

文章编号: 1006-6616(2004)02-0172-07

利用声发射研究东营凹陷新生代构造期次

徐建春, 戴俊生

(石油大学地球资源与信息学院, 山东 东营 257061)

摘要: 声发射作为一种地应力测试的方法, 越来越引起人们的兴趣。应用岩石对经受应力历史具有“记忆”功能, 作者利用声发射法对东营凹陷的岩样进行了测试, 获得了该地区岩样的地应力记忆值和记忆出现率, 从而来揭示本区所经历的构造期次和强度。测试结果证明, 古应力记忆值与构造旋回中的应力历史是相吻合的。同时, 在本文中简要介绍了声发射的基本原理。

关键词: 声发射; 东营凹陷; 构造期次

中图分类号: P546

文献标识码: A

0 引言

声发射是一种岩石存在内部缺陷或潜在缺陷时, 在外部条件作用下改变状态而自动发声的现象。它的最重要特征就是对以往受力和变形历史保持着“记忆”^[1]。利用岩石声发射对应力的记忆特性可以进行地应力测试。通过对岩样的声发射测试记忆的地应力值, 可以推断该地区所经历过的构造运动期次及其强度。

1 东营凹陷地质概况

东营凹陷位于渤海湾盆地济阳坳陷的东南部, 凹陷周围均由断裂带与相邻隆(凸)起相接, 北邻陈家庄凸起、滨县凸起, 西接林樊家低凸起和青城凸起, 南面的鲁西南隆起既是凹陷的南界, 也是坳陷的南界, 东以沂沭大断裂为界。凹陷东西长达100km, 南北宽64km, 总面积约5700km², 是中、新生代以来形成的一个北断南超的裂陷-断陷盆地。

2 声发射基本原理

固体材料在外力作用下, 内部的缺陷或不均质区会发生应力集中, 导致微破裂的产生和扩展, 同时累积的应变能也随之迅速释放。伴随着应变能的释放产生的应力波, 叫声发

收稿日期: 2003-10-28

基金项目: 胜利油田有限公司、中石化、国家“十五”科技攻关项目(2001BA605A09-11)

作者简介: 徐建春(1978—), 男(汉族), 山东青州人, 硕士研究生, 从事油区构造地质方面的研究。

射^[2]。岩石同许多金属材料一样，压缩时也具有声发射的凯瑟效应（Kaiser）^[3]。地层中的岩石经历了长期的地应力作用，对经受过的应力具有记忆功能。岩石的凯瑟效应是指受过应力作用的岩石再次加载时，如果所加载荷小于以前的地应力值时，不（或很少）发生声发射信号的一种现象^[4]。实验表明，只有等于或超过以前的应力值时，才有声发射信号产生，此时声发射信号对应的载荷值就是所要测的地应力值。岩石声发射的力学本质是岩石受原地应力作用所形成的特定的微裂纹，在原地应力的载荷作用下，重新活动和延展的客观反映。自从 Goodman 证明岩石声发射亦具有 Kaiser 效应以来，这种方法逐步应用到地应力测试中^[5]。声发射测试地应力的准确性等问题目前还正处于讨论之中^[6~8]。

需要指出的是，不同类型的岩石对应力水平的记忆功能存在较大差异，需要选择适宜的岩石。由于“记忆”衰退现象的存在，岩石多期声发射记忆的应力作用往往少于该岩石所经历的构造应力作用期次。声发射测量可以测得主应力值。需要强调指出，声发射法所测岩石已脱离地下环境，测值是岩石自身对曾经有过的受力变形的“记忆”。对于地下环境中岩石的孔隙压力未能给出测量，因而测量所得的是有效最大主应力值，该值加上孔隙压力值，才是真正地应力的最大主应力值^[9]。由于测点所在井位的孔隙压力不详，一般以静水压力取代孔隙压力，这固然会造成一定误差，但大多数都会在容许的误差范围之内。

丁原辰和张大伦发现了 Kaiser 效应的“涂抹不净现象”，即岩石试样第一次加载至某一压应力值时显示 Kaiser 效应，紧接着对岩石试样做第二次加载，在声发射率记录曲线上初压显示凯瑟效应点处也有与之相应的显著而相对独立的声发射信号出现^[10]。丁原辰运用涂抹不净现象建立了只测最大主应力值的声发射估测法，在 3~4 个不同的任意方向上取试样，经初压、复压获得声发射值，各个方向上测得的最大主应力值偏差在 15% 以内，就可以认为所测最大主应力测值可靠。

