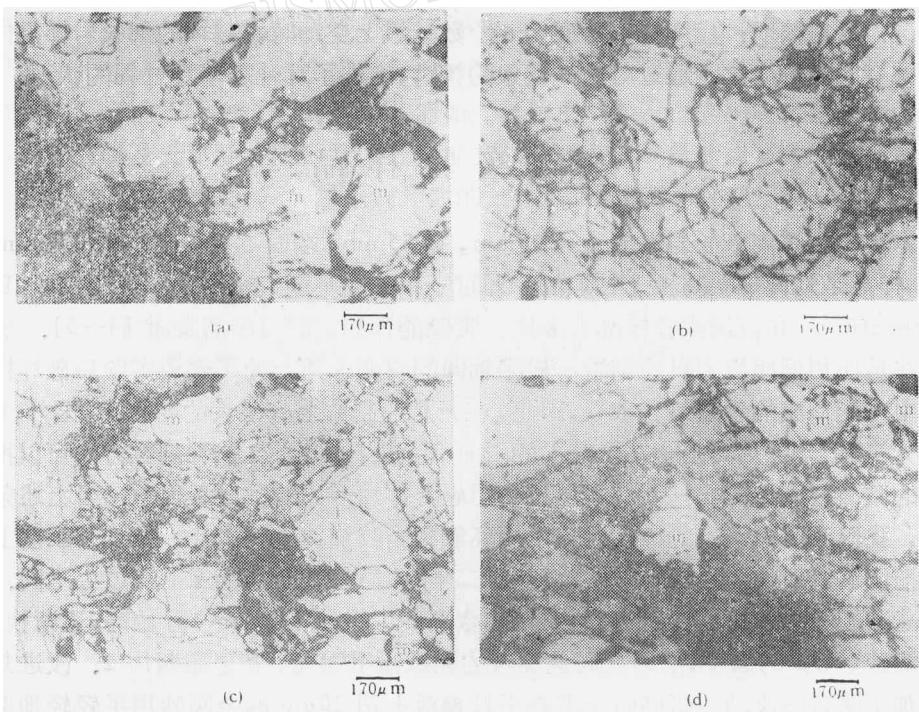
本实验用济南辉长岩做成直径 25mm, 高 55mm, 端面不平行度小于 0.02mm 的实验样品, 样品是从同一块石头上钻取的。通过一系列的不同应变速率和恒压实验, 取得了从 $10^{-2}/\text{s} - 10^{-8}/\text{s}$ 和恒压实验样品共 8 块。实验的详细情况可参阅文献 [4-5]。实验的基本方法是使用伺服压力机控制岩石样品轴向的应变速率。为了避免实验后破坏样品加工过程中可能形成的新裂纹和破裂, 因此, 在光片的制作上有很大的变化。国外 Brace 和黄庭芳等人^[7-8]是用离子炮在已磨平的岩石面上进行剥蚀。这种剥蚀方法可以把研磨时形成的微破裂剥蚀掉, 从而获得真正由于应力作用形成的微破裂现象。当上述条件不具备时, 我们对所需研磨的样品, 除了用环氧树脂胶浇铸成一体外, 在加工工艺上做了变动。把浇铸成形的样品, 沿中轴线切割成二半, 然后在轴面的加工上与过去不同。过去是通过高速旋转的砂盘进行研磨, 所使用的金刚砂由粗砂(120 μm)开始磨, 逐渐换砂磨, 最后用细砂(3.5 μm)磨平, 然后在高速旋转的呢绒盘上抛光, 其显微照片 2。改进加工法与传统加工法有些改动。研磨时全部在平玻璃板上用 20 μm 的金刚砂用手轻轻地磨, 磨平后即用 3.5 μm 的金刚砂磨, 最后用 1 μm 的砂磨至手感平滑, 磨面发光为止。磨好后不必在呢绒转盘上抛光[照片 3(c)]。照片 2 和 3(c) 对比之后明显看出, 手磨出的光片要比机



照片 2 应变速率 $2.7 \times 10^{-8}/s$, 78 号辉长岩破坏样品的光片, 用常规法研磨

器磨的光片清晰. 由于本项研究内容的要求, 观察的面积范围较大, 因而只用低放大倍率的光学显微镜即可. 做对比观察时, 基本上是在岩石光片相对应的区域上(中间)观察. 岩石光片是用显微镜的垂直光射到光片面, 垂直反射到观察目镜或胶片上. 当岩石表面凹凸不平时, 反射光不能射入目镜或胶片上. 因此, 目镜上为黑影.

