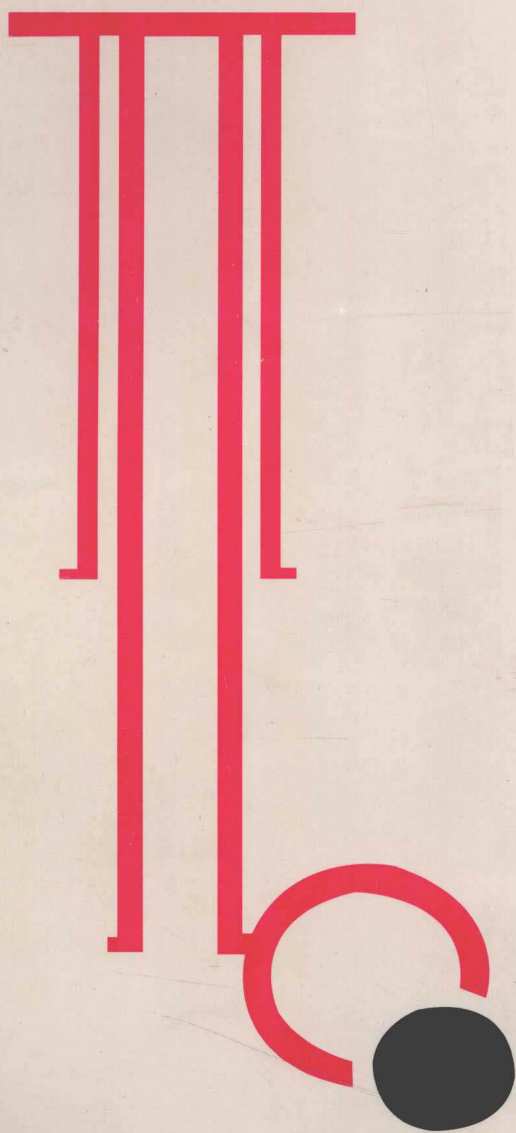


国外力学和化学稳定井壁 机理和方法的调研

中国石油天然气总公司
石油信息研究所



国外力学和化学稳定井壁机理和方法的调研 (内部发行)

编辑: 中国石油天然气总公司信息研究所

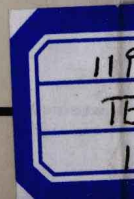
印刷: 石油出版社印刷厂

发行: 中国石油天然气总公司信息研究所
(北京安外安贞里二区三号楼)

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 · 印张 10.2

字数: 26 万 印数: 1—1000

油所(单): 9709 工本费: 50 元
邮编: 100011



目 录

第一章:稳定井壁机理的研究	(1)
一、井壁稳定力学因素的研究	(1)
(一)井眼稳定研究和建立力学模型	(1)
(二)确定地应力的方法	(2)
(三)岩石材料的特性及有关的岩石试验	(7)
(四)井眼围岩的应力分析	(25)
(五)地层的水化对井眼周围岩石应力的影响	(34)
(六)划分岩石强度的准则	(36)
(七)地层破碎或有裂缝	(43)
(八)岩石结构对井眼稳定的影响	(45)
二、井壁稳定的物理化学因素的研究	(46)
(一)页岩特性的分析方法	(46)
(二)评价井壁稳定性的室内试验方法	(53)
(三)页岩地层的分类方法	(66)
(四)页岩的水化膨胀和分散特性	(67)
(五)影响页岩水化和膨胀的因素	(69)
(六)无机盐与页岩水化膨胀和分散特性之间的关系	(70)
(七) K^+ 、 NH_4^+ 抑制页岩水化机理的研究	(74)
(八)聚合物稳定页岩的作用机理	(74)
(九)聚合物与盐类的复配对页岩稳定性的影响	(77)
(十)氢氧根离子对页岩稳定性的影响	(78)
(十一)沥青类产品防塌机理的研究	(78)
三、井壁稳定的化学与力学与耦合研究	(79)
(一)理论研究	(80)
(二)实验研究方法	(97)
第二章:稳定井壁的技术措施	(97)
(一)设计合理的钻井液密度	(97)
(二)选择风险小的井眼轨迹	(105)
(三)利用测井资料确定井壁稳定的泥浆密度安全窗口	(110)
(四)由页岩的比表面积及介电常数确定井壁稳定的泥浆密度	(111)
(五)提高钻井液的抑制性	(113)
(六)利用“封堵”原理形成物理屏障	(130)
(七)利用活度原理平衡总势能	(139)
(八)其它方法	(142)
第三章:我国井壁稳定技术的研究现状及今后发展方向	(144)
一、我国井壁稳定技术的研究简况	(144)
二、我国井壁稳定技术今后研究方向	(157)
主要参考文献	(159)

井壁失稳一直是困扰石油工业界的一个大问题。据保守的估计,井壁失稳每年约会给世界石油工业造成约5—6亿美元的损失。因为井壁稳定是一个十分复杂且带有世界性的难题,各国石油工作者均对此问题进行了大量研究,取得了大量研究成果,并找出了一系列克服井壁失稳的方法。我国在钻井过程中也经常遇到井壁不稳定问题。为了更好在解决并眼稳定问题,从国外找到一些可借鉴的经验。我们收集了国外1980~1996年上半年的井壁稳定文献,经分析和提炼编成综述,以供大家参考和借鉴。

就一口井而言,约有75%的地层是由页岩组成的,而90%的井壁失稳发生在页岩段。

井壁不稳定情况可能有几种类型(见图1-1)。当塑性岩石被挤入并眼时,就会发生并眼缩径,而页岩坍塌或硬岩石剥落会引起并径扩大。如果并内泥浆液柱压力太高,则因地层会遭到意外水力压裂,而导致并漏;如果并内液柱压力太低,井壁就可能坍塌。地层流体的涌出可导致固体颗粒侵入并眼。泥页岩水化膨胀会加剧并眼坍塌,并眼不稳定还会引起卡钻,以及挤毁套管或尾管。这些复杂情况可能会导致侧钻新并眼或油井报废。

