

文章编号: 0253-9993(2008)02-0171-04

块裂结构岩体中的三维应力传递

翟英达¹, 康立勋¹, 朱德仁²

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 中国煤炭工业协会, 北京 100713)

摘要: 利用岩石力学中碎裂介质理论提出的方法, 研究了应力在三维块裂介质中的传递规律。根据矿山地下开采中采场上方一定范围内岩石破断后可能形成的块体形状, 把破断块体抽象成具有一定长、宽、高和破断角的规则块体, 建立了采场上覆岩层三维块裂介质力学计算模型; 借助应力计算理论, 研究了自重应力在三维块裂介质模型中的传递规律, 得到了相应的三维应力计算公式。块裂介质中块体自重产生的三维应力大小受计算位置上方岩块数量、岩块密度以及岩块的长、宽、高、破断角等几何参数的控制, 同时还与块体的重力分解系数有关。

关键词: 块裂结构; 岩体; 三维; 自重应力

中图分类号: TU459.4 **文献标识码:** A

Transmitting of three dimensions stresses in block structure rock mass

ZHAI Ying-da¹, KANG Li-xun¹, ZHU De-ren²

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. China Coal Industry Association, Beijing 100713, China)

Abstract: The transmitting law of three dimensions stress in block structure rock mass was researched by using the method of fracture medium theory in rock mechanics. Based on the shape of blocks in broken zone of the strata over working site in underground mining, the rock blocks in broken zone were drawn as regular blocks which have constant length, width, height and breaking angle, and mechanics calculating model about three dimensions block media was set. With the aid of stress calculating theory, the principle of gravitational stress transmission in block structure rock mass was researched, and the stress calculating formulas in three dimensions were obtained. The values of three dimension stresses caused by dead weight of rock blocks are controlled by number of blocks above the calculated block, unit weight of rock and geometry coefficients as length, width, height and breaking angle of rock block, and concerned with the resolution factor of gravity force of block.

Key words: block structure; rock mass; three dimensions; gravity stress

煤层开采后, 采场上方一定范围内的岩层会破断成块体而形成断裂带。该范围内岩石块体的自身质量是本基本顶结构上载荷的主要来源^[1]。在理想状态下, 由岩石块体组成的断裂带岩体可以抽象为如图1所示的块体介质模型, 重力在这类块体介质中的传递方式不同于连续介质, 而是遵循特有的规律^[2]。笔者利用碎裂块体理论的研究方法已经建立了二维块体介质中自重应力的计算公式, 相关的结论与应用发表在文献[1]。为了更好地帮助确定特定层位岩体的应力边界条件^[3]以及为块裂结构岩体施工时围岩稳定性判断^[4]提供应力计算依据, 本文针对图1所示介质模型, 从三维空间角度研究块裂岩体中应力的传递规律, 建立

收稿日期: 2007-01-29 责任编辑: 柴海涛

基金项目: 山西省留学回国人员科研基金资助项目(98-41)

作者简介: 翟英达(1966—), 男, 河北辛集人, 副教授, 硕士生导师, 博士. Tel: 0351-6014466, E-mail: zhaiyd@163.com

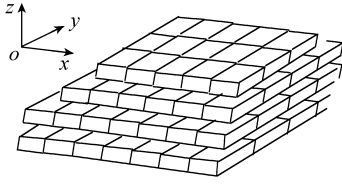


图1 三维块体介质模型

Fig. 1 3 dimensions model of block medium

的 oxy 平面, 底面中心为坐标原点 o ; x 轴与长度为 a 的底边平行, 其正向与块体侧面夹角为 α_0 (定义为块体破断角); y 轴与长度为 b 的底边平行, 其正向与块体侧面夹角为 α_0 ; z 轴沿厚度方向, 以向上为正。

定义块体 A 的中心为 o_A , 编号为 i ($i = 1, 2, 3, 4$) 的块体中心为 o_i ; 自块体 A 的中心 o_A 向块体 i 的中心 o_i 所在平面引垂线, 垂足为 o' 。利用以上点的坐标, 可以求出线段 $\overline{o_A o'}$ 和 $\overline{o_i o'}$ 的长度。

