

岩石亚临界裂纹扩展及其应用研究

万琳辉, 曹平, 黄永恒, 文有道, 汪亦显

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 亚临界裂纹扩展是岩体工程破坏时间效应的原因之一。应力腐蚀机制能很好地说明亚临界裂纹的扩展, 其中适合岩石材料的应力腐蚀理论是 Charles 理论。利用双扭试件可获得岩石亚临界裂纹扩展 Charles 理论的相关参数。将传统断裂力学中拉伸应力和压剪应力下的裂纹扩展模型与 Charles 理论相结合, 推导出与时间相关的裂纹扩展模型。采用双扭试件测得了中条山有色金属集团某矿岩的亚临界裂纹扩展参数。将此参数应用于拉伸应力下与时间相关的裂纹扩展模型, 预测矿岩崩落时间, 结果表明: 该模型能较好地预测矿体的崩落; 同时, 也可对其他岩体工程的施工开挖提供指导。压剪应力下与时间相关的裂纹扩展模型的应用及复杂状态下多裂纹相互影响的扩展模型, 有待进一步研究。

关键词 亚临界裂纹; 应力腐蚀; Charles 理论; 裂纹扩展; 时间效应预测

中图分类号 TU457

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)09-0042-05

Subcritical Crack Growth of Rocks and Its Applications

WAN Linhui, CAO Ping, HUANG Yongheng, WEN Youdao, WANG Yixian

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

Abstract Subcritical crack growth is one of the main causes of time-induced failure in rock engineering. It can be explained by the stress corrosion mechanism and Charles theory is a stress corrosion theory suitable for rocks. Double torsion tests are often used for the subcritical crack growth in rocks and the parameters in Charles theory can be obtained. The crack propagation models under the tensile stress and compression-shear stress in the traditional fracture mechanics are combined with Charles theory, which would lead to the time-dependent crack propagation models. The subcritical crack growth parameters of ore-rock in ZTS Non-ferrous Metals Group were obtained by double torsion tests and applied to the time-dependent crack propagation model under the effect of tensile stress to predict ore-rock block caving. It is found that the ore block caving can be predicted accurately. Additionally, the excavation construction of rock projects can be guided by the model. The application of the time-dependent crack propagation model under compression-shear stress and the time-dependent crack propagation model of multiple cracks interaction under complex conditions remain to be further studied.

Keywords subcritical crack; stress corrosion; Charles theory; crack propagation; time-dependent; predicted

0 引言

岩石作为一种含有缺陷的脆性材料, 其破坏过程实质上就是微裂纹产生、扩展及贯通的过程^[1]。任何岩体工程的失稳破坏都是岩体中裂纹产生、扩展及贯通的结果, 其时间效应不能忽视。近年来, 众多国内外学者利用断裂力学原理研究岩体强度的时间效应。肖洪天等^[2]采用双扭试件和自行研制的加载装置, 对三峡船闸花岗岩进行了亚临界裂纹扩展实验

研究, 并获得了该岩石的裂纹扩展速度与应力强度因子的关系。Y. Nara 等^[3-4]利用双扭实验研究了岩石亚临界裂纹扩展, 发现岩石的亚临界裂纹扩展速度受裂纹扩展方向、蒸汽压和试件导向槽截面形式的影响, 并利用应力腐蚀理论解释了蒸汽压影响亚临界裂纹扩展速度的原因; 随着蒸汽压的提高, 应力腐蚀下限 K_0 也会提高; 矩形导向槽最适合双扭实验。袁海平等^[5]采用双扭试件常位移松弛法, 对金川软弱复杂矿岩

收稿日期: 2009-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(10972238); 中南大学学位创新课题(2009bsxt061); 湖南省安监局项目

作者简介: 万琳辉, 博士研究生, 研究方向为岩体工程稳定性及其时间效应, 电子信箱: wlh9818@163.com; 曹平(通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: S330730017M), 教授, 研究方向为岩石断裂与计算力学、岩层控制及采矿过程, 电子信箱: pcao_csu@tom.com

