

# 有限宽切槽对 CCNBD 断裂试样应力强度因子的影响

戴 峰, 王启智

(四川大学 土木力学系, 四川 成都 610065)

**摘 要:** 国际岩石力学学会 (ISRM) 在 1995 年提出一种新型的岩石断裂韧性试样——人字形切槽巴西圆盘试样 (cracked chevron notched Brazilian disc——CCNBD), 对该试样的一个重要力学参数即最小无量纲应力强度因子的标定, 以前的分析和计算都没有考虑切槽宽度的影响。然而试样切槽的宽度受切割刀具厚度所限, 不能为零。当试样较小时, 切槽宽度则相对较大。通过三维边界元计算分析表明, 切槽宽度越大, 无量纲应力强度因子的标定值就越大; 对于 ISRM 推荐的 CCNBD 标准试样, 得出其最小无量纲因子值为 0.954, 这比 ISRM 给出对应值 0.84 要大 13.6%。同时, 小裂纹应力强度因子曲线的变化趋势也发生了质的变化, 这可能会导致实验的失败。推荐最小无量纲应力强度因子的标定采用考虑切槽的三维分析。

**关 键 词:** 人字形切槽巴西圆盘 (CCNBD); 无量纲应力强度因子; 断裂韧性; 切槽宽度; FRANC3D

**中图分类号:** TU 459      **文献标识码:** A

## Effects of finite notch width on stress intensity factor for CCNBD specimen

DAI Feng, WANG Qi-zhi

(Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** International Society for Rock Mechanics ( ISRM ) proposed in 1995 a new type of rock fracture toughness specimen ——cracked chevron notched Brazilian disk ( CCNBD ), the previous analytical and numerical studies of the dimensionless stress intensity factor, which is an important mechanical parameter, does not take into account the effects of finite notch width. Since the minimum chevron notch width is limited by the size of the cutting wheels used to produce it and can not be zero, as the specimen size get small enough, the notch width would become large in relation to the sample size. Our 3D BEM(Boundary Element Method) calculation shows that the larger the notch width is, the bigger the error makes for the dimensionless stress intensity factor. To the standard CCNBD specimen suggested by ISRM, this paper determines the minimum dimensionless stress intensity factor to be 0.954 which is 13.6 % larger than the value 0.84 given by ISRM; and the trend of the curve is changed when the crack is short, this could make the failure of the experiment. We recommend that a full 3D numerical analysis taking into effect of the notch width to be done whenever determine the dimensionless stress intensity factor.

**Key words:** cracked chevron notched Brazilian disc(CCNBD); dimension stress intensity factor; fracture Toughness; notch width; FRANC3D

## 1 引 言

国际岩石力学学会 ( ISRM—International Society for Rock Mechanics ) 先后提出了 2 个用于测定岩石断裂韧度的方法<sup>[1, 2]</sup>。它们分别是 1988 年推荐的人字形切槽短圆棒试样 ( chevron notched short rod specimen ) 和三点弯曲圆棒试样 ( three-point bend round bar specimen )<sup>[1]</sup>, 以及 1995 年提出的人字型切槽巴西圆盘试样 ( cracked chevron notched Brazilian disc——CCNBD )<sup>[2]</sup>。由于无量纲应力强度因子作为关键的参数出现在断裂韧性计算公式

中, 所以必须要获取试样的高精度的应力强度因子。1988 年的方法, 研究较为透彻, 对这两种试样应力强度因子的标定也比较成熟。Chen 用边界元法<sup>[3]</sup>, Xu 和 Fowell 分别用柔度法和边界元法<sup>[4]</sup>对 CCNBD 试样进行了计算标定。在 ISRM 95<sup>[2]</sup>方法中, 给出了标准试样的各项参数值, 并给出了相应的最小无量纲应力强度因子值 ( 这是用于断裂韧性计算公式中的一个关键数值 )。1998 年, 王启智<sup>[5]</sup>在《国际岩石力学和采矿科学杂志》上撰文, 从理论分析的角度对文献[2~4]中的数值结果提出了质疑, 指出 Chen 的结果偏大, 而 Xu 和 Fowell 的结果又偏小 ( 包

