

矿柱裂隙扩展机理分析研究

郭建军^{1,2}, 窦源东², 杨玉泉²

(1. 中南大学, 湖南长沙 410083; 2. 山东招金集团有限公司, 山东招远市 265400)

摘要:依据断裂损伤力学理论对矿柱裂隙扩展机理进行了研究。详细讨论了岩石在不同应力状态下裂纹的扩展演化规律, 并对裂纹扩展模型及裂纹群的演化与相互作用进行了分析总结; 采用滑移裂纹模型对矿柱近自由表面裂纹在压应力下的扩展规律进行了分析, 提出了裂纹扩展的应力判据。进一步得出由于裂纹的贯穿与联合复杂作用, 最终在矿柱中形成破坏区, 从而对矿柱稳定性造成影响的结论。

关键词:断裂损伤; 矿柱失稳; 滑移裂纹; 裂纹扩展

由于岩石是含孔隙的材料, 并且广泛分布着原始微细观缺陷, 当岩石承受一定荷载后, 会在其中产生大量细观裂纹, 并随着荷载的增大而逐渐扩展, 这种细观裂纹的扩展总是随着应力的局部集中而产生, 直至裂纹贯通岩石发生破坏^[1,2]。

1 岩石裂纹演化及力学特征

岩石类材料的力学特性和裂纹扩展与材料的微观结构、受力状态和环境密切相关^[3]。

1.1 岩石变形及破坏过程

根据岩石的三轴压缩试验过程曲线(见图1), 岩石受力变形破坏过程可大致分为5个阶段:

- (1) 非线性压密阶段(OA);
- (2) 弹性变形阶段(AB);
- (3) 微裂纹稳定扩展阶段(BC);
- (4) 不稳定破裂发展阶段(CD);
- (5) 破坏阶段(DE)。

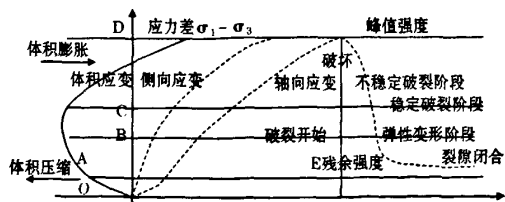


图1 三轴压应力作用下岩石的变形破坏过程

岩石单轴压缩与三轴压缩过程基本一致, 由于有围压作用, 单轴应力峰值小于三轴情况下的峰值。

上述过程表明, 岩石变形与破坏过程实质是载荷作用下其内部裂纹演化的过程。这一过程可用图

2表示^[4-7]。图中 σ_1 、 ε_1 为轴向压力和应变。

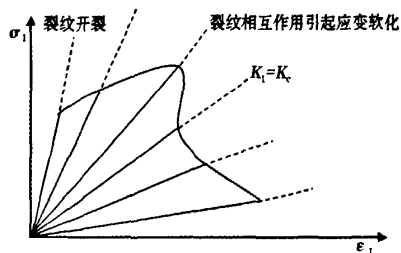


图2 含裂纹扩展和相互作用的岩石试件的应力-应变曲线

1.2 微裂纹(缺陷)扩展模型

大多数岩石的异质微结构导致颗粒(晶)粒尺度上的高度各向异性与应力集中, 往往存在局部张应力, 在岩体内部引起延性I型微裂纹, 随着应力的增加, 进一步连续扩展将是不稳定的。最常用的和最有影响的是滑移开裂模型和预存缺陷扩展模型^[1-4]。

二维滑移开裂模型最初是由Brace和Bomblakis(1963)提出的。微观力学理论和实验研究表明^[5-8]: 该模型对研究岩石中微裂纹延性开裂机制及岩石类材料非线性变形是非常适宜的。

预存缺陷扩展模型是Horii和Nemat-Nasser等在定量分析和实验验证的基础上, 提出的一个二维模型。Germanovich等的研究考虑了二维和三维情况下预存缺陷诱发裂纹的相互作用, 在一定程度上揭示了岩石脆性断裂的机制^[7]。

