

沈义东,沈军辉,李何伟. 基于固支梁理论的煤层底板突水破坏机制分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(1):17-22. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.01.003

SHEN Y D, SHEN J H, LI H W. Analysis of Water Inrush Failure Mechanism of Coal Floor Based on the Theory of Fixed Beam [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(1):17-22. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.01.003

基于固支梁理论的煤层底板 突水破坏机制分析

沈义东*, 沈军辉, 李何伟

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验, 四川 成都 610059)

摘要:我国煤层底板隔水层的厚度不一,部分煤层开采底板隔水层厚度巨大,不符合弹性薄板理论的适用条件.故文章采用弹性力学固支梁理论建立任意一点应力计算模型,推导承压水作用下底板隔水层的应力解,根据皖北煤电集团某矿采煤工作面底板隔水层力学特性,并结合FLAC^{3D}软件分析底板隔水层应力分布和底板突水破坏机制.研究表明:底板隔水层的极限水压力与隔水层厚度成正比;当隔水层厚度 h 与开采工作面跨度 b 满足 $h/b \leq 0.7$,隔水层发生弯拉破坏;当 $h/b \geq 0.7$ 时,隔水层发生压剪破坏.此研究成果为分析底板突水破坏提供理论参考.

关键词:底板突水;固支梁理论;应力分析;FLAC^{3D};破坏特征

中图分类号:TD821 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2021)01-0017-06

Analysis of Water Inrush Failure Mechanism of Coal Floor Based on the Theory of Fixed Beam

SHEN Yidong, SHEN Junhui, LI Hewei

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The thickness of the water-proof layer of the coal seam floor in China is different, and the thickness of the water-proof layer of the coal seam floor in some coal seams is huge, which does not meet the applicable conditions of the elastic thin plate theory. The theory of elastic mechanics fixed beam was adopted to establish an arbitrary point stress calculation model, and the stress solution of the floor aquifer under the action of confined water was derived. According to the mechanical characteristics of the floor aquifer in a coal mining face of Wanbei Coal and power group, and combined with FLAC^{3D} software, the stress distribution of the aquifer of the floor and the mechanism of floor water inrush was analyzed. The research shows that: the ultimate water pressure of the bottom impervious layer is proportional to the thickness of the impervious layer; when the thickness h of the impervious layer and the span b of the mining working face satisfy $h/b \leq 0.7$, the tensile damage of the impervious layer occurs; when $h/b \geq 0.7$, the water barrier is damaged by pressure shearing. The research results provide a theoretical reference for the analysis of water inrush failure of the floor.

Keywords: floor water inrush; fixed beam theory; stress analysis; FLAC^{3D}; failure characteristics

收稿日期:2019-07-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41572308)

*通信作者, E-mail: 1614966915@qq.com

我国煤层开采过程中底板破坏突水事故频发^[1-2].煤层底板突水多为隔水关键层所受的应力超过其临界强度所致.有关底板突水破坏机理的研究,20世纪30年代,前苏联列萨列夫结合力学基础及强度理论,研究了煤层底板在承压水作用下的破坏机制^[3].1944年匈牙利学者基于力学理论提出完整隔水层的观点^[4].孟祥瑞等^[5-6]运用弹性力学半无限体理论研究确定了煤层底板扰动带的深度;虎维岳^[7]、王连国等^[8-10]根据岩石渗透率与应力、应变关系的尖点突变模型,研究了采动下煤层底板破坏的力学机制.虎维岳^[11]、冯强等^[12]运用FLAC^{3D}分析了点状、带状及面状承压水作用下煤层底板的力学响应及煤层开采后采空区底板应力分布规律;温廷新、于凤娥^[13]提出基于PSO_SVM_AdaBoost的煤层底板突水预测模型,通过引入UCI经典分类数据集进行实验.综合考虑煤层底板突水主要影响因素,提高了煤层底板突水预测的准确率.王鑫、郑洁铭^[14]等在确定了含水层水压、单位涌水量、隔水层有效厚度等指标后,根据熵值法构建了工作面煤层底板突水的综合评价指标体系,对整个工作面进行突水评价.

