

Determining the Direction of Natural Fractures by Combining Acoustic Emission with Paleomagnetism

Wei Li¹, Xiaowei Gong², Kelin Wang³, Jin Zhou²

¹School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing Heilongjiang

²Exploration Division, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla Xinjiang

³Oil and Gas Engineering Research Institute, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla Xinjiang

Email: 36631876@qq.com

Received: Sep. 27th, 2017; accepted: Apr. 20th, 2018; published: Oct. 15th, 2018

Abstract

The application of hydraulic fracturing in the oilfields was more and more extensive, and the existence of natural fractures in the reservoir affected the extension direction of the hydraulic fractures. Therefore, the accurate description of the natural fractures in the reservoirs was of vital importance for determining the fracture morphology in hydraulic fracturing, the ability to generate complex fractures as well as the direction of well array and well pattern selection. Therefore, by combining acoustic emission with paleomagnetic experiments, according to the acoustic emission experiment, the direction of the marker line relative to the earth stress was obtained, and the direction of the rock core mark line relative to the modern geographical north pole was determined by the paleomagnetic method. The direction of natural fractures in Fuyu Reservoir in the south of Changyuan Area in Daqing Oilfield was determined. According to the acoustic emission experiment, the direction of the mark line relative to the geostress is obtained. The paleomagnetic method is used to determine the orientation of the core mark line relative to the modern geography. The results show that the direction of the natural fractures obtained by combining the acoustic emission and paleomagnetism is close to that of formation dip logging curve.

Keywords

Hydraulic Fracturing, Natural Fracture, Acoustic Emission, Paleomagnetism, In-situ Stress Direction

声发射与古地磁结合确定天然裂缝方向

李 玮¹, 龚小卫², 王克林³, 周 进²

¹东北石油大学石油工程学院, 黑龙江 大庆

²中石油塔里木油田分公司勘探事业部, 新疆 库尔勒

³中石油塔里木油田分公司油气工程研究院, 新疆 库尔勒

作者简介: 李玮(1979-), 男, 教授, 博士生导师, 现主要从事高效钻井破岩、水力压裂、钻井优化等方面的理论与技术研究工作。

Email: 36631876@qq.com

收稿日期: 2017年9月27日; 录用日期: 2018年4月20日; 发布日期: 2018年10月15日

摘 要

当前水力压裂在油田中的运用越来越广泛, 而储层中天然裂缝的存在影响了水力裂缝的延伸扩展方向, 因此, 储层中天然裂缝方位的准确描述对于确定水力裂缝形态, 能否生成复杂裂缝, 以及开发井井排方向的确定和井网的选择至关重要。为此, 根据声发射试验得出标志线相对于地应力的方向, 利用古地磁方法判定岩心标志线相对于现代地理北极的方位, 确定了大庆长垣南部地区扶余储层中天然裂缝的方向。研究结果表明, 声发射与古地磁结合得到的天然裂缝方向, 与地层倾角测井曲线测得的结果较接近。

关键词

水力压裂, 天然裂缝, 声发射, 古地磁, 地应力方向

Copyright © 2018 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

在水力压裂过程中, 人们越来越意识到掌握天然裂缝方向的重要性。水力压裂不仅能够提高老油田的产量, 也是实现非常规油气有效开发的重要手段之一。而水力压裂能否形成复杂裂缝, 是评价其能否成功的一个重要标准。水力裂缝能否形成复杂裂缝的影响因素有很多, 如工程上的主观因素以及储层中的客观因素, 其中天然裂缝对水力裂缝的形态、扩展延伸方向等都有重要的影响。因此, 研究天然裂缝的方向对储层改造以及开发井井排方向的确定和井网的选择具有十分重要的现实意义。当前, 研究天然裂缝方向的评价方法主要有 6 种[1]: ① 通过钻井取心的方式, 直接观察天然裂缝; ② 声波测井的方法; ③ 利用探井和注水开发动态资料; ④ 施工过程中微地震波测量; ⑤ 滞弹性应变恢复; ⑥ 三维 CT 扫描。上述技术方法难度系数相对较大, 且成本较高。为此, 笔者利用声发射试验和古地磁相结合确定天然裂缝方向的方法, 通过先确定地应力方向, 进而确定天然裂缝的方向, 解决了大庆长垣南部地区扶余油层中天然裂缝方向的评价问题。