1.3 裂纹群的演化及相互影响

裂纹群演化控制大裂纹的扩展, 如裂纹尖端的

微裂纹可处理为相互平行的翼裂纹群。Dyskin 和 Germanovich^[7]认为缺陷的切扩展是适宜的翼裂纹取向及结构连续连接的过程,与数学上的理想裂纹相比它具有一定的厚度。

尽管三维缺陷劈裂最终变为类似二维的情况,但裂纹扩展初始阶段在本质上不同于二维,与二维状况相比,单一三维翼裂纹不再扩展,而是大量微裂纹的成核和扩展,相当接近的共线裂纹的相互作用造成的裂端外应力集中等于裂纹已联合造成的应力集中^[9]。

2 矿柱裂隙扩展机理分析

矿柱失稳多发生于高压应力集中的区域,是与采场或中段附近的裂纹扩展密切相关的。基于试验和现场观测到的情况,主要针对金矿矿柱失稳的情况,采用裂纹扩展的滑移开裂模型,分析矿柱近自由表面的裂纹扩展、贯穿联合,提出相应的模型,进而分析矿柱失稳发生时的应力判据。

2.1 矿柱边缘附近矿体受力及损伤

矿柱边缘附近矿体受压状况如图 3(a)和(b)所示,矿柱边缘附近矿体在 Z 方向出现高应力集中区,设应力集中区范围为 L(图 3(b))。同时,自由空间的出现使得沿 Y 方向出现应力由 0 过渡到远场应力 σ_0 的应力过渡区,在这个过渡区,铅垂线应力高于远场应力,存在应力集中,且围岩的侧压(至少一个方向)远低于铅垂压应力。

由于金矿体自身含有缺陷,高应力作用使这些缺陷得以扩展,矿柱边缘附近产生大量的再生裂纹,所以,在过渡区内由边界往里将存在大量的微裂纹,且矿柱边缘附近矿体多于矿柱深处(沿 Y 方向)的矿体。由于这些损伤的存在,尽管其整体仅承受压力,但是金矿体内将产生局部各向异性,如缺陷局部形成应力集中,使得缺陷边缘沿最大压应力方向产生张性翼裂纹。

2.2 矿柱近自由面的裂纹扩展模型及应力判据

从矿柱近自由表面中取一单元进行分析,该单元处于两向受力状态,如图 3(c)所示,其铅垂压应力为 σ_z ,侧压力为 σ_x , σ_x 为左右矿体限制压力。在矿柱附近,若不考虑地应力异常情况, σ_x 远小于 σ_z ,一般情况下有 $\sigma_x < \sigma_z$ 。为分析裂纹的扩展,可以将其简化为平面问题(X-Z 平面)。设单元内有若干初始裂纹,在压应力的作用下,萌生张性翼裂纹,其扩展受 I 型应力强度因子 K_I 控制^[1,5,7],其扩展特

性可用滑移裂纹模型来描述。

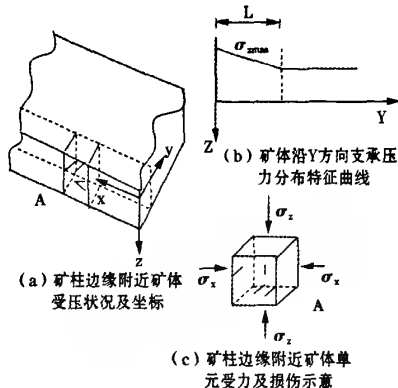


图3 矿柱边缘附近矿体受力及损伤示意

(1) 单一裂纹模型。设初始裂纹长度为 $2l_0$,滑移面长度为 $2l_0$,且与最大压力方向的夹角为 θ ,最简单的模型可由图 4 所示,滑移接触面的作用可以用一对集中应力模拟,因此,模型可以视为受该集中力作用的线展开裂纹。则集中力的大小可以表示为^[8]:

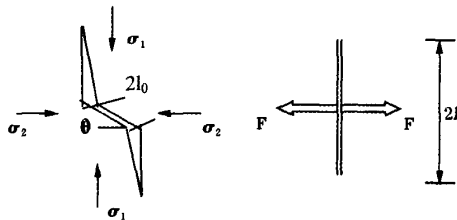


图4 压缩状态下的单一裂纹扩展模型

$$F = 2\sigma_z \xi(\theta) l_0 \quad (1)$$

$$\xi(\theta) = C \sin^2 \theta \cos \theta \quad (2)$$

式中, C 为考虑摩擦和次生翼型张裂纹弯曲的级次单位因子。

由于压应力方向平行于自由表面,裂纹的扩展也将平行于自由表面(见图 5)。Germanovich 和 Grekov 对该模型给出了数值解,裂尖的应力强度因子 K_I 在 $l_{cr} = 0.5 h$ 时,达到最小,这表明裂纹的长度在达到距自由面距离一半时,裂纹稳定扩展过渡到非稳定扩展,反映了自由表面对裂纹扩展的影响。

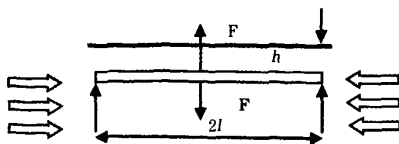


图5 裂纹扩展平行于自由表面

对于裂纹长度小于裂纹到自由表面距离的情况,受自由边界影响的裂纹的不稳定扩展可由双渐进法分析^[10],裂纹的强度因子为:

$$K_I = \frac{F}{\sqrt{\pi d}} + \frac{3Fl^{\frac{3}{2}}}{2h^2 \sqrt{\pi}} \\ = K_I^* \left(1 + \frac{3l^3}{2h^2} \right) \quad (3)$$

式中, $K_I^* = \frac{F}{\sqrt{\pi d}}$ 是无限大板内单裂纹受一对集中力作用的应力强度因子,裂纹非稳定扩展对应于最小的 K_I 。对式(3)求 K_I 的极值条件,可得到裂纹非稳定扩展的临界强度 $l_{cr} = 0.47h$ 。如果裂纹扩展,则必须满足:

$$K_I = K_{Ic} \quad (4)$$

式中, K_{Ic} 为材料断裂韧性。联立式(2)、(3)和(4),可得裂纹扩展的控制方程:

$$\left(\frac{l}{h} \right)^2 - \frac{K_{Ic}}{3\xi(\theta)\sigma} \frac{\sqrt{\pi h}}{l_0} \sqrt{\frac{l}{h}} + \frac{2}{3} = 0 \quad (5)$$

并可求得临界应力为:

$$\sigma_{cr} = \frac{2^{\frac{1}{2}} K_{Ic} \sqrt{3\pi h}}{8\xi(\theta) l_0} \quad (6)$$

(2) 多裂纹模型。金矿矿柱附近矿体内,存在大量的裂纹(见图3(c)),为简单起见,这里将共面裂纹处理为等长度 $2l$ 和等间距 $2b$ 的周期性共线滑移裂纹,先取其中最靠近自由表面的一组进行分析,设该组裂纹到表面的距离为 h ,如图6所示。由于裂纹的扩展受侧压影响,在矿柱边缘附近, σ_x 远小于 σ_z ,裂纹将优先沿 Z 方向扩展。

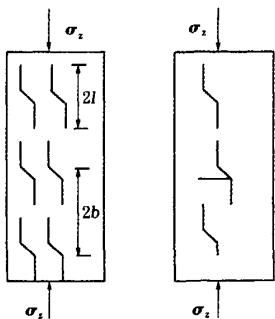


图6 平面滑移裂纹模型

对于距表面距离 h (沿 y 方向) 的滑移裂纹,其裂纹尖端应力强度因子可表示为:

$$K_I = K_I^* f\left(\frac{l}{h}\right) g\left(\frac{l}{b}\right), K_I^* = F / \sqrt{\pi l} \quad (7)$$

