

矿井底板突水的水力劈裂研究

谢兴华¹, 速宝玉², 高延法³, 段祥宝¹

(1. 南京水利科学研究所 水工所, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210098;
3. 山东科技大学 资源环境与工程学院, 山东 青岛 266510)

摘要: 矿井承压水上采煤底板突水问题是一个困难的问题。困难之处就在于影响因素太多, 而且由于矿井条件的不同, 难以找到统一的处理模式。从水力劈裂的机理入手, 通过分析工作面推进过程中采场及采空区底板力学条件变化导致的渗透性改变, 来推断底板突水的危险程度。在分析过程中, 引入了损伤的概念。损伤被用来描述采场底板的破坏程度(结构演变情况), 底板岩体的破坏直接导致底板渗透性的改变; 渗透性的改变为承压水提供了通路, 增加了底板突水的可能性。针对正交各向异性岩体建立了渗透系数与损伤变量的函数关系, 以此描述底板破坏对渗透性的影响。针对具体的算例, 得到了矿井底板突水的危险位置。

关键词: 采矿工程; 水力劈裂; 矿井底板突水; 数值方法; 损伤; 渗流应力耦合

中图分类号: TD 313

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)06-0987-07

NUMERICAL STUDY ON WATER INRUSH ABOVE A CONFINED AQUIFER IN COAL MINING USING HYDRO-FRACTURING

XIE Xing-hua¹, SU Bao-yu², GAO Yan-fa³, Duan Xiang-bao¹

(1. Department of Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. College of Natural Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology,
Qingdao 266510, China)

Abstracts: It is a big diffusion for the mechanics of water inrush in coal mining that is above a confined aquifer. because there are many influencing factors. The situation differs greatly in various coal mining districts, and it is difficult to find a uniform model to solve the problem. In this paper, based on rock hydraulic fracture mechanism and its penetrability alteration, the base plate's stress state changing was studied. All of those would increase the possibility of water inrush. Aimed at a case of study, a water inrush danger location was presented and the concept was introduced. Damage parameters are used to describe the degree of rock damage, i.e., the rock structure evolution. The rock damage would induce the change of the penetrability. It was important for water inrush forecasting in mining works because the changes of base plate penetrability would make ways for the water form confined aquifer. Based on perpendicular anisotropic rock to upbuild the relation function between permeability coefficient and damage parameter, which was used to deduce the permeability change with base plate damage, the results of the numerical computing show that it agrees well with the real case.

Key words: mining engineering; hydro-fracturing; mining water inrush; numerical method; damage; seepage and stress coupling

收稿日期: 2003-01-26; **修回日期:** 2003-04-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50239070); 国家自然科学基金资助项目(50174035); 南京水利科学研究所青年科学基金项目(Y10402)

作者简介: 谢兴华(1971-), 男, 博士, 1995年毕业于山东矿业学院, 主要从事岩土工程渗流与控制以及岩石水力学方面的研究工作。E-mail: iamxiexh@163.com.

1 引言

矿井底板突水一直是威胁矿井安全生产的重大问题。特别是近些年来, 矿井开采深度已达千米, 这样矿井突水问题就显得更加突出。“堵”和“排”是目前解决矿井水问题的两大措施。“堵”, 就是预先注浆, 设置防水帷幕, 也就是在有可能突水的区域大范围预注黄泥浆或水泥浆, 达到堵住水源的目的。“排”, 就是突水以后, 向地面排水。在矿井开采实践中, 这两项措施起到了很好的作用。

矿井底板突水的数值预报工作, 一直是困扰矿业科研工作者和工程师的难题, 至今没有一种成熟实用的方法。关于矿井底板突水的机理, 作者同意文[1]的观点: 采掘工程底板突水不是单纯的水文学问题、也不是单纯的岩体力学问题, 而是在人为采掘活动的诱发下, 围岩岩性、结构(断层和裂缝)和地质环境(区域构造场、渗流场、温度场、水理作用场等)综合作用的结果。因此, 数值方法预报底板突水, 就要尽可能地综合考虑多物理场的相互作用。

劈裂是指局部裂缝的扩展, 它以应力集中为特征。在劈裂发生时, 往往是结构的整体并未达到屈服或破坏的条件, 而在结构的局部发生了应力集中现象, 使材料破坏, 并且沿着破坏区域继续发生应力集中, 导致裂缝扩展。