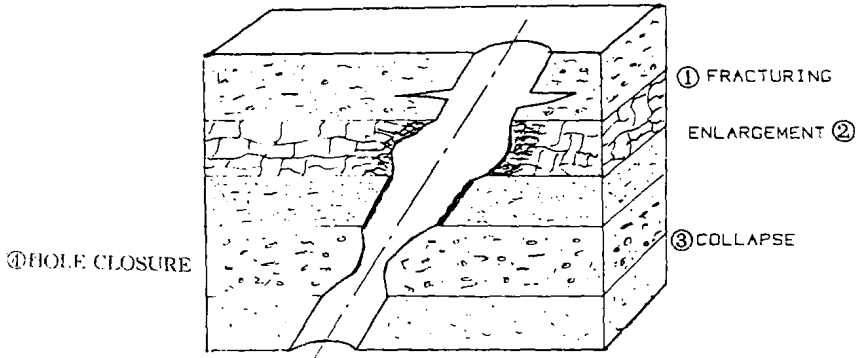


图1-1 井眼不稳定情况的类型
①破裂; ②扩大; ③坍塌; ④缩径

泥页岩发生井壁失稳的因素大体可分为三个方面:一是地层力学因素;二是物理化学因素。三是水力因素,上述三个因素最终均归结为力学不稳定。

第一章 稳定井壁机理的研究

一、井壁稳定力学因素的研究

(一)井眼稳定研究建立的力学模型

任何一口井开钻前,原地应力就已存在于地层岩石中(图1-2)。这些压力可分为上覆压力 σ_v 、最大水平地应力 σ_H 和最小水平地应力 σ_h 。并眼钻开后,泥浆液柱压力取代了所钻岩层提供的支撑,引起并眼周围岩石应力重新分布。这重新分布的应力可称为沿并眼环向应力 σ_θ 、沿并眼径向应力 σ_r 、沿并眼轴向应力 σ_z 。在斜井中还包括剪切应力分量 $\tau_{\theta z}$ 。

如果重新分布的应力超过岩石强度所能承受的程度(不管是抗拉强度还是抗压强度),将

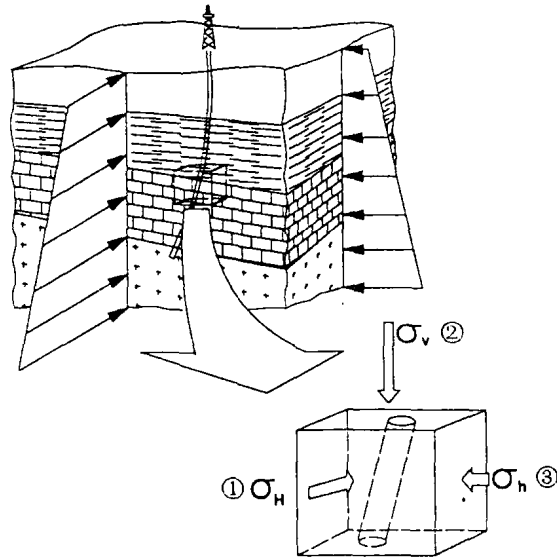


图 1-2 原地应力场

①最大水平应力； ②垂直应力； ③最小水平应力

会导致井壁失稳。为了评价井眼稳定性，必须先了解地应力，然后必须采用符合实际的本构模型来计算井眼周围的应力或应变。计算出的应力或应变必须与给定的屈服准则相对照。

(二) 确定地应力的方法

确定地应力的大小和方向是井壁稳定力学研究的第一步。

岩石是地球表层的物质，在漫长的地质年代里，由于地质构造运动等原因使地壳物质产生了内力效应，这种应力称为地应力，它是地壳应力的统称。

1. 上覆应力 σ_v

假设原地主应力之一是垂直的(上覆压力)，深度 Z 处的原地垂直应力可通过对邻井密度测井资料积分而得到：

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(Z)g dz \quad (1-1)$$

式中 z ——深度

g ——重力加速度常数

$\rho(Z)$ ——地层密度

若密度测井曲线所标明的深度不是真正的垂深，软件可在积分计算之前将深度转换成垂深。

2. 最小水平地应力 σ_h

由小型压裂(小容量水力压裂)后记录下来的瞬时关井压力(ISIP)提供了原地主应力的另一个分量——原地最小水平主应力 σ_h 的值。

表 1-1 是加拿大西部沉积盆地的各种最小水平主应力的数据。

表 1-1 加拿大西部原地地应力原始数据表

应力	数据点	井位数	平均值 (千帕/米)	方 法
σ_v	1 1 9	— — 9	24.5 27.7 24.7±0.6	山前沉积层使用的最小密度为 2.5 克/厘米 ³ 山前沉积层使用的最大密度为 2.8 克/厘米 ³ 阿尔伯达密度测井
σ_h	2 330 3 20 140	1 330 3 4 12	19.0 19.2±1.4 20.6±4.6 19.7±1.6 17.7±1.7	套取岩心 水力压裂瞬时关井压力 山前带小型压裂应力值 山前带附近进行小型压裂 平原小型压裂和水力压裂
σ_H	2 3 10 4	1 3 3 4	28.0 28.8±10.9 27.0±2.6 19.3±2.2	套取岩芯 山前带小型压裂 山前带附近进行小型压裂 平原小型压裂
σ_H 的 方位	2 3 2 2083	2 2 2 154	45° 55°—90° 39°—49° 东北—西南(45°)	由水力压裂方向推断 套取岩芯 上倾层滑距 压裂