声发射法不仅可以测得现今地应力，而且能够测得各个地质历史时期的古地应力。要确定某时期历史应力测值所对应的地质时代，应选取不同时代的岩石进行测试^[11]。不同时代岩石记忆的主要构造运动期幕不同^[9]。时代较老的岩石记录历史应力的期幕数包含有它所经历的整个历史时期应力的期幕数，而时代较新岩石只记录较新历史时期应力的期幕数^[11]。只要选取的岩石时代合适，便可逐一筛分出来。

3 样品采集和测试结果

在实验室中将进行试验的岩心（岩样要选取节理裂缝少、未风化的岩石，以免造成异常声发射）加工成直径 20（或 25）mm，高 50mm 的圆柱体，圆柱体试样的两个端面应该平整，要求不平行度误差小于 $5\mu\text{m}$ ，以免在加载的过程中造成偏压，从而影响力集中，产生不正常的声发射。不垂直度误差小于 0.1 度，表面光洁度不低于 5 级（ $3.2\mu\text{m}$ ）。从大岩心的任意三个方向钻取试样，每个方向取至少 3 个试样。为了使测试者给出客观的测试结果，所用岩心只提供埋深，不提供岩心所在井位是否有油藏出现。

本次实验共测试样品 8 组 41 件^①，包含地层有沙三下、沙三中、沙二上、沙一段。应力记忆出现率指出现记忆值的个数与可出现记忆值的个数之比（百分比），可出现记忆值的个数是指测值个数和未测得值个数的总和。应力记忆出现率越高，测试结果越可靠。在测

① 声发射测试工作由地质力学研究所丁原辰研究员完成。

点试样满足（通常是 10 个）的情况下，通常记忆出现率大于 60% 为可靠程度较高，小于 60% 为可靠程度较低。

在本次实验过程中，我们选择了四个有代表性的测点，它们分别是：“辛 1 井”、“辛 2 井”、“河 29 井”、“莱 105 井”。在钻取岩心时，除了测点“莱 105 井”以外，其余 3 个测点的试样数量不足 10 个，而且测点“辛 2 井”和测点“辛 1 井”的试样还不是取自 3 个不同的方向，而是分别取自两个和一个方向，因而给出的测试结果是可靠性不高和可靠性极低。因此在本文选取典型测点“莱 105 井”的应力值结果作为实例进行分析，从“莱 105 井”的一个试样 L-lylf 的声发射测试曲线（图 1）上，可以看出外加压应力与声发射累计数之间的大致关系。

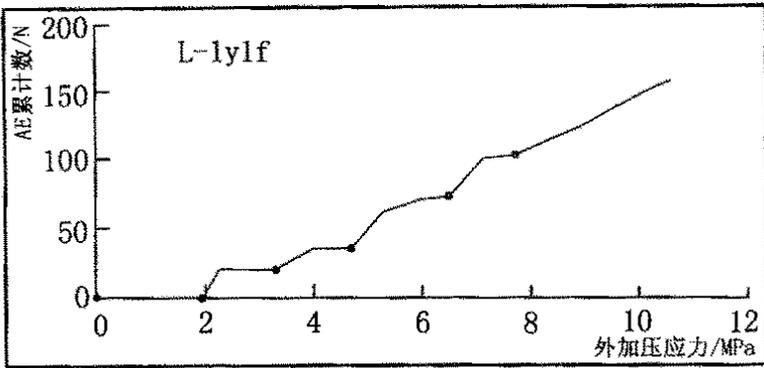


图 1 “莱 105 井”试样 L-lylf 的声发射测试曲线

Fig.1 Testing curve of acoustic emission of sample L-lylf from “L-105 well”

声发射法古应力测量所测得的各应力值是岩石记忆的各主要构造运动期的最大主应力值，是不包含当时孔隙压力的最大主应力值，实际是当时的最大主应力与当时孔隙压力之差，也即是当时的有效最大主应力值⁹¹。从这个意义上说，也可以认为测的是差应力。若要求取古构造活动的最大主应力，需要计算样品在当时埋藏条件下的孔隙压力，然后与声发射测量值相加。鉴于无法知道当时的孔隙压力，我们只能以测点离地表所处深度的静水压力予以取代，从而可以大致估计各测点的最大主应力值：

测点“莱 105 井”的各试样离地表平均深度为 2739.8m，估计其 σ_1 值如下：

$$\sigma_1 \approx 4.6 + 0.0098 \times 2739.8 + 4.6 + 26.9 = 31.5 \text{ (MPa)}$$

