

深部硬岩二次应力状态下破裂的断裂力学分析

赵国彦, 马驰, 郭琪

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 为探索深部硬岩的开挖扰动对微裂纹延展破坏的影响关系, 利用弹性力学与断裂力学相结合的理论分析方法, 依据弹塑性力学的应力分解叠加等效原则和断裂力学的最大周向拉应力准则, 求解出不同侧压力系数 λ 条件下深部巷道围岩的二次应力解析解, 并推导出了极限状态下裂纹扩展长度的理论计算公式。通过建立岩石断裂力学参数模型分析发现, 侧压系数 λ 对巷道破坏深度和周边应力场分布有着明显的影响。 $\lambda > 1$ 时, 边帮为裂纹延展破坏的主要区域, $\lambda < 1$ 时, 顶底板为裂纹延展破坏的主要区域; 在压剪应力方向一定时, 裂纹延展深度与裂纹初始长度有关, 与应力大小无关。

关键词 圆形巷道; 硬岩; 二次应力; 断裂力学; 破坏区

中图分类号 TD353

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.31.007

Fracture Mechanics Analysis of Fracture Zone in Deep Hard Rock Under the State of Secondary Stresses

ZHAO Guoyan, MA Chi, GUO Qi

School of Resources and Safety Engineering, Center South University, Changsha 410083, China

Abstract In order to explore the impact of the excavation disturbance on the microcrack extension, by using the combining method of elasticity and fracture mechanics, the analytic solution of the secondary stress for the lateral pressure coefficient λ is obtained based on the decomposition and superposition principles. The formulas for the extending depth of the fissure cracking are derived according to the maximum circumferential stress criterion. By building series of models of rock mechanics parameters, it is shown that the lateral pressure coefficient λ has a significant effect on the failure depth of the roadway and the stress distribution. The roadway's sides are the main regions of the surrounding rock failure under the condition of $\lambda > 1$, the roof and the floor are the main regions of the surrounding rock failure under the condition of $\lambda < 1$. In addition, the failure depth of the roadway has no correlation with the magnitude of the stress under a constant compression-shear stress, but dependent on the crack initial length.

Keywords circular opening; hard rock; secondary stresses; fracture mechanics; cracked region

0 引言

据统计, 中国约有 1/3 的有色金属矿山的开采深度在 1000m 左右, 未来几年深部采矿将成为矿山开采的主要方式^[1]。深部岩体工程的稳定性成为近年来热点理论研究课题。

针对深部高地应力下的硬岩力学行为及力学特征, 国内外学者做了大量研究。研究表明, 对于深部或高地应力工程, 尤其是硬脆性围岩, 岩石的破裂深度和范围主要受岩体力学特征和地应力量级控制, 同时, 生产过程中大量二次应力扰

动也是诱发深部岩石破坏的重要因素^[2-3]。蒋斌松等^[4]用非关联性弹塑性力学计算了深部围岩破裂区和塑性区半径; 俞茂宏等^[5]采用双剪统一强度理论, 研究分析了考虑中间主应力的高应力围岩的应力应变特征, 并给出了应力场、位移场及塑性区的分析解; 隋斌^[6]用断裂力学深入研究和分析了深部岩体脆性破坏的机制; 朱泽奇等^[7]用实验的方式研究了脆性硬岩石侧向变形特征及损伤机制, 认为脆性硬岩石在不同应力路径和不同加载控制方式下, 侧向损伤是损伤的主要方

收稿日期: 2012-07-30; 修回日期: 2012-08-30

基金项目: 国家重点基础研究计划(973计划)项目(2010CB732004); 国家自然科学基金项目(50934006); 2011年中南大学硕士学位论文创新资助项目(2011ssxt273)

作者简介: 赵国彦, 教授, 研究方向为采矿与岩土工程灾害控制及其安全评价, 电子信箱: gy.zhao@263.net

式;左宇军等^[8]用 RFPA^{2D} 分析了扰动应力对深部岩巷破坏过程的影响,从微观角度分析了不同深度或受不同静压力的岩石巷道在动力扰动下的破坏规律,认为当巷道埋深较大时,较小的应力扰动便可导致裂纹大规模瞬时动力扩展。

目前对深部硬岩巷道开挖后破裂机制的研究,主要停留在均质性静水压力假设的基础上,针对不同侧压力系数下巷道破坏规律的研究还比较少。因此,针对此现状,本文运用弹性力学中应力叠加等效原理,结合断裂力学,推导微裂纹发展连通的断裂判据,以此研究二次应力下微裂纹断裂发展的非线性规律。

