

文章编号: 1673-3363-(2016)01-0012-07

富水巷道顶板水渗流特征数值计算研究

姚强岭, 陈田, 李学华, 刘凯, 梁顺, 朱晨光

(中国矿业大学矿业工程学院, 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要 巷道开挖改变了顶板岩层裂隙水的赋存形态, 水作用下顶板岩体强度削弱显著, 易于引起顶板的大变形甚至垮冒失稳。现场实测了富水巷道顶板水出水位置和围岩内部结构, 利用数值计算方法研究了富水巷道顶板无疏水孔、有疏水孔和有疏水孔且穿过顶板岩层裂隙面3种情况下, 顶板水流动特征、孔隙水压力变化规律及其顶板支护强度对顶板水渗流特征的影响作用。研究表明, 富水巷道顶板出水位置位于裂隙发育区域, 通过合理布置顶板疏水孔技术参数, 有利于顶板水的排放和顶板围岩稳定控制。据此, 提出了有控疏水和合理保水的技术原理, 并在现场进行了工程应用。

关键词 富水巷道; 顶板水; 有控疏水; 合理保水

中图分类号 TD 324 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2016.01.003

Numerical analysis on percolation characteristics of water-enriched roof of roadway

YAO Qiangling, CHEN Tian, LI Xuehua, LIU Kai, LIANG Shun, ZHU Chenguang

(School of Mines, Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education,
China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract Due to the excavation of roadway, the occurrence mode of water in the fractures of roof strata has changed, which has significantly decreased the strength of roof rock mass under the action of water and tends to induce large deformation of roof even loss of its stability. Field measurement on the occurrence position of roof effluent water and development law of surrounding rock internal fractures has been conducted in water-enriched roadway, and research has also been done on flow characteristics of roof water and variation law of pore water pressure as well as the influences of roof support intensity on the flow characteristics of roof water by means of numerical simulation under the following three conditions, no drain hole existing in the roof, drain hole existing in the roof and drain hole crossing the fissure-plane of roof strata, respectively. Research results have indicated that the occurrence position of roof effluent water locates in the developing area of fissures and it is conducive to drain roof water and control the stability of roof surrounding rock by reasonably arranging technical parameters of water drainage. Based on the above research, the technological principles of controllable water draining and reasonable water retention have been put forward and engineering application has also been conducted.

Key words water-enriched roadway; roof water; controllable water draining; reasonable water retention

收稿日期: 2014-04-24

责任编辑: 王江涛

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51304208); 国家自然科学基金项目(51374197); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 姚强岭(1982—), 男, 河南省兰考县人, 副教授, 博士, 从事矿山压力和岩层控制方面的研究。

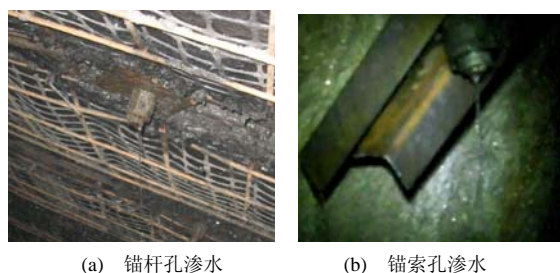
E-mail: yaoqiangling@126.com

Tel: 13805210624

煤系地层为沉积岩，其中煤层直接顶多为泥质类岩石组成，而基本顶多为砂质类岩石。水对岩石的损伤作用，国内外学者多以实验室试验研究为主，分别研究了水对岩石的物理、化学及力学作用，并掌握了水岩作用下岩石弹性模量、单轴和三轴抗压强度、声发射特征等变化规律^[1-7]。水在煤系地层中广泛分布，一般分为承压水和自由水。巷道开挖与掘进破坏了岩体的原岩应力状态，应力调整过程中改变了岩体的结构及其赋存形态，易于引起巷道顶板水的流动，如果水压及水量较大，可能造成突水事故^[8-9]。而在煤层顶板中广泛分布着含水砂岩顶板，这类顶板砂岩含水量不大且水压较小，多为渗流状态。研究发现顶板水渗流过程中，不仅削弱了顶板岩石的强度，也降低了支护体的强度，易于诱发巷道顶板变形失稳^[10-11]。一些学者研究了巷道顶板水对树脂锚杆支护强度的削弱作用，发现涌水量大小为关键影响因素之一^[12-13]。文献^[14-15]通过数值计算和现场实测研究了巷道顶板水对其稳定性的影响作用，并提出了相应的治理措施。而目前关于富水巷道顶板水渗流特征的研究较少，而水的动态流动特征不仅影响顶板岩层的强度，也是采取治理顶板水技术措施的关键一环。

