

水-岩化学作用下岩体裂纹应力强度因子的计算及分析

杨 慧,曹 平,江学良

(中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083)

摘 要:水化作用对裂隙岩体的影响主要来自于水压力和化学腐蚀伤两方面的作用。运用地球化学矿物-水反应的溶解动力学,考查水-岩反应化学溶液中不同时间段离子浓度的变化,从理论上探讨化学腐蚀下等效裂纹扩展的定量化分析方法,从而建立水-岩化学作用下等效裂纹扩展的计算公式并计算裂纹尖端应力强度因子。计算表明,水-岩化学作用的存在,对应力强度因子的影响明显,随着水-岩化学作用的不断发展,应力强度因子逐渐增大。

关键词:水-岩化学作用;溶解动力学;等效裂纹扩展;应力强度因子

中图分类号:TU451

文献标识码:A

Calculation of Stress Intensity Factor for Crack Under Chemical Corrosive of Water-Rock Interaction

YANG Hui, CAO Ping, JIANG Xue-liang

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

Abstract: The effects of water pressure and chemical damage on the stress intensity factor of crack in rocks are analyzed. Geochemical kinetics of mineral-water interactions is used to check ion concentration in chemical solution under different periods, and quantitative methods for equivalent crack propagation under chemical corrosive of water-rock interaction are approached. According to conservation of mass, the evolution equation of crack is obtained and chemical corrosive of water-rock interaction is equivalent to effective crack length. The computational formulation of equivalent crack propagation is set up and the stress intensity factor is also calculated. The results show that the influence of water-rock chemical interaction on crack propagation is notable and the stress intensity factor increases with water-rock interaction.

Key words: water-rock chemical reaction; dissolution kinetics; equivalent crack propagation; stress intensity factor

收稿日期:2008-10-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50774093);湖南省自然科学基金资助项目(07JJ6084);博士生专项基金资助项目(20060533071)

作者简介:杨 慧(1981-),女,湖南益阳人,中南大学博士研究生。主要研究方向:岩石断裂力学。

水 - 岩化学作用在自然界中广泛存在着. 其发生过程是短暂的, 但在历史发展中其孕育过程是漫长的, 作用机理很复杂, 水岩化学作用在此过程中起着决定性作用. 水 - 岩化学作用对裂隙岩体的影响主要来自于水压力和化学腐蚀伤两方面的作用. 一方面, 水压力的存在降低了裂纹面上的正应力, 进而产生对裂纹尖端应力强度因子的影响^[1]. 另一方面, 环境中水、不同化学溶液等的侵蚀对岩石产生不同程度的腐蚀作用, 将改变岩石的物理状态和微细观结构, 使其力学特性发生变化. 由于化学溶液在岩体工程中存在的广泛性, 近年来关于化学腐蚀对岩石物理力学性质影响的研究以及岩石受各种环境侵蚀下的破裂机理的研究受到了国内外研究者的重视. 但现阶段的研究成果主要是受化学溶液腐蚀作用的岩石在外部荷载作用下力学效应的反映^[2-5], 陈四利对于化学腐蚀下砂岩细观损伤机理进行了实验研究^[6], 汤连生, 王思敬对岩石水化学损伤的机理及量化方法进行了初步探讨^[7-8].

研究和解决水化学综合作用对岩体裂隙扩展、变形和破坏的力学效应及其机理方面的问题以及微观与宏观相结合的问题, 是关系到岩体断裂力学能否解决岩石力学问题的关键所在, 而对水 - 岩作用的断裂力学效应量化方法的研究尚少见. 运用地球化学矿物 - 水反应的溶解动力学, 通过计算离子浓度的变化, 从理论上探讨化学腐蚀下裂纹扩展的定量化研究方法. 运用断裂力学理论, 考虑裂隙水压力对节理裂纹尖端应力场的实际影响, 在理论上探讨了考虑水压力及化学腐蚀的 I、II 型裂纹应力强度因子.

1 岩体裂纹中的水岩化学作用

1.1 双轴压缩下应力强度因子的计算

设平面岩板双向无限长, 远场最大和最小压应力分别为垂直方向和水平方向, 裂纹长度为 $2a$, 与最大主应力 σ_1 的夹角为 β , 由断裂力学可知, 作用在裂纹面上的正应力、剪应力分别为

$$\begin{aligned}\sigma_n &= \frac{1}{2}[(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta] \\ \tau_n &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta\end{aligned}\tag{1}$$

裂纹尖端 I、II 型应力强度因子为(压应力为正)

$$\begin{aligned}K_I &= \sigma_n \times \sqrt{\pi a} \\ K_{II} &= \tau_n \times \sqrt{\pi a}.\end{aligned}\tag{2}$$

式中, σ_n, τ_n 分别为裂纹面上的有效正应力和有效剪应力.

1.2 岩体裂纹中的水作用

水压力的存在降低了裂纹面上的正应力, 进而产生对裂纹尖端应力强度因子的影响, 其次, 孔隙水压力的“楔入”作用推动了裂纹的扩展过程, 使岩体产生渐进性破坏^[1]. 假设裂纹内水压力 p 均匀分布, 则裂纹面上的有效正应力和有效剪应力为

$$\begin{aligned}\sigma^k &= \sigma_n - p \\ \tau^k &= \tau_n\end{aligned}\tag{3}$$

1.3 岩体裂纹中的化学腐蚀作用

岩石中原已存在的裂纹, 在与水化学溶液化学作用时, 其规律往往很复杂. 在水化学溶液的作用下, 由于裂纹尖端矿物的溶解, 或尖端微结构的破坏, 使原有的裂纹缓慢扩展, 但由于扩展速度很小而稳态扩展; 由于裂纹的扩展, 裂纹的长度不断增大, 结果使表征裂纹尖端应力场的应力强度因子 K 不断增大, 当 K 大于临界应力强度因子 K_{IC} 时, 裂纹失称扩展, 从而使岩体强度降低而产生变形破坏.

假设在初始时刻 t_0 时裂纹长度为 $2a_0$, 经历水化腐蚀 t 时刻后裂纹尺寸如图 1 所示.

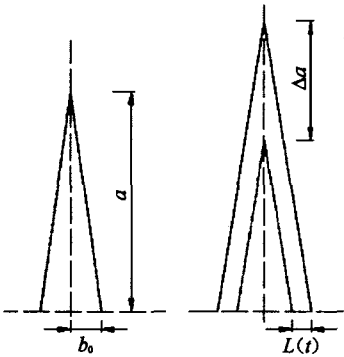


图 1 水化腐蚀前后裂纹模型
Fig. 1 Model of crack after hydration corrosion

裂纹尖端是水 - 岩化学作用最活跃的地区, 水化学作用直接溶解尖端的矿物成分或在尖端处沉淀、结晶矿物, 改变了裂纹尖端的应力状态和塑性区的塑性半径. 本文引入文献[9]关于远场应力作用下的岩体水力损伤的断裂力学分析方法, 将被尖端局部化学腐蚀后的裂纹问题等效成线性断裂力学问题, 假设裂隙内侧的水压力为 p , 不包含屈服区的裂纹长度为 $2a_0$, 裂纹屈服长度为 d_0 , 岩体的抗拉强度为 σ_t , 则屈服区长度为

$$d = a_0 \left[\sec \frac{\pi(p - \sigma)}{2\sigma_1} - 1 \right] \quad (4)$$

引入裂纹尖端屈服长度修正系数 κ 为

$$\kappa = d/a_0 \quad (5)$$

在水化学溶液的作用下,假定岩石中某一主要矿物 X 成分决定岩石的力学指标,随着反应的持续进行,矿物不断被溶液溶解,裂纹不断增长,设 $L(t)$ 为裂纹隙壁后退发展的长度.为使问题简化,现考虑一简单计算模型:设初始时刻的溶液中 X 的浓度为 $[X]_0$.在一定温度下,矿物 X 与水溶液相互作用,经历 t 时间段的水化反应后,溶液中矿物 X 浓度为 $[X]_t$.根据质量守恒原理,水化反应后溶液中的离子浓度等于初始时刻溶液中的离子浓度与水-岩相互作用溶解的离子浓度之和^[10],

$$[X]_t - [X]_0 = \int_0^t \frac{A_0}{V} v_i k_0 dt$$

$$= 2 \int_0^t \frac{4D \sqrt{a^2(t) + b^2(t)} + 2W^2D + 4WD}{V} v_i k_0 dt \quad (6)$$

浓度 $[X]$ 是可以测量的量,其中,

$$a(t) = a_0 + L(t) \quad (7)$$

$$b(t) = b_0 + L(t)$$

式(6)即为

$$\frac{\sqrt{(a_0 + L(t))^2 + (b_0 + L(t))^2}}{V} =$$

$$\frac{\gamma([X]_t - [X]_0)}{2v_i(k_0 t)} + \frac{\sqrt{a_0^2 + b_0^2}}{V} \quad (8)$$

其中, γ 为裂纹表面溶解对溶液中某组分的浓度贡献系数,相当于由于裂纹表面积与岩石表面积

之比,据式(8)得到裂纹迹长及隙宽方向扩展的长度 $L(t)$,代入式(6)出即可以求出水化腐蚀 t 时间段的等效裂纹长度为

$$\Delta a(t) = (1 + \kappa)L(t) \quad (9)$$

1.4 水-岩作用下应力强度因子的计算

初始时刻 I、II 型应力强度因子为

$$K_I^t = \sigma^t \times \sqrt{\pi a} =$$

$$\left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta] - p \right\} \sqrt{\pi a_0}$$

$$K_{II}^t = \tau^t \times \sqrt{\pi a} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \sqrt{\pi a_0} \quad (10)$$

在水化学溶液的作用下,原有的裂纹缓慢扩展, t 时刻的裂纹长度为 $a(t)$,裂纹尖端的应力强度因子为

$$K_I^t = \sigma^t \times \sqrt{\pi a} =$$

$$\left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta] - p \right\} \sqrt{\pi a(t)}$$

$$K_{II}^t = \tau^t \times \sqrt{\pi a} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \sqrt{\pi a(t)} \quad (11)$$

式中 $a(t)$ 为 t 时刻裂纹的长度,为

$$a(t) = a_0 + \Delta a(t) \quad (12)$$

2 算例研究

为研究该方法的可行性笔者给出了下面的算例,岩板、裂纹尺寸及参数选取见表 1,渗透压仅在裂纹张开部分直接作用于裂纹面.

表 1 计算参数

Table 1 Parameters used in model

岩板 宽度 W/mm	初始裂 纹半长 a ₀ /mm	裂纹 半宽 b ₀ /mm	γ	远场 应力 σ ₁ /MPa	远场 应力 σ ₃ /MPa	水压力 p/MPa	抗拉 强度 σ _t /MPa	裂纹 倾角 β/°	κ	k ₀ / (mol · m ⁻² · s ⁻¹)
200	15	0.1	0.063 831	20	5	5	10	30	8.46E-04	10 ⁻⁸

文献[11]对不同水环境下砂岩 pH 值演变和矿物蚀变开展一系列的实验研究,配制了 NaCl, CaCl₂, MgCl₂ 三种化学组分的溶液, pH 值分别为 3、6、9,浓度为 0.010 mol/L.同时还配制了蒸馏水溶液进行对比分析.岩石主要矿物成份含量为石英(SiO₂) 58.5%,长石 13.5%,绿泥石胶结物 10.0%,生物岩屑 18.0%.表 2 为砂岩在各中化学溶液下 SiO₂ 浓度随时间变化的测定结果.本文引用其测定结果进行计算裂纹尖端应力强度因子

并进行分析,见表 3.

从表 3 可以看出,随着水-岩化学作用的不断发展,应力强度因子随着时间的推移逐渐增大,同时,溶液 pH 值大小对应力强度因子的影响非常明显.当溶液的 pH 值越小即酸性越强,或越大即碱性越强时,对砂岩的腐蚀越大,等效裂纹扩展越快. pH 值为中性时,其影响相对减小,腐蚀作用得到较大缓解,等效裂纹发展缓慢.

表 2 测定结果
Table 2 Determination results

腐蚀时间/m	SiO ₂ 浓度/(mg · L ⁻¹)			
	蒸馏水溶液	pH = 3 溶液	pH = 6 溶液	pH = 9 溶液
T = 0	0.34	0	0	0.01
T = 1	0.51	1.4	0.58	0.71
T = 2	0.67	1.88	0.8	0.99
T = 3	0.86	2.25	1.02	1.3
T = 4	0.95	2.5	1.2	1.45
T = 5	0.98	2.55	1.32	1.52
T = 6	1.18	2.66	1.43	1.56

表 3 计算结果
Table 3 Calculation results

时间 /m	蒸馏水溶液			pH = 3 溶液			pH = 6 溶液			pH = 9 溶液		
	$\Delta\alpha$ / m	K_I / MPa · m ^{1/2}	K_{II} / MPa · m ^{1/2}	$\Delta\alpha$ / m	K_I / MPa · m ^{1/2}	K_{II} / MPa · m ^{1/2}	$\Delta\alpha$ / m	K_I / MPa · m ^{1/2}	K_{II} / MPa · m ^{1/2}	$\Delta\alpha$ / m	K_I / MPa · m ^{1/2}	K_{II} / MPa · m ^{1/2}
T = 0	0	0.814051	1.409978	0	0.814051	1.409978	0	0.814051	1.409978	0	0.814051	1.409978
T = 1	3.87E-06	0.814156	1.410160	3.18E-05	0.814914	1.411473	1.32E-05	0.814409	1.410598	1.59E-05	0.814483	1.410726
T = 2	7.51E-06	0.814255	1.410331	4.27E-05	0.815210	1.411985	1.82E-05	0.814545	1.410833	2.23E-05	0.814656	1.411025
T = 3	1.18E-05	0.814372	1.410534	5.11E-05	0.815438	1.412380	2.32E-05	0.814681	1.411068	2.933E-05	0.814847	1.411356
T = 4	1.39E-05	0.814428	1.410630	5.68E-05	0.815592	1.412647	2.73E-05	0.814792	1.411260	3.273E-05	0.814939	1.411516
T = 5	1.46E-05	0.814446	1.410662	5.80E-05	0.815623	1.412700	3.00E-05	0.814866	1.411388	3.433E-05	0.814983	1.411591
T = 6	1.91E-05	0.814570	1.410876	6.05E-05	0.815690	1.412817	3.25E-05	0.814933	1.411506	3.523E-05	0.815007	1.411634

3 结论

- 1)水 - 岩化学作用对岩体裂隙的影响包括水压力和水化学腐蚀两方面的作用。
- 2)运用地球化学矿物 - 水反应的溶解动力学计算离子浓度的变化,通过质量守恒定律从理论上给出了裂纹在迹长及隙宽方向的水化腐蚀等效裂纹长度定量公式,从而计算岩体裂隙尖端应力强度因子的方法是行之有效的。
- 3)水 - 岩化学作用的存在,对裂纹尖端应力强度因子的影响明显。随着水 - 岩化学作用的不断发展,应力强度因子随着时间的推移逐渐增大。

参考文献:

[1] 汤连生,张鹏程,王 洋. 水作用下岩体断裂强度探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(19):3337 - 3341.

[2] 汤连生,王思敬. 水 - 岩化学作用对岩体变形破坏力学效应研究进展[J]. 地球科学进展,1999,14(5): 433 - 439.

[3] 汤连生,张鹏程,王思敬. 水 - 岩化学作用的岩石宏观力学效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,

2002,21(4):526 - 531.

[4] 陈四利,冯夏庭,李邵军. 岩石单轴抗压强度与破裂特征的化学腐蚀效应[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(4):547 - 551.

[5] 周翠英,邓毅梅,谭祥韶,等. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(1):33 - 38.

[6] 陈四利,冯夏庭,周 辉. 化学腐蚀下砂岩三轴细观损伤机理及损伤变量分析[J]. 岩土力学,2004,25(9):1363 - 1367.

[7] 汤连生,张鹏程,王思敬. 岩石水化学损伤及其定量方法的探讨[C]//第六次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京:中国科技出版社,2000:90 - 93.

[8] 汤连生,王思敬. 岩石水化学损伤的机理及量化方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(3):314 - 319.

[9] 王建秀. 腐蚀损伤岩体中的水化 - 水力损伤及其在隧道工程中的应用研究[D]. 成都:西南交通大学,2002.

[10] 中国科学院地球化学研究所. 高等地球化学[M]. 北京:科学出版社,1998.

[11] 乔丽苹,刘 建,冯夏庭. 岩石水物理化学损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(10):2117 - 2124.