在研究分析过程中,将深部硬岩巷道开挖面附近的围岩看作一侧卸压,并取开挖面附近的围岩单元进行弹塑性力学分析,根据泊松效应,运用应力分解叠加的等效原则将二次应力场分解为以侧压力系数 λ 为主要变量的解析式,得出巷道开挖后二次应力分布的解析解。根据解析解,从考虑裂纹尖端强度出发,运用断裂力学理论,将围岩的失稳看作微小微裂纹的扩展连通导致的失稳,认为围岩中微裂纹扩展深度就是围岩的破坏深度。采用最大周向拉应力准则,推导出裂纹在二次应力条件下的断裂强度因子,从而获得极限状态下裂纹扩展长度的理论计算公式,由此可计算出巷道围岩的破坏深度。

1 圆形巷道二次应力状态弹性分布

1.1 圆形巷道开挖后的二次应力分布

在工程岩石力学中,均质岩体中二次应力状态与侧压力系数 λ 有关^[9-10],因此,研究 $\lambda \neq 1$ 时的应力分布特征更符合工程实际需要。假设围岩为均质连续的线弹性体,图 1 所示为距地表垂直高度为 H 的圆形隧道,隧道半径为 R_a , σ_x 为原岩水平应力, σ_y 为原岩垂直主应力。

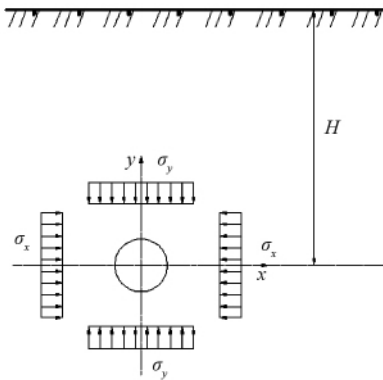


图 1 深埋圆形巷道力学模型

Fig. 1 The mechanical model of deep circular opening

当巷道埋深较大,且巷道长度相对巷道截面尺寸较大的条件下,原岩应力受地势地貌扰动较小,原岩应力场为

$$\begin{cases} \sigma_x = \gamma H \lambda \\ \sigma_y = \gamma H \\ \tau_{xy} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, γ 为岩石容重, N/m^3 ; τ_{xy} 为岩石所受剪切力。根据应力分解叠加的等效原则^[11],巷道开挖产生的新应力场可分解为图

2 所示的计算模型。

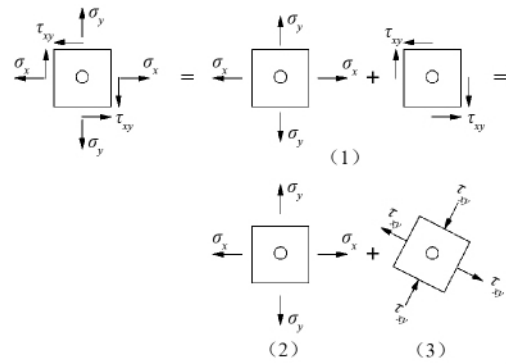


图 2 圆孔受力分解计算模型

Fig. 2 Force decomposition calculation model of circular hole

在图 2 的应力(2)作用下,应用复变函数解得围岩应力为

$$\begin{cases} \sigma_r^{(2)} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \left[1 - \left(\frac{R_a}{r} \right)^3 \right] - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cdot \\ \quad \left[1 - 4 \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 + 3 \left(\frac{R_a}{r} \right)^4 \right] \cos 2\theta \\ \sigma_\theta^{(2)} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \left[1 + \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 \right] + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \left[1 + 3 \left(\frac{R_a}{r} \right)^4 \right] \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta}^{(2)} = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \left[1 + 2 \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 - 3 \left(\frac{R_a}{r} \right)^4 \right] \sin 2\theta \end{cases} \quad (2)$$