收稿日期: 2002-12-30

基金项目: 国家自然科学基金 ( 编号: 19872046 ) 资助项目

作者简介: 戴峰, 男, 1978 年生, 硕士, 从事固体力学方面的研究。

括 ISRM 推荐试样的标定值也存在问题)。随后, 贾学明和王启智<sup>[6]</sup>用更精确的有限元法重新标定了 ISRM 提出的 CCNBD 标准试样的  $Y_{min}^*$ , 证实 ISRM 值<sup>[2]</sup>的确偏小。

值得指出的是, 1988 年和 1995 年的方法都采用了人字型切槽试样, 试样切槽的制作一般是由刀具切割出来, 切槽的宽度由切割的刀具所决定, 并取决于加工的工艺水平。对于一些不易获取或者昂贵的材料来说, 试样可能比较小, 这样切槽宽度相对试样来说就比较大。切槽的宽度对试样应力强度因子的影响会变得很大, 甚至可能会导致实验的失败, 美国 Cornell 大学对矩形截面人字型切槽三点弯曲试样切槽宽度的计算证明了这一点<sup>[7]</sup>。对于 CCNBD 试样, 现有文献对应力强度因子的分析和计算<sup>[2~6]</sup>都没有考虑切槽的宽度。对于实验来说, CCNBD 试样是有切槽宽度的, 切槽并不是尖锐的裂纹, 分析中把切槽看成零宽度, 切槽也成了尖锐的裂纹前端, 从而简化了计算分析过程。这种简化改变了裂纹的形状, 究竟对 CCNBD 的应力强度因子产生多大的影响, 有必要进行检验。因此, 本文将考虑实验试样切槽的宽度, 对 CCNBD 试样做进一步的分析。

本文有如下 3 点假设:

- (1) 材料是各向同性、线弹性的;
- (2) 裂纹沿切槽宽度一半处扩展;
- (3) 采用 Ouchterlony 穿透直裂纹<sup>[8]</sup>。

## 2 CCNBD 试样的应力强度因子

图 1 所示是一典型的 CCNBD 试样。尺寸统一采用无量纲形式, 相应的几何参数为:  $a_0 = a_0/R$ ,  $a = a/R$ ,  $a_1 = a_1/R$ ,  $a_b = B/R$ ,  $a_s = R_s/R$ ,  $d = h/R$ 。其中,  $a_0$  为初始裂纹长度;  $a$  为裂纹长度;  $a_1$  为最大切槽长度;  $B$  为试样厚度;  $R$  为试样半径;  $R_s$  为切割刀具半径;  $b$  为裂纹前沿宽度;  $h$  为切槽宽度 (不考虑切槽宽度的 CCNBD 则没有  $h$ )。应力强度因子采用式 (1) 无量纲化:

$$Y^* = \frac{K_I}{P/B\sqrt{D}} \quad (1)$$

式中  $Y^*$  为代表 CCNBD 的无量纲应力强度因子;  $D$  为直径。不考虑切槽宽度时,  $Y^*$  由  $a, a_0, a_1$  决定, 考虑切槽宽度,  $Y^*$  由  $a, a_0, a_1, d$  决定。

图 2 所示的是一典型的 CCNBD 无量纲应力强度因子值随  $a$  分布的趋势, 它和其它人字型切槽的应力强度因子变化趋势是一致的<sup>[9]</sup>, 就是其无量纲应力强度因子有一个明显的先下降、后又上升的过

