

# 非定向全直径岩心现今地应力特征试验测试一体化研究

谢润成<sup>1,2</sup> 周文<sup>3</sup> 杨志彬<sup>4</sup> 张生军<sup>4</sup> 杨元科<sup>5</sup> 周秋媚<sup>2</sup>

(1. 西南石油大学 博士后科研流动站, 四川 成都 610500; 2. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059; 3. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 4. 中国石化西南油气分公司 工程技术研究院, 四川 德阳 618000; 5. 玉门石油管理局 油田作业公司, 甘肃 玉门 735200)

**摘要:**岩石地应力的大小与方向在钻井工程、压裂工程等方面具有重要的参考价值。实验室测试岩心地应力是获取井下原岩现今地应力特征的有效方法之一。但定向取心成本高、工序繁多,因此,现场多为非定向岩心。在文献调研的基础上,分别介绍了古地磁法、声波各向异性法和差应变法,及它们确定地应力方向和大小的原理,建立了非定向全直径岩心实验室测试地应力大小及方向的一体化方法。现场实际井下岩心测试应用表明,该一体化方法的测试结果与成像测井结果具有一致性。

**关键词:**岩心; 地应力; 古地磁; 声波; 差应变; 实验室试验

**中图分类号:**TE21    **文献标识码:**A    **文章编号:**1001-0890(2010)04-0108-04

## Research on Integrated Test of In-Situ Stresses from Unoriented Core

Xie Runcheng<sup>1,2</sup> Zhou Wen<sup>3</sup> Yang Zhibin<sup>4</sup> Zhang Shengjun<sup>4</sup> Yang Yuanke<sup>5</sup> Zhou Qiumei<sup>2</sup>

(1. Mobile Postdoctoral Center of Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China; 2. College of Energy Resource, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, 610059, China; 3. State Key Lab of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, 610059, China; 4. Research Institute of Southwest Branch, Sinopec, Deyang, Sichuan, 618000, China; 5. Oilfield Downhole Operation Company, Yumen Petroleum Administration, Yumen, Gansu, 735200, China)

**Abstract:** In-situ stresses are important in well drilling and hydraulic fracturing. The formation stress measured in laboratory is one of the ways to obtain the In-situ stresses. Unoriented coring is common in practice due to high cost of oriented coring. In this paper, we give an introduction to several different methods for stress determination, including paleomagnetic orientation determination, wave velocity anisotropy and differential strain analysis. An integrated method for determination of in-situ stress from unoriented core in laboratory was developed. The filed application shows that the result from this method agrees with imaging logging.

**Key words:** core; crustal stress; testing; paleomagnetism; sound wave; differential strain analysis method; laboratory testing

地应力的研究已有 100 多年历史,其研究方法及应用越来越广泛<sup>[1-4]</sup>。测试岩心地应力是获取地应力特征比较有效的方法之一,也是测井计算地应力的参照标准之一。由于取心成本高、工序繁多等,现场取心大多数都是非定向取心。而如何根据非定向岩心确定地应力的大小,尤其是方向,对于钻井、完井及压裂设计与施工等都具有重要意义。为此,

收稿日期:2010-03-12; 改回日期:2010-06-01

基金项目:中国石化西南油气分公司重点科研项目“河坝构造工程地质研究”(GJ-106-0818)资助

作者简介:谢润成(1979—),男,四川简阳人,2003 年毕业于成都理工大学石油工程专业,2009 年获成都理工大学油气田开发工程专业博士学位,讲师,从事油气藏工程地质评价方面的教学与研究工作。

联系方式:(028)84079005, xieruncheng06@edut.cn

笔者依据现场非定向全直径岩心,采用古地磁法、声波各向异性法和差应变法,并将其综合形成一体化研究方法,来确定地应力的方向及大小。

## 1 具体方法及原理

### 1.1 古地磁法

岩石中往往含有铁磁性矿物,因而岩石剩磁特征及其变化遵从铁磁学的一般规律,在成岩作用过程中由于受客观存在的地磁场的作用,岩石记录了其形成时的地磁特征。在岩石形成或形成较短的一段时间内,岩石中的磁性矿物的分布方向将指向与当时、当地的地球磁场相同的方向。在以后的地质时期里,岩石中的原生剩磁可能全部或部分被年代较轻的、方向明显和原生磁化强度不一致的磁化强度所代替。因此,特定岩心上的天然剩磁也许是不同形成、不同方向磁化分量的组合<sup>[4-5]</sup>。标准的古地磁测量是分离出天然剩磁中的不同分量,并由此分离出地层磁化强度的特征,再与当时、当地岩石的已知方向进行对比,从而确定出岩心及其标志线方向。其取样方法如下:沿岩心基线方向钻取3个岩样,去除表层后制成6个样品( $\phi 25.0\text{ mm} \times 25.0\text{ mm}$ ),测定6个样品平均方位,如图1所示。

