

地下洞室围岩劈裂破坏判据及数值模拟研究

郭群¹, 李江腾¹, 赵延林²

- (1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭, 411201)

摘要: 对地下洞室围岩劈裂破坏的形成机理和裂纹扩展演化模型进行探讨。根据断裂力学原理, 考虑原裂纹对翼型裂纹的影响, 推求压剪应力状态下翼型裂纹尖端的应力强度因子 K_I^{wing} 演化方程。以金川三矿区为工程背景, 根据实测的岩石力学相关参数和地质条件, 数值模拟其围岩的劈裂破坏区。当翼型裂纹应力强度因子 K_I^{wing} 达到岩石的Ⅱ型断裂韧性 K_{IC} 时, 地下洞室围岩裂纹发生劈裂贯通的破坏判据, 用 FISH 语言将劈裂破坏判据编程内嵌到 FLAC3D 中确定围岩的劈裂范围。研究表明: 数值模拟结果可为地下工程的稳定性评价及支护设计提供参考。

关键词: 劈裂破坏判据; 应力强度因子; 数值模拟; 劈裂破坏区

中图分类号: O342.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2010)04-1535-05

Splitting failure criterion and numerical simulation for underground surrounding rock masses

GUO Qun¹, LI Jiang-teng¹, ZHAO Yan-lin²

- (1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Hunan Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Mechanism of splitting failure and crack growth model were discussed in underground caverns surrounding rock masses. According to fracture mechanics theory, the evolutive equation of wing crack stress intensity factor, K_I^{wing} , was deduced in compressive shear stresses state, in which the effect of original crack on wing crack was taken into account. The splitting failure criterion of underground caverns surrounding rock masses was put forward when wing crack stress intensity factor (K_I^{wing}) was up to the mode-II fracture toughness of rock (K_{IC}). The criterion was programmed into FISH language and embedded into FALC3D. Taking Jinchuan Mine as an engineering case, the splitting failure range was simulated by rock mechanics parameters and geological condition. The results show that the estimated results can provide basis for stability evaluation and support design.

Key words: splitting failure criterion; stress intensity factor; numerical simulation; splitting damage range

在开挖采矿井巷、深部隧道等地下结构时, 积聚在岩体中的大量弹性能会释放, 在开挖面附近的岩体将发生脆性响应如岩爆、岩石崩落、弹射、劈裂破坏等现象。洞室围岩出现纵向劈裂裂缝, 在洞室附近形

成局部或整个断面的岩板结构, 造成坚固岩体软化, 对洞室的稳定性造成威胁。这种软化结构的出现与围岩应力水平和围岩内裂纹的发生、扩展密切相关。在研究断续节理岩体劈裂破坏的贯通机理方面, 人们

收稿日期: 2009-10-21; 修回日期: 2010-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50774093)

通信作者: 郭群(1969-), 女, 湖南汉寿人, 实验师, 从事岩石力学实验与教学工作; 电话: 13278851082; E-mail: guoqun69@163.com

进行了大量的理论^[1-3]、试验^[4-6]和数值模拟^[7-9]研究,取得了许多有实用价值的成果。对于某些特殊形状的洞室围岩,朱大勇等^[10-11]采用复变函数法对围岩应力与变形进行计算,并得出一些特殊形状的洞室围岩的弹性解析解。对劈裂裂缝形成的板岩结构,一些学者应用薄板稳定性理论讨论了地下洞室围岩出现层裂现象的稳定性问题^[12-13]。人们主要采用强度判据和位移判据^[14-15]对岩石破坏判据方面进行研究,这些判据对认识围岩的破坏机制和强度破坏现象以及支护设计具有至关重要的作用。目前,人们对形成劈裂破坏的断裂判据研究不多,为此,本文作者从劈裂裂纹的贯通机制出发,得到翼型裂纹尖端的应力强度因子,在此基础上,根据劈裂裂纹的扩展过程,确定地下洞室围岩发生劈裂破坏的判据,通过该判据确定围岩的劈裂范围。将劈裂判据编成 FISH 语言内嵌到 FLAC3D 中,数值模拟其围岩的劈裂破坏区,以便为地下工程的稳定性评价及支护设计提供参考。

