

大采高采场顶板断裂关键块稳定性分析

付玉平, 宋选民, 邢平伟, 严国超, 李志军

(太原理工大学 采矿工艺研究所, 山西 太原 030024)

摘要:以大采高采场基本顶初次断裂对称的关键块为研究对象, 将其视为可变形体, 按照严格的变形对应关系, 分析回转下沉不同位置的块体变形量与水平力的关系. 探索块体结构的平衡-失稳状态转化的临界点, 详细分析了关键块在回转下沉过程中, 作用在其上的水平力变化规律, 给出了水平力与回转下沉角度、块体的块度系数以及上覆载荷和块体自身质量的量化关系式, 并且给出了关键块发生滑落失稳和回转失稳时块度系数与回转角度的关系, 以及关键块平衡时具有承载能力的范围. 与传统近似计算方法所得结论比较, 结果表明: 按照严格的几何对应关系推导的结果比原来方法计算的水平力大了近1倍; 关键块自身平衡作用范围增大. 给出了关键块承载能力的回归计算公式, 依照此公式可以预测断裂的顶板关键块是否会失稳.

关键词: 大采高; 顶板断裂; 关键块; 稳定性

中图分类号: TD322.1

文献标识码: A

Stability analysis on main roof key block in large mining height workface

FU Yu-ping, SONG Xuan-min, XING Ping-wei, YAN Guo-chao, LI Zhi-jun

(Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Taking the key block for research object, which was the large mining height workface main roof fractured to be symmetrical during first weighting and was seen as a deformed body, strictly in accordance with corresponding relation in mechanical derivation, analyzed the relation between block deformation and horizontal force at different rotation angle and different subsidizes deformation. The critical point in balance-instability transformation of the body structure was explored; and detail analyzed the horizontal force changes acting on the key block in the process of rotation and sinking was carried out; and the quantization relationship of horizontal force with rotational angle, block coefficient and the force on the key block were worked out; and the relationship of rotational angle with block coefficient during rotating instability or sliding instability, and the range of carrying capacity when the key block is balance, were also worked out. Measured against the conclusion of the traditional method of calculating, the value of horizontal force derived in strict accordance with geometric relationship is two times bigger; the balance range of key block is improved. The regression formula of key block's carrying capacity was worked out. Whether the key block in the fractured roof will lose balance or not can be predicted by this formula.

Key words: large mining height; main roof fracture; key block; stability

基本顶块体结构断裂下沉运动以及自身平衡过程中, 水平推力以及对块体结构自身平衡相互影响观点

收稿日期: 2008-08-28 责任编辑: 常琛

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2007BAK29B02); 山西省自然科学基金资助项目(200601047); 山西省科技攻关项目(200631118-02)

作者简介: 付玉平(1983—), 男, 山东郓城人, 博士研究生. E-mail: fuyuping_1983@163.com

的提出与发展,是矿山压力基础理论研究的突破. 目前的研究大都集中在关键块体理论及其在巷道、硐室及隧道围岩稳定性中的应用^[1-3]. 而采场顶板的研究多集中在顶板的极限垮落步距和上覆岩层垮落高度的确定上^[4-7],对采场顶板断裂关键块受水平力大小与回转下沉变形的内在机制与发展过程的研究、水平力的变化规律、水平力对平衡与失稳状态的影响区间和临界分界点(或范围)的界定,以及对结构破坏的影响等方面的研究很少. 文献[8-9]对于关键块回转过程中的水平力是经过近似假设求得的,没有考虑块体长度方向上的变形量对其的影响,认为水平力与块体的回转角度、块度系数与上覆载荷有关系. 然而,随着回转下沉角的增加,顶板下沉量增加,此时由于回转运动空间的限制,块体的变形接触范围与应变量也是在不断增大的. 在大采高采场中,由于采高比较大,直接顶垮落后不足以充填采空区,使得关键块有很大的回转空间,因此块体的变形量对块体的回转下沉量是有很影响的. 本文将按照严格的变形几何对应关系对关键块回转下沉过程中的各个变量进行推导,研究水平力的精确变化规律,探求关键块的平衡作用范围,对采场顶板来压时所需的支架工作阻力有一定的指导作用.