定义块体 A 的中心 o_A 与其下方第 i 块块体中心 o_i 的连线和竖直方向的锐角夹角 θ_i 为块体分布角, 利用有关的几何要素可求得

$$\theta_1 = \arctan \sqrt{\left(\frac{a}{2h} - \cot \alpha_0\right)^2 + \left(\frac{b}{2h} + \cot \alpha_0\right)^2}, \theta_2 = \arctan \sqrt{\left(\frac{a}{2h} - \cot \alpha_0\right)^2 + \left(\frac{b}{2h} + \cot \alpha_0\right)^2},$$

$$\theta_3 = \arctan \sqrt{\left(\frac{a}{2h} + \cot \alpha_0\right)^2 + \left(\frac{b}{2h} - \cot \alpha_0\right)^2}, \theta_4 = \arctan \sqrt{\left(\frac{a}{2h} + \cot \alpha_0\right)^2 + \left(\frac{b}{2h} + \cot \alpha_0\right)^2}.$$

令直线 $o_i o'$ 与 y 轴的夹角为 β_i , 可以求出

$$\beta_1 = \arctan \frac{a - 2hcot \alpha_0}{b + 2hcot \alpha_0}, \beta_2 = \arctan \frac{a - 2hcot \alpha_0}{b - 2hcot \alpha_0},$$

$$\beta_3 = \arctan \frac{a + 2hcot \alpha_0}{b - 2hcot \alpha_0}, \beta_4 = \arctan \frac{a + 2hcot \alpha_0}{b + 2hcot \alpha_0}.$$

1.2 块体的受力要素

在图1中, 岩体内部任一块体的周围有12个以面接触方式接触的岩块。将前述岩块 A 视作中心岩块, 由碎块体理论的中心作用原理可知, 为保证力矩平衡, 两个面接触岩块之间的接触力沿这2个岩块中心连线方向传递^[2]。作用在岩块 A 上的力除自身重力 W 外, 还有来自周围12个接触块体的12个接触力(图3), 它们分别为: 来自上层右外侧块体的 R_1 、左外侧块体的 R_4 、右内侧块体的 R_2 、左内侧块体的 R_3 、来自外侧块体的 E 、右侧块体的 I 、内侧块体的 U 、左侧块体的 J 、来自下层左外侧块体的 O_4 、右外侧块体的 O_1 、右内侧块体的 O_2 、左内侧块体的 O_3 。 A 块体在这组接触力和自身重力作用下保持平衡状态。

定义 $R_1^0, R_2^0, R_3^0, R_4^0, I^0, U^0$ 为由单个块体自重 W 产生的作用于相邻面接触块体上、作用方向分别为 $o_A O_3, o_A O_4, o_A O_1, o_A O_2, x, y$ 方向的单位力(图4)。在大小上, 假设有 $R_1^0 = K_2 R_2^0 = K_3 R_3^0 = K_4 R_4^0$, 其中 K_2, K_3, K_4 为比例常数(可称之为重力分解系数), 则将单个块体的重力 W 分解后, 可得

$$R_1^0 = WK_2 K_3 K_4 / S, R_2^0 = WK_3 K_4 / S, R_3^0 = WK_2 K_4 / S, R_4^0 = WK_2 K_3 / S. \quad (1)$$

$$I^0 = \frac{W(K_2 K_3 K_4 \sin \theta_3 \sin \beta_3 + K_3 K_4 \sin \theta_4 \sin \beta_4)}{S} - \frac{W(K_2 K_4 \sin \theta_1 \sin \beta_1 - K_2 K_3 \sin \theta_2 \sin \beta_2)}{S},$$

$$U^0 = \frac{W(K_2 K_4 \sin \theta_1 \cos \beta_1 + K_3 K_4 \sin \theta_4 \cos \beta_4)}{S} - \frac{W(K_2 K_3 K_4 \sin \theta_3 \cos \beta_3 + K_2 K_3 \sin \theta_2 \cos \beta_2)}{S},$$

式中, $S = K_2 K_3 K_4 \cos \theta_3 + K_3 K_4 \cos \theta_4 + K_2 K_4 \cos \theta_1 + K_2 K_3 \cos \theta_2$ 。

揭示上述规律的三维应力计算公式。

1 块体介质模型的基本参数

1.1 块体结构的几何参数

如图2所示, 从块体介质中任选一个块体 A 作为研究对象, 在 A 下面有编号分别为1~4的块体与之接触, 各块体的厚度为 h , 底面边长分别为 a 和 b 。以块体 A 的底面为坐标系