已有研究表明,有关煤层底板在承压水作用下的突水破坏机制,多从理论分析和数值模拟角度开展研究,缺少对完整隔水层应力分析的理论模型.本文将从煤层开采工作面跨(宽)度方向将完整隔水层概化为固支梁,运用弹性力学理论推导应力解析式,得出了煤层底板任意一点在纵横荷载作用下应力解析式,结合FLAC^{3D}分析岩梁受力规律,分析底板隔水层的突水破坏机理,成果对预测底板隔水层的突水破坏具有理论与实际意义.

1 底板隔水层固支梁模型

煤层底板岩层自上而下形成“下三带”,即:底板采动裂隙带 h_a 、完整隔水层保护带 h_b 和承压水导升带 h_c ^[15-17],如图1所示.无断层情况下,底板岩层是否突水破坏,主要取决于底板完整隔水层的厚度和本身的极限承载力^[18].由于采空区四周均有煤柱支承,因而可将隔水底板看作固支边界.固支梁模型的上方受到采掘扰动导水裂隙带的自重 $\gamma_a h_a$ 、承压水压力的均布荷载 p ,完整隔水层的自重 $\gamma_b h_b$ 以及水平应力 N (为线荷载,单位N/m)^[19].

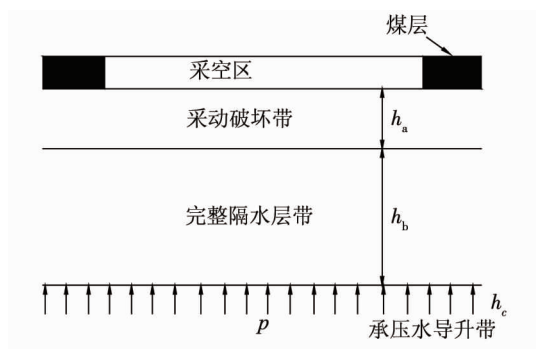


图1 完整底板隔水层分带

在我国,长臂工作面延伸距离一般为120~240 m,底板突水多发生在第一次来压时期,此时,工作面与开切眼的距离为20~40 m时,当是工作面斜长的1/5或更小时,可把底板岩层在走向上视作岩梁^[20].当隔水层未受扰动时,可视为均质各向同性的连续介质,设定其符合弹性力学的计算条件^[21-22].假设工作面推进长度为 $2L$ (m),以下将依据弹性理论对图2所示的底板隔水层的应力进行推导.

假设此问题为平面应变问题.对于平面应变梁,在平面应力的形变公式和位移公式推导计算中,把 E 换为 $E/(1-\mu^2)$,把 μ 转换为 $u/(1-u)$,进行求解.

1.1 不考虑隔水层自重和水平力时的应力计算

当不考虑隔水层自重和水平应力时,此时隔水层底部只受横向应力 $q=p-\gamma_a h_a$ 的作用(见图2).

应力函数的确定:

假设 σ_y 是 y 的函数,与 x 无关,即 $\sigma_y = f(y)$,因为 $\sigma_y = \partial^2 \varphi / \partial x^2$,所以应力函数 φ 为

$$f = \frac{1}{2} x^2 f(y) + x f_1(y) + f_2(y). \quad (1)$$

将应力函数 φ 代入相容方程: $\Delta^4 \varphi = 0$,即可求得待定函数 f, f_1 和 f_2 的形式为

$$f(y) = Ay^3 + By^2 + Cy + D;$$

$$f_1(y) = Ey^3 + Fy^2 + Gy;$$

$$f_2(y) = \frac{A}{10} y^5 - \frac{B}{6} y^4 + Hy^3 + Ky^2.$$

故应力函数形式为

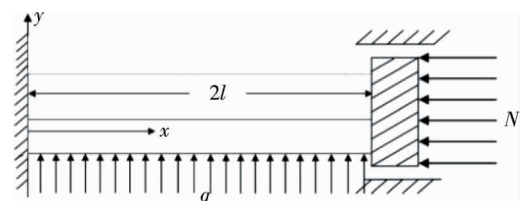


图2 底板隔水层的力学模型

$$\varphi = \frac{1}{2}x^2(Ay^3 + By^2 + Cy + D) + x(Ey^3 + Fy^2 + Gy) - \frac{A}{10}y^5 - \frac{B}{6}y^4 + Hy^3 + Ky^2. \quad (2)$$

将式(2)微分,根据应力函数可求出 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$.