1 采场关键块下沉的水平力分析模型

1.1 模型建立的前提条件

在建立水平力分析模型时,前提条件:① 关键块的下沉运动处于受限空间中,即限制在 $L=2l$ 跨度空间内;② 考虑采场初次来压的情形,关键块为两块断裂,且为对称块体,两块体相向回转运动;③ 两块体的左右铰接点固定不变,中部产生垂直下沉运动;④ 块体变形对称,水平应力由变形(应变)产生,限制块体运动的外边界岩体刚度足够大,无大变形产生;⑤ 不失一般性,以垂直破断的块体为研究对象,且岩层赋存是水平的;⑥ 关键块是均质的,且各向同性. 根据上述前提,建立如图 1 所示的分析模型.

1.2 关键块下沉过程中变形与水平力的分析

(1) 下沉过程中关键块的变形计算.

将图 1 的左半块分离出来,作为研究对象,过点 A 作水平线与边界线分别交于 H, J. 在回转角为 α 的情形下,假设块体长度方向的最大变形 $\overline{CD} = \overline{FG} = \delta$,依据块体的形状和变形几何关系,左块体的下沉量 w 、块体方向的变形量 δ 和块体回转下沉量 w' 分别为

$$w = (\overline{AD} - \overline{CD}) \sin \alpha = (l - \delta) \sin \alpha,$$

$$\delta = \frac{1}{2 \cos \alpha} [h \sin \alpha + l(\cos \alpha - 1)],$$

$$w' = \frac{l(\cos \alpha + 1) - h \sin \alpha}{2 \cot \alpha}.$$

(2) 下沉过程中关键块的水平力计算.

根据变形三角形的几何关系,可知水平推力在块体下沉的变形边界 CE (或 BG) 距顶点 C (或 G) 的位置为

$$yTz = \frac{1}{3} \overline{BG} = \frac{\delta}{3 \sin \alpha} = \frac{h \sin \alpha + l(\cos \alpha - 1)}{3 \sin 2\alpha}.$$

图 2 为关键块受力分析,假定上覆岩层对关键块载荷及关键块自身质量为 P ,作用在断裂块体的中间,对左块点 A 取矩, $\sum M = 0$,则

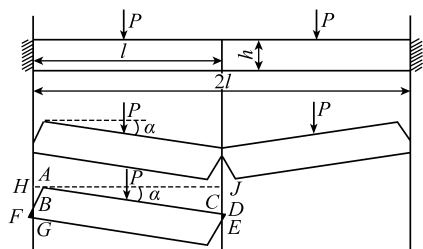


图 1 关键块的水平力分析模型

Fig. 1 The horizontal force analysis model for key block

h ——关键块厚度; P ——关键块自身及上覆岩层载荷; α ——关键块回转角度; l ——关键块长度

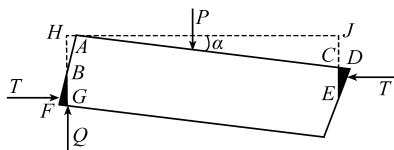


图 2 关键块受力分析

Fig. 2 The force analysis for key block

$$T\left(\overline{BH} + \frac{2}{3}\overline{BG}\right) - P\left(\frac{l}{2} - \overline{AH}\right) - P\overline{AH} - T\left(\omega + \frac{\overline{BG}}{3}\right) = 0.$$

可求得水平推力为

$$T = Pl \left/ \left[2h\cos\alpha - 2l\sin\alpha + \left(1 - \frac{3\cos^2\alpha + 1}{3\sin\alpha}\right) \frac{h\sin\alpha + l(\cos\alpha - 1)}{\cos\alpha} \right] \right.$$

取断裂块体的块度系数 $i = h/l$, 则水平推力 T 可化为

$$T = P \left/ \left[2i\cos\alpha - 2\sin\alpha + \left(1 - \frac{3\cos^2\alpha + 1}{3\sin\alpha}\right) \frac{i\sin\alpha + (\cos\alpha - 1)}{\cos\alpha} \right] \right. \quad (1)$$

根据以上分析, 基本顶关键岩层断裂岩块在下沉过程中, 水平推力不仅与回转下沉角 α 有关, 还与岩块块度 i 和作用在岩块上的载荷 P 有关.

