

文章编号: 1000-7598(2013)07-2051-08

采场内结构体解算及其稳定性计算

陈庆发¹, 赵有明², 陈德炎¹, 唐中琴¹, 于振宇¹

(1.广西大学 资源与冶金学院, 南宁 530004; 2.广西煤炭地质局, 广西 柳州 545005)

摘要: 采场内结构体的存在对矿块安全回采影响较大, 开展其解算方法与稳定性计算方法研究具有重要意义。应用一般块体理论, 以采场四周的开拓巷道结构面调查数据为基础, 运用 GeneralBlock 程序初步解算出采场内结构体, 分析结构体的真实性, 制定真实性分级表。结合 3DMine 软件, 用定义包裹长方体的方法准确刻划结构体的位置, 建立简单材料力学模型, 计算出固定结构体的最小固定面面积。对于解算出的结构体, 在块体可移动性定理和稳定性原理的基础上, 运用材料力学、集合等方法, 分析矿块回采过程中结构体可移动性, 计算结构体稳定性系数。研究成果成功解算出采场内结构体并进行了稳定性分析, 对于裂隙岩体加固与采矿工艺优化具有较好的指导意义。

关键词: 采矿工程; 采场; 结构体; 解算; 一般块体理论

中图分类号: TD 45

文献标识码: A

Solution of structure body and its stability calculation in stope

CHEN Qing-fa¹, ZHAO You-ming², CHEN De-yan¹, TANG Zhong-qin¹, YU Zhen-yu¹

(1.College of Resources and Metallurgy, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2.Guangxi Bureau of Coal Geology, Liuzhou, Guangxi 545005, China)

Abstract: For the existence of stope structure body having a great influence on the safety mining of ore block, it is very important to carry out the method for calculating the structure body and its stability. By the application of general block theory, based on the data of structure plane in the developing roadways surrounding the stope, structure bodies in stope were preliminarily worked out by using GeneralBlock code. The authenticity of structure body was analyzed; and its grading table was established. Combined with 3DMine software, the structure body positions were accurately marked by defining the package cuboids. A material mechanics model was established; the minimum area of the fixed structure plane in the fixed structure body was gotten. For the calculated structure body, according to the block mobility theorem and stability theory, using methods of material mechanics and sets, the mobility of structure body during the ore stoping process was analyzed; and the coefficient of structure body stability was obtained. The results for calculating the structure body and its stability provide a good guide for strengthening and optimizing the mining technology of the fractured rock mass.

Key words: mining engineering; stope; structure body; solution; general block theory

1 引言

岩体内存在着大量的节理、裂隙、断层、破碎带等结构面, 众多结构面将岩体切割成为大量的块体。在完成开拓尚未进行回采的矿块内存在的块体(结构体), 对矿块的安全回采影响较大, 因此, 开展矿块内结构体解算及其稳定性分析研究具有重要意义。

在块体分析研究领域, 关键块体理论是岩石块

体理论研究中最成熟的部分, 由 Goodman 和 Shi^[1-2] 1985 年创立, 在国内外研究不稳定岩石块体的识别、稳定性评价以及加固设计时得到普遍应用^[3-6]。但关键块体理论存在一些突出问题。即: 将岩体结构面或裂隙面假设为无限大, 未考虑不同规模不连续结构面对岩体强度及稳定性的影响。为解决前述问题, 于青春^[7]提出了一般块体理论, 开发了 GeneralBlock 程序, 解决了有限延展结构面问题, 更加符合工程实际^[8-10]。

收稿日期: 2012-09-07

基金项目: 广西防灾减灾与工程安全重点实验室开放基金(No. 2012ZDK09)。

第一作者简介: 陈庆发, 男, 1979 年生, 博士后, 副教授, 主要从事矿山岩石力学和采矿工艺的教学与科研。E-mail: chqf98121@163.com

2 采场内结构体解算方法

2.1 采场内结构体的初步解算

20 世纪 80 年代,孙广忠^[11]提出了“岩体结构控制论”,并对结构面的规模以及连续性做了详细地分级。在研究过程中,可以使用产状、间距、连续性、延伸性、张开度等物理量描述结构面。利用 GeneralBlock 程序可以解算出采场内结构体。矿块参数如图 1 所示,具体定义参数为:一阶边坡定义矿块,各边坡角度均设为 90°, x 轴长为 60 m, y 轴长为 100 m, z 轴高为 50 m。矿块 6 个面均为固定面,不含自由面。

根据文献[11]确定本文研究的主要是Ⅲ级和Ⅳ级结构面。以某一工程开拓巷道侧帮结构面调查数据为基础,整理并输入 General Block 程序,开展结构体的解算、识别与稳定性分析研究。图 2 为 1[#]矿块采场内结构体的解算结果图,解算的内容包括:块体类型、块体体积 V 、结构面迹线和块体的组成结构面等。