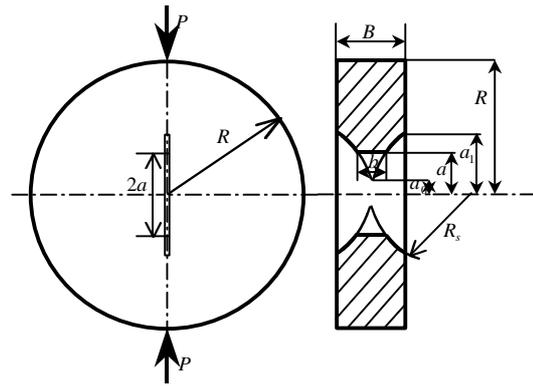


图 1 CCNBD 试样  
Fig.1 The CCNBD specimen

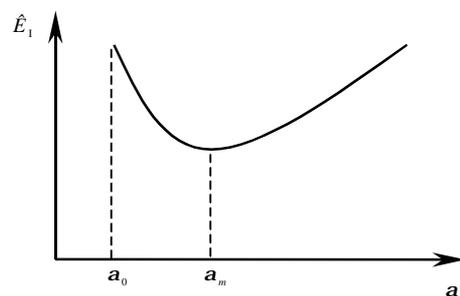


图 2 标准的 CCNBD 应力强度因子值随 a 分布  
Fig.2 Stress Intensity factor vs. crack length for standard CCNBD

程。对于不考虑切槽宽度的 CCNBD 试样, 在  $a = a_0$  处,  $Y^*$  为无限大, 实验中试样加载时, 由于极度的应力集中, 极小的力就可以在切槽尖端触发裂纹, 而材料有着定常的断裂韧度。因此, 必须增大加载力才能使扩展裂纹, 当裂纹扩展到临界长度  $a_m$ , 而函数  $Y^*$  达到了最小值  $Y_{min}^*$  时, 相应的载荷达到了最大值  $P_{max}$ 。所以稳定的裂纹扩展要求载荷减小。基于这种方法, 断裂韧度  $K_{IC}$  通过最大载荷  $P_{max}$  和临界长度  $a_m$  时的  $Y_{min}^*$  可由式 (2) 求得<sup>[2]</sup>:

$$K_{IC} = \frac{P_{max}}{B\sqrt{D}} Y_{min}^* \quad (2)$$

用试验方法测定材料断裂韧度的两个重要数值为试验时的最大压应力  $P_{max}$  及相应的最小无量纲应力强度因子  $Y_{min}^*$ 。而  $Y_{min}^*$  可以通过数值计算先于试验获得<sup>[3~6]</sup>。

## 3 边界元分析应力强度因子

本文使用三维断裂分析软件 FRANC3D (Fracture analysis code in 3 dimensions), 结合立体对象建模器 OSM (Object solid modeler) 和边界元求解器 BES (Boundary element system), 来分析考虑切槽宽度的 CCNBD 试样的应力强度因子<sup>[10]</sup>。FRANC3D 是由美国 Cornell 大学断裂工作组

(Cornell fracture group—CFG) 开发的一套具有建模、应力分析、应力强度因子计算、裂纹自动扩展等功能的软件，它有很强的模拟裂纹的能力，可以生成多裂纹、非平面裂纹和任意形状的裂纹。这些裂纹可以是表面裂纹、内埋、交叉、不同材料交界处的裂纹，甚至完全不连续裂纹。对于一个裂纹的构形，可以有任意的裂纹前缘。FRANC3D 在生成裂纹时，用户可以通过菜单选择它自带的裂纹库，如椭圆裂纹、圆片裂纹、直裂纹等。也可以通过文件的方式生成自己想要的复杂裂纹。FRANC3D 应力强度因子的计算是通过位移值来获得的，可以通过裂纹前缘单元的节点位移得到，也可以通过一个距离裂纹前缘的一个固定值  $r$  得到。对于 I 型裂纹使用裂纹张开位移 (COD—Crack opening displacement) 计算 I 型应力强度因子。

文献[10]使用 FRANC3D 对 1995 年方法推荐的不考虑切槽宽度的标准 CCNBD 试样 ( $R_s/R=0.6933$ ,  $B/R=0.8$ ,  $a_0=0.2637$ ,  $a_1=0.65$ ),  $a=0.49$  时的应力强度因子进行了计算，以考验 FRANC3D 的精度。材料常数取值与文献[6]一致，计算得到无量纲应力强度因子值为 0.946，与文献[6]用有限元标定相应的无量纲应力强度因子值 0.943 相比，误差极小。

