

# 峨口铁矿地应力测量原理和结果分析\*

蔡美峰 于波 乔兰 陈桂忠

北京科技大学资源工程学院, 北京 100083

**摘要** 介绍了峨口铁矿的地应力测量同时采用的水压致裂法和应力解除法的基本原理和在现场测量中所采用的新技术. 根据实测地应力数据, 使用静态系统灰色曲线模型获得峨口矿区的地应力分布规律. 结果表明由两种方法所获得的测量结果具有良好的 consistency.

**关键词** 地应力测量, 水压致裂法, 应力解除法

**中图分类号** TD301

太钢峨口铁矿边坡设计垂直高度达 720 m, 是我国边坡最高的露天矿山之一. 目前采场边坡已形成 400 m, 随着采场的延伸, 台阶滑坡事故日见增多, 边坡破坏概率增大. 为了保证矿山生产安全, 必须开展高陡边坡稳定性研究. 另一方面, 通过研究, 采取适当措施, 可以合理加大边坡角, 减少废石剥离量, 提高矿山经济效益. 据估算, 如将峨口铁矿总体边坡角加陡  $1^\circ$ , 可减少剥离量 5 000 万 t 以上, 节省剥离费用 1 亿元, 经济效益十分显著. 但随着边坡的加高加陡, 边坡稳定性控制和维护技术的难度将越来越大. 为此, 峨口铁矿高陡边坡稳定性维护已被列为国家“八五”重点科技攻关项目, 于 1992 年 5 月正式开展各项研究工作.

为了进行高陡边坡稳定性分析和控制技术的研究, 必须对影响边坡稳定性的各项因素进行全面深入的了解. 在这些因素中, 地应力是最根本的因素之一.

峨口铁矿地应力测量同时采用水压致裂和应力解除法. 两种方法互相对比和补充, 将会更有效地保证测量结果的可靠性.

## 1 水压致裂地应力测量

### 1.1 测点布置和测量原理

为了进行深部边坡岩体特性的研究, 在矿区边坡进行了 10 个孔的勘察试验. 勘察孔直径 75 mm, 深度 140~250 m, 倾角  $75^\circ$ . 通过分析和研究, 选择其中的 4 个孔进行水压致裂试验. 这 4 个孔都在接近采区最终开采境界的地方, 且能控制整个采区的地应力状态. 图 1 中 1#~4# 即为水压致裂测孔.

水压致裂应力测量包括 6 个步骤:

(1) 打钻孔到测试部位, 并将试验段用两个封隔器隔离开来;

(2) 向隔离段注射高压水流, 直到孔壁出现裂隙, 此时的水压力称为初始开裂压力, 记为  $P_0$ ; 然后继续施加水压以扩展裂隙, 当裂隙扩展至 2~3 倍钻孔直径深度时, 关闭高压水系

1995-04-19 收稿 第一作者 男 52 岁 教授

\* 国家“八五”重点科技攻关项目, 国家教委回国留学人员启动基金项目

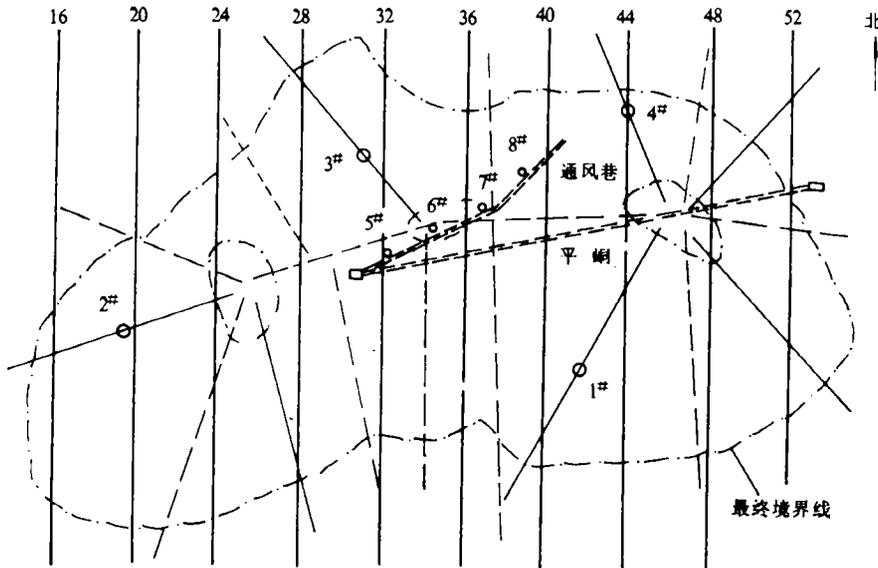


图 1 水压致裂测点布置简图

统, 此时的恒定水压力称为关闭压力, 记为  $P_s$ ; 最后卸压使裂隙闭合;

