

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201600339

## 巷道底板承压水突水评价方法研究

郭兵兵<sup>1,2</sup>, 刘长武<sup>1\*</sup>, 刘德峰<sup>1</sup>, 高云端<sup>3</sup>, 王超<sup>1</sup>

(1. 四川大学水利水电学院, 四川成都 610065; 2. 河南工程学院安全工程学院, 河南郑州 451191;  
3. 宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司, 宁夏银川 750004)

**摘要:**华北石炭二叠纪聚煤区是中国最重要的煤炭生产基地,区内众多煤矿皆受煤系底部奥陶系灰岩承压水威胁。针对当前煤矿巷道底板承压水突水评价方法存在的局限和不足,探索研究巷道底板承压水突水评价方法。现行评价方法岩梁法的理论计算前提主要包括:底板隔水层简化为两端固支梁;在岩梁弯矩最大处,底板隔水岩层承受的拉应力超过抗拉强度,岩层拉裂破坏;忽略孔隙水压力对岩石破坏的影响,计算隔水层厚度时抗拉强度取底板隔水层的平均值。事故数据及研究分析表明岩梁法计算假设存在不合理之处,与实际工况有较大偏差。基于对常见矩形巷道围岩应力分布特征的分析,结合巷道实际工况,摒弃底板隔水岩层弯拉破坏模式,提出隔水岩层剪切破坏模式,建立巷道底板承压水突水破坏岩柱模型;基于所建立的岩柱模型,利用极限平衡理论,综合考虑孔隙水压力对岩石破坏的影响,推导底板隔水层承受最大水压的计算评价方法。结果表明:最大水压与隔水层厚度、隔水层平均容重、抗剪强度参数、孔隙水压力系数和巷道宽度直接相关,最大水压与隔水层厚度呈指数函数关系。文中所提评价方法的计算结果与实测吻合,证明该方法合理有效。所提方法也能为地下工程其他专业领域类似的承压水突水问题研究提供借鉴。

**关键词:**承压水;底板突水;最大水压;隔水层厚度;岩柱法

中图分类号:TD322

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2017)03-0104-06

### Study on Evaluation Method of Confined Water Inrush from Roadway Floor

GUO Bingbing<sup>1,2</sup>, LIU Changwu<sup>1\*</sup>, LIU Defeng<sup>1</sup>, GAO Yunrui<sup>3</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>

(1. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China; 2. College of Safety Eng., Henan Univ. of Eng., Zhengzhou 451191, China; 3. Ningxia Water Resources & Hydropower Survey Design & Research Inst. Co. Ltd., Yinchuan 750004, China)

**Abstract:** The Carboniferous-Permian coal-bearing region is the most important coal production base in China, and coal mining is threatened with confined water from the Ordovician limestone aquifer in many coal mines. Aiming at some limitation and deficiency in the current evaluation method about confined water inrush from roadway floor in coal mine, the evaluation method was explored and studied. In the current rock beam method, the main theoretical calculation hypothesis contained: the water-resisting layer was treated as a clamped-clamped beam. The floor water-resisting layer tension failure was caused by tensile stress exceeding the tensile strength of the rock, at the maximum of the beam moment. The influence of pore water pressure on rock damage was neglected, and the thickness of water-resisting layer was calculated using the average tensile strength of the floor strata. Accident data and researches evidenced that there were some unreasonable parts and a big deviation between actual working conditions and calculation conditions, in the main theoretical hypothesis of rock beam method. By analyzing the stress distribution characteristics of the surrounding rock in common rectangle roadway and combining with actual working conditions, the floor strata tension failure model was abandoned and the shear failure model was formulated, then a new rock pillar mechanical model of confined water inrush in rectangle roadway was built. Based on the new rock pillar model, and taking the influence of pore water pressure on rock damage into consideration, a new formula calculating the critical hydraulic pressure that the floor water-resisting layer could withstand was given using limit equilibrium theory. The new formula showed that there was a direct relationship between the critical hydraulic pressure and the thickness of water-resisting layer, average

收稿日期:2016-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51369001);河南省科技攻关计划项目资助(172102310706);河南省高等学校重点科研项目资助(16A44001)

作者简介:郭兵兵(1982—),男,博士生,讲师。研究方向:岩土与地下工程。E-mail: guobb\_professor@163.com

\*通信联系人 E-mail: liuchangwu@scu.edu.cn

volume-weight, shear strength parameters, pore water pressure parameters and the roadway width, and the critical hydraulic pressure exhibited exponent relation with the thickness of water-resisting layer. The calculation result quite coincided with the measured data, showing that this new method was reasonable and effective. This new method could be used and referenced for study on similar problem of confined water inrush, in other fields of underground engineering.