本文计算考虑切槽宽度的 CCNBD 标准试样的应力强度因子。试样的尺寸按照 1995 年方法，但是该方法并没有考虑切槽的厚度，只是对试样加工切槽的厚度提出不能大于 1.5 mm。根据实验情况<sup>[11]</sup>，加工的刀具为圆切口的金属铣刀，厚度为 1 mm。使用 1 mm 刀具制作的切槽要比 1 mm 稍大一点，因此，我们选用 1.2 mm 来作为 1995 年方法标准试样的切槽宽度，即  $h=1.2$  mm，无量纲切槽宽度  $d=0.032$ 。同时，我们也考虑切槽宽度较大一点的情况，即  $d=0.064$ ,  $d=0.096$  (对于标准试样，相当于 2.4 mm 和 3.6 mm 的槽宽)，来进行对比。

由试样和边界条件的对称性，取一半建模。图 3 给出的是  $d=0.032$ ,  $a=0.49$  时的网格划分。其中，图 3 为整体网格，图 4 为裂纹面上以及切槽面上的网格划分。图 5 为  $a=0.49$  时整个直裂纹上无量纲应力强度因子的分布曲线，与文献[6]中图 8 比较，考虑切槽的 CCNBD 模型直裂纹上各点应力强度因子的分布，与不考虑切槽的模型类似，均为中心点的值最小，向外逐渐增大，但趋势较平缓，边界上各点由于受边界影响值扰动较大。因此，本文采用与文献[6]同样的方法，即取离中心点无量纲应力强度因子值的变化不超过 7% 的所有点作平均，

作为所研究 CCNBD 试样的应力强度因子。对于切槽宽  $d=0.032$  的 CCNBD 模型计算所得的最小值  $Y_{min}^*=0.9535$ ，对应的无量纲裂纹长度  $a_m=0.49$ 。与不考虑切槽的模型相比较 (文献[7]得到的最小值是 0.9430)，无量纲裂纹长度  $a_m$  都是 0.49，其  $Y_{min}^*$  值仅增大 1.11%。

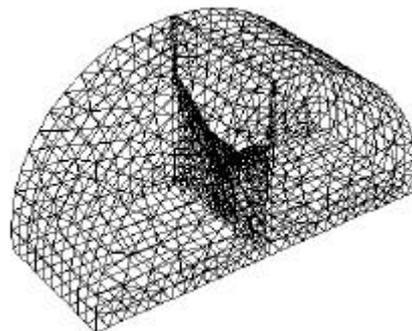


图 3 考虑切槽 CCNBD 网格划分 (整体)  
Fig.3 The mesh of CCNBD taking into account the notch (whole)

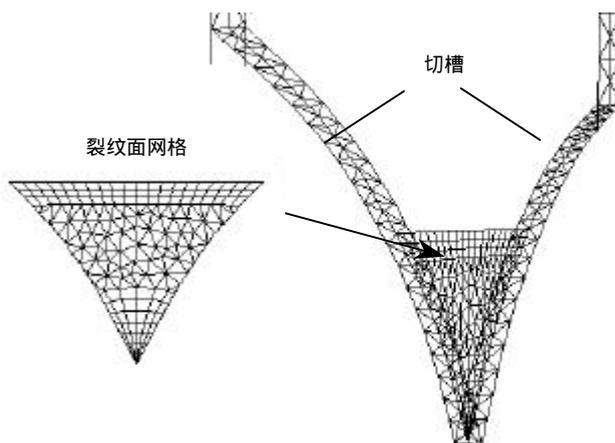


图 4 考虑切槽模型 CCNBD 切槽及裂纹面网格划分 (细部)  
Fig.4 The mesh of the notch and the crack face of CCNBD taking into account the notch (detail)

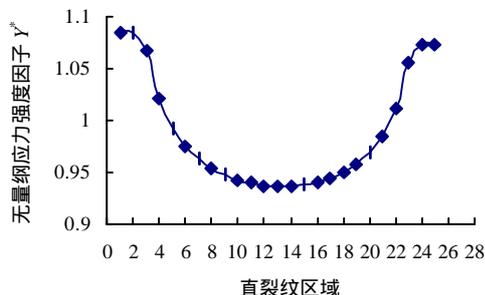


图 5 考虑切槽 CCNBD 无量纲应力强度因子沿裂纹前沿分布  
Fig.5 Distribution of the dimensionless SIF along crack front of CCNBD taking into account the notch

