

# 泥页岩三轴试验及其井壁稳定性研究

李 荣, 韩 林, 孟英峰 (西南石油学院石油工程系, 四川 成都 610500)

刘玖沸 (塔里木油田塔西南勘探公司, 新疆 库尔勒 841000)

何世明 (西南石油学院石油工程系, 四川 成都 610500)

**[摘要]** 在钻井过程中, 泥页岩井眼最容易发生井壁失稳, 经常出现井壁的坍塌、剥落掉块以及缩径等问题, 严重的影响施工进度, 造成巨大的经济浪费。而泥页岩井壁稳定性研究的基础就是要准确求出相应的岩石力学参数, 根据试验得出的岩石力学参数才能较好的进行力学性质分析并确定出钻井液密度安全窗口。采用三轴岩石力学试验机进行泥页岩三轴试验, 根据试验得出的静态弹性模量、泊松比、抗压强度、内聚力、内摩擦角等岩石力学特性参数, 对泥页岩井壁进行了力学分析, 并求出了包括坍塌压力和破裂压力在内的钻井液密度安全窗口, 为该工区的井壁坍塌问题找到了原因。

**[关键词]** 三轴应力; 泥页岩; 岩心试验; 井壁稳定

**[中图分类号]** TE26

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1000-9752 (2005) 05-0768-02

## 1 泥页岩三轴试验

泥页岩的三轴应力试验在美国 GCTS 公司的 RTR-1000 岩心试验机上进行。岩石试样配有橡胶密封膜, 三轴试验在三轴压力室内进行。压力系统最大可提供 140MPa 的围压, 可保持试验进程的稳定性<sup>[1]</sup>。从测试中的测量记录可得到应力对轴向和径向的应变比率、体积应变、岩石强度、正切和正割的杨式模量、泊松比、内聚力、内摩擦角等参数。试验的岩心都来自同一口井, 井深为 1896.5m, 1# 岩样  $\varnothing 24.91\text{mm}$ , 高度 53.91mm, 密度  $2.586\text{g/cm}^3$ ; 2# 岩样  $\varnothing 24.52\text{mm}$ , 高度 54.51mm, 密度  $2.679\text{g/cm}^3$ ; 3# 岩样  $\varnothing 24.49\text{mm}$ , 高度 49.54mm, 密度  $2.65\text{g/cm}^3$ 。对围压下的泥页岩施加交变应力, 考虑在此情况下的应力应变情况, 并求取此时的弹性模量和泊松比, 同时进行一定围压下的泥页岩强度试验, 求泥页岩的内聚力和内摩擦角。结果见图 1。

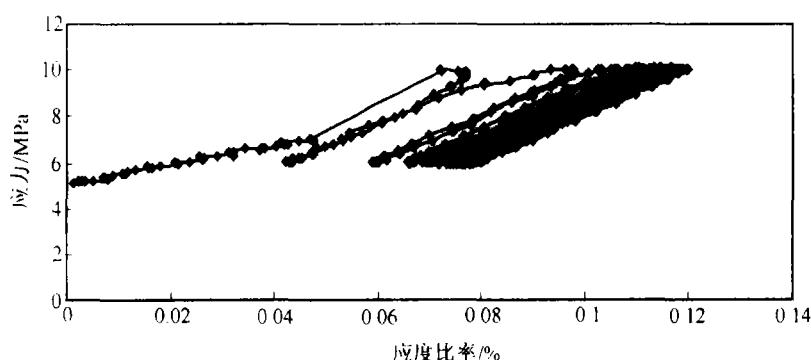


图 1 泥页岩的应力与应变关系图

由图 1 可以看出, 对泥页岩采用动态加载, 以正弦波的方式循环加载 10 次, 正弦波峰值为 10MPa, 平均值为 8MPa; 该泥页岩在正弦加载的时候呈现出明显的弹塑性特征, 随着正弦形应力的上下波动, 应变也随之上下波动, 表明具有弹性特征; 同时, 应变还呈现出逐渐增加的趋势, 表明具有塑性特征。

**[收稿日期]** 2005-05-24

**[作者简介]** 李荣 (1979-), 男, 2002 年大学毕业, 博士生, 现在从事钻井参数优选、欠平衡钻井、岩石力学等方面的学习以及研究工作。

用 2# 和 3# 泥页岩在围压 7MPa 及 19MPa 条件下试验，得出了应变随时间的关系以及对应的抗压强度，于是得到该地区泥页岩不同围压下的抗压强度以及通过破坏应力圆求出的内聚力和内摩擦角。该井段泥页岩的三轴试验结果如表 1 所示。