2 关键块下沉过程中的稳定性分析

2.1 水平力变化规律

为了分析关键结构岩块下沉过程中水平推力的变化规律, 特取作用在断裂块体上的载荷 P 为定值, 取基本顶的块体形状系数 $i = h/l = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ 和 1.0 等情况下, 回转下沉角度 $\alpha = 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 24, 26, 28$ 和 30° . 根据式 (1) 绘出水平推力 T/P 随回转角 α 的变化曲线, 如图 3 (a) 所示.

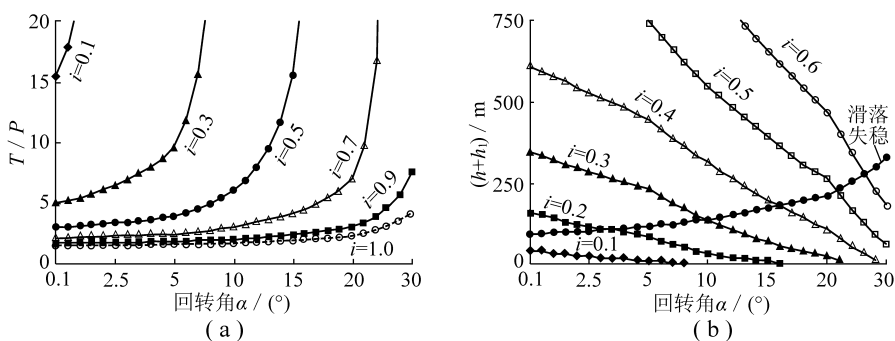


图 3 水平力 T/P 和关键块平衡区域分别与 α 的关系

Fig. 3 The change curves of horizontal force (T/P) and balance area in the key block with α

由图 3 (a) 可见, 在各种不同的基本顶断裂岩块形状系数条件下, 随着关键岩块的下沉回转, 均表现为明显的规律性: ① 岩块回转下沉的过程中, 随回转角 α 增大, 水平力 T 相应增加, $i < 0.5$ 时, 水平力 T 随回转角 α 的增大而快速增大, $i \geq 0.5$ 时, 水平力 T 随回转角 α 的增大而增幅减缓; ② 随关键块块度系数 i 的增大, 水平力减小.

2.2 关键块结构平衡范围分析

关键块失稳主要有 2 种形式: 滑落失稳和回转变形失稳. 当断块接触面间的摩擦力小于两者之间的剪切力时即发生滑落失稳; 当断裂岩块接触面的水平推力超过了接触面岩块的强度极限, 则岩块将被挤压破坏, 进一步导致岩块回转而形成变形失稳.

(1) 关键块的滑落失稳分析. 要使关键块不发生滑落失稳, 必须满足^[10]

$$T \tan \varphi \geq P, \quad (2)$$

其中, $\tan \varphi$ 为关键块与岩层面的摩擦因数, 取为 0.5. 将 T, P 分别带入式 (2), 整理得

$$i \leq \frac{0.75\sin 2\alpha + 3\sin 2\alpha \sin \alpha + (3\sin \alpha - 3\cos^2 \alpha - 1)(1 - \cos \alpha)}{3\sin 2\alpha \sin \alpha + (3\sin \alpha - 3\cos^2 \alpha - 1)\sin \alpha}. \quad (3)$$

若取 l 为老顶初次来压步距的一半, 即 $l = h\sqrt{2R_T/q}/2$, 其中 R_T 为岩块的抗拉强度, 取为 $0.1\sigma_c$; q 为

岩块自身及上覆载荷, $q = \rho g(h + h_1)$. 则将 $i = 2 \sqrt{q/2R_T} = 2 \sqrt{\rho g(h + h_1)/0.2\sigma_c}$ 代入式 (3) 有

$$h + h_1 \leq \frac{\sigma_c}{20\rho g} \left[\frac{0.75\sin 2\alpha + 3\sin 2\alpha \sin \alpha + (3\sin \alpha - 3\cos^2 \alpha - 1)(1 - \cos \alpha)}{3\sin 2\alpha \sin \alpha + (3\sin \alpha - 3\cos^2 \alpha - 1)\sin \alpha} \right]^2. \quad (4)$$

(2) 关键块的变形失稳分析. 要使关键块不发生回转变形失稳, 必须满足

$$T/a \leq \eta[\sigma_c], \quad (5)$$

其中, T/a 为接触面上的平均挤压应力; a 为关键块端角挤压接触面高度; $\eta[\sigma_c]$ 为关键块端角抗压强度.

