

◀“973”计划专题▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2013.04.006

# 利用黏滞剩磁进行水平地应力定向的试验研究

王 磊<sup>1</sup>, 杨春和<sup>1</sup>, 郭印同<sup>1</sup>, 衡 帅<sup>1</sup>, 金 衍<sup>2</sup>

(1. 岩土力学与工程国家重点实验室(中国科学院武汉岩土力学研究所), 湖北武汉 430071; 2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

**摘要:**为了快速准确地对地层水平地应力进行定向,指导页岩气的水力压裂开采,研究利用岩心的黏滞剩磁定向方法。该方法可以克服一般古地磁定向的不足,在不考虑地层年代和复杂构造运动的情况下还原岩心在地层中的原始方位。利用热退磁手段分离出黏滞剩磁,对岩心进行定向,并对取自重庆涪陵地区某页岩气井多个层位的岩心进行了古地磁测试。结合声发射Kaiser效应测得的地应力资料,对测试结果进行处理,得到取心层位最大水平主应力的方位角,与先期地震资料的结果进行比较,二者具有较好的一致性。研究结果表明,利用黏滞剩磁进行水平地应力定向的方法是可行的、而且有效的。

**关键词:**黏滞剩磁 热退磁 岩心定向 水平地应力 Kaiser 效应

中图分类号: TE21 文献标识码: A 文章编号: 1001-0890(2013)04-0023-04

## Experimental Research on Horizontal In-Situ Stress Orientation Determination through Viscous Remanent Magnetization

Wang Lei<sup>1</sup>, Yang Chunhe<sup>1</sup>, Guo Yintong<sup>1</sup>, Heng Shuai<sup>1</sup>, JinYan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering (Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences), Wuhan, Hubei, 430071, China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China)

**Abstract:** In order to determine the orientation of horizontal in-situ stress conveniently and accurately, and provide help in hydraulic fracturing of shale gas, a technique called Viscous Remnant Magnetization (VRM) was investigated. Compared with conventional methods, VRM can help to provide the determination of core orientation without considering the deposit age and tectonic movement of the formation. In the experiment, the procedure of thermal demagnetization was introduced in detail to extract VRM for core orientation determination from a shale gas well in Fuling of Sichuan basin. Combining the results of Kaiser effect, the orientation of maximum horizontal stress was obtained. It indicated that results from VRM were basically consistent with those from seismic data. So it is feasible and effective to utilize VRM horizontal in-situ stress orientation determination.

**Key words:** viscous remnant magnetization; thermal demagnetization; core orientation; horizontal in-situ stress; Kaiser effect

在油气田钻井和开发中,了解油气储集区域构造应力的大小和方位,可以进行油气田开发井网布置,确定合理的钻井液密度,减少或避免漏、喷、塌、卡等井下故障<sup>[1]</sup>。目前,地应力测量方法已经取得了很大进展<sup>[2-6]</sup>。其中,岩石声发射的Kaiser效应<sup>[7]</sup>和岩心古地磁定向相结合的方法是室内地应力测量的有效手段。一般的古地磁定向方法,是用古地磁仪测定处理系统分离出稳定的原生剩磁,然后用原生剩磁向量确定岩心参考线坐标,并与现场(露头)给定年代的岩样预先测定方向比较,确定岩心的

收稿日期:2013-03-10;改回日期:2013-06-13。

作者简介:王磊(1989—),男,山东费县人,2007年毕业于山东农业大学水利水电工程专业,在读硕士研究生,主要从事页岩气水力压裂开采过程中的岩石力学问题研究。

联系方式:(027)87197560,jack1906@hotmail.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“深井复杂地层岩体力学特征与参数表征”(编号:2010CB226701)、国家自然科学基金项目“深井复杂碳酸盐岩地层孔隙压力预测模型研究”(编号:51104144)和国家科技重大专项“海相碳酸盐岩油气井筒关键技术(二期)”(编号:2011ZX05005-006)部分研究内容。

