

基于裂纹扩展的含隐伏断层底板突水评价

胡新宇^{1,2}, 王连国^{1,2}, 陆银龙², 喻梅¹

1. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 徐州 221116

2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 徐州 221008

摘要 为研究承压水上开采时含隐伏断层底板的安全性, 根据断裂力学理论建立导水断层活化扩展的理论模型。将煤层底板看做半平面无限体, 把底板中含水层顶部以上的隐伏断层建模为有限宽度板条的倾斜边缘裂纹。根据采场底板的支承压力分布规律, 将其简化为若干分段线性载荷加载至底板, 纳入断层产状、断层在底板中埋深、工作面推进距离、含水层水压、断层面摩擦角等各种参数, 推导得到底板内任意一点的应力公式。将其应用到隐伏断层面上各点, 综合考虑各点法向应力、剪应力对裂纹活化的影响, 计算得到采动条件下断层面上的有效切应力分布。该有效切应力剔除了裂纹面上摩擦效应对压剪裂纹扩展的影响, 将其代入断裂力学相关公式, 计算得到隐伏断层前缘的应力强度因子, 最后通过定义突水安全指数建立了底板突水判据。以某矿带压开采工作面为例, 根据相应水文和地质资料, 计算得到在工作面推过隐伏断层的整个过程中断层活化突水危险性的变化规律, 所得结论与工作面现场微震监测数据相符, 即当工作面推进至采空区位于隐伏断层正上方区域时, 断层面承受有效剪切最充分, 剪切应力强度因子最大, 突水安全指数达到峰值, 这与现场微震监测结果中显示的在该推进阶段中, 原有隐伏断层附近派生裂隙集中出现、突水危险性最高的结果相符合。

关键词 隐伏断层; 底板突水; 压剪裂纹; 安全指数

中图分类号 TD31

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.11.008

Evaluation of Water Inrush from Floor Containing Insidious Fault Based on Crack Growth

HU Xinyu^{1,2}, WANG Lianguo^{1,2}, LU Yinlong², YU Mei¹

1. College of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China

2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China

Abstract For analyzing the security of floor containing insidious fault while mining above water, a fracture mechanical model is established in order to describe the activation and growth of insidious fault. First, from the beginning of aquifer top in floor, the above part of insidious fault is modeled as an oblique edge crack of finite width plate. Second, involving the effects of normal stress and shear stress for fault activation, effective shear stress distribution in the fault plane is calculated in the mining conditions. Third, according to attitude and burial depth in the floor of fault, distance of face advancing, water pressure of the aquifer, and angle of friction in the fault plane, the compress-shearing stress intensity factor of insidious fault is presented. Finally, the safety index is defined for establishing the criterion of water inrush. Taking a certain coal face mining under pressure for example, in accordance with its hydrologic and geological data, variation of risk about water inrush from activating fault is obtained during the whole face advancing across the fault. The conclusion coincides with microseismic monitoring data at the site. This analysis may provide suggestions for safe

收稿日期: 2013-11-25; 修回日期: 2014-02-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB226805); 国家自然科学基金项目(51274191)

作者简介: 胡新宇, 博士研究生, 研究方向为采动岩体力学, 电子信箱: xyhu@cumt.edu.cn; 王连国(通信作者), 教授, 研究方向为深部岩体力学、矿井水害防治技术, 电子信箱: lgwang@cumt.edu.cn

引用格式: 胡新宇, 王连国, 陆银龙, 等. 基于裂纹扩展的含隐伏断层底板突水评价[J]. 科技导报, 2014, 32(11): 55-59.

and rational coal mining and improve numerical or theoretical models of water inrush in floor.

Keywords insidious fault; water inrush in floor; compressing-shearing crack; safety index

底板突水是煤矿重大灾害之一, 水害机理及其预测预报的研究具有重要意义。突水系数类预测方法的公式简便实用, 应用广泛, 但临界突水系数的确定需因地制宜, 后继发展出的计算方法众多, 值得进一步探讨和统一^[1]。另一类预测方法是泛决策分析方法, 如专家系统^[2]、系统聚类方法^[3]、多源信息集成理论^[4]等, 特点是充分利用多种软科学决策方法, 考虑因素广泛。但它们避开矿井突水的复杂机理, 难以从力学角度揭示不同突水类型各自的核心影响因素。