(3) 重新向密封段注射高压水, 使裂隙重新打开, 并记下裂隙重开时的压力, 记为  $P_r$ . 这种重新加压的过程重复 2~3 遍;

(4) 将封隔器完全卸压后从钻孔中取出;

(5) 将用特殊橡皮包裹的印模器送入钻孔破裂段并加压使水压致裂裂隙的形状、大小、方位及原来孔壁的节理裂隙均由橡皮印痕记录下来. 根据初始裂隙在切向应力最小的部位发生以及关闭压力必须和最小主应力相平衡的关系, 在有孔隙水压力  $P_0$  的情况下, 可得如下的决定垂直于钻孔平面的 2 个主应力公式<sup>[1]</sup>:

$$\sigma_h = P_s \tag{1}$$

$$\sigma_H = 3P_s - P_r - P_0 \tag{2}$$

式中:  $\sigma_h$  为最小主应力, 其方向和裂隙方向垂直;  $\sigma_H$  为最大主应力, 其方向和裂隙方向平行.

1个钻孔的水压致裂试验只能确定测点处垂直于钻孔轴线的平面内的 2 个主应力的大小和方向. 只有假设钻孔轴线和 1 个主应力方向重合, 且该主应力值也已知, 才有可能采用单孔水压致裂试验来确定测点的三维应力状态, 否则必须打 3 个互不平行的钻孔, 才能决定一点的三维应力状态. 通常情况下, 垂直方向即可认为是 1 个主应力方向, 其值等于自重应力, 故一般将钻孔打在垂直方向.

本次试验使用的水压致裂装置中只使用 1 个电力驱动的油泵. 该油泵首先用于向封隔器加压, 当封隔器压力达到规定要求时, 将封隔器液压管路关闭, 并通过通道开关将油泵和试验段加压系统连通. 油泵和封隔器之间的液压通道为高压软管, 而油泵和试验段之间的液压通道是钻杆.

### 1.3 试验结果

由水压致裂结果计算地应力的关键是如何正确认定  $P_s$  和  $P_r$  的值.

(1) 关闭应力  $P_s$ 

到目前为止, 根据压力-时间曲线来确定瞬时关闭应力  $P_s$  的方法大概有 10 种. 由于岩石和工程地质条件的复杂性, 试验环境各不相同, 在这些方法中还没有哪一种被认为是标准的方法. 本文使用 格罗塞斯 T M 和 克里 P R 提出的“拐折点法” (Inflection Point Method)<sup>[1]</sup> 和李 M Y 与 海姆森 B C 提出的“指数压力衰减法” (Exponential Pressure-decay Method)<sup>[2]</sup> 来确定  $P_s$  的值, 结果见表 1. 可以看出, 由两种方法获得的  $P_s$  值是相当接近的, 本文中取它们的平均值用于计算主应力.

(2) 裂隙重开压力  $P_r$ 

裂隙重开压力通过比较第一加压循环和第二 (或第三、第四等) 加压循环获得. 通常将第二加压循环和第一加压循环的压力-时间曲线重叠在一起, 然后选择第二加压循环曲线偏离第一加压循环曲线的一点作为裂隙重开点, 并将该点的压力定为裂隙重开压力  $P_r$  (参见图 4). 各测点的  $P_r$  值列于表 1.

确定了  $P_s$ ,  $P_r$  的值之后, 即可根据公式 (1)、(2) 计算出各测点的应力值, 结果见表 2.

表 1 用于计算主应力的各测点  $P_s$ ,  $P_r$  和  $P_0$  值

测点号	深度/m	$P_s$ /MPa	$P_r$ /MPa	$P_0$ /MPa
1	118.0	6.4	4.8	1.07
2*	99.14	5.4	5.4	0.92
2	133.48	6.3	6.3	1.26
3	151.25	7.3	7.3	1.47
4	110.92	6.8	9.0	0.98

注: 2\* 为 2# 钻孔第二测点, 以下同.

