

文章编号:1001-4888(2020)04-0702-10

用两种 ISRM 推荐圆盘试样测试 岩石断裂韧度的试验研究*

赵文峰¹, 张盛^{1,2}, 王猛¹, 神文龙¹, 焦振国³

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南焦作 454000; 2. 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南焦作 454000;
3. 山西省大同煤矿集团公司白洞煤业有限公司, 山西大同 037003)

摘要: 采用国际岩石力学协会推荐的人字型切槽巴西圆盘试样(CCNBD)和中心直裂纹三点弯曲试样(NSCB), 在 RMT-150B 试验机上进行了劈裂加载试验, 结合声发射仪对比分析了不同尺寸试样的载荷一位移曲线、破坏形态和断裂韧度测试值的差异。结果表明:CCNBD 试样的载荷一位移曲线可能出现二次倒拐现象, NSCB 试样的载荷一位移曲线峰后直接跌落; 两种试样破坏过程中的振铃计数和能量与时间的变化过程与载荷一时间曲线完全对应; NSCB 试样测得的大理岩断裂韧度平均值比 CCNBD 试样测试值偏高 4% 左右, 但试样尺寸较大时, 偏高程度更为明显; 两种试样都是劈裂加载破坏形式, CCNBD 试样在端部可能出现偏离加载直径方向的破坏形式, 本研究结果有助于进一步完善和推广 ISRM 测试岩石断裂韧度的建议方法。

关键词: 岩石断裂韧度; 峰值载荷; 人字型切槽巴西圆盘试样(CCNBD); 中心直裂纹三点弯曲试样(NSCB); 声发射

中图分类号: TU455

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-216

0 引言

岩石断裂韧度是描述岩石力学性质的一项重要参数, 用于研究岩石切削、爆破作业、外力致裂等破岩机制问题^[1]。如何准确测试岩石的断裂韧度一直是当前研究的热点问题。国内外研究者先后采用了几十种测试方法来确定岩石的断裂韧度, 这些方法各有优缺点^[2-5], 国际岩石力学学会(ISRM—International Society for Rock Mechanics)于 1995 年提出一种人字型切槽巴西圆盘试样(CCNBD—Cracked Chevron Notched Brazilian Disc), 2014 年又提出一种中心直裂纹三点弯曲圆盘试样(NSCB—Notch Semi-Circular Bend)。相对于其他构型的试样, 这两种建议方法采用圆盘类试样, 体积较小、加载简便。对不同测试方法的结果进行对比研究, 非常有必要^[6,7]。尹祥础^[8]等采用短棒拉伸、直切口三点弯曲梁、紧凑拉伸及带裂纹的厚壁筒试样等四种不同方法测定了花岗岩等四种岩石的静态断裂韧度值, 发现短棒拉伸法测试值最高; 王博楠^[9]等对 V 型切槽三点弯曲圆棒(CB—Chevron Bend)、V 型切槽短圆棒(SR—Short Rod)及人字型切槽巴西圆盘(CCNBD)等测试方法进行对比, 比较了不同试样的尺寸效应和离散程度; 王启智^[10]等对比分析了圆棒三点弯曲试样和短圆棒拉伸试样在测试过程中裂纹扩展的稳定性问题; 徐纪成^[11]等采用圆棒三点弯曲和短棒拉伸测试方法进行岩石断裂韧度试验, 结果发现两种测试方法测得的断裂韧度值存在显著差异。目前国内外对圆盘类试样测试方法之间的对比分析较少, 张

* 收稿日期: 2018-09-27; 修回日期: 2019-01-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 51674101, 51704098); 河南省重点实验室开放基金(S201605)

通讯作者: 张盛(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山岩石力学方面的教学与研究。Email: zsroy2002@163.com

盛^[12]等采用五种不同圆盘构型试样测试大理岩 I 型断裂韧度值, 得出不含切槽的试样测得的断裂韧度值大于含有切槽试样的测试值。但对于 ISRM 提出的两种圆盘试样, 即人字型切槽巴西圆盘试样(CCNBD)与中心直裂纹三点弯曲试样(NSCB)的测试方法, 还缺乏试验对比研究, 有必要从测试原理、测试结果、裂纹扩展规律、尺寸影响等方面对这两种测试方法进行对比研究。

鉴于此, 本文采用不同尺寸的大理岩试样, 分别对 CCNBD 和 NSCB 试样的 I 型断裂韧度值 K_{IC} 进行了测试, 从试样制作、加载曲线、测得的断裂韧度值、试样破坏过程和形态等方面进行对比分析。结果表明, 试样存在一定的尺寸效应, NSCB 试样测试得到的断裂韧度值略高于 CCNBD 试样的测试值。