对于底板隐伏断层采动型突水, 必须包括断层倾角、断层在底板中的埋深、底板采动二次应力场、采动工作面与断层的水平距离、含水层水压等核心影响因素, 显然它们都极大影响着突水的可能性。当前侧重反映突水机理的预测理论数量众多, 适用对象较广泛, 有些同时用于完整底板突水和断层突水, 涵盖多种不同类型的断层构造。施龙青等^[5]认为采场底板突水的条件为开采造成的底板破坏深度不小于底板高峰应力线与断层交点的深度, 其模型包含遭遇贯穿顶底板的大断层时留设的煤柱, 故隐伏断层突水模型不能套用。杨善安^[6]从矿压角度出发, 分析了断层在采空区的位置及要素与突水的关系, 得出当断层倾角同最大膨胀线相吻合时采空区内的底板最容易突水, 却未纳入隐伏断层的底板埋深和含水层水压对突水的影响。钱鸣高等^[7]考虑承压水对断层带的渗透冲刷、采动来压步距等要素, 建立了张开型、闭合型断层的突水准则, 但考虑范围是底板关键层内的断层, 而实际的突水通道需贯穿数个坚硬和软弱岩层。陈忠辉等^[8]建立了底板隐伏断层突水的简化力学模型, 得到导水断层发生劈裂破坏的临界水压力以及影响因素, 但未考虑底板采动应力场和工作面推进对突水的影响。本文考虑采动条件下影响隐伏断层突水的各主要因素建立力学模型, 导出突水判据后利用某矿承压开采工作面的数据进行验证。

1 隐伏断层理论模型

对于长壁开采工作面, 沿推进方向取断层带底板围岩分析, 将其看作半平面体。根据矿压控制理论^[9], 将采动应力简化为分段线性载荷加载至底板, 如图1所示。

图1中底板载荷分为5个区域: I区均布载荷代表煤壁前方原岩应力 γH , 其载荷作用范围 $x \in (-d_1, +\infty)$, II区代表煤壁前方应力降低区(载荷作用跨度 d_2), III区代表煤壁前方应力增高区(载荷作用跨度 d_3), IV区为采空区底板线性分布载荷(载荷作用跨度 d_4), V区均布载荷代表工作面后方原岩应力, 其载荷作用范围 $x \in (-\infty, -d_1 - d_2 - d_3 - d_4)$ 。对任一具体工作面, 距离 $d_2 \sim d_4$ 通常不变, 而随着其从左向右推进, 距离 d_1 不断减小直至为负, 故用 d_1 取值的变化表征工作面的推进。考虑含水层以上的导水隐伏断层, 设其长度为 L , 断层倾

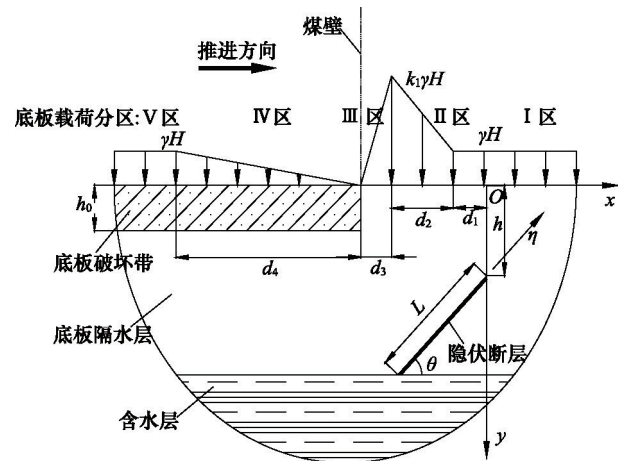


图1 采场底板隐伏断层区域剖面

Fig. 1 Surrounding rock section of insidious fault in the mining floor

角为 θ , η 轴表示裂纹面各点的局部坐标(η 轴原点位于含水层顶部), h 为断层在底板中的埋深, h_0 为采动破坏深度, 工作面前方最大应力集中系数设为 k_1 。

根据弹性力学中半平面体边界受法向分布力的公式, I区—V区的底板载荷都会在底板中各点产生应力, 将5个分区载荷引起的应力进行叠加, 得到底板内任一点 (x, y) 总的33个应力分量 $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$ 。将其应用到断层面上各点, 并换算为该点沿断层面(θ 方向)的法向压应力 σ_n 和剪应力 τ_n :

$$\sigma_n = \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta - 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (1)$$

$$\tau_n = (\sigma_y - \sigma_x) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (2)$$

