

DOI: 10.11779/CJGE201512008

人字形切槽巴西圆盘岩石试样复合型断裂渐进过程数值模拟研究

许 媛, 戴 峰*, 徐奴文, 魏明东

(水力学与山区河流开发保护国家重点实验室(四川大学), 四川 成都 610065)

摘 要: 人字形切槽巴西圆盘(CCNBD)岩石试样由于诸多优点, 被国际岩石力学学会确定为岩石 I 型断裂韧度测试建议方法, 并被众多学者应用于复合型(包括纯 II 型)断裂试验研究。然而, CCNBD 在复合型荷载下的渐进断裂机理尚未完全获悉, 复合型断裂韧度测试基于的穿透直裂纹扩展假设并未严格评估, 用于复合型断裂研究的合理性还未得到有效验证。采用细观损伤力学软件首次模拟得到 CCNBD 在复合型荷载下的渐进破坏过程。结果显示: 裂纹不仅萌生于人字形切槽尖端, 且易产生于切槽边缘, 造成真实裂纹前缘为曲线形, 与人字形切槽试样断裂韧度测试所基于的穿透直裂纹假设不符; 裂纹并非沿着预制人字形切槽平面扩展至其根部, 切槽边缘的破裂方向均朝向加载端, 形成扭曲的三维翼形裂纹。数值模拟结果同物理实验对比, 十分吻合。CCNBD 的裂纹形态和渐进扩展规律不符合当前普遍采用的复合型测试原理, 因此采用 CCNBD 试样进行岩石复合型(包括纯 II 型)断裂韧度测试值得商榷。

关键词: 渐进断裂; 人字形切槽巴西圆盘; 复合型; 翼形裂纹; 声发射

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)12-2189-09

作者简介: 许 媛(1992-)女, 博士研究生, 从事岩石力学与工程研究。E-mail: fengdai@scu.edu.cn。

Numerical analysis of mixed mode progressive rock fracture mechanism of cracked chevron notched Brazilian disc specimens

XU Yuan, DAI Feng, XU Nu-wen, WEI Ming-dong

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) method, due to its distinct advantages, has been suggested by ISRM for mode I fracture toughness determination, and later applied extensively to mixed mode fracture researches (pure mode II included). When the CCNBD is applied to mixed mode fracture researches, however, the progressive fracture mechanism and relevant hypotheses have not been thoroughly assessed, and the rationality of mixed mode fracture tests using CCNBD is under suspect. In this paper, the progressive rock fracture mechanism of CCNBD rock samples under mixed mode conditions is first simulated using the meso-scale damage mechanics analysis code. The results show that the fracture initiates not only from the notch tip but also from the saw-cut chevron notch edges, as a result, the crack front is significantly curved, inconsistent with the straight through crack assumption. Furthermore, cracks fail to grow stably to the base of the notch, but depart from the pre-cracked notch plane and develop towards the loading direction, forming a couple of twisty 3D-wing cracks. The results from simulation correspond very well with those from our experiments. Both the fracture pattern and the growing trend of CCNBD under mixed mode conditions are inconsistent with the present hypotheses, which suggests that the application of the CCNBD specimens to the mixed mode (including pure mode II) fracture tests is questionable.

Key words: progressive fracture; CCNBD; mixed mode; wing crack; acoustic emission

0 引 言

岩石断裂韧度是反映含裂纹岩石抵抗失稳扩展能力的重要参数, 在诸多岩土工程领域得到应用, 包括爆破、机械破岩、水压致裂、岩石边坡分析、岩爆、地震力学、地震预测、含裂隙岩体内的流体运动性质等^[1-2]。国际岩石力学协会(ISRM)先后 3 次将 4 种

试件构型提为 I 型断裂韧度测试建议方法, 分别是 1988 年的 V 形切槽三点弯曲圆棒(CB)和 V 形切槽

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2015CB057903); 教育部新世纪优秀人才项目(NCET-13-0382); 四川省杰出青年基金项目(2014JQ0004)

收稿日期: 2014-11-17

*通讯作者

短棒 (SR)^[3]、1995 年的人字形切槽巴西圆盘 (CCNBD)^[4]以及 2012 年的直切槽半圆盘 (NSCB) 试样^[5]。其中, CCNBD 试样由于诸多显著优点而得到广泛采用^[6-8], 如基于岩芯取样, 制作方便, 能承受较高临界荷载, 人字形韧带尖端有助于诱发裂纹而无需预裂等。

在实际工程中, 岩石通常处于复杂应力状态下。由于所含裂隙相对荷载方向的随机性, 脆性岩石的断裂主要表现为两类断裂模式, 即张拉性 (I 型) 与滑移型 (II 型) 的复合断裂模式。因此, 除了纯 I 型, I/II 复合加载及纯 II 型加载条件下的临界应力强度因子受到重视。虽然 CCNBD 只是 ISRM 建议的 I 型断裂韧度测试试样, 众多研究者认为改变加载方向可以实现复合型加载, 并引入一定假设将其用于复合型 (包括纯 II 型) 断裂韧度测试。相关研究如: 复合型静态以及循环加载下的断裂行为^[9]; 不同圆盘试样的复合型及纯 II 型断裂韧度值测定及比较分析^[10]; 白色大理岩纯 I 型及纯 II 型荷载下的韧度值测定^[11]; 粒径分布等微观性质对 I 型、II 型及复合型断裂韧度的影响^[12]等。

需要指出, 采用 CCNBD、CB、和 SR 等含 V 形或人字形切槽的试样测定岩石断裂韧度时, 均基于穿透直裂纹假设 (straight through crack assumption, STCA), 即裂纹在整个发展过程中始终为直穿透式, 裂纹前缘为直线。在此假设下, CCNBD 断裂过程简化为二维断裂问题, 裂纹尖端各点的应力强度因子理想化为常数, 从而可以将直切槽巴西圆盘 (cracked straight through Brazilian disk, CSTBD) 的解答应用到 CCNBD 方法^[13]。然而, 由于传统实验技术的局限, CCNBD 试样真实的渐进破坏过程难以及时捕捉, STCA 等基本假设尚未得到有效验证。最近, Dai 等^[14]通过细观损伤力学模拟方法再现了 CCNBD 试样纯 I 型渐进断裂过程, 发现裂纹前缘并非假设的直线形, 而是与人字形韧带形状相关的曲线前缘, 由此认为

