

塔里木盆地北部油田古应力的 AE 法测量*

丁原辰 孙宝珊 汪西海 邵兆刚 周新桂

(中国地质科学院地质力学研究所)

摘要 本文在阐述了声发射(简称 AE—Acoustic Emission)法测量古构造应力的可行性之后,着重介绍了测量古应力与测量现今应力在方法上的不同之处。作者采用 AE 法测量了塔里木盆地北部油田古应力,并得出该区喜马拉雅期有 2 幕主要构造运动;燕山期有 3 幕主要构造运动;古生代有 2—3 幕主要构造运动的认识。喜马拉雅构造运动在该区占主导地位。

关键词 古应力 古构造应力 声发射 AE

0 引言

丁原辰、张大伦发现了声发射抹录不净现象^[1],在此基础上丁原辰提出了声发射法测量历史地应力的新见解^①,用于实践取得初步实效^[2]。此后,笔者等以单轴 3 期加载一个花岗岩岩柱,用于模拟历史应力,再以声发射法估计这 3 期模拟应力值,检验证实方法可行^[3]。

应该指出,上述模拟实验过于简化,地下深处岩石处于三维应力状态之下,所经历的多期构造运动也应是三维应力作用结果。因此,三维多期加载模拟实验结果才能给出令人信服的验证,并能给出较可信的测量精度。然而,由于这种实验花费昂贵,笔者用已知经历多次构造运动的岩石进行估测,取代这一昂贵的模拟实验。塔里木盆地北部油田有长期工作基础,构造运动期次研究得较清楚,以对其实测作检验,应是可行的检验手段。

1 测点布置

塔里木盆地北部油田古构造应力的测点布置(图 1),基于以下几个方面的考虑:

- (1)选取的测点面要宽,使测量结果能反映区域构造运动的期幕;
- (2)尽量选用各测点新鲜、坚硬的岩石,这样的岩石有较高的单轴抗压强度,因而才能具备记忆高历史应力的条件;
- (3)各测点所采集的岩石时代要明确,同一测点尽量选取一定数量不同时代的岩石,以便比较;
- (4)盆地内钻孔岩芯采集反映地下岩石对各期幕历史应力记忆,盆地边缘(主要是北缘)地

* 地质矿产部地质力学开放研究实验室课题。

① 丁原辰,金厂沟梁金矿声发射法历史地应力测量研究报告,1990。

表出露岩石理应也能对各期幕历史应力给出记忆,二者兼顾以便比较;

(5)对于那些构造带应力作用方式已有所认识的,在其不同部位采集岩石,以考察各测点历史应力测值是否能反映所认识到的某期构造运动的应力作用方式;

(6)选取剥蚀厚度不同的测点,以比较剥蚀厚度不同,对历史应力记忆的差别;