2. 基本原理

主要利用声发射试验中的 Kaiser 效应, 测标志线相对于地应力的方向。材料在受到外载荷作用时裂纹增加, 其内部贮存的应变能快速释放, 产生弹性波, 发生声响, 称为声发射。岩石对所受载荷的最大值具有“记忆”效应, 只有当加载应力达到或超过先前所施加的最大应力后, 才会产生大量声发射, 这就是 Kaiser 效应。结合单轴压缩试验和声发射系统测试岩石 Kaiser 效应特征, 从而确定岩石地应力, 进而得出标志线相对于地应力的方向[2] [3] [4] [5]。

岩石或沉积物中铁磁矿物具有记录和保存地磁方向的能力。地磁场长期作用的结果使地球具有轴向地心偶极子磁场性质。在实验室内, 通过磁清洗(退磁方法), 可获得岩心定向所需的原生剩磁、天然剩磁和次生剩磁等磁矢量。现代地磁场作用下, 叠加的黏滞剩磁(VRM)属于次生剩磁, 现代地磁场的水平分量与地理北极之间存在一个地区性磁偏角, 在大庆长垣附近, 该磁偏角约为 10° (中科院地球物理所, 1987)。因此, 在获得 VRM 矢量后, 即可将岩心进行定向[6] [7] [8] [9]。

3. 试验岩样的制备

首先, 在岩样的圆柱面上画一条有方向的标志线(标志线是声发射试验和古地磁法测量共同的参考线), 并将标志线的方向顺延到岩样断面上, 在断面上画出平行于该条线的一组平行线, 如图 1 所示。然后, 将取完心的岩样制成直径为 25 mm、高为 25 mm 的标准试样。具体的过程是: 将带有标志线的岩样放在切割机上固定好, 进行切割, 切成直径为 25 mm、高为 25 mm 的标准试样。

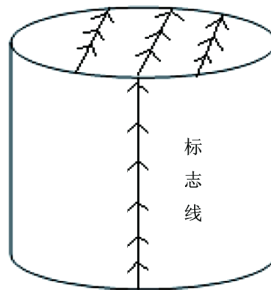


Figure 1. The preparation of acoustic emission and paleomagnetic rock samples
图 1. 声发射和古地磁岩样的准备

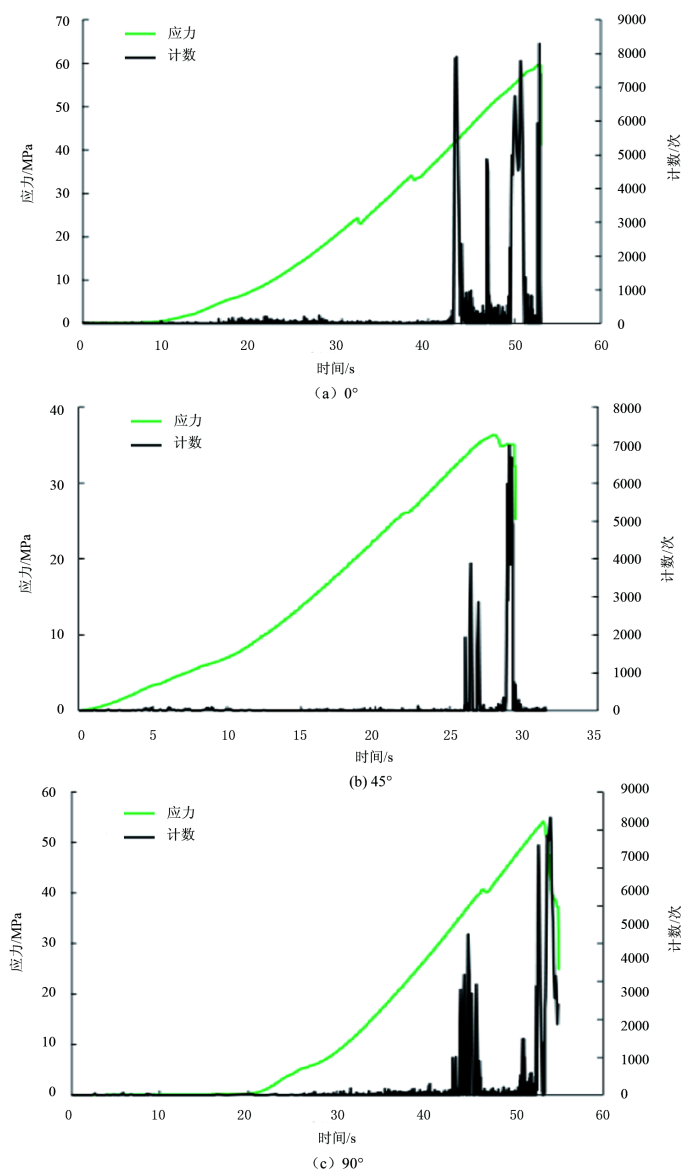
对于一个岩样来说, 声发射法求出的应力分量, 就是岩样加载方向的正应力分量。从岩心库中取出一块岩心(直井段), 假设一个主应力的方向为垂直方向, 加工岩样的方向为垂直方向, 进行垂直主应力测试。通常只有在水平面内取出 3 个方向以上的岩样, 才可用声发射法测出水平内的应力状态。该次研究由于岩样有限, 只取了 3 个方向的岩样, 分别为 0° 、 45° 和 90° , 其中 0° 为标志线方向。由于岩样偏小, 为了便于进行单轴压缩试验时, 探头能够顺利安装, 设计了 2 个刚性试件, 如图 2 所示。



