

单轴压缩状态下类岩石材料水力劈裂试验

徐力群¹,陶韵成¹,刘得潭¹,旦增赤列²

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 西藏自治区江孜县水利队,西藏 日喀则 857400)

摘要:采用自制水泥砂浆作为类岩石材料进行试验,研究内水压力和单轴压缩耦合作用下岩体的破坏规律。制作带有中心预制裂缝的立方体试样,利用自行研发的内外水压力与轴向压力加载装置,在固定内水压力加载速度和轴向压力大小的前提下,对不同材料强度和尺寸的试样,以不同轴向压力加载方向进行了水力劈裂试验。试验结果表明:轴向压力加载方向对裂缝尖端的起裂角度有一定影响,在固定内水压力加载速度下,裂缝内水压力上升速度与试样强度正相关;轴向压力方向无论是与预制裂缝走向平行还是垂直,都会加快内水压力上升速度;试样水力劈裂临界水压力与试样强度正相关;轴向压力加载方向对单裂缝试样水力劈裂影响较大,轴向压力方向与裂缝走向垂直时对裂缝开裂起抑制作用,轴向压力方向与裂缝走向平行时对裂缝开裂起促进作用。

关键词:类岩石材料;水力劈裂;单轴压缩;临界水压力;试验研究

中图分类号:TU458⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)04-0028-07

Hydraulic fracture test of rock-like materials under uniaxial compression//XU Liqun¹, TAO Yuncheng¹, LIU Detan¹, DANZENG Chilie² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangzi County Water Conservancy Bureau in Tibet, Shigatse 857400, China)

Abstract: Self-made cement mortar was used as the rock-like materials to test the law of rock destruction under the coupling effect of water pressure and uniaxial axial compression. Under the premise of steady hydrostatic loading speed and axial pressure, cube specimens of different material strengths and sizes with prefabricated cracks in the center were made to perform hydraulic fracture tests by a self-developed hydraulic pressure and axial compression device. The results show that the axial compression loading direction has some influence on the crack initiation angles, and the rising of the internal water pressure is positively correlated with the strength of the specimen at a steady hydrostatic loading rate. The axial compression loading direction, whether parallel or vertical to the prefabricated cracks, can accelerate the rising of internal water pressure. The critical internal water pressure of hydraulic fracture is positively correlated with the strength of the specimen. The axial compression loading direction has a greater effect on the hydraulic fracture of a specimen with a single crack. When the axial compression direction is perpendicular to the direction of the prefabricated fracture, the crack initiation is inhibited. On the contrary, when the axial compression direction is parallel to the prefabricated fracture direction, the crack cracking is promoted.

Key words: rock-like materials; hydraulic fracture; uniaxial compression; critical internal water pressure; experimental study

水力劈裂是高水头作用驱动下,岩体或土体内裂纹产生、发展、贯通等物理现象的统称,岩体水力劈裂是岩体渗流-应力耦合研究的一个重要分支^[1],广泛应用于石油开采、水利工程建设、核废料地下处理、地应力测量等工程中。由于岩体水力劈裂而造成的工程事故发生过多起^[2-7],大坝、边坡、矿井等工程中的岩体水力劈裂问题是一个亟待解决的难题。目前,水力劈裂研究多集中在油气井开采与地应力测量方面,即研究岩体在高渗压水力劈裂作用下结构改变对裂隙渗流的影响^[8-10],偏向于流体力学(流场)方面;而偏向固体力学(力场)方面,应用断裂损伤相关理论,对水力劈裂作用下岩体本身的变形规律、破坏机理、承载能力等力学性能的研究还有待进一步深入。

水力劈裂研究最常使用的实验模型有两种:①圆筒模型,即使用中心钻孔的圆柱形样品,将水静态加载注入钻孔直到样品劈裂破坏。岩体水力劈裂试验大多数采用圆筒模型^[11-14]。圆筒模型内孔受内水压力后试样会产生环向拉应力,且岩体的应力状态是球对称或轴对称的,而实际工程岩体各向应

力状态往往是不同的,故不能很好地模拟工程实际情况。②立方体模型,即利用立方体或长方体样品,在3个方向上独立加载,以模拟更类似于工程实际的三轴应力场^[15-19]。李宗利等^[20-21]对斜角度单裂缝岩石立方体模型的水力劈裂与临界水压力做了较为详细的理论分析和计算。

国内外学者对岩石和类岩石材料的劈裂性质进行了大量的研究^[22-26],但对于岩石水力劈裂试验,仍未总结出试样材料、试样强度和荷载等因素与劈裂历时之间的关系。基于采用立方体模型的研究大多针对岩体在围压状态下的劈裂特性,而对于单轴压缩状态下的岩体水力劈裂研究较少。复合应力状态往往可以视为多种单一应力状态的叠加,故开展单一应力状态下的水力劈裂研究具有重要意义。

本文针对不同方向的单轴压缩与裂缝作用开展水力劈裂作用试验研究,采用带有预制裂缝的正方体或长方体试样,进行模拟水-岩耦合作用荷载试验,以探讨试样强度、荷载大小、加载方式等因素与劈裂临界水压力和劈裂历时之间的关系。

1 试验设备及试样

1.1 试验设备

试验采用河海大学与溧阳市永昌工程实验仪器有限公司联合研制的大型三场耦合三轴实验系统,系统由电动压力泵、压力水箱、转换阀门、耐高压弯管等部分组成,可实现数据计算机实时采集。水压密封装置采用自主设计研制的工字形水压密封架,采用延展性不同的两层橡胶垫进行双层密封,水密封效果良好。使用河海大学水工结构实验室的电液伺服万能试验机加载应力,动态信号测试分析系统采集应力应变数据。