水力劈裂是指在水压力作用下, 导致固体结构的劈裂破坏。水压力作用造成的劈裂与其他力学作用造成的劈裂不同, 由于水的流动性, 当新裂缝出现时, 立刻被水充满, 并且将水压力传递到裂缝面上, 使得固体结构的应力集中现象更显著^[2]。

2 研究现状

关于煤矿开采底板变形与破坏的研究, 起初主要基于材料力学与弹性力学理论以及相似材料试验。M. 鲍莱茨基等提出了几个基本概念: 底板开裂、底鼓、底板断裂和大块底板突起。 . . . 多尔恰尼诺夫等认为, 在高应力作用下(如深部开采), 岩体或支承压力区出现渐进的脆性破坏, 其破坏形式是裂缝逐渐扩展并发生沿裂缝的剥离和掉块, 从而为底板高压水突入矿井创造了条件。B. . . 斯列萨列夫最早按照梁的强度理论, 计算得出了底板抗静水压力的理论最小安全厚度, 并一直被作为煤矿防治水设计的主要依据。山东矿业学院李白英、沈光寒、

荆自刚教授通过大量的测试和研究, 提出了底板破坏的“下三带”概念, 即采动底板破坏带(h1)、完整岩层带(h2)和原始导高带(h3), 并得出了底板破坏深度与采面斜长之间的线性关系, 代表了底板变形理论研究的新成果。20世纪80年代末和90年代初以来, 科研及生产部门更侧重于底板问题的模拟和探测技术研究: 文[3]通过相似材料模拟试验分析了工作面生产过程中煤层底板应力分布规律; 桂和荣等对不同倾角煤层开采后围岩应力和移动规律进行了数值模拟及比较, 所提出的数值模拟技术在防水煤(岩)柱的合理留设、最大导高及支承压力带宽度的合理确定等方面得到了较广泛的应用; 张大顺、郑世书教授在底板突水预测中首次引入地理信息系统; 王经明高工率先开发了煤层底板突水的智能化监测技术, 对减少矿井突水危害很有意义; 文[4]基于尖点灾变模型, 提出了底板突水与否的判据; 文[5]将优势面理论引入底板突水的研究, 提出“突水优势面的概念”, 重视采场底板的地质条件, 对底板突水的研究具有指导意义。

水力劈裂是裂缝岩体渗流-应力耦合研究的一个方面, 反映的是在渗透水压力作用下岩体的力学响应及结构变化, 它是许多岩体工程(水工建筑物稳定性、石油开采、矿井突水防治、核废料地下处置、地下污染物运移、地下干热岩体热能开发等)的基础性理论研究, 具有重要的理论和工程意义。水力劈裂自1947年在美国首次试验成功后, 作为油气井增产的主要技术措施已经广泛应用于现代石油工业中, 这方面的研究比较多, 文[6~9]作了综述研究, 其中应用较早、技术也比较成熟的是用于原位地应力测量。在国内, 这方面的研究论文出现较早, 数量也比较多^[10~17]。水压致裂法地应力测量的基本假设是: 岩石是脆性、线弹性、均质和各向同性及非渗透性的, 而且作用于岩层的一个主应力方向与钻孔轴平行。文[18]研究后认为, 上述的水压致裂测量地应力的方法仅适用于地下500m以内的地应力测量。超过这一深度后张性破裂理论就暴露了局限性与不完全性。当深度大于500m时, 岩石先发生剪切破裂, 然后才受拉破坏。

水力劈裂通常被认为是地下注浆工程的核心问题^[19, 20]。地下注浆工程多用于建筑地基的增强处理、水电工程中建造的防水帷幕、矿山注浆治理矿井突水事故及井下巷道围岩支护等领域。水力劈裂也是推进涉及到地下流体的环境保护工程研究的有效方法^[21], 水力劈裂造成的裂缝空间为岩石水化

学反应提供了场所，也是污染质运移的通道^[22]。水力劈裂理论还被用来研究火成岩的侵入过程^[23-25]。在岩体工程稳定性研究中还未见考虑水力劈裂影响的相关报道。

