

# 圆孔内单边(或双边)裂纹平台巴西圆盘 应力强度因子的全面标定\*

周妍<sup>1</sup>, 张财贵<sup>1</sup>, 杨井瑞<sup>1</sup>, 王启智<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学 土木工程及应用力学系, 成都 610065;  
2. 水力学及山区河流开发保护国家重点实验室(四川大学), 成都 610065)

**摘要:** 虽然径向压缩含内单边裂纹的圆环型试样已有学者进行了分析,但在该试样上增加有益于加载的平台,就形成了新的试样——圆孔内单边裂纹平台巴西圆盘(holed single cracked flattened Brazilian disc, HSCFBD),并对其进行了研究.此外,对圆孔内(双边)裂纹平台巴西圆盘(holed cracked flattened Brazilian disc, HCFBD)做了进一步研究.通过有限元分析,对含有不同内外半径比、无量纲裂纹长度、平台角的 HSCFBD 和 HCFBD 的无量纲应力强度因子  $Y$  进行了全面标定,给出  $Y$  的曲线和拟合公式,拟合公式计算结果与数值标定结果相对误差在  $\pm 1.39\%$  以内.分析了试件形状参数对应力强度因子的影响:内外半径比越大,平台角越小,无量纲应力强度因子越大.根据应力强度因子的变化规律,推荐了适合测试 I 型断裂韧度的 HSCFBD 和 HCFBD 的参数.进行了 HCFBD 的初步试验,还用国际岩石力学学会建议的人字形切槽巴西圆盘做了对比试验.

**关键词:** 圆孔内(双边)裂纹平台巴西圆盘(HCFBD); 圆孔内单边裂纹平台巴西圆盘(HSCFBD); 无量纲应力强度因子; 有限元分析; 拟合公式

**中图分类号:** O242.21; O346.1<sup>+</sup>1 **文献标志码:** A  
**doi:** 10.3879/j.issn.1000-0887.2015.01.002

## 主要符号表

HCFBD	圆孔内(双边)裂纹平台巴西圆盘	$r$	圆盘中心圆孔半径
HSCFBD	圆孔内单边裂纹平台巴西圆盘	$a$	圆盘裂缝长度
$K_I$	I型(张开型)裂纹的应力强度因子	$\alpha$	无量纲裂缝长度 $\alpha = a/(R-r)$
$K_{Ic}$	I型裂纹的静态断裂韧度	$\gamma$	内外半径比 $\gamma = r/R$
$Y$	无量纲应力强度因子	$2\beta$	平台角
$R$	圆盘外半径		

## 引 言

岩石断裂力学在土木工程和采矿工程等领域有广泛的应用.岩石断裂韧度表征岩石材料

\* 收稿日期: 2014-03-25; 修订日期: 2014-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(51179115); 教育部博士点基金(20130181130013)

作者简介: 周妍(1989—),女,辽宁阜新人,硕士生(E-mail: 419626681@qq.com);

王启智(1946—),男,浙江嘉兴人,教授,博士生导师(通讯作者. E-mail: qzwwang2004@163.com).

抵抗裂纹扩展的能力<sup>[1]</sup>,是岩石断裂的一个重要力学参数.要确定材料的断裂韧度,必须有测试规范和方法,而测试方法一般由权威的学术机构来颁布,如美国材料试验学会(American Society for Testing and Materials, ASTM)和国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics, ISRM)等.岩石试样不易预制尖锐裂纹,故不能直接套用比较成熟地用于金属材料的测试规范<sup>[2]</sup>.为了确定岩石的断裂韧度,ISRM提出了4种建议试样<sup>[3-5]</sup>,有人字形切槽三点弯曲圆棒(three-point chevron bend, CB)试样、人字形切槽短圆棒(chevron notched short rod, SR)试样、人字形切槽巴西圆盘(cracked chevron notched Brazilian disc, CCNBD)试样和半圆盘弯曲(the notched semi-circular bend, NSCB)试样.除此之外,也有学者提出采用中心直裂缝平台巴西圆盘(cracked straight-through flattened Brazilian disc, CSTFBD)来进行岩石断裂韧度的测试.但是,岩石圆盘试样中心直裂缝的加工有相当难度<sup>[6-7]</sup>.为了解决这一难题,人们又提出了先在圆盘中心钻圆孔,然后再从孔边制作裂缝,这样就产生了圆孔内单边裂纹巴西圆盘<sup>[8]</sup>以及含内双边裂纹的圆环型试样<sup>[9]</sup>.Hobbs<sup>[10]</sup>指出径向加载的圆盘试样会在加载端部附近先产生断裂破坏,而中心圆孔则可以使裂纹从孔边开裂,有效避免加载端先开裂.为了消除加载端部应力集中的影响,Fischer等采用了修正圆环试样<sup>[11]</sup>进行I型断裂的有限元分析.张盛和王启智<sup>[12]</sup>此前研究了平台巴西圆盘(flattened Brazilian disc, FBD)、圆孔平台巴西圆盘(holed flattened Brazilian disc, HFBD)、中心直裂缝巴西圆盘(cracked straight-through Brazilian disc, CSTBD)、人字型切槽巴西圆盘、圆孔内(双边)裂纹平台巴西圆盘(holed cracked flattened Brazilian disc, HCFBD)5种不同类型圆盘测试岩石的断裂韧度.在试验中,没有预制裂纹的FBD和HFBD试样试验结果的离散性较大,无效试验比较多.加工方法上,CCNBD的加工尽管相对容易,但其较为复杂的三维构形,不能按照平面问题进行分析;CSTBD试样构形最简单,而加工却最困难.综合比较后可以认为,圆孔内(双边)裂纹平台巴西圆盘(HCFBD,如图1)是比较理想的测试岩石断裂韧度的构型,这种圆盘试样加工相对容易,且加工的裂缝宽度较小,故其试验的离散性小.含内单边裂纹的圆环型试样同样具有加工简单、分析容易的优点,单边裂纹避免了双边裂纹两个裂尖的相互影响,本文在该试样上增加了有益于加载的平台,形成了新的试样,并命名为圆孔内单边裂纹平台巴西圆盘(holed single cracked flattened Brazilian disc, HSCFBD,如图2).本文标定试样符号说明如下,“S”代表单边裂纹,不加“S”意味着对称双边裂纹,“H”表示有中心圆孔,“C”代表裂纹,“F”表示有平台.保留BD(巴西圆盘)是因为内孔半径较小,故不称圆环.

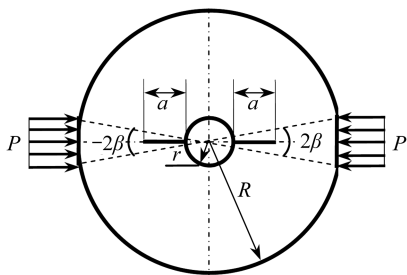


图1 圆孔内(双边)裂纹平台巴西圆盘(HCFBD)

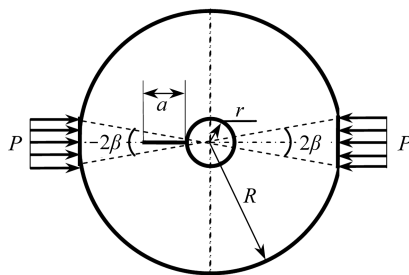


图2 圆孔内单边裂纹平台巴西圆盘(HSCFBD)

