

# 大孔隙率砂岩的试验研究

卢应发<sup>1</sup> 田 斌<sup>2</sup> 黄文捷<sup>3</sup> 邵建富<sup>4</sup>

(1 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074;

2 三峡大学 土木水电学院, 湖北 宜昌 443002;

3 广东沙角“ A ”电厂, 广东 东莞 523908; 4 里尔科技大学, 法国 59660)

**摘 要:** 对大孔隙率砂岩在不同饱和液体情况下的力学特性进行了试验研究, 以两种破坏理论对大孔隙率砂岩的破坏特征进行了解释. 试验证明: 大孔隙率砂岩存在临界围压, 随着围压的变化, 大孔隙率岩石以压剪破坏为主逐渐转化为以孔隙坍塌破坏为主; 在油水转化过程中, 也存在临界饱和度, 超过此临界饱和度, 岩石力学性质发生较大改变.

**关键词:** 大孔隙率砂岩; 油饱和; 水饱和; 力学特征

**中图分类号:** TU 458.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7037(2005)02-0056-03

研究大孔隙率岩石的力学特性不仅具有理论意义, 而且具有工程实践作用. 特别是在石油开采过程中, 由于石油贮存于大孔隙率岩石之中, 一方面必须研究大孔隙率岩石的石油开采技术, 另一方面必须研究开采后地表沉降. Doremus<sup>[1-4]</sup>研究了比利时烈日地区的大孔隙率砂岩力学特性, 并从试验出发, 以孔隙率( $\phi$ )对岩石强度的影响进行了分类(表 1). 葛洪魁及黄思静等分别对砂岩孔隙弹性特性和在水饱和情况下砂岩力学性质与地层条件之间的关系进行了一些实验研究和理论探讨<sup>[5,6]</sup>.

表 1 大孔隙率砂岩分类表 (%)

孔隙率	$\phi < 32$	$32 \leq \phi < 37$	$37 \leq \phi < 45$	$45 \leq \phi$
砂岩分类	小孔隙率	中孔隙率	大孔隙率	强孔隙率

## 1 试验目的和方法

本次试验研究目的就是分析水饱和与油饱和对大孔隙率砂岩力学性质影响, 探讨在石油开采过程中注水技术及地面沉降的机理和力学效应, 为工程处理技术及数值模拟提供室内依据.

本文研究的岩石为比利时烈日地区的大孔隙率砂岩, 是一种沉积岩, 微观电子扫描可以观察到: 砂岩由钙质粘粒骨架组成, 颗粒与颗粒间连结长度在 2~10 $\mu$ m 之间, 当然, 也可见 0.1~5 $\mu$ m 大小的空洞, 其组成约为体积的 1/2. 微观矿物组成分析显示, 约有 99% 钙质矿物( $\text{CaCO}_3$ )和 1% 硅质含量, 宏观上是均质和各向同性的.  $\phi$  约为

42.5%  $\pm$  0.5%, 有水时, 其比重  $\gamma$  为 19.7 kN/m<sup>3</sup>; 干燥时, 其比重  $\gamma_d$  为 15.4 kN/m<sup>3</sup>. 钙质颗粒比重为 27.2 kN/m<sup>3</sup>, 平均孔隙率为 42.2%, 属于大孔隙率砂岩.

试件加工成长 71.5 mm, 直径 35.5 mm 的圆柱形. 用油和水两种液体饱和岩石, 岩石在液体中浸泡三个月, 以充分混合和完成化学反应. 试验加载采用荷载控制, 由于加载速度增加, 引起岩石强度升高, 试验时控制加载速度是非常必要的. 但是加载速度太快, 容易产生孔隙水压力, 孔隙水压力对岩石强度也存在影响, 控制加载速度为 10<sup>-3</sup> MPa/s, 这个加载速度和比利时烈日大学加载速度一致, 接近静载荷试验, 便于实验结果比较. 试验时, 先将试件在水或油中饱和, 时间不小于 6 h, 当一边流出的液体流量近似等于另一边时, 则认为试件饱和. 试验温度保持在 21  $\pm$  1 $^{\circ}$ C. 试验机具有电液伺服功能, 应变测量采用大量程应变片, 误差 10%. 采用 Vishay4000 数据采集仪, 时间效应不考虑.

