

# 矿山压力译文集

煤炭工业部  
单体支柱工作面矿压情报分站

一九八五年五月

# 目 录

## 总三期

- 一、岩体中的应力估算。作者，V. K阿克什罗瓦..... 1
- 二、长壁开采的顶板冒落。作者科特·弗·路伍格..... 15
- 三、选择合理采煤系统的临界顶板跨距法。作者（波兰）  
A基特宾斯基..... 30
- 四、顶板桁架构件目前趋势。作者，斯·波门捷尔斯朵夫..... 44
- 五、均质坚硬岩体的液压分层作用作为控制难破坏顶  
板的一种方法。作者O. I. 切若瓦..... 54
- 六、遥感分析：长壁开采的一种实用手段  
作者M. Terry Hoch和William  
Pas COe..... 64
- 七、Witwat/rstrand 全矿的岩爆——学术评论  
作者J. F. Curtis等..... 81

## 岩体中的应力估算

V、K、阿克什罗瓦

B、M、里伯肯什基

K、V、普赖利维

在全国许多深部矿井观察到典型的岩体动力破坏特征，它包括：岩体的猛烈断裂、岩石突出、个别巷道和井筒表面的剥落。这实质上是使利用仪表观测方法来估计岩体的应力状态和岩石性质的应用受到了限制，井筒观测更加困难。当记录井筒直径的变化时，由于在安装仪表以前井壁剥落，由试验期间的位移读数和计算的应力明显的偏高实际。在较深的开采水平，情况必然更加恶化，使得井筒测量完全无效。

岩石破坏的形式具有一定的特色。例如，在奥士阿毕什加瓦矿，开采深度为800~900米，岩体边缘的破坏形式为杯状薄层，其暴露面与裂隙面并非一致。薄层厚度与其它尺寸之比为1:10:10。尽管观察的结果与此比值有明显偏差。动力破坏的开始与诱发动力破坏的爆破工艺有关。剥落能持续几个月。通常在壁内形成破坏层，它由许多层组成，各分层的形状与暴露面大致相同，其厚度一般为10~15厘米，有时达20厘米。在薄层移去后，剥落恢复。在顶板下沉而冒落时观察到一些略有差别的岩石表面状况。由于所谓突然崩落作用，顶板成拱式形状。在有突然崩落、断裂和巷道表面剥落的地方，岩体中的应力大小和方向可以根据矿压的这些显现资料来估计。每个巷道表面动力破坏的定性特征如下：

1. 有裂隙的岩体在均匀应力作用下具有某种特性：(1)在自然裂隙面上不出现破坏；(2)动力过程发展破坏，它普遍表明了岩石的脆性性质

和弹性性质；(3)破坏影响的层厚及其范围表明了岩石强度与应力的各种比值；(4)巷道壁的破坏形式表明：最大切向应力可以作为评价应力的主要标准。

2. 我们来考虑一个无限长的巷道在平面应力状态下周围的应力分布：

$$\sigma_r = \frac{\sigma_y^*}{2} \left[ (1+\lambda) \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right) - (1-\lambda) \left( 1 - 4 \frac{R^2}{r^2} + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{-\sigma_y^*}{2} \left[ (1+\lambda) \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) + (1-\lambda) \left( 1 + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_y^*}{2} (1-\lambda) \left( -1 - 2 \frac{R^2}{r^2} + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \quad (1)$$

式中：  $\lambda = \frac{\sigma_x^*}{\sigma_y^*}$  ；

$\sigma_x^*$  —— 垂直巷道轴线平面内无限远处的最小应力；

$\sigma_y^*$  —— 垂直巷道轴线平面内无限远处的最大应力；

$R$  —— 巷道半径；

$r, \theta$ ——极坐标。

最大切向应力按下式计算：

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{r\theta}^2} \quad (2)$$

通过  $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$  表示  $\tau_{max}$ ，我们可以得到：

$$\begin{aligned} (2\tau_{max}/\sigma_{y^*})^2 &= (1+\lambda)^2 A^2 + 2(1-\lambda^2) \\ &\quad ABC \cos 2\theta + (1-\lambda)^2 (B^2 \cos^2 2\theta + C^2 \sin^2 2\theta) \end{aligned} \quad (3)$$

