

采矿工程手册

美国采矿工程师协会 A.B.卡明斯 I.A.吉文
冶金工业出版社

- ① 法规、地质及岩体工程
- ② 采矿方法与地下开采
- ③ 岩层控制、地下运输、提升及通风
- ④ 露天开采、环境保护及地表运输
- ⑤ 特殊采矿方法
- ⑥ 测量、动力、维修、供应及选矿
- ⑦ 系统工程、矿山管理及咨询

内 容 提 要

《采矿工程手册》是根据1973年美国采矿工程师协会(SME)编辑出版的《Mining Engineering Handbook》一书翻译的。中文译本分七个分册陆续出版。本册为第三分册——岩层控制、地下运输、提升和通风部分。

本分册共有四章：第十三章顶板和岩层控制；第十四章地下运输；第十五章提升机和提升系统；第十六章通风。比较全面、系统地介绍了美国地下矿山在地表下沉和岩层移动，岩石力学实验与矿井设计的关系，岩石结构的模型试验，深部开采的岩层控制，矿柱设计，冲击地压的控制，岩层的各种支护方法；各种地下运输设备和方法的选择和使用；各种提升装置与系统的选择、计算和使用；矿井通风原理，各类矿井的通风系统，金属矿和铀矿的环境控制通风以及井下空气调节方面的实践和经验。

本书主要读者对象为矿山(金属矿、煤矿、非金属矿)工程技术人员，也可供矿业院(系)校师生参考。

采 矿 工 程 手 册

第 三 分 册

岩层控制、地下运输、提升及通风

美国采矿工程师协会 A. B. 卡明斯
I. A. 吉文

《采矿工程手册》翻译组 译

汪永嘉 审校

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 17 3/4 插页 1 字数 473 千字

1982年12月第一版 1982年12月第一次印刷

印数00,001~3,700册

统一书号：15062·3836 定价2.25元

目 录

第十三章 顶板和岩层控制	1
13-1 地表下沉和岩层移动	1
13-2 协调方法——初步分析和整体分析	12
13-3 岩石的实验室试验及其与矿井设计的关系	46
13-4 岩石结构的模型试验	66
13-5 岩石力学测定仪表	87
13-6 深部采矿的岩层控制	94
13-7 从梁和成拱作用看顶板控制	105
13-8 矿柱设计	130
13-9 冲击地压的控制	161
13-10 顶板和岩石锚杆支护	171
13-11 用化学添加剂加固顶板	185
13-12 人工支护	201
第十四章 地下运输	252
14-2 矿车和轨道	252
14-2 矿山运输机车计算	261
14-3 地下主要线路和次要线路运输的运输机	280
14-4 运输机在工作面——区段运输中的应用	286
14-5 地下管道运输	291
14-6 梭车	301
14-7 卡车和牵引拖车	308
14-8 地下卸载	311
14-9 地下人员运送	316
第十五章 提升机和提升系统	327
15-1 矿山提升机型式	327
15-2 根据用途选择提升机	344
15-3 选择提升系统时的技术考虑	353
15-4 箕斗、罐笼、罐道和提升辅助设备	415

第十六章通风	423
16-1 矿井大气和瓦斯	423
16-2 矿井通风原理	427
16-3 煤矿基本通风系统	472
16-4 非煤矿山基本通风系统	497
16-5 金属矿环境控制通风	503
16-6 铀矿环境控制通风	520
16-7 矿井空气调节	526
参考文献和其他参考资料	545

第十三章 顶板和岩层控制

责任编辑 J.R.卢卡斯 L.艾德勒

13-1 地表下沉和岩层移动

R.斯蒂芬科

13-1-1 地表下沉和破坏

本节中关于地表下沉和岩层移动的讨论将限于控制地表下沉方面的问题。控制地表下沉是为了限制地表破坏，它是通过确定对采矿时影响岩层移动的主要参数，采用合理的采矿技术达到的。文中所提供的材料同样也适用于蒸发盐矿和煤矿，但不适用于分块崩落或类似的开采法，因为崩落法本来要使顶板崩落而不需考虑地表保护的问题。

当地下开挖坑洞时，其所造成的应力集中破坏了原来的平衡。在影响坑洞稳定性的许多因素中，跨度 W 无疑是产生破坏的最重要的因素之一。如果跨度较小，则上覆岩层能成为桥跨越坑洞，即使顶底发生移动或闭合也是较小的。但是，一旦跨度增加到使覆盖岩层中的应力超过岩石某个强度指标时，则顶板就要断裂。如果坑洞跨度限制在某个亚临界值 $-W_c$ 和（或）在较大深度 D 时，则将形成一个假拱，能在岩层破坏达到地表前保持稳定。该拱的边界一般认为近似于一个椭圆，其长轴为垂直轴并等于 $4W$ ，但是迄今尚无观测研究资料来证实这个理论。不过根据这个理论，如果坑洞的跨度增加到某个临界值 W_c 或跨度不变而位于较浅层中，则覆盖岩层将逐渐破坏达到地表形成特有的下沉盆地（图13-1）。

