

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0050

刘得潭, 沈振中, 徐力群, 等. 裂隙岩体水力劈裂临界水压力试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 140-145. LIU D T, SHEN Z Z, XU L Q, et al. Experimental study on critical internal water pressure of hydraulic fracturing of fractured rock mass[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 140-145. (in Chinese)

裂隙岩体水力劈裂临界水压力试验研究

刘得潭^{1,2}, 沈振中^{1,2}, 徐力群^{1,2}, 甘磊^{1,2}, 李舸航²

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 许多水工建筑物建于基岩上, 天然岩体大多存在节理裂隙, 在高水压力作用下易发生水力劈裂破坏。为研究裂隙岩体的水力劈裂特性, 以水泥砂浆代替岩石、制作预制裂缝试样, 研制了高压水密封装置和水压力加载系统, 开展了不同缝长和缝宽的砂浆试件水力劈裂试验研究, 测定了预制裂缝起裂临界水压力、水力劈裂临界水压力, 分析了两者关系, 提出了预测表达式。试验结果表明, 试件水力劈裂临界水压力为 0.441~1.542 MPa, 相同条件下, 试件水力劈裂临界水压力与初始缝长及缝宽呈负相关关系; 预制裂缝起裂临界水压力与水力劈裂临界水压力比值为 61.57%~64.17%, 与预制裂缝初始缝长和缝宽无关。应用应力强度因子计算公式, 综合试验结果, 分析得到了考虑预制裂缝宽度影响的裂缝起裂临界水压力和试件水力劈裂临界水压力的计算表达式。

关键词: 裂隙岩体; 水力劈裂; 预制裂缝; 临界水压力

中图分类号: TV 36 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2018)02-0140-06

Experimental study on critical internal water pressure of hydraulic fracturing of fractured rock mass

LIU Detan^{1,2}, SHEN Zhenzhong^{1,2}, XU Liqun^{1,2}, GAN Lei^{1,2}, LI Gehang¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing

210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Many hydraulic structures are built on bedrocks, and most natural rock masses have joint fissures, which are prone to triggering hydraulic fracturing phenomenon under high water pressure. In order to study the hydraulic fracturing characteristics of fractured rock mass, we prepared specimens with pre cast cracks using cement mortar as a substitute material of rock mass. We developed a water pressure loading system and a water sealing device, and used them to test the hydraulic fracturing of cement mortar specimens with different initial pre cast crack lengths and widths. We determined the critical water pressure of pre cast crack initiation and that of hydraulic fracturing of the specimens. The relationship between the critical water pressure of pre cast crack initiation and that of hydraulic fracturing was analyzed, and the predictive formulas for the critical water pressures of pre cast crack initiation and hydraulic fracturing were proposed. The test results showed that the critical water pressure of hydraulic fracturing of the specimens was 0.441 MPa-1.542 MPa. The critical water pressure of hydraulic fracturing would decrease as the initial pre cast crack length and width increased when the other factors remained unchanged. The ratio between the critical water pressure of pre cast crack initiation and the critical water pressure of hydraulic fracturing was 61.57%-64.17%, and it was independent of the initial crack length and width. Based on the stress intensity factor formula and the experimental results, we obtained the calculation formulas for the critical water pressure of pre cast crack initiation and hydraulic fracturing of the specimens with consideration of the influence of the width of the pre cast cracks.

Key words: fractured rock mass; hydraulic fracturing; pre cast crack; critical water pressure

收稿日期: 2017-11-14 修回日期: 2017-12-20 网络出版时间: 2018-03-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180309.1724.020.html>

基金项目: 国家自然科学基金/雅砻江联合基金项目(U1765205); 国家自然科学基金青年项目(51609073); 长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2017515/KY)

Funds: National Natural Science Foundation of China/Yalong River Joint Fund (U1765205); The Youth Project of National Natural Science Foundation of China (51609073); the CRSRI Open Research Program (CKWV2017515/KY)

作者简介: 刘得潭(1993-), 男, 宁夏中卫人, 主要从事水工结构方面的研究。E-mail: 2456650534@qq.com

通讯作者: 沈振中(1968-), 男, 江苏苏州人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构工程科学研究、人才培养和工程实践。E-mail: zhzhsher@hhu.edu.cn

