

文章编号: 1000-7598(2009)11-3318-06

自由边界形状与近边界裂纹相互作用模型研究

方恩权^{1,2}, 蔡永昌¹, 朱合华¹

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室 上海 200092; 2. 广州市地下铁道总公司建设事业总部, 广州 510380)

摘要: 大量的研究表明, 岩爆发生条件与岩石的力学性能有关。岩体中微裂纹的形成、扩展和汇合对岩体的力学性能产生显著影响, 可以导致材料的逐渐劣化直至破坏。对于单轴压缩的岩石试件, 其破坏型式主要是微裂纹的摩擦滑移、自相似平面扩展和弯折扩展。基于断裂力学机制, 对单轴压缩荷载下3种不同边界形状, 即直边、凸形、凹形情况下近边界原生斜裂纹的扩展进行了理论研究, 并运用FLAC数值模拟技术, 建立了基于Interface界面单元的裂纹扩展数值模型。近直边界及凸形边界情况的裂纹扩展使用梁渐近模型来解析薄片岩层的屈曲断裂问题, 对于近凹形边界情况给予简化, 提出了裂纹-圆-椭圆相互作用的修正模型并进行理论分析。研究结果表明, 基于Interface界面单元的裂纹扩展的数值模型正确, 解析解与数值解吻合较好, 相应的梁渐近模型及裂纹-圆-椭圆模型可以合理地分析应力调整过程中裂纹的扩展和裂纹与不同洞室表面形状的相互作用问题, 为岩爆工程及理论研究提出了新的理论依据。

关键词: 岩爆; 近边界裂纹; 裂纹扩展; 单轴压缩; 梁渐近模型; 裂纹-圆-椭圆模型

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

Research on interaction model of free boundary shape on crack propagation

FANG En-quan^{1,2}, CAI Yong-chang^{1,2}, ZHU He-hua^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A great many researches show that the rockburst is related to the mechanical properties of rock. The microcracks in rock mass are formed, expanded and converged which have remarkable influences on the mechanical properties of rock. It may bring about material inferiority and failure. For rock samples under uniaxial compression test, its failure forms include friction slippage, self-similar propagation and crinkle expansion of microcracks. Based on the fracture mechanism, these mechanisms of crack propagation situated close to the boundary are studied by theoretical methods with considering three different boundary shapes, i.e. straight, convex and concave. Based on "Interface" element of FLAC simulation technology, the direct numerical simulations of crack propagation are proposed and analyzed. When the crack is situated close to the straight and convex boundary, the beam asymptotic model can be employed to find the crack-free surface interaction. A crack-hole-ellipse interaction model is proposed when crack propagation is near a concave boundary using some simplified methods. The expressions for crack propagation near different boundaries are all derived. The results show good agreement between the numerical and theoretical results. The proposed model can analyze the propagating, interaction of crack with free boundary due to stress distributing of surrounding rock, which can provide new basis for rockburst and theoretical research.

Key words: rockburst; crack nearby free boundary; crack propagation; uniaxial compression; beam asymptotic model; crack-hole-ellipse interaction model

1 引言

岩爆是高地应力条件下地下洞室开挖过程中, 因开挖卸荷引起洞室周边围岩产生应力分异作用, 储存于硬脆性围岩中的弹性应变能突然释放, 且产

生爆裂松脱、剥离、弹射甚至抛掷性等破坏现象的一种动力失稳地质灾害^[1]。而岩爆实际就是受变形局部化影响, 岩体表面裂纹在短时间内受强相互作用而贯通引起的岩体突然破坏过程。因此, 研究单个或有限裂纹的扩展对岩爆的研究显得极为重要^[2-4]。

收稿日期: 2008-06-03

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(No. 107041)资助, 国家自然科学基金资助(No. 40672184)。

第一作者简介: 方恩权, 男, 1980年生, 工学博士, 工程师, 主要从事岩土及地下结构领域方面的工程建设管理工作。E-mail: fenser@sohu.com

考虑洞室表面附近存在周向压应力, 当应力达到一定大小, 初始裂纹将会平行或偏向最大主应力的方向扩展, Dyskin 等^[5]研究认为, 这种情况下初始裂纹将以稳定的方式朝压缩方向产生分叉。随着载荷增加, 裂纹长度将相应增长。当裂纹增长时, 自由表面对裂纹扩展具有重要影响。在裂纹达到一定长度后, 自由表面的存在导致裂纹非稳定扩展, 从而使裂纹长度突然增长并使岩体分裂形成薄层。薄层的厚度取决于该初始裂纹与自由表面的距离。分裂层的长度由压应力集中区的长度决定, 如图 1 所示, 图中 σ 为围岩的压应力。

