

引黄工程 AE 法与水压法地应力测量对比*

丁原辰 邵兆刚

(中国地质科学院地质力学研究所)

摘要 本文在说明 AE(声发射)法在引黄工程地应力测量实施过程中的作用之后,简要介绍了 AE 估测法和估测结果,并与水压致裂法测量结果相对比,给出测量结果的评价性结论是两法测量结果近乎一致。AE 法估计 500m 深度最大主应力值为 26.7MPa。

关键词 声发射(AE)法 凯瑟效应 地应力

0 引言

水压致裂法地应力测量对最小水平主应力测量精度尚可,但对最大水平主应力测量,会因多种原因出现误差偏大现象。由本文第一作者提出的声发射(简称 AE)估测法,测量地应力最大主应力值精度相对较高,且简便、经济,因而可作为水压致裂法地应力测量的检验和补救手段(当分析水压法所测最大主应力值不可靠时,可用 AE 法的最大主应力测值予以取代)。在引黄工程地应力测量工作中,AE 法地应力测量起到了检验水压致裂法测量精度和弥补水压法测量深度不足的双重作用。

分别位于马吉掌村和马头水村的 1 号、2 号钻孔,漏水严重,皆属“干孔”,无孔隙水。因工程事故,钻孔可供水压致裂法地应力测量的深度分别为二百多米和三百多米,而实际钻取出岩芯的孔深,分别为三百三十多米和四百二十多米。为了获得较全面的测量结果及检验水压法测量的可靠性,除利用未作过水压法测量的深部孔段的岩芯外,还选取已作过水压法测量段以内的岩芯,进行声发射法地应力测量。

1 地应力状态的声发射估测法简述

岩石试样制备及测量装置详见文献[1]、[2],兹不赘述。

1.1 方法简述

声发射是材料内部贮存的应变能快速释放时所产生的弹性波。声发射法地应力测量的原理是基于声发射活动中的凯瑟效应(Kaiser effect)。所谓凯瑟效应,是指材料在经受过一次或多次加载——卸载过程后,若再对其进行加载时,只要未达到以前所承受的最大应力值,则没有或很少出现声发射,而一旦超过先前最大应力值,则有显著的声发射活动出现。这一效应 50

* 地质矿产部地质力学所开放研究实验室课题内容之一。

年代德国学者凯瑟(J. Kaiser)首先在金属材料中发现^[1]。图1所示岩石声发射率(AE率,指每秒声发射计数)记录曲线上,K点以后信号相对连续且幅度相对增高,AE活动显著,即显示凯瑟效应。K点对应岩石试样先存应力,将K点称为凯瑟点。

近10年来,凯瑟效应对应力判断相继出现多种^[3-6]。归结起来,是以声发射累积数与

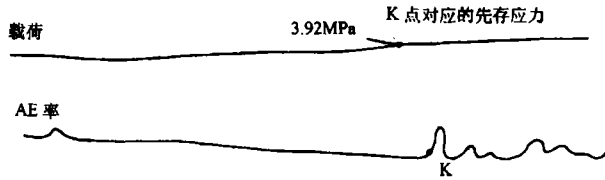


图1 一个大理岩试样声发射记录曲线示意图

Fig. 1 Sketch for AE activity of a specimen of marble in uniaxial compression

外加压应力响应曲线上斜率陡增点的对应应力,作为试样取样方向的正应力,进而计算测点主应力大小和方向。事实上斜率陡增点往往不明显,甚至根本看不出来,所以才有多种判断法。

笔者过去的研究表明,如果岩石试样第一次加载时就有对应地应力的凯瑟效应显示,那么不管其明晰与否,在一定技术条件下对岩石试样作第二次加载(以下简称复压)时,随加载值的增高岩石试样声发射率在到达第一次加载的最高载荷值之前一般都很小,而到达时,声发射信号开始有相对较明显的增多和增强,即显示凯瑟效应。这时如仔细观察记录曲线就会发现在第一次加载时显示凯瑟效应的对应应力处,也有显著而又相对孤立的声发射信号出现。我们将这种第二次加载原凯瑟效应处仍能显示痕迹的现象称为“抹录不净现象”^[7]。由于有痕迹显示,所以依据重加载记录曲线绘出的AE累积数与外加压应力响应曲线上,显示斜率陡增点处仍对应于该地应力值。