其中： $A = R^2 / (R+\delta)^2$ ；

$$B = 1 - 2 \frac{R^2}{(R+\delta)^2} + 3 \frac{R^4}{(R+\delta)^4}$$

$$C = -1 - 2 \frac{R^2}{(R+\delta)^2}$$

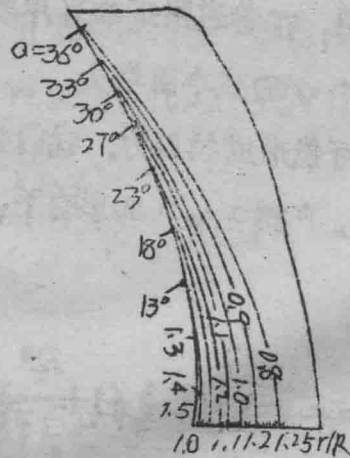


图1：当  $\lambda = 0, R = 2$  米时巷道附近的  $\tau_{max}$  等值线  $\sigma_{y^*}$

图 1 为  $\lambda = 0$  时的  $\tau_{\max}/\sigma_{y^*}$  曲线。注意： $\tau_{\max}/\sigma_{y^*}$  在巷道周边达到最大值。其值取决于最小应力线。 $r/R$  轴是对称轴，等值线与它相交的距离最远。等值线靠近巷道周边时角度增大，在接触处为  $\theta$ 。在巷道周围与最近的等值线之间的岩石范围为杯状，这与观察到剥落和破裂岩片的形状相似。

由于  $r/R$  轴是对于比值  $\tau_{\max}/\sigma_{y^*}$  的对称轴，我们来考虑表达式 (3) 在  $\theta = 0$  时的情况：

$$2\tau_{\max}/\sigma_{y^*} = A(1+\lambda) + B(1-\lambda) \quad (4)$$

用前面的  $A, B$  值代入上式，我们可以求出  $r/R$ ：

$$\frac{r}{R} = \sqrt{\frac{6(1-\lambda)}{(1-3\lambda) + \sqrt{(3\lambda-1)^2 - 12(1-\lambda)(1-\lambda - 2\frac{\tau_{\max}}{\sigma_{y^*}})}}} \quad (5)$$

因为  $r = R + \delta$ ，这里  $\delta$  为中间薄片的厚度。（图中沿着  $r/R$  轴）

$$\frac{\delta}{R} = (r/R) - 1; \quad (r/R > 1) \quad (6)$$

分析方程 (5)、(6) 表明：在巷道附近的岩片厚度  $\delta$  受  $\tau_{\max}/\sigma_{y^*}$  值的影响，随  $\lambda$  和  $\tau_{\max}/\sigma_{y^*}$  的减小而增大。

考虑到在巷道周围可能形成拉应力，我们将对形成破碎圈的可能性进行分析。在压应力  $\sigma_{x^*}$  和  $\sigma_{y^*}$  的影响下，当比值  $\sigma_{x^*}/\sigma_{y^*} = \lambda$  时，产生拉应力：

$$\frac{2\sigma_{\theta}}{\sigma_{y^*}} = - \left( 1 + \lambda \right) \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - (1 - \lambda) \left( 1 + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (7)$$

当  $\theta = 90^\circ$  时, 从(7)式中解出  $r/R$  得:

$$r/R = \sqrt{\frac{6(1-\lambda)}{(1+\lambda) + \sqrt{(1+\lambda)^2 + 24(1-\lambda)\left(\frac{\sigma_\theta}{\sigma_{y^*}} + \lambda\right)}}} \quad (8)$$

因为  $r = R + h$ , 这是  $h$  为  $\theta = 90^\circ$  时的破碎高度,

$$h/R = (r/R) - 1; \quad r/R > 1 \quad (9)$$

分析(8)、(9)式表明, 破碎高度  $h$  随  $\lambda$  和  $\sigma_\theta / \sigma_{y^*}$  的减小而增高。