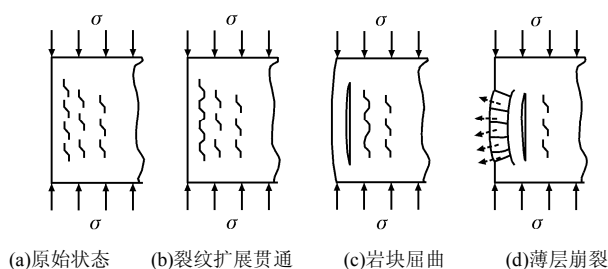


图 1 近自由面岩石断裂机制

Fig.1 Mechanism of rock fracture near a free surface

李广平^[6]在 Dyskin 的基础上就岩爆机制作了相关探讨。左宇军^[7]建立了洞室层裂屈曲岩爆的突变模型, 对洞室表面裂纹扩展引起的层裂屈曲现象给予充分的探讨。郭彦双^[8]对辉长岩中张开型表面裂隙破裂模式进行了研究。综上研究成果, 很少有文献就不同自由边界形状对近边界裂纹扩展的影响进行研究, 本文以断裂力学为基础, 设计 3 种自由边界形状的模型, 即直边、凸形、凹形, 在模型内部设置预制斜裂纹, 运用相关理论及数值方法对近边界裂纹与边界相互作用的模型进行研究, 以获得有益结论。

2 近边界裂纹渐近性模型分析

2.1 近直边界及凸边界的裂纹扩展力学模型

假设在岩壁附近存在平行于表面的压应力集中区 (如图 2 (a) 所示)。当压应力达到某一极限值时, 一些原生裂纹沿压应力方向开始扩展, 并在原生裂纹两端形成翼裂纹。当翼裂纹扩展长度较长时, 即分翼形裂纹扩展长度 l 远大于原生裂纹的半长 a 时, 可以用图 2 (b) 的等效裂纹系统来代替, 即将两条翼裂纹作为一条平行最大主压应力 σ 方向的共线裂纹来考虑, 共线裂纹总长为 $2l$, 主裂纹的影响通过作用在等效裂纹中心上的一对共线集中力 P 来反映。 P 表达式如下:

$$P = 2a\sigma\beta(\alpha) \beta(\alpha) = \sin^2\alpha \cos\alpha(1 - \tan\alpha \tan\mu) \quad (1)$$

式中: α 为原生裂纹的倾角; μ 为摩擦角。

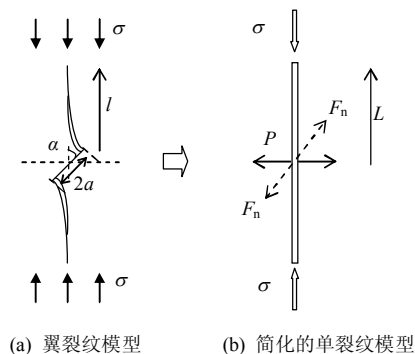


图 2 翼裂纹分支等效示意图

Fig.2 Model of wing crack under compression

当裂纹接近于自由边界时, 也就是 $l/h \gg 1$, 此处 h 为裂纹至自由边界的距离, 可以把裂纹与边界之间的分裂层看作一定荷载作用下的梁 (对于平面应变情况为板)^[9], 其应力强度因子、能量释放率及裂纹张开度可以通过匹配相应的内部及外部渐近解求得, 其理论模型见图 3^[10]所示。

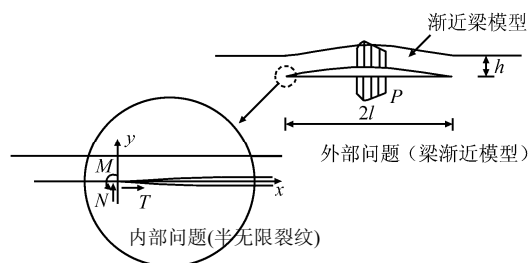


图 3 近边界裂纹

Fig.3 The crack close to boundary

在图 3 所示的内部问题中, 当半裂纹表面有任意加载项时 (如集中力和力偶作用), 可以求得应力强度因子及裂纹张开度的两个主导渐近项。而对于图 3 的外部问题, 可以使用梁渐近模型予以求解, 得出表面裂纹位置的渐近近似解。