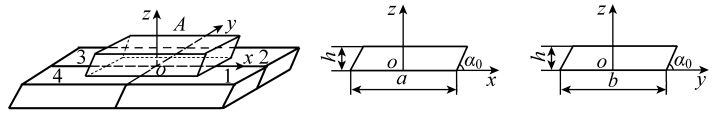


图2 块体介质中的基本块体

Fig. 2 The basic block in block medium

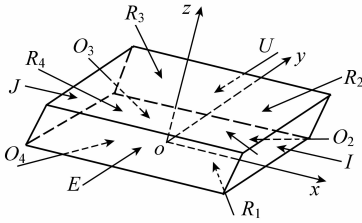


图3 单个块体上受的力
Fig. 3 The forces on a block

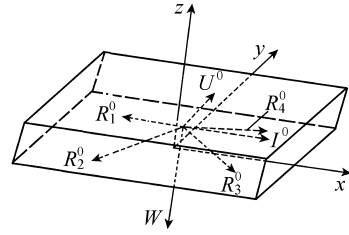


图4 块体所受重力的分解
Fig. 4 The resolution of gravity acting on a block

对于中心岩块A，如果其上部所受接触力 R_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 的来源方向有 l_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 个岩块，水平接触力 I 及 U 的来源方向分别有 n 和 m 个岩块，则有

$$R_1 = l_1 R_1^0, R_2 = l_2 R_2^0, R_3 = l_3 R_3^0, R_4 = l_4 R_4^0, I = n I^0, U = m U^0. \quad (2)$$

对于接触力 O_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 和 J, E ，则有

$$\begin{aligned} O_1 &= (l_3 + 1) R_3^0, O_2 = (l_4 + 1) R_4^0, O_3 = (l_1 + 1) R_1^0, \\ O_4 &= (l_2 + 1) R_2^0, J = (n + 1) I^0, E = (m + 1) U^0. \end{aligned} \quad (3)$$

在上述接触力系作用之下，岩石块体内部产生某种形式的应力分布。

2 块体介质中的三维应力传递规律

定义单位力 R_i^0 ($i = 1, 2, 3, 4$) 在 x, y, z 轴方向的分量分别为 R_{ix}^0, R_{iy}^0 和 R_{iz}^0 (它们可通过对 R_i^0 的分解计算得到，与块体模型的几何参数 θ_i 和 β_i 有关)。选取如图5所示的一个块体，显然，来自该块体上方的块体接触力为 R_i^0 ，它们是块体内与 oxy 坐标平面平行的面上的应力之源。根据应力理论^[5]，利用 oxy 平面上力的平衡条件，可以求出块体内与 oxy 平面平行的面上的平均应力；再根据式(2)确定的 R_i 与 R_i^0 之间的关系，可以得到图1模型中块体内的应力 σ_z 和 τ_{zx}, τ_{zy} 。同样可求出块体内与 oxz 坐标平面平行的面上的应力分量 $\sigma_y, \tau_{yx}, \tau_{yz}$ 以及与 oyz 坐标平面平行的面上的应力分量 σ_x, τ_{xy} 和 τ_{xz} 。最终的结果为

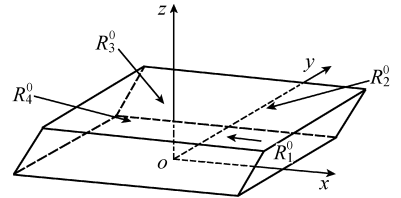


图5 平行于 oxy 坐标面的平面上的应力
Fig. 5 Calculating model of stress acting on the plane paralleling with coordinate plane oxy

$$\begin{cases} \sigma_x = -\frac{1}{2bh} \left(\sum_{i=1}^4 l_i R_{ix}^0 + 2nI^0 \right) + \frac{l_3 R_{3x}^0 + l_4 R_{4x}^0 - l_1 R_{1x}^0 - l_2 R_{2x}^0}{ab} \cot \alpha_0, \\ \sigma_y = -\frac{1}{2ah} \left(\sum_{i=1}^4 l_i R_{iy}^0 + 2mU^0 \right) + \frac{l_1 R_{1y}^0 + l_4 R_{4y}^0 - l_2 R_{2y}^0 - l_3 R_{3y}^0}{ab} \cot \alpha_0, \\ \sigma_z = -\frac{1}{ab} \sum_{i=1}^4 l_i R_{iz}^0, \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{l_1 R_{1x}^0 + l_3 R_{3x}^0 - l_2 R_{2x}^0 - l_4 R_{4x}^0}{2ah} + \frac{l_3 R_{3x}^0 + l_4 R_{4x}^0 - l_1 R_{1x}^0 - l_2 R_{2x}^0}{ab} \cot \alpha_0, \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} = \frac{l_3 R_{3x}^0 + l_4 R_{4x}^0 - l_1 R_{1x}^0 - l_2 R_{2x}^0}{ab}, \tau_{yz} = \tau_{zy} = \frac{l_1 R_{1y}^0 + l_4 R_{4y}^0 - l_2 R_{2y}^0 - l_3 R_{3y}^0}{ab}. \end{cases} \quad (4)$$