1.2 试样制备

由于采集性质相同、形状规则、大小固定的天然岩石难度较高,且岩石试样取出后性质受扰,与在地层中性质差别较大,故采用水泥砂浆制作试样,作为岩石的相似材料进行试验。作为对比试验,在同一时期浇筑了3批不同强度的试样,以相同条件养护,强度等级分别记为M7.5、M10、M15,配合比见表1。

表1 水泥砂浆试样配合比

强度等级	水泥、砂、水的质量之比	水泥标号
M7.5	1 : 4.91 : 0.87	P. C 32.5R
M10	1 : 4.23 : 0.53	P. C 42.5R
M11	1 : 4.01 : 0.79	P. C 42.5R

试验用水泥为南京市龙潭镇中国水泥厂有限公司生产的海螺牌P. C 32.5R与P. C 42.5R复合硅酸盐水泥;砂子采用细砂,为最大粒径小于0.35 mm

的河砂;水取民用自来水。

类岩石材料尺寸效应与其长径比有关,但岩石长度对峰值应力前的变形特性没有显著影响^[27],因此试样的尺寸效应并不明显。每种强度的试样分别通过不同模具浇筑成Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ3类,Ⅰ、Ⅱ类试样如图1所示,试样中的预制裂缝均通过在模具正中心位置的预制裂缝孔中埋入一端为刀刃状的钢片预制而成,待试样达到初凝时间后拔出钢片,形成一侧为尖端的贯穿预制裂缝,裂缝长50 mm,宽2 mm。Ⅲ类试样为边长70.7 mm的实心立方体,用于测定试样的抗压强度与劈拉强度^[28]。

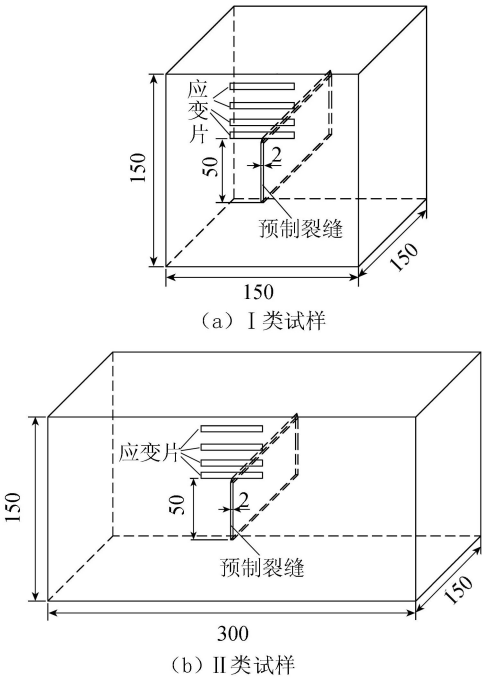


图1 Ⅰ、Ⅱ类试样结构示意图(单位:mm)

1.3 数据采集

预制裂缝内水压力由电压力泵施加,可自定义加压速度与数据读取间隔时间。试样表面应变采用应变片与表面式应变计测量,连接信号采集仪记录。应变片粘贴好后均匀涂抹一层环氧树脂胶,起绝缘与提高密封性作用。轴向压力通过万能试验机预设和加载,通过设定压力大小,根据试样受压面积可换算为试样所受轴向压力。

2 试验方案

对Ⅲ类试样进行抗压强度及劈拉强度试验测试,取平均值作为各个强度等级试样的抗压及劈拉强度。试验步骤为:①密封装置安装完毕后,连接应变片,粘贴表面式应变计;②将试样置于万能试验机加载台,施加压力达到预设值后,充水排出裂缝内空气,拧紧密封螺帽;③对试样进行内水压力加载,保持各组试验内水压力加载速度相同,每隔1 s记录

1 次内水压力值,直至试样劈裂破坏后停止试验。

为了研究试样在不同轴向压力作用下破坏时的临界水压力与破坏形式,不考虑围压,采用相同尺寸、不同强度的试样进行 3 组对比试验:①A 组采用 I 类试样,无轴向压力作用;②B 组采用 I 类试样,轴向压力方向与裂缝走向平行;③C 组采用 II 类试样,轴向压力方向与裂缝走向垂直。各组试验方案如图 2 所示。

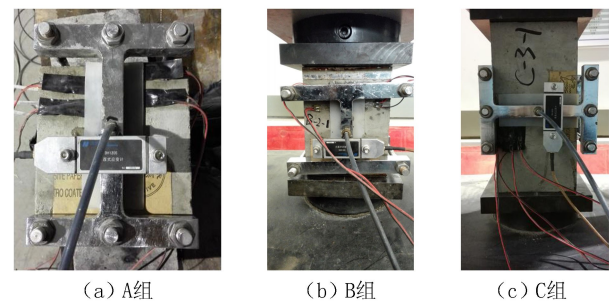


图 2 试验方案

试验中当内水压力上升到破坏的临界值时,劈裂面突然有大量水渗出,并伴随有沉闷破裂声,随后内水压力快速下降到接近于零,此现象即表明试样发生水力劈裂破坏,产生整体贯穿或局部贯穿的裂缝,形成劈裂面或贯通的渗水通道。如试样 A-2-1 试验时,内水压力由 1 008 s 时的 1.635 MPa 骤降至 1 009 s 的 0.29 MPa,可推断试样在 1 008 ~ 1 009 s 时间段发生了水力劈裂,该试样发生水力劈裂破坏时的临界水压力值为 1.635 MPa。