**Key words:** confined water; floor water inrush; maximum hydraulic pressure; thickness of water resisting layer; rock pillar method

中国许多煤矿水文地质条件复杂, 水害事故频发, 水害是仅次于瓦斯灾害的第二大灾害性事故。河北的邢台、邯郸和峰峰, 河南的焦作、平顶山, 山东的淄博、新汶, 江苏的徐州、大屯等典型的华北石炭二叠纪煤田, 煤系底部奥陶系含水层富水性强, 水压高, 可达到2.0~6.5 MPa, 隔水层薄, 一般只有10~30 m, 承压水水害严重威胁煤矿开采<sup>[1]</sup>。

从20世纪60年代起, 众多学者就开始对煤层底板承压水问题进行探索和研究, 先后提出突水系数<sup>[2]</sup>、下三带<sup>[3]</sup>、原位张裂<sup>[4]</sup>、薄板理论<sup>[5]</sup>和关键层<sup>[6]</sup>等理论, 从不同角度研究底板突水, 对煤矿水害防治起到了积极的指导作用。但以往的研究大都是针对采煤工作面底板突水机理及突水危险评价, 对巷道底板突水的研究还不够深入。

2009年8月, 中国国家安全监督管理总局颁布的《煤矿防治水规定》(以下简称规定), 要求“高度重视煤矿防治水工作, 全面加强水文地质基础工作, 加强防治水监督监察工作力度, 坚决有效遏制重特大水害事故”, 对煤矿防治水工作起到了重要的指导和促进作用。《规定》对煤矿掘进巷道底板突水危险评价推荐了具体的计算方法。

在地下工程的其他专业领域, 对于类似承压水突水问题, 如铁路、水利工程等的岩溶隧道防突岩柱安全厚度的设计, 由于还没有制定统一的规范<sup>[7]</sup>, 部分也参考和借鉴了《规定》中的方法和模型<sup>[8-9]</sup>。

## 1 巷道底板突水评价的岩梁法

《规定》对掘进巷道安全隔水层厚度提出按式(1)进行计算, 隔水层安全水头压力值按式(2)计算:

$$t = \frac{L(\sqrt{\gamma^2 L^2 + 8K_p p} - \gamma L)}{4K_p} \quad (1)$$

$$p = 2K_p \frac{t^2}{L^2} + \gamma t \quad (2)$$

式中:  $t$ 为底板隔水层厚度, m;  $L$ 为巷道宽度, m;  $\gamma$ 为底板隔水层的平均容重, MN/m<sup>3</sup>;  $K_p$ 为底板隔水层的平均抗拉强度, MPa;  $p$ 为底板隔水层承受的水头压力, MPa。

巷道底板隔水层简化为两端固支的矩形截面梁, 如图1所示。根据材料力学理论, 两端固支梁作用均布荷载 $q$ , 跨度为 $L$ , 如图2所示。最大剪力 $Q_{\max}$ 在梁

的两端,  $Q_{\max} = (qL/2)$ ; 最大弯矩 $M_{\max}$ 也在梁的两端,  $M_{\max} = (-qL^2/12)$ 。

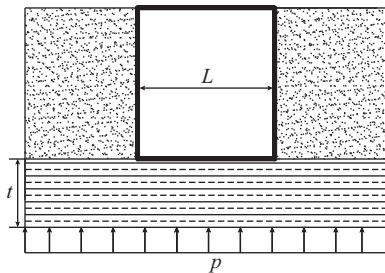


图1 隔水层岩梁模型

Fig.1 Beam model of water resisting layer

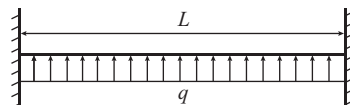


图2 固支梁

Fig.2 Clamped beam

弯曲时矩形截面梁截面的最大拉应力为:

$$\sigma'_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} = \frac{qL^2/12}{bh^2/6} = \frac{(p - \gamma t)L^2}{2t^2} \quad (3)$$