其中, r 为巷道中心距岩石单元的距离; θ 为岩石单元与巷道中心水平夹角; $\sigma_r^{(2)}$ 、 $\sigma_\theta^{(2)}$ 、 $\tau_{r\theta}^{(2)}$ 为应力(2)条件下岩石单元的极坐标应力。在图 2 的应力(3)条件下,由材料力学可知,岩石单元所受剪切力 τ_{xy} 与 $-\tau_{xy}$ 数值相等,方向相反,解出状态(3)下的应力状态为

$$\begin{cases} \sigma_r^{(3)} = \tau_{xy} \left[1 - 4 \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 + 3 \left(\frac{R_a}{r} \right)^4 \right] \sin 2\theta \\ \sigma_\theta^{(3)} = -\tau_{xy} \left[1 + 3 \left(\frac{R_a}{r} \right)^4 \right] \sin 2\theta \\ \tau_{r\theta}^{(3)} = \tau_{xy} \left[1 + 2 \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 - 3 \left(\frac{R_a}{r} \right)^4 \right] \sin 2\theta \end{cases} \quad (3)$$

运用应力分解叠加等效原理,图 2 中应力(1)为应力(2)与应力(3)的表达式叠加,联立原岩应力场,可得关于侧压力系数的应力解析解为

$$\begin{cases} \sigma_r^{(1)} = \frac{1}{2} \gamma H (1 + \lambda) \left[1 - \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 \right] - \frac{1}{2} \gamma H (\lambda - 1) \cdot \\ \quad \cos 2\theta \left[1 - 4 \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 + 3 \left(\frac{R_a}{r} \right)^4 \right] \\ \sigma_\theta^{(1)} = \frac{1}{2} \gamma H (1 + \lambda) \left[1 + \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} [\gamma H (\lambda - 1) \cdot \\ \quad \cos 2\theta] \left[1 + 3 \left(\frac{R_a}{r} \right)^4 \right] \\ \tau_{r\theta}^{(1)} = \frac{1}{2} \gamma H (\lambda - 1) \sin 2\theta \end{cases} \quad (4)$$

1.2 微裂纹有效应力计算模型

在开挖面附近,与巷道中心水平夹角成 θ 角的径向方向上取含一组微裂纹的单元体,根据式(4)可知,单元体所受力为 $\sigma_r^{(1)}$ 、 $\sigma_\theta^{(1)}$ 、 $\tau_{r\theta}^{(1)}$,如图3所示,单元体内微裂纹长度为 $2L$,微裂纹倾角为 α 。根据裂纹增速与应力变化的非线性关系,在应变开始的初期、中期、后期阶段可以认为是岩石的弹性变形阶段,岩石微裂纹开始萌生并缓慢稳定扩展,由于增速缓慢,岩石宏观上仍表现出弹性性质。另外,根据现场钻孔实测可

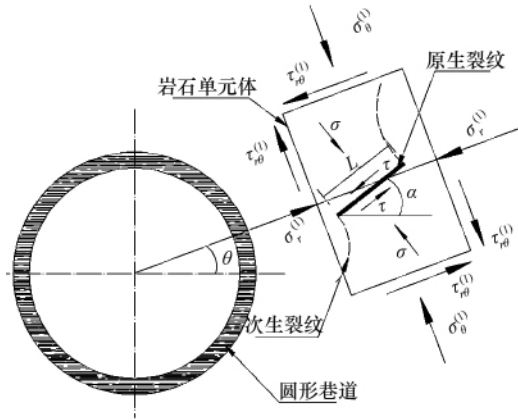


图3 微裂纹有效应力图

Fig. 3 The effective stress of discontinuity

知^[2],在巷道开挖初期,巷道围岩完整性较好,裂纹发育程度较低,微裂纹对应力分布的影响以及应力随微裂纹长度上的变化可以忽略。距巷道中心距离为 r 的微裂纹所受的径向及切向应力为

$$\begin{cases} \sigma = \frac{\sigma_r^{(1)} + \sigma_\theta^{(1)}}{2} - \frac{\sigma_\theta^{(1)} - \sigma_r^{(1)}}{2} \cos 2(\alpha - \theta) \\ \tau = \frac{\sigma_\theta^{(1)} - \sigma_r^{(1)}}{2} \sin 2(\alpha - \theta) - \tau_{r\theta}^{(1)} \cos(\alpha - \theta) \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(6),得到二次应力状态下微裂纹的主应力及切应力公式

$$\begin{cases} \sigma = \frac{1}{2} \gamma H (1 + \lambda) \left[1 - \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 \cos(\alpha - \theta) \right] + \gamma H (\lambda - 1) \cos 2\theta \cdot \left\{ \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 - \frac{\cos(\alpha - \theta)}{2} \left[1 - 2 \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 + 3 \left(\frac{R_a}{r} \right)^4 \right] \right\} \\ \tau = \left\{ \gamma H (1 + \lambda) \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 + \frac{1}{2} \gamma H (\lambda - 1) \cos 2\theta \left[1 - 2 \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 + 3 \left(\frac{R_a}{r} \right)^4 \right] \right\} \cdot \sin 2(\alpha - \theta) - \frac{1}{2} \gamma H (\lambda - 1) \sin 2\theta \cos(\alpha - \theta) \end{cases} \quad (6)$$

