

深层地应力地理方位确定的新方法

卢运虎¹, 陈勉¹, 金衍¹, 吴文², 张家振³, 李远⁴

(1. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 川庆钻探工程有限公司 钻采工程技术研究院, 四川 广汉 618300; 4. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 地应力地理方位是合理井网布置、水力压裂设计、复杂结构井定向方位优选及安全钻井液密度窗口确定的重要基础参数。针对室内地应力测试方法对非定向岩芯无法确定水平地应力地理方位的难题, 利用深部地层岩芯的黏滞剩磁分量标定岩芯的地理方位; 同时对标定岩芯开展围压下的声发射 Kaiser 试验, 测量出水平地应力大小和相对方位; 最终确定出最大、最小地应力的地理方位。该方法解决 Kaiser 试验地应力地理方位无法确定的难题, 完善深层地应力测试方法, 可为钻井工程和油田增产措施优化设计提供基础的数据。

关键词: 石油工程; 地应力测量; Kaiser 效应; 黏滞剩磁; 地理方位

中图分类号: TD 311

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2011)02 - 0233 - 05

A NEW METHOD FOR DETERMINATION OF GEOGRAPHIC ORIENTATION OF DEEP FORMATION GEOSTRESS

LU Yunhu¹, CHEN Mian¹, JIN Yan¹, WU Wen², ZHANG Jiazhen³, LI Yuan⁴

(1. Key Laboratory of Petroleum Engineering of Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. Drilling and Production Technology Research Institute, Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Guanghan, Sichuan 618300, China; 4. School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Geographic orientation of geostress is an important basic parameter for reasonable well layout, hydraulic fracturing design, optimization of directional orientation of complex structural well and determination of safe drilling fluid density window. According to the problems that laboratory geostress testing methods can not determine the geographic orientation of horizontal geostress for nondirectional cores, the geographic orientation of cores is calibrated by using viscous remanent magnetization component; the acoustic emission Kaiser test under confining pressures for calibrated cores is carried out so as to determine the magnitude and relative orientation of horizontal geostress. Eventually, the geographic orientations of the maximum and minor principal geostresses are determined. This method solves the problem that the geographic orientation of geostresses can not be determined by using Kaiser test and improves the testing methods of geostress in deep formation. Meanwhile, it provides basic data for drilling engineering and optimization of oilfield stimulation.

Key words: petroleum engineering; geostress measurement; Kaiser effect; viscous remanent magnetization; geographic orientation

1 引言

地应力测量包括测量地应力的大小和主应力方

向。在油气田勘探开发中, 人们逐渐认识到地应力地理方位的重要性, 特别是合理井网布置、水力压裂设计、复杂结构井定向方位优选以及安全钻井液密度窗口确定等一系列工程技术问题都需要对地层

收稿日期: 2010 - 08 - 12; **修回日期:** 2010 - 10 - 08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226700); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET - 08 - 0840)

作者简介: 卢运虎(1983 -), 男, 2006年毕业于长江大学石油工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学、井壁稳定和油田地应力测量方面的研究工作。E-mail: luyunhu20021768@163.com

地应力进行精细描述^[1]。地应力测量方法有许多种，如水力压裂法、井壁崩落法、声发射 Kaiser 效应法、复合地应力测量法、地破试验与差应变或多极子测井相结合确定地应力的方法^[2]。水力压裂法是根据井眼的受力状态及其破裂机制来推算地应力，计算精度高，但其复杂的工艺、较高的作业成本限制了该方法的广泛应用^[3]。随后通过差应变或多极子测井确定最大、最小水平地应力的内在联系，结合地破试验确定地应力的大小^[4~7]。室内声发射 Kaiser 效应试验可以确定地应力的大小和相对方位^[8]，但是 Kaiser 效应试验对深井岩芯要求苛刻，邓金根等^[9~11]利用声波各向异性和声发射 Kaiser 效应相结合的复合地应力测试方法，解决了上述难题。上述地应力测试方法只能确定地应力的相对方位，不能确定地应力的地理方位。井壁崩落法利用井壁崩落椭圆的崩落长轴方向与最小水平主地应力方向一致的原理，借助超声波井下电视测定仪和四臂地层倾角测定仪来确定地应力的地理方位，但是所用设备价格昂贵，井下限制条件多。目前地应力测量还没有一种完善的测试方式，急需一种经济简捷的室内测量方法填补在地应力地理方位确定方面的空白，完善地应力测试方法体系。