本文基于水力劈裂的基本理论与方法，研究承压水对底板岩层的力学作用以及破坏，试图模拟随工作面推进，底板岩层的变形破坏以及渗流水头场的发展，从而提供底板突水与否的趋势，帮助工程师判断是否采取防水的紧急措施。

3 水力劈裂研究的基本理论

水力劈裂问题的数值模拟，需要解决以下几个基本问题：水的作用方式、开裂的起始点、裂缝的扩展以及水的渗透与裂缝开裂的耦合关系。本文基于稳定流场渗流应力耦合基本原理，引入损伤变量描述岩体的内部结构演变，并在损伤变量和渗透系数之间建立关系，使得渗透系数随岩体结构演化，交叉叠代，从而进行岩体水力劈裂计算。

3.1 水力劈裂的控制方程

为推导方便，以单裂缝水力劈裂为例进行研究。岩体中的水压力不仅作用在岩体骨架上，还使得水在岩体中渗流。所以在这一过程中，水的压力势能同时对岩体骨架和水做功，总功 W_z 转化为对岩体骨架做功 W_r 和水流动的动能 W_w ，即

$$W_z = W_r + W_w \tag{1}$$

下面分别推导这三部分能量的计算式：

(1) 水的压力势能做功 W_z

孔隙水压力 u (单位为 MPa) 表示单位面积上承受的力。假设孔隙全部充满水且连通，单位体积岩体 dV 中所含的水的压力势能做功 W_z 为

$$W_z = (u + \gamma z)dV \tag{2}$$

式中： z 为位置水头， γ 为水的容重。

(2) 对岩体骨架做功 W_r

在孔隙水压力 u 的作用下，岩体骨架的主应变为 $\varepsilon_i (i = 1, 2, 3)$ ，对应的主应力为 $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$ 。单位体积固体的变形能分为应变能和裂缝扩展所需的能量。裂缝扩展是有阈值的，达到阈值之前，裂缝不扩展，达到阈值后裂缝扩展。在线弹性假设之下，裂缝扩展之前能量以弹性应变能的形式存在；开始扩展之后，能量全部用于裂缝扩展，这一过程称为能量释放。对岩体骨架做功 W_r 为

$$W_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sigma_i \varepsilon_i dV \tag{3}$$

(3) 水流动的动能 W_w

水在岩体中流动，具有一定的流速，按单位体积考虑，则水流动的动能 W_w 为

$$W_w = \frac{1}{2} m v^2 \tag{4}$$

式中： m ， v 分别为单位体积岩石中水的质量和水的流速，且有

$$m = n\rho dV \tag{5}$$

$$v = K \frac{\partial h}{\partial x} = K \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{\gamma} \right) = \frac{K}{\gamma} \frac{\partial u}{\partial x} \tag{6}$$

式中： n 为岩体孔隙率， x 为离开裂缝壁的距离。

将式(5)，(6)代入式(4)，得

$$W_w = \frac{1}{2} n\rho \left(\frac{K}{\gamma} \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 dV \tag{7}$$

因此，根据式(1)，(2)和(7)，有

$$(u + \gamma z)dV = W_r + \frac{1}{2} n\rho \left(\frac{K}{\gamma} \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 dV \tag{8}$$

式(8)为单裂缝扩展的控制方程，适用于裂缝，也适用于岩体内部。在岩体内部时，将水压力 u 换为岩体内部的等效渗透水头即可。在低渗透岩体中形成宏观裂缝之前流速很小，动能 W_w 项一般被忽略。但是在临近破坏时，岩体中形成宏观裂缝，渗流量明显增大，这时如果仍然忽略动能项就会导致计算裂缝扩展量变大。

3.2 能量释放率的引入

式(8)中右边第一项为对岩体骨架做功 W_r ，假设这一部分能量全部用于裂缝开裂，裂缝扩展的面积为 A ，那么能量释放率 G 为

$$G = \frac{W_r}{A} \tag{9}$$

考虑式(8)，则有

$$G = \frac{1}{A} \left[(u + \gamma z) - \frac{1}{2} n\rho \left(\frac{K}{\gamma} \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 dV \right] \tag{10}$$

