

⑥ KS 结构的稳定性与底板突水机理*

40-45

黎良杰

殷有来

钱鸣高

(中航勘察设计研究院 北京 100086) (北京大学 北京 100871) (中国矿业大学 徐州 221008)

TD322.1
P641.461
~~TD742~~

摘要 根据采场底板岩体结构特征,建立了底板岩体的关键层(KS)结构模型。应用KS结构模型分析了采场底板突水机理,并取得了满意的效果。

关键词 关键层, 稳定性, 底板突水

KS结构, 底板稳定, 钱鸣高

1 KS 结构模型的建立

目前,对底板突水机理的分析,无论是突水系数法或下三带理论,还是等值隔水层厚度法等都没有注意到煤层底板作为层状岩体的板结构特征和破坏机制,也没有注意到关键岩层在阻止底板突水中的力学骨架作用,都是以铅直方向每米岩层抵抗水压力的能力作为底板突水危险性评价的标准,即都是以对点的突水危险性评价来代替对面(采场)的评价,因而对作为面的采场来说它们均有很大的局限性。

从华北型煤田煤系地层构造来看,许多煤田煤层底板以下、含水层以上均有一层较坚硬的岩层,如砂岩等。因此如果将煤层底板采动破坏带以下含水层以上承载能力最大的一层岩层定义为底板关键层(Key Stratum),那么根据采场不断推进的特点,在关键层达到极限破断跨距以前,隔水层中的其他各岩层均早已达到了极限破断跨距,因此隔水层中各岩层和顶板冒落矸石的重力荷载便可看作关键层上的载荷或承压水的部分平衡荷载,对采场底板突水机理的研究就简化为底板关键层破断条件及破断后各岩块平衡关系的研究。根据关键层的板结构特征和采空区卸载空间的边界条件,在没有断层构造条件下,底板岩体的KS结构模型便简化为在均布荷载下四周固支的矩形薄板;在有断层构造条件下,则视断层性质,Ks结构模型可以简化为均布荷载下三周固支一边自由或三周固支一边简支的矩形薄板^[1]。

2 KS 结构破断前的稳定条件

在没有断层构造的条件下,采场底板突水问题实质上就是底板关键层的破断问题。根据KS结构模型,由塑性理论^[2],其破断机构为如图1所示的“四坡屋顶”机构,即采矿工程中常称的OX型破坏。若设破断机构的最大虚挠度为 δ ,则当 $a < \frac{1}{2}$ 时,其内力功为

1996年3月25日收到初稿,1996年7月12日收到修改稿。

* 中国博士后科学基金资助项目。

$$W_1 = 4\delta\left(\frac{2b}{a} + \frac{a}{x}\right)M_p$$

$$\text{外力功为 } W_2 = \frac{q}{6}\delta a(3b - 2x)$$

由 $W_1 = W_2$ 得

$$4M_p\left(\frac{2b}{a} + \frac{a}{x}\right) = \frac{q}{6}a(3b - 2x) \quad (1)$$

式中: M_p 为关键层的塑性极限弯矩, Nm; a 为关键层的破断跨距, m; b 为工作面长度, m; q 为板上荷载, $q = q_w - q_r - q_s$, q_w 为含水层水压, q_r 为隔水层岩荷集度, q_s 为冒落矸石荷载集度; x 见图 1。

由 $\frac{dq}{dx} = 0$ 得 $x = \frac{a}{2}(\sqrt{3 + \lambda^2} - \lambda)$ ($\lambda = a/b$) 代入式(1)得关键层所能承受的最小极限破坏载荷为 q_0 。

$= \frac{48M_p}{a^2}(\sqrt{3 + \lambda^2} - \lambda)^{-2}$, 反之, 在假定极限载荷 q 和 b 为已知的条件下关键层的最小破断跨距为

$$a = \frac{2\sqrt{3blQ}}{\sqrt{3b - 4\sqrt{3}lQ}} \quad (a < b) \quad (2)$$

$$\text{同理} \quad a = \frac{4\sqrt{3b^2lQ}}{3b^2 - 12l^2Q^2} \quad (a > b) \quad (3)$$