式中:  $\sigma'_{\max}$ 为弯曲时梁截面的最大拉应力;  $W_z$ 为梁的弯曲截面系数, 与截面形状尺寸有关, 对于矩形截面,  $W_z = (bh^2/6)$ ,  $b$ 为截面宽,  $h$ 为截面高。

根据最大拉应力理论, 最大拉应力为引起材料破坏的因素, 即

$$\sigma'_{\max} = \frac{(p - \gamma t)L^2}{2t^2} = K_p \quad (4)$$

由式(4)可以导出, 当底板隔水层承受的水压为 $p$ 时, 安全隔水层厚度 $t$ 表示为式(1); 当隔水层厚度为 $t$ 时, 底板隔水层能够承受的最大水压 $p$ 表示为式(2)。

通过对《规定》中计算方法的分析可以看出, 现行的承压水突水评价方法中存在以下问题:

1) 该方法是基于材料力学中的固支梁模型推导的。其中, 巷道宽度 $L$ 为梁的跨度, 底板隔水层厚度 $t$ 为梁的高度, 隔水层承受的水压 $p$ 为梁的荷载, 如图1所示。材料力学中对梁的定义为“外力垂直于轴线, 以弯曲为主要变形形式, 长度方向远大于横截面尺寸的构件”, 同时式(3)成立的条件为梁的跨高比大于5<sup>[10]</sup>。巷道宽度一般为3~5 m, 要满足跨高比条件, 隔水层厚度应不超过1 m, 实际中这样的情况不会出

现,部分巷道底板突水事故中隔水层厚度见表1<sup>[11]</sup>,岩梁模型是不合适的。

2)底板隔水岩层受承压水作用后,水压是导致底板突水的重要因素,水的软化作用及水压的力学作用会造成底板岩层的劣化,导致强度降低,隔水层岩石的强度应考虑承压水的影响<sup>[12]</sup>。该方法计算参数直接采用底板岩层的平均抗拉强度,忽略了承压水效应的影响。

表 1 巷道底板突水事故

Tab.1 Accident of water inrush from roadway floor

| 名称      | 水压/MPa | 隔水层厚度/m   |
|---------|--------|-----------|
| 河南焦作中马村 | 2.50   | 20.0      |
| 江苏徐州韩桥  | 0.48   | 2.7       |
| 山东新汶华丰  | 1.70   | 18.0~22.0 |
| 焦作九里山   | 2.80   | 20.0      |
| 焦作朱村    | 1.90   | 23.0      |
| 河南郑州新密  | 1.50   | 10.0      |
| 焦作王封    | 0.56   | 18.0      |
| 焦作焦西    | 2.10   | 7.4       |

3)巷道开挖后,围岩应力重新分布,巷道围岩应力分布特征与原岩应力、围岩性质、巷道尺寸、巷道形状和地质构造等因素有关。将地下岩体简化为均质各向同性的连续介质,巷道开挖后,众多学者通过理论及数值仿真计算已证明矩形巷道围岩应力分布的一般特征为:从巷道周边开始,环向应力先迅速增加后缓慢减小,随着深入围岩内部,最终趋于原岩应力;巷道的四角应力集中;顶底板会出现卸压区<sup>[13-14]</sup>。

均布荷载作用下的固支梁,最大弯矩及剪力都在两端。最大弯矩处产生的拉应力超过抗拉强度而发生破坏,破坏形式为弯拉破坏。从材料力学的角度出发,岩梁弯拉破坏,脆性断裂是合理的。结合巷道实际工况,不受采动影响,巷道开挖后,两边为应力升高区(应力峰值为 $k\gamma h$ ),底板为应力降低区。隔水层厚度为 $t$ ,水压为 $p$ ,隔水岩层受到底板承压水与两帮高应力的综合作用,发生剪切破坏,如图3所示。文献<sup>[15]</sup>通过相似模拟试验发现:在围岩和水压力共同作用下,巷道底板经历了完整—小裂隙形成—裂隙扩展—底板破碎的过程,且大的裂隙首先出现在底角。隔水岩层发生岩柱剪切破坏的可能性及合理性远大于岩梁弯拉破坏。

