

文章编号: 1000-4750(2009)04-0167-07

# 用中心直裂纹平台巴西圆盘测试 岩石动态断裂韧度的尺寸效应

冯 峰, 韦重耕, \*王启智

(四川大学土木工程及应用力学系, 四川, 成都 610065)

**摘 要:** 对三组几何相似, 尺寸不同( $\phi 80$ ,  $\phi 122$ ,  $\phi 155\text{mm}$ )的中心直裂纹平台巴西圆盘试样, 利用霍普金森压杆系统进行径向冲击试验, 采用实验-数值方法确定岩石的动态断裂韧度。测试结果表明, 岩石的动态断裂韧度同时受到加载率效应和尺寸效应的影响。为了分离两者的耦合作用, 进行了两次线性回归: 首先对相同尺寸试样的动态断裂韧度随加载率的变化进行回归, 利用该回归公式可得到在相同加载率下不同尺寸的相似试样的动态断裂韧度, 在此条件下可将 Bazant 的静态尺度律公式应用到动态; 然后对同一加载率下的动态断裂韧度不同试样尺寸再进行回归, 由此可以研究在给定加载率下动态断裂韧度的尺寸效应, 最后求出了不同加载率下大理岩的材料动态断裂韧度。

**关键词:** 动态断裂韧度; 尺寸效应; 中心直裂纹平台巴西圆盘; 几何相似试样; 加载率

**中图分类号:** O346.1; TU458<sup>+</sup>.3 **文献标识码:** A

## SIZE EFFECT FOR ROCK DYNAMIC FRACTURE TOUGHNESS TESTED WITH CRACKED STRAIGHT THROUGH FLATTENED BRAZILIAN DISC

FENG Feng, WEI Chong-geng, \*WANG Qi-zhi

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

**Abstract:** The geometrically similar cracked straight through flattened Brazilian disc specimens of different sizes ( $\phi 80$ ,  $\phi 122$ ,  $\phi 155\text{mm}$ ) were diametrically impacted by the split Hopkinson pressure bar system, and the dynamic fracture toughness of rock materials was determined by the experimental-numerical method. The result shows that the dynamic fracture toughness is affected by both the loading rate and the specimen size. In order to separate the coupling effects of these two factors on the dynamic fracture toughness, two procedures of linear regressions were conducted: the first regression was used to treat the dynamic fracture toughness with respect to the loading rate for the same sized specimens, and by using the obtained formulas, the dynamic fracture toughness corresponding to different diameters under the same loading rate can be calculated, under this condition the Bazant's static size effect law can be applied to dynamic situation; then the second regression was made for the dynamic fracture toughness with respect to the specimen size. The size effect law of dynamic fracture toughness under a certain loading rate was thusly obtained. Finally, the dynamic fracture toughness of the marble material under different loading rates was presented.

**Key words:** dynamic fracture toughness; size effect; cracked straight through flattened Brazilian disc; geometrically similar specimens; loading rate

收稿日期: 2007-12-12; 修改日期: 2008-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(10472075)

作者简介: 冯 峰(1984—), 男, 湖北孝昌人, 硕士, 从事岩石动态断裂研究(E-mail: fengfengwind@163.com);

韦重耕(1981—), 男, 广西柳江人, 硕士, 从事动态断裂研究(E-mail: fractureofscu@163.com);

\*王启智(1946—), 男, 浙江嘉兴人, 教授, 博导, 从事固体力学、岩土工程方面的研究(E-mail: qzwang2004@163.com).

越来越多的实验和工程实践表明,准脆性材料(如岩石、混凝土、海冰、复合材料、陶瓷等)存在尺寸效应(size effect),例如,实验中得到的力学参数不仅与材料性质有关,而且与试样尺寸和几何有关。当结构和材料的尺寸改变时,其力学响应也随之改变;或当结构细观尺度不同时,其宏观变形和破坏行为也不相同,这就是所谓尺寸效应<sup>[1]</sup>。由于实验室采用的试样尺寸一般比工程结构小得多,这意味着在实验中由小尺寸试样得到的力学参数,必须以恰当的方式外推到大尺寸构件上才能合理使用<sup>[1]</sup>。

国内外对准脆性材料的动态断裂尺寸效应的研究很少,迄今尚未见到关于岩石动态断裂韧度尺寸效应的研究成果,尤其是其动态拉伸实验不易实施,如果再涉及到尺度效应研究则难度更大。仅有的研究表明<sup>[2-3]</sup>,影响混凝土材料的动态压缩强度的因素除了与试样的应力和材料的特征尺寸有关之外,还与加载率和时间尺度有关。因此,动态断裂的尺寸效应问题除了空间尺度(断裂过程区长度)外,又增加了时间尺度(孕育时间)的影响。目前国外可查到的资料只有Elfahal等采用落锤对75mm×150mm、150mm×300mm、300mm×600mm以及600mm×1200mm(直径×高度)的混凝土圆柱试样进行了动态轴向压缩试验及有关的讨论<sup>[4-8]</sup>;他们还利用数值方法模拟整个试验,观察到了高强度混凝土的动态抗压强度具有依赖于时间的尺寸效应,发现试样的尺寸效应和加载率效应对测试结果的影响很大。但他们并没有对这两种因素各自的影响方式进行深入的研究,在研究测试结果的尺寸效应时,没有扣除加载率效应的影响。