显然，只要按照式(1)确定了 R_i^0 及 I^0, U^0 ，并计算出相应的 $R_{ix}^0, R_{iy}^0, R_{iz}^0$ ，便可以由式(4)求出块体中的各个应力分量。式中应力的正负遵从弹性力学中应力理论对应力正负的规定。

3 应用

考虑二维问题，比如只研究 oxz 平面内的应力，定义岩石的密度为 γ_0 ，此时模型中几何参数 $b = 1$ ，单

个块体质量为 $W = \gamma_0 ah$ ，且有

$$R_1^0 = \frac{WK_4}{K_4 \cos \theta_4 + \cos \theta_1}, R_4^0 = \frac{W}{K_4 \cos \theta_4 + \cos \theta_1}, I^0 = \frac{W(K_4 \sin \theta_4 - \sin \theta_1)}{K_4 \cos \theta_4 + \cos \theta_1}.$$

其余参量不考虑，计算出 R_{ix}^0 ， R_{iz}^0 后连同 I^0 一起代入式 (4)，可得

$$\sigma_x = -\frac{l_1 K_4 \gamma_0 a \sin \theta_4 + l_4 \gamma_0 a \sin \theta_1 + 2na(K_4 \sin \theta_4 + \sin \theta_1)}{2(K_4 \cos \theta_4 + \cos \theta_1)} - \frac{l_1 \gamma_0 K_4 h \sin \theta_4 - l_4 \gamma_0 h \sin \theta_1}{K_4 \cos \theta_4 + \cos \theta_1} \cot \alpha_0,$$

$$\sigma_z = -\frac{l_1 K_4 \gamma_0 h \cos \theta_4 + l_4 \gamma_0 h \cos \theta_1}{K_4 \cos \theta_4 + \cos \theta_1}, \tau_{xz} = \tau_{zx} = -\frac{l_1 K_4 \gamma_0 h \sin \theta_4 - l_4 \gamma_0 h \sin \theta_1}{K_4 \cos \theta_4 + \cos \theta_1}. \quad (5)$$

该结果正是文献 [1] 中研究得到的二维块体介质中的应力计算公式。另外，当 $\alpha_0 = 90^\circ$ 时，式 (5) 与碎块体理论的结果一致^[2]。因篇幅有限，上述结果的应用请参考文献 [1] 和 [2]。

针对和采矿工程密切相关的应力分量 σ_z ，当 $\alpha_0 = 90^\circ$ 且 $K_4 = 1$ ， $l_1 = l_4 = l$ 时，由式 (5) 可得

$$\sigma_z = -\frac{l_1 K_4 \gamma_0 h \cos \theta_4 + l_4 \gamma_0 h \cos \theta_1}{K_4 \cos \theta_4 + \cos \theta_1} = -l \gamma_0 h = -\gamma_0 H.$$

其中负号代表应力的性质为压应力； l 为计算位置上方在 R_1^0 作用方向的块体数； H 为块体介质中计算位置的深度， $H = lh$ 。显然，该结论和常用的原岩应力计算理论中垂直自重应力的计算结果一致。

4 结 论

(1) 块体介质中由重力荷载引起的三维应力传递规律是地下采矿工程中采场上方断裂带岩层应力场分析的理论基础。

(2) 在三维块体结构岩体中，重力荷载作用下某块体中的应力除与结构中块体的密度、块体的长、宽、高以及块体破断角这些几何参数有关外，还和被计算块体与其上方相邻块体形心连线方向的块体数量密切相关。

(3) 确定块体介质中应力三维传递规律的关键之一，是确定介质中单个块体的自重在不同方向的重力分解系数，它们往往和块体所在岩层的倾向、倾角有关。

(4) 同二维块体介质的应力计算公式相比，由式 (4) 确定的块体介质中的三维应力传递规律更具有普遍性。

参考文献：

- [1] 康立勋, 翟英达. 块体结构岩体中的应力传递与采场基本顶结构载荷计算 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (10): 1 720 ~ 1 723.
- [2] 重庆建筑工程学院, 同济大学. 岩体力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981. 57 ~ 64.
- [3] 翟英达, 康立勋, 朱德仁. 面接触块体结构的力学特性研究 [J]. 煤炭学报, 2003, 28 (3): 241 ~ 245.
- [4] Zhai Yingda. Study on the cutting plane friction law of sandstone [J]. Journal of Coal Science & Engineering (China), 2003, 9 (2): 40 ~ 42.
- [5] 徐芝纶. 弹性力学简明教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1983. 15 ~ 19, 25.