3. 以动力破坏资料为基础, 让我们对作用在岩体中的应力进行定量的估价。

a) 首先, 我们考虑两种形式的动力破坏同时显现: 即形成破碎圈和形成薄片。由于给出了试验管中岩石的临界抗剪强度  $T_e$  和临界抗拉强度  $\sigma_p$  及其现场的破碎圈高度  $h$  和薄片厚度  $\delta$ , 这就有可能求出  $\sigma_{x^*}$  和  $\sigma_{y^*}$ , 对如下情况时的问题进行求解: 由于巷道壁内的切向应力作用产生薄片状破坏; 由于巷道顶板中的拉应力作用产生突然崩落。

将  $\theta = 0$  代入(3)式,  $\theta = 90^\circ$  代入(7)式, 得如下两个方程:

$$\frac{2\tau_{\max}}{\sigma_{y^*}} = (1+\lambda) \frac{R^2}{(R+\delta)^2} + (1-2\lambda) \frac{R^2}{(R+\delta)^2} + 3 \frac{R^4}{(R+\delta)^4} (1-\lambda)$$

$$\frac{2\sigma_{\theta}}{\sigma_{y^*}} = - (1+\lambda) \left(1 + \frac{R^2}{(R+h)^2}\right) + (1-\lambda)$$

$$\left(1 + 3 \frac{R^4}{(R+h)^4}\right)$$

当  $\sigma_{\theta} = \sigma_p$ ,  $\tau_{\max} = T_e$  时, 联立上两式求解, 消去  $\sigma_{y^*}$ , 我

们得到 
$$\sigma_{x^*} = \frac{2(T_e A_1 - \sigma_p D_1)}{A_1 B_1 - C_1 D_1} \quad (10)$$

这里, 
$$A_1 = - \frac{R^2}{(R+h)^2} + 3 \frac{R^4}{(R+h)^4};$$

$$B_1 = 3 \frac{R^2}{(R+h)^2} - 3 \frac{R^4}{(R+h)^4} - 1;$$

$$C_1 = - \frac{R^2}{(R+h)^2} - 3 \frac{R^4}{(R+h)^4} - 2;$$

$$D_1 = - \frac{R^2}{(R+h)^2} + 3 \frac{R^4}{(R+h)^4} + 1$$

解出  $\sigma_{x^*}$  后, 我们就很容易求出  $\sigma_{y^*}$ :

$$\sigma_{y^*} = \frac{2(\sigma_p B_1 - T_e C_1)}{A_1 B_1 - C_1 D_1} \quad (11)$$

然而, 前述的例子是一特殊情况, 通常在实践中观察到只是出现如



下两种情况之一，即：由于拉应力的作用形成突然冒落或由于切向应力的作用在岩体暴露面处形成岩片突出。

b) 对于从巷道壁脱落的一定尺寸的不规则薄片，假设等值线  $\tau_{max} / \sigma_{y^*}$  以临界角度  $\theta$  与巷道边缘相接触（见图1），方程(3)仍适用。

当  $r = R$  时，有： $2\tau_{max} / \sigma_{y^*} = (1+\lambda) + 2(1-\lambda)\cos 2\theta$

因为薄片的最大尺寸出现在  $\theta = 0^\circ$  时，我们将(3)式写成如下形式：

$$\frac{2\tau_{max}}{\sigma_{y^*}} = A(1+\lambda) + B(1-\lambda)$$

使两个方程的两边相等，得：

$$\cos 2\theta = \frac{(1+\lambda)(A-1) + B(1-\lambda)}{2(1-\lambda)} \quad (12)$$

因为  $a = 2R\sin\theta$ ，对于给定的  $\lambda$ ，薄片长度  $a$  和厚度  $\delta$  间的关系可以进行分析。计算结果见表1。实测薄片尺寸及数量见表2。