(7)由于从构造上区别构造运动期幕主要依据不整合面予以判断,因此,测点应尽量选在不整合面上、下岩层中。

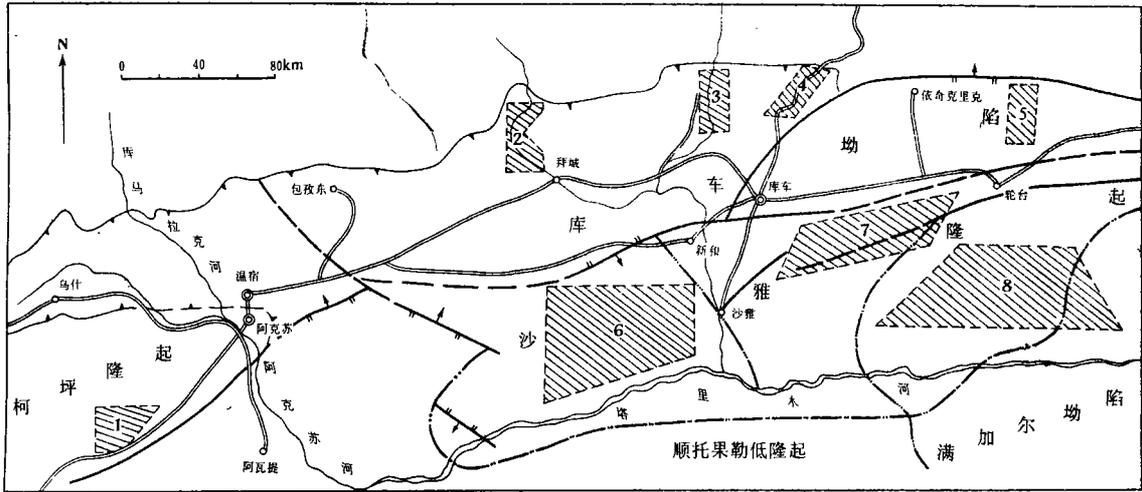


图 1 塔里木盆地北部油田测点位置图

Fig. 1 Sketch of sampling sites in Northern Tarim Oil Field

1. 印干采样点;
2. 卡普沙良河采样点;
3. 克拉苏河采样点;
4. 库车河采样点;
5. 阳霞河采样点;
6. 沙 13 井、沙 16 井、沙 21 井、沙 24 井、沙 26 井采样点;
7. 沙参 2 井、沙 4 井、沙 5 井、沙 6 井、沙 15 井采样点;
8. 沙 9 井、沙 14 井、沙 17 井、沙 18 井、沙 22 井、沙 23 井采样点

2 测量方法

测量设备和试样制作本文所列文献多有介绍,兹不赘述。这里重点介绍历史应力(即古应力)最大主应力值的测量方法。由于篇幅所限,只着重阐述古应力最大主应力值测量方法与现今地应力最大主应力值测量方法的不同之处。

2.1 岩石声发射全过程类型的确定

测量古应力最大主应力值需作声发射全过程(岩石试样压至破裂)的响应曲线。Boyce^[4]测量了岩石在单轴压缩下,压到岩石破坏的全过程声发射累积计数与外加压应力的响应关系。并将多种岩石声发射类型归并为 4 类,如表 1 和图 2 所示。由表 1 可见,同一种岩石其过渡点位置并不相同,甚至所属声发射类型也不一样。作 AE 法历史应力测量时,实际上也是作声发射全过程的响应曲线,由响应曲线上的斜率陡增点判断岩石对其经历的历史应力的记忆。当所估测的某期历史应力的最大主应力值恰处于 C 点值附近,则此值需特别仔细地辨识,若试样只进行了一次测量,则此值可认为不能测出,应予舍弃。从图 2 可以看出, I 型 III 型 C 点和 D 点处 AE 累积数有陡增,易与历史应力记忆混淆,目前测试技术 C 点附近历史地应力最大主应力

表 1 单轴压缩下岩石声发射类型概要(取自 Boyce,1981)

Table.1 Summary of AE signatures of rocks tested in unconfined compression (After Boyce,1981)

序号	岩石类型	单轴压缩强度 C ₀ (MPa)	AE 形状	过渡点的位置(单轴压缩强度 C ₀ 的百分比)		
				AB 至 BC	BC 至 CD	CD 至 DF
A	白云岩	241	I	6.6	70.1	90.8
B	页岩	57	II	...	47.3	90.1
C	云母片岩	19	II	...	41.0	80.0
D	片麻岩	71	I	14.7	79.4	88.2
E	大理岩	102	II	8.9	...	90.0
F	白云大理岩	96	I	14.3	82.1	96.2
G	花岗岩	160	I	4.3	84.8	94.2
H	页岩	168	II	10.8	...	95.5
I	云母片岩	67	III	...	68.7	87.8
J	石灰岩	64	IV	96.4