2 微裂纹的断裂判据

开挖巷道在低侧压情况下以剪胀破坏为主。微裂纹的开裂是作用在其上的剪切应力所造成的。根据断裂力学,裂纹在有效压剪应力作用下可能以 II 型挫断方式延展,其应力强

度因子为

$$K_{II} = [\tau - (\mu\sigma + c)] \sqrt{\pi L} \quad (7)$$

其中, μ 为微裂纹的摩擦系数; c 为微裂纹表面黏聚力; τ 为微裂纹所受剪切力; σ 为裂纹所受主应力。根据最大周向拉应力准则^[3],裂隙尖端受到 I 型和 II 型复合型断裂因子共同作用。

设微裂纹以与初始裂纹成 β 角的方向扩展,根据断裂理论,最大拉应力的法线方向与裂纹面成 $\beta = 70.5^\circ$ 时,式(7)取得最大值^[4]。则等效 I 型断裂形式的强度因子为

$$K'_I = \frac{3}{2} K_{II} \sin \beta \cos \frac{\beta}{2} = \frac{2}{\sqrt{3}} K_{II} \quad (8)$$

翼形裂纹发生扩展的极限条件为 $K'_I = K_{Ic}$ (K_{Ic} 为岩石 I 型断裂极限强度因子),其断裂判据可表示为

$$\frac{2}{\sqrt{3}} [\tau - (\mu\sigma + c)] \sqrt{\pi L} = K_{Ic} \quad (9)$$

将式(6)代入式(9),可得二次应力分布条件下圆形巷道围岩中微裂纹破坏的断裂判据

$$\begin{aligned} & \left\{ \gamma H (1 + \lambda) \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 + \frac{1}{2} \gamma H (\lambda - 1) \cos 2\theta \left[1 - 2 \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 + 3 \left(\frac{R_a}{r} \right)^4 \right] \right\} \cdot \\ & \sin 2(\alpha - \theta) - \frac{1}{2} \gamma H (\lambda - 1) \sin 2\theta \cos(\alpha - \theta) - c - \frac{1}{2} \mu \gamma H \cdot \\ & (1 + \lambda) \left[1 - \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 \cos(\alpha - \theta) \right] - \mu \gamma H (\lambda - 1) \cos 2\theta \cdot \\ & \left\{ \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 - \frac{\cos(\alpha - \theta)}{2} \left[1 - 2 \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 + 3 \left(\frac{R_a}{r} \right)^4 \right] \right\} = \frac{\sqrt{3} K_{Ic}}{2 \sqrt{\pi L}} \end{aligned} \quad (10)$$

3 裂纹与应力应变关系及其强度分析

3.1 裂纹扩展对应力应变影响分析

数值模拟与相似材料实验都发现,在压剪应力作用下,产生宏观损伤及破坏的驱动力为裂纹的剪切贯通变形,并且服从由剪切应力所决定的最弱贯通路径原则。

裂纹对应力的影响主要表现为裂纹的叠加作用对应力场产生扰动,其扰动结果可以相互增强,也可能减弱效应,且裂纹萌生、扩展的方式与侧压力有很大关系。侧压增大,翼形裂纹的生长受到抑制,次级裂纹成为扩展主要对象,在较低或无侧压时,裂纹群试样破坏模式中较大的裂纹起到控制作用。

有关研究采用裂纹密度增速来描述裂纹发展过程,定义裂纹密度 $f = \frac{M}{V} \bar{\omega}^3$,其中, ω 为随机分布的币状微裂纹面半径, $\bar{\omega}^3$ 为 ω^3 的平均值, M 为裂纹数目, V 为基体体积。在弹性阶段,裂纹密度增速 ($\Delta f / \Delta \sigma$) 缓慢,速度由 0 缓慢增至约 0.0076MPa^{-1} ; 应变中期阶段,随着应变或应力的继续增加,裂纹密度增速开始加快,速度由 0.1176MPa^{-1} 增至 1.1330MPa^{-1} ; 应变后期阶段,即峰后阶段,裂纹密度继续增加,但增速突然降低,由 1.1330MPa^{-1} 降至 0.0594MPa^{-1} ; 岩石破坏后,裂纹密