本文利用深部地层岩芯的黏滞剩磁分量标定岩芯的地理方位，同时对标定岩芯开展围压下的声发射 Kaiser 试验，测量出水平地应力大小和相对方位，最终确定出最大、最小地应力的地理方位。该方法解决了 Kaiser 试验地应力地理方位无法确定的难题，完善了深层地应力测试方法，可为钻井工程和油田增产措施优化设计提供基础数据。

2 声发射 Kaiser 效应

声发射 Kaiser 效应测量地应力利用了岩石具有记忆的特性，其力学本质是岩石受原地应力作用所形成的特定的微裂缝在达到原地应力载荷作用下重新活动和扩展的反映。岩石 Kaiser 效应试验可以测量野外曾经承受过的最大压应力。实验室内一般采用与钻井岩芯轴线垂直的水平面内，增量为 45° 的方向钻取 3 块岩样，测出 3 个方向的 Kaiser 点处正应力，而后求出最大、最小水平主地应力；由与岩芯轴线平行的垂向岩样 Kaiser 点处的地应力确定垂向地应力。在试验时， σ_0 的取心位置为标定线(见图 1)，试验得到的 β 即标定线与水平最小地应力的夹角。

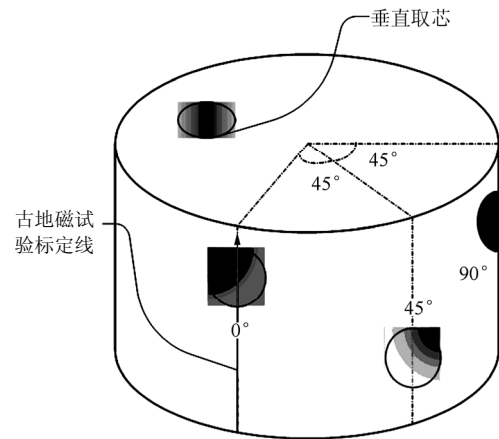


图 1 声发射试验岩芯取样示意图

Fig.1 Sketch of rock core sampling for acoustic emission test

根据岩芯所确定的各个方向的最大压应力，利用公式可以确定地应力的数值，即最大、最小水平主地应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{Hmax} &= \frac{\sigma_{0^\circ} + \sigma_{90^\circ}}{2} + \frac{\sigma_{0^\circ} - \sigma_{90^\circ}}{2} [1 + \tan^2(2\beta)]^{\frac{1}{2}} + \alpha P_p \\ \sigma_{Hmin} &= \frac{\sigma_{0^\circ} + \sigma_{90^\circ}}{2} - \frac{\sigma_{0^\circ} - \sigma_{90^\circ}}{2} [1 + \tan^2(2\beta)]^{\frac{1}{2}} + \alpha P_p \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中，

$$\tan(2\beta) = \frac{\sigma_{0^\circ} + \sigma_{90^\circ} - 2\sigma_{45^\circ}}{\sigma_{0^\circ} - \sigma_{90^\circ}} \quad (2)$$

式中： σ_{Hmax} ， σ_{Hmin} 分别为最大、最小水平主地应力； α 为有效应力系数； P_p 为地层孔隙压力； σ_{0° ， σ_{45° 和 σ_{90° 分别为 0°，45° 和 90° 三个水平向岩芯 Kaiser 效应点处正应力。

3 黏滞剩磁定向

3.1 测试原理

地层中的岩石主要含有原生剩磁(PRM)和黏滞剩磁(VRM)。由于岩石的黏滞剩磁分量方向在地理坐标系中与现代地磁场方向是近似相同的^[12]。通过使用磁力仪对取自地层的岩芯进行退磁与剩磁测试，测定出岩芯的磁化变迁过程并分离出稳定的磁向量，通过 Fisher 统计法确定岩芯对应的不同地质年代的磁北极与地理北极的方向，即可恢复岩芯在地下所处的原始方位^[13]。

建立地球地理位置相关的三维坐标，X 轴为正北方向，Y 轴为正东方向，Z 轴垂直向下，且 X 轴穿过岩芯标定线，通过确定剩磁矢量 F 和水平剩磁矢量 H (平均剩磁矢量在 OXY 面的投影) 的相关参