原始方位<sup>[8]</sup>。应用原生剩磁定向方法时,必须同时考虑岩心所在地层的准确年代和构造运动情况,影响因素较多,处理过程复杂。

近年来,Aidona<sup>[9]</sup>利用热退磁和交变退磁方法研究了不同取心深度处岩心的古地磁和磁学特性。侯守信等人<sup>[8]</sup>探讨了黏滞剩磁岩心定向的实验过程和分析方法。董平川<sup>[10]</sup>利用交变退磁的方法分离出黏滞剩磁,结合岩石声发射的 Kaiser 效应,最终确定了地层中最大主应力的方向。张家振等人<sup>[11]</sup>论述了非定向岩心黏滞剩磁重定向的原理、试验方法及主要影响因素,并结合实例证实了该方法的可行性。李学森等人<sup>[12]</sup>研究了利用交变退磁分离黏滞剩磁的方法及其可靠性。前人主要研究了利用交变退磁的方法分离黏滞剩磁,用热退磁的方法分离黏滞剩磁的研究很少。因此,笔者研究了利用热退磁手段分离黏滞剩磁的试验原理和试验方法,然后结合先前已经得到的岩石声发射 Kaiser 效应试验结果,来确定重庆涪陵地区某页岩气井地应力的大小和绝对方向。

## 1 黏滞剩磁定向原理

岩石在形成的过程中,其自身所含有的铁磁性矿物受到当时地磁场的影响,会顺着地磁场的方向发生磁化,并像“化石”一样保存下来,这一部分磁性称为岩石的原生剩磁。岩石形成后长期置于地磁场中,地磁场又处于动态变化之中,由于热运动,原来已经定向排列的磁畴将松弛到后来的地磁场的方向,这一部分磁性称为黏滞剩磁<sup>[13-14]</sup>。

地球磁场保持基本稳定的方向已经持续了 73 万年,在这期间内,平均磁北极与地理北极基本保持一致。在这样长的地质时期内,岩石所获得的黏滞剩磁的方向总是指向当地的磁北极方向。因此利用分级加热的方法,使样品中的黏滞剩磁逐步退去,分离出黏滞剩磁,黏滞剩磁的水平分量就指示着正北方向,可以实现岩心的定向。

## 2 试验方案及步骤

### 2.1 岩心来源与试样的制备

本次试验岩心取自重庆涪陵某页岩气井的垂直井段,取心井段 2 100~2 300 m,部分岩心的详细信息见表 1。

表 1 部分岩心的基本信息

Table 1 Basic information of cores

取心井段/m	层位编号	岩性描述	加工试样数量
	1#	灰绿色泥质粉砂岩	7
	2#	灰黑色泥页岩	7
2 100~2 300	3#	灰绿色粉砂岩	8
	4#	灰色含泥灰岩	7
	5#	灰色灰质泥岩	5

将断开的岩心照原样组合在一起,在岩心柱面画一条平行于岩心轴线并标有方向的标志线。这条标志线是岩心 Kaiser 效应测定和古地磁定向共同的参考线。将圆柱面标志线延伸到岩心截面上,然后在截面上绘出多条平行于标志线的线,以保证最终试样绘有标志线;将画有标志线的岩心置于钻床上,沿轴向钻取小岩心,加工成直径 25 mm、高 25 mm 的标准样品,再将端面上的平行标志线通过轴心绘于圆柱面上(见图 1),此时标准试样制备完毕<sup>[15]</sup>。

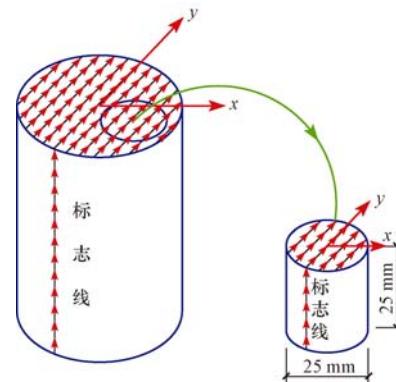


图 1 古地磁试样加工方法

Fig. 1 Preparation of paleomagnetic specimen

### 2.2 试验设备

2G-755 型岩石超导磁力仪主要由超导室、送样杆、样品架、数据显示和采集器、计算机等部分组成。试验过程中,将岩石样品装入样品架,使样品上的标志线与样品架上的红色标记线重合,将样品送入超导室,试样中的磁场会在超导线圈中产生感应电流,数据采集系统记录下感应电流并转换为磁场强度储存到计算机中。仪器测量范围  $1.0 \times 10^{-12} \sim 2.0 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ , 灵敏度  $1.0 \times 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 。