4)底板突水存在两种情况:底板隔水层基本完整或局部存在微小裂隙,承压水作用下,当岩层不能保持平衡而破坏时,会发生隔水层破坏型突水;底板岩层中存在构造带或软弱面,当承压水沿构造带或软弱面涌出时,会发生构造型突水<sup>[16]</sup>。《规定》中推

荐的岩梁法只能对隔水层破坏型突水进行评价,构造型突水显然不适用。

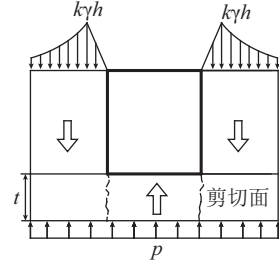


图 3 底板隔水层剪切破坏

Fig.3 Shear failure of water resisting layer

## 2 巷道底板突水评价的岩柱法

### 2.1 底板隔水层剪切破坏

巷道开挖后,底板岩体受巷道两帮高应力及承压水联合作用,隔水层基本完整时,巷道底角应力集中,最先破坏,随后剪切破坏发生在巷道两底角往下的底板岩体中,岩柱被剪断,破坏面近似平面,如图3所示。

隔水层局部存在微小裂隙时,水压力劈裂作用下,原有裂隙重新张开并扩展,形成破坏面。对岩体水力劈裂的研究,文献<sup>[17-18]</sup>具有相同的结论:在地应力和静水压力作用下,岩体中裂隙发生压剪破坏的临界水压力较发生拉剪破坏所需的临界水压力易于满足,压剪破坏模式的临界水压力远小于拉剪破坏模式的临界水压力,岩体裂隙水压劈裂为压剪扩展模式。

破坏面形成后,隔水层岩体的稳定性主要取决于承压水压力和破坏面的摩擦力,当摩擦力不能抵抗承压水压力时,隔水岩体被破坏,发生突水。

### 2.2 孔隙水压力影响下的Mohr-Coulomb准则

承压水作用不同于一般力的作用,水能渗入到岩体内部,承压水对底板岩体影响的力学作用包括有效应力效应、水楔效应和水流冲刷扩径作用<sup>[12]</sup>。孔隙水压是重要的影响因素之一。

岩石三轴压缩试验时,轴向加载的孔隙水压 $p$ 能同时影响到有效轴向应力和有效围压,影响的程度与有效应力系数 $\alpha$ 有关<sup>[19-20]</sup>。在莫尔圆上表现为莫尔圆整体向左移动 $\alpha p$ ,孔隙水压作用会导致岩石强度降低。

无孔隙水压力时, Mohr-Coulomb准则表示为:

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (5)$$

有孔隙水压力时, Mohr-Coulomb准则表示为:

$$(\sigma_1 - \alpha p) = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} (\sigma_3 - \alpha p) + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (6)$$

即

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi - 2\alpha p \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (7)$$

### 2.3 岩柱法

巷道延伸方向的尺寸远大于巷道的宽度和高度, 把问题简化为  $xoz$  平面内的平面应变问题, 建立平面应变计算模型, 如图4所示。其中, 矩形巷道宽度为  $L$ , 底板隔水岩层厚度为  $t$ , 作用于底板隔水岩层下部的承压水水压为  $p$ 。底板受承压水作用时, 隔水岩层有沿底角裂隙剪切破坏的趋势, 当处于极限平衡状态时, 从中任意取出一个厚度为  $dz$  的微小单元体, 如图5所示。

