金属矿或类似金属矿地下开采的地表稳定性（四）

普通房柱法或小采区房柱法

法国巴黎高等矿业学校采矿教授 岩石力学研究中心主任 E.Tincelin

10.1.3. 房柱法采空区中和A型复岩的矿山中突然发生自然冒落的解释

第一阶段：

根据矿石的强度和覆盖岩层的厚度，确定突然冒落采区的回采率。在过去计算中采用的安全系数是矿石的瞬时抗压强度的1/2。相反，这个系数范围若是太大了，很难具体确定某一个数值。因为人员不稳定，培训工作欠缺，因此不可能遵守规定的数值。

但是，不论矿柱的计算方法如何，众所周知，这些矿柱不可能受到最大应力。只要房柱法的采空区是很有限的，就能利用这个最大应力很好地计算矿柱。

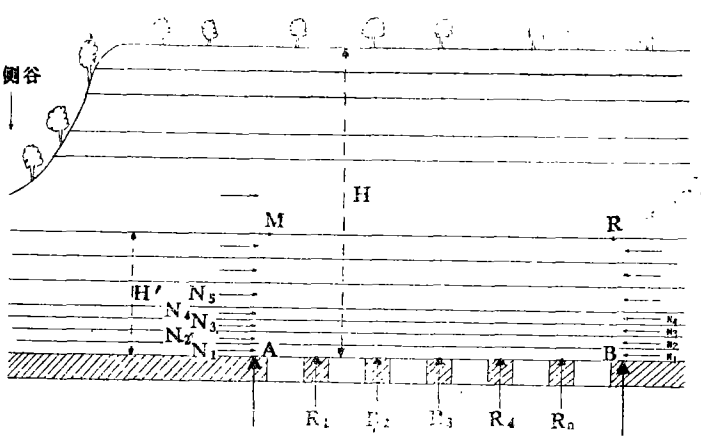


图29 AB<H的垂直断面
矿柱支撑反力 $=R_1, R_2, R_3 \cdots R_n \rightarrow$小
矿柱承受荷载小

某矿柱位于回采区中心处，该采区的回采率为τ，则矿柱承受最大的平均应力：

$$\sigma_m = \rho g H \frac{1}{1-\tau}$$

回采区的范围是以H为半径的圆。

在A型覆岩的矿山中考察证明：需要达到半径等于覆岩厚度H的圆的范围，在采区中心的矿柱才能在上述计算的σ_m作用下，开始承受荷载。

只要A与B之间的跨度不是足够大时，所发生的一切现象犹如整个覆岩组成的很厚岩板不能弯曲，而且其重量作用在矿柱上。直接顶板的前几层岩层，如果它们是薄岩层（如洛林铁矿区的情况）则支撑在矿柱上。但是，在大多数矿山，仅是AB跨度足够大时，即AB＝H，位于云母泥灰岩层上部的厚石灰岩层（参看7.1节）才开始弯曲，而且全部重量支撑在下边的薄岩层上。值得指出的是，当跨度小于AB时，矿柱承受的平均应力一般是低于原岩的初始垂直自重应力，因此，顶板不会发生剥落现象（图29）。

在未达到临界面积时，即没达到以H为半径的圆的范围时，矿柱负载小。由于矿柱没有出现任何的疲劳迹象，则矿柱尺寸是

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

很合理的。数个月以来，顶板未有破坏。但是，采区中心的矿柱上，一旦发现某些疲劳现象，就应该引起注意。

遗憾的是达到这个阶段时（即临介回采面积时，可用在房柱法采区中以H为半径的圆的范围来表示），具体如图24中AB＝H的情况，矿柱的应力从较弱的状态变成大的应力状态，大致为$\sigma_v=\rho gH$，（确切的值由$\sigma_{m1}=\frac{\rho gH'}{1-\tau}$到$\sigma_{m2}=\frac{\rho gH}{1-\tau}$），式中H′是硬石灰岩层下部的薄岩层的总厚度，即：