1.2 任意方向试样皆记忆地应力的最大主应力

日本学者^[9]以80MPa的单轴压缩应力施加到花岗岩大试件上,卸载后以与加载轴所成角度分别为0°、30°、45°、60°和90°方向取小尺寸试样。试验后绘出AE累积数对外加压应力的响应曲线(图2)。图中也绘出未经受过先存应力的试样以Virgin标注于图上。文献[9]的作者指出

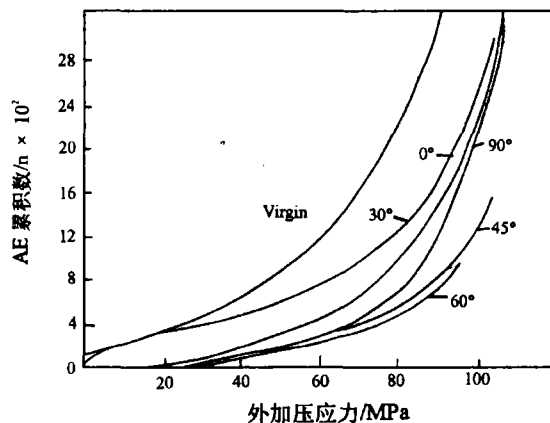


图2 各向花岗岩试样AE累积数与外加压应力响应曲线(据文献[9])

Fig. 2 Response curve of total AE counts versus applied stress for a variety of granites indifferent directions (after Kojima[9])

先存应力的方向未发现有规则的变化,AE累积数的陡增点也不清楚,甚至在预应力方向也是

如此。而笔者依据包依斯(G. M. Boyce)^[4]的方法对文献[9]所给出的图2进行处理,则可得出这样的结果:0°、30°、45°、60°和90°试样所反映的先存应力分别近似等于80、75、85、80和83MPa。但笔者按弹性力学所计算的上述各取样方向的正应力,应分别为80、60、40、20和0MPa。由此可见,对于一个单向压缩过的大岩石试件,不管在哪个方向取小岩石试样,大试件的压缩应力值在小试样上都能有所反映,即不存在方向性。

张大伦^[10]在施加了轴压和围压的5个大岩石试件上,分别从与试件的轴向成0°、45°、90°等方向上取21个试样,实验结果证明各试样AE凯瑟效应点都有两个,即 K_1 、 K_2 。前者对应压力较低的围压,其平均误差不低于25%;后者对应加载值较大的轴压,误差大多小于12%。这是 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ 的三维预加载情况下,不管从哪个方向取样都能反映三维最大主应力值的实例。

文献[8]介绍了以声发射抹录不净现象建立的一套地应力测量方法。文中指出,以复压记录曲线所确定的抹录不净点,有一个较低值 M_1 和一个较高值 M_2 。其中 M_1 与取样方向的正应力大致相对应,而 M_2 则与最大主应力值有较好的对应关系。表1示出取自现场地应力测点,在同一应力解除过的大岩芯上,以不同方向取样,所测抹录不净点值。由表1看出,若每个方向取平均值,得到0°、45°和90°方向试样的抹录不净点较高值(M_2 值)分别为:10.41、10.19和10.54MPa。此测点以公认现场测量效果最好的方法之一(压磁套芯法^[11])测得最大水平主应力值为9.51MPa。三个方向,0°、45°和90°试样 M_2 点

平均值,相对于9.51MPa的误差分别为9.5%、7.2%和10.8%。考虑到 M_2 点所对应的三维最大主应力值本来就应该大于平面最大主应力值,因而 M_2 点对应值与实际三维最大主应力相比误差应更小。这是现场地应力测量岩芯上不同方向取样都能反映测量地点三维最大主应力值的实例。