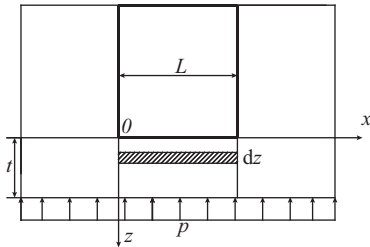


图4 岩柱法巷道力学模型

Fig.4 Mechanical model of rock pillar method

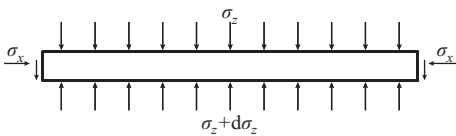


图5 微元体受力模型

Fig.5 Micro-unit force model

单元体所受的垂直应力为  $\sigma_z$ , 水平应力为  $\sigma_x$ , 单元体的静力平衡方程为:

$$(\sigma_z + d\sigma_z)L - \sigma_z L - 2\tau dz = 0 \quad (8)$$

当岩石作用有孔隙水压力时, 考虑孔隙水压作用, 抗剪强度可表示为:

$$\tau = \sigma_e \tan \varphi + c = (\sigma_x - \alpha p) \tan \varphi + c \quad (9)$$

式中:  $\tau$  为底板隔水岩层的抗剪强度, MPa;  $c$  为底板隔水岩层的黏聚力, MPa;  $\varphi$  为底板隔水岩层内摩擦角;  $\sigma_e$  为作用于破坏面上的有效应力, MPa;  $\sigma_x$  为作用于破坏面上的法向应力, MPa;  $\alpha$  为有效应力系数;  $p$  为孔隙水压力, MPa。

将式(9)代入式(8)有:

$$(\sigma_z + d\sigma_z)L - \sigma_z L - 2(\sigma_x \tan \varphi + c - \alpha p \tan \varphi) dz = 0 \quad (10)$$

即

$$\frac{d\sigma_z}{dz} = \frac{2}{L} (\sigma_x \tan \varphi + c - \alpha p \tan \varphi) \quad (11)$$

根据极限平衡条件, 将式(7)代入式(11)有:

$$\frac{d\sigma_z}{dz} = \frac{2}{L} (c - \alpha p \tan \varphi) +$$

$$\frac{2}{L} \tan \varphi \left( \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \sigma_z - \frac{2c \cos \varphi - 2\alpha p \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right) \quad (12)$$

即

$$\frac{d\sigma_z}{dz} - \frac{2 \tan \varphi - 2 \tan \varphi \sin \varphi}{L(1 + \sin \varphi)} \sigma_z = \frac{2\alpha p \sin \varphi \tan \varphi - 2\alpha p \tan \varphi}{L(1 + \sin \varphi)} + \frac{2c - 2c \sin \varphi}{L(1 + \sin \varphi)} \quad (13)$$

式(13)为1阶线性非齐次微分方程, 求解可得:

$$\sigma_z = C_1 e^{\frac{2 \tan \varphi - 2 \tan \varphi \sin \varphi}{L(1 + \sin \varphi)} z} - \frac{c}{\tan \varphi} + \alpha p \quad (14)$$

式中,  $C_1$  为待定系数。将边界条件  $z=0, \sigma_z=0; z=t, \sigma_z=p-\gamma t$ , 代入式(14)可得:

$$\begin{cases} p = \frac{B(e^{At} - 1) + \gamma t}{\alpha(e^{At} - 1) + 1}, \\ A = \frac{2 \tan \varphi - 2 \tan \varphi \sin \varphi}{L(1 + \sin \varphi)}, \\ B = \frac{c}{\tan \varphi} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\gamma$  为底板隔水岩层的平均容重,  $\text{MN/m}^3$ ;  $t$  为底板隔水岩层的厚度, m。

### 2.4 岩梁法与岩柱法

岩梁法与岩柱法皆可在掘进巷道底板岩层性质一定的情况下, 计算隔水层能够抵抗承压水的最大水压值。岩梁法认为底板能承受的最大水压与隔水岩层的厚度、平均容重、底板岩层的抗拉强度直接相关, 见式(2)。岩柱法认为最大水压与隔水岩层的厚度、平均容重、抗剪强度参数、孔隙水压力系数和巷道宽度直接相关, 见式(15)。

巷道掘进宽度一般为3~5 m, 在宽度一定的情况下, 基于煤系地层常见岩石饱水后的抗拉强度和抗剪强度参数<sup>[21]</sup>, 分别绘制岩梁法、岩柱法计算的隔水层厚度与最大水压的关系曲线, 同时绘出表1中的底板突水事故中实测的隔水层厚度和最大水压, 如图6所示。