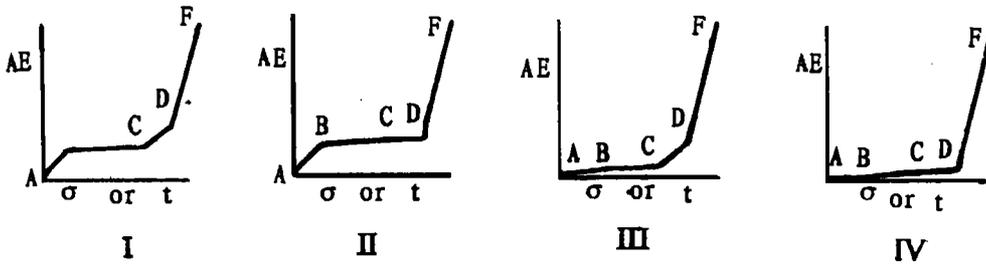


图 2 岩石声发射类型(取自 Boyce,1981)

Fig. 2 Types for rocks in AE(After Boyce,1981)

I 型. MOGI 型; II 型. 不稳定的; III 型. 致密的; IV 型. 致密的不稳定的

值,一般可以辨别,而 D 点处尚不能确认。故第一次加载(简称初压)时可以超过 C 点的应力,但不得超过 D 点。C 点附近的历史应力记忆,可通过特定技术条件下第二次重加载(简称复压)予以确认^[5]。因此,判断岩石声发射全过程类型是否是 I 型或 II 型以及它们的 C、D 点位置尤其重要。

2.2 择出现今地应力的最大主应力值

只有择出现今地应力的最大主应力值才能确认可靠的古应力测值,择出方法见本期孙宝珊等“声发射法测量古今应力在油田的应用”一文。

2.3 构造形成时的应力值判断

通常认为用声发射凯瑟效应(Kaiser effect)^[1]测量地应力无法判断形成构造的应力状态,只能测量形成构造以后的地应力状态,原因是形成构造的应力超过岩石的抗压强度。笔者对此持有疑议,理由有二,其一,岩石抗剪强度远低于单轴抗压强度,岩石破裂多是压扭、张扭的应力作用所致,而且这种应力不一定立即造成岩石破坏,只要其作用时间保持足够长,岩石蠕变发展到一定程度也会产生破裂;其二,岩体的三轴抗压强度远低于实验室内测定的岩石试件的三轴抗压强度,原因是岩体内的裂隙、缺陷等远远多于试件者,笔者以单轴加载于直径 50mm、高 100mm 的陶瓷试件上,求得陶瓷试件单轴抗压强度为 132.4MPa,而后在该试件避开裂纹处(图 4),取与轴向成 73° 角的直径 20mm、高 45mm 的小试样,求其响应曲线上的斜率陡增

点,看是否能反映大试件的抗压强度。实验证明小试样的 AE 响应曲线可以测出大试件的单轴抗压强度,误差 1.7%。当然,这只能作为上述三轴抗压强度情况下的旁证,同时也证明了凯瑟效应无明显方向性。岩石试样单轴抗压强度远远高于岩体单轴抗压强度不容置疑。至于小试

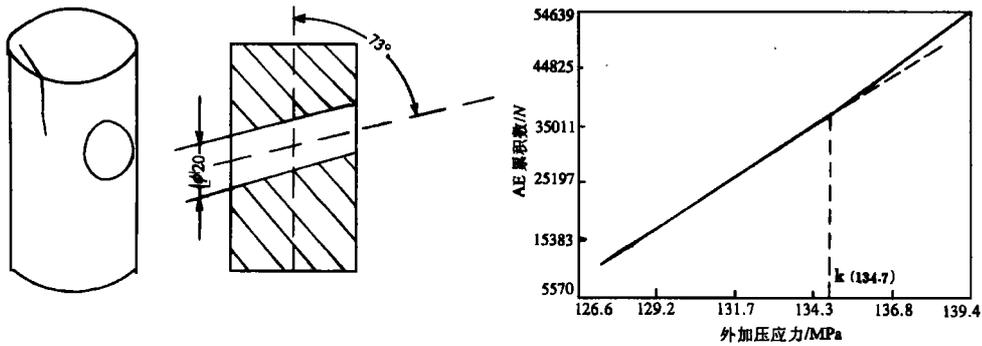


图 3 以小试样的凯瑟效应测量大试件的单轴抗压强度

Fig. 3 Applied a small specimen to measurement of unconfined strength of a big sample by Kaiser effect of AE

