

古地磁岩心定向及其在地应力测量上的应用

侯守信 田国荣

摘要：在实验室,将需测试的一段岩心柱标上标志线,制备成古地磁测试和差应变分析测试的标准试样。岩样经一定步骤的磁清洗、相应的磁性参数测量和数据处理,可恢复岩样在地下的原始方位。用差应变分析(DSA)法确定最大主应力相对标志线的方位,与古地磁测试结果结合,即可确定出该地区的最大主应力方向。

关键词：古地磁；定向；磁清洗；差应变分析

分类号：P318.4

文献标识码：B

PALAEOMAGNETIC ORIENTATION OF CORES AND ITS APPLICATIONS FOR INSITU STRESS MEASUREMENTS

HOU Shouxin, TIAN Guorong

Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Guanghan Sichan 065007

Abstract : A core from a certain depth is marked with a master orientation line (MOL), and is made into standard samples, which are used in palaeomagnetic tests and differential strain analysis (DSA) in the laboratory. The original orientation of the core in the formation can be obtained by magnetic cleaning test, magnetic parameter measurement and data processing. Differential strain analysis (DSA) method, which is used to determine the direction of the maximum principle stress with respect to the master orientation line, is combined with the results of magnetic tests to define the direct of the maximum principle stress in the area.

Key words : palaeomagnetism ; orientation ; magnetic cleaning ; Differential strain analysis (DSA)

0 引言

在石油工程中,为了合理确定采油井的井网布置,钻井过程中的井壁稳定性,水力压裂裂缝延伸方向,都需要了解和掌握地应力的大小和方向。因此,确定地应力的大小和方向已是工程界经常遇到的实际问题。

国内外已有各种地应力测试技术。如长源距声波测井、小型水力压裂^[1]、应力解除法、声发射(AE)等测量方法可测定地应力的大小;井筒椭圆度测井、井下电视、定向取心、震源机制等可确定地应力方向。但是,各种测量技术都有其优点和局限

性，特别是在现场测量成本一般较高，实施也比较困难。

目前，差应变分析是实验室里确定主地应力方向的有效方法，其中的关键之一是岩心定向问题。在钻井缺乏定向取心的条件下，利用古地磁确定岩心方向就十分方便可靠。

1 岩心定向的基本方法

岩心定向一般有4种方法。第一是定向取心。它是在取心筒中安装一个照相机，定时拍照罗盘盘面与一个凸耳相对位置，而这个凸耳是与岩心的划线针在同一直线上。岩心进入岩心筒即刻画出这个参考线。此方法需要昂贵的井下钻具和无磁钻头，同时由于扭转运动的作用，划线方向也易产生误差而影响精度^[2,3]。

第二是用倾角测量仪的测井数据。这种方法要求斜井或地层有明显的天然倾角，这往往是不常见的；同时还需电子倾角测量仪来精确确定地层倾角的大小和方向。由于仪器处于泥浆中，测量记录会受到一定的影响^[2]。

第三就是井下电视，是通过电子和声纳技术映射井壁上的裂缝和层面图像。映射图像的方位是靠井下电视工具中的陀螺仪或磁罗盘完成。经过观测岩心上对应的特征与井下图像对照，这个岩心就可定向了。这种方法要求有专用和昂贵的井下工具，依赖于正确的分辨并需找准井下图像和岩心的对应关系^[2]。

第四是本文所要讨论的古地磁岩心定向方法。它是根据岩心都携带一种或多种持久磁化向量，并且与岩心获取时所处地磁场方向一致。通过钻取这种岩石的小岩样，在实验室通过高精度的磁力仪系统，分离出稳定的磁化强度方向，可以确定岩心各自的地理北极方向。此法的优点在于这种测量是在岩心体上进行的，无需多点照相，不会出现因岩体转动造成的固有误差，也不与井斜或倾角测量仪记录的精度之间有什么关系^[2]。