数, 从而确定岩芯的地理方位(见图 2)。它们之间的关系为

$$F = \sqrt{H^2 + Z^2} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (3)$$

$$D = \arctan \frac{X}{Y} \quad (4)$$

$$I = \arctan \frac{Z}{H} \quad (5)$$

式中: D 为磁偏角, 为 X 轴与水平剩磁矢量 H 的夹角; I 为磁倾角, 为剩磁矢量 F 和水平剩磁矢量 H 的夹角。

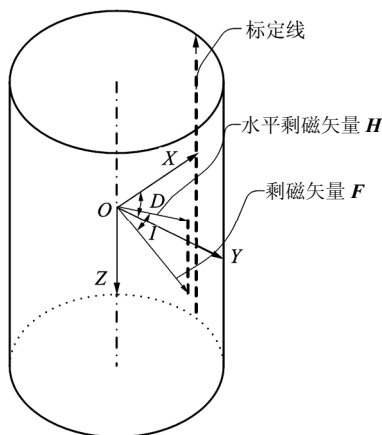


图 2 剩磁测试坐标系

Fig.2 Coordinate system of remanent magnetization test

3.2 试样准备

选取深部地层钻井取芯获取的全尺寸岩芯, 在岩芯柱面上绘制一条平行于岩芯轴线的标定线。这条标定线是古地磁试验和 Kaiser 效应试验取芯的参考线, 将绘有标定线大岩芯沿轴线制作成 $\phi 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的标准样品(见图 3^[14])。为保证试验结果的精度, 每个取样点应至少取 6 个岩样。

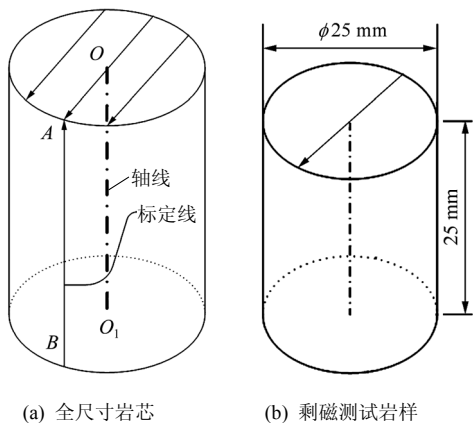


图 3 剩磁测试岩样准备^[14]

Fig.3 Specimen preparation for remanent magnetization test^[14]

3.3 数据处理

(1) 用主成分分析法分析单个岩样标定线的地理方位。主成分分析法是假定组成任意岩样的剩磁矢量的分量数值均是等权的, 通过对坐标轴线性变换, 对退磁直线或退磁平面进行最小二乘法拟合, 从而确定剩磁成分的个数及特征剩磁方向。

(2) 所有样品试验完成后, 对单样品数据进行统计处理, 用 Fisher 统计方法进行采样点内样品剩磁方向的平均统计, 然后计算采样点的古纬度和古地磁位置、古地磁方向的精度及离散度, 确定岩芯对应的不同地质年代的磁北极与地理北极的方向, 即可恢复岩芯在地下所处的原始方位。

(3) 如果钻取的岩芯的倾角足够小, 所测得的磁偏角 D 可直接转为相对地理北极方向的偏角, 不用考虑地质年代、当地磁偏角的影响。而它的磁倾角(垂直向量)则取决于当地的地理纬度。纬度 L 与磁倾角 I 的关系可表示为

$$\tan I = 2 \tan L \quad (6)$$

如果取样地点纬度已知, 就可在相关退磁段内(低于 350 奥斯特), 通过筛选黏滞剩磁向量的磁倾角, 分离出其中一个倾角接近于地球中心偶极磁场值, 然后校正对应向量偏角, 由此确定岩芯原始方位。

3.4 最小地应力方位确定

古地磁试验得到岩芯上标定线与地理北极的夹角 α , 声发射 Kaiser 效应试验得到了最小水平地应力方位与标定线的夹角 β (见图 4), 则最小水平地应力的地理方位为

$$\theta = \alpha + \beta \quad (7)$$

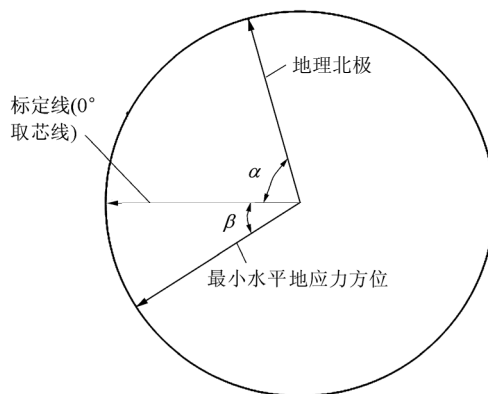


图 4 最小主地应力地理方位确定示意图

Fig.4 Sketch of determination of geographic orientation of minor principal geostress

