金属矿或类似金属矿地下开采的地表稳定性（三）

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

9．缩小的采区之间矿柱宽度λ的确定

9.1　矿柱中的应力分析

巴黎高等矿业学校岩石力学研究中心通过弹性和弹塑性问题的有限元计算表明（图20）：根据洛林铁矿石的力学性质，不论观测的和假设的冒落拱形状如何，在矿柱的四周边缘区几米之内都出现破坏区和塑性变形区。

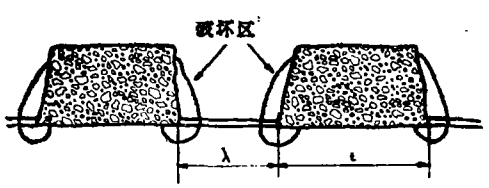


图20　矿柱边缘的破坏区和塑性变形区

通过这些计算得出如下结论：

1．为了使矿柱中所有点都处于弹性状态，而研究矿柱的合适形状的方案，不是确定宽度λ值的方案。当然，实际上矿柱承受的荷载，使它最终在一定的区域内破坏或者呈现非弹性变形状态。

2．如果不支护和不加固破坏区或塑性变形区，肯定会出现不稳定的情况，因此矿柱破坏。

事实上，在小采区回采之后，冒落的岩石支撑和加固了矿柱四周边缘的破坏区或塑性变形区。这样就形成对矿柱的自行加固。因而必需在考虑到这种事实的前提下进行矿柱稳定性的计算。

9.2　矿柱中的变形测量

曾经有待证实的问题是矿柱四周边缘区确实处于破坏状态或塑性变形状态。为此，在矿柱内部安置测量元件，测量距回采水平各种高度上的矿柱的伸长或膨胀。

这些测量的目的如下：

a．通过测定，确定矿柱周围的破坏区或塑性区的范围。

b．得出破坏区的伸长变化值。

c．通过测定，发现一般情况下矿柱的中心部分被膨胀的破坏区箍紧，这个破坏区支撑在冒落岩石上。它在水平方向上压紧矿柱的中心部分。

通过长时期内远距离遥测完成上述工作。实际上，仪器不可能通过冒落区安设在矿柱内，应该在两个相邻的小采区内回采工作面推进之前安设好仪器，并且开始测量。然后一直等到回采结束。

图21表明在祖德雷维尔铁矿的一个26米宽矿柱内，测量仪器的布置和水平变形的测量结果。

这种测量是在相邻的小采区开采之前，开采当中和开采之后进行的。可以看出，在

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

回采层水平上，矿柱的破坏区向着冒落区方向膨胀，破坏区的厚度大约3米左右。而矿柱中心部分受到压缩变形。

值得注意的是在小采区回采之后，如果伸长变形为40毫米时，则3米厚的岩体一定处于非弹性变形状态，即破坏状态。这个40毫米的伸长变形就是冒落岩石和矿柱中心部分受到压缩变形的原因。

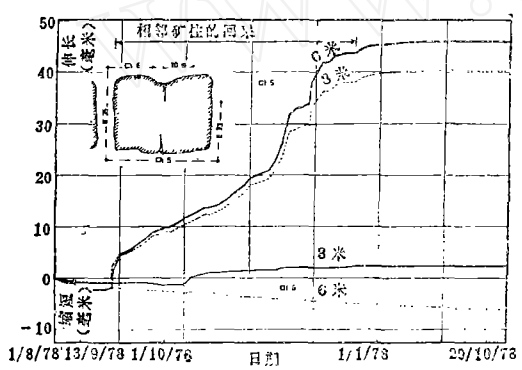


图21　在祖德雷维尔矿山中伸长变形的测量

9.3　在围压作用下，矿石破坏后的力学性质

通过测量地表下沉和岩体变形以及观察之后，我们确认：

——由于地表没有任何的下沉现象（除了在缩小尺寸的小采区中，由于矿柱的荷载增加有2～4厘米的下沉值之外），所以矿柱是稳定的。

——矿柱承受的应力使它四周边缘几米范围内形成破坏区。

——矿柱的中心部分处于弹性变形状态和三向受压状态。因为矿柱中心部分被膨胀的破坏区箍紧，而且周围邻接冒落的岩石。因为矿柱的荷载和应力状态是已知的，可以在已知条件下进行计算。