式中, F 为翼型张裂纹产生时,裂纹滑移面上的一对

扩张力; K_I^* 为无限平面内裂纹变面中部受一对集中力作用的应力强度因子, θ 为预存裂纹与压应力方向的倾斜角。 $f\left(\frac{l}{h}\right)$ 为裂纹位置及尺寸影响系数, $f\left(\frac{l}{b}\right) = 1 + \frac{3l^2}{2h^2}$, $g\left(\frac{l}{b}\right)$ 为修正因子,对于周期性裂纹可取为 $g\left(\frac{l}{b}\right) = \sqrt{\frac{2b}{\pi l} \tan \frac{\pi l}{2b}}$ 。

若裂纹扩展,则必须满足 $K_I \geq K_{Ic}$,由式(7)可得出裂纹扩展的临界压应力:

$$\sigma_z^c = \frac{\pi K_{Ic} l}{2l_0 \xi(\theta) \left(1 + \frac{3l^2}{2h^2} \right) \sqrt{2b \tan \frac{\pi l}{2b}}} \quad (8)$$

式(8)表明,临界应力 σ_z^c 随裂纹长度的增加而减小,反映了近表面共线周期裂纹向自由空间压曲的特性,与 Papamichos 和 Vardoulakis^[6] 的研究一致。

在矿柱边缘附近存在压应力集中区(见图7(a))。当压应力达到一定值时,一些原生裂纹和次生裂纹将沿压应力方向开始扩展,即在原生裂端形成翼裂纹,翼裂纹开裂方向受最大压应力方向控制,并受自由表面的影响。在载荷的进一步作用下,各裂纹将产生滑移,当裂纹满足开裂条件 $K_I \geq K_{Ic}$ 时,翼裂纹将沿最大压应力方向以非稳定的方式扩展,最后,同一裂纹面的翼裂纹发生贯通联合。在矿柱边缘附近形成与矿体剥离的薄层,并向空间压曲(见图7(b))。这一过程可重复出现,使矿柱边缘附近矿体成为层裂结构。

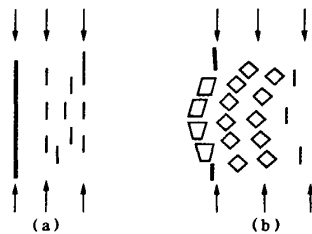


图7 滑移裂纹扩展示意

3 结 论

矿柱失稳是矿体内裂隙演化、扩展和贯通的结果,本文依据断裂损伤力学理论对矿柱裂隙扩展机理进行了研究。主要表现在:

(1) 通过对岩石在不同压应力作用下表现出的非线性变形特性的分析,详细讨论了岩石在不同应

(下转第112页)

间各种危险情况进行了分析,结合安全仿真的相关理论和技术,对受限空间安全仿真平台的建设进行了相关的探讨。仿真技术和信息技术是实现可视化、网络化、信息化、智能化的关键技术,将这些技术合理地运用于受限空间事故模拟仿真,对提高受限空间的安全性,提高工作人员和公众的安全意识,纠正受限空间内的不安全行为,降低事故的发生率,以及进行事故预防及紧急救援等具有重要意义。

参考文献:

- [1] 张国宏.受限空间的危险情况分析[EB/OL]. <http://www.chinavalue.net/Article/Archive/2008/3/25/105778.html>, 2008-03-25.
- [2] 王志荣,蒋军成.受限空间工业气体爆炸研究进展[J].工业安全与环保,2005,31(3):25,43~46.
- [3] 李鸿志,范宝春,杨宏伟.障碍物和管壁导致火焰加速的三维数值模拟[J].爆炸与冲击,2001,21(4):259~264.
- [4] 林柏泉,周世宇.障碍物对瓦斯爆炸过程中火焰和爆炸波的影响[J].中国矿业大学学报,1999,28(2):104~107.
- [5] 杜红兵,戚宜欣,马国超.粒子系统算法在建筑物火灾可视化研究中的应用[J].中国安全科学学报,2002,12(3).
- [6] 周庆,徐志胜.模型车厢内火灾烟气层运动模拟分析[J].消防科学与技术,2006,25(1):27~29.