Fig. 1 A holed cracked flattened Brazilian disc

Fig. 2 A holed single cracked flattened Brazilian disc

试样的主要几何参数:外半径  $R$ , 内半径  $r$ , 厚度  $B$ , 裂纹长度  $a$ , 平台角  $2\beta$ . HCFBD 和 HSCFBD 的 I 型应力强度因子(stress intensity factor-SIF)表达式如下:

$$K_I = \frac{P}{\sqrt{RB}} Y(\alpha, \gamma, 2\beta), \quad (1)$$

$$Y(\alpha, \gamma, 2\beta) = \frac{K_I B \sqrt{R}}{P}, \quad (2)$$

其中  $Y$  是无量纲应力强度因子,  $\alpha = a/(R-r)$  为无量纲裂纹长度,  $\gamma = r/R$  为内外半径比,  $2\beta$  为平台角度,  $P$  为施加在平台上的压缩载荷的合力,  $Y$  是  $\alpha, \gamma, 2\beta$  的函数。考虑到研究者兴趣的区别, 也同时标定了  $2\beta = 0^\circ$  (即无平台角) 的情况。通过有限元法对  $Y$  进行标定,  $Y$  的精度和覆盖范围对实验意义重大, 为了方便应用, 还给出了  $Y$  的曲线和拟合公式。

受一对径向集中荷载或分布荷载的圆环试样广泛应用于理论和实验力学中的各个领域<sup>[13]</sup>。Ahmad 和 Ashbaugh<sup>[8]</sup> 对径向加载含内单边裂纹的圆环试样, 标定了其内外半径比为 0.25, 0.333, 0.5, 无量纲裂纹长度在 0.2~0.8 范围内的无量纲应力强度因子。Chen 等<sup>[14]</sup> 重新标定了内外半径比为 0.5, 无量纲裂纹长度在 0.1~0.7 范围内的无量纲应力强度因子, 并与文献<sup>[8]</sup> 标定结果进行了对比验证。Aliha 等<sup>[15]</sup> 也研究了圆环试样的无量纲应力强度因子, 但是裂纹和加载方向的夹角在  $0^\circ \sim 32^\circ$  范围变化。总之, 以上的研究都尚不全面, 他们只考虑了内外半径比和裂纹长度等参数中个别因素对无量纲应力强度的影响, 对试样也没有采用平台加载。本文完成了 HSCFBD 和 HCFBD 无量纲应力强度因子  $Y$  的全面标定, 综合考虑了形状参数的影响, 其中平台角  $2\beta = 0^\circ, 7^\circ, 14^\circ, 20^\circ$ , 内外半径比  $\gamma = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3$ , 无量纲裂纹长度  $\alpha = 0.025 \sim 0.975$ 。

## 1 测试原理和标定方法

### 1.1 试样特征和测试原理

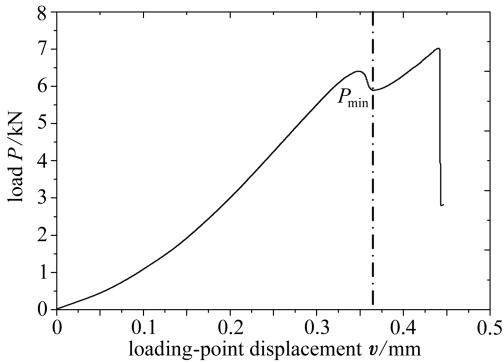


图3 HCFBD的载荷-加载点位移曲线示意图  
Fig. 3 The load-displacement curve of HCFBD

断裂韧性  $K_{IC}$  是材料常数, 由断裂原理  $K_I = K_{IC}$ , 可以用裂纹扩展过程中的任何载荷  $P$  以及其对应的无量纲裂纹长度  $\alpha$  由式(1)计算, 但这很麻烦, 甚至是不现实的。HCFBD 试样的载荷-位移曲线(如图3)会经历一个二次倒拐现象, 即载荷会发生一个先下降后又上升的过程, 无量纲应力强度因子的最大值  $Y_{max}$  正好对应载荷-位移曲线上载荷从最大值下降达到一个局部最小载荷  $P_{min}$  (此时  $\alpha_c = a_c/(R-r)$  即临界裂纹长度对应  $Y_{max}$ )。可以用这一最小载荷  $P_{min}$  结合  $Y_{max}$  一起代入式(1)计算  $K_{IC}$ , 即

$$K_{IC} = \frac{P_{min}}{\sqrt{RB}} \cdot Y_{max}. \quad (3)$$

### 1.2 应力强度因子标定方法和精度

本文利用有限元软件 ANSYS 对式(1)中无量纲应力强度因子  $Y$  进行数值标定, 采用 1/4 节点奇异单元模拟裂纹尖端应力奇异性, 通过裂纹面张开位移获得裂纹尖端应力强度因子, 裂纹尖端坐标和裂尖奇异单元如图4所示。用有限元法计算出奇异单元上节点 A 和节点 B 的位移, 然后利用位移法求得应力强度因子<sup>[16]</sup>。

$$K_I = \frac{\sqrt{2\pi}E}{24(1-\mu^2)} \frac{8v_B - v_A}{\sqrt{r_{OB}}}, \quad (4)$$

式中  $E$ 、 $\mu$  分别为材料的弹性模量和 Poisson 比。 $r_{OB}$  为奇异单元边长  $r_{OA}$  的  $1/4$ ，图 4 中  $v_A$  为 A 节点  $y$  方向位移， $v_B$  为 B 节点  $y$  方向位移。

为了确保本文数值标定的有效性和准确性，对含内单边裂纹的圆环试样进行有限元分析，数值标定结果与文献[8,14]中结果进行了对比验证，所得数值标定结果与二者比较吻合（如图 5），最大相对误差小于  $\pm 2.19\%$ ，

$$\text{相对误差} = \frac{|\text{文献[8]与文献[14]结果平均值} - \text{本文结果}|}{\text{文献[8]与文献[14]结果平均值}}.$$

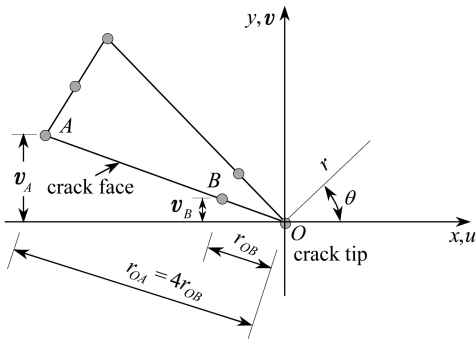


图 4 裂尖坐标系统和 1/4 节点奇异单元

Fig. 4 The crack tip coordinate system and the singular element with quarter points

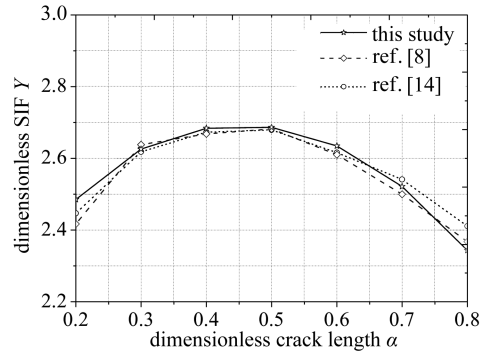


图 5 本文数值标定结果与文献[8,14]结果对比

Fig. 5 Comparison between numerical calibration results in this study and references [8,14]

## 2 HCFBD 和 HCBFBD 试样的无量纲应力强度因子

考虑到荷载和几何模型的对称性，用有限元软件 ANSYS 建立 2 维 1/4 模型（如图 6）。采用 Plane82 单元划分网格，裂尖采用 1/4 节点完全映射划分，共 3 660 个单元，11 227 个节点。内外半径比  $\gamma = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3$ ，平台角  $2\beta = 0^\circ, 7^\circ, 14^\circ, 20^\circ$ ，无量纲裂纹长度  $\alpha = 0.025 \sim 0.975$  时，进行了 HCFBD 的无量纲应力强度因子  $Y$  的标定（其中  $2\beta = 0^\circ$  时为 HCBFBD 试样）。