表 2 水压致裂测量各测点主应力计算结果

测点号	深度/m	$\sigma_H$		$\sigma_h$		$\sigma_v$ /MPa
		数值 (MPa)	方向 (°)	数值 (MPa)	方向 (°)	
1	118.0	13.3	140	6.4	50	3.1
2*	99.14	13.3	102	6.5	12	2.6
2	133.48	14.0	—	7.2	—	3.5
3	151.25	18.5	97	9.1	7	4.0
4	110.92	13.2	112	6.8	22	2.9

## 2 应力解除法地应力测量

### 2.1 测点布置

分析峨口铁矿矿山开采状况资料, 只有一运输平峒及其通风巷道可以利用. 然而平峒作为矿石的运输通道, 不允许停产做试验, 只有在其通风巷道内做应力解除试验. 受通风巷长度所限, 只进行了 4 个孔的试验, 且孔间距较近, 在 100 m 左右. 图 1 中的 5# ~ 8# 即为应力解除测孔. 应力解除测孔均为水平孔, 孔深为巷道跨度的 3 倍左右, 保证测点是在未受开挖扰

动的原岩应力区。

### 2.2 测量方法

- (1) 在所选测点垂直巷道壁钻直径为 130 mm 的水平孔至原岩应力区, 然后从大孔底钻直径为 36 mm 的同心小孔;
- (2) 将钻孔应变计或变形计安装在小孔的中间部位;
- (3) 用直径为 130 mm 的薄壁钻头继续延深大孔, 进行套钻, 使小孔周围的岩芯脱离周围的岩体而实现应力解除;
- (4) 根据应力解除过程中应变计或变形计测得的小孔应变值, 即可由有关公式计算出作用在小孔周围岩体中的三维原岩应力的大小和方向。

本次测量使用改进型空心包体应变计作为钻孔应变测量探头, 并采用蔡美峰提出的完全温度补偿技术, 以正确修正由于测点温度变化对应变测量结果造成的影响。有关改进型空心包体应变计和完全温度补偿技术的详细介绍见参考文献[3]、[4]。

### 2.3 计算公式

由应力解除过程中空心包体应变计中的 12 个应变片测得的最终应变值, 在经过温度标定之后, 可由下列公式与原岩应力值联系起来<sup>[9]</sup>:

$$\epsilon_{\theta} = (1/E) \{ (\sigma_x + \sigma_y) K_1 + 2(1 - \nu^2) [ (\sigma_y - \sigma_x) \cos 2\theta - 2\tau_{xy} \sin 2\theta ] K_2 - \nu \sigma_x K_4 \} \quad (3)$$

$$\epsilon_z = (1/E) [ \sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y) ] \quad (4)$$

$$\gamma_{\theta z} = (4/E) (1 + \nu) (\tau_{yz} \cos \theta - \tau_{zx} \sin \theta) K_3 \quad (5)$$

$$\epsilon_{\pm 45^\circ} = (1/2) (\epsilon_{\theta} + \epsilon_z \pm \gamma_{\theta z}) \quad (6)$$

式中:  $\epsilon_{\theta}$ ,  $\epsilon_z$ ,  $\gamma_{\theta z}$  和  $\epsilon_{\pm 45^\circ}$  分别为周向应变, 轴向应变, 剪切应变值和与轴线成  $\pm 45^\circ$  方向的应变;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  为原岩力的 6 个应力分量;  $E, \nu$  分别为岩石的弹性模量和泊松比;  $K_1, K_2, K_3$  和  $K_4$  是 4 个修正系数, 其值与岩石和空心包体的弹性模量、泊松比, 安装小孔的直径, 空心包体的内径以及应变片在空心包体中的径向位置有关<sup>[9]</sup>。

由公式 (3) ~ (6) 可以看出, 为了从应力解除所测空心包体应变求原岩应力值, 需要知道岩石的弹性模量和泊松比。本次测量所用岩石弹性模量和泊松比由套孔岩芯的围压试验根据下列公式获得:

$$E = K_1 (P_0 / \epsilon_{\theta}) R^2 / (R^2 - r^2) \quad (7)$$

$$\nu = \epsilon_{\theta} / \epsilon_z \quad (8)$$

式中:  $P_0$  - 围压值;  $\epsilon_{\theta}, \epsilon_z$  - 围压引起的平均周向应变和平均轴向应变;  $r, R$  - 套孔岩芯的内、外径。

公式 (7) 是蔡美峰推导出来的, 首次将  $K_1$  引入岩石弹模的计算公式, 纠正了以往在利用空心包体围压试验结果计算岩石弹模公式中的一大错误, 该错误可造成弹模计算结果高达 40% 的误差。

由公式 (3) ~ (8) 可以看出, 计算  $K$  系数时需要知道  $E$  值, 而计算  $E$  时又需要知道  $K_1$  值, 因而需要用迭代法求解。同时, 由于一般岩体均具有非线性, 其弹模值与应力水平有关。在根据 (3) ~ (6) 式计算地应力时必须使用与所测应力水平相一致的弹模值。由于地应力是未知

的,因此也需要用迭代法求解.作者在进行测量结果计算时所采用的双迭代程序有效地保证了计算结果的精度.

