

# 声发射法测量古今应力在油田的应用\*

孙宝珊 丁原辰 邵兆刚 周新桂 汪西海

(中国地质科学院地质力学研究所,北京)

张大权

(地矿部西北石油地质局,乌鲁木齐)

**摘要** 作者采用声发射法测量了塔北油田、中原油田的古今应力值,并用实测数据反演模拟了中原油田的构造应力场。出油井现今最大主应力值低于非出油井的特点可直接用于评价含油构造与非含油构造,而且,测量现今应力的大小为油田开发注水压裂的泵压参数的选取和开采层系的划分提供了重要的依据。

**关键词** 声发射法 应力测量 油田勘探开发 应用

## 0 引言

声发射应力测量技术方法可操作性强,相对简便、经济,具有其他测量方法不可替代的优势。它适应于地表或井下地质条件,试样岩性不限,规格可大可小,且能测出古今应力。

声发射(简称 AE 法)法测量应力的理论和实验依据是岩石在受力过程中存在凯瑟效应和抹录不净现象<sup>[1,2]</sup>,其中“抹录不净”现象乃是判识古今应力值的重要依据。

作者采用 AE 法对中国 3 个油田进行测试研究,初步确定,塔北油田新生代岩石记忆了 2 期应力值,中生代岩石记忆了 5 期应力值,古生代岩石记忆了 7 期应力值;而中原油田中新世代岩石只记忆了 2 期应力值。作者用实测应力值反演了中原油田和科尔康油田的应力场,分析了不同部位应力值的变化情况,应用出油井应力值低于非出油井应力值的特点,进行预测和评估油田含油构造与非含油构造,应用现今应力值的大小为注采方案设计提供了依据。

## 1 古今应力数值筛分方法

本文提出的筛分原则是:

### 1.1 筛分现今地应力最大主应力值

岩石能够记忆古今应力值,而现今地应力的最大主应力值筛分方法是:

(1)以地表岩石的测试结果与钻孔深处岩芯的测试结果对比,所取试样最好是同一时代的岩石。由于地表岩石脱离现今地应力场的作用,故不可能测出现今地应力值,一般也不可能测

\* 地矿部地质力学开放研究实验室资助项目。

出与现今地应力值完全相同的古应力值。

(2)通常现今地应力的最大主应力值在初压(第一次加载)声发射累积数与外加压应力响应曲线上,斜率陡增点比较明显(图1)。图中的“·”表示与现今地应力最大主应力对应的响应曲线上的斜率陡增点。图1a为试样n127的初压响应曲线,图1b为复压(特定技术条件下第二次加载)声发射累积数与外加压应力响应曲线。比较图1a中圈出的4个“表现凯瑟效应”(又称“视凯瑟效应”)点<sup>[3]</sup>,“·”处的斜率陡增相对明显;比较图1b中圈出的4个“抹录不净”点<sup>[1]</sup>,其“·”处的斜率陡增也较明显。

(3)以全国平均最大水平主应力值随深度变化的规律,对测得的现今最大主应力值可作参考性估计判断。

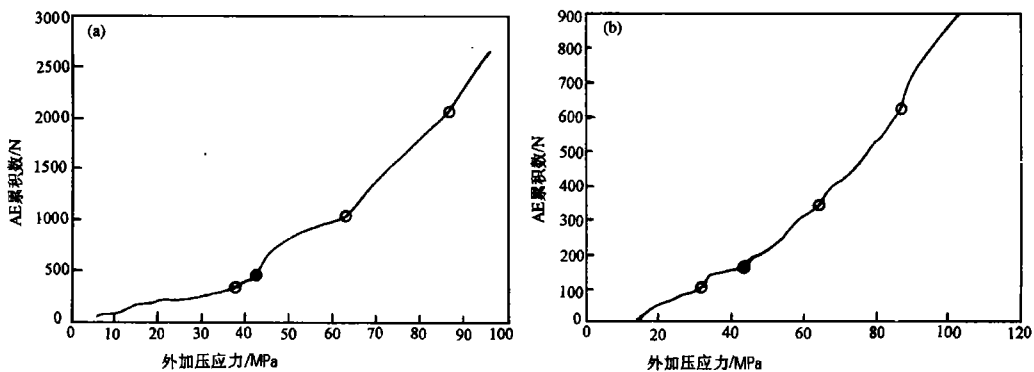


图1 外加压应力与声发射累积计数响应曲线(试样 No. 127)