注：±=90%置信度。

3. 最大水平地应力 σ_H

已知破裂压力 P_b ，用下列方程可求出最大水平地应力：

$$\sigma_H = 3\sigma_h - P_b - P_0 + T \quad (1-2)$$

式中： P_0 ——地层流体孔隙压力

T ——岩石抗拉强度

由地层倾角仪测水平主应力的方向(见图 1-3)，四臂地层倾角仪有 4 个衬垫式电极，四臂互成 90°角，每个臂靠可控的弹簧片压在井壁上，四个电极是两对相互独立的测径器，分别测量 1、3 和 2、4 臂方向的井眼直径。由于弹簧片的作用，使电极能与椭圆井眼的长短轴共线。仪器上提时能自动旋转，在仪器的臂 1 方向装有磁性罗盘定位仪，可标记仪器在井眼内的旋转方向及各臂的位置与磁北间的夹角。每个电极臂长 30cm，宽 6cm，当井壁上的崩落掉块的长度大于 30cm 且宽大于 6cm，并径差大于 6cm 时，电极臂就会进入此掉块槽内停止旋转。从而可记录下此崩落掉块槽所处的位置亦即椭圆井眼长短轴的方向。最近斯伦贝谢公司又研究出了超声井壁成象(UBI)和微电阻井壁成象(FMI)等井下电视来观察井眼的坍塌和破裂情况。哈里伯顿能源服务公司的 Peng Lin 研制了一种新的六臂测地应力方向和岩石特性的仪器。增大封隔段的压力使地层压开裂缝并由六臂位移计测出井壁上各点的位移值，从而可确定地应力的大小及方位。根据压力和位移的数值可确定地层的弹性和强度参数。

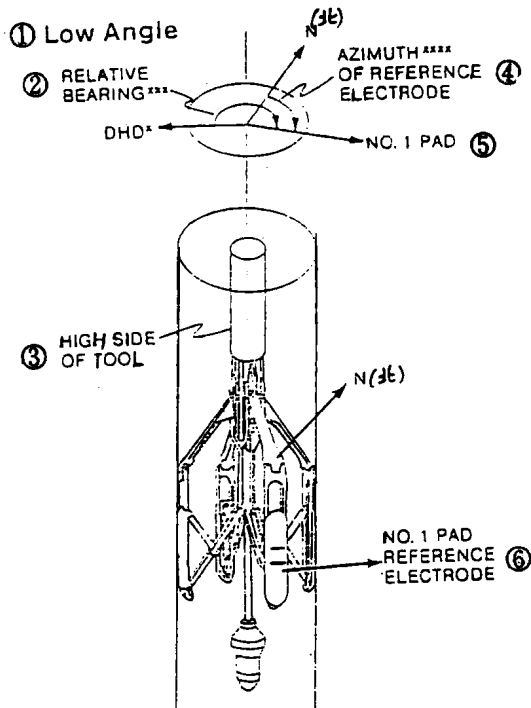


图 1—3 地层倾角仪外形图

①低角；②相对方位；③仪器的高侧；④参考电极的方位；⑤1号臂；⑥参考电极

值得提到的是 Schlumberger 剑桥研究中心的 Thiercelin 和 Desroches 于 1993 研究成电缆式水压致裂地应力测量仪器(电缆式微压震仪)为深层地应力测试提供了新的手段。

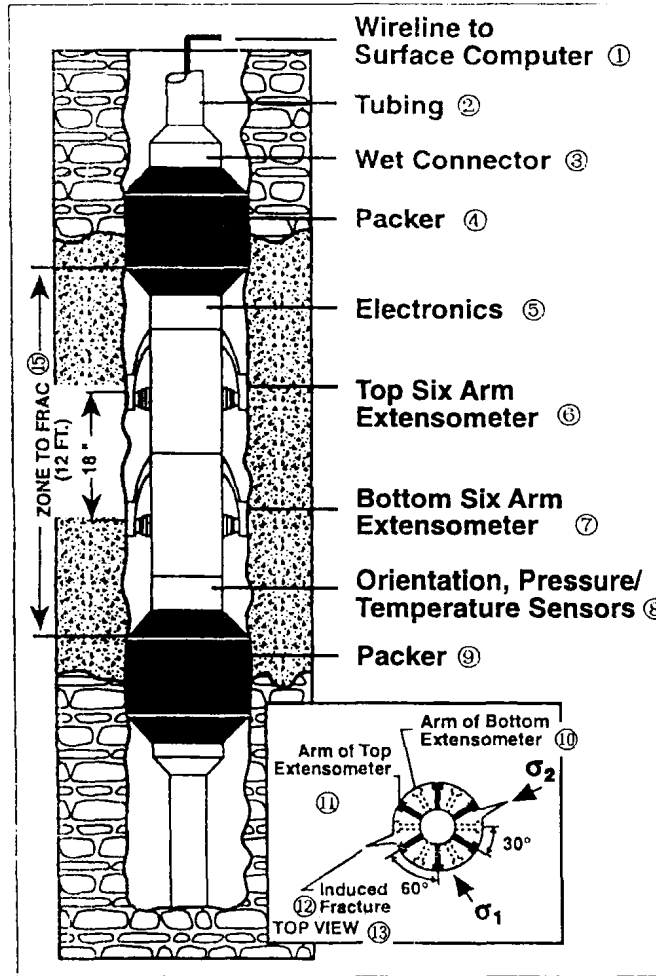
微压裂(Minifracture)是近代国外广泛应用于层间地应力的测试设备,由于封隔器间距可控制压裂层段,裂缝尺寸较小,一般为 2—4 米长,对地层损害少,与井径相比,又足以测出远场的最小应力,所以被认为数据比较可靠。但是需要用钻杆或油管下井,压裂液体需由地面原供给,十分不便且钻杆或井筒的容积大,会影响测试结果。新型的电缆式微压裂仪是把泵装在下井仪器中,它是在 Schlumberger 公司的 MDT(标准地层动态测试仪)基础上设计成的。它包括两个主要部分(见图 1—5)。