岩体经过长期地质构造作用,含有很多微观甚至宏观上的节理、孔隙及裂纹等。水的渗入使得裂缝内的水压值增大,增加了裂缝尖端应力集中的程度,可造成裂缝发生扩展、贯通出现水力劈裂现象^[2]。

目前,很多学者在岩石水力劈裂方面进行了深入的研究。Hayashi^[3]在 $0.3\text{ m}\times 0.3\text{ m}\times 0.3\text{ m}$ 立方体安山岩块表面钻一直径 10 mm 的圆孔,以黏性稠油为液体进行三轴水力劈裂试验,得出裂缝重新开裂的临界孔压经验公式;Papanastasion和Thiercelin^[4]通过试验,研究了岩石塑性屈服和剪胀对水力劈裂裂缝的张开和扩展的影响,定性的分析了裂缝尖端在水力劈裂作用下的力学上和结构上的反应;Kim和Abass^[5]对以石膏试件代替岩石试件,进行三轴水力劈裂试验,得到了主应力方向与劈裂方向之间的关系,并观察了裂缝的发育状况;吴景浓^[6]分别对于厚壁圆筒岩样和饱和厚壁圆筒岩样进行了不同围压下的水力劈裂试验,得到了岩样的破裂模式、致裂强度与围压的关系;唐红侠和周志芳^[7]等人以某水电站工程坝址区岩体所作的水力劈裂试验资料为基础,分析了岩体在水力劈裂过程中岩体裂隙形成的机理。针对规定形状的岩样在制备过程中对试验设备要求较高,不易内置裂缝等缺点,一些学者采用取材方便的砂浆作为岩体相似材料进行岩体相关试验研究^[8-11]。王国庆和谢兴华^[12]等人利用高压渗流一应力耦合试验仪对以水泥砂浆作为岩石相似材料的厚壁圆筒试件进行水力劈裂试验,研究了试件的破坏形式和发生水力劈裂破坏的条件,探讨了试件在不同压力环境下水力劈裂破坏的机理;陈勉和庞飞^[13]等人采用立方体水泥砂浆试件代替岩石研究了岩体裂纹扩展规律;詹美礼和岑建^[14]两人采用水泥砂浆相似材料代替岩石研究了厚壁圆筒水力劈裂破坏条件,提出了发生水力劈裂破坏的半经验理论判别关系;甘磊^[15]采用立方体试件,研究了试件水力劈裂临界水压力与与轴压和材料抗拉强度之间的定量关系。

上述研究工作虽然在岩体水力劈裂机理方面取得了不少成果,但在不同初始缝长、缝宽因素影响下岩石临界水压力研究很少,需进一步补充。针对这一问题,本文在文献[15]的基础上,进行了不同缝长、缝宽因素影响下岩石临界水压力试验。分析得到了不同缝宽、缝长对应的预制裂缝起裂临界水压力、水力劈裂临界水压力,拟合得到了预制裂缝起裂临界水压力与水力劈裂临界水压力关系,并提出了临界水压力计算表达式。

1 试验系统

1.1 水压力加载系统

裂缝表面所受的外水压力由自主研制的微机控

制电液伺服压力试验系统提供。该试验系统包括微机控制加载系统(耦合三轴加载系统)、电动施压泵、耐高压弯管。该水压力加载系统可施加最大水压力 3 MPa ,即水头达 300 m ,可以满足岩石、混凝土试件水力劈裂试验研究的需要。利用电动施压泵提供岩石试件的水压力,微机控制加载系统控制电动施压泵的开启、电调压力的采集、电动施压泵运转的速率等;耐高压弯管用于连接电动施压泵与水密封装置。

1.2 水密封装置

试件裂缝水密封性的好坏决定着试验的成败,随着试件所受的水压力值的增加,试件水密封难度也迅速增加。为了获得试件良好的水密封效果,这里研制了专门的水密封装置;该装置分两层,分别为硅胶密封层、工字钢架密封层。