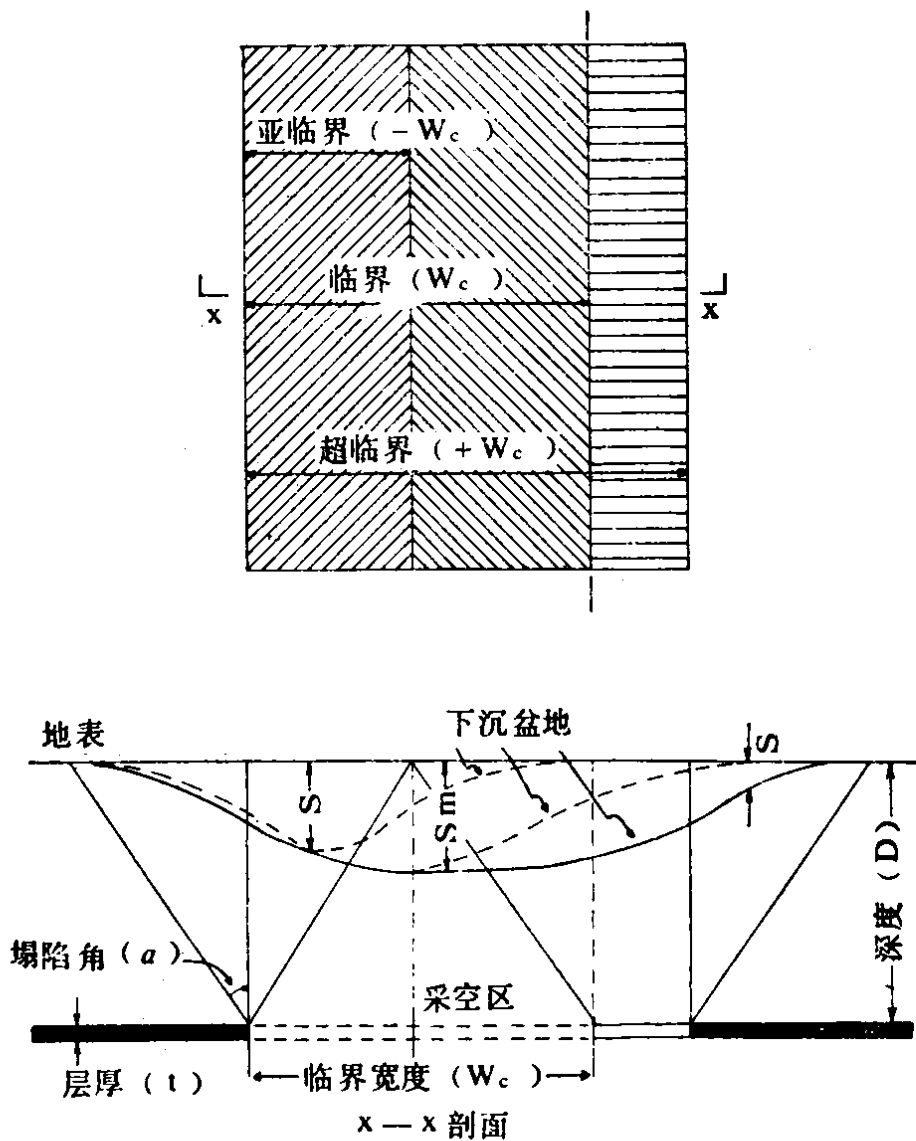


图 13-1 采掘宽度对地表下沉的影响

地表受影响的面积远大于地下采掘的面积，这取决于“塌陷角” α 。所谓塌陷角就是坑洞边缘的垂线和由坑洞边缘到地表上下沉量趋于零的一点的连线的夹角。这个角在欧洲所得的数值约为 35° 。由于该值与下沉观测的仪器精度有关，所以仅供参考。因为超过 25° 角的任何点的下沉均很小，所以可认为 25° 角是下沉的实际极限。此外塌陷角的大小还同矿层的深度和性质有关^[1]。对新墨西哥一个超过1000英尺深的钾盐矿的现场观测表明，最大的塌陷角为 51.5° ^[2]。

以上仅考虑一个单个的坑洞。然而不论用何种复杂的巷道式、矿房式和长壁式采矿方法，只要矿层充分采掘，采掘的宽度

等于一侧矿柱到另一侧矿柱的间距。这里要指出的是，虽然地表上各点的垂直位移 S 均不相同，但是最大的下沉 S 是在盆地的中央。 S 的值不一定等于最大可能的下沉值 S_m ，后者只有当宽度达到临界值或超临界值 $+W_c$ 时才发生（图13-1）。