2 古地磁岩心定向基本原理

这种方法是用有稳定剩磁方向的岩心来确定该岩心磁化时的地磁场方向来实现的。因为，任何岩心所处的地层或岩石在其形成时或稍后，都会受到地球偶极子场引起的（它的磁轴线与地理轴呈 11.5° ）磁场磁化，且与当时的古磁场方向一致，此即原生剩磁。随着地层的变迁和时间的推移，岩心所处的地层或岩石又受到新的地磁场磁化，这时岩心及所处的地层或岩石又具有了次生的剩磁或叫粘滞剩磁(VRM)。古地磁岩心定向方法就是利用古地磁仪来分离和测定岩心的磁化变迁过程，用Fisher统计法确定与岩心对应的不同地质年代的磁北极与地理北极的方向，以便恢复岩心在地下所处的原始方位。

3 实验岩样的制备

首先将断开的岩心照原样组合在一起，在岩心柱面绘一条平行于岩心轴线并标有方向的标志线。这条标志线是差应变分析法和古地磁法测量共同的参考线。

将截取的岩心加工制成直径25mm、高25mm的标准试样。步骤是先将圆柱面标志线延到岩心截面上（图1），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；将绘有标志线的大岩心置于钻床上，调好水平夹固，沿轴向钻取小岩心，再切成直径25mm、高25mm标准样品，再将端面上的平行标志线过轴心绘于圆柱面上。此时标准试样制备完毕。

4 剩磁的测定和统计

古地磁平均剩磁定向测量是以水平分量确定磁北极方位，它是采用右手坐标系，Z轴向下为正。磁偏角D体现出地理北极的方向角(图2)。因为X轴通过标志线，D是水平向量H与X轴的夹角，所以D可以决定标志线的地理方位。