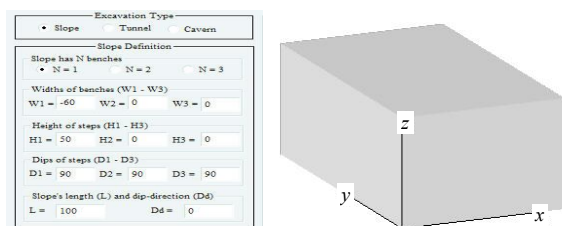


图 1 矿块参数图

Fig.1 Parameters of ore block

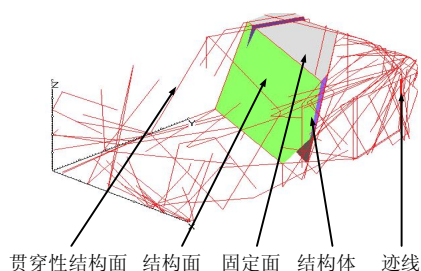


图 2 矿块内结构体解算结果

Fig.2 The computed results of structure body in ore block

2.2 结构体真实性分析

野外结构面统计存在着各种误差,如产状统计误差、迹长统计误差;另一方面,结构面半径无法直接测量,只能通过迹长估算,这些因素影响了结构体解算结果的真实性。

结构体为多面体,由若干个多边形组成,结构体的真实性分析可以转化为多边形面的真实性分析。假设实测点为结构面圆盘的圆心,结构面半径的保守估计值为 μ (μ 可根据地质人员经验得出)。

图 3 为结构体真实性分析图。多边形 a 的 3 个顶点分别记作 A_1 、 A_2 和 A_3 ,所在结构面的实测点记作 A 。分别计算线段 AA_1 、 AA_2 、 AA_3 的长度。

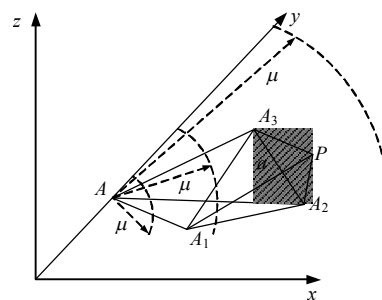


图 3 结构体真实性分析图

Fig.3 Analysis of structure body authenticity

若 $\max(AA_1, AA_2, AA_3) \leq \mu$, 则面 a 真实存在; 若 $\max(AA_1, AA_2, AA_3) > \mu > \min(AA_1, AA_2, AA_3)$, 则面 a 部分存在; 若 $\min(AA_1, AA_2, AA_3) \geq \mu$, 则面 a 不存在。

设任一结构体有 N 个面, 对应 N 个实测点, 分别记为 $A_i (i=1, 2, \dots, N, N$ 为正整数)。第 i 个面上 S_j 个顶点, 分别记作 $A_{ij} (j=1, 2, \dots, S, S$ 为正整数), 若 $A_i(x_i, y_i, z_i)$, $A_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$, 则

$$A_i A_{ij} = \sqrt{(x_i - x_{ij})^2 + (y_i - y_{ij})^2 + (z_i - z_{ij})^2} \quad (1)$$

若第 i 个面上求得 $A_i A_{ij}$ 长度最大值为 b_i , 最小值为 d_i , 即 $b_i = \max(A_i A_{ij})$, $d_i = \min(A_i A_{ij})$ 。此时 i 为某一确定的正整数, $j=1, \dots, S$ 。若 $b_i \leq \mu$, 则面 i 存在; 若 $d_i \geq \mu$, 则面 i 不存在; 若 $d_i < \mu < b_i$, 则面 i 部分存在。

固定面、自由面和贯穿性结构面不必参与运算, 自由面与贯穿性结构面可直接反映结构体的真实性, 切割结构体的自由面与结构面中自由面与贯穿性结构面的数量越多, 则结构体真实存在的可能性越大。固定面是假想面, 其真实性不作分析。

根据上述分析, 对结构体的真实性进行分级, 结果如表 1 所示。

表 1 结构体真实性分级表

Table 1 Authenticity classification of structure body		
级别	描述	评价
I	完全由自由面和(或)贯穿性结构面切割而成	确定存在
II	含部分自由面和(或)贯穿性结构面, 其余为 $b_i \leq \mu$ 的结构面	很真实
III	全部为 $b_i \leq \mu$ 的结构面	较真实
IV	部分为 $b_i \leq \mu$ 的结构面, 其余为 $d_i < \mu < b_i$ 的结构面	真实
V	全部为 $d_i < \mu < b_i$ 的结构面和(或) $b_i \geq \mu$ 的结构面	不真实

2.3 结构体的位置与最小固定面面积解算

在 3DMine 中导入由 GeneralBlock 输出的结构体 DXF 格式文件。定义结构体的包裹长方体, 长方体各边平行或垂直于坐标轴。通过求解该包裹长方体在 Oxy 面和 Oxz 面投影形心的坐标值, 确定出结构体的重心位置, 如图 4 为 2[#]矿块采场内结构体位置计算示意图。

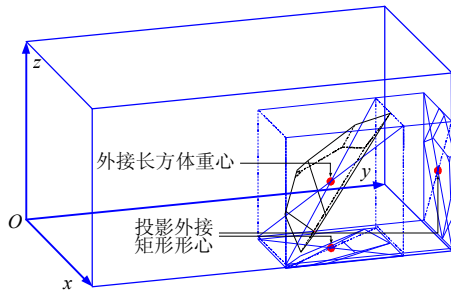


图 4 2[#]矿块采场内结构体位置计算示意图
Fig.4 Counting of structure body position in the stope #2