①封隔器组件:为骑跨式,可将测试井段封隔,长度为 1 米,封隔器内和测试的压力可同时测出进行适时分析。

②泵出组件:可使操作者对封隔器或测试地层加压,最大泵速为 1 升/分,符合对低渗地层的测试要求。由于泵装在下井仪器中,可避免井筒、钻杆容积的影响,最大压差可达 28 MPa,但是,对于工程来说,对页岩和渗透性地层的地应力测试更为重要。由于井壁的垮塌,井眼扩大,使得页岩段难以封隔,主要问题是地层压裂之前,压力已达到封隔器破裂水平。在高孔隙度,低渗透性地层,封隔器的膨胀压力与地层的破裂压力非常接近,也给测试带来了困难。为了解决这个问题,该研究中心又研究了把套袖压裂和水力压裂相结合的技术。先对套袖(轴套)封隔器加压;使测试段地层起裂,然后再使上下骑跨式拍克涨开以封隔测试井段,将轴套卸压,往测试

井段注液加压以延伸裂缝,完成测试任务。1994年曾将此技术在页岩、泥浆和砂岩地层进行过测试,获得成功。此技术对于弱地层的的地应力测试为首选方法。

对于高渗地层的测试(例如为导流设计而确定层间地应力差或进行定向设计的需要),上述方法的缺点是不能给出大泵量。此问题可改用优良的高粘性小滤失的液体加以解决。



Extensometer features. ⑭

图 1-4 位移计简图

- ①与地面计算机连线;②钻柱;③湿接头;④封隔器;⑤电子件;⑥上部六臂位移计;⑦下部六臂位移计;
- ⑧定位,压力/温度传感器;⑨封隔器;⑩下部位移计的臂;⑪上部位移计的臂;⑫产生的裂缝;
- ⑬俯视图;⑭位移计简图;⑮裂缝区

该公司认为,有了可靠的工具,将来地应力测试会成为石油工业中的一种常规测试项目。

对于深层地应力测试,目前也发展了众多的室内用岩心(最好有定向岩心)的测试方法。其中主要应用了岩石对其加载历史是有记忆特性的原理,开发出了差应变分析(DSA)、声发射凯塞效应法(AFM)和滞弹性应变恢复松弛分析(ASR)等,目前尚处于研究发展阶段。其中的ASR方法已由美国的 Terra Tek 公司研制出三维ASR仪器,为便携式,装在一个恒温箱中,有6个应变传感器随时测出6个方向上的滞弹性应变的恢复值,并通过微机采集处理,数据比较

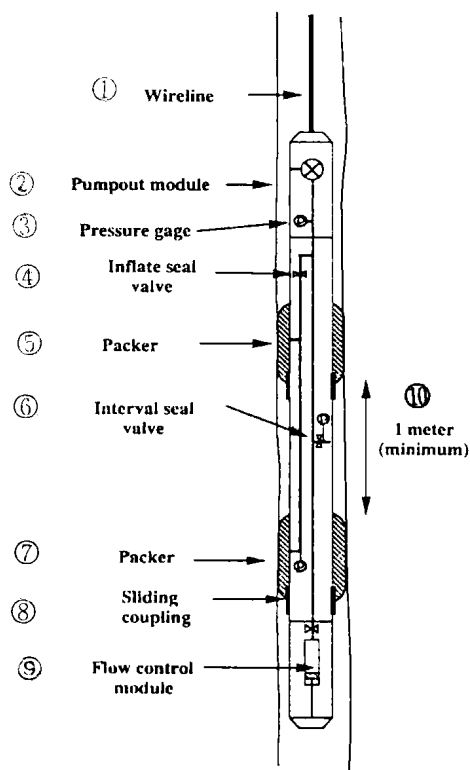


图 1-5 电缆式微压裂地应力测试仪

① 电缆；② 泵出组件；③ 压力计；④ 充压阀；⑤ 封隔器；⑥ 井段封隔阀；
⑦ 封隔器；⑧ 滑块；⑨ 流量控制件；⑩ 1 米（最小）

准确。如岩心为定向的，这些方法可同时测出主地应力值及其方位来。关于地应力测量的方法及文献还有很多，不一一列举。

4. 孔隙压力 P。

井眼稳定计算取决于有效应力。因此很有必要精确地预测孔隙压力。

预测方法有好几种，基本上可分为直接法和间接法。

直接测量孔隙压力的方法是通过收集实际应力条件下有孔隙流体的岩样来进行（重复式地层测试器）。此法通常只对储层岩样进行这种测试。

对于非储层岩石，采用间接法具有优越性。这种方法主要是建立一条砂泥岩地层的正常孔隙压力剖面的趋势线，而后检验孔隙压力偏离该条趋势线的程度（异常孔隙压力）。根据所采用的以下数据，间接预测法可进一步分为三种方法。