当地表下沉时会造成实质性的地表破坏。影响岩层移动大小和类型的因素有：矿层的厚度及性质、塌陷角、采掘宽度、覆盖岩层的深度和种类、岩层和地表的倾斜以及遗留在采空区中的支架的数量等。在欧洲人口稠密，因赋存太深和自然条件贫瘠而引起的开拓费用浩大，以及由于开采叠层和地表下沉严重，导致要求对下沉及其破坏效应进行综合的评价。因此积累了大量的经验资料以确定各种因素对地表下沉的作用，从而可以采用合理的采矿方法以减少破坏范围。虽然这方面的工作大部分是对长壁工作面而言的，但所得的数据同样也适用于有长工作面的充分采掘的房柱式采矿法。由于野外观测数目有限，加上部分回收矿柱造成的复杂因素，因此即使作最乐观的估计，设计房柱式采矿法也是冒险的。虽然如此，这里还将讨论几个能作定性评价的因素。减少下沉以防止地表破坏只是问题的一个方面，此外还必须使煤柱损失最小和对正常的工序干扰最小。欧洲集中注意于下沉问题的许多原由现在正在美国出现，从而推动了对下沉问题的研究。

13-1-2 临界面积

临界采掘宽度（实际上是临界面积）的概念在今天已毋庸置疑。设有一无限长的采区（长度超过开采深度的1.4倍实际上满足这个要求），对于一个给定的深度 D ，其采掘的临界宽度 W_c 为当在此宽度时地表下沉盆地的中央有最大可能的下沉值 S_m 。采掘的亚临界宽度（ $-W_c$ ）产生的下沉（ S ）小于（ S_m ），而超临界值 $+W_c$ 则造成较平坦的盆地，其最大值等于 S_m （图13-1）。

根据欧洲地表下沉观测站用精密水准测量得到的高程变化的数据可以画出 W 、 D 和 S 的关系图。为了能略去层厚 t 的影响，一般用下沉量和层厚的百分比（ S/t ）来表达盆地的最大下沉。

图13-2所示的下沉变化曲线适用于英国的条件〔1〕。这是英国国家煤炭局根据157个煤矿的观测资料所画出的平均下沉曲线。这157个煤矿的条件为：深度100~2600英尺，层厚2~18英尺，倾角25°以内，开采宽度100~1500英尺以及宽深比0.05~4.0。显然只要W/D比小于0.25，下沉（还有破坏）可以不加考虑。由图还可以见到：当W/D比为1.2时即达最大下沉值，对于全部崩落法，该值可以超过层厚的90%。继续开采时，只是增大盆地的平坦部分，而最大下沉值则保持不变。值得指出的是，在西宾夕法尼亚开采深313~345英尺厚84英寸的煤层时，地表下沉值仅为层厚的60%〔3〕。

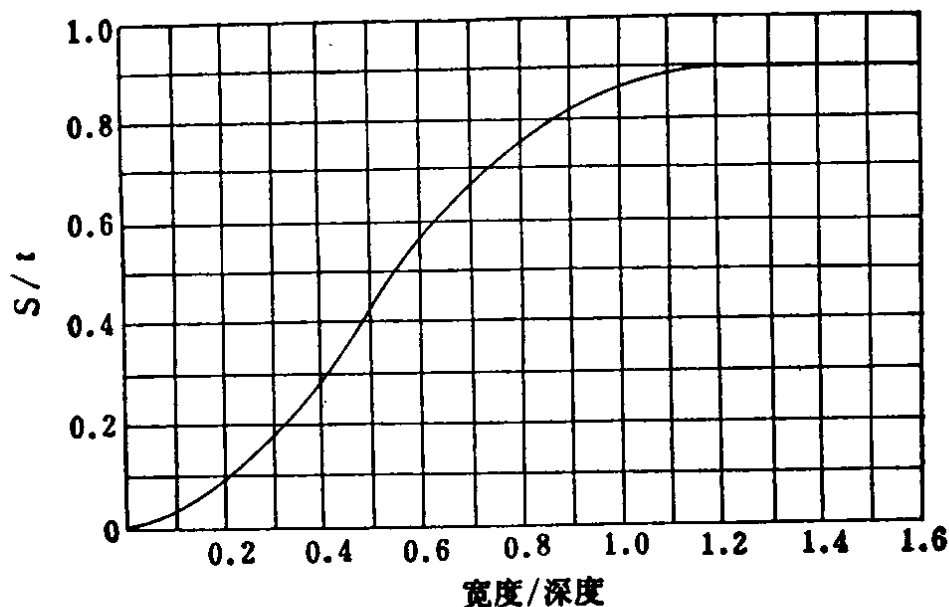


图 13-2 全部崩落法下沉和W/D的函数关系

这里只是根据需要肤浅地涉及到一些理论问题，但对其它因素也还有必要简单地提一提。当出现下沉盆地时，实际上地表上每个下沉点都有一个水平分量和一个垂直分量。因为盆地中各点移动值不同，但都朝向盆地的中心方向移动，则一部分地表受拉伸，另一部分地表受压缩（图13-3）。拐点或者叫做过渡点：当开采空间近于临界宽度时，位于采空区里面紧靠采场的一帮，其