1 劈裂破坏的形成机理

当洞室开挖卸载后,围岩处于压剪应力状态,随着洞室开挖范围的扩大,围岩所承受的应力水平不断增加,在原先载荷作用下不发生扩展的初始裂纹则可能扩展形成翼型裂纹。根据断裂力学原理,裂纹扩展方向最终大致与最大主应力方向平行,其扩展示意图如图 1 所示。随着载荷增加,翼型裂纹长度将相应增长,当达到一定长度后,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,形成平行于洞室边墙的尺寸较大的劈裂裂纹,见图 2。贯通后的岩板在纵向载荷的进一步作用下,会发生屈曲破坏。

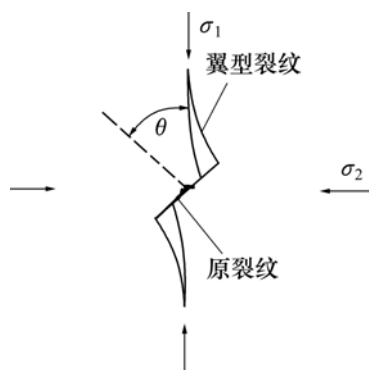
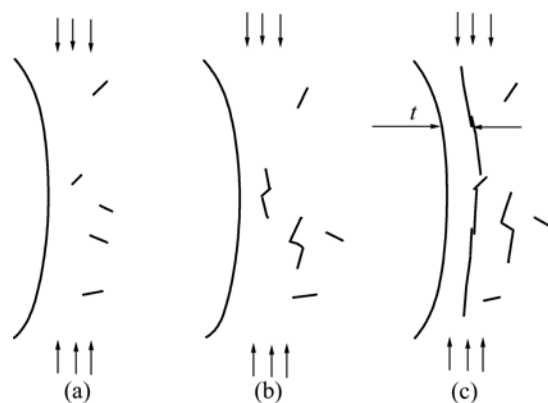


图 1 裂纹扩展示意图

Fig.1 Schematic diagram for crack propagation



(a) 初始裂纹; (b) 裂纹扩展; (c) 岩板形成

图 2 劈裂破坏形成示意图

Fig.2 Qualitative description for splitting

2 裂纹扩展演化模型及劈裂破坏判据

处于压剪状态的岩石其裂纹尖端仍处于拉剪应力状态,使裂纹转折。断裂面的分离是由于张应力超过了原子间的结合力,并导致Ⅱ型破坏,因而压剪断裂与Ⅱ型断裂密切相关^[4],即压剪应力状态下裂纹的扩展机理必然包括Ⅱ型断裂的机理。因此,可通过建立Ⅱ型应力强度因子与 K_{IC} 的关系来判断是否发生劈裂破坏。

天然岩石的结构具有显著特征,结构面分布具有非均质性和各向异性。在岩石细观损伤力学研究中,通常将岩石上非贯通的裂隙、节理、界面裂纹等都简化为圆形币状裂纹,参照文献^[16],将圆形币状裂纹简化为二维问题来处理,如图 3 所示。

对于二维裂纹,设长度为 $2a$,与 x 轴的夹角为 β 的原裂纹受应力 σ_1 和 σ_2 ($\sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0, \sigma_1$ 为最大主应力)作用(见图 3(a))。在 σ_1 和 σ_2 作用下,当有效剪应力达到临界值时,原裂纹以与其呈 θ 角的方向发生扩展,初始裂纹尖端将产生翼裂纹。参照文献^[4, 15],翼型裂纹尖端的应力强度因子 K_I^{wing} 可写成如下形式:

$$K_I^{\text{wing}} = K_I^{\text{isol}} + K_I^{\text{infl}} \quad (1)$$

式中: K_I^{wing} 为翼型裂纹尖端的应力强度因子; K_I^{isol} 是长度为 l 的单个翼型裂纹受相同双向压应力 σ_1 及 σ_2 时的应力强度因子; K_I^{infl} 是长为 $2a$ 的原裂纹在 σ_1 及 σ_2 作用下对翼型裂纹尖端的应力强度因子的影响。