样单轴抗压强度是否高于岩体造成破坏时三维应力状态的最大主应力,由于缺乏实验尚难断言。但是,对于那些由于蠕变所致的岩体破坏,那么其破坏时的三维应力状态的最大主应力值以小试样的 AE 响应曲线理应能测出。尽管上述观点的依据不充分,将测区内时代最老的岩石其最高应力状态的最大主应力测值视为最强烈构造活动时的最大主应力值,并不影响对各期幕历史应力最大主应力的估测。作者的工作已经证实就单轴抗压强度上限而言,时代较老的岩石高于时代较新的岩石(由于篇幅所限,容以后的文章中详述)。况且在目前古构造应力场模拟中缺乏三维应力测值的情况下,提供一个可供参考的形成构造时的最大主应力值也是有价值的。

2.4 点、面结合

现今地应力测量每个测点要求 3 个以上任意方向取样,每方向至少取 3 个,一个测点不少于 10 个试样,进行测量值统计,求得该测点的现今地应力最大主应力值。古应力测量也需如此。不同的是,它要求每条响应曲线上每个较明显的斜率陡增点都用于统计,凡不同方向试样其响应曲线各斜率陡增点对应的应力有一致者,即可考虑为一期历史应力的最大主应力值,仅如此尚不够,还需作各测点的比较,也即作面上的比较。因为现今应力状态受古构造影响最为严重,不同构造部位现今地应力最大主应力值多不相同。但形成某期主导构造时应力场在相当大的范围内有一致性,故在主导构造应力场席卷的不同部位,均匀分布采测点,各测点在大范围内呈现对该期测值的一致性。例如,一个背斜,在其形成前各测点记忆的前一期历史应力最大主应力可能是一致的,而形成后的后期构造应力则会不一致。像背斜轴部测点的测值在统计时,异常数据有可能被剔除,也就是说,在古构造特殊部位的测值,不能代表古构造形成后的后期构造运动历史应力测值。因此,确定历史应力必须在一定范围内多测点进行测量,并对测值作出现频率统计,将出现频率高的测值认定为某期构造运动的最大主应力值。

2.5 不同时代岩石的测值比较

各测点单轴抗压强度足够高的同时代岩石,对该时代以来经历的构造运动期幕数,理应有

一致的统计结果。岩石时代愈老记忆的构造运动期幕数愈多。相反,时代愈晚记忆的构造运动期幕数愈少。恰当地选取不同时代的岩石进行测量,可估测出某一时代构造运动的最大主应力值。

3 测量结果

按照前述方法,统计出不同时代岩石记忆应力出现频度,绘成图 4、图 5、图 6。各图中“.”、

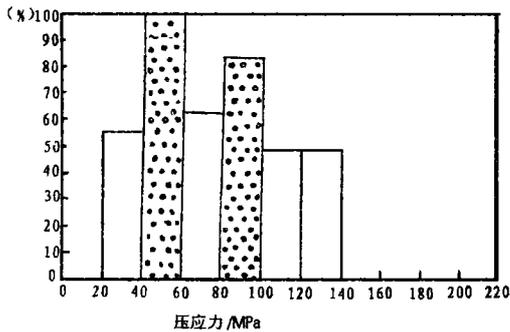


图 4 新生代岩石组记忆应力出现频度直方图
Fig. 4 Histogram of degree of existence of memory stress in Cenozoic rock group