硅胶密封层底层为厚度 5 mm 、宽度 20 mm 、长 120 mm 的黑色硅胶垫。利用高强度环氧树脂胶将黑色硅胶垫粘贴在工字钢内侧凹槽。由于硅胶具有良好的压缩性,所以利用硅胶垫作为密封夹层具有很好的密封效果。为了防止应变片与硅胶垫受压致使应变片发生过载现象,影响数据的采集,在黑色硅胶垫内侧粘贴3层薄的橡胶夹层。

工字钢密封层采用两块 2 cm 厚独立的工字钢板由螺杆、螺母连接而成。工字钢密封层的实物图如图1所示,工字钢板内侧切割打磨一深度 3 mm 、宽度 20 mm 、长 120 mm 的凹槽,用于安置硅胶密封层,增加试件的水密封效果,防止应变片与钢板直接接触发生过载现象,影响试验结果。两块工字钢中心位置预制一对直径为 1 cm 的螺纹孔。上下螺纹孔分别与特制接口、密封帽连接。试验前试样的预制裂缝与工字钢架螺纹孔对好位置后,将耐高压导水管与螺纹孔连接,启动水压力加载系统,将试样预制裂缝中的空气排出,排出空气之后,使用密封帽将工字钢架底部螺纹孔密封。

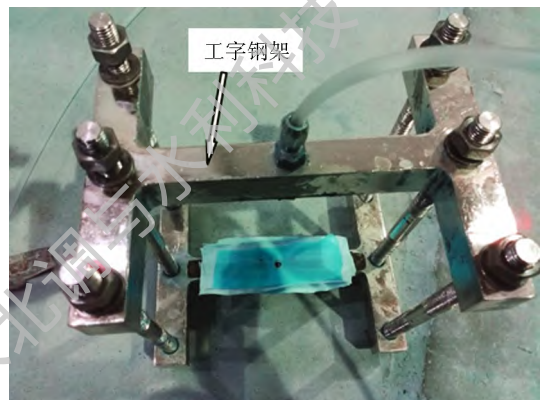


图1 水密封装置

Fig.1 Water sealing device

1.3 试件制作

采用水泥砂浆作为岩体相似材料,其配合比为:水泥:砂:水=1:4.559:0.774。试件尺寸为 $B \times H \times T=150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。试件不同长度、宽度的预制裂缝通过在模具预制裂缝孔中埋入钢片预制而成,待试样达到初凝时间后拔出预制钢片,形成贯穿试件的预制裂缝。为了测量试样预制裂缝起裂时临界水压力,在每个模具的侧面距预制裂缝孔尖端2 mm、20 mm、40 mm处预埋直径4 mm的耐高压导水管,待试件养护好后与水压传感器接头相连。试件养护28 d后,用水泥砂浆填补试件表面缺陷,并用砂纸打磨平整。本试验水力劈裂试件结构及尺寸见图2。

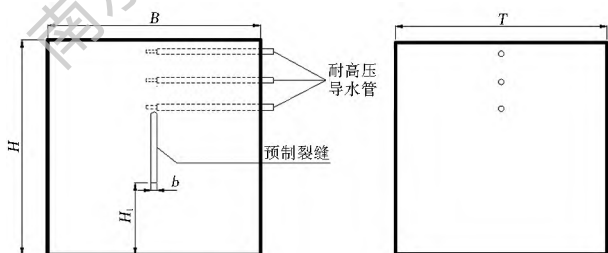


图2 试件结构及尺寸示意图

Fig.2 Structure and size of the specimen

2 试验方案

为了研究不同预制裂缝宽度、长度条件下预制裂缝起裂临界水压力及水力劈裂临界水压力,设计了A、B两种试验方案,见表3。对6个养护28 d成型的 $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$ 立方体试件测定其抗压强度及劈拉强度,测得平均抗压强度为11.71 MPa,平均劈拉强度为1.09 MPa。

3 试验结果及分析

3.1 预制裂缝起裂临界水压力

在靠近试件预制裂缝尖端位置处理设耐高压导水管,外接水压传感器,预制裂缝内水压较小时,裂缝未起裂扩展,水压传感器无测值。随着水压的不断增大,当增至某个值时,预制裂缝起裂,然后随着裂缝的扩展,水压传感器开始有测值。由于水前锋的发展滞后于干裂缝的扩展,所以可大致确定水压传感器有测值的时刻附近,裂缝开始起裂扩展,具体确定需结合裂尖应变的变化规律进行确定。