上述3个实例表明,从经受过地应力作用的岩石上,任意方向取样作AE单轴压缩试验,都能直接估计地应力的三维最大主应力值。

1.3 最大主应力值的声发射估测法

确定三维最大主应力值的方法如下:从现场取回室内大岩芯或待测地点的新鲜石块,在不同方向(3—4个任意方向)上取制 $\varnothing 25\text{mm} \times (50-75)\text{mm}$ 岩石试样;测得各试样初压、复压AE率记录值,并分别绘出它们的AE累积数与压应力响应曲线,以初压、复压响应曲线上的 K_2 点和较大的一个抹录不净点 M_2 作为三维最大主应力值。如果从3—4个方向上所取的岩石试样测得的三维最大主应力值相近,偏差值大体在平均值15%以内,那么可认为此最大主应力测值可信。

2 AE法估测结果

前已述及,声发射估测法要求至少在大岩芯的3个任意方向上取样,每方向至少3个试

表1 不同方向所取试样抹录不净点值^[8]

Table 1 Stress magnitude of the point of incomplete erasion for specimens in different direction

试样编号	抹录不净点取值	
	M_1 (MPa)	M_2 (MPa)
0-1	9.11	10.39
0-2	7.00	10.21
0-3	—	10.63
45-1	7.27	8.75
45-2	9.33	11.39
45-3	5.87	10.43
90-1	6.71	11.69
90-2	6.31	10.55
90-3	5.61	9.39

样,累计每个测点应不少于 10 个试样。但由于大岩芯短而细,取样困难,无论从方向还是从数量来看皆未达到要求。两个钻孔取样明细表如表 2 所示。试样 AE 法估测值的判断如图 5、图 6 所示。各试样测试结果如表 3 所示。表中 C 和 F 分别表示初压和复压的测值,测值有“*”号者表示测值可靠,其权取为 1,无“*”号者取权 0.5,以此作加权平均以求得一个测点的最大主应力值。表中备注栏中所列复压因增益低无测值系指试样声发射信号过少,增益选择到保证仪器稳定的最高增益仍无测值。各测点试样所测最大主应力值的加权平均值见表 4,各测点最大主

表 2 取样地点、深度和数量

Table 2 Sampling site, depth, and number

钻孔号	取样地点	取样深度(m)	取样数量	各钻孔共取试样数
1	马吉掌村	198	4	9
		279-280	5	
2	马头水村	218	3	7
		303	3	
		415	1	

表 3 各试样测值

Table 3 Measurement results of specimens collected from different depths of the cores

钻孔号	取样深度(m)	试样号	σ_1 值(MPa)	备注
1	198	1-140-A	C ₁ :20.4	增益选低了测值可靠性差
			F ₁ :22.4	
		1-140-B	C ₁ :16.3*	复压时因增益选低了无测值
		1-140-Z	C ₁ :18.3*	复压时因增益选低了故无测值
	277-280	1-140-C	C ₁ :16.8*	
			F ₁ :18.3*	
		1-196-X	—	探头线断了未测到值
		1-196-Y	C ₁ :(16.8)	因仪器故障未作定区测量此值不计入统计
			F ₁ :17.8	
		1-197-C	C ₁ :18.3*	复压因增益低无测值
1-197-Y	C ₁ :23.9*			
	F ₁ :24.4*			
1-197-S	C ₁ :17.3	复压因增益低无测值		
2	218	2-218-X	C ₁ :20.9	
			F ₁ :19.9	
		2-218-Y	C ₁ :20.4*	
			F ₁ :20.3*	
	2-218-Z	C ₁ :18.3	复压因增益低无测值	
	303	2-303-X	F ₁ :19.4	因操作失误初压未记录
		2-303-Y	C ₁ :23.4*	复压因增益低无测值
2-303-Z		—	试样信号少,增益最高时也无法测量	
415	2-415-Z	C ₁ :25.5*		
F ₁ :22.9*				