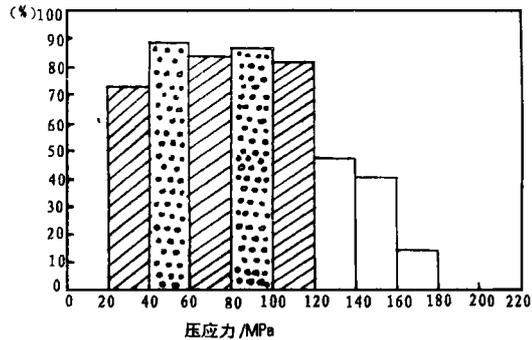


图 5 中生代岩石组记忆应力出现频度直方图
Fig. 5 Histogram of degree of existence of memory stress in Mesozoic rock group

“/”和“·”3种符号分别表示新生代、中生代和古生代构造运动最大主应力记忆出现频度。由3组直方图可得出如下认识:

(1) 新生代岩石记忆 2 期主要构造运动,或者说,喜马拉雅期两幕主要构造运动;

(2) 中生代岩石共记忆 5 期主要构造运动,剔除喜马拉雅期的两幕主要构造运动,中生代岩石对中生代 3 期主要构造运动显示记忆;

(3) 同理,古生代岩石记忆 7 期主要构造运动,其中古生代有 2 期主要构造运动显示记忆。

值得注意的是,古生代岩石记忆的 1 期中生代构造运动最大主应力值 32.0MPa 出现频度只有 52%,仍将之视为古生代岩石对中生代构造运动的记忆,原因是考虑到古生代岩石试样多取自盆缘处,此处古生代岩石迁位至地表后无明显中生代沉积^①,中生代的某期构造应力作用于古生代形成的构造上,在构造的不同部位该期构造应力的最大主应力会有所差别,因而造成测值的分散性,导致该期构造运动最大主应力值的出现频度降低。图 6 中 140—160MPa 和 180—

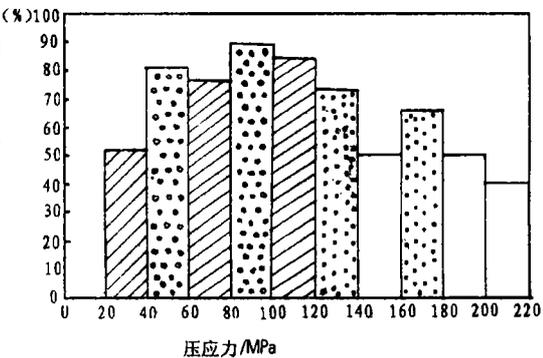


图 6 古生代岩石组记忆应力出现频度直方图
Fig. 6 Histogram of degree of existence of memory stress in Paleozoic rock group

① 孙宝珊、沈淑敏等,新疆塔里木盆地北部主要断裂应力场特征与油气关系研究,地质力学研究所内部报告,1994。

200MPa 两个应力范围记忆出现频度也达到 50%，目前尚不能给出判断，故未列入古生代的构造运动记忆范围。

还需指出，新生代组中 20—40MPa 和 60—80MPa 范围的应力记忆频度分别达 55% 和 63%，之所以皆未划为一幕构造运动记忆的最大主应力值，是考虑到新生代离现今时间相对短一些，“记忆”印象深刻，理应有高的记忆出现频度。但也不能排除其为非主要构造运动的两期构造运动记忆。地质分析也有认为喜马拉雅期有四幕构造运动的观点。

4 测值可靠性讨论

(1) 测点和试样数量问题。由于多种原因，不仅测点数量少，每个测点试样数量也不足，影响了统计结果的可靠性。好在面上测点布局尚有一定代表性，故显示出统计规律。这些规律与地质分析有所吻合。例如本区长期大量的地质工作证实喜马拉雅期在主要构造运动期中起主导作用，而实测显示喜马拉雅期的两幕构造运动最大主应力值出现频度无论在中生代还是古生代岩石中都相对较高。