基于徐世烺和Reinhard^[16,17]提出的关于裂缝开展判断依据,试件的破坏形式由裂缝起裂前的线弹性阶段、裂缝起裂后的稳定扩展阶段、裂缝失稳破坏阶段。当试件处于裂缝起裂前的线弹性阶段时,

裂缝端部的应变与外荷载呈正比例关系。一旦裂缝起裂,裂缝端部附近的应变会随着应力突然释放出现回缩现象,拉应变突然降低。综合水压传感器测值和裂尖位置处应变变化规律,可确定裂缝起裂时临界水压力 P_{ini} 。

现以A-1-1试件为例分析说明,图3为距离裂尖2 mm、20 mm、40 mm水压传感器传化为该位置内水压力变化规律,表1列出了A-1-1试件起裂时附近部分应变数据。预制裂缝内水压较小时,裂缝扩展的宽度较小,靠近裂尖位置处的水压传感器无测值,随着预制裂缝内水压的增加,增至544 s时,距离裂尖2 mm位置的水压传感器开始有测值,由于水前锋的发展滞后于干裂缝的扩展,所以大致认定在544 s左右预制裂缝开始起裂;随着裂缝的扩展,在试验进行到598 s时距离预制裂缝尖端20 mm位置的水压传感器开始有测值,随着电动试压泵水压继续加载,测值不断增加;试验进行到635 s时距离预制裂缝尖端40 mm位置的水压传感器开始有测值,随着水压继续增加,测值不断增加,直至663 s时,试样发生劈裂破坏,电动施压泵水压突然降低,三个水压传感器测值也随之骤降。

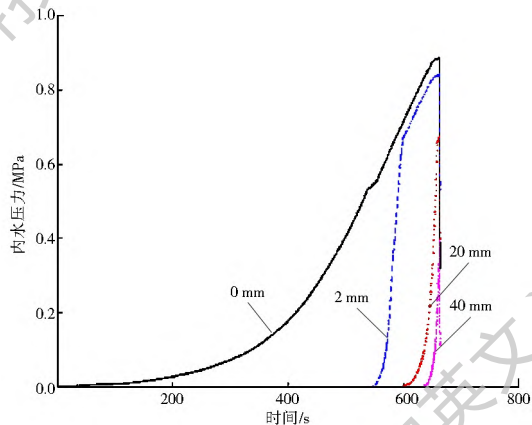


图3 A-1-1试件距离裂尖0 mm、2 mm、20 mm、40 mm位置处内水压力变化曲线

Fig.3 The curve of internal water pressure at the position of 0 mm, 2 mm, 20 mm, 40 mm to the crack tip of A-1-1 specimen

表1 A-1-1试件预制裂缝起裂时附近应变数据

Tab.1 Strain data near the crack of A-1-1 specimen at crack initiation

时间/s	水压传感器测值/kPa	裂尖应变值 μ_ε	电动施压泵水压/MPa
539	0	6.580 35	0.533
540	0	7.594 82	0.534
541	0	8.022 92	0.535
542	0	6.241 8	0.535
543	0	3.758 68	0.536
544	0.001 6	2.501 87	0.537

从表1可以发现,A-1-1试件在试验进行到541

s 时,应变突然开始减小,所以综合上述距裂尖 2 mm 处水压传感器测值分析可认为 A-1-1 试件在 541 s 时开始起裂,起裂临界水压力 P_{ini} 为 0.535 MPa。同样对其它工况下的试件进行裂缝起裂临界水压力 P_{ini} 的分析,取每组 3 个试件的平均值作为该工况裂缝起裂临界水压力,结果见表 3。从表 3 可以发现在其它影响因素相同时,预制裂缝宽度、长度在一定范围内,预制裂缝起裂临界水压力随着初始预制裂缝宽度的增加而减小,每增加 2 mm,起裂临界水压力降低 25% 左右;在其它影响因素一定时,预制裂缝起裂临界水压力随着初始预制裂缝长度的增加而减小,每增加 10 mm,起裂临界水压力降低 35% 左右。