由表1可见，薄片的长度随厚度和  $\lambda$  的增加而有规律的增加。这种规律在现场通常也能观察到（见表2），尽管不是明显。通过比较表1和表2中的数据，很容易看出：实际  $a$  值明显地小于计算值，特别对于薄片厚度变化在1厘米以内时更是如此。由于实际岩体具有不连续性和非均质性，并非为理想的弹性均质体。当薄片落到巷道底板上时，随之产生破碎，因此，必须找出每一矿井的系数  $K$ ，以便能够通过现场实测的  $a$  和表1中的分析值来找出  $\lambda$  值。对于奥克士阿毕什金矿矿床，将分析解与现场实测结果比较后，得  $K = 2$ ，理论前提是使得  $a$  的最大值为系数2最好的。我们找出表1中值的对应  $\lambda$ ，将它们列在表3中。

对于厚度 $\delta$  (厘米) 计算薄片长度 $a$  (厘米)

$\frac{\delta}{\lambda}$	0.1	0.25	0.7	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	8.0	12.0	25.0	50.5
$\infty$	14.2	22.4	37.2	44.2	62.4	76	87	96.8	120	1434	1916	213.2
0.1	14.4	22.8	38	45.2	63.8	77.6	89	99	1228	1468	1964	224.2
0.2	14.8	23.8	39	46.4	65.4	79.6	91.4	101.6	126.2	1508	2028	231.4
0.3	15.2	24.2	40.4	48	67.6	82.2	94.4	105	1304	156	2096	240.2
0.4	16.0	25.2	42	49.8	70.4	85.6	98.2	109.2	1358	1626	218.6	251.6
0.5	16.8	26.4	44.2	52.4	73.8	90	103.4	115	143	1712	2314	266.8
0.6	17.8	28.2	47.2	56	79.2	96.4	110.6	123	1532	1832	2498	288.2
0.7	19.6	31	52	61.8	87	106	121.8	135.4	1688	2026	2754	320.4
0.8	22.8	36	60.2	71.6	101	123.2	141.4	157.4	196.4	236	3224	376
0.9	30.4	48	80.2	94.5	134.4	164	188.6	210	2624	358	—	—

☆ 原文为 103.4. ● 原文为 175.4 可能打印错误——译者

△ 原文为 213.2.

表2

薄片尺寸 及数量	薄片厚度δ (厘米)							
	0.1	0.25	0.7	1.0	2.0	3.0	4.0	
薄片长a (厘米)	2	5	7	10-26	18-37	17-47	24-47	
数量	1960	108	88	3	11	7	4	

表3

薄片长度a (厘米)	薄片厚度δ 厘米								
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	8.0	12.0	25.0	36.0
薄片长度a (厘米)	26	37	47	47	66	76	91	90	170
λ	0.5	0.5	0.55	0.3	0.7	0.6	0.6	-	0.75

假设薄片为最大厚度 $\delta$ 时的实际 $\alpha$ 值是由于规定 $\lambda$ 值后,可利用方程(3)求 $\tau_{\max}/\sigma_{y^*}$ ,于是,知道 $\tau_{\max}=T_0$ 后,我们就能求 $\sigma_{y^*}$ ,又因为 $\lambda=\sigma_{x^*}/\sigma_{y^*}$ ,知道 $\lambda$ 后,我们可求解 $\sigma_{x^*}$ 。

c) 在由于拉应力的作用引起突然崩落的地方,在顶板的局部地点形成穹洞。因为当 $\theta=90^\circ$ 观察到穹洞的最大高度为 $h$ 。当 $\theta=90^\circ$ 时,方程(7)可写成:

$$2\sigma_\theta/\sigma_{y^*} = - (1+\lambda)(1+A) + (1-\lambda) / (1+3A^2)$$

当 $r=R$ 时,穹洞宽度最大;当 $r=R$ 时,(7)式可改写成:

$$2\sigma_\theta/\sigma_{y^*} = -2(1+\lambda) + 4(1-\lambda)\cos 2\theta$$

使上面两个方程的右边相等,我们可解出:

$$\cos 2\theta = \frac{(1+\lambda)(A-1) - (1-\lambda)(1+3A^2)}{4(1-\lambda)}$$

按照图2所示,穹洞宽度 $m=2R\cos\theta$  (15)