1 试样制作与测试

1.1 圆盘试样的尺寸选择

岩样选自河南南阳大理岩, 按照 ISRM 建议的方法加工^[13]了三种不同尺寸的 CCNBD 试样, 圆盘直径分别为 65mm、75mm 和 100mm。CCNBD 试样形式如图 1(a)所示, 为了确保测试结果的有效性, ISRM 对 CCNBD 试样的尺寸范围进行限制, $0.4 \leq \alpha_1 \leq 0.8$, $\alpha_1 \geq B/2$, $1.1729 \alpha_1^{1.6666} \leq \alpha_B \leq 0.8$, 以 α_B 的取值范围为 X 轴, 以 α_1 的取值为 Y 轴, 得到 CCNBD 试样的尺寸有效范围如图 1(b)所示, 参数如表 1 所示。图 1 中 R 为圆盘半径; B 为圆盘厚度; α_0 为无量纲初始裂纹长度 ($\alpha_0 = a_0/R$); α_1 为无量纲最大切槽长度 ($\alpha_1 = a_1/R$); α_B 为无量纲试样厚度 ($\alpha_B = B/R$); H 表示正反两面切割圆盘时切入的深度。加工 NSCB 试样时, 参考 ISRM 建议的参数^[14], 选用加工 CCNBD 试样的同块大理岩制作, 试样直径分别为 50mm、75mm 和 100mm, NSCB 试样的参数如表 2 所示, 试样形状如图 2 所示, a 表示裂缝长度, R 表示圆盘半径, B 表示圆盘厚度。

表 1 CCNBD 试样几何尺寸

Tab.1 Geometric dimensions of CCNBD specimens

直径 2R/mm	厚度 B/mm	无量纲 试样厚度 α_B	无量纲初始 裂纹长度 α_0	无量纲最大 切槽长度 α_1	切入深度 H/mm
65	27.3	0.84	0.14	0.78	14
75	31.5	0.84	0.22	0.72	17
100	42	0.84	0.15	0.57	22

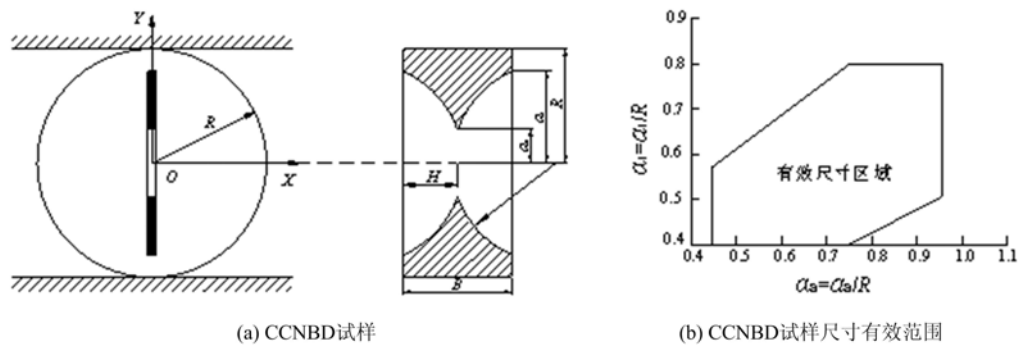


图 1 人字型切槽巴西圆盘试样的有效尺寸范围

Fig.1 Effective size ranges of cracked chevron notched Brazil disk specimen

表 2 NSCB 试样几何尺寸

Tab.2 Geometric dimensions of NSCB specimen

直径 2R/mm	厚度 B/mm	裂缝长度 a/mm
50	30	12.50
75	30	18.75
100	30	25.00

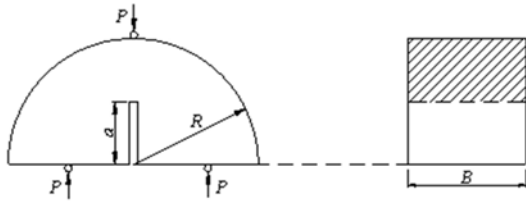


图2 NSCB试样示意图

Fig. 2 Schematic picture of NSCB specimen

度0.35mm的金刚石刀片在高速研磨机上一次切割而成,如图3(b)所示。为保证加工精度,预先计算出不同尺寸试样的裂纹长度,然后以试样圆心为起点,在半圆盘的两个面上画两条一定长度的线,便于加工时调整。两种不同类型的试样都是在高速研磨机上采用不同的金刚石刀片加工,但两者切出的裂缝宽度相同,约为0.7mm左右,裂缝宽度符合国际岩石力学协会(ISRM)对圆盘试样裂缝宽度不得大于1mm的要求。

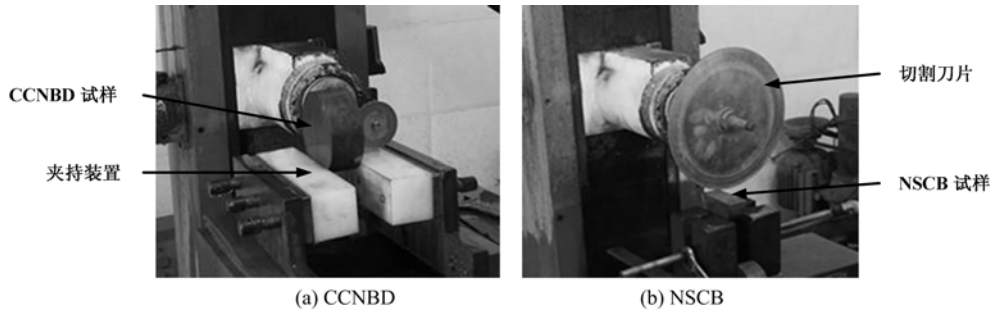


图3 试样加工图

Fig. 3 Specimen processing picture

1.3 圆盘试样的测试设备与方法

在RMT-150B型岩石力学试验系统上进行两种试样的静态加载试验,都采用恒定位移加载,加载速率为0.0002mm/min,较低的位移加载速率有利于裂纹沿预制裂纹面稳定扩展。