假如 $G < G_{lc}$ (G_{lc} 为岩石临界能量释放率，由试验获得)，则裂缝不扩展，否则裂缝扩展。式(10)可以作为裂缝扩展与否的判据，其中包含了渗流的作用。

3.3 损伤变量及演化方程

试验表明，混凝土材料在单轴压缩时的损伤是张应力引起的，损伤方向与载荷方向正交。这说明混凝土的损伤是各向异性或正交各向异性的^[26]。坚硬岩石材料与混凝土材料性质相似，可以认为岩石材料的损伤是正交各向异性的。在主应力空间，假定应力主轴、应变主轴和损伤主轴互相重合，材料初始状态是各向同性线弹性体，损伤后表现出正交各向异性性质。在此假定下，损伤张量 D 和应力张量 σ 均为二阶张量，设 3 个主损伤分量为 D_1, D_2, D_3 ，则有

$$D_1 = \frac{1}{2} \left(\left\langle \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_c} \right\rangle^m + \left\langle \nu \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_c} \right\rangle^m + \left\langle \nu \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_c} \right\rangle^m \right) \quad (11a)$$

$$D_2 = \frac{1}{2} \left(\left\langle \nu \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_c} \right\rangle^m + \left\langle \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_c} \right\rangle^m + \left\langle \nu \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_c} \right\rangle^m \right) \quad (11b)$$

$$D_3 = \frac{1}{2} \left(\left\langle \nu \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_c} \right\rangle^m + \left\langle \nu \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_c} \right\rangle^m + \left\langle \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_c} \right\rangle^m \right) \quad (11c)$$

式中： ε_c 为容许拉应变； m 为脆性因子； ν 为泊松比； $\langle x \rangle$ 为计算符号，取值方法为

$$\langle x \rangle = \begin{cases} 0 & (x \geq 0) \\ -x & (x < 0) \end{cases} \quad (12)$$

从岩石试件的单轴压缩试验观察到，试件破坏的方向大体与压应力方向一致，这可从式(11)推得 $D_2 = D_3 > D_1$ (ε_1 为压应变)。另外， ε_1 方向也有损伤。这是因为，当微裂缝出现后，微裂缝的方向并不完全是破坏时的宏观裂缝方向，初始微裂缝的方向存在一定的随机性，这也正是 D_1 的含义。在数量上， D_1 远远小于 D_2 和 D_3 。

3.4 渗透系数与损伤变量的关系

将损伤引入渗流应力耦合研究具有重要意义，因为损伤描述的是材料内部的缺陷演化情况，而水在岩石体内渗流的通道就是岩体内的孔隙、裂缝等缺陷。在渗透系数与损伤变量之间建立合适的关系，对于渗流应力耦合及水力劈裂研究都有积极意义。因为损伤理论在连续介质理论之下具有完善的理论推导，而渗透系数却是在非连续介质意义下的参量。因此建立其关系的最大意义就在于，可以在连续介质理论之下研究岩体的渗透性问题，也就是将渗透性在理论上纳入连续介质的范畴^[27]，在裂缝统计的基础上，研究损伤变量与渗透系数的关系。这一研究基于统计力学，还没有将其引入连续介质范畴。后来的研究就朝着这一方向发展，文[28, 29]

研究了试块在变形过程中渗透性与应变的关系，并且提到了损伤研究渗透性的问题。

复杂应力状态下岩石类材料的破坏形式多为拉、剪破坏，其损伤的研究也应当分别讨论。当岩石单元的应力状态或者应变状态满足某个给定的损伤阈值时，单元开始损伤。其一，当单元的最小主应变(最大拉主应变)达到其抗拉强度(应变强度)时，开始发生拉伸损伤；其二，当单元的应力状态满足莫尔-库仑准则时，该单元发生剪切损伤。

文[29, 30]根据 Biot 三维固结理论，建立了渗流与应力-应变耦合方程，即

$$K_{ij}(\sigma, p) = K_0 e^{-a \left(\frac{\sigma_{ii}/3 - p}{H} \right)} \quad (13)$$

式中： $\sigma_{ii}/3$ 为平均总应力，且 $\sigma_{ii} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ； p 为孔隙水压力； $1/H$ 度量了由于水压力变化引起的介质整体体积的变化，是水充分排出时，排出的水量与介质体积应变之比； a 为水充分排出时排出的水量与介质体积应变之比； a 为耦合参数，表征应力-应变对渗透系数的影响程度，可由试验确定。