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = \frac{1}{2}x^2(6Ay + 2B) + (6Ey + 2F)x - 2Ay^3 - 2By^2 + 6Hy + 2K; \\ \sigma_y = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = Ay^3 + By^2 + Cy + D; \\ \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} = -3Axy^2 - 2Bxy - Cx - 3Ey^2 - 2Fy - G. \end{cases} \quad (3)$$

固支梁所受荷载是对称分布的,应力也是对称分布的,即 σ_x 和 σ_y 是以 x 为变量的偶函数, τ_{xy} 是以 x 为变量的奇函数,则由式(3)可得

$$E = F = G = 0. \quad (4)$$

上、下边界条件为

$$\begin{cases} (\sigma_y)_{y=\frac{h}{2}} = -q, (\tau_{yz})_{y=\frac{h}{2}} = 0; \\ (\sigma_y)_{y=-\frac{h}{2}} = 0, (\tau_{yz})_{y=-\frac{h}{2}} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

式中: h 为底板完整隔水层厚度; q 为隔水层所受应力。

将式(4)和式(5)代入到式(3)可得

$$A = -\frac{2q}{h^3}, B = 0, C = \frac{3q}{2h}, D = -\frac{q}{2}. \quad (6)$$

由于固支梁两端位移不变,即为0的前提下,根据物理方程和几何方程可得

$$H = \frac{ql^2}{3h^3} - \frac{(2+u)q}{4h}; \quad K = -\frac{uq}{4}. \quad (7)$$

将所求系数代入式(3)中,得应力分量为

$$\begin{cases} \sigma_x = \left(\frac{2ql^2}{h^3} - \frac{6q}{h^3}x^2\right)y + \frac{4q}{h^3}y^3 - \frac{6q + 3uq}{2h}y - \frac{uq}{2}; \\ \sigma_y = -\frac{2q}{h^3}y^3 + \frac{3q}{2h}y - \frac{q}{2}; \\ \tau_{xy} = \frac{6q}{h^3}xy^2 - \frac{3q}{2h}x. \end{cases} \quad (8)$$

1.2 隔水层只受重力时的应力计算

同理,当隔水层只受重力时的应力表达式为:

$$\begin{cases} \sigma_x = -\frac{6\rho g}{h^2}x^2y + \frac{4\rho g}{h^2}y^3 + \left(\frac{2\rho gl^2}{h^2} - \frac{5\rho gu}{2} - 3\rho g\right)y; \\ \sigma_y = -\frac{2\rho g}{h^2}y^3 + \frac{1}{2}\rho gy; \\ \tau_{xy} = \frac{6\rho g}{h^2}xy^2 - \frac{3\rho g}{2}x. \end{cases} \quad (9)$$

1.3 隔水层同时受均布载荷、重力以及水平地应力作用时的应力计算

根据叠加原理,结合式(8)和式(9)可求得底板隔水层在纵横荷载作用下的应力,见式(10)所示。

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \left(\frac{2ql^2 - 6qx^2 + 6\rho ghx^2}{h^3}\right)y + \frac{(4q - 4h\rho g)}{h^3}y^3 + \left(\frac{5\rho gu}{2} - \frac{2\rho gl^2}{h^2} + 3\rho g - \frac{6q + 3uq}{2h}\right)y - \frac{uq}{2} + N; \\ \sigma_y &= \left(-\frac{2\rho g}{h^2} + \frac{2q}{h^3}\right)y^3 + \left(\frac{3q}{2h} - \frac{1}{2}\rho g\right)y - \frac{q}{2}; \\ \tau_{xy} &= \left(\frac{6q}{h^3} - \frac{6\rho g}{h^2}\right)xy^2 - \left(\frac{3q}{2h} - \frac{3\rho g}{2}\right)x. \end{aligned} \quad (10)$$