CCNBD试样的加载方式为沿平行于人字型切槽方向,在韧带两端施加集中载荷,采用试验机配套的软件自动采集试样各个时刻的载荷、位移等数据,以声发射软件测试试样破坏过程。NSCB试样采用同样的试验机进行三点弯曲加载,利用声发射测试试样的破坏过程。两种试样的加载方式如图4所示。

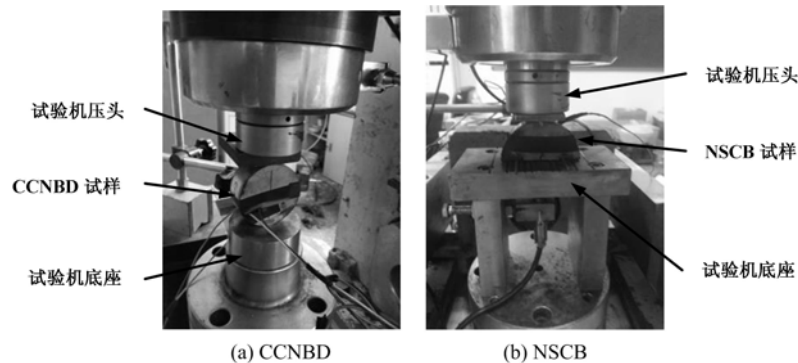


图4 试样加载图

Fig. 4 Specimen loading picture

2 测试结果分析

2.1 载荷—位移曲线分析

两种试样典型的载荷—位移曲线如图5所示,由图5(a)可以看出,CCNBD试样典型的载荷—位移

曲线大致分为四个阶段：①从加载开始到曲线弯曲处为加密阶段，在这一过程中试样沿加载方向被压实；②从开始曲线弯曲终点到峰值荷载为弹性阶段，在这一过程中试样为弹性变形；③从峰值荷载到曲线发生倒拐处为下降阶段，在这一过程中试样已经发生破坏；④载荷曲线产生倒拐之后的曲线阶段。不同尺寸的 CCNBD 试样在加载过程中，其载荷—位移曲线基本上呈先上升然后快速下降，之后又有所上升的曲线特征。其原因与 CCNBD 试样破坏后形成的两个半圆盘在横向并不能完全分离有关。当 CCNBD 试样破裂为两部分后，加载端由线性接触变为面接触，破裂的两部分可以继续承受荷载，且承载能力会先增加再减少。CCNBD 试样的二次峰值并不一定都出现，在较大试样加载时更容易出现，此时试样已经完全破裂为两半，二次峰值实际上是劈裂后分成两半试样承载能力的体现。

由图 5(b)可以看出，NSCB 试样的载荷—位移曲线大致分为三个阶段：①从加载开始到曲线弯曲处为加密阶段，在这一过程中试样沿加载方向被压实；②从曲线弯曲终点处到峰值荷载为弹性阶段，在这一过程试样基本为弹性变形；③从峰值荷载快速跌落为零。对于 NSCB 试样，其加密阶段容易出现在较大尺寸的试样上，而小尺寸试样的加密阶段不是很明显。NSCB 试样的载荷—位移曲线上升到达峰值荷载后急剧下降为零，这种现象与 NSCB 为半圆盘试样，且采用的加载方式为三点弯曲有关。当 NSCB 试样架在试验机底座上通过三条接触条施加荷载后，试样达到峰值荷载，将破坏为两部分，此时，底座上的两条线接触并不能在横向保持稳定，从而不能继续承受竖向荷载。因此，当 NSCB 试样达到峰值荷载后，试样承受荷载的能力快速下降，同时，试样到达峰值荷载后变形加大，由于试样已破坏，不能阻止裂纹的扩展，在这一时期裂纹呈不稳定扩展，表现在荷载—位移曲线上为峰值荷载过后曲线快速下降为零。