由于承压水涌入断层, 用 $\sigma_n - p$ 取代上式中的 σ_n , 这里 p 为孔隙水压。由于摩擦效应的存在, 断层面的压应力会减缓剪应力的剪切作用。一般把剔除摩擦效应之后的剪切作用称为有效剪切^[10], 这里定义裂纹面上的有效切应力 τ_e 为

$$\tau_e = \tau_n - \tan \varphi \sigma_n \quad (3)$$

式中, φ 是断层面摩擦角。上式只是粗略的计算式, 具体编程时还需要考虑承压水导致断层面法向出现拉应力、切应力的正负方向等带来的计算困难。另外, 由于断层属于薄弱岩体且被水侵蚀, 断层面黏聚力与摩擦效应相比很小可以忽略, 不计入 τ_e 。按照文献[8]的方法, 将图1的隐伏断层视为有限宽度(宽度为含水层以上底板厚度减去底板破坏带厚度 h_0)、无限长板条的边缘压剪裂纹, 断层突水的先兆为该裂纹的扩展, 而是否扩展活化取决于该压剪裂纹的应力强度因子。将断层面任意点的 τ_e 代入应力强度因子手册的相关公式^[11], 得到剪切型(II型)应力强度因子 K_{II} :

$$K_{II} = \sqrt{\pi L} f_0(\lambda_1) f(\lambda_1) \quad (4)$$

式中,

$$\lambda_1 = L/W, \quad W = L + (h - h_0) / \sin \theta$$

$$f_0(\lambda_1) = (1.122 - 0.561\lambda_1 + 0.085\lambda_1^2 + 0.18\lambda_1^3) / \sqrt{1 - \lambda_1}$$

$$f(\lambda_1) = \tau_c \Big|_{z=0} + \int_0^{\lambda_1} (1-z) \frac{2}{\pi} \arccos \left[\frac{z(1-\lambda_1)}{\lambda_1(1-z)} \right] H(z, \lambda_1) \frac{\partial}{\partial z} \tau_c(z) dz$$

$$z = \eta/L, \quad H(z, \lambda_1) = 1 - \frac{0.12}{1.12} z(1 - 2.5\lambda_1)(1 - \lambda_1)/\lambda_1$$

积分得到的 K_{II} 表达式太过复杂, 以下只列出其相关变量:

$$K_{II} = f(d_1, d_2, d_3, d_4, \theta, h, h_0, \varphi, L, p, k_1, H) \quad (5)$$

2 实例分析

以某矿 1066 工作面的开采为例进行分析。该工作面倾斜长 112 m, 走向长 790 m, 开采 10 号近水平煤层, 其顶板为细砂岩, 底板为泥岩或粉砂岩。煤层埋深 $H=490$ m, 距煤层底板 55 m 处为承压太灰含水层, 其水压高达 $p=3$ MPa。工作面沿走向的中部位置的底板下遭遇 F4 隐伏断层, 断层底部与含水层相连, 已探明 F4 断层在底板中的最小埋深 $h=30$ m, 断层倾角平均 60° , 断层走向与开采方向正交。岩层比重 $\gamma=26$ kN/m³, 则底板原岩应力 q_0 约为 13 MPa。图 1 中 d_1 表示工作面推进位置, 其他参数分别为 $d_2=20$ m, $d_3=10$ m, $d_4=70$ m, 断层长度 $L=28.9$ m, $h_0=15$ m, $\theta=60^\circ$ 。根据采场围岩应力集中系数的理论取值范围^[9], 结合现场矿压观测数据, 取 $k_1=3.5$ 。由于水对断层带物质的软化, 断层面摩擦角约为 $\varphi=25^\circ$ 。通过式(4)计算, 图 2 给出了应力强度因子 K_{II} 随采场推进距离 d_1 的变化。

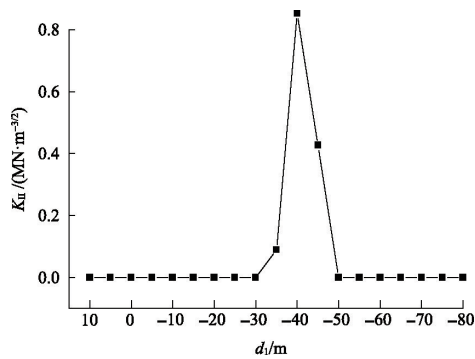
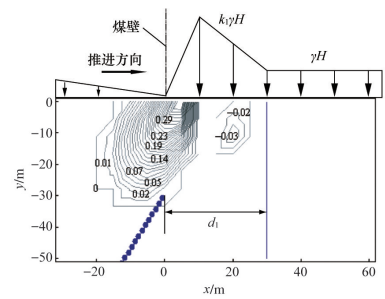