H′＝MA＝RB（图30）

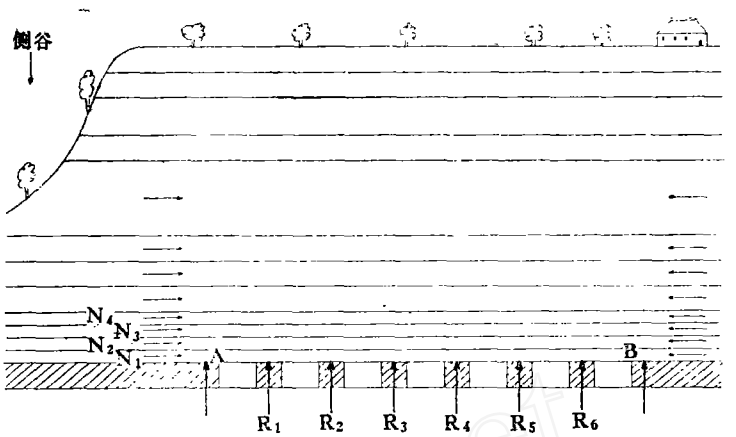


图30　AB＝H的垂直断面

R_1，R_2，R_3，R_4…→大　N_1，N_2，N_3，N_4…→正常　坚固矿柱承受荷载大

例如某一矿山，开采深度170米，回采5米厚的矿层，H′＝40米，回采率75%，则：

$$\sigma_v=\rho gH=23000\times170\approx3.9\times10^6\text{ 帕}$$

$$\sigma_{m1}=\frac{23000\times40}{1-0.75}=3.7\times10^6\text{帕}$$

$$\sigma_{m2}=\frac{23000\times170}{1-0.75}=15.6\times10^6\text{帕}$$

换句活说，矿柱支撑了宽度为AB的大巷道。只要AB宽度缩小，矿柱就仅仅支撑着一定厚度的冒落拱。当AB宽度足够大时，冒落拱达到回采临界面积，则矿柱支撑着整个覆盖岩层。

因此，第一阶段取决于达到临界回采面积。此时，矿柱在几天之内承受逐渐增大的很大荷载。从覆岩重量产生的平均应力变成4～5倍自重应力以上的应力。

第二阶段

假设矿层的单轴抗压强度平均值约为15.0×10^6帕，因此，在有关的矿柱内将发生破坏，但是这种破坏表现为矿柱没有破裂。这是处于图22表示的荷载条件下。因为应力超过矿柱的最大强度值，则矿柱自行塌陷，从这时起，矿柱通过压缩或伸长方式变形，即应力—应变曲线的负向硬化部分或无硬化部分。矿柱的承载能力逐渐降低。顶板受有弯曲，从这时起，应力变化很大。由于矿柱自行塌陷，整个顶板相对矿柱开始移动，因此矿柱破坏越来越严重。只要整个岩层（至少是40米厚，即直接顶板的薄岩层的总厚度）类似一个厚板，这是由于薄板之间通过矿柱的反力R_1，R_2，…R_n使之连接起来，则顶板弯曲减弱或停止。但是一旦矿柱塌陷足够大时，（因为所讨论的矿柱都是高矿柱，这种情况是很可能发生的），这时顶板上的薄岩层弯曲使其更危险。

矿柱的承载能力减少，同时顶板弯曲增加，我们可以设想，在某一时刻，矿柱承载能力变成很小，它不能再使得每个薄岩层之间连接，这时，各薄岩层之间滑动，而且分离开。当AB跨度达到H时，这种滑动和剥落是突然发生的。矿柱，薄岩层和硬岩层的滑动及剥落几乎是瞬时发生的。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

