

矿压短训班教材之八

巷道合理位置选择

马 光

湘潭矿业学院采煤系

有关巷道合理位置选择的 一些问题

1984.2

— 目 录 —

第一章	前言	1
第二章	岩体初始应力场及其在沉积岩中的测试方法	3
第三章	采场附近的应力分布的一些特征	19
第四章	交互压力	29
第五章	采场周围移动变形特征及采矿地质因素对保护区的影响	46
第六章	保护层开采及巷道合理位置选择	65

第一章 前言

为了作到在煤炭产量增长的同时改善采煤的技术经济指标及劳动条件，合理选择巷道位置具有重要意义。

§1.1 国民经济方面的意义

1. 随着采煤深度的增加，巷道维护费用显著增加：

苏联的统计工作表明，受回采影响的巷道维护费用占全部巷道维护费用的 90~95%，其中与煤层掘进的巷道维护费又占整个巷道总长度的近 50%。

2. 巷道的翻修至今仍是繁重的手工作业，也是最繁重的作业过程。

3. 采准巷道的不利状态，极大地增加了附加开支（通风、排水、工作面的劳动生产率以及人员运送的危险）。

§1.2 技术措施中的地位

1. 影响巷道地压的显现因素：

1) 开采深度；

2) 岩体初始应力状态；

3) 围岩及煤层的物理力学性质；

4) 巷道断面及支护形式；

5) 采区方法；

6) 巷道相对于煤层、开采边界的位置——比较可以较大地依人们意志为转移的因素。

2. 巷道合理位置选择是重要的治本方法。

§1.3 巷道合理位置的选择应满足的一些要求

1. 巷道位置应位于开采空间周围的卸载保护区，避免因采式采区引起的强烈应力集中地带；

2. 采区方法、运输通风及防治瓦斯等方面的要求；

3. 掘进及维护费用（使用期限）最小；

4. 巷道位置选定以后，还应结合其他种巷道应力防护措施、综合治理（包括改变围岩的性质及减少巷道应力集中的其他措施）使巷道处于最有利的应力状态。

§1.4 巷道合理位置的研究方法及本讲座中的讨论范围

从巷道所在位置是最有利的应力状态出发选择巷道位置，是矿山岩体力学研究的薄弱环节。由于问题本身的复杂性，本讲座仅从开采空间周围应力分布研究的实用技术观点出发，为指导工程实践，提供一些基本概念和原则。至于用综合方法（实测模拟研究及理论分析）进行研究的研究方法是很有效的，但因已超出本讲座的范围，在此从略。

第二章 岩体初始应力场及其在沉积岩中的测试方法

§2.1 岩体初始应力场的用处及一点应力的表示方法

在印度、南非的一些金矿及在加拿大的铜镍矿床，开采深度已达到接近 4000 公尺，我国的开滦唐山矿开采深度已超过 1000 公尺；开采深度每增加一个步骤，都增加了矿山压力的显现程度，及巷道的维护困难。此外还有岩爆、片帮及瓦斯的严重突出，矿柱被强烈矿山压力而突然压垮，顶板产生震动响声等其他形式的矿山压力显现。例如在南非金矿有些矿山，平均每月发生 15 次矿山冲击。

有些深矿，使用宽工作面——类似长壁，并采用充填，以降低矿山压力动力现象显现的发生频率，还有在岩体中掘进巷道时并掘超前裂隙以及进行矿层的下采式下采，但需要指出的是，同一种矿山压力的显现可以出现在不同的深度（其中矿体围岩赋存条件类似）这主要是由于构造应力引起的。

我们在以后还会进一步介绍由于岩体初始应力不同，开采空间周围的应力位移分布都会发生变化，所以有必要了解岩体初始

应力场及其测试方法。

岩体中一点的应力状态（原始应力分量）可用下列矩阵表示：

$$T_{\sigma}^0 = \begin{vmatrix} \sigma_{xx}^0 & \sigma_{xy}^0 & \sigma_{xz}^0 \\ \sigma_{xy}^0 & \sigma_{yy}^0 & \sigma_{yz}^0 \\ \sigma_{xz}^0 & \sigma_{yz}^0 & \sigma_{zz}^0 \end{vmatrix} \quad \text{----- (II-1)}$$

