

山东科技大学

硕士学位论文

东滩煤矿三采区地应力测量及应力场分析

姓名：梁继新

申请学位级别：硕士

专业：矿业工程

指导教师：王同旭;孙新荣

20050501

摘 要

地应力是影响一切地下工程稳定性的根本力源,是工程地质学科长期研究的主要课题之一。本项目采用一种方便且较为经济的地应力测试方法—声发射法(AE法),对东滩煤矿三采区进行了地应力实测,在此基础上估算了三采区3煤顶板40m和底板30m范围包括软岩和煤层的水平最大主应力、水平最小主应力和垂直主应力;对该采区-500m~-700m的范围地层进行了反演分析,得到了三采区地应力场分布规律,为巷道支护、采场矿压控制提供设计依据。

地质构造分析表明,东滩矿三采区为构造应力场型采区,水平最大主应力方向为北西西—南东东方向;三采区8个地应力实测点结果表明水平最大主应力方向为 105.7° ~ 148.7° ,二者结论基本一致。

三采区地应力值大小的分布规律:在开采深度小于780m时,水平最大主应力为15~19MPa,且煤层底板比顶板大一些,但断层附近地应力大小和方向变化较大;在开采深度达到780m左右时,垂直主应力近似等于水平最大主应力;在开采深度大于780m时,垂直主应力大于水平方向最大主应力。

反演分析绘制的最大主应力等值线图表明,煤层老顶、老底岩层往往处于较高应力区;采区最大水平主应力的最大值出现在FS46和FS51断层附近及采区西南部,达24MPa;最小主应力的最大值出现在中部断层FS51处;最大剪切应力的最大值出现在断层FS46和FS51处和3采区南部,为15MPa左右。

巷道布置方向应该尽量与水平最大主应力方向平行或保持小夹角相交,尽可能避免两者方向垂直;在无法回避两者方向垂直或大夹角相交情况下,应根据巷道具体位置地应力值大小,加强巷道支护。

关键词: 地应力测量 声发射法 反演分析 地应力分布规律 巷道布置

Abstract

Ground stress is the ultimate force source which affects all the ground project stability and one of the main subjects that the engineering geology long-time studies. This item adopts a convenience and more economy ground stress testing method-sound emission method (AE method), measuring the third mine section ground stress of Dongtan coal mine, estimating the maximum principal stress, the level minimum principal stress, and normal principal stress of third coal roof 40m and motherboard 30m range including the soft rock and coal bed; making the inversion analysis of the stratum range of -500m~700m, obtaining the distributing rule of third mine section field, providing the designing gist for tunnel supporting and stope mine press controlling.

Geology constitution analysis indicates that the third mine section of Dongtan mine is the section of structure stress field, and the maximum principal stress is north west west-south east east orientation; the result of the third mine section eight ground stress measure points indicates that the orientation of level maximum principal stress is $105.7^{\circ} \sim 148.7^{\circ}$. The two conclusions are mainly conformity.

The distributing rule of the third mine section ground stress value: while the mining depth is less than 780m, the level maximum principal stress is 15~19MPa, moreover the coal bed motherboard is bigger than roof, but around the fault the size and orientation of ground stress change a lot; while the mining depth is 780m about, the normal principal stress almost amount the level maximum principal stress; while the mining depth is more than 780m, the normal principal stress is more than level maximum principal stress.

The max principal stress isoline graph of inversion analysis indicates that the old roof and old floor rock stratum of the coal bed sometimes locates in much higher stressed zone; the max. of mine section maximum level principal stress presents to FS46 and FS51 fault around and the south-west of the section, almost 24MPa; the max. of the minimum principal stress presents to mid fault FS51; the max. of the maximum shear stress presents to fault FS46 and FS51 and the south of the third mine section, almost 15MPa.

Tunnel dispose orientation should parallel with level maximum principal stress or keep small included angle intersecting, avoids both vertical orientation; in the condition that cannot obviate both vertical orientation or big included angle, tunnel supporting should be strengthened according to the ground stress size of tunnel prop position.

Keywords: ground stress measure sound emission method inversion analysis the distributing rule of ground stress tunnel dispose

1 绪论

1.1 课题研究的意义

地应力是影响一切地下工程稳定性的根本力源，引起巷道围岩变形和破坏，对巷道支护形成矿山压力，导致支护体矿压过大而致使巷道工程失稳。地应力是工程地质学科长期研究的主要课题之一。

随着我国煤炭资源持续开采，东部许多国有大中型煤矿开采深度在不断增加，相当一部分矿井已进入深部开采，发生冲击矿压的可能性大大增加；而我国中西部由于所处特殊区域地质构造位置，大部分矿井都存在较大的水平构造应力（如金川矿区）。本项目以山东兖州煤业集团公司东滩煤矿3采区为研究区域，开展采区地应力场研究，为巷道支护、采场矿压控制提供地应力基础资料，在煤矿安全生产上具有较重要的实用意义。

地应力是在漫长的地质历史时期逐渐形成的复杂应力场。它是引起采矿、水利水电、土木建筑、铁道、公路、军事及其他各种地下或露天岩土开挖工程变形和破坏的根本作用力，是确定工程岩体属性、实现岩土工程开挖设计和决策科学化的必要前提。

在诸多影响工程开挖稳定性的因素中，地应力是最重要的因素之一。只有掌握了具体工程区的地应力条件，才能准确合理的确定矿山的总体布局、选取适当的采矿方法、确定巷道和采场的最佳断面形式、断面尺寸、开挖步骤与支护形式、支护时间等等。因此对于地应力场的研究已受到国内外学者的高度重视。尤其随着采矿向深部发展，高地应力场的研究对于煤矿安全高效生产更为重要。

1.2 国内外研究现状

就地应力测量而言，国内外最常用的是水压致裂法和应力解除法，但因其较大的测试设备和较高的测试费用及较繁琐的测试工序限制了其广泛应用。为此国内外提出了一种方便且较为经济的地应力测试方法——声发射法（AE法）；并已在一些重大的地质工程中得到应用（如二滩水利发电站、三峡水利工程等）。根据本项目实际情况，选用了AE法对东滩煤矿三采区8个点进行了地应力测量。

根据东滩煤矿要求,进行 3 采区地应力场研究,主要包括地应力测量和地应力场综合计算分析,进行现场取样、室内测试计算、分析总结等工作,并在此基础上对没有实测的岩层进行地应力值估算;对 3 采区-500m~-700m 的范围进行数值模拟反演计算分析,得到三采区地应力实测及应力场分布规律。

1.3 研究的主要内容

主要研究内容为:

- (1) 根据地质构造特征及“密度椭圆球理论”确定区域地应力类型。
- (2) 对 3 采区 4 个补勘孔,每孔取采 3 煤的老顶和老底 2 个层位段的砂岩样,用 AE 法测试 8 个点(各孔 2 个点)的主地应力值大小及主应力方向。
- (3) 用理论分析法、地质构造力学分析法等方法,确定东滩矿宏观地应力场类型,并确定水平最大主应力方向,然后结合实测值对矿井宏观地应力场类型特点进行分析。
- (4) 根据矿方提供的相应钻孔岩块物理力学参数成果和岩芯 RQD 值,由 Hoek-Brown 岩体强度准则,确定相应的各岩层岩体强度和变形参数。
- (5) 用上述 8 个点实测值,计算 3 采区未进行实测的部位煤及软岩层中地应力大小。
- (6) 考虑地质构造、岩性条件,建立 3 采区水平地应力场反演计算力学模型。根据 8 个点地应力实测值、岩体强度和变形参数值,进行弹塑性有限元反演计算,得到 3 煤底板 50m 至顶板 150m 范围岩层水平地应力场分布变化结果,得到水平最大、最小主应力方向矢量图,大小等值线图,最大剪应力等值线图。
- (7) 根据地应力的分析结果,同时结合了 3 采区煤层赋存特点及构造特征对 3 采区巷道布置进行合理设计,对巷道支护提出合理建议。
对 3 采区巷道布置进行合理设计,对巷道支护提出合理建议。

2 区域地应力场类型分析

兖州煤田为一向东倾伏、轴向北东—南西向的向斜构造，地层倾角较为平缓，一般小于 10° 。其主要构造是：北东向的褶皱构造，北西、北东东和近南北向断层为主体（图 2.1）。从整体上看，煤田内部大中型断层不甚发育，主体向斜内部次级断层比较少。煤田内的次级褶皱有：杏行背斜、兖州煤田轴部向斜、鲍家场背斜、小南湖向斜、齐家村背斜、前候营隆起、街头背斜等。

东滩煤矿位于兖州向斜轴部。分析区域构造切割关系，发现北西向组正断层（马家楼断层、北部正断层），切割了北东向构造（如兖州向斜），说明在水平方向，最大主应力近北西向。

矿区的地应力场类型包括构造应力性和重力应力性，与周边运动地块的运动趋势有关。若矿区处于某一运动地块运动方向的正前方，则其地应力场型多为构造应力场型；矿区处于某一运动地块运动方向的正后方，其地应力场多呈现重力应力场型。

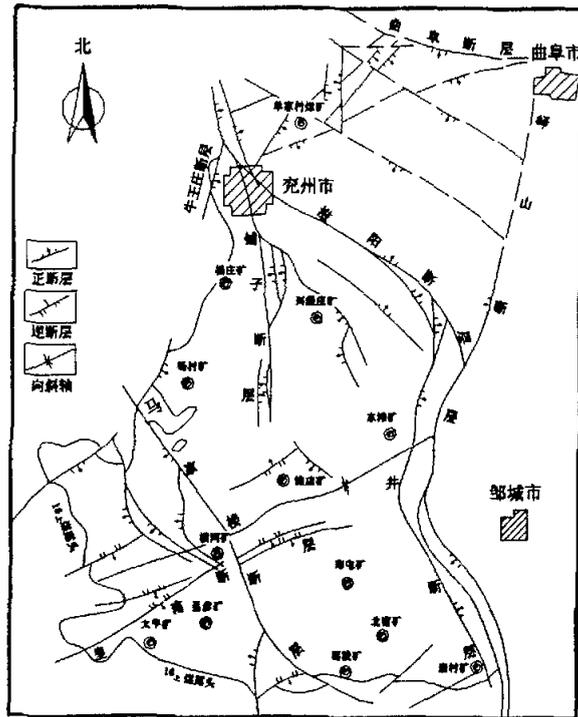


图 2.1 兖州煤田构造纲要示意图
Fig.2.1 yanzhou coal mine construct

研究矿区是否存在运动地块及判断其运动方向，可以采用中国矿业大学于双忠教授提出的“密度椭球体理论”。该理论认为：密度相对大的地块，具有向地球极点运动的趋势；密度相对小的地块，具有向赤道运动的趋势。根据这一理论，研究东滩矿区及其相邻地区的重力密度分布变化，进而分析该区的宏观应力场类型。

分析矿区所处的布格重力异常图（如图 2.2 所示），可以看出，在该区的东南和西北方向分别有两个重力异常区，东南部异常区的重力异常值为+15.2，具有向北运动的趋势；西北部异常区的重力异常值为-29.3，具有向南运动的趋势。在这两股趋势的共同作用下，矿区受到扭压作用，在北西-南东向受到挤压。因此，矿区所属的区域应力场为受挤压的构造应力场型，最大水平主应力方向为北西-南东向，与根据构造特征推断结果一致。因密度异常值较小，故构造应力值也不会太大。

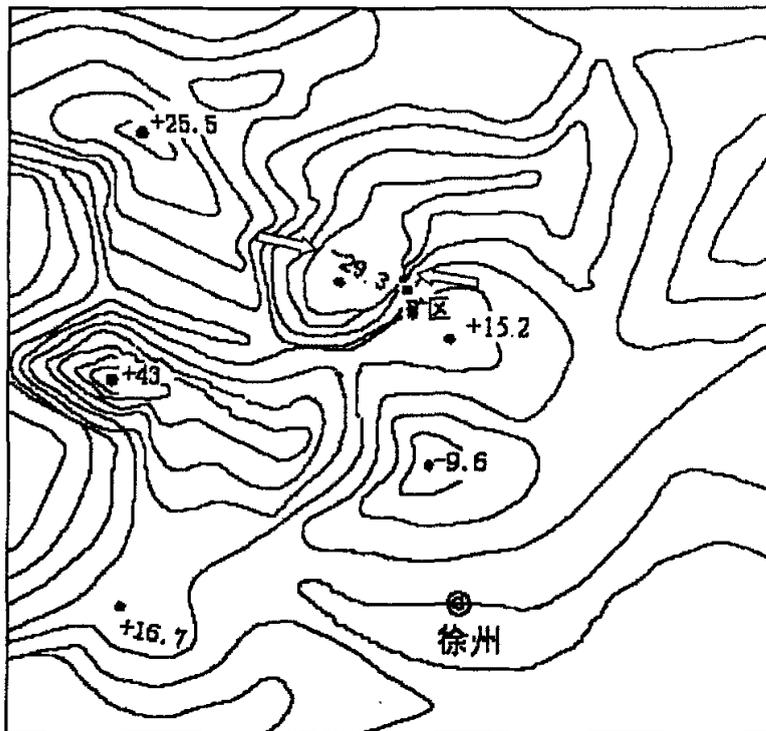


图 2.2 东滩矿区重力布格异常图
Fig.2.2 Dongtan mine gravity

3 采区钻孔 AE 法地应力测量

按弹性理论分析, 假设岩芯原岩应力为 σ_0 , 在实验室加压过程中, 当加压应力 $\leq \sigma_0$ 时, 岩样仍处于弹性状态, 当加压应力 $> \sigma_0$ 时, 随着压力增大岩样会发出声音 (声发射), 直到破坏。

3.1 AE 法地应力测量基本方法

声发射测岩石地应力的具体做法是在现场采取标明方位的定向岩样, 经室内加工后进行单轴抗压强度的测试, 同时接收其声发射信号, 根据凯塞效应确定所对应的地应力值。根据凯塞效应, 当作用力达到某一临界值时, 声发射活动会突然增多, 此临界应力值即为岩芯试件先前所受的应力 (原岩应力), 如图 3.1 所示。

磨制定向试样时, 为了便于计算空间主应力, 一般需从六个特殊方向切取岩芯: 即 X、Y、Z 和 X45° Y、Y45° Z、Z45° X。其中 X、Y、Z 相互垂直, 后三个方向分别与 X、Y、Z 成 45° 夹角。利用弹性力学公式可求得空间主应力。