3 试验结果与分析

3.1 试验数据统计

3 组试验共 12 个试样的水力劈裂对比试验结果如表 2 所示。

表 2 水力劈裂试验结果统计

试样	强度等级	试样抗压强度 f_c /MPa	试样劈裂强度 f_t /MPa	轴向压力 σ_1 /MPa	轴向压力 σ_3 /MPa	劈裂历时 t /s	临界水压力 P_c /MPa
A-1-1	M7.5	8.30	0.91	0	0	1 397	1.580
A-1-2	M7.5	8.30	0.91	0	0	1 143	1.498
A-2-1	M10	11.15	1.28	0	0	1 008	1.635
A-2-2	M10	11.15	1.28	0	0	935	1.604
A-3-1	M15	17.48	2.07	0	0	720	1.969
A-3-2	M15	17.48	2.07	0	0	574	1.914
B-1-1	M7.5	8.30	0.91	0	0.2	382	1.161
B-2-1	M10	11.15	1.28	0	0.2	349	1.288
B-3-1	M15	17.48	2.07	0	0.2	527	1.735
C-1-1	M7.5	8.30	0.91	0.2	0	987	2.012
C-2-1	M10	11.15	1.28	0.2	0	576	2.094
C-3-1	M15	17.48	2.07	0.2	0	231	2.495

3.2 试样劈裂破坏与试样强度关系

采用断裂力学方法对单裂缝岩体结构水力劈裂

试验的临界劈裂水压进行验证。根据应力强度因子理论,轴向压力作用下水力劈裂破坏属于 I 型裂纹劈裂(张开型裂纹劈裂),Irwin 提出的裂缝失稳扩展的临界条件^[29-30]为

$$K_I = K_{Ic} \tag{1}$$

式中: K_I 为张开型裂缝的应力强度因子, $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$; K_{Ic} 为试样的断裂韧度, $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ 。

可将试样简化为含中心裂缝的有限矩形板,其试样受力情况如图 3 所示。

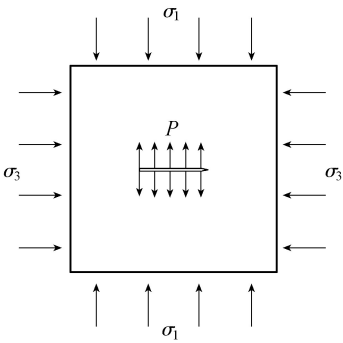


图 3 试样受力示意图

3.2.1 无外部轴向压力作用(A 组试样)

A 组试样裂缝表面受均布内水压力 P , 轴向压力 $\sigma_1 = \sigma_3 = 0, \tau_{xy} = 0$, 裂缝尖端应力强度因子 K_I 计算公式为

$$K_I = F_I P \sqrt{\pi a} \tag{2}$$

式中: a 为半裂缝长, m ; F_I 为与裂缝长度和试样尺寸相关的常数,根据文献[31]含中心裂缝矩形板问题应力强度因子计算方法,求得 $F_I = 1.158$ 。

A 组试样水力劈裂破坏属于纯 I 型断裂破坏,联立式(1)与式(2)可得出 A 组 3 种不同强度试样断裂韧度 K_{Ic} 。采用文献[32]的试验数据进行对比分析,依据类岩石材料抗压强度与断裂韧度呈线性相关关系的规律^[33],将 A 组试样与文献[32]的试验数据 K_{Ic} 和 f_c 线性拟合,结果如图 4 所示。

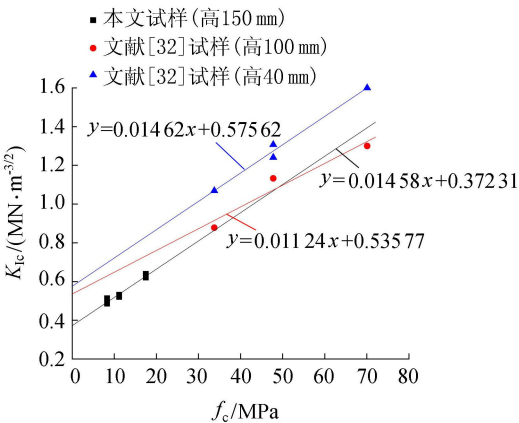


图 4 I 型断裂韧度随抗压强度变化关系

徐世烺^[34]采用体积、跨度、厚度和高度四系列

的三点弯曲梁试件研究了混凝土断裂韧度的尺寸效应规律,发现试件高度是影响混凝土断裂韧度的主要因素。由于水泥砂浆试样的失稳韧度随着试样高度的增大而表现出下降的趋势,相同强度的试样,高度每增大 10 mm,失稳韧度约降低 2.8%^[32]。A 组试样(高 150 mm)与文献[32]高度 40 mm 试样的拟合曲线相比,高度相差 110 mm,断裂韧度降低 35.3%,符合文献[32]所述规律。

文献[32]试验试样采用粗砂,最大粒径为 1.2 mm,A 组试样采用细砂,最大粒径为 0.35 mm,故 A 组试样抗压强度较小。范飞飞等^[35]的研究结果表明,对于配合比、尺寸、养护等条件均相同的试样,采用细砂与粗砂制备的水泥砂浆试样抗压强度相差在 3~4.3 倍之间。对于强度等级 M7.5、M10 和 M15 的 A 组试样,抗压强度分别为文献[32]高度 40 mm 试样的 4.07 倍、4.28 倍和 4.01 倍,在 3~4.3 倍之间,且离散性较小,可见 A 组试样抗压强度符合文献[35]所述规律,试验数据可靠。

3.2.2 轴向压力方向与裂缝走向平行(B 组试样)