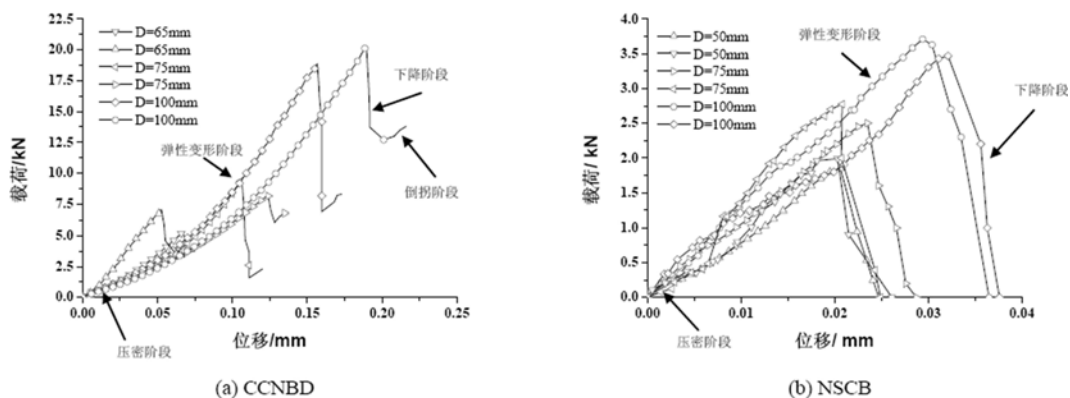


图5 两种试样典型的载荷—位移曲线

Fig. 5 Typical load-displacement curves for two types of specimen

同种尺寸的 CCNBD 试样比 NSCB 试样的峰值荷载大，其原因与 CCNBD 试样是从中间切缝，裂缝扩展要克服上下两端韧带的阻抗，但 NSCB 试样是半圆盘边裂缝，裂缝扩展只需要克服裂缝一侧韧带的阻抗有关。

2.2 断裂韧度测试值的对比分析

2.2.1 两种试样测试的断裂韧度值

试验结束后，记录试样破坏时的峰值荷载，通过式(1)计算出 CCNBD 试样测试的 I 型断裂韧度值 K_{IC} 。式(1)中无量纲应力强度因子 Y_{min} ，根据王启智^[15]等采用分片合成法对国际岩石力学协会 (ISRM)1995 年人字型切槽巴西圆盘试样测试方法进行的修正公式计算。

$$K_{IC} = \frac{P_{max}}{B \sqrt{D}} Y_{min} \quad (1)$$

$$Y_{min} = u \cdot e^{v-\alpha_1} \quad (2)$$

式中， K_{IC} 为岩石断裂韧度； P_{max} 为试样破坏时的峰值荷载； Y_{min} 为无量纲应力强度因子； B 为试样厚度； D 为试样直径($D=2R$)； α_1 为无量纲最大切槽长度($\alpha_1 = a_1/R$)； u 和 v 由文献[15]得出。

通过试验测出中心直裂纹三点弯曲试样破坏时的峰值荷载，然后由式(3)和(4)计算出中心直裂纹

三点弯曲试样(NSCB)的 I 型断裂韧度值 K_{IC} 。式(3)中无量纲应力强度因子 Y' 由国际岩石力学协会(ISRM)2014 年建议方法中的公式(4)得出。

$$K_{IC} = \frac{Y_{max}}{2RB} Y' \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

$$Y' = \frac{s}{2R} (2.91 + 54.39\beta - 391.4\beta^2 + 1210.6\beta^3 - 1650\beta^4 + 875.9\beta^5) \quad (4)$$

式(3)中 K_{IC} 为岩石 I 型断裂韧度; Y_{max} 为试样破坏时的峰值荷载; Y' 为应力强度因子; s 为三点弯曲下两点的跨距; R 为试样半径; β 为裂缝长度与试样半径的比值。

CCNBD 试样和 NSCB 试样通过试验测得大理岩断裂韧度值如表 3 所示。

表 3 测试结果

Tab.3 Test results

编号	峰值载荷 (/kN)	应力强度 因子	断裂韧度 K_{IC}	
			试验值/(MPa · m ^{1/2})	平均值/(MPa · m ^{1/2})
C-A65-1	6.83	1.23	1.22	
C-A65-2	7.02	1.26	1.30	
C-A65-3	7.07	1.26	1.30	1.27
C-A75-1	9.38	1.04	1.11	
C-A75-2	9.44	1.11	1.21	
C-A75-3	9.67	1.01	1.13	1.15
C-A100-1	19.84	0.82	1.22	
C-A100-2	20.29	0.82	1.25	
C-A100-3	18.89	0.82	1.16	1.21
N-A50-1	1.85	4.51	1.09	
N-A50-2	1.99	4.32	1.10	
N-A50-3	1.99	4.34	1.15	1.11
N-A75-1	2.49	4.19	1.05	
N-A75-2	2.94	4.51	1.39	1.22
N-A100-1	3.16	4.57	1.34	
N-A100-2	3.71	4.33	1.45	
N-A100-3	3.47	4.69	1.53	1.44

2.2.2 两种试样断裂韧度测试值的对比分析

不考虑尺寸效应,用大理岩制成的 CCNBD 试样测得的断裂韧度的平均值为 $1.21\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, NSCB 试样测得的平均值为 $1.26\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,如图 6 所示,NSCB 试样测试结果的平均值比 CCNBD 试样偏大 4%。

2.2.3 试样尺寸对两种试样断裂韧度测试值的影响分析

不同尺寸(以圆盘直径为特征尺寸)CCNBD 和 NSCB 试样测得的断裂韧度值有明显差异。以 CCNBD 试样为例,大理岩随着试样尺寸的增加先减少后增大,在试样尺寸为 75mm 时为最小值,在该尺寸下测得的断裂韧度平均值比 65mm 时小 $0.12\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,比 100mm 时小 $0.06\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。NSCB 试样测试的断裂韧度值随试样尺寸增大而持续增大,如图 7 所示。