CCNBD 试验结果与其它试验测试结果存在 20%~30% 测量差异^[15]的一个重要原因是其假想的断裂模式与真实破坏情况的差异。迄今为止, CCNBD 试样在复合型加载模式下的渐进断裂过程仍无相关报道, 因此有必要评估 CCNBD 试样复合型渐进断裂真实过程并检验理想假设的有效性。

本文采用细观损伤力学软件 RFPA^{3D} 首次模拟 CCNBD 在复合型荷载作用下的渐进破坏过程, 并进行相应的物理实验验证数值模拟的有效性; 再现试样内部裂纹扩展性状, 揭示其三维渐进断裂机理, 评估 STCA 的理想假设; 在此基础上分析 CCNBD 试样用于复合型断裂韧度测试的合理性。

1 CCNBD 复合型断裂测试原理

CCNBD 试样的几何特征如图 1 (a) 所示: B 为圆盘厚度, R 为圆盘半径, R_s 为圆锯刀片半径, a_0 和 a_1 分别为人字形切槽的初始裂纹长度和最终裂纹长度 (无量纲裂纹长度分别为 $\alpha_0=a_0/R$, $\alpha_1=a_1/R$)。人字形韧带使得裂纹从韧带尖端萌生, 并引导裂纹沿着韧带发展。当 CCNBD 的径向加载方向与预制切槽平行时, 人字形韧带尖端处于纯拉应力状态, 随着荷载增加达到临界状态而形成 I 型裂纹扩展, 此即 ISRM 建议的 I 型断裂韧度测试方法。当 CCNBD 的径向加载方向与切槽方向成一定角度时, 韧带所在平面同时受压和受剪, 裂纹尖端应力强度因子 K_I 和 K_{II} 同时存在, 试样处于复合型加载模式, 如图 1 (b) 所示: P 为试验中所施加的荷载; β 为预制裂缝相对加载方向的夹角, 称为裂缝倾角。

尽管 ISRM 尚未对复合型断裂韧度的测试提出标准方法, 部分学者^[10-12]引入一定假设建立 CCNBD 用于复合型或纯 II 型加载模式的断裂韧度测试方法并展开研究。代表性的思路是基于 CSTBD 应力强度因子的解答 (Shetty 等^[16])。如式 (1) 所示, 基于 STCA,

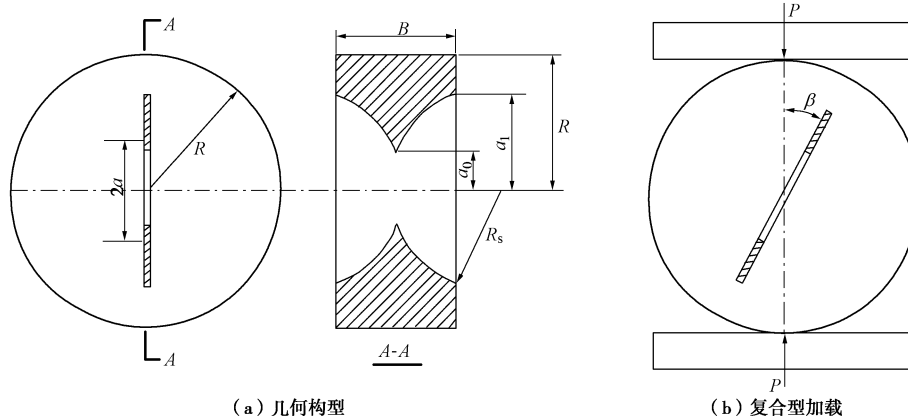


图 1 CCNBD 尺寸参量与复合型加载模式

Fig. 1 Sample geometry and mixed mode loading of CCNBD method

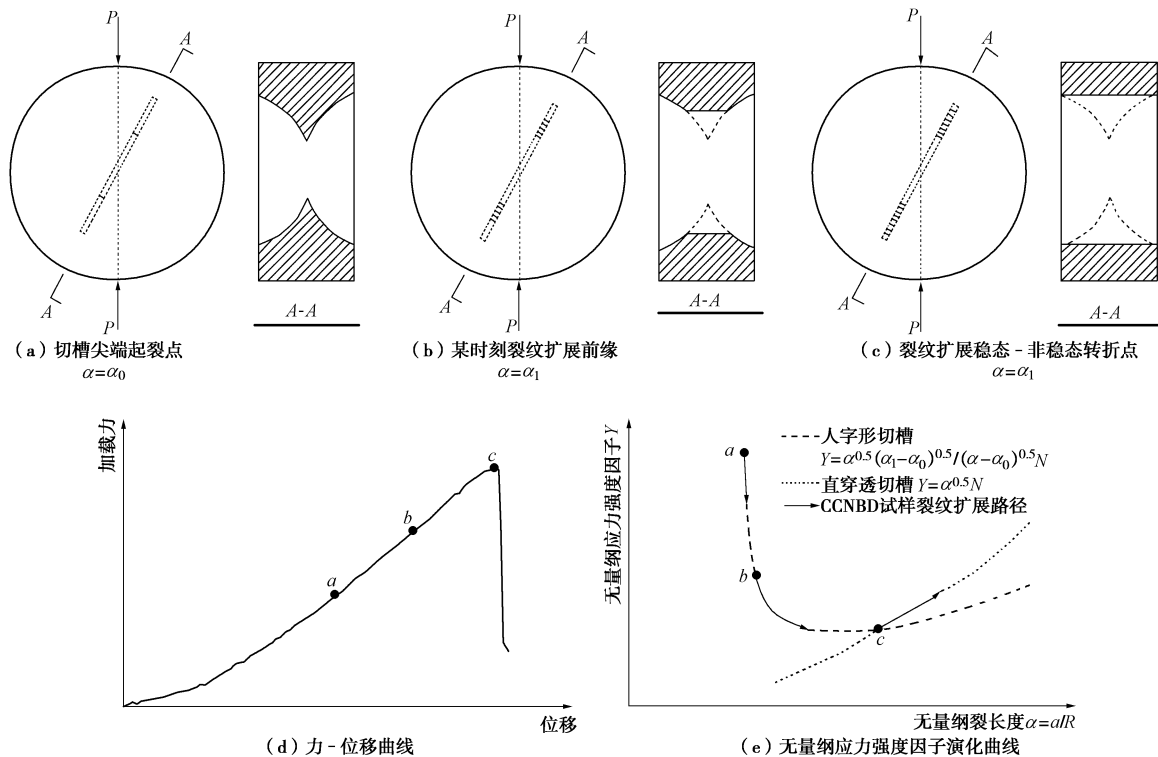


图 2 CCNBD 复合型断裂原理与假设

Fig. 2 Fracture principle and assumption of CCNBD method under mixed mode loading