2.2 梁渐近模型的应力强度因子

按照梁渐近模型理论, 把裂纹与边界之间的薄层看成一固支梁系统。在集中力 P 作用下, 使用外部问题的应力强度因子 K_I 的渐近解:

$$K_I^b = P \frac{l}{h^{3/2}} \left[0.483 + 0.67\varepsilon + O(\varepsilon^2) \right] \quad (2)$$

式中: $\varepsilon = h/l$ 。

将集中力 P 的表达式 (1) 代入式 (2) 中, 略去无穷小项, 可以得到:

$$K_I^b = a\beta(\alpha) \frac{l}{h^{3/2}} \left(0.966 + 1.34 \frac{h}{l} \right) \quad (3)$$

依据线弹性断裂力学, 翼裂纹扩展的极限条件为 $K_I = K_{IC}$, 于是可以求得近边界裂纹扩展时的应力为

$$\sigma = \frac{K_{IC} h^{3/2} l}{a\beta(\alpha)(0.966l + 1.34h)} \quad (4)$$

2.3 近凹边界的裂纹扩展模型

近凹形边界附近的裂缝扩展目前没有合适的模型。笔者认为, 近凹边界的裂纹扩展与贯通可以看作圆形洞室的失稳现象。因为洞室的失稳正是由于作用在平行洞室表面岩层的压应力不断的增加而引起的劈裂破坏。随着载荷的继续增大, 加之自由边界的影响以及裂纹间的相互作用, 自由边界的影响至关重要。此外, 圆形洞室观察到的破坏现象与直边墙洞室的破坏形式有所不同^[11], 随着圆形洞室的不断失稳, 圆形洞室将呈现出椭圆形, 同时洞室周围的集中应力也将随着洞室形状的改变而有所变化。在此, 可以假设凹形边界情况下裂纹扩展模型即为裂纹-圆-椭圆相互作用模型。

2.3.1 裂纹-圆-椭圆相互作用模型

考虑双向受压椭圆洞室情况, 其长短轴分别为 a 、 b 。作用在岩体上的垂直应力为 p , 侧向应力 $q = \lambda p$, 如图 4 (a) 所示。初始裂纹的长度为 $2l$, 其距圆孔边界的距离为 h 。为了简化计算, 在圆孔边界附近的裂纹可以简化为一条圆弧, 如图 4 (b) 所示, 其半径 R_c 等同于相应的椭圆曲率半径与垂直距离 h 的和, 表达式如下:

$$R_c = \frac{2ab^2}{a^2 + b^2} + h \quad (5)$$

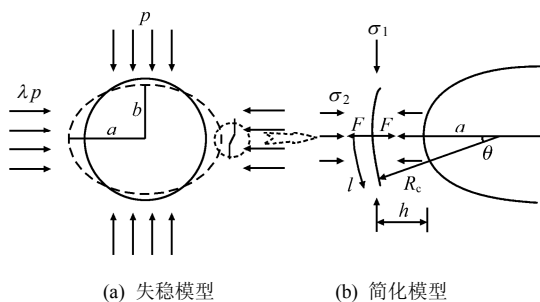


图 4 近凹边界裂纹扩展模型

Fig.4 The crack model close to concave boundary

2.3.2 模型的应力强度因子(SIF)

根据文献[7], 运用 Dyskin 所提出的偶渐近解析法, 可以求得裂纹-圆-椭圆相互作用模型解析解, 该情况可以看作远场应力作用下无限平板中任意形状的缺陷。基于复变函数理论, 本文对文献[7]的公式进行修正, 应力强度因子可以由垂直及水平应力值 $\sigma_1 + \Delta\sigma_1$ 、 $\sigma_2 + \Delta\sigma_2$ 来求得, 并考虑椭圆边界对应力值的影响, 取应力修正系数为 1/3, 该模型表达式如下所示:

$$\begin{aligned} \sigma_1 + \Delta\sigma_1 = & -\frac{\sigma_1}{2(m - \zeta_h^2)^3} \{ 2\zeta_h^6 + [(1 + \lambda)(m^2 + 1) - \\ & 2(2 + \lambda)m]\zeta_h^4 + [(-5\lambda - 1)m^2 + 3 + (1 + \lambda)m^3 + \\ & (7\lambda - 5)m - 3\lambda]\zeta_h^2 + (1 + \lambda)m^3 - (1 - \lambda)(m - 2m^2) \} 1/3 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sigma_2 + \Delta\sigma_2 = & \frac{\sigma_1(1 - \zeta_h^2)}{2(m - \zeta_h^2)^3} \{ 2\lambda\zeta_h^4 + [-(1 + \lambda)m^2 + 2m + \\ & 3(1 - \lambda)]\zeta_h^2 - (1 + \lambda)m^3 - 2(1 - \lambda)m^2 - (1 - \lambda)m \} 1/3 \end{aligned} \quad (7)$$

其 I 型应力强度因子为

$$\begin{aligned} K_I = & \frac{2\sqrt{\pi}}{\sqrt{R_c} \sin \theta (3 - \cos \theta)} \left[(F + \Delta F) \frac{3 \cos \theta - 1}{2\pi} - \right. \\ & \left. (\sigma_2 + \Delta\sigma_2) R_c \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

式中: F 为简化后的裂纹表面作用的集中力, 且有:

$$\left. \begin{aligned} F + \Delta F = & 2a\bar{\beta}(\sigma_1 + \Delta\sigma_1), \bar{\beta} = 0.212 \cdot 2 \\ R = & \frac{a+b}{2}, m = \frac{a-b}{a+b}, c = 1 + m + \frac{h}{R} \\ \zeta_h = & [c + \sqrt{c^2 - 4m}]/2, \theta = l/R_c \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

根据该修正的裂纹-圆-椭圆模型, 针对单轴受压的凹形边界情况, 可以对上述各个参数予以演变如下:

$$\left. \begin{aligned} R = & a, m = 0, \zeta_h = c = (R + h)/R = R_c/R \\ \sigma_1 + \Delta\sigma_1 = & \frac{\sigma_1}{6\zeta_h^6} [2\zeta_h^4 + \zeta_h^2 + 3], \sigma_2 + \Delta\sigma_2 = \frac{\sigma_1(\zeta_h^2 - 1)}{2\zeta_h^4} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

再将式 (9)、(10) 代入式 (8), 可得单轴受压情况下近凹形边界裂纹尖端的 I 型应力强度因子:

$$\begin{aligned} K_I = & \frac{1}{\sqrt{R_c} \sin \theta (3 - \cos \theta)} \left\{ 2a\bar{\beta} \left[\frac{\sigma_1}{6\zeta_h^6} (2\zeta_h^4 + \zeta_h^2 + 3) \right] \cdot \right. \\ & \left. \frac{3 \cos \theta - 1}{\sqrt{\pi}} + \frac{\sqrt{\pi}\sigma_1(1 - \zeta_h^2)}{\zeta_h^4} R_c \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

使用裂纹扩展的准则 $K_I = K_{IC}$, 可以求得近凹形边界裂纹扩展时的应力:

$$\sigma_1 = \frac{K_{IC} \sqrt{R_c \sin \theta (3 - \cos \theta)}}{a \beta \frac{1}{3 \zeta_h^6} \psi \frac{3 \cos \theta - 1}{\sqrt{\pi}} + \frac{\sqrt{\pi (1 - \zeta_h^2)}}{\zeta_h^4} \delta} \quad (12)$$

式中: $\psi = 2\zeta_h^4 + \zeta_h^2 + 3$, $\delta = R_c \sin \theta \cos \frac{\theta}{2}$, $\zeta_h = R_c / R$ 。

3 近边界裂纹扩展的数值模型

3.1 原生裂纹面模型的建立

本文采用 ITASCA 公司的 FLAC^{3D} 程序来建立裂纹扩展的数值模型, 从而对上述提出的渐近模型解析解进行相关的数值验证。FLAC^{3D} 可以模拟岩石材料的二维力学行为, 采用快速拉格朗日算法, 把计算区域划分为若干四边形网格, 每个网格点及四节点围成的区域存储定义岩石的性质参数。对于模型中原生裂纹面的模拟, 可以使用 FLAC 中的 Interface 命令。通过对原生裂纹面分界面两侧岩石的重度、内摩擦角、凝聚力、体积模量、剪切模量以及裂纹分界面的法向刚度和切向刚度等系列参数的设置对岩体内的裂纹面进行模拟。在 FLAC 数值模型中, 笔者使用如下方法定义裂纹面: 用 Interface 命令将数值模型中定义一条独立界面, 将模型“分离”成上下两个部分, 有裂纹的界面(Interface), 见图 5 中所示的 1, 定义其相应的材料特性, 裂纹可以滑动或者剥离; 而无裂纹的界面, 应视为无滑移和剥离的岩石体, 见图 5 中所示的 2, 将其法向刚度及切向刚度均设为邻近区域单元刚度的 10 倍值以确保无滑移和剥离现象。

