

地下空区稳定性的相似模拟研究

Similar imitation research on ground empty slope stability

万虹

(武汉工业大学资源与环境工程系, 430070)

文 摘 提出了提高地下永久性大面积采空区稳定性的新方法, 即把原来沿走向均匀布置的矿柱改为不均匀布置。文中提出一套稳定性指标, 并结合具体矿山的空区稳定性研究进行了模型实验, 验证了新方法的可靠性。

关键词 地下开采, 采空区, 稳定性研究。

中图法分类号 TU 456

作者简介 万虹, 男, 1956年生, 1986年在武汉工业大学获工学硕士学位, 现为武汉工业大学副教授。主要从事岩土力学、采矿工程、计算机应用方面的研究和教学工作。

Wan Hong

(Wuhan University of Technology, wuhan, 430070)

Abstract This paper puts forward a new method of enhancing large area empty slope stability. This method changes pillar distribution from regular to irregular, raising a sets of stable index, and model tests are carried on to testify the reliability of the new method.

Key word ground empty slope, stability, simulation test.

1 前 言

大面积采空区的稳定性是采矿实践中常遇到的问题。影响稳定性的因素很多, 研究它们对空区稳定性影响的最终成果在很大程度上也仅限于“评阶”而不是改善或提高空区的稳定性。这是因为影响稳定性的因素大部分都是客观存在的, 很难或不可能改变。如地应力大小和方向; 围岩的结构构造和岩性; 地下水的状况; 空区中矿柱的大小和分布。本文试图从新的角度探讨稳定性问题, 即从上述因素中可以通过设计人为改变的因素——矿柱的分布这个角度。并结合对某矿采空区稳定性的研究, 以期达到对矿柱分布的稳定效应有一个正确的认识。

2 矿山概况

某矿矿体沿走向长约 1000m, 沿倾向长 600 ~ 700m, 平均厚度 15m, 倾角 $6^\circ \sim 12^\circ$ 。对这样一大块缓倾斜、厚度尺寸远小于平面尺寸、以层状赋存的扁平矿体, 矿山一直采用房柱法开采。矿房和矿柱垂直走向布置, 矿柱宽度 6 ~ 8m, 高度 10 ~ 12m, 矿房顶部留有 2 ~ 3m 护顶柱。采后矿柱不回收, 矿房不充填。矿体分阶段由上至下开采, 阶段之间留有 10 ~ 15m 的连续矿柱, 已回采完的空区约有 8 万 m^2 。空区在 10 多年中不断形成, 至今仍然保持稳定。

因为矿区地表有农田、河流和城镇, 不出现允许塌陷; 另一个方面, 由于开采成本的限制, 空区的地压主

要由留下的矿柱承受。这样就要求解决这样两个问题: ①对现有矿柱参数下的空区稳定程度作出评价, 矿柱系统的强度储备还有多大? ②能否在保持稳定性的前提下, 进一步提高回收率, 改善矿山开采的经济效益?

3 解决问题的新思路

矿柱的分布是影响空区稳定性诸因素中可以通过设计加以改变的一个重要因素。矿柱的分布可分为沿走向、沿倾向以及沿厚度三种。由于一般矿体的走向较长, 因此矿柱沿走向的分布对空区稳定性影响是决定性的。

矿山现有的矿柱系统是沿走向等距离、等宽度地均匀分布, 每 12m 一个矿柱, 每个矿柱的宽度为 6 ~ 8m, 按照常规的方法, 要想进一步提高稳定性, 只有增大矿柱宽度, 或是矿房跨度; 而要进一步提高回收率, 则只有减小矿柱宽度, 增大矿房跨度。回收率和稳定性不能同时兼得, 一个必须为另一个作出让步。因此, 要满意地解决问题, 取得较好的综合效益, 必须寻找新的途径。

按照系统理论, 一个系统的稳定性不是这个系统各部分稳定性的代数迭加或平均, 而是取决于该系统中稳定性最差的那个部分, 这个原理也适用于矿柱系统。对于一个由许多矿柱构成的地压支撑系统来说,

到稿日期: 1997 - 12 - 29.