假设裂纹从切槽尖端沿切槽平面扩展到根部, 裂纹前缘宽度则从 0 线性增长到 B , 用 $B \times \sqrt{\alpha - \alpha_0} / \sqrt{\alpha_1 - \alpha_0}$ 替换式 (1) 中的 B , 从而建立复合型加载条件下 CCNBD 试样的应力强度因子计算公式:

$$\begin{cases} K_I = \frac{P}{B\sqrt{\pi R}} \sqrt{\alpha} N_I, \\ K_{II} = \frac{P}{B\sqrt{\pi R}} \sqrt{\alpha} N_{II}, \end{cases} \quad (1)$$

式中 K_I , K_{II} 分别为 I 型和 II 型应力强度因子; $\alpha = a/R$, 为无量纲裂纹长度; N_I , N_{II} 分别为 CSTBD 的 I 型和 II 型无量纲应力强度因子, 仅与无量纲裂纹长度 α 和裂缝倾角 β 有关。

图 2 为复合型加载条件下 CCNBD 试样的断裂测试原理示意图。其中, 图 2 (a)、(b)、(c) 为裂纹扩展过程中的 3 个特征状态, 分别对应力-位移曲线(图 2 (d))与无量纲应力强度因子演化曲线 (e) 上的 a , b , c 三点。人字形切槽尖端起裂后, 无量纲应力强度因子 Y 随着裂纹的扩展逐渐减小, 同时加载力不断增大, 应力强度因子保持 $K=K_C$ 直到切槽根部, 即 $\alpha=\alpha_1$ 处, 对应最大加载力 P_{\max} 与临界无量纲应力强度因子 Y 。此时 CCNBD 等效为达到临界状态的 CSTBD, 裂纹扩展从稳态转变为非稳态。随后 CCNBD 裂纹的扩展类似于 CSTBD, 无量纲应力强度因子不断增大, 非稳态的裂纹扩展不需要持续增加的荷载。于是由临界

状态的裂纹长度 $\alpha = \alpha_1$, 相应的 Y_I , Y_{II} 以及最大加载力即可计算得到 CCNBD 试样的复合型断裂韧度值。

值得强调的是, CCNBD 复合型断裂过程包括两个明显不同的阶段: 裂纹在初始切槽平面内的稳定扩展和从切槽根部开始偏离切槽面的不稳定扩展。其中, 切槽平面内裂纹扩展的穿透直前缘假设以及稳态-非稳态转折点是保证 CCNBD 复合型断裂韧度测试方法合理性的关键。

2 数值模型介绍

采用基于有限元的细观损伤力学数值软件 RFPA^{3D} 模拟 CCNBD 试样的对径压缩复合型断裂试验。RFPA 系列软件在模拟岩石断裂和破坏方面的有效性已被许多研究证实, 在室内试验上的应用包括岩石试样静态拉伸、压缩荷载^[17]以及动荷载下^[18]的断裂机理研究, 三维裂纹的萌生和扩展研究^[19]等; 在工程上的应用包括地下开挖的岩爆机理研究^[20]、水电站的岩石边坡稳定性分析^[21]等。本文采用的 RFPA^{3D} 是 RFPA 系列软件的三维版本, 其显著特点是细观反映天然岩石材料的非均质性, 精确记录伴随微破裂产生的声发射 (acoustic emission, AE), 从而可有效刻画岩石断裂过程。更多 RFPA 介绍可参考文献[17~21], 本文不再赘述。

参照文献[9]中 CCNBD 复合型断裂的物理试验, 模拟裂缝倾角分别取 0° , 28° , 30° , 33° , 45° 和 70° 等 6 种不同复合型加载的断裂。试样具有相同几何尺寸: 圆盘直径 D 为 64.0 mm, 厚度 B 为 25.0 mm, 人字形切槽初始和最终裂缝长度(a_0 和 a_1)分别为 8.0, 18.0 mm, 各参数根据圆盘半径转化为无量纲值: $\alpha_0 = a_0/R = 0.25$, $\alpha_1 = a_1/R = 0.5625$, $\alpha_B = B/R = 0.7810$; 刀片直径 D_s 为 40.0 mm, 切缝宽度 t 为 1.5 mm。上述尺寸均在 ISRM 建议的有效几何尺寸范围内。

典型数值模型见图 3 (裂缝倾角 $\beta = 28^\circ$)。模型采用的力学参数均根据物理试验所用砂岩取值: 弹性模量平均值为 60 GPa, 抗拉强度平均值为 9.9 MPa, 单轴抗压强度平均值为 100 MPa, 泊松比为 0.25。考虑相对均匀的情况, 在 RFPA3D 中取岩石材料均匀性系数 $m=10$ 。图中单元颜色的差异, 反映了材料细观参数分布的非均匀性。加载板为刚性的钢板。采用位移控制的加载方式, 上部加载板保持每计算步-0.001 mm 的速率, 下部钢板保持静止。低速位移加载有利于裂纹达到临界状态之前的稳态扩展。