进行亚临界裂纹扩展实验研究,并得出采场矿岩亚临界裂纹扩展速度与应力强度因子之间的关系。李江腾等^[6]对大理岩、花岗岩进行了亚临界裂纹扩展研究,获得了其裂纹扩展速率与应力强度因子的关系及断裂韧度,并确定了岩石亚临界裂纹扩展的停滞速度和门槛值。

但是,如何将获得的亚临界裂纹扩展参数应用到实际工程中,还少见相关研究报道。只有缪协兴等^[7]利用亚临界裂纹扩展方程建立了与实践相关的冲击矿压模型。本文基于岩石亚临界裂纹扩展的应力腐蚀机制及裂纹扩展模型,建立岩体工程失稳破坏的时间预测方程,并将拉伸应力下与时间相关的裂纹扩展模型应用到中条山有色金属公司某矿的矿体开采,结果表明,该预测方程能较准确地预测岩体工程的破坏时间,为岩体工程的开挖施工提供指导。

1 亚临界裂纹扩展研究

1.1 应力腐蚀机制

按照传统的断裂力学理论,当裂纹尖端的应力强度因子(K_I)小于断裂韧度值(K_{IC})时,裂纹不扩展。但玻璃中的亚临界裂纹扩展很早就被观察到^[8],特别是在有水的情况下,这一现象更加明显。由此,人们提出了应力腐蚀概念:构件在拉应力和腐蚀介质的联合作用下,会产生裂纹,且裂纹会不断扩展,最后导致断裂破坏,这种过程称为应力腐蚀。在应力腐蚀过程中,常用应力强度因子 K_I 作为控制裂纹扩展的参量。相应地,应力腐蚀下限为 K_0 ,当 $K_I < K_0$ 时,裂纹不扩展,而在 $K_0 < K_I < K_{IC}$ 时,裂纹就随时间而扩展^[9]。

图1为玻璃材料中亚临界裂纹扩展典型的裂纹尖端应力强度因子 K_I 与裂纹扩展速度 V 之间的关系曲线^[4]。曲线可分为3个区间:在第I区间,裂纹扩展速度由裂纹尖端的应力腐蚀化学反应速率所控制;在第II区间,裂纹扩展速度也是由应力腐蚀所控制,但主要由反应物质输送到裂纹尖端的速度所控制;在第III区间,裂纹由稳定扩展转为不稳定扩展,裂纹扩展不受外部化学环境的影响,而是由力学环境——即

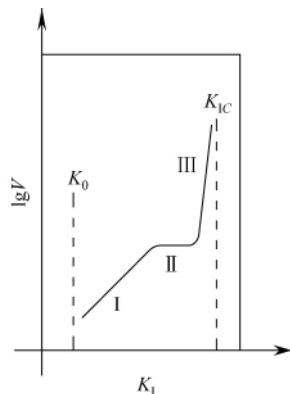


图1 亚临界裂纹扩展速度 V 与应力强度因子 K_I 的关系
Fig. 1 Relation between the stress intensity factor and the crack velocity for subcritical crack growth

断裂机制所控制^[9]。

在关于亚临界裂纹扩展应力腐蚀机制的理论中,适合岩石材料的是 Charles 理论^[10]。Charles 理论认为,应力腐蚀是由于拉应力使玻璃中的原子之间距离增大,从而使碱离子易于扩散引起的^[11]。在裂纹尖端,由于应力集中,拉应力很大,碱离子的扩散就更为严重。由此,推导出最通用的描述关系的方程——Charles 方程:

$$V=da/dt=v_0K_I^n\exp(-E^*RT) \quad (1)$$

式中, V 为裂纹扩展速度, E^* 为活化焓(热函), a 为裂纹长度, t 为时间, R 为气体常数, T 为绝对温度, v_0, n 为常数。

当温度 T 恒定时,可将 Charles 方程表示为 K_I - V 空间的幂函数和 $\lg K_I$ - $\lg V$ 空间的线性函数:

$$V=AK_I^n \quad (2)$$

$$\lg V=a+b\lg K_I \quad (3)$$

式中, A, a, b 均为常数; $A=10^a$; $b=n$,称之为应力腐蚀因子或亚临界裂纹扩展指数。

1.2 亚临界裂纹扩展的实验技术

当利用式(2)或式(3)研究岩石亚临界裂纹扩展的规律时,需要实验先测出常数 A, a 和 b 的值。国内外研究者^[2-6,12]常用双扭试件作为亚临界裂纹扩展的研究对象。双扭试件如图2所示,为长×宽×厚= $L \times W \times d$ 的薄板,要求试件宽度远大于厚度。在板的上表面沿 L 方向的对称线有中槽,以便裂纹沿中槽扩展,槽部厚度为 d_n 。采用四点加载法,载荷为 $P/2$,这相当于在试件一端施加一对 $\frac{P}{2} \times W_m$ 的扭矩, W_m 为力臂。

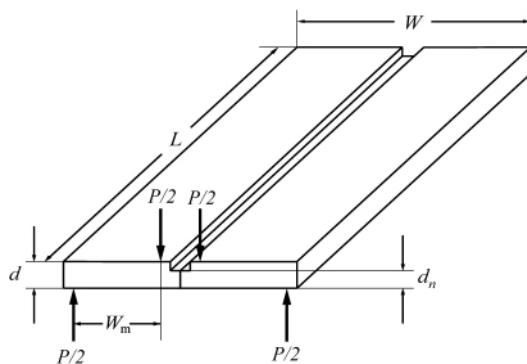


图2 双扭试件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of double torsion specimen

双扭试件常位移松弛时,应力强度因子和裂纹扩展速度为^[13]:

$$K_I=PW_m\left[\frac{3(1+\mu)}{Wd^3d_n}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$V=-\frac{Wd^3E_y}{6P^2W_m^2(1+\mu)}\frac{dP}{dt} \quad (5)$$

式中, μ 为试件泊松比, E 为试件弹性模量, y 为加载点位移。

利用单轴压缩实验测出试件的泊松比 μ 和弹性模量 E , 在双扭实验中记录 P_y 和 t 值, 利用式(4)和式(5)可计算出 K_I 、 V 值, 根据式(3)可得出 K_I - V 双对数空间关系曲线。对实验结果进行分析处理, 即可得到常数 A 、 a 和 b 的值。

2 裂纹扩展模型

这里考虑裂纹尖端为拉应力的扩展计算模型, 常见的有两种情况: 纯拉应力状态下的 I 型断裂和压剪裂纹扩展。

2.1 拉伸应力下裂纹扩展模型

岩体受拉伸荷载作用时, 垂直于拉应力的裂纹尖端应力容易集中。当其应力强度因子达到断裂韧度时, 裂纹开始扩展, 且在裂纹原平面中发展。如图 3 所示, $2a$ 为原始裂纹长度, σ_1 为主拉应力。该状态下裂纹尖端应力强度因子为:

$$K_I = \sigma_1 \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

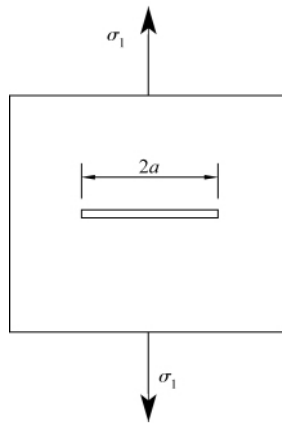


图 3 I 型断裂模型

Fig. 3 Model for type I fracture

2.2 压剪应力下裂纹扩展模型

由于岩体受到构造变形的影响, 岩体中裂纹主要受压剪复合应力作用。关于压剪裂纹的扩展, Horii 等^[14]进行了大量的研究。当裂纹起裂后, 将在原始裂纹尖端形成拉伸型翼裂纹, 由于在翼裂纹尖端存在 II 型应力强度因子, 翼裂纹偏离原来的起裂方向 α_0 , 最终发展成与最大压应力 σ_1 方向平行。翼裂纹扩展的驱动力是原始裂纹面上的剪切力。压剪应力下裂纹扩展可以简化为如图 4 所示的模型, $2a$ 为原始裂纹长度, σ_1 为第一主应力, σ_2 为第二主应力, l 为翼裂纹长度, θ 为裂纹面法线和轴向压应力方向之间的夹角。