图 6 所示为 FRANC3D 计算所得的考虑三种切槽宽度 ( $d$  分别为 0.032, 0.064, 0.096) 的 CCNBD 模型以及不考虑切槽宽度模型的无量纲应力强度因

子随裂纹长度的变化曲线。不考虑切槽宽度模型的曲线取自文献[6],但是文献[6]没有列出  $a < 0.3$  时的值,因为文献[6]的标定主要是要找到无量纲应力强度因子最小值及对应的裂纹位置。对此,我们补充了  $a = 0.28$  时,不考虑切槽宽度的 CCNBD 模型  $\tilde{O}^*(0.28) = 1.476 2$ 。参考以及图[5]不考虑切槽宽度模型的曲线  $\tilde{O}^*(0.30) = 1.335 6$ ,可见,不考虑切槽宽度的 CCNBD 模型,  $a \rightarrow a_0$  无量纲应力强度因子趋向于无穷大。

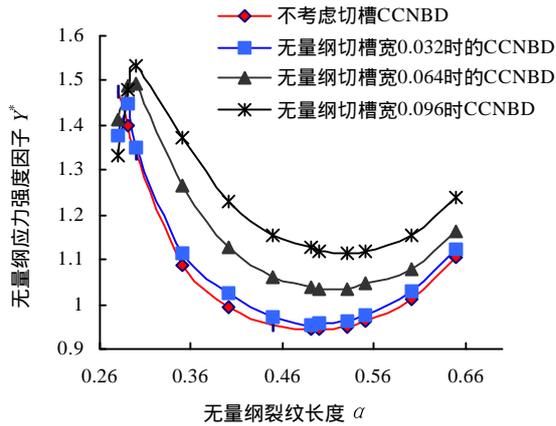


图6 考虑和不考虑切槽 CCNBD 的应力强度因子  
Fig.6 The dimensionless SIF of CCNBD taking into account the notch CCNBD not taking into account the notch

从图6,很容易看出,不考虑切槽宽度的模型,其曲线位于底端,其无量纲应力强度因子值比考虑切槽宽度的模型的值都要小。切槽宽度大的模型,其曲线在切槽较小的模型的上方,其无量纲应力强度因子值比切槽宽度较小的模型的值要大。而且,切槽宽度越大的模型无量纲应力强度因子值比不考虑切槽宽度的模型偏大得越多。这是因为切槽造成了试样的“弱化”,从而导致应力强度因子的增大。而切槽较宽的模型则削弱更厉害一些,所以更容易破坏。同时可见,通过计算标定得到  $Y_{min}^*$ ,对于切槽较宽的模型,用不考虑切槽的模型计算所得的值要严重偏小。

有切槽的模型,即使是  $d = 0.032$  的小宽度,其无量纲应力强度因子变化曲线都与不考虑切槽的模型不同,经历了先增大后又减小,而后再再增大的过程。例如,对于考虑切槽宽度  $d = 0.032$  的模型,我们计算了  $a < 0.3$  的两个位置的无量纲应力强度因子值,  $\tilde{O}^*(0.29) = 1.449 1$  及  $\tilde{O}^*(0.28) = 1.376 4$ ,相对于  $\tilde{O}^*(0.30) = 1.350 4$ ,可以看出,在  $a \rightarrow a_0$  时,无量纲应力强度因子不再是趋向于无穷大,而是先增大后又减小。无量纲应力强度因子值在增长的区域非常陡峭,在很靠近  $a_0$  的极小裂纹间隔内增加的很大(尤其是切槽宽度比较大时)。比如,  $d = 0.032$ ,