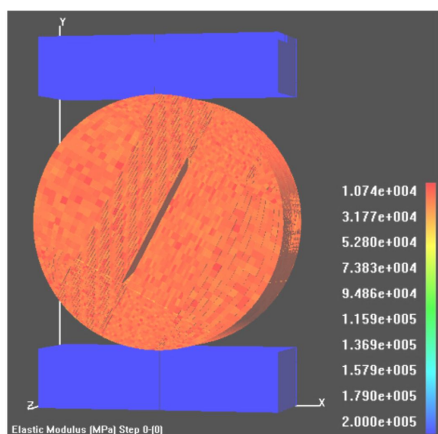


图 3 3D 数值模型示意图 ($\beta = 28^\circ$, $m=10$)

Fig. 3 3D numerical model ($\beta = 28^\circ$, $m=10$)

3 模拟结果及讨论

3.1 不同裂缝倾角的 CCNBD 试样断裂结果

CCNBD 试样的裂缝倾角 β 为 28° , 30° , 33° , 45° , 70° 时, 试样处于复合型加载模式; β 为 0° 时, 试样处于纯 I 型加载模式。

图 4 为不同裂缝倾角的 CCNBD 复合型断裂试验的力-位移曲线, 完整地包含了线性、非线性、承载力跌落以及变形软化 4 个阶段 (如 $\beta = 70^\circ$ 的曲线所示)。随着裂缝倾角从 28° 增大到 70° , 峰值力大致呈逐渐上升的趋势, 峰值位移逐渐增大。

CCNBD 复合型断裂试验的声发射发展均经历了

峰前微弱上升、峰值附近骤增和峰后骤降趋于零等阶段。图 5 为裂缝倾角 28° 的 CCNBD 复合型断裂破坏的声发射事件与力-位移曲线, 根据声发射特征划分为 6 个阶段并在 3.2 节作详细阐述。

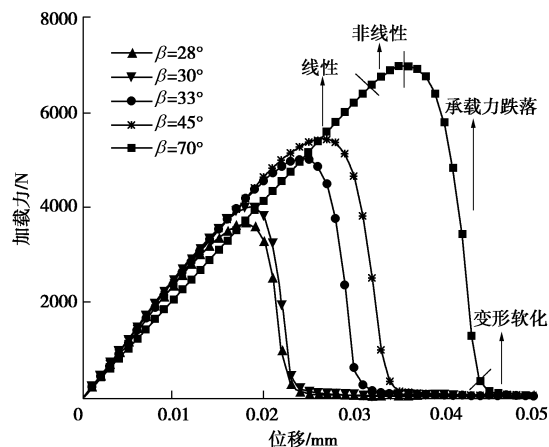


图 4 CCNBD 复合型断裂结果 (力-位移曲线)

Fig. 4 Results of CCNBD specimens under mixed mode loading: force-displacement curves

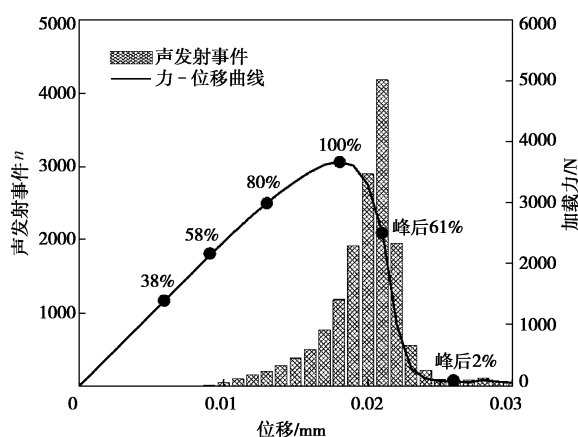


图 5 CCNBD 复合型断裂结果 ($\beta = 28^\circ$): 声发射事件与力-位移曲线

Fig. 5 Results of a CCNBD specimen under mixed mode loading: AE events and force-displacement curve ($\beta = 28^\circ$)

径向压缩作用下, 裂缝倾角不同时, 裂纹尖端 K_I 和 K_{II} 的大小及比值也不同, 从而影响裂纹的扩展方式。图 6 为 6 种不同裂缝倾角的 CCNBD 试样最终破坏表面最小主应力。 $\beta = 0^\circ$ 时, 裂纹沿着韧带平面竖向扩展至加载端; $\beta = 28^\circ$, 30° , 33° , 45° 时, 裂纹看似大致从韧带根部向加载端扩展, 裂缝倾角越大, 裂纹偏离预制切槽平面的角度也越大; $\beta = 70^\circ$ 时, 试样的断裂特征明显不同于其余试样, 表面裂纹的起始位置不再是 $\alpha = \alpha_1$ 处, 而更偏向圆盘中心。对比数值模拟结果与文献[9]的物理试验结果 (如图 7 所示), 圆盘表面裂纹扩展的趋势比较吻合。

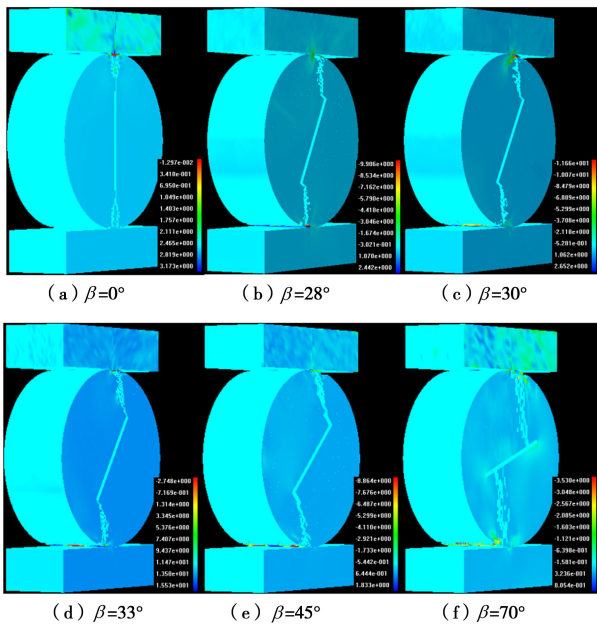


图 6 CCNBD 复合型断裂数值模拟结果: 最小主应力分布
Fig. 6 Final failure of numerically simulated CCNBD fracture tests: the minimum principal stress distribution



图 7 CCNBD 复合型断裂试验破坏结果 (引自文献[9])
Fig. 7 Realistic mixed mode fracture failure of CCNBD (from Ref. [9])