——受到三向应力影响的直接顶板岩层和矿石的应力状态，可通过普通的三轴试验得出有关数据。

——在不同围压作用下，破坏岩石的应力状态。这就是本节研究的问题。

——在较小的三向压缩下的冒落岩石的应力状态。这部分研究还没有进行。在下节中将看到目前在矿柱计算中仅以参数的形式引用冒落岩石的应力状态。

现在讨论在围压作用下，破坏后的铁矿石的力学性质的问题，为此，巴黎高等矿业学校岩石力学研究中心M.Vouille和Saghafi研究员进行一系列的室内试验，铁矿石试件的高径比为2，围压为0.2×10^6帕和0.8×10^6帕。在普通压力机上，附加一种装置以便增加压力机的刚度，因此，能控制试件破裂的发展。图22是利用这种装置得到的铁矿石试件应力-纵向应变全过程曲线之一。由试件破坏后的曲线段表明，在负向硬化之后是无硬化的塑性变形阶段。应力-应变曲线的水平部分对应着无硬化的塑性变形，其应力值随着围压增加而增大。通过对这些铁矿石试件的全过程应力-应变曲线的分析，可以得出破坏后矿石的力学性质：内摩擦角和强度极限，在强度极限以后矿石试件处于负向硬化的塑性变形，然后进入无硬化塑性变形阶段。

上述试验同时还取得图23和应力-横向应变全过程曲线，根据该曲线得出水平应变，这种水平应变使矿柱中心部分被箍紧，受到围压和膨胀变形。

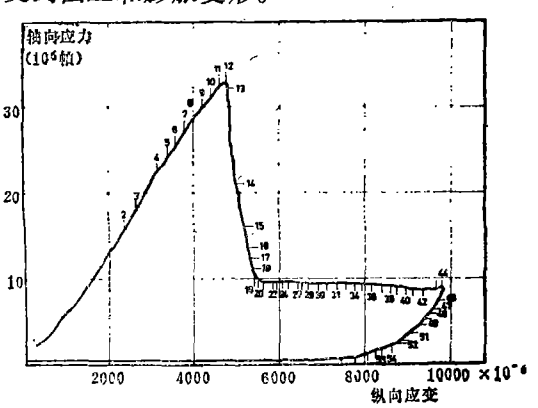


图22　应力-纵向应变全过程曲线（德鲁瓦托蒙铁矿石）围压0.2×10^6帕

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

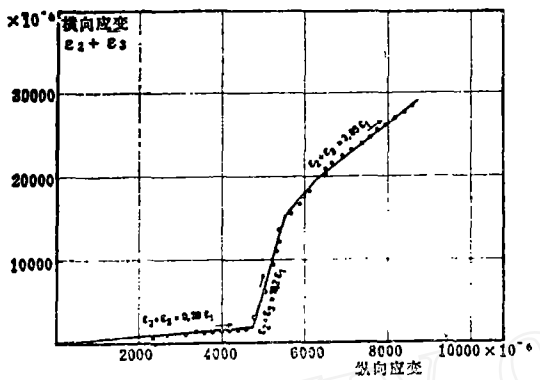


图23 纵向应变与横向应变的关系（德鲁瓦托蒙铁矿石）围压0.2×10^6帕

9.4 计算矿柱的原理及计算程序

利用巴黎高等矿业学校岩石力学研究中心S.M.Tijani研究员编制的Viplef计算程序，根据有限元法原理，进行计算。采用负向硬化的弹塑性力学模型表示矿体中应力状态（及同矿柱有关的顶板岩层中的应力状态），包括破坏后的应力状态。因为这种表示法能够很好的阐述上述的试验，所以采用这种模型。此外，在能够进行分析计算的情况下，这种方法成功地模拟了深部平硐衬砌荷载。（参看《Rock Mechanics》Vol.8，№4，209～233页，“岩体平硐稳定性分析并考虑岩体破坏后的应力状态”一文）。