此时翼裂纹尖端应力强度因子为^[15-16]

$$K_I = \frac{2l_0 \tau_s \cos \theta}{\sqrt{\pi l}} - \sqrt{\pi l} \sigma_2 \quad (7)$$

$$\tau_s = (\sin \theta \cos \theta - \mu \cos^2 \theta) (\sigma_1 - \sigma_2) - \mu \sigma_2 \quad (8)$$

式中, τ_s 为原始裂纹面上的剪切驱动力, l_0 为翼裂纹初始长度。

3 时间相关的裂纹扩展

当 $K_{Ic} > K_I > K_0$ 时, 亚临界裂纹开始扩展, 扩展时, 岩体中应

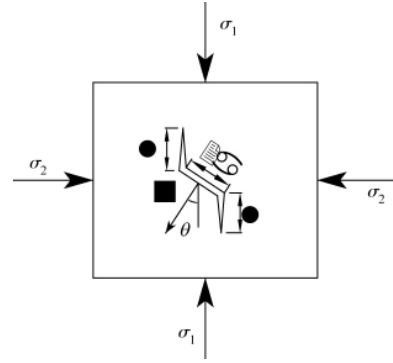


图 4 压剪裂纹扩展模型

Fig. 4 Model for frictional crack growth

力水平保持不变。当裂纹长度 a (或 l) 小于 a_c (或 l_c) 时, 裂纹处于稳定扩展阶段; 当裂纹长度 a (或 l) 等于 a_c (或 l_c) 时, 裂纹处于贯通或不稳定扩展的临界状态, 此时 $K_I = K_{Ic}$; 当裂纹长度 a (或 l) 大于 a_c (或 l_c) 时, 裂纹已经贯通, 或出现不稳定扩展, 即岩体工程已经被破坏了, 此时 $K_I > K_{Ic}$ 。在应力水平保持不变的情况下, 经过一段时间, 岩体工程仍然会出现破坏, 这种破坏的时间效应是本文研究的重点。

3.1 拉伸应力下裂纹扩展的时间相依性

实际工程中, 单纯的拉伸作用是比较少见的, 但岩体工程中有些部位的受力可以简化为拉伸作用, 如矩形巷道及采场的顶板。拉伸应力作用下危险曲面发生破坏所需时间 t 的公式推导过程如下。

由式(1)中 $V = da/dt$, 可得裂纹扩展达到临界长度所需的时间为

$$t = \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{V} da \quad (9)$$

式中, a_0 为裂纹初始长度, a_c 为临界裂纹长度。

如果将问题进一步简化, 假设危险曲面上不仅各个裂纹尖端的应力强度因子相等, 而且拉应力也相等, 则结合式(6)和式(9)可得

$$t = \frac{2}{\pi \sigma_1^2} \int_{K_{Ic}}^{K_I} \frac{K_I}{V(K_I)} dK_I \quad (10)$$

式中, K_{Ic} 为危险曲面上应力强度因子。

由前述可知, 岩石亚临界裂纹扩展规律与 Charles 理论相符, 即应力强度因子 K_I 与裂纹扩展速度 V 满足式(2)或式(3)。将式(2)代入式(10)得

$$t = \frac{2}{\pi \sigma_1^2} \int_{K_{Ic}}^{K_I} \frac{K_I}{A K_I^n} dK_I = \frac{2}{\pi A \sigma_1^2 (2-n)} (K_{Ic}^{2-n} - K_I^{2-n}) \quad (11)$$