3.2 模型设计与参数设置

根据模拟目的和模型设计的要求, 本次数值试验考虑单轴压缩情况, 采用各向同性弹性材料模型和 Interface 界面单元, 用以模拟不同边界形状影响下均匀介质中裂纹扩展的力学行为。细化的 FLAC 网格单元用以模拟材料的微观结构, 裂纹端部应力由裂纹尖端附近的单元应力来替代, 网格单元也可以用来作为基本的破裂单元。单元的破坏分析则是根据裂纹端部单元的最大主应力是否超过材料的局部拉应力强度的破坏准则来检查材料中是否有单元破坏, 对破坏单元则采用刚度特性退化(置空单元)的方法进行处理。为了模拟试验机加载情况, 使用 FLAC 提供的 FISH 语言设计增量加载系统, 对于每一步给定的应力增量, 首先进行应力计算, 再根据破坏准则来判断模型中是否有破坏单元。如果没有, 继续增加一个应力增量, 进行下一步应力计算; 如

果有破坏单元, 则将该单元置空(NULL), 再重新进行当前步的应力计算。重复上述进程, 直到整个材料产生宏观破坏。

3 种不同边界的模型尺寸根据边界的不同情况有所变化, 模型水平及垂直边界范围均为 120 mm × 220 mm, 网格剖分为 100 × 200。凸形及凹形模型的侧边界可以使用标准圆弧画出, 为验证上述提出的近边界裂纹与边界相互作用模型的正确性, 使内部原生裂纹中心距边界距离约为 10 mm。为了节省运行时间, 均采用对称模型(近左右边界附近均有原生裂纹), 故数值计算时取其 1/2 进行计算。根据原生裂纹面与应力方向的夹角不同, 分别设置倾角 α 为 30°、45°、60°、75° 共 4 组试样, 采用平面应力分析, 其有限差分网格模型如图 5 所示。

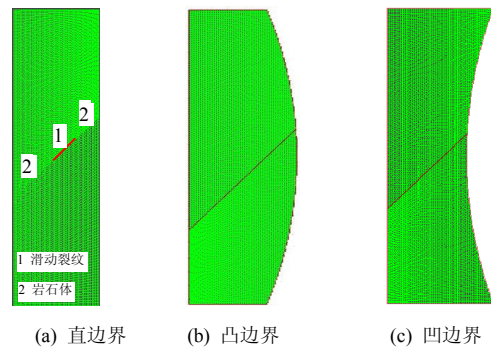


图 5 裂纹扩展数值模型
Fig.5 Numerical model of crack propagation

数值计算时, 将分级施加外荷载, 拉裂单元的应力将自动分配到相邻单元中去, 依据文献[12]所使用的部分试验资料, 模型的力学参数如下: 弹性模量 $E = 4.2 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.2$, 体积弹模 $K = 2.33 \text{ GPa}$, 剪切模量 $G = 1.75 \text{ GPa}$, 重度 $\rho = 27 \text{ kN/m}^3$, 裂纹面的摩擦角 $\varphi = 0^\circ$, 裂纹面的法向刚度为 2.5 GPa/m , 切向刚度为 0, 抗拉强度为 1.6 MPa 。裂纹的断裂韧性 K_{IC} 为材料的固定参数, 其值由数值模拟中原生裂纹出现翼裂纹扩展时的应力状态所对应的值求出。

4 数值模拟结果分析

篇幅限制, 本文仅取本次数值模型中 $\theta = 45^\circ$ 的近边界裂纹扩展进行相关分析, 其最大主压应力分布如图 6 所示。图中显示了裂纹尖端部分单元在达到相应破坏状态后, 破坏的单元均被置空, 从而形成翼形裂纹。可以看出, 在单轴压缩荷载作用下, 翼形裂纹在原生裂纹两端以一弧形向前扩展, 起裂角与原生裂纹夹角基本在 $70^\circ \sim 73^\circ$ 之间, 随着压应力