在测点“莱 105 井”处的岩石相当松散，孔隙压力相对较高，估计应高于测点深度处的静水压力，将其 $\sigma_{1\text{有效}}$ 加上测点深度处的静水压力来估计 σ_1 的值，就会导致估计值偏低。基于这一分析和估计，我们可以知道 σ_1 实际值中测点的孔隙压力所占成分越多，测点越有利于油气聚集（前提是测点处于形成油气藏的构造圈闭之中）。

莱 105 井采样深度为 2739.8m，样品岩性为粗粒砂岩，层位属于沙三中（Es3 中），测得最大主应力记忆值 5 组。其中 4 组应力记忆出现率大于等于 64%，属于可靠。应力记忆出现率为 29% 者 1 组，属于不可靠（表 1）。该样品记忆了 4 次可靠的受力过程，其中 1 次为现今地应力，3 次为古构造应力。测点“辛 1 井”，“辛 2 井”，“河 29 井”的古今应力记忆值测值分别见表（表 2，表 3，表 4）。

表 1 测点“莱 105 井”古今应力记忆值测值

Table 1 Memory values of precontemporary and present stresses in measuring point “L-105 Well”

试样编号	古今应力记忆值测值/MPa				
	0~2.0	2~3.5	3.5~5.5	5.5~7.5	7.5~9.5
可记忆应力值个数	14	14	14	13	11
测得记忆应力值个数	4	10	11	9	7
记忆出现率	29%	71%	79%	69%	64%
加权平均值	1.7	2.8	4.6	6.7	8.5

表 2 测点“辛一井”古今应力记忆值测值

Table 2 Memory values of precontemporary and present stresses in measuring point “Xin (X-1)”

试样编号	古今应力记忆值测值/MPa				
	0~2.5	2.5~4.0	4.0~5.5	5.5~7.0	7.0~8.5
可记忆应力值个数	3	3	3	3	3
测得记忆应力值个数	2	2	3	1	2
记忆出现率	66%	66%	100%	33%	66%
平均值	2.2	3.6	4.6	5.7	7.4

表 3 测点“辛二井”古今地应力记忆值测值

Table 3 Memory values of precontemporary and present stresses in measuring point “Xin (X-2)”

试样号	古今应力记忆值测值/MPa											
	0~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35	35~40	40~45	45~50	50~55	55~60	60~70
可出现记忆应力值个数	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	4
实测得记忆应力值个数	2	4	2	1	1	1	3	4	4	1	3	4
记忆出现率	33%	67%	33%	16.7%	16.7%	16.7%	50%	67%	67%	16.7%	60%	100%
平均值	7.0	11.9	18.7	21.6	28.6	30.6	37.0	43.1	48.9	52.2	58.2	66.8

表 4 测点“河 29 井”古今应力记忆值测值

Table 4 Memory values of precontemporary and present stresses in measuring point “H-29 Well”

试样编号	古今应力记忆值测值/MPa					
	0~5.0	5~7.5	7.5~10	10~12.5	12.5~15	15~17.5
可记忆应力值个数	7	7	7	7	7	6
测得记忆应力值个数	3	6	3	7	5	6
记忆出现率	43%	86%	43%	100%	71%	100%
平均值	3.9	6.1	9.0	10.7	12.9	16.0

4 构造运动期次分析

从以上各表中的现今最大主应力的记忆情况可以看出，每组样品应力记忆出现率最高者为现今最大主应力，它们的应力记忆出现率高达 75%~100%，说明测试结果可靠，从而我

们可以对东营凹陷新生代的构造运动期次(图2)进行分析。

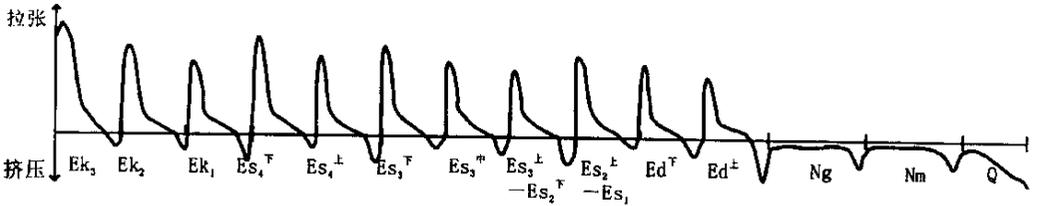


图2 东营凹陷新生代构造期次图

Fig.2 Cenozoic structural phase in the Dongying subbasin

从样品可靠的古应力记忆次数来看,辛2井2064.5m深度的沙一段样品为3次,辛2井2064.7m深度的沙一段样品3次,河29井沙二上样品3次,莱105井沙三中样品4次,牛105井沙三中样品4次,牛104井沙三中样品4次,牛35井沙三中样品4次,纯41—38井沙三下样品4次。也就是说,东营凹陷在沙一段和沙二上段时,地层经历过3次明显的古构造挤压活动,沙三中段和沙三下段时,地层经历过4次明显的古构造挤压活动(表5)。