Fig. 1 Response curve of total AE counts and stress applied (Specimen No. 127)

a. 初压; b. 复压

(4)AE法测得的应力数据与钻孔崩落法测取的现今应力值(此法只能测量现今地应力)对比,找出两者一致或相近的应力数据,此应力数据可视为现今地应力的最大主应力值。上述两种方法测取塔北油田的现今地应力的最大主应力值非常接近(表1、2)。证明由AE法测取的塔北油田多组应力数据中筛分出的这组应力值应是现今最大主应力值,余为不同期次的古应力值。

(5)把AE法测取的应力数据与水压致裂法计算的现今应力值比较,也可以筛分出现今应力数据组,辽河油田就曾进行过这方面的工作。

表1 钻孔崩落法计算的塔北各油井现今地应力最大、最小水平主应力结果

Table. 1 Present Stresses derived from borehole breakouts in Northern Tarim

油井编号	测量深度(m)	钻孔直径D(cm)	平均崩落深度 $r_b$ (cm)	$r_b/D$	$\sigma_H/R_c$	$\sigma_H/\sigma_h$	岩石单轴抗压强度 $R_c$ (MPa)	最小水平主应力 $\sigma_h$ (MPa)	最大水平主应力 $\sigma_H$ (MPa)
沙5井	5379—5425	21.59	23.88	1.11	0.05	15.9	128	6.8	108.4
沙21井	4511—4685	21.59	24.89	1.15	0.07	14.8	83.5	6.1	90.3
沙15井	4963—5268	31.12	37.85	1.21	0.12	11.1	72.1	8.5	94.1
沙17井	4226—4652	21.59	27.43	1.27	0.14	7.94	91.2	12.3	97.8

表 2 AE 法测塔北现今最大主应力数据表

Table. 2 Present Stresses deriued from AE in the Northern Tarim

编号	井号	岩性	时代	埋深(m)	有效应力(MPa)	静水压力(MPa)	最大主应力(MPa)	备注
n122	沙 5	灰岩	C <sub>1</sub>	5458	51.5	53.5	105.0	
n147	沙 21	砂岩	S	5152	68.4	50.5	118.9	
n134	沙 15	泥岩	K <sub>1kp</sub>	5271	61.2	51.7	112.9	
n135	沙 15	砂岩	K <sub>1kp</sub>	5262	49.9	51.6	101.5	
n136	沙 15	白云岩	O	5385	51.4	52.8	104.2	
n139	沙 17	砂岩	T	4657	44.3	45.6	89.9	

## 1.2 古应力分期

测得的各个古应力值,对应不同的构造运动期次,细分期时必须是由新到老,由浅到深逐时代(或运动阶段)、逐层系进行。将测得的数据先统计出新近时代岩石试样的测试数据,再向老岩层依次进行统计,因为较新的岩石不可能记忆早于该时代的应力活动,即时代愈新记忆历史应力期次愈少;相反,岩石愈老记忆历史应力期次就愈多。一般说来,分别对各时代地层岩石试样作古应力测值统计,可确定出对应各不同构造运动期次的古应力的最大主应力值。塔北油田地区地质工作基础较好,为了判断古应力分期的可靠性,在理清区内构造运动期次的基础上,注意选取不同构造运动阶段相应时代的岩石岩样,分别按不同层序、不同构造层、不同构造部位、不同地点和不同岩性进行测值统计。表 3 给出了依据这些原则选定的 AE 法采样点。同时依据地质上认识的构造运动性质、席卷范围、强弱变化以及不同构造部位的运动特点,对测试结果和统计情况核查和检验。

笔者认为古今应力数值一般随测点埋藏深度的增加而增大。在对应应力数值分组、对比和分期时,应进行测点的埋深和地层剥蚀校正。需要指出的是:目前对是否应进行上述校正尚存在不同观点,详见本期丁原辰等“塔里木盆地北部油田古应力的 AE 法测量”一文。

## 2 AE 法估测古今应力的初步应用

### 2.1 用于研究油田经历的构造应力场期次及其主攻地位

塔北油田测试结果(见本期丁原辰等塔里木盆地北部油田古应力的 AE 法测量)表明:新生代岩石主要记忆了 2 期历史应力;中生代岩石记忆了 5 期历史应力;古生代岩石记忆了 7 期。所测某期古应力出现记忆的频度大小反映相应期次构造运动的强度,实验证明某一应力活动持续时间愈久,或反复次数愈多该期应力出现记忆愈明显或者说记忆愈深刻<sup>[3]</sup>。据此,分析出塔北油田新生代岩石记忆出现频度高的应力值对应喜马拉雅中晚期较强烈的构造运动;而晚古生代高记忆出现频度的应力数据标明海西晚期强烈的构造运动。