TD48 型热退磁仪主要由温度控制系统和加热炉单元 2 部分组成,加热温度 25~800 °C,一次最多可加热 48 块样品,样品置于 3 层无缝磁屏蔽桶中。通过温度控制器,使炉内温度升至设定温度并保持恒温,实现样品的热退磁。

## 2.3 试验方案与步骤

### 2.3.1 试验方案

首先测量样品在常温下的天然剩余磁性,然后设置 80,150,200,250,300 和 350 ℃ 共 6 个温度点进行热退磁,测量样品每一温度点对应的剩余磁性。试验结束后,选取 80~300 ℃ 的低温分量作为黏滞剩磁,对岩心进行定向。

### 2.3.2 试验步骤

- 1) 制作超导磁力仪测试用的样品架。
- 2) 用 2G-755 型岩石超导磁力仪逐一测量样品的天然剩磁,获得样品的天然剩磁数据。
- 3) 由于待测试样较多,将样品分 2 批进行热退磁。先将第一批样品放入加热炉,接好电源插头,设置加热温度为 80 ℃,打开加热炉开关进行加热;温度升至 80 ℃ 后,记录此时的时间,恒温保持 40 min 后,关闭加热炉开关,拔掉电源插头,将样品推至加热炉的冷却区,打开风扇冷却 30 min;然后,取出样品,放入第二批样品进行加热;同时,测量第一批样品的剩磁数据。
- 4) 重复步骤 3) 中的程序,依次得到 150,200,250,300 和 350 ℃ 温度下的剩磁数据。
- 5) 对在 7 个温度点下得到的剩磁数据进行处理和分析,得到样品上标志线的地理方位。

## 3 数据处理及分析

在测试过程中,超导磁力仪记录了每一退磁温度下试样的磁偏角、磁倾角、磁矩等数据。某典型试样的原始数据如表 2 所示。

表 2 某典型试样的原始数据

Table 2 Original data of a typical specimen

样品编号	温度	磁倾角/(°)	磁偏角/(°)	磁矩/(A·m <sup>2</sup> )
	常温	278.2	77.8	$1.07 \times 10^{-6}$
	80 ℃	279.3	53.9	$7.32 \times 10^{-7}$
	150 ℃	270.1	63.2	$3.81 \times 10^{-7}$
4-2-1	200 ℃	267.9	67.4	$1.82 \times 10^{-7}$
	250 ℃	26.4	31.2	$1.88 \times 10^{-7}$
	300 ℃	326.1	39.1	$1.26 \times 10^{-7}$
	350 ℃	332.5	22.8	$1.02 \times 10^{-7}$