解算出的结构体有隐藏结构体和固定结构体两类。分析过程中视隐藏结构体的固定面积为 0。固定结构体并未被切割成孤立体, 即为块体理论中所定义的无限块体, 其自身可能在应力作用下发生断裂破坏, 需对其稳定性进一步分析。

对容易失稳的固定块体进行识别, 需假设:

- (1) 固定结构体只在固定面处发生断裂破坏;
- (2) 围岩与结构体均为均质介质;

(3) 除固定面外, 其他面均视为临空面, 且驱动力只考虑自重力。

对于一个结构体, 当固定面积发生变化, 而其他条件不变, 在固定面积的变化过程中应当存在一个恰好令结构体保持稳定的面积, 称之为最小固定面面积。

考虑单个固定面的情形, 根据材料力学建立单

固定面简化计算力学模型, 如图 5 所示。此为采场顶板上的一个固定结构体, 结构体重心为 $O(x_o, y_o, z_o)$, 固定面形心为 $C(x_c, y_c, z_c)$, 以 OC 为轴作底面积为 A 的圆柱体, 固定结构体简化为一端嵌固的圆柱体。

固定面切割圆柱体于斜截面 c_1 , 过形心点 C 处的横截面为 c_2 , 斜截面 c 与横截面 c_2 的夹角为 α 。结构体的重力 G 集中作用于重心 O , 以 O 为原点, 以 OC 为 x 轴, 以重力线与 OC 线所确定的平面为 Oxy 平面, 建立三维坐标系。在 y 轴方向上, 嵌固端斜截面 B_1 到原点 O 处横截面距离最短, 点 B_1 所在横截面 c_3 上, 过点 B_1 的直径的另一端点为 B_2 。由材料力学的知识可知, 横截面 c_3 为圆柱体的危险截面, 此截面上沿着 y 轴方向直径的两个端点 B_1 、 B_2 将会出现最大的拉应力和压应力。

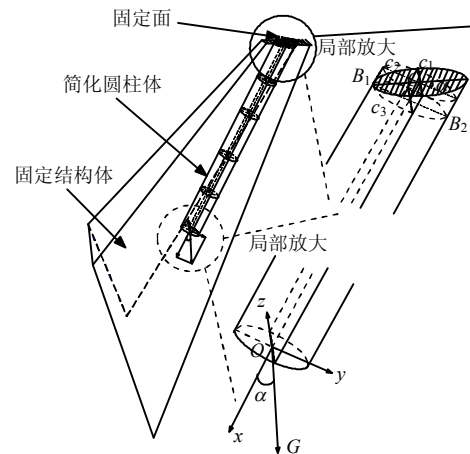


图 5 单固定面简化计算力学模型
Fig.5 Simplified calculation mechanical model of single fixed surface

OC 线段长为 l ,

$$l = OC = \sqrt{(x_o - x_c)^2 + (y_o - y_c)^2 + (z_o - z_c)^2} \quad (2)$$

结构体重心 $O(x_o, y_o, z_o)$ 可用式 (3) 求解^[12],

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{\iiint_V x dx dy dz}{V} = \frac{\iiint_V x dx dy dz}{\iiint_V 1 dx dy dz} = \frac{\sum \text{simplex-integration} - 3d(\text{point-data}, 1, 0, 0)}{\sum \text{simplex-integration} - 3d(\text{point-data}, 0, 0, 0)} \\ Y &= \frac{\iiint_V y dx dy dz}{V} = \frac{\iiint_V y dx dy dz}{\iiint_V 1 dx dy dz} = \frac{\sum \text{simplex-integration} - 3d(\text{point-data}, 0, 1, 0)}{\sum \text{simplex-integration} - 3d(\text{point-data}, 0, 0, 0)} \\ Z &= \frac{\iiint_V z dx dy dz}{V} = \frac{\iiint_V z dx dy dz}{\iiint_V 1 dx dy dz} = \frac{\sum \text{simplex-integration} - 3d(\text{point-data}, 0, 0, 1)}{\sum \text{simplex-integration} - 3d(\text{point-data}, 0, 0, 0)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: V 为结构体体积, x 、 y 和 z 为结构体重心的

三维坐标。此方法求结构体重心较复杂, 可以通过

编程实现快速求解, 文献[13]中已给出了求解的代码。为了便于工程应用, 也可使用包裹长方体的重心代替结构体的重心, 但会引起较大的误差。

固定面形心 $C(x_c, y_c, z_c)$ 可用公式 (4) 求解,

$$x_c = \frac{\int_s x dS}{\int_s dS}, y_c = \frac{\int_s y dS}{\int_s dS}, z_c = \frac{\int_s z dS}{\int_s dS} \quad (4)$$

设斜截面 c 的单位法向量为 $\vec{n} = (0, 0, 1)$, OC 连线的一个方向向量 $\vec{a} = (x_o - x_c, y_o - y_c, z_o - z_c)$ 。所以有

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{n} \cdot \vec{a}|}{\sqrt{(\vec{n})^2} \cdot \sqrt{(\vec{a})^2}} \right) \quad (5)$$