参考式(14)，建立损伤与渗透系数的关系为

$$K_{ij}(D) = \frac{K_{ij}^0}{(1 - D_{ij})^\beta} \quad (14)$$

式中： K_{ij}^0 为损伤前渗透系数张量； D_{ij} 为损伤张量； β 为敏感系数，本文取 $\beta = 4$ 。

渗透系数 K 与损伤变量 D 的关系曲线如图 1 所示。

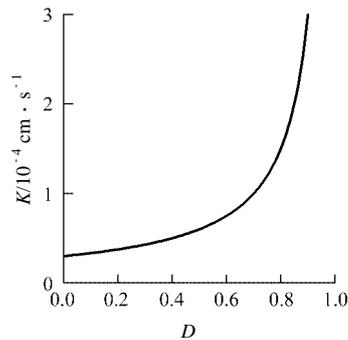


图 1 渗透系数 K 与损伤变量 D 的关系曲线 ($\beta = 1$)

Fig.1 The relationship curve between K and D ($\beta = 1$)

4 算例

4.1 算例的基本描述

某工作面在承压水上采煤，前进方向有一急倾斜断层带，为导水的薄弱带。煤层埋深 600 m，近水平赋存。从煤层底板到承压水顶面垂深 90 m。工作面距断层较远时，开采对断层的扰动较小。随工作面推进，开采扰动越来越大。为研究工作面接近

断层带时工作面的渗流变化情况, 取断层附近一段工作面走向长度 300 m, 计算域厚度 10 m, 作假三维模拟。工作面走向剖面如图 2 所示。

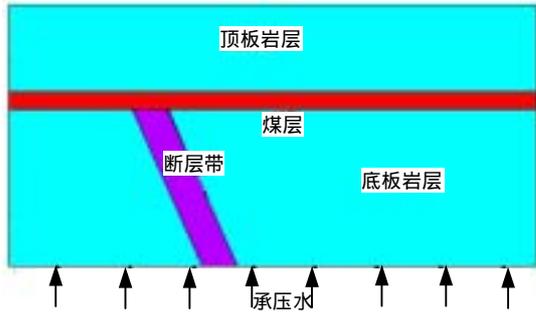


图 2 工作面走向剖面图

Fig.2 The section plane of district in strike

4.2 计算方案

本例计算模拟随工作面推进, 底板岩层在底部承压水作用下, 特别是断层带附近的损伤演化及其对渗流场的影响。首先计算工作面没有开采时的原始应力场和水头场。然后用分步开挖来近似模拟工作面的推进。第一步开挖 30 m, 以后每步开挖 20 m, 直到推过断层带, 共 12 步。

边界条件: 将顶板覆岩的重量作为等效均匀面力作用于计算域顶板, 计算域四周为位移约束。底面受均匀水压力(面力), 且为已知水头边界, 煤层两端为已知水头(位置高程), 其他边界为不透水边界。

4.3 计算结果及分析

图 3~5 为将岩层计算参数(表 1)与网格数据输入自编程序 Hydrofrac.F90 进行计算, 得到的几个代表位置的损伤场和渗流场。

由图 3~5 可见, 在基岩内部, 采空区中部正下方损伤比较集中, 但损伤度并不大, 不足以引起基岩损伤突水。直到工作面推进 230 m 后(图 5), 断层带接近处于采空区下方, 在断层带内损伤集中, 损伤度也较大。这说明导致开采工作面突水的重要因素是断层带的强导水性, 而不是底板的损伤。