B 组试样受轴向压力, $\sigma_1=0$ 且 $\sigma_3\neq 0,\tau_{xy}=0$,由应力状态分析可知裂缝表面上的正应力 σ_a 为均布内水压力 P ,剪应力 $\tau_a=0$,根据经典断裂力学的观点也属于 I 型裂纹劈裂,裂缝尖端应力强度因子 K_I 计算公式为

$$K_I=\sigma_a\sqrt{\pi a}\tag{3}$$

即与裂缝走向平行的轴向压力 σ_3 与裂缝尖端的应力强度因子无关,按式(3)计算,与 A 组试样情况受力相同,破坏时临界水压力 P_c 应相等。然而试验结果表明,轴向压力的存在使临界水压力 P_c 降低,且试样的破坏速度加快,说明应力强度因子理论在这种特殊情况下并不能很好地反映真实情况。此外当加载的轴向压力 σ_3 仅为 0.2 MPa 时,B 组的临界水压力 P_c 较 A 组降低的数值远大于法向变形引起的分力,砂浆强度越小,轴向压力对破坏的促进作用越明显。根据表 3 中 A 组与 B 组临界水压力数据,对比 3 种强度的试样,发现 B 组试样的临界水压力较 A 组试样分别下降了 24.56%、20.49% 和 10.66%。

类岩石材料单轴压缩产生的裂缝走向近乎轴向,与此类似,预制裂缝位置也会受到垂直于轴向压力方向的拉应力,并在裂缝端部产生应力集中。当轴向压力 σ_3 的方向与预制裂缝走向一致时,轴向压力 σ_3 必定对水力劈裂起促进作用。

根据 Griffith 理论,试样中总是存在一些微小裂隙或空腔,当应力增大到一定程度时,这些裂隙和空腔就开始扩展,越靠近端部受应力集中的作用越大,越易发展,最终沿轴向开裂。在 B 组试验中,轴向

压力较小,不足以使试样的裂隙空腔扩展开裂,但由于存在对称轴向压力,试样可以近似地看作一个轴向受压的梁或杆,当裂缝内水压力逐渐增大时,相当于受到一个与轴向压力垂直的作用力,导致受压试样失稳,又由于缝尖水压力作用和预制裂缝尖端应力集中现象,加剧了裂缝的开裂扩展。

3.2.3 轴向压力方向与裂缝走向垂直(C 组试样)

C 组试样裂缝表面受均布内水压力 P ,轴向压力 $\sigma_1\neq 0$ 且 $\sigma_3=0$,裂缝尖端应力强度因子 K_I 计算公式为

$$K_I=F_1P\sqrt{\pi a}-F_2\sigma_1\sqrt{\pi a}\tag{4}$$

式中 F_2 为与裂缝长度和试样尺寸相关的常数,根据文献[2]含中心裂缝矩形板问题应力强度因子计算方法,可求得 $F_1=1.055,F_2=1.143$ 。

根据表 2 中劈裂临界水压力 P_c 数据,采用式(2)和式(4)可分别计算得 A、C 组 3 种强度试样的强度因子分别为 0.499 MN/m^{3/2}、0.526 MN/m^{3/2}、0.630 MN/m^{3/2} 和 0.531 MN/m^{3/2}、0.554 MN/m^{3/2}、0.673 MN/m^{3/2},可见两式应力强度因子计算结果接近,相对误差在 6% 左右,说明对于强度较小的类岩石材料,受力方式和试样尺寸不同时,依旧可将单裂缝水力劈裂试样简化为中心含裂缝的有限矩形板来计算。

3.3 水力劈裂临界水压力与劈拉强度的关系

将各组试样劈拉强度 f_t 和水力劈裂临界水压力 P_c 进行线性拟合,结果如图 5 所示。试样劈拉强度越大,则使试样破坏需要的内水压力越大,故临界水压力 P_c 随试样劈拉强度增大而增大。对于同组试样,临界水压力 P_c 服从 $P_{cM15}>P_{cM10}>P_{cM7.5}$ 的规律。对于同强度试样,B 组试样预制裂缝走向与轴向压力 σ_3 方向平行,在此单向压力作用下会使裂缝尖端承受额外的拉应力,更易扩展和失稳,因此 B 组试样劈裂破坏时的临界水压力更低。C 组试验施加的轴向压力与均布内水压力反向,有抑制裂缝张开的作用,与 A 组同强度试样相比较,C 组试样破坏需要更大的内水压力,故临界水压力更高。对于不同组的同

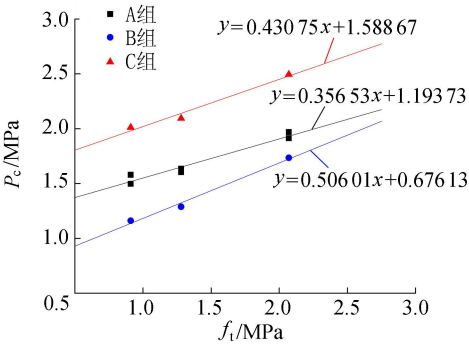


图 5 各组试样水力劈裂临界水压力与劈拉强度关系

强度试样,临界水压力 P_c 服从 $P_{cC} > P_{cA} > P_{cB}$ 的规律。

3.4 试样劈裂破坏现象分析

水力劈裂试验分为无拉压应力(A组)和单轴受压(B、C组)两种应力环境,试样在不同条件下产生破坏后,拆卸水密封装置观察,发现各组试样的破坏形态基本一致(图6),但也存在细微差别。