注:表中“*”表示测值可靠程度高。

应力值随深度变化如图 3 所示(该图将钻孔 1、2 合在一起)。由图 3 可以看出,声发射法与水压致裂法所测结果基本一致。在深度 100—500m 范围内,由各不同深度测点的 AE 估测法测值求得地应力最大主应力值随深度变化的回归方程为:

$$S = 13.5338 + 0.02638H \quad (1)$$

$$r = 0.98$$

式中: S —三维最大主应力,单位 MPa; H —深度,单位 m; r —相关系数。按照这一方程推算出 500m 深处地应力的最大主应力值为 26.7MPa。与水压致裂法在该深度的外推值 30.8MPa 相对误差为 13.3%。

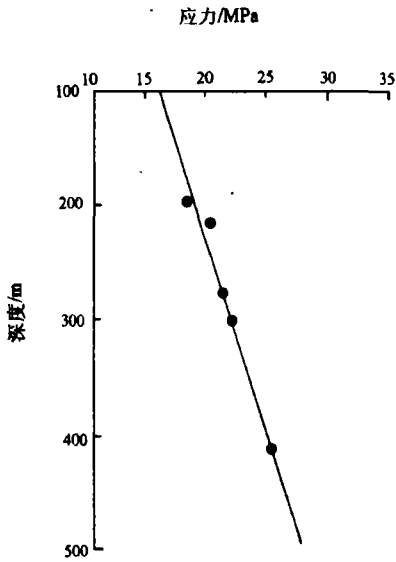


图 3 各测点最大主应力估测值随深度变化曲线

表 4 各测点最大主应力测值的统计值

Table 4 Statistic magnitude of maximum principal stress for cores in two boreholes

钻孔号	测点序号	取样深度(m)	各测点 σ_1 加权平均值(MPa)
1	1-1	198	18.2
	1-2	279-280	21.0
2	2-1	218	20.1
	2-2	303	21.7
	2-3	415	24.6

3 两法测量结果对比与评价

钻孔岩芯在 1993 年取出,离声发射测量时间(1995 年 7 月)约二年,试样对现今地应力的记忆有所淡薄,给估测造成一定困难,各测点所测试样方向也未满足要求,且数量不足,对统计值有一定影响。尽管如此,综观各测点估测结果,可得出

以下结论:

(1) 由声发射估测法所测各点地应力的最大主应力值与水压致裂法测量结果基本一致,图 4 示出将各测点最大主应力的声发射法估测值与水压致裂法测值合在一起,观察最大主应力值随深度变化情况。由图 4 可见二者随深度变化规律基本一致。可见由水压致裂法所测结果外推至 500m 深处的地应力状态可靠。

(2) 需要指出,声发射估测法所测的是测点的三维最大主应力值,一般应高于水压致裂法所测的平面最大主应力值。由上述比较可见,前者并不明显比后者高,甚至可以认为两法测值基本吻合,这说明最大主应力方向处于近水平面内。

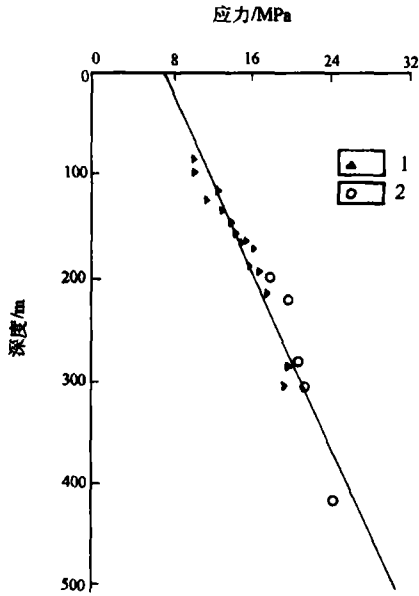


图4 水压致裂法与声发射法估测的最大主应力值随深度变化
Fig. 4 Curve of magnitude of maximum principal stress estimated by hydrofracturing and AE versus the depth
1. 水压法测值; 2. 声发射法测值