(2) 测值问题。必须指出，以声发射抹录不净现象建立的古构造应力测量方法，所测的是岩石对经历过的受力变形的记忆，不论哪个时代的岩石其古应力状态都有可能包含有当时的孔隙压力，这些孔隙压力无法估计，因此，所有最大主应力估测值，皆为当时引起岩石变形的有效最大主应力值的估测值。就构造期幕的划分而言，统计结果不会有大的出入。然而，即便如此，也有时代不同岩石对同一幕构造古应力记忆上的差别。中生代岩石记忆的两幕喜马拉雅期构造运动的最大主应力值与新生代岩石的记忆值能一样吗？这里有 3 种考虑：其一，如果 AE 法所测的有效最大主应力值在水平面内（一般多近于在水平面内），其值包含有岩石自重引起的水平等应力，那么，中生代岩石即使在喜马拉雅期构造运动期间，对喜马拉雅期各幕构造古应力最大主应力值的记忆与新生代岩石的记忆应无多大差别，因为即便中生代岩石埋深比新生代岩石深 1km，也仅造成几 MPa 的应力差别（限于篇幅计算从略）。对统计的应力范围不构成多大影响。其二，认为古构造应力不随深度变化，笔者在作辽河油田 AE 法古应力测量时，有这样的印象（容另文阐述），这里引用文献[6]的相关内容作为这一考虑的参考性依据，文献[6]指出，从 150—200m 到 1200—1300m 深度取出的大岩芯，取其试样测得声发射估计应力常常是 30—33MPa，各试样这样一致的声发射法测值，既不能由重力效应来解释，又不能以热场的水平分量来解释，因为它们二者随深度而有规律地改变。当设计模型与现场实验比较时，注意到在研究区域内能够在不同深度上相等的总应力的构造应力分量恰恰是 30—35MPa。因此，考虑到作为古构造应力记忆，由声发射估计的应力 $\sigma = 30—33\text{MPa}$ 是正确的。按上述两种考虑各时代岩石记忆的构造运动最大主应力值应如图 4、5、6 所示值。取其平均值列于表 2。

表 2 各时代岩石记忆应力统计表(第 1、第 2 种考虑)

Table. 2 Statistic table of memory stress of rocks for different geological times
(The first and the second kind of point of view)

岩石时代	记忆的构造运动期幕数	各时代岩石记忆构造运动最大主应力值(MPa)		
		新生代	中生代	古生代
新生代	2	49.4, 88.8	—	—
中生代	5	50.0, 90.7	33.4, 71.1, 111.5	—
古生代	7	48.5, 91.8	32.0, 71.3, 110.2	130.9, 169.3

第3种考虑,认为古今地应力的最大主应力值随深度变化规律一致。据此可推算出(推算方法容另文详述)新生代岩石记忆的新生代两幕主要构造运动最大主应力值,49.4MPa和88.8MPa,在中生代岩石中分别反映为71.1MPa和111.5MPa。从中生代岩石记忆的5期幕值中剔掉这两个值,那么中生代有3幕构造运动,它们记忆的各自最大主应力值,分别为33.4,50.0和90.7MPa。

而古生代岩石反映新生代构造运动各幕最大主应力值又不同于中生代的规律,原因是地质调查证实中生代构造运动发生时古生代岩石(盆缘处的古生代岩石)已迁位至近地表,中生代以来可以说暴露于地表无显著沉积。因而可以认为古生代岩石与新生代岩石记忆新生代构造运动最大主应力值基本一致;同样古生代岩石与中生代岩石记忆中生代应力也基本一致。于是91.8MPa的古生代岩石记忆应力应该既是新生代一幕构造运动的最大主应力又是中生代的一幕构造运动最大主应力值,这也许是古生代岩石记忆该应力出现频度最高(图6)的原故。这样分析下来,古生代岩石记忆古生代主要构造运动有3幕而不是2幕。按第3种考虑,各时代岩石记忆的构造运动最大主应力平均值列于表3。