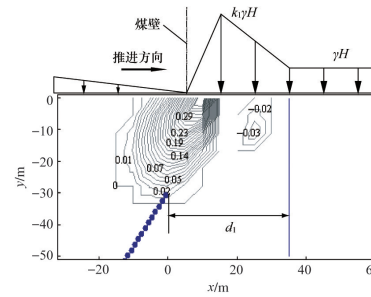
图 2 应力强度因子 K_{II} 随工作面推进的变化

Fig. 2 Variation of stress intensity factor K_{II} during face advancing

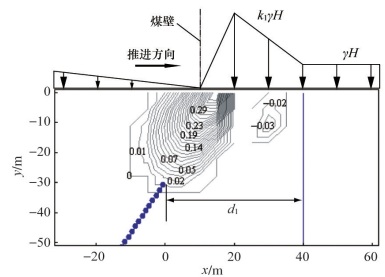
由图 2 可以看出, 工作面推进至断层面位于采空区下方 (d_1 为 -40 m 左右) 时应力强度因子取最大值 $K_{II, \max} = 0.865 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 。这是因为断层面上侧岩体遭受采空区卸压, 导致摩擦效应急剧下降, 进而断层受剪切程度加剧。该图说明采空区下方岩体是受有效剪切剧烈的区域, 这还可以从图 3 进一步剖析验证。



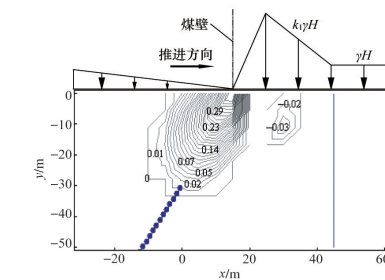
(a) $d_1 = -30$ m



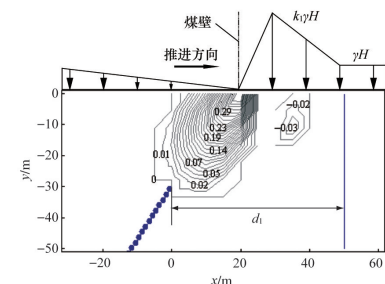
(b) $d_1 = -35$ m



(c) $d_1 = -40$ m



(d) $d_1 = -45$ m



(e) $d_1 = -50$ m

图 3 底板有效剪应力 τ_e 等值线图

Fig. 3 Contours of effective shearing stress τ_e in the floor

将底板岩体各点坐标代入式(2),整理得到图3的采动载荷作用下,隐伏断层附近围岩各点所承受的沿断层面(θ 方向)的有效剪应力 τ_e 等值线图,其中各等值线对应的应力均为无量纲形式(除以原岩应力 γH),横坐标 x 的含义与图1相同,例如断层上缘位于 $x=0$ 处,纵坐标 y 代表底板深度。为描述断层与采场推进的相对位置,图3中用连续点代表断层位置,并给出对应的工作面推进距离 d_1 。

由图3可以看出,隐伏断层在底板中较浅的部分(上缘)更容易受到有效剪切,随着工作面从左向右推进,F4断层由右往左扫过了采空区正下方岩层的有效剪应力集中区,经历了逐渐接近($d_1=-30$ m,图3(a))、开始进入($d_1=-35$ m,图3(b))、进一步深入($d_1=-40$ m,图3(c))、开始脱离($d_1=-45$ m,图3(d))、完全脱离($d_1=-50$ m,图3(e))等各个连续阶段。图3的结果与图2一致,同时说明了在工作面推进到 $d_1=-40$ m(图3(c))时应力强度因子 K_{II} 达到峰值,此时断层最容易朝采空区上方压剪扩展,然后进入有效切应力集中更强烈的区域,从而持续活化导致突水。为定量评价突水危险性,定义突水安全指数为