1 工程概况

工程实践表明：富水巷道开挖过程中，应力调整引起顶板水发生渗流，特别是采用锚杆支护巷道，巷道开挖后顶板水沿着锚杆、锚索钻孔流动。图 1 为神华宁煤梅花井煤矿富水巷道顶板锚杆孔、锚索孔渗水情况。



(a) 锚杆孔渗水

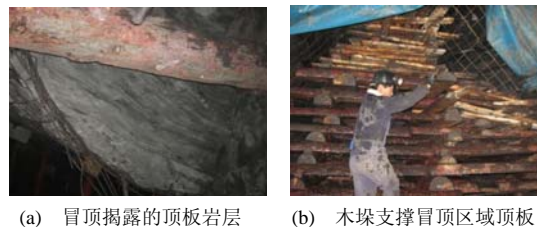
(b) 锚索孔渗水

图 1 顶板锚杆(索)孔渗水

Fig.1 Water seepage from the hole of roof bolt (cable)

巷道顶板水流动过程中，如果顶板岩层成分中含有蒙脱石、伊蒙混层等吸水后易于发生膨胀、崩解的矿物，则水对顶板岩体强度削弱明显，不利于巷道顶板围岩的稳定，易于诱发巷道顶板变形失稳。图 2 为梅花井煤矿富水巷道顶板发生冒顶事故时的情形。该处巷道顶板垮冒事故呈现如下特点：

- 1) 顶板在垮冒前下沉量较大，而两帮相对移近量不大；
- 2) 巷道刚掘出时顶板淋水量在 $6\sim 8\text{ m}^3/\text{h}$ ，并逐渐减少，但在顶板垮冒前仍在淋水；
- 3) 垮冒后发现，锚杆、锚索无破断。



(a) 冒顶揭露的顶板岩层

(b) 木垛支撑冒顶区域顶板

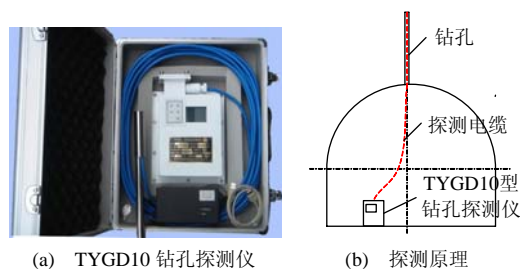
图 2 富水巷道顶板垮冒

Fig.2 Roof caving of water-enriched roadway

由于锚杆、锚索钻孔易于导通顶板含水岩层，而水作用影响树脂锚杆支护效果，并削弱锚固体支护强度，受水患影响的一些矿井将锚杆支护巷道改为棚式支护。但随着巷道顶板下沉变形，顶板水的下渗只是时间问题，水岩作用引起棚式支护巷道更大程度的变形，并且不利于工作面的回采，制约了矿井安全高效开采。为此，掌握富水巷道顶板水渗流特征，为巷道采取合理的支护技术措施提供基础显得尤为重要。

2 顶板水渗流特征现场实测

为了掌握富水巷道顶板水渗流规律，通过在巷道掘进工作面顶板布置探测孔，利用 TYGD10 钻孔探测仪现场实测了富水巷道顶板围岩内部结构、顶板水出水位置等。观测仪器及探测原理见图 3，钻孔直径 32.0 mm、长 8.0 m，垂直于巷道顶板施工。