1.4 固支梁模型应力分析

在上述应力分析基础上,采用FLAC^{3D}软件分析了底板隔水层在承压水作用下的应力状态.如图4a将煤层底板抽象概化为长60 m,宽10 m,高30 m(数值模型长:宽:高=6:1:3,其中隔水层宽度与长度之比为1/6,满足煤层底板隔水层厚度是开采工作面斜长的1/5或更小的前提条件,此时可把底板岩层在走向方向上视作一组岩梁),两端应力、位移全约束,忽略底板隔水层自重和水平应力,只考虑承压水对隔水层的作用,承压水压力均匀分布在煤层底板下方,方向朝上.根据公式9,图3和图4b~图4d可得出隔水层在承压水作用下的应力分布规律.

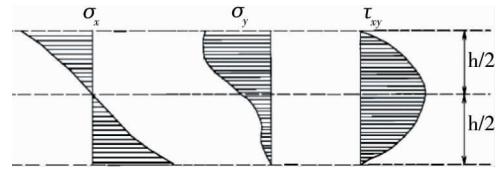


图3 梁两端不受水平力作用下应力分布^[22]

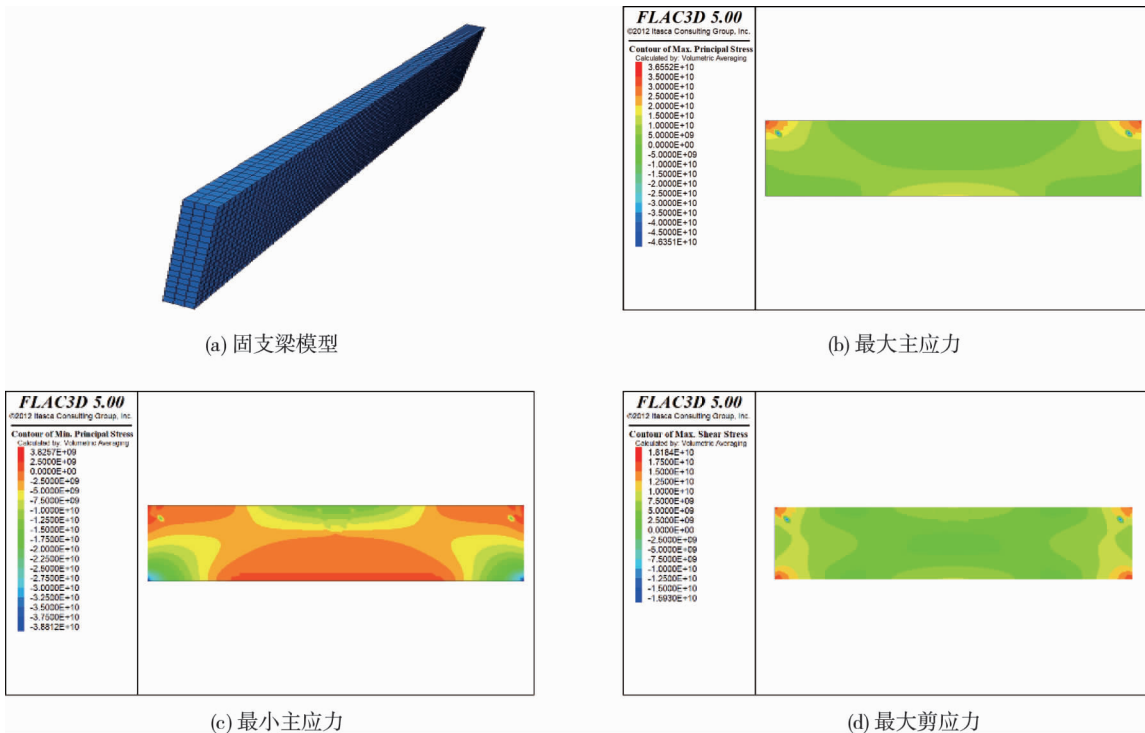


图4 承压水压力作用下隔水层应力云图

由式(9)中 σ_x 计算公式可看出, σ_x 的绝对值随 y 线性增大,并随 x 的增加而减小,因此 σ_x 的最大值必然发生在梁的上下表面中心位置(如图3,图4b,图4c),在梁的下表面为拉张破坏,上表面为压剪破裂.当有水平轴向力单独作用下,岩梁将产生轴向压缩,任一横截面上将产生数值相等的压应力,其值等于水平地应力 N .故横截面上 x 方向的总应力为横向荷载产生的弯曲应力与水平地应力按代数值叠加. σ_y 不随 x 的变化而变化,与 y 呈非线性关系,并随 y 坐标的减小而增大,可见 σ_y 的最大值发生在梁的上表面.

由 τ_{xy} 的计算公式和图3,图4d可知, τ_{xy} 的绝对值随着 y 的增大而减小,又因为 τ_{xy} 与 y 成正比,因此 τ_{xy} 的最大值在梁两端的中心位置.根据结果可知最大主应力和剪应力在固支端集中较为明显,最小主应力在梁的下表面与梁的固支端上侧集中最为明显.故在梁中部为拉张破坏,梁固支端为压剪破坏.

2 固支梁模型底板突水破坏判据

2.1 底板完整隔水层破坏形式判断

就煤层底板而言,抗拉强度是影响破坏的主要因素.因此,岩层容易发生因抗拉能力不足而导致的弯曲破坏.考虑了水平地应力后,若当水平地应力较大时,则岩层或以压剪破坏为主.

综上所述,下伏隔水层在受水压力和水平地应力双重影响可能发生的破坏有二:第一,在固支端发生剪切破坏;第二,在梁中部发生弯拉破坏.

2.2 隔水层压剪破坏的力学判据

剪切破坏是围岩弱结构体中最容易沿优势结构面发生破坏的形式,但在高水平应力作用下,结构面不