在缺少很难取得的试验数据情况下，我们用一种弹塑性模型模拟冒落岩石，其力学性质就是顶板岩石的残余应力特性，这是一种内聚力为零的特殊情况。

采用迭代算法，假设已知荷载，各点的塑性应变（有时为零）和确定材料硬化值，利用有限元法，在已知初始应力的基础上计算作用于每个点上的应力值。如果这些应力值符合塑性的特性，则既不用修改塑性应变值，也不修改硬化变量值。在每个点上，如果是另外的情况，这种弹塑性的关系可以确定新的塑性应变和新的硬化变量值。这时用新的变量进行计算，一直到由于新的迭代引起变量可以忽略时为止。

现在这种新的计算程序已编制结束，并且在三个试验缩小尺寸的小采区房柱法的矿山中计算矿柱的应力。目前，由于我们还不了解冒落岩石的真正力学性质，因此，这些计算的精度还不清楚。然而，我们能够根据所采用的确定冒落岩石特性的参数得出宽度。

不久，我们将利用上述确定的冒落岩石的参数，或者说冒落岩石的力学特性，重新获得在矿柱内实测出的裂隙区的伸长变形和厚度。

9.5 小采区稳定性的控制

如果我们想绝对地保证地表的稳定性，就应该使小采区有合适的尺寸，在掌握更多的情况以前，这种尺寸是根据上述方法得出来的。

但是整个计算都应该由地表和井下测量和观测进行检验。

完全稳定的标准是矿柱周围的塑性区和破坏区不再与矿柱中心部分连接。换言之，在矿柱中心部分必需存在一个垂直压应力和水平压应力，并且逐渐地增加，当一个矿柱两侧的两个小采区开采结束后，达到一个稳定值。我们主张在一个矿柱或两个矿柱内部进行伸长变形测量来检验，在相邻小采区开采之前，将这些测量元件水平地安置在开采矿层之内，它们能够测出负应变（压缩变形），这是由于在相邻小采区开采当中和结束时，作用在矿柱中心部分的三向应力增加的缘故。

10. 普通房柱法采区中自然冒落

在洛林铁矿区和其他的金属矿山中，曾经发生过采区中全部矿柱的自然冒落，这种

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

冒落是非常危险的，因为它是突然发生和没有明显的预兆。

——首先是一种大规模的和全面性的冒落，因此，是造成房柱法已采区中死亡事故的原因。

——其次发生强大的气浪，如果冒落区通道很少的话，能够使距离冒落地点几十米处的人员死亡。

——最后，自然冒落产生一次或两次地震，在地面居住的30多公里范围内的居民都能感觉到这种地震，地震站可以记录数千公里外的地震现象。数个矿山居住区都会受到地震的影响和伴随着瞬时的沉陷。当覆盖岩层的厚度超过100米时，仅是局部性的危害，而且不会发生人身事故。1873年，瓦朗热维伊（Varange′ville）盐岩矿发生自然冒落引起工厂的烟筒倒塌，造成一人死亡。

在1963年5月份的《矿山工业杂志》上，我们论述了自然冒落现象的解释，现在考虑到最新的知识应该稍加修改，但是我们提出的预防原则还是有效的，而新的解释特别是考虑到岩石破坏后强度特性。同样，现在我们更清楚的掌握巷道顶板岩层的应力状态和破坏情况，特别是对于大尺寸的巷道顶板情况。这些具有各种自然裂隙的岩层，只有过大的压应力和剪应力才能冒落，而不能承受拉应力。

最后，通过对岩石冒落的研究也可以了解直接顶板和老顶的破坏现象。

10.1 自然冒落现象的解释

我们仅简单的论述一下关于自然冒落现象的新解释，因为这种新解释对于预防自然冒落没有带来任何新的改进。其基础仍然是建立在留有足够强度的矿柱，以便能够立即和长期内承受地压。