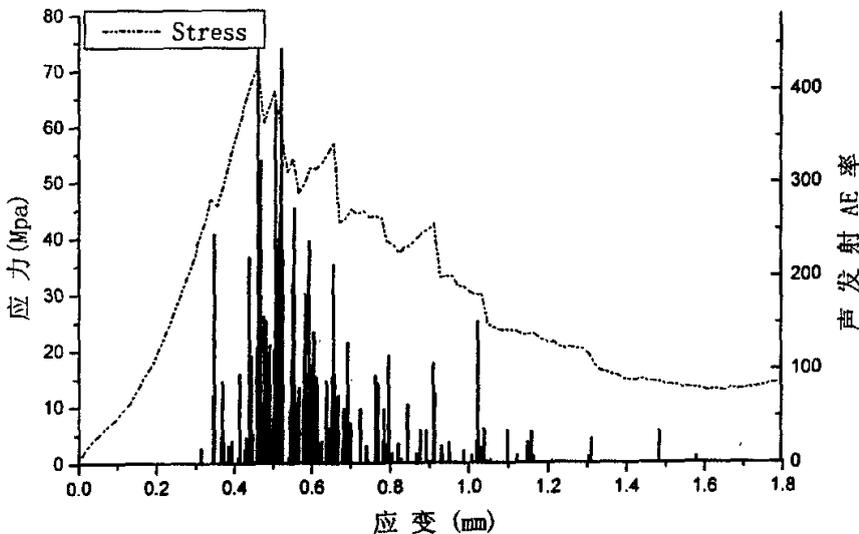


图 3.1 声发射凯塞效应
Fig.3.1 Kayser effect of the sound emission

对于深部岩层而言, 为方便主应力的测定与计算, 利用钻孔取出来的岩芯测地应力时, 常假设钻孔轴线平行于某一主应力 (主应力大小为 νh), 这样只须三

个方向的定向试样进行测试：即走向 X、倾向 Y、与 X 和 Y 成 45° 夹角的 Z。如图 3.2 所示。

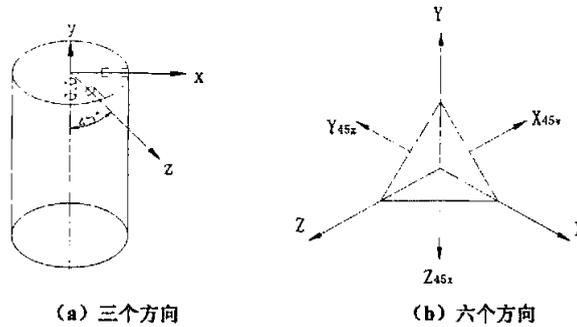


图 3.2 声发射法岩芯试件切取方向
Fig.3.2 difference of sound emission model

3.2 取样与制样

本次试验是在地面打钻取样，标记岩样的倾向；本次试验采取的岩样是从钻孔中采取具有明显层面的岩芯样，因可以知道采样处岩层倾向，这样岩样可以定向，见图 3.3。本次试验共取样 8 组（3 个钻孔，每孔 2 组（3 煤顶底板各 1 组）），都来自东滩矿 3 采区。采用三方向制样法，按一定工艺要求在室内加工声发射试样。其取样及制样的具体情况参见表 3.1。

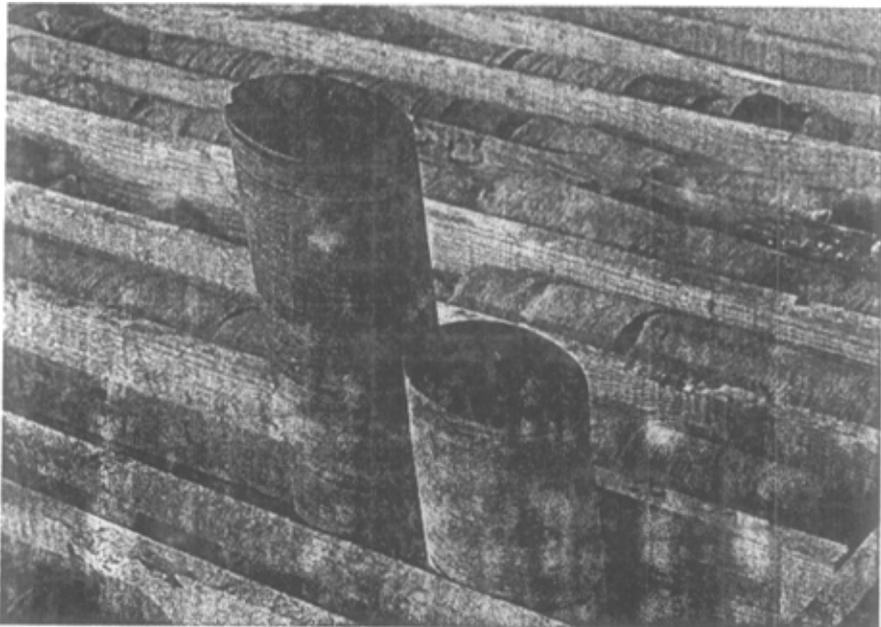


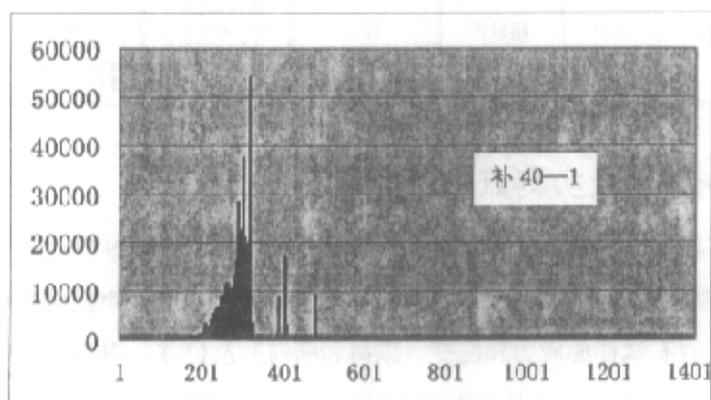
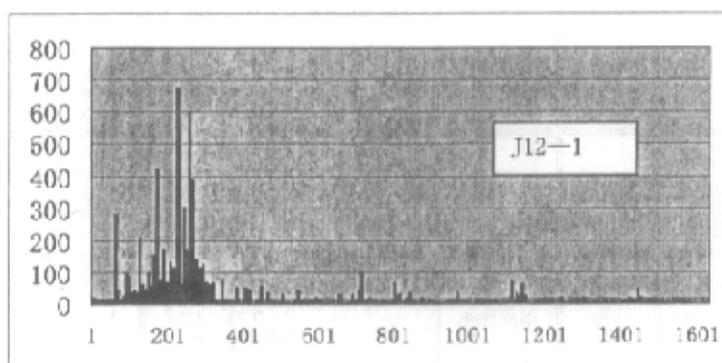
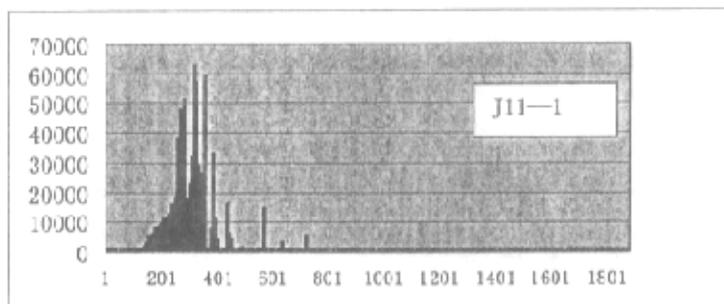
图 3.3 岩样照片
Fig.3.3 photo of sound emission model

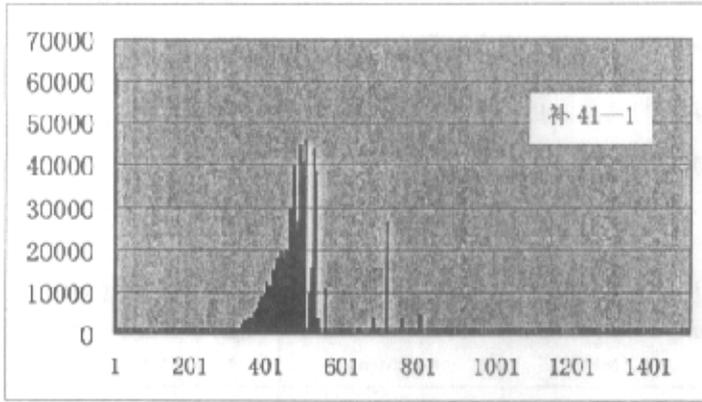
表 3.1 岩样基本情况表
Table 3.1 parameters photo of sound emission model

岩样编号	钻孔编号 取样层位	深度 (m)	岩性	岩样倾向 (°)	长×宽(cm)	高度 (cm)	试样方向 (°)
DT1-1	J3-11 (顶)	520.1	细砂岩	25.3	2.76×2.81	4.97	25.3
DT1-2					2.68×2.64	5.01	115.3
DT 1-3					2.65×2.57	4.85	70.3
DT 1-4	J3-11 (底)	585.6	细砂岩	25.6	2.85×2.69	5.13	25.6
DT 1-5					2.80×2.71	5.05	115.6
DT 1-6					2.77×2.71	5.14	70.6
DT 2-1	J3-12 (顶)	534	中细砂岩	0.5	2.79×2.42	5.17	0.5
DT 2-2					2.75×2.61	5.12	90.5
DT 2-3					2.89×2.69	5.01	45.5
DT 2-4	J3-12 (底)	575.20	灰岩	1.2	2.89×2.78	5.19	1.2
DT 2-5					2.72×2.64	4.86	91.2
DT 2-6					2.90×2.53	5.05	46.2
DT 3-1	补 40 (顶)	530.43	中细砂岩	5	2.78×2.66	5.15	5
DT 3-2					2.62×2.51	5.22	95
DT 3-3					2.66×2.46	4.86	50
DT 3-4	补 40 (底)	570	中细砂岩	4.7	2.68×2.55	5.09	4.7
DT 3-5					2.78×2.70	5.01	94.7
DT 3-6					2.72×2.61	4.96	49.7
DT 4-1	补 41 (顶)	528.97	粗砂岩	10	2.81×2.64	5.12	10
DT 4-2					2.94×2.86	4.98	100
DT 4-3					2.64×2.71	5.03	55
DT 4-4	补 41 (底)	630	粗砂岩	12.3	2.54×2.55	4.92	12.3
DT 4-5					2.53×2.50	5.06	112.3
DT 4-6					2.63×2.59	5.01	57.3

3.3 实验数据整理及实测点主应力计算

整个测试实验在中国矿业大学岩控中心完成。试验采用 100KN 普通试验机作为加载系统,用国产 AE-400B 型四通道 AE 参数测试仪记录获得声发射率—时间曲线,同时测量岩石试样的应力和应变(纵向和横向)及位移,得到应力—时间曲线,如图 3.4。整个测试系统是在微机控制下自动采集和储存的。





在声发射率—时间曲线上寻找凯塞效应特征点，按照凯塞效应原理整理试验数据并判断取样方向上的正应力值。岩样应力实测值见表 3.2。

表 3.2 岩样应力实测值
Table 3.2 value of model stress measuring

试样编号	凯塞效应特征点应力(MPa)	试样编号	凯塞效应特征点应力(MPa)
DT1-1	14.3	DT3-1	16.70
DT1-2	9.68	DT3-2	12.08
DT1-3	11.95	DT3-3	15.11
DT1-4	17.82	DT3-4	12.06
DT1-5	13.08	DT3-5	8.20
DT1-6	14.97	DT3-6	11.34
DT2-1	18.07	DT4-1	13.74
DT2-2	14.74	DT4-2	5.47
DT2-3	16.34	DT4-3	12.41
DT2-4	13.82	DT4-4	12.08
DT2-5	10.90	DT4-5	9.43
DT2-6	12.92	DT4-6	11.86

因为取样时，各岩样的夹角为 45° ，可采用以下公式计算最大、最小主应力的方向和大小：

$$\operatorname{tg} 2\phi = \frac{\sigma_1^1 + \sigma_3^1 - 2\sigma_2^1}{\sigma_1^1 - \sigma_3^1} \quad (3-1)$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_1^1 + \sigma_3^1}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1^1 - \sigma_2^1)^2 + (\sigma_2^1 - \sigma_3^1)^2} \quad (3-2)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_1^1 + \sigma_3^1}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1^1 - \sigma_2^1)^2 + (\sigma_2^1 - \sigma_3^1)^2} \quad (3-3)$$

式中： σ_1^1 、 σ_2^1 、 σ_3^1 —平行、垂直和 45° 方向的正应力实测值；

σ_1 、 σ_3 —平面最大主应力、最小主应力。规定应力以压为正；

ϕ — σ_1 与 σ_1^1 的夹角，由主应力 σ_1 逆时针转到 σ_1^1 方向为正。

计算结果如表 3.3 所示。

表 3.3 各测点的主应力大小和方向
Table 3.3 principal stress value and direction of measuring points

测点	水平方向最大主应力 σ_H (MPa)	水平方向最小主应力 σ_h (MPa)	垂直方向主应力 σ_v (MPa)	水平最大主应力 方向 (°)
J3-11(顶)	16.77	9.47	13.00	142.0
J3-11(底)	19.99	12.79	14.64	148.7
J3-12(顶)	19.82	13.6	13.35	118.3
J3-12(底)	15.5	10.86	14.38	120.6
补 40 (顶)	19.82	12.00	13.26	108.9
补 40 (底)	15.18	8.22	14.25	111.4
补 41 (顶)	18.72	5.32	13.22	105.7
补 41 (底)	15.46	9.38	15.75	107.3

3.4 结果分析

由前面的“密度椭球体理论”分析和测试结果可知，本矿区地应力场属于构造应力场型。对于构造应力场型来说，测点在水平方向所受的力，可以分解为水平构造应力与由自重应力所引起的侧压力之和，因此，各测点水平构造应力值可通过下式计算：

$$\sigma_T = \sigma - \lambda \gamma h \tag{3-4}$$

式中： σ_T —水平构造应力值；

σ —水平方向最大主应力（见表 3.3）；

λ —侧压力系数， $\lambda = \frac{\mu}{1-\mu}$ ， μ —泊松比；

γ —计算深度处上覆岩体平均比重，MN/m；一般取 0.025。

由上式可得各测点最大水平构造应力值，如表 3.4。

表 3.4 各测点最大水平构造应力值
table 3.4 the major horizontal principal stress of measuring points