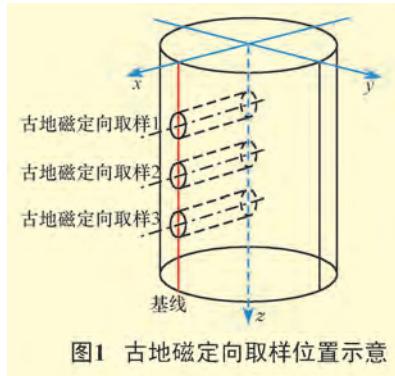


图1 古地磁定向取样位置示意

### 1.2 声波各向异性法

在应力作用下,岩石颗粒和结晶晶体及其胶结物发生变形,导致岩石微观力学参数、颗粒间声波耦合状态、微观声波传播路径发生相应变化,其波速各向相异,而波速各向相异程度与岩石应力状态及其自身的均一性相关。由于井下岩心在垂向(垂直层面方向)上的各向异性明显,而平行层面方向较均一,通常只测量层面方向的波速各向异性。当应力消除后,岩石发生恢复变形,岩石颗粒和结晶晶体及其胶结物发生变形,同样也可形成波速各向相异,

但方向相反。试验中,通过测量不同方向的声波传播速度,绘制速度分布椭圆,椭圆长、短轴的方向即代表了岩体中最大和最小主应力的方向。

对于声波各向异性测量,须保证仪器有足够高的分辨率和足够高的试样加工精度,保证试验条件一致。具体要求为:仪器分辨率1 ns;试样研磨加工精度是直径0.001 mm,不平整度0.01 mm;耦合剂涂抹均匀,耦合压力 $2.000 \pm 0.001\text{ kg}$ 。其取样方式为:垂直方向取1个样,水平方向上,标志线处取1个样,与标志线水平垂直方向上取1个样(见图2)。

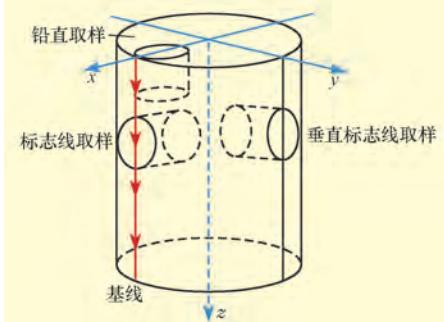


图2 声波各向异性取样位置示意

测量步骤为:

- 1) 选择岩性、结构较为简单的岩心,尽量消除岩性不均一的影响,标画基准线,作为测量基准方位,然后选相对较均匀的岩段标画3个以上的水平基线,作为声波测量平面;
- 2) 以基线为起点,在其周围不同方向布置测点(发射点和接收点,见图3),构成监测网络;

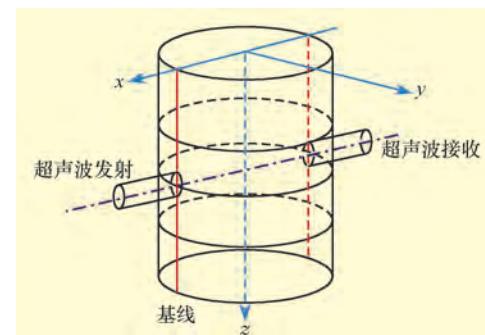


图3 超声波发射点和接收点的测点布置示意

- 3) 使用专用声波仪器向岩体中发出声波,并在各接收点接收声波;
- 4) 测量不同方向各发射点至接收点的声波传播速度,绘制速度分布椭圆;
- 5) 测量不同方向各的声波传播速度差异曲线。

### 1.3 差应变法

取心过程中由于应力释放所产生的次生孔隙变

形及孔隙变形即是地应力状态的直观反映<sup>[6]</sup>。差应变法地应力测量即是测量岩石受力释放后所产生的次生裂隙变形及孔隙变形。为了保证试验结果的一致性,须保证仪器有足够高的分辨率和足够高的试样加工精度,保证试验条件一致。具体要求为:试验多通道应变仪分辨率 $1 \mu\epsilon$ ( $\mu\epsilon$ 为微应变,即应变仪的分辨率可达到百万分之一的应变量);试样研磨加工精度是直径0.001 mm,不平整度0.01 mm;隔离绝缘层是环氧树脂或硫化硅橡胶;压力传感器分辨率0.1 MPa;高压容器耐压200 MPa,加温温度限制小于350 ℃。