度增速由慢变快继续增加。由此可见,弹性阶段是微裂纹缓慢增长的过程,此阶段微裂纹发展对应力变化影响作用并不明显^[5]。

微裂纹扩展对应力的影响既有应力放大作用,也有应力屏蔽作用,具有随机性。应力屏蔽作用时,影响作用力相互抵消,因此,忽略微裂纹之间相互作用的假定适用范围更广。本文采用该假定,即认为微裂纹之间的应力影响可以忽略。

3.2 微裂纹的剪切强度分析

根据岩石损伤理论,裂纹损伤累计到一定程度,岩石将发生应变软化,从而导致岩石强度降低。研究试验发现^[15-16],在岩石的峰后阶段,裂纹强度随着裂纹延展贯通程度的增强而逐渐减小,其抗剪强度弱化速率下降尤其明显。在深部高应力巷道开挖卸荷后,巷道产生应力集中,岩石突变为塑性状态,裂纹开始加速扩展贯通,因此可以忽略裂纹剪切强度。若不考虑微裂纹的抗剪强度,即 $\mu=0, c=0$,根据式(10)可知,翼形裂纹的断裂判据为

$$\frac{\sqrt{3} K_{Ic}}{2\sqrt{\pi L}} = \left\{ \gamma H(1+\lambda) \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 + \frac{1}{2} [\gamma H(\lambda-1) \cos 2\theta] \left[1 - 2 \left(\frac{R_a}{r} \right)^2 + 3 \left(\frac{R_a}{r} \right)^4 \right] \right\} \cdot \sin 2(\alpha-\theta) - \frac{1}{2} \gamma H(\lambda-1) \sin 2\theta \cos(\alpha-\theta) \quad (11)$$

若方程式目标参量是破裂区半径 r , 则破裂区深度为

$$d = r - R_a \quad (12)$$

当 $r \leq R_a$ 时, 围岩中的微裂纹不产生扩展, 当 $r > R_a$ 时, 微裂纹发生扩展, 从而形成破坏区。

4 压剪力作用下裂纹延展深度的讨论分析

为探究破裂区深度与各参数变量之间的关系, 在不考虑微裂纹的抗剪强度, 即 $\mu=0, c=0$ 时, 根据式(11), 利用 Matlab 数据处理软件, 建立目标函数模型, 通过各参数变量的输入, 讨论分析破裂区深度与各参变量之间的非线性关系。

(1) 侧压系数与裂纹延展深度的关系

选取不同地应力下的侧压系数, 利用式(11)计算分析侧压系数与裂纹扩展深度的关系。令 $\alpha-\theta=\psi$, 并取 $\psi_s=45^\circ$ 。

根据式(11), 给出 $R_a, \gamma H, L, K_{Ic}$ 值如表 1 所示。输入变量 $\lambda=0.5, 1, 1.5, 2, 2.5$, 裂纹所在空间位置 $\theta=0, 45^\circ, 90^\circ$, 给出不同的 λ, θ 变量值, 得到破裂深度 d 和 λ, θ 的关系曲线图 4。

表 1 d 与 λ, θ 函数关系中的参变量
Table 1 The parameter variables in the function of d and λ, θ

参变量	R_a/m	$\gamma H/MPa$	L/m	$K_{Ic}/(kPa \cdot m^{1/2})$	$\psi_s/(^\circ)$
指标	2	15	0.1	2	45