3.2 水力劈裂临界水压力

试样所受水压值达到水力劈裂临界水压力值 P_c 时,电动施压泵水压突然下降至零附近,裂缝沿着裂尖方向贯通整个试件。现以 A-1-1 试样在水压

作用下发生水力劈裂破坏为例进行分析。由表 2 可知水压由第 660 s 的 0.883 MPa 升至第 663 s 的 0.886 MPa,第 663 s 到第 665 s 间,水压由 0.886 MPa 骤降至 0.321 MPa,此期间并有水流从破坏面喷射涌出,由此可认为在第 663 s 时发生了水力劈裂破坏,水力劈裂临界水压力为 0.886 MPa。

表 2 A-1-1 试样水力劈裂时数据

时间/s	660	661	662	663	664	665
水压力值/MPa	0.883	0.883	0.884	0.886	0.451	0.321

取每一组 3 个试样的平均值作为该工况下试样水力劈裂临界水压力, A、B 两组试验方案下水力劈裂临界水压力结果汇总于表 3。从试样水力劈裂破坏形态图可以看出试件破坏的形态为:裂缝沿着预制裂缝尖端贯通整个试件,劈裂破坏面与预制裂缝基本上处于同一个平面。部分试样水力劈裂破坏的形态见图 4。

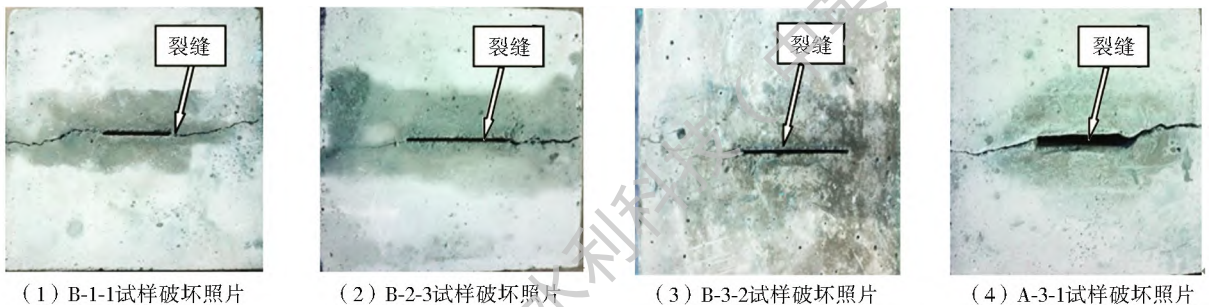


图 4 部分试样水力劈裂破坏形态照片

Fig. 4 Hydraulic fracturing photos of some specimens

从表 3 可以看出在其它影响因素相同时,预制裂缝宽度、长度在一定范围内,试样水力劈裂临界水压力随着初始预制裂缝宽度的增加而减小,每增加 2 mm,减小 30% 左右;试样水力劈裂临界水压力随着初始预制裂缝长度的增加而减小,每增加 10 mm,减小 40% 左右。

表 3 不同工况下试样临界水压力值

Tab. 3 The critical internal water pressure under different working conditions

工况	试样	数目/个	裂缝宽/mm	裂缝长/mm	P_{ini} /MPa	P_c /MPa
A	A-1	3	2	50	0.568	0.917
	A-2	3	4	50	0.431	0.695
	A-3	3	6	50	0.283	0.441
B	B-1	3	2	40	0.942	1.542
	B-2	3	2	50	0.568	0.917
	B-3	3	2	60	0.371	0.582