(a) TYGD10 钻孔探测仪

(b) 探测原理

图 3 钻孔探测仪实物和原理图

Fig.3 Objects and schematic diagram of borehole detection instrument

在富水巷道顶板淋水区域布置 3 组顶板探测孔。以其中的 1[#]和 2[#]钻孔为例，其分别距掘进工作面约 8.0 m 和 12.0 m，根据该处顶板岩层综合柱状图可知，直接顶为灰黑色泥岩，基本顶为灰白色中粒砂岩。富水巷道渗流段顶板围岩内部结构特征见图 4。

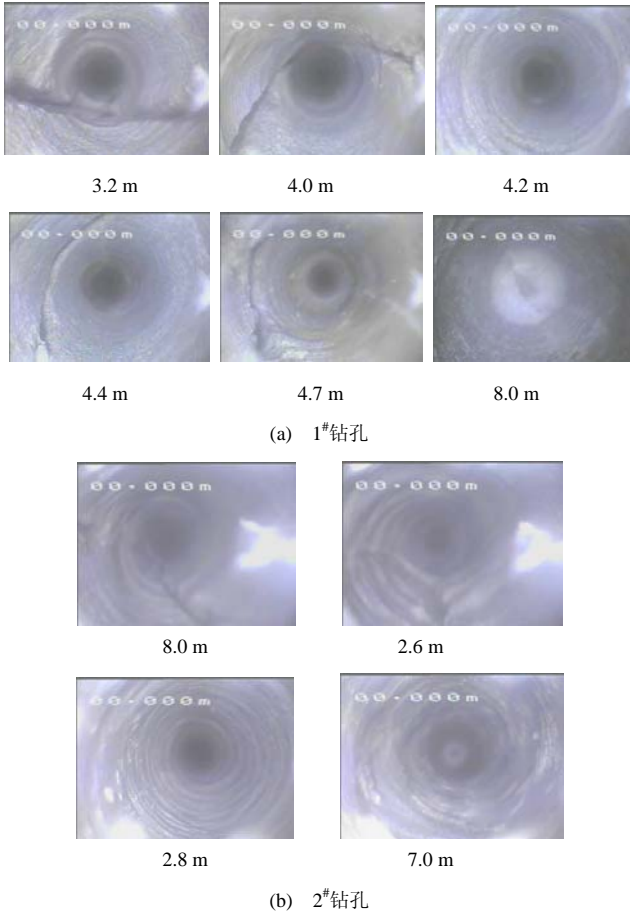


图 4 富水巷道渗流段顶板围岩内部结构

Fig.4 Internal structures of surrounding rocks of enriched-roof roadway in the section of water spraying from roof

由图 4 可知, 富水巷道顶板水渗流呈现如下特征: 1) 围岩内部裂隙较为发育。1#钻孔 3.2~4.0 m, 4.4~4.7 m 和 2#钻孔 2.6~2.8 m 范围存在垂直和平行钻孔横向裂隙, 裂隙平均张开度约为 8 mm。2) 钻孔出水区域较为集中。1#钻孔和 2#钻孔 0~3.2 m 和 0~2.0 m 范围内钻孔中水流量较大, 而 3.2~8.0 m 和 2.0~8.0 m 范围岩层内钻孔内无水渗出。

综上所述: 顶板水渗水水源来自顶板中粒砂岩, 且渗水位置原生裂隙较为发育; 同时, 锚杆(索)孔为顶板水下渗提供了通道。

3 顶板水渗流特征数值计算

富水巷道顶板水-岩石作用属流固耦合问题, 研究此类问题多采用数值计算方法, 而因对试验材料、边界条件较高的要求, 相似模拟方法研究此类问题较少。为此, 本文借助 COMSOL3.5a 多场耦合数值模拟软件, 研究富水巷道顶板水渗流特征, 以期进一步掌握富水巷道顶板水渗流特征, 为该巷道顶板围岩有效控制提供技术思路。

3.1 流固耦合方程的建立

1) 固体变形控制方程

对破碎岩体而言, 岩体中总应力^[15]为

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \phi p \delta_{ij} \quad (1)$$