将测试的标准样品首先从要测的一批样中抽出两三个样进行磁化强度和磁清洗探测性试验，取得初步认识后，即可确定测试方案和程度。

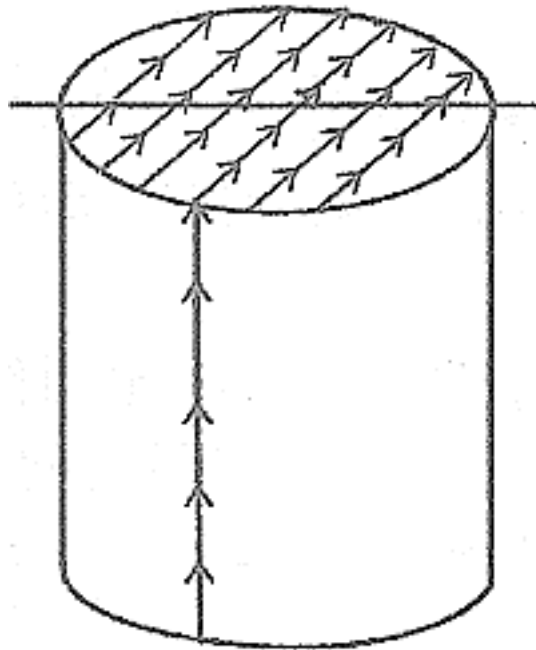


图1 古地磁试样的制备

Fig.1 Preparation of
palaeomagnetic core sample

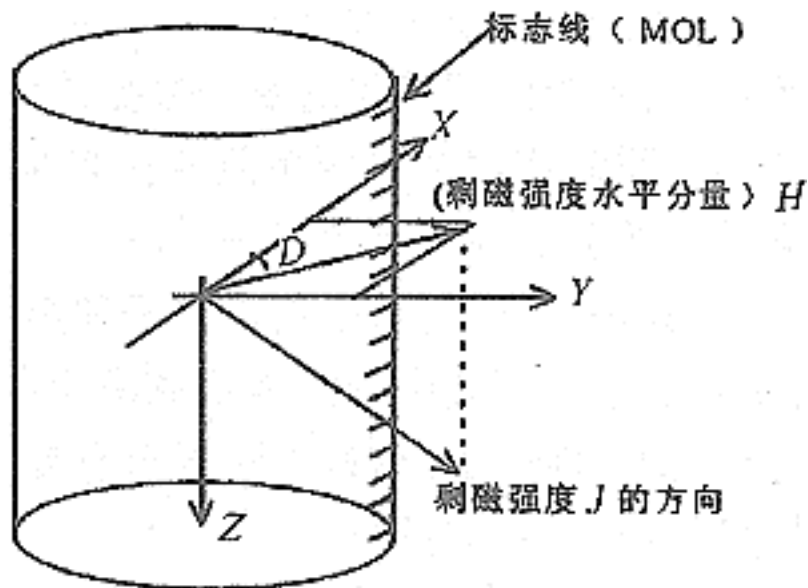


图2 古地磁岩样的坐标系

Fig.2 Coordinate system of palaeomagnetic core sample

测试样品经过英国MOLSPIN公司磁力仪和交变退磁测试、中国科学院地球物理研究所的美国2G超导磁力仪、交变退磁和英国利物浦大学的热退磁测试，当退磁温度达到680 K时，剩磁强度约为 $1.2 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6} \text{emu}$ ，即 $1.1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4} \text{A/m}$ ，取得的磁偏角、磁倾角具有较一致的规律(表1)。在680 K时的磁偏角和磁倾角数值比较集中，磁偏角一般在 $200^\circ \sim 250^\circ$ 之间，倾角在 $33^\circ \sim 53^\circ$ 之间，已比630 K时的数据要更加集中。

表1 岩样热退磁过程数据记录

Table 1 Data in thermal demagnetization process

标本号	退磁温度 (K)	X向量 $\text{emu}/10^{-6}$	Y向量 $\text{emu}/10^{-6}$	Z向量 $\text{emu}/10^{-6}$	剩磁磁矩 $\text{emu}/10^{-6}$	磁偏角 ($^\circ$)	磁倾角 ($^\circ$)
411U	630	-0.264	-3.14	2.48	4.01	265.20	38.19
411D	630	-1.54	-1.27	3.05	3.65	219.51	56.80
412U	630	-2.85	1.99	3.81	5.16	145.06	47.61
412D	630	-1.06	-0.530	-1.99	2.31	206.63	-59.23
413U	630	-2.26	-1.35	2.00	3.30	210.90	37.21
413D	630	-2.47	-0.988	2.29	3.51	201.83	40.82
414U	630	2.77	-3.07	1.81	4.51	227.99	23.62
414D	630	-3.28	-1.61	2.20	4.26	206.17	31.04
415U	630	-3.76	-1.41	2.62	4.79	200.52	33.08

415D	630	-2.10	-4.34	3.07	5.71	244.16	32.49
422U	630	-2.54	-2.01	-0.183	3.25	218.40	-3.22
422D	630	-1.91	-1.28	1.83	2.94	213.91	38.49
411U	680	-1.80	-3.12	3.74	5.20	240.08	46.10
411D	680	-1.01	-0.544	1.52	1.90	208.41	53.03
412U	680	-1.67	-3.76	0.297	4.13	246.06	4.13
412D	680	-1.71	-1.58	2.31	3.28	222.71	44.82
413U	680	-0.595	-1.05	1.46	1.90	240.52	50.40
413D	680	-1.41	0.0726	1.54	2.09	177.04	47.53
414U	680	-1.94	-2.48	2.21	3.84	232.01	35.05
414D	680	-1.03	-5.00	1.58	5.35	258.31	17.22
415U	680	-2.83	-1.67	2.10	3.90	210.57	32.58
415D	680	-0.80	-2.55	2.04	3.36	252.59	37.34
422U	680	-2.93	0.956	1.43	3.40	161.94	24.83
422D	680	-1.33	-2.47	2.17	3.55	241.69	37.73

由计算机对测试过程进行程序控制，并把各种测试结果绘制成各种图件。图3为单样退磁过程曲线，图4为单样测试过程所表示的正交投影图，图5为乌尔夫网格图，其中小圆表示剩磁方向为负倾角，加号为正倾角。由图看出，起始集在图中心，表示倾角大，不稳定，最后倾角变正，接近 50° ，偏角约 240° ，显然，这与测试结果相近。由图件可清楚表示单样测试过程的各种剩磁强度和水平向量变化规律。