实际上是存在着顶板中每层薄岩层受载情况，如图18，在巷道宽度AB＝H中，有一些忽略承载能力的矿柱。在这些条件下，N_1，N_2，N_3，等等变成很大数值，一旦岩层之间剥落，各个薄层就瞬时破坏。在支撑点A与B的垂直上方存在着一种剪切和纵向弯曲的现象。图31是在非常短的时间内，当矿柱的反力变成很小时，已经不能再保证薄岩层之间的连结，而出现薄岩层之间互相滑动的情景。

此外，还可以看出，实际上观察到第一种类型冒落的机理。在一般冒落情况下，根据类似于岩层B_1，随后岩层B_2，B_3等等，随着回采面积增大而增加复杂弯曲，从而产生破坏。在研究的具体情况下，可使冒落延缓一段时间，但是，当矿柱减少其反力时（这个反力能够维持这些岩层之间的连结），它涉及到$B_1+B_2+B_3+\cdots B_n$岩层的总厚度。

图32表明薄岩层破坏后的情况，这种破坏引起矿柱的最终破坏。这种薄岩层和矿柱的破坏几乎是瞬时发生的，每一个岩层当其跨度超过临界跨度时，便自行破坏。还可以看出崩落岩层带有15～20°的崩落角。这种几乎瞬时的压坏是在很大面积