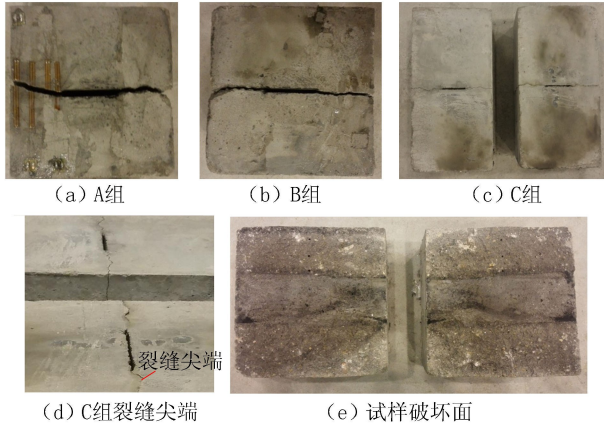


图6 试样水力劈裂破坏形态

由于起裂角度方向可判定裂缝可能的发展方向,对其规律的研究可为岩体加固提供必要的理论支撑。试验结果表明,各组试样裂缝均从尖端处开始扩展,劈裂面与预制裂缝面大致处于同一平面上,可判断各组均发生水力劈裂破坏。各组试样劈裂面与预制裂缝面基本重合,裂缝尖端起裂角度 θ 由大到小排列顺序为 $\theta_C > \theta_A > \theta_B$ 。A、B组试样发生水力劈裂破坏时有明显破裂声响,伴随大量水迅速涌出,试样被劈为两半,劈裂面无残余结合力;而C组试样发生劈裂时,可观察到表面有连贯裂缝,有水从裂缝中涌出,但大部分试样并未彻底裂成两半,劈裂面残存少许结合力。

3组试验裂缝方位均对称,荷载均对称,试样不受剪切作用,属于I型裂纹。根据最大周应力准则,理论上周向切应力 $\tau_{\theta\theta} = 0$,周向正应力 $\sigma_{\theta\theta}$ 的方向与预制裂缝走向垂直,起裂角度 $\theta = 0^\circ$ 。记由裂缝内水压力引起的周向正应力为 σ_p ,设 x 轴与 σ_3 方向平行, y 轴与 σ_1 方向平行,各组试验起裂角度有以下规律:

a. 对于A组试验,试样水力劈裂只由裂缝内水压力引起, σ_p 即为 $\sigma_{\theta\theta}$ 。由于试样的不均匀性,内部结构与孔隙分布不完全相同,故试样强度分布存在细微偏差,导致裂缝尖端起裂方向有所不同,通常 $\sigma_{\theta\theta}$ 方向并不与 y 轴完全重合,故起裂角度 θ 一般并不为 0° ,但总体上接近于 0° 。

b. 对于B组试验,轴向加压时, $\sigma_{\theta\theta} > 0$, $\theta \approx 0^\circ$, $\sigma_r < 0$, x 轴方向存在负向变形(压缩), y 、 z 轴方向相应存在正向变形(扩张),预制裂缝在 y 轴方向受到

拉应力作用,该拉力作用与 σ_p 的合力为 $\sigma_{\theta\theta}$,故与A组试验相比, $\sigma_{\theta\theta}$ 方向与 y 轴方向更接近,起裂角度 θ 更趋近于 0° 。

c. 对于C组试验,轴向压力 σ_1 与 y 轴重合, σ_1 与 σ_p 的合力为 $\sigma_{\theta\theta}$ 。由于 σ_1 与 σ_p 夹角接近 180° ,故与A组试验相比, $\sigma_{\theta\theta}$ 方向与 y 轴方向偏离更大,起裂角度 θ 也更大。

根据C组试样破坏后的形态可知,当在与裂缝走向垂直方向存在一定大小的轴向压力 σ_1 时,试样并没有完全劈开,劈裂面可能存在一定的残存结合力。由于试样的不均匀性,试样内部存在一定的缺陷,如细微裂缝、空腔或薄弱面,在发生水力劈裂破坏时裂缝更倾向于通过试样内部薄弱结构向外扩展,且由于轴向压力 σ_1 的作用,试样破坏时位移与变形受到一定限制,可能导致试样劈裂面上小部分强度相对较大的区域没有完全断开,从而使得劈裂破坏后劈裂面存在残存结合力。残存结合力与轴向压力 σ_1 关系及其机理有待进一步研究。

3.5 试样劈裂破坏过程内水压力规律分析

根据大型三场耦合三轴实验系统中内水压力数据纪录,每隔20s取一数据绘图如图7所示,试样破坏过程内水压力曲线呈“J”形或“S”形,劈裂历时 t 随试样强度的增大而缩短,水力劈裂临界水压力 P_c 随试样强度的增大而增大。其中,B-3-1试验时发现试样表面存在微小缺陷导致密封性不良,有少量水从密封装置侧边持续渗出,导致内水压力上升速度减慢,劈裂历时增长,虽试样破坏时的临界水压力值为真实值,由于劈裂历时不准确,故剔除B-3-1数据。

水泥砂浆的抗压强度越大,弹性模量就越大,二者存在线性正相关关系,且相关性非常强。在裂缝内水压力相同的情况下,弹性模量越大,裂缝张开变形量越小,即缝内空间更小,在内水压力加载速度相等的情况下,内水压力上升速度就更快,从而能在更短时间内上升至临界水压力,所以劈裂历时随试样强度增大而降低。对于同组试样,劈裂历时服从 $t_{M7.5} > t_{M10} > t_{M15}$ 的规律。

由于水泥砂浆属于类岩石材料,根据岩石在单向压应力作用下的试验现象,当试样轴向加压时,在试样的内部会产生相应的变形。由于轴向压力作用于试样两端表面,静摩擦力约束该表面横向变形,使其有一定的刚性来阻止内部的横向变形,从而导致试样内部处于三维应力状态。

对于B组试验,预制裂缝面也是试样的受力面,当裂缝表面上存在内水压力作用时,裂缝表面处的砂浆也处于三维压应力状态,而A组试样裂缝表面砂浆近似处于单向压应力状态,故B组试样在内