式中: σ_{ij} 为总应力; σ'_{ij} 为有效应力; ϕ 为破碎岩体的孔隙度; p 为孔隙水压力; δ_{ij} 为 Kronecker 符号。

岩体弹性状态下静力平衡方程为

$$\begin{aligned} -\left(\frac{\partial \sigma'_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma'_{zx}}{\partial z}\right) &= F_x - \phi \frac{\partial p}{\partial x} \\ -\left(\frac{\partial \sigma'_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma'_{zy}}{\partial z}\right) &= F_y - \phi \frac{\partial p}{\partial x} \\ -\left(\frac{\partial \sigma'_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma'_{zz}}{\partial z}\right) &= F_z - \phi \frac{\partial p}{\partial x} \end{aligned} \quad (2)$$

几何变形方程为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3)$$

根据广义胡克定律, 应力应变本构方程为

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (4)$$

式中 i, j 取值为 1, 2, 3。

将几何变形方程式(3)和本构方程式(4)代入平衡方程式(2), 可以得到用位移表示的平衡方程:

$$\begin{aligned} -\left[G\nabla^2 u + \frac{G}{1-2\nu}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z}\right)\right] &= F_x - \alpha \frac{\partial p}{\partial x} \\ -\left[G\nabla^2 v + \frac{G}{1-2\nu}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z}\right)\right] &= F_y - \alpha \frac{\partial p}{\partial x} \\ -\left[G\nabla^2 w + \frac{G}{1-2\nu}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)\right] &= F_z - \alpha \frac{\partial p}{\partial x} \end{aligned} \quad (5)$$

写成张量形式为

$$G\nabla^2 u_i + (\lambda + G)\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial x_i} - \alpha \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_{x_i} = 0 \quad (i=1, 2, 3) \quad (6)$$

式中 λ, G 为拉梅常数:

$$\lambda = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (7)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (8)$$

式(6)为弹性状态下考虑孔隙水压情况下固体变形控制方程。

2) 渗流场基本方程

假设富水巷道顶板水运动服从 Darcy 定律, 孔隙水压力表示的 Darcy 公式为

$$v_i = -\frac{1}{\gamma_w} k \frac{\partial (p + \gamma_w z)}{\partial x_i} \quad (9)$$

式中 k 为介质渗透系数。

Darcy 定律和渗流连续方程仅反映了顶板水渗

流的一般规律，而对于含水岩层，必须考虑边界条件和初始条件，并最终通过求解微分方程，确定水头的时空分布。结合多孔介质有效应力原理，渗流场基本方程为

$$S_{\alpha} \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \left[-\frac{k}{\gamma_w} \nabla (p + \gamma_w z) \right] = Q_s - \phi \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \quad (10)$$

式中 S_{α} 为介质储藏系数。

3) 状态方程

岩体介质渗透系数为非线性，且渗透系数与孔隙率之间满足

$$k = k_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^3 \quad (11)$$

式中 k_0 为介质初始渗透系数张量。

文献[16-17]研究了软弱岩层、含水砂岩单轴抗压强度、变形与含水率的定量关系，见式(12)~(15)。

$$\sigma_c = \sigma_{c0} - A(W - W_1) \quad (12)$$

$$E_c = E_0 - B(W - W_1) \quad (13)$$

$$\sigma_{cz} = 49.83e^{-0.801W} \quad (14)$$

$$E_z = 7.6765e^{-0.578W} \quad (15)$$

式中： σ_c 、 E_c 、 σ_{cz} 、 E_z 分别为直接顶软弱岩层、基本顶含水砂岩单轴抗压强度和弹性模量，MPa； σ_{c0} 、 E_0 分别为岩石干燥状态下直接顶软弱岩层单轴抗压强度和弹性模量，MPa； W 、 W_1 分别为含水率和初始含水率，%； A 、 B 为与岩石性质有关的系数。

由式(7)，(8)可知，拉梅常数 λ ， G 是弹性模量的函数，而富水巷道顶板岩层单轴抗压强度、弹性模量又是含水率的函数，所以拉梅常数 λ ， G 是含水率的函数。