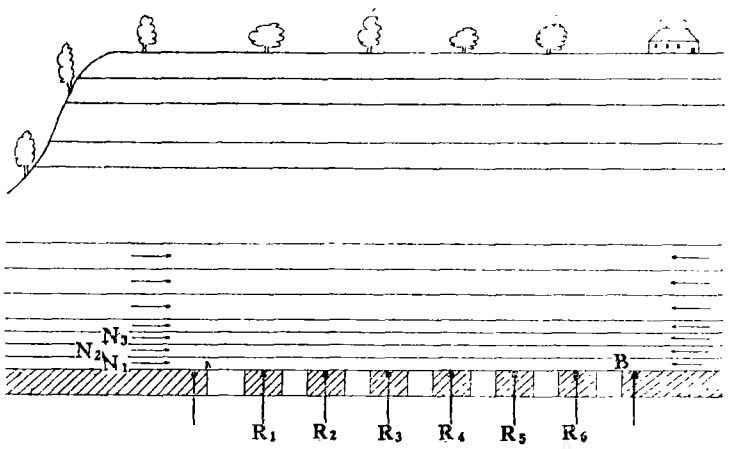


图31　AB＝H＋ε

R_1，R_2，R_3，R_4…→忽略或很小。　N_1，N_2，N_3，N_4…→很大矿柱被压缩而没有压塌

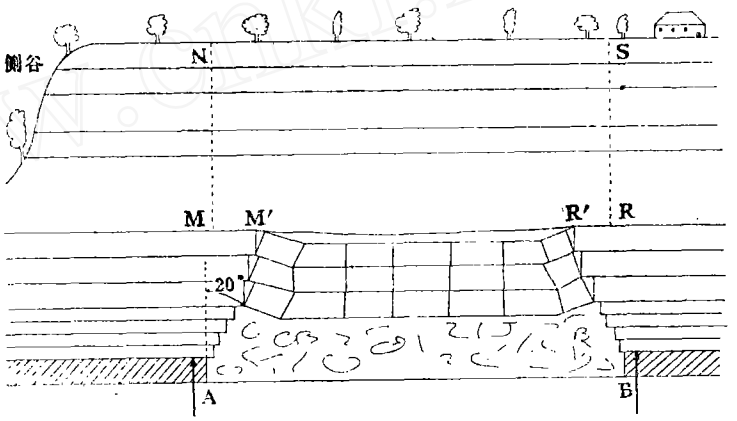


图32　AB＝H＋ε

在图32中，A与B点之间的薄岩层几乎瞬时破坏之后，硬岩层处于M′R′的跨度上，该跨度大于引起巨大MNRS岩体逐渐滑动的跨度。

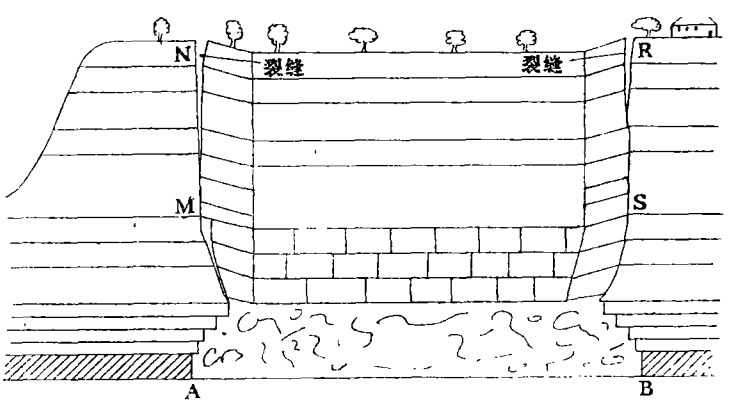


图33　AB＝H＋ε

最终破坏后的情况

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

上发生的，其面积至少为$2\pi H \times H' \cong 4.0 \times 10^4$平方米。它将引起第一个波列（拉力波）。由向心的初始位移来观测和记录这个波列。

在第二个阶段结束之后，就会发生矿柱几乎瞬时的全部塌落，并且伴随着气浪。薄岩层塌落一直到硬的厚岩层。发生第一次冲击。

注：我们还可以假设，对于矿柱及其紧靠的上部岩层破坏，是由M.Ph.Weber先生建议的能量的近似。

第三阶段

当存在着坚硬的厚岩层时，紧接着将产生第二种类型的破坏，即垂直截面为MNRS的巨大柱形岩体的滑动，在它下滑时，沿着MN和RS面产生的摩擦力阻止下滑。但是在这个阶段中，MR距离大于在回采工作线引起巨大柱状岩体MNRS缓慢破坏的距离（图30），当所有薄岩层破坏的瞬间，在一个面积大于崩落回采时引起MNRS巨大柱状岩体滑动的面积上，转向硬岩层的底槽部分，于是便发生非常迅速的滑动，尽管是沿着MN和RS面存在着阻止滑动的摩擦力（图33）。但是由于靠近侧谷（它在自然冒落附近处）而这种阻止能力有点减少。

我们假设在垂直于侧谷轴的方向，水平的自重应力受到扰动，至少是应力降低。最后，自然是由于很大岩体压缩破坏（所有的薄岩层）产生巨大的能量释放，使得产生一种向心的冲击，这种冲击能够造成自然裂隙张开，至少是震动自然裂隙。不论什么情况下，根据回采经验，我们知道，一旦达到足够的回采宽度，即$L = AB = 0.9H$时，巨大柱形岩体MNRS将下滑，这种下滑总是缓慢的，经过几天，有时是经过几个星期。在自然冒落情况下，这种下滑仅是很短的时间。毫无疑问，这是非常接近自由下落。在井下工程中，有时是AB宽度略大于H。这个稍大一点宽度是为了使逐渐地滑动变成全面的、瞬时的滑动。这种难以阻止的巨大柱形岩体MNRS下落产生第二次地震。它是紧接着第一次地震的几秒钟后发生的，这就证明，硬岩层组成岩板及其上覆岩层不是接着直接顶板中的薄岩层预先冒落而陷落。这种薄岩层的预先冒落是在$AB = 0.9H$以后才发生的。这种宽度使得硬岩层应力变化达到其抗剪强度以上。值得注意的是当直接顶板岩层下沉成20度时（由井下观察），在下沉的巨大柱形岩体中破坏面是垂直的（从地表处观察）。