1. 钻井数据；
2. 测井数据；
3. 地质显示。

应用前两种方法时，重要的是应在可靠的资料基础上建立该地区的孔隙压力趋势线。否

则,这条趋势线若有一点偏移,估计孔隙压力时,就会产生很大误差。因而有必要采用不同方法并在它们之间作对比。

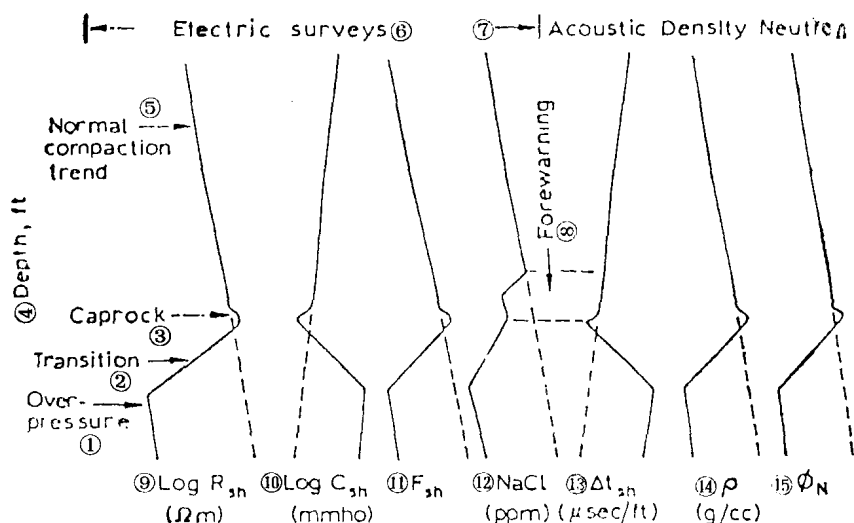


图 1-6 常压地层和过压地层的测井响应图

- ①过压;②过渡带;③盖层岩石;④深度,英尺;⑤正常的压实趋势;⑥电测;⑦声波密度中子;
⑧预先报警;⑨页岩电阻率(R_{sh})测井,欧姆;⑩页岩电导率(C_{sh})测井,毫姆欧;
⑪页岩地层因子;⑫氯化钠,ppm;⑬页岩声波时差(Δt_{sh})微秒/英尺;⑭密度(克/厘米³);⑮中子孔隙度

图 1-6 总结了常压地层和过压地层的不同测井响应。

由于异常高的孔隙压力可能与某些沉积条件有关,因而可以用地质显示来检验预测的准确度。

在地堑区域(如北海),砂/粘土按顺序迅速沉积,粘土很容易覆盖在砂岩体上,并形成渗透性阻挡层。在这样的砂岩层顶部继续沉积,将使孔隙中的流体不能流出,从而导致孔隙压力增加,这与水下 400—500 米深度的沉积情况相关,它常常用化石含量来进行检验。

另外,也可将页岩中膨胀性粘土(蒙脱石)的含量作为异常高孔隙压力的一种指示,这是因为这些粘土的含量一般随深度的增加而减少。如果膨胀性粘土含量不随深度的增加而增加,那就是可能要遇到高孔隙压力的一种指示。

(三)岩石材料的特性及有关的岩石试验

对井眼稳定性进行解析及数值预测时,关键在于考虑垂直于井眼轴线的平面上出现的应力,以及这些应力与周围材料强度的对比情况。为了消除材料性能及边界条件方面出现的一些不确定因素,必须做室内模拟试验。

1. 三轴试验

试验用两种岩石:一种是人造的软岩石,另一种则为致密的 GOV 砂岩。由于大多数预测方法只能模拟各向同性材料,因此这项试验没有考虑各向异性和横向各向同性材料。试验用的

软砂岩是由水泥和粒度均匀的砂粒混合物制成的,将这种混合物分层倒入模具,在模具内分层压实。以这种方式制成的岩块其密度最合适且非常均匀。为了确保获得一些具有代表性的数据以输入数值模型中,在这种砂岩上进行了标准的三轴试验。图 1—7—图 1—9 是这两种砂岩的应力-应变曲线、模量随围压变化的曲线及破坏包络线。有关砂岩机械性能和物理性能的更详细资料见表 1—2。

