

# 盐腔形成过程对覆岩影响的相似材料模拟实验研究

任松<sup>1,2</sup>, 姜德义<sup>2</sup>, 刘新荣<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 应用相似材料模拟实验研究了盐腔成腔过程中上覆岩层移动、变形和破坏规律, 上覆岩层损伤演化过程及规律, 上覆岩层的层面效应及分层特性, 上覆岩层破碎岩体尺寸特性等内容。通过这些研究, 获得了上覆岩层在盐腔形成过程中的损伤演化方程、上覆岩层因岩层性质不同而产生的分层特性、上覆岩层移动变形过程中表现出来的层面效应以及岩层破碎岩体尺寸与岩层力学性质的关系。为进一步弄清开采沉陷的微观机理和建立新的预测模型打下了基础。  
**关键词:** 相似材料模拟实验; 损伤演化方程; 尺寸特征; 分层特性

**中图分类号:** TD824 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2008)08-1178-06

**作者简介:** 任松(1975-), 男, 四川营山人, 博士, 主要从事采矿与岩石力学研究。E-mail: rs\_rwx@tom.com。

## Model test on effect of salt rock cavern on overburden

REN Song<sup>1, 2</sup>, JIANG De-yi<sup>2</sup>, LIU Xin-rong<sup>2</sup>

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory of Southwest

Resources Exploitation & the Environmental Disaster Control Engineering of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The movement, distortion and breaking rules of overburden, the evolution of damage in overburden, the bedding influence and the size characteristics of broken rock were studied by model tests. The evolution equation of damage in overburden was obtained. The bedding had great effect on the subsidence. Because of the sandwich of terranes, it was different when overburden was distorted. The size of broken terrane was related to the rock strength. The scope of influence could be determined from mechanical parameters of terrane, and it was the basis for finding the micro-mechanism and the new predicting model of mining subsidence.

**Key words:** model test; evolution equation of damage; size characteristic of broken rock; bedding influence

## 0 引言

相似材料模拟实验自 1937 年在前苏联全苏矿山测量科学研究院首次用于研究岩层与地表移动问题至今, 作为室内研究的一种重要手段, 具有研究周期短、成本低、成果形象直观等特点, 特别是能对影响因素进行重复分析, 已被广泛用于矿山开采岩层移动规律研究中<sup>[1-2]</sup>。本文应用相似材料模拟实验, 对盐腔形成过程中上覆岩层的变形破坏规律进行研究, 主要研究了上覆岩层损伤演化过程及规律, 上覆岩层移动、变形和破坏规律, 上覆岩层的层面效应及分层特性, 上覆岩层破碎岩体尺寸特性等内容。

## 1 实验方案

### 1.1 模型选择

采用长 1.5 m, 宽 0.3 m, 高 1.2 m 的转体实验台,

做平面应变相似材料模拟实验, 见图 1。

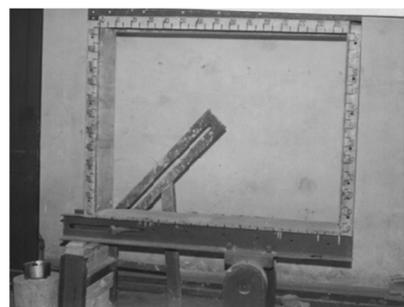


图 1 转体模型实验台

Fig. 1 Rotational test table

模型的载荷主要是自重, 为了全面了解上覆岩

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50334060); 国家自然科学基金项目(50674108); 国家创新研究群体基金项目(50621403)  
收稿日期: 2007-07-20

层的移动、变形和破坏过程, 本文模拟全高, 模型不用施加外力。实验几何比  $a_1 = 1/300$ ; 时间比  $a_t = \sqrt{a_1} = \sqrt{\frac{1}{300}} \approx \frac{1}{17}$ ; 对于沉积岩层, 其重度差异并不大, 取其平均重度  $\gamma_p = 2.5 \text{ g/cm}^3$ , 容总比  $a_\gamma = 0.6$ ; 强度比  $a_q = a_\gamma a_1 = 0.6/300 = 1/500$ ; 模型模拟高度  $1.2 \times 300 = 360 \text{ m}$ ; 模拟长度  $1.5 \times 300 = 450 \text{ m}$ 。模型共 14 个自然分层, 从上到下依次排序, 其中第 14 层为底板岩层, 第 13 层为矿物层 (岩盐), 共 12 层上覆岩层, 各岩层的性质分布如表 1。

表 1 各岩层物理力学性质

Table 1 Material properties of the model

层号	密度 /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	$\sigma_c$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	拉压比	厚度 /m
1	2.5	119	10	0.084	21
2	2.5	76	10	0.132	24
3	2.5	136	10	0.074	42
4	2.5	134	14	0.104	18
5	2.5	63	10	0.159	15
6	2.5	113	11	0.097	18
7	2.5	123	15	0.121	15
8	2.5	165	19	0.115	51
9	2.5	82	11	0.134	9
10	2.5	63	14	0.222	21
11	2.5	113	11	0.097	30
12	2.5	123	10	0.081	21
13	2.5	23	1	0.043	30
14	2.5	123	10	0.081	45

### 1.2 测量系统

实验中测量的数据有: ①盐腔形成过程中岩层力学参数及岩层损伤情况; ②上覆岩层的位移及破坏情况等。

#### (1) 岩层力学参数及岩层损伤测量

本文采用声波测量方法来对开采过程中岩层的力学参数及岩层的损伤演化情况进行测量。使用 EMS-2 型工程多波地震仪 (图 2), 测定每次开采后岩层的纵波波速和横波波速, 然后解算出岩层的力学参数和损伤量。



图 2 EMS-2 型工程多波地震仪

Fig. 2 EMS-2 seismograph

### (2) 岩层位移测量方法及原理

实验中采用数字近景摄影测量方式。这种方法是一种非接触式三维测量方法, 可以克服传统位移测量法的缺点, 并具有测量精度高, 方便易行等优点<sup>[3-4]</sup>。

### 1.3 材料配比实验

相似材料模拟实验用河砂作为骨料, 石灰、石膏为胶结物的混合材料作为相似材料。为了获得材料强度特性, 在实验室做了材料的抗拉、抗压强度及重度实验。通过对千余块试件进行测试, 获得了砂胶比 (砂: 石灰石膏胶结构) 从 4:1 至 15:1 的抗拉、抗压强度。

实验结果表明: 随着砂胶比的增大, 相似材料的强度减小, 拉压比有加大趋势; 在砂胶比一定的情况下, 调节胶结物的比例也可改变材料强度; 相似材料成型以后, 随着放置时间的增长, 含水率降低, 力学性质随之变化见图 3, 4。

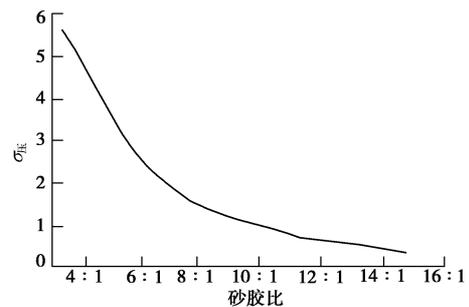


图 3 砂胶比对抗压强度的影响

Fig. 3 The relationship between compressive strength and proportion of sand and binding

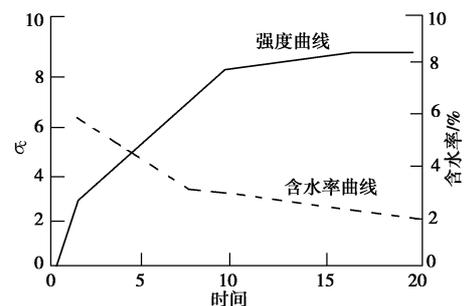


图 4 相似材料强度与含水率的关系

Fig. 4 The relationship between strength and moisture of material

根据配比实验和模拟的岩层对象, 可以得到模型实验各岩层材料配比, 见表 2。

配比号的含义: 后面两位是黏结物石灰和石膏的比例, 分别用  $h$  和  $g$  表示, 前面的位数是骨料砂的含量, 用  $s$  表示。那么, 混合物总份数为  $s+h+g$ , 其中  $h+g=1$ 。

表2 模型实验材料配比表

Table 2 The proportions of materials in model test

层号	厚度/cm	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	配比号	总重/kg	砂/kg	石膏/kg	石灰/kg	水/kg
1	7	1.5	1082	47.25	42.95	3.44	0.86	5.25
2	8	1.5	1246	54.00	49.85	1.66	2.49	6.00
3	14	1.5	982	94.50	85.05	7.56	1.71	10.50
4	6	1.5	428	40.50	32.40	1.62	6.48	4.50
5	5	1.5	1028	33.75	30.68	0.61	2.45	3.75
6	6	1.5	855	40.50	36.00	2.25	2.25	4.50
7	5	1.5	1082	33.75	30.68	2.45	0.62	3.75
8	17	1.5	873	114.75	102.00	8.93	3.83	12.75
9	3	1.5	1137	20.25	18.56	0.51	1.18	2.25
10	7	1.5	1028	47.25	42.95	0.86	3.44	5.25
11	10	1.5	855	67.50	60.00	3.75	3.75	7.50
12	7	1.5	973	47.25	42.53	3.31	1.42	5.25
13	10	1.5	1628	67.50	63.53	0.79	3.18	7.50
14	15	1.5	973	101.25	91.13	7.09	3.04	11.25
合计	120			810.00	728.31	44.83	36.7	90.0

1.4 水压处理

实验中，考虑到模型的稳定性及材料的特性，很难对溶腔水压进行模拟。同时水压对上覆岩层的移动变形规律的影响主要表现为支撑压力，因此本实验过程中，不模拟溶腔内的水压，而直接换算成相应的采深进行处理<sup>[5]</sup>。

2 开采及测量

根据实验目的及重庆地区的气候，本实验采用湿模型法作模型实验。在模型制作完成后的3~7 d，拆去前后模板，测定模型材料的含水率，当与材料配比实验的含水率相符合时，即开始开采和测量数据。

$$\text{按时间比 } \alpha_1 = \frac{1}{(300)^{1/2}} = \frac{1}{17}, \text{ 则 } 84 \text{ min 相当于实际的 } 24 \text{ h.}$$

如果每天开采一次，即84 min进行一次开采。

假设溶腔几何形态近似于倒圆锥体，在平面模型上为倒三角形。按 $\alpha_1 = \frac{1}{300}$ ，实验一次掘进2.5 cm，45°的溶蚀角，共开挖8次，挖完整个厚度，然后再向两边平行推进，昼夜实际开采7.5 m。开采推进过程如图5。

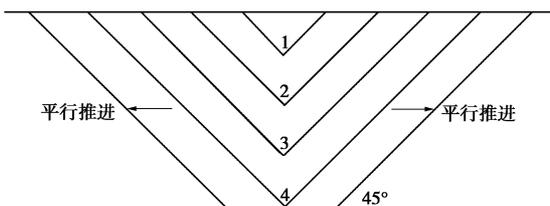


图5 开采推进过程

Fig. 5 The process of mining

在模型上覆岩层中总共布置13行位移测点，每

行9个测点，共计9×13=117个测点。测点设置如图6。

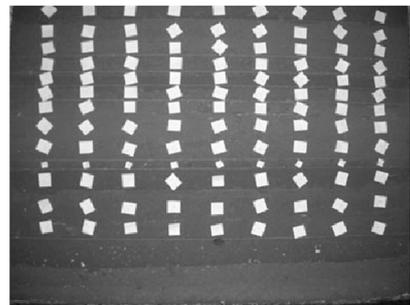


图6 位移测点

Fig. 6 The measuring points of displacement

每次开挖前用高清晰度数码相机拍摄模型并用地震仪测量岩层力学参数和损伤量。

数码相机固定在三脚架上，使用电脑软件控制进行拍摄，确保每次拍摄时，相机位置固定。

岩层波速测试采用声波透射法，在每层岩层的两端，一端进行声波发射，另一端进行声波接收。声波发射采用锤击法，用小铁锤敲击声发射点。发射和接收示意图见图7。



图7 弹性波透射法测试

Fig. 7 Measurement by elastic waves

3 实验结果及分析

实验中建立了两种模型，模型1在分层间没有添加云母和滑石；模型2在分层间加有少量云母和

表 3 开挖过程中岩层损伤量演化表

Table 3 The data of the envelopment process of damage in rock

开挖跨距 /m	岩层损伤量									
	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3
0.0	0.166	0.170	0.160	0.155	0.154	0.154	0.144	0.148	0.139	0.109
7.5	0.160	0.166	0.154	0.140	0.140	0.140	0.130	0.133	0.133	0.109
15.0	0.164	0.166	0.154	0.137	0.137	0.140	0.126	0.140	0.130	0.105
22.5	0.164	0.166	0.151	0.144	0.137	0.140	0.120	0.137	0.130	0.098
30.0	0.178	0.172	0.158	0.144	0.133	0.140	0.126	0.130	0.130	0.102
37.5	0.199	0.189	0.165	0.151	0.137	0.144	0.123	0.130	0.126	0.109
45.0	0.222	0.211	0.179	0.160	0.140	0.151	0.126	0.130	0.126	0.109
52.5	0.255	0.232	0.193	0.172	0.147	0.158	0.130	0.133	0.137	0.109
60.0	0.296	0.267	0.221	0.189	0.154	0.165	0.133	0.137	0.137	0.112
67.5	0.333	0.301	0.253	0.218	0.158	0.168	0.133	0.140	0.144	0.116
75.0	0.360	0.337	0.288	0.246	0.160	0.172	0.137	0.151	0.147	0.120
82.5	0.406	0.392	0.326	0.280	0.172	0.182	0.140	0.147	0.154	0.120
90.0	0.486	0.480	0.393	0.354	0.179	0.193	0.140	0.154	0.158	0.123
97.5	0.622	0.594	0.502	0.449	0.182	0.204	0.154	0.160	0.160	0.123
105.0	0.771	0.754	0.642	0.593	0.182	0.211	0.158	0.168	0.160	0.133
112.5	1.000	0.951	0.835	0.786	0.189	0.218	0.154	0.168	0.160	0.138

滑石来模拟层理。两种模型的其他情况完全一致。

模型 1 总共进行了 25 次开挖, 开挖宽度 187.5 m。当溶腔顶板跨距为 45 m 时, 溶腔顶板出现裂隙, 高度为 3.0 m; 当溶腔顶板跨距为 90 m 时, 顶板上有部分小块剥落; 随着跨距的增加, 顶板裂隙带增宽; 当溶腔跨距为 187.5 m 时, 顶板失稳垮塌, 垮塌高度 54 m, 宽度 90 m。至此, 溶腔报废, 不再进行开挖。在整个开挖过程中, 上覆岩层中没有离层出现。

模型 2 总共进行 15 次开挖, 开挖宽度 112.5 m。当溶腔顶板跨距为 30 m 时, 溶腔顶板开始出现裂隙, 裂隙高度为 2.5 m; 当溶腔顶板跨距为 60 m 时, 顶板上有部分小块剥落, 上覆岩层出现离层, 离层位置在顶板上 51 m 处; 随着跨距的增加, 顶板裂隙带增宽; 当溶腔跨距为 112.5 m 时, 顶板失稳垮塌, 垮塌高度 34 m, 宽度 60 m, 并且在顶板上 81 m 处产生离层。至此, 溶腔报废, 不再进行开挖。

模型 1 的岩层间没有加云母和滑石模拟层理, 致使整个上覆岩层胶结为一个整体。因此, 其模拟结果与实际情况有很大的差别。以下的分析都以模型 2 的测量数据进行。

### 3.1 岩层损伤演化过程

实验总共进行 15 次开挖, 每次开挖的岩层损伤量数据见表 3。将表 3 的数据做在以开挖跨距为横坐标, 损伤量为纵坐标的坐标轴上, 可得到上覆岩层开挖影响的损伤演化曲线(图 8)。

由图 8 可以明显的看到, 第 12 层~第 9 层岩层产生了较为严重的破坏: 其中第 12 层岩层完全破坏垮塌; 第 11 层岩层部分垮塌, 剩余部分严重破碎; 第 10 层、第 9 层岩层也破碎严重, 基本失去承重能力。第 8 层以上各岩层受影响较小, 没有产生明显的破坏情况。在第 9 层和第 8 岩层间可以十分明显的看到离

层现象。由岩层力学参数可知, 第 8 层岩层较厚, 强度较高, 在其下部岩层失去承载能力时, 它能够对上部岩层提供支撑力, 而不产生较大的破坏情况。

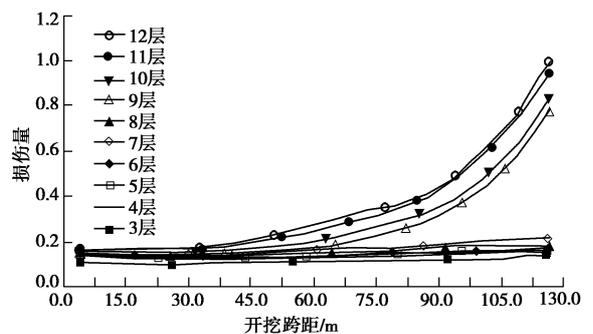


图 8 上覆岩层损伤演化曲线

Fig. 8 The curve of the envelopment of damage in rock

从破坏严重的岩层损伤演化曲线可以看到, 岩层的损伤演化基本可以分为 3 个阶段: ①第一个阶段, 岩层损伤量基本保持不变, 甚至可能因局部应力增大而导致损伤变小的可能; ②第二个阶段岩层损伤量以一定的斜率保持稳定而缓慢的增长; ③第三阶段岩层损伤以指数函数形式加速增长, 很快导致完全破坏而失去承重能力。实验中第 12 层~第 9 层岩层损伤演化达到了第三阶段; 而第 8 层以上各岩层基本处于第二甚至第一阶段。

对第 12 层~第 9 层岩层损伤演化数据进行回归分析, 可以得到由开挖跨距为变量的岩层损伤演化方程:

$$D = \begin{cases} D_0 & (0 < x \leq m) \\ ax + D_0 & (m < x \leq n) \\ be^{cx} + D_1 & (n < x) \end{cases}, \quad (1)$$

式中,  $D_0$  为岩层初始损伤量,  $D_1$  为第二阶段的最大损伤量,  $a, b, c$  为回归参数, 随岩层不同而改变,  $m$  为岩层进入第二损伤阶段的跨距值,  $n$  为岩层进入第三损伤阶段的跨距值。

### 3.2 岩层移动变形

每次开挖后进行位移测量，测量方法采用近景数字摄影法，获得每次开挖后所有测点相对于初始状态垂直和水平方向的位移值。对最终状态拍摄的图像进行处理后获得了所有测点垂直方向和水平方向的位移值，表4列出第1层、第4层、第8层、第9层、第11层岩层上的测点位移。将这些测点值进行插值后，分别绘制成垂直方向和水平方向的岩层位移曲线图(图9, 10)。由图9可见，垂直位移随上覆岩层距岩盐层垂直距离的增大而减小，同时距岩盐层越近的岩层，其垂直变形越集中在中间小范围内，而两边几乎不会发生位移变化；相反远离岩盐层的岩层其垂直位移减小，但移动范围增大。在同一水平岩层上，距盐腔中心的距离越小，其垂直位移越大。

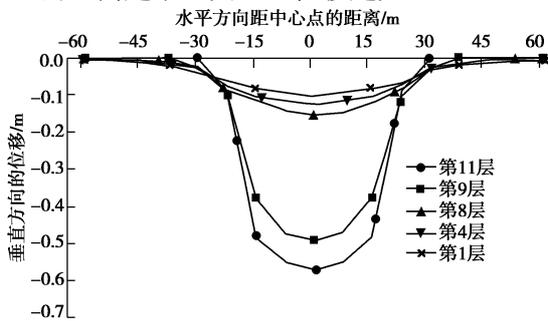


图9 模型岩层垂直位移

Fig. 9 Vertical displacement in strata of cavern

表4 部分测点 x, y 方向最终位移量

Table 4 The x-and y-displacements of some measuring points

序号	位移/m		序号	位移/m	
	垂直	水平		垂直	水平
1	-0.69	0.03	78	-12.11	-0.16
2	-1.32	0.04	79	-3.01	-0.17
3	-4.12	0.11	80	-0.42	-0.03
4	-8.23	0.11	81	-0.32	-0.01
5	-10.35	0.00	82	0.00	0.00
6	-8.25	-0.11	83	0.00	0.00
7	-3.19	-0.12	84	-2.61	0.05
8	-1.31	-0.04	85	-38.26	0.32
9	-0.72	-0.03	86	-49.34	0.00
28	-0.62	0.02	87	-37.36	-0.31
29	-0.65	0.03	88	-2.62	-0.07
30	-2.72	0.13	89	0.00	0.00
31	-10.12	0.13	90	0.00	0.00
32	-12.43	0.00	100	0.00	0.00
33	-10.32	-0.13	101	0.00	0.00
34	-2.81	-0.13	102	0.00	0.00
35	-0.65	-0.03	103	-48.53	0.35
36	-0.61	-0.02	104	-57.16	0.00
73	-0.31	0.01	105	-48.34	-0.36
74	-0.49	0.03	106	0.00	0.00
75	-2.31	0.16	107	0.00	0.00
76	-11.27	0.16	108	0.00	0.00
77	-15.42	0.00			

由图10可见，水平位移几乎有同垂直位移类似的规律。只是其变形量集中或分散在溶腔中心点两旁。

不难看出，位移量越小的岩层其变形范围越大，反知位移量越大的岩层其变形范围越小。

位移图上明显反映出了岩层岩性对岩层变形的影响。第8层岩层位移曲线和第9层岩层位移曲线有明显的区别。而第1层、4层、8层岩层的位移曲线则差别不大；第9层、11层极为相似。说明第8层岩层和第9层岩层间的位移变化并不连续，出现了离层。这和岩体损伤分析结果一直。

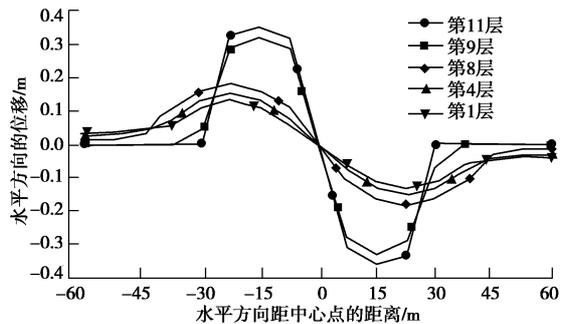


图10 模型岩层水平位移

Fig. 10 Horizontal displacement in strata of cavern

### 3.3 开采沉陷的层面效应及分层特性

上覆岩层是岩性相差很大的许多层岩层按一定的顺序沉积形成的，在岩层之间一般都存在着弱面(层理)，层理对开采沉陷的影响很大。最为明显的就是离层的产生。在离层产生处，层理不但发生了法向位移，同时也发生了较大的切向位移。这一点从模型的岩层移动变形图上可以清楚的看到。层理承受抗拉和抗剪的能力都很差。因此，层理的存在，在一定程度上改变了上覆岩层的整体刚度，使整个上覆岩层相当于由多层相互独立的单一岩层直接堆砌而成。这样，在相同采动条件下，弱面抗拉、抗剪能力越弱，则地表移动变形就越大。这一点可以从两个模型的岩层移动变形值可以明显看出。在相同开挖跨距时，模型2的变形比模型1明显要大一些。上覆岩层的层状结构，决定了上覆岩层的移动变形具有分层特性，上覆岩层不会作为一个整体进行变形、移动和破坏。

### 3.4 岩层破碎岩体尺寸特征

图11是岩层初次垮塌时的过程。从图上可见，顶板垮塌前出现微小离层，然后岩层从顶板两帮断裂垮塌。此现象与简化两端固支梁理论相同。按简化两端固支梁理论，有

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{My}{J_z} \\ J_z &= \frac{bh^3}{12} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中， $J_z$ 为表示梁的惯性矩， $y$ 为距离梁中性面的距离， $b$ 为梁的宽度(这里取为单位厚度)， $h$ 为梁的高

度。

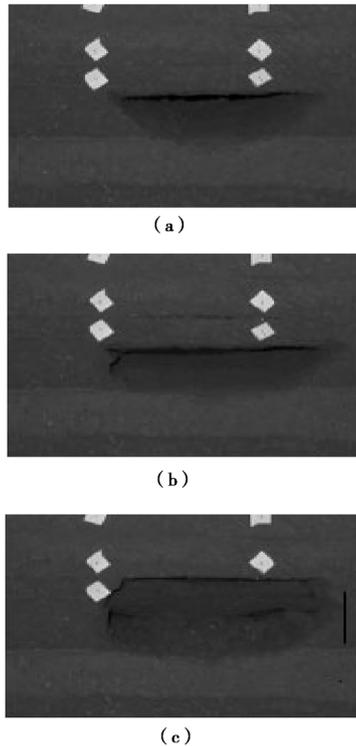


图 11 岩层初次垮塌过程

Fig. 11 The first collapse of terrane

所以梁中的最大应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{2J_z} h = \frac{3qL^2}{h^2} = \frac{3\lambda hL^2}{h^2} = \frac{3\gamma L^2}{h}, \quad (3)$$

式中,  $q$  为梁的均布荷载,  $L$  为梁的长度,  $\gamma$  为岩层材料重度。

由式 (3) 可得, 岩层最小破坏尺寸为

$$L = \sqrt{\frac{\sigma_{\max} h}{3\gamma}}, \quad (4)$$

可见, 岩层破碎岩体尺寸与岩层强度、重度和垮塌厚度有关。

## 4 结 论

(1) 相似材料模型实验中, 层理对上覆岩层移动、破坏具有很大影响。

(2) 盐腔形成过程中, 上覆岩层的损伤演化基本可以分为 3 个阶段: ①第一个阶段, 岩层损伤量基本保持不变; ②第二个阶段岩层损伤量以一定的斜率保持稳定而缓慢的增长; ③第三阶段岩层损伤以指数函

数形式加速增长。

(3) 上覆岩层的层状结构, 决定了上覆岩层的移动变形具有分层特性, 上覆岩层不会作为一个整体进行变形、移动和破坏。

(4) 上覆岩层破碎岩体尺寸与岩层强度、重度和垮塌厚度之间有定量关系。

## 参考文献:

- [1] 崔希民, 许家林, 缪协兴. 潞安矿区综放与分层开采岩层移动的相似材料模拟实验研究[J]. 实验力学, 1999, 14(3): 402 - 406. (CUI Xi-min, XU Jia-lin, MIU Xie-xing. Modeling experiment for the rock movement in fully mechanized sub-level caving and slice mining at Lu'an coal field[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1999, 14(3): 402 - 406. (in Chinese))
- [2] 崔希民, 缪协兴, 苏德国. 岩层与地表移动相似材料模拟试验的误差分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1827 - 1830. (CUI Xi-min, MIU Xie-xing, SU De-guo. Error analysis in similar material simulation test of the movement of rock strata and surface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1827 - 1830. (in Chinese))
- [3] 任伟中, 寇新建, 凌浩美. 数字化近景摄影测量在模型试验变形测量中的应用[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(3): 436 - 440. (REN Wei-zhong, KOU Xin-jiang, LING Hao-mei. Application of digital close-range photogram in deformation measurement of model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 436 - 440. (in Chinese))
- [4] 罗 汉, 曹定华. 多元微积分与代数[M]. 北京: 科学出版社, 1999. (LUO Han, CAO Ding-hua. Calculus and algebra[M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese))
- [5] 徐志斌, 谢和平. 断裂尺度的分形分布与其损伤演化的关系[J]. 地质力学学报, 2004, 10(3): 268 - 275. (XU Zhi-bin, XIE He-ping. Relation between fracture scale fractal distribution and its damage evolution[J]. Journal of Geo-mechanics, 2004, 10(3): 268 - 275. (in Chinese))