图 4 表明在 $\lambda < 1$ 时, 边帮裂纹的延展深度远远大于顶板

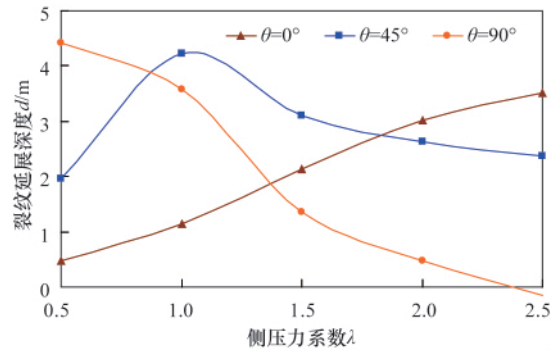


图 4 裂纹延展深度与侧压力系数变化曲线

Fig. 4 Relation between cracked extension depth and coefficient of rock pressure

裂纹延展深度, 且随着测压系数的增大, 顶板裂纹 ($\theta=90^\circ$) 发展缓慢下降, 边帮裂纹 ($\theta=0$) 扩展深度不断增大; 当 $\lambda > 1$ 时, 随着侧压系数的增大, 顶板裂纹延伸量快速下降, 在 $\lambda=2.4$ 时由于水平应力增大, 顶板受压剪作用的裂纹停止扩展, 该区域裂纹延展由压剪主导演变为拉剪主导。在 $\theta=45^\circ$ (巷道拱角) 时, 裂纹扩展深度整体略大于顶板和边帮裂纹延展深度, 另外, 由于产生水平和垂直方向应力干扰, 随着 λ 的变化裂纹扩展变化不明显。

(2) 断裂韧度与裂纹延展深度的关系

根据式(11), 给出 $R_a, \gamma H, \psi_s, \lambda$ 值如表 2 所示。定义变量 $K_{Ic}=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 kPa \cdot m^{1/2}$, 裂纹长度 $L=0.1, 0.3, 0.5, 0.7m$, 得到破裂深度 d 和 K_{Ic}, L 的关系曲线如图 5 所示。

表 2 d 与 K_{Ic}, L 函数关系中的参变量
Table 2 The parameter variables in the function of d and K_{Ic}, L

参变量	R_a/m	$\gamma H/MPa$	$\psi_s/(^\circ)$	λ
指标	2	15	30	0.8

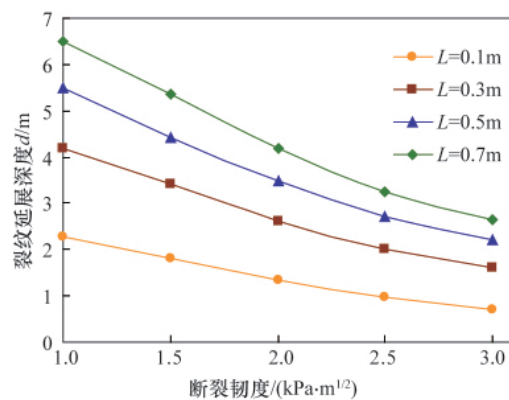


图 5 裂纹延展深度与断裂韧度变化曲线

Fig. 5 Relation between cracked extension depth and fracture toughness

图 5 表明岩体断裂韧度越大,破坏区越小,断裂韧度 $K_{Ic}=1\text{kPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时,裂纹扩展深度可达 6.5m,当 K_{Ic} 增大到 $3\text{kPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时,其扩展深度约是 $K_{Ic}=1\text{kPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时的 1/2,可见岩石强度越高,巷道越不容易破坏。另外,在压剪应力方向一定时,裂纹延展深度与初始长度有关,与应力大小无关,初始长度越大,延展深度越大。

(3) ψ_s 与裂纹延展深度的关系

根据式(11),给出 $R_a, \gamma H, \psi_s, K_{Ic}$ 值如表 3 所示。定义变量 $\psi_s=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, 裂纹初始长度 $L=0.1, 0.3, 0.5, 0.7\text{m}$, 得到破裂深度 d 和 ψ_s, L 的关系曲线如图 6 所示。

表 3 d 与 ψ_s, L 函数关系中的参变量
 Table 3 The parameter variables in the function
 of d and ψ_s, L

参变量	R_a/m	$\gamma H/\text{MPa}$	λ	$K_{Ic}/(\text{kPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
指标	2	15	0.8	2.0