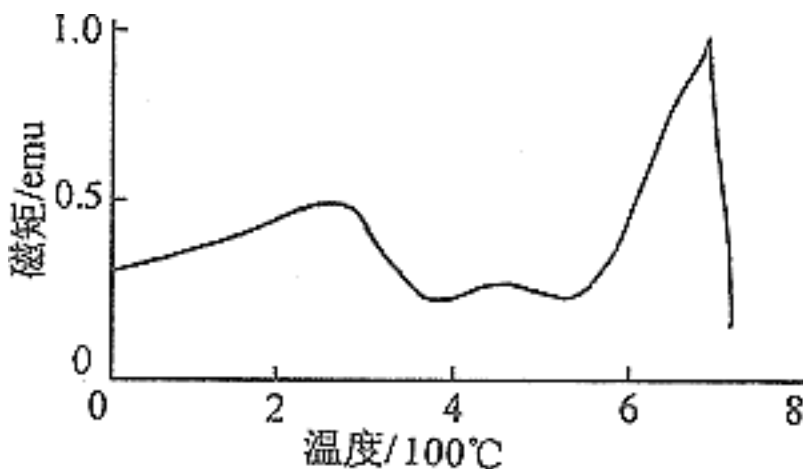


图3 单样的退磁曲线
Fig.3 Demagnetization
of a single sample

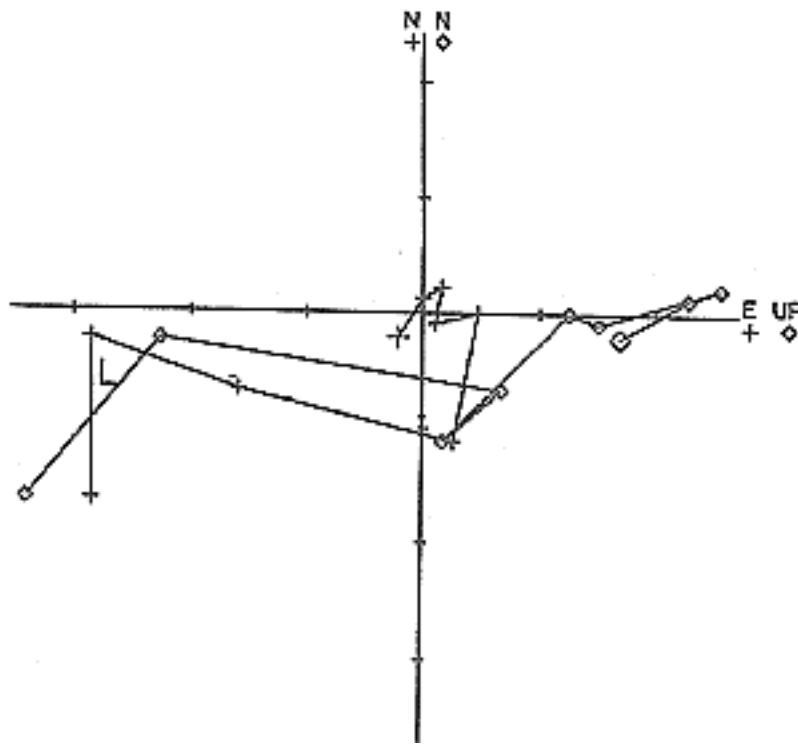


图4 单样测量的正交投影图
Fig.4 Orthogonal perspective view
of a single sample measurement

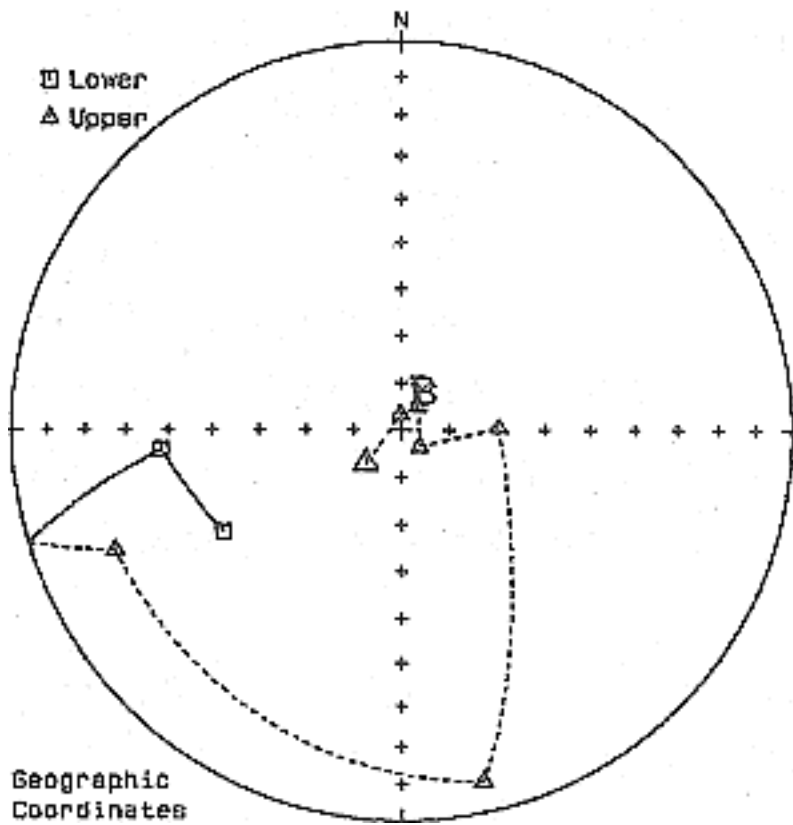


图5 单样测量的乌尔夫网格图

Fig.5 Wulff grid chart of a single sample measurement

随后进行矢量计算与Fisher统计，从而得到一组样品的测试结果。

在Fisher统计中，一般采用代数的方法求矢量的平均方向^[4, 5]。假定从所有样品组成的母体中随机抽取几个样品，测得特征剩磁方向的倾角和偏角分别为 I_i 和 D_i

($i=1,2,3,\dots,n$)。在直角坐标系中，单位矢量在每个轴的方向余弦为：

$$\begin{aligned} X &= \cos D \cos I & Y &= \sin D \cos I \\ Z &= \sin I \end{aligned} \quad (1)$$

将 n 个样品的特征剩磁矢量的方向余弦相加，得合成矢量的长度和平均方向余弦：

$$R^2 = \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n Z_i \right)^2 \quad (2)$$

$$\bar{l} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{R} \quad \bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{R} \quad \bar{n} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{R} \quad (3)$$

该平均方向的偏角 \bar{D} 和倾角 \bar{I} 分别为：