将 OC_3 段圆柱隔离体分析, 如图 6 所示。

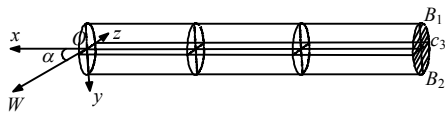


图 6 OC_3 段圆柱隔离体

Fig.6 Free-body diagram of period OC_3 of cylinder

结构体自重力 W 为

$$W = \gamma V \quad (6)$$

式中: γ 为岩石重度; V 为结构体体积。

结构体重力在 x 轴上的分力 F_x 为

$$F_x = \gamma V \cos \alpha \quad (7)$$

在 y 轴上的分力 F_y 为

$$F_y = \gamma V \sin \alpha \quad (8)$$

由材料力学知识, 联合式 (7)、(8), 杆所受到的轴力 F_N 、剪力 F_S 、弯矩 M , 圆截面的惯性矩 I_z 、抗弯截面系数 W_z 分别为

$$F_N = F_x = \gamma V \cos \alpha \quad (9)$$

$$F_S = F_y = \gamma V \sin \alpha \quad (10)$$

$$M = \gamma V x \sin \alpha \quad (11)$$

$$I_z = \frac{\pi d^4}{64} \quad (12)$$

$$W_z = \frac{\pi d^3}{32} \quad (13)$$

在横截面 c_3 处, 弯矩最大, 弯曲正应力最大。图 7 是横截面 c_3 上正应力分布示意图, 最大的拉应力出现在点 B_1 处, 最大压应力出现在点 B_2 处。

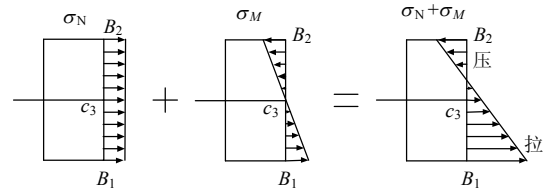


图 7 横截面 c_3 上正应力分布示意图

Fig.7 Normal stress distribution on cross-section c_3

最大弯矩 M_{c_1} 为

$$M_{c_1} = \gamma V \left(l - \frac{d}{2} \tan \alpha \right) \sin \alpha \quad (14)$$

轴向拉应力 σ_N 为

$$\sigma_N = \frac{F_N}{A} = \frac{4\gamma V \cos \alpha}{\pi d^2} \quad (15)$$

最大弯曲正应力为

$$\sigma_{M_{c_1}} = \frac{M_{c_1}}{W_z} = \frac{32\gamma V \left(l - \frac{d}{2} \tan \alpha \right) \sin \alpha}{\pi d^3} \quad (16)$$

最大弯曲切应力 $\tau_{\max}$ 为

$$\tau_{\max} = \frac{4F_S}{3A} = \frac{16\gamma V \cos \alpha}{3\pi d^2} \quad (17)$$

最大拉应力 $\sigma_{t_{\max}}$ 为

$$\sigma_{t_{\max}} = \sigma_{M_{c_1}} + \sigma_N = \frac{M_{c_1}}{W_z} + \frac{F_N}{A} = \frac{32\gamma V \left(l - \frac{d}{2} \tan \alpha \right) \sin \alpha}{\pi d^3} + \frac{4\gamma V \cos \alpha}{\pi d^2} \quad (18)$$

最大压应力 $\sigma_{c_{\max}}$ 为

$$\sigma_{c_{\max}} = \sigma_{M_{c_1}} - \sigma_N = \frac{M_{c_1}}{W_z} - \frac{F_N}{A} = \frac{32\gamma V \left(l - \frac{d}{2} \tan \alpha \right) \sin \alpha}{\pi d^3} - \frac{4\gamma V \cos \alpha}{\pi d^2} \quad (19)$$

式中: σ_t 、 σ_c 、 τ 分别为岩石的抗拉强度、抗压强度和抗剪强度。

结构体保持稳定的条件是 $\sigma_{t_{\max}} \leq \sigma_t$ 且 $\sigma_{c_{\max}} \leq \sigma_c$ 且 $\tau_{\max} \leq \tau$, 即

$$\frac{32\gamma V \left(l - \frac{d}{2} \tan \alpha \right) \sin \alpha}{\pi d^3} + \frac{4\gamma V \cos \alpha}{\pi d^2} \leq \sigma_t \quad (20)$$

$$\frac{32\gamma V \left(l - \frac{d}{2} \tan \alpha \right) \sin \alpha}{\pi d^3} - \frac{4\gamma V \cos \alpha}{\pi d^2} \leq \sigma_c \quad (21)$$

$$\frac{16\gamma V \cos \alpha}{3\pi d^2} \leq \tau \quad (22)$$

式(20)、(21)可参考盛金公式^[14-15]求出 d , 以确定临界状态时横截面 c_1 的抗拉强度面积 A_t 和抗压强度面积 A_c 。

由式(22)求得横截面 c_1 抗剪强度面积 A_τ 为

$$A_\tau = \frac{1}{4}\pi d^2 \geq \frac{4\gamma V \cos \alpha}{3\tau} \quad (23)$$