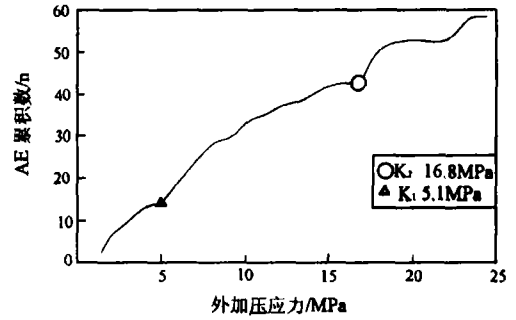


图5 试样1-140-c初压的声发射累积数与外加压应力响应曲线
Fig. 5 Total AE counts of specimen No. 1-140-c during first loading

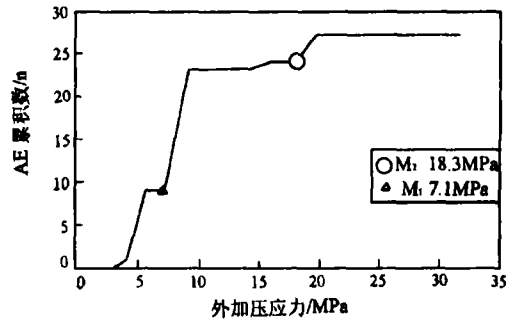


图6 试样1-140-c复压的声发射累积数与外加压应力响应曲线
Fig. 6 Total AE counts of specimen No. 1-140-c during first reloading

作者感谢太原市自来水公司水源开发处、冶金部山西省交城县 316 地质大队的大力支持。地质力学研究所王连捷研究员给予鼓励,丁宜同志帮助完成了试样测试,在此也一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Yoshikawa S, Mogi K. Experimental studies on the effect of stress history on Acoustic Emission activity--a possibility for estimation of rock stress, *Journal of Acoustic Emission*, 1990, Vol. 8 No. 4, 113-123.
- 2 丁原辰、张大伦、傅芳才, 岩石试样凯瑟效应的实验研究。中国地质科学院地质力学研究所所刊(12), 1988: 171-183.
- 3 Kanagawa T, Hayashi M, Nakasa H. Estimation of spatial geostress components in rock samples using the Kaiser effect of acoustic emission. Third Acoustic Emission Symposium, Tokyo, 1976. 229-248.
- 4 Boyce G M, A study of the acoustic emission response of various rock types, M. S. thesis, Drexel University, 1981.
- 5 Zhang D L, Use of the Kaiser effect for estimation of the previous state of stress in rock, Internal Report RML-IR/82-4, Geomechanics Section Department of Mineral Engineering, The Pennsylvania State University, 1982.

- 6 Yoshikawa S, Mogi K. A new method for estimation of crustal stress from cored rock samples, Laboratory study in the case of uniaxial compression. *Tectono-physics*. 1981, 74: 323-339.
- 7 丁原辰、张大伦,以声发射估计岩石试样先存应力的新方法。现代地质, 1989, 3(3): 359-368.
- 8 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).
- 9 Kojima T, Matsuki K, A fundamental study on the Kaiser effect in the rock for tectonic stress measurement. Proc. 10th International. Senda(Japan). 1990. 468-475.
- 10 张大伦, 确定岩石试样先存应力状态的声发射法。地震地质, 1984, 6(1): 31-40.
- 11 王连捷、李方全、廖榕庭等, 绝对地应力测量的实验研究。见: 地应力测量的原理和应用。北京: 地质出版社, 1981.

A COMPARISON OF THE RESULTS OF STRESS MEASUREMENTS OBTAINED BY AE WITH THAT BY HYDROFRACTURING AT TAIYUAN, SHANXI

Ding Yuanchen Shao Zhaogang

(Institute of Geomechanics, CAGS)

Abstract Acoustic Emission stress determination method was applied at Taiyuan, Shanxi, for the water-diversion project and the results obtained are given in the paper. A comparison of the results with that by hydrofracturing shows a good agreement of the measurements. The maximum principal stress estimated by AE at a depth of 500m is 26.7MPa.

Key words AE, Kaiser effect, geostress

第 一 作 者 简 介

丁原辰, 1940年生, 1964年毕业于山东大学物理系, 副研究员, 主要从事地应力、岩石力学、声发射技术等方面研究。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。