10.1.4.房柱法采空区中和E型覆岩的矿山中突然发生自然冒落的解释

我们参阅图29及其以后的图，则在矿柱的直接顶板上有一层坚硬的厚岩层。图32中的M′点和R′点分别与回采界限的A点和B点混淆起来。

在$MN = RS = H$的情况下，矿柱和覆岩是通过沿着MN和RS面滑动而自然冒落。为了能够自发的和突然的冒落，其跨度$AB = MR$应该大于缓慢的和逐渐的发生冒落的跨度。

即：$AB = H + \varepsilon$

在这种覆岩类型情况下，仅存在一种剪切破坏（MNRS区大柱形岩体的滑动），且仅伴随着一次地震。仅有一次MNRS岩体的突然下落。我们没有研究曾提出的11种情况下的这种自然冒落。上述的冒落机理是在南非的煤矿中观测到的。

10.2.几点看法

人们不应该冒着自然冒落的固有危险。如果人们不赞成我们的解释或者假设其它的解释，最有意义的是有一个能被大家接受的行为准则。如果必需用房柱法回采时，应该注意几点：

1．在小矿柱内不能超过保证其稳定的

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

应力值。我们建议：

$$\sigma_m < R_E - \varepsilon$$

因此，应该特别要谨慎地取样，以便取得尽可能准确的R_E和ε。还要严格遵守井下矿柱和巷道的规定尺寸。

2．在房柱的采空区中，永远不能形成以H为半径的圆的范围，以便永远不能达到临界面积。因此应该采用采区矿柱，其间距为0.7H。

3．此外，我们建议后退式进行房柱法回采，如果前进式回采情况下，人员在采空区中通行。在自然冒落情况下，人员撤退线路被阻碍了。

4．我们观察到自然冒落是在矿柱压碎（破坏后状态）之前发生的，而不是矿柱被破坏和崩塌。表面的检查不能发现这种破坏后的状态。相反，这种状态可用测量矿柱压缩或伸长来检查。当怀疑有自然冒落危险时，就应该进行这种测量。这时要撤离地下有关的工程及地表上的住房。

结论——小采区房柱法和普通房柱法的应用条件比较

在洛林铁矿区，当矿柱和矿房的尺寸遵守上述规定值时，采用普通小采区房柱法或大尺寸的房柱法都能获得地表的永久性的稳定。这个结论适合于20几个不同的矿山，它们都采用这种回采方法，主要是保护各种不同时期的和不同的开采深度（120和150米之间）时的居民点。洛林铁矿区最早的矿柱几乎存在75年。