下沉值为最大下沉值的一半 ($S/2$)；在亚临界宽度时，该点位于采场矿柱之上；在超临界宽度时，该点移向采空区。当宽深比 (W/D) 近于临界宽度一半 $W_c/2$ 时，产生最大的拉伸应变和压缩应变。水平线和由采场边缘到地表最大拉伸应变点的连线的夹角定义为“断裂角”。

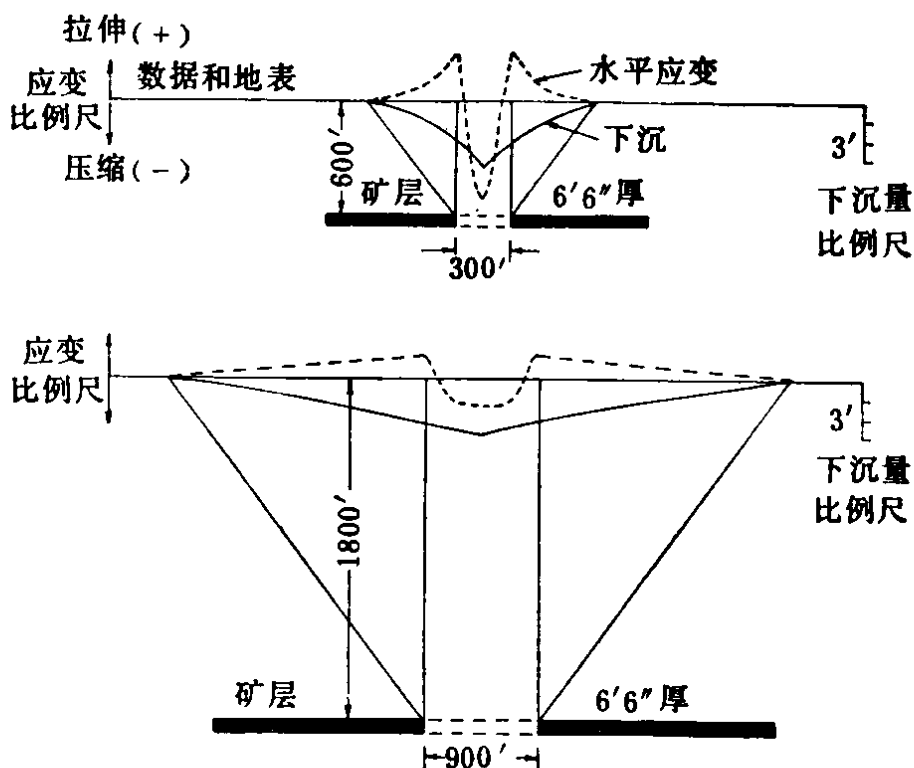


图 13-3 在相同条件下矿层深度对地层曲率和应变的影响^{〔1〕}

减少对建筑物的破坏，可以用限制建筑物的长度、采用特殊的柔性结构和设计能抵抗地层移动的刚性基础等方法^{〔1〕}。但是，采用合理的采矿技术以减小拉伸应变可能是更为重要的方法。在欧洲当开采叠层时采用一种叫协调开采的方法：将工作面错开排列使得拉伸应变和压缩应变相互抵消。即使当开采单一水平层时，也可将工作面错开以达到部分抵消的效果。

图13-3表明，单是 W/D 比还不是减少建筑物破坏要考虑的最重要的因素。在不同深度开采的两个同样厚度的矿层可以有同样的 W/D 比，亦即有同样的垂直下沉。然而由于开采浅层时的曲率较大，拉伸应变就较大，因此可以预期对于建筑物也有较大

的破坏作用。请注意观察图13-3，在其它条件相同时，开采较厚的矿层将造成较大的曲率使拉伸应变增加，从而使地表的破坏程度增大。这可以用直觉推理出来，也可以用数学加以证明。因此，可以肯定说，在开采近地表的厚矿层时，地表有最大的破坏危险。由于不认识到这一点，已经造成了许多严重的破坏情况，或者使得控制破坏的措施很不得力。但是却不能由此而推论，认为开采深处的薄层对地表没有危险而可以麻痹大意。