## 2 试验结果及分析

### 2.1 静水压力试验

静水压力试验主要研究大孔隙率砂岩的均质性和变形特性, 在油饱和及水饱和情况下, 实施三轴静水压力试验, 图 1 中三角形表示油饱和, 正方形是水饱和. 从图 1 可知, 大孔隙率砂岩静水压力应力-应变曲线可以划分为三个区域, 第一区域为弹

塑性区域, 在此区域, 颗粒与颗粒之间受力而压缩, 发生屈服; 第二区域为坍塌区域, 这是由于颗粒之间的连接键发生屈服破坏, 孔隙结构逐渐坍塌, 体积压缩; 第三区域为硬化区域, 特征是由于颗粒与颗粒间连接破坏, 颗粒间接触面增加, 塑性收缩下降而引起砂岩宏观硬化。同时可以观察到: 随着限制压力增加, 孔隙率下降, 钙质之间的连接发生破坏, 压缩模量增加, 试件体积变小, 即

$$\phi - \phi_0 \propto \epsilon, \quad (1)$$

式中,  $\phi$  为实际孔隙率;  $\phi_0$  为初始孔隙率;  $\epsilon$  为试件塑性体积变形。上式表明: 试件塑性变形基本上是由孔隙间不可逆变形引起。静水压力试验证明比利时烈日地区的大孔隙率砂岩各向异性特性不明显, 可不考虑。同时, 水饱和及油饱和的静水压力特征具有很大的差异性。饱和于水时, 初始塑性门槛值相对饱和于油中有所下降, 第三区域特征明显; 而饱和于油中, 初始屈服门槛值较大, 有时没有第三区域特征出现。

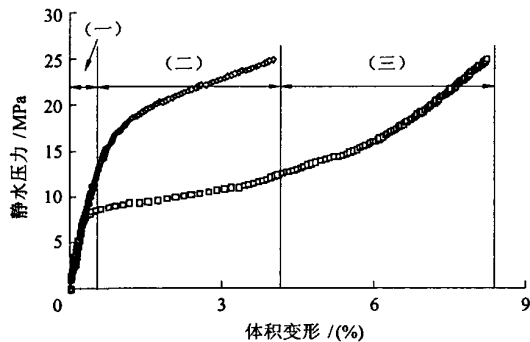


图 1 大孔隙率砂岩油饱和及水饱和静水压力试验结果

### 2.2 三轴压缩试验

以应力控制加载实施油饱和和三轴试验, 结果表明: 大孔隙率砂岩力学行为随围压变化而变化, 与小孔隙率岩石的力学行为差异较大。低围压时, 大孔隙率砂岩主要呈压剪破坏; 在中等围压时, 大孔隙率砂岩呈坍塌破坏; 在高围压时, 大孔隙率砂岩呈压硬破坏。图 2 中, 围压正方形为  $P_c = 1 \text{ MPa}$ , 三角形为  $P_c = 7 \text{ MPa}$ , 圆形为  $P_c = 20 \text{ MPa}$ 。