$$n = K_c / K_{II, \max} \quad (5)$$

式中, K_c 是底板岩体断裂韧度。突水安全指数 n 越大,工作面推过隐伏断层过程中的峰值应力强度因子与岩体断裂韧度相比越小,则隐伏断层越发难以活化扩展进而突水,承压水上开采安全性越高。若 $n > 1$,则底板隐伏断层主干部分不会突水,因此底板隐伏断层的突水判据可以表示为 $n \leq 1$ 。按照式(6)^[12]计算1066工作面底板岩体断裂韧度:

$$K_c = 0.2176P_c + 0.2953 \quad (6)$$

式中, P_c 为岩体围压。取侧压系数 $\lambda=0.33$,则底板岩体围压 $P_c = \lambda\gamma H = 4.16$ MPa。代入式(6),得 $K_c = 1.2$ MN \cdot m^{3/2},进而得到突水安全指数 $n = 1.39 > 1$,即不会突水。

为进行底板水害的预测预报和防治,实施了现场动态微震监测,如图4所示,其中灰色部分代表煤层,4个钻孔从轨道巷向工作面底板下方打设,钻孔中安放了8个检波器(图4中用黑色圆点表示)。这些检波器构成一空间监测体系,可以精确测定监测区域内底板岩体微震事件所发生的时间和空间位置。

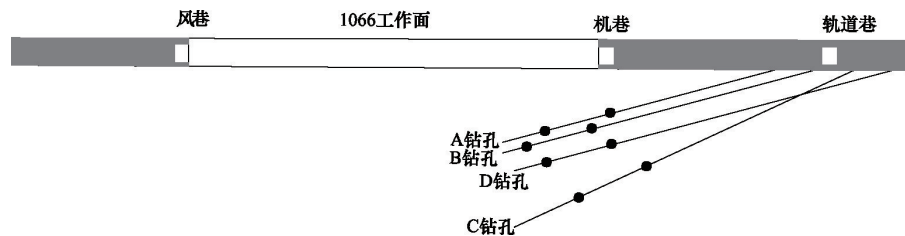


图4 检波器位置沿工作面倾向剖面的投影

Fig. 4 Projection of detectors along working surface inclination

图5给出了1066工作面接近并推过F4断层的时间段(d_1 为 $-30 \sim -55$ m)内机巷底板微震事件沿工作面倾向剖面的分布,用黑色圆点表示各微震事件发生的空间位置。为便于比较,图5中标有底板无断层时破坏区域的轮廓线,该轮廓线以内的黑点分布位置与工作面距离F4断层较远时($d_1 > -30$ m及 $d_1 < -55$ m)的情况是相同的。不同之处在于在这个工作面推进阶段,不少微震事件发生在底板破坏带深度以下、断层埋深以上的连接区域(底板下方 $15 \sim 30$ m),即图5中的派生裂隙区域。

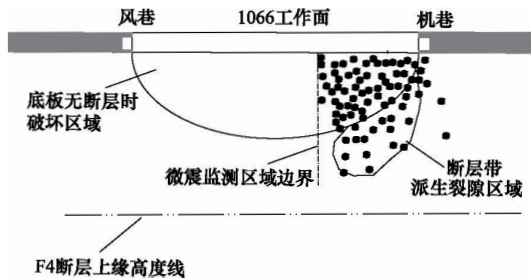


图5 d_1 为 $-30 \sim -55$ m时间段内机巷底板微震事件沿工作面倾向剖面分布

Fig. 5 Micro-seism incidents distribution in tunnel floor along working surface inclination during $d_1 = -30 \sim -55$ m

该区域岩体微破裂的集中出现可以从图2、图3总结的底板岩体卸压、断层受剪切程度加剧来解释。虽然F4隐伏断层的主干部分没有开始扩展活化($n = 1.39 > 1$),但由于该时间段剪切应力强度因子 K_{II} 达到峰值(图2),导致断层带薄弱围岩在采空区下方的有效剪应力集中区(图3)出现派生裂隙。鉴于该时间段突水安全指数最低,实际开采时通过预先疏水降压、底板注浆加固等措施加强防范,以实现安全开采。

3 结论

对于底板隐伏断层的采动突水,利用断裂力学理论,考虑断层倾角及其相对于工作面的水平和垂直距离、含水层水压、断层面摩擦角等参数建立采场突水预测模型。定义突水安全指数并用来建立底板突水判据,进行突水危险性评价。某矿1066工作面开采底板突水预测:当工作面推进至采空区位于隐伏断层上方时,断层面承受有效剪切最充分,剪切应力强度因子 K_{II} 达到峰值,突水危险性最高,后来现场的微震监测数据也显示该推进阶段断层带派生裂隙集中出现;突水安全指数 $n = 1.39$,与临界值1较接近,虽然断层主干部分没有活化,断层带派生裂隙的新增和演化不容忽视,需要预先采取充分防治措施。