的增加,很快平行于压应力方向,即沿着原生裂纹的尖端不断向两侧呈 Z 型扩展,最终沿最大压应力方向扩展,与 Ashby 等^[13]的研究结果相同,说明本文基于 Interface 界面单元建立的裂纹扩展模型具有正确性。

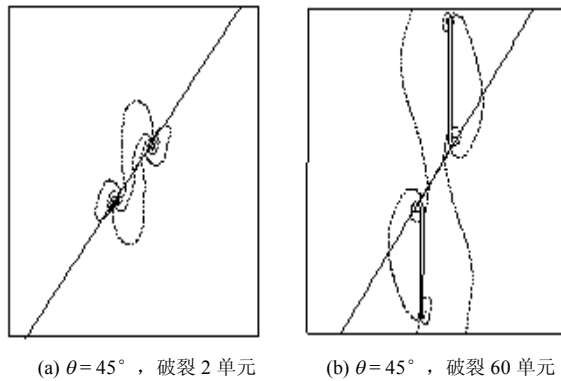


图 6 裂纹扩展后的最大主压应力分布
Fig.6 Distribution of the major principal stress with the crack propagation

图 7 给出了 $\theta = 45^\circ$ 时数值试验与上述模型解析解的对比。结果表明,理论模型的解析解与数值试验结果相当吻合,说明该模型具有很好的适用性。从图中可以看出,对于直边界和凸边界情况,原生裂纹在当 $K_I = K_{Ic}$ 时就会发生起裂,随之有稳定扩展与非稳定扩展两种情况出现。当裂纹扩展 Δl 的长度之后,如果停止加载,则裂纹随之停止增长。由于数值模拟过程中需不断增加外载荷至以进一步追踪裂纹的扩展轨迹,这种裂纹处于稳定扩展状态。而当裂纹长度扩展到临界长度 l_{cr} 时,如减少外载(或保持外载)就可保持裂纹继续扩展,这种情况裂纹处于非稳定扩展状态。载荷一旦增加致使裂纹扩展,如不减小外载,裂纹将继续扩展,从而导致试样的最终破坏。

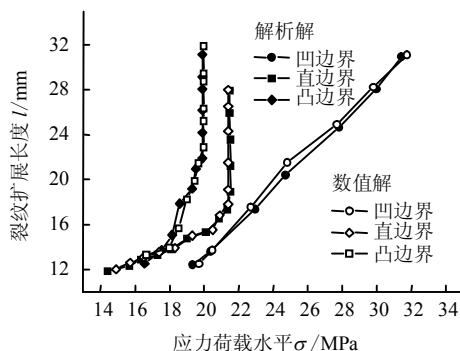


图 7 $\theta = 45^\circ$ 时裂纹扩展长度与荷载关系图
Fig.7 Distribution of crack propagation length with load level for the crack inclined at 45°

另外,从图 7 所示的数据可以看出,边界的形状对裂纹扩展是有一定影响的。在同等条件下,凸形边界的近边界裂纹扩展所需的初始应力及其非稳定扩展的应力均比直边界情况有所降低,其相应的非稳定裂纹扩展长度相比直边界也较低。而对于凹形边界,其裂纹初始扩展应力较另外两种边界情况都高,并且由于边界的限制及影响作用,也就是裂纹圆-椭圆模型公式中应力值 $\sigma_2 + \Delta\sigma_2$ 的影响,裂纹在发生起裂之后,一直处于稳定扩展阶段,没有发生非稳定扩展,直至试样最终发生屈曲失稳破坏。此现象值得学者们关注和思考。

5 结 论

(1) 基于 Interface 界面单元建立的裂纹扩展模型可以较好地模拟含原生裂纹试样翼裂纹的扩展,从而导致试件破坏的过程,具有一定的正确性。

(2) 渐近梁模型及裂纹-圆-椭圆模型与数值试验表现出较好的一致性,可以合理地分析应力调整过程中裂纹的扩展和裂纹与洞室表面的相互作用问题,该模型为不同边界情况影响裂纹扩展的解析给出了新的思路。