3.2 模型的建立

数值计算模型以梅花井煤矿 4-2 煤及其顶底板条件和图 4 所测结果而建立，模型主要包括直接顶软弱岩层、基本顶含水砂岩、底板岩层、煤层和顶板岩层，其厚度分别为 3.0、6.0、10.0、3.0、28.0 m。模型上表面施加均匀垂直压应力，按照 200 m 上覆岩体自重考虑，模型底部与两边固定且为零流量边界，巷道周边为水头渗流边界。数值计算模型宽×高为 100 m×50 m，巷道断面尺寸宽×高为 4 m×3 m，模型煤岩层物理力学性质参数见表 1。

巷道初始垂直地应力为 5.0 MPa，初始孔隙水压力为 1.0 MPa，利用 COMSOL3.5a 模拟分析富水巷道不同含水及支护阻力状态下顶板位移特征、顶板岩层水流动规律及孔隙水压力变化特征，其中根据巷道顶板是否施工疏水孔、顶板岩层中是否存在

裂隙面、巷道顶板支护强度以及岩石含水率等进行数值计算，具体方案见表 2。

表 1 岩石物理力学性质参数

Table 1 Physico-mechanical properties parameters of rock

岩层名称	弹性模量/GPa	泊松比	岩石密度/(kg·m ⁻³)	初始孔隙度	初始渗透系数/(cm·s ⁻¹)
顶板岩层	15.2	0.28	2 500	0.18	3.0×10 ⁻⁹
含水砂岩	含水率函数	0.25	2 680	0.25	1.9×10 ⁻⁵
软弱岩层	含水率函数	0.28	2 510	0.08	7.5×10 ⁻⁹
煤层	2.8	0.32	1 350	0.20	2.1×10 ⁻⁶
底板岩层	9.6	0.28	2 620	0.18	2.0×10 ⁻¹⁰

表 2 数值分析方案

Table 2 Schemes of numerical analysis

方案	顶板疏水孔	顶板裂隙面	顶板支护强度/MPa	岩石含水率/%	模拟目标
1	无	无	0.2	3.5	顶板岩石不同含水率及支护阻力时，顶板下沉量
				4.0	
				4.5	
				5.0	
				5.5	
2	有	有	无	6.0	顶板水流动规律
				3.5	
3	有	有	无	3.5	孔隙水压力变化规律
4	有	有	0.0	3.5	孔隙水压力变化规律
			0.2		
			0.4		

3.3 结果分析与讨论

1) 顶板水流动特征

工程实践表明，富水巷道顶板水-岩层相互作用下，顶板岩体强度弱化明显^[18]，为了消除或减弱开采过程中诱发的顶板水弱化作用，研究认为可通过减少顶板水-岩层间作用的机会或者避免水侵蚀巷道直接顶软弱岩层。通过对富水巷道顶板水有效疏放，有效改变顶板水的流动规律，是一种行之有效的方法，而顶板水能不能有效疏放？如果能被疏放，顶板钻孔布置的位置如何确定？为此，利用 COMSOL3.5a 模拟分析了富水巷道顶板施工疏水孔、有疏水孔且含水砂岩存在裂隙面和无疏水孔 3 种方案下顶板水的流动特征，见图 5。

由图 5 可知，在孔隙水压力作用下，对应巷道顶板是否布置疏水孔及含水砂岩中是否存在裂隙面，顶板水流动规律呈现如下特征：① 在富水巷道顶板施工疏水孔后，顶板水沿着疏水孔流动，且其流动速度和流量均较顶板无疏水孔时呈几何级增长；② 当富水巷道顶板施工疏水孔且穿过含水