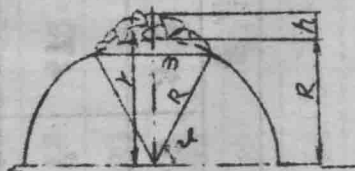


图2 巷道中的破坏

对于给定的 $\lambda$ ,可以分析穹洞宽度 $m$ 与高度 $h$ 之间的关系。计算结果见表4。

表4

$\frac{h}{m}$		破碎宽度 $m$ (米)对破碎高度									
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
0		1.25	1.53	1.70	1.86	1.92	1.97	1.99	2.01	2.02	2.03
0.1		1.22	1.54	1.70	1.80	1.86	1.90	1.92	1.93	1.94	1.95
0.2		1.18	1.43	1.64	1.72	1.77	1.80	1.82	1.83	1.84	1.84
0.3		1.12	1.40	1.54	1.62	1.66	1.68	1.69	1.69	1.69	1.69
0.4		1.00	1.30	1.41	1.47	1.49	1.50	1.49	1.48	1.47	1.46
0.5		0.87	1.13	1.20	1.22	1.22	1.20	1.16	1.13	1.10	1.10
0.6		0.61	0.81	0.80	0.72	0.61	0.46	0.22	—	—	—

观察到完全有规律的关系如下：

当  $\lambda$  在 0 至 0.3 之间时，破碎的宽度随着高度的增加而增加；当  $\lambda$  在 0.3 至 0.6 之间时，破碎的宽度开始随高度的增加而增加，然后，当达到某一值后，随高度的增加，破碎的宽度逐渐减小。当  $\lambda$  增加时，由于拉应力减小，破碎宽度减小。

当知道破碎的尺寸时，从表 4 中就可查出  $\lambda$ ，再利用(7)式就可求出  $\sigma_y^*$ ，又因  $\lambda = \sigma_x^* / \sigma_y^*$ ，知道  $\lambda$  后，就能进一步求出  $\sigma_x^*$ 。

4. 按照理论分析的巷道周围应力分布，巷道周围动力破坏地点的方位取决于主应力方向及其它们的相对大小。在  $\sigma_x^* / \sigma_y^*$  为某一值时可能在巷道周围的岩体内引起拉应力，最后出现突然冒落。对巷道进行仔细的观察，人们可以得到关于主应力的方向的实质性资料。

由于拉应力作用，在最大剪应力区引起岩体破坏。观察到这样的现象，由于薄片脱落，巷道的横断面增大。为了找出主应力的方向，应该画出破坏区（图 3 a）最大穹洞高度点处的切线和法线（与巷道轴线垂直）。

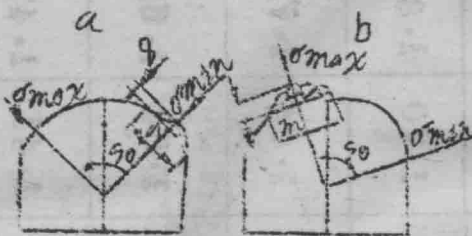


图 3 (a) 以薄片形式的破坏

(b) 以突然崩落形式的破坏

由于拉应力作用，岩体发生破坏。因为破碎冒落，巷道的横断面增

大。为了找出主应力的方向，应当画出最大穹洞高度点的切线和法线（与巷道轴线垂交）。

5 下面我们给出奥士阿毕什基矿动力破坏的实际数据。在开拓巷道中，记载114次破坏，高度都达到2米。大多数顶板破坏高度为0.5米至1.0米。在巷道纵向的平均高度为1.0米。图4a给出了以高度 $h$ 为密度出现的频率 $n$ 。