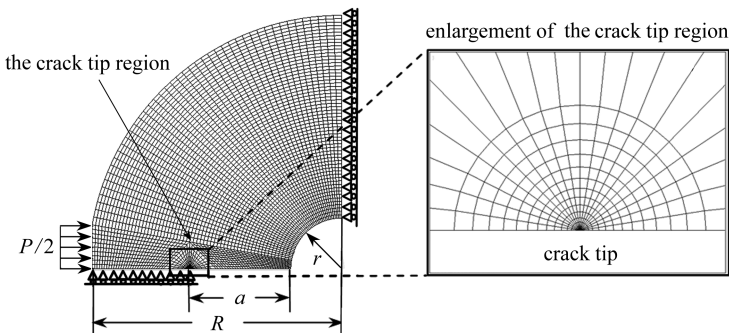


图 6 HCFBD 有限元网格划分

Fig. 6 The finite element mesh for HCFBD

有限元标定结果如下，4 种不同平台角  $2\beta$  下不同无量纲裂纹长度  $\alpha$ 、内外半径比  $\gamma$  所对应的无量纲应力强度因子  $Y$ ，见表 1~4。 $Y$  随  $\alpha, 2\beta$  的变化曲线如图 7、图 8。

表 1 HCB D 无量纲应力强度因子  $Y$  ( $2\beta = 0^\circ$ )Table 1 Dimensionless SIF of HCB D ( $2\beta = 0^\circ$ )

dimensionless crack length $\alpha$	inner-radius-to-outer-radius ratio $\gamma$				
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
0.025	0.358	0.442	0.520	0.603	0.697
0.038	0.364	0.470	0.570	0.676	0.794
0.050	0.363	0.482	0.598	0.721	0.858
0.075	0.358	0.487	0.623	0.771	0.937
0.100	0.357	0.488	0.633	0.796	0.983
0.150	0.371	0.495	0.646	0.825	1.038
0.200	0.397	0.514	0.665	0.852	1.080
0.250	0.430	0.543	0.693	0.883	1.122
0.300	0.470	0.580	0.729	0.922	1.169
0.350	0.514	0.623	0.772	0.969	1.222
0.400	0.562	0.672	0.822	1.021	1.281
0.450	0.616	0.726	0.878	1.080	1.346
0.500	0.675	0.787	0.940	1.146	1.417
0.550	0.741	0.854	1.009	1.217	1.493
0.600	0.815	0.929	1.086	1.296	1.576
0.650	0.899	1.019	1.171	1.383	1.664
0.700	0.997	1.112	1.269	1.479	1.760
0.750	1.113	1.227	1.383	1.591	1.868
0.800	1.259	1.371	1.523	1.726	1.995
0.850	1.455	1.565	1.711	1.905	2.161
0.875	1.587	1.695	1.838	2.026	2.273
0.900	1.759	1.866	2.005	2.186	2.423
0.920	1.946	2.052	2.189	2.364	2.591
0.940	2.214	2.321	2.455	2.626	2.843
0.950	2.403	2.511	2.645	2.814	3.027
0.960	2.657	2.768	2.904	3.072	3.282
0.975	3.290	3.410	3.554	3.728	3.938

表 2 HCFBD 无量纲应力强度因子  $Y$  ( $2\beta = 7^\circ$ )Table 2 Dimensionless SIF of HCFBD ( $2\beta = 7^\circ$ )

dimensionless crack length $\alpha$	inner-radius-to-outer-radius ratio $\gamma$				
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
0.025	0.356	0.441	0.518	0.601	0.694
0.038	0.363	0.469	0.569	0.673	0.791
0.050	0.362	0.480	0.596	0.718	0.855
0.075	0.357	0.486	0.621	0.768	0.933
0.100	0.356	0.486	0.630	0.793	0.979
0.150	0.369	0.493	0.643	0.822	1.034
0.200	0.395	0.512	0.662	0.848	1.075
0.250	0.428	0.540	0.689	0.879	1.116
0.300	0.462	0.577	0.725	0.917	1.162
0.350	0.511	0.619	0.767	0.962	1.214
0.400	0.559	0.667	0.815	1.013	1.271
0.450	0.613	0.720	0.870	1.071	1.334
0.500	0.672	0.779	0.931	1.133	1.402
0.550	0.736	0.845	0.997	1.202	1.473
0.600	0.809	0.916	1.069	1.275	1.550
0.650	0.890	0.996	1.148	1.354	1.629
0.700	0.981	1.085	1.235	1.438	1.709
0.750	1.086	1.185	1.330	1.527	1.791
0.800	1.222	1.304	1.437	1.620	1.868
0.850	1.349	1.423	1.541	1.704	1.925
0.875	1.414	1.479	1.585	1.733	1.932
0.900	1.468	1.520	1.609	1.735	1.906
0.920	1.463	1.515	1.591	1.695	1.838
0.940	1.429	1.461	1.513	1.589	1.699
0.950	1.394	1.403	1.439	1.498	1.590
0.960	1.281	1.293	1.320	1.367	1.442
0.975	1.055	1.046	1.055	1.083	1.134

通过表 1~4 和图 7、图 8 可以看出,内外半径比  $\gamma = 0.1$  时,在  $\alpha \leq 0.1$  的局部范围内,无量纲应力强度因子  $Y$  随着无量纲裂纹长度  $\alpha$  增加先增加后减小; $\alpha > 0.1$ ,平台角  $2\beta = 0^\circ$  时, $Y$  随着  $\alpha$  增加, $2\beta > 0^\circ$  时, $Y$  随着  $\alpha$  增加先增加后减小。 $\gamma > 0.1$  时,在其它条件相同的情况下, $Y$  随着  $\alpha$  增加整体呈现先增加后减小的趋势。

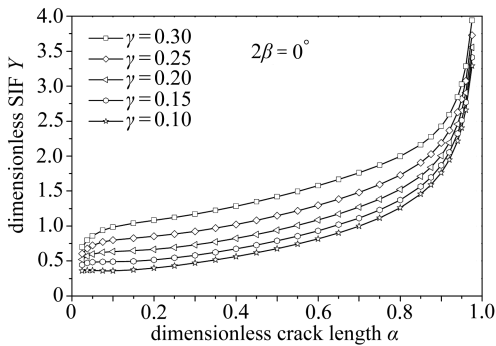
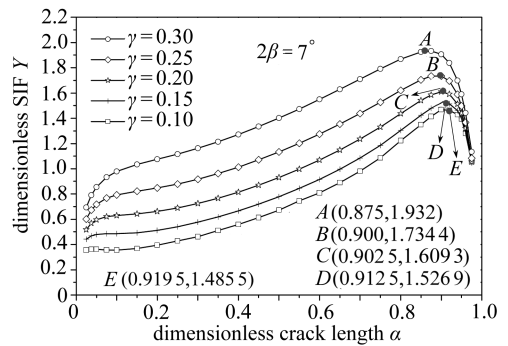
除  $2\beta = 0^\circ$  外, $Y$ - $\alpha$  曲线中出现最大无量纲应力强度因子  $Y_{\max}$  (见表 5),对应临界裂纹长度  $\alpha_c$ ; 相同  $\alpha$  下, $Y$  随  $\gamma$  的增加而增加;随  $2\beta$  的增加而减小。其它条件不变的情况下,内外半径比  $\gamma$  在 0.15 ~ 0.3 之间时,无量纲应力强度因子最大值  $Y_{\max}$  比较明显且较易获得,便于标定其最大值。根据式 (3) 可求出相应的断裂韧度。为了便于应用,通过非线性拟合得到无量纲应力强度因子  $Y$  的函数表达式(见表 6)。