层主裂隙面后,顶板水沿着主裂隙面流动,并通过疏水孔流出,其流动速度和流量较顶板无疏水孔和有疏水孔而没有穿透含水砂岩主裂隙面时增加明显。

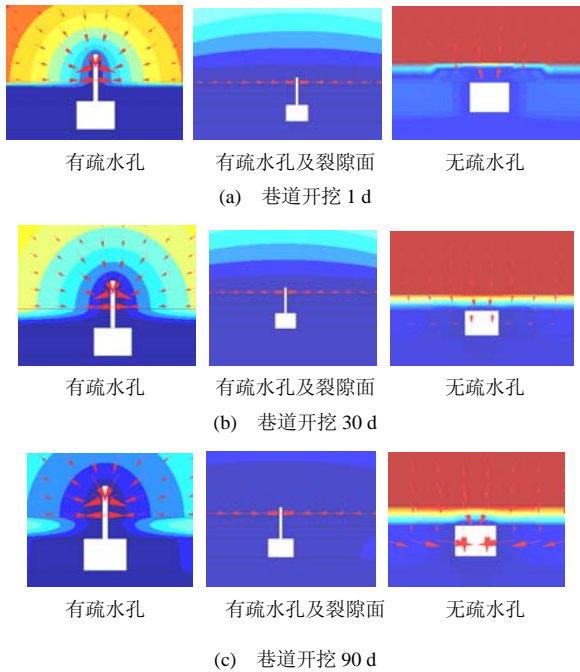


图 5 顶板水流动特征

Fig.5 Flow characterization of roof water

2) 孔隙水压力变化规律

图 6 为富水巷道顶板直接顶软弱岩层与基本顶含水砂岩交界处孔隙水压力随巷道开挖时间变化规律,因模型为左右对称,故取模型左半部分进行研究即可反映整个模型的情况,其中横坐标起始位置为巷道顶板中间处。

由图 6 可知:① 当富水巷道顶板布置疏水孔时,随着巷道开挖时间的变化,孔隙水压力呈现从巷道顶板中心向边界减少趋势,顶板水从边界向巷道开挖自由面和疏水钻孔流动;② 当富水巷道顶板开挖疏水孔且存在主裂隙面时,30.0~50.0 m 范围顶板孔隙水压力在巷道开挖初期即减少为 0,这与孔隙压力值选取在直接顶软弱岩层和基本顶含水砂岩交界面处有关;③ 当富水巷道顶板无疏水孔时,孔隙水压力随着巷道开挖而变化较小,此时顶板水没有发生明显流动。

3) 支护作用下顶板水流动特点分析

富水巷道开挖后,需要进行及时支护,以维护巷道围岩的完整性和提高围岩强度。在一定顶板支护强度和顶板水共同作用下,富水巷道顶板位移见

图 7。

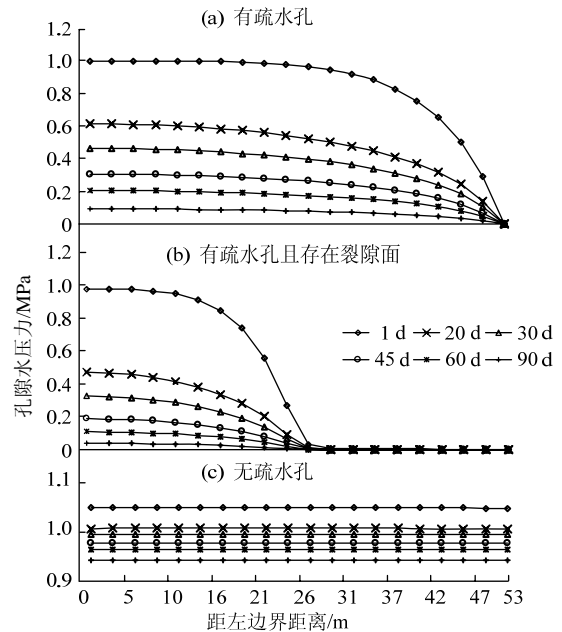


图 6 顶板水孔隙水压力曲线

Fig.6 Curve about pore water pressure of roof water

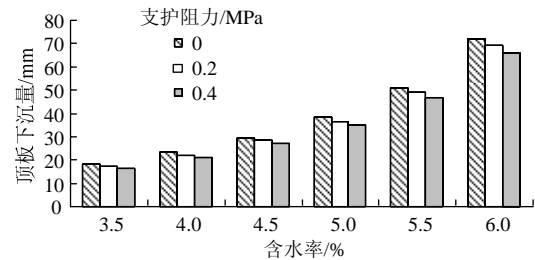


图 7 不同含水状态和支护阻力巷道顶板中间最大下沉量

Fig.7 Maximum roof subsidence of roadway under the condition of different water content and support resistance