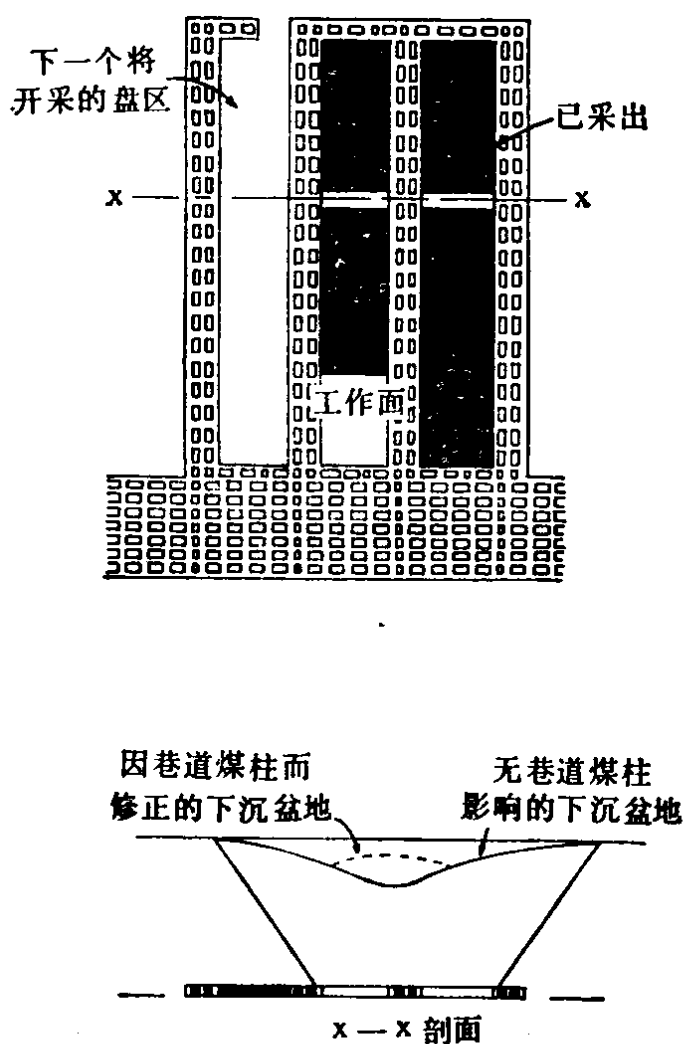


图 13-4 有中间巷道煤柱及无中间巷道煤柱时长壁盘区上的地表下沉盆地

以上考虑的是跨度中完全无支承的情况。实际上应该分析无支承区中起支承作用的小矿柱的作用。请看图13-4，这是中宾夕法尼亚的一种典型的长壁法。这里，主要开采层之一，其层厚约

44英寸，赋存在700~1000英尺的深处。宽600英尺的长壁工作面由两组巷道切割而成，每一组巷道包括中心距70英尺的三条18英尺宽的巷道。显然，开采第一个盘区时只达到亚临界宽度，下沉觉察不出来。而在开采第二个盘区时，则两个盘区就达到了临界宽度。但是由于与第一个盘区相隔的两条巷道煤柱形成了中间支承，因此地表没有达到最大下沉值。代替的是如图13-4所示的那样一条修正的曲线。

国外的研究表明，在盆地中央预期达到正常下沉量的40%。在中宾夕法尼亚经过连续观测至撰写本文时发现地表下沉缓慢均匀，在巷道煤柱上的下沉量已超过一英尺。但在这种小煤柱上到底下沉量能达到多少尚难预测，因为小煤柱的稳定性难于确定。在计算中至少要包括下列因素：深度、回采率、矿柱载荷、矿柱的高宽比、矿柱的大小及形状、矿石和围岩的强度特征、工作面的湿度和矿柱约束的程度等。至少反映了其中某些因素，建议取矿柱的最小尺寸至少为矿层深度的10%。

13-1-3 设计准则

如上所述，地表下沉能使地面结构物造成严重的破坏，因此坑硐设计是很关键的。否则，除了可能引起诉讼外，地面结构物的修缮和重建也会造成经济上的巨大损失。为了国家的利益，矿石既不能留下不采，也不能为了使地表得到妥善保护采取低效的控制措施而使回采率降低。由于造成破坏的地表移动和 S/D 成正比，而 D 是固定的，所以只有靠改变 S 。可以用两种方法来控制 S ：（1）永久支承整个地表，或者（2）使任何一个全部开采的区域或分区的尺寸限制在亚临界值的范围内。其中第一种方法几乎在美国专用，所以先讨论第一种方法。

因为房柱式采煤法在美国用得最多，曾有过几种煤柱支承的方式〔4〕。例如，当地面坡度小于5%和煤矿经营者负有财政责任时，则从被保护的结构物的15英尺处的一点向下引一 15° 的直线与煤层相交（图13-5）。在所圈的面积内，煤层的回采率限制在

50%，煤柱均匀布置，每个煤柱的最小尺寸为20×30英尺。这种支承的方式在宾夕法尼亚用于：（1）公众所使用的非商业性的建筑物；（2）居民住宅；（3）坟地。图13-6中所示的例子是在地面坡度小于5%时，在40×35英尺的地面结构物下400英尺深的煤层中留50%面积的煤柱支承地表的情况。如果同样的结构物位于5%或更大的坡度上，则部分开采的面积在下山方向还要增加，增加的长度等于坡度（%）乘上D（英尺）。拿上面的例子来说，如果地面的坡度为15%，朝结构物右面倾斜，则50%开采的面积将增加到346×281英尺。因为覆盖岩层有向开采区域往下滑动的倾向，所以，地面倾斜时的附加因素是必须的。