图6中实线表示岩柱法在3组不同抗剪强度参数下的结果, 虚线表示岩梁法在3组不同抗拉强度下的结果。

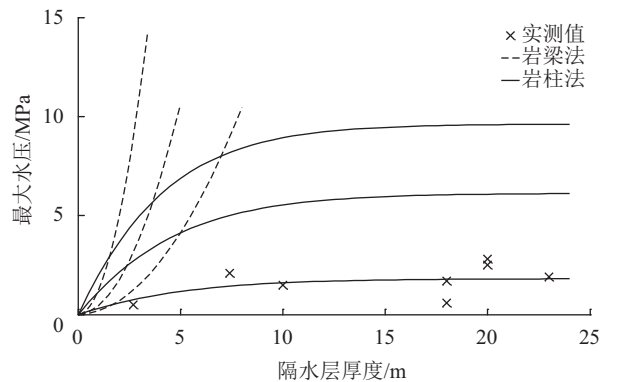


图6 最大水压与隔水层厚度

Fig.6 Relation of maximum water pressure to thickness of water resisting layer



由图6可以看出,岩梁法的最大水压与隔水层厚度呈2次函数关系,岩柱法的最大水压和隔水层厚度呈指数函数关系;在巷道宽度确定的情况下,基于煤系地层常见岩石饱水后力学参数,岩柱法计算结果能更好地吻合现场实测数据。

### 3 工程实例

河南郑宏恒泰煤业有限公司主采二<sub>1</sub>煤层,煤层底板为泥岩、砂质泥岩和细砂岩,直接充水水源为太原组上段L<sub>7~8</sub>灰岩岩溶承压裂隙含水层,水压为1.22~3.08 MPa。二<sub>1</sub>煤底至L<sub>7~8</sub>灰岩顶的泥岩、砂质泥岩为主的隔水层厚度为6.60~15.30 m,一般10 m左右,最大抗拉强度2.64 MPa,平均容重25.70 kN/m<sup>3</sup>,平均内摩擦角为33°,平均黏聚力为1.91 MPa,孔隙水压力系数为0.8。

2010年7月31日,西翼采区13100工作面回风巷掘进时发生底板透水事故,造成3人死亡,分别用岩梁法和岩柱法评价巷道底板突水危险性。

1)岩梁法计算隔水层承受最大水压为:

$$p = 2K_p \frac{t^2}{L^2} + \gamma t = 2 \times 2.64 \times \frac{6.6^2}{3.5^2} + 0.0257 \times 6.6 = 18.9 \text{ MPa}.$$

式中:  $t$ 为隔水层厚度,取6.6 m;  $L$ 为巷道宽度,取3.5 m;  $\gamma$ 为底板隔水层的平均容重,取0.0257 MN/m<sup>3</sup>;  $K_p$ 为底板隔水层的平均抗拉强度,取2.64 MPa;  $p$ 为底板隔水层可能承受的最大水压,MPa。

岩梁法计算的最大水压为18.9 MPa,煤层底板隔水层实际承受的L<sub>7~8</sub>灰岩水最大水压为3.08 MPa,巷道掘进安全,不存在突水危险。

2)岩柱法计算隔水层承受最大水压为:

$$A = \frac{2 \tan \varphi - 2 \tan \varphi \sin \varphi}{L(1 + \sin \varphi)} = \frac{2 \tan 33 - 2 \tan 33 \sin 33}{3.5(1 + \sin 33)} = 0.26,$$

$$B = \frac{c}{\tan \varphi} = \frac{1.94}{\tan 33} = 2.92,$$

$$p = \frac{B(e^{At} - 1) + rt}{\alpha(e^{At} - 1) + 1} = \frac{2.92 \times (e^{0.26 \times 6.6} - 1) + 0.0257 \times 6.6}{0.8 \times (e^{0.26 \times 6.6} - 1) + 1} = 2.91 \text{ MPa}.$$