参考文献 (References)

- [1] 刘其声. 关于突水系数的讨论[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(4): 34-42.
Liu Qisheng. A discussion on water inrush coefficient[J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(4): 34-42.
- [2] 刘伟韬, 张文泉, 高延法, 等. 底板突水预测专家系统研究[J]. 山东矿业学院学报, 1998, 17(4): 333-338.
Liu Weitao, Zhang Wenquan, Gao Yanfa, et al. Research on expert system for predicting floor water-irruption[J]. Journal of Shandong Mining Institute, 1998, 17(4): 333-338.
- [3] 李娜娜, 施龙青, 李忠建, 等. 基于系统聚类法的底板突水危险性评价[J]. 矿业安全与环保, 2011, 38(2): 28-30.
Li Nana, Shi Longqing, Li Zhongjian, et al. Evaluating water inrush from floor based on system clustering method[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2011, 38(2): 28-30.
- [4] 武强, 张志龙, 张生元, 等. 煤层底板突水评价的新型实用方法II—脆弱性指数法[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1121-1126.
Wu Qiang, Zhang Zhilong, Zhang Shengyuan, et al. A new practical methodology of the coal floor water bursting evaluating II: The vulnerable index method[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1121-1126.
- [5] 施龙青, 曲有刚, 徐望国. 采场底板断层突水判别方法[J]. 矿山压力与顶板管理, 2000(2): 49-52.
Shi Longqing, Qu Yougang, Xu Wangguo. Discriminant method of water inrush from mining floor[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2000(2): 49-52.
- [6] 杨善安. 采场底板断层突水及其防治方法[J]. 煤炭学报, 1994, 19(6): 620-625.
Yang Shan'an. Prevention and control of water inrush from faults in floor rocks in the workings[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6): 620-625.
- [7] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu Jialin, et al. Key strata theory in ground control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.
- [8] 陈忠辉, 胡正平, 李辉, 等. 煤矿隐伏断层突水的断裂力学模型及力学判据[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(5): 673-677.
Chen Zhonghui, Hu Zhengping, Li Hui, et al. Fracture mechanical model and criteria of insidious fault water inrush in coal mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(5): 673-677.
- [9] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
Qian Minggao, Shi Pingwu. Mining pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.
- [10] 冯西桥, 余寿文. 准脆性材料微观损伤力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
Feng Xiqiao, Yu Shouwen. Damage micromechanics of quasi-brittle materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [11] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
Chinese Aeronautical Establishment. Manual of stress intensity factor [M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [12] 陈勉, 金衍, 袁长友. 围压条件下岩石断裂韧性的实验研究[J]. 力学与实践, 2001, 23(4): 32-35.
Chen Mian, Jin Yan, Yuan Changyou. Study on the experiment for fracture toughness under confining pressure[J]. Mechanics in Engineering, 2001, 23(4): 32-35.

(责任编辑 侯澄芝)

·学术动态·



中国科协推动科普影视传播品制作与传播工作取得新突破

2013年,中国科协与中共中央组织部党员教育中心联合开展“高新技术知识院士讲座”视频制作,紧密结合16个“国家科技重大专项”,邀请20名知名院士主讲,讲座已在共产党员网(40万个端口)、远程教育专用频道(700多个点)、中国数字科技馆等网站播出,同时在地方党建电视频道播出,制作成音像制品出版发行。

组织中国科技馆等9家制作单位制作科学生活、应急科普、科学小实验、科学TED演讲类等科普微视频3140分钟共444集,整合改编视频1500分钟共200集,在中国数字科技馆开设科普微视频专栏,通过公交、地铁、楼宇视窗广泛传播,科普日和会员日期间共播出科普微视频406分钟,2014年1月起在全国的高铁动车组节目中播出。

《科普大篷车》电视栏目完成了104集1560分钟的视频节目和3900分钟的音频节目的制作工作,在2630家基层电视台和相关机构播放。

支持北京科技视频网、武汉广播电视台摄制重大科学题材专题片《播火录》,组织开展中央电视台科普影视资源调研。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35533/n38605/15353848.html>。