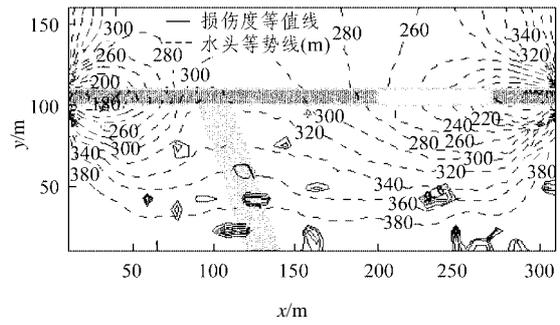


图 3 工作面推进 70 m 后的损伤场及渗流场

Fig.3 The damage and seepage fields for working face 70 m

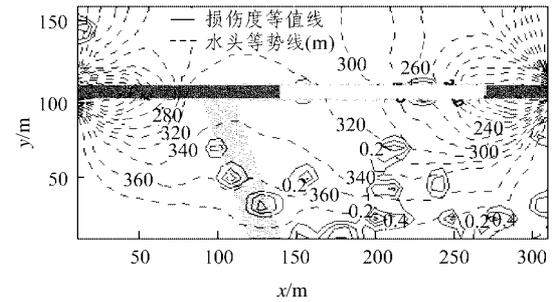


图 4 工作面推进 130 m 后的损伤场及渗流场

Fig.4 The damage and seepage fields for working face 130 m

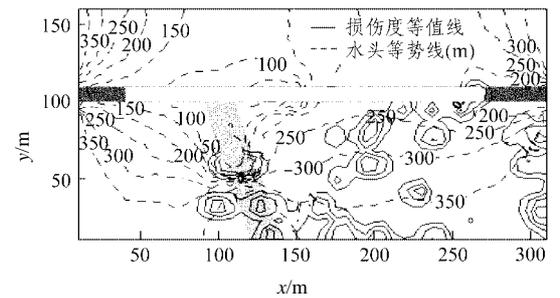


图 5 工作面推进 230 m 后的损伤场及渗流场

Fig.5 The damage and seepage fields for working face 230 m

从图 6 及表 2 可见, 在工作面推进 130 m 之前, 工作面上水头随工作面推进逐渐增大。工作面推过 130 m 后, 工作面上水头变化较大, 很不稳定。从图 5 可见, 工作面推进 130 m 的位置为接近断层带, 工作面推进 150 m 时的位置几乎正好在断层带上, 工作面上水头降低。然而, 在工作面稍后方的采空区内出现低水头。这说明在此处出现涌水, 导

表 1 岩层计算参数

Table 1 Computing parameters for rock mass

岩层	弹模/MPa	泊松比	初始损伤	拉应变极限值/ 10^{-5}	压应变极限值/ 10^{-4}	脆性因子	粘聚力/ 10^{-5} MPa	内摩擦系数	G_{ic} / 10^6 N·m $^{-1}$	渗透系数/ 10^{-10} m·s $^{-1}$		
										K_x	K_y	K_z
基岩	3 270	0.167	0.0	6.10	9.8	3	5	0.194	61.0	0.01	0.09	0.01
断层带	227	0.400	0.0	9.25	27.3	3	2	0.300	9.7	2.00	0.09	2.00
煤层	327	0.300	0.0	6.12	5.5	3	3	0.300	6.1	0.50	0.09	0.50

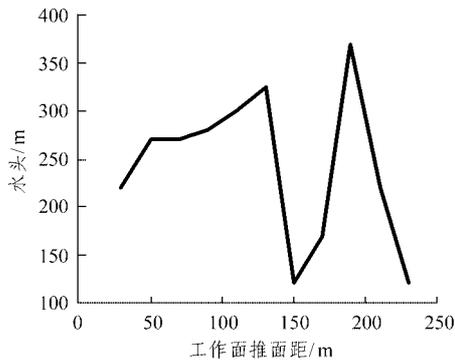


图 6 随工作面推进工作面上水头变化

Fig.6 The water pressure change in working face

表 2 工作面处水头值

Table 2 The water heads at working face

开挖步	推进长度 /m	工作面水头/m	开挖步	推进长度 /m	工作面水头/m
0	0	0	6	130	325
1	30	220	7	150	120
2	50	270	8	170	170
3	70	270	9	190	370
4	90	280	10	210	220
5	110	300	11	230	120

致水头降低。工作面推进 170 m 后，工作面处于断层带正上方，在整个采空区范围内为低水头带。也就是说整个采空长度都是可能出水的地带。再往前推进，水头有所起伏，但在断层带附近的采空区仍然是低水头带，即出水的危险地带。因此对于本算例，工作面推进 130 m 是矿井底板突水的危险位置。

