

# 评价矿井突水危险性的关键层方法

黎良杰 殷有泉

(北京大学力学与工程科学系, 北京 100871)

**摘要** 将煤层底板至含水层间承载能力最大的一层岩层看作起阻水作用的关键岩层(简称关键层), 并把它简化为薄板, 利用板的理论解确定该岩层的破断跨距, 用以评价底板突水的危险性。实例分析表明, 这种预测突水危险性的方法是简明有效的。

**关键词** 底板突水, 关键层, 薄板

煤矿采场底板突水机制研究的核心问题是力学问题。这方面的研究还很不够。目前突水防治技术中, 由突水系数等方法给出的突水判据还停留在经验公式阶段, 缺少必要的力学理论基础。黎良杰博士提出了关键层理论, 引入极限破断跨距概念, 将突水判据与采掘进尺, 关键层厚度以及岩性联系起来, 使突水问题的理论研究和现场预测提高到一个新水平<sup>[1]</sup>。

## 1 关键层方法

煤系地层是逐层沉积的, 具有层状结构特征。在采动破坏带以下, 含水层以上, 通常存在一层承载能力最高的岩层, 我们将其称为底板关键岩层(key stratum), 简称关键层。关键层层厚一般在2m~6m左右, 产生底板突水时工作面从切眼煤壁推进20m~40m, 因而从力学上可将关键层简化为薄板(图1), 用结构力学方法, 按强度条件预测底板破坏并形成导水通道的观点来研究底板突水的发生机制。

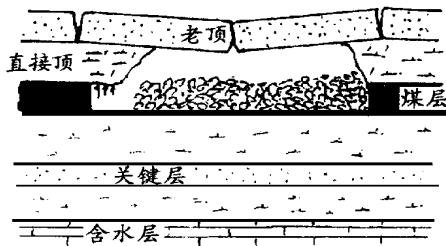


图1 采场工作面结构和关键层的示意图

在关键层理论中将底板关键层简化为一个四周固支的矩形薄板, 在均布载荷 $q$ 作用下, 最大弯矩 $M_{\max}$ 发

生在长边中点处, 其数值为

$$M_{\max} = \frac{1 + \mu\lambda^2}{12(1 + \lambda^4)} qa^2 \quad (1)$$

$$\lambda = a/b \quad (2)$$

$$q = q_w - q_H - q_0 \quad (3)$$

式中,  $a$  为板的短边, 底板关键层的破断跨距 (m);  $b$  为板的长边, 工作面长度 (m);  $\mu$  为泊松比;  $q_w$  为承压含水层水压 (MPa);  $q_H$  为单位面积上隔水层岩重载荷集度 (MPa);  $q_0$  为单位面积上直接顶冒落后载荷集度 (MPa)。底板关键层破断时的极限弯矩为

$$M_s = h^2\sigma_s/6 \quad (4)$$

式中,  $\sigma_s$  为关键层岩石的抗拉强度 (MPa);  $h$  为关键层的厚度 (m)。

将(4)式代入(1)式可得确定破断跨距 $a$ 的公式

$$a^2 = \frac{2(1 + \lambda^4)\sigma_s h^2}{(1 + \mu\lambda^2)q} \quad (5)$$

上式是关于 $a$ 的一个非线性代数方程。令

$$m^2 = \frac{b^2 q}{2h^2 \sigma_s} \quad (6)$$

(5)式可简化为一个四次代数方程

$$(\mu m^2 - 1)\lambda^4 + m^2\lambda^2 - 1 = 0 \quad (7)$$

这个方程在 $m^2 = 1/\mu$ 时, 有

$$\lambda = 1/m \text{ 或 } a = \sqrt{\mu} b \quad (8)$$

和在区间 $(2(\sqrt{1 + \mu^2} - 1), 1/\mu)$ 与区间 $(1/\mu, +\infty)$ 有符合工程意义的实根

$$\lambda = \left[ \frac{m^2 - (m^4 + 4\mu m^2 - 4)^{1/2}}{2(1 - \mu m^2)} \right]^{1/2} \quad (9)$$

一般情况下 $\lambda < 0.6$ , 因此在 $\mu \leq 0.3$ 时,  $\mu$ 对 $\lambda$ 的影响对采矿工程来说可以忽略, 于是(9)式可简化为

$$\lambda = \left\{ \frac{1}{2} [m^2 - (m^4 - 4)]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (10)$$