CCNBD 试样的尺寸效应不同于 NSCB 试样,可能由于 NSCB 试样为直裂缝更容易满足相似性,而 CCNBD 试样的人字型切槽是复杂的三维结构,不容易满足三维相似性。另外,两种试样受到加载端部

效应的影响程度也不同,CCNBD 试样采用竖向径直加载而 NSCB 试样采用三点弯曲加载。不同构型的试样表现为不同的尺寸效应,与试验加载方式有一定关系。

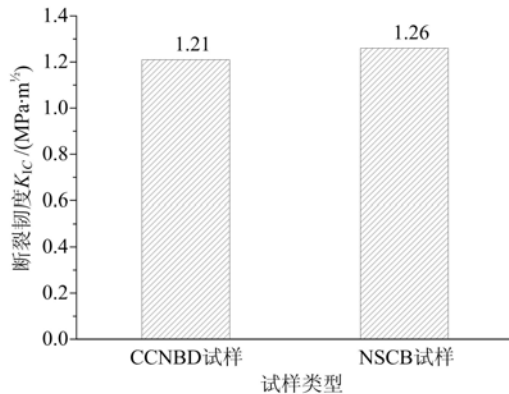


图6 两种试样测得的断裂韧度平均值

Fig. 6 Average values of fracture toughness by two types of specimen

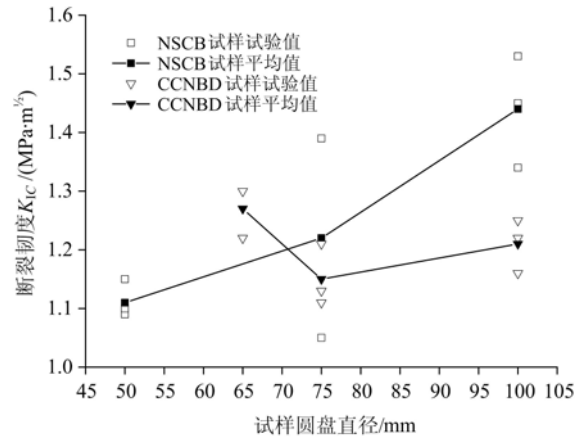


图7 两种试样的尺寸效应

Fig. 7 Size effect of two types of specimen

CCNBD 试样测的大理岩的断裂韧度值 K_{Ic} 较接近,在 $1.16 \sim 1.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 之间。相对而言,NSCB 试样的测试值受试样尺寸变化影响较大,测得的断裂韧度值在 $1.05 \sim 1.53 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 之间。NSCB 试样测得断裂韧度的平均值比 CCNBD 试样测得的平均值偏大,尤其是大尺寸试样。两种圆盘试样直径为 75mm 时,采用 NSCB 试样测得的断裂韧度平均值比 CCNBD 试样测得平均值偏大 6%,当圆盘直径为 100mm 时偏大 19%。用两种试样测试同种岩石出现差异,表明测试方法和试样构型和尺寸对测试结果都存在一定的影响。从试验结果分析,CCNBD 试样的测试值相对较为准确。笔者认为,CCNBD 试样的人字型切槽,容许加工较宽的人工裂缝,可保证裂缝发生中心起裂;NSCB 试样的起裂则受到预制裂缝宽度的影响较大,同时该试样是三点弯曲加载,不如 CCNBD 试样容易加载,其测试值离散程度相对较大。为了提高 NSCB 试样测试的准确性,有必要制作足够小的人工预制裂缝(在圆盘直径小于 100mm 时,建议裂缝宽度小于 0.5mm),同时要保证三点弯曲加载的合理性。

3 试样破坏过程及形态分析

3.1 试样破坏过程分析

由于相同构型不同尺寸试样的声发射现象大致相同,本节只对尺寸为 75mm 的大理岩进行声发射现象分析。CCNBD 和 NSCB 试样在加载过程中声发射如图 8 和图 9 所示,两种构型试样的声发射现象与试样的载荷-时间曲线相对应。从图 8 中可知,CCNBD 试样的裂纹扩展过程极快,一旦达到峰值荷载,试样迅速破坏,表现在荷载-时间图上为荷载急剧下降,与之对应的声发射图片中的振铃计数和能量在破坏点上升。CCNBD 试样的振铃计数在试样压密阶段有所增加;然后在试样弹性阶段前期,振铃计数有所降低;在弹性阶段中期和后期有所增加,当试样达到峰值荷载时,其振铃计数急剧增加;从峰值荷载到倒拐阶段,其振铃计数逐渐降低。在荷载位移曲线出现倒拐现象后,停止加载,未监测试样到达二次峰值的声发射现象;声发射中的能量与时间变化趋势和振铃计数与时间变化趋势基本相同。