测点	自重应力引起的侧压力值 (MPa)	最大水平构造应力 (MPa)	最大水平构造应力平均值 (MPa)	岩样单轴抗压强度 (MPa)
J3-11 (顶)	4.29	12.48	13	78.66
J3-11 (底)	4.83	15.16		65.54
J3-12 (顶)	4.41	15.41		24.03
J3-12 (底)	4.75	10.75		61.58
补 40 (顶)	4.38	15.44		82.01
补 40 (底)	4.70	10.48		109.49
补 41 (顶)	4.36	14.02		109.96
补 41 (底)	5.20	10.26		162.14

由下式:

$$\sigma_v = \gamma h \tag{3-5}$$

$$\sigma_H = \sigma_1 = \lambda \sigma_v + \sigma_T = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_v + \sigma_T \tag{3-6}$$

$$\sigma_h = \lambda \sigma_v + \lambda \sigma_T = \lambda (\gamma h + \sigma_T) \tag{3-7}$$

式中: σ_H 、 σ_h —水平方向最大、最小主应力; 其它参数同式 (3-4)。

可得到东滩煤矿基岩中地应力值随深度变化的计算公式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_v &= 0.025h \\ \sigma_H &= 0.00825h + 13.00 \\ \sigma_h &= 0.00825h + 4.29 \end{aligned} \right\} \tag{3-8}$$

令 $\sigma_v = \sigma_H$, 得 $h=780m$ 。此即为垂直主应力近 似等于水平最大主应力的临界深度, 小于这个深度采区地应力场呈现构造应力场型, 垂直方向主应力小于水平方向最大主应力; 大于这个深度采区地应力场呈现自重应力场型, 垂直方向主应力大于水平方向最大主应力。

4 测点附近未测区域地应力值估算

对于一个矿区来说,要了解整个工程区域的地应力分布规律,就必须进行足够数量的“点”的地应力测量,但完全靠应力实测将是成本极高而不现实的。更何况,目前的地应力实测方法,理论上都只能测量较硬岩层中的应力,煤层和软岩层中的地应力测量困难,而煤巷和软岩巷道围岩控制问题恰恰是矿山工程难点所在。

本章提出了一种利用少量地应力实测成果,估算不同岩层中地应力值的方法。它是一种简化的估算方法,对无条件进行大量地应力实测工作的煤矿,可用此方法计算煤岩层中的地应力值,作为工程设计的参考。

如前所述,天然地应力场可分为以自重应力为主的自重应力场型和以构造应力场为主的构造应力场型,分别讨论如下。

4.1 自重应力场型

(1) 各向同性岩体

根据连续介质力学的原理,考虑线弹性、各向同性岩体,在地下深 h 处,对于没有承受荷载的水平地表,自重应力可按式计算:

$$\sigma_z = \gamma h \quad \sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z \quad (4.1)$$

式中

σ_z 、 σ_x 、 σ_y —分别为垂直自重应力分量和两个水平自重应力分量;
 μ —岩体泊松比。

在自重应力场中,浅部岩体中应力小,岩体处于弹性状态,随着深度增加,岩体中应力值加大,当深度大到一定值时,岩体便会由弹性进入潜塑性状态,岩体由弹性进入潜塑状态的深度叫临界深度 H_{cr} 。

在临界深度处,应力分量可继续用(4.1)计算,即有:

$$\sigma_z = \gamma H_{cr} \quad \sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H_{cr} \quad (4.2)$$

同时在 H_{cr} 处,应力状态应满足岩体的屈服准则 Hoek-Brown 准则,即

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (4.3)$$

以 $\sigma_z = \sigma_1, \sigma_x = \sigma_y = \sigma_3$,将(5.2)式代入(5.3)式得 H_{cr} 的表达式为:

$$H_{cr} = \frac{\lambda m + \sqrt{(m\lambda)^2 + 4s(1-\lambda)^2}}{2\gamma(1-\lambda)^2} \cdot \sigma_c \quad (4.4)$$

式中 m 、 s — 岩体性质常数，与岩体结构有关，可查表或由公式计算得到；

σ_c — 岩块的单轴抗压强度，MPa；

γ — 上覆岩土体平均重量密度，MN/m³，土体部分可取 0.02，岩体可取 0.027，一般可取 0.025。

$$\lambda \text{ — 侧压系数, } \lambda = \frac{\mu}{1-\mu}$$

假设岩体为理想弹塑性体，则 H_{cr} 深度以下岩层中的应力可由 (4.3) 式得到，即：

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \gamma h \\ \sigma_x = \sigma_y &= \sigma_z + \frac{1}{2} m \sigma_c - \sqrt{m \sigma_c \sigma_z + \frac{1}{4} m^2 \sigma_c^2 + s \sigma_c^2} \quad (h > H_{cr}) \end{aligned} \quad (4.5)$$

(2) 横观各向同性近水平层状岩层

如图 4.1 (a) 所示，根据 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ ，由广义虎克定律，自重应力可按下列式计算：

$$\sigma_z = \gamma h$$

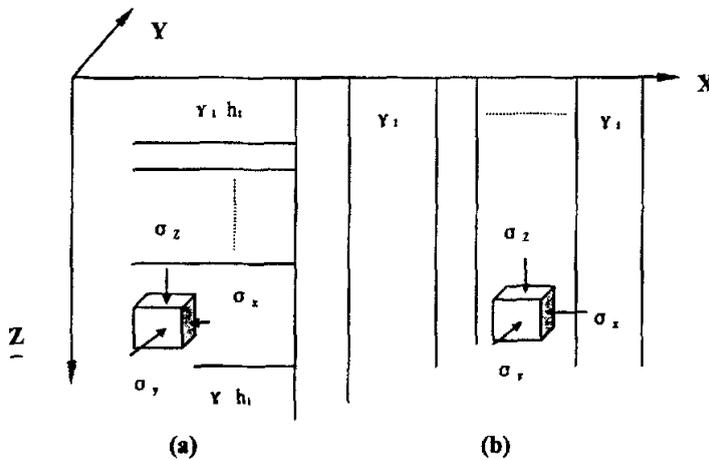


图 4.1 非均质岩体自重应力的计算
Fig.4.1 gravity stress in rock

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu'}{1-\nu'} \cdot \frac{E'}{E} \cdot \gamma h \quad (4.6)$$

式中 γ 取各层的容重加权平均值。

临界深度公式仍为 (4.4) 式, 不同之处在于式中 $\lambda = \frac{\mu'}{1-\mu} \cdot \frac{E}{E'}$; E, E' 和 μ, μ' 分别为平行层面和垂直层面方向的弹模和泊松比。 H_{σ} 深度以下, 岩层中的应力也可由 (4.3) 式求解得到, 式中 γ 和 λ 取值同式 (4.6)。

(3) 横观各向同性近垂直层状岩层

如图 4.1 (b) 所示, 根据 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$, 由广义虎克定律, 自重应力可按式计算:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \gamma h \\ \sigma_x &= \frac{\mu'}{1-\mu} \cdot \frac{E}{E'} \cdot \gamma h \\ \sigma_y &= \frac{\mu'}{1-\mu} \sigma_x \end{aligned} \quad (4.7)$$

式中 E, E' 和 μ, μ' 分别为平行层面和垂直层面方向的弹模和泊松比。代入 (4.3)

式得此时的临界深度公式仍为 (4.4) 式, 但式中 $\lambda = \frac{\mu'}{1-\mu} \cdot \frac{E}{E'}$ 。 H_{σ} 深度以下, 岩层中的应力也由 (4.3) 式求解, 式中 γ 和 λ 取值同式 (4.7)。

4.2 构造应力场型

(1) 弹性状态

当构造应力较小时, 所有岩层都处于天然弹性状态时, 考虑岩层为各向同性, 则岩层中地应力可简化表示为:

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \gamma h \\ \sigma_H &= \lambda \sigma_v + \sigma_T = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v + \sigma_T \\ \sigma_h &= \lambda \sigma_v + \lambda \sigma_T = \lambda (\sigma_v + \sigma_T) \end{aligned} \quad (4.8)$$

式中: σ_v —垂直方向应力, 国内外地应力实测结果表明, 构造应力场中 σ_v 亦近似为 γh ;

σ_H, σ_h —水平方向最大、最小应力;

λ —侧压力系数;

σ_T —水平构造应力。

(2) 弹塑性状态

在构造应力场型矿区中, 当 σ_T 较大时, 浅部一部分岩层 (软弱岩层) 可能会进入天然塑性状态, 而其深部仍为弹性状态。这时浅部(塑性)和深部(弹性)的应力计算方法是不同的, 应分别计算。因计算塑性区深度 H_{σ} 的方法不同, 此时又分两种情况。

第一种情况： σ_1 、 σ_2 在水平方向， σ_3 在垂直方向。此时在 H_{cr} 处

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= \gamma H_{cr} \\ \sigma_1 &= \lambda \sigma_3 + \sigma_T \end{aligned} \quad (4.9)$$

同时,该点处应力应满足 Hoek-Brown 准则, 即式 (4.3), 将 (4.9) 代入 (4.3),

整理得到此时计算 H_{cr} 的表达式

$$H_{cr} = \frac{1}{\gamma} \frac{2\sigma_T(1-\lambda) + m\sigma_c - \sqrt{[2\sigma_T(1-\lambda) + m\sigma_c]^2 - 4(1-\lambda)^2(\sigma_T^2 - s\sigma_c^2)}}{2(1-\lambda)^2} \quad (4.10)$$

由 (4.10) 式可讨论 $H_{cr}=0$ 的条件为:

$$2\sigma_T(1-\lambda) + m\sigma_c = \sqrt{[2\sigma_T(1-\lambda) + m\sigma_c]^2 - 4(1-\lambda)^2(\sigma_T^2 - s\sigma_c^2)}$$

即

$$\begin{aligned} 4(1-\lambda)^2(\sigma_T^2 - s\sigma_c^2) &= 0 \\ \sigma_T &= \sqrt{s}\sigma_c \end{aligned} \quad (4.11)$$

即 $\sigma_T < \sqrt{s}\sigma_c$ 时岩体都为弹性, 岩层中应力按式 (4.8) 求解计算;

$\sigma_T = \sqrt{s}\sigma_c$ 时岩体处于由弹性进入塑性的临界状态, 塑性区深度为零 (在地表);

$\sigma_T > \sqrt{s}\sigma_c$ 浅部岩体要进入塑性, 此时先按 (4.10) 式计算塑性区深度

H_{cr} , 若岩层处于 H_{cr} 深度以下, 按式 (4.8) 计算岩层应力, 若处于 H_{cr} 以上, 则

按下列式计算(假设岩体为理想弹塑性):

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \lambda \sigma_3 + \sigma_T & \sigma_3 &= \gamma h \\ \sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} & \sigma_2 &= \lambda(\sigma_3 + \sigma_T) \end{aligned} \quad (4.12)$$

第二种情况： σ_1 、 σ_3 在水平方向， σ_2 在垂直方向。

此时在 H_{cr} 处

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \lambda \sigma_2 + \sigma_T = \lambda \cdot \gamma H_{cr} + \sigma_T & \sigma_2 &= \gamma H_{cr} \\ \sigma_3 &= \lambda(\sigma_2 + \sigma_T) = \lambda(\gamma H_{cr} + \sigma_T) \end{aligned} \quad (4.13)$$

代入 (5.3) 式整理得到此时 H_{cr} 的表达式

$$H_{cr} = \frac{(1-\lambda)^2 \sigma_T^2 - (m\sigma_c \lambda \sigma_T + s\sigma_c^2)}{\lambda m \sigma_c \gamma} \quad (4.14)$$

由(4.14)式可讨论 $H_{cr} = 0$ 的条件为:

$$(1-\lambda)^2 \sigma_T^2 - (m\sigma_c \lambda \sigma_T + s\sigma_c^2) = 0$$

考虑一般只有软岩进入天然塑性状态, 软岩的岩体结构特征常数 s 值极小, $s\sigma_c^2$ 可忽略, 于是有:

$$\sigma_T = \frac{\lambda}{(1-\lambda)^2} m\sigma_c \quad (4.15)$$

即 $\sigma_T < \frac{\lambda}{(1-\lambda)^2} m\sigma_c$ 时岩体都为弹性，岩层中应力按式 (4.8) 求解计算；
 $\sigma_T = \frac{\lambda}{(1-\lambda)^2} m\sigma_c$ 时岩体处于由弹性进入塑性的临界状态；
 $\sigma_T > \frac{\lambda}{(1-\lambda)^2} m\sigma_c$ 时浅部岩体要进入塑性，此时先按(4.14)式计算塑性区深度 H_σ ，
 若岩层处于 H_σ 深度以下，按式 (4.8) 求解计算岩层中应力；若岩层处于 H_σ 以上，
 则按下列一组式子求解计算岩层中的地应力值 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 σ_T ：

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \lambda\sigma_2 + \sigma_T & \sigma_2 &= \gamma h \quad (h < H_\sigma) \\ \sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} & \sigma_3 &= \lambda(\sigma_2 + \sigma_T) \end{aligned} \quad (4.16)$$

以上推导地应力计算公式时考虑岩层为各向同性，对近水平层状岩层和近垂直层状岩层均适用，只不过须变换一下式中的 γ 和 λ ，具体做法同自重应力场型。

构造应力场型中岩层地应力值的估算，关键是求得其构造应力 σ_T ，而 σ_T 一般只能由对少量硬岩层进行应力实测获取。若已实测了矿区某硬岩层中的应力，则其它岩层中（待估算岩层）的应力可按如下方法简化计算得到，分近水平层状弹性岩层和近垂直层状岩层两种情况来讨论。

已知硬岩层弹模 E_1 、泊松比 μ_1 、实测应力 σ_{H1} 、 σ_{h1} 、 σ_{v1} ，要计算岩层地应力的岩层弹模 E_2 、泊松比 μ_2 。假设岩层为弹性岩层。

对近水平层状岩层，有：

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E_1} [\sigma_{H1} - \nu_1(\sigma_{h1} + \sigma_{v1})] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E_2} [\sigma_{H2} - \nu_2(\sigma_{h2} + \sigma_{v2})] \end{aligned} \quad (4.17)$$

对处于同一个矿井这样小地块中的各岩层，可近似认为它们具有同一构造变形，即近似有 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ ，于是有