在一般情况都可以证明，一点的应力分量，除决定于直角坐标外，还必须符合平衡方程式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}^0}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}^0}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}^0}{\partial z} + \rho g_x &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{xy}^0}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}^0}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}^0}{\partial z} + \rho g_y &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{xz}^0}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}^0}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}^0}{\partial z} + \rho g_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (II-2)}$$

g_x, g_y, g_z —— 重力加速度分量。

§ 2.2 关于岩体初始应力场

造成岩体初始应力的存在，可归结为由重力、构造应力、温度及岩石自身的封闭应力所引起的，但一般可以认为：

1. 岩体中未开挖以前有原始应力 —— 用 σ_{ij0} 表示。

由于在岩体中开挖巷道后所形成的最佳应力叫全应力 —— 用 σ_{ij1} 表示，

则开挖补充引起的应力 σ_{ij}

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_{ij} &= \sigma_{ij1} - \sigma_{ij0} \\ \bar{\sigma}_{ni} &= \sigma_{ni1} - \sigma_{ni0} \end{aligned} \right\} \text{--- (II-3)}$$

式中 n 表示垂直于岩层层面方向。

2. 当矿体为水平埋藏时

$$\bar{\sigma}_{yy} = -\gamma(H-y) \text{--- (II-4)}$$

当主应力方向为铅直及水平时

$$\bar{\sigma}_{xyH} = \bar{\sigma}_{yzH} = \bar{\sigma}_{xzH} = 0 \text{--- (II-5)}$$

在水平石中

$$\bar{\sigma}_{xxH} = \bar{\sigma}_{zzH} = \lambda_1 \bar{\sigma}_{yyH} \text{--- (II-6)}$$

此处

$$\lambda_1 = \lambda_1(1-\lambda_1);$$

λ_1 —— 岩层波系数。

上述条件为自重应力场(地

表地形平坦的情况, 在其他条件)。

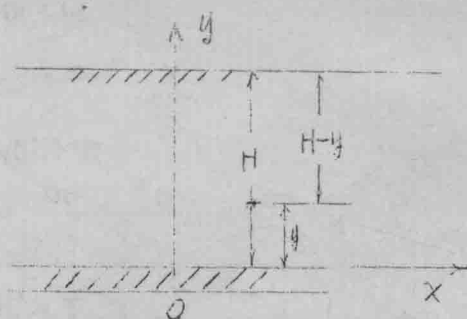


图 1

λ_1 有时甚至会大于 1, 这主要是由于构造应力所引起。 λ 值的确定, 目前主要借助现场岩体岩体应力测量获得, 在我国目前开采深成条件下, 根据我们在一些矿山进行岩体应力测量的结果垂直方向的地应力, 在没有严重地表地形变化条件下, 可以取用

(II-4) 式 (见图2)。但也有不少情况下, 水平方向的地应力, 大于垂直方向。见图3的实测结果

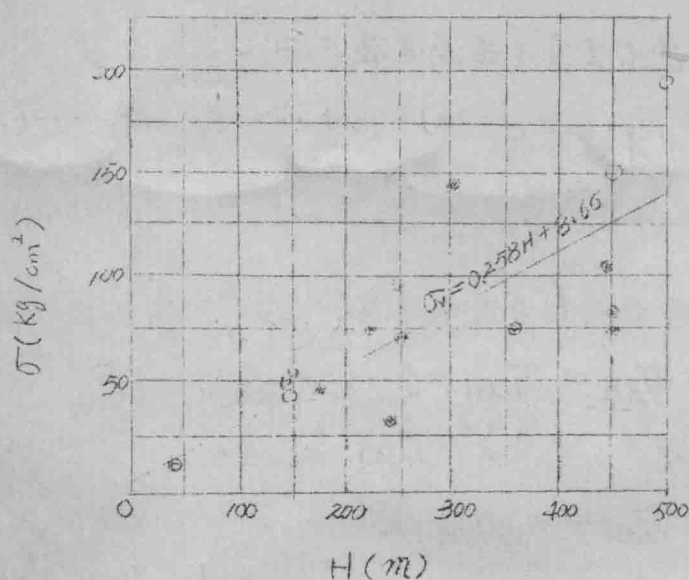


图 2
平均垂直应力
与开采深度关
系 (应力实测
结果)