设最小固定面面积 $A_{\min}$ 为

$$A_{\min} = \max(A_t, A_c, A_\tau) / \cos \alpha \quad (24)$$

当固定面在间柱(矿块的侧壁)或底板时, 上述公式仍然适用。

结构体最小固定面面积计算流程如图8所示。

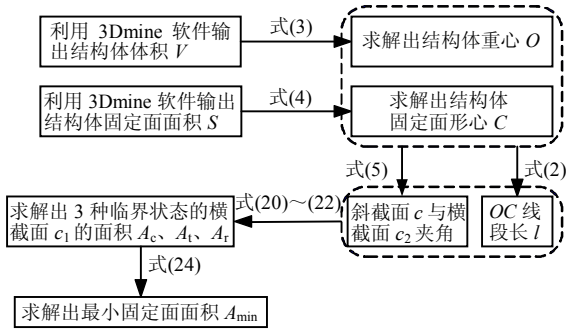


图8 结构体最小固定面面积计算流程图

Fig.8 Calculation flow chart of minimum fixed surface area of structure

3 采场内结构体可移动性分析

开挖方式对采场内结构体回采失稳机制起着决定性作用, 借助于块体理论可移动块体稳定性计算原理进行分析。

假设结构体为凸块体, 驱动力为自重力, 其单位方向矢量为 $\bar{w} = (0, 0, -1)$, 结构体有 N 个结构面, S 个固定面, 各结构面编号为 $n_i (i=1, \dots, N)$, 各结构面向内的单位法向矢量为 $\bar{n}_i$; 各固定面编号为 $m_i (i=1, \dots, S)$, 各固定面向内的单位法向矢量为 $\bar{m}_i$ 。通过点积 $\bar{w} \cdot \bar{m}$ 可将结构体各结构面分为两类:

(1) 当 $\bar{w} \cdot \bar{m} \geq 0$ 时, 面 n_i 称为非重力约束面, 在几何上不对重力方向的运动产生阻碍;

(2) 当 $\bar{w} \cdot \bar{m} < 0$ 时, 面 n_i 称为重力约束面, 在几何上对重力方向的运动产生阻碍。

显然, 固定面总是重力约束面, 但与其 $\bar{w} \cdot \bar{m}$ 的值无关。设所有固定面的集合为 D ; 所有结构面的集合为 E , 其中所有的非重力约束面的集合为 I , 所有重力约束面的集合为 J , 各集合表示如下:

$$D = \{m_i, i=1, \dots, S\}$$

$$E = \{n_i, i=1, \dots, N\}$$

$$I = \{n_i \mid \bar{w} \cdot \bar{m} \geq 0, i=1, \dots, N\}$$

$$J = \{n_i \mid \bar{w} \cdot \bar{m} < 0, i=1, \dots, N\}$$

$$E = I \cup J$$

3.1 埋藏结构体的回采可移动性分析

当集合 $D = \emptyset$, 即没有固定面, 此时结构体为埋藏结构体。所有重力约束面都是潜在的滑动面, 非重力约束面不可能成为滑动面。破坏的结构面的集合为 P , 一般认为破坏面之间总是两两相邻。破坏后的结构面成为临空面, 临空面的相邻面指与临空面共用一条边的面, 其集合为 A ; 周边面是指与临空面共用一条边或一个顶点的面, 其集合为 B , 显然有 $A \subseteq B$ 。图9为回采可移动性示例结构体, 平面 $ABCD$ 以上全部为非重力约束面, 以下全部为重力约束面。当 $P \neq \emptyset$ 时, 结构体可能产生运动。结构面发生破坏后形成临空面是结构体运动的必要条件, 可表示为 $P \neq \emptyset \Leftarrow$ 结构体运动。

(1) 当 $P = J$, 即所有的重力约束面破坏, 剩下的结构面满足 $\bar{w} \cdot \bar{n}_i \geq 0$, 则结构体掉落。当平面 $ABCD$ 以下结构面全部破坏, 则结构体掉落。

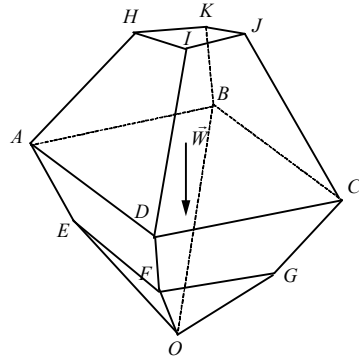


图9 回采可移动性示例结构体

Fig.9 Example for mobile structure body in mining

(2) 当 $P \subset J \wedge A \subset J$, 即重力约束面破坏, 且形成临空面的相邻面均为重力约束面时, 结构体不可移动。当重力约束面 FGO 被破坏时, 临空面 FGO 的相邻面为面 $DCGF$ 、 $BCGO$ 和 EFO , 均为重力约束面, 形成了圈闭的夹制作用, 结构体不可移动; 当面 FGO 和 EFO 同时破坏时, 形成的临空面为 $EFGO$, 为一曲面, 其相邻面为面 $ADFE$ 、 $DCGF$ 、 $BCGO$ 和 $ABOE$, 均为重力约束面, 形成了圈闭的夹制作用, 结构体仍不可移动。

(3) 当 $P \subset J \wedge A \cap I \neq \emptyset$, 即重力约束面破坏, 形成的临空面的相邻面有重力约束面, 也有非重力约束面时, 结构体可能出现滑动, 也可能不移动。