式中:  $c$ 为底板隔水层的黏聚力,取1.91 MPa;  $\varphi$ 为底板隔水层的内摩擦角,取33°;  $t$ 为隔水层厚度,取6.6 m;  $L$ 为巷道底板宽度,取3.5 m;  $\gamma$ 为底板隔水层的平均容重,取0.0257 MN/m<sup>3</sup>;  $\alpha$ 为有效应力系数,取0.8;  $p$ 为隔水层能承受的最大水压,MPa。

岩柱法计算的最大水压为2.91 MPa,实际承受水压超过了计算的最大水压,存在突水危险。

西翼采区13100工作面回风巷掘进时发生底板

透水事故的结果表明岩柱法评价更为合理有效。

岩柱法计算的最大水压远小于岩梁法计算的最大水压,实际应用时会存在岩梁法评价安全,岩柱法评价危险,当出现这样的情况时一定要高度重视,加强现场预警监测,注意底板鼓起或产生裂隙出现渗水等突水征兆,避免事故发生,保证安全生产。

### 4 结 语

基于对承压水突水底板破坏模式的研究,考虑孔隙水压的力学作用,研究了煤矿巷道底板突水评价的改进方法,提出初步的结论和建议:

1)现行的巷道底板承压水突水评价方法存在着局限和不足:固支梁力学计算模型不合理,底板破坏模式不恰当,孔隙水压劣化岩石的影响被忽略。

2)完整底板隔水岩层的破坏模式为剪切破坏,考虑孔隙水压对岩石强度的影响,建立底板隔水层岩柱模型,提出巷道底板承压水突水评价的岩柱法。

3)岩梁法的最大水压和隔水层厚度呈2次函数关系,岩柱法的最大水压和隔水层厚度呈指数函数关系;在巷道宽度确定的情况下,岩柱法计算结果与以往的事故现场实测数据更为符合。

4)工程实例表明,岩柱法计算结果能更好地吻合现场,评价结论更为合理有效。巷道底板突水评价方法的研究,能够为掘进巷道底板承压水防治提供依据,促进矿井防治水理论的发展,也能为铁路、水利工程等岩溶隧道防突岩柱安全厚度的设计提供借鉴和参考。

参考文献:

- [1] Dai Changqing. Research on water inrush regularity of floor strata for mining on confine aquifer[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2005. [代长青. 承压水体上开采底板突水规律的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2005.]
- [2] Guo Weijia, Liu Yangxian. Conception and application of water bursting coefficient[J]. Hebei Coal, 1989(2): 56-60. [郭惟嘉, 刘杨贤. 底板突水系数概念及其应用[J]. 河北煤炭, 1989(2): 56-60.]
- [3] Jing Zigang, Li Baiying. Preliminary study on water inrush mechanism of floor strata[J]. Coal Geology & Exploration, 1980(2): 54-59. [荆自刚, 李白英. 煤层底板突水机理的初步探讨[J]. 煤田地质与勘探, 1980(2): 54-59.]
- [4] 王作宇, 刘鸿泉. 承压水上采煤[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993: 66-67.
- [5] 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: 91-95.
- [6] Li Liangjie, Qian Minggao, Wen Quan, et al. Relationship