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\sigma_{H1} - \nu_1(\sigma_{h1} + \sigma_{v1})}{\sigma_{H2} - \nu_2(\sigma_{h2} + \sigma_{v2})} \quad (4.18)$$

同时可有

$$\sigma_{v2} = \gamma_2 h_2 \quad (4.19)$$

$$\sigma_{H2} = \sigma_{T2} + \frac{\nu_2}{1-\nu_2} \cdot \sigma_{v2} \quad (4.20)$$

$$\sigma_{h2} = \frac{\nu_2}{1-\nu_2}(\sigma_{v2} + \sigma_{T2}) \quad (4.21)$$

四个未知数 σ_{v2} 、 σ_{H2} 、 σ_{h2} 、 σ_{T2} ，有四个方程 (4.18) ~ (4.21)，因而可以求解。这样可根据硬岩层中所测地应力值计算软岩层及其它岩层中地应力值。

对近垂直层状岩层，有：

处于同一构造地块中的相邻垂直地层，可近似认为软硬岩层水平构造应力 σ_T 是相同的。则可按下列公式计算：

$$\sigma_{v2} = \gamma_2 h_2 \quad (4.22)$$

$$\sigma_{H2} = \sigma_{T2} + \frac{\nu_2}{1-\nu_2} \cdot \sigma_{v2} \quad (4.23)$$

$$\sigma_{h2} = \frac{\nu_2}{1-\nu_2}(\sigma_{v2} + \sigma_{T2}) \quad (4.24)$$

其中 σ_T 可按下列式计算

$$\sigma_T = \frac{\sigma_{H1} - \frac{\nu_1}{1-\nu_1} \sigma_{v1}}{\frac{\nu_1}{1-\nu_1}} \quad (4.25)$$

或
$$\sigma_T = \frac{\sigma_{h1}}{\nu_1} \sigma_{v1} \quad (4.26)$$

4.3 估算步骤

根据以上分析，可以看出估算的关键有两个：一是确定区域应力场类型。可利用少量地应力实测成果，或地质分析等方法，判断矿区地应力场类型，也可由密度椭球体理论分析而得；另一个是岩层所处的应力状态，可由弹塑性临界深度来判断。具体步骤为：

(1) 自重应力场型

a. 计算自重应力场型中岩层由浅部弹性状态进入塑性的 H_{cr} 。

b. 将要计算地应力岩层所处的深度与临界深度 H_{cr} 进行对比，判断计算点岩层所处的应力状态(弹性状态或塑性状态)。

c. 根据岩层所处的应力状态，弹性状态选用公式 (4.1) 或 (4.6) 或 (4.7)。塑性状态选用 (4.5) 进行计算。

(2) 构造应力场型

a. 利用已知岩层应力实测结果，选用公式 (4.18) ~ (4.21) (近水平层状岩层) 或 (4.22) ~ (4.26) (近垂直层状岩层)，计算所求未知各岩层中的构造应力值 σ_T ；然后选用公式 (4.11) 或 (4.15) 判断岩层是否在浅部进入塑性状态。

b. 计算构造应力场型中岩层由浅部塑性转为弹性的临界深度 H_{cr} 。

c. 将要计算地应力岩层所处的深度与临界深度 H_{cr} 进行对比，判断计算点岩

层所处的应力状态（弹性状态或塑性状态）。

d.根据岩层所处的应力状态，弹性状态选用公式（4.8）；塑性状态选用（4.12）或（4.16）计算岩层中的地应力值。

根据矿方提供的岩石指标测试综合报告，用上述方法估算了3煤顶板40m和底板30m范围包括硬岩、软岩（如泥岩）和煤的各岩层的水平最大主应力、水平最小主应力和垂直主应力大小，见下表。

表 4.1 3煤及顶底板岩层地应力估算值
Table 4.1 calculating stress in 3 coal and its floor and roof rock

岩 性	深度 (m)	水平最大主应力 (Mpa)	水平最小主应力 (Mpa)	垂直主应力 (Mpa)
细砂岩	535.12	17.87	6.32	14.45
泥 岩	540.92	16.51	4.03	14.61
粉砂岩	547.20	17.77	5.28	14.77
煤 层	560.17	16.22	6.48	15.12
粉细砂岩互层	562.89	16.91	5.36	15.20
细砂岩	565.49	18.14	4.87	15.27

4.4 小结与讨论

(1) 从推导过程可以看出，这种方法是简单的地应力估算方法。从说明根据少量地应力实测值估算邻近岩层中地应力值是初步可行的。

(2) 对于一个矿井，最好有3-5个硬岩层(强度高、弹模大、天然弹性状态)地应力实测值同时用于计算其它岩层(硬岩层和软岩层)地应力值为好(取平均值)。如果条件不具备，用1-2个实测点值进行计算，亦可为岩石工程设计提供参考。但这些实测点，必须具备代表性，即尽可能选用矿井中最坚硬的岩层(弹性模量最大、强度最高)、且不受构造影响的部位进行实测。

(3) 煤及软岩层中地应力值的研究，是国内外地应力研究的难题。本文提出的估算煤及软岩层中地应力值的方法在国内外都是一种新的尝试。

5. 矿区地应力场数值模拟

根据矿区的工程地质条件及地应力实测资料,利用 FLAC 有限元数值分析程序对矿区深部-500m--700m 水平岩体初始地应力状态进行了三维反演分析,对实验结果加以验证。分析矿井区域应力场分布及变化规律,给采区巷道布置及支护提供科学依据。

5.1 概述

从 20 世纪 60 年代起,有限元就广泛应用于岩土力学中,用来解决地基、采场围岩以及边坡稳定性等问题。近十几年来,国内把有限元应用在采矿工程方面,如“三下”采煤、矿区地表沉降等方面,取得较好效果。

有限元之所以有这么大的生命力,主要在于它是一种较为准确预测岩土力学状态、解决各种复杂条件下的岩土力学问题最有效的数值方法之一。近年来,尤其是 20 世纪 80 年代以来,人们在岩土力学的研究与工程实践中对岩土类介质的认识进一步深化,不断改进和完善数学模型,使之更能反映岩土介质的本构关系。有限单元法有弹性有限元法与非线性有限元法之分。前者假设岩体是弹性介质,即岩体弹性、均质、连续,而后者更能够反映岩土体的真实力学性状。

在实际工作中受资金与现场条件的限制,通常只能给出矿区有限点的应力实测值,由于地应力分布的复杂性,这些有限点的数值远不能准确地表达原岩应力场的分布,因而不能满足工程上大范围的需要,以实测值为基础的区域原岩应力场的反演可弥补上述不足,因而其研究价值日益受到人们的重视。目前区域原岩应力场的反演方法包括边界荷载调整法、多元回归分析法、应力函数法及构造应力场拟合计算法等,此不在一一介绍,它们的共同之处是结合地质条件、以实测地应力资料为根据的反分析方法。

在矿区地应力场反演分析方面应用较多的是以有限元反演计算为基础的边界荷载调整法,并且取得了较大的成果。一些矿区进行了地应力场的研究,进行了非线性有限元数值模拟,进一步了解了区域地应力分布规律,分析结果对现场实际工作具有较大指导意义。

5.2 矿区深部地应力场非线性有限元数值分析

计算采用大型非线性有限元结构分析的 FLAC 程序。数值模拟结果的可靠性主要取决于所选的物理模型、计算模型、模型边界条件和计算参数。下面分别加以讨论。

5.2.1 物理模型的建立

(1) 模型范围

物理模型包括计算区域大小、工程地质单元的划分等。此次研究的是整个东滩矿三采区深部工程小区的地应力场情况，根据主采煤层赋存情况，研究的范围为 15 勘探线到 18 勘探线，深度为-500 到-700m，整个研究区域为一长方体。

矿山工程岩体的应力总是处于三维空间应力状态，最好采用三维有限元计算，才能较准确地确定岩体的空间应力状态，三维有限元计算及成图复杂，对所用的有限元软件要求高，再加上本次研究的范围很大，划分的单元多，就给计算带来难度。为了使计算结果能在实际工程建设中得到更好的利用，决定在三维计算结束后剖一个具有代表性（煤层开采较多）的水平剖面。本次作出的水平最大主应力、最小主应力、剪应力图和水平最大、最小主应力矢量图是-600m 水平的，因为三采区在-500m 水平刚见到煤层而在-700m 水平基本上快到自重应力场了。所以剖-600m 水平以研究该区的地应力场分布规律具有比较大的实际应用价值。

由于资料未提供水平切面图，根据三煤底板等高线和 15、16、17、18 等 4 条勘探线剖面图作出水平地质切面图。根据工程地质岩组划分的原则，适当的合并各小分层。再考虑到工程实际需要，本计算模型的范围取为一矩形区域，区域范围 3250m×1875m。

(2) 工程地质单元划分

整个计算范围内的岩层可划分为相应的工程地质单元。工程地质单元的种类有许多种。对于工程地质单元的划分，应根据工程地质计算所涉及的研究区域大小，要模拟的具体内容和精度要求来加以选择。本次模拟计算区域较大，为矿区应力场的初步认识，故决定采用工程地质岩组作为划分计算单元的基本依据。

根据各分层的物理力学性质，-500—-700m 水平面计算区共划分以下 7 个工程地质岩组：

细砂岩组，砂岩、泥岩互层组，中砂岩组，中细砂岩组，砂岩灰岩互层，煤

层和断层带。

(3) 工程地质岩组岩块力学参数确定

在数值计算中，各岩组力学性质确定的几个原则为：

①对缺乏实测数据的岩体，根据岩性、岩石微观综合鉴定结果及水文地质参数，按其和待定岩层的相关程度，综合选取或参考有关资料。

②同一岩层有多组测试数据时，选用代表性的数据，用加权平均的方法进行处理。

③各工程地质岩组的物理力学性质按小分层进行加权平均来确定。

(4) 岩体力学性质研究

岩体是地质体的一部分，岩体与完整的岩石材料不同，其中存在着断层、节理、层面等各种不连续面或结构面。正是结构面的存在使得现场岩体力学性质不同于实验室相对完整的岩石材料的力学性质。因此，用室内所测岩块强度、变形参数代替实际岩体参数，参与工程设计计算和预测工程岩体的变形和破坏，往往带来较大的误差，甚至结果令人无法相信。而现场试验无疑是一种最理想的方法，但测试时间长，代价高。本文采用由岩块强度参数换算成岩体强度参数的方法。过程如下：

①强度参数的确定

岩体的强度参数包括抗压、抗拉、抗剪强度。Hoek 和 Brown 提出的岩体破坏准则：

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{M\sigma_c\sigma_3 + S\sigma_c^2} \quad (5.1)$$

式中： σ_1 ——岩体破坏时的最大有效主应力

σ_3 ——岩体破坏时的最小有效主应力

σ_c ——完整岩块的单轴抗压强度

M, S ——岩体结构特征常数，可查表 5.1 得到。

表 5.1 岩体结构特征常数 M、S 值确定方法

table 5.1 M、S value of rocks

岩石质量指标 RQD (%)	经验破坏准则 M、S——岩体结构特征常数	碳酸岩盐、晶体解理发育白云岩、石灰岩、大理岩	成岩交好的粘土质岩石：泥岩、粉砂岩、页岩和板岩（垂直于层理试验）	砂质岩、结晶好，晶体解理发育。砂岩和石英岩	细粒多矿物火成结晶岩、安山岩、结晶玄武岩、辉绿岩和流纹岩	粗粒多矿物火成、变质结晶岩、角闪岩、辉长岩、片麻岩、花岗岩、苏长岩、石英闪长岩
100	完整岩样实验室尺寸岩样，无原始裂隙	M=7 S=1.0	M=10.0 S=1.0	M=15.0 S=1.0	M=17.0 S=1.0	M=25.0 S=1.0
90	优质岩体紧密镶嵌结构，未扰动，具粗糙未风化节理，间距 1-3m	M=3.5 S=0.1	M=5.0 S=0.1	M=7.5 S=0.1	M=8.5 S=0.1	M=12.5 S=0.1
75	良质岩体新鲜~微风化岩体，轻微扰动，节理间距 1-3m	M=0.7 S=0.004	M=1.0 S=0.004	M=1.5 S=0.004	M=1.7 S=0.004	M=2.5 S=0.004
50	中等岩体数组中等风化节理，间距 0.3-1m，扰动	M=0.14 S=0.0001	M=0.2 S=0.0001	M=0.30 S=0.0001	M=0.34 S=0.0001	M=0.50 S=0.0001
25	低质岩体多组泥质充填的风化节理	M=0.04 S=0.00001	M=0.05 S=0.00001	M=0.08 S=0.00001	M=0.09 S=0.00001	M=0.13 S=0.00001
0	劣质岩体多组夹泥的强风化节理，间距 50mm 或废岩	M=0.007 S=0	M=0.01 S=0	M=0.015 S=0	M=0.017 S=0	M=0.025 S=0

如果围压 σ_3 已知，则有围压时的岩体强度为：

$$\sigma_{mass} = \sigma_3 + \sqrt{M\sigma_c\sigma_3 + S\sigma_c^2} \quad (5.2)$$

取 $\sigma_3=0$ 时，即为岩体单轴抗压强度：

$$\sigma_{cmass} = \sqrt{S} \cdot \sigma_c \quad (5.3)$$

取 $\sigma_1=0$ ，则得到岩体的抗拉强度：

$$\sigma_{tmass} = \frac{1}{2}\sigma_c(M - \sqrt{M^2 + 4S}) \quad (5.4)$$

岩体抗剪强度指标 c_{mass} 和 ϕ_{mass} 的确定方法如下：

由 (5.1) 式计算破裂时的 σ_1 值，再计算破裂面上的正应力 σ_n

$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}M\sigma_c} \quad (5.5)$$

此处 c 、 ϕ 的计算中要用到 σ_3 ，在本矿的岩体强度和变形参数换算中， σ_3 是按 -550 水平平均主应力大小 15MPa 计算的。破裂面上的剪应力为：

$$\tau = (\sigma_n - \sigma_3) \sqrt{1 + \frac{M\sigma_c}{2(\sigma_1 - \sigma_3)}} \quad (5.6)$$

则 c_{mass} 和 ϕ_{mass} 为:

$$c_{mass} = \tau - \sigma_n \operatorname{tg} \phi_{mass} \tag{5.7}$$

$$\phi_{mass} = 90 - \arcsin \frac{2\tau}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \tag{5.8}$$