发育的岩体也会发生破坏.对于岩梁,弯矩绝对值最大的截面为危险截面,最大正应力位于最大弯矩所在的截面上距离中性轴最远的点.

在底板水压和水平地应力下,假设固支端上部单向受压($y = -h/2, x = \pm L$),根据主应力计算公式,梁固支端上部 σ_1, σ_3 为

$$\sigma_1 = \sigma_x = \pm l, y = -h/2 = \frac{2ql^2}{h_b^2} + q + \frac{u_b q}{4} - \frac{2\gamma_b l^2}{h_b} - \gamma_b h_b - \frac{5h_b \gamma_b u_b}{4} + N; \quad (11)$$

$$\sigma_3 = 0.$$

当底板隔水层的任意一点将要发生塑性变形时,其主应力应该满足极限平衡条件.根据岩石力学中通用的莫尔-库仑屈服准则判断.

$$\sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi - 2c\sqrt{N_\varphi} = 0. \quad (12)$$

式中: $N_\varphi = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$; c 为粘聚力; φ 为内摩擦角.

由式(11)求得工作面底板下任一点主应力,将其带入到式(13)后,即可用主应力来判别底板在受压最危险点的剪切破坏状况.则根据式(13)可知,岩梁未剪切破坏时极限水压力:

$$t_{ij} = \frac{8c_b h_b^2 \sqrt{N_{\varphi b}} + 8\gamma_b h_b l^2 + 4\gamma_b h_b^3 + 5h_b^3 \gamma_b u_b - 4N h_b^2}{8l^2 + 4h_b^2 + u_b h_b^2} + \gamma_a h_a. \quad (13)$$

2.3 隔水层弯拉破坏的力学判据

对固支梁模型而言,岩梁跨度的加长,支座弯矩增大,固定端岩层下表面处($x = \pm l, y = h/2$)的拉应力 $\sigma_x > [\sigma_t]$ 时,岩层在此处率先被拉断,如图 5 所示.由公式(10)第 1 式知,岩梁左嵌固端岩层下表面($x = \pm l, y = h/2$)处的 $|\sigma|$ 为

$$\sigma = \sigma_x = \pm l, y = h/2 = \frac{(q - \gamma_a h_a)(4h^2 + 5h^2 u + 8l^2)}{4h^2} - N. \quad (14)$$