遗憾的是由于岩石变质和老化现象，使得最正确的计算也产生一定的偏差。因此，应该增加矿柱尺寸作为另一种的预防措施。

10.1.1 在自然冒落区中的观测

对于自然冒落区观测的主要内容如下：

1．根据某些少量矿柱的观测估算回采率，这些矿柱是位于自然冒落区边缘上的未破坏的矿柱。

可以看出矿柱上的平均应力 σ_m 大于弹性极限RE，而与抗压强度Rc相接近，$RE<\sigma_m<Rc$。

例如在洛林铁矿经常测出回采率为75%，当覆盖岩层厚度为150米时，$\sigma_m = 15\times10^6$帕，而矿石的 R_E，Rc的平均值：

$$R_E = 9\times10^6 \text{帕}$$

$$Rc = 18\times10^6 \text{帕}$$

标准偏差达到30%。

2．矿柱总是有一个很大的高度

$h \geqslant 5$ 米。

此外，这些矿柱的水平断面的形状往往是正方形。直到现在还从来没有看到具有所谓长方形矿柱（即矿柱的水平断面形状是较长的长方形）的自然冒落区。

3．当房柱法采空区的周围是没有开采的或少量开采的采区，这个采空区的尺寸达到以覆盖岩层高度H为半径画出圆的那个范围时，矿柱就会突然倒塌（图24）。

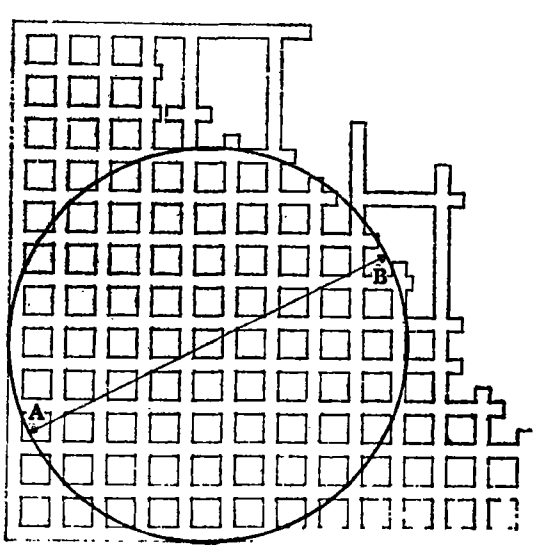


图24 AB = H

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

当然，还存在一些局部范围的冒落，然而这与矿柱无关，而与放弃某些残留小矿柱的全面回采有关。不再涉及到为保证临时稳定性而计算的矿柱。甚至于不涉及到均匀下沉矿柱。问题是在一个不规则的小采区中不良的回采造成的。值得指出的在这些局限范围内冒落不存在自然冒落的一些现象。

当回采区的尺寸很接近以H为半径的圆的范围时，自然冒落是随着矿柱倒塌而突然发生的。在洛林铁矿曾经发生8次自然冒落，在Champagnole和Clamat矿也曾经发生过自然冒落。这与Gafsa处自然冒落不同，此处是一座山在矿柱的上方，因而所有矿柱都同时倒塌。

应该补充一点就是自然冒落或者在某些采区尺寸增加，当达到以H为半径的圆的范围情况下则突然发生，或者是一些采区很早就停止开采了，但是采区的尺寸正好达到上述范围时也会突然发生。矿柱存在几年或10年达到强度极限（疲劳、老化和变质）。

4．采区的直接顶板总是良好的，坚固的和厚的（至少为2米）。

还观察到其他的问题：

a．洛林铁矿的8次自然冒落都发生在12月份或1月份，即在雨量最多的季节的末期。但是Champagnole和Gafsa的自然冒落发生在7月份，因而不是覆盖岩层中存在着大量的水造成的。

b．地表下沉具有下述特点，它与崩落矿柱的下沉是有明显区别的。

——在自然冒落之后，地表下沉瞬时发生，毫无疑问，矿柱倒塌是同时发生或者几秒后发生的。

——沿着陷落区周围，地表立即出现一些很大的裂缝，该陷落区位于井下冒落区的上方，这些大裂缝有0.5米宽，在深度10至20米具有一些垂直面，裂缝的两个面之间落差不大，没有形成台阶。