由式(11)可知, 如果已知岩石的亚临界裂纹扩展参数及危险曲面上的拉应力及应力强度因子, 则可预测工程破坏的时间。式(11)在运用中还可做简化。由式(6)可知, K_I 与 σ_1 成线性关系, 故有

$$K_{Ic} = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{Ic}} \right) K_{Ic} \quad (12)$$

式中, σ_{Ic} 为岩石抗拉强度。

将式(12)代入式(11)得

$$t = \frac{2}{\pi A \sigma_1^{2(2-n)}} K_{IC}^{2-n} \left[1 - \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{IC}} \right)^{2-n} \right] \quad (13)$$

由式(13)可知,在计算危险曲面的破坏时间时,只需测定岩石的抗拉强度,而不用计算应力强度因子 K_{IC} 。

3.2 压剪应力下裂纹扩展的时间相依性

压剪复合应力作用下的裂纹在实际工程中是很常见的,研究其失稳破坏的时间相依性更具实用性。由式(7)可得

$$l = \frac{K_I^2}{\sigma_2^2 \pi} + \frac{2l_0 \tau_s \cos \theta}{\sigma_2 \pi} - \frac{K_I \sqrt{K_I^2 + 8\sigma_2 \tau_s l_0 \cos \theta}}{2\sigma_2^2 \pi} \quad (14)$$

进一步求导可得 dl 为:

$$dl = \frac{1}{2B} \left(4K_I - \frac{K_I^2}{\sqrt{K_I^2 + C}} - \sqrt{K_I^2 + C} \right) dK_I \quad (15)$$

式中, $B = \sigma_2^2 \pi$, $C = 8l_0 \sigma_2 \tau_s \cos \theta$ 。

同理,将式(2)、式(9)与式(15)结合得

$$t = \frac{1}{2AB} \int_{K_{Ic}}^{K_{Ic}} \frac{1}{K_I^2} \left(4K_I - \frac{K_I^2}{\sqrt{K_I^2 + C}} - \sqrt{K_I^2 + C} \right) dK_I \quad (16)$$

根据式(16),调查岩体工程节理分布状况,确定围岩危险曲面;测得岩体工程应力场,利用数值方法计算出围岩应力状态;根据应力状态计算出危险曲面上应力强度因子;从实验室测得围岩亚临界裂纹扩展参数,就可以预测岩体工程破坏的时间。

4 拉伸应力下裂纹扩展模型的应用

4.1 应用前期工作

在应用第3节中的破坏时间预测式(11)或式(13)、式(16)时,要做好以下工作。

- 1) 测定围岩中主要岩石的 K_I - V 关系,可采用1.2节中介绍的双扭实验测得;
- 2) 测定围岩中原岩应力,根据岩体工程的结构形式,利用数值方法计算出围岩应力状态;
- 3) 进行围岩节理调查,在此基础上,建立围岩节理分布的数学模型;
- 4) 根据围岩应力状态和节理分布,找出危险的应力强度因子所在的等应力强度因子曲面,并计算出该曲面上应力强度因子。

做好以上工作后,可以利用式(11)或式(13)、式(16)计算岩体工程的破坏时间。

4.2 在自然崩落法中的应用

自然崩落法是一种在矿体下部消除自然支撑,使矿岩破断和崩落,并凭借自重下落到事先开挖好的底部结构中的采矿方法。对于节理中等发育的矿体,矿体的自然崩落可以看作是矿体中已有节理裂隙在拉应力作用下,发生亚临界裂纹扩展,扩展到临界裂纹长度,导致裂隙快速扩展、矿石破裂的过程。这一过程与巷道顶板破坏基本一致。