表3 HCFBD 无量纲应力强度因子  $Y$  ( $2\beta = 14^\circ$ )Table 3 Dimensionless SIFs of HCFBD ( $2\beta = 14^\circ$ )

dimensionless crack length $\alpha$	inner-radius-to-outer-radius ratio $\gamma$				
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
0.025	0.353	0.437	0.513	0.594	0.687
0.038	0.359	0.464	0.563	0.666	0.782
0.050	0.358	0.475	0.590	0.711	0.845
0.075	0.352	0.480	0.614	0.759	0.923
0.100	0.352	0.480	0.623	0.784	0.968
0.150	0.364	0.486	0.635	0.812	1.021
0.200	0.389	0.504	0.652	0.836	1.060
0.250	0.421	0.531	0.678	0.865	1.099
0.300	0.459	0.566	0.712	0.901	1.142
0.350	0.500	0.606	0.751	0.943	1.190
0.400	0.546	0.651	0.797	0.990	1.242
0.450	0.596	0.701	0.847	1.042	1.298
0.500	0.650	0.754	0.901	1.097	1.357
0.550	0.708	0.812	0.958	1.155	1.418
0.600	0.771	0.873	1.018	1.214	1.477
0.650	0.838	0.937	1.079	1.272	1.531
0.700	0.908	1.002	1.138	1.325	1.576
0.750	0.977	1.063	1.190	1.365	1.602
0.800	1.035	1.108	1.220	1.377	1.591
0.850	1.059	1.114	1.204	1.333	1.512
0.875	1.043	1.086	1.162	1.274	1.431
0.900	0.994	1.025	1.085	1.177	1.311
0.920	0.908	0.937	0.987	1.064	1.178
0.940	0.795	0.815	0.852	0.913	1.005
0.950	0.729	0.739	0.768	0.819	0.898
0.960	0.630	0.642	0.668	0.712	0.779
0.975	0.458	0.463	0.479	0.505	0.549

表4 HCFBD 无量纲应力强度因子  $Y$  ( $2\beta = 20^\circ$ )Table 4 Dimensionless SIFs of HCFBD ( $2\beta = 20^\circ$ )

dimensionless crack length $\alpha$	inner-radius-to-outer-radius ratio $\gamma$				
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
0.025	0.348	0.431	0.506	0.586	0.677
0.038	0.354	0.458	0.555	0.657	0.770
0.050	0.353	0.469	0.582	0.700	0.833
0.075	0.347	0.473	0.605	0.748	0.909
0.100	0.346	0.472	0.614	0.772	0.953
0.150	0.357	0.477	0.624	0.798	1.004
0.200	0.381	0.494	0.640	0.820	1.040
0.250	0.411	0.519	0.663	0.847	1.076
0.300	0.447	0.551	0.694	0.879	1.115
0.350	0.486	0.589	0.730	0.917	1.158
0.400	0.528	0.630	0.771	0.959	1.205
0.450	0.573	0.674	0.815	1.004	1.253
0.500	0.621	0.721	0.861	1.050	1.301
0.550	0.672	0.769	0.908	1.096	1.347
0.600	0.723	0.818	0.954	1.139	1.388
0.650	0.774	0.864	0.995	1.174	1.417
0.700	0.820	0.903	1.026	1.196	1.428
0.750	0.855	0.928	1.039	1.195	1.409
0.800	0.866	0.924	1.018	1.154	1.343
0.850	0.824	0.868	0.942	1.052	1.209
0.875	0.777	0.811	0.874	0.970	1.108
0.900	0.703	0.729	0.780	0.860	0.977
0.920	0.615	0.639	0.683	0.750	0.848
0.940	0.511	0.529	0.561	0.614	0.690
0.950	0.452	0.461	0.486	0.528	0.590
0.960	0.375	0.384	0.403	0.435	0.482
0.975	0.217	0.227	0.235	0.249	0.255

(a)  $2\beta = 0^\circ$ (b)  $2\beta = 7^\circ$



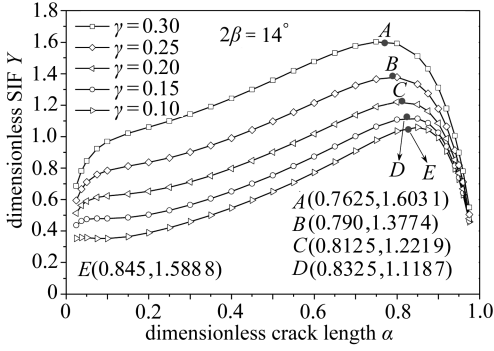
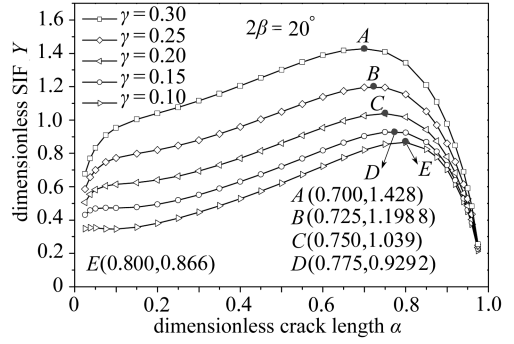
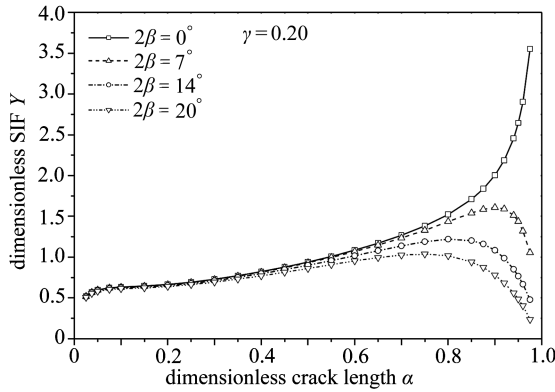
(c)  $2\beta = 14^\circ$ (d)  $2\beta = 20^\circ$ 

图7 HCFBD 和 HCBF 的无量纲应力强度因子

Fig. 7 Dimensionless SIFs of HCFBD and HCBF

图8 当  $\gamma = 0.2$  时,不同平台角下 HCFBD 和 HCBF 的无量纲应力强度因子Fig. 8 Dimensionless SIFs of HCFBD and HCBF with different flattened angles when  $\gamma = 0.2$ 表5 HCFBD 不同  $\gamma, 2\beta$  下的  $Y_{\max}$ Table 5  $Y_{\max}$  of HCFBD with different values of  $\gamma, 2\beta$ 

flattened angle $2\beta/(\circ)$	inner-radius-to-outer-radius ratio $\gamma$				
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
7	1.485 5	1.526 9	1.609 3	1.734 4	1.932 0
14	1.588 8	1.118 7	1.221 9	1.377 4	1.603 1
20	0.866 0	0.929 2	1.039 0	1.198 8	1.428 0

表6 HCFBD 无量纲应力强度因子  $Y$  的拟合公式

Table 6 Curve-fitting formulas of dimensionless SIF for HCFBD

$$Y(\alpha) = k_1 \cdot e^{(k_2 \cdot \alpha)} + k_3 \cdot \alpha^{k_4} + k_5 \cdot \alpha^3 \quad (0.30 \leq \alpha \leq 0.95)$$

$2\beta/(\circ)$	$\gamma$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$
0	0.10	0.206 3	3.182 6	2.068 4	29.391 3	-2.681 8
	0.15	0.435 6	0.823 8	2.045 3	21.088 4	0.999 0
	0.20	0.572 1	0.701 3	2.076 9	21.886 3	0.988 9
	0.25	0.735 3	0.677 8	2.119 1	22.970 3	0.880 7
	0.30	0.926 1	0.730 8	2.150 7	24.258 3	0.638 3

续表 6

$$Y(\alpha) = k_1 \cdot e^{(k_2 \cdot \alpha)} + k_3 \cdot \alpha^{k_4} + k_5 \cdot \alpha^3 \quad (0.30 \leq \alpha \leq 0.95)$$