硬砂岩的最大强度包络线是一条曲线,因此,如果假设破坏包络线是一条直线,则会过高地估计材料在受围压作用时的强度。

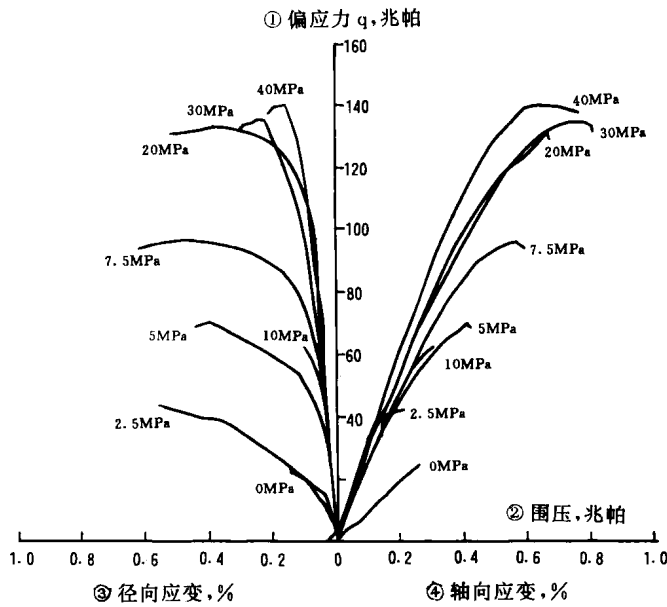


图 1—7a 硬砂岩的应力-应变曲线

①偏应力 q , 兆帕; ②围压, 兆帕; ③径向应变, %; ④轴向应变, %

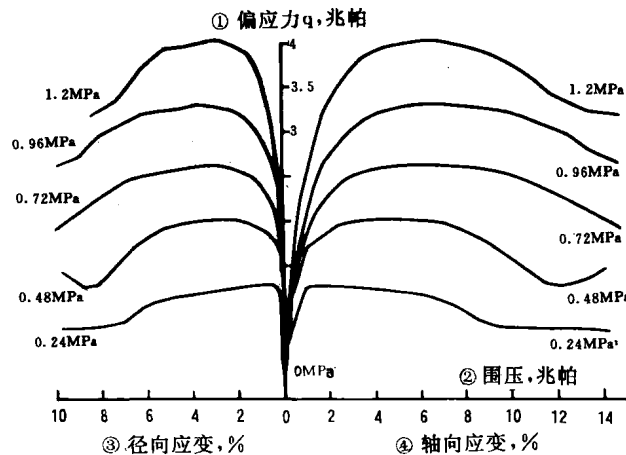


图 1—7b 软砂岩的应力-应变曲线

①偏应力 q , 兆帕; ②围压, 兆帕; ③径向应变, %; ④轴向应变, %

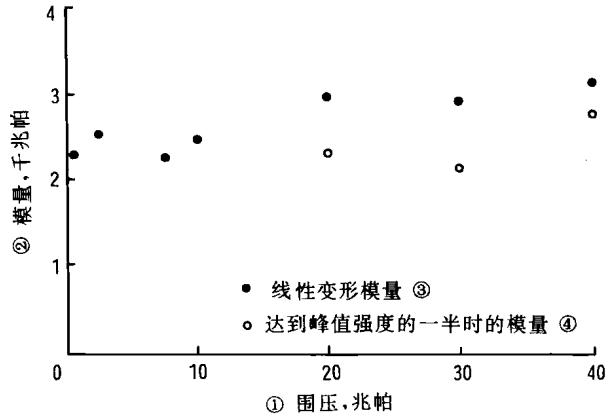


图 1—8a 硬砂岩模量随围压变化的情况

①围压,兆帕;②模量,千兆帕;③线性变形模量;④达到峰值强度的一半时的模量

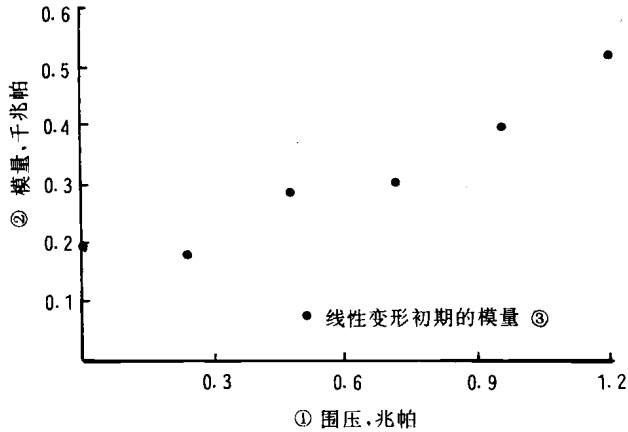


图 1—8b 软砂岩模量随围压变化的情况

①围压,兆帕;②模量,千兆帕;③线性变形初期的模量

2. 模拟斜井眼的多轴试验

原地应力场包括三个相互垂直的独立应力场。在实验室内可通过给一块立方体岩样的相对面施加三个独立的应力来再现这样的应力场。只要不违背砂岩的破坏条件,用这种方法就可以模拟任何大小的应力比值。岩样是 0.125 米^3 的正方体岩样,井眼模型的直径是 5.08 cm (2 英寸)。为减少岩样与加载板之间的摩擦力,试验中采用摩擦力很小的界面。为估计井眼何时开始出现不稳定情况,采用了内径规测量孔径随外力的增加出现的变化量,而且还使用了插入式传感器和声波发射装置作为支持系统,以检测孔眼是否开始破坏。孔眼是在两种不同条件下钻成的。进行软砂岩试验时,将岩块装入多轴试验腔中,给岩块施加一个小应力,然后钻孔眼,

进行硬砂岩试验时,先在常压下钻成孔眼,而后将钻有孔眼的岩块装入多轴试验装置内。按事先设计的应力比值逐渐增大作用在岩块各面上的三对应力,直至孔眼破坏为止。软砂岩试验中,外应力的增加幅度很小,而在硬砂岩试验中,外应力的增加幅度则很大。试验时,岩样孔隙压力维持常压。表 1—3 是研究应力各向异性、井斜角及方位角对井眼稳定性影响的试验方案。

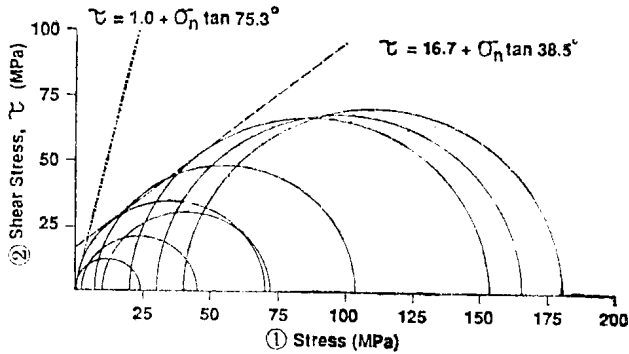


图 1—9a 硬砂岩的 Mohr—Coulomb 包络线

①应力,兆帕;②剪切应力 τ,兆帕

模拟井眼的井斜角是指井眼相对于最大应力 σ_v 的倾角,最大应力 σ_v 相当于原生的垂直上覆岩层应力。斜井的方位角以它相对于最大水平应力 σ_H 的角度来表示。

表 1—4 列出在模拟井眼发生破坏的时刻施加在岩样上的外部边界应力。

应力各向异性的影响:由表 1—4 看出平行于井眼方向的应力对井眼稳定性的影响极小,当 $\sigma_H/\sigma_h=0.6$ 时,软砂岩岩块发生破坏时的边界应力低于应力各向同性岩块发生破坏时的应力。

井斜角的影响:当垂直应力不等于水平应力时,井斜角对井眼稳定性有影响。试样 2.2—2.4 就是研究这种影响的,井斜角为 0° 、 30° 、 60° ,引起井眼破坏的边界应力随井斜角的增大而减小,图 1—10 比较了使砂岩岩样破坏所需的实测水平应力值和预测值。