本实验的辉长岩样品由开始加载荷到样品破坏止, 实验时间由 $\Delta t = 0.3s$ 到 $\Delta t = 25h$ 的时间域内变动. 伺服压机控制着岩石样品轴向的应变速率, 并以如下七种稳定的



照片 3 三种应变速率下和恒压下辉长岩破坏样品的显微照片
(a) 74号样品; (b) 71号样品; (c) 78号样品; (d) c-4样品.

应变速率($10^{-2}/s$, 74 号; $0.8 \times 10^{-3}/s$, 73 号; $0.6 \times 10^{-4}/s$, 72 号; $1.0 \times 10^{-5}/s$, 71 号; $0.7 \times 10^{-6}/s$, 70 号; $1.6 \times 10^{-7}/s$, 75 号和 $2.7 \times 10^{-8}/s$, 78 号)增加载荷, 得到了七种应变速率下的破坏样品和一块恒压 ($\sigma_1 = 212 \text{ MPa}$, $\dot{\varepsilon} = 1.3 \times 10^{-8}/s$, $\Delta t = 19 \text{ h}$, c-4) 的破坏样品。为了突出岩石在这一时间域内的破坏状况, 本报告只选用了 $10^{-2}/s$, 74 号, $\Delta t = 0.3 \text{ s}$; $1.0 \times 10^{-5}/s$, 71 号, $\Delta t = 225 \text{ s}$; $2.7 \times 10^{-8}/s$, 78 号, $\Delta t = 25 \text{ h}$ 和恒压 $\sigma_1 = 212 \text{ MPa}$, $\dot{\varepsilon} = 1.3 \times 10^{-8}/s$, $\Delta t = 19 \text{ h}$, c-4 的样品做对比观察[照片 3(a-d)]。

三、观察结果和分析讨论

由照片 1 和照片 3(a-d)看出以下三点:

1. 作用于岩石样品上的力, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 和 $\Delta t \rightarrow \infty$ (25 小时) 的时间域里, 岩石的破坏程度有明显的差异。74 号样品中[照片 3(a)]是以支离破碎为主, 微裂纹少; 71 号样品[照片 3(b)]仅以裂纹为主; 78 号样品和 c-4 样品中[照片 3(c, d)]除支离破碎外, 还有破碎环带(照片中灰暗色)和裂纹。这一变化意味着岩石随 Δt 的变动, 其破坏程度亦有变化。其中支离破碎程度最小者为 71 号样品 $10^{-5}/s$ 。并以它(71 号)为中心, 当应变速率向无穷大($\Delta t \rightarrow 0$)和无穷小($\Delta t \rightarrow \infty$)附近时, 岩石的破坏程度有变大的现象。

2. 由照片 3(a-d)看到, 辉长岩内云母矿(用 m 符号)的破坏状况是以 $10^{-2}/s$ (74 号样品)为最轻而后向 $10^{-8}/s$ 逐渐增大的。

3. 照片 3(a), $10^{-2}/s$ 74 号样品与 3(c), $10^{-8}/s$ 78 号样品有些类似的黑色孔洞。然而岩石内矿晶的完整程度 $10^{-2}/s$ (74 号)要强于 $10^{-8}/s$ (78 号) 样品。74 号和 78 号样品都形成了黑孔洞, 但是 74 号的黑孔洞四周的界线是比较清晰的, 而 78 号样品中黑孔洞四周有破碎区域[照片 3(c, d) 中灰暗色]。这类灰暗区是一些参差不齐的凹凸面。