4 地应力测试试验

四川广安地区受构造运动作用，区域地应力复杂，对钻井和后期增产措施优化设计带来了巨大的难题。该地区为了提高油气采收率，需要采用定向井开采，由于地应力地理方位确定困难，给定向井井眼轨道设计带来了巨大的难题。于是，利用上述黏滞剩磁和 Kaiser 效应相结合的试验方法，可确定该地区地应力的地理方位。

岩芯取自广安地区的 6 口气井，主要为泥岩和砂岩。按照测试新方法的要求准备试样并开展剩磁和退磁试验，得到了相关岩芯的磁偏角和磁倾角。各井标志线的测试结果见表 1。

表 1 各井标志线的测试结果

Table 1 Measured results of marked lines for various wells

井号	采样数/个	D/(°)	I/(°)
X1	12	236.2	56.5
X5	10	229.6	48.2
X15	12	107.1	-53.8
X17	12	169.9	60.2
X19	12	165.3	-49.1
X106	11	203.6	62.8

为了验证测试数据，首先用各测井数据中的井斜角和方位角校正磁倾角数据，代入式(6)得到磁倾角为 47.3°~52.7°，与实际纬度对应值 49.1°~49.7° 具有很好的一致性，能满足地应力方位确定的要求。

通过 Kaiser 效应试验得到了广安地区的地应力大小(见表 2)。利用岩芯的古地磁试验和声发射 Kaiser 效应试验结果，由式(7)可确定出最小水平地应力的地理方位，试验结果见表 3。

对比完井资料中各对应层段的水平地应力分布，得到 X1, X15, X19, X106 井的偏差均小于 10°; X17 井偏差为 12.6°; 而 X5 井的偏差较大，达到 24.9°。结果表明，利用黏滞剩磁岩芯定向结合声发射 Kaiser 效应确定地应力的方法能满足实际工程的需要。

岩芯黏滞剩磁地理方位标定试验的影响因素较多，如岩性和地层温度等，而试验过程中发现存在个别岩芯试样的试验结果偏离较大(如 X5 井)，需要进一步分析和研究影响岩样剩磁变化的因素。

表 2 广安地区岩样的 Kaiser 测试试验结果

Table 2 Kaiser test results of rock specimens in Guang'an region

井号	取样深度/m	岩性	岩芯编号	最小水平地应力 /MPa	最大水平地应力 /MPa	标志线与小水平地应力夹角β/(°)
X1	1 889.00~1 891.11	砂岩	1 - 10/43	29.91	36.92	35.340
	2 033.89~2 035.79		10 - 32/37			
X5	2 402.10~2 402.33	泥质砂岩	2 - 37/60	38.27	47.19	-24.120
	1 610.74~1 610.90		8 - 36/96			
X15	2 602.70~2 602.88	泥质砂岩	1 - 81/85	42.87	51.33	-22.500
	2 615.00~2 619.00		1 - 76/85			
X17	2 402.10~2 402.33	泥岩	1 - 34/38	39.68	49.67	-18.500
	2 502.18~2 502.41		1 - 37/38			
X19	2 358.18~2 358.47	砂岩	4 - 38/88	37.55	47.13	1.934

表 3 岩芯地应力试验结果

Table 3 Test results of geostresses of rock cores

井号	取样深度/m	最大水平地应力/MPa	最小水平地应力/MPa	最小水平地应力方向
X1	1 889.00~1 891.11	36.92	29.91	NE88.46°
X5	2 402.10~2 402.33	47.19	38.27	SE25.48°
X15	1 610.74~1 610.90	50.57	43.67	NW74.67°
X17	2 602.70~2 602.88	51.33	42.87	SW32.60°
X19	2 402.10~2 402.33	49.67	39.68	SW33.20°
X106	2 358.18~2 358.47	47.13	37.55	SE26.54°