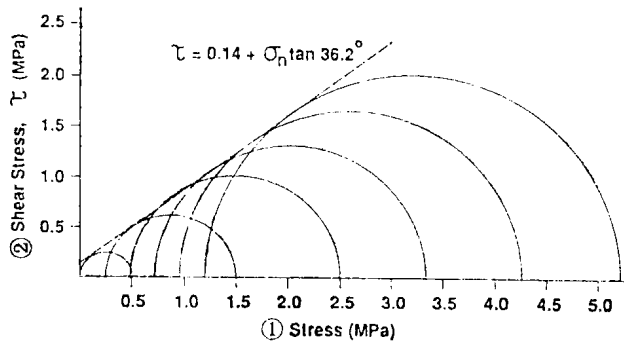


图 1—9b 软砂岩的 Mohr—Coulomb 包络线

①应力,兆帕;②剪切应力 τ,兆帕

表 1—2 砂岩的物理性能和机械性能

性 能		软 砂 岩	硬 砂 岩
中等粒度(毫米)		0.15	—
孔隙度(%)		39.5	15.3
不受围限应力作用时的抗压强度(兆帕)		0.5	24.4
杨氏模量(千兆帕)		0.19	0.99
平均初始模量(千兆帕)		0.31	2.44
平均泊松比		0.24	0.18
摩擦角	屈 服	35.8°	51.2°
内聚力(兆帕)	强 度	0.08	4.0
摩擦角	最 大	36.2°	38.5°
内聚力(兆帕)	强 度	0.14	16.5

表 1—3 井眼稳定试验方案

试验岩样	各向异性应力		井眼轨迹		砂 岩
	σ_v/σ_H	σ_H/σ_h	井斜角	方位角	
2.1	1.0	1.0	0°	—	软砂岩
2.2	1.6	1.0	0°	—	软砂岩
2.3	1.6	1.0	30°	—	软砂岩
2.4	1.6	1.0	60°	—	软砂岩
2.5	1.25	2.0	45	0°	软砂岩
2.6	1.25	2.0	45°	90°	软砂岩
2.7	1.25	2.0	45°	45°	软砂岩
3.1	1.0	1.0	0°	—	硬砂岩
3.2	1.6	1.0	0°	—	硬砂岩
3.3	1.54	1.18	0°	—	硬砂岩
3.4	1.25	2.0	0°	—	硬砂岩

表 1—4 使模拟井眼破坏所需的外力

试验岩块	外 部 边 界 应 力(兆帕)		
	σ_v	σ_H	σ_h
2.1	2.1	2.1	2.1
2.2	2.00—3.30	1.62—1.98	1.62—1.98
2.3	2.90—3.10	1.74—1.86	1.74—1.86
2.4	2.20	1.32	1.32
2.5	2.70	2.16	1.08
2.6	2.90	2.32	1.16
2.7	3.00	2.40	1.20
3.1	48.00	48.00	48.00
3.2	86.00	51.60	51.60
3.3	62.00	40.30	34.20
3.4	64.00	51.20	25.60

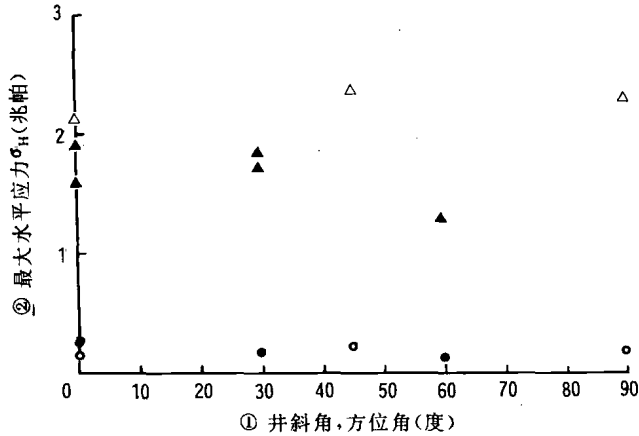


图 1—10 根据线弹性得出的预测值与岩样测试结果的比较

①井斜角,方位角(度);②最大水平应力 σ_H (兆帕)

表 1—4 中的试样 2.5—2.7 就是为了评价方位角对井眼稳定性的影响。在这些试验中,井斜角为 45° ,井眼方位角见表 1—3。表 1—4 表明,平行于最大水平地应力方向的井眼,其稳定性最差,最大水平地应力与最小水平地应力夹角的等分线方向上的井眼,其稳定性较强;平行于最小水平地应力方向的井眼比平行于最大水平地应力方向的井眼稳定得多。

此试验得出的结论是:①垂向地应力对井眼强度的影响微乎其微。②当水平地应力小于垂直地应力时,斜井的稳定性随井斜角增大而降低;③当三个主地应力不相等时,平行最小水平地应力方向的井眼比平行最大水平地应力方向的井眼稳定。

Santarelli 等人观察到由单轴或三轴试验确定的弹性模量随围压增加而增加(见图 1—11),他把弹性模量随围压的变化计入本构模型中,并假定割线模量 E_s 与最小主应力 σ_3 有如下幂律关系:

$$\text{当 } \sigma_3 \geq 0 \text{ 时 } E_s = E_0(1 + A\sigma_3^b)$$

$$\text{当 } \sigma_3 < 0 \text{ 时 } E_s = E_0$$

式中: E_0 是单轴模量, A 和 b 是常数。

Antheunis 和 Haimson 及 Herrick 通过室内试验,提出了尺寸对圆孔周围岩石屈服的影响。由于实验室设备的限制,Antheunis 只给出了尺寸影响而没给出结论性的结果;Haimson 和 Herrick 通过对 Alabama 石灰石的测定给出了在一定的井眼尺寸范围内表现出非常稳定的倾向(图 1—12a)。这些试验表明:对于直径大于某一尺寸(约为 6cm)的井眼,采用线—弹性理论并结合使用简单的屈服准则预测井壁开始屈服是完全适用的。小于 6cm 的孔,尺寸影响会在很大程度上提高孔的强度。因此,除非能使尺寸的影响量化,否则依据实验室内模拟定量地预测全尺寸井眼的稳定性是危险的。而实验室的模拟通常都是在直径为 1 英寸或更小的情况下进行的。