式中: $l = h\sqrt{\sigma_s/q_0}$, $Q = \sqrt{q_0/q}$, $q_0 = 1 \text{ MPa}$, 并且称 l 为单位荷载下关键层破断跨距基准数; Q 为与含水层水压、隔水层厚度、顶板冒落状况等有关的无量纲系数; σ_s 为关键层的塑性极限抗拉强度, MPa; h 为关键层厚度, m。式(2)或式(3)即为底板关键层的破断准则。但是由于其中隐含的岩体强度 σ_s 是较难测定的, 因此实际利用式(2)或(3)还是有一定困难。但是在类似条件下, 冒落带高度、含水层水压、隔水层总厚度等都可以通过开采时的具体情况或水文网的监测等确定。因此利用已知突水事故信息来确定 σ_s , 从而来预测同类条件下工作面的突水情况就显得特别有意义。若已知事故面的长度为 b_0 , m; 突水跨距为 a_0 , m; 则预测面的突水跨距为

$$a = \frac{a_0\sqrt{b}K(\sqrt{\lambda_0^2 + 3} - \lambda_0)}{\sqrt{3b - 2a_0K(\sqrt{\lambda_0^2 + 3} - \lambda_0)}} \quad (a < b) \quad (4)$$

$$a = \frac{2a_0b^2b_0^2K(\sqrt{3\lambda_0^2 + 1} - 1)}{3a_0^2b^2 - b_0^2K^2(\sqrt{3\lambda_0^2 + 1} - 1)^2} \quad (a > b) \quad (5)$$

式中: $\lambda_0 = a_0/b_0$, $K = Q/Q_0$ 。

如果没有突水事故资料, 那么用初次来压步距代替 a_0 代入式(4)或(5), 则说明预测面至少在 a m 内是安全的^[3]。

3 KS 结构破断后岩块间的相互咬合与平衡

当底板关键层达到破断跨距时, 随着回采工作面的推进, 只要工作面老顶的极限破断

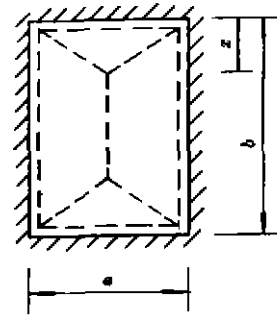


图 1 四边固支板的破断机构
Fig. 1 The damage mechanism of a plate with four fixed-boundaries

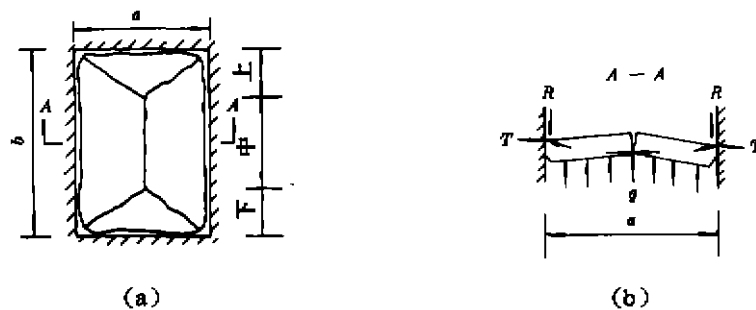


图2 关键层破断后的一般状态

Fig. 2 The general state after KS fracture

步距大于底板关键层的破断跨距, 关键层就要产生断裂, 断裂后的一般状态如图2所示。将工作面底板分为图示上、中、下3个区, 破断的岩块由于互相挤压形成水平力, 从而使岩块间产生摩擦力。卸载空间底板的上、下两区是圆弧形破坏, 岩块间的咬合是一个立体咬合关系, 而中部如图中剖面 $A-A$, 则可能形成如图2(b)所示的反三铰拱式平衡结构。因此并不是关键层刚一达到断裂极限发生断裂就产生突水, 它还取决于它们之间的相互咬合与平衡关系。

3.1 反三铰拱的 S-R 稳定性

如图2(b)中设 A, B 岩块在采空区的最大上挠量为 w , 则由图3岩块回转时的几何关系得 $w = \frac{a}{2} \sin\theta$, $d = \frac{1}{2}(h - \frac{a}{2} \sin\theta)$; d, θ 见图3。鉴于块与块之间的接触是塑性铰接关系, 因此图2(b)中水平推力 T 作用点的位置可取 $d/2$ 处^[4], 由此可得 $T = qa^2/4(h - atan\theta + asin\theta/2)$, $R = qa/2$, 由于 θ 很小, $\tan\theta \approx \sin\theta$ 。所以

$$T = qa^2/4(h - \frac{a}{2} \sin\theta) \quad (6)$$

令 $i = h/(\frac{a}{2})$, 并且定义 i 为关键层断裂块度, 则 $F = T/(qa/2) = 1/(i - \sin\theta)$, 作 T 与 i 及 θ 的曲线如图4所示。可见当 $i \geq 0.4$ 时, 随着 θ 的变化, T 值变化较小。而当 $i < 0.4$ 时, 则 i 值愈小, T 值随 θ 角的加大增大得越快, 从力学上说明该结构为几何非线性结构, 从工程上说明关键层要形成反三铰拱结构, 其厚宽比必须满足一定的条件。