表3 各时代岩石记忆应力统计表(第3种考虑)

Table. 3 Statistic table of memory stress of rocks for different geological times
(The third kind of point of view)

岩石时代	记忆构造运动期幕数	各时代岩石记忆构造运动最大主应力值(MPa)		
		新生代	中生代	古生代
新生代	2	49.4, 88.8	—	—
中生代	5	71.1, 111.5	33.4, 50.0, 90.7	—
古生代	8	48.5, 91.8	32.0, 71.3, 91.8	110.2, 130.9, 169.3

3种考虑哪一种符合实际,目前尚难作决断,有待进一步深入研究。

5 结束语

塔里木盆地北部油田古应力的AE法测量,测得主要构造运动期幕为:喜马拉雅期2幕、燕山期3幕,这与地质判断基本一致,古生代有2—3幕。由于古生代涉及时代长远,其古应力记忆印象相对淡薄,而测点和试样数量又远未满足要求,故只能与地质分析进行粗放型比较。就现有水平而言,AE法判断新生代和中生代构造运动期幕是可行的。

由前述分析可见,新生代、中生代岩石记忆的最高历史应力的最大主应力值皆属喜马拉雅期,且记忆出现频度相对较高,充分说明了塔里木盆地北部地区喜马拉雅期构造运动在本区的主导地位。已如前述,测得的各期幕构造应力的最大主应力值是除去当时孔隙压力的偏量值,应称为有效最大主应力值。

AE法古应力测量的意义,在于试图为应力场研究由定性向定量发展作点贡献。测出地质历史上这一地区经历的主要构造运动次数,并且知道它们的最大主应力值,配合地质分析判断各期幕构造运动的主应力方向,作各期幕应力作用迭加,进行构造应力场数值模拟,笔者认为有重要意义。当然模拟某幕构造应力活动所造成的古构造应力环境也有相当意义。

最后,作者感谢地质力学开放研究实验室对本课题研究工作的支持,感谢本所王建平、张国铎研究员等众多地质工作者的热情鼓励和指教。

参 考 文 献

- 1 丁原辰、张大伦,声发射抹录不净现象在地应力测量中的应用。岩石力学与工程学报,1991,10(4),331—326。
- 2 王建平等,内蒙古金厂沟梁金矿构造控矿分析。北京:地质出版社,1992。
- 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 Boyce G M, McCabe W M and Koerner R M. Acoustic emission signatures of various rock types in unconfined compression, Acoustic emission in geotechnical engineering practice ASTMSTP 750, 1981, 142—154.
- 5 丁原辰等,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专辑,北京:地震出版社,1994,185—187。
- 6 Golodkovskaya G A, Panasiyan L L, Pelrovsky M A, Kolegov S A. New aspect of rock state of stress study, 5th International IAEG Congress/Buenos Aries, 1986, 335—364.

PALEOSTRESS IN NORTHERN TARIM OIL FIELD ESTIMATED BY AE

Ding Yuanchen Sun Baoshen Wang Xihai Shao Zhaogang Zhou Xingui

(*Institute of Geomechanics, CAGS*)

Abstract After a feasibility study of the application of AE method to the measurement of paleostress emphasis is placed on the discussion of the methods used in paleostress measurements and current stress measurements by AE in the paper.

Paleostress measurements by AE in Northern Tarim Oil Field show two-episodes of tectonic movements in the Himalayan movement three in the Yanshannian movement, and that the Himalayan was the most dominant.

Key words paleostress measurements, acoustic emission method

第一作者简介

丁原辰,男,1940年生,1964年毕业于山东大学,副研究员,主要从事地应力、岩石力学、声发射测试研究工作。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。