#### 测试步骤:

- 1) 从现场取回定向岩心,记录该岩心相应的位置和深度;
- 2) 将岩心加工成长径比为1:1的圆柱体试样,加工过程中不允许出现新的裂隙;
- 3) 将3支特制的相互成45°的4轴应变花粘贴在三个相互垂直的端面上(见图4),在岩心上画上标线;

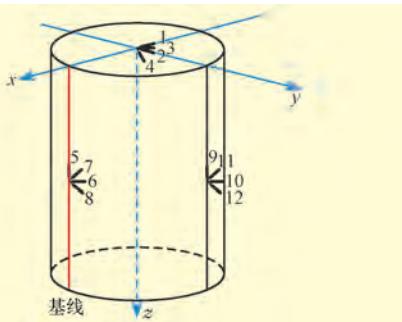


图4 差应变分析法应变片粘贴位置及编号示意

- 4) 将试样和补偿块一起放入一个压力容器中,并加静水压至100~140 MPa,加压大小取决于原来岩心所在的深度;按0.1 MPa/min的增压速率增加,在加压过程中裂隙逐步闭合;记录加压过程中应变片的应力-应变值,绘制应变片的应力-

应变曲线;

5)以上步骤加压和卸压重复3次以上;

6) 对每一应力-应变曲线进行微分分析;

7)由多个方向的裂隙闭合应变率可求得三个主裂隙应变的方向,它们对应着三个主应力的方向;由于试样是确定了原始方向的,则试样所在点的三个主应力方向也就已知了,主应力的大小可由瞬时关闭压力值来确定;在每一应变片所在方向,地应力大小对应于应力-应变曲线的过渡段。

差应变数据的处理方法:

1) 差应变数据公式。差应变数据=记录数据-标样数据。

2) 同围压状态应变分量。以1 MPa为增量,不同围压下,在差应变数据中获取9个应变分量,由9个应变分量计算主应变分量和主应变方向。计算主应变方向,采用下半球投影(吴氏网),求主应变方向极密图。主应力方向由主应变方向余弦确定。

3) 应力。由于差应变分量计算的主应变值只有相对意义,假定岩石铅直应力为上覆岩层的重量,根据平均主应变比值计算主应力值。

4) 应力方向修正。进行坐标旋转,根据古地磁定向数据修正原基线方向。

## 2 综合测试举例及结果

试验岩心为新取岩样,由于是进行岩心地应力特征测试,因此不需对岩心进行包裹、蜡封等。取心深度为3 000.06~3 000.54 m,岩性为灰白色中粒岩屑砂岩,岩心长度480 mm,岩心直径50 mm,取样地层温度约为80.56 ℃。由于采用全直径岩心,基本上考虑了岩样的尺度效应<sup>[7]</sup>。首先进行古地磁测试,测试结果见表1。从表1可以看出,所测试岩样标志线方位为NE54.5°。

表1 古地磁岩样测试结果

样品号	温度段	地理坐标下		可信度( $a_{95}$ )	标志线方向/(°)	平均方向/(°)
		偏角/(°)	倾角/(°)			
4-1	NRM-T200	323.3	44.3	5.8	36.7	
4-1A	NRM-T150	314.8	47.1	4.9	45.2	
4-2	NRM-T150	304.3	35.0	7.8	55.7	
4-2A	NRM-T150	299.3	32.7	4.0	60.7	54.5
4-3	NRM-T150	307.3	35.5	3.9	52.7	
4-3A	NRM-T100	295.5	33.8	0	64.5	
4-4	NRM-T150	314.1	38.5	6.4	45.9	
4-4A	NRM-T150	285.6	37.8	10.4	74.4	

波速各向异性测试结果表明,岩样声波波速在2 695.80~3 460.29 m/s之间变化,其平均值为

3 042.22 m/s,其样本方差为6 1623.81,试验岩样的变异系数为20.26,表明其岩性、结构不均匀,声波各

向异性十分明显。从声波波速的雷达图(见图5)中可以看出,声波的波速呈椭圆分布,判读明确。根据古地磁测试基线方位及声波测试岩样的各向异性,可确定出最大水平主应力的地理方位,根据表1古地磁测试得到基线方位角为 $54.5^{\circ}$ ,而声波测试结果得到最大水平主应力与基线夹角为 $158.4^{\circ}$ (如图5所示),因此最大水平主应力方位角为NE $32.9^{\circ}$ 。该方位与相应井段成像测井确定出的水平最大主应力优势方位(NE $37.5^{\circ}$ )基本一致(见图6),说明测试结果可靠程度较好。