该系统的稳定性是由一个或几个应力集中最大, 稳定性最差的矿柱决定的。

大面积采空区形成以后, 顶板和上覆岩层的变形和下沉在整个空区面积上 (尤其是沿走向) 是不均匀的, 然而, 矿山现有的维护空区稳定性的设计思想是将矿柱沿走向均匀分配。在这种情况下, 空区中部下沉位移大, 边界下沉位移小; 空区中部矿柱的载荷大, 应力集中程度高, 边部矿柱载荷小, 应力集中程度低。因此, 上覆岩层容易首先压坏一部分中部矿柱, 破坏后的矿柱的载荷转移到邻近的矿柱上, 使邻近的矿柱应力增大, 当超过矿柱强度时, 又使它发生破坏。如此反复, 矿柱系统以多米诺骨牌方式在较短时间内逐批破坏, 最后整个空区上覆层失去支撑而大面积冒落陷。

上述分析给出这样的启示: 既然空区稳定性是由中部少数几个稳定性系数最小的矿柱所控制, 那么, 提高中部矿柱的稳定性, 就能提高整个空区稳定性。若减小边部矿柱的面积, 增加中部矿柱的面积, 矿柱系统承受的总载荷不变, 虽边部矿柱应力增加, 稳定性系数下降, 中部矿柱应力减小, 稳定性系数提高, 但是整个空区的稳定性在回收率不降低甚至有所提高的情况下得到提高。

为了实施上述设想, 笔者提出了一套稳定性指标, 并进行了模拟试验。

4 稳定性指标

空区的稳定性, 可以看成材料和结构强度大于应力场的程度^[5,4]。稳定性指标应能定量反映这两个方面的状态, 同时在试验技术上能被测试出来。基于这样的看法, 本文提出如下4个测试和分析时使用的稳定性指标。

1) $\Delta\sigma$ 。

该指标为矿房回采后, 所有矿柱中的应力增量的平均值, 代表了矿柱的应力集中的平均程度: $\Delta\sigma$ 增大, 在没有超过矿柱的强度极限时, 意味着矿柱中的应力普遍增大, 矿柱的强度储备普遍减少, 因而矿柱系统的稳定性降低; 反之, 矿柱系统的稳定性提高。所以, 该指标从矿柱材料的角度反映了空区的稳定性。

2) $\Delta S_{\text{下}} - \Delta S_{\text{上}}$ 。

$\Delta S_{\text{下}} - \Delta S_{\text{上}}$ 指矿房回采后, 矿房中部直接顶板 (上覆岩层) 中的一排位移侧点的位移平均值。 $\Delta S_{\text{下}}$ 与 $\Delta S_{\text{上}}$ 的差值反映了空区上部一部分覆岩的平均变形。由于矿体和围岩都是呈层状赋存, $\Delta S_{\text{下}} - \Delta S_{\text{上}}$ 所代表的变形中很大一部分来自岩层层面的分离和水平解理

等结构面的扩展, 仅有一小部分是岩体的弹塑性变形。 $\Delta S_{\text{下}} - \Delta S_{\text{上}}$ 的或大或小, 意味着离层和结构面扩展或剧烈或轻微。因离层和结构面扩展使岩体的整体性降低, 造成稳定性下降, 所以该指标从结构的角度反映了上覆岩层的稳定性。

3) $\sum (\Delta\sigma_i - \Delta\sigma)^2$ 。

该指标为矿房回采后每个矿柱的应力增量与平均应力增量的偏差平方和。该指标反映了矿柱应力集中程度的不均匀性, 这主要取决于矿柱的刚度和不同刚度的矿柱在采空区中沿走向的位置, 该指标从结构的角度反映了矿柱系统的稳定性。

4) $\sum (\Delta S_{\text{下}i} - \Delta S_{\text{上}})^2$ 。

系直接顶板中各测点的位移与平均位移的偏差平方和。由于顶板位移的不均匀主要意味着矿柱应力增量的不均匀, 所以该指标和第三指标一样, 也反映了矿柱在结构上的稳定性。不同的是, 它还能间接的反映矿房顶板的稳定性。

5 相似材料模型试验

为了检验上述设想, 并找出非均匀分布的最佳参数, 本文选取细沙、石膏粉、滑石粉、云母片和硼酸等组成模拟材料, 通过岩石力学性能实验和相似材料配比实验, 多次逼近, 找到与原型岩石对应的配比, 其性质基本满足相似准则^[1]。为了提高可靠性, 又与原模型做了对比实验, 从中可知, 模型实验的边界条件的相似, 层面的模拟, 强度和几何条件的相似都达到工程应用的精度^[5,4]。

由第4节可知, 降低第1)指标能使空区稳定性提高, 但要增加矿石损失; 降低第2), 3), 4)指标, 只需调整空区中矿柱分布的空间位置和参数就能改善矿柱系统受力均匀性, 从而提高其稳定性, 同时也能提高矿石回收率。因此, 模型试验主要着眼于调整矿柱的空间分布以及参数。