5 结论与讨论

矿井底板突水是一个复杂的问题，本文的工作只是一种尝试，并且基于一些假设，比如：假设底板岩层为各向同性(或横观各向同性)，不考虑原岩应力场。本文算例研究的是最简单的水平煤层情况，对于断层的处理也作了简化。

尽管如此，本文引入渗流应力耦合及水力劈裂概念研究承压水上采煤底板突水问题，仍然得到了有意义的结论，即随着工作面推进，采场底板受力作用发生损伤，损伤部位集中在采空区中部的下方；引起矿井底板突水的最主要因素是断层带等强导水带，矿井底板突水的危险位置为接近强导水带处。工作面接近强导水带的程度取决于具体的岩层条件。在本文算例条件下，矿井底板突水的危险位置

为距强导水带约 30 m 处。

矿井底板突水是一个十分复杂的问题，采用一种方法针对某一个方面进行研究，总是难免有些片面。因此，研究矿井底板突水问题一定要针对具体的矿井地质、开采条件，尽量减少假设，只有这样才能接近真实情况。用水力劈裂研究矿井底板突水是一种尝试，从物理本质上讲本文的研究路线是可行的，对其机理的探索还要从试验入手多做些工作。

参考文献(References) :

[1] 桂和荣,孙本魁. “深部开采底板突水控制论”研究意义及核心内容[J]. 淮南工业学院学报, 1999, 19(3) : 1-4.(Gui Herong, Sun Benkui. Study meaning and the core content of the control theory about water in rush from bed bottom in deep mining[J]. Journal of Huainan Institute of Technology, 1999, 19(3) : 1-4.(in Chinese))

[2] Wang J A, Park H D. Coal mining above a confined aquifer[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences ,2003, 40 : 537-551.

[3] 黎良杰,钱鸣高,殷有泉. 采场底板突水相似材料模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(1) : 33-36.(Li Liangjie, Qian Minggao, Yin Youquan. Research on the tests of water-inrush from floor simulated by similar materials[J]. Coal Mining Geology and Prospecting, 1997, 25(1) : 33-36.(in Chinese))

[4] 王连国,宋扬. 煤层底板突水突变模型[J]. 工程地质学报, 2000, 8(2) :160-163.(Wang Lianguo, Song Yang. A catastrophic model of water-inrush from coal floor[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(2) : 160-163.(in Chinese))

[5] 高延法,施龙青,娄华君等. 底板突水规律与突水优势面[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.(Gao Yanfa, Shi Longqing, Lou Huajun, ed al. Law of Mining Floor Water-inrush and Its Preferred Plane[M]. Xuzhou : China University of Mining and Technology Press, 1999.(in Chinese))

[6] Gidley J L, Holditch S A, Nierode D E, et al. Recent advances in hydraulic fracture[J]. Society Petroleum Engineering Monograph, 1989, 452 : 119-204

[7] Veatch R W. Overview of current hydraulic fracture design and treatment technology—part 1[J]. J. Pet. Technol., 1983, (3) : 677-687.

[8] Veatch R W. Overview of current hydraulic fracture design and treatment technology—part 2[J]. J. Pet. Technol., 1983, (4) : 853-863.

[9] Murdoch L C, Slack W W. Forms of hydraulic fractures in shallow fine-grained formations[J]. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2002, 128(6) : 479-487.