3.2 裂缝倾角为 28° 的 CCNBD 试样渐进破坏过程

CCNBD 表面破坏结果难以真实反映试样内部的断裂过程, 下面借助声发射, 以裂缝倾角 $\beta=28^\circ$ 的 CCNBD 渐进破坏过程为例详细阐述其复合型断裂特征 (图 8)。整个渐进破坏过程中, 蓝色球体 (代表拉伸破坏) 占主导地位, 而红色球体 (代表剪切破坏) 直到峰值荷载时才少量出现于加载端, 说明试样的断裂过程主要表现为拉伸破坏。试样的渐进破坏过程可以分为以下 6 个典型阶段:

(1) 阶段 a (荷载为 38% 峰值力), 试样承受较低荷载, 由于人字形韧带尖端应力集中而率先产生微破裂, 开始出现微弱的声发射事件。

(2) 阶段 a 到阶段 b (荷载为 58% 峰值力前),

声发射事件仍限制在韧带内, 属于自相似扩展。此后, 微破裂在迅速沿着人字形韧带边缘传播的同时, 开始向空间扩展。对于裂纹在韧带平面内的自相似扩展 (58% 峰值力之前), 测量得到此裂纹的增加长度 Δa 约为入字形韧带长度的 1/3, 即 $\Delta a = (a_1 - a_0)/3$ 。

(3) 阶段 c (荷载为 80% 峰值力), 微破裂沿着人字形韧带边缘发展到其根部, 并且一定程度的朝向加载端扩展。值得注意的是, 由于韧带边缘率先破裂, 真实裂纹前缘明显应为曲线形, 裂纹并不满足 STCA 假设沿韧带平面扩展。仅此一点来说, 基于 STCA 将 CSTBD 的应力强度因子解答应用到 CCNBD 中, 是不准确的。此后, 试样上下部分的微破裂继续中心对称地扩展, 形成两个凸向加载端的扭曲破裂面, 即三维翼形裂纹。

(4) 阶段 d (试样承受峰值荷载), 裂纹扩展方向逐渐平行于加载方向, 裂纹前缘已显著偏离韧带平面。需要说明的是, CCNBD 复合型断裂测试原理, 假设峰值力时裂纹扩展到入字形切槽根部, 即 $\alpha = \alpha_1$ 处, 由此时的裂纹长度 α_1 可以计算得到对应的临界无量纲应力强度因子 Y 。然而真实情况是, 裂纹并未扩展到切槽根部即偏离原始裂纹面向空间发展, 真实断裂与理想假设差异显著。

(5) 峰值力过后, 裂纹由稳态扩展转变为失稳扩展, 声发射事件骤增。阶段 e (峰后 61% 峰值力), 单步声发射事件数达到峰值, 此时试样加载端部位由于应力集中而产生大量裂纹。

(6) 阶段 f (残余力 2%), 裂纹扩展贯穿整个试样, 荷载达到残余值。

为了更清晰地说明裂纹的扩展路径即扭曲面的形成过程, 沿着圆盘厚度的不同位置截取薄片进行观察。3 组平行于圆盘表面等距切割获得的薄片最小主应力分布如图 9 (a)、(b)、(c) 所示。A 组薄片过人字形韧带尖端, B 组过圆盘厚度三分之一处, C 组接近圆盘表面。在足够薄的情况下, 切片的预制裂缝端部近似为直穿透形, 每一组都可以看作是很薄的 CSTBD 试样, 区别在于 3 组试样的切缝长度不同。A 组薄片的预制裂缝最短, 对应 CCNBD 试样的初始裂纹长度 a_0 , 因此这一组切片能够直观反映 CCNBD 试样韧带尖端的裂纹扩展路径。阶段 a, 裂纹尖端的应力集中现象十分明显, 直到阶段 b, 裂纹从切缝端部的一侧 (靠近加载端) 萌生, 并平行于切缝方向扩展; 阶段 c 以后, 裂纹开始偏离原始裂纹面而朝向加载端扩展直到贯穿整个试样, 形成压剪作用下常见的翼形裂纹^[22-23]。C 组薄片的预制裂缝最长, 对应 CCNBD 试样的最终裂纹长度 a_1 , 因此这一组切片能够直观反映 CCNBD 试样

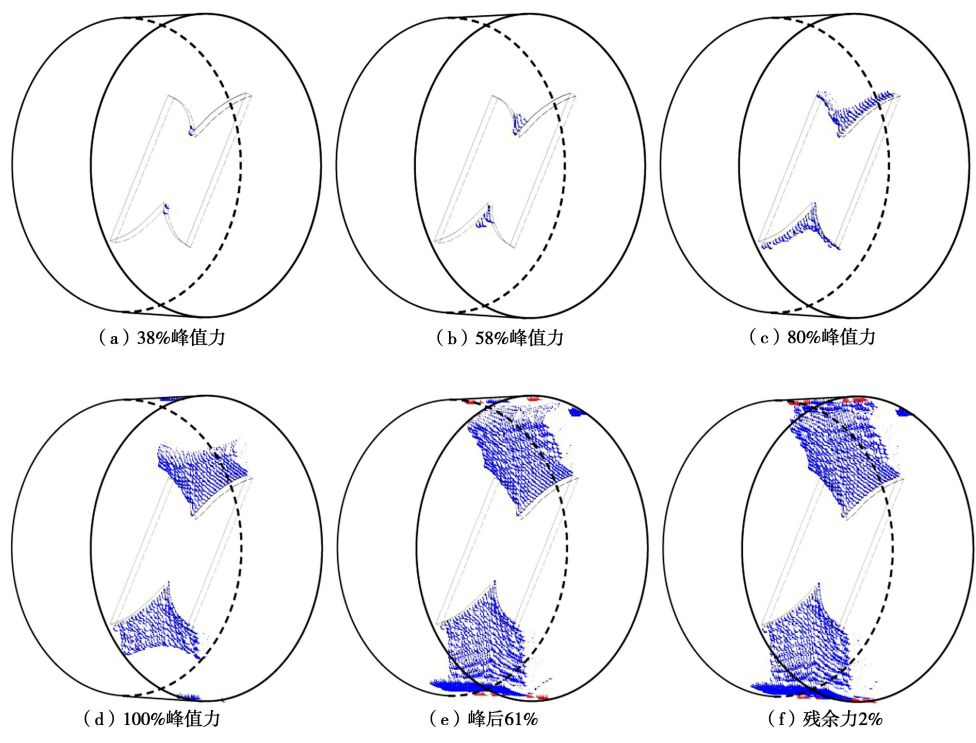


图 8 CCNBD 复合型断裂渐进过程的 AE 分布立体图 ($\beta=28^\circ$)
Fig. 8 AE distribution during whole mixed mode fracture process of CCNBD ($\beta=28^\circ$)