由上面的三点可以看到: 岩石的破坏状况与作用于岩石上的力的增加速率和作用的持续时间(条件 $\sigma_1 > C_0^1$)紧密相关。仅从八个实验样品看到: 当作用力的增加促使岩石的应变速率由 $10^{-5}/s$ — $10^{-2}/s$ 上升时, 岩石的破碎程度有增大的现象。当应变速率由 $10^{-5}/s \rightarrow 10^{-8}/s$ 减小时, 岩石的破碎程度也同样增大。但是后者的破碎度要比前者严重得多, 特别是 78 号样品中云母也被破碎[照片 3(c)中的 m]。然而 $10^{-2}/s$ (74 号) 样品内多数云母仍然完整。表明了高应变速率的破碎与低应变速率的破碎机理有着本质上的差别。

我们知道: 岩石是由数种矿物晶体组合而成。这些不同的矿物晶体, 其力学性质有些差异。因此, 当压应力作用于岩石时, 假定岩石内的应力线是均匀的, 也就是矿物晶体受到均匀的压应力作用。当压应力上升到一定水平时, 由于各种矿物晶体的力学性质上的差异性, 此时有些矿晶开始破裂, 另一些矿晶则仍完好。如果此时刻的外加压力保持恒定的话, 这时被压破的矿晶会随时间的发展继续破裂。由于破裂而散失承载能力, 则应力线也会随时间的发展向尚完好的矿晶上密集直至完好的矿晶发生微破裂。先前被压的较破的矿晶, 由于四周其它矿晶的围限, 因此, 较破的矿晶仍有些承载能力。应力线又会相对地疏散到较破的矿晶上。此时, 较破的矿晶又会继续随时间的发展而破裂。这一现象如此循环往复下去, 这就是 78 号和 c-4 样品内形成黑孔洞和破碎区的可能原因。

对于作用力时间非常短暂致使岩石破坏的情况,岩石内矿晶力学性质上的差异性是来不及反应的。因为,当压力上升到一定水平时,某一矿晶虽然已达到破裂的水平,但由于压力上升的速率过快,使得其它强度较高的矿晶几乎也在时差极短的瞬间内达到破裂的压力水平。在这个极短的瞬间里,强度较低的矿晶的破坏没有得到发展的机会。实际上,强度较高的矿晶保护了强度较低的矿晶[照片 3(a) 中的 m]。因而,在这种情况下,岩石的力学性质取决于岩石内强度高的矿物晶体的力学性质。因此,如若要破坏它,就必须用较大的压力,致使岩石在极短的瞬间 ($\Delta t \rightarrow 0$) 内被破坏。当然,在这类情况中,岩石内强度较高的矿晶的含量也不能太少,必须成一定比例。强度较高的矿晶虽然暂时保护了强度较低的矿晶,但是一旦强度较高的矿晶发生破裂时,这个保护伞也就失去作用。因而,此刻岩石表现为整体破坏的特性。这就是 74 号样品破碎程度增大的可能原因。

在震源物理研究中,兴趣是在岩石的应变速率极低的作用力上。当岩石上的压力 $\sigma_1 > C_0^1$ 时,岩石的变形开始依赖于时间,即施于岩石上的外作用力的增率在极低或者为 0 的条件下,此时岩石的应变随着时间的发展而变化。从我们实验的样品上看到:岩石内的破坏是以黑孔洞、破碎区和微裂纹构成[照片 3(c,d)]。当我们仔细观察黑孔洞的深处时,看到极微小参差不齐的凹凸面,这一现象意味着这里曾是破裂的极微细区,即粉碎区。当光片加工时,由于矿晶粉碎致使散架形成了小黑洞。因而可以推测,照片 3(c,d) 中的黑孔洞是矿晶粉碎的区域,并且它们是在岩石达到完全破坏前形成的。从样品中的粉碎区(黑洞)、破碎区(灰色区)和裂纹等现象与地壳中断层物质(断层泥、断层碎屑与破碎带)来看,它们是非常的相似。这种相似性是否出于同样的力学机理?在震源物理研究中,我们知道,震源区地壳的应变速率是在 $10^{-15}/s$ 量级上,然而实验仅在 $10^{-8}/s$ 这一量级上。如果把实验中的应变速率降到与地壳的应变速率相当的量级时,上述现象是否就更逼近?这是将要深入研究的问题。