3.3 预制裂缝起裂临界水压力与水力劈裂临界水压力的关系

同一试样,预制裂缝起裂临界水压力 P_{ini} 与水

力劈裂临界水压力 P_c 的关系如图 5 所示。从图中可以发现,预制裂缝起裂临界水压力与水力劈裂临界水压力比值为 61.09% ~ 64.17%,由于比值变化范围较小,可认为预制裂缝起裂临界水压力/水力劈裂临界水压力与预制裂缝宽度、长度无关,拟合的关系式为:

$$P_c = 1.61P_{ini} \quad (1)$$

式中: P_{ini} 为试样预制裂缝起裂临界水压力; P_c 为试样水力劈裂临界水压力。

4 水力劈裂临界水压力理论计算公式

甘磊^[15]基于最大周向应力理论,得到了试样水力劈裂临界水压力计算公式。在文献[15]的基础上得到了本文试样水力劈裂临界水压力计算公式:

$$P_c = 0.394f_t \quad (2)$$

式中: f_t 为试样劈裂抗拉强度; P_c 为试样水力劈裂临界水压力。

通过式(2)得到 A-1 试样水力劈裂临界水压力

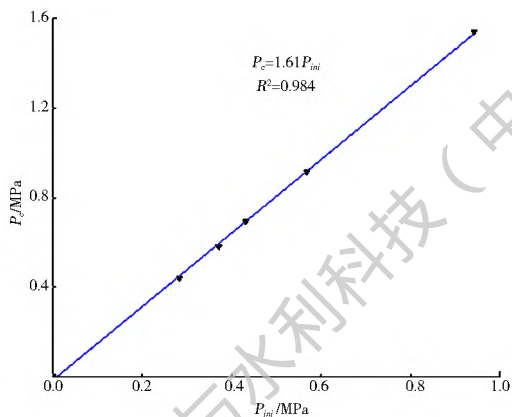


图5 裂缝起裂临界水压力

P_{ini} 与劈裂破坏临界水压力 P_c 的关系

Fig. 5 Relationship between critical internal water pressure of crack initiation and critical internal water pressure of hydraulic fracturing

力为 0.642 MPa, 这与试验测得的数据有 29% 的误差, 原因在于文献[15]没有考虑初始裂缝宽度对水力劈裂临界水压力的影响。因此, 对于一定初始缝长、缝宽的试样临界水压力理论计算表达式可通过下面步骤推求。

(1) 试件水力劈裂临界水压力计算公式。

对于中心裂缝所在的断面, 中心裂缝受均布荷载 P 作用时, 利用线弹性叠加理论可以等效成具有中心裂缝的载体两端受到均匀拉应力 P , 见图 6。图 6(b) 为无裂缝板, 其应力强度因子 $K = 0$, 故图 6(c) 情况下的应力强度因子等于图 6(a) 情况下的应力强度因子。对于图 6(a) 情况下的应力强度因子的求解, 虽然目前国内外对有限尺从宽板中心裂缝的 \bar{N} 型应力强度因子进行了研究, 并提出了裂缝长度 a 与试件尺寸对应应力强度因子影响的修正系数 α , 但对裂缝宽度 b 影响的研究很少, 基于此, 本文引入裂缝宽度修正系数 λ 对 \bar{N} 型裂缝应力强度因子表达式进行修正, 并求预制裂缝水力劈裂临界水压力 P_c 。计算公式。

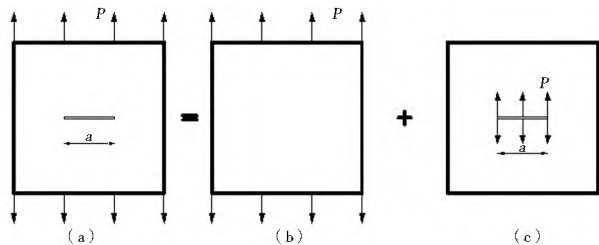


图6 带中心裂缝模型受力示意图

Fig. 6 Force diagram of the model with a central crack

对于图 6(a) 情况下, 裂缝失稳扩展的临界条件^[18]为:

$$K = K_{IC} \quad (3)$$

式中: K 为试样的应力强度因子; K_{IC} 为试样的断裂韧度。

当试样裂缝尖端的应力强度 K 到达断裂韧度 K_{IC} 时, 试件将失稳破坏。

对于图 6(a) 所示的情况, 裂缝尖端应力强度因子 K 的计算表达式为:

$$K = \sqrt{\pi \cdot a_c} \cdot \lambda \cdot p \cdot \alpha \quad (4)$$

式中: a_c 为裂缝有效长度 (mm); λ 为裂缝宽修正系数, $\lambda = f(\eta)$, 其中 $\eta = \frac{100b}{B}$; p 为作用在预制裂缝中的水压力 (MPa); α 为裂缝长修正系数。

裂缝扩展过程中, K_{IC} 为材料的基本参数, 是个常数, 不随裂缝尺从的变化而变化。 K_{IC} 一般通过试验获得, 但也可通过经验公式对其进行估算。参考已有的相关文献岩石试件的估算公式^[19-20] 如下所示:

$$K_{IC} = 0.13f_t \quad (5)$$

将式(4)、式(5)代入式(3), 可得到裂缝宽 b 影响修正系数为:

$$\lambda = f(\eta) = \frac{0.13f_t}{p \cdot \sqrt{\pi \cdot a_c} \cdot \alpha} \quad (6)$$

对修正系数 λ 与 η 进行回归分析, 可以得到其关系式(见图 7)为:

$$\lambda = 0.2\eta + 0.21 \quad (1 \leq \eta \leq 4) \quad (7)$$

则试样水力劈裂临界水压力为:

$$P_c = \frac{0.13f_t}{(0.2\eta + 0.21) \cdot \sqrt{\pi a_c} \cdot \alpha} \quad (8)$$

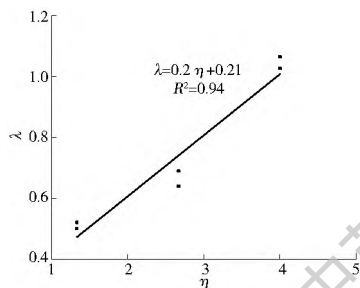


图7 λ 与 η 关系

Fig. 7 Relationship between λ and η

(2) 预制裂缝起裂临界水压力计算公式。

将式(1)代入式(8)可得预制裂缝起裂临界水压力计算表达式为:

$$P_{ini} = \frac{0.0807f_t}{(0.2\eta + 0.21) \cdot \sqrt{\pi a_c} \cdot \alpha} \quad (9)$$

5 结论

(1) 本文以水泥砂浆作为岩石相似材料研究了预制裂缝临界水压力, 试验结果表明: 试样预制裂缝临界水压力与初始缝长、缝宽呈负相关关系。

(2) 同一试样, 预制裂缝起裂临界水压力与水力

劈裂临界水压力比值为 61.57% ~ 64.17%，基本为常数，可认为与预制裂缝宽度、长度无关，拟合的关系式为： $P_c = 1.61P_{ini}$ 。

(3) 基于断裂力学理论，考虑了裂缝宽度对应力强度因子影响的修正系数，给定了岩石裂缝在一定宽度范围下水力劈裂临界水压力表达式为： $P_c = \frac{0.13f_t}{(0.2\Gamma + 0.21) \cdot \sqrt{\pi a_c} \cdot \alpha}$ ，裂缝起裂时临界水压力表达式为： $P_{ini} = \frac{0.0807f_t}{(0.2\Gamma + 0.21) \cdot \sqrt{\pi a_c} \cdot \alpha}$ ，由于试验数据有限，本文提出的临界水压理论计算公式有待进一步验证。

参考文献 (References):

[1] 倪绍虎, 何世海, 汪小刚, 等. 裂隙岩体水力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 488-498. (NI S H, HE S H, WANG X G, et al. Hydraulic properties of fractured rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 488-498. (in Chinese))

[2] 谢兴华, 速宝玉. 裂隙岩体水力劈裂研究综述[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 330-336. (XIE X H, SU B Y. A review of fracture rock hydraulic fracturing research [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 330-336. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2004.02.040

[3] ITO T, HAYASHI K. Analysis of crack reopening behavior for hydrofracture stress measurement[A]. The 34th U. S. Symposium on rock mechanics[C], University of Wisconsin Madison: Bezaire Haimson. 1993, 335-338.

[4] PAPANASTASIOU P, THERCELIN M. Influence of inelastic rock behavior in hydraulic fracturing[A]. The U. S. Symposium on rock mechanics[C], University of Wisconsin Madison 1993. 339-342.

[5] KIM C M, ABASS H H. Hydraulic fracture initiation from horizontal wellbores: laboratory experiments [C]//Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science: Proceedings of the 32nd U. S. Symposium. Rotterdam: Balkema, 1991: 231-240.

[6] 吴景浓. 室内岩石水压致裂三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(4): 61-69. (WU J N. Research on laboratory triaxial test for rock hydrofracture [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(4): 61-69. (in Chinese))

[7] 唐红侠, 周志芳, 王文远. 水劈裂过程中岩体渗透性规律及机理分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1320-1322. (TANG H X, ZHOU Z F, WANG W Y. Permeability of rock and mechanism analysis during hydraulic fracturing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8): 1320-1322. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2004.08.031.

[8] 蒲成志, 曹平, 陈瑜, 等. 不同裂隙相对开度下类岩石材料断裂试验与破坏机理[J]. 中南大学学报, 2011, 42(8): 2394-2399. (PU C Z, CAO P, CHEN Y, et al. Fracture test failure mechanism of rock like material of relatively different fracture apertures [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(8): 2394-2399. (in Chinese))

[9] 李明田, 李术才, 杨磊, 等. 类岩石材料表面裂纹扩展模式的实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(1): 21-26. (LI M T, LI S C, YANG L, et al. Experimental study of the surface crack propagation mode in rock like materials [J]. Journal of experimental mechanics, 2009, 24(1): 21-26. (in Chinese))

[10] 张波, 李术才, 杨学英, 等. 含交叉多裂隙类岩石材料单轴压缩力学性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1777-1785. (ZHANG B, LIS C, YANG X Y, et al. Mechanical property of rock like material with intersecting multi flaws under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1777-1785. (in Chinese))

[11] 李晓红, 卢义玉, 康勇, 等. 岩石力学实验模拟技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 6-24. (LI X H, LU Y Y, KANG Y, et al. Simulation experiment technique of rock mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2007: 6-24 (in Chinese))

[12] 王国庆, 谢兴华, 速宝玉. 岩体水力劈裂试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4): 481-484. (WANG G Q, XIE X H, SU B Y. Experimental study of hydraulic fracturing of rock mass [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(4): 481-484. (in Chinese))

[13] 陈勉, 庞飞, 金衍. 大尺寸真三轴水力压裂模拟与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊): 868-872. (CHEN M, PANG F, JIN Y. Experiments and analysis on hydraulic fracturing by a large size triaxial simulator [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp): 868-872. (in Chinese))

[14] 詹美礼, 岑建. 岩体水力劈裂机制圆筒模型试验及解析理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1174-1181. (ZHAN M L, CEN J. Experimental and analytical study on hydraulic fracturing of cylinder sample [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1174-1181. (in Chinese))

[15] 甘磊. 水工混凝土结构水力劈裂试验及数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2013. (GAN L. Experimental and numerical simulation on hydraulic fracturing of hydraulic concrete structure [D]. Nanjing: Hohai University, 2013. (in Chinese))

[16] 徐世烺, 赵国藩. 混凝土结构裂缝扩展的双K断裂准则[J]. 土木工程学报, 1992, 25(2): 32-38. (XU S L, ZHAO G F. A Double K fracture criterion for the crack propagation in concrete structures [J]. China, 1992, 25(2): 32-38. (in Chinese))

[17] Xu Shilang, Reinhardt H W. A simplified method for determining double K fracture parameters for three point bending tests [J]. International Journal of Fracture, 2000, 104: 181-209.

[18] 徐世烺. 混凝土断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 6-20. (XU S L. Fracture mechanics of concrete [M]. Beijing: Science Press, 2011: 6-20 (in Chinese))

[19] 邓华锋, 朱敏, 李建林, 等. 砂岩Ⅱ型断裂韧度及其强度参数的相关性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3586-3591. (DENG H F, ZHU M, LI J-L, et al. Study of mode II fracture toughness and its correlation with strength parameters of sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3586-3591. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2012.12.004.

[20] 李宗利, 张宏朝, 任青文. 岩石裂纹水力劈裂分析及临界水压计算[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1217-1220. (LI Z L, ZHANG H C, REN Q W. Analysis of hydraulic fracturing and calculation of critical internal water pressure of rock fracture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1217-1220. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2005.08.008.