### 2.2 揭示成藏期构造应力场最大主应力值

如塔北地区油气移聚成藏期主要发生在海西晚期和喜马拉雅中晚期,尤以后者最重要,估测该期最大主应力为 88.8MPa。

### 2.3 为应力场数学模拟反演提供实测应力数据

如我国东部汶西凹陷,根据地质研究结果,在应力场数学模拟时确定了两期外力加载方

表 3 沙雅隆起及邻区地层层序及构造运动以及 AE 法采样层系简表

Table. 3 Column of stratigraphic succession tectonic movement, sampling location of AE method at the Shaya Uplift and adjacent area, Northren Traim BaSin

地 层 系 统				接 触 关 系	构 造 运 动	地 质 结 构 与 演 化		AE 法 采 样 层 系				
界	系	统	组或群			代号	构造层		演化阶段			
新 生 界	第四系	全新统		Q	喜马拉雅 晚期运动  喜马拉雅中期运动  喜马拉雅早期运动	第四系- 上第三系 构造层	前陆盆地 统一成盆 阶段					
		更新统										
	上第三系	上新统	西域组	N <sub>2x</sub>				整一 上超			▲	
			库车组	N <sub>2k</sub>							▲	
		中新统	康村组	N <sub>1k</sub>				局部削截			▲	
吉迪克组	N <sub>1j</sub>					▲						
下第三系		苏维依组	N <sub>1s</sub>	上超								
中 生 界	白垩系	上统			燕山晚期运动	下第三系 — 上二叠 统构造层	大陆内拗 陷盆地(晚 期类前陆 盆地)发展 阶段					
		下统	卡普沙良群	K <sub>1kp</sub>				整一 上超		▲		
	侏罗系	上统	卡拉札组	J <sub>3k</sub>	局部削截			燕山早期运动		▲		
			齐古组	J <sub>3q</sub>	整一 上超					▲		
		中统	七克台组	J <sub>2q</sub>	局部削截				▲			
			克孜勒努尔组	J <sub>2k</sub>					▲			
	下统	阳关组	J <sub>1y</sub>		印支运动				▲			
		阿合组	J <sub>1a</sub>	整一 上超					▲			
	三叠系	上统	塔里奇克组	T <sub>3t</sub>	局部削截					▲		
		中统	黄山街组	T <sub>3h</sub>						▲		
		下统	克拉玛依组	T <sub>2k</sub>						▲		
			俄霍布拉克组	T <sub>1ch</sub>						▲		
二叠系	上统	比尤勒包谷组	P <sub>2b</sub>	上超	海西晚期运动	下二叠统 — 石炭构 造层	中期类前 陆盆地发 展阶段					
		沙井子组	P <sub>2s</sub>	整一 上超 削截					▲			
	下统	开派茨曹克组	P <sub>1kl</sub>	局部削截					▲			
		库普库兹满组	P <sub>1kk</sub>						▲			
石炭系	上统	康克林组	C <sub>2k</sub>	局部削截	海西早期运动		▲					
		北京他乌组	C <sub>2bg</sub>	整一 下超			▲					
	中统	卡拉苏组	C <sub>2k</sub>					▲				
		野云沟组	C <sub>1y</sub>	上超				▲				
古 生 界	泥盆系	中上统	克孜勒塔格组	D <sub>2-sk</sub>	前截	泥盆—志 留系构造 层	早期类前 陆盆地发 展阶段					
		下统	依木干他乌组	D <sub>1y</sub>					▲			
	中上统	塔塔埃尔塔格组	S <sub>2-sl</sub>	整一 上超	加里东中期运动				▲			
		柯坪塔格组	S <sub>1k</sub>						▲			
	奥陶系	上统	因干组	O <sub>3y</sub>	微角度削截			奥陶—震 旦系构造 层	塔里木古 地块克拉 通稳定发 展阶段			
			其浪组	O <sub>2-sg</sub>							▲	
		中统	坎岭组	O <sub>2k</sub>								▲
			萨尔干组	O <sub>1-2s</sub>	整一 上超						▲	
	寒武系	上统	上丘里塔格群	Є <sub>2-3ql</sub>				塔里木古 地块克拉 通稳定发 展阶段		▲		
			下丘里塔格群	Є <sub>2-3ql</sub>						▲		
		中统	阿瓦塔格组	Є <sub>2a</sub>							▲	
			沙依里克组	Є <sub>1s</sub>							▲	
下统	吾松格组	Є <sub>1w</sub>				▲						
	肖尔布拉克组	Є <sub>1xr</sub>				▲						
玉尔吐斯组		玉尔吐斯组	Є <sub>1y</sub>				▲					
	震旦系	上统	奇格布拉克组	Z <sub>3g</sub>	上超	塔里木运动						
苏盖特布拉克组			Z <sub>2s</sub>									
下统		尤尔美那克组	Z <sub>1y</sub>									
		巧思布拉克组	Z <sub>1q</sub>	前截								
前震旦系		阿克苏群	Pt			基底构 造层	塔里木地 块形成阶段	▲				