当施于岩石的外加载荷 σ_1 的作用下,岩石会发生应变,岩石沿 σ_1 方向的应变速率是由 σ_1 的增率所控制。然而,当 $\sigma_1 > C_0^1$ 的情况时,这时岩石的应力-应变关系是依赖于时间的。并且,只要能控制住 σ_1 的增率,就可使岩石以任何一种应变速率变形直至岩石破坏止。从我们实验 ($10^{-2}/s$ — $10^{-8}/s$) 的结果看出,7 种恒应变速率下破坏的岩石样品的显微镜观察表明:岩石内部的破坏状况有明显的差异,出现了 7 种不同的破坏。因此,当应变速率的变化范围向两端扩展时,就可以得到无数种不同的破坏现象。从这一层意义上说,只要我们适当地选定岩石的应变速率,我们就可得到与其对应破坏的岩石。这种破坏特征可能正是我们生产实践中需要的。因此,今后我们只要深入的研究出各种岩石在各种应变速率下所相对应的破坏状况。那么在生产实践中就可以利用它,取得我们心目中欲想得到的破坏状况。即人类可以用控制外加作用力的增率的办法达到控制人类所希望出现的破坏状况。

在野外考察时,经常会见到岩石变形的复杂现象,如褶皱、节理、砂岩中的砾石以某种方式排列,并被挤压成扁椭圆形等等。这些现象是与蠕变紧密相关的,但是它们的形成是与温度、压力紧密相关,特别是温度,都是接近于岩石的熔融温度的^⑨。本报告中的蠕变却是在室温条件下的蠕变,此刻岩石仍然为脆性性质,这种蠕变是岩石中以脆性破裂激发起的蠕变。由此看来,岩石的蠕变现象的机理不是唯一性的。对于脆性破裂激发的蠕变

现象,可能是地震的主要成因,是值得今后深入探讨的课题。

参 考 文 献

- [1] 陈 颛、姚孝新、谢洪森,1981. 辉长岩的破裂. 地震学报,3,321—327.
- [2] Bridgman, P. W., 1949. Volume changes in the plastic stages of simple compression. *J. Appl. Phys.*, **20**, 1241—1251.
- [3] Brace, W. F., Paulding, Jr. B. W., Scholz, C., 1966. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. *J. Geophys. Res.*, **71**, 3939—3954.
- [4] 姚孝新、傅祖强、张来凤、赖德伦、阎 虹,1986. 对岩石本构关系中的新认识. 科学通报,20.
- [5] 姚孝新、赖德伦、张来凤,1988. 岩石强度降低的微观机理. 中国科学, B辑,5: 533—540.
- [6] Yanagidani, T., Ehara, S., Nishizawa, O. and Kusunose, K., 1985. Localization of dilatancy in Ohshima granite under constant uniaxial stress. *J. Geophys. Res.*, **90**, 6840—6858.
- [7] Brace, W. F., Silver, E., Hadley, K. and Geotze, C., 1972. Cracks and pores: a closer look. *Science*, **178**, 162—163.
- [8] Wong, T. E., Brace, W. F., 1979. Thermal expansion of rocks some measurement at high pressure. *Tectonophysics*, **57**, 95—117.
- [9] D. L. 特科特, G. 舒伯特,1986. 地球动力学,284,地震出版社.

EXPERIMENTAL RESEARCH ON ROCK FAILURE STATUS

YAO XIAOXIN, LAI DELUN AND ZHANG LAIFENG

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

Abstract

It is found with microscopic observation that under uniaxial compression, when the rate of axial strain changes from $10^{-3}/s$ to $10^{-8}/s$ or the pressure is constant, the failure status of gabbro samples shows significant variation. This phenomenon indicates that the time interval Δt from the start of the external force acting on the rock to the complete failure of the rock may affect the failure status in the rock. Further investigation of this phenomenon may improve our understanding of the process of earthquake occurrence.