最近使用的缩小尺寸的小采区房柱法也取得了同样的覆岩稳定性，并且还有一定的安全系数。该种方法与大尺寸的小采区房柱法的概念是相同的。

相反的，在同样的这些矿山中，房柱法回采的大量保安矿柱经较长时间后崩塌而结束了。少量的保安矿柱是自然冒落。这两种采矿法（包括矿柱）的回采率都是高的。

如何解释这种不同的状况呢？

对于房柱法回采的，由崩塌而结束的保安矿柱，人们有理由指出下述的一个或另一个因素，或者几个因素的共同存在是不合理的。

——或者没有边界矿柱；

——或者没有采区矿柱；

——或者回采率太高；

——或者自然裂隙的方向不好；

——或者岩石老化和变质现象；

——或者为了测定R_E，ρ，弹性模量E和泊松比γ，在取样时不够认真。

不论是什么可能的或实际上的原因，我们感兴趣的是考察对矿柱稳定性没有影响的所有的原因。

我们试图提出某些解释，并且优越于上节中提出的关于夹在崩落岩石中矿柱自动阻止的机制。

1．所有的岩石都存在着不同方向的自然裂隙。一般情况下，不可能找出一种矿柱的形式，能够阻止所有裂隙两侧的岩石移动。

但是组成小采区矿柱那些大的和长的矿柱具有三个非常有利于裂隙的特点：

a．这些小采区矿柱形成一些很厚的矿柱，在水平面上岩体尺寸越大，侧壁近区体积就越小，并且因组成裂隙而强度减弱；

b．此外，这些很厚的矿柱被矿房全面回采形成的冒落岩石充填（或箍紧），这些假充填阻止了岩石结构中的成组自然裂隙的发展；

c．由于冒落产生的充填作用，使裂隙区加固，就好象在回采时有一种支护作用。这种支护有很大的优越性，它不仅是无偿的，而且不随时间而消除。

2．当增加矿柱尺寸时，岩石的老化和变质现象减少了。我们稍减少10000平方米的开挖面积的侧壁、顶板和底板的比例，如把不

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

回采的矿柱改为小采区矿柱。特别是要保护侧壁和底板，防止气流侵蚀。由于冒落形成的几乎完全的充填矿房，就是阻止大气侵蚀的非常完善的措施。

3．由于各种原因，小采区矿柱的尺寸和计算不可能很准确。例如：在顶板岩层中岩石的力学性质有很大的变化。这些误差表现在使用小采区房柱法情况下，当矿柱压缩时，而冒落拱没有通到地表。相反的，这些压缩总是缓慢地进行，并且不可能形成自然冒落。矿柱被充填了，但是矿柱不能因压碎而完全消除。这就如同不采动的小矿柱在超过它们最大强度极限之后（图22），仅有内聚力的最后阶段的情况。

□

在上述所谓小采区房柱法的固有的优点之外，还应该补充缩小尺寸的小采区的房柱法带来的优越性：

a．在井下工程中排除了水。

这种结果是由于减少矿房的宽度，从而减少冒落拱高度而取得的。因此，在某些情况下，我们能够保存老顶中和顶板上的不透水层；

b．减少冒落拱高度将使得冒落岩石的高度减少。这时作用在采矿工程上的地压显著降低，改善了安全条件并能达到安全标准。从而提高生产率和降低采矿消耗；

c．实际上取得的回采率等于或高于下沉式矿柱的回采率，因此在矿柱得到最终稳定时，矿柱的回采率达到10～20%之间。

总之，我们认为普通房柱法在矿柱方面具有稳定差的问题。每当有可能的话，最好是使用缩小尺寸的小采区房柱法进行部分回采。这种可能性在缩小宽度的矿房内，一定能够马上形成冒落。如果不能在缩小宽度的矿房内产生冒落，就应该放弃这种采矿法，而采用普通的小采区房柱法。若使用普通小采区房柱法也不可能产生冒落或者担心破坏防水层造成水的侵入，就对不采动的矿柱进行切割。

但是根据我们了解的资料和经验，长期存在的不采动矿柱具有倒塌的危险，至少具有迅速下沉的危险，并且有可能导致自然冒落。因此，如果想禁止和避免自然冒落就要特别注意使用上述的规则。

遵守上述规则就能保证不采动矿柱和覆岩的长期稳定性。但是我们不认为不采动矿柱无限长时期的稳定是合理的，当然在矿脉中仅掘进几条平巷的情况除外。问题不再是不采动矿柱，而是穿过保安矿柱的巷道网。

附　录

房柱法开采的矿山稳定性近似分析计算

S.M.Tijani

1．问题的数据

为了简化计算，假设采矿平巷和切割巷道的宽度相同，均为g，矿柱为方形断面，其宽度为l。覆盖岩层厚度为H，岩体是均质的，各向同性的，容重γ，单位是牛顿/米^3，弹性极限S，单位是帕，内摩察角φ，单位是角度。

注：岩石的弹性极限可能至少用三种方法确定；

——单向压缩试验；

$S=R_E$，R_E为应力-应变曲线中由直线段转为曲线段分界点上的应力值。

——松弛试验；利用双向等温松弛试验装置，简称DRBI装置，将一个软岩试件放入平衡状态系统中，分析这种平衡状态就可确定岩石的内摩擦角φ及弹性极限S。

——蠕度试验：S是一个应力极限值，在超过该应力极限值，延缓变形达到瞬时变形的某一固定的比值，而且是在给定时间之后（相适应于井下工程稳定的时间）。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