从图 9 可以看出,在 NSCB 试样刚开始加载时的前期压密阶段,振铃计数和能量开始较少,之后有所增加,此时试样被压密进入弹性变形阶段;然后振铃计数和能量会发生减小到一定程度再逐渐增加,到试样破坏时增至最大,在这一过程中试样的微裂纹被压实后,试样继续承受荷载,引起新的裂纹起裂,在新的裂纹起裂前有一段时间,试样处于完好状态,在声发射图上表现为不活跃,当新的裂纹扩展时,声发射现象增多^[16-18];由于裂纹扩展后试样破坏速度极快,在这一过程中振铃计数和能量逐渐降低为零。

3.2 破坏形态分析

不同尺寸试样典型破坏后的形状如图 10 所示,可以看出,CCNBD 试样裂纹是从预制裂缝的两端

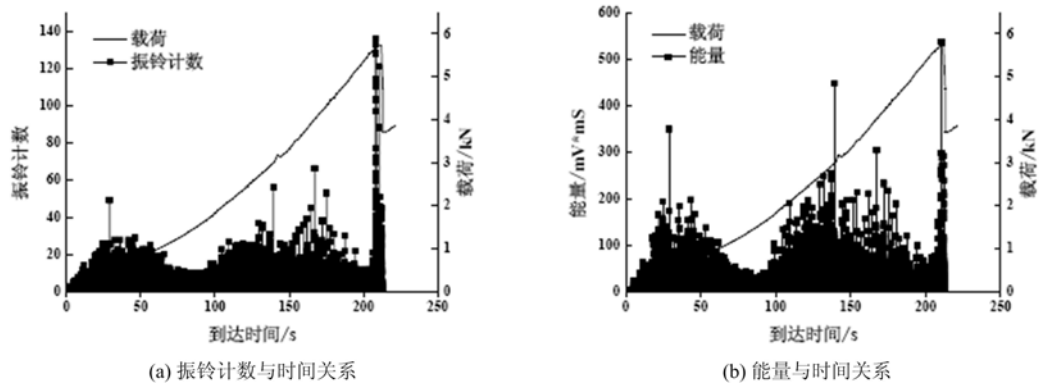


图 8 CCNBD 试样声发射图
Fig. 8 Acoustic emission of CCNBD specimen

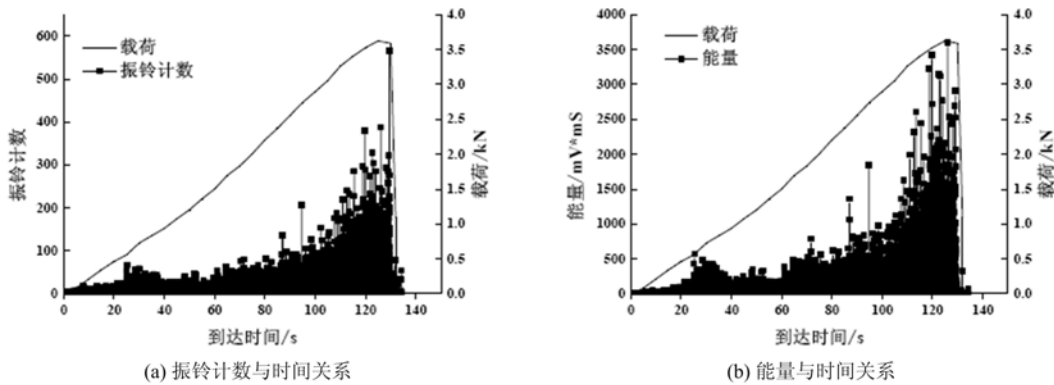


图 9 NSCB 试样的声发射图
Fig. 9 Acoustic emission of NSCB specimen

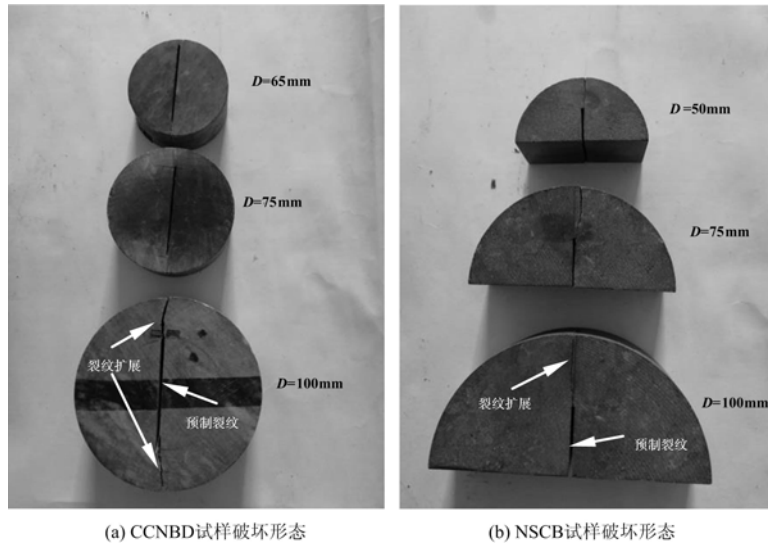


图 10 试样破坏形态图
Fig. 10 Fracture pattern of specimen

起裂且顺着加载方向扩展,直至试样完全断裂,其破坏的过程是从裂尖起裂然后扩展到试样两边,受试验加载影响,其裂纹扩展方向与预制裂纹的方向存在一定偏差;而 NSCB 试样是从预制裂缝的顶端开裂沿平行于预制裂缝的直线方向向试样的边缘扩展,其裂纹扩展方向与预制的裂纹方向基本一致。