②变形参数的确定

岩体变形参数——弹模或变形模量，目前主要靠来获得。对于室内所得的弹性模量如何用于现场中去，本次研究采用一种经验法，即 W.Dershowits 提出的根据岩石质量指标 RQD 值和岩块弹模 E 确定岩体弹模 E_{mass} 的方法。其经验关系如图 5.1。

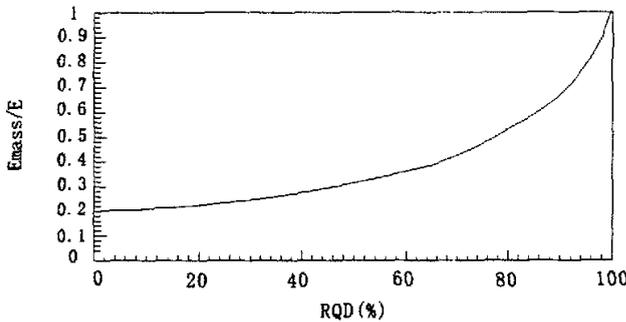


图 5.1 岩体弹模估计图 Fig.5.1
Fig.5.1 calculating method of modulus of elasticity

为此按照公式将岩块强度和变形参数换算成相应的岩体强度和变形参数。下表 5.2 给出了各小分层换算前后的力学指标值。

表 5.2 换算前后岩层力学性质
Table 5.2 rock parameters before and after calculating

岩层	换算前					换算后				
	弹模 ($\times 10^4$)	抗压强度 (MPa)	c (MPa)	ϕ ($^\circ$)	抗拉强度 (MPa)	弹模 ($\times 10^4$)	抗压强度 (MPa)	c (MPa)	ϕ ($^\circ$)	抗拉强度 (MPa)
砂岩	2.13	87	17.17	36.58	4.10	0.94	4.92	4.96	27.51	0.22
砂泥岩	1.64	48.1	10.0	39.69	1.23	0.64	2.41	3.44	20.17	0.14
泥岩	0.78	38	11.86	34.06	1.68	0.23	0.38	1.73	10.72	0.02
灰岩	1.9	100.0	13.0	40.0	6.0	0.76	5.39	4.11	22.12	0.51

根据以上原则，各工程地质岩组岩组换算前后的力学性质见表 5.3 和表 5.4。

表 5.3 换算前岩组的参数
Table 5.3 rock parameters before calculating

岩组序号	岩组名称	平均 RQD 值	弹模 (10 ⁴ MPa)	泊松比	抗压强度 (MPa)	内聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)	抗拉强度 (MPa)
1	砂岩泥岩互层	0.5	1.32	0.5	60.0	14.0	35.5	2.65
2	中砂岩岩组	0.7	2.13	0.7	87.0	16.6	36.3	4.0
3	灰岩砂岩互层	0.58	1.34	0.58	69.0	12.4	37.0	3.8
4	灰岩岩组	0.49	1.78	0.49	38.0	11.9	34.1	1.7
5	中细砂岩组	0.64	1.64	0.64	48.2	10	39.7	1.2
6	煤层	0.3	0.18	0.2	18	0.5	16	0.2
7	断层带	0.05	0.4				0.0	

表 5.4 换算后岩组的参数
Table 5.4 rock parameters after calculating

岩组序号	岩组名称	弹模 (10 ⁴ MPa)	泊松比	抗压强度 (MPa)	内聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)	抗拉强度 (MPa)
1	砂岩泥岩互层	0.41	0.25	8.6	2.29	14.06	0.24
2	中砂岩岩组	0.94	0.25	14.92	4.96	27.51	0.12
3	灰岩砂岩互层	0.48	0.25	12.84	3.02	17.31	0.30
4	灰岩岩组	0.56	0.25	12.38	2.73	10.72	0.22
5	中细砂岩组	0.64	0.25	12.41	3.44	20.17	0.14
6	煤层	0.04	0.4	0.6	0.18	11.14	0.02
7	断层带	0.05	0.4	0.2	0.10	16.14	0.0

5.2.2 建立计算模型

所谓计算模型是指将要求解的实际问题抽象为一个力学模型，这是下一步进行计算的关键。力学模型就是研究区内工程地质单元的本构模型，由岩层性质而定。以往的研究大多假定材料为线弹性，但这并不符合实际的岩体力学性质。为此，本次计算选择了弹塑性材料模式。

岩土体的非线性本构模型很多，而能广泛应用于岩土工程中的岩土本构模型是 Mohr - Coulomb 模型和 Drucker - Prager 模型。其屈服面见图 5.2。Drucker - Prager 模型的屈服准则采用广义的 von Mises 屈服准则，其表达式为：

$$F = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - k = 0 \quad (5.9)$$

式中，参数 α 和 k 分别由下列公式计算：

$$\alpha = \frac{\sin \phi}{\sqrt{3(3 + \sin^2 \phi)}} \quad (5.10)$$

$$k = \frac{\sqrt{3}c \cos \phi}{\sqrt{3 + \sin^2 \phi}}$$

式中 c — 材料的粘聚力，Mpa;
 ϕ — 材料的内摩擦角。

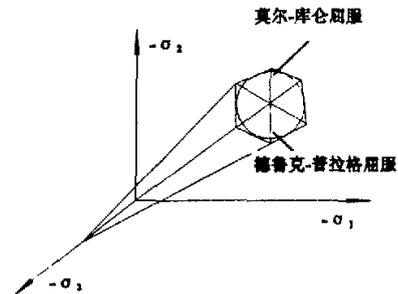


图 5.2 两种模型屈服面
Fig.5.2 two yield faces

本次计算采用 FLAC 程序提供的 Drucker-Prager-Cap 弹塑性材料模式, 即带“帽”的 Drucker – Prager 屈服准则。这样更能反映岩土塑性体应变和剪胀性, 符合计算区岩石轴向抗压试验的应力—应变曲线特点, 并能反映拉断特点。

5.2.3 边界条件的确定

根据前面的地应力实测分析和理论分析, 构造应力大致近东西方向, 偏西北-东南方向, 再考虑到模型的稳定性, 决定对模型计算采用东、南边界加约束, 北、西边界施加荷载。一般来说, 这种约束条件和边界加载较符合实际, 具有良好的效果。施加的荷载大小根据已知地应力实测值, 由反演试载法来确定。

5.2.4 计算参数的选取

计算参数的选取一般是由所选或所建的力学模型决定的, 本次计算采用 FLAC 程序的 D-P-C 模型, 所需的参数是:

- (1) 弹性模量 E 和泊松比 μ
- (2) 屈服函数参数 α 和 k
- (3) 帽硬化参数 W 和 D
- (4) 材料的抗拉强度 T
- (5) 帽硬化初始位置 I_0

各参数确定方法为:

- (1) E 、 μ 、 c 和 ϕ 取值参见表 5.2
- (2) α 和 k 根据公式 (5.10) 计算

(3) 帽参数原则上根据各种应力途径试验来确定的。本次根据经验进行了选取。 W 、 D 越小表示强化越快; 越大直至趋于无穷大表示材料为理想弹塑性。岩石取 $W=5 \times 10^4$, $D=1 \times 10^{-2} \text{MPa}$, 对于现场岩体, 由于结构面的缘故, 硬化特性不是十分明显, 故此次计算采用 $W=1.0 \times 10^4$, $D=1.0 \times 10^{-2} \text{MPa}$ 。帽硬化初始位置 I_0 一般采用的经验公式:

$$I_0 = (5 \sim 10) \sigma_c \quad (5.11)$$

式中 σ_c ——实验室岩块的单轴抗压强度。

此次计算采用 $I_0 = 10\sigma_{cmax}$ 。模型有限元计算参数，见表 5.5

表 5.5 有限元计算参数表
Table 5.5 parameters in Numerical Simulation

岩组	弹模 (10^4 MPa)	泊松比	α	k	W	D	抗拉强度 (MPa)	帽初始位置 (MPa)
1	0.41	0.25	0.080	2.20	10000	0.01	0.02	6
2	0.94	0.25	0.149	4.251	10000	0.01	0.22	49.2
3	0.48	0.25	0.098	2.839	10000	0.01	0.30	28.4
4	0.23	0.25	0.062	1.69	10000	0.01	0.02	3.8
5	0.64	0.25	0.113	3.167	10000	0.01	0.14	24.1
7	0.04	0.4	0.0066	0.180	10000	0.01	0.02	5
8	0.05	0.4	0.12	0.012	10000	0.01	0.0	2.5

5.2.5 单元划分

单元划分的几点说明：

(1) 单元的尺寸与应力计算的误差成正比，单元划分得越小，计算结果越精确。但另一方面，单元越多，所需计算时间越长，要求计算机容量也越大。从整体来说，单元的大小要根据计算精度的要求和计算机的容量及速度来确定。

(2) 单元划分四节点等参元，单元形状以矩形为主，必要时辅以三角形单元。在断层带内和煤层内，划分的相对细一些。另外同一岩层划在同一单元组内，要避免同一单元处在两种性质变化大的岩层内。

(3) 由于煤层和断层带在水平切面图上为一狭长条带，对于有限元计算，一般需用节理单元来模拟。将煤层和断层划分为细长的四边形单元，用这种细长四边形单元近似模拟节理单元。

(4) 对应力和位移需要详细了解的重要部位，单元应划分得小一些，对次要的部位，以及应力和位移变化缓慢的部位，单元可适当大一些。为此，对于平面图上煤及顶底板单元划分相对细些。一些构造复杂的部位如断层带、向斜和背斜处划分得也相对详细些。

考虑上述 4 点因素，本次计算将 -500—-700m 计算剖面划分为 7 个单元组，整个剖面共划分为 23238 个节点，16300 个单元。

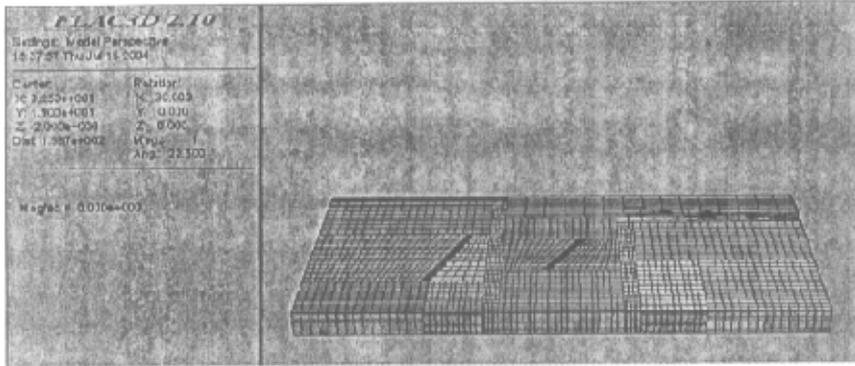


图 5.3 东滩煤矿三采区-500m--700m 三维地应力场模拟原始网格图
Fig.5.3 Numerical Simulation grids

5.3 计算结果分析

5.3.1 边界荷载调整

所加边界荷载的大小，应根据计算范围内已知实测点的地应力大小和方向，经过反复调整，使该点的应力计算值等于或尽可能逼近实测值。

计算模型最终采用的边界荷载为：西边界施加 15.0MPa 的均布应力，北边界施加 5.4MPa 的均布应力。

5.3.2 计算结果及矿区构造应力场分析

此次研究的矿区为构造应力场。为便于说明，采用以下图表来分析线性有限元计算结果。

表 5.5 列出了计算所得的各岩组水平最大、最小应力变化范围。

表 5.5 - 600m 平面各岩组最大、最小水平应力
Table 5.5 maximum and minimum horizontal stress in rocks of -600m

岩组编号	岩组名称	最大水平应力 (MPa)	最小水平应力 (MPa)
1	砂岩泥岩互层	6-24	2-4
2	中砂岩岩组	12-24	6-10
3	灰岩砂岩互层	10-23	0-6
4	灰岩岩组	12-15	0-10
5	中细砂岩组	12-19	6-12
6	煤层	14-20	0-12
7	断层带	6-21	-2-12

上表分析可得：总体来说，砂岩岩组中的水平应力值要较泥岩岩组、煤层

中的大。一般来说岩石越坚硬，弹模越大，其在构造运动期所聚集的应力则越大，如砂岩计算结果中最大水平构造应力多集中在 10~24MPa 之间，断层带内，因岩体破碎，一般也不能聚集太大的构造应力。计算所得断层带内最大水平构造应力多集中在 6-21MPa 之间，但断层带内最大和最小构造应力变化范围较大。

东滩矿为典型构造应力场。构造应力一般为压应力，但在矿区的断层和煤两侧，一些较硬的灰岩、砂岩、砂泥岩互层地层单元中，出现拉应力（负值），有的甚至拉断破坏。拉破坏单元中，最大和最小主应力很小。另外，软硬岩层之间（如本次计算中的煤层与其顶板砂岩、砂泥岩；煤层与其底板的灰岩、砂岩之间），最大主应力方向变化相对较大。计算结果也可以看出，由于该区构造比较复杂，最大主应力的方向变化较大。

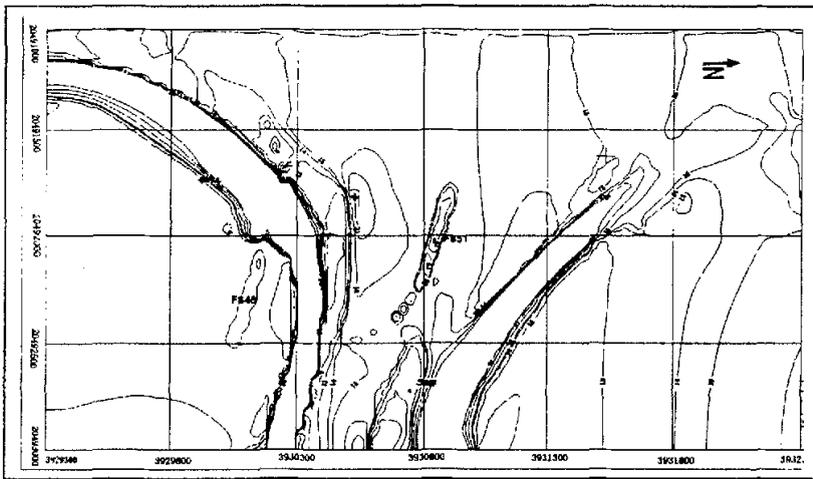


图 5.4 东滩煤矿三采区-600m 水平最大主应力等值线图
Fig.5.4 maximum horizontal stress in rocks of -600m

