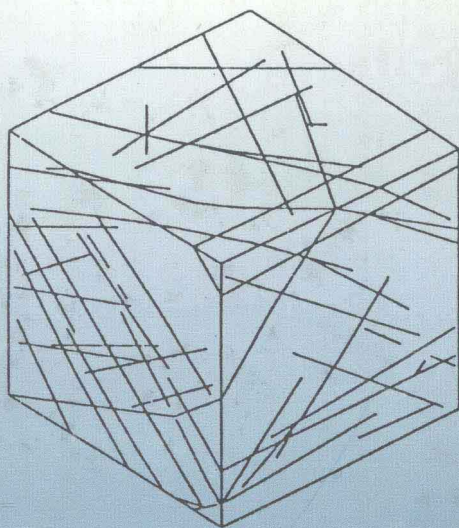


第五届全国青年 岩石力学与工程学术 会议论文集

曹 洪 陈晓文 廖建三 主编



华南理工大学出版社

第五届全国青年 岩石力学与工程学术会议 论文集

曹 洪 陈晓文 廖建三 主编

华南理工大学出版社
·广州·

内 容 简 介

本论文集收入论文共 109 篇,包括以下几方面的议题:岩石力学基本理论与实验研究、数值方法及计算机模拟、监测与信息化施工方法、岩石地下工程、边坡的治理及监测、深基坑及城市隧道工程、地基基础工程以及岩土工程的其他议题。

图书在版编目(CIP)数据

第五届全国青年岩石力学与工程学术会议论文集/曹洪,陈晓文,廖建三
主编. —广州:华南理工大学出版社,1999. 11

ISBN 7-5623-1480-2

I. 第…

II. ①曹…②陈…③廖…

III. 岩土工程-学术会议-文集

IV. TU43-53

华南理工大学出版社出版发行

(广州五山 邮编 510640)

责任编辑 王魁葵

各地新华书店经销

广州市新光明印刷厂印装

*

1999 年 11 月第 1 版 1999 年 11 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:40.5 字数:916 千

印数:1—550 册

定价:140.00 元

開拓是事業之本
創新乃科學之源

祝全國青年岩石力學與工程
學術會議圓滿成功

王思敬

一九九九年十月

王思敬教授为中国工程院院士、中国岩石力学与工程学会理事长。

顾问委员会

(按姓氏笔画排列)

王思敬院士 王梦恕院士 白世伟研究员 刘宝琛院士
孙均院士 朱维申研究员 吴仁培教授 杨志法研究员
陆培炎教授 郑颖人教授 哈秋舫教授 傅冰骏研究员
傅泽南教授 葛修润院士

组织委员会

主 任:李永盛

副主任:曹 洪 黄宏伟

委员会(按姓氏笔画排列):

刘东升 刘汉东 刘保卫 张子新 李永盛 杨光华
陈如桂 陈晓文 周萃英 金丰年 郭树高 唐春安
莫海鸿 曹 洪 梅志荣 黄宏伟 赖琼华 廖建三

论文评审委员会

(按姓氏笔画排列)

李永盛 陈晓文 林本海 房营光 周萃英 唐孟雄
莫海鸿 黄宏伟 曹 洪 杨光华 赖琼华 廖建三

序

目前,我国的建设事业日新月异。在水利枢纽、大坝、堤围、地下厂房、洞室、铁路、隧道、桥梁、高速公路、机场、地铁、海港、码头、采矿、边坡治理、工厂、高层建筑、深基坑开挖、填海和开山等与岩土有关的工程中,遇到许多岩土力学理论、岩土工程计算技术、测试技术和施工技术的新问题,岩土力学与工程的科技队伍不断扩大,水平逐步提高。我们许多人,包括一些在国外的中国学者,特别是年青人,正在根据岩体本来的面貌(硬岩或软岩、块体、断裂、节理、溶蚀、溶洞、构造应力等)去研究它在工程受力时的变形、稳定和开裂的定量分析及全过程,研究新的岩石工程测试技术和新的施工技术;根据土体本来的面貌(一般土、软土、黄土、冻土、非饱和土和饱和土、膨胀土等)去研究在基础荷载作用、桩荷载作用、土桩结构共同作用、基坑开挖荷载作用、边坡开挖和地铁的矿山法开挖的变形、受力和失稳的定量分析和全过程,研究新的测试技术、桩施工和土加固处理的各种新施工技术,创造了许多新的理论、新的计算方法和新的施工技术。现在年青人已成为学术会议的主角,他们中的许多人已是教授、博士生导师、总工程师、学术带头人、学术团体的领导人,有的获各种科技奖励,有的已申请院士。这次中国岩石力学与工程会青年工作委员会主办的第五届全国青年岩石力学与工程学术会议的论文已充分证明了这一点。