## 2.4 测量结果

(1) 应力解除应变数据 各测点经过温度修正的应力解除应变值,即最终用于计算地应力的应变值列于表 3.

表 3 各测点用于计算地应力的最终应变数据

测点号	各通道用于计算地应力的最终应变数据( $\mu\epsilon$ )											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	198	352	268	325	219	398	354	329	336	231	375	305
6	152	205	198	197	247	230	231	227	156	184	176	160
7	315	282	313	259	213	328	362	363	356	273	325	345
8	347	400	350	357	397	316	336	277	352	299	319	292

(2) 各测点岩石弹模、泊松比、K 系数计算结果列于表 4.

表 4 各测点岩石  $E$ 、 $\nu$  值和  $K$  系数值

测点号	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
5	54.46	0.25	1.160	1.161	1.094	0.894
6	84.61	0.29	1.162	1.174	1.097	0.932
7	58.53	0.27	1.159	1.163	1.094	0.914
8	47.80	0.22	1.160	1.156	1.093	0.856

(3) 各测点原岩应力计算结果 各测点 3 个主应力的方向和大小示于表 5.

表 5 应力解除测量各测点主应力计算结果

测点号	$\sigma_1$			$\sigma_2$			$\sigma_3$		
	数值/MPa	方向/( $^\circ$ )	倾角/( $^\circ$ )	数值/MPa	方向/( $^\circ$ )	倾角/( $^\circ$ )	数值/MPa	方向/( $^\circ$ )	倾角/( $^\circ$ )
5	23.10	359.9	-2.0	7.64	89.9	1.1	9.41	331.4	87.7
6	23.11	170.0	-0.5	8.25	258.1	74.5	10.72	260.2	-15.5
7	22.96	183.2	0.8	8.85	93.4	-15.6	10.97	90.5	74.3
8	19.34	153.1	-0.3	8.57	64.6	78.0	8.99	63.0	-12.0

## 3 测量结果分析

影响地应力测量结果的因素很多,其中大多为随机因素.由于工程条件的限制,测点的选择和布置具有很大的局限性;矿区的地质条件相当复杂,各点的地应力状态具有很强的随机性.灰色建模理论的实质是对原始随机序列(称为灰序列)采用“生成”的信息处理方法弱化其随机性,使原始灰序列转化为易于建模的新序列,对依新序列而建的模型作相应的逆生成即得原始灰序列的模型.

目前灰色模型对处理多变量非线性系统问题仍然存在很大困难.为此有人根据灰色系统理论的信息处理原则,提出了灰色代数曲线模型,简称  $\text{GAM}(n, h)$  模型.它是一个动态非线性

系统模型，主要用来对未来时间点上多个相互关联的变量进行预测。而在分析地应力场分布规律时，其原始灰序列中，不含时间序列，因此它是一个静态系统。在该系统中，由于主应力序列和  $X, Y, Z$  坐标序列都是摆动的，这就大大增加了数据处理的难度。本文在  $GAM(n, h)$  模型的基础上，提出了静态系统灰色代数曲线模型，简称  $GAM(0, h)$  模型。根据现场实测的 8 个钻孔 9 个测点的地应力数据用该模型进行模拟得出矿区 3 个主应力的分布规律：

$$\sigma_H = -0.13 - 0.1697x + 0.2797y + 0.4396z \quad (\text{MPa})$$

$$\sigma_h = 0.03 - 0.1480x + 0.2052y + 0.1177z \quad (\text{MPa})$$

$$\sigma_v = -0.017 + 0.008x + 0.016y + 0.3316z \quad (\text{MPa})$$

式中： $\sigma_H, \sigma_h$  和  $\sigma_v$  分别为最大水平主应力，最小水平主应力和垂直主应力； $x = X/100, y = Y/100, z = Z/10$ ； $X, Y$  为区域坐标， $Z$  为埋深，单位为  $m$ 。