令 h_1 为上覆岩层作用在关键块上的等效岩柱厚度, 则 $P = \rho g(h + h_1)l$, 将有关参数代入式 (5) 得

$$h + h_1 \leq \frac{\eta[\sigma_c]}{\rho g} \left[\frac{3i\sin 2\alpha \cos \alpha - 3\sin \alpha \sin 2\alpha + (3\sin \alpha - 3\cos^2 \alpha - 1)(i\sin \alpha + \cos \alpha - 1)}{1.5\sin^2 2\alpha} \right] \times (i\sin \alpha + \cos \alpha - 1). \quad (6)$$

(3) 关键块平衡区域分析. 采场基本顶断裂块体若要形成平衡结构体, 必须同时满足不发生滑落失稳和回转变形失稳 2 个条件, 即同时满足式 (4) 和式 (6). 如图 3(b) 所示, 关键块体平衡区域在滑落失稳临界曲线与回转失稳临界曲线相交区域的下部. 在上述假设的条件下, 经计算在不同块度系数的关键块的最大承载能力, 绘成图 4, 其回归公式为 $h + h_1 = 441.37i + 0.4867$. 由此可见, 关键块的极限承载能力随着块度系数的增大而线性增加.

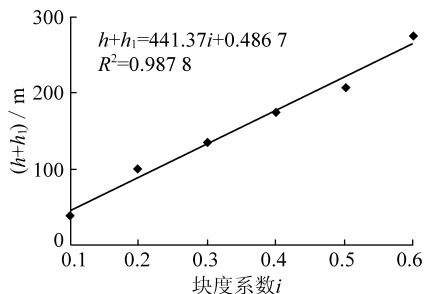


图 4 关键块承载能力回归曲线

Fig. 4 The carrying capacity regression curve of key block

2.3 关键块稳定性改进性分析

(1) 关键块水平力计算改进性分析. 本文在计算水平力时严格按照断裂垮落块体的几何变形关系进行推导的水平力计算公式 (1), 与传统的按照几何关系近似推导的水平力计算公式 $T = P/(i - \sin \alpha)$ 进行比较, 若取 $i = 0.5$, $\alpha = 10^\circ$, 则本文的计算结果水平力比传统方法计算出来的将近大 1 倍, 并且增大的速度更快.

(2) 关键块平衡范围计算改进性分析. 经过改进计算方法得到的关键块平衡范围, 其中发生滑落失稳的范围减小了, 发生回转变形失稳的范围也减小了, 即关键块结构平衡的范围增大了. 例如, 取 $i = 0.2$, $\sigma = 80 \text{ MPa}$, $\rho g = 25 \text{ kN/m}^3$ 时, 按照本文推导的公式计算的关键块极限承载厚度 $h + h_1 = 100 \text{ m}$, 而按照原来的方法计算的极限承载厚度仅近为 $h + h_1 = 20 \text{ m}$. 可见按照本文的方法计算得到的关键块稳定区域比原来的范围大得多.

3 实例分析

以中国神华能源股份有限公司神东煤炭分公司上湾煤矿 51101 工作面的地质条件为背景来验证本文计算的正确性. 上湾煤矿 51101 工作面采高为 5.5 m, 埋深为 100 ~ 120 m, 其直接顶为 7 m 厚的砂质页岩, 基本顶为 7 m 厚的砂岩, 抗压强度 $\sigma = 80 \text{ MPa}$, 容重 $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$, 实测得到该工作面的初次来压步距约为 54 m. 按照采场顶板初次来压顶板对断裂为两块且为对称体的假设, 则关键块长度 $l = 27 \text{ m}$. 采用