[10] 王建军. 应用水压致裂法测量三维地应力的几个问题[J]. 岩石力

- 学与工程学报, 2000, 19(2): 229–233.(Wang Jianjun. Several problems in application of hydraulic fracturing method to in-situ 3D stress measurement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 229–233.(in Chinese))
- [11] 陈群策, 安美建, 李方全. 水压致裂法三维地应力测量的理论探讨[J]. 地质力学学报, 1998, 4(1): 37–43.(Chen Qunce, An Meijian, Li Fangquan. Theoretical discussion on 3D hydraulic fracturing in situ stress measurement[J]. Journal of Geomechanics, 1998, 4(1): 37–43.(in Chinese))
- [12] 刘允芳. 水压致裂法三维地应力测量[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(3): 246–256.(Liu Yunfang. In-situ 3-dimensional stress measurements by hydraulic fracturing technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(3): 246–256.(in Chinese))
- [13] 刘允芳, 罗超文, 景 锋. 水压致裂法三维地应力测量及其修正和工程应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 465–470.(Liu Yunfang, Luo Chaowen, Jing Feng. 3D geostress measurement by hydrofracturing technique and its engineering application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4): 465–470.(in Chinese))
- [14] 刘允芳, 钟作武, 汪 洁. 水压致裂法三维地应力测量成果计算与分析的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 833–838.(Liu Yunfang, Zhong Zuowu, Wang Jie. Interpretation of 3-dimensional geostress results measured by hydraulic fracturing technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 833–838.(in Chinese))
- [15] 郭启良, 安其美, 赵仕广. 水压致裂应力测量在广州抽水蓄能电站设计中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 828–832.(Guo Qiliang, An Qimei, Zhao Shiguang. Application of hydraulic fracturing test in the design of Guangzhou pump storage project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 828–832.(in Chinese))
- [16] Ito T, Evans K, Kawai K, et al. Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1999, 36: 811–826.
- [17] Klee G, Rummel F, Williams A. Hydraulic fracturing stress measurement in Hong Kong[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1999, 36: 731–741.
- [18] 李自强. 水压致裂法地下绝对应力测量[A]. 见: 中国诱发地震[C]. 北京: 地震出版社, 1984. 61–68.(Li Ziqiang. Hydraulic fracturing method to in-situ stress measurement[A]. In: China Induced Earthquake[C]. Beijing: Earthquake Press, 1984. 61–68.(in Chinese))
- [19] Morgenstern N R, Vaughan P R. Some observations on allowable grouting pressures[A]. In: Proc. Conf. Grouts and Drill[C]. London: Muds, Institute of Civil Engineering, 1963. 36–42.
- [20] Wong H Y, Farmer I W. Hydro-fracture mechanisms in rock during pressure grouting[J]. Rock Mech., 1973, (5): 21–41.
- [21] Murdoch, L C. Forms of hydraulic fractures created during a field test in fine-grained glacial drift[J]. Q. J. Eng. Geol., 1995, 28: 23–35.
- [22] Murdoch L C. Remediation of organic chemicals in the vadose zone[A]. In: Looney B B, Falta R W ed. Vadose zone, Science and Technology Solutions[C]. [s. l.]: [s. n.], 2000. 949–1 237.
- [23] Pollard D D. Derivation and evaluation of a mechanical model for sheet intrusions[J]. Tectonophysics, 1973, 19: 233–269.
- [24] Pollard D D. Forms of hydraulic fractures as deduced from field studies of sheet intrusions[A]. In: Kim Y S ed. United States Symposium of Rock Mechanics[C]. Reno, Nev.: Univ. of Nevada, 1978. 1–9.
- [25] Pollard D D, Johnson A M. Mechanics of growth of some laccolithic intrusions in the Henry mountains[J]. Tectonophysics, 1973, 18: 311–354.
- [26] 余天庆, 钱济成. 损伤理论及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994. 109–114.(Yu Tianqing, Qian Jicheng. Damage Theory and Its Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1994. 109–114.(in Chinese))
- [27] 朱珍德. 裂缝岩体损伤流变模型研究及其应用[R]. 成都: 四川大学, 1999.(Zhu Zhende. A study on damage and rheological model of rock mass and its application[R]. Chengdu: Sichuan University, 1999.(in Chinese))
- [28] 朱珍德, 张爱军, 徐卫亚. 脆性岩石全应力-应变过程渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 556–563.(Zhu Zhende, Zhang Aijun, Xu Weiya. Experimental research on complete stress-strain process seepage characteristics of brittle rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 556–563.(in Chinese))
- [29] 杨天鸿, 唐春安, 朱万成等. 岩石破裂过程渗流与应力耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 489–493.(Yang Tianhong, Tang Chun'an, Zhu Wancheng, et al. Coupling analysis of seepage and stresses in rock failure process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 489–493.(in Chinese))
- [30] 李连崇, 杨天鸿, 唐春安等. 岩石水压致裂问题的耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1 060–1 066.(Li Lianchong, Yang Tianhong, Tang Chun'an, et al. Coupling analysis on hydraulic fracturing process of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1 060–1 066.(in Chinese))