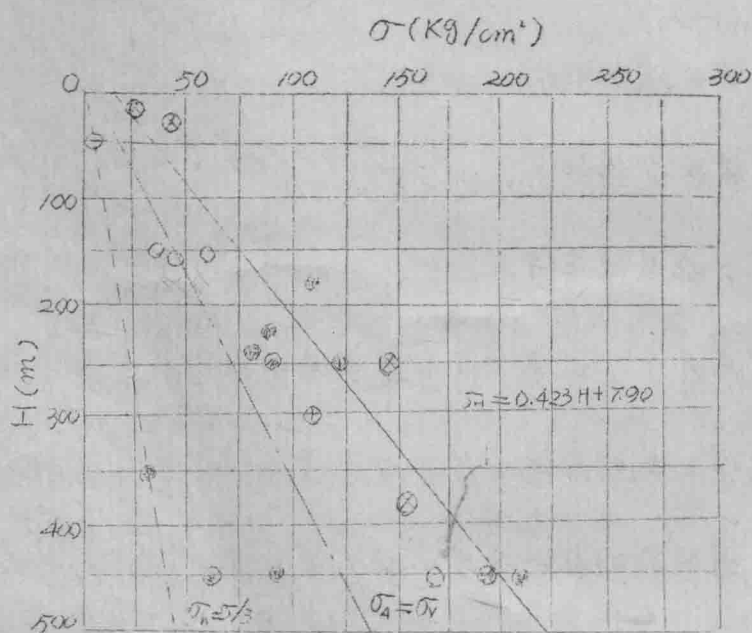


图 3
平均水平应力
与开采深度关
系 (应力实测
结果), 不同的
点表示不同的矿
山。

3. 如拟求垂直于孔轴（倾斜孔轴）方向的原岩应力分量（为

了今后计算方便）

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{yyH} &= -\gamma(H - X \sin \alpha)(\lambda \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) \\ \sigma_{xxH} &= -\gamma(H - X \sin \alpha)(\lambda \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) \\ \sigma_{xyH} &= -\gamma(H - X \sin \alpha)(1 - \lambda) \sin \alpha \cos \alpha \\ \sigma_{zzH} &= -\lambda'' \gamma(H - X \sin \alpha); \\ \sigma_{yzH} &= \sigma_{xzH} = 0 \end{aligned} \right\} \text{-----(II-7)}$$

λ 在此为侧压系数（垂直走向方向）

λ'' 在此为侧压系数（沿走向方向）

在一般情况下，可以认为 $\lambda'' = \lambda$

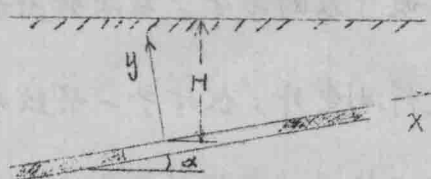


图 4

§2.3 沉积岩中的岩体初始应力测量方法

1. 关于硬岩中岩体初始应力（绝对应力）量测方法。

这主要是使用卸载原理，利用在具体开挖几何条件下的有关开挖空间在受外荷条件下的弹性理论解，或经验解，通过专门的仪器来量测其卸载以后的恢复应变、和有关地点的岩石弹性常数，求解一点的三维应力。已经建立起来，并得到广泛使

用的方法是 [6]。

a. 岩石钻机三轴应变计元件的孔壁应变卸载量测方法（弹性均质及各向异性）；

b. 孔底三维应变传感器卸载法以门塞式二维应变传感器；

c. 三维中空包容式元件的卸载法。

但属于这方面，已经在有关杂志上作了很多介绍在此从略。

2. 关于在沉积岩中的应力测量。

鉴于孔矿中，除了在围岩中，有灰岩或砂岩等较坚的岩层可供使用上述方法进行测量外；但对于一些软岩，由于取不成岩心，无法使用卸载法进行量测。下面介绍两种广泛用于苏联七十年代，孔矿中的二维应力测量方法。