表 1 井深为 1896.5m~1899m 的泥页岩岩石力学参数测定结果

岩心号	围压/MPa	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角/°
1#	6	41	1210	0.225	5.69	34
2#	7	47	1912	0.240		
3#	19	89	2114	0.311		

2 井壁稳定性研究

为了正确估算该井钻井液安全密度窗口的影响，需对坍塌压力和破裂压力所对应钻井液密度值分别进行计算<sup>[1]</sup>。

2.1 坍塌压力所对应的钻井液密度

当井壁围岩所受的切向应力和径向应力的差达到一定数值后，将形成剪切破坏，造成井眼坍塌，此时的钻井液的液柱压力即为地层坍塌压力。

由理论分析的结果可知，在小范围的围压下，采用线性屈服准则，即 Mohr-Coulomb 准则更为合适。考虑到地层岩石是非线性弹性体的实际情况，则可建立如下的地层坍塌压力所对应的钻井液密度计算模型：

ρ<sub>m</sub> = (η(3σ<sub>h</sub> - σ<sub>H</sub>) - 2CK + αP<sub>p</sub>(K<sup>2</sup> - 1)) / (K<sup>2</sup> + η)H × 100 (1)

式中，ρ<sub>m</sub> 为坍塌压力对应的钻井液密度，g/cm<sup>3</sup>；σ<sub>H</sub>，σ<sub>h</sub> 分别为水平最大最小主应力，MPa；K = arctg(π/4 - φ/2)；φ 为内摩擦角，(°)；C 为岩石粘聚力，MPa；α 为有效应力系数，无量纲；P<sub>p</sub> 为地层孔隙压力，MPa；H 为井深，m；η 为应力线性修正系数，无量纲。

2.2 破裂压力所对应的钻井液密度

从防止井壁岩石结构破坏的意义上考虑，对于直井，在井壁处有破裂压力所对应的钻井液密度为：

ρ<sub>i</sub> = (3σ<sub>h</sub> - σ<sub>H</sub> - αP<sub>p</sub> + S<sub>t</sub>) / H × 100 (2)

式中，ρ<sub>i</sub> 为破裂压力对应的钻井液密度，g/cm<sup>3</sup>；S<sub>t</sub> = cosφ / (6 - 6sinφ) 为岩石抗拉强度，MPa。

2.3 钻井液安全密度窗口的计算结果

钻井过程中的钻井液密度大小的设计，要求不仅能保持井内压力平衡，避免地层流体大量流入井内，造成地层流体对钻井泥浆的污染，以及井涌，井喷、压差卡钻等工程问题，还要能够保持井壁稳定。所以，在平衡钻井中，泥浆柱压力要求既要大于坍塌压力，又不能小于地层破裂压力。如果钻井液密度低于地层坍塌压力，则井壁岩石将发生坍塌、缩径；如果钻井液密度超过地层破裂压力，则意味着井壁岩石结构被破坏，地层发生破裂。因此，钻井液的安全密度窗口应该为 ρ<sub>m</sub> < ρ < ρ<sub>i</sub>。

该地区的地应力梯度为 2.73MPa/100m 和 1.82MPa/100m 时，有效应力系数取 0.4，应力线性修正系数取 0.95，地层孔隙压力为 1.13g/cm<sup>3</sup>。根据式 (1)，(2)，结合该井段泥页岩三轴试验结果，代入相应的岩石力学参数，可以求出该处的钻井液的安全密度窗口为：1.47g/cm<sup>3</sup> < ρ < 2.34 g/cm<sup>3</sup>。该计算结果表明此井段的钻井液安全密度窗口下限，即坍塌压力较大，而当时此井段为了实现近平衡钻井，采用 1.22g/cm<sup>3</sup> 的钻井液。泥页岩井壁易发生力学失稳，所以出现井壁坍塌在所难免。

本研究没有考虑泥页岩的水化作用，下一步将对此进行深入分析。

[参考文献]

[1] 罗健生，焉捷年. 页岩水化对其力学性质和井壁稳定性的影响 [J]. 石油钻采工艺，1999，21 (2)，7~13.

[编辑] 苏开科