注：西北石油地质局资料综编。

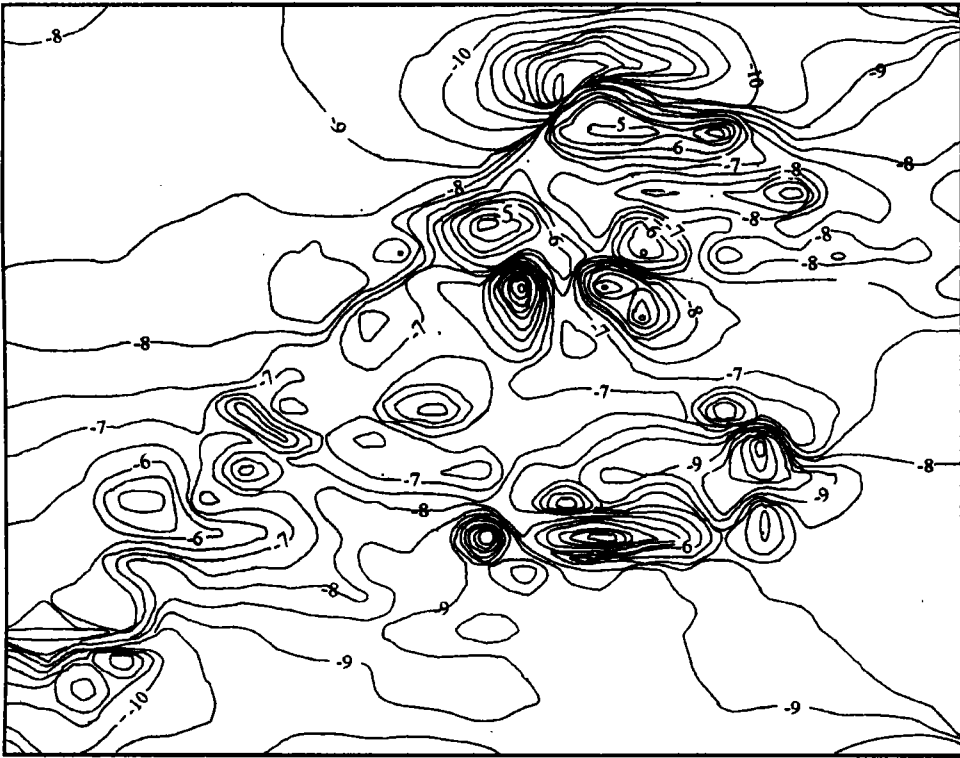


图 2 汶西凹陷新生代应力场最大主应力等值线图

Fig. 2 Contour map of maximum principal stresses Cenozoic era in the Wenxi

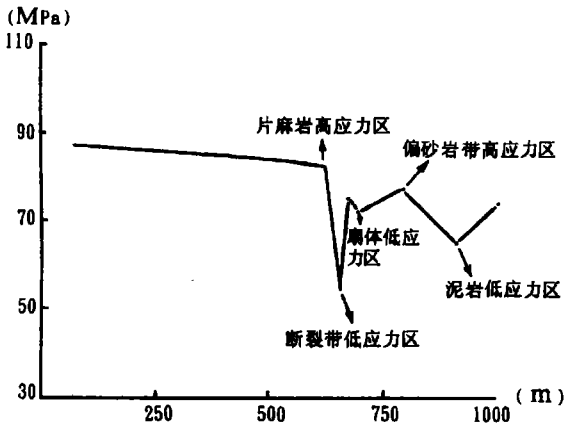


图 3 汶西凹陷新生代应力场最大主应力剖面图

Fig. 3 Sectional profile of maximum principal stresses of Cenozoic era in the Wenxi