由图 7 可知:① 随着含水率的增加,顶板中间位置最大下沉量逐渐增大,当支护阻力为 0 时,含水率从 3.5% 增加至 6.0%,顶板中间位置最大下沉量增加了 295.7%;② 当含水率为 6.0% 时,巷道顶板支护强度从 0 增加至 0.4 MPa,顶板下沉量减少了 8.3%。由此可知,在弹性状态下,富水巷道顶板中间位置最大下沉量与其含水率密切相关,而支护强度对其影响不大。

3.4 顶板水可控性分析

现场钻孔探测和数值计算结果表明,通过在顶板合理布置疏水孔技术参数,可以实现对富水巷道顶板水的控制性疏放,且具有如下几个特点:

1) 富水巷道顶板含水砂岩裂隙较为发育且出水点层位一般位于其底部,顶板水连通性好,这为控制顶板水的流动提供了可能。

2) 巷道顶板疏水孔穿透含水层主裂隙面时,顶板水沿着裂隙面和疏水孔流动,此时的疏放效果较顶板无疏水孔和仅有疏水孔而没有穿透裂隙面更好,这为合理布置疏水孔技术参数提供了依据。

4 工程应用

现场实测和数值计算研究成果表明:富水巷道顶板含水岩层内部裂隙较为发育,且该处为巷道开挖后的顶板主要出水点,支护顶板施工的锚杆、锚索为裂隙水的流动提供了通道;而数值分析结果揭示了顶板水对巷道顶板围岩稳定性具有显著影响,且顶板水具有可控性。为此,基于现场实测和数值分析结果,提出了有控疏水和合理保水技术原理。

有控疏水技术原理是指当富水巷道顶板岩层含水量较大时,影响巷道掘进和锚杆支护,主要体现在钻杆易于被堵塞、淋水量影响树脂药卷及支护构件强度弱化作用,提高锚杆锚固强度。该技术进行应用的关键在于选择合适的施工位置、钻孔长度、钻孔间排距等,并辅以相应的封孔技术。

合理保水技术的原理在于充分利用和调动巷道围岩的自承能力,通过采用一定的技术手段限制顶板水的自由流动,使顶板水以较为稳定的状态赋存于岩层之中,以削弱顶板水渗流引起的岩体强度损伤。主要包括围岩注浆技术、树脂锚杆加长或全长锚固技术、封闭巷道表面围岩技术等。

有控疏水技术和合理保水技术在神华宁煤梅花井煤矿进行了工程应用^[19]。

5 结 论

1) 通过钻孔探测方法,研究了富水巷道顶板水出水位置及其围岩内部裂隙发育规律。

2) 通过 COMSOL3.5a 多场耦合数值计算软件分析了富水巷道顶板水渗流特征,主要包括在顶板无疏水孔、有疏水孔和有疏水孔且穿过顶板岩层裂隙面情况下,顶板水流动特征、孔隙水压力变化规律、顶板支护与顶板水共同作用下顶板水流动特征。

3) 提出了有控疏水和合理保水的基本原理。有控疏水在于减少水对锚固岩体初期支护作用的影响,而合理保水在于减少水对锚固体后期作用的影响,并在现场进行了工程应用。

参考文献:

- [1] 黄伟, 周文斌, 陈鹏. 水-岩化学作用对岩石的力学效应研究[J]. 西部探矿工程, 2006, 117(1): 122-125. HUANG Wei, ZHOU Wenbin, CHEN Peng. The study on mechanical effect of the chemical action of water-rock on rocks[J]. West-China Exploration Engineering, 2006, 117(1): 122-125.
- [2] 沈荣喜, 刘长武, 刘晓斐. 压力水作用下碳质页岩三轴流变特征及模型研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1031-1034. SHEN Rongxi, LIU Changwu, LIU Xiaofei. Triaxial rheology characteristics and model of carbonaceous shale in pressure water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 1031-1034.
- [3] 费晓东, 董正筑, 李玉寿, 等. 动态孔隙水作用下砂岩力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(3): 425-428. FEI Xiaodong, DONG Zhengzhu, LI Yushou, et al. Experimental study of mechanical properties of sands under a dynamic pore pressure[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(3): 425-428.
- [4] 郭富利, 张顶立, 苏洁, 等. 地下水和围压对软岩力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2324-2332. GUO Fuli, ZHANG Dingli, SU Jie, et al. Experimental study on influences of groundwater and confining pressure on mechanical behaviors of soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2324-2332.
- [5] 刘建, 乔丽苹, 李鹏. 砂岩弹塑性力学特性的水物理化学作用效应-试验研究与本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 20-29. LIU Jian, QIAO Liping, LI Peng. Experimental studies and constitutive mode of elastoplastic mechanical behaviors of sandstones with hydro-physicochemical influencing effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 20-29.
- [6] 陈四利, 冯夏庭, 李邵军. 岩石单轴抗压强度与破裂特征的化学腐蚀效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 547-551. CHEN Sili, FENG Xiating, LI Shaojun. Effects of chemical erosion on uniaxial compressive strength and meso-fracturing behaviors of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 547-551.
- [7] YAO Qiangling, LI Xuehua, ZHOU Jian, et al. Experimental study of strength characteristics of coal specimens after water intrusion[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(9): 6779-6789.
- [8] 伊茂森, 朱卫兵, 李林, 等. 补连塔煤矿四盘区顶板

- 突水机理及防治[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3): 241-245.
- YI Maosen, ZHU Weibing, LI Lin, et al. Water-inrush mechanism and prevention for fourth panel roof in Bulianta coalmine[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 241-245.
- [9] 景继东, 施龙青, 李子林, 等. 华丰煤矿顶板突水机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(5): 642-647.
- JING Jidong, SHI Longqing, LI Zilin, et al. Mechanism of water-inrush from roof in Huafeng mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(5): 642-647.
- [10] 姚强岭, 李兴华, 瞿群迪. 富水煤层巷道顶板失稳机理与围岩控制技术研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 12-17.
- YAO Qiangling, LI Xuehua, QU Qundi. Instability mechanism and technique of surrounding rock control of water-enriched roofs of coal drifts[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 12-17.
- [11] 曾佑富, 伍永平, 来兴平, 等. 复杂条件下大断面巷道顶板冒落失稳分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 423-427.
- ZENG Youfu, WU Yongping, LAI Xingping, et al. Analysis of roof caving instability mechanism of large-section roadway under complex conditions[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(4): 423-427.
- [12] 勾攀峰, 陈启永, 张盛. 钻孔淋水对树脂锚杆锚固力的影响分析[J]. 煤炭学报, 2004, 29(6): 680-683.
- GOU Panfeng, CHEN Qiyong, ZHANG Sheng. Influence analysis of the anchor-hold of the resin bolt by the draining water in the drill hole[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(6): 680-683.
- [13] 薛亚东, 黄宏伟. 锚索锚固力影响因素的试验分析研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1523-1526.
- XUE Yadong, HUANG Hongwei. Experimental study on affect factors on anchoring force of cable bolts[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1523-1526.
- [14] 高明仕, 张农, 张连福, 等. 伪硬顶高地压水患巷道围岩综合控制技术及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3996-4002.
- GAO Mingshi, ZHANG Nong, ZHANG Lianfu, et al. Synthetical control technique and engineering application to roadway with false-hard roof high surrounding pressure and water disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3996-4002.
- [15] 张玉军. 考虑水-应力耦合作用的地下洞室的锚杆支护效果[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2683-2688.
- ZHANG Yujun. Effects of supporting for underground opening considering coupled hydro-mechanical action [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2683-2688.
- [16] 陈占清, 李顺才, 浦海, 等. 采动岩体蠕变与渗流耦合动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 263-264.
- [17] 康红普. 水对岩石的损伤[J]. 水文地质工程地质, 1994(3): 39-40.
- KANG Hongpu. The damage of rocks by water[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1994(3): 39-40.
- [18] 姚强岭. 富水巷道顶板强度弱化机理及其控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- [19] 姚强岭, 李兴华, 陈庆峰. 含水砂岩顶板巷道失稳破坏特征及分类研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(1): 50-56.
- YAO Qiangling, LI Xuehua, CHEN Qingfeng. Research on the characteristics and classification of water-enriched sandstone roofs[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(1): 50-56.