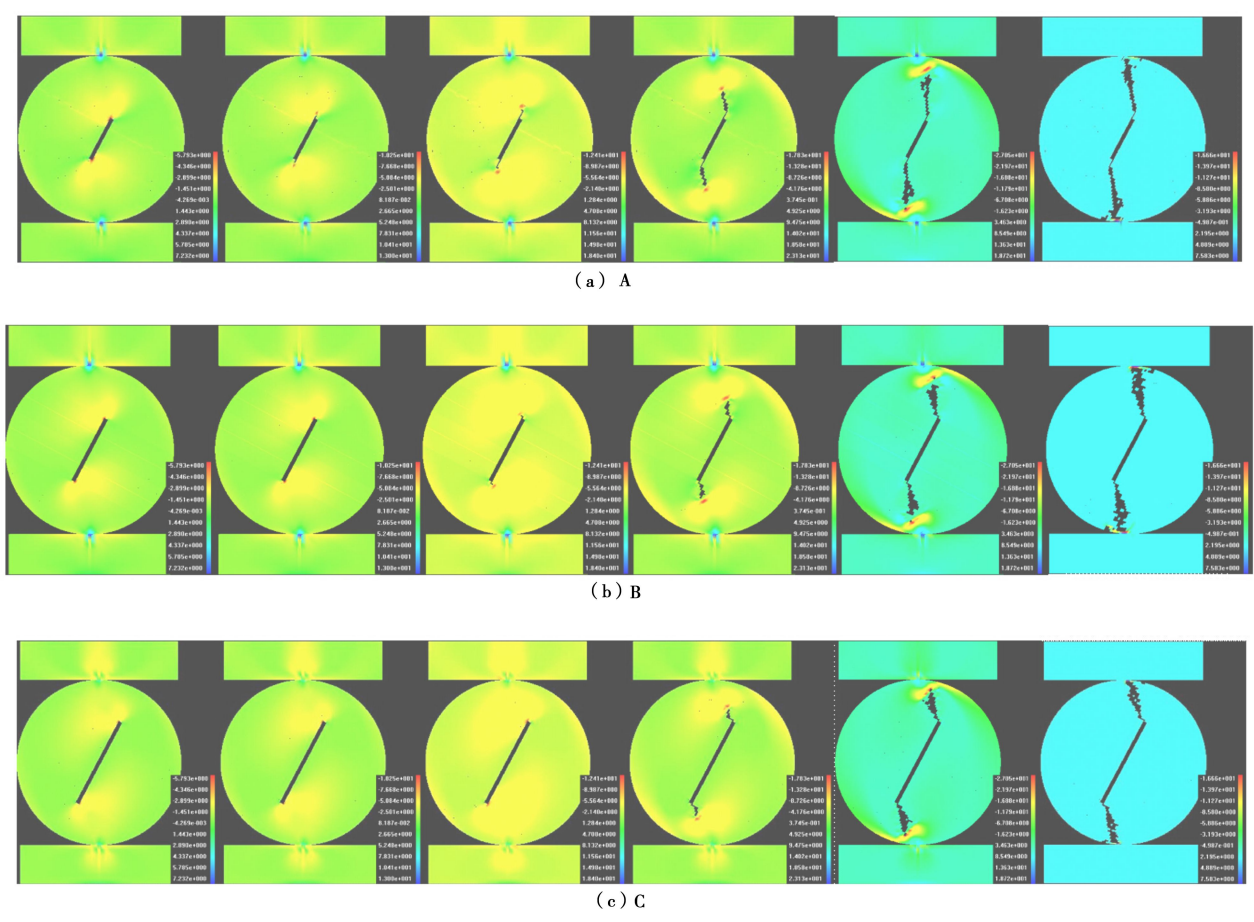


图 9 CCNBD 复合型断裂渐进过程之最小主应力分布图 ($\beta=28^\circ$)
Fig. 9 Simulated fracture process of CCNBD specimens under mixed mode condition: minimum principal stress distribution ($\beta=28^\circ$)

切槽根部的裂纹扩展路径。与韧带尖端的裂纹扩展相比, 切槽根部的裂纹扩展明显滞后。从阶段 a 到阶段 b, 均没有明显的裂纹产生, 直到阶段 c, 裂缝端部开始出现宏观裂纹。阶段 d, 即试样承受峰值荷载时, 裂缝端部萌生的裂纹没有经历自相似扩展便立即偏离原始裂缝面向空间扩展, 直到贯穿整个试样。B 组切片的预制裂缝长度约为 $(a_0+a_1)/2$, 其裂纹扩展特征介于韧带尖端与切槽根部的裂纹扩展之间。

结合 3 组切片观察, CCNBD 人字形切槽边缘各点均有微裂纹产生, 并且靠近尖端的裂纹扩展优先于靠近圆盘表面的裂纹扩展。将切片看作很薄的 CSTBD 试样, 则 CCNBD 试样等效于不同预制裂缝长度 CSTBD 试样的集合体。对于 CSTBD 试样, 当承受相同载荷且预制裂缝的倾角相同时, 裂缝长度不同会导致裂尖应力强度因子的差异^[24]。这一观点对于同一受力水平下的 CCNBD 试样表现为其各个切片的应力状态不尽相同 (如图 9 中颜色差异)。由此可见, 对于某一受力阶段的 CCNBD 试样, 其裂纹扩展前缘的应力强度因子是随空间变化的函数, 前缘曲线上各点的扩展并不同步。另外, 根据声发射分布 (如图 8) 可知, 在 CCNBD 复合型渐进断裂过程中, 裂纹前缘是复杂的三维曲线。因此, 用一个数学意义上的“平均”应力强度因子来综合描述 CCNBD 试样非直穿透裂纹前缘的应力状态是不合理的。