试验表明用第一种方法得出的弹性极限R_E值偏高（因为加载速度快），而且一般变化较大。

DRBI试验和蠕变试验得出R_E也偏高，但是比较接近实际，因为这些试验是缓慢进行的，而且在DRBI试验中，其结果是对应于极限平衡状态而不是非线性状态。

为此，我们建议对R_E值（单向压缩的弹性极限）进行修正，利用测量R_E时的偏差Σ_E（该偏差是由于分散性和测量方法产生的）修正。

如果假设有一个高斯分散，已知R_E是偏高的值，则：

$$S = R_E - 1.2\Sigma_E$$

概率大于77%。

2．计算原理

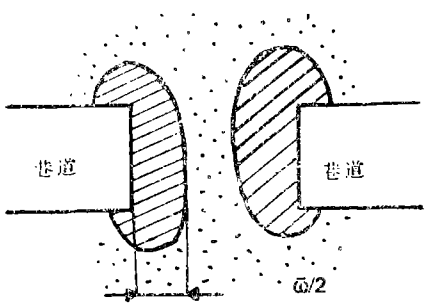
我们考虑切割横巷，将一条横巷和一个矿柱上部的厚度为H的覆盖岩层由一个矿柱支撑，因此，自重应力：

$$P = \gamma H(g + l)/l$$

如果引进回采率，得：

$$P = \gamma H/\sqrt{1-\tau} \qquad (1)$$

第二步是计算矿柱内塑性区的厚度$\bar{\omega}$。



为了计算$\bar{\omega}$，假设$\bar{\omega}/2$是掘进在无限大岩体中单一巷道周围的塑性环厚度，其自重应力是均匀的，且等于P。

利用关于圆柱形隧道和椭圆形硐室的两个一般性的规则推导出公式，并引入称作形状系数（或叫作应力集中系数）的系数值f，对于圆柱形f＝2，椭圆形f＝3。形状系数一般2～3之间，在井下硐室(Tersanne)情况下接近于3，在采矿巷道 f＝z(Varangeville:f＝2.11）。在矩形巷道情况下，f取决于巷道的高宽比。

3．公式及其应用

我们引进一个无量钢的数x，x等于覆岩自重γH与弹性极限S的值。

$$x = \gamma H/S \qquad (2)$$

假设：

$K = (1+\sin\varphi)/(1-\sin\varphi)$：推力系数、

$a = (k-1)f/[(f-1)k+1]$

$b = f/[(f-1)k+1]$

$\alpha = (f-1)(k-1)$

$x_0 = 1 - 1/f$

那么，如果$X \leqslant X_0$，可能选定一个回采率，它不能产生延缓变形（稳定的和非下沉的矿柱即不出现塑性区）。

$\tau \leqslant 1-(x/x_0)^2 \Longleftrightarrow$不存在延缓变形，反之，如果$x > x_0$，整个回采都伴随着一个塑性区（在矿柱中），在下列公式给出$\bar{\omega}$的总厚度。

$$(1+\bar{\omega}/g)^{\alpha} = ax/\sqrt{1-\tau} + b \qquad (3)$$

对于内摩擦角为零（盐岩）的岩石的具体公式为：

如果 $\phi = o$，则 $1+\bar{\omega}/g = \exp\left(\frac{\frac{x}{\sqrt{1-\tau}} - x_0}{f-1}\right)$

在这种情况下，如果回采率使得塑性的厚度低于矿柱宽度，则回采向着稳定的渐近状态变化。反之，向着破坏状态变化。

渐近状态的稳定性（如果存在的话）可用塑性率Ω从数量上表示，Ω是塑性体积与矿柱总体积之比：

$$\Omega = \frac{l^2 - (l-\bar{\omega})^2}{l^2} \qquad (4)$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