国内外学者研究了加载率对动态断裂韧度的影响,例如Zhang等用短棒试样研究了大理岩和辉长岩的动态断裂韧度与加载率的关系<sup>[9]</sup>,得到了动态断裂韧度随着加载率的增大而增大的关系,并根据实验结果给出了断裂韧度-加载率的拟合曲线;李战鲁等用边切槽圆盘试样研究了加载率对大理岩动态断裂韧度的影响,也得到断裂韧度随加载率增大而增大的结果<sup>[10]</sup>。虽然文[9-10]都只研究了一种尺寸试样,没有涉及尺寸效应;但这些研究说明,要研究动态断裂韧度的尺寸效应,需要将加载率对断裂韧度的影响分离开来。

在测试准脆性材料的拉伸力学性能方面,巴西试验由于试样制作简单,加载方便,理论成熟等优点而为许多学者所接受。国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics—ISRM)早在1978年就颁布了利用巴西圆盘试样测试岩石的静态拉伸强度 $\sigma_t$ 的建议方法<sup>[11]</sup>,王启智等人为了改进试样的应力状态又提出了平台巴西圆盘试样<sup>[12]</sup>,Ross等对混凝土巴西圆盘动态劈裂实验进行了数值分析和实验研究<sup>[13-14]</sup>,Yamauchi等对中心直裂纹巴西圆盘实施单点径向冲击,测试石墨等材料动态断裂能量释放率以及动态断裂韧度<sup>[15]</sup>。

本文利用霍普金森压杆对直径分别为80mm、122mm、155mm的几何相似的中心直裂纹平台巴西圆盘(cracked straight through flattened Brazilian disc—CSTFBD)试样进行了径向冲击试验,采用实验-数值相结合的方法,将实验记录的载荷数据输入有限元软件ANSYS得到了试样在不同加载率下的动态断裂韧度。对动态断裂韧度随加载率的变化趋势进行线性回归,利用回归公式求出相同加载率下三组几何相似试样的动态断裂韧度,并将Bazant尺度律公式应用到动态,将相同加载率下的动态断裂韧度对直径进行线性回归,由此研究动态断裂韧度的尺寸效应。最后给出了不同加载率下大理岩的材料动态断裂韧度。

## 1 试样及加载设备

试样材料为白色大理石,采自四川雅安,参考文献[16],取弹性模量为16.3GPa,泊松比为0.3,密度为2527kg/m<sup>3</sup>。图1—图3分别为中心直裂纹平台巴西圆盘试样简图、实物图和实验后的开裂图;其中, $D$ 为试样的直径, $2a_0$ 为裂纹长度, $2\beta$ 为平台圆心角,作用在试样平台上的载荷的合力为 $F(t)$ 。试样的几何参数如表1所示,定义无量纲裂纹长度为 $\alpha_0 = 2a_0 / D$ 。本次实验采用洛阳工程兵科研三所的霍普金森压杆作为加载设备,压杆直径为100mm,入射杆长4500mm,透射杆长2500mm,弹性模量210GPa,泊松比0.30,密度7850kg/m<sup>3</sup>,理论波速为5172m/s,实测波速为5200m/s,炮弹长度为180mm。

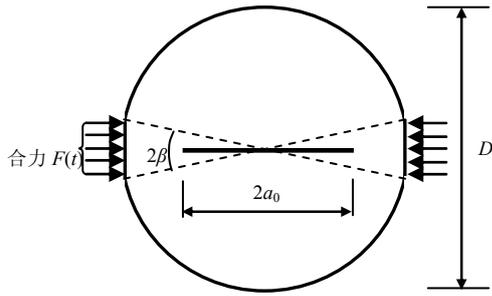


图 1 中心直裂纹平台巴西圆盘(CSTFBD)

Fig.1 Cracked straight through flattened Brazilian disc (CSTFBD)



图 2 中心直裂纹平台巴西圆盘实物图

Fig.2 The specimen of CSTFBD



图 3 测试后断裂的试样

Fig.3 A fractured specimen after test

表 1 试样的几何参数

Table 1 The geometry of specimens

试样编号	D/mm	2a <sub>0</sub> /mm	a <sub>0</sub>	厚度/mm	2β/(°)
D1	80.0	53.0	0.66	26.0	20
D2	122.0	80.5	0.66	40.0	20
D3	155.0	103.0	0.66	50.0	20