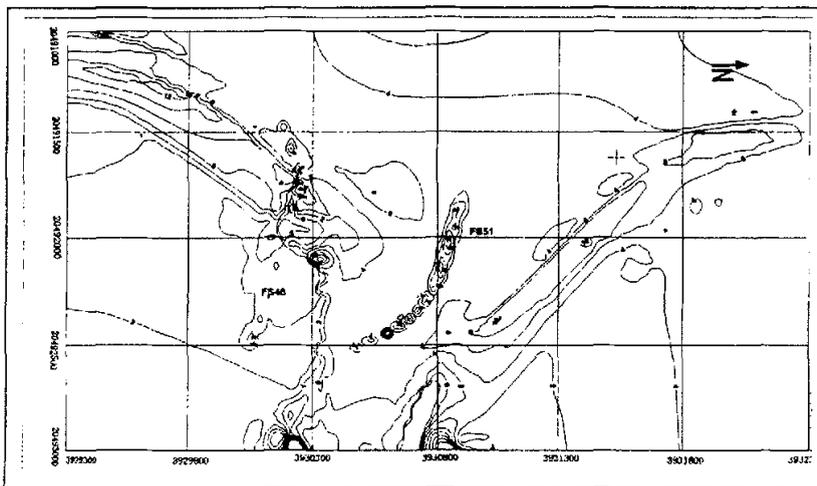


图 5.5 东滩煤矿三采区-600m 水平最小主应力等值线图
Fig.5.5 minimum horizontal stress in rocks of -600m

由图 5.4 看出采区最大水平主应力的最大值出现在 FS46 和 FS51 断层地区以及采区西南部, 最大为 24Mpa; 由图 5.5 可以看出最小主应力的大值出现在中部断层 FS51 处, 这也与前面的计算结果相吻合, 最大为 12Mpa; 最大剪切应力的最大值由图 5.6 得知出现在断层 FS46 和 FS51 处和采区南部, 最大为 15Mpa 左右。总体上, 近东西向存在最大水平构造应力, 近南北方向为最小水平应力, 偏西北—东南可达 30° — 40° 。这与前面的区域应力场分析和实测所得的应力方向基本上是一致的。通过细致分析三维地应力场数值模拟结果, 可以把 3 采区最大水平主应力方向变化可大致划分为 3 个区域 (见图 5.7): 褶皱南翼区, 最大主应力方向近北东向; 褶皱核部区, 最大主应力方向近东西向; 褶皱北翼区, 最大主应力方向近北西向。

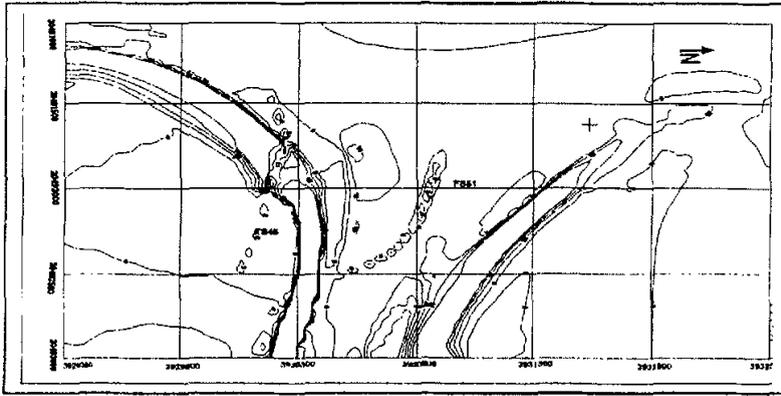


图 5.6 东滩煤矿三采区-600m 最大剪应力等值线图
Fig.5.6 maximum shear stress in rocks of -600m

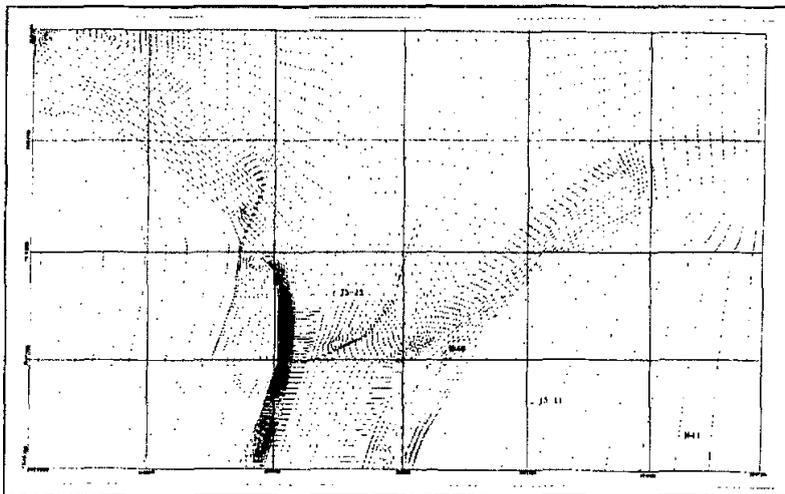


图 5.7 东滩煤矿三采区-600m 水平最大、最小主应力矢量图
Fig.5.7 maximum and minimum horizontal stress in rocks of -600m

5.4 小结与讨论

(1) 本章选择了 FLAC 非线性有限元数值分析方法作为研究区地应力场分析的基本方法, 并建立了相应的三维物理模型和力学模型。反演出该区的地应力场分布规律, 为该区深部矿井今后的建设和生产提供了相应的地应力资料。

(2) 从计算结果分析可以看出, 矿区的现代构造应力场分析仅是定性的评价, 小范围的构造应力场与大区域的构造应力场在总体上是一致的。由于地质体中构造及结构的复杂性, 构造应力的分布也十分复杂。不同区段, 不同部位, 其构造应力场的分布都是不均匀的。局部地区或局部部位的构造应力场与大区域的构造应力场可能不尽一致, 因此在评价分析矿区范围构造应力场时应具体情况具体分析, 且需要一些定量评价方法。

(3) 原岩应力场的反分析需要继续解决的问题

①断层、节理等弱面力学参数的考虑。这些弱面部位正是应力变化比较大的地方, 而其力学参数大多数靠经验而得。如何准确地量化其有关指标仍是以后研究的重点。

②边界效应的处理。现在大都将边界条件假定为正向和切向的均布力, 这种处理是不完善的。事实上, 真实的边界条件应是沿边界方向任意次方的函数。原岩应力场反演计算的必要条件, 即实测点数必须大于或等于 2。实测已知值越多, 边界条件的解就越准确。一般实测点为 2 时, 可求出最粗略的边界调节, 即均匀分布。此次计算, 已知实测点数大于 2, 采用均匀边界条件, 计算结果较好, 可以满足实际工程的需要。

③地质构造明显地影响岩体初始应力状态的分布。地质构造复杂的部位, 如断层附近和褶皱轴部等部位, 地应力场相对比较复杂。

从计算所得的最大主应力大小和方向来看, 在断层附近, 主应力大小和方向变化较大, 即使在同一断层内部, 由于为破碎带, 应力状况也比较复杂, 应力变化范围较大。

④矿区各种岩层的不同力学性质及不同岩层的组合结构特性亦影响矿区的应力分布。一般坚硬完整, 弹模大的岩体, 岩体中积累的应力就大。而软岩由于其自身的性质, 一般不能积聚大的构造应力。并且硬、软岩间最大主应力方向可产生较大的差异。如同等条件下灰岩, 砂岩岩组中应力较煤、泥岩中的应力大。

6 地应力工程应用建议

对东滩矿 3 采区地应力场研究成果, 在今后工程实践中可考虑如下三方面应用。

(1) 地应力方向应用

地应力场理论分析、8 个点地应力测量结果表明, 3 采区最大水平主应力方向总体上为北西-南东方向。三维地应力场数值模拟结果显示, 3 采区最大水平主应力方向变化可大致划分为 3 个区域: 褶皱南翼区, 最大主应力方向近北东向; 褶皱核部区, 最大主应力方向近东西向; 褶皱北翼区, 最大主应力方向近北西向。巷道布置方向应该尽量与水平最大主应力方向平行或保持小夹角相交, 尽可能避免两者方向垂直, 这样巷道的稳定性会较好; 在无法回避两者方向垂直或大夹角相交情况下, 应根据巷道具体的位置地应力大小, 加强巷道支护强度。

(2) 地应力大小在巷道围岩稳定性分类及支护方面的应用

目前, 国内外很重视基于地应力研究的巷道支护强度研究。其实质是在研究地应力和围岩工程地质力学指标基础上, 对围岩稳定性进行分类, 然后, 根据围岩稳定类型, 确定相对应的支护形式和支护强度。在长期工程实践基础上, 中国矿业大学于双忠教授、李文平教授提出的煤矿巷道围岩稳定性分类, 得到了较广泛的应用。

分类主要考虑了围岩的单轴抗压强度与该处原始最大地应力值大小比值、RQD 值以及岩石水稳性(浸水试验结果), 将巷道围岩稳定性分成五种类型, 即: 极稳定 I、稳定 II、中等稳定 III、不稳定 IV 和极不稳定 V, 提出 5 种类型对应的支护形式。

极稳定型 I: 巷道未加支护, 稳定时间超过半年; 或仅有混凝土喷层, 半年后无任何掉片、脱落现象。

稳定型 II: 普通锚喷, 半年后无破坏现象; 或直墙半圆拱砌墙, 半年后仍保持完好。

中等稳定类型 III: 普通锚喷方法支护, 围岩有位移, 喷层有脱落现象, 或直墙半圆拱砌墙, 有压坏现象但不严重, 巷道还能维持使用。

不稳定类型 IV: 锚喷加钢筋网或锚喷加 U 型钢联合支护, 才能保持巷道围岩

稳定。

极不稳定类型 V：锚喷加钢筋网或锚喷家 U 型钢联合支护仍有严重破坏。必须采用锚喷钢筋网加重型 U 型钢、U 型钢之间加拉杆，并注意壁后充填等特殊支护方法才能保持围岩稳定。

在 3 采区一般程度地应力区，如在补 41 号孔附近开采深度为 530m 左右的三煤顶板细砂岩层，它的 RQD 值为 50%，单轴抗压强度为 97Mpa，地应力值为 17.87Mpa，其巷道围岩稳定性分类为极稳定类型（I 类）；软岩如泥岩，它的 RQD 值为很小，在 25%以下，单轴抗压强度为 24.7Mpa，地应力值为 16.51Mpa，围岩稳定性类型为不稳定类型（IV 类）。按照类似方法，对某一位置确定的设计巷道，可结合不同部位围岩、不同地应力值大小（尤其要注意地应力集中区），得到整个巷道围岩稳定性分类，从而在此基础上，设计巷道的支护形式和支护强度。

（3）地应力空间分布对冲击地压预测的应用

冲击地压的发生尽管涉及多种因素，但地应力是最根本、最重要的因素，是诱发冲击地压的最原始的动力来源。空间上地应力高异常区，往往是弹性应变能集聚高的地方，也是最易发生冲击地压的地方。因此，本项目关于 3 采区地应力场空间分布研究成果图（见附图 1~3），为该区冲击地压的预测和防治提供了基础资料。

7 结论

主要结论:

(1) 根据地质构造分析,东滩矿 3 采区为构造应力场型采区,水平最大主应力方向总体为北西西—南东东方向;而 3 采区 8 个地应力实测点结果表明水平最大主应力方向在 $105.7^{\circ} \sim 148.7^{\circ}$,二者结论基本一致。

(2) 三维地应力场数值模拟结果显示,3 采区最大水平主应力方向在空间上可大致划分为 3 个区域:褶皱南翼区,最大主应力方向近北东向;褶皱核部区,最大主应力方向近东西向;褶皱北翼区,最大主应力方向近北西向。巷道布置方向应该尽量与水平最大主应力方向平行或保持小夹角相交,尽可能避免两者方向垂直,这样巷道的稳定性会较好;在无法回避两者方向垂直或大夹角相交情况下,应根据巷道具体的位置地应力值大小,加强巷道支护。

(3) 通过 8 个点地应力值实测,揭示了 3 采区地应力值大小的分布规律:在开采深度小于 780m 时,测点的水平最大主应力为 15~19MPa,且煤层底板比顶板大一些,但断层附近地应力大小和方向变化较大;在开采深度达到约 780m 时,3 采区垂直主应力近似等于水平最大主应力;在这个深度以下地应力场呈现近似自重应力场型特点,也就是说呈现垂直方向主应力大于水平方向最大主应力,这时地应力的水平方向性对巷道稳定性已不那么重要。

(4) 对无条件进行大量地应力实测工作的矿区,提出了利用少量硬岩层地应力实测值结果,估算不同岩层(包括煤及软岩层)中地应力,作为工程设计参考的方法。本文根据 3 采区补勘孔岩石力学指标测试结果,估算了三煤顶板上 40m 和底板下 30m 范围包括硬岩、软岩(如泥岩)和煤的各岩层的水平最大主应力、水平最小主应力和垂直主应力。其中硬岩(如中砂岩)的水平最大主应力为 17.77~18.14 MPa,软岩的水平最大主应力为 16~17 MPa。

(5) 根据东滩矿 3 采区钻孔岩石力学性参数测试综合结果,按 Hoek-Brown 岩体强度准则整理得到的岩体力学参数,以 8 个实测点地应力值为基础,建立了反演计算东滩矿 3 采区三维地应力场工程地质力学模型。模拟计算得到了 3 采区不同构造部位、不同岩层中地应力值大小,绘制了最大主应力等值线图。结果表明,煤层老顶、老底岩层往往处于较高应力区;采区最大水平主应力的最大值出

现在 FS46 和 FS51 断层附近及采区西南部，达 24MPa；最小主应力的最大值出现在中部断层 FS51 处；最大剪切应力的最大值出现在断层 FS46 和 FS51 处和 3 采区南部，为 15 MPa 左右。

(6) 最后对地应力的工程应用进行了简单分析，提出了几点建议。

8 致 谢

本文是在王同旭教授、冯恩杰高工、孙新荣高工悉心指导下完成的。在论文形成的全过程中，无论从论文选题、试验方案、理论分析、现场应用及论文写作修改等都倾注了导师大量的心血。三年来，各位导师始终关注论文进展，在课题研究的各个阶段都给予了关键性的指导，倾注了大量心血。文字的字里行间无不浸透着导师的心血和汗水。导师兢兢业业的工作精神、严谨的治学态度和高尚的品德令学生敬佩，并将永远激励学生不断进步。另外，在论文形成过程中，也得到中国矿业大学李文平教授及东滩煤矿矿压组同志们的无私帮助，在此表示衷心的感谢和崇高的敬意。