在裂隙垂直方向上突然下沉值很小，接近于零，而它的最大幅度达30多米。

在崩落回采的下沉中，可以看到一些裂隙，但是裂隙较小而数量多，变形的曲率比较规则，没有30米范围内的整个下沉现象，也没有出现在距离为H的范围内的下沉。

——在地表上的观测就好象是发生分开两次的大地震，这两次地震间隔时间为几秒钟，由地震记录的分析中证明这些现象。

在洛林铁矿区，覆盖岩层为145米时容易发生自然冒落，而在Rochonvillers矿山，二次自然冒落都是发生在覆盖岩层为180米的情况下。

值得说明的是在所有情况下，我们都是在地表的下沉区边缘处或山谷附近处观测自然冒落现象，这种观察包括每个铁矿山，也包括Champagnole，Clamat和Gafsa矿山。

在冒落采区的上部，有一个所谓的高原，其厚度为覆盖岩层厚度H，但是在高度为H的覆盖岩层下方紧靠近冒落区的地方有一个山谷，通过露头可直达矿脉，但是在多数情况下，高度为30至50米的直接顶板岩层不能被山谷的断面相切。

最后，在回采过程中，所有的自然冒落的一个共同特点是：我们观察到在冒落的前几天中，矿柱的中心部分受到一个至今还没有测出的荷载，这种加载对于习惯于房柱法残留小矿柱变形的人员没有任何惊惶的感觉，相反的，对于不熟悉房柱法的人员，对这种加载感到不安。在Champagnole矿山决定处理因突然冒落而使整个矿山垮掉的采区。

应该补充一点是矿柱加载永远不会发生在坚固的和没有受到破坏的直接顶板处。这种加载表现在矿柱剥落和出现裂隙，有时还会有几个大块岩石冒落下来。

10.1.2 崩落引起复岩破坏的机理

为了更好掌握各种类型自然冒落的机

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

理，我们认为最好是了解冒落采空区上部复盖岩层的破坏机理。现将沉积式金属矿床或类似的矿床的各种覆盖岩层分类如下：

A型：

直接顶板——其岩层的抗压强度和厚度类似于回采层的抗压强度和厚度而且：

$$R_E > 2\rho gH$$

为了使这些顶板岩层容易冒落，其强度不应该太大，即：

$$R_E \leqslant 6 \sim 8\rho gH$$

老顶——在老顶中，至少有一个厚的岩层，并且有足够大的强度，以便能支撑在大跨度（如接近于H值）时岩层本身的重量和上覆岩层的重量。我们认为所谓的硬岩层，应具有R_E近似为6～10ρgH，H′是硬岩的厚度。

洛林铁矿的覆盖岩层就是这种类型，回采层 $R_E = 10 \times 10^6$帕，

$\rho gH \leqslant 5 \times 10^6$帕，

此外，对于坚硬的石灰岩层

$$R_E = 20 \sim 25 \times 10^6 \text{帕}。$$

B型：

直接顶板——其岩层的抗压强度和厚度类似于回采层抗压强度和厚度，而且

$$R < 2\rho gH,$$

当 $R_E < \rho gH$时，在开采深度上的这些岩层的状态如同土一样。因而由下列关系确定R_E：

$$R_E = 2C\frac{\cos\varphi}{1-\sin\varphi}$$

老顶——其性质同A型的老顶。某些地下磷酸盐矿（突尼斯的Gafsa矿和摩洛哥的Koarihga矿）就是这种类型，回采层和顶板岩层的

$$R_E = 1.2 \sim 2 \times 10^6 \text{帕}$$

C型：

回采层和直接顶板岩层弹性极限大于2ρgH，在老顶中不存在坚硬和厚的岩层。Var铝矿和浅部的洛林铁矿（硬岩层由于侵蚀而消失了）就是这种类型。

D型：

回采层和直接顶板岩层的R_E小于ρgH，在老顶中不存在坚硬的和厚的岩层（硬岩层由于侵蚀而消失了）。突尼斯和摩洛哥的浅部磷酸盐矿就是这种类型。

E型：

回采层的$R_E > 2\rho gH$，直接顶板较坚硬和较厚，并且能支撑整个覆岩的重量。这就是巴黎地区石膏矿的情况，其顶板是泥灰岩，它能支撑50至100米厚的砂子。这也是Gardanne上部回采层房柱法开采的情况。

由于下述理由，我们对A型和E型顶板感兴趣，因为在B型和D型顶板的矿山中，$R_E < 2\rho gH$，所以不能组成矿柱。在C型顶板的矿山，至今还没有见到顶板冒落或矿柱自然冒落。我们仅限于研究A型和E型顶板的矿山中自然冒落，而E型顶板的矿山中冒落是A型顶板的矿山中冒落的一种特殊情况。