$$\bar{D} = \tan^{-1} \frac{\bar{m}}{\bar{l}} \quad \bar{I} = \sin^{-1} \bar{n} \quad (4)$$

得到上述结果后，可用均方根误差和Fisher统计来估计它们的精度和离散度。对参加统计的一组矢量，Fisher仿照三维空间的高斯分布，把这些矢量当作单位球面上的点，给出概率度分布 P 。

$$P = \frac{K}{4\pi \sin hK} \exp(K \cos \theta) \quad (5)$$

式中， θ 是一样品的观察方向与密度最大真方向之间的夹角。K取最佳估计值 $K > 3$ 时：

$$K = \frac{N - 1}{N - R} \quad (6)$$

式中， n 为参加统计的样品个数， R 为合矢量长度，一般用 K 来衡量平均方向的精度。

平均方向的可靠程度，可通过测定球面上一个圆(置信圆)的半径 来确定，其圆

心在观察到的平均方向上，其方向落在该圆内的概率为(1-P)，其顶角值为：

$$\alpha = \cos^{-1} \left\{ 1 - \frac{n-R}{R} [P^{-\frac{1}{n-1}} - 1] \right\} \quad (7)$$

通常取概率 $P=0.05$ ，用 α_{95} 又叫95%置信圆锥半顶角。因此可用 K 和 α_{95} 这两个精度参数（ K 值越大精度越高， α_{95} 越小越可靠）来量度一组呈Fisher分布的方向或极的平均观察方向的可靠程度。

5 实验结果和分析

利用古地磁法确定标志线相对于地理北极的方向，利用差应变分析法(DSA法)确定主地应力相对于标志线的方向，将两者结合，便可获得最大主地应力相对地理北极的方向，对我国西北某油田岩心进行了古地磁与DSA测量。

这个油田地处东经 108.6° 、北纬 37.8° 的陕北一带。岩心取自深1800m左右（计算水平应力30MPa），地层倾角 $1^\circ \sim 2^\circ$ ，地质年代为三叠纪。

在实验室，用交变退磁和热退磁按一定步骤对岩样进行磁清洗和剩磁测量（图3，图4）。岩样最后退磁强度达到 1.5×10^{-6} emu左右（剩磁强度约为 1.5×10^{-4} A/m），磁偏角趋于一致，一般集中在 $200^\circ \sim 250^\circ$ 之间（表1）。然后，进行矢量计算与Fisher统计，从中取得样品的剩磁特征方向。测得结果见表2。