利用数据处理软件 PMag31b1 得到样品的正交投影图和等面积投影图(见图 2)。

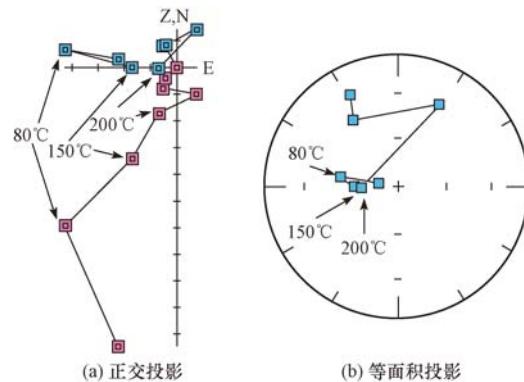


图 2 不同温度下的黏滞剩磁处理结果

Fig. 2 Viscous remnant magnet at different temperatures

从表 2 和图 2 中可知,随着温度的升高,样品中的磁矩逐渐减小,磁偏角和磁倾角也在不断改变;在 80,150,200 ℃ 时的磁偏角和磁倾角变化很小,基本维持稳定,而在 250 ℃ 时,磁倾角和磁偏角发生突变,由此可以判断,80~200 ℃ 的磁向量即为样品中的黏滞剩磁。选取 80,150,200 ℃ 时的剩磁向量数据进行线性拟合,得到拟合后的磁偏角、磁倾角和最大角度偏差。同一层位岩样加工了多个样品,这些样品在理论上标志线的地理方位角应该是一致的,但由于加工、测量以及岩石本身的不均一性等多种因素的影响,导致各个样品有所差别。对同一个层位的样品,将最大角度偏差值大于 15° 的数据舍弃后进行统计平均,得到最终标志线的地理方位角。室内 Kaiser 效应测定已知最大水平主应力在岩心上的方位(相对于标志线),与前者结合可以确定最大水平主应力的方向与地理北的夹角(见图 3)。

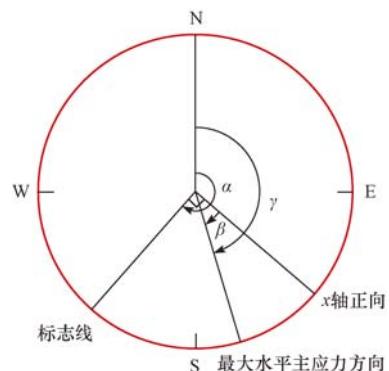


图 3 最大水平主应力方位图

Fig. 3 Orientation of the maximum horizontal stress

最大水平主应力方位角计算公式:

$$\gamma = \alpha - 90^\circ + \beta \quad (1)$$

式中: $\alpha$  为由黏滞剩磁定向得到的标志线的方位角,(°); $\beta$  为由声发射 Kaiser 效应得到的水平最大主应

力方向和  $x$  轴正向的夹角, ( $^{\circ}$ );  $\gamma$  为最大水平主应力的方向角, ( $^{\circ}$ )。

利用式(1)根据试验结果求取的部分层位最大水平主应力的方向角, 结果见表 3。

**表 3 部分层位水平最大主应力的方向角**

**Table 3 Azimuth of the maximum horizontal stress of some formations**

层位编号	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	$\gamma/(^{\circ})$
1#	233	-31	112
2#	185	-9	86
3#	222	-20	112
4#	176	30	116
5#	77	122	109

由表 3 可看出, 最大水平主应力方位角为  $80^{\circ} \sim 120^{\circ}$ , 前期根据地震资料估测该区域最大水平主应力近似呈东西走向, 两者具有很好的一致性, 证明了地应力测试数据的有效性, 可以为后续页岩气的勘探开发提供指导。

## 4 结 论

1) 利用热退磁的方法, 分离出砂岩、泥页岩、灰岩等沉积岩岩心的黏滞剩磁进行定向是可行的。试验所测试的沉积岩在温度  $250 \sim 300^{\circ}\text{C}$  时, 岩心中的剩磁向量会发生突变, 表现为磁偏角和磁倾角的大幅度变化, 表明试样中的黏滞剩磁已全部退去, 保留下来的是原生剩磁。

2) 每一个深度点处应加工尽可能多的试样(8个以上), 以保证统计结果的可靠性。试样在加工的过程中远离磁场, 避免受到磁污染。数据分析时, 要剔除离散性较大的数据, 对其余离散性较小的数据进行统计平均。

3) 在利用热退磁方法分离黏滞剩磁的过程中, 温度会对试样中的黏滞剩磁产生一定影响, 并可能影响最终测试结果, 试验时未考虑该影响因素。利用交变退磁分离黏滞剩磁的方法不受温度的影响。因此, 应开展热退磁和交变退磁试验结果的对比研究, 以了解温度对分离黏滞剩磁的影响。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 67.  
Chen Mian, Jin Yan, Zhang Guangqing. Rock mechanics in petroleum engineering[M]. Beijing: Science Press, 2008: 67.
- [2] 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.