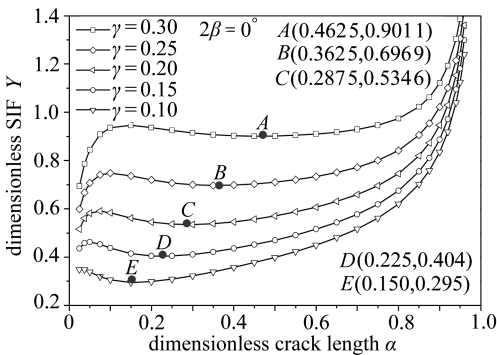
$2\beta/(\circ)$	$\gamma$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$
7	0.10	0.208 3	3.071 1	-1.420 7	22.619 5	-2.350 6
	0.15	0.419 1	0.962 1	-1.797 9	34.023 7	0.780 4
	0.20	0.532 9	0.949 2	-1.831 4	30.849 2	0.584 7
	0.25	0.680 8	0.946 0	-1.855 6	27.010 5	0.338 6
	0.30	0.863 7	0.973 4	-1.910 2	23.151 8	-0.003 6
14	0.10	0.269 8	1.784 2	-1.486 2	15.131 4	-0.072 8
	0.15	0.369 2	1.405 0	-1.508 4	14.241 6	0.070 8
	0.20	0.502 1	1.137 5	-1.593 1	13.176 4	0.114 5
	0.25	0.670 7	0.965 7	-1.732 2	12.055 1	0.086 7
	0.30	0.868 3	0.912 1	-1.920 1	11.096 3	-0.091 7
20	0.10	0.270 3	1.695 5	-1.413 0	10.111 6	-0.074 4
	0.15	0.370 5	1.311 7	-1.448 8	9.613 5	0.067 2
	0.20	0.507 8	1.013 3	-1.564 2	8.993 8	0.168 2
	0.25	-0.002 4	6.952 2	1.072 3	0.185 9	1.489 2
	0.30	-0.005 1	6.406 7	1.378 2	0.186 0	1.721 5

表 6 中 HCFBD 无量纲应力强度因子  $Y$  的拟合公式, HCFBD 拟合公式计算结果与数值标定结果的最大相对误差 (相对误差 = (数值标定结果 - 拟合结果) / 数值标定结果) 在  $\pm 1.39\%$  以内, HCFBD 拟合公式计算结果与数值标定结果的最大相对误差在  $\pm 0.91\%$  以内。

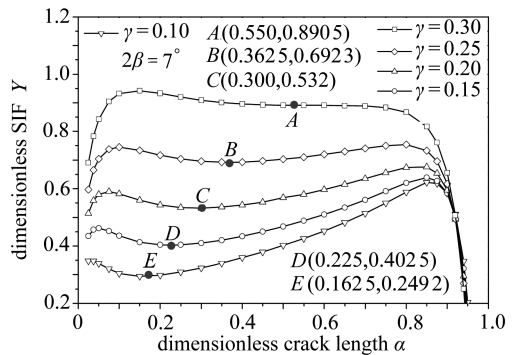
### 3 HSCFBD 和 HSCBD 试样的无量纲应力强度因子

当圆孔平台圆盘只有单边裂纹时, 就变成了圆孔内单边裂纹平台巴西圆盘 HSCFBD 和圆孔单边裂纹巴西圆盘 HSCBD ( $2\beta = 0^\circ$ )。同样用 ANSYS 对 HSCFBD 和 HSCBD 无量纲应力强度因子  $Y$  进行数值标定, 考虑到荷载的对称性, 建立 2 维 1/2 模型, 采用 Plane82 单元划分网格, 裂尖采用 1/4 节点完全映射划分, 共 8 360 个单元, 25 457 个节点, 内外半径比  $\gamma = 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$ 。平台角  $2\beta = 0^\circ, 7^\circ, 14^\circ, 20^\circ$ , 无量纲裂纹长度  $\alpha = 0.25 \sim 0.96$ 。

有限元标定结果如下表 7~10。无量纲应力强度因子  $Y$  随  $\alpha$  的变化曲线见图 9、图 10。



(a)  $2\beta = 0^\circ$



(b)  $2\beta = 7^\circ$



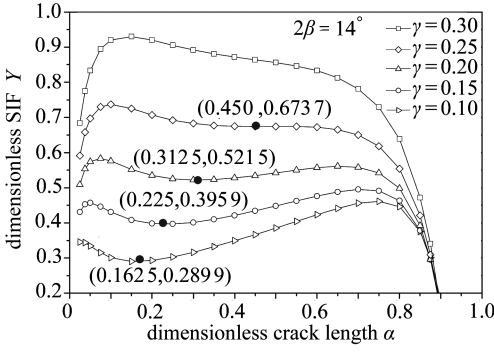
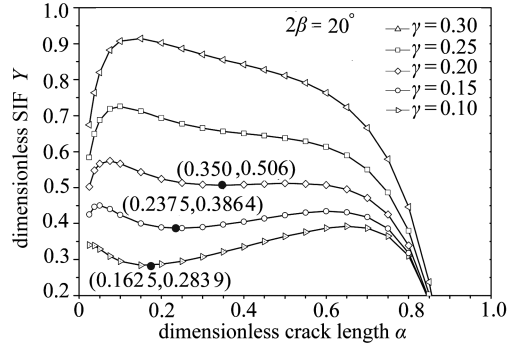
(c)  $2\beta = 14^\circ$ (d)  $2\beta = 20^\circ$ 

图9 HSCBD 和 HSCFBD 的无量纲应力强度因子

Fig. 9 Dimensionless SIFs of HSCBD and HSCFBD

表7 HSCBD 无量纲应力强度因子  $Y(2\beta = 0^\circ)$ Table 7 Dimensionless SIFs of HSCBD ( $2\beta = 0^\circ$ )

dimensionless crack length $\alpha$	inner-radius-to-outer-radius ratio $\gamma$				
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
0.025	0.349	0.436	0.516	0.599	0.694
0.038	0.348	0.459	0.561	0.667	0.786
0.050	0.339	0.463	0.582	0.707	0.845
0.075	0.319	0.453	0.591	0.741	0.909
0.100	0.306	0.438	0.584	0.748	0.936
0.150	0.295	0.415	0.562	0.737	0.946
0.200	0.299	0.405	0.545	0.720	0.937
0.250	0.309	0.405	0.537	0.707	0.925
0.300	0.323	0.411	0.535	0.700	0.915
0.350	0.339	0.422	0.539	0.697	0.907
0.400	0.358	0.436	0.546	0.699	0.903
0.450	0.378	0.452	0.557	0.703	0.901
0.500	0.399	0.470	0.571	0.711	0.902
0.550	0.423	0.491	0.588	0.721	0.905
0.600	0.450	0.516	0.607	0.734	0.910
0.650	0.481	0.544	0.631	0.751	0.917
0.700	0.517	0.577	0.659	0.772	0.929
0.750	0.562	0.619	0.696	0.801	0.946
0.800	0.620	0.675	0.746	0.842	0.974
0.850	0.702	0.755	0.820	0.906	1.023
0.875	0.759	0.811	0.873	0.954	1.062
0.900	0.835	0.887	0.947	1.022	1.121
0.920	0.919	0.972	1.030	1.101	1.193
0.940	1.040	1.095	1.153	1.215	1.304
0.950	1.125	1.182	1.241	1.306	1.387
0.960	1.239	1.300	1.360	1.426	1.503

表8 HSCFBD 无量纲应力强度因子  $Y(2\beta = 7^\circ)$ Table 8 Dimensionless SIFs of HSCFBD ( $2\beta = 7^\circ$ )