在广东,青年岩土工程工作者的学术活动是很活跃的。1998年12月12日有70多人参加了广东省岩石力学与工程学会青年工作委员会在飞来峡举办的青年学术讨论会;1999年6月27~28日由广州市建委主办的“广州地区岩土工程青年专家学术论坛”,有53位硕士、博士和51位高级工程师参加。目前,广东许多重大的岩土工程主要由青年人完成,在评审岩土工程的各种专家组中,青年人占了大多数。有的单位从事岩土力学与工程研究的人员全是年青人。年青人已成为岩土工程队伍的主力军!

我国的岩土工程是那么宏伟和复杂,我们的青年人是那么勤奋而富于创造性,可以预见,岩土力学与工程学科必将迅速发展,岩土力学与工程的专家队伍将日益壮大,人才辈出。

广东省岩石力学与工程学会理事长
中国岩石力学与工程学会常务理事

陆培炎

1999 年 10 月

前 言

中国岩石力学与工程学会青年工作委员会成立于1991年。在中国岩石力学与工程学会的领导下,在老一辈专家们的关心和支持下,青委会积极工作,为从事岩石力学与工程研究和实践的广大青年科技工作者提供了一个良好的学术交流途径,两年一届的全国青年岩石力学与工程学术会议,更为青年人提供了一个充分展现才能的舞台和广交朋友的机会。

本书为第五届全国青年岩石力学与工程学术会议论文集。内容包括:①岩石力学基本理论与试验研究;②数值方法及计算机模拟;③监测与信息化施工方法;④岩石地下工程;⑤边坡治理及监测;⑥深基坑及城市隧道工程;⑦地基基础工程;⑧岩土工程的其他议题等。本次会议共收到论文138篇,经评审委员会专家评审选出109篇文章收入论文集。这些论文反映了水利水电、石油、煤炭、采矿、交通、能源和国防等多行业岩石力学与工程方面的研究成果,其中不少是国家自然科学基金、国家重点科技攻关项目的成果总结或研究报告的一部分,有些工作接触到岩石力学的前沿课题,并取得了优异的成果,具有较高的学术水平。论文集中所涉及的大量的岩土工程中设计、施工、监测、难题处理等方面的实践资料,具有较高的参考价值。

中国工程院院士、中国岩石力学与工程学会理事长王思敬教授为本书题词。广东省岩石力学与工程学会理事长陆培炎教授为本书作序。在会议筹备和论文集编辑过程中得到了不少老一辈专家的关心和指导,在此一并表示感谢。

中国岩石力学与工程学会青年工作委员会对负责筹备本届会议并给予本届会议支持和赞助的广东省水利水电科学研究所、同济大学、广东省岩石力学与工程学会学术工作委员会、广东省岩石力学与工程学会青年工作委员会、华北水利水电学院等单位表示衷心的感谢。

改革开放20年来,国民经济的发展带动岩石力学、土力学和岩土工程技术的快速发展。21世纪即将来临,随着技术的进步、市场的需求,我们面临的机遇更多,挑战也更多,对于青年岩石力学工作者而言,这是一个充分发挥聪明才智的好年代。我国的岩石力学与工程技术在许多方面与国际先进水平差距还不小,这就要求我们更多地学习、研究和实践,更多地交流,不断提高。

年青的朋友们,让我们承担起时代的重任,积极投身到科学研究和工程实践中去,探寻机理,创新工艺,解决难题,为祖国的建设,为科学的发展贡献青春年华!

中国岩石力学与工程学会青年工作委员会

1999年10月

第一部分

岩石力学基本理论与试验研究

化学环境对岩石的裂纹扩展特性的影响^{*}

冯夏庭

中国科学院武汉岩土力学研究所
武汉 530071

赖户政宏

资源环境综合技术研究所
日本筑波 305-8569

摘 要 通过三点弯曲和双抗扭试验,探讨了化学环境对岩石强度和裂纹扩展速度的影响。结果表明:与空气条件下相比,裂纹尖端的水或化学溶液使岩石试件的破裂韧度明显地降低。双抗扭试验中应力腐蚀破裂也明显地受到化学环境的影响,并依赖于 ζ 电位。