尽管属于二维应力测量，鉴于沉积岩在许多情况下，由于岩石总体的规则性（较金属矿山规则），通过工程地质力学的分析，往往可以确定一个主应力方向，然后使下面方法也可以近似地了解该处的原始应力场的一般状况，对于工程设计及改善矿山压力管理，也是很有益的。

1) 弹性岩石中的钻孔影响法：

在岩石强度不足以使用取芯法进行全应力解除时，对于旁测二维应力（例如在巷道或洞室表面）时，可以使用钻孔影响法。

此种方法的实质是在一个测旁钻孔中按放测旁元件（例如旁测钻孔直径变化），旁测时再在此测旁钻孔道旁钻一个较大直径的钻孔，利用此大孔所形成的应力扰动，使测旁孔的应力、位移发生变化。借助于专门的测旁孔径变化的仪器，利用弹性理论中，在一定应力场条件下相邻不等直径圆形孔，孔径位移与有关岩体应力分量的理论解（问题归结为确定两个解析变函数问题，此两个函数与孔周边的应力状态及位移有关）及有关岩的弹性常数及测到的孔径的变化，即可求出该测量地点的平面应力。

在右图5中小孔 O_1 的近旁开一个大孔，其孔间距离 l ，当在小钻孔沿 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 方向（ $\theta_1 = 0$ ， $\theta_2 = 0 + \frac{\pi}{2}$ ， $\theta_3 = 0 + \frac{\pi}{4}$ ）旁测其应力扰动后的钻孔径向位移 u_1 、 u_2 、 u_3 ， θ 为一个主应力方向与旁测径向位移 u_1 之间的夹角。可以利用下式求得平面中的主应力：

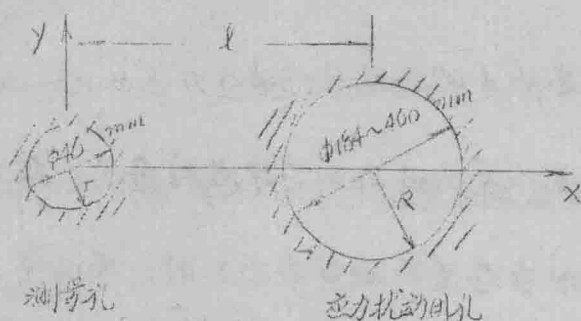


图5 钻孔影响法的钻孔布置

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \frac{U_1 - U_2 (A + B \cos 2\theta)}{(AC - BF) \cos 2\theta + AD \sin 2\theta} \quad \text{--- (II-8)}$$

$$\sigma_2 = \frac{U_1 - \sigma_1 (A - B \cos 2\theta)}{A + B \cos 2\theta} \quad \text{--- (II-9)}$$

$$\tan 2\theta = \frac{a}{b}$$

$$\text{此处: } a = [(AC - BF)U_3 + (U_1 F - U_2 A)L + (U_2 B - U_1 C)M];$$

$$b = [U_1 D M + (U_2 A - U_1 F)K - U_2 A D];$$

$$A = \frac{R^2}{4q} \frac{H}{1-l}; \quad H = 3 - 4\nu; \quad q \text{ — 为剪切模数}$$

$$B = \frac{R^2}{4q} \left[\frac{2H+1}{1-l} - \frac{HR^2}{(1-l)^3} - \frac{H+1}{l^3} \right];$$

$$F = \frac{R^2}{4q} - \frac{H}{1-l^2}$$

$$M = \frac{R^2}{4q} \cdot \frac{H(1-l\frac{\sqrt{2}}{2})}{1+l\sqrt{2}+l^2};$$

$$C = \frac{R^2}{4q} \left[-2H \frac{1-l^2}{(1+l^2)^2} - \frac{H+1}{l^2} - R^2 H \frac{3l^2-1}{(1+l^2)^3} - \frac{1}{1-l^2} \right];$$