- [7] 郑立刚,余明高,贾海林.标准受限空间内细水雾熄灭煤油火的实验和数值模拟[J].中国安全科学学报,2007,17(1):81~85.
- [8] 陈建宏,周科平,周智勇,等.矿山安全仿真模拟平台建设关键技术[J].矿业研究与开发,2006,26(S2):120~125.
- [9] 冯晖.3S等信息化新技术在环境监测科研领域的应用[J].环境科学导刊,2008,27(3):87~88.
- [10] 吴延海,黄健.基于3S技术的应用开发平台[J].通信技术,2008,41(6):192~194.
- [11] 傅智河.基于RFID的矿山井下人员定位系统设计[J].龙岩学院学报,2007,25(6):50~52.
- [12] 郑琮琰.大型空间展览场展览活动之避难安全评估之研究[D].台湾:私立中原大学,2004.
- [13] 潘必超,张瑾.有限状态空间搜索技术在紧急逃生行为仿真中的应用[J].计算机时代,2006,(6):35~37.
- [14] 周晓猛,姜丽珍.建筑物性能化设计中人群安全疏散问题探讨[J].公共安全,2007,2:17~19.
- [15] 朱福喜,汤怡群,傅建明.人工智能原理[M].武汉:武汉大学出版社,2002.

(收稿日期:2008-09-21)

作者简介:李立峰(1986-),男,山西太原人,中南大学资源与安全工程学院学生,Email:416243498@qq.com。

(上接第75页)

力状态下裂纹的扩展演化规律。并对裂纹扩展模型及裂纹群的演化与相互作用进行了分析总结。

(2)采用滑移裂纹模型,分析了矿柱近自由表面裂纹在压应力下的扩展规律,认为矿柱近自由表面矿体内的裂纹在一定压力作用时滑移开裂,并且具有翼型张裂纹平行沿最大压应力方向扩展,从而提出了裂纹扩展的应力判据。由于裂纹的贯穿与联合,使矿柱边缘附近出现分离层,并向空间弯曲,由于此过程可以重复发生,从而导致矿柱中形成一定宽度的破坏区,对矿柱稳定性造成影响。

参考文献:

- [1] 张晓春,杨挺青,缪协兴.岩石裂纹演化及其力学特性的研究进展[J].力学进展,1999,22(05):97~104.
- [2] 张晓春.煤矿岩爆发生机制研究[D].武汉:华中理工大学,1998.
- [3] Myer L R, Kemeny, et al. Extensive Crack in Porous Rock under Differential Compressive Stress[J]. Appl, Mech, Rev, 1992, 45: 263~280.

- [4] Yoshida H, Horii H. A Micromechanics - based Model for Creep Behavior of Rock[J]. Appl, Mech, Rev, 1992, 45: 294~303.
- [5] Nemat - Nasser S, Horii H. Compression - induced Nonplanar Crack Extension with Application to Splitting, Exfoliation, and Rockburst[J]. Geophys, Res, 1982, 87: 6805~6821.
- [6] Wang E T, Shrive N G. Brittle fracture in Compression: Mechanics, Model and Criteria[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1995, 52: 1107~1126.
- [7] Germanovich L N, Salganik R L, Dyskin A V, et al. Mechanisms of Brittle Fracture of Rock with Pre - existing Crack in Compression[J]. Pageoph, 1994, 143: 117~149.
- [8] Kachanov M. A Microcrack Model of Rock inelasticity, Part I: Frictional Sliding on Microcracks[J]. Mech, Mat, 1982, (1).
- [9] 黄润秋,许强,等.突变理论在工程地质中的应用[J].工程地质学报,1994,2:65~73.
- [10] 唐春安,徐小荷.岩石破裂过程中失稳尖点突变模型[J].岩石力学与工程学报,1990,(2).

(收稿日期:2008-04-18)

作者简介:郭建军(1967-),山西阳泉人,博士后,高级工程师,主要从事矿山开发和生产调度管理工作,Email:guojian-jun1967@tom.com。