公式 $\alpha_{\max} = \arcsin \frac{M - \sum h(k-1)}{l}$ 计算关键块的最大回转角度, 其中 M 为采高; $\sum h$ 为直接顶厚度; l 为关键块长度; k 为直接顶岩石碎胀系数, 取为 1.3. 根据以上条件可求得关键块的块度系数 $i = 7/27 = 0.26$, 最大回转角 $\alpha_{\max} = 11.5^\circ$. 按照式 (4) 可求得在最大回转角时不发生滑落失稳的极限承载厚度 $h + h_1 = 196.4 \text{ m}$; 按照式 (6) (若按上述各参数进行计算), 在最大回转角时不发生变形失稳的极限承载厚

度 $h + h_1 = 67$ m. 这就表明关键块还没有达到最大回转角时就已经发生了回转失稳. 按照煤层埋深为 120 m 计算, 除去采高以及直接顶厚度共 12.5 m, 则需关键块承载的上覆岩层厚度 107.5 m, 反代回式 (6) 可求得不发生变形失稳的最大回转角 $\alpha = 8.3^\circ$.

4 结 论

(1) 建立了采场顶板初次断裂关键块水平力精确分析模型, 给出水平力计算公式.

(2) 研究了关键块不发生滑落失稳和回转失稳的条件, 比较了精确水平力分析模型与近似模型所确定的关键块平衡范围的区别, 得出精确模型的平衡范围要比近似模型大的结论.

(3) 给出了关键块的承载能力回归公式: $h + h_1 = 441.37i + 0.4867$, 可以根据此公式预测断裂的顶板关键块是否会失稳.

参考文献:

- [1] 顾铁凤, 黄 景. 影响巷道顶板稳定的关键块的受力分析 [J]. 太原理工大学学报, 2005, 36 (6): 645 - 646.
Gu Tiefeng, Huang Jing. The mechanics analysis of the key block affecting roadway's roof stability [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36 (6): 645 - 646.
- [2] 王海亮, 李宏健, 王景春. 巷道压力的岩石块体力学分析 [J]. 石家庄铁道学院院报, 1993, 10 (1): 73 - 76.
Wang Hailiang, Li Hongjian, Wang Jingchun. Analysis of rock mass mechanics for tunnel pressure [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 1993, 10 (1): 73 - 76.
- [3] 陈洪转, 王渭明. 巷道围岩关键块体分布概率研究 [J]. 山东科技大学学报 (自然科学版), 2002, 21 (1): 62 - 64.
Chen Hongzhuan, Wang Weiming. On the distribution probability of the key block in the surrounding rock of roadways [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2002, 21 (1): 62 - 64.
- [4] 史 红, 姜福兴. 采场上覆大厚度坚硬岩层破断规律的力学分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (18): 3 066 - 3 069.
Shi Hong, Jiang Fuxing. Mechanical analysis of rupture regularity of hard and massive overlying strata of longwall face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (18): 3 066 - 3 069.
- [5] Unver B, Yasitli N E. Modeling of strata movement with a special reference to caving mechanism in thick seam coal mining [J]. International Journal of Coal Geology, 2006, 66 (4): 227 - 252.
- [6] 陈忠辉, 冯竞竞, 肖彩彩, 等. 浅埋深厚煤层综放开采顶板断裂力学模型 [J]. 煤炭学报, 2007, 32 (5): 449 - 452.
Chen Zhonghui, Feng Jingjing, Xiao Caicai, et al. Fracture mechanical model of key roof for fully-mechanized top-coal caving in shallow thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32 (5): 449 - 452.
- [7] 黄庆享, 钱鸣高, 石平五. 浅埋煤层采场老顶周期来压的结构分析 [J]. 煤炭学报, 1999, 24 (6): 581 - 585.
Huang Qingxiang, Qian Minggao, Shi Pingwu. Structural analysis of main roof stability during periodic weighting in longwall face [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24 (6): 581 - 585.
- [8] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 采场“砌体梁”结构的关键块分析 [J]. 煤炭学报, 1994, 19 (6): 557 - 562.
Qian Minggao, Miao Xiexing, He Fulian. Analysis of key block in the structure of voussoir beam in longwall mining [J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19 (6): 557 - 562.
- [9] 黄庆享. 采场老顶初次来压的结构分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17 (5): 521 - 526.
Huang Qingxiang. Structural anslysis of main roof stability during first weighting in longwall face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17 (5): 521 - 526.
- [10] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
Qian Minggao, Shi Pingwu. Underground pressure and stratum control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.