5 结 论

利用黏滞剩磁岩芯定向结合声发射 Kaiser 效应地应力测量的新方法，解决了 Kaiser 效应无法确定水平地应力地理方位的难题，完善了深层地应力测试方法，但在试验过程中发现个别岩芯试样的试验结果存在较大偏差，需要进一步分析影响岩样剩磁变化的因素。

参考文献(References):

[1] 刘建中, 张金珠, 张 雪. 油田应力测量[M]. 北京: 地震出版社, 1993.(LIU Jianzhong, ZHANG Jinzhu, ZHANG Xue. Oilfield stress

- measurement[M]. Beijing: Earthquake Press, 1993.(in Chinese))
- [2] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.(CHEN Mian, JIN Yan, ZHANG Guangqing. Petroleum engineering rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2008.(in Chinese))
- [3] 李志明, 张金珠. 地应力与油气田勘探开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.(LI Zhiming, ZHANG Jinzhu. Geostress and oil-gas exploration and development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.(in Chinese))
- [4] 程远方, 沈海超, 赵益忠. 一种简化的差应变地应力测量技术[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(2): 61 - 64.(CHENG Yuanfang, SHEN Haichao, ZHAO Yizhong. A simplified differential strain analysis method for in-situ stress measurement[J]. Oil Drilling and Production Technology, 2008, 30(2): 61 - 64.(in Chinese))
- [5] 金衍, 陈勉, 郭凯俊, 等. 复杂泥页岩地层地应力的确定方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2 287 - 2 291.(JIN Yan, CHEN Mian, GUO Kaijun, et al. Study on determination method of in-situ stress for complex silt formations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2 287 - 2 291.(in Chinese))
- [6] 高合明, 刘建东, 沈露禾. 深部地应力测试技术及其在钻井工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增1): 1 124 - 1 127.(GAO Heming, LIU Jiandong, SHEN Luhe. Measuring method of deep formation geostress and its application to borehole stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp.1): 1 124 - 1 127.(in Chinese))
- [7] 高坤, 陶果. 利用多极子阵列声波测井资料计算横向各向同性地层破裂压力[J]. 中国石油大学学报, 2007, 31(1): 35 - 39.(GAO Kun, TAO Guo. Determining breakdown pressures in transversely isotropic formation by multiple array acoustic logs[J]. Journal of China University of Petroleum, 2007, 31(1): 35 - 39.(in Chinese))
- [8] KAISER E J. A study of acoustic phenomena in tensile test[Ph. D. Thesis][D]. Munchen: Technische Hochschule, 1959.
- [9] 邓金根, 黄荣樽, 田效山. 油田深部地层地应力测定的新方法[J]. 中国石油大学学报, 1997, 21(1): 32 - 35.(DENG Jingen, HUANG Rongzun, TIAN Xiaoshan. A new method for measuring geostress in deep formation[J]. Journal of China University of Petroleum, 1997, 21(1): 32 - 35.(in Chinese))
- [10] 张广清, 金衍, 陈勉. 利用围压下岩石的凯泽效应测定地应力[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 360 - 363.(ZHANG Guangqing, JIN Yan, CHEN Mian. Measurement of in-situ stresses by Kaiser effect under confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 360 - 363.(in Chinese))
- [11] 石林, 张旭东, 金衍, 等. 深层地应力测量新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2 355 - 2 358.(SHI Lin, ZHANG Xudong, JIN Yan, et al. New method for measurement of in-situ stresses at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2 355 - 2 358.(in Chinese))
- [12] TALLINN D H. 古地磁学的原理和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1978.(TALLINN D H. The principles and applications of palaeomagnetism[M]. Beijing: Science Press, 1978.(in Chinese))
- [13] 李学森, 吴汉宁, 张小浩, 等. 钻井岩芯重定向的古地磁方法及其可靠性分析[J]. 油气地球物理, 2006, 4(2): 27 - 32.(LI Xuesen, WU Hanning, ZHANG Xiaohao, et al. The palaeomagnetic method applied to reorient core and its reliability[J]. Petroleum Geophysics, 2006, 4(2): 27 - 32.(in Chinese))
- [14] 侯守信, 田国荣. 古地磁岩芯定向及其在地应力测量上的应用[J]. 地质力学学报, 1999, 5(1): 90 - 96.(HOU Shouxin, TIAN Guorong. Palaeomagnetic orientation of cores and its applications for in-situ stress measurements[J]. Journal of Geomechanics, 1999, 5(1): 90 - 96.(in Chinese))