$a = 0.28$  时,其值为 1.376 4,比最高点  $a = 0.29$  时的值 1.449 1 低 5.0%;  $d = 0.064$ ,  $a = 0.28$  时,其值为 1.411 4,比最高点  $a = 0.29$  时,其值 1.490 9 低 5.3%;  $d = 0.096$ ,  $a = 0.28$  时的值 1.331 9 比最高点  $a = 0.3$  时的值 1.534 3 低 13.2%。同时,最高点所在的无量纲裂纹位置后移了 0.01,这说明切槽宽度加大时对 CCNBD 试样有更大的影响。

计算表明,两种模型的 CCNBD 试样有一共同的现象,既在小裂纹长度时,试样应力强度因子分布曲线,不再是中心点的值最小,并向外逐渐增大,而是中间大,并向外渐渐减小。这说明裂纹刚起裂后扩展并不是直线,中间扩展得要快一些。

### 4 讨论

边界元分析结果揭示了考虑切槽宽度时,CCNBD 试样的无量纲应力强度因子曲线与不考虑切槽宽度的试样的曲线存在区别,特别是在切槽宽度大的情况下。参考文献[7],可以这样来解释这个现象。由对称性,仅考虑试样的上半部分,如图7(a)是一典型的不考虑切槽宽度的 CCNBD 试样的裂纹面,由于把切槽看成裂纹(图中阴影部分)。图7(b),(c)所示的是考虑切槽宽度的 CCNBD 试样的裂纹面,注意其裂纹面是由两条切槽中线和直裂纹前沿组成的三角形。在极限情况下,裂纹长度  $\Delta a \ll h$ ,  $\Delta a$  是唯一的相对量度,由量纲分析知道:

$$\hat{E}_1 \propto s \sqrt{\Delta a} \tag{4}$$

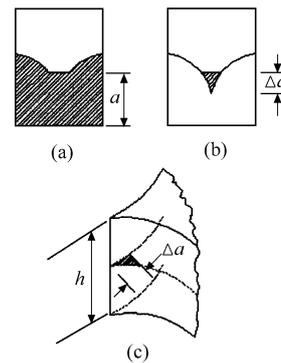


图7 CCNBD 试样的裂纹面  
Fig.7 Crack surfaces for CCNBD specimen

式中  $s$  为在切槽中间点的当地应力。当  $\Delta a \rightarrow 0$  时,  $\hat{E} \rightarrow 0$ 。

理论上,对不考虑切槽宽度的试样,  $\tilde{O}^*(a_0) = \infty$ ,这样试样一加载就会起裂。初始阶段  $\tilde{O}$  曲线急剧下降,所以,加载力  $P$  迅速上升,然后随着  $\tilde{O}$  曲线的上升,加载力  $P$  逐渐下降。对于有限槽宽的试样,则  $\tilde{O}^*(a_0) = 0$ ,应力强度因子的概念已不适用。但有限槽宽仍可以产生一定程度的应力集中,

这样,必须施加一定的力,才可以使裂纹起裂。槽宽越大,起裂力也越大,故起裂后试样已存储较大的弹性应变能而处于不稳定的状态,此时,即使荷载不增加,试样也会被释放的弹性应变能摧毁,从而导致实验失败。由断裂力学理论无法得到这个力的大小,不过,这并不妨碍我们分析问题的实质。假设这个力为 $P_1$ ,这样裂纹在施加力为 $P_1$ 时起裂。如果实验机是位移控制的,并且,裂纹缓慢的增长,当裂纹增长的时候,载荷将逐渐减小,然后沿着 $P(a)$ 曲线变化,如图8。如果实验时保持恒定载荷 $P_1$ ,裂纹将非稳定的沿着“path1”跃进。在真实的实验中裂纹的扩展往往是沿着“path1”和位移控制曲线所围的阴影中的某条未知曲线跃进的。这样,在初始短裂纹时裂纹扩展,可能出现一段非稳定的过程,而载荷可能会减小。裂纹非稳态的跃进到位移曲线上后有短暂停止,必须增大加载,才能继续稳定的扩展。如果断裂触发载荷大于最大载荷,那么,整个实验都是在非稳态的破裂过程下进行的,可能存在动态断裂过程。这种情况下,裂纹将非稳定的沿着“path2”或其下面区域的某条路径扩展。试样在加载的瞬间就崩裂了。