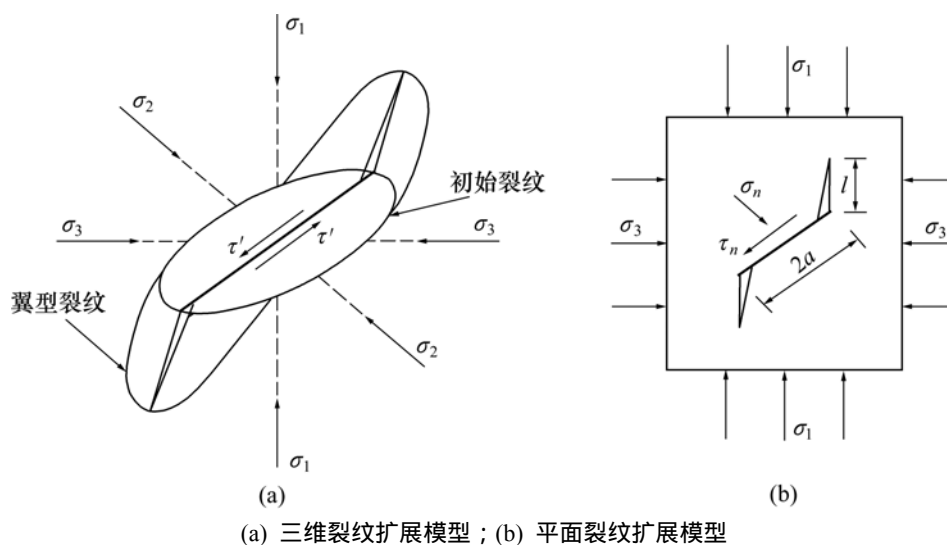


图3 三维币状裂纹扩展简化成平面裂纹扩展示意图

Fig.3 Sketch of 3D penny shape crack propagation equivalent to 2D crack propagation

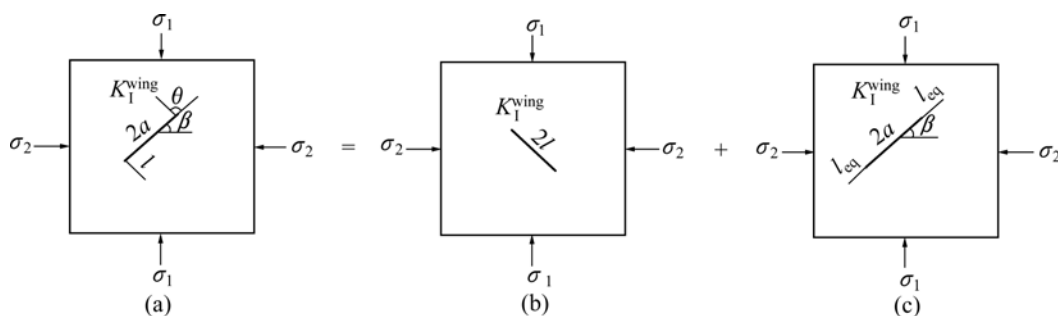


图4 翼型裂纹应力强度因子叠加示意图

Fig.4 Stress intensity factor superposition of wing cracks

$$K_I^{\text{isol}} = \frac{1}{2}[(\sigma_1 + \sigma_2) + (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2(\theta + \beta)] \sqrt{\pi l} \quad (2)$$

$$K_I^{\text{infl}} = -3\tau_{\text{eff}} \sqrt{\frac{a+l_{\text{eq}}}{\pi}} \arcsin\left(\frac{a}{a+l_{\text{eq}}}\right) \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

式中: τ_{eff} 为裂纹面间的有效剪应力。

式(3)反映了原裂纹对翼型裂纹应力强度因子 K_I^{wing} 的贡献。将式(2)和式(3)相加,有:

$$K_I^{\text{wing}} = -3\tau_{\text{eff}} \sin \theta \sqrt{\frac{a+l_{\text{eq}}}{\pi}} \arcsin\left(\frac{a}{a+l_{\text{eq}}}\right) \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} + \frac{1}{2}[(\sigma_1 + \sigma_2) + (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2(\beta + \theta)] \sqrt{\pi l} \quad (4)$$

式(4)即为压剪应力下翼型裂纹应力强度因子 K_I^{wing} 与翼型裂纹长度 l 及原裂纹几何参数的关系。

由式(4)所得应力强度因子发现:当应力强度因子大于岩石的Ⅱ型断裂韧度 K_{IC} 时,裂纹的扩展必将转化为裂纹的失稳扩展,形成贯通的尺度较大的劈裂裂

纹,从而导致劈裂破坏。

$$K_I^{\text{wing}} = K_{\text{IC}} \quad (5)$$

即

$$-3\tau_{\text{eff}} \sin \theta \sqrt{\frac{a+l_{\text{eq}}}{\pi}} \arcsin\left(\frac{a}{a+l_{\text{eq}}}\right) \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} + \frac{1}{2}[(\sigma_1 + \sigma_2) + (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2(\beta + \theta)] \sqrt{\pi l} = K_{\text{IC}} \quad (6)$$