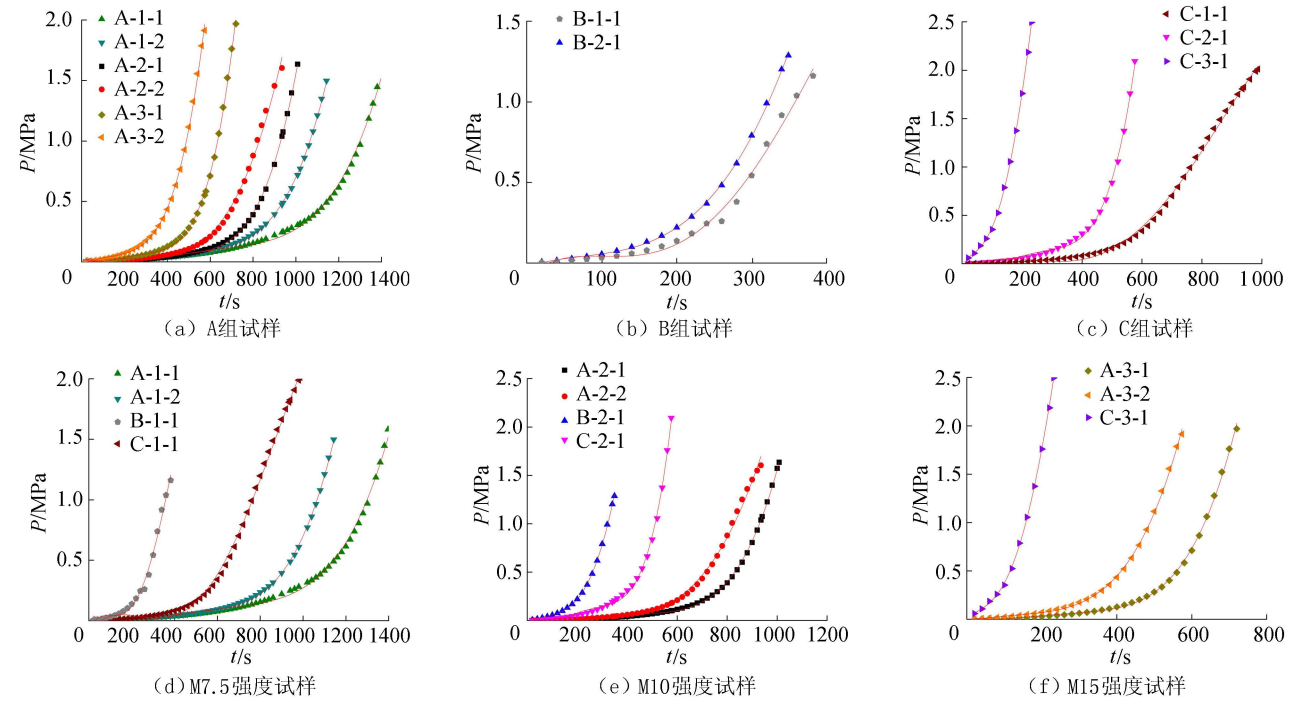


图7 试样内水压力时程曲线

水压力作用下更难向两侧张开变形,所以内水压力上升更快,劈裂历时更短。对于C组试验,由于轴向压力与内水压力方向相反,有抑制裂缝扩展与张开变形的作用,所以内水压力上升更快,劈裂历时更短。根据试验数据,对于不同组的同强度试样,劈裂历时服从 $t_A > t_C > t_B$ 的规律。

4 结 论

- a. 轴向压力相等的条件下,试样的水力劈裂临界水压力 P_c 大小与试样强度正相关。轴向压力方向对单裂缝水力劈裂影响较大,当轴向压力方向与裂缝走向垂直时,对裂缝开裂有抑制作用,水力劈裂临界水压力 P_c 升高;相反,轴向压力方向与裂缝走向平行时,对裂缝开裂有促进作用。
- b. 本文试验水力劈裂属于I型裂纹劈裂,轴向压力加载方式对裂缝尖端的起裂角度 θ 有一定影响,3组试验起裂角度 $\theta_C > \theta_A > \theta_B$ 。当轴向压力方向与裂缝走向平行时,发生水力劈裂时劈裂面可能不完全断开,存在少许残余结合力。
- c. 水力劈裂临界水压力 P_c 与轴向压力加载方向密切相关,同强度试样的 P_c 服从 $P_{cC} > P_{cA} > P_{cB}$ 的规律,劈裂历时服从 $t_A > t_C > t_B$ 的规律。
- d. 试样弹性模量越大,裂缝内水压力 P 的上升速度越快,水泥砂浆弹性模量与强度正相关,故内水压力上升速度与试样强度正相关。另外,轴向压力方向无论是与预制裂缝走向平行还是垂直,都会使内水压力上升速度加快。

参考文献:

- [1] 仵彦卿,张倬元. 岩体力学导论[M]. 成都:西南交通大学出版社,1995.
- [2] 甘磊,沈振中,徐力群. 多场耦合作用下高混凝土坝水力劈裂研究综述[J]. 水利水电科技进展,2013,33(2):87-94. (GAN Lei, SHEN Zhenzhong, XU Liqun. Review on hydraulic fracture in high concrete dam under multi-field coupling conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(2):87-94. (in Chinese))
- [3] 王俊杰,朱俊高. 土石坝心墙水力劈裂影响因素分析[J]. 水利水电科技进展,2007,27(5):42-46. (WANG Junjie, ZHU Jungao. Influence factors on hydraulic fracturing in central core of earth-rock dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2007,27(5):42-46. (in Chinese))
- [4] 朱晟,顾淦臣,白永年. 劈裂灌浆改善土坝坝体应力状态研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),1997,25(2):8-14 (ZHU Sheng, GU Ganchen, BAI Yongnian. Improvement of stress in earth dam by splitting grouting[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1997,25(2):8-14. (in Chinese))
- [5] 曾开华,殷宗泽. 土质心墙坝水力劈裂影响因素的研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2000,28(3):1-6. (ZENG Kaihua, YIN Zongze. Factors affecting hydraulic fracturing of high earth core dams[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2000,28(3):1-6. (in Chinese))
- [6] 盛金昌,赵坚,速宝玉. 高水头作用下水工压力隧洞的水力劈裂分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(7):1226-1230. (SHENG Jinchang, ZHAO Jian, SU

- Baoyu. Analysis of hydraulic fracturing in hydraulic tunnels under high water pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (7): 1226-1230. (in Chinese))
- [7] 张丙印,李娜,李全明,等. 土石坝水力劈裂发生机理及模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(11):1277-1281. (ZHANG Bingyin, LI Na, LI Quanming, et al. Mechanism analysis and model test of hydraulic fracturing in embankment dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2005,27(11):1277-1281. (in Chinese))
- [8] ANDREEV G E. Brittle failure of rock materials: test results and constitutive models [M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995.
- [9] PATER C J D, GROENENBOOM J, DAM D B V, et al. Active seismic monitoring of hydraulic fractures in laboratory experiments[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, 38(6):777-785.
- [10] 杨天鸿,唐春安,朱万成,等. 岩石破裂过程渗流与应力耦合分析[J]. 岩土工程学报,2001,23(4):489-493. (YANG Tianhong, TANG Chunan, ZHU Wancheng, et al. Coupling analysis of seepage and stresses in rock failure process[J]. Chinese Journal Geotechnical Engineering, 2001, 23(4):489-493. (in Chinese))
- [11] 詹美礼,岑建. 岩体力学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):1173-1181. (ZHAN Meili, CEN Jian. Experimental and analytical study on hydraulic fracturing of cylinder sample [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(6):1173-1181. (in Chinese))
- [12] 谢兴华,速宝玉. 裂隙岩体力学水力劈裂研究综述[J]. 岩土力学,2004,25(2):330-336. (XIE Xinghua, SU Baoyu. A review of fracture rock hydraulic fracturing research[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2):330-336. (in Chinese))
- [13] 王国庆,谢兴华,速宝玉. 岩体力学水力劈裂实验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2006,23(4):480-484. (WANG Guoqing, XIE Xinghua, SU Baoyu. Experimental study of hydraulic fracturing of rock mass[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2006,23(4):480-484. (in Chinese))
- [14] 谢兴华. 岩体力学水力劈裂机理试验及数值模拟研究[D]. 南京:河海大学,2004.
- [15] STOECKHERT F, MOLENDI M, BRENNER S, et al. Fracture propagation in sandstone and slate: laboratory experiments, acoustic emissions and fracture mechanics [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2015,7(3):237-249.
- [16] SALIMZADEH S, PALUSZNY A, ZIMMERMAN R W. Three-dimensional poroelastic effects during hydraulic fracturing in permeable rocks[J]. International Journal of Solids & Structures,2017,108:153-163.
- [17] 高丹盈,宋帅奇,杨林. 真三轴应力下塑性混凝土性能及破坏准则[J]. 水利学报,2014,45(3):360-367. (GAO Danying, SONG Shuaiqi, YANG Lin. Performance and failure criteria for plastic concrete under true tri-axial compressive stress[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014,45(3):360-367. (in Chinese))
- [18] 甘磊,沈心哲,王瑞,等. 单裂缝混凝土结构水力劈裂试验[J]. 水利水电科技进展,2017,37(4):30-35. (GAN Lei, SHEN Xinzhe, WANG Rui, et al. Hydraulic fracturing test of concrete structures with single crack[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017,37(4):30-35. (in Chinese))
- [19] 曾奕滔,沈振中,甘磊,等. 弯应力作用下混凝土结构水力劈裂试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):72-77. (ZENG Yitao, SHEN Zhenzhong, GAN Lei, et al. Experimental study on the hydraulic fracture of concrete structure under bending stress[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(1):72-77. (in Chinese))
- [20] 李宗利,张宏朝,任青文,等. 岩石裂纹水力劈裂分析与临界水压计算[J]. 岩土力学,2005,26(8):1216-1220. (LI Zongli, ZHANG Hongchao, REN Qingwen, et al. Analysis of hydraulic fracturing and calculation of critical internal water pressure of rock fracture[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(8):1216-1220. (in Chinese))
- [21] 李宗利. 岩体力学水力劈裂机理研究及其在地下洞室围岩稳定分析中应用[D]. 南京:河海大学,2005.
- [22] 李佳. 单轴和双轴压缩下裂隙性岩石力学特性试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [23] 姚赞勋,张汉兴. 脆性岩石在单向压应力作用下的破坏机理[J]. 武汉钢铁学院学报,1982(1):45-54. (YAO Zhanxun, ZHANG Hanxing. The fracture mechanism of brittle rock under uni-directional compression[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 1982(1):45-54. (in Chinese))
- [24] 衣永亮,曹平,蒲成志. 静载下预制裂隙类岩石材料断裂实验与分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2010,25(1):67-71. (YI Yongliang, CAO Ping, PU Chengzhi. Fracture experiment and analysis of rock-like material with prefabricated-fissures under static loading [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 25(1):67-71. (in Chinese))
- [25] 常留红,陈建康. 单轴压缩下水泥砂浆本构关系的试验研究[J]. 水利学报,2007,38(2):217-220. (CHANG Lihong, CHEN Jiankang. Experimental study on constitutive relation of cement mortar[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(2):217-220 (in Chinese))
- [26] 吴胜兴,王瑶,周继凯,等. 水泥砂浆动态轴向拉伸本构关系试验研究[J]. 土木工程学报,2012,45(1):13-22. (WU Shengxing, WANG Yao, ZHOU Jikai, et al. Experimental study of dynamic axial tensile constitutive relationship for mortar [J]. China Civil Engineering Journal,2012,45(1):13-22. (in Chinese))