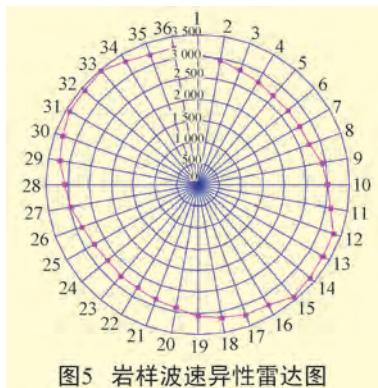


图5 岩样波速异性雷达图

根据差应变测试得到的岩样主应变极密图(见图7),可确定出最大水平主应变轴、最小水平主应变轴、铅直主应变轴,以及各主应变的比值关系(见表2),由于样品的取样深度已知,依据测井密度资料,采用岩石体积密度积分或岩石体积密度累

加即可获得取样深度处上覆岩层重量,即铅直应力,然后根据差应变测试得到的各主应变的比值关系就可确定出水平地应力的大小。

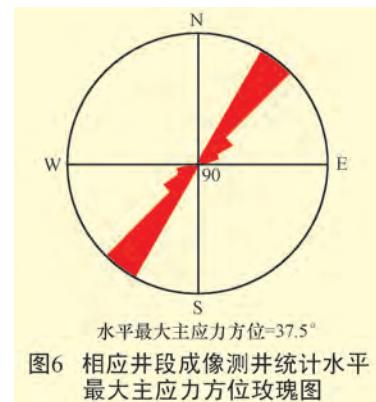


图6 相应井段成像测井统计水平最大主应力方位玫瑰图

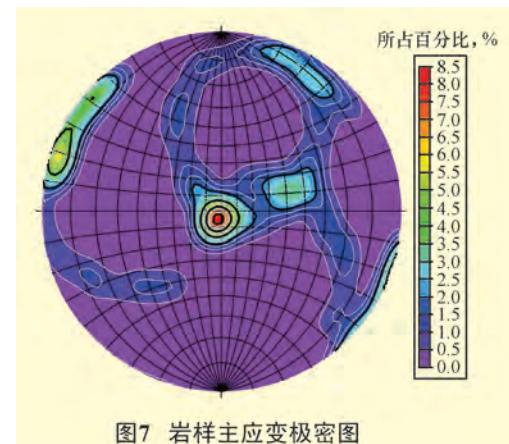


图7 岩样主应变极密图

表2 差应变地应力值确定结果

三向应力	方位/(°)	倾角/(°)	主应变比值	应力值/MPa
铅直主应力	205.21	83.25	1.01(水平最大/铅直方向)	79.23
最大水平主应力	32.93	10.54	1.20(水平最大/水平最小)	94.12
最小水平主应力	301.24	4.56	1.04(水平最小/铅直方向)	82.71

### 3 结 论

1) 建立了由非定向岩心古地磁法、声波各向异性法和差应变法组成的测试地应力方向及大小的地应力特征实验室测试一体化方法,该方法具有原理简单、成本低等特点。

2) 基于实验室非定向岩心测试方法,利用现场实际井下岩心进行测试,其应力测试方向结果与测井方法确定的结果具有对比性,表明该方法具有较高的可靠性。而依据主应变比值关系确定出的应力大小及状态,可作为测井地应力解释的参考标准。

### 参 考 文 献

- [1] 李志明,张金珠.地应力与油气勘探开发[M].北京:石油工业出版社,1997;3-5.
- [2] 张景和,孙宗顾.地应力、裂缝测试技术在石油勘探开发中的应用[M].北京:石油工业出版社,2001;38.
- [3] 谢润成,周文,邓虎成,等.现今地应力场特征评价一体化研究[J].石油钻采工艺,2008,30(4):32-35.
- [4] 周文,闫长辉,王世泽,等.油气藏现今地应力场评价方法及应用[M].北京:地质出版社,2007;1-2.
- [5] 孙连环,鲍洪志,杨顺辉.准噶尔盆地中部区块地应力求取研究[J].石油钻探技术,2007,35(2):18-20.
- [6] 谢润成.川西坳陷须家河组探井地应力解释与井壁稳定性评价[D].四川成都:成都理工大学能源学院,2009.
- [7] 谢润成,周文,单钰铭,等.考虑岩样尺度效应时钻井液对岩石力学性质影响的试验评价[J].石油学报,2008,29(1):135-138.

[审稿 葛洪魁]