因为考虑到该矿井下6m等宽矿柱系统至今仍然稳定, 而爆破松动带的存在矿柱又不能够太窄, 所以将矿柱的宽度选定在4~9m范围内变动, 变动分三个位级。空区中央的矿柱宽而两边窄, 由中央向两侧依次递减的幅度为1m, 那么三个位级的矿柱宽度分别为: 位级1-4:5:6:6:7; 位级2-5:6:7:7:8; 位级3-6:7:8:8:9。矿房跨度也作为一个因素, 同步变化三个位级: 14m, 13m, 12m。用 $L_9(3^4)$ 正交表安排上面两个因素, 就构成9套矿房矿柱结构参数, 通过模型试验考察4个稳定性指标, 再计算矿石回收率。试验结果详见表1所示。

表 1 试验参数及结果
Table 1 Experimental parameter and results

试验号	因 素				指 标				回收率 (%)
	A	B	C	D	$\overline{\Delta\sigma}$	$\overline{\Delta S_{\text{下}}} - \overline{\Delta S_{\text{上}}}$	$\sum (\Delta\sigma_i - \overline{\Delta\sigma})^2 \times 10^4$	$\sum (\Delta S_{\text{下}i} - \overline{\Delta S_{\text{上}}})^2$	
1	1 (4)	1 4:5:6:6:7)	1	1	0.301	294	2	3660	74.1
2	1	2 5:6:7:7:8)	2	2	0.294	278	36	9284	70.7
3	1	3 6:7:8:8:9)	3	3	0.279	279	111	11999	67.8
4	2 (3)	1	2	3	0.285	221	90	11320	72.6
5	2	2	3	1	0.259	211	32	6615	69.1
6	2	3	1	2	0.269	224	81	8147	66.0
7	3 (2)	1	3	2	0.256	1443	32	2505	71.0
8	3	2	1	3	0.246	149	63	9013	67.4
9	3	3	2	1	0.151	153	36	7353	64.2
$\overline{\Delta\sigma}$	I	0.874	0.855	0.803	0.711	$T1 = 2.34 \quad T2 = 1952 \quad T3 = 483 \quad T4 = 69895$ $A \cdot B \cdot A \times B \quad A_2 \cdot B_3$			
	II	0.800	0.799	0.703	0.819				
	III	0.666	0.686	0.807	0.810				
	R	0.208	0.169	0.077	0.108				
$\overline{\Delta S_{\text{下}}} - \overline{\Delta S_{\text{上}}}$	I	851	658	667	658	$A \cdot A \times B \cdot B \quad A_3 \cdot B_1$			
	II	656	638	652	645				
	III	445	656	633	649				
	R	406	20	34	13				
$\sum (\Delta\sigma_i - \overline{\Delta\sigma})^2$	I	149	124	146	70	$A \times B \cdot B \cdot A \quad B_1 \cdot A_1$			
	II	203	131	162	149				
	III	131	228	175	264				
	R	72	104	29	194				
$\sum (\Delta S_{\text{下}i} - \overline{\Delta S_{\text{上}}})^2$	I	24943	17485	20802	17627	$A \times B \cdot B \cdot A \quad B_1 \cdot A_3$			
	II	26082	24912	27956	19936				
	III	18870	27498	21119	32332				
	R	7212	10013	7136	14705				

6 结果分析

1) 从表 1 $\overline{\Delta\sigma}$ 的栏中可以看到, $R_A > R_B$, 这说明 A (跨度) 的变化对 $\overline{\Delta\sigma}$ 的影响最大, B (宽度) 次之, 而其交互作用 $A \times B$ 的影响最小。因此因素重要性次序是 $A \cdot B \cdot A \times B$ 。又因为 $\text{III } A < \text{II } A < \text{I } A$, $\text{III } B < \text{II } B < \text{I } B$, 即随着 A 的下降或 B 的升高, $\overline{\Delta\sigma}$ 的位级平均值下降, 稳定性提高, 所以对稳定性最好的位级配合是 $A_3 \cdot B_3$ 。

2) 从表 1 $\Delta S_{\text{下}} - \Delta S_{\text{上}}$ 的栏中可以看到, $R_A > R_{A \times B} > R_B$, 因此因素的重要性次序是 $A \cdot A \times B \cdot B$ 。又因为 $\text{III } A < \text{II } A < \text{I } A$, A 的最好位级为 A_3 。 $A \times B$ 的最好位级要根据指标栏中使 $\Delta S_{\text{下}} - \Delta S_{\text{上}}$ 最小的位级配合确定, 因此选定 $A_3 \cdot B_1$ 为对稳定性最好的位级配合。