从可靠的古应力记忆次数与构造活动期次的对应关系来看,东营凹陷沙三期以来经历了4个二级构造旋回,它们是沙三一沙二下期、沙二上一东营期、馆陶期和明化镇期。每个二级构造层序的顶部都存在着剥蚀和地层不整合的现象,这都可以作为层序的边界,也就是挤压运动期次的界限。在这一点上充分反映了挤压作用的存在,而且通过其旋回的数目就可以知道其挤压活动的期次,通过二级构造旋回边界的剥蚀程度和不整合的分布范围,我们能够看出在沙三期以来的四次挤压活动中,以东营期末的最强,其次是沙二下期,再次应属于明化镇期末,馆陶期末应该最弱。沙三中和沙三下的样品可靠地记忆了4次挤压作用的最大主压应力,沙二上和沙一段的样品仅可靠地记忆了东营期末、馆陶期末和明化镇期末3次挤压作用的最大主压应力。根据应力记忆出现率与挤压活动强度的对应关系,能够大致确认各次挤压活动在各个样品上记忆的最大主压应力(有效应力)值(表5)。

从较可靠古应力记忆次数来看,辛2井2064.7m深度的沙一段样品2次,河29井沙二上样品2次,牛105井沙三中样品4次,牛35井沙三中样品4次,纯41—38井沙三下样品4次。其余的辛2井2064.5m深度沙一段样品、莱105井沙三中样品和牛104井沙三中样品,由于测试过程中岩样早期破裂,没有测得较可靠的古应力记忆数值。但是可以看出,沙一段和沙二上样品除记忆了现今地应力和3次可靠的古应力外,还记忆了2次较可靠的古应力。沙三下样品除记忆了现今地应力和4次可靠的古应力外,还记忆了4次较可靠的古应力。前已述及,可靠的应力记忆值对应着现今地应力和二级构造旋回末的挤压应力,较可靠的古应力记忆值应该对应着三级构造旋回末的挤压应力。沙一段和沙二上样品记忆的2次较可靠古应力应该代表着沙一末期和东营早期末的构造挤压,沙三下样品记忆的4次较可靠古应力应该代表着沙三早期末、沙三中期末、沙一期末和东营早期末的构造挤压。沙三中的样品应该只记忆3次较可靠的古应力,代表着沙三中期末、沙一期末和东营早期末的构造挤压,测出的4次较可靠古应力记忆中应该有一次是不可靠的。

表 5 东营凹陷声发射法最大主应力测试结果

Table 5 Measuring results of the maximal principal stress with acoustic emission in the Dongying subbasin

井号	地层	深度 (m)	应力记忆出现率及平均最大主压应力值 (MPa)									
			记忆出现率	100%	66%		66%	66%	33%			
辛 2	Es1	2064.5	记忆出现率	100%	66%		66%	66%	33%			
			平均应力值	4.6	7.4		3.6	2.2	5.7			
辛 2	Es1	2064.7	记忆出现率	100%	67%		67%	67%	60%	50%		
			平均应力值	66.8	48.9		43.1	11.9	58.2	37.0		
河 29	Es2 上	2444.1	记忆出现率	100%	100%		86%	71%	43%	43%		
			平均应力值	10.7	16.0		6.1	12.9	9.0	3.9		
莱 105	Es3 中	2739.8	记忆出现率	79%	71%	69%	64%	29%				
			平均应力值	4.6	2.8	6.7	8.5	1.7				
牛 105	Es3 中	3050.9	记忆出现率	91%	82%	82%	73%	64%	55%	50%	45%	45%
			平均应力值	42.0	74.7	56.6	47.7	35.3	64.8	110	85.0	26.7
牛 104	Es3 中	3032.3	记忆出现率	100%	100%	100%	67%	50%				
			平均应力值	21.9	32.3	27.1	42.3	14.2				
牛 35	Es3 中	2974.0	记忆出现率	75%	67%	67%	63%	63%	50%	50%	50%	50%
			平均应力值	26.7	76.9	85.4	34.9	13.0	64.8	53.4	42.8	94.8
纯 41 —38	Es3 下	2653.3	记忆出现率	75%	75%	75%	60%	60%	50%	50%	50%	50%
			平均应力值	33.7	42.1	17.2	87.2	63.2	49.4	24.4	108	116
构造活动时期			现今	Ed 末	Es2 上末	Nm 末	Ng 末	Ed 末、Es1 末、Es3 中末、Es3 下末				
构造活动绝对年龄 (Ma)			0.0	24.6	37.0	2.0	5.0					