$$D = \frac{R^2}{q} \left\{ H \left[\frac{1}{(1+l^2)^2} - \frac{Hl(3-l^2)}{(1+l^2)^3} \right] - \frac{l}{1-l^2} \right\};$$

$$K = \frac{R^2}{4q} \left[\frac{1-H-l\frac{\sqrt{2}}{2}}{1-l\sqrt{2}+l^2} - \frac{H(1-l^2-2l\sqrt{2})}{(1+l\sqrt{2}+l^2)^2} - \frac{HR^2(\frac{\sqrt{2}}{2}l-1-\frac{\sqrt{2}}{2}l^3)}{(1-l\sqrt{2}+l^2)^3} \right];$$

$$L = \frac{R^2}{4q} \left[\frac{H-Hl\sqrt{2}-l\frac{\sqrt{2}}{2}}{1-l\sqrt{2}-l^2} - \frac{H(1-l^3)}{(1-l\sqrt{2}-l^2)^2} - \frac{H+1}{l^3} - HR^3 \frac{3l^2-\frac{\sqrt{2}}{2}l-\frac{\sqrt{2}}{2}}{(1-l\sqrt{2}+l^2)^3} \right];$$

当在有些情况下另测地点的主应力方向已知时，可以利用小孔在两个方向，例如 $\theta_1 = 0$ 及 $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$ 时的径向位移进行求解，得到：

$$\sigma_1 = \frac{U_1(A_2 + B_2) - U_2(A_1 + B_1)}{A_2 B_1 - A_1 B_2} \quad \text{----- (II-10)}$$

$$\sigma_2 = \frac{A_2 U_1 - A_1 U_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2} \quad \text{----- (II-11)}$$

$$A_1 = \frac{R^2 H}{4G} \left[\frac{1+H}{H} \left(\frac{1}{1-l} - \frac{1}{l^2} \right) - \frac{R^2}{(1-l)^3} \right];$$

$$A_2 = \frac{R^2 H}{4G} \left[\frac{1+H}{H} \left(\frac{-1}{1-l^2} - \frac{1}{l^2} \right) - \frac{R^2(3l^2-1)}{(1+l^2)^3} - \frac{2(1-l^2)}{(1+l^2)^2} \right];$$

$$B_1 = \frac{R^2 H}{2G} \cdot \frac{1}{1-l}; \quad B_2 = \frac{R^2 H}{2G} \cdot \frac{1}{1+l^2}$$

在以上所有的公式中 R, l, U_1, U_2, U_3 为无量纲单位(相对于小孔半径 r)，此种方法为了使另测元件，保证必要的灵敏度，

大小孔之间距离，根据 E. N. ШЕНАХУН (1975) 的意见

$$4r \leq l \leq R \quad \text{----- (II-12)}$$

另外大孔孔径也不能太大，否则小孔周围有些地方可能会出现拉应力；因为岩石的抗拉强度低，这对另测工作是很不利的。

因此，一般大小孔半径之比取用

$$4 \leq \frac{R}{r} \leq 10 \quad (R \text{ 为大孔半径})$$

此种方法由于不要取岩心，所以一般钻不同直径的孔还处很
容易的。此种方法当测旁钻孔孔径取用46 mm时，卸载旁侧钻孔
孔径可采用184—460 mm直径的钻孔，并且孔间距相应要采用
92—230 mm。

2) 非弹性岩石应力测旁

① 决定岩石应力的特点：

在矿山中，我们还会遇到一些软岩，我们这里所指的非弹性
模旁较低的岩石，对它们要钻取完整的岩心比较困难，但它们在
加载、卸载中，还是遵守线性弹性变形准则，此时还可以应用如上
所介绍的方法进行测旁。

但与大成岩、变质岩不同，有不少的沉积岩和凡，它本身具
有较复杂的构造模型，此种介质进行卸载时，除去有瞬时发生的
弹性变形外，还有反蠕变变形，此两种变形相同时出现，而不能
把它们分开，在这种情况下，在根据旁测到的变形决定应力时，
所采用的数学模型应当考虑介质的流变性质，特别要考虑到沉积
岩在加载卸载时的弹性与流变变形的特点。