利用公式（3），可推导出塑性率与回采率之间的关系。

当然，稳定的渐近状态仅要求$\Omega<100\%$的条件，最好是用实际的标准（安全的）代替理论上的标准，即

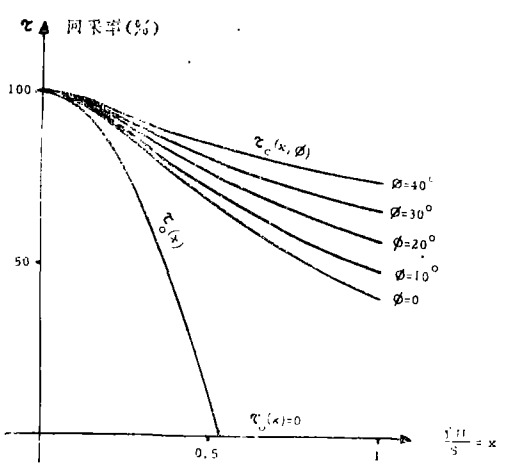
$$\Omega<50\%$$

实际上，如果矿柱还存在一个弹性区（在矿柱的中间处），如果塑性率是很大，只在矿柱中有大的收缩和储存大的非弹性能之后，才有可能达到渐近状态。并且能产生回采的破坏（参看§4）。

采用实际的塑性率50%，利用（3）式和（4）式，可以确定临界回采率（在这个临界回采率以上，则塑性率超过50%）作为代数方程的解。

数值解：

在下图中，我们表示$\tau_0=1-(x/x_0)^2$的抛物线和一个曲线族（根据不同的摩擦角度），由曲线可查出随着x不同的临界回采率，且形状系数$f=2.11$。



x——自重应力与弹性极限的比值，当$x<0.53$时，存在τ_0，使得$\tau=\tau_0$即不存在延缓变形。

对于所有x，存在一个与摩擦角Φ有关的τ_{C13}，使得$\tau_0<\tau\leq\tau_C$即延缓变形趋向一个渐近的稳定状态，此时，矿柱的体积至少有50%为塑性状态。

例如：对于一个矿山，开采深度$H=200$米，岩石容重$\gamma=2.5$（$\gamma=25000$牛顿/米^3）单向抗压强度极限$R_E=16.5\times10^6$帕，偏差$\Sigma_E=5.5\times10^6$帕，内摩擦角$\Phi=20°$，则：

$S=R_E-1.2\Sigma_E=9.9\times10^6$帕

$\gamma H=5\times10^6$帕

$x=0.5$，此处$\tau_0=10\%$和$\tau_C=75\%$

$\tau\leqslant\tau_0\Longleftrightarrow$不存在延缓变形

$\tau_0<\tau\leqslant\tau_C\Longleftrightarrow$（延缓变形）向稳定状态发展。

塑性率低于50%。

4．破坏准则

当涉及到破坏问题时，在上述中一般都用瞬时破坏准则代替塑性准则（即将应力与破坏强度曲线对比，这种曲线是由高速加载的压缩试验得出来的），但是，大家知道（如蠕变试验），当应力满足于瞬时破坏准则，岩石会破坏。现在讨论的问题可用应变准则代替应力破坏准则（如果存在着一个应变的界限，当超过它时，则发生破坏）。

但是这样的准则如果能够研究在长时期突然发生的破坏，（计算回采年限），那么就不用再评述瞬时破坏了。

根据试验的结果进行本质上观察，我们认为一个内在的准则（它与应力方式无关）应该综合考虑应力和应变，有时将是非弹性的临界体积能（正在研究当中）。

然而，我们推论出过剩的应变和临界的体积能，这来自实验室中的试验和现场中的观测（甚至当应力达到瞬时破坏标准时），矿山工程的塌陷可能发生在达到稳定临界状态之前，这种破坏，经常是在矿柱压缩速度增加之前发生的。（全文完）

译自法国《Ihdustrie minérale les techniques》，1982，№2，104～111

辛洪波　译　郑永学　校

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net