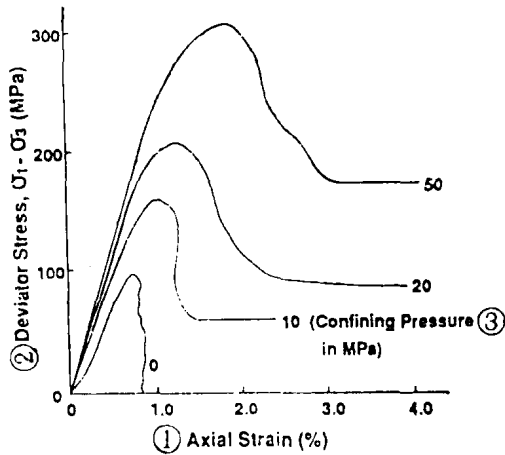


图 1-11 石炭系砂岩三轴试验数据
①轴向应变, %; ②偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$, 兆帕; ③围压, 兆帕

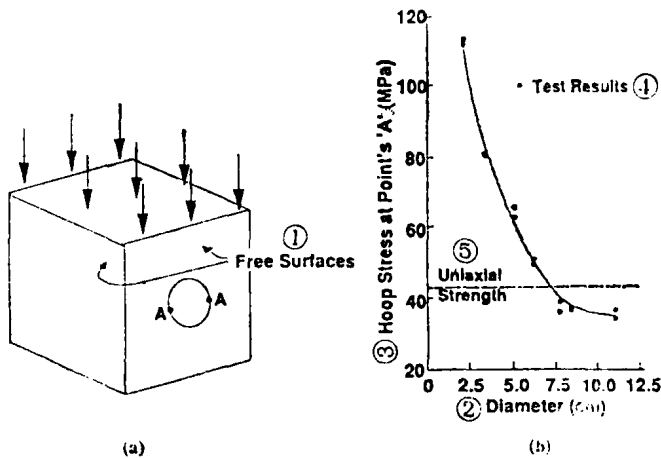


图 1-12 井眼直径对裂缝初始应力的影响

①自由面; ②直径, 厘米; ③A 点的环向应力, 兆帕; ④试验结果; ⑤单轴强度

Haimson 和 Herrick 建议, 全尺寸井眼中应力状态可由线—弹性模型给出, 他们的试验结果与用 Santarelli 的模型(该模型中采用了围压相关模量)计算的结果没有矛盾, 这是因为他们在测定岩心时应用了应力路径的概念。他们在岩块上钻孔, 且仅在一个方向加载(见图 1-12a), 在这个条件下整块岩心的最小主应力不是零就是拉应力。

由于一些不确定性, 特别是尺寸影响, 评价本构模型在井眼稳定性分析中应用的质量是困难的。只有更好地了解室内测定时岩心尺寸固有的影响, 才能正确判断本构模型与屈服准则定量的预测数值。

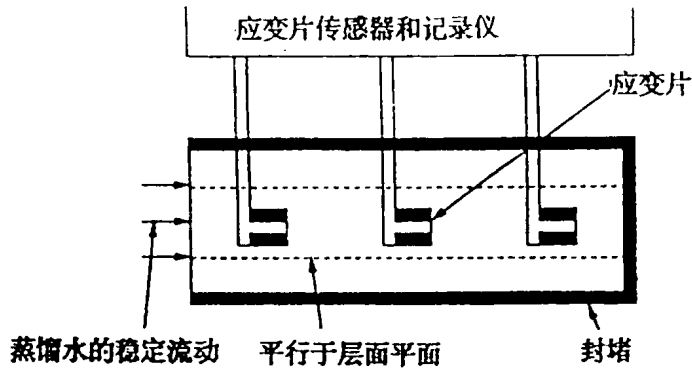


图 1-13 为研究水吸附的实验设备

3. 页岩的水化应力

Chenevert 对受了水份作用的页岩性质做了比较深入的研究。他用图 1-13 示出的设备研究了页岩内部的吸水过程。将三个应变片紧贴在岩样的表面上,除留下一个端面外,其余各面包裹起来,留下这个端面的目的是让其暴露于潮湿的环境里。Chenevert 使用这种方案能够观

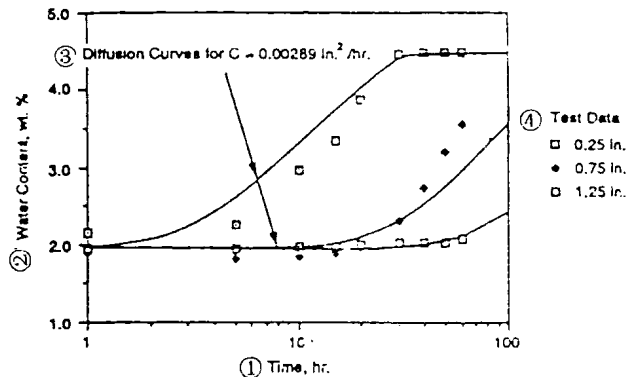


图 1-14 随时间变化的吸水量 (Mancos 页岩在去离子水中)

- ①时间,小时;②水份含量,重量百分比;③扩散系数 $C=0.00289$ 英寸²/小时的扩散曲线;
④试验数据 0.25 英寸, 0.75 英寸, 1.25 英寸

察到样品吸水和含水量上升的时间过程。还可以测量岩样的膨胀。图 1-14 是一典型的吸水量与时间的关系曲线。如果严格限制岩样的自由膨胀,那么吸水就会在岩样中产生应力。Chenevert 把这种吸水产生的应力称作“水化应力”。图 1-14 是在大气条件下,Mancos 页岩典型的应变与吸附水的关系曲线。

从图 1-15 可看出,因吸水而产生的应变与所吸水份的重量百分比成正比,但不是线性变化。而且还观察到,在这种页岩中垂直层面方向的膨胀(或应变)量比平行于层面方向的应变约大 1.4 倍。Chenevert 认为,页岩吸水是材料与环境的湿度差所引起的一种化学反应,并假定材料中的水化应力是一种静水压力。这种水化应力的大小可按下述公式计算: