

基于室内模型试验的多漏斗同步放矿柔性隔离层材料受力特性分析

陈庆发, 赵富裕, 陈青林, 王玉丁

(广西大学资源环境与材料学院, 南宁 530004)

摘 要: 开展多漏斗放矿条件下柔性隔离层材料受力特性分析是放矿机理研究的基础。该文基于室内模型试验, 测定了试验中隔离层所受拉应力和压应力, 分析了隔离层材料的受力特性及失效条件。研究结果表明: 1) 横向上, 随测点与隔离层中心点距离的增大, 隔离层内部拉应力值的变化趋势与正弦函数一致; 隔离层所受压应力值逐渐减小, 所受摩擦力值呈余弦函数形态变化; 对应空腔部位的隔离层未受支持力作用, 其余部位的隔离层所受支持力载荷的变化规律与压应力一致; 2) 纵向上, 作用于隔离层的所有力系值随下降深度的增加而增大; 隔离层接触底部结构前, 其内部平均拉应力值随下降深度增加呈指数函数增大; 隔离层所受拉应力最大值与下降深度的关系为 $\sigma_{\max} = -0.32 + 0.32e^{0.005h}$, 隔离层失效点满足等式 $s = \pm 30.12$ cm。

关键词: 同步充填; 室内模型试验; 柔性隔离层材料; 受力特性; 失效点

中图分类号: TD801

文献标志码: A

doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.08.0606

MECHANICAL PROPERTIES ANALYSIS FOR A FLEXIBLE ISOLATION LAYER MATERIAL IN MULTIPLE FUNNELS SYNCHRONOUS ORE DRAWING BASED ON A INDOOR MODEL EXPERIMENT

CHEN Qing-fa, ZHAO Fu-yu, CHEN Qing-lin, WANG Yu-ding

(School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The development of mechanical properties of a flexible isolation layer material in ore drawing from multiple funnels is the foundation of ore drawing mechanism. The tensile stress and compressive stress of an isolation layer were measured using an indoor model experiment, and the mechanical properties and rupture condition of isolation-layer materials were analyzed. The results show that: 1) in the transverse direction, with the increase in distance between measuring points and center point in an isolation layer, tensile stress changes sinusoidally; compressive stress decreases gradually and the friction changes cosinoidally; the isolation layer on cavity is not affected by its supporting force, and the variation law of the supporting force in other parts is the same as compressive stress; and 2) in the longitudinal direction, all forces acting on an isolation layer increase with the descending height; average tension stress increases exponentially before contacting funnels in the bottom of the model; correlation between the maximum tension stress and the descending height is $\sigma_{\max} = -0.32 + 0.32e^{0.005h}$, and failure point satisfies equation of $s = \pm 30.12$ cm.

Key words: synchronous filling; indoor model experiment; a flexible isolation layer material; mechanical characteristics; failure point

收稿日期: 2017-08-06; 修改日期: 2017-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51464005)

通讯作者: 陈庆发(1979—), 男, 河南人, 教授, 博士, 从事非传统采矿与岩石力学理论研究(E-mail: chqf98121@163.com).

作者简介: 赵富裕(1993—), 男, 河南人, 硕士生, 从事同步放矿与矿山安全技术方面的研究(E-mail: realmefly@outlook.com);

陈青林(1990—), 男, 江西人, 硕士生, 从事柔性隔离层方面理论分析(E-mail: 18376748317@163.com);

王玉丁(1993—), 男, 湖南人, 本科生, 从事柔性隔离层试验研究(E-mail: diwangyuding@163.com).

留矿采矿法是一种适用于开采急倾斜薄矿床的采矿方法,在我国有色金属矿山尤其是中小型矿山或开采条件适宜的大型矿山中应用广泛^[1]。然而,由于留矿法在使用过程中采空区未及时处理,可能产生剧烈的地压活动。为有效控制因空场存在及嗣后延迟充填带来的地压问题,笔者于 2010 年提出了一种大量放矿同步充填无顶柱留矿采矿方法^[2]。区别于传统的放矿工艺,新采矿方法在大量放矿前预先在留矿堆表面铺设柔性隔离层^[3-10],致使流动规律突破了现有放矿理论描述范围,因此开展柔性隔离层作用下散体介质流理论研究具有重要意义。其中,多漏斗放矿柔性隔离层受力特性分析是该新放矿理论研究的重要内容。

前述发明专利采矿法中,推荐采用土工布、橡胶、合成材料等这类具有高强度、耐腐蚀、柔软性低等优势特点的柔性材料。这类材料目前被广泛使用至堆积工程、防渗工程、道路工程等。例如:刘华北等^[11]讨论了几种土工合成材料加筋土挡墙的筋材内力分析方法,并对不同方法的优缺点进行评述;胡利文^[12]从强度损失角度分析了土工布长期运行过程中的渗透性、保土性和淤堵性能;陈善民等^[13]提出了利用土工布加固堤坝的弹性薄膜理论进行有限差分计算,编制程序计算了土工布拉力以及土摩阻力的实际分布及其对海堤稳定的影响;Bergado 等^[14]通过极限平衡法、极限法以及简单的组合方法对土工合成材料成分引起的拉伸载荷进行评估;Wasti 等^[15]采用斜板抗剪强度参数的土工膜防渗土工织物进行直接剪切盒试验;Qian 等^[16]通过室内疲劳试验,研究了不同荷载组合和温度变化对土工织物延缓沥青路面反射裂缝性能的影响;Abdul 等^[17]采用黄麻土工布对孟加拉不同位置的农村公路进行铺设,发现不同路段增加的承载能力为原来的 1.5 倍~7 倍,提高经济效益和耐久性;Clemente 等^[18]使用多功能土工织物,在德国开姆尼茨市附近的铁路沿线进行了测试,发现土工布能够提供加强和监测功能。相应地,该类材料受力特性研究也主要集中在结构、岩土领域。例如,谭萍等^[19]基于经典板壳理论,对曲线纤维增强复合材料圆环板的非轴对称弯曲问题进行了探讨;李庆华等^[20]采用分离式霍普金森压杆装置,研究了超高韧性水泥基复合材料在高速冲击压缩应力状态下的力学响应;施建勇等^[21]对垃圾填埋场中组成复合衬垫的土工膜、土工布和砂土、界面分别进行了土工膜与

砂土、土工膜与黏土、土工布与砂土、土工布与黏土的拉拔试验、直剪试验及土工网-土工膜-黏土组合的单剪试验;为了研究位于斜坡上衬垫的力学特性,Muller 等^[22]研制了坡度 1:2.5 的斜面剪切仪,并用其进行了土工复合膨润土衬垫(GCL)长期剪切强度试验研究;Mizyal 等^[23]利用斜板仪和传统直剪仪对不同纹理的 HDPE 膜与不同性状的砂之间的特性进行了对比试验研究;McCartney 等^[24]根据 534 大型直剪试验结果数据库对合成粘土衬垫(GCLS)和土工膜(GMs)的剪切强度进行评估和研究。

综合国内外研究现状,关于土工布、橡胶等柔性材料在采矿工艺中的相关研究有限,樊满华^[25]利用编织塑料布铺设长度较短采场以及采用人工出矿的区域,进而弥补了铺垫水泥浆缺点;侯建华等^[26]介绍了干式充填采矿法采场几种铺垫材料特点,并对各铺垫材料进行了可选性评价。在放矿工艺研究中,笔者利用高斯模型及理论推导的方式获取了单漏斗放矿柔性隔离层界面形态^[27]。

为进一步丰富柔性材料在放矿中的应用,本文以柔性隔离层材料为研究对象,研究多漏斗放矿条件下隔离层力学特性,分析各力系分布特点及变化规律,为新采矿方法中柔性隔离层的强度设计提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验模型

为研究多漏斗放矿柔性隔离层的力学特性,根据相似第一定理,按 1:25 相似比制作相似模型^[28](见图 1)。模型以 200 cm×160 cm×24 cm 的长高宽尺寸规格模拟一个标准矿块。模型的基本框架材料主要由不同型号角钢、扁钢、铁板焊接组成。前 PC 耐力板画制相应坐标网格,后 PC 耐力板为试验方便切割成三等分;底部结构由 7 个漏斗组成,漏斗间间距排列为 24 cm,漏斗尺寸为 8 cm×8 cm;为实现模型同步放矿功能,在漏斗口安装一长条形可上下振动木板。

1.2 试验材料与仪器

试验所用矿石为石灰石,按 1:25 相似比破碎加工而成,平均块度为 2 cm,密度为 1530 kg/m³,湿度 n 为 0.14%,自然安息角为 35.8°,内摩擦角为 41.5°。选取长宽厚尺寸 170 cm×24 mm×2 mm 规格的硅橡胶作为柔性隔离层。



图1 室内试验模型

Fig.1 Indoor experiment model

实验采集设备有 YJZ-32A 型智能数字应变仪 2 台、微型土压力盒 15 个、应变片和导线若干。

1.3 试验方案

在隔离层上表面布置测点,测点布置如图 2 所示。采集横向拉应变时,在每个测点固定布置 2 个反向且平行矿体走向的应变片(多次测量取平均),然后将连接好应变片的导线按从左往右的顺序依次接入应变仪的相应通道。待模型装填满后,再将布有应变片的隔离层平整铺设于矿石面上。实验时,打开全部漏斗,通过上下振动木板,缓慢放出矿石颗粒,每放出一定量矿石,及时回填废石至模型初始高度,以实现同步充填,并用应变仪采集数据,直至矿石不能被放出为止。采集纵向压应变时,在隔离层每个测点固定布置一个压力盒,其余步骤与采集横向拉应变步骤一致。因隔离层的对称性,试验中仅取其右侧测点力系值进行分析。

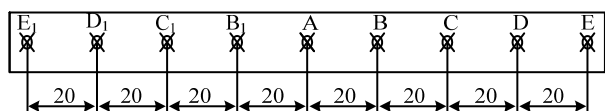


图2 隔离层测点布置图 /cm

Fig.2 Arrangement of measuring points in an isolation layer

隔离层应力与矿料的体积,密度,形状和大小及其随机性相关,本次试验进行了多次重复以减小随机性对结论的影响,在多次试验中,矿料的体积,密度,形状和大小均为确定值,故本试验可分析隔离层在下降过程中应力与下降高度 h 的关系,进而反映隔离层应力演化规律及破断条件。

由于相似试验模型成本低、具有可操作性且在满足几何相似、力学相似与初始状态相似的情况下,其规律具有一定的可靠性^[29],故本试验结论可为工程现场隔离层的选择提供参考。

2 试验结果及分析

2.1 隔离层质点力系分析

在多漏斗放矿实验中,放矿初期,逐渐变形弯曲下降。隔离层与最高矿石面始终紧密接触在一起,并一起保持平缓下移。当最高矿石面下降到某一深度时,最高矿石层面开始出现凹凸不平;随着矿石面的继续下降,凹凸现象越来越明显,并在某些空间部位出现隔离层与矿石面脱离的现象;当各漏斗口不再有矿石放出时,隔离层呈波浪形悬浮于各漏斗上,且由于隔离层的阻碍和平整作用,采场中不存在脊部纯矿石的残留。部分放矿实验剖面图如图 3 所示。

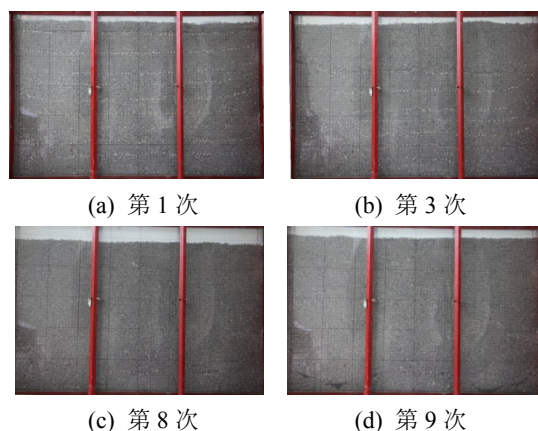


图3 多漏斗同步充填放矿剖面图

Fig.3 Profile of synchronous filling ore drawing from multiple funnels

试验中,隔离层受充填废石的压力、散体矿岩的支持力及充填废石和散体矿岩对隔离层所产生的摩擦力、隔离层自身拉力,某微段 ds 隔离层所受力系如图 4 所示,图中 σ_s 为该微段所受拉应力, $d\sigma_s$ 为拉应力增量, θ 为拉应力方向与隔离层微段切向方向之间的夹角, q_1 为压应力, q_2 为支持力, f_1 、 f_2 分别为上、下表面摩擦力。

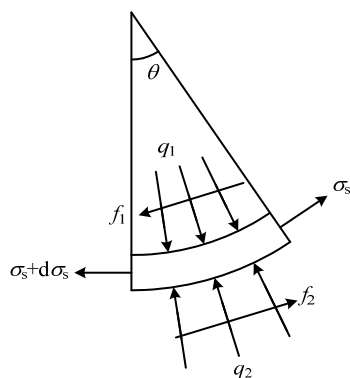


图4 隔离层微段受力分析图

Fig.4 Force analysis of micro-segment in an isolation layer

试验缓慢放出矿石颗粒,控制矿石放出速率在近乎为零水平,因此忽略体系加速度影响,即下降过程中隔离层受力 F 趋近于平衡状态:

$$F \approx 0 \quad (1)$$

2.2 各分力特性分析

1) 拉应力分析。

由应变仪采集的横向拉应变数据,可得各个下降深度 h 下隔离层各测点应变片的值。对应变值进

行分析处理,即可得隔离层各测点的拉应力值,如表 1 所示。

利用 Origin 对表 1 各下降深度的实验数据进行回归分析,其中正弦函数拟合效果最好,其通式如下:

$$\sigma_s = \sigma_0 + A \sin\left(\pi \frac{s-s_0}{w}\right), \quad A > 0 \quad (2)$$

式(2)给出了各下降高度下隔离层的拉应力曲线函数的通式,为便于观察隔离层拉应力函数的演

表 1 隔离层各测点拉应力数据表

Table 1 Tensile stress data of each measuring point in an isolation layer

h/cm	E_1	D_1	C_1	B_1	A	B	C	D	E
14	0.0419	0.0326	0.0470	0.0421	0.0324	0.0421	0.0461	0.0328	0.0423
23	0.0490	0.0372	0.0532	0.0497	0.0369	0.0503	0.0523	0.0374	0.0494
34	0.0885	0.0723	0.1022	0.0891	0.0723	0.0755	0.1015	0.0713	0.0897
42	0.0966	0.0847	0.1097	0.0982	0.0855	0.0978	0.1091	0.0837	0.0980
54	0.1063	0.0929	0.1198	0.1069	0.0921	0.1070	0.1191	0.0923	0.1080
63	0.1110	0.0962	0.1233	0.1116	0.0970	0.1108	0.1231	0.0960	0.1103
72	0.1260	0.1030	0.1478	0.1273	0.1030	0.1264	0.1471	0.1022	0.1262
82	0.1563	0.1307	0.1693	0.1573	0.1416	0.1562	0.1687	0.1428	0.1578
92	0.1708	0.1563	0.1891	0.1719	0.1563	0.1734	0.1891	0.1563	0.1741
102	0.1923	0.1736	0.2091	0.1934	0.1767	0.1937	0.2089	0.1755	0.1944

化全过程,以隔离层的中心点为坐标原点,建立以隔离层横向长 s 为横轴,拉应力 σ_s 为纵轴的坐标系,将各下降深度 h 下隔离层拉应力函数曲线绘制于同一张图(见图 5)。

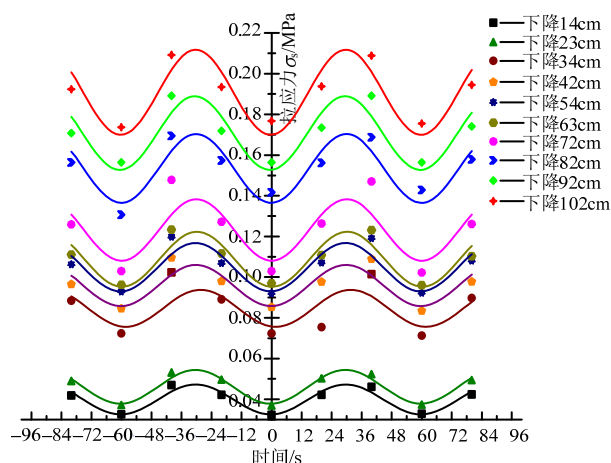


图 5 拉应力值函数曲线图

Fig.5 Function curve of tensile stress

通过上述分析,可拟合得到各下降深度下隔离层拉应力函数表达。各下降深度下隔离层拉应力函数的拟合参数如表 2 所示。

利用 Origin 对表 2 各拟合参数与隔离层下降深度的关系分别进行回归分析,可得到放矿过程中各参数 σ_0 、 A 、 s_0 、 w 的函数式为:

表 2 隔离层拉应力函数的拟合参数

Table 2 Fitting parameters of tensile stress function in an isolation layer

h/cm	σ_0/MPa	A/MPa	S_0	w
14	0.0399	0.0073	14.6654	30
23	0.0461	0.0083	14.5967	30
34	0.0847	0.0091	16.6670	30
42	0.0959	0.0101	14.7490	30
54	0.1049	0.0119	14.6120	30
63	0.1088	0.0135	15.1970	30
72	0.1232	0.0151	15.0036	30
82	0.1534	0.0169	14.8820	30
92	0.1708	0.0181	14.3805	30
102	0.1908	0.0209	14.6890	30

$$\sigma_0 = -0.343 + 0.367e^{0.004h} \quad (3)$$

$$A = -0.003 + 0.009e^{0.010h} \quad (4)$$

$$s_0 = 15.253 \quad (5)$$

$$w = 30 \quad (6)$$

将式(3)~式(6)代入式(2),可得放矿全程隔离层的内拉应力函数为:

$$\sigma_s = -0.343 + 0.367e^{0.004h} + (-0.003 + 0.009e^{0.010h}) \sin\left(\pi \frac{s-15.253}{30}\right) \quad (7)$$

由式(7)并结合图 5 可知,同一下降深度下,随测点与隔离层中心点距离的增大,隔离层内拉力的

变化趋势与正弦函数一致；下降深度变化时，隔离层内拉应力值随下降深度增加而增大，说明在等间距漏斗布置的工程中，同一下降深度下隔离层的拉应力符合正弦函数模型，各点应力值与下降深度呈指数增加。

多漏斗物理试验中隔离层所受平均拉应力值反应了隔离层整体拉伸形变，对工程设计材料选择具有指导意义，各下降深度下隔离层的平均拉应力值如表 3 所示。对表 3 中的数据，进行回归分析 ($R^2=0.967$)，结果如图 6 所示。

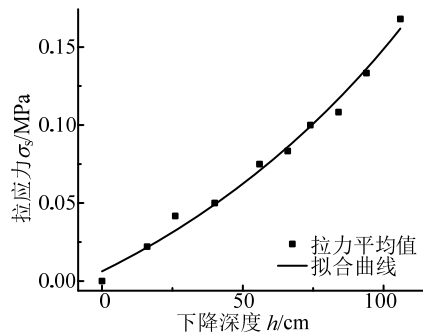


图 6 平均拉应力值拟合曲线图

Fig.6 Fitting curve of average tensile stress

由图 6 可知，隔离层平均拉应力与隔离层下降深度的增加而增大，呈指数形式增长，拟合式见式

表 3 隔离层平均拉应力值

Table 3 Average tensile stress of an isolation layer											
h/cm	8	16	26	36	46	56	66	74	84	94	106
$\sigma_{\text{sp}}/\text{MPa}$	0.025	0.041	0.0417	0.065	0.075	0.075	0.083	0.1	0.108	0.133	0.168

表 4 各下降深度下最高矿石层面的压应力值数据

Table 4 Data of compressive stress in the highest ore level under each descending height													
h/cm	0	2	8	16	26	36	46	56	66	74	84	94	106
P/kPa	0	0.160	1.120	1.631	2.847	3.647	4.894	5.694	5.854	6.270	6.846	6.974	7.549

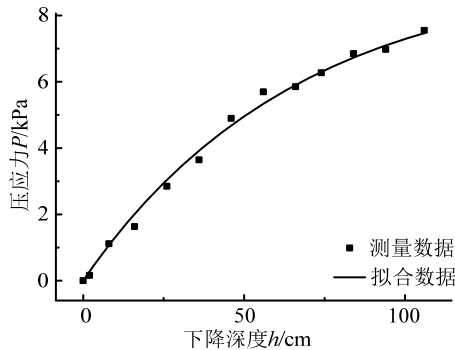


图 7 下降深度与最高矿石面压应力值关系拟合曲线图

Fig.7 Fitting curve of relationship between compressive stress in the highest ore level and descending height

由拟合曲线可知，最高矿石面的压应力值随隔

(8)，说明设计的矿房高度尺寸越大，对隔离层强度要求越高，因此在实际施工中，矿房高度尺寸不宜太过于偏大。

$$\sigma_s = -0.10 + 0.10e^{0.009h} \tag{8}$$

2) 压应力分析。

由应变仪采集的纵向压应变数据，测得不同下降深度下最高矿石层面的应变值，结合压力盒的率定系数，得到各下降深度下各测点压应力值，但是在数据处理发现因测点倾斜造成压力盒实际接触受力面变化波动，而使读数误差较大。为获得更为准确的试验数据，借鉴德国工程师 Janssen 运用连续介质模型对粮仓效应解释的经验^[30]，先获取隔离层下降深度与最高矿石层面铅直方向压应力值 P 之间的函数表达式，即利用中心测点数据进行拟合，然后再根据夹角的关系求取各倾斜面的压应力值。

以坐标网格为原点，取水平向右为 x 轴正方向，取垂直向上为 y 轴正方向，建立坐标系。各下降深度下最高矿石层面的压应力值数据如表 4 所示，对表 4 数据进行回归分析，拟合曲线如图 7 所示(相关系数为 0.995)。

离层下降深度的增加而增加，但增长速率逐渐变缓，说明在有限空间里，运动矿石颗粒与围岩存在摩擦效应，围岩承担了部分矿石重量，而改变其完全的线性关系，其拟合函数为：

$$P = 9.350 - 9.350e^{-0.015h} \tag{9}$$

隔离层上所受压应力值的分布与隔离层曲线形态相关，因此需对试验隔离层演化曲线进行分析。隔离层形态演化曲线如图 8 所示。

由图 8 可知，隔离层变形演化过程中剖面上整体上呈正弦函数曲线形态，不断演化至隔离层下表面接触漏斗底部结构。但当隔离层接触漏斗底部结构后，其形态变化复杂，曲线方程难以用统一的数

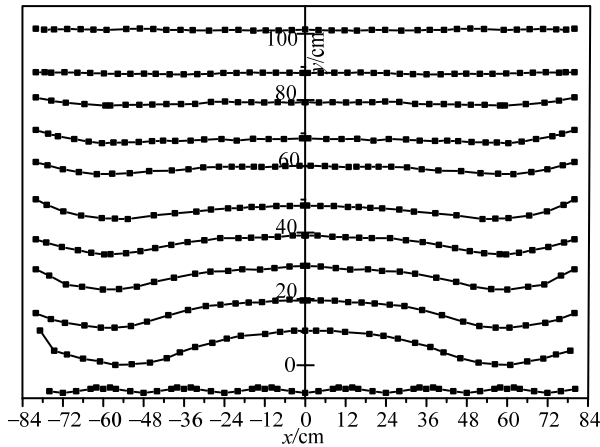


图8 隔离层形态曲线图

Fig.8 Morphology curve of an isolation layer

学模型表达。放矿终了时, 隔离层形态呈谐振波形式。隔离层形态曲线方程为:

$$\begin{cases} y = (-0.132 + 0.395e^{0.03h})\sin\left(\frac{\pi}{60}x\right) + C - h + \\ \quad 0.132 - 0.395e^{0.03h}, & h < 102 \\ y = 0.725\sin\left(\frac{\pi}{12}x\right) - 7.625, & h = 110 \end{cases} \quad (10)$$

式中, C 为隔离层在该下降范围内的最大下降深度, 为 109cm。由式(10)可知, 在隔离层接触到底部结构后的下降深度只有 8 cm, 大部分是处于未接触底部结构区域, 因此以下只对未接触底部结构区域进行分析。由于隔离层在此范围下降过程中呈谐振波, 且作用在隔离层上的压应力与作用最高矿石层面上的压应力存在一定的角度关系, 因此可得隔离层接触漏斗底部结构前以及放矿终了时隔离层的压应力函数 q_1 表达为:

$$q_1 = [9.350 - 9.350e^{-0.015(h+C-y)}] \times \left| \cos\left(\sqrt{\frac{1}{1+y'^2}}\right) \right| \quad (11)$$

由式(11)可知, 在柔性隔离层作用下多漏斗放矿试验中, 隔离层接触漏斗底部结构前其所受压应力随测点与隔离层中心点距离的增大而减小; 放矿终了时, 随测点与隔离层中心点距离的增大, 隔离层所受压应力的变化趋势与正弦函数相近。

3) 支持力分析。

多漏斗隔离层放矿条件下柔性隔离层在随矿石流动一起下降的过程中所受的支持力是来自于未放出矿石的支撑作用, 随着矿岩的放出, 某些空间部位出现隔离层与矿石面脱离的现象, 空腔的存在致使该空间的隔离层并未受到未放出矿石支持

力作用, 因此在分析研究隔离层所受支持力时需要分情况讨论, 即需要分别对隔离层未受空腔影响部分和受空腔影响部分的支持力进行讨论。此外, 由于隔离层接触漏斗底部结构后受力的复杂性, 只对隔离层接触漏斗底部结构前的支持力进行分析。

① 在未产生空腔的隔离层区域, 此时隔离层受到底部未放出矿石的支持力作用。在隔离层上任取一微段 ds , 根据微段法向受力平衡分析^[31-36], 有:

$$(\sigma_s + d\sigma_s) \times \sin\left(\frac{1}{2}\theta\right) \times B_t + \sigma_s \times \sin\left(\frac{1}{2}\theta\right) \times B_t = B \times (q_2 - q_1) \times ds \quad (12)$$

$$\theta = \frac{ds}{\rho} \quad (13)$$

$$\rho = \frac{(1+y'^2)^{3/2}}{|y''|} \quad (14)$$

式中: B 为隔离层宽度; t 为隔离层厚度; ρ 为隔离层形态曲线的曲率半径。由式(11)~式(14)联立可解得支持力 q_2 的函数表达式:

$$q_2 = [9.350 - 9.350e^{-0.015(h+C-y)}] \times \left| \cos\left(\sqrt{\frac{1}{1+y'^2}}\right) \right| + \frac{|y''|}{t \times (1+y'^2)^{3/2}} \times (-0.078 + 0.103e^{0.004h}) \quad (15)$$

② 在未产生空腔的隔离层区域, 此时隔离层受到底部未放出矿石的支持力的作用因而对这部分隔离层其支持力为零, 如图 9 所示。



图9 隔离层空腔图

Fig.9 Cavity under an isolation layer

由式(15)并结合图 9 可知, 对应空腔部位的隔离层未受支持力作用, 其余部位的隔离层所受支持力载荷的变化规律与压应力一致。

4) 摩擦力分析。

隔离层在下降过程中, 上、下表面与充填废石和矿岩接触的隔离层区段均受到摩擦力的作用。隔

隔离层上表面的摩擦力方向在隔离层剖面曲线斜率大于充填废石外摩擦角的区段是斜向下的,在隔离层剖面曲线斜率小于充填废石外摩擦角的区段斜向上。空腔区段的隔离层下表面不受摩擦力作用,空腔界点以上区段的隔离层所受摩擦力的方向为斜向上。因此,针对隔离层复杂的受力情况,将放矿过程中隔离层所受摩擦力的合力作为隔离层所受的摩擦力,并用 f_3 表示总摩擦力集度。

在隔离层上任取一微段 ds 进行受力分析,如图 10 所示。由微段切向受力平衡,可得:

$$[(\sigma_s + d\sigma_s) - \sigma_s] \times B_l = f_3 \times B \times ds \quad (16)$$

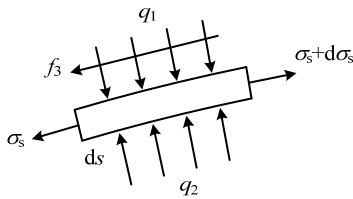


图 10 隔离层摩擦力微段分析图

Fig.10 Micro-segment force analysis of friction in an isolation layer

整理得:

$$f_3 = t \frac{d\sigma_s}{ds} \quad (17)$$

故柔性隔离层所受摩擦力集度的函数表达式为:

$$f_3 = \frac{\pi}{3} \times t (-0.003 + 0.009e^{0.010h}) \cos\left(\pi \frac{s-15.253}{30}\right) \quad (18)$$

由式(18)可知,在隔离层接触漏斗底部结构前,隔离层所受摩擦力的变化趋势与余弦函数的变化趋势一致。

3 失效分析

隔离层强度是实现顺利放矿的关键因素之一。如果放矿过程中隔离层发生失效,将导致矿石与废石直接接触,增加矿石损失与贫化,同时也失去同步充填的意义。

材料在试验中承受的内力系主要有拉应力和压应力,其中拉应力是由于矿岩放出和上覆废石的充填隔离层逐渐下降且受到充填废石和矿岩的摩擦作用产生的。压应力是由上覆废石的自重直接作用于隔离层表面而产生。隔离层的失效主要是由于作用于其上的最大拉应力大于隔离层的抗拉强度。由于各下降深度下隔离层所受拉应力值呈正弦函数分布,因此整个放矿过程中隔离层内部所受拉应力最大点即失效点满足等式:

$$s = \pm 30.12 \text{ cm} \quad (19)$$

在放矿过程中,隔离层所受拉应力最大值与隔离层下降深度的关系如图 11 所示,拟合式为:

$$\sigma_{s\max} = -0.32 + 0.32e^{0.005h} \quad (20)$$

由图 11 和式(20)可知,在隔离层接触漏斗底部结构前,随着下降深度的不断增加,隔离层所受最大拉应力值呈指数形式增大。因此在工程实际中,为防止隔离层失效,可根据拉应力最大值与下降深度的函数关系选择强度合适的柔性隔离层材料。

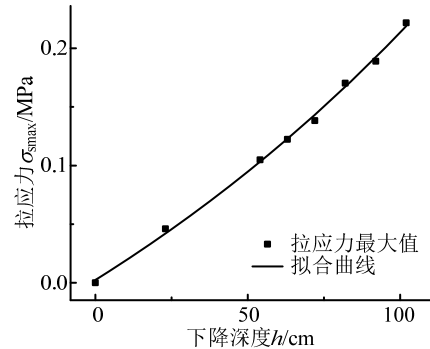


图 11 拉应力最大值与下降深度拟合曲线

Fig.11 Fitting curve of the maximum tensile stress and descending height

4 结论

基于同步充填放矿物理模型,本文对多漏斗放矿实验中柔性隔离层所受拉、压应变进行了测量。根据测量数据,分别对放矿全程隔离层所受拉应力、压应力、支持力、摩擦力的受力特性及其失效条件进行了分析,分析结果如下:

(1) 相同下降深度下,随测点与隔离层中心点距离的增大,隔离层拉应力的变化趋势与正弦函数一致。测点与隔离层中心点距离一定时,隔离层内拉应力值随下降深度增加而增大;隔离层未接触底部结构前其内部平均拉应力值随下降深度增加呈指数形式增大,函数式为: $\sigma_s = -0.10 + 0.10e^{0.009h}$ 。

(2) 相同下降深度下,隔离层所受压应力值随测点与隔离层中心点距离的增大而减少。测点与隔离层中心点距离一定时,隔离层所受压应力值随下降深度增加而增大。

(3) 对应空腔部位的隔离层未受支持力作用,其余部位的隔离层所受支持力载荷的变化规律与压应力一致。

(4) 相同下降深度下,随测点与隔离层中心点距离的增大,隔离层所受摩擦力值呈余弦函数形态变化趋势。测点与隔离层中心点距离一定时,隔离

层所受的摩擦力值随着下降深度的增加而增大。

(5) 整个放矿过程中隔离层内部所受拉应力最大点即失效点满足等式 $s = \pm 30.12 \text{ cm}$; 隔离层所受拉应力最大值与隔离层下降深度满足方程 $\sigma_{\text{max}} = -0.32 + 0.32e^{0.005h}$ 。

参考文献:

- [1] 李明, 伍衡山, 李蒲姣, 等. 浅孔留矿法在国内矿山应用的若干技术问题[J]. 采矿技术, 2004, 4(2): 1—3.
Li Ming, Wu Hengshan, Li Pujiao, et al. Some technical problems on the application of short-hole shrinkage in China [J]. Mining Technology, 2004, 4(2): 1—3. (in Chinese)
- [2] 陈庆发, 吴仲雄. 大量放矿同步充填无顶柱留矿采矿方法: 中国, 201010181971.2[P]. 2010-10-20.
Chen Qingfa, Wu Zhongxiong. A large number of ore drawing synchronous filling no-top-pillar shrinkage stoping method: CN, 201010181971.2 [P]. 2010-10-20. (in Chinese)
- [3] 岩小明, 李夕兵, 郭雷, 等. 露天地下开采隔离层稳定性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1682—1686, 1690.
Yan Xiaoming, Li Xibing, Guo Lei, et al. Stability of boundary pillar of open pit and underground mine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1682—1686, 1690. (in Chinese)
- [4] Luo Zhouquan, Xie Chengyu, Jia Nan. Safe roof thickness and span of stope under complex filling body [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(12): 3641—3647.
- [5] 刘希灵, 李夕兵, 宫凤强, 等. 露天开采台阶面下伏空区安全隔离层厚度及声发射监测[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 3357—3362.
Liu Xiling, Li Xibing, Gong Fengqiang, et al. Safety isolation layer thickness and acoustic emission monitoring of cavity under open pit benches [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Suppl 1): 3357—3362. (in Chinese)
- [6] 刘希灵, 尚俊龙, 朱传明, 等. 露天台阶下空区安全隔离层计算及稳定性分析[J]. 金属矿山, 2011, 40(5): 141—145.
Liu Xiling, Shang Junlong, Zhu Chuanming, et al. Safety isolation layer calculation and stability analysis of cavity under open pit bench [J]. Metal Mine, 2011, 40(5): 141—145. (in Chinese)
- [7] 岩小明, 李夕兵, 李地元, 等. 露天开采地下矿室隔离层安全厚度的确定[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(4): 666—671.
Yan Xiaoming, Li Xibing, Li Diyu, et al. Determination of boundary pillar's safety thickness of open pit mining with underground goaf [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(4): 666—671. (in Chinese)
- [8] 张钦礼, 陈秋松, 胡威, 等. 露天转地下采矿隔离层研究[J]. 科技导报, 2013, 31(11): 33—37.
Zhang Qinli, Chen Qiusong, Hu Wei, et al. Safety thickness of interval layers for the transition from open pit to underground mining [J]. Science & Technology Review, 2006, 2(4): 666—671. (in Chinese)
- [9] 亢一澜. 力学若干问题的实验研究[J]. 力学与实践, 1999, 21(3): 9—15.
Kang Yilan. Experimental analysis for some interfacial mechanics problems [J]. Mechanics and Practice, 1999, 21(3): 9—15. (in Chinese)
- [10] 白树林, 陈建康, 王建祥. 共混/填充高分子复合材料力学行为实验研究进展[J]. 力学进展, 2006, 36(4): 507—516.
Bai Shulin, Chen Jiankang, Wang Jianxiang. Research progress of experimental study on the mechanical behavior of the interface of particle filled/blended polymer composites [J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(4): 507—516. (in Chinese)
- [11] 刘华北, 汪磊, 王春海, 等. 土工合成材料加筋土挡墙筋材内力分析[J]. 工程力学, 2017, 34(2): 1—11.
Liu Huabei, Wang Lei, Wang Chunhai, et al. Analysis methods for the reinforcement loads of geosynthetic-reinforced soil retaining walls [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(2): 1—11. (in Chinese)
- [12] 胡利文. 深圳河反滤土工布试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 351—355.
Hu Liwen. Experimental study on filter geotextiles applied in Shenzhen river project [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 351—355. (in Chinese)
- [13] 陈善民, 周洪峰, 孟松兔, 等. 海堤工程软基土工布加筋的抗滑作用分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 662—663.
Chen Shanmin, Zhou Hongfeng, Meng Songtu, et al. Stability analysis of seawall built on soft subgrade reinforced by geotextile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 662—663. (in Chinese)
- [14] Bergado D T, Ramana G V. Evaluation of interface shear strength of composite liner system and stability analysis for a landfill lining system in Thailand [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24(6): 371—393.
- [15] Wasti Y, Bahadmir Z. Geomembrane-geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box tests [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19(19): 45—57.
- [16] Qian Jingsong, Chen Xinran, Jin Chen, Fu Wei. Influence of combined load on performance of geotextiles as antireflective cracking system in asphalt pavements [C]. Washington: Transportation Research Board 96th Annual Meeting, 2017: 452—459.
- [17] Abdul Jabbar Khan, Fahmida Huq, Zubair Hossain.

- Application of jute geotextiles for rural road pavement construction [C]. Shanghai: American Society of Civil Engineers, 2014: 370—379.
- [18] Clemente F, Donato Z, Aleksander W, et al. Innovative approach in the use of geotextiles for failures prevention in railway embankments [J]. *Transportation Research Procedia*, 2016, 14(5): 1875—1883.
- [19] 谭萍, 聂国隼. 曲线纤维增强复合材料圆环板的非轴对称弯曲问题[J]. *工程力学*, 2016, 33(3): 239—247.
- Tan Ping, Nie Guojun. Asymmetric bending of curvilinear-fiber reinforced composite annular plates [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(3): 239—247. (in Chinese)
- [20] 李庆华, 赵昕, 徐世焱. 纳米二氧化硅改性超高韧性水泥基复合材料冲击压缩试验研究[J]. *工程力学*, 2017, 34(2): 85—93.
- Li Qinghua, Zhao Xin, Xu Shilang. Impact compression properties of Nano-SiO₂ modified ultra high toughness cementitious composites using a split Hopkinson pressure bar [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(2): 85—93. (in Chinese)
- [21] 施建勇, 钱学德, 朱月兵. 垃圾填埋场土工合成材料的特性试验方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(5): 688—692.
- Shi Jianyong, Qian Xuede, Zhu Yuebing. Experimental methods for interface behaviors of geosynthetics in landfills [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(5): 688—692. (in Chinese)
- [22] Muller W, Jakob I, Seeger S, et al. Long term shear strength of geosynthetic clay liners [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 26(2): 130—144.
- [23] Mizyal I, YIdiz W. Geomembranes and interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests [J]. *Geotextiles and Geomembrane*, 1998, 16(3): 207—219.
- [24] Mc cartney J S, Zornberg J G, Robert H S. Analysis of a large database of GCL-geomembrane interface shear strength results [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(2): 209—223.
- [25] 樊满华. 干式充填法采场铺垫隔离材料的选择及应用[J]. *黄金科学技术*, 2004, 12(1): 34—38.
- Fan Manhua. Select & apply stope paving separate material in the use of dry -placed fill method [J]. *Gold Science and Technology*, 2004, 12(1): 34—38. (in Chinese)
- [26] 侯建华, 梁凯河. 干式充填采矿法采场铺垫材料的选择[J]. *黄金*, 2009, 30(7): 33—37.
- Hou Jianhua, Liang Kaihe. Choice of stope matting material for dry type back-filling mining method[J]. *Gold*, 2009, 30(7): 33—37. (in Chinese)
- [27] 陈庆发, 陈青林, 仲建宇, 等. 单漏斗放矿柔性隔离层界面形态演化规律[J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(6): 1332—1338.
- Chen Qingfa, Chen Qinglin, Zhong Jianyu, et al. Evolution law of interface morphology of flexible isolation layer under ore drawing from single funnel [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(6): 1332—1338. (in Chinese)
- [28] Castro R, Trueman R, Halim A. A study of isolated draw zones in block caving mines by means of a large 3D physical model [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(6): 860—870.
- [29] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010: 84—96.
- Qian Minggao, Shi Pingwu, Xu Jialin. *Mining pressure and strata control* [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010: 84—96. (in Chinese)
- [30] 孙其诚, 厚美瑛, 金峰. 颗粒物质物理与力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- Sun Qicheng, Hou Meiyong, Jin Feng. *Physics and mechanics of granular materials* [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [31] 周蓉. 松散介质约束下土工织物的拉伸力学行为[D]. 上海: 东华大学, 2007.
- Zhou Rong. *Tensile behavior of geotextile confined in granule* [D]. Shanghai: Donghua University, 2007. (in Chinese)
- [32] Lee K M, Manjunath V R. Experimental and numerical studies of geosynthetic-reinforced sand slopes loaded with a floating [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(4): 828—842.
- [33] Abramento M, Whittle A J. Shear-lag analysis of planar reinforcement in plane-strain compression. [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1993, 119(2): 270—291.
- [34] Abramento M, Whittle A J. Analysis of pullout tests for planar soil reinforcement in soil [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 121(6): 476—485.
- [35] Sobhi S, Wu J T H. An interface pullout formula for extensible sheet reinforcement [J]. *Geosynthetics International*, 1996, 3(5): 565—582.
- [36] 赵思远, 郭彦林, 王宏. 闭合截面压弯钢拱的平面外稳定性能研究[J]. *工程力学*, 2016, 33(10): 62—67.
- Zhao Siyuan, Guo Yanlin, Wang Hong. Out-of-plane stability of close-section steel arches under compression and bending [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(10): 62—67. (in Chinese)