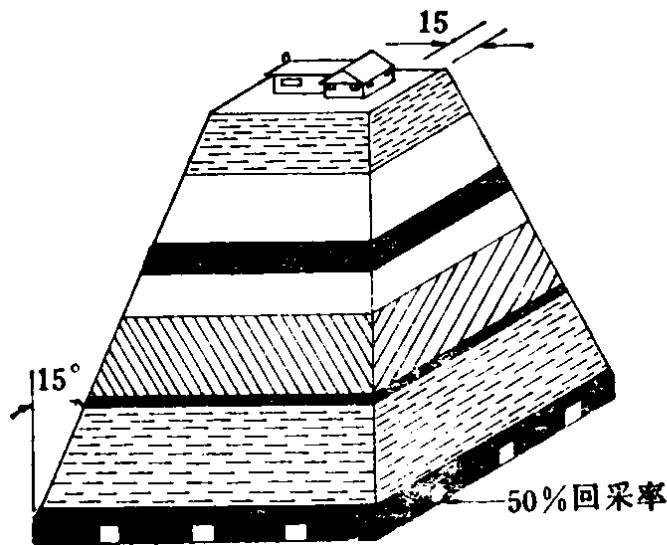


图 13-5 现行的保护地面结构物的方法〔4〕

然而，在宾夕法尼亚，如果经营者的财政报告未经批准，或者他们没有提出法律所要求的契约或抵押，那就要求用更大的安全系数。在这种情况下，要从地面结构物125英尺外的起始线引垂线往下与煤层相交，并且所圈的面积不得采动。此外，还要在起始线处引另一条表示25°塌陷角的直线与煤层相交。这在中间煤柱周围的一圈可以回采50%，其余50%的面积以均匀留设的煤柱支承，煤柱的尺寸不小于20×30英尺。

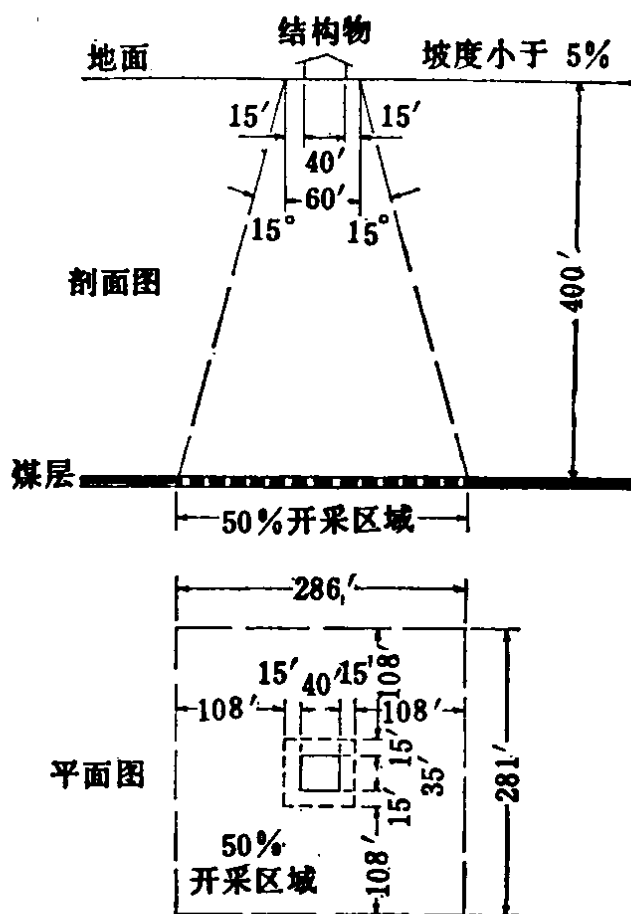


图 13-6 保护某一结构物所需支承面积的示例⁽³⁾

对于第一个方法，角度达到 15° 就不合适了，特别是因为塌陷角定为 35° 而在 25° 内有破坏作用。此外，这个办法并没有反映开采浅部厚层时可能发生更大的破坏。无论如何，用这个办法时地面结构物是有过破坏情况发生的。上面已经说过，对于浅部厚层来说，地面结构物将受到最大的拉伸应变。有的地表下沉工程师认为，在这种情况下，如果一开始就全部回采，则下沉可能更为均匀而使地面结构物蒙受的损害反而较小。

这种设计的缺点是不能用煤柱来提供永久性的支承。众所周知，岩石，特别是煤，有强烈的随时间而破裂的特性。所以，虽然在开始时矿柱能起适当的支承作用，但是随着逐渐破坏，矿柱实际上起不到支承作用。即使矿柱有足够的强度不致破坏，但其顶盘或底盘也可能脱落下来，结果还是起不到支承作用。因此，