因为非重力约束面不可能成为滑动面, 非重力约束面之间, 重力约束面与非重力约束面之间的交棱不可能为滑动棱 (双面滑动其实为沿双面的交棱滑动), 可能的滑动棱或单滑动面出现在集合 $B-I$ 中。此时运用块体理论中块体单面滑动和双面滑动的判断原理对可能的滑动方向进行判断, 判断过程中只需对集合 B 中的面进行验证。

(4) 当 $P \subseteq I$ 时, 结构体不可能出现掉落运动, 可能出现滑动。

(5) 当 $P \subset I \wedge A \subset I$, 即非重力约束面破坏, 形成的临空面的相邻面均为非重力约束面时, 结构体不移动。非重力约束面 $HIJK$ 破坏, 形成的临空面的相邻面为 $AHID$ 、 $DIJC$ 、 $CJKB$ 和 $BKHA$, 均为非重力约束面, 结构体不移动。

(6) 当 $P \subseteq I \wedge A \cap J \neq \emptyset$, 即非重力约束面破坏, 形成的临空面的相邻面有重力约束面, 结构体可能出现滑动。非重力约束面 $AHID$ 破坏, 形成的临空面的相邻面为 $BKHA$ 、 $HIJK$ 、 $DIJC$ 和 $ADFE$, 其中面 $ADFE$ 为重力约束面, 其余为非重力约束面, 结构体可能发生单面滑动或双面滑动, 也可能不移动, 判断方法如(3)所述。

(7) 当 $P \cap I \neq \emptyset \wedge P \cap J \neq \emptyset$, 即被破坏的面有重力约束面, 也有非重力约束面时, 则必有 $A \cap I \neq \emptyset \wedge A \cap J \neq \emptyset$, 结构体可能出现滑动, 也可能不移动。非重力约束面 $DIJC$ 和重力约束面 $DCGF$ 被破坏, 形成的临空面的相邻面为 $HIJK$ 、 $AHID$ 、 $ADFE$ 、 FGO 、 $BCGO$ 和 $CJKB$, 其中 DFE 、 FGO 和 $BCGO$ 为重力约束面, 其余为非重力约束面, 结构面可能单面滑动或双面滑动, 也可能不移动, 判断方法如(3)所述。

3.2 固定结构体的回采可移动性分析

当集合 $D \neq \emptyset$, 即存在固定面时, 结构体为固定结构体。

固定面位于顶底板和间柱, 不直接因回采爆破而发生破坏, 可能的破坏是受爆破振动的影响而开裂形成次生结构面, 此次生结构面的集合为 C , 显然有 $C \subseteq D$ 。分析过程中只考虑一个或两个固定面, 即集合 D 只有一个或两个元素, 考虑固定面处的破断。

当 $P \neq \emptyset \wedge C = D$ 时, 结构体可能产生运动, 即所有的固定结构面演变为次生结构面, 结构面发生破坏后形成临空面是结构体运动的必要条件, 可表示为 $P \neq \emptyset \wedge C = D \Leftarrow$ 结构体运动。

次生结构面产生后, 集合 C 并入集合 E 中, 再根据 $\bar{w} \cdot \bar{n}_i$ 的值, 将集合 C 中的元素分别归入到 I

或 J 中。如此, 则之后的可移动形式的分析和稳定性计算将如 $D = \emptyset$ 时的分析计算类似。

4 结构体稳定性计算

4.1 埋藏结构体稳定性计算

埋藏结构体的稳定性计算参考一般块体理论中的块体稳定性计算。结构体掉落时不进行稳定性计算, 稳定性系数为 0。结构体滑动时运用一般块体理论进行计算分析。

4.2 固定结构体稳定性分析

回采后, 临空面只在采场内出现, 顶底板、顶底柱和间柱等不考虑回采破坏, 结构体无论为何运动形式, 总的运动趋势是指向采场内的。在稳定性分析过程中, 只考虑单固定面, 且假设结构体只在固定处发生破断并只考虑结构体自重, 不考虑其他地应力的影响。

(1) 当 $\bar{w} \cdot \bar{m}_i \geq 0$ 时, 固定面一般位于顶板、间柱及顶底柱处。

假设固定面为结构面。图 10 为当 $\bar{w} \cdot \bar{m}_i \geq 0$ 时满足掉落运动条件的固定块体。图 10(a)为一固定面位于间柱处的结构体, 经过回采, 其下部和右部形成了临空面。图 10(b)为一个固定面位于顶板处的结构体, 回采后, 其下部形成了临空面。

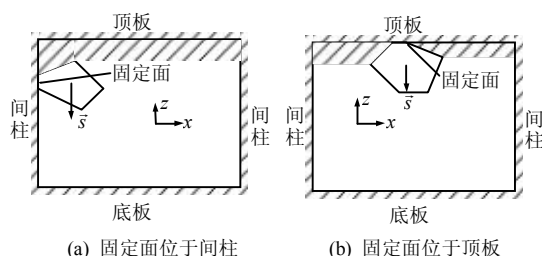


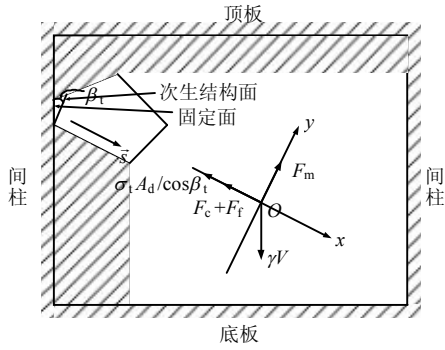
图 10 满足掉落运动条件的固定结构体 ($\bar{w} \cdot \bar{m}_i \geq 0$)