3.1.1 结构的滑动失稳

图2(b)中结构不产生滑动失稳的条件为

$$T \sin(\varphi \pm \alpha) - R \cos(\varphi \pm \alpha) \geq 0 \quad (7)$$

式中, R 为剪切力, φ 为岩块相互间的摩擦角, 一般 $\tan\varphi = 0.3$ ^[4]; α 为断裂面与铅直面的夹角, 当断裂面的外法线方向指向采空区时, 取正, 反之取负。令 $\alpha = 0$, 并将 R, T 代入式(7)得

$$i \leq \tan\varphi + \sin\theta \quad (8)$$

式(8)即为结构不产生滑动失稳的条件。一般地, $\theta = 3^\circ$ 左右^[4], $\tan\varphi = 0.3$, 则 $i \leq 0.35$ 。即断裂岩块的长度要大于厚度的2.85倍, 结构才不会产生滑动失稳。

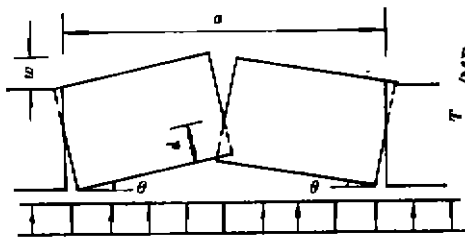


图3 岩块回转时的几何关系
Fig. 3 The geometric relationship for rotating rock block

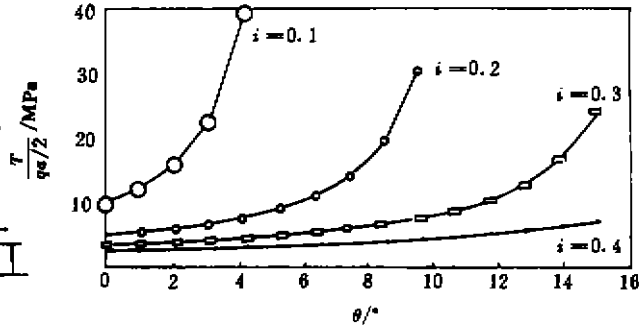


图4 T 与 i 及 theta 的关系
Fig. 4 The relation among T, i and theta

3.1.2 结构的回转失稳

随着 A, B 岩块向上回转, T 值将越来越大, 其结果将可能导致转角处岩块被挤碎而失稳, 即产生回转变形失稳。因此不产生回转变形失稳的条件为 $\sigma_p \geq T/d$, σ_p 为岩块允许的挤压强度, 令 $\sigma_p = \bar{k}\sigma_c$, \bar{k} 为挤压强度与抗压强度的比值, σ_c 为岩块的抗压强度。将 T, d 代入得

$$i \geq \sqrt{\frac{2q}{\bar{k}\sigma_c}} + \sin\theta \quad (9)$$

式(9)即为结构不产生回转变形失稳的条件。

因此底板关键层形成稳定的反三铰拱结构的条件即 S-R 稳定条件为:

$$\sqrt{\frac{2q}{\bar{k}\sigma_c}} + \sin\theta \leq i \leq \tan\varphi + \sin\theta \quad (10)$$

3.2 弧三角的稳定性

根据文[3], 图2(a)中的弧三角 C 岩块与 A, B 等岩块是空间咬合, 只有在某一特定条件下才能取得平衡, 在一般情况下它极难与 A, B 等岩块形成稳定结构。

尽管对关键层破断后可否形成稳定的结构作了定量分析, 但是由于板破坏时的角隅效应, 岩体参数的选择等因素的影响, 其稳定性分析事实上还停留在定性上。对其进行分析只是为了更加清晰地解释一些突水现象与规律。因此目前关键层的破断准则即可视为突水准则。

4 KS 结构模型的应用

4.1 突水实例计算

表1是利用 KS 结构模型对焦作矿区一些无断层构造条件下的底板突水实例的计算结果。可见利用式(2)或(3)计算, 其结果主要取决于对 σ_c 的测定, 而利用式(4)或(5)则不仅

表1 计算实例

Table 1 Calculation for engineering examples

序号	工作面名称	工作面已知参数					按式(2)或(3)取		按式(4)或(5) a/m	实际 a/m
		b/m	q_w /MPa	g_r /MPa	g_t /MPa	h/m	$\sigma_1 = 2.5$ MPa a/m			
1	12031	110	1.00	0.667	0.125	2.9	22.6		23	
2	12031	100	0.92	0.592	0.125	2.9	23.3	23.7	24	
3	12031	45	0.82	0.592	0.125	2.9	55.6	55.5	36	
4	12011	70	1.10	0.592	0.125	6.0	43.8		40	
5	12011	70	1.03	0.592	0.125	6.0	46.3	46.0	43	
6	1281	80	1.18	0.467	0.125	6.0	30.8		32	
7	12121	85	1.30	0.475	0.125	6.0	27.4	30.1	31	
8	12021	130	1.50	0.592	0.125	6.0	23.8		21	
9	11051	113	1.50	0.542	0.125	6.0	23.5	20.7	23	