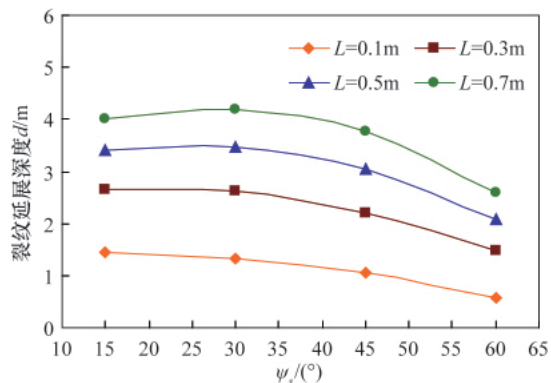


图 6 裂纹延展深度与 ψ_s 变化曲线

Fig. 6 Relation between cracked extension depth and the parameter of ψ_s

岩体中微裂纹的分布具有随机性,微裂纹与有效应力夹角不同,裂纹扩展方式与扩展深度也不相同。相似模拟实验表明,受压剪作用时,岩石主要产生复合型挫断劈裂,压力条件一定时,其劈裂程度与裂纹与有效应力夹角存在非线性关系。图 6 中可以看出, $\psi_s < 30^\circ$ 时,同一初始长度的裂纹扩展随着裂纹与有效应力夹角的增大变化不明显,若裂纹初始平均长度为 0.1m,裂纹延展深度为 1.4m; $30^\circ < \psi_s < 60^\circ$ 时,随着裂纹有效角度的增大,裂纹扩展能力加速下降。由此可见,裂纹与有效应力夹角是影响裂纹扩展方式与发展程度的重要因素之一,夹角越大,裂纹越不容易破坏,其延展深度也越小,反之越大。另外,从图中可知,裂纹初始长度越小,围岩抗压剪能力越强。

总结以上分析可知,侧压系数 λ 对巷道破坏深度和周边应力场有明显影响。随着 λ 的增大,巷道边帮的裂纹扩展有增大趋势,顶板破坏深度随着 λ 的增大而减小。另外,岩石断

裂韧度和初始裂纹空间形态对裂纹的延展方式和延展深度具有重要影响,断裂韧度越大,岩石强度越高,裂纹扩展能力越低。

原生裂纹在峰值压力下不断扩展和贯通,在有效应力主导下,裂纹的扩展将沿着与有效主应力平行的方向传播。但是新生裂纹的空间分布具有随机性,其分布的不规则性一定程度上干扰了有效主应力方向,导致裂纹不可能沿某一方向无限发展,因此裂纹扩展的路径并不确定。裂纹在发展过程中,优势微裂纹首先贯通,贯通的区域形成应力弱化区,宏观表现为形成新的自由面,应力峰值向深部递减式转移,在径向方向上将同步产生一个支撑压力区,重复上一过程会产生第二个裂纹扩展区,当应力深度达到原岩应力时,裂纹扩展停止,因此,实际裂纹扩展深度要小于计算值。

5 结论

本文利用断裂力学理论,对开挖巷道的围岩裂纹扩展深度与形状进行了分析计算,可以得出以下结论。

(1) 针对圆形巷道开挖形成的二次应力状态,利用弹塑性理论,建立符合基本方程的力学模型,并推导出巷道开挖后二次应力下的有效应力的解析式。

(2) 通过分析高应力下硬岩的破裂规律,在合理假定的基础上,推导硬岩断裂判据,得出适合深部硬岩巷道开挖后围岩的断裂判据,最后通过推导公式求解破裂区深度。

(3) 通过对解析式赋值计算,总结发现侧压力系数 $\lambda=1$ 时破裂区深度最大。另外,破裂区深度与岩石力学参数和初始地应力和裂纹初始状态有很大关系,岩石越坚固,破裂区深度越小,地应力越大,裂纹扩展越大。

(4) 在不考虑剪切应力条件下,初始裂纹与有效主应力的夹角及裂纹初始长度也是裂纹扩展程度的重要影响因素。夹角小于 30° 时,裂纹不易扩展,随着角度增大,裂纹扩展加速;相同围岩条件下,裂纹初始长度越大,裂纹越不稳固。

(5) 本文考虑的是理想状态下裂纹的延展深度,是严格按照断裂力学对裂纹扩展深度计算的初步尝试,其结果可利用有限元等数值方法进行检验。

参考文献 (References)

- [1] 郭立. 深部硬岩岩爆倾向性动态预测模型及其应用 [D]. 长沙: 中南大学, 2004.
 Guo Li. The model and application of dynamically predict rock bursts proneness in deep hard rock [D]. Changsha: Center South University, 2004.
- [2] 张雯, 曹平. 某铜矿二次应力场的监测与分析[J]. 南华大学学报: 自然科学版, 2009, 23(1): 41-44.
 Zhang Wen, Cao Ping. *Journal of University of South China: Science and Technology*, 2009, 23(1): 41-44.
- [3] 张晓春, 卢爱红, 王军强. 动力扰动导致巷道围岩层裂结构及冲击矿压的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 3111-3114.
 Zhang Xiaochun, Lu Aihong, Wang Junqiang. *Chinese Journal of Rock*