CCNBD 和 NSCB 试样的破坏过程都要经过裂纹起裂阶段、裂纹稳定扩展阶段、裂纹失稳扩展阶段

和破坏阶段四个过程^[19-21]。虽然总的破坏过程相似,但每种试样在各个阶段的表现有所不同。CCNBD试样先从三维的人字型缝尖起裂,从非线性逐步扩展为近似线性破裂,然后稳定向两边扩展,受内部缺陷的影响,裂纹扩展方向很可能会偏离预制裂缝所在平面,在试样将要破坏时失稳扩展;NSCB试样是以直裂缝为起裂点,基本属于线性扩展裂纹,稳定向一端扩展,在试样将要破坏时失稳扩展。CCNBD和NSCB试样在加载过程中,都是裂纹在预制裂缝尖端起裂然后扩展至试样破坏,其破坏机理都为受拉破坏,试样破坏断面较为平整。但如果扩展裂纹受试样内部缺陷影响或者加载过程中发生偏心加载,裂纹断面也有发生摩擦的痕迹,表明试样可能发生拉剪复合型破坏,会影响试验结果,另外试样加载的端部效应、加工尺寸精度、岩石非均性等都会对试验结果造成影响。

4 结论

(1) CCNBD和NSCB试样的载荷一位移曲线存在一定的差异,CCNBD试样由于破坏后分为两个半圆盘,破裂后的半圆盘可以继续承受荷载,其载荷一位移曲线具有较长的峰后曲线,甚至出现二次峰值现象,试样越大,二次峰值越明显,但NSCB试样属于三点弯曲加载,其载荷一位移曲线为持续上升到峰值荷载,然后急剧下降的简单形式。

(2) 采用尺寸为50~100mm的NSCB试样测得大理岩的断裂韧度平均值比用CCNBD试样的偏高4%,对于大尺寸试样偏高更多。

(3) 不同构型的试样可能表现为不同的尺寸效应。CCNBD试样测试值随着试样尺寸的增加,规律不明显,NSCB试样测试的断裂韧度值随试样尺寸增大而持续增大。

(4) CCNBD和NSCB试样破坏过程中的振铃计数和能量与时间的变化过程与载荷一时间曲线完全对应,CCNBD和NSCB试样的破坏过程都经过裂纹起裂阶段、裂纹稳定扩展阶段、裂纹失稳扩展阶段和破坏阶段,NSCB试样相对于CCNBD试样,裂纹起裂至试样破坏经历的时间较短。

参考文献:

- [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 Xiaozhong. Fracture mechanics of rock and concrete[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1991 (in Chinese))
- [2] 崔振东,刘大安,安光明,等. 岩石I型断裂韧度测试方法研究进展[J]. 测试技术学报,2004,30(2):189-196 (CUI Zhendong, LIU Daan, AN Guangming, ZHOU Miao. Research progress of test method for fracture toughness of rock type I[J]. Test Technology Journal, 2004, 30(2):189-196 (in Chinese))
- [3] 张盛,李小军,李大伟. 岩石I型断裂韧度测试技术和理论研究综述[J]. 河南理工大学学报,2009,20(3):33-38 (ZHANG Sheng, LI Xiaojun, LI Dawei. Summary of rock fracture toughness testing technique and theory research[J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2009, 20(3): 33-38 (in Chinese))
- [4] 张盛,梁亚磊. 预制裂缝宽度对HCFBD试样确定岩石断裂韧度的影响[J]. 实验力学,2013,28(4):517-523 (ZHANG Sheng, LIANG Yalei. Effect of prefabricated crack width on determination of fracture toughness of rock by HCFBD specimens[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(4):517-523 (in Chinese))
- [5] 崔振东. 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,2010,30(9):2743-2748 (CUI Zhendong. Experimental study on determination of rock fracture toughness K_{Ic} by V notch Brazil disk method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 30(9):2743-2748 (in Chinese))
- [6] 朱哲明,王洪山. 切口曲率半径对岩石断裂韧度 K_{Ic} 值的影响[J]. 实验力学,1993,8(1):92-95 (ZHU Zheming, WANG Hongshan. Influence of curvature radius on the fracture toughness K_{Ic} of rock[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1993, 8(1):92-95 (in Chinese))
- [7] Franklin J A, Sun Zongqi, Atkinson B K, et al. Suggested methods fracture toughness for determining the of rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1988, 25(2):71-96.
- [8] 尹祥础,颜玉定,李红,等. 不同方法测定岩石断裂韧度 K_{Ic} 的研究[J]. 岩石力学与工程学报,1990,9(4):328-333 (YIN Xiangchu, YAN Yuding, LI Hong, et al. Experimental investigation on the measurement of fracture toughness K_{Ic} of rocks using different methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1990, 9