(3) 数值模拟结果显示,凹边界情况下裂纹扩展较为稳定,而直边界及凸边界情况裂纹扩展过程由稳定扩展向非稳定扩展逐步进行。

参 考 文 献

- [1] 赵本钧. 冲击地压及其防治[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.
- [2] 邵鹏, 东兆星, 张勇. 岩石爆破模型研究综述[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 91—96.
SHAO Peng, DONG Zhao-xing, ZHANG Yong. Comment on the research of rock blast models[J]. *Rock and soil mechanics*, 1999, 20(3): 91—96.
- [3] 李廷芥, 王耀辉, 张梅英, 等. 岩石裂纹的分形特性及岩爆机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 6—10.
LI Ting-jie, WANG Yao-hui, ZHANG Mei-ying, et al. Fractal properties of crack in rock and mechanism of rock-burst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(1): 6—10.
- [4] 李广平. 岩体的压剪损伤机理及其在岩爆分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(6): 49—55.
LI Guang-ping. The mechanism of compression-shear damage for rock mass with its application to rockburst[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1997,

- 19(6): 49—55.
- [5] DYSKIN A V, GERMANOVICH L N. Model of rockburst caused by cracks growing near free surface[C]// Proceedings of the 3rd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines. Kingston: Balkema A A, 1993: 169—174.
- [6] 李广平. 岩爆的损伤断裂模型[J]. 岩土力学, 1997, 18(8): 105—109.
LI Guang-ping. The damage fracture model for rockburst [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1997, 18(8): 105—109.
- [7] 左宇军, 李夕兵, 赵国彦. 洞室层裂屈曲岩爆的突变模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(2): 311—316.
ZUO Yu-jun, LI Xi-bing, ZHAO Guo-yan. A catastrophe model for underground chamber rockburst under lamination spallation bucking[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2005, 36(2): 311—316.
- [8] 郭彦双, 黄凯珠, 朱维申, 等. 辉长岩中张开型表面裂隙破裂模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 525—531.
GUO Yan-shuang, WONG R H C, ZHU Wei-shen, et al. Study on fracture pattern of open surface-flaw in gabbro[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(3): 525—531.
- [9] RICE J R, ROSENGREN G F. Plane strain deformation near a crack tip in a power law hardening material[J]. **Journal of Mechanics and Physics of Solids**, 1968, 16(1): 1—2.
- [10] DYSKIN A V, GERMANOVICH L N, USTINOV K B. Asymptotic analysis of crack interaction with free boundary[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2000, 37(6): 857—886.
- [11] GERMANOVICH L N, DYSKIN A V. Fracture mechanisms and instability of openings in compression[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37 (1—2): 263—284.
- [12] LI YINPING, CHEN LONGZHU, WANG YUANHAN. Experimental research on pre-cracked marble under compression[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2005, 42(9—10): 2505—2516.
- [13] ASHBY M F, HALLAM S D. The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states[J]. **Acta Metallica**, 1986, 34(3): 497—510.

上接第 3317 页

- [9] KAZIMOGLU Y K, MCDOUGALL J R, PYRAH I C. Unsaturated hydraulic conductivity of landfill waste[C]//Unsaturated Soils. [S. l.]: ASCE, 2006: 1525—1534.
- [10] BLIGHT G E, BALL J M, BLIGHT J J. Moisture and suction in sanitary landfills in semiarid areas[J]. **Journal of Environmental Engineering**, 1992, 118(6): 865—877.
- [11] STRAUB W A, LYNCH D R. Models of landfill leaching: moisture flow and inorganic strength[J]. **Environmental Engineering Division**, 1982, 108: 231—250.
- [12] KORFIATIS G P, DEMETRACOPOULOS A C. Moisture transport in a solid waste column[J]. **Journal of Environmental Engineering**, 1984, 110(4): 789—796.
- [13] NOBLE J J, ARNOLD A E. Experimental and mathematical modeling of moisture transport in landfills[J]. **Chemical Engineering Communication**, 1991, 100: 95—111.
- [14] FREDLUND D G, XING A, HUANG S Y. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31: 533—547.
- [15] VAN GENUCHTEN M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. **American Journal of Soil Science Society**, 1980, 44: 892—898.
- [16] KAZIMOGLU Y K, MCDOUGALL J R, PYRAH I C. Unsaturated hydraulic conductivity of landfill waste[C]//Unsaturated Soils. [S. l.]: ASCE, 2006: 1525—1534.
- [17] BROOKS R H, COREY A H. Hydraulic properties of porous media[M]. Fort Collins: Colorado State University, 1964.
- [18] BEAR J. Hydraulics of groundwater[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1979.