式中: K_{IC} 由断裂实验得到。在裂纹几何参数确定以后,可由式(6)来判断地下洞室围岩产生劈裂破坏的范围。将劈裂判据编成 FISH 语言内嵌到 FLAC3D 软件中,得到劈裂破坏区范围分布图。

3 工程实例分析

金川有色金属(集团)公司 矿区矿体具有倾斜、厚度大、破碎软弱、品位低、节理裂隙发育的特点,

表 1 裂隙优势面概化表

Table 1 Preferred plane generalization in fractured rock

组号	优势面所占百分比/%	倾向/(°)				倾角/(°)			
		最小值	最大值	均值	方差	最小值	最大值	均值	方差
1	32.37	145	228	186.20	23.06	0	90	64.2	18.90
2	23.00	54	138	96.27	22.70	5	90	54.2	20.50
3	16.31	-27	42	7.20	19.52	0	90	59.6	18.40
4	15.61	262	315	289.50	14.97	5	90	63.0	18.80

主要为二辉橄榄岩，岩体单块强度高，整体强度低等。裂隙优势面概化表见表 1。在计算中只考虑第 1 组主节理组，断续节理迹长为 1.1 m。二辉橄榄岩计算参数如下：弹性模量为 26.7 GPa，泊松比 μ 为 0.24，抗压强度 σ_b 为 42.96 MPa，断裂韧度 K_{IC} 为 $0.97 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ 。

计算模型力学边界条件如下：左、右边界及底面均采用法向约束，初始地应力为自重应力。整个计算区域(长×宽)为 65 m×65 m，洞室宽为 4.6 m，高为 4.0 m。图 5 所示为劈裂破损区，图 6 所示为劈裂破损区位移矢量。

从图 5 和图 6 可以看出：巷道围岩劈裂区并不是均匀发展，主要发生在围岩两侧，其原因是顶板中形成的损伤带承载拱将以侧帮破裂带为基座，而侧帮破裂带岩体自身的稳定性差，变形量大，在损伤承载拱传递力的作用下，加剧了这种变形，引起损伤承载拱的失效。计算结果与实际工程结果一致。

4 结论

(1) 从劈裂裂纹的贯通机制出发，根据断裂力学原理，考虑原裂纹对翼型裂纹的影响，推求了压剪应力状态下翼型裂纹尖端的应力强度因子 K_I^{wing} 演化方程。提出当翼型裂纹应力强度因子 K_I^{wing} 达到岩石的型断裂韧度 K_{IC} 时，地下洞室围岩裂纹发生劈裂贯通的破坏判据，用 FISH 语言将劈裂破坏判据编程内嵌到 FLAC3D 中确定围岩的劈裂范围。围岩破裂区是新生裂纹与原有节理相互贯通，导致岩体中产生纵横交错的贯通裂隙所致。

(2) 以金川三矿区为工程背景，根据实测的岩石力学相关参数和地质条件，数值模拟其围岩的劈裂破损区，计算结果可为地下工程的稳定性评价及支护设计提供参考。

参考文献：

[1] ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-hua. Study on the coalescence mechanism of splitting failure of crack-weakened rock subjected to compressive loads[J]. Mechanics Research Communications, 2005, 32(2): 161-171.

[2] 周小平, 张永兴, 王建华. 断续节理岩体劈裂破坏的贯通机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 8-12.

ZHOU Xiao-ping, ZHANG Yong-xing, WANG Jian-hua. Study on coalescence mechanism of splitting failure of rock masses with intermittent joints under compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 8-12.