- between the stability of floor structure and water-inrush from floor[J].Journal of China University of Mining & Technology,1995,24(4):18-23.[黎良杰,钱鸣高,闻全,等.底板岩体结构的稳定性与底板突水关系的研究[J].中国矿业大学学报,1995,24(4):18-23.]
- [7] Li Ji,Lu Hao,Xia Yuanpu.Survey and research on estimation method of against-inrush safe thickness of rock strata in karst tunnels[J].Tunnel Construction,2014,34(9):862-872.[李集,卢浩,夏沅谱.岩溶隧道防突安全厚度研究综述及估算方法探讨[J].隧道建设,2014,34(9):862-872.]
- [8] Guo Jiaqi.Study on against-inrush thickness and water burst mechanism of karst tunnel[D].Beijing:Beijing Jiaotong University,2011.[郭佳奇.岩溶隧道防突厚度及突水机制研究[D].北京:北京交通大学,2011.]
- [9] Zeng Yi.Study on calculation method of safe thickness of rock strata and water burst mechanism of karst tunnel[D].Chengdu:Southwest Petroleum University,2015.[曾艺.岩溶隧道岩盘安全厚度计算方法及突水灾害发生机理研究[D].成都:西南石油大学,2015.]
- [10] 孙训方,方孝淑,关来泰.材料力学I[M].北京:高等教育出版社,2002:117-118.
- [11] Tian Gan.Study on resistant mechanism of coal seam floor aquiclude to high pressure water intrusion[D].Xi'an:China Coal Research Institute Xi'an Branch,2005.[田干.煤层底板隔水层阻抗高压水侵入机理研究[D].西安:煤炭科学研究总院西安分院,2005.]
- [12] Gao Yanfa,Yu Yongxin,Niu Xueliang.The mechanical actions of water pressure on water-inrush from coal floor[J].Coal Geology & Exploration,1996,24(6):37-39.[高延法,于永辛,牛学良.水压在底板突水中的力学作用[J].煤田地质与勘探,1996,24(6):37-39.]
- [13] Hou Huaqiang,Wang Lianguo,Lu Yinlong,et al.Research of rectangular roadway surrounding rock stress distribution and its fracture mechanism[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2011,7(S2):1625-1629.[侯化强,王连国,陆银龙,等.矩形巷道围岩应力分布及其破坏机理研究[J].地下空间与工程学报,2011,7(增刊2):1625-1629.]
- [14] He Feng,Tang Zhi,Zhu Xiaojing,et al.Stress distribution characteristics of rectangular roadway surrounding rocks[J].Mathematics in Practice and Theory,2015,45(20):128-134.[何峰,唐治,朱小景,等.矩形巷道围岩应力分布特征[J].数学的实践与认识,2015,45(20):128-134.]
- [15] Xu Yanchun,Chen Xinming,Li Jianbo,et al.Experimental research on floor heave and water inrush in the broken rock roadway under great depth and high water pressure[J].Journal of China Coal Society,2013,38(Supp 1):124-128.[许延春,陈新明,李见波,等.大埋深高水压裂隙岩体巷道底板突水试验研究[J].煤炭学报,2013,38(Supp 1):124-128.]
- [16] Yin Shangxian.Modes and mechanism for water inrushes from coal seam floor[J].Journal of Xi'an University of Science and Technology,2009,29(6):661-665.[尹尚先.煤层底板突水模式及机理研究[J].西安科技大学学报,2009,29(6):661-665.]
- [17] Guo Jiaqi,Qiao Chunsheng.Study on water-inrush mechanism and safe thickness of rock wall of karst tunnel face[J].Journal of the China Railway Society,2012,34(3):105-111.[郭佳奇,乔春生.岩溶隧道掌子面突水机制及岩墙安全厚度研究[J].铁道学报,2012,34(3):105-111.]
- [18] Li Shucai,Yuan Yongcai,Li Liping,et al.Water inrush mechanism and minimum safe thickness of rock wall of karst tunnel face under blast excavation[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(2):313-320.[李术才,袁永才,李利平,等.钻爆施工条件下岩溶隧道掌子面突水机制及最小安全厚度研究[J].岩土工程学报,2015,37(2):313-320.]
- [19] 凌贤长,蔡德所.岩体力学[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002:156-159.
- [20] Xu Jiang,Yang Hongwei,Peng Shoujian,et al.Experimental study of mechanical property of sandstone under pore water pressure and confining pressure[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(8):1618-1623.[许江,杨红伟,彭守建,等.孔隙水压力-围压作用下砂岩力学特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(8):1618-1623.]
- [21] Xiong Deguo,Zhao Zhongming,Su Chendong,et al.Experimental study of effect of water-saturated state on mechanical properties of rock in coal measure strata[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(5):998-1006.[熊德国,赵忠明,苏承东,等.饱水对煤系地层岩石力学性质影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(5):998-1006.]

(编辑 李轶楠)

引用格式:Guo Bingbing,Liu Changwu,Liu Defeng,et al.Study on evaluation method of confined water inrush from roadway floor[J].Advanced Engineering Sciences,2017,49(3):104-109.[郭兵兵,刘长武,刘德峰,等.巷道底板承压水突水评价方法研究[J].工程科学与技术,2017,49(3):104-109.]