Figure 2. The acoustic emission probe specimen
图 2. 声发射探头试件

4. 数据处理方法

通过声发射试验以及单轴压缩试验, 得出计数、载荷与时间的关系曲线。在数据处理中, 将声发射中计数的突变点作为地应力 Kaiser 效应点。但是测量过程中出现了多个突变点, 给 Kaiser 效应点的确定带来了一定困难。为此, 将所有岩样的计数、载荷与时间的关系曲线进行综合考虑, 找出其规律性, 将具有共同特征的突变点作为 Kaiser 效应点。图 3 为同一样品中, 从不同方向(0°、45°和 90°)取出的 3 个岩心试件的曲线图。由图 3 可见, 0°方向的 Kaiser 效应点对应的应力值为 40 MPa, 45°方向的 Kaiser 效应点对应的应力值为 36 MPa, 90°方向的 Kaiser 效应点对应的应力值为 35 MPa。然后将得到的应力值代入公式(1), 得到不同方向的正应力:



注: 绿线为单轴压缩曲线, 黑线为声发射计数与时间曲线, 取第一条黑色突变曲线与单轴绿色曲线交点对应的应力值为 Kaiser 效应点对应的应力值。

Figure 3. The relationship of stress and count changing with time of rock core specimen in different directions

图 3. 不同方向岩心试件的应力、计数随时间的变化关系

$$\sigma_{\theta} = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (1)$$

式中： σ_{θ} 为 θ 方向的正应力(AE法的测量值)，MPa； θ 为标志线方向，(°)； σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 分别为X、Y、XY坐标轴方向的地应力分量，MPa。

将不同方向 θ 的测量值分别代入公式(1)，联立方程组，即可求出以X、Y为坐标轴的地应力分量。根据弹性理论，将 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 代入公式(2)、(3)和(4) [10]，可得水平最大主应力(σ_H)、水平最小主应力(σ_h)及其作用方向(α ，即为最大主应力与标志线的夹角)：

$$\sigma_H = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \left[\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \tau_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\sigma_h = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \left[\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \tau_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \right) \quad (4)$$

运用 Fisher 统计方法处理古地磁试验得到的数据，最终得出样品的测试结果。利用黏滞剩磁定向测定的磁偏角可直接转为地理北极方向(在钻取岩心倾角很小情况下)，不考虑地质年代、当地磁偏角。而磁倾角(垂直向量)取决于当地的地理纬度，该纬度与磁倾角的关系式为[11]：

$$\text{tg}I = 2\text{tg}L \quad (5)$$

式中： I 为黏滞剩磁磁倾角，(°)； L 为当地的地理纬度，(°)。

因此，如取样地点的纬度已知，可在相关温度内(低于350℃)，通过筛选向量矢量方法分离黏滞剩磁，其中总有某一个倾角接近于地球中心偶极(GAD)磁场值，然后校正向量偏角，由此确定岩心原始方位[11]。