注: 1与2, 3, 4与5, 6与7, 6与9号工作面情况类似。

可以避开对 σ_1 的测定, 而且可以取得更加令人信服的结果。说明利用 KS 结构模型分析无断层构造条件下的底板突水机理是成功的。

4.2 对某些突水现象的再认识

4.2.1 底板突水与底鼓

已往突水理论^[6]认为底板突水的前兆——底鼓是由于承压水先沿构造裂隙进入采空区底板浅部的离层裂隙, 在水压、矿压甚至地应力的共同作用下, 塑性较强的岩层产生底鼓, 然后于适合的通道突破形成突水。而事实上既然采空区浅部为采动导水裂隙带, 且岩石材料多为塑性差的脆性材料, 因此它不可能在采空区底板浅部形成离层区域使浅部岩层产生 0.2~0.6 m 这样大的底鼓(遇水膨胀岩层除外)。用 KS 结构模型分析知, 在断层构造条件下, 底鼓是由于断层两盘的关键层在水压作用下产生上挠而形成的^[1]。在没有断层构造条件下, 底鼓是由于关键层在产生 OX 型破坏后形成图 2(b) 所示的反三铰拱结构的缘故, 且其在最大控顶距 L 处的底鼓量为 $L \sin \theta$ 。若取 $L = 5$ m, $\theta = 4^\circ$, 则底鼓量为 0.35 m, 与实际情况是比较吻合的。这说明 KS 模型可用来分析底板突水时底鼓的形成机制。

4.2.2 突水点沿工作面的分布

突水事例统计表明采场底板突水呈现在工作面中部单位长度上机率最小、上出口次之、下出口最大的特点。由底板关键层破断后的平衡条件分析可知上、下两端是采场底板突水的最危险点。从关键层的 OX 型破坏特点看, 由于 O 型裂缝均是下表面张开, X 型裂缝均是上表面张开, 只有在 O 型裂缝与 X 型裂缝的交点才是突变点, 因此从 OX 型破坏来看也说明了工作面上、下两端是突水最危险点。事实上突水的相似材料模拟试验也证明了上面的分析^[3]。又由于缓倾斜煤层中, 下出口处水压比上出口处水压大 $b \sin \varphi$ 个水柱(φ 为煤层倾角), 因此下出口处比上出口处突水机率更大。这就解释了底板突水点的分布特点。

5 结论

(1) 利用 KS 结构模型分析无断层构造条件下的底板突水机理, 解释突水现象可以取得令人满意的效果。

(2) KS 结构在水压等作用下产生 O_X 型破坏, 破坏后中部岩块在一定条件下可以形成反三铰拱式平衡, 上、下两端弧三角则极难与其他岩块咬合形成稳定的平衡结构。

参 考 文 献

- 1 黎良杰, 钱鸣高等. 断层突水机理分析. 煤炭学报, 1996, 21(2): 119~123
- 2 徐秉业, 刘信声. 结构塑性极限分析. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985
- 3 黎良杰. 采场底板突水机理的研究[博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 1995
- 4 钱鸣高等. 砌体梁结构的关键块体分析. 煤炭学报, 1994, 19(6): 557~563
- 5 沈光寒, 李白英等. 矿井特殊开采的理论与实践. 北京: 煤炭工业出版社, 1992

STABILITY OF KS STRUCTURE AND MECHANISM OF WATER-INRUSH FROM FLOOR

Li Liangjie¹ Yin Youquan² Qian Minggao³

(¹ China Aviation Industry Institute of Geotechnical Investigation & Surveying & Design, Beijing 100086)

(² Peking University, Beijing 100871)

(³ China University of Mine and Technology, Xuzhou 221008)

Abstract Based on the structural characteristics of floor in the longwall face, the structural model of the key stratum (KS) in floor is established. The mechanism for the water-inrush from floor is analysed by the KS-model, and good results are achieved.

Key words key stratum, stability, water-inrush from floor

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》将发表下列内容的文章:

- (1) 岩石节理的特性分析;
- (2) 隧道围岩的变形监测与节理岩体中洞室围岩的大变形研究;
- (3) 煤矿岩石力学;
- (4) 边坡滑动的预测预报及岩石力学系统失稳的机制分析;
- (5) 岩石动力学在水电工程中的应用;
- (6) 建筑物纠偏与桩基补强研究。