3) 从 $\sum (\Delta S_{\text{下}i} - \overline{\Delta S_{\text{上}}})^2$ 的栏中可看到, $R_{A \times B} > R_B > R_A$, 另外, 从表 1 $\sum (\Delta S_{\text{下}i} - \overline{\Delta S_{\text{上}}})^2$ 的栏中可以看到, $R_{A \times B} > R_B > R_A$, 同样, 可以确定对稳定性最好的位级配合分别为 $B_1 \cdot A_1$ 和 $B_1 \cdot A_3$ 。

将上面各指标和回收率的最好位级配合列成表 2。可以看到, 各指标的因素重要性次序略有不同, 对最好位级配合的要求也有矛盾, 但是反映稳定性的 4 个指标中有 3 个要求 A_3 和 B_1 , 因此对稳定性最好的位级配合为 $B_1 \cdot A_3$ 。这与回收率的要求有出入; 因为本文主要考虑的是稳定性问题, 对回收率仅仅要求它不比原来均匀分布时下降。但 $B_1 \cdot A_3$ 的回收率 (71%) 已经比矿山原有的回收率 (66%) 有提高, 所以综合最好位级配合选为 $B_1 \cdot A_3$ 。

表 2 各项指标与回收率要求的位级配合

Table 2 Rank coordination of stability index and rate of recovery

指标	$\overline{\Delta\sigma}$	$\overline{\Delta S_{\text{下}}} - \overline{\Delta S_{\text{上}}}$	$\sum (\Delta\sigma_i - \overline{\Delta\sigma})^2$	$\sum (\Delta S_{\text{下}i} - \overline{\Delta S_{\text{上}}})^2$	回收率
最好位级配合	$A_3 \cdot B_3$	$A_3 \cdot B_1$	$B_1 \cdot A_1$	$B_1 \cdot A_3$	$B_1 \cdot A_1$

表 3 方差分析的计算值

Tbale 3 Calculated values of $D(\xi)$ analysis

各项计算	$\overline{\Delta\sigma}$	$\overline{\Delta S_{\text{下}}} - \overline{\Delta S_{\text{上}}}$	$\sum (\Delta\sigma_i - \overline{\Delta\sigma})^2$	$\sum (\Delta S_{\text{下}i} - \overline{\Delta S_{\text{上}}})^2$
S_A	0.0074	27487	936	10021288
S_B	0.0049	81	2253	18011288
S_C	0.0013	194	141	10861829
S_D	0.0024	30	6345	41692147
$S_{\text{总}}$	0.016	27791	9674	80587253
$S_{A \times B}$	0.0037	224	6486	52553976
F_A	2	2	2	2
F_B	2	2	2	2
$F_{A \times B}$	4	4	4	4
F_C	4	6	2	2
S_A	0.0037	13744	468	5010644
S_B	0.0025	41	1127	9005994
$S_{A \times B}$	0.009	56	1622	13138494
S_C	0.0009	51	468	5010644

4)方差分析。将表 1 的结果按方差分析的要求计算后列成表 3,将各 F 值与临界值 (考虑到模拟试验的平均误差范围,选取显著性水平 $\alpha = 0.25, 0.1$) 比较,就得到各指标的因素重要性次序和最好位级配合。将表 3 和表 2 对照,可知方差分析的结果与直接分析的结果基本一致,既综合最好位级配合为 $B_1 \cdot A_3$ 。

7 结 语

- 1)试验表明,本文提出的研究思路是合理可行的。
- 2)矿房跨度和矿柱分布的交互作用对应力和位移的均匀性影响最大。
- 3)试验表明,原有矿房矿柱参数虽能保持空区稳定,但稳定性不高 (和矿柱非均匀分布相比)。本文提

出的 $B_1 \cdot A_3$ 参数组合,即矿房跨度 12m,矿柱宽度 4:5:6:6:7 (m),使空区稳定性大大提高,同时回收率也提高了 5%。由于矿床储量较大,经济效益将十分可观。

参 考 文 献

1 徐 挺.相似理论与模型试验.北京:中国农业机械出版社,1982.

2 于学馥等.地下工程围岩稳定分析.北京:煤炭工业出版社,1983.

3 万 虹.运用正交法寻找某地下岩层相似模拟材料的研究.系统工程理论与实践,1997 4):101.

4 万 虹.Research of the Colloid materials for slope stability simulation.见:第九届国际表面和胶体科学大会论文集.1997 4):122.