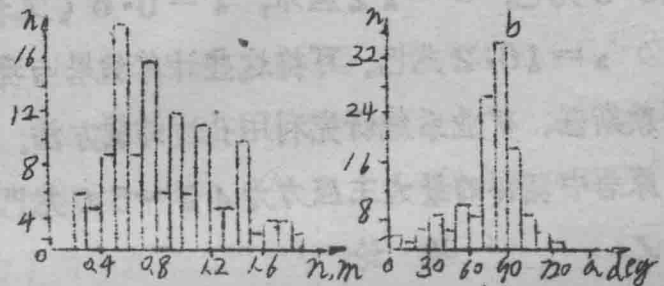


图4 (a) 高度 $h$ 对应的破坏数

(b) 方位角 $\alpha$  ( $\sigma_{max}$ 和 $C$ 的夹角)对应的破坏数

分析矿井巷道周围的破坏表明：在顶板中以薄片形式的大多数动力破坏面有一个向东方向的偏角 ( $\theta = 60^\circ$ )。这就可以认为：岩体中最大应力向东倾斜而偏离铅垂方向 ( $\theta = 60^\circ$ )。另一方面，在向南方向巷道中形成大量的破碎可认为最大应力的微横向方向。图4b示出了破坏方位对应的破坏数。巷道的总纵向长度是2570米，其中百分之四十点七为顶板动力破坏；在巷道的总长度上，沿横向破坏的为百分之三点二。在114处破坏中，有102处是巷道纵向的，只有12处是巷道横向的。在顶板中，与横向的偏角在 $\pm 10$ 度内的破坏占百分之六十五。尽管最大应力有一定的指向（方位），由于地质条件的非均质性

已观察到其偏离现象。

以现场表面岩体的动力破坏资料为基础，我们来计算作用应力。在采动影响区外，没有观察到由于拉应力而引起的破碎破坏。动力破坏主要以板（薄片）脱离顶板的形式出现，它是由最大剪应力区的最大切向应力引起的。按照这样的观点，利用方程(3)计算时取  $\theta = 60^\circ$ 。

奥士阿毕什基矿的较普遍的岩石——玄武岩、辉长岩、辉绿岩、粗玄岩——临界剪应力强度在 16.3~34.7 兆巴。计算时，我们假设  $T_e = 25.5$  兆巴， $\delta = 12$  厘米， $\lambda = 0.6$ （见表 3），得： $\sigma_1 = 55$  兆巴， $\sigma_3 = 16.2$  兆巴。可将这些计算结果与现场实测值进行比较。由斯科款斯基，矿业系统研究利用孔边卸载方法。奥士阿毕什基矿

原岩中测得的最大主应力为 49~50 兆巴。

## 1. 结 论

1. 巷道周围动力破坏的出现是高水平应力作用于岩体的结果。
2. 根据破坏区的尺寸能够定量的评价主应力。
3. 巷道周围破坏区的方位与主应力的方向直接有关。
4. 对相互垂直的两类巷道的动力破坏的分析使得人们可以确定完整矿床中岩体内的主应力方向。
5. 由卸载所进行应力测量的结果根据主应力的作用方向及其数值通过巷道动力破坏的分析后得到了证实。
6. 为了减少动力破坏危险，巷道应当主要布置在横穿最大主应力的位置。
7. 巷道的纵断面应当为拱状，其拱高为巷道的三分之一。

译自苏联采矿科学 VOL. 18 NO. 1

1982年1~2月

刘先贵 译  
朱茂林 校



## 长壁开采的顶板冒落

肯塔基州、莱哈辛镇 肯塔基大学采矿工程系

科特·弗·路伍格

### 前 言

自采用长壁法开采以来，预测顶板的活动及其选择合理的支护方式直接成为安全生产的主要问题。

近来，特别在美国，长壁工作面全部装备了昂贵的液压自移支架。研究长壁开采的适用条件及其在既定条件下的设备选型是极其重要的。由于缺乏经验，支架或采煤机的选择不合理，造成极大损失的实例很多。

应当强调指出：为了确保开采工作能顺利地进行，要求对主要的地质条件及开采条件进行详细的研究，这对于新采区尤其重要。建议利用如下的方法来评价各种条件。

当地质条件根据理论上的假设条件——这时，采用理论计算方法。在所取系数合理的情况下能给出满意结果的经验计算方法。

经受各种地质作用的构造地质的研究（因为断层的频率及其取向对顶板特性的影响很大）。

大规模地进行相似材料实验，以便搞清顶板破坏的条件及其断裂岩块运动的机理，为按经验公式计算提供参数，为数学模拟研究提供边界条件。

数学模拟计算，如有限元分析。

利用本采区开采中积累的经验，进行井下实测，这是最实用的方法，此时开采条件与地质条件均可对比。

在进行特殊条件的判断时，可以采用上述方法的某一种或组合形式。