表2 岩样特征剩磁测量结果

Table 2 The results of characteristic remnant magnetization measurements

岩性	标本数	\bar{D}	\bar{I}	R	K	α_{95}
砂岩	12	226.3°	43.6°	11.29	15.45	11.4°

这次岩样古地磁极偏角为 329.7° ，磁倾角 43.6° [6]。考虑到当地三叠纪古地磁极偏角因素，获得岩心定向标志线的地理北极偏角是 103.4° 。利用差应变分析（DSA）法，确定最大主应变方向（即最大主应力方向）相对标志线的方位 [7]。岩心在地应力场作用下处于压缩状态，岩心取到地面后，由于应力解除引起岩心膨胀导致新的裂缝产生或裂缝张开。这些微裂缝张开程度、密度和方向与岩心所处的应力场状态相关，是应力场的反映。对岩心加围压，恢复岩心裂缝闭合，由应变片获取在空间上的不同方向的变形，从而取得最大与最小主应力方向。这种方法称为差应变分析法（DSA）。

岩样的制备及应变片的粘贴见图6。岩样为60mm的立方体，图中1、2、3……9为应变片在岩样立体粘贴形式。

将制备好的岩样放入压力舱内加静液压力到80MPa（超过地层压力），其部分应变系数与围压的关系曲线见图7。在图上利用线性回归得到两段曲线的斜率（表3）。表中 ϵ_i 表示在低围压阶段加压过程中包含微裂缝和岩石本体一起的应变， ϵ_j 表示在高围压阶段加压过程岩石本体应变， ϵ_j 相应每一个应变片的应变贡献值 ϵ_j （ $i=1、$

2、3.....9) , 由 ϵ_1 、 ϵ_2 ϵ_9 的计算, 可求出6个应变值 ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z 、 ϵ_{xy} 、 ϵ_{yz} 、 ϵ_{zx} 。

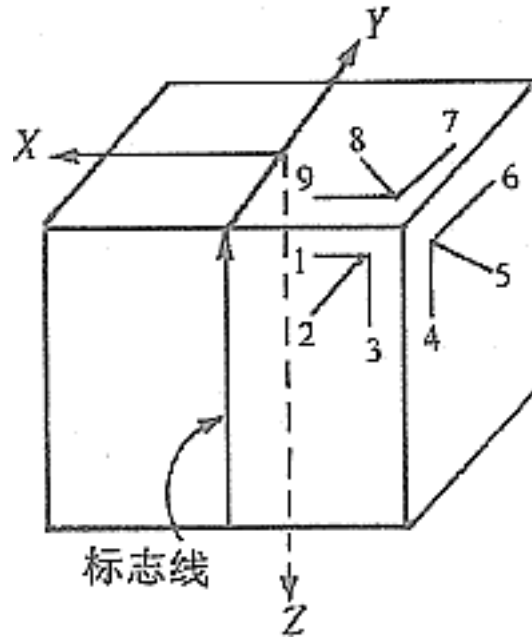


图6 DSA的
岩样制备
Fig.6 Core sample
preparation for DSA

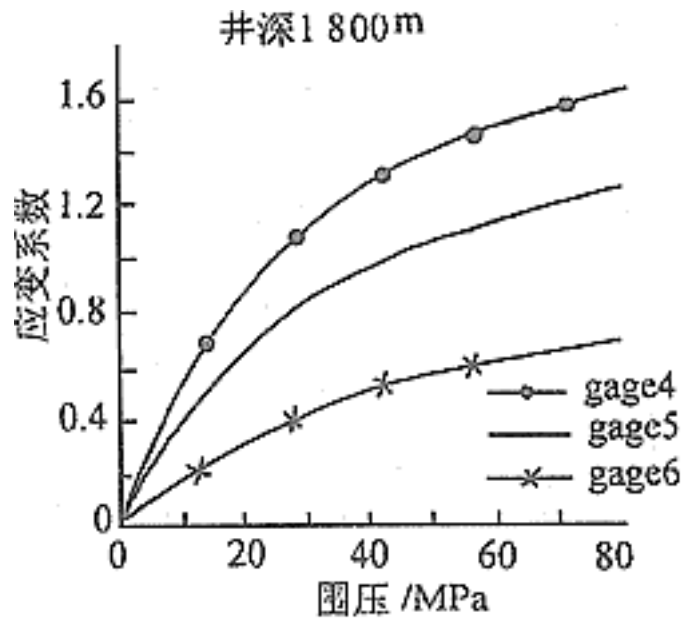


图7 岩样的围压与
应变系数的关系曲线
Fig.7 Strain coefficient
and confining pressure
of a core sample