若要岩层不断裂,则应使嵌固端岩层下表面($x = \pm l, y = h/2$)处的拉应力小于等于岩石的容许抗拉强度,即

$$\sigma_x = \pm l, y = h/2 \leq [\sigma_t]. \quad (15)$$

则岩梁不发生拉断的极限水压力为

$$t_{II} = \frac{\gamma_b h_b (4h_b^2 + 5h_b^2 u_b + 8l^2) + 4h_b^2 [\sigma_{tb}] + 4h_b^2 N}{(4h_b^2 + 5h_b^2 u_b + 8l^2)} + \gamma_a h_a. \quad (16)$$

2.4 完整隔水层极限水压力分析

2010 年 10 月 29 日中班,皖北煤电某煤矿 II 615 综采工作面,在初次放顶结束后,工作面正常回采向前推移综采支架过程中,发现工作面内距机巷 75 m 的 51 架处,煤层底板突然出现一个柱形孔洞,并不断向外大量突水.初步调查发现,工作面内底板圆柱形孔洞直径 110 mm 左右,此时孔内突水量约 $12 \text{ m}^3/\text{h}$,突水量呈现逐渐增大的趋势.结合地面已有资料分析,II 615 综采工作面煤层底板圆形孔洞,是 1993 年在地面施工的 13-14B7 生产补勘钻孔.因地面钻孔封闭不良,造成回采揭露钻孔时,发生地面钻孔大量突水.在上述的研究基础上,结合皖北煤电集团某矿采煤工作面底板突水隔水层岩体力学特性来讨论当 h/b 不同数值时,假设工作面跨度为 $b = 2l = 30 \text{ m}$,设计不同的 h/b 比值计算方案见表 1 所示,根据式(13)和式(16)计算固支梁模型下煤层底板的极限水压力变化情况.

如图 5 所示,给定开采工作面跨度($b = 30 \text{ m}$)条件下,底板突水破坏极限水压力随隔水层厚度 h 的增大而增大;且在隔水层厚度的增加过程中,隔水层破坏方

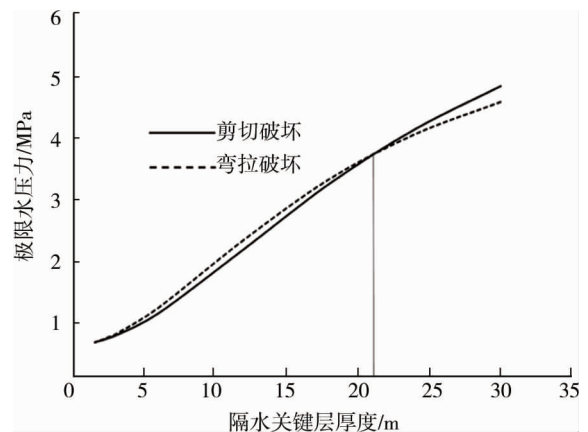


图 5 不同 h/b 值下的极限水压力值

式由弯拉破坏逐渐向压剪破坏过度。

采煤工作面底板岩层隔水层的弹性模量 E 为 5000 MPa,黏聚力 c 为 3 MPa,内摩擦角 φ 为 30° ,岩体重度 γ 为 25 KN/m^3 ,泊松比 u 为 0.25,岩体抗拉强度 σ_t 为 2 MPa,水平应力 N 为 3 MPa,下伏承压水压力为 3 MPa。

表 1 不同的 h/b 值下的极限水压力值

h/b	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1	0.08	0.07	0.06	0.05
剪切破坏	4.80	4.09	3.19	2.11	1.05	0.680	0.63	0.605	0.584	0.564
弯拉破坏	4.54	4.01	3.27	2.27	1.15	0.711	0.65	0.62	0.595	0.572