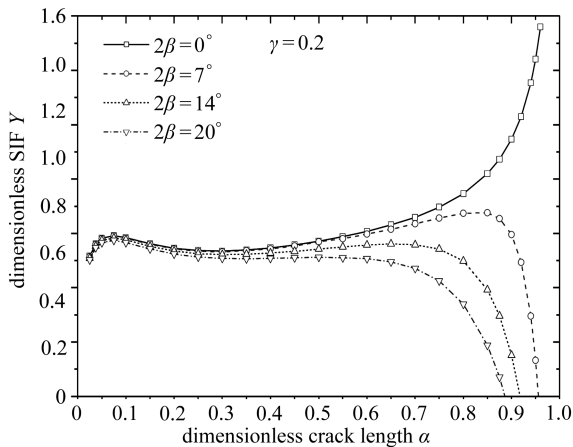
dimensionless crack length $\alpha$	inner-radius-to-outer-radius ratio $\gamma$				
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
0.025	0.348	0.435	0.514	0.597	0.691
0.038	0.347	0.457	0.559	0.665	0.784
0.050	0.339	0.462	0.580	0.704	0.842
0.075	0.320	0.452	0.590	0.738	0.905
0.100	0.304	0.436	0.582	0.745	0.932
0.150	0.294	0.413	0.560	0.734	0.942
0.200	0.298	0.404	0.543	0.717	0.933
0.250	0.309	0.404	0.534	0.704	0.920
0.300	0.323	0.410	0.532	0.696	0.909
0.350	0.340	0.420	0.536	0.693	0.901
0.400	0.359	0.434	0.543	0.693	0.896
0.450	0.379	0.450	0.553	0.697	0.893
0.500	0.402	0.468	0.569	0.703	0.891
0.550	0.426	0.488	0.580	0.710	0.891
0.600	0.452	0.510	0.597	0.720	0.891
0.650	0.482	0.534	0.615	0.730	0.890
0.700	0.514	0.561	0.635	0.741	0.889
0.750	0.550	0.591	0.656	0.750	0.883
0.800	0.588	0.620	0.674	0.754	0.867
0.850	0.622	0.639	0.676	0.733	0.817
0.875	0.618	0.627	0.654	0.696	0.761
0.900	0.584	0.584	0.595	0.617	0.656
0.920	0.511	0.499	0.493	0.494	0.507
0.940	0.347	0.321	0.295	0.269	0.250
0.950	0.203	0.170	0.132	0.091	0.054
0.960					

表 9 HSCFBD 无量纲应力强度因子  $Y(2\beta = 14^\circ)$ Table 9 Dimensionless SIFs of HSCFBD ( $2\beta = 14^\circ$ )

dimensionless crack length $\alpha$	inner-radius-to-outer-radius ratio $\gamma$				
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
0.025	0.345	0.431	0.509	0.591	0.684
0.038	0.343	0.453	0.553	0.658	0.775
0.050	0.334	0.457	0.574	0.697	0.833
0.075	0.315	0.446	0.583	0.730	0.895
0.100	0.301	0.431	0.576	0.737	0.920
0.150	0.290	0.408	0.552	0.725	0.930
0.200	0.293	0.398	0.535	0.707	0.920
0.250	0.303	0.397	0.525	0.692	0.905
0.300	0.316	0.401	0.522	0.683	0.892
0.350	0.332	0.410	0.523	0.677	0.881
0.400	0.349	0.421	0.528	0.675	0.872
0.450	0.366	0.434	0.534	0.674	0.864
0.500	0.385	0.448	0.542	0.674	0.856
0.550	0.404	0.462	0.550	0.674	0.846
0.600	0.423	0.476	0.557	0.672	0.833
0.650	0.441	0.488	0.561	0.665	0.813
0.700	0.456	0.495	0.558	0.650	0.781
0.750	0.461	0.491	0.542	0.618	0.729
0.800	0.446	0.463	0.498	0.554	0.638
0.850	0.375	0.378	0.392	0.421	0.472
0.875	0.301	0.295	0.296	0.309	0.340
0.900	0.180	0.164	0.151	0.145	0.153
0.920	0.029	0.005			

表 10 HSCFBD 无量纲应力强度因子  $Y(2\beta = 20^\circ)$ Table 10 Dimensionless SIFs of HSCFBD ( $2\beta = 20^\circ$ )

dimensionless crack length $\alpha$	inner-radius-to-outer-radius ratio $\gamma$				
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
0.025	0.340	0.425	0.502	0.583	0.674
0.038	0.339	0.446	0.547	0.649	0.763
0.050	0.329	0.450	0.566	0.687	0.820
0.075	0.309	0.440	0.574	0.719	0.882
0.100	0.295	0.424	0.566	0.725	0.907
0.150	0.284	0.400	0.543	0.712	0.914
0.200	0.287	0.389	0.524	0.693	0.902
0.250	0.295	0.387	0.513	0.677	0.886
0.300	0.307	0.390	0.508	0.665	0.870
0.350	0.321	0.397	0.506	0.656	0.855
0.400	0.335	0.405	0.508	0.650	0.842
0.450	0.350	0.414	0.510	0.644	0.827
0.500	0.364	0.423	0.512	0.637	0.811
0.550	0.376	0.430	0.510	0.628	0.791
0.600	0.387	0.434	0.507	0.613	0.763
0.650	0.392	0.431	0.495	0.589	0.723
0.700	0.387	0.418	0.471	0.550	0.666
0.750	0.365	0.386	0.425	0.486	0.579
0.800	0.310	0.318	0.339	0.380	0.446
0.850	0.189	0.184	0.188	0.203	0.237
0.875	0.091	0.079	0.071	0.072	0.088
0.900					
0.920					

图 10 当  $\gamma = 0.2$  时,不同平台角下 HSCFBD 和 HSCBD 的无量纲应力强度因子Fig. 10 Dimensionless SIFs of HSCFBD and HSCBD with different flattened angles when  $\gamma = 0.2$ 

通过表 7~10 和图 9、10 可以看出:无量纲应力强度因子  $Y$  随内外半径比  $\gamma$  增加而增加;

相同无量纲裂纹长度  $\alpha$  下,无量纲应力强度因子  $Y$  随平台角  $2\beta$  增加减小。 $2\beta$ ,  $\gamma$  越大,  $Y$ - $\alpha$  曲线下降越快。在  $\alpha \leq 0.15$  时,出现局部最大值  $Y_{\max}$ 。在  $\gamma \leq 0.2$  时,在  $0.15 \leq \alpha \leq 0.35$  期间出现局部最小值  $Y_{\min}$  (对应于临界裂纹长度  $\alpha_c$ ,  $\gamma$  越大,  $\alpha_c$  越大)。 $Y_{\max}$  对应的临界裂纹长度  $\alpha_c$  过小 ( $\alpha_c \leq 0.15$ ), 预制裂纹长度  $\alpha_0$  很可能超过  $\alpha_c$ , 所以宜选用局部最小值  $Y_{\min}$  求断裂韧度, 可以用最大载荷  $P_{\max}$  结合  $Y_{\min}$  一起代入式(5) 计算  $K_{IC}$ , 即

$$K_{IC} = \frac{P_{\max}}{\sqrt{RB}} \cdot Y_{\min} \quad (5)$$

表 11 HSCFBD 不同  $\gamma$ ,  $2\beta$  下的  $Y_{\min}$ Table 11  $Y_{\min}$  of HSCFBD with different values of  $\gamma$ ,  $2\beta$ 

flatten angle $2\beta/(\circ)$	inner-radius-to-outer-radius ratio $\gamma$				
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
0	0.295 0	0.404 0	0.534 6	0.696 9	0.901 1
7	0.249 2	0.402 5	0.532 0	0.692 3	0.890 5
14	0.289 9	0.395 9	0.521 5	0.673 7	
20	0.283 9	0.386 4	0.506 0		