中条山有色金属公司某矿的矿体厚大,节理中等发育,矿石品位不高,矿岩交界不明显,矿体开采采用了自然崩落

法。为确保生产安全,需要预测矿岩的崩落时间。在采场选用典型岩样,对主要矿岩(主要为变质花岗岩闪长岩)各种物理力学性质进行测定,其中 K_I - V 关系采用双扭试件常位移松弛法测定的结果如图5所示(实验中有6块试件,其中1块试件实验失败)。根据式(11),测定的时间预测参数如表1所示。

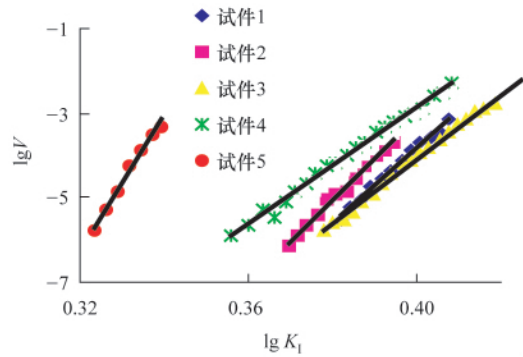


图5 矿岩试件 K_I - V 关系曲线

Fig. 5 Relation between the stress intensity factor and the crack velocity for ore-rock

表1 时间预测参数

Table 1 Parameters of time prediction

参数	测得值
$A/(m \cdot s^{-1})$	$10^{-67.4}$
n	105.1
σ_{IC}/MPa	6.1
$K_{IC}/(MN \cdot m^{-3/2})$	2.68

将表1中参数代入式(11)得

$$t = \frac{4.15 \times 10^{708}}{\sigma_1^{105.1}} (1 - 1.64 \times 10^{-721.7} \times \sigma_1^{103.1}) \quad (17)$$

由于 $\sigma < \sigma_{IC}$, 则 $1.64 \times 10^{-721.7} \times \sigma_1^{103.1} < 1.64 \times 10^{-721.7} \times 6.1^{103.1} \ll 1$, 故有

$$t = \frac{4.15 \times 10^{708}}{\sigma_1^{105.1}} \quad (18)$$

式(18)是该类矿岩发生崩落破坏所需时间的计算公式。在采场对矿体进行节理调查,并找出相应的等应力强度因子的危险曲面;测量采场的应力;根据拉底、切帮后采场的机构形式,结合应力测量结果,计算出危险曲面的拉应力 $\sigma_1 = 5.02 MPa$ 。将 σ_1 代入式(18)得

$$t = \frac{4.15 \times 10^{708}}{(5.02 \times 10^6)^{105.1}} = 23663.96 (s)$$

所以危险曲面以下矿石崩落的时间约为 23663.96s (6.573h)。与现场矿石崩落情况相比,崩落的曲面与节理调查后选择的曲面基本吻合,但是矿体破坏崩落的时间为 5.2~6.4h,与计算的破坏时间有误差。其原因可能是应力 σ_1 有误差,从式(18)中可以看出,时间 t 对应力 σ_1 很敏感。

5 结论

岩石亚临界裂纹扩展是岩体工程破坏时间相依性的重

要原因。基于亚临界裂纹扩展及断裂力学理论,研究了岩体工程破坏的时间效应,主要得到以下结论:

1) 岩石亚临界裂纹扩展的过程是裂纹尖端的应力腐蚀过程,适合岩石应力腐蚀机制的理论是 Charles 理论。目前常用于研究岩石亚临界裂纹扩展规律及测定其参数的实验主要是双扭实验。

2) 基于裂纹扩展模型和 Charles 理论,建立了拉伸应力及压剪应力下与时间相关的裂纹扩展模型。并将拉伸应力下裂纹扩展模型应用到实际工程中,结果表明,该预测模型能够较准确地预测岩体在拉伸应力下的破坏。预测时间 t 对应力 σ_1 很敏感,故应用中应精确确定 σ_1 值。

3) 与时间相关的压剪应力下裂纹扩展模型的应用以及复杂条件下多裂纹相互影响的扩展模型,还有待进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
Xie Heping, Chen Zhonghui. Rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] 肖洪天, 杨若琼, 周维垣. 三峡船闸花岗岩亚临界裂纹扩展试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 447-450.
Xiao Hongtian, Yang Ruojiong, Zhou Weiyuan. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4): 447-450.
- [3] Nara Y, Kaneko K. Sub-critical crack growth in anisotropic rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43: 437-453.
- [4] Nara Y, Kaneko K. Study of subcritical crack growth in andesite using the double torsion test [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2005, 42: 521-530.
- [5] 袁海平, 曹平, 周正义. 金川矿岩亚临界裂纹扩展试验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(2): 381-384.
Yuan Haiping, Cao Ping, Zhou Zhengyi. Journal Central South University: Science and Technology, 2006, 37(2): 381-384.
- [6] 李江腾, 曹平, 袁海平. 岩石亚临界裂纹扩展试验及门槛值研究[J]. 岩

土工程学报, 2006, 28(3): 415-418.

Li Jiangteng, Cao Ping, Yuan Haiping. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 415-418.

- [7] 缪协兴, 安里千, 翟明华, 等. 岩(煤)壁中滑移裂纹扩展的冲击矿压模型[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(2): 114-117.
Miao Xiexing, An Liqian, Zhai Minghua, et al. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(2): 114-117.
- [8] 袁海平. 诱导条件下节理岩体流变断裂理论与应用研究 [D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2006: 28-29.
Yuan Haiping. Study on the rheologic fracture of jointed rock mass under inducing condition and its engineering application[D]. Changsha: School of Resources and Safety Engineering, Central South University, 2006: 28-29.
- [9] Freiman S W. Effects of chemical environments on slow crack growth in glasses and ceramics [J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89: 4072-4076.
- [10] Atkinson B K. Subcritical crack growth in geological materials [J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89: 4077-4114.
- [11] Lajtai E Z, Bielus L P. Stress corrosion cracking of Laodu Bonnet granite in tension and compression [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1986, 19(1): 71-87.
- [12] Williams D P, Evans A G. A simple method for studying slow crack growth[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1973, 1(4): 264-270.
- [13] 罗礼. 用双扭方法测试岩石的亚临界裂纹扩展速度和断裂韧度[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 1988.
Luo Li. Subcritical crack growth velocity and fracture toughness of rock was tested by double-torsion [D]. Changsha: School of Resources and Safety Engineering, Central South University, 1988.
- [14] Horri H, Nemat-Nasser S. Brittle failure in compression: Splitting faulting and brittle-ductile transition[J]. Phitran R Soc, 1986, A319: 337-374.
- [15] Kemeny J M. A model for nonlinear rock deformation under compression due to subcritical crack growth[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1991, 28: 459-467.
- [16] Kemeny J M, Cook N G W. Crack models for the failure of rocks in compression, Constitutive laws for engineering materials: Theory and applications[M]. New York: Elsevier, 1987, II: 879-887.

(责任编辑 代丽)

本期完词填空答案

满					戈		全
地	震				高	尔	球
黄							子
花	木	兰			光	年	位
堆		州	官	放	火		星
积				大			统
				镜	面	反	射
玉	宇	琼	楼				手
树		梅	兰	芳			座

本期九宫填数答案

九宫 难度系数 ◆◆◆◆◇

1	3	7	9	8	6	5	4	2
2	4	9	7	1	5	8	3	6
6	5	8	3	2	4	7	1	9
9	1	5	2	6	7	3	8	4
3	7	6	8	4	1	2	9	5
8	2	4	5	9	3	6	7	1
4	6	3	1	7	2	9	5	8
7	8	2	4	5	9	1	6	3
5	9	1	6	3	8	4	2	7
5	3	9	2	4	6	7	8	1
6	4	1	8	3	7	9	2	5
8	7	2	9	5	1	4	3	6
2	8	4	5	7	9	6	1	3
3	1	5	6	2	4	8	9	7
7	9	6	1	8	3	5	4	2