Xie Runcheng, Zhou Wen, Deng Hucheng, et al. Integrated research methods of in-situ stress field characteristics[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(4): 32-35.

- [3] 葛洪魁, 林英松, 王顺昌. 水力压裂地应力测量有关技术问题的讨论[J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(6): 53-56.  
Ge Hongkui, Lin Yingsong, Wang Shunchang. Discussion on technical problems related to measurement of earth stress through hydraulic fracturing[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1998, 20(6): 53-56.
- [4] 谢润成, 周文, 杨志彬. 非定向全直径岩心现今地应力特征试验测试一体化研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4): 108-111.  
Xie Runcheng, Zhou Wen, Yang Zhibin. Research on integrated test of in-situ stress from unoriented core[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 108-111.
- [5] 吴超, 刘建华. 区域油田地应力及井壁稳定性综合预测方法[J]. 断块油气田, 2011, 18(6): 705-709.  
Wu Chao, Liu Jianhua. Predicting method of regional in-situ stress of oilfield and borehole stability[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(6): 705-709.
- [6] 李光泉, 王怡, 陈海军, 等. 利用井眼坍塌信息求取最大水平主应力的方法[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(1): 37-41.  
Li Guangquan, Wang Yi, Chen Junhai, et al. Analysis of the maximum horizontal principal stress based on wellbore collapse information[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(1): 37-41.
- [7] 鲍洪志, 孙连环, 于玲玲, 等. 利用岩石声发射 Kaiser 效应求取地应力[J]. 断块油气田, 2009, 16(6): 94-96.  
Bao Hongzhi, Sun Lianhuan, Yu Lingling, et al. Obtainment of ground stress by Kaiser effect of rock acoustic emission[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(6): 94-96.
- [8] 侯守信, 田国荣. 粘滞剩磁(VRM)岩芯定向的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊 1): 1128-1131.  
Hou Shouxin, Tian Guorong. The application of viscous remanent magnetization in orientation determination by using drill cores[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 19(Supplement 1): 1128-1131.
- [9] Aidona E, Kondopoulou D. Palaeomagnetic and rock magnetic properties of sediment cores from Chalkidiki, Greece[J]. Phys. Chem. Earth A, 2001, 26(11/12): 879-884.
- [10] 董平川. 利用岩芯古地磁定向研究油藏水平主应力方向[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2480-2483.  
Dong Pingchuan. Orientation determination of maximum horizontal stress in reservoir formation by paleomagnetic orientation of cores[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2480-2483.
- [11] 张家振, 陈勉, 鲍洪志, 等. 非定向岩心粘滞剩磁重定向方法[J]. 油气地球物理, 2008, 6(2): 14-18.  
Zhang Jiazen, Chen Mian, Bao Hongzhi, et al. The viscous remanence method applied to redirect non-oriented core[J]. Petroleum Geophysics, 2008, 6(2): 14-18.
- [12] 李学森, 吴汉宁, 张小浩, 等. 钻井岩心重定向的古地磁方法及其可靠性研究[J]. 油气地球物理, 2006, 4(2): 24-32.  
Li Xuesen, Wu Hanning, Zhang Xiaohao, et al. The paleomagnetic method applied to reorient core and its reliability[J]. Petroleum Geophysics, 2006, 4(2): 24-32.
- [13] 徐世浙. 古地磁学概论[M]. 北京: 地震出版社, 1982: 14-49.  
Xu Shizhe. Introduction to paleomagnetism[M]. Beijing: Seismological Press, 1982: 14-49.
- [14] 刘椿. 古地磁学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 30-31.  
Liu Chun. Paleomagnetism guide[M]. Beijing: Science Press, 1991: 30-31.
- [15] DD 2006-04 古地磁测试技术要求[S].  
DD 2006-04 Technical requirement of paleomagnetism testing[S].

[编辑 滕春鸣]