为了研讨关键层的抗弯强度, 载荷, 边界条件等因素对破断跨距的影响, 引入以下参量

$$W(\lambda) = \sqrt{\frac{1+\mu^4}{1+\mu\lambda^2}} \quad (11)$$

$$Q = \sqrt{q} \quad (12)$$

$$L = \sqrt{2h^2\sigma_r} \quad (13)$$

(5) 式可写为

$$a = LW/Q \quad (14)$$

式(13)定义的 $L$ 实质上是单位载荷( $q=1$ )下层厚为 $h$ , 抗拉强度为 $\sigma_r$ 的极限破裂跨距, 称为关键层破断步距基准数。对于给定矿区的同一煤层底板, 只要在沉积时比较均匀, 并且经历的地质构造运动基本相同, 便可以认为它是一个常数。步距基准数也因此而得名。底板关键层步距基准数的大小表征了底板抵抗突水的能力。由于 $q = \sqrt{q_w - q_H - q_0}$ , 它与含水层水压 $q_w$ 与隔水层岩荷载集度, 顶板冒落荷载集度 $q_0$ 之差有关。这个差值越大, 表示含水层的突破能力越大, 因而 $Q$ 值表征了含水层水压的突破能力。 $W(\lambda)$ 仅与边界条件和工作面长度有关, 当 $\mu = 0.3$ 时 $W(\lambda)$ 随 $\lambda$ 的变化如图2所示, 随 $\lambda$ 的逐渐减小,  $W(\lambda)$ 接近于1, 当 $\lambda \leq 0.6$ 时可认为 $W(\lambda) = 1$ 。在 $\lambda \leq 0.6$ 时, 关键层的板模型可简化为梁模型, 使计算得到更大的简化。

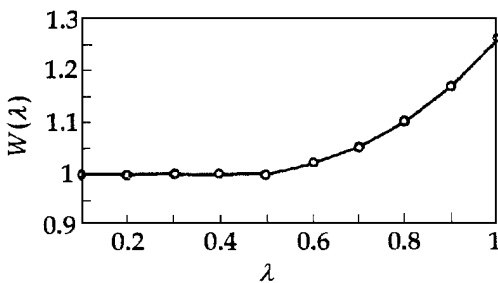


图2  $W(\lambda)$  随 $\lambda$ 变化的曲线

根据上述的关键层理论可以预测煤矿底板突水时的破断跨距, 只要实际开采进尺不超出这个跨距, 便可安全生产。预测跨距有两种方法, 简介如下。

#### (1) 正演方法

如果关键层岩层的抗拉强度 $\sigma_r$ 事前能相当准确的得到, 这时按(14)式可直接计算出关键层的极限破断跨距 $a$ 。

#### (2) 反演方法

在难以测定岩层的抗拉强度 $\sigma_r$ 时, 需要利用已知同类条件下的突水事故资料来预测新采场突水的极限破断跨距。在已发生的突水工作面有公式

$$a_0 = \frac{L_0 W(\lambda_0)}{Q_0} \quad (15)$$

式中各量的下标“0”表示是发生突水灾害时所取的数值。将(14)式与(15)式相比, 得

$$a = a_0 \frac{L Q_0}{L_0 Q} \cdot \frac{W(\lambda)}{W(\lambda_0)} \quad (16)$$

在类似条件下, 如同一煤层相邻工作面, 其底板关键层在岩性和层厚方面是相差不大的, 因而可设 $L = L_0$ , 因此(16)式可简化为

$$a = a_0 \frac{Q_0}{Q} \cdot \frac{W(\lambda)}{W(\lambda_0)} \quad (17)$$

通常可设 $W(\lambda) = W(\lambda_0)$ 来计算 $a$ 值。如果得到 $a$ 值, 对应的 $\lambda \geq 0.6$ , 便可在(16)式中用 $\lambda$ 代入, 重新计算 $a$ 值。采用这种逐次逼近的迭代算法, 可得到满足(17)式的极限破断跨距 $a$ 值。实际上, 在很多情况下 $\lambda$ 是小于0.6的,  $W(\lambda) = 1$ , 不用迭代, 便可得到极限破断跨距值。

## 2 实例分析

焦作矿区九里山矿12031工作面曾先后4次发生底板突水, 后3次突水与构造无关, 它们分别发生在1987年9月, 1988年10月和1993年3月。为考核计算方法, 设1987年9月工作面为突水事故面, 而1988年10月和1993年3月工作面均为预测面。事故面的基本参数为: 工作面采高为2m; 底板隔水层总厚度为27m, 其中关键层 $h = 2.9$ m; 直接顶冒落带高度为5m; 含水层水压为1.0 MPa; 底板关键层极限破断跨距23m; 工作面长度为 $b = 110$ m;  $Q_0 = 0.457$ ; 采用机采。已知1988年10月预测面的基本参数为: 隔水层总厚度为24m, 其中关键层厚 $h = 2.9$ m;  $q_w = 0.92$  MPa;  $b = 100$ m;  $Q = 0.450$ ; 反演预测得 $a = 23.3$ m。设 $\sigma_r = 6$  MPa, 正演预测得21.9m。同样, 将1993年3月突水面作预测面, 其基本参数为: 工作面长度为45m; 隔水层总厚度为24m;  $q_w = 0.82$  MPa;  $b = 45$ m。反演计算得 $a = 40.0$ m; 正演预测 $a = 33.1$ m。