表3 岩样DSA的各应变片的应变值
Table 3 Strain values of DSA

	XZ平面			YZ平面			XY平面		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0.0049	0.00394	0.00333	0.00751	0.00671	0.0050	0.00483	0.00454	0.00491
	0.021	0.0378	0.0511	0.0515	0.0419	0.0204	0.0223	0.0229	0.0214
-	0.01691	0.03386	0.04777	0.04399	0.03519	0.0154	0.01747	0.01836	0.01649

通过建立一元三次方程，求出三个主应变 ϵ_{11} 、 ϵ_{22} 、 ϵ_{33} 与设定在岩样坐标轴的方向余弦 l 、 m 、 n 和夹角 α 、 β 、 γ （表4）。

表4 岩样DSA计算的方向余弦
Table 4 Direction cosine results of DSA

岩样		方向余弦			角度		
		11	22	33	11	22	33
	l	0.057487	0.513983	-0.855841	86.7 °	59 °	148.8 °
1#	m	0.179322	-0.848679	-0.497672	79.7 °	148.1 °	119.8 °
	n	0.982109	0.124891	0.140922	10.9 °	82.8 °	81.9 °

从岩样DSA法测得主应变方向余弦结果，得出最大水平应变为中间主应变，它与Z轴夹角为82.8°，接近水平方位，相对岩样标志线方位角D取决于水平面的方向余弦。

$$\text{即：} \tan D = \frac{L_i}{m_i} \quad (8)$$

从而得到 $D=31.2^\circ$ ，即水平方向最大主应变相对标志线偏角 31.2° 。最后得到该地区最大主应力方向为 $NE72.2^\circ$ 。该区域地层倾角测井测得最大主应力方向为 NEE ，两者比较接近。

几点认识：

(1) 岩样制备过程要谨防受到磁污染。这次测试过程中出现异常，查出岩样受到磁污染，只能采用原生剩磁做岩心定向，使测试过程拖长，并需知道地质年代的古地磁数据等。

(2) 用粘滞剩磁定向比较简单可靠，国外已比较成熟^[2,3]，应是古地磁岩心定向推崇方法。

(3)古地磁定向的可靠性依赖于它的统计性，应当有一定量的测量点，以提高它定向的可信度。

(4)地应力方向测试精度不但取决于古地磁岩心定向技术，还与差应变分析测量有重要关联，两者必须同样重视。

本实验研究中，石油勘探开发研究院廊坊分院压裂中心主任单文文教授、张保平工程师、申卫兵工程师参加部分工作，地质矿产部航空物探遥感中心周姚秀研究员、北京大学物理系刘凤凰教授、地质科学院地质力学研究所马醒华研究员给予大力帮助与支持，在此表示衷心感谢。

emu为仪器测量的电磁单位，磁矩

作者简介：侯守信(1938-)男，高级工程师，主要从事岩石力学和古地磁研究。

作者单位：石油勘探开发科学研究院廊坊分院，河北 廊坊 065007

参考文献

- [1] Harikrishan R & Hareland G.Prediction of minimum principal In-situ stress by comparison and verification of four methods [J] .SPE 29258.
- [2] Hallwood E A & Ding F.Palaeomagnetic reorientation of cores and the magnetic fabric of hydrocarbon reservoir Sands [J] . Geological Special Publication 1995 , (98) : 245 ~ 258.
- [3] Rolph T C.Viscous remanent magnetization , a tool for orientation of drill cores [J] . Geological Special Publication 1995,(98):239 ~ 243.
- [4] D.H.塔林.古地磁学的原理和应用 [M] .北京：北京科学出版社，1978.
- [5] 刘 椿.古地磁学导论 [M] .北京：北京科学出版社，1991.
- [6] 马醒华.鄂尔多斯盆地晚古生代以来古地磁研究 [M] .北京：北京地震出版社，1992.
- [7] 刘建中.油田应力测量 [M] .北京：北京地震出版社，1993.

收稿日期：1998-11-15