由于对矿柱作用的本质摸不清楚，所以采用均匀布置矿柱的设计，其合理的回采率多不可靠。

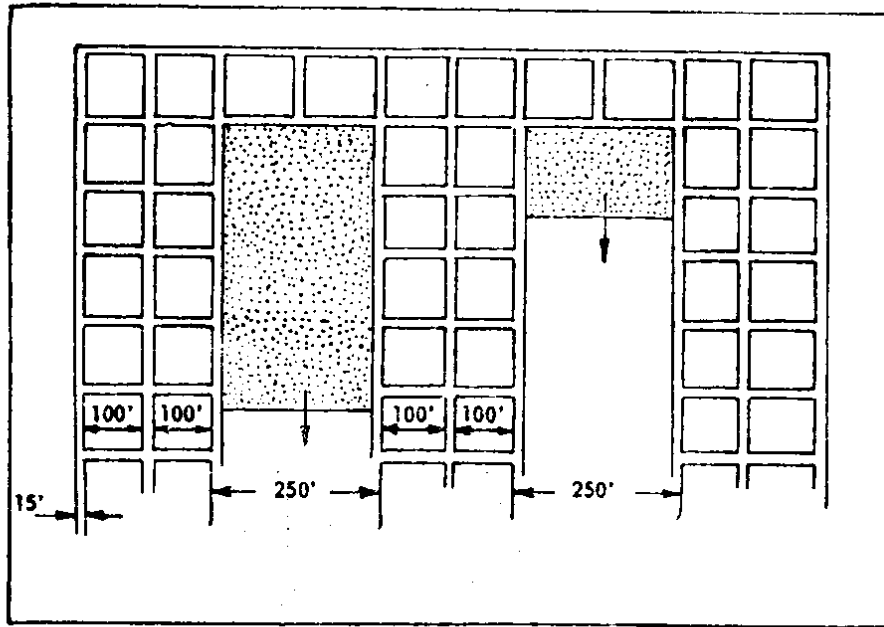


图 13-7 支护塌陷盘区柱式采矿法

上面所讲的并没有涉及到控制下沉的措施对生产循环的影响。在西南宾夕法尼亚和西弗吉尼亚北部的煤矿中所用的匹兹堡分区采煤法，要求必须建立和保持一条良好的煤柱线。否则将产生过高的应力使煤柱线破坏，而整个盘区将因挤压而报废。即使没有达到这样严重的程度，但是无规则留在采空区中的煤柱也会对生产造成恶劣的影响，妨碍运输均衡和其它辅助工作的进行。因此，这个方法有严重的副作用，且不谈超出本节范围的其它因素，诸如地下火灾等。

由于第一种方法有上述一些缺点，所以限制全部采掘规格的第二种方法正在得到推广。由图13-2可见，当 W/D 比为 0.25 时下沉效应几乎可以略去不计，因为这时在地表形成的是一个实际上无斜率无应变的浅平的下沉盆地。用一种划分盘区开采的方法就可达到这一目的，盘区的 W/D 比等于 0.5，盘区间用适当尺寸的大型支承矿柱隔开。这种方法已用于开采深 200~3000 英尺、

厚度10英尺以内的煤层、钾盐层和锆矿层〔5〕。盘区可用长壁法或房柱法全部开采，平巷可以开凿在支承矿柱内。该法的回采率可达60~70%。如图13-7，对于一深1000英尺的矿层用两组巷道将其切割成盘区，每组巷道包括中心间距为115英尺的三条宽度为15英尺的巷道。盘区用长壁工作面或房柱法来开采，用100×100英尺的煤柱来支承。当然，如果覆盖岩层中有硬厚岩层，则跨度可以超过250英尺。但这就要根据实践来决定，因为到目前为止，岩石力学的进展尚未能提供合理设计的依据。人们还认为，在某种条件下，可能250英尺宽的长壁盘区对于充分冒落而言还嫌太小，结果反而会因为悬臂载荷过大压坏支柱甚至还可能损失工作面。同样，一个250英尺宽的开采盘区也证明不能提供良好的冒落矿柱线，因而可能发生顶底板的问题。虽然如此，到1970年为止，用这种盘区柱式采矿法的地方都获得了良好的效果，这种方法的潜力应当进一步加以发掘。其优点是：

1. 能达到较高的回采率，且无有害的影响。
2. 用较大的支承矿柱因而减缓矿柱随时间的破坏和减小地表下沉。
3. 有选用房柱法或长壁法的余地。
4. 可以在较大的不同深度范围内应用。

13-1-4 结论

用较大较稳定的矿柱作支承，为盘区柱式采矿法提供了较为合理的设计准则。虽然在美国用英国的经验数据有危险性，但在获得当地的观测数据和提出另外的看法之前，仍可用作参考。实地研究应当包括，在长壁和房柱上面的地表上进行水平和垂直移动的观测，并将地表盆地和采空区的几何形状与井下开采的时间进行对照。同时，除了要记录覆盖岩层的深度和构造外，还要记录覆盖岩层的全部地质和岩石性质的数据。只有在收集和分析了这些资料后，才能比较合理地进行采掘设计，使得在减少各工序间干扰和减少煤损的同时尽可能减少地表下沉的破坏。