3.3 室内试验验证

为了验证数值模拟的有效性, 利用四川大学水利水电学院 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统进行 CCNBD 复合型断裂试验, 加载采用轴向位移 (LVDT) 控制, 速率为 0.02 mm/min。裂缝倾角为 28° 的试验破坏结果见图 10, 可以明显看到裂纹的扩展路径起始于人字形切槽边缘各点, 最终在切槽平面偏向加载端的一侧形成扭曲破裂面。试验所得的裂纹形态与数值模拟所得的三维翼型裂纹保持了较高的一致度。

本文模拟得到的三维翼型裂纹在 Aliha 等^[11]的 CCNBD 纯 II 型断裂试验中也得到证实 (图 11), 主裂纹在切槽平面内仅扩展一小段即偏离形成严重扭曲的三维曲面。需要指出, Aliha 等^[11]将 CCNBD 等效为 $(a_0+a_1)/2$ 裂纹长度的 CSTBD, 以借用 CSTBD 的应力强度因子解答来确定纯 II 型裂缝角度。根据本文模拟结果, CCNBD 的复合型或纯 II 型断裂是一个复杂的三维过程, 裂纹违背 STCA 且并非沿韧带平面发展, 因此将 CCNBD 等效为 CSTBD 是不恰当的。



图 10 CCNBD 复合型断裂试验破坏结果 ($\beta=28^\circ$)

Fig. 10 Experimental mixed mode fracture failure of CCNBD ($\beta=28^\circ$)

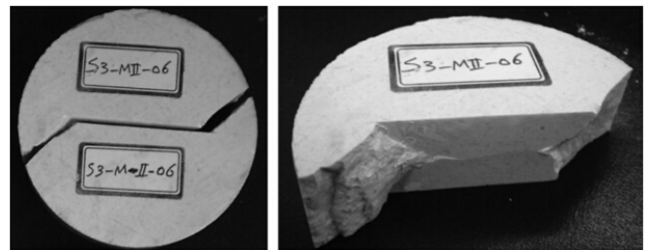


图 11 CCNBD 纯 II 型断裂试验破坏结果 (引自文献[11])

Fig. 11 Experimental pure mode II fracture failure of CCNBD (from Ref. [11])

4 结 论

基于 CCNBD 试样复合型断裂渐进过程还没有被完全认识的事实, 本文采用 RFPA^{3D} 对 CCNBD 复合型断裂试验进行数值模拟, 再现了试样的整个渐进断裂过程, 得到以下 3 点主要结论。

(1) CCNBD 试样在复合型加载条件下, 尽管裂纹扩展的趋势和走向同 CSTBD 试样裂纹的发展相似, 均为翼形扩展, 但 CCNBD 的裂纹扩展路径更复杂: 裂纹不仅萌生于人字形韧带尖端, 而且也产生于切槽边缘, 真实裂纹扩展前缘为曲线形, 与采用人字形切槽构型进行断裂韧性测试所基于的穿透直裂纹假设不符; 最终形成一对明显凸向加载端的扭曲破裂面, 即“三维翼形裂纹”。试验结果同样验证了这个三维断裂现象。

(2) 人字形韧带尖端起始的裂纹仅仅在韧带平面内平行扩展了小段距离 (自相似扩展) 就立即偏离该平面, 转向加载端。其自相似扩展明显达不到实验原理所假定的 CCNBD 人字形切槽根部^[10]。这说明真实的裂纹扩展与预先假设严重不符, 基于该假设所建立起来的复合型或纯 II 型断裂韧性测试是不合适的。

(3) 在复合型加载条件下, 由于预制人字形韧带的存在, CCNBD 试样的断裂过程是复杂的三维问题, 简化为二维分析会带来显著误差。应用人字形切槽巴

西圆盘岩石试样进行断裂力学测试应重视试样的真实渐进断裂过程, 以保证试验的有效性和准确性。

参考文献:

- [1] 陈洪凯, 唐红梅, 王林峰, 等. 缓倾角岩质陡坡后退演化的力学机制[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(3): 468 - 473. (CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei, WANG Lin-feng, et al. Mechanical mechanism for retreat evolution of steep rock slopes with gentle dip[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(3): 468 - 473. (in Chinese))
- [2] 赵延林, 王卫军, 万 文, 等. 裂隙岩体渗流 - 断裂耦合机制及应用[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(4): 677 - 684. (ZHAO Yan-lin, WANG Wei-jun, WAN Wen, et al. Coupling mechanism of seepage-fracture in fractured rock mass and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(4): 677 - 684. (in Chinese))
- [3] ISRM Testing Commission. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstract, 1988, **25**: 7 - 96.
- [4] ISRM Testing Commission. Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstract, 1995, **32**: 57 - 64.
- [5] KURUPPU M D, OBARA Y, AYATOLLAHI M R, et al. ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, **47**: 267 - 274.
- [6] DWIVEDI R D, SONI A K, GOEL R K, et al. Fracture toughness of rocks under sub-zero temperature conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, **37**: 1267 - 1275.
- [7] 崔振东, 刘大安, 安光明, 等. V 形切槽巴西圆盘法测定岩石断裂韧度 K_{IC} 的实验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9): 2743 - 2748. (CUI Zhen-dong, LIU Da-an, AN Guang-ming, et al. Research for determining mode I rock fracture toughness K_{IC} using cracked chevron notched Brazilian disc specimen[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(9): 2743 - 2748. (in Chinese))
- [8] DAI F, CHEN R, IQBAL M J, et al. Dynamic cracked chevron notched Brazilian disc method for measuring rock fracture parameters[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, **47**: 606 - 613.
- [9] ERARSLAN N, WILLIAMS D J. Mixed-mode fracturing of rocks under static and cyclic loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, **46**: 1035 - 1052.
- [10] CHANG S H, LEE C I, SEOKWON J. Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimens[J]. Engineering Geology, 2002, **66**: 79 - 97.
- [11] ALIHA M R M, AYATOLLAHI M R. Rock fracture toughness study using cracked chevron notched Brazilian disc specimen under pure modes I and II loading - A statistical approach[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2014, **69**: 17 - 25.
- [12] AMROLLAHI H, BAGHBANAN A, HASHEMOLHOSSEINI H. Measuring fracture toughness of crystalline marbles under modes I and II and mixed mode I - II loading conditions using CCNBD and HCCD specimens[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, **48**: 1123 - 1134.
- [13] OUCHTERLONY F. Compliance calibration of a round fracture toughness bend specimen with chevron edge notch[R]. Stockholm: Swedish Detonic Research Foundation, 1984.
- [14] DAI F, WEI M D, XU N W, et al. Numerical assessment of the progressive rock fracture mechanism of cracked chevron notched Brazilian disc specimens[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, DOI: 10.1007/s00603-014-0587-8.
- [15] IQBAL M J, MOHANTY B. Experimental calibration of stress intensity factors of the ISRM suggested cracked chevron-notched Brazilian disc specimen used for determination of mode-I fracture toughness[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, **40**: 1270 - 1276.
- [16] SHETTY D K, ROSENFIELD A R, DUCKWORTH W H. Fracture toughness of ceramics measured by a chevron notch diametrical compression test[J]. Journal of American Ceramic Society, 1985, **68** (12): 325 - 327.
- [17] 梁正召, 杨天鸿, 唐春安, 等. 非均匀性岩石破坏过程的三维损伤软化模型与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(12): 1447 - 1452. (LIANG Zheng-zhao, YANG Tian-hong, TANG Chun-an, et al. Three-dimensional damage soften model for failure process of heterogeneous rocks and associated numerical simulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(12): 1447 - 1452. (in Chinese))