对多年来支持我完成学业的山东科技大学资环学院领导和老师们、研究生处领导和老师们的关爱，表示敬意。

感谢各位教授、专家在百忙中对论文的审阅和指导。

9 参考文献

1. 苏恺之. 地应力测量方法[M],北京:地震出版社,1985
2. 秦四清. 岩石声发射技术概论[M],成都:西南交通大学出版社,1993
3. 蔡美峰. 地应力测量原理和技术[M],北京:科学技术出版社,1995
4. 国家地震局地震地质大队情报室. 地应力研究文集[M],北京:地震出版社,1984
5. 于双忠,彭向峰,李文平等. 煤矿工程地质学[M],北京:煤炭工业出版社,1994
6. 徐州矿务集团地质勘探工程处. 徐州矿务集团张集煤矿东翼深部补充勘探地质报告
7. 于双忠. 对地壳运动动力来源的新认识—“密度平衡椭球体”假设[J],中国矿业大学学报,1980(3)
8. 李文平. 煤及软岩层中地应力初值估算方法[J],岩石力学与工程学报,2000,19(2)
9. 周宝江. 张双楼煤矿地应力场研究及其工程应用[D],徐州:中国矿业大学,1997
10. 谷德振. 岩体工程地质学基础[M],北京:科学出版社,1987
11. 扬林德等. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M],北京:科学出版社,1996
12. 中国地质科学研究所. 地质力学研究所所刊(第12号)[M],北京:地质出版社,1989
13. 蔡美峰. 地应力测量原理和方法评述[J],岩石力学与工程学报,1993(3)
14. 凌贤长,沈跃生. 地应力研究在土木工程中的实践和应用[J],哈尔滨建筑大学学报,1998,31(2)
15. 葛洪奎,林英松等. 地应力测试及其在勘探开发中的应用[J],石油学报,1993,20(1)
16. 吴少华. 国内外原岩应力测量及其进展. 全国第四届矿山岩石力学学术讨论会,1988
17. 李光煜,刘继光. 二十年岩体应力现场实测研究[J],岩土力学,1988(9)
18. 王建军. 利用水压致裂法测量三维地应力中的几个问题[J],岩石力学与工程学报,2000,19(2)
19. 刘允芳. 水压致裂法三维地应力测量[J],岩石力学与工程学报,1991,(3)
20. 刘允芳. 水压致裂法地应力测量的校正和修正[J],岩石力学与工程学报,1998,17(3)
21. 刘允芳,罗超文,景锋. 水压致裂法三维地应力测量及修正和工程应用[J],岩土工程学报,1999,21(4)
22. 刘允芳. 在单钻孔中水压致裂法的三维地应力测量[J],岩石力学与工程学报,1999,18(2)
23. 庞俊勇,吴忠等. 煤矿地应力测试[J],煤炭科学技术,1991(7)
24. N.HAST. 地应力的量测范围(周池烈译)[M],地下工程,1980(1)
25. 姚宝魁. 地应力研究及其进展. 见:岩体工程地质学问题. 中科院地质所,1987
26. 丁原辰,张大伦. 以声发射估测岩石试样先存应力的新方法[J],现代地质,1989,3(3)
27. 丁原辰. 声发射地应力测量中任意角度取样的计算方法[J],煤炭工程师,1989,(3)
28. 黄志鹏,朱可善,郭映忠. 关于 Kaiser 效应方向独立性试验研究[J],长江科学院院报,1998,15(2)
29. 卢兴宇. 关于 Kaiser 效应和应力方向的初步探讨[J],重庆建筑工程学院学报,1987(3)
30. 李宏等. 北京房山花岗岩体 AE 法应力测量的研究. 见:国家地震局地壳应力研究所. 地壳构造与地应力文集[10]. 地震出版社,1997
31. 吴刚等. 不同应力状态下岩石材料破坏的声发射特性[J],岩土工程学报,1998,20(2)
32. 黄思静,单钰铭,刘维国. 陕甘宁盆地 G 地区岩石声发射试验与构造应力[J],成都理工学院学报,1998,25(4)
33. 尹菲. 对利用声发射凯塞效应测量地应力技术中几个问题的探讨[J],应用声学,1992,11(1)
34. 李文平. 牛马司、潘集两矿区现代地应力场及其对井巷工程稳定性影响的研究:[学位论文]. 徐州:中国矿业大学,1989
35. 贾政和. 红层井筒围岩稳定性弹塑性有限元分析[D],徐州:中国矿业大学,1993
36. 谷孟志,葛润修. 软岩地应力测量新方法的试验研究[J],岩石力学与工程学报,1994(4)
37. 叶明亮等. 原岩应力超声波检测及应力分析[J],岩土工程学报,1998,(5)

38. 庞作会, 陈文胜, 邓建辉等. 复杂地应力的反分析[J], 岩土工程学报, 1998, 20 (4)
39. 郑颖人. 国内岩石力学数值分析的目前任务[J], 岩石力学与工程学报, 1989 (2)
40. 郭怀志. 岩体初始地应力场分析方法[J], 岩土工程学报, 1983, 5 (3)
41. 刘允芳. 鹤壁矿深孔应力测试技术与地应力场分析方法[J], 岩土工程学报, 1993
42. 郭映忠. 锦屏二级水电站引水工程区地应力场初步研究[J], 工程地质学报, 1997, (1)
43. 朱维申等. 二滩电站坝肩厂房三维有限元分析及围岩变形反分析[J], 岩土力学, 1988 (3)
44. 靳晓光, 王兰生, 李天斌. 地应力测量的应力恢复试验和数值模拟研究[J], 成都理工学院学报, 1999, 26 (3)
45. 程瑞端, 许江, 陈海炎等. 矿区地应力测量及非线性有限元计算的研究[J], 西南工学院学报, 1997
46. 姚宝魁, 刘竹华. 某矿区开采中段初始应力场特性的数值分析. 见: 姚宝魁等, 矿山岩体工程地质力学研究, 中国科学技术出版社, 1993
47. 许江, 鲜学福. 鱼田堡煤矿矿区地应力场的非线性有限元分析. 见: 姚宝魁等, 矿山岩体工程地质力学研究. 中国科学技术出版社, 1993
48. M.Seto.D.K and V.S.Vutukuri. In-situ Rock Stress Measurement from Rock Cores Using the Acoustic Emission Method and Deformation Rate Analsis. Geotechnical and Geological Engineering. 1999, 17 (3/4)
49. 王越之, 李自俊. 横向各向同性地层地应力的研究[J], 石油学报, 1993, 20 (1)
50. 张万斌等. 我国冲击地压研究与防治的进展[J], 煤炭学报, 1992, 17 (3)
51. 周晓军. 煤矿冲击地压理论与工程应用研究的进展[J], 重庆大学学报, 1998, 21 (1)
52. 尹志光, 鲜学福, 余立平. 地应力对冲击地压的影响及冲击危险性区域评价的研究[J], 煤炭学报, 1997, 22 (2)
53. 胡光伟. 冲击矿压机理的数值分析[D], 徐州: 中国矿业大学, 1999.6
54. 缪协兴, 孙海, 吴志刚. 徐州东部软岩矿区冲击矿压机理分析[J], 岩石力学与工程学报, 1999, 18 (4)
55. 章梦涛. 冲击地压失稳理论与数值计算[J], 岩石力学与工程学报, 1987, 6 (3)
56. 徐州矿区冲击矿压机理及防治技术——96年阶段总结报告. 中国矿业大学, 1996
57. 马启超. 工程岩体应力场的成因分析与分布规律[J], 岩石力学与工程学报, 1986, (4)
58. 吴振业. 环氧树脂三轴应变计与岩体应力测量[J], 煤炭学报, 1987, (3)
59. 王文祥. 深部地应力探测技术理论探讨[J], 地球物理学进展, 1991, 4 (2)
60. 王淑坤, 齐庆新等. 复合模型力学性质试验研究[J], 矿山压力与顶板管理, 1994, (1)
61. 范学理, 潘一山. 冲击地压与突出的理论、预报及防治的现状和前景[J], 阜新矿业学院学报 (自然科学版), 1995, 14 (1)
62. 潘一山, 李国臻, 章梦涛. 回采巷道冲击地压危险指标的确定[J], 矿山压力与顶板管理, 1994, (1)
63. 张景和, 刘翔鄂, 刘勇谦, 利用岩石声发射凯塞效应测地应力的新方法[J], 岩石力学与工程学报, 1987, 6 (4)
64. Markrin. Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for the intact rock in uniaxial compression. Internation Journal of Rock Mechanics and Minning Science. 1999, 36 (3)
65. V.A.Mansurov. Acoustic Emission from Failing Rock Behaviour. Rock Mechanics and Rock Engineering. 1994, 20 (3)
66. B.Jpestman and J.G.Vanmunster. An Acoustic Emission Study of Damage Development and Stress Memory Effect in sand stone. Int j.Rock.Mech.sci. 1996, 33 (6)
67. S.Serata, S.Sakuma, Skikuchi, and Y.Miznta, Double Fracture. Method of In Situ Measurment in Brittle Rock. Rock Mechnics and Rock Engeering, 1992, 25 (2)
68. Amadeib. In situ Stress Measurement in Anisotropic Rock, Int.J.Rock Mech sci.& Geomech.Abs. 1984. 21 (8)
69. Siqing Qin, Siing Wang, Hui Hong et.al. A new Approach to estimatite geo-stress from laboratory Kaiser Effect measurements. Internation Journal and Rock Mechanics and Minning Science. 1999, 36 (8)

作者: [梁继新](#)
学位授予单位: [山东科技大学](#)

参考文献(69条)

1. [苏恺之](#) [地应力测量方法](#) 1985
2. [秦四清](#) [岩石声发射技术概论](#) 1993
3. [蔡美峰](#) [地应力测量原理和技术](#) 1995
4. [国家地震局地震地质大队情报室](#) [地应力研究文集](#) 1984
5. [于双忠](#), [彭向峰](#), [李文平](#) [煤矿工程地质学](#) 1994
6. [徐州矿务集团地质勘探工程处](#) [徐州矿务集团张集煤矿东翼深部补充勘探地质报告](#)
7. [于双忠](#) [对地壳运动动力来源的新认识——“密度平衡椭球体”假设](#) 1980(03)
8. [李文平](#) [煤及软岩层中地应力值的初步估算方法](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2000(2)
9. [周宝江](#), [张双楼](#) [煤矿地应力场研究及其工程应用](#)[学位论文]硕士 1997
10. [谷德振](#) [岩体工程地质力学基础](#) 1987
11. [扬林德](#) [岩土工程问题的反演理论与工程实践](#) 1996
12. [中国地质科学研究院](#) [地质力学研究所所刊\(第12号\)](#) 1989
13. [蔡美峰](#) [地应力测量原理和方法评述](#) 1993(03)
14. [凌贤长](#), [沈跃生](#) [地应力研究在土木工程中的实践和应用](#) 1998(02)
15. [葛洪奎](#), [林英松](#) [地应力测试及其在勘探开发中的应用](#) 1993(01)
16. [吴少华](#) [国内外原岩应力测量及其进展](#) 1988
17. [李光煜](#), [刘继光](#) [二十年岩体应力现场实测研究](#) 1988(09)
18. [王建军](#) [应用水压致裂法测量三维地应力的几个问题](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2000(2)
19. [刘允芳](#) [水压致裂法三维地应力测量](#) 1991(03)
20. [刘允芳](#) [水压致裂法地应力测量的校正和修正](#) 1998(03)
21. [刘允芳](#), [罗超文](#), [景锋](#) [水压致裂法三维地应力测量及其修正和工程应用](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 1999(4)
22. [刘允芳](#) [在单钻孔中水压致裂法的三维地应力测量](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 1999(2)
23. [庞俊勇](#), [吴忠](#) [煤矿地应力测试](#) 1991(07)
24. [N HAST](#), [周池烈](#) [地应力的量测范围](#) 1980(01)
25. [姚宝魁](#) [地应力研究及其进展](#) 1987
26. [丁原辰](#), [张大伦](#) [以声发射估测岩石试样先存应力的新方法](#) 1989(03)
27. [丁原辰](#) [声发射地应力测量中任意角度取样的计算方法](#) 1989(03)
28. [黄志鹏](#), [朱可善](#), [郭映忠](#) [岩石Kaiser效应方向独立性试验研究](#)[期刊论文]-[长江科学院院报](#) 1998(2)
29. [卢兴宇](#) [关于Kaiser效应和应力方向的初步探讨](#) 1987(03)
30. [李宏](#) [北京房山花岗岩体AE法应力测量的研究](#) 1997
31. [吴刚](#), [赵震洋](#) [不同应力状态下岩石类材料破坏的声发射特性](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 1998(2)
32. [黄思静](#), [单钰铭](#), [刘维国](#) [陕甘宁盆地G地区岩石声发射试验与构造应力](#) 1998(04)
33. [尹菲](#) [对利用声发射凯塞效应测量地应力技术中几个问题的探讨](#) 1992(01)
34. [李文平](#), [牛马司](#), [潘集两矿区现代地应力场及其对井巷工程稳定性影响的研究](#) 1989