表 12 HSCFBD 无量纲应力强度因子  $Y$  的拟合公式

Table 12 Curve-fitting formulas of dimensionless SIF for HSCFBD

		$Y(\alpha) = \frac{k_1 \cdot \alpha^{k_2} + k_3 \cdot \alpha^2}{k_4 \cdot \alpha^{k_5} + \alpha^3} \quad (0.10 \leq \alpha \leq 0.75)$				
$2\beta/(\circ)$	$\gamma$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$
0	0.10	0.448 8	3.418 3	0.013 5	-0.549 2	5.610 1
	0.15	0.196 0	2.818 4	0.006 5	-0.787 8	3.660 3
	0.20	0	-0.803 1	-0.304 3	-1.312 1	2.344 4
	0.25	0.456 9	2.627 3	-0.036 2	-0.586 6	4.127 0
	0.30	0.769 1	2.780 7	-0.034 2	-0.317 6	4.952 4
7	0.10	-0.054 0	0.831 2	-0.733 3	-1.970 8	1.584 5
	0.15	-1.167 7	0.569 0	-2.162 1	-5.291 7	0.835 7
	0.20	0.706 3	3.803 6	0.191 4	0.176 4	1.852 2
	0.25	0.696 4	3.519 7	0.163 4	0.059 2	1.603 0
	0.30	0.847 5	3.062 7	0.043 3	0.001 6	0.813 8
14	0.10	0.177 0	-0.031 2	0.763 8	0.927 3	0.148 8
	0.15	0.201 9	6.896 8	-0.184 7	-1.127 5	2.329 2
	0.20	0.073 4	-2.315 1	0.454 1	0.164 1	-2.205 8
	0.25	0.031 1	-5.629 7	0.455 1	0.049 5	-5.558 4
	0.30	0.812 3	2.860 4	-0.019 9	3.674 8	14.771 6
20	0.10	0.471 0	3.493 3	0.014 5	6.484 0	15.591 9
	0.15	0.279 7	6.781 4	-0.181 1	-1.140 9	2.335 5
	0.20	1.707 6	10.261 0	-0.698 4	-2.145 1	2.207 9
	0.25	0.598 9	2.893 6	-0.003 8	6.489 2	14.173 7
	0.30	0.763 8	2.800 2	-0.030 3	4.759 5	12.327 4

通过非线性拟合得到无量纲应力强度因子  $Y$  的函数表达式(表 12)。表 12 中 HSCFBD 无量纲应力强度因子  $Y$  的拟合公式计算结果, 与数值标定结果的相对误差绝对值在 0.87% 之内。

## 4 HCFBD 试验

为了验证圆孔内(双边)裂纹平台巴西圆盘 HCFBD 试样测试岩石断裂韧度的可行性和数值分析的有效性,用砂岩制作了若干 HCFBD 试样进行了初步实验,并与 ISRM 建议的人字形切槽巴西圆盘 CCNBD 进行对比实验。

试样采用四川雅安的青砂岩岩芯制作而成,其颗粒细致紧密,分布均匀,强度较高.HCFBD 和 CCNBD 试样构型尺寸和初始裂纹长度分别见表 13、14.实验在四川大学基础力学实验室的深圳 REGER 全数字化微机控制双立柱电子万能试验机上进行(型号 RGM-4300,最大测量量程 300 kN,试验机准确度等级为 0.5 级,即精确度为示值的 1%(±0.5%)以内,试验速度调节范围为 0.001~500 mm/min 无级调速),载荷传感器为拉压式传感器,选用 20 kN 量程.实验采用 0.1 mm/min 的位移加载速率进行控制,直接对 HCFBD 和 CCNBD 试样进行径向压缩加载,如图 11 所示。



图 11 HCFBD 试样的加载

Fig. 11 Loading system for HCFBD specimen

表 13 用 HCFBD 试样测得砂岩断裂韧度

Table 13 Fracture toughness of sandstone tested with HCFBD specimens

No.	external radius $R/\text{mm}$	thickness $t/\text{mm}$	flattened angle $2\beta/(\circ)$	initial dimensionless crack length $\alpha_0$	critical load $P_{\min}/\text{kN}$	critical dimensionless $\text{SIF } Y_{\max}$	fracture toughness $K_{\text{IC}}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	average fracture toughness $\bar{K}_{\text{IC}}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
HCFBD(15)	75	50	20	0.1	0.866	12.845	0.812	
HCFBD(30)	75	50	20	0.2	1.039	11.458	0.869	0.765
HCFBD(45)	75	50	20	0.3	1.428	5.890	0.614	

通过 RGM-4300 试验机获得 HCFBD 和 CCNBD 试样的荷载-位移曲线.和数值标定结果一起通过式(3)求出相应 HCFBD 的断裂韧度  $K_{\text{IC}}$  (如表 13).CCNBD 试样厚度  $B = 51.2 \text{ mm}$ , 半径  $R = 75.3 \pm 0.2 \text{ mm}$ , 最大切槽长度  $a_1 = 46.3 \pm 0.5 \text{ mm}$ , 初始切槽长度  $a_0 = 24.5 \pm 0.5 \text{ mm}$ ; 无量纲参数  $\alpha_B = B/R$ ,  $\alpha_1 = a_1/R$ ,  $\alpha_0 = a_0/R$  符合 ISRM 试样制备几何要求.CCNBD 断裂韧度计算公式<sup>[17]</sup>与公式(3)相同,其中的临界应力强度因子根据  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_B$  从文献[15]中查表插值得,临界载荷值  $P_{\max}$  直接从实验记录的荷载-位移曲线中读出.HCFBD 测得的砂岩断裂韧度均值为  $0.765 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , 略高于 CCNBD 测得的砂岩断裂韧度均值  $0.666 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .这是由于试样构型不同引起的差异,而 CCNBD 试样测得不同岩石的 I 型断裂韧度值一般比其它建议测试方法偏

低<sup>[18]</sup>.这次试验仅是初步尝试性,以后会进行更加深入全面的试验研究工作.

表 14 用 CCNBD 试样测得砂岩断裂韧度

Table 14 Fracture toughness of sandstone tested with CCNBD specimens

No.	dimensionless thickness $\alpha_B$	dimensionless crack length $\alpha_0$	dimensionless maximum crack length $\alpha_1$	critical load $P_{\min} / \text{kN}$	critical dimensionless SIF $Y_{\max}$	fracture toughness $K_{\text{IC}} / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	average fracture toughness $\bar{K}_{\text{IC}} / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
CCNBD-1	0.68	0.301 3	0.621 6	10.45	0.930 8	0.692	
CCNBD-2	0.68	0.342 9	0.618 1	9.50	0.939 8	0.636	0.666
CCNBD-3	0.68	0.371 6	0.625 4	9.79	0.961 8	0.670	

## 5 结 论

1) 对圆孔内(双边)裂纹平台巴西圆盘(HCFBD)和圆孔内单边裂纹平台巴西圆盘(HSCFBD)的无量纲应力强度因子  $Y$ ,进行了试样宽范围几何参数的全面系统的标定.对有限元标定的数值计算结果进行了非线性拟合,给出了  $Y$  的拟合公式,拟合公式与数值标定结果相对误差小于  $\pm 1.39\%$ ,方便其他学者进行类似试样的研究.根据数值分析结果,无量纲应力强度因子  $Y$  随内外半径比  $\gamma$  增加而增加,随平台角  $2\beta$  增加而减小.为了保证扩展的稳定性,宜选用内外半径比较小,平台角较大的试样.