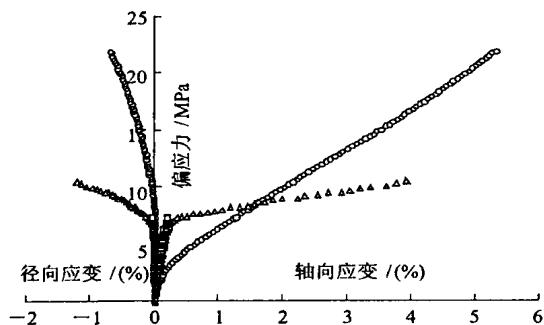


图 2 在三种不同围压下, 油饱和三轴试验结果

从图 2 可知, 在低围压 ( $1 \text{ MPa}$ ) 的初始段, 岩石存在线性阶段, 紧接着是塑性硬化阶段, 试件发生破坏, 其破坏方式相当于弹塑性破坏。试件屈服破坏是由于剪切带破坏而发生的, 且试件体积变形较小。可以认为是压剪破坏机理。当围压大于  $7 \text{ MPa}$ , 塑性压缩变形较大, 其破坏来自于孔隙坍塌破坏, 体积压缩变形变化较大, 且随围压增大而增大, 岩石力学强度也随围压增大而增大。

水及油饱和和三轴试验结果比较: 在相同围压和不同饱和液体情况下, 其力学行为具有较大差异性 (图 3)。

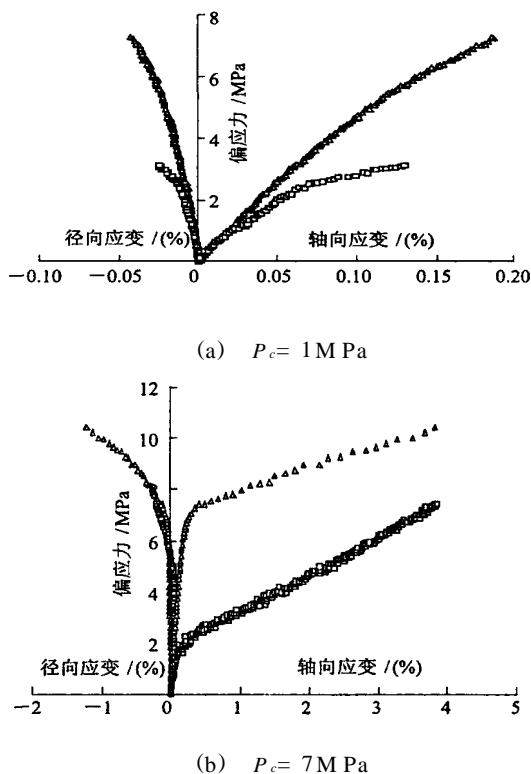


图 3 三轴试验结果比较

岩石饱和于水 (图 3 中曲线以正方形表示), 其初始屈服强度明显低于饱和于油 (图 3 中曲线以三角形表示), 饱和于水时, 岩石的峰值应力强度也明显小于饱和于油, 饱和于水时岩石的弹性模量也较饱和于油低。但在低围压 ( $1 \text{ MPa}$ ) 下, 两者力学行为均呈现压剪破坏, 在中等围压 ( $7 \text{ MPa}$ ) 下, 岩石试件压缩严重。

### 2.3 侧边卸载试验

首先对岩石施加静水压力荷载, 然后将两向围压卸载, 直至试件破坏。从图 4 可知, 在静水压力为  $30 \text{ MPa}$  时, 大孔隙率砂岩侧边卸载试验的径向变形比三轴压缩试验变形大, 这种力学现象的存在是对传统理论的挑战。

### 2.4 比例加载试验

比例加载试验就是保持轴向压力和围压恒定

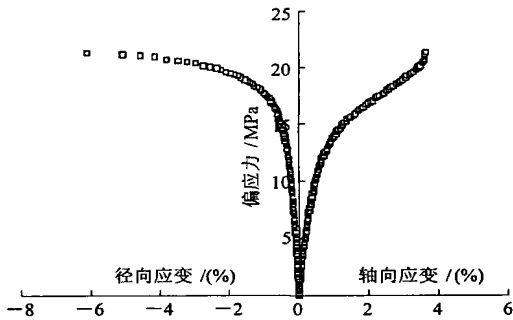


图4 油饱和和侧边卸载试验结果

( $\lambda = \sigma_{11} / \sigma_{22}$ ) 并对试件加载, 直至试件发生破坏

从图5可见, 在油饱和情况下, 大孔隙率砂岩也具有三个区域特征 另外, 通过注水试验表明, 在油饱和情况下, 当岩石中水含量达5%~7%时, 大孔隙率砂岩具有水饱和的基本力学特征