另一组工作面突水事例的计算如表1所示。序号1为突水事故面, 2~4为预测面。可见, 预测的结果与实际破断跨距值基本上是一致的, 因而本文介绍的关键层模型是正确和可行的。

表1 工作面突水实例计算

序号	$b$ (m)	$q_w$ (MPa)	$q_H$ (MPa)	$q_0$ (MPa)	$h$ (m)	$\sigma_c$ (MPa)	破断跨距		
							反演	正演	实际
1	70	1.10	0.592	0.125	6.0	6.0			40
2	70	1.03	0.592	0.125	6.0	6.0	44.2	37.1	40
3	80	1.18	0.467	0.125	6.0	6.0	32.4	26.8	32
4	85	1.30	0.475	0.125	6.0	6.0	29.4	24.6	31

不难看出, 正演预测的准确性取决于底板关键层的抗拉强度  $\sigma_c$  的测定。只要  $\sigma_c$  测定准确, 就可使计算结果接近实际情况。利用已知同类条件下突水事故资料来反演预测工作面的突水情况, 可以避免对  $\sigma_c$  的测定, 而且也可以取得令人满意的结果。

在本文中主要涉及无构造影响的突水事例。实际上, 关键层模型在构造控水问题中也得到了成功的应用<sup>[1]</sup>。

### 参 考 文 献

- 黎良杰, 钱鸣高. 断层突水机理分析. 煤炭学报, 1996, 21(2): 119~124
- 渥美光等著 [日], 张少如译. 材料力学. 北京: 人民教育出版

版社, 1981

## THE KEY STRATUM METHOD OF RISK EVALUATION FOR WATER-INRUSH IN COAL MINE

L ILiangjie YN Youquan

(Dept. of Mechanics and Engineering Sciences,  
Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** The stratum with the largest bearing capacity between coal seam and aquifer is regarded as the key stratum in preventing from water-inrush, and it is simplified into a thin plate. Its fracturing span is determined by the plate theory, and is used to appraise the risk of water-inrush from floor. The analyses of real examples show that the method is the simple and efficacious.

**Key words** Water-inrush from floor, key stratum, thin plate

## 光面爆破岩石破碎的力学分析

王修勇

(湘潭工学院, 湘潭 411201)

**摘要** 在分析光面爆破成缝机理的基础上, 分析了光爆层岩石的受力状况, 进而描述了光爆层岩石的破碎过程。

**关键词** 光面爆破, 光爆层, 力学分析

光面爆破是一种控制爆破技术, 在爆破工程中得到广泛应用。目前, 对光面爆破的研究都集中在光爆成缝机理上, 而对光爆层岩石的破碎机理则少有研究。事实上, 光面爆破除所要求相邻炮孔间形成平整光滑的贯穿裂缝外, 还要求爆落下的岩石块度适中, 便于装载。因此, 研究光爆层岩石的破碎过程, 从而控制爆落岩石的块度, 对完善光爆技术具有重要意义。

### 1 光面爆破成缝机理

为了对光爆层岩石破碎过程进行力学分析, 先对

光爆成缝机理作一简介。目前关于光爆中贯穿裂缝的形成机理主要有两种理论, 其中一种理论认为, 在相邻炮孔起炮后, 由于相邻炮孔互为空孔, 在相邻炮孔连线方向的孔壁处产生应力集中, 使炮孔壁在该处最先开裂, 继而在爆生气体准静态压力作用下使裂缝扩展并成为贯穿裂缝。

从光面爆破特点和贯穿裂缝形成机理可以得出:

- 1) 在孔间贯穿裂缝形成过程中, 爆生气体楔入裂缝, 对裂缝的扩展起着主导作用;
- 2) 因为光面爆破要求岩壁不受损伤, 可以认为爆破产生的应力波作用很弱, 不会对光爆层产生太大破坏, 因此, 可以断定光爆层岩石的破碎主要是爆生气体作用的结果。

### 2 光爆层岩石破碎的力学分析