13-2 协调方法——初步分析和整体分析

L. 艾德勒

地下结构物的设计和管理可能是一个冗长和复杂的程序。在进行全面深入的研究之前，有必要先进行初步分析以明确各种方案的适用范围和提出它们的发展趋向。为此，本节特提出一个经过理论和实践检验的简化程序。

继初步分析之后，还要对结构的各个构件进行深入的研究，详细的分析请参看有关顶板、矿柱、人工支架等专门章节。在对各构件分析之后，再将结果综合起来以作整体分析。

整体分析首先是对单个坑硐（即单个平硐和硐室）和组合坑硐（以采掘平面图表示）的稳定性进行评价。对于单个坑硐，应该着重对以时间为变数的载荷转移机理进行分析，特别是对顶板，也要对两帮和底板进行分析。文中对底板进行稍为深入的讨论，从底板的沉降到失去承载能力为止。对于组合坑硐的相互作用，主要是讨论承载能力和载荷在结构各部分间的转移。为此，文中分析了弹性基础梁并讨论了可能应用曲梁、屈服柱、空间刚架的问题，而且随着复杂程度的增加也考虑了计算机程序。

对于所有的情况，都有一个因岩石风化、蠕变、成散粒和膨胀引起的与时间有关的过程。此外，采矿方法如用前进还是后退式开采时，都会使结构随时间产生显著的变化。

13-2-1 顶板控制初步分析

顶板控制的初步分析，必须广泛地考虑与顶板发生闭合或下沉时的坍塌或冒落以及移动等有关的各种可能的问题。一旦合理的数量级和发展趋向确定以后，就可以进行具体的分析以确定正确的数值，得到安全和经济的解答。一个适用的初步分析，不但岩层控制专家需要，而且进行日常生产或计划的工程师也需要。初步分析除了要有充分根据外，还必须简明、平衡、广泛而又目

的明确。对于采矿来说，目的明确即是除了要考虑一般的稳定性外，还要考虑在崩落时控制的可能性。生产循环对顶板的短时效应、风化以及瞬时蠕变等，都应当仔细加以研究，因为这些都对顶板控制尤其有关。

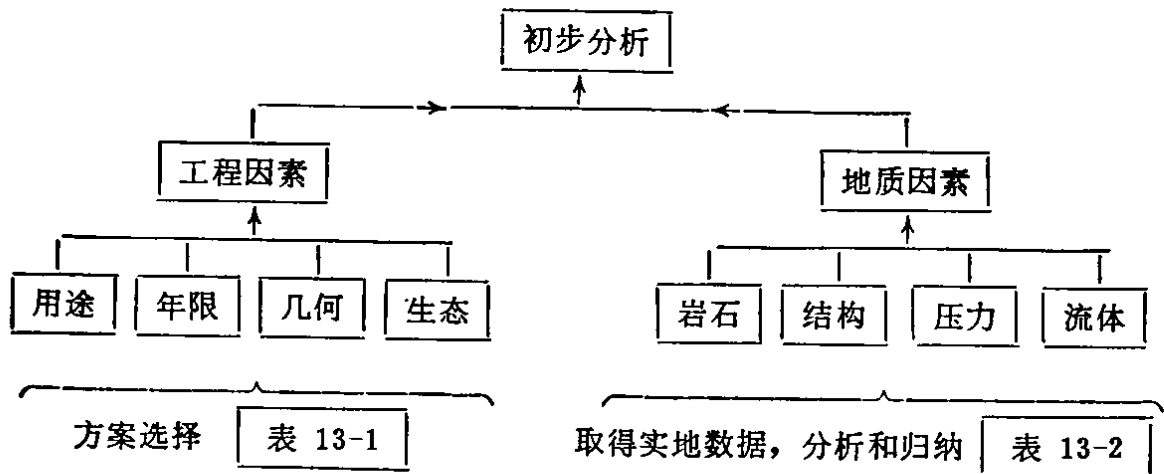


图 13-8 初步分析流程图

对于一定的地点或区域必须考虑它的资源潜力和与之有关的工程能力。还有两个基本方面要加以评价：（1）所需的工程方面的因素和（2）有关的地质特征。图13-8所示为这两个基本方面，图中用图解的方式总结了初步分析的步骤和过程。其中包括了结构分析的先决条件（载荷，材料和结构的几何条件）有的地方稍有重复。

下面将要论述各个方面的发展，本来可以用高深的方法来说明，但是这里只用较简单的方法来说明。其目的是强调简单的概念，使得所有的步骤能为采矿工程师所掌握，并且避免表面上的精确，这种精确原非作初步研究所要求的探讨目标。为此，将广泛地利用图表来说明问题，文中所引用的参考资料是专业所采纳的最基本的资料，而不是为了指明原文的出处。

虽然这里的重点是放在顶板控制上，但是对其它结构单元也同样进行讨论，以期得到一个更为全面的适用于地层控制的初步分析。

工程因素

坑硐的用途和年限——在表13-1中所列的对于单个坑硐的各