- (4):328—333 (in Chinese))
- [9] 王博楠,王之东,唐铁吾,等. 岩石 I 型断裂韧度测试方法比较及尺寸效应[J]. 岩土力学与工程学报, 2017, 32(2):286—288 (WANG Bonan, WANG Zhidong, LIN Xiaotong, et al. Comparison of I type fracture toughness test methods and size effect of rock[J]. Rock and Soil Mechanics and Engineering, 2017, 32(2):286—288 (in Chinese))
- [10] 王启智,鲜学福. 二种岩石断裂韧度试样测试的稳定性分析[J]. 实验力学, 1991, 6(3):264—271 (WANG Qizhi, XIAN Xuefu. Stability analysis of two kinds of rock fracture toughness test samples[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1991, 6(3):264—271 (in Chinese))
- [11] 徐纪成,刘大安,孙宗顺,等. 岩石断裂韧度的国际联合试验研究[J]. 中南工业大学学报, 1995, 26(3):310—313 (XU Jicheng, LIU Daan, SUN Zongqi, et al. International joint experimental study on rock fracture toughness[J]. Journal of Zhongnan University of Technology, 1995, 26(3):310—313 (in Chinese))
- [12] 张盛. 用 5 种圆盘试样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. Determination of rock fracture toughness by splitting test of 5 kinds of disc specimens [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1):12—18 (in Chinese))
- [13] Fowell 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, 1995, 32(1):57—64.
- [14] 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(1):267—274.
- [15] 樊鸿,张盛,苟小平,等. 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—423 (FAN Hong, ZHANG Sheng, GOU Xiaoping, et al. A new numerical calibration of critical stress intensity factor CCNBD for rock fracture toughness specimen[J]. Journal of Applied Mechanics, 2011, 28(4):416—423 (in Chinese))
- [16] 夏祁寒. 应变片测试原理及在实际工程中的应用[J]. 山西建筑, 2005, 10(8):99—100 (XIA Qihan. The principle of strain gauge test and its application in practical engineering[J]. Shanxi Architecture, 2005, 10(8):99—100 (in Chinese))
- [17] 曾开华,王春光,李丙乾,等. 岩石三轴压缩声发射测试装置改进及其信号分析[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(4):19—23 (ZENG Kaihua, WANG Chunguang, LI Bingqian, et al. Improvement of acoustic emission testing device for rock three axis compression and its signal analysis[J]. Laboratory Research and Exploration, 2013, 32(4):68—72 (in Chinese))
- [18] Antonio Bobet. The initiation of secondary cracks in compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 66(2):187—219.
- [19] 陶纪南. 岩石断裂韧度 K_{IC} 测试中的几个问题——裂纹亚临界扩展的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(4):319—327 (TAO Jinan. Some problems concerning the measurement of rock toughness K_{IC} —research into subcritical propagation of cracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1990, 9(4):319—327 (in Chinese))
- [20] 邓华锋,李建林,刘杰. 考虑裂隙水压力的岩体压剪裂纹扩展规律研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1):297—302 (DENG Huafeng, LI Jianlin, LIU Jie. Research on propagation of compression shear fracture in rocks considering fissure water pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1):297—302 (in Chinese))
- [21] 陈勉,金衍,袁长友. 围压条件下岩石断裂韧性的实验研究[J]. 力学与实践, 2001, 23(4):32—35 (CHEN Mian, JIN Yan, YUAN Changyou. Study on the experiment for fracture toughness under confining pressure[J]. Mechanics in Engineering, 2001, 23(4):32—35 (in Chinese))

Experimental study on testing rock fracture toughness with two types of disc specimens recommended by ISRM

ZHAO Wen-feng¹, ZHANG Sheng^{1,2}, WANG Meng¹, SHEN Wen-long¹, JIAO Zhen-guo³

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454001, Henan, China;

2. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety, Jiaozuo 454001, Henan, China;

3. Baidong Coal Industry Co. Ltd. of Datong Coal Mine Group, Datong 037003, Shanxi, China)

Abstract: The splitting loading tests of Cracked Chevron Notched Brazilian Disc specimen (CCNBD) and Notch Semi-Circular Bend specimen (NSCB) recommended by International Association of Rock Mechanics were carried out on RMT-150B tester. The load-displacement curve, failure mode and fracture toughness test value of the specimens by different size specimens were compared and analyzed. The result indicates that the load displacement curve of CCNBD specimen may be reversed twice and the load displacement curve of NSCB specimen falls directly after the peak. The ring counting, energy and time variation in the failure process of specimens completely corresponds to the load-time curve. The average fracture toughness of marble measured by NSCB specimens is about 4% higher than that of CCNBD specimens and the higher degree is more obvious when the specimen size is larger. Both types of specimens are fractured under splitting load, and CCNBD specimen may deviate from the direction of loading diameter at the end. The study is helpful to improve and popularize the method of testing rock fracture toughness suggested by ISRM.

Keywords: rock fracture toughness; peak load; Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD); Notch Semi-Circular Bend (NSCB); acoustic emission