5 结论

(1) 声反射作为一种测试地应力最大主应力值的方法, 可以为研究某一地区的构造运动期次提供充分的参考依据。从测点测试的现今最大主应力来看, 每组样品应力记忆出现率最高者为现今最大主应力, 它们的应力记忆出现率高达 75% ~ 100%, 说明测试结果可靠。

(2) 从可靠的古应力记忆次数与构造活动期次的对应关系来看, 东营凹陷沙三期以来经历了 4 个二级构造旋回, 它们是沙三一沙二下期、沙二上一东营期、馆陶期和明化镇期。每个二级构造层序的顶部都存在剥蚀和地层不整合的现象, 从这一点充分反映了挤压作用的存在, 而且通过其旋回数可以知道其挤压活动的期次, 通过二级构造旋回边界的剥蚀程度和不整合的分布范围, 我们能够看出在沙三期以来的四次挤压活动中, 以东营期末最强, 馆陶期末最弱。根据应力记忆出现率与挤压活动强度的对应关系, 能够大致确认各次挤压活动在各个样品上记忆的最大主压应力 (有效应力) 值。

(3) 较可靠的古应力记忆值应该对应着三级构造旋回末的挤压应力。沙一段和沙二上样品记忆的 2 次较可靠古应力应该代表着沙一末期和东营早期末的构造挤压, 沙三下样品记忆的 4 次较可靠古应力应该代表着沙三早期末、沙三中期末、沙一期末和东营早期末的构造挤压。沙三中的样品应该只记忆 3 次较可靠的古应力, 代表着沙三中期末、沙一期末和东营早期末的构造挤压, 测出的 4 次较可靠古应力记忆中应该有一次是不可靠的。

参 考 文 献

- [1] 孙吉主, 周健. 影响岩石声发射的几个因素 [J]. 地壳形变与地震, 1997, 17 (2): 2 ~ 5.
- [2] 李俊平. 声发射技术在采矿工程中的应用 [J]. 工业安全与防尘, 2000, 1 : 32 ~ 35.
- [3] Goodman R E. Subaudible noise during compression of rock [J]. Geology Society of America Bulletin, 1963, 74 : 487 ~ 490.
- [4] 冯英. 岩石声发射 Kaiser 效应测定地应力研究及工程应用 [J]. 焦作工学院学报, 1997, 16 (4): 12 ~ 16.
- [5] 金川忠. 用岩石声发射测定地层中的应力 [J]. 地下工程, 1980, 2 : 30 ~ 36.
- [6] 邓荣贵, 付小敏. 用 Kaiser 效应测定地应力的几个问题的探讨 [A]. 第二届全国岩石动力学学术会议论文集 [C]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1990, 10.
- [7] 丁原辰等. 岩石试样凯塞效应的实验研究 [J]. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 1989, 12 : 171 ~ 183.
- [8] 尹菲, 冯英. 声发射技术在岩土工程中的初步应用 [A]. 岩石力学在工程中的应用. 第二次全国岩石力学与工程学术会议论文集 [C]. 北京: 知识出版社, 1989, 11.
- [9] 丁原辰. 声发射法古应力测量问题讨论 [J]. 地质力学学报, 2000, 6 (2): 45 ~ 52.
- [10] 丁原辰, 张大伦. 声发射抹录不净现象在地应力测定中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10 (4): 313 ~ 326.
- [11] 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 : 124.

APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION IN THE STUDY OF THE NUMBER OF CENOZOIC TECTONIC PHASES IN THE DONGYING SUBBASIN

XU Jian-chun , DAI Jun-sheng

(Faculty of Geo-Resource and Information , University of Petroleum , Dongying 257061 , Shandong , China)

Abstract : Acoustic emission as a method of measuring ground stresses has aroused increasing interest. Rock has the function of “ memory ” of its stress history. By using this function , the authors applied acoustic emission to the analysis of rock samples from the Dongying subbasin and obtained the ground stress memory values and memory occurrence rates and thus further revealed the phase number and intensity of tectonic activities that this area underwent. The results of the measurements demonstrate that the paleo-stress memory values coincide with the stress history in the tectonic cycles. Furthermore , the paper briefly introduces the basic principle of acoustic emission.

Key words : acoustic emission ; Dongying subbasin ; tectonic phase