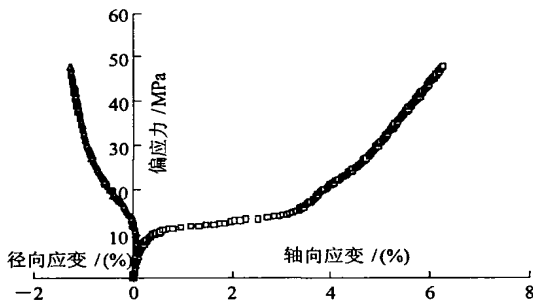


图5 比例加载系数  $\lambda = 2$  的试验结果

### 3 结 语

a 将岩石力学特性分为三个区域: 压剪破坏区域、坍塌区域和压硬破坏区域 对于不同饱和和液体, 在不同围压情况下, 岩石可能出现三种区域某种形式破坏或者其它 组合形式的破坏

b 在低围压情况下, 岩石以压剪破坏为主, 在高围压下, 岩石以坍塌破坏为主, 在压剪破坏转化为坍塌破坏过程中存在一临界围压值 同理, 在油饱和情况下, 注水驱油, 其水饱和度也存在一临界值, 超过此临界饱和度, 岩石强度下降, 模量减小

c 大孔隙率砂岩在油饱和情况下, 强度高和弹性模量大, 由压剪破坏转化为孔隙坍塌破坏临界围压值高, 在水饱和情况下, 其力学特征值相对油饱和而言降低, 这可以合理解释石油开采后, 地表沉降机理

### 参 考 文 献

- [1] Doremus M. A constitutive theory for the inelastic behaviour of rock [J]. Mechanics of Materials, 1978, (4): 67-93
- [2] Monjois J P. Response of a microcrack constitutive model for brittle rock [A]. Proceedings of the NARM '6 on Rock Mechanics [C]. Balkma, 1985. 1 707 -1 714
- [3] Monjois J P. The effect of inclusion shape on the elastic moduli of a two-phase material [J]. Int. J. Solids Structures, 1989, (2): 1-8
- [4] Monjois J P. Some basic stress diffusion solution for fluid saturated elastic porous media with compressible constituent [J]. Reviews of Geophysics & Space, 1990, (14): 227-241.
- [5] 葛洪魁, 韩德华, 陈 颢. 砂岩孔隙弹性特性的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 332-337.
- [6] 黄思静, 单钰铭, 刘维国, 等. 储层砂岩岩石力学性质与地层条件的关系研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 454-459.

### Laboratory Study of Sandstone with Large Porosity

LU Ying-fa<sup>1</sup> TIAN Bin<sup>2</sup> HUANG Wen-jie<sup>3</sup> SHAO Jian-fu<sup>4</sup>

(1. School of Civil Eng. & Mechanics, HUST, Wuhan 430074, China;

2. College of Civil & Hydroelectric Eng., Three Gorges Univ., Yichang 443 002, China;

3. Shajiao 'A' Electrical Factory, Dongguan 523908, China;

4. Univ. of Sci. & Technologies of Lille, Lille 59660, France)

**Abstract** The experimental study is performed on the mechanical behaviors of rock with large porosity. Two kinds of failure theories are used to explain the failure types of sandstone with large porosity based on the experimental results under different saturated liquid conditions. The existence of threshold confining pressure is proved during the process from the mainly deviatoric stress failure to the mainly slough failure. A critical saturated degree also exists during the changing processes from oil saturation to water saturation. When the water saturated degree is above the critical value, the mechanical features of sandstone with large porosity are changed clearly.

**Key words:** sandstone with large porosity; oil saturation; water saturation; mechanical behavior