式,参考区域岩石力学参数和岩石力学实验插值得出 7 种岩石力学参数,应用 AE 法测估的中生代一期最大主应力值为 110MPa,新生代一期最大主应力值为 62.1—91.7MPa,采用相应两期地震反射层构造图为地质构造格架模型,选取连续介质弹性变形理论为力学模型原则,进行了两期构造应力场数学模拟计算。其中,新生代是凹陷油气成藏期应力场具如下特点:其一,凹陷应力场,基本特点与断裂性质、展布方向和岩石力学性质相关,较大规模的断裂往往是应力场变化的边界,泥岩、扇根及断裂带对应的是低应力区(图 2、3)。其二,边界断裂转弯处外侧应力集中,梯度变化大,凹陷西部内侧为张应力区,恰为正断裂发育部位。

## 3 AE 法估测现今应力的应用

### 3.1 应力数据大小是评估含油构造与非含油构造的重要依据之一

塔北油田在深 3845—5860m 井段的出油井与非出油井的现今应力最大主应力数值统计发现,出油井的最大主应力值低于非出油井的应力值(限于篇幅,拟另文发表)。它给我们从应力值大小去评估油气分布状况的启示,为评估含油构造与非含油构造和筛选有利井位提供了重要依据。

### 3.2 AE 法应力测量与油气开发

AE 法应力测量与水压致裂法结合,可以评估油气田剖面应力状态,可用于指导油气勘探开发工作。辽河油田的探索已取得如下经验:

(1)首批重点开发井,宜选在低应力值的近断裂或高部位的圈闭构造上,在这些部位易见效。

(2)相同测试条件下声发射信号丰富的岩样所在的储层(微裂隙发育)可列为开采层系。如辽河科尔康油田的晚侏罗世玄武岩储油层便是。

(3)结合储层地应力剖面资料,划分开采层系,以决定单层开采或者混层合并开采,以防止单井水突进。

(4)现今最大主应力值,是选择注水压裂的泵压参数的重要依据之一,按合理的泵压参数钻进,利于提高经济效益。

## 4 讨论

AE 法测量应力是油田应力场研究工作的一项新技术,当与钻孔崩落法、水压致裂法计算应力相结合时,将对油田勘探开发起一定的指导作用。本文对古今应力筛分作了初步探讨,有待完善,目前仅在少数油田应用,宜不断扩大应用领域。需要指出的是:应力大小与所处的构造环境、构造具体部位、岩层含流体多少及岩性有关,在筛分不同期次应力值时要充分考虑多种因素,并进行孔隙压校正。总之,地质构造特征精细研究是应力筛分的关键。

本项研究得到西北石油地质局刘鹏生、葛志田高级工程师,中国石油大学刘泽容、信荃麟教授及辽河石油勘探局李志明、张金珠高级工程师、任德生工程师的支持和帮助,并得到地质力学开放研究实验室的大力资助和指导,在此致射。

### 参 考 文 献

- 1 丁原辰、汪西海等,声发射凯瑟效应测量岩石先存应力值的限度。第三届全国地应力会议论文集,北京:地震出版社,1994。
- 2 丁原辰、张大伦,声发射抹录不净现象及其在地应力测量中的应用。岩石力学与工程学报,1991,10(4)。
- 3 丁原辰等,声发射估计岩石古应力的实验研究。地质力学与地壳运动——地质力学开放研究实验室 1991—1992 年年报,北京:地震出版社,1994,43—55。
- 4 孙宝珊等,塔里木盆地北部地区构造应力场特征与油气移聚的关系。中国塔里木盆地北部油气地质研究(2),构造与油气,1991。

# APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE IN DETERMINATION OF FOSSIL AND PRESENT-DAY STRESSES IN OIL FIELDS

Sun Baoshan Ding Yuanchen Shao Zhaogang Zhou Xingui Wang Xihai

*(Institute of Geomechanics, CAGS)*

Zhang Daquan

*(Northwest Bureau of Petroleum Geology, MGMR)*

**Abstract** Fossil and present-day rock stresses in the Tabei, Zhongyuan, and the Keerkang Oil Fields have been measured using acoustic emission (AE) technique. It has been found by an analysis of the relationship between known oil/gas distribution and stress state that the present sreatest principal stress in the Tabei Oil Field is below the average of the country, and that the stress in producing wells is lower than that in the non-producing wells. Therefore, the magnitude of the current stress may serve as a criterion for distinguishing oil-bearing structures, for choosing the parameters of pumping pressure, and for the division of production horizons.

**Key words** oil field, stress measurement, acoustic emission

## 作者简介

孙宝珊,男,58岁,研究员。1961年毕业于长春地质学院,主要从事地质力学和石油地质构造研究。通讯地址:北京市海淀区民族学院南路11号地质力学研究所。邮政编码:100081。