5. 试验结果

通过声发射和古地磁试验得出了大庆长垣南部地区3口井的地应力状况(天然裂缝分布情况)，结果见表1、表2。古地磁与声发射测量结果表明： σ_H 方向为NE91.9°~NE112.9°。该结果与地层倾角测井曲线测得的结果较为一致，因此可以认为在大庆长垣南部地区储层中，天然裂缝的方位为NE91.9°~NE112.9°，可为储层改造以及开发井井排方向的确定和井网的选择提供依据，具有十分重要的现实意义。

Table 1. The results of acoustic emission and paleomagnetic measurements

表 1. 声发射与古地磁测量结果

井号	深度/m	岩心编号	计算取值范围	磁偏角/(°)	磁倾角/(°)	α /(°)	σ_H 相对地理北极方向/(°)	α_{95}
敖 158	1674	8-1-1	NRM-T320	201.1	65.2	30	126.3	1.2
		8-1-2	NRM-T320	214.3	74.7		102.3	0.8
		8-1-3	NRM-T320	197.1	68.5		107.9	1.7
		Fisher	207.1	69.9	112.9		3.1	
茂 72	1954	11-1-1	NRM-T320	239.1	69.6	5	101.3	0.6
		11-1-2	NRM-T320	250.8	69.4		117.9	1.7
		11-1-3	NRM-T320	200.6	67.0		104.3	1.4
		Fisher	244.9	67.9	100.1		3.4	
葡 31	1581	20-1-1	NRM-T320	224.1	69.6	9	104.3	1.0
		20-1-2	NRM-T320	261.1	62.8		116.2	2.2
		20-1-3	NRM-T320	250.1	72.1		99.8	1.9
		Fisher	249.1	68.6	91.9		4.1	

注：NRM-T320表示做古地磁试验时，在无磁环境下，将带有标志线的岩样从0℃开始测试，一直到320℃，每增加10℃~40℃，进行测试一次；“Fisher”是一种数学统计算法； α_{95} 代表置信度，也叫可靠度，表示该次计算值的可靠性。

Table 2. The main stress measurement results of acoustic emission and paleomagnetism
表 2. 声发射与古地磁主应力测量结果

井号	深度/m	σ_H 相对地理北极方向/(°)	磁倾角/(°)	α_{95}	σ_H 方向(NE)/(°)	σ_h 方向(NE)/(°)
敖 158	1674	112.9	69.9	3.1	112.9	202.9
茂 72	1954	100.1	67.9	3.4	100.1	190.1
葡 31	1581	91.9	68.6	4.1	91.9	181.9

6. 结语

利用声发射与古地磁岩心定向测定了大庆长恒南部地区 3 口井的地应力方向,天然裂缝的方位为 NE91.9°~NE112.9°,与地层倾角测井曲线测得的结果接近。利用声发射结合古地磁岩心定向的方法,能够正确测出地层中三向应力分布的方向,进而得出天然裂缝的方位,对储层改造以及开发井井排方向的确定和井网的选择,具有十分重要的现实意义。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(51774093)。

参考文献

- [1] 邓虎成,周文,周秋媚,等.新场气田须二气藏天然裂缝有效性定量表征方法及应用[J].岩石学报,2013,29(3):1087-1097.
- [2] 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,1997:109.
- [3] 陈强,朱宝龙,胡厚田.岩石 Kaiser 效应测地应力场的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(7):1370-1376.
- [4] 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.
- [5] 杨杰.声发射信号处理与分析技术的研究[D]:[硕士学位论文].长春:吉林大学,2005.
- [6] 侯守信,田国荣.古地磁岩心定向及其在地应力测量上的应用[J].地质力学学报,1999,5(1):92-98.
- [7] 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(S1):1128-1131.
- [8] 黄宝春,谭承泽.古地磁多磁成分的分离技术[J].地球物理学进展,1994,9(1):1128-1131.
- [9] 李素玲,程国良,孙宇航.古地磁法在钻孔岩芯定位和隐伏断裂研究中的应用[J].地球物理学进展,1993,8(4):262-263.
- [10] 李彦兴,董平川.利用岩石的 Kaiser 效应测定储层地应力[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S1):2802-2807.
- [11] 田国荣.差应变分析与古地磁结合确定地应力方向[D]:[硕士学位论文].北京:中国地质大学(北京),2003.

[编辑] 龚丹

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2471-7185，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jogt@hanspub.org