35. [贾政和](#) [红层井筒围岩稳定性弹塑性有限元分析](#)[学位论文]硕士 1993
36. [谷志孟](#). [葛修润](#) [软岩地应力测量新方法的试验研究](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 1994(4)
37. [叶明亮](#). [邹义怀](#) [原岩应力超声波检测及应力场分析](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 1998(5)
38. [庞作会](#). [陈文胜](#). [邓建辉](#) [复杂初始地应力场的反分析](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 1998(4)
39. [郑颖人](#) [国内岩石力学数值分析的目前任务](#) 1989(02)
40. [郭怀志](#). [马启超](#). [薛玺成](#) [岩体初始应力场的分析方法](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 1983(3)
41. [刘允芳](#). [龚壁新](#) [深钻孔地应力测试技术与地应力场分析方法](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 1993(3)
42. [郭映忠](#) [锦屏二级水电站引水工程区地应力场初步研究](#)[期刊论文]-[工程地质学报](#) 1997(1)
43. [朱维申](#) [二滩电站坝肩厂房三维有限元分析及围岩变形反分析](#) 1988(03)
44. [靳晓光](#). [王兰生](#). [李天斌](#) [地应力测量的应力恢复法试验和数值模拟研究](#)[期刊论文]-[成都理工大学学报\(自然科学版\)](#) 1999(3)
45. [程瑞端](#). [许江](#). [陈海炎](#) [矿区地应力测量及非线性有限元计算的研究](#) 1997
46. [姚宝魁](#). [刘竹华](#) [某矿区开采中段初始应力场特性的数值分析](#) 1993
47. [许江](#). [鲜学福](#) [鱼田堡煤矿矿区地应力场的非线性有限元分析](#) 1993
48. [M Seto D K. V S Vutukuri](#) [In-situ Rock Stress Measurement from Rock Cores Using the Acoustic Emission Method and Deformation Rate Anaysis](#) 1999(3-4)
49. [王越之](#). [李自俊](#) [横向各向同性地层地应力的研究](#)[期刊论文]-[石油学报](#) 1999(1)
50. [张万斌](#) [我国冲击地压研究与防治的进展](#) 1992(03)
51. [周晓军](#) [煤矿冲击地压理论与工程应用研究的进展](#)[期刊论文]-[重庆大学学报\(自然科学版\)](#) 1998(1)
52. [尹志光](#). [鲜学福](#). [余立平](#) [地应力对冲击地压的影响及冲击危险性区域评价的研究](#) 1997(02)
53. [胡光伟](#) [冲击矿压机理的数值分析](#)[学位论文]硕士 1999
54. [缪协兴](#). [孙海](#). [吴志刚](#) [徐州东部软岩矿区冲击矿压机理分析](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 1999(4)
55. [章梦涛](#) [冲击地压失稳理论与数值计算](#) 1987(03)
56. [徐州矿区冲击矿压机理及防治技术—96年阶段总结报告](#) 1996
57. [马启超](#) [工程岩体应力场的成因分析与分布规律](#) 1986(04)
58. [吴振业](#) [环氧树脂三轴应变计与岩体应力测量](#) 1987(03)
59. [王文祥](#) [深部地应力探测技术理论探讨](#) 1991(02)
60. [王淑坤](#). [齐庆新](#) [复合模型力学性质试验研究](#) 1994(01)
61. [范学理](#). [潘一山](#) [冲击地压与突出的理论、预报及防治的现状和前景](#) 1995(01)
62. [潘一山](#). [李国臻](#). [章梦涛](#) [回采巷道冲击地压危险指标的确定](#) 1994(01)
63. [张景和](#). [刘翔鄂](#). [刘勇谦](#) [利用岩石声发射凯塞效应测地应力的新方法](#) 1987(04)
64. [Markrin](#) [Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for the intact rock in uniaxial compression](#) 1999(03)
65. [V A Mansurov](#) [Acoustic Emission from Failing Rock Behaviour](#) 1994(03)
66. [B Jpestman. J G Vanmunster](#) [An Acoustic Emission Study of Damage Development and Stress Memory Effect in sand stone](#) 1996(06)
67. [S Serata. S Sakuma Skikuchi. Y Miznta](#) [Double Fracture. Method of In Situ Measurment in Brittle Rock](#) 1992(02)

68. [Amadeib In situ Stress Measurement in Anisotropic Rock](#) 1984(08)

69. [Siqing Qin, Siing Wang, Hui Hong A new Approach to estimatite geo-stress from laboratory Kaiser Effect measurements](#) 1999(08)

相似文献(8条)

1. 期刊论文 [韩金良, 吴树仁, 谭成轩, 孙炜峰, 张春山, 丁原辰, 彭华, HAN Jinliang, WU Shuren, TAN Chengxuan, SUN](#)

[Weifeng, ZHANG Chunshan, DING Yuanchen, PENG Hua 东秦岭东江口花岗岩体水压力致裂法与AE法地应力测量对比研究—岩石力学与工程学报](#)2007, 26(1)

中国东部现今构造应力场的特征表现为以水平应力为主,最大主压应力方向为近EW向,而秦巴地区已有地应力测量资料显示地应力最大主压应力方向以近SN向为主。为了查明其原因,结合三峡引水工程秦巴地区地壳稳定性调查评价工作,在东秦岭东江口花岗岩体内布置一口地应力综合测量孔,进行水压力致裂法与AE法地应力测量对比研究。在东江口花岗岩体600 m深钻中,将埋深30~596 m分27段进行水压力致裂法地应力测量,获得20组水平主应力有效数据和25个裂缝破裂方向数据;同时,将埋深为75~599 m分11段进行AE法现今最大主应力值测量,获得11个有效数据。将上述2种方法在同一测量深度的测量结果对比后发现:在200 m深度以上,2种方法所得结果相近;在200 m深度以下,水压力致裂法测量的最大水平主应力值比AE法测量的最大主应力值大10 MPa左右,前者与邻区已有的水压力致裂测量数据相比,普遍偏高,而后者与邻区同一深度的测量结果相近。造成上述结果的原因是,在200 m以下岩体中存在残余古构造应力,它与现今构造应力等叠加在一起构成地应力。综合研究结果表明:残余古构造应力是秦巴地区地应力的重要组成部分,不容忽视,上述研究结果对于充分认识秦岭中新生代造山带地应力场的分布规律具有重要的理论意义;同时,还可为穿越秦岭和大巴山的生命线工程的深埋长隧道的规划和设计提供依据。

2. 期刊论文 [汪西海 贵州思林电站AE法与套心法地应力测量结果的比较—地质力学学报](#)2002, 8(2)

为了研究思林电站地下厂房区地应力状态,作者采用声发射法(AE)和现场套心应力解除法对拟建的思林电站进行地应力测量。声发射法测得最大主应力值为15.9MPa,套心法测得的最大主应力方向为NE 70.9°,最大主应力值为16.03MPa,表明在同一测点用两种不同的测量方法所测的结果一致。

3. 期刊论文 [王志磊, 苏桂霞 平煤集团十三矿地应力分布特征实测研究—中州煤炭](#)2009, ""(11)

结合平煤集团十三矿的具体条件,采用声发射法和理论分析计算地应力及其分布特征。结果表明:十三矿在埋深583 m以浅,水平方向最大主应力大于垂直方向自重应力,地应力场类型呈现构造应力场型;在埋深大于583 m的深部,垂直方向自重应力大于水平方向最大主应力,呈现自重应力场型特点。

4. 期刊论文 [王连捷, 崔军文, 张晓卫, 唐哲民, 李朋武, 李双林, WANG Lian-jie, CUI Jun-wen, ZHANG Xiao-wei, TANG](#)

[Zhe-min, LI Peng-wu, LI Shuang-lin 中国大陆科学钻主孔现今地应力状态—地球科学—中国地质大学学报](#)

2006, 31(4)

用钻孔崩落法确定了中国大陆科学钻主孔5 047 m深度以上的现今地应力状态。由钻孔声波成像测井资料发现,科学钻主孔在1 200 m深度以下出现了钻孔崩落现象。我们从1 216~5 047m的深度范围内采集了143个钻孔成像测井图象资料,对钻孔崩落椭圆长轴方位进行了统计,结果表明崩落椭圆长轴平均方位为319.5°±3.5°,最大水平主应力方位平均为49.5°±3.5°。利用崩落形状要素(崩落深度和崩落宽度)以及岩石的内聚力和内摩擦角,估算了1 269 m至5 047 m范围内52个深度上的最大和最小水平主应力的大小。结果表明,在浅处1 216 m深度,最大水平主应力为42 MPa,最小水平主应力为30.3 MPa;在深处5 000 m深度,最大水平主应力为160.5 MPa,最小水平主应力为120 MPa;地应力随深度近于线性增加。据岩石密度测井资料计算了各个深度上静负载应力。3个主应力的大小和方向反映出科学钻主孔位置的应力场处于走滑应力状态,与临近地区地震震源机制解和其他方法得到的应力场一致。利用声发射法对岩心试件进行了声发射测量,得到了最大水平主应力幅值,并与崩落法测量结果进行了对比,两者十分一致。

5. 学位论文 [孙东生 滨南油田水力压裂模拟试验研究](#) 2007

水力压裂技术是改造低渗透储集层,使其达到工业性开采最经济有效的增产措施之一。地应力场作为影响水力压裂缝起裂和扩展的主要因素,对水力压裂缝的起裂和扩展有着不可忽视的作用,它控制着裂缝的起裂位置和裂缝的扩展过程。同时,射孔和天然裂缝也是影响油田水力压裂过程中水力压裂缝起裂和扩展的主要因素,射孔和天然裂缝的存在,将改变近井筒地带的水力压裂缝的起裂位置和裂缝的扩展过程。鉴于此,本文综合考虑地应力场、射孔工况、天然裂缝及孔隙压力等因素,研究水力压裂过程中裂缝起裂压力和裂缝扩展过程。

本文以滨南油田地质背景及地应力测量为基础,开展了水力压裂过程中射孔及初始裂缝对压裂起裂压力和裂缝扩展的数值模拟和物理模拟试验研究,并将损伤力学理论引入到水力压裂模型中,使裂缝模拟更加接近实际,重点开展了以下几个方面的工作:

1. 开展了油田地质背景和开发现状资料的收集工作,了解了区块成藏规律及演化过程以及区块目前的开发现状,参与了油田现场压裂施工,了解了井网布置及目前的注采情况,现场的施工流程及施工参数;

2. 通过声发射法、波速各向异性法、钻孔崩落法、水压力致裂法、微地震法和电位监测等多种方法相结合进行区块地应力测量,从总体上把握了区块的地应力状态,为现场压裂施工,井网部署提供了根据,同时为后续的水力压裂数值模拟和物理模拟试验提供了边界条件;

3. 在进行岩石力学试验的基础上,应用ANSYS有限元软件进行了水力压裂中起裂压力的模拟试验研究,定量分析了地应力状态、射孔方位、射孔密度、射孔直径和深度对裂缝起裂压力的影响,并以滨660和利853块为例进行了模拟计算,为现场压裂设计、施工提供了基础数据;同时基于FEFG有限元软件平台及流固损伤耦合模型,进行了孔隙压力和损伤作用影响下,压裂过程的裂缝扩展规律研究,并实现了裂缝的动态扩展模拟。

4. 为验证数值模拟试验方法的有效性,根据现场的压裂参数和相似理论,进行了室内水力压裂物理模拟试验,真实恢复了现场水力压裂过程中的压裂曲线,并通过观察压裂后的裂缝扩展方向,证明了数值模拟试验的有效性,为现场施工提供了参考。

5. 对数值模拟试验和物理模拟试验结果进行对比分析,揭示了地应力场状态、定向射孔和预制裂缝对压裂缝起裂和裂缝扩展方向之间的内在联系,加深了对水力压裂过程的了解和认识,并结合现场情况,优选压裂井位,实践证明效果较好。

6. 期刊论文 [周新桂, 张林炎, 范昆, 黄臣军, 刘格云, 侯勤虎, ZHOU Xin-gui, ZHANG Lin-yan, FAN kun, HUANG Chen-jun](#)

[. LIU Ge-Yun, HOU Qin-Hu 鄂尔多斯盆地现今地应力测量及其在油气开发中的应用—西安石油大学学报\(自然科学](#)

[版\)](#) 2009, 24(3)

油田开发中实施水力压裂措施、部署和优化注采井网必须考虑现今地应力方向、大小及其分布规律。通过岩石声发射法、钻孔井壁崩落法、古地磁定向岩石应变法以及岩石压缩等实验方法,测定了鄂尔多斯盆地伊陕斜坡区现今主应力大小和方向,并以吴旗探区为例,讨论了现今地应力在油气开发中的初步应用。认为伊陕斜坡区不同深度砂岩的现今最大水平主应力(6 1)值介于20.3~60.01 MPa之间,与深度线性相关性好,相关系数=0.952;现今最大水平主应力方向为NE-NEE-近EW向,由盆地西南(西)向东北(东)方向逐步偏转。在现今应力状态下,吴旗探区中生界延长组长6储层NNE-NEE向裂缝系统在水利压裂过程中将首先启动张开并连通,最先形成有效主渗流通道,随着外界流体压力逐步增大,NW及NNW向裂缝系统可成为次级渗流通道;同时认为长61储层人工裂缝扩展方位约为NE-SW向,压裂缝为沿最大水平主应力方向延伸的垂直裂缝,且井孔相对稳定。

7. 期刊论文 [刘显太, 戴俊生, 徐建春, 汪必峰 纯41断块沙四段现今地应力场有限元模拟—石油勘探与开发](#)

梁家楼油田纯41断块位于东营凹陷的西南部,主要油气产层是沙四段.现今地应力对油田开发有重要影响.用岩心声速法和井斜统计法确定关键井的水平主应力方向,用声发射法测量关键井的水平最大主应力,用水力压裂法计算关键井的水平最小主应力.以关键井的地应力测量、计算结果为约束条件,采用弹性平面有限元法模拟该断块沙四段现今地应力场,结果是:水平最大主应力值为52~74MPa,断块内部为近东西向,断层带主要为北西向;水平最小主应力值为41~52MPa,断块内部为近南北向,断层带主要为北东向.图5表3参10

8. 学位论文 周新桂 鄂北塔巴庙地区构造裂缝分布定量预测与天然气有利勘探区带评价 2004

储层裂缝参数的定量表征和空间分布规律定量预测研究,仍是石油地质前沿问题之一.中国拥有相当数量裂缝性储层的油气地质储量,因此,对储层构造裂缝空间分布规律的合理预测评价,对油气勘探开发起到积极的指导作用.塔巴庙研究区位于鄂尔多斯盆地北部伊陕斜坡的东北部,“低孔、低渗、低丰度、低产”是上古生界天然气储层的显著特点.本文针对研究区地应力研究相对薄弱和储层天然裂缝发育与否而进行的专题研究,是低压致密砂岩气藏开发研究中较前沿的基础课题,具有深入研究的客观意义.本文以地质力学、构造物理学、地球物理学先进理论为指导,对鄂北露头区岩石及研究区钻井岩心裂缝系统进行了定量观测描述、岩石古地磁裂缝定向研究、岩石物理力学试验和声发射法地应力测量等.在三维构造应力场数值模拟和挠曲场分析基础上,以成盆、成藏动力学理论为基础,通过构造应力场与天然裂缝系统、流体势场之间的内在联系的研究,指出不同储层天然裂缝相对发育部位和空间分布规律;结合本区油气地质特点,以模糊数学原理为基础,根据裂缝发育程度、平均应力、砂岩有效厚度等多参数叠合,综合预测天然气有利勘探靶区,并提出具体勘探建议.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y842218.aspx

下载时间: 2010年5月27日