Fig.10 Fixed structure body meeting the drop conditions when $\bar{w} \cdot \bar{m}_i \geq 0$

两结构体满足掉落运动的条件, 发生掉落, $\bar{s}$ 为其运动方向矢量。此种结构体的稳定性计算参考最小固定面面积求法部分, 计算出结构体所对应的最小固定面面积 $A_{\min}$, 结构体的固定面面积为 A_d , 则其稳定性系数为 f :

$$f = \frac{A_d}{A_{\min}} \quad (25)$$

图 11 为当 $\bar{w} \cdot \bar{m}_i \geq 0$ 时满足滑动运动条件的固定结构体。经过回采, 其右部形成了临空面, 上部和下部还有留有矿石, 假设固定面为结构面时, 结构体满足滑动运动的条件, $\bar{s}$ 为其滑动方向矢量。

图 11 满足滑动运动条件的固定结构体 ($\bar{w} \cdot \bar{m}_i \geq 0$)Fig.11 Fixed structure body meeting the sliding movement conditions when $\bar{w} \cdot \bar{m}_i \geq 0$

结构体滑动失稳的过程为：首先固定面破断，产生了次生结构面，然后结构体滑动。由于岩体容易发生拉破坏，固定面不会成为滑动面，所以在固定处破断为次生结构面的过程中只考虑拉应力的作用，且次生结构面总体上垂直于滑动矢量。将作用于结构体的力移到坐标原点 O 上，以滑动方向线为 x 轴，以重力线与滑动方向线确定的平面为 Oxy 平面建立坐标系， F_m 为滑动面上的支承力，可求得结构体滑动方向矢量和固定面法向矢量的夹角 β_t 为

$$\beta_t = \cos^{-1} \frac{|\bar{n}_d \cdot \bar{s}|}{|\bar{n}_d| \cdot |\bar{s}|} \quad (26)$$

式中： $\bar{n}_d$ 为结构体固定面单位法向矢量。

由于固定面的破断产生的次生结构面形态复杂，其面积的确定较为困难，据经验大致取其面积为 $A_d / \cos \beta_t$ ，则固定面产生的阻力 F_d 为

$$F_d = \sigma_t A_d / \cos \beta_t \quad (27)$$

此时，固定结构体的稳定性系数 f_d 可定义为

$$f_d = \frac{F_f + F_c + F_d}{F_s} \quad (28)$$

式中： F_f 、 F_c 和 F_s 参考一般块体理论中块体的稳定性计算的内容。

(2) 当 $\bar{w} \cdot \bar{m}_i < 0$ ，固定面位于底板、间柱或底柱处。假设固定面为结构面时，因为固定面一般不因回采而破坏，结构体不会满足掉落运动条件，可能满足滑动条件。

图 12 为固定面不为滑动面的固定结构体。固定面处较易发生剪切破坏，对结构体作 $\bar{w} \cdot \bar{m}_i \geq 0$ 时的类似处理与分析，则：

$$\beta_r = 90^\circ - \cos^{-1} \left(\frac{|\bar{s} \cdot \bar{n}_d|}{|\bar{s}| |\bar{n}_d|} \right) \quad (29)$$

$$F_d = \tau A_d / \cos \beta_r \quad (30)$$

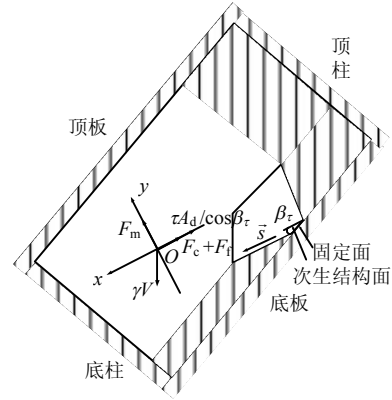
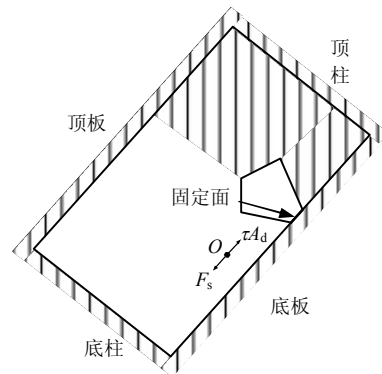
图 12 固定面不为滑动面的固定结构体 ($\bar{w} \cdot \bar{m}_i < 0$)Fig.12 Structure body about fixed surface not for sliding surface when $\bar{w} \cdot \bar{m}_i < 0$

图 13 为固定面为滑动面的固定结构体。固定面受剪切作用，固定面处受力超过岩石的抗剪强度时，结构体滑动失稳，结构面上不需要计算 F_f 和 F_c ，则：

$$F_d = \tau A_d \quad (31)$$

$$f = \frac{F_d}{F_s} \quad (32)$$

图 13 固定面为滑动面的固定结构体 ($\bar{w} \cdot \bar{m}_i < 0$)Fig.13 Structure body about fixed surface for sliding surface when $\bar{w} \cdot \bar{m}_i < 0$