10.1.2.1 A型的覆盖岩层中冒落

随着崩落开采，回采面积越来越大（如图25，回采宽度为AB），直接顶板中的每个岩层一个接着一个的都达到破坏和冒落的跨度。

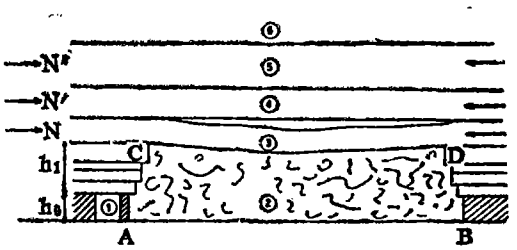


图25 垂直断面图

图中：ho——崩落顶板的房柱法回采层的厚度；h_1——采空区中已经破坏的直接顶板岩层的厚度总和，冒落的岩石几乎占满ABCD空间。（1）——进路（2）——冒落岩石（3），（4），（5）——受到复杂弯曲而还没有破坏的直接顶板岩层

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

假设一个岩层作用着水平应力N，当跨度接近于CD时，因复杂弯曲而自行破坏（图26），从某一高度起，该岩层不再冒落，已经破坏的岩层将支撑在下边的冒落岩石上，而且没有太大的落差。这个破坏的岩层在冒落岩石上则停止变形和下沉，冒落岩石是由前几层岩层自由下沉破坏形成的，它是松散的。岩层4（图27）和接着的所有薄岩层以同样的过程自行断裂，尽管它们弯曲和出现裂隙，但是仍然保持大致完整状态。只有增加回采面积，经过复杂的弯曲过程才能引起每个薄岩层的破坏。

由于采空区加宽，所谓的每个薄岩层就逐渐地破坏。当达到一定回采面积时，就可以接触到硬的和厚的岩层，该岩层即使在复杂的弯曲作用下也不能自行破坏，至少在回采阶段的跨度内，它不会破坏（图28）。值得注意的是该岩层上部的所有薄岩层和软岩层都支撑在这个硬岩层上。因此形成一个抗力很大的岩板（厚度等于MN或RS）。

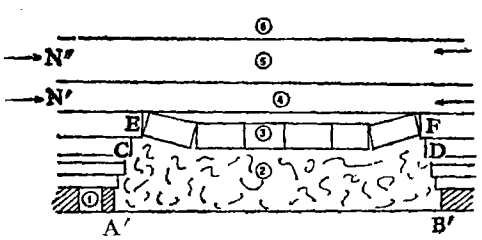


图26　垂直断面
（回采面积增加，A′B′距离大于图25中的AB距离）

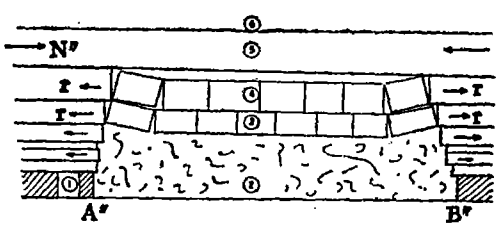


图27　A″B″＞A′B′＞AB的垂直断面

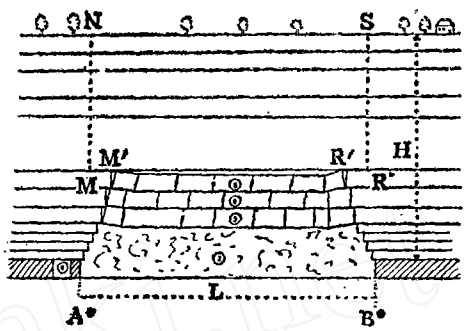


图28　垂直断面

随着跨度MR增加，复杂的弯曲增加，同时沿着MN和RS的剪应力增加。当开采层达到临界宽度L时，则垂直断面为MNRS的巨大柱状岩体将沿着MN和RS滑动。这种滑动既不在R′点，也不在M′点，而是在R点和M点，因为在R′，M′点的垂直方向上的剪应力不是最大，而是在R′，M′点稍后的R点和M点剪应力最大，这与无限长的刚性支座是不一样的。