关键词 化学环境 岩石强度 裂纹扩展 影响

1 引言

岩石的强度因环境的变化而变化是早已得到证实的问题。例如,干燥条件下和湿润条件下的岩石强度是不同的,湿润条件下的岩石强度要低 10% 左右^[1]。而且,在裂纹扩展方面,湿润条件下的破坏韧性值比干燥条件下的要低,裂纹扩展速度加快^[2]。环境中的腐蚀物质的化学反应、应力腐蚀,使得裂纹扩展在临界值以下发生。因此,研究环境对岩石力学性质和裂纹扩展的影响规律,评价环境影响下岩体的长期稳定性、长期强度,已成为地下空间的开发、利用领域中的一个重要的研究课题。

Rebinder 等探讨了化学环境对钻进面上岩石力学性质的影响^[3],比较了几种不同化学药剂的作用及其机制,用 Griffith 强度理论对由于化学物质的吸附使得矿物表面能降低、促进裂纹扩展等进行了说明。但是,当岩石钻进过程时间较短时,新裂纹的形成与新形成裂纹的化学物质的吸附作用以及发生速度还未很好地弄清楚。另一方面,Westwood 进行了溶液中的酸性矿物材料的硬度测定试验^[4],探讨了硬度的变化与 ζ 电位之间的关系。 ζ 电位为零时,材料的表面硬度最大。当钻进时,Westwood 试验 ζ 电位若为零,则材料表面的移动度(mobility)最小,钻进能量消耗最大。后来,有人探讨了 ζ 电位与钻进效率、单轴抗压强度、应力腐蚀破裂之间的关系。例如,美国矿山局的研究小组在室内进行了岩块的模拟钻进试验,报告了 ζ 电位与钻进效率的关系^[5]。Ishido 研究了结晶岩石的单轴抗压强度随 ζ 电位变化的关系^[6]。Wiederhorn 报告了应力腐蚀裂纹取决于 ζ 电位的结果^[7]。上述研究表明了化学环境对岩石力学性质的影响,但对其影响机制未很好地阐明。

本文为了说明化学环境条件对岩石的力学性质的影响,探讨了国际岩石力学学会推荐的标准三点弯曲试验过程中不同化学溶液侵蚀对声发射行为和破裂韧度的影响,还研究了双抗扭(double torsion)试验中化学环境对应力腐蚀裂纹的影响。为了说明岩石力学性质与 ζ 电位之间的关系,对不同的岩石和化学溶液组合进行了 ζ 电位测试。

^{*}:国家自然科学基金项目(59604001),教育部博士点基金项目(96014513)。

2 对破坏韧度值的影响

2.1 试验概要

采用三点弯曲的标准试件(长 210 mm, 直径 60 mm), 进行裂纹口位移控制的反复加卸载试验(图 1), 以获得环境对破坏韧度值的影响规律。试验过程中, 试件裂纹口附近是干燥, 或浸泡在纯水、DTAB 溶液(浓度 1.0×10^{-3} mol/L) 或 NaCl 溶液(浓度为 1 mol/L、pH 值为 2 或 12)中。试件表面的开口附近布置有 12 个用于破坏源定位的 AE 探头和 2 个用于获得随时间演化的 AE 参数(事件数、能量、振幅、持续时间等)。使用的 AE 测试系统同三轴抗压试验。

2.2 破坏韧度值的变化

图 2 给出了裂纹口变形与载荷的关系的一个例子, 以此可以获得破坏韧度值。使用的岩石为稻田花岗岩和来特砂岩。图 3 给出了破坏韧度值随环境变化的例子。

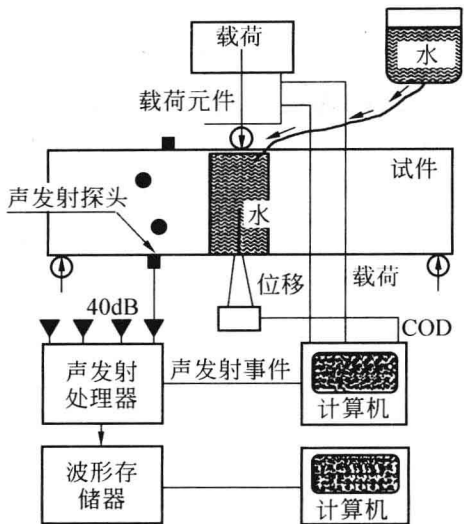


图 1 三点弯曲试验模式

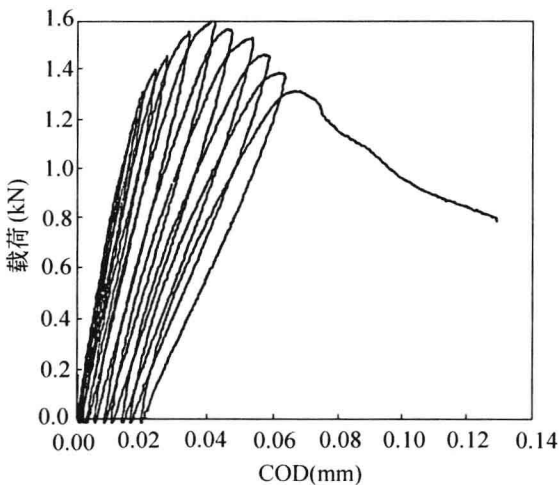


图 2 稻田花岗岩裂纹口变形与载荷的关系

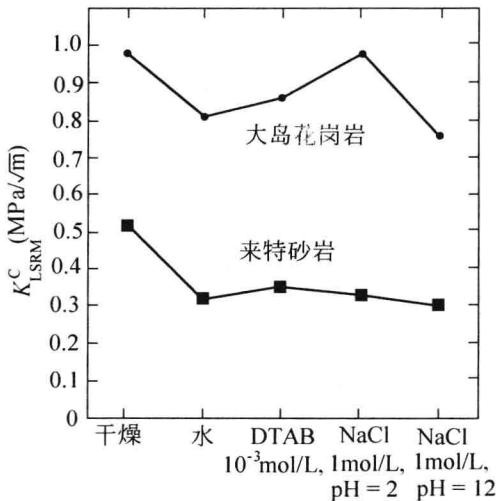


图 3 破坏韧度值环境变化的关系

由试验结果可以看出, 对于来特砂岩, 纯水和化学溶液侵蚀下的破坏韧度值要比干燥时低 30% 左右。纯水和 DTAB 溶液侵蚀下的破坏韧度值没有明显的差别。但是, NaCl 溶液侵蚀下的破坏韧度值要比纯水的低。对于稻田花岗岩, 纯水侵蚀下的破坏韧度值要比干燥时低 20% 左右, 纯水和 DTAB 溶液侵蚀下的破坏韧度值没有明显的差别。在 NaCl 溶液侵蚀下, 酸性溶液时的破坏韧度值与干燥时的相差不大, 而碱性溶液时的破坏韧度值比纯水时的要稍低一些。这表明, 与干燥条件相比, 化学溶液和纯水对裂纹口段的破坏韧度值的影响是明显的。

3 对应力腐蚀破裂的影响

3.1 应力腐蚀破裂

对于与岩石相类似的硅酸盐玻璃和某些结晶氧化物, Charles 建议用下列式子描述应力腐蚀破裂:

$$V = V_0 e^{(-\frac{H}{RT})} K_I^n \quad (1)$$

式中, V 为裂纹速度; V_0 和 n 为常数, n 为应力腐蚀破裂指数; H 为活性能比; R 为气体常数; T 为温度。

式(1)可以简写为:

$$V = \alpha K_I^n \quad (2)$$

其中, $\alpha = V_0 e^{(-\frac{H}{RT})}$ 。

图 4 表示了化学环境下的 $K_I - V$ 模式。区域 I 的裂纹扩展为裂纹尖端的应力腐蚀所引起。

3.2 双抗扭试验概要

双抗扭试验法具有以下优点: ①裂纹尖端的应力扩大系数 K_I 与裂纹长度无关系; ②单纯的试件形状; ③单纯的载荷形式。图 5 表示双抗扭试验的试件形状。双抗扭试验的应力扩大系数 K_I 由下式确定:

$$K_I = PW_m [3(1 + \nu)/(Wd^3 d_n)]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中, P 为载荷; ν 为泊松比; d 为试件的厚度; d_n 为槽部的试件厚度。

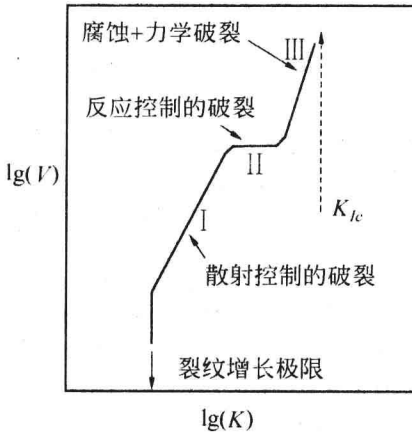


图 4 化学环境下的 $K_I - V$ 模式图

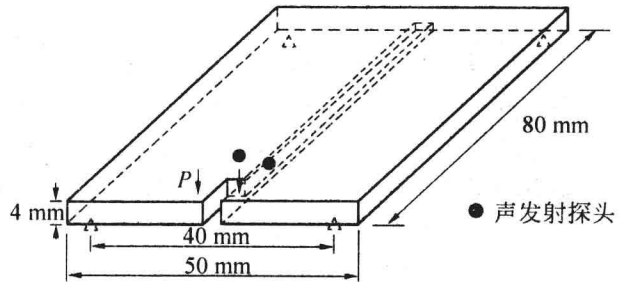


图 5 双抗扭试件

本试验使用的是日本爱知县大岛花岗岩, 试件的尺寸如图 5 所示。试验采用恒定位移和恒定载荷两种加载模式, 试件放在空气中, 或浸泡在水、化学溶液 DTAB (浓度 10^{-3} mol/L, 化学式 $C_{15}H_{34}NBr$) 中。为探讨各向异性的影响, 采用裂纹的伸长方向与某种岩目(裂缝面、粒子面或硬质面)相平行的三种大岛花岗岩试件: A 类为裂纹的伸长方向平行于裂缝面, B 类为裂纹的伸长方向平行于粒子面, C 类为裂纹的伸长方向平行于硬质面。

3.3 试验结果的考察

3.3.1 岩石各向异性的影响与声发射

本试验采用恒定位移和恒定载荷两种加载模式。在恒定位移加载模式下, AE 事件和载荷随时间变化, 在载荷达到最大值时固定位移, 然后载荷随时间的推移而逐渐减小。根据载荷的减小率, 求得任意时刻的载荷与裂纹扩展速度之间的关系:

$$V = -\phi a_f p_f \left(\frac{1}{P^2} \right) \left(\frac{dP}{dt} \right) \quad (4)$$

式中, a_f , p_f 为试验终了时的裂纹长度和载荷; ϕ 由 $d_n / \sqrt{(\delta_n^2 + d_n^2)}$ 求得, 本研究中, $\delta_n = (4 \sim 5) d_n$ 。

对于恒定载荷模式, 载荷保持一定值 p_0 , 由变形速度可以求得裂纹扩展速度:

$$V = \frac{dz}{dt} / (BP_0) \quad (5)$$

式中, $B = (3aW_m^2)/(GWd^3)$; a 为裂纹长度。

图 6 为空气条件下三类试件的 $K_I - V$ 双对数模式图。裂纹速度在 $10^{-3} \sim 10^{-7}$ m/s 范围内分布, 应力扩大系数是以 A 类、B 类到 C 类的顺序增加。但是, 由 $K_I - V$ 关系的斜率求得的应力腐蚀系数 n , A 类的最小, B 类的最大。这与岩石的相对强度关系相一致。

3.3.2 环境的影响

图 7 给出了一个 C 类试件的空气、水、DTAB 侵蚀下的 AE 发生率与应力扩大系数关系的双对数图。应力腐蚀系数 n 依次为 35.353、21.21、12.623, 急剧减小。而且, 在 ζ 电位为零时, 与空气和水条件相比, DTAB 条件下应力腐蚀破裂的应力扩大系数范围更宽。

在恒定载荷的双抗扭试验中, 任意固定的应力扩大系数条件下, 还探讨了环境对裂纹速度的影响, 表 1 给出了 $K_I = 1.182 \text{ MN/m}^{3/2}$ 时的 A 类和 B 类试件的裂纹速度的比较。A 类试件中, 与裂缝面平行的裂纹伸长, 在空气、水、DTAB 环境下的裂纹速度存在一个数量级的差别。DTAB 环境下的裂纹速度为空气条件下的 100 倍左右。与 A 类试件相比, B 类试件受环境的影响要小。

上述恒定位移和恒定载荷双抗扭试验的结果表明, 大岛花岗岩的应力腐蚀破裂存在对 ζ 电位的依赖性。

表 1 恒定载荷的双抗扭试验中的大岛花岗岩的裂纹速度的比较

$K_I = 1.182 \text{ MN/m}^{3/2}$	A 类 (m/s) 裂缝面	B 类 (m/s) 裂缝面
空气	1.98×10^{-5}	2.16×10^{-5}
水	1.22×10^{-4}	3.36×10^{-5}
DTAB	1.80×10^{-3}	6.20×10^{-5}

5 结论

本研究探讨了不同应力状态(破坏韧性、双抗扭)下, 化学环境的变化对岩石的物理力学性质、裂纹扩展的影响, 获得如下认识:

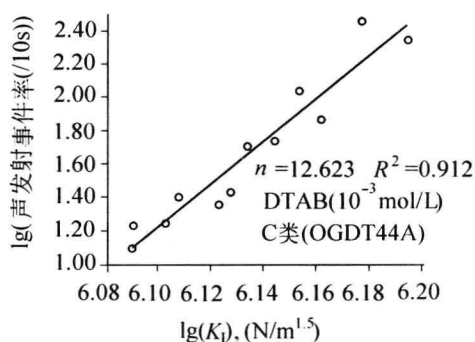
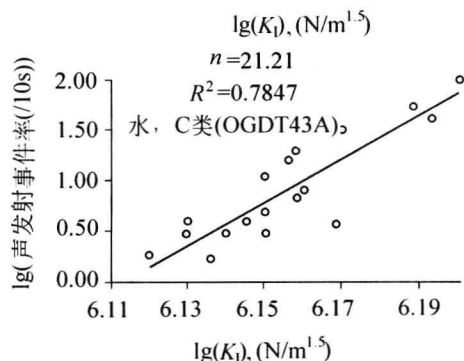
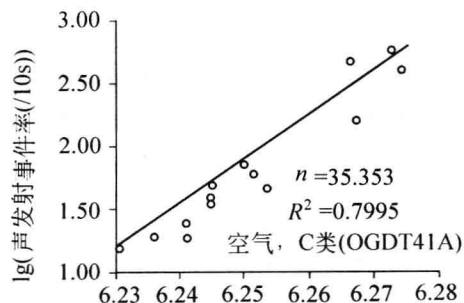
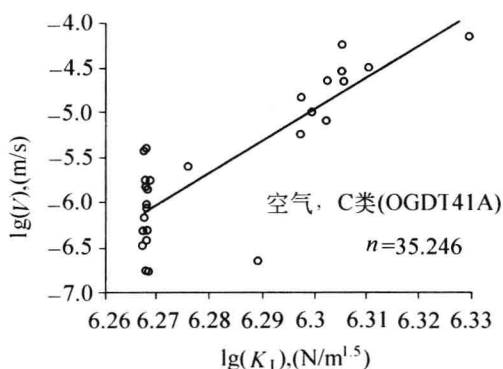
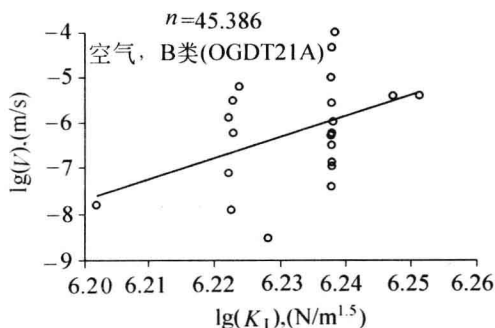
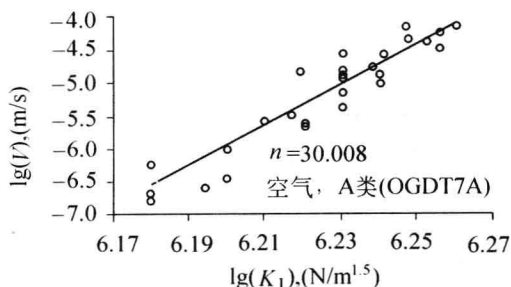


图 6 大岛花岗岩在空气条件下的 $K_I - V$ 模式图 图 7 大岛花岗岩在不同条件下的 $K_I - AE$ 模式图

(1) 裂纹尖端的环境的变化,使得破坏韧度值有明显的变化,这与干燥条件不同。但未查明破坏韧度值有电位的依赖性。

(2) 双抗扭试验的应力腐蚀存在明显的方向性和化学溶液 DTAB 的电位依赖性。

参考文献

- 1 Swolfs H S. Chemical effects of pore fluids on rock properties, in underground waste management and environment implications, T. D. Cook (ed.), 1972. 224 ~ 234
- 2 Dunning J, Douglas B, Millar M, McDonald. S. The role of the chemical environment in frictional deformation: stress corrosion cracking and comminution, Pageoph, 1994, 143(1/2/3): 151 ~ 178
- 3 Rebinder P A, Schreiner L A, Zhigach K F. Hardness reducers in drilling: a physico-chemical method of facilitating mechanical destruction of rocks during drilling, Akad Naunk, USSR, Moscow, 1994, Tansl. By

CSIRO, Melbourne, Australia

- 4 Westwood A R C, Macmillan N H. Environmental – sensitive hardness of nonmetals, In: The science of hardness testing, ASTM, Cleveland, Ohio, 1973. 377 ~ 417
- 5 Engelmann W H, Watson P J, Tuzinski P A, Pahlman J E. Zeta potential control for simultaneous enhancement of penetration rates and bit life in rock drilling U.S. Bureau of Mines RI9103, 1987
- 6 Ishido T, Mizutani H. Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, J. Geophys. Res., 1984, 86: 1763 ~ 1775
- 7 Lajtai E Z, Schmidtke R H, L P Bielus. The effect of water on the time-dependent deformation and fracture of a granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. , 1987, 24(4): 247 ~ 255
- 8 Charles R J. The strength of silicate glasses and some crystalline oxides. In Fracture; Proc. of Int. Conf. on the Atomic Mechanisms of Fracture, MIT Press, Cambridge, Mass, 1959: 225 ~ 249

Influence of chemical environments on the crack velocity of rocks

Feng Xiating

(Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese
Academy of Sciences, Wuhan, 430071)

Seto Masahiro

(National Institute for Resources and Environment, Tsukuba, Japan 305)

Abstract: The effect of chemical environments on the strength and crack velocity of rock were investigated by conducting three points bending tests and double torsion tests on sandstone and granite specimens. Water or chemical solutions at the crack tip significantly lowered the fracture toughness of the rock specimen when compared to that in dry condition. Stress corrosion cracking in double torsion tests was also significantly affected by the chemical environments and represented the ζ potential dependency.

Key words: chemical environment, rock strength, crack velocity, change

岩石蠕变研究的若干进展

金丰年 许宏发

工程兵工程学院 南京 210007

摘 要 岩石蠕变是岩石力学的重要研究内容,本文主要介绍和讨论蠕变曲线、蠕变寿命和蠕变模型三个方面的研究新进展。

关键词 岩石 蠕变 蠕变寿命 模型

1 引言

岩石的蠕变是岩石力学的重要研究内容,尽管具有相当高的难度,例如,蠕变试验的时间比较长,特别是当蠕变应力水平较低时,试验时间少则数周,多则数月,甚至数年;另外,岩石是一种含缺陷的材料,要获得定量化的蠕变规律非常困难。但是,由于众多学者长期的致力研究,尤其是近十年来,与岩土工程的发展相适应,蠕变研究的进展十分显著。本文将介绍和讨论蠕变曲线、蠕变寿命和蠕变模型三个主要方面取得的若干进展。

2 蠕变曲线

由蠕变试验得出的应变随时间而变化的曲线,称为蠕变曲线。近年来,试验设备和试验技术的发展非常迅速,试验数据的采集和整理更加方便,从而进一步加深了蠕变曲线的试验分析。

图1为多胡砂岩的蠕变试验结果^[2],与通常的表现形式略有不同,横坐标取为 $\tau = t/(t_c - t)$ 的对数,其中 t 为蠕变试验时间, t_c 为蠕变寿命。如此取坐标以后,蠕变应变随 τ 几乎呈直线增加,较好地反映出了蠕变应变变化的定量规律。

图2为三城目安山岩(S)和河津凝灰岩(K)的蠕变试验结果^[3],分别给出了蠕变应变和蠕变应变速度随时间的变化,其中横坐标取为时间的对数。在蠕变的初始阶段,蠕变应变与时间的对数成比例增大,应变速度与时间成反比例减小。

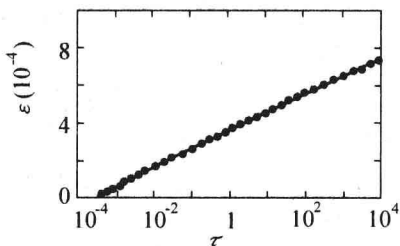


图1 多胡砂岩蠕变应变变化规律

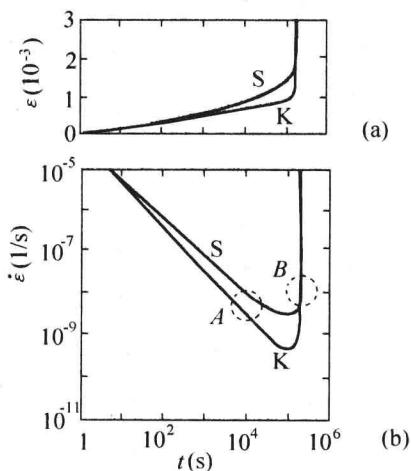


图2 蠕变应变及速度的经时变化

在这样的坐标图中,蠕变变形破坏的全过程反映得比较清楚,图中 A、B 所示位置大体为一次、二次、三次蠕变的分界部位,蠕变应变速度随时间而变化的曲线则基本上可以看成由两直线段加一圆弧连接段组成。

图 3 在应力—应变曲线图上标出了两种蠕变应力水平下两个时刻的蠕变应变,“△”为蠕变应变速度达到最小时蠕变应变的位置,“□”为发生蠕变破坏前 1 秒钟时蠕变应变的位置,图中虚线为应力达到强度破坏点时的卸载曲线。由此可以看出,蠕变应变速度达到最小的蠕变应变落在强度破坏点的卸载曲线上,蠕变发生破坏的蠕变应变则基本上落在强度破坏点以后的应力—应变曲线上^[4],也就是说,在应力—应变曲线和蠕变曲线之间存在着一定的、互为对应的关联,这是蠕变试验研究在近年来取得的较显著的进展。

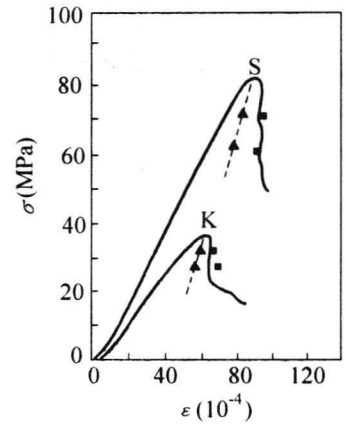


图 3 应力—应变曲线上不同时刻蠕变应变的位置

3 蠕变寿命

蠕变寿命是指蠕变试验开始至蠕变破坏为止的时间。蠕变应力水平与蠕变寿命之间的关系,或者说蠕变应力水平与蠕变破坏之间的关系,一直是岩石力学中没有很好解决的问题之一。随着蠕变试验的深入,有关这方面的规律性研究也正在逐步趋向于定量化。

图 4 为三城目安山岩在不同应力水平下单轴压缩蠕变寿命的试验结果^[5]。试验分别在干燥和湿润两种状态下进行,蠕变应力水平的变化范围为 66% ~ 97%。试验结果表明,不管是干燥状态还是湿润状态,当纵坐标取为蠕变寿命的对数,横坐标取为破坏强度 σ_F 与蠕变应力 σ_C 之差时,在如此坐标图中,蠕变寿命 t_C 随 $(\sigma_F - \sigma_C)$ 基本呈直线变化,因此两者间

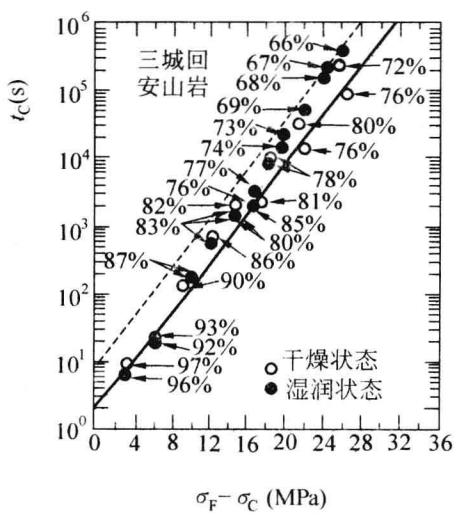


图 4 单轴压缩蠕变寿命随蠕变应力的变化

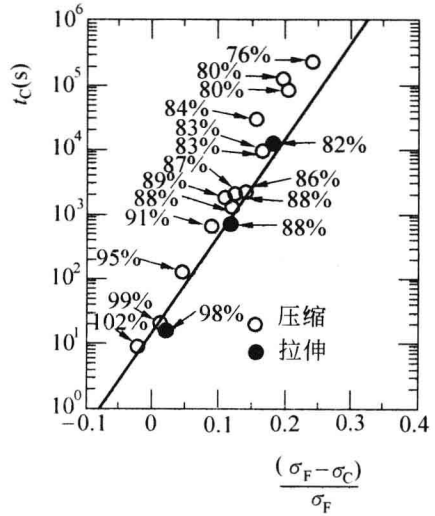


图 5 单轴拉伸与单轴压缩蠕变寿命随蠕变应力变化的比较