(下转第 43 页)

- A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1945,183:405-435.
- [10] KRAJCINOVIC D, MANUEL A G S. Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. International Journal of Solids and Structures, 1982,18(7):551-562.
- [11] BREYSSE D. Probabilistic formulation of damage-evolution law of cementitious composites[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990,116(7):1489-1511.
- [12] KANDARPA S, KIRKNER D J, SPENCER B F. Stochastic damage model for brittle materials subjected to monotonic loading[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996, (8):788-795.
- [13] 李杰, 张其云. 混凝土随机损伤本构关系[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001,29(10):1135-1141. (LI Jie, ZHANG Qiyun. Study on stochastic damage constitutive relationship for concrete material[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2001,29(10):1135-1141. (in Chinese))
- [14] LI J, REN X D. Stochastic damage model for concrete based on energy equivalent strain[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009,46:2407-2419.
- [15] 李杰, 任晓丹. 混凝土随机损伤力学研究进展[J]. 建筑结构学报, 2014,35(4):20-29. (LI Jie, REN Xiaodan. Advances in stochastic damage mechanics of concrete[J]. Journal of Building Structures, 2014,35(4):20-29. (in Chinese))
- [16] 刘汉昆, 李杰. 单轴受拉状态下混凝土非局部化细观损伤模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014,42(2):203-209. (LIU Hankun, LI Jie. Non-localized meso-
- damage model of concrete under uniaxial tension[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014,42(2):203-209. (in Chinese))
- [17] 李苹, 任晓丹, 李杰. 基于隐式梯度理论的混凝土细观随机断裂模型[J]. 建筑科学与工程学报, 2014,31(3):90-97. (LIE Ping, REN Xiaodan, LI Jie. Meso stochastic fracture model of concrete based on implicit gradient theory[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014,31(3):90-97. (in Chinese))
- [18] 卿龙邦, 郝冰娟, 赵欣, 等. 基于随机损伤与断裂耗散能等效的混凝土裂缝扩展分析[J]. 水利学报, 2015,46(12):116-123. (QING Longbang, HAO Bingjuan, ZHAO Xin, et al. Research on analysis of crack propagation of concrete based on the stochastic damage and equivalent energy fracture dissipation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015,46(12):116-123. (in Chinese))
- [19] 刘智光, 陈建云, 白卫峰. 基于随机损伤模型的混凝土轴拉破坏过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009,28(10):2048-2058. (LIU Zhiguang, CHEN Jianyun, BAI Weifeng. Research on concrete failure process under uniaxial tension based on stochastic damage model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(10):2048-2058. (in Chinese))
- [20] BAŽANT Z P, OH B H. Crack band theory for fracture of concrete[J]. Matériaux et Construction, 1983,16(3):155-177.
- [21] 赵志方. 基于裂缝黏聚力的大坝混凝土断裂特性研究[R]. 北京: 清华大学, 2004.

(收稿日期:2017-06-15 编辑:熊水斌)

(上接第34页)

- [27] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 岩石材料尺寸效应的试验和理论研究[J]. 工程力学, 2005,22(4):112-118. (YANG Shengqi, SU Chengdong, XU Weiya. Experimental and theoretical study of size effect of rock material[J]. Engineering Mechanics, 2005,22(4):112-118. (in Chinese))
- [28] 刘勇军, 朱岳明, 曹为民, 等. 长方体劈裂试验的可行性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001,29(5):100-102. (LIU Yongjun, ZHU Yueming, CAO Weimin. The feasibility study on cuboid split test[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2001,29(5):100-102. (in Chinese))
- [29] DALLY J W, FOURNEY W L, IRWIN G R. On the uniqueness of the stress intensity factor-crack velocity relationship[J]. International Journal of Fracture, 1985,27(3/4):159-168.
- [30] TADA H, PARIS P C, IRWIN G R. The stress analysis of cracks[J]. International Journal of Fracture Mechanics, 1985,118(11):612-614.
- [31] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [32] 徐世烺, 朱榆, 张秀芳. 水泥净浆和水泥砂浆材料的 I 型断裂韧度测定[J]. 水利学报, 2008,39(1):41-46. (XU Shilang, ZHU Yu, ZHANG Xiufang. Determination of model fracture toughness of cement paste and mortar[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,39(1):41-46. (in Chinese))
- [33] 李江腾, 古德生, 曹平, 等. 岩石断裂韧度与抗压强度的相关规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009,40(6):1695-1699. (LI Jiangteng, GU Desheng, CAO Ping, et al. Interrelated law between model fracture toughness and compression strength of rock[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009,40(6):1695-1699. (in Chinese))
- [34] 徐世烺. 混凝土断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [35] 范飞飞, 尚建丽, 刘银霞, 等. 砂对水泥砂浆强度影响的试验研究[J]. 散装水泥, 2008(6):61-63. (FAN Feifei, SHANG Jianli, LIU Yinxia, et al. Experimental study on the effect of sand on the strength of cement mortar[J]. Bulk Cement, 2008(6):61-63. (in Chinese))

(收稿日期:2017-08-06 编辑:熊水斌)