分析表明，所有 9 个测点的实测值和对应的模型值的残差是均匀的，表明由应力解除法和水压致裂法两种方法获得的测量结果服从同一分布规律。这就说明了由两种方法在峨口铁矿所获得的地应力测量结果具有良好的一致性。

#### 4 结论

(1) 应力解除法测量结果表明，在每一测点均有 2 个主应力接近于水平方向，其倾角不大于  $16^\circ$ 。另一主应力接近于垂直方向，其倾角，5 号孔为  $87.7^\circ$ ，6 ~ 8 号孔为  $75^\circ \sim 78^\circ$ ，这与水压致裂法测量中的钻孔倾角基本一致。因此在水压致裂法测量中假定钻孔与 1 个主应力方向重合，是比较符合实际情况的。

(2) 最大主应力位于水平方向，其值为自重应力的 2 倍以上。垂直应力基本等于或大于上覆岩层质量，证明峨口铁矿的地应力场是以水平构造应力为主导的而不是以自重应力为主导的。这就否定了传统的认为山坡地构造应力已充分释放的假设。较大的水平构造应力的存在对边坡稳定性有重大的影响，必须给予足够的重视。

(3) 最大水平主应力  $\sigma_H$  随深度变化增加较快，而深度变化对最小水平主应力  $\sigma_h$  的影响却相对较小。这是本区地应力分布的一大特点。

(4) 最大主应力的方向基本为北北西 - 南南东向或接近于南 - 北向，与矿区地质构造分析的结果相一致。矿区的一系列东西褶皱构造，都是在近南北向主压应力的作用之下形成的，山羊坪正断层也是受到南北向挤压应力作用而产生的与东西向挤压构造相配套的张性断裂。

#### 参 考 文 献

- 1 Gronseth J M, Kry P R. Instantaneous Shut-in Pressure and Its Relationship to the Minimum in-situ Stress Proc Workshop on Hydraulic Fracturing Stress Measurements. Open-file Rept 82-1075, Washington D C, 1982. 147 ~ 167
- 2 Lee M Y, Haimson B C. Statistical Evaluation of Hydraulic Fracturing Stress Measurement Parameters. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1989, 26: 447 ~ 456
- 3 蔡美峰. 地应力测量中温度补偿方法的研究. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(3): 227 ~ 235

(下转第 111 页)

- 3 Hartson H R, Hix D. Human Computer Interface Development: Concepts and Systems for its Management. CAM Computing Surveys, 1989, 21(1): 47 ~ 54
- 4 程景云, 倪亦泉等. 人机界面设计与开发工具. 北京: 电子工业出版社, 1994
- 5 蔡希尧, 陈平. 面向对象技术. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1993
- 6 蒋日东. VGA卡高效模块化图形程序设计. 计算机应用研究, 1994(1): 15 ~ 17

## Developing Environment for Human Computer Interface of CAD and Its Applications

*Jiang Ridong He Yuxin*

Department of Metals Forming, USTB, Beijing 100083, PRC

**ABSTRACT** Basic techniques for graphic user interface (GUI) are introduced. The effective method for the design of interactive interface of CAD is proposed. Multiple windows GUI is developed under the DOS environment using object-oriented and event driven technologies. The developed system has the same display style and operating rules with Ms-Windows, and it is adaptable to the computer hardware and software environments of our country. Finally a practical use is given.

**KEY WORDS** CAD/human computer interaction, graphic interface, object-oriented, event driven



(上接第 106 页)

- 4 乔兰, 蔡美峰. 应力解除法在某金矿地应力测量中的新进展. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(1): 25 ~ 32
- 5 Dancan Fama M E, Pender M J. Analysis of the Hollow Inclusion Technique for Measuring in-situ Rock Stress. Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr, 1980, 17(3): 137 ~ 146

## Results of in-situ Stress Measurement in Ekou Iron Mine

*Cai Meifeng Yu Bo Qiao Lan Chen Guizhong*

College of Resources Engineering, USTB, Beijing 100083, PRC

**ABSTRACT** Both hydraulic fracturing and borehole overcoring methods were used for in-situ stress measurement in Ekou Iron Mine. The basic principles of these two methods and a series of new techniques used in the field measurement are introduced. Based on the measuring results, the distribution law of in-situ stress state in the Mine was established using grey algebraical curve model. The measuring results obtained by two different methods showed good agreement.

**KEY WORDS** in-situ stress measurement, hydraulic fracturing technique, borehole overcoring technique