Е.Н.ШЕМЯКИН 认为钻孔变形计与钻孔的相互作用可如图6表示:

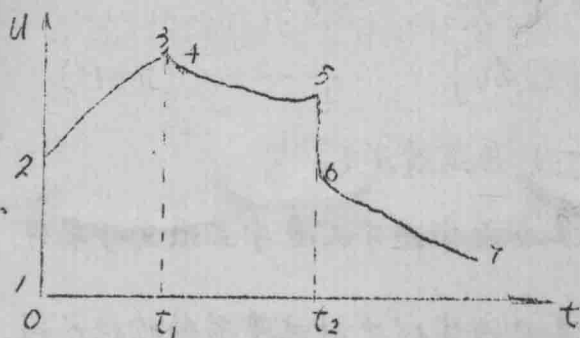


图 6

钻孔变形与钻孔变形计按装及卸载的影响

图中开新钻孔产生的瞬间

弹性变形为1—2,以后随

时间产生的纯蠕变变形2—3.

如果在 t_1 的瞬间按装钻孔变

形计, 由于变形计本身具有

一定的刚度, 甚至对钻孔壁

有某种压力, 所以按装钻孔

变形计以后的变形为3~4~5, 在 t_2 的时间完成卸载, 此时瞬间弹

性变形为5~6, 以后随时间增长, 孔径变形沿6~7.

当然, 当不使用钻孔变形计时.

(或使用刚度很小的钻孔变形计

时) 则上图中变形随时间的关

系, 可以改为如图7所示.

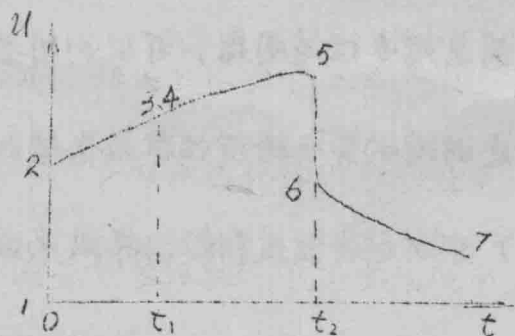


图7. 钻孔中不使用钻孔变形计
时 $U-t$ 关系

为了描述上述介质的蠕变

变形, 可以采取不同的假说.

目前在岩体应力测量中应用最广泛的假说是线性——岩数变形假说。

对于单轴变形时，此种关系有如下关系式

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \int_0^t L(t, \tau) d\tau \right] \quad \text{-----} \quad (\text{II}-13)$$

$L(t, \tau)$ —— 为蠕变函数，由试验决定。

И. И. Погосов 已经指出：上述关系还可以用于三维变形条件，并且蠕变变形的物性方程可以表示为类似于弹性变形的物性方程：

$$E_t = E(1 - E^*), \quad G_t = G(1 - G^*), \quad \nu_t = \nu(1 + \nu^*) \quad \text{----} \quad (\text{II}-14)$$

$$\left. \begin{aligned} E_t \varepsilon_y &= \sigma_y - \nu_t (\sigma_x + \sigma_z), & G_t \gamma_{yx} &= \tau_{yx} \\ E_t \varepsilon_x &= \sigma_x - \nu_t (\sigma_y + \sigma_z), & G_t \gamma_{xy} &= \tau_{xy} \\ E_t \varepsilon_z &= \sigma_z - \nu_t (\sigma_x + \sigma_y), & G_t \gamma_{yz} &= \tau_{yz} \end{aligned} \right\} \quad \text{----} \quad (\text{II}-15)$$

在上式中， E_t 、 G_t 、 ν_t 为由弹性常数 (E 、 G 、 ν)，及考虑时间因子变化的积分部分 (E^* 、 G^* 、 ν^*)。

上述方程式 (II-15) 告诉我们，前述蠕变理论问题，可以利用置换瞬时变形的弹性常数，用能考虑时间的算子的弹性常数代替。

对于大多数岩石来说 (II-13) 中的蠕变函数 (核)，可以采取

幂函数形式

$$L(t, \tau) = \delta(t - \tau)^{-2} \quad \text{-----} \quad (\text{II}-16)$$