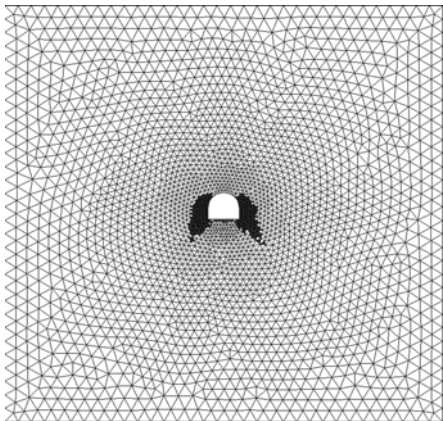


图 5 劈裂破损区形状
Fig.5 Shape of splitting failure range

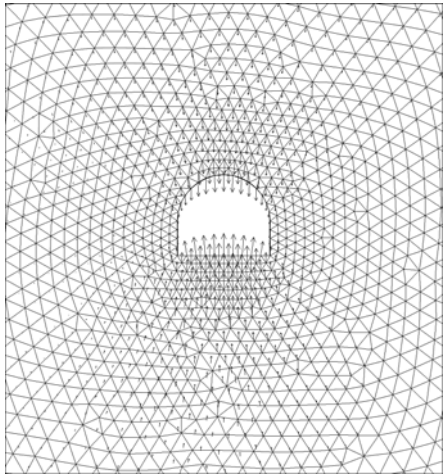


图 6 劈裂破坏区位移矢量
Fig.6 Displacement vector of splitting failure range

- [3] 李江腾, 曹平. 硬岩矿柱纵向劈裂失稳突变理论分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(2): 371-375.
LI Jiang-teng, CAO Ping. Analysis of pillar stability in hard rock mass by longitudinal splitting based on catastrophe theory[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(2): 371-375.
- [4] 陈枫. 岩石压剪断裂的理论实验研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2002: 17-20.
CHEN Feng. Study on theory and experiment of compressive-shear fracture[D]. Changsha: Central South University. School of Resources and Safety Engineering, 2002: 17-20.
- [5] 刘刚, 赵坚, 宋宏伟. 断续节理岩体中围岩破裂区的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 62-66.
LIU Gang, ZHAO Jian, SONG Hong-wei. Model experiments on the broken zone in intermittently jointed surrounding rock[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(1): 62-66.
- [6] 张晓春, 缪协兴, 杨挺青. 冲击矿压的层裂板模型及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 507-511.
ZHANG Xiao-chun, MIAO Xie-xing, YANG Ting-qing. The layer-crack-plate model and testing study of the rockburst in mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 507-511.
- [7] Bobet A, Einstein H. Numerical modeling of fracture coalescence in a model rock material[J]. International Journal of Fracture, 1998, 92(2): 221-252.
- [8] Wilde A J, Aliabadi M H A. 3D dual BEM formulation for the analysis of crack growth[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 23(1): 78-111.
- [9] Wong R H C, Tang C A, Chau K T. Splitting failure in brittle rocks containing pre-existing flaws under uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69(17): 1853-1871.
- [10] 朱大勇, 钱七虎, 周早生. 复杂形状洞室围岩应力弹性解析分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 402-404.
ZHU Da-yong, QIAN Qi-hu, ZHOU Zao-sheng. Elastic solution to stresses of rock masses around openings with complex shape[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4): 402-404.
- [11] 张路青, 杨志法, 吕爱钟. 两平行的任意形状洞室围岩位移场解析法研究及其在位移反分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 584-589.
ZHANG Lu-qing, YANG Zhi-fa, LÜ Ai-zhong. Analysis study on displacement field of surrounding rocks of two parallel tunnels with arbitrary shapes and its application to back-analysis of displacement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 584-589.
- [12] 冯涛, 潘长良. 洞室岩爆机理的层裂屈曲模型[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(2): 287-290.
FENG Tao, PAN Chang-liang. Lamination spallation buckling model for formation mechanism of rockburst[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(2): 287-290.
- [13] 王敏强, 侯发亮. 板状破坏的岩体岩爆判别的一种方法[J]. 岩土力学, 1993, 14(3): 53-60.
WANG Min-qiang, HOU Fa-liang. A method to determine rock burst in rock mass with plateform damage[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, 14(3): 53-60.
- [14] 周国林, 谭国焕, 李启光. 剪切破坏模式下岩石的强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 753-762.
ZHOU Guo-lin, TANG Guo-huan, LI Qi-guang. New strength criterion for rock with shear failure mode[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 753-762.
- [15] Baud P, Reuschle T, Charlez P. An improved wing crack model for the deformation and failure of rock in compression[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1996, 33(5): 539-542.
- [16] 朱维申, 张强勇. 节理岩体脆弹性断裂损伤模型及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 245-249.
ZHU Wei-shen, ZHANG Qiang-yong. Brittle elastic fracture damage constitutive model of jointed rockmass and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(3): 245-249.

(编辑 陈灿华)