- [18] 黄志平, 唐春安, 朱万成, 等. 动载荷条件下波长对岩石试件破坏模式影响的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1048 - 1053. (HUANG Zhi-ping, TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng, et al. Numerical simulation on failure modes of rock bars under different wave lengths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1048 - 1053. (in Chinese))
- [19] LIANG Z Z, XING H, WANG S Y, et al. A three-dimensional numerical investigation of the fracture of rock specimens containing a pre-existing surface flaw[J]. Computers and Geotechnics, 2012, 45: 19 - 33.
- [20] ZHU W C, LI Z H, ZHU L, et al. Numerical simulation on rock burst of underground opening triggered by dynamic disturbance[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(5): 587 - 599.
- [21] XU N W, TANG C A, LI L C, et al. Micro seismic monitoring and stability analysis of the left bank slope in Jinping first stage hydropower station in southwestern China[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(6): 950 - 963.
- [22] 赵延林, 万 文, 王卫军, 等. 类岩石材料有序多裂纹体单轴压缩破断试验与翼形断裂数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2097 - 2109. (ZHAO Yan-lin, WAN Wen, WANG Wei-jun, et al. Fracture experiments on ordered multi-crack body in rock-like materials under uniaxial compression and numerical simulation of wing cracks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2097 - 2109. (in Chinese))
- [23] ALIHA M R M, AYATOLLAHI M R, AKBARDOOST J. Typical upper bound-lower bound mixed mode fracture resistance envelopes for rock material[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(1): 65 - 74.
- [24] ATKINSON C, SMELSER R E, SANCHEZ J. Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk test[J]. International Journal of Fracture, 1982, 18(4): 279 - 291.

第九届全国青年岩土力学与工程会议（第 2 号通知）

2016 年 11 月 4~6 日, 中国 重庆

会议简介: 本届会议是继在浙江大学（1992）、大连理工大学（1995）、河海大学（1998）、中科院武汉岩土所（2001）、西安交通大学（2004）、同济大学（2007）、清华大学（2011）、南昌航空大学（2013）召开的前八届会议之后全国青年岩土工程科技工作者的又一次学术盛会。热忱欢迎本领域的专家教授、学者、工程技术人员、博士后、在校研究生积极参与！

主办单位: ①中国土木工程学会土力学及岩土工程分会；②中国力学学会岩土力学专业委员会；③中国水利学会岩土力学专业委员会；④中国建筑学会地基基础分会；⑤中国振动工程学会土动力学专业委员会。

承办单位: 重庆交通大学；重庆大学；招商局重庆交通科研设计院有限公司。

会议主题: 本次会议以“岩土工程灾害与控制”为主题，对我国近年来岩土力学与岩土工程领域中的相关研究进展进行广泛的学术交流。

会议英文文章征文范围仅限于“岩土工程灾害与控制”；中文文章征文内容涵盖岩土力学与岩土工程的各研究领域，包括但不限于以下内容：①土的本构关系及强度理论；②土工测

试及仪器；③岩土工程数值模拟；④非饱和土与特殊土；⑤软土工程；⑥高边坡与危岩；⑦地下水渗流；⑧土工合成材料；⑨库岸再造与防治；⑩桩基础；⑪地基处理；⑫土石坝工程；⑬航道整治工程；⑭港口码头工程；⑮土动力学与地震工程；⑯环境岩土工程；⑰岩土工程设计与施工；⑱地下空间开发与利用；⑲岩土工程风险与管理；⑳重大岩土工程实例分析。

重要日期: 2015 年 06 月 01 日接受论文全文投稿；2015 年 11 月 30 日中文稿件提交全文截止；2015 年 12 月 30 日英文稿件提交全文截止；2016 年 02 月 29 日通知论文是否录用；2016 年 03 月 31 日提交修改后论文；2016 年 11 月 4~6 日：会议召开。

联系方式: 王俊杰教授（电话：023-62896924；13883116938），梁越副教授（电话：023-62459033；18983369809），钟祖良副教授（电话：13594058380），朱根桥副主任（电话：18008377813），叶四桥教授（电话：13627647292），黄锋副教授（电话：15808075278）。通讯地址：重庆市南岸区学府大道 66 号，重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心。邮政编码：400074，投稿邮箱：nycgge2016@163.com，会议网址：nycgge2016.cqjtu.edu.cn。

（重庆交通大学 供稿）