2) HCFBD 测试 I 型岩石断裂韧度.其无量纲应力强度因子随着裂纹长度的增长先增加后减小,出现局部最大无量纲应力强度因子  $Y_{\max}$ , 对应于载荷-位移曲线中的载荷的局部最小值  $P_{\min}$ , 可根据相应的式(3) 求出材料断裂韧度.当  $\gamma$  较大时,  $Y_{\max}$  对应的临界裂纹长度  $\alpha_c$  较小.综合考虑,选用  $2\beta = 20^\circ$ ,  $\gamma = 0.2$  的 HCFBD 测试 I 型岩石断裂韧度最合适.

3) HSCFBD 测试 I 型岩石断裂韧度时,为了让临界裂纹长度  $\alpha_c$  比较居中,宜选用内外半径比  $\gamma = 0.2$  的试样.在  $\alpha = 0.3$  处出现局部最小无量纲应力强度因子  $Y_{\min}$ , 对应载荷-位移曲线中的载荷局部极大值  $P_{\max}$ , 根据式(5) 求出材料的断裂韧度.平台角  $2\beta$  较小时,  $\alpha_c$  比较居中,便于求出断裂韧度.因此宜选用平台角比较小的试样.HSCFBD 与 HCFBD 相比,  $Y$  随  $\alpha$  变化相对比较平缓.

4) 进行了 HCFBD 的初步试验,并与 ISRM 建议的 CCNBD 做了对比试验.HCFBD 测得的砂岩断裂韧度均值  $0.765 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,略高于 CCNBD 测得的砂岩断裂韧度均值  $0.666 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

## 参考文献(References):

- [1] 于晓中. 岩石和混凝土断裂力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991. (YU Xiao-zhong. *Rock and Concrete Fracture Mechanics* [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1991. (in Chinese))
- [2] American Society for Testing and Materials Standard E399-12. Standard test method for linear-elastic plane-strain fracture toughness  $K_{\text{IC}}$  of metallic materials[S]. 3.1.2, ASTM International West Conshohocken, PA, USA, 2012.
- [3] Franklin J A, SUN Zong-qi, Atkinson B K, Meredith P C, Rummel F, Mueller W, Nishimatsu Y, Takahashi H, Costin L S, Ingraffea A R, Bobrov G F. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1988, 25(2): 71-96.

- [4] Powell R J. 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 Abstracts*, 1995, **32**(1): 57-64.
- [5] Kuruppu M D, Obara Y, Ayatollahi M R, Chong K P, Funatsu T. ISRM-Suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen[J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2014, **47**(1): 267-274.
- [6] CHEN Mian, ZHANG Guang-qing. Laboratory measurement and interpretation of the fracture toughness of formation rocks at great depth[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, **41**(1/3): 221-231.
- [7] 李银平, 王元汉, 陈龙珠, 余飞, 李亮辉. 含预制裂纹大理岩的压剪试验分析[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 1120-1124. (LI Yin-ping, WANG Yuan-han, CHEN Long-zhu, YU Fei, LI Liang-hui. Experimental research on pre-existing cracks in marble under compression[J]. *Chinese of Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(1): 1120-1124. (in Chinese))
- [8] Ahmad J, Ashbaugh N E. Constant  $K_I$  crack-propagation test specimens[J]. *International Journal of Fracture*, 1982, **19**(2): 115-129.
- [9] Tang T X, Bazant Z P, Yang S C, Zollinger D. Variable-notch one-size test method for fracture energy and process zone length[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1996, **55**(3): 383-404.
- [10] Hobbs D W. The tensile strength of rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1964, **1**(3): 385-396.
- [11] Fischer M P, Elsworth D, Alley R B, Engelder T. Finite element analysis of the modified ring rest for determining mode I fracture toughness[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1996, **33**(1): 1-15.
- [12] 张盛, 王启智. 用五种圆盘试件的劈裂试验确定岩石断裂韧度[J]. 岩土力学, 2009, **30**(1): 12-18. (ZHANG Sheng, WANG Qi-zhi. Determination of rock fracture toughness by split test using five types of disc specimens[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(1): 12-18. (in Chinese))
- [13] Kourkoulis S K, Markides Ch F. Stresses and displacements in a circular ring under parabolic diametral compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, **71**: 272-292.
- [14] Chen C H, Chen C S, Wu J H. Fracture toughness analysis on cracked ring disks of anisotropic rock[J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2008, **41**(4): 539-562.
- [15] Aliha M R M, Ayatollahi M R, Pakzad R. Brittle fracture analysis using a ring shape specimen containing two angled cracks[J]. *International Journal of Fracture*, 2008, **153**(1): 63-68.
- [16] 苟小平, 杨井瑞, 王启智. 基于 P-CCNBD 试样的岩石动态断裂韧度测试方法[J]. 岩土力学, 2013, **34**(9): 2450-2466. (GOU Xiao-ping, YANG Jing-rui, WANG Qi-zhi. Test method of rock dynamic fracture toughness based on using P-CCNBD specimen[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(9): 2450-2466. (in Chinese))
- [17] 樊鸿, 张盛, 苟小平, 王启智. 岩石断裂韧度试样 CCNBD 临界应力强度因子的全新数值标定[J]. 应用力学学报, 2011, **28**(4): 416-422. (FAN Hong, ZHANG Sheng, GOU Xiao-ping, WANG Qi-zhi. A completely new numerical calibration of the critical stress intensity factor for the CCNBD specimens used in rock fracture toughness test[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2011, **28**(4): 416-422. (in Chinese))
- [18] 崔振东, 刘大安, 安光明, 周苗. 岩石 I 型断裂韧度测试方法研究进展[J]. 测试技术学报, 2009, **23**(3): 189-196. (CUI Zhen-dong, LIU Da-an, AN Guang-ming, ZHOU Miao. Research progress in mode-I fracture toughness testing methods for rocks[J]. *Journal of Test and*



*Measurement Technology*, 2009, **23**(3): 189-196. (in Chinese)

## Comprehensive Calibration of the Stress Intensity Factor for the Holed Flattened Brazilian Disc With an Inner Single Crack or Double Cracks

ZHOU Yan<sup>1</sup>, ZHANG Cai-gui<sup>1</sup>, YANG Jing-rui<sup>1</sup>, WANG Qi-zhi<sup>1,2</sup>

(1. *Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, Sichuan University, Chengdu 610065, P.R.China;*

2. *State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering (Sichuan University), Chengdu 610065, P.R.China)*

**Abstract:** Previously the circular ring specimen containing an inner single radial crack subjected to diametrically compressive loading had been studied, here it was modified with a pair of parallel flattened facets, which were beneficial to loading, to form a new-type specimen — the holed single cracked flattened Brazilian disc (HSCFBD). In addition, the holed (double) cracked flattened Brazilian disc (HCFBD) was further investigated. The dimensionless stress intensity factors of HSCFBD and HCFBD with different inner-radius-to-outer-radius ratios, different dimensionless crack lengths and different flattened angles, were comprehensively calibrated through finite element simulation, and the curve-fitting formulas of the factor were given. The relative errors between the fitting formulas and the numerical calibration results were within  $\pm 1.39\%$ . The effects of geometric factors on the dimensionless stress intensity factor were also analyzed. The results show that the dimensionless stress intensity factor increases with the inner-radius-to-outer-radius ratio, and decreases with the flattened angle. According to the varying law of the stress intensity factor, the specimen parameters of HSCFBD and HCFBD were recommended for testing the mode-I fracture toughness. The preliminary test of HCFBD specimens was carried out for a sand stone, and the comparative test of CCNBD specimens suggested by the International Society for Rock Mechanics was also conducted.

**Key words:** holed (double) cracked flattened Brazilian disc (HCFBD); holed single cracked flattened Brazilian disc (HSCFBD); dimensionless stress intensity factor; finite element analysis; curve-fitting formula

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China(51179115)