大量的工作面在临界开采宽度下结束了，因此在坚硬的岩板下形成一个大的掏槽，巨大的柱状岩体慢慢地滑动和通过MM′和RR′面将其重量直接作用到采矿工程上。这就是众所周知的冲击地压现象产生的原因。但是我们从来没有考察地震产生的动力现象。

这种巨大的柱状岩体冒落需要几天，有时需要几个星期。这种大冒落导致地表全面下沉，下沉值大约为0.5h。（h_0是回采层的有效厚度）即大于小矿柱冒落时所引起的地表下沉值。

我们已经证明，当L＝KH时，0.75＜K＜1.1，则这种现象突然发生。如果硬的和厚的岩层紧靠着回采层，则K＝1.1。如果硬的和厚的岩层位于覆盖岩层的前$\frac{1}{3}$处，则K＝0.75。然而在这种情况下，因为MNRS相对较小，（下转66页）

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

之后，矿山救护队员带好防毒面具、氧气分析器和小灯，进入封闭区测定氧气含量。他们发现，没有必要担心放出的氮气会构成危险。

如果消防区的面积较大，使用较大型的防火系统也许不会得出含氧量有任何不同的数据。尽管放出的氮量较大，如果扩散面也较大，则浓度仍将保持不变。

第六步：维修和培训

这套系统所需维修量不大，无需全日制操作工和管理人员，能持续承担各区段的消防任务。尽管它可以人工触发，却不依赖工人。密封在NEMA型防水操纵盒里的操纵仪表，监控与这套系统相联接的所有电路。例如，如果出现了短路，就用可见讯号发出指示。福尔肯布里奇公司对消防设备每周检查一次，由维修队员测定溶液液位，查看是否渗漏，管道和阀门是否完整无损。建议每隔六个月进行一次较细致的检修。

安装和维修这套系统的工程队，由福尔肯布里奇公司培训。他们很快就掌握了这套系统的操作技能。

结　论

总之AFFF型消防系统建立伊始，就不断地互通情况，福尔肯布里奇公司了解设备性能和公司的要求，莱维特公司则询问防火情况。在设计和安装整个阶段，开展并坚持这种建设性的讨论，对其他想建立消防系统的公司来说，这也许是最宝贵的建议。这样就能消除隐患，并在设计中有效地采纳用户的具体意见。

其它建议包括及早让防火专家参加工作，并坚持贯彻按用户要求进行设计的制度。

译自加拿大《CIM BULLETIN》，October，1982，53～56

房俭生 译　王定远 校

（上接44页）特别是MA* 距离相当大时，可以减弱和分散巨大柱形岩体滑动产生的超荷载，所以冲击地压减少了。

在洛林铁矿区，L = 0.9H，一般硬岩层位于覆盖岩层的2/3处（从地表测量）则发生上述现象。

10.1.2.2　E型的覆盖岩层中冒落

在这种情况下，上部的薄岩层（图25和图26）不会发生冒落和破坏。仅存在第二种形式的破坏，MNRS岩体的滑动（图28），MN或RS等于覆盖岩层厚度H。

当顶板岩层坚硬时，应该避免在具有E型覆盖岩层的矿山进行冒落，因为若使覆岩沿MN和RS开始滑动，需要达到很大的开采面积，我们担心对采矿工程的破坏和产生气浪。实际上，MNRS岩体滑动比A型覆盖岩层情况下快得多（几分钟）。根据我们的了解，当突然冒落时，在它们之中还没有发生地震，也没有大的气浪。然而，在硬岩板下有掏槽。

当顶板岩层不是太坚硬时，我们可以在很大面积下回采矿房，并且同时崩落大量的残余小矿柱（如巴黎地区的石膏矿）。当顶板岩层坚硬情况下，我们还可以增加回采面积，但是不能达到临界的回采面积。这时可以崩落采空区边缘上的一些小矿柱（如突尼斯磷酸盐矿），对地表的影响是迅速的。在崩落矿柱1小时后，地表下沉的范围达到最大。

（未完待续）

译自法国《Industrie minérale les techniques》，1982，№2，97～104

辛洪波 译　郑永学 校

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