5 讨 论

(1) 本文探讨了单固定面结构体的稳定性，未进行两个以上固定面结构体分析计算及凹结构体可移动性分析。

(2) 固定结构体的回采稳定性分析考虑的影响因素单一，还应该结合采矿行为的力学作用进行系统分析研究。

(3) 对于结构体最小固定面面积简化力学模型计算结果产生的误差及固定面破裂产生的次生结构面垂直于滑动矢量或平行于滑动矢量导致的误差，留待以后研究分析。

6 结 论

(1) 使用 GeneralBlock 软件和 3DMine 软件初步解算出采场内的结构体, 分析了其真实性, 推导出计算固定结构体的最小固定面积的公式, 用定义包裹长方体方法准确刻划了结构体位置, 清楚地了解采场中结构体的分布情况。

(2) 以一般块体理论为基础, 运用集合、矢量分析的方法, 研究分析了不同的回采方式形成的不同结构面对结构体失稳形式的关系, 有效指导了矿块的安全回采。

(3) 计算了单固定面的结构体稳定性系数, 推导了不同情况固定结构体稳定性系数计算公式。

参 考 文 献

- [1] GOODMAN R E, SHI G H. Block theory and application to rock engineering[M]. New York: Prentice Hall, 1985: 58—65.
- [2] GOODMAN R E, SHI G H. Geology and rock slope stability—application of the key block concept for rock slope[C]//Proceedings of the 3rd International Conferences on Stability in Surface Mining (AIME/SME, NEW YORK). New York: Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1982: 347—373.
- [3] 臧士勇. 块体理论及其在采场巷道稳定性分析中的应用[J]. 昆明理工大学学报, 1997, 22(4): 9—15.
ZANG Shi-yong. Rudiments of block theory and its application to the stability analysis of stope driftway[J]. **Journal of Kunming University of Science and Technology**, 1997, 22(4): 9—15.
- [4] 魏继红, 吴继敏, 陈显春, 等. 块体理论在高速公路连拱隧道超挖预测中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2005, (5): 60—63.
WEI Ji-hong, WU Ji-min, CHEN Xian-chun, et al. Application of block theory on overbreak forecast in double-arch tunnel[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2005, (5): 60—63.
- [5] 黄正加, 邬爱清, 盛谦. 块体理论在三峡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 648—652.
HUANG Zheng-jia, WU Ai-qing, SHENG Qian. Usage of block theory in the Three Gorges project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(5): 648—652.
- [6] 张子新, 孙钧. 块体理论赤平解析法及其在硐室稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1756—1760.
ZHANG Zi-xin, SUN Jun. Stereanalytic method for block theory and its application to stability analysis of a cave[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(12): 1756—1760.
- [7] 于青春, 陈德基, 薛果夫, 等. 裂隙岩体一般块体理论初步[J]. 水文地质工程地质, 2005, (6): 42—47.
YU Qing-chun, CHEN De-ji, XUE Guo-fu, et al. Preliminary study of general block method of fractured rock mass[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2005, (6): 42—47.
- [8] 于青春, 陈德基, 薛果夫, 等. 裂隙岩体一般块体理论[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 1—11.
- [9] 张丽莉, 于青春. 一般块体方法理论验证[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(6): 55—60, 70.
ZHANG Li-li, YU Qing-chun. Theoretical validation on general block method[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2010, 37(6): 55—66, 70.
- [10] 李建勇, 肖俊, 王颖. 岩体稳定性分析的块体理论方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(21): 4—8.
LI Jian-yong, XIAO Jun, WANG Ying. Simulation method of rock stability analysis based on block theory research[J]. **Computer Engineering and Applications**, 2010, 46(21): 4—8.
- [11] 孙广忠. 论“岩体结构控制论”[J]. 工程地质报, 1993, 1(1): 14—18.
SUN Guang-zhong. On the theory of structure-controlled rockmass[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1993, 1(1): 14—18.
- [12] 武艳强, 陈光齐, 江在森. 任意多面体重心及积分的精确算法[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(27): 6515—6520.
WU Yan-qiang, CHEN Guang-ji, JIANG Zai-sen. Accuracy algorithm of integration and gravity centers in the polyhedron with arbitrary shape[J]. **Science Technology and Engineering**, 2011, 11(27): 6515—6520.
- [13] 李玉冰, 郝永杰, 刘恩海. 多边形重心的计算方法[J]. 计算机应用, 2005, 25(2): 91—98.
- [14] 范盛金. 一元三次方程的新求根公式与新判别法[J]. 海南师范学院学报(自然科学版), 1989, 2(2): 91—98.
FAN Sheng-jin. A new extracting formula and a new distinguishing means on the one variable cubic equation[J]. **Natural Science Journal of Hainan Teachers College**, 1989, 2 (2): 91—98.
- [15] 王利畏. 液化石油气储罐充液高度的计算[J]. 科技情报开发与经济, 2006, 16(5): 190—192.
WANG Li-wei. Liquid height calculation of the liquefied petroleum gas(LGP) tanks[J]. **Sci-Tech Information Development & Economy**, 2006, 16(5): 190—192.