- Mechanics and Engineering*, 2006, 25(1): 3111-3114.
- [4] 蒋斌松, 张强. 深部圆形巷道破裂围岩的弹塑性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 982-986.
 Jiang Binsong, Zhang Qiang. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 982-986.
- [5] 徐栓强, 俞茂宏, 胡小荣. 基于双剪统一强度理论的地下圆形洞室稳定性的研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(5): 522-526.
 Xu Shuanqiang, Yu Maohong, Hu Xiaorong. *Journal of China Coal Society*, 2003, 28(5): 522-526.
- [6] 隋斌. 深部岩体脆性破坏机理及相关问题研究 [D]. 济南: 山东大学, 2009.
 Sui Bin. Study on mechanism of brittle crack and relevant problems in deep rock[D]. Jinan: Shandong University, 2009.
- [7] 朱泽奇, 盛谦. 脆性岩石侧向变形特征及损伤机理研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2137-2143.
 Zhu Zeqi, Sheng Qian. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(8): 2137-2143.
- [8] 左宇军, 唐春安, 朱万成, 等. 深部岩巷在动力扰动下的破坏机理分析 [J]. 煤炭学报, 2006, 31(6): 742-746.
 Zuo Yujun, Tang Chun'an, Zhu Wancheng, et al. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(6): 742-746.
- [9] 顾金才, 顾雷雨, 陈安敏, 等. 深部开挖洞室围岩分层断裂破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 433-438.
 Gu Jincai, Gu Leiyu, Chen Anmin, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3): 433-438.
- [10] 高富强, 康红普, 林建, 等. 深部巷道围岩分区破裂化数值模拟[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 21-24.
 Gao Fuqiang, Kang Hongpu, Lin Jian, et al. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(1): 21-24.
- [11] 郭东杰, 王立忠, 陈云敏, 等. 倾斜地表下深埋隧道受力弹性分析[J]. 地下空间, 1997, 17(4): 211-216.
 Guo Dongjie, Wang Lizhong, Chen Yunmin, et al. *Underground Space*, 1997, 17(4): 211-216.
- [12] 张玉军. 钻孔电视探测技术在煤层覆岩裂隙特征研究中的应用[J]. 煤矿开采, 2011, 16(3): 77-80.
 Zhang Yujun. *Coal mining Technology*, 2011, 16(3): 77-80.
- [13] 伍佑伦. 基于岩体断裂力学的巷道稳定性与锚喷支护机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
 Wu Youlun. Study on the stability of laneway and the mechanism of the bolts and shotcrete [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [14] 李贺, 尹光志, 许江, 等. 岩石断裂力学 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1988.
 Li He, Yin Guangzhi, Xu Jiang, et al. *Rock fracture mechanics* [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1988.
- [15] 赖勇, 张永兴. 岩石宏、细观损伤复合模型及裂纹扩展规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 344-342.
 Lai Yong, Zhang Yongxing. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3): 344-342.
- [16] 任建喜, 葛修润, 杨更社. 单轴压缩岩石损伤扩展细观机理 CT 实时试验[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 130-133.
 Ren Jianxi, Ge Xiurun, Yang Gengshe. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(2): 130-133.

(责任编辑 刘志远)

· 学术动态 ·

“第十一次全国营养科学大会 暨 DRIs 国际研讨会”征文



中国营养学会“第十一次全国营养科学大会暨 DRIs 国际研讨会”将于 2013 年 5 月 15—17 日在杭州举办。

征稿范围: (1) 不同人群的营养需要研究; (2) 有关营养需要量研究的方法学; (3) 营养素的生物利用率、代谢、生理功能; (4) DRIs 相关的营养基因组学, 代谢组学研究; (5) 膳食营养与非传染性慢性病; (6) 食物新资源、食物成分和相关健康食品研究; (7) 食物中的植物化学物的生物学功能及其摄入量; (8) 营养状况调查和评价; (9) 营养不良及改善; (10) 营养相关政策; (11) 循证营养学; (12) 营养素和食物成分安全性评价; (13) 其他相关的研究内容。

论文提交日期: 2013 年 1 月 31 日

联系电话: 010-83554781-816, 810, 826

电子信箱: cns2012@vip.126.com

大会网站: www.cnsoc.org/cn/news_info.asp?nid=1492