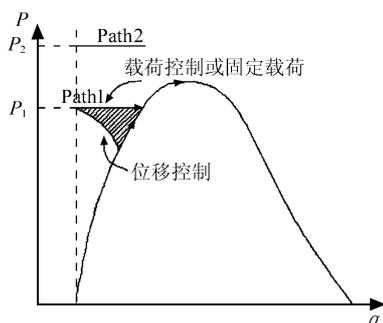


图8 切槽相对宽度对裂纹扩展的影响  
Fig.8 The effect of the notch width to the propagation of crack

## 5 结论

对 ISRM 95 方法<sup>[2]</sup>推荐的 CCNBD 标准试样(标准试样尺寸为:  $R_s/R=0.6933$ ;  $B/R=0.8$ ;  $a_0=0.2637$ ;  $a_1=0.65$ )考虑切槽( $d=0.032$ )的无量纲应力强度因子进行了详尽的分析,得出最小无量纲应力强度因子 $\tilde{O}_{\min}^*=0.9535$ ,比文献[6]的0.943稍大,比 ISRM 给出最小值0.84要大13.6%。对应的无量纲裂纹长度 $a_m=0.49$ ,这与文献[6]一致。

(1)对于切槽相对宽度较大的情况,如 $d=0.064$ , $d=0.096$ 时,对应无量纲应力强度因子值比不考虑切槽的时候要大很多,最小值同样大很多,其位置也有偏移。所以,当试样较小、切槽相对宽度较大时,沿用文献[6]的标定值是不妥当

的,推荐最小无量纲应力强度因子的标定应考虑切槽的宽度进行三维数值分析。

(2)对实验成败有重要影响的是:考虑切槽宽度的模型,其无量纲应力强度因子的曲线不再是先下降后上升,而是先有上升,到最高点后下降,降到最低点后,再上升。因此,切槽较宽时,试样需要一个较大的起裂力,该起裂力可能会引起试样失稳而使实验失败。

## 参考文献

- [1] ISRM Testing Commission, (co-ordinator: F. Ouchterlony), Suggested methods for determining the fracture toughness of rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract**, 1988, 25: 71-96.
- [2] ISRM Testing Commission, (co-ordinator: R J Fowell), 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.
- [3] Chen J F. The development of the cracked-chevron-notched Brazilian disc methods for rock fracture toughness measurement[A]. In **proceeding of 1990 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics**[C]. Albuquerque: American Society of Experimental Mechanics, 1990, 18-23.
- [4] Xu C, Fowell R J. Stress Intensity factor evaluation for cracked chevron notched Brazilian disc specimen[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract**, 1994, 31: 157-162.
- [5] Wang Q Z. Stress intensity factors of ISRM suggested CCNBD specimen used for mode-I fracture toughness determination[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1998, 35: 977-982.
- [6] 贾学明,王启智. 断裂韧性试样 CCNBD 宽范围应力强度因子标定[J]. **岩土力学**, 2003, 24 (6): 907-912.
- [7] Kolhe R Hui, Chung Yuen. Effects of finite notch width on the fracture of chevron-notched specimen[J]. **International Journal of Fracture**, 1998, 94: 189-198.
- [8] Ouchterlony F. Compliance calibration of a round fracture toughness bend specimen with chevron edge notch[R]. Stockholm: Swedish Detonic Research Foundation, 1984.
- [9] Gerstle W H, Ingraffea A R. Compliance and stress-intensity factor calibration of the CENRBB specimen using the boundary element method[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract**, 1991, 28: 85-92.
- [10] 贾学明,王启智. 三维断裂分析软件 FRANC3D[J]. **计算力学学报**, (待发表).
- [11] 吴礼舟,王启智,贾学明. 用人字形切槽巴西圆盘(CCNBD)确定岩石断裂韧性及其尺度律[J]. **岩石力学与工程学报**, 2004, 23 (3): 383-390.