3 结论

1) 基于弹性力学中的固支梁理论,建立了沿煤层跨度方向采动底板受力学模型,计算了煤层回采过程中底板内任一点处的应力大小,笔者认为隔水层自重与隔水层所受的水平应力与承压水压力相比较小,可忽略不计;因此对所阐述的固支梁理论对煤层底板所受的应力条件进行了简化,未考虑底板隔水层自重和水平应力,因此计算结果与实际有所差别。

2) 当 $h/b \leq 0.7$,完整隔水层弯拉破坏的极限水压力小于压剪破坏的极限水压力,当 $h/b \geq 0.7$ 时,压剪破坏的极限水压力大于弯拉破坏的极限水压力。

3) 煤层底板完整隔水层在下伏承压水作用及两端固支的边界条件下,底板隔水层中部发生弯拉破坏,底板隔水层固支端发生压剪破坏。

参考文献:

- [1] 贾立君.煤矿安全要“避难设施”[J].瞭望,2010(16):20.
- [2] 蔡跃雨,朱仙庄矿“1·30”突水事故矿山救护工作探析[J].淮北职业技术学院学报,2018,17(3):115-116.
- [3] 杨志斌.斯列萨列夫公式在矿井水害防治中的应用分析[J].煤矿安全,2016,47(9):190-193.
- [4] 范胜洋.采动底板突水孕灾演化规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
- [5] 孟祥瑞,徐铖辉,高召宁,等.采场底板应力分布及破坏机理[J].煤炭学报,2010,35(11):1832-1836.
- [6] 高召宁,孟祥瑞.采动条件下煤层底板变形破坏特征研究[J].矿业安全与环保,2010,37(3):17-20.
- [7] 虎维岳,尹尚先.采煤工作面底板突水灾害发生的采掘扰动力学机制[J].岩石力学与工程学报,2010,29(s1):3344-3349.
- [8] 王连国,缪协兴.岩石渗透率与应力、应变关系的尖点突变模型[J].岩石力学与工程学报,2005(23):4210-4214.
- [9] 王连国,宋扬,缪协兴.基于尖点突变模型的煤层底板突水预测研究[J].岩石力学与工程学报,2003(4):573-577.
- [10] 张金才,张玉卓,刘天泉.岩体渗流与煤层底板突水[M].北京:地质出版社,1997.
- [11] 虎维岳,朱开鹏,黄选明.非均布高压水对采煤工作面底板隔水岩层破坏特征及其突水条件研究[J].煤炭学报,2010,35(7):1109-1114.
- [12] 冯强,蒋斌松.基于积分变换采场底板应力与变形解析计算[J].岩土力学,2015,36(12):3482-3488.
- [13] 温廷新,于凤娥.基于 PSO_SVM_AdaBoost 的煤层底板突水预测研究[J].计算机应用研究,2018,35(12):3664-3667.
- [14] 王鑫,郑浩铭,张成行,等.基于 AHP 熵值法的煤层底板突水预测评价[J].中国煤炭,2018,44(12):126-130.
- [15] 刘洪磊,杨天鸿,于庆磊,等.范各庄矿 12 煤底板突水过程模拟分析[J].煤田地质与勘探,2010,38(3):27-31.
- [16] 卢爱红,张连英.水平构造应力对煤层底板突水的影响分析[J].采矿与安全工程学报,2010,27(3):395-398.
- [17] 李文敏.承压水上采煤的流固耦合数值模拟[D].淮南:安徽理工大学,2013.
- [18] 蒋昊良.岱庄煤矿承压水上膏体充填开采技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
- [19] 陈刚,王琼,杜福荣.煤层开采对底板突水的影响[J].煤矿安全,2005(4):34-36.
- [20] 刘士强.登封煤田白坪井田二₁煤层底板突水危险性预测[D].焦作:河南理工大学,2009.
- [21] 倪宏革,罗国煜,汪青葆.南京玄武湖下盾构过富水断裂施工的安全性评价[J].岩石力学与工程学报,2001(3):350-354.
- [22] 徐芝伦.弹性力学简明教程[M].北京:高等教育出版社,1980.