## 2 实验方法和实验记录

### 2.1 载荷的确定

图 4 显示了各应变片在杆和试样上的相对位置。入射波  $\varepsilon_i(t)$  和反射波  $\varepsilon_r(t)$  由应变片 g1 获得, 透射波  $\varepsilon_t(t)$  由应变片 g2 获得, 裂尖的信号由应变片 g3 获得。为了将入射波和反射波分开, 同时消除由于圣维南原理以及杆端波互相叠加带来的干扰, 入射杆和透射杆上的应变片应该贴在离杆与试样接触处足够长的距离。在本次实验中两个应变片

的粘贴距离分别为  $L_{g1}=100\text{cm}$ ,  $L_{g2}=80\text{cm}$ 。从试验结果可以看出, 这个距离已经能够把入射波和反射波信号分开;  $L_s = D \times \cos(10^\circ)$  为试样两个平台间的距离。对试样 D1-4 对应的各信号进行滤波以及扣除零飘后各信号如图 5 所示, 其中压应变为正拉应变为负。

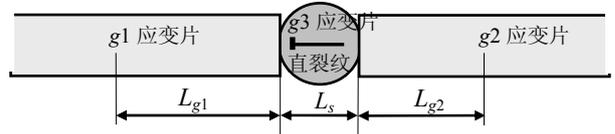


图 4 杆和试样上各应变片的粘贴位置

Fig.4 The location of strain gauges on the bars and CSTFBD specimen

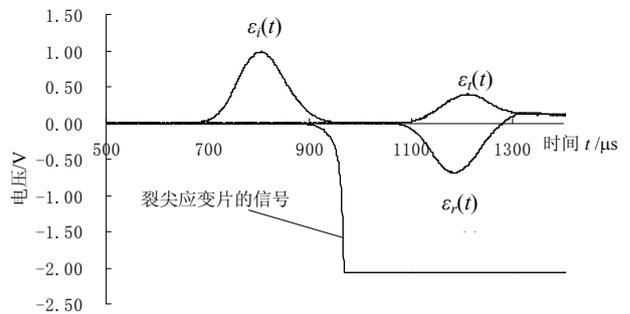


图 5 试样 D1-4 (D=80mm)对应的各信号

Fig.5 The strain signals correspond to testing specimen D1-4 (D=80mm)

由于各应变片的粘贴位置不同, 因此各信号在同一时间轴上的位置是错开的, 对这些信号进行相应的处理后, 可由下式计算出试样左(L)右(R)两个端面的载荷:

$$\begin{cases} F_L(t) = EA[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] \\ F_R(t) = EA\varepsilon_t(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $A$  为入射杆截面积;  $E$  为压杆的弹性模量。

图 6 为 D3-4(D=155mm)试样的左右端载荷  $F_L(t)$  和  $F_R(t)$ , 可以看出左右端载荷信号在时间上有一个差值, 这正是由于波传播通过试样需要一定的时间, 试样对应应力波传播的阻碍以及惯性效应所造成的。因此, 在实验中试样两端面的应力确实存在着不均匀性, 所以应采用修正非均匀性效应的公式进行计算, 具体按照文[17]中的方法, 以试样左端面受到载荷的时刻为起点时刻, 将透射波向左平移  $\tau_0$  时间得到  $\varepsilon_t^*(t) = \varepsilon_t(t + \tau_0)$ 。其中  $\tau_0$  弹性波传播通过试样所需要的时间, 可以通过透射波的理论起点与实际起点的时间差得到。同时又由于利用了三个实测波形进行计算, 故可以消除试样两个端面应力

分布的时间与空间不均匀性的影响, 如式(2)所示。这与文[18]中考虑应力波在岩石试样中的衰减并建议用试样两端面所计算的应力来分析试样端面载荷的做法类似。

$$F(t) = \frac{F_L(t) + F_R^*(t)}{2} = \frac{EA}{2} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_i^*(t)] \quad (2)$$

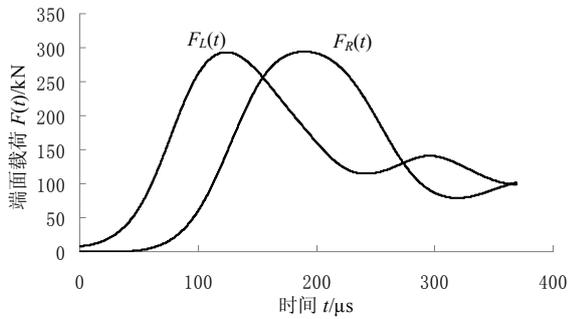


图 6 试样 D3-4(D=155mm)的左右两个端面的载荷  
Fig.6 The load on left end and right end of specimen D3-4 (D=155mm)

### 2.2 断裂时间的确定

本次实验采用应变片破裂法来确定起裂时间, 此时应变片断裂并对应试样裂纹起裂。即对图 5 中的试样上应变片测到的信号进行求导, 得到应变导数如图 7 所示。以应变导数绝对值最大点对应的时刻作为试样的起裂时刻  $t_{end}$ , 减去试样左端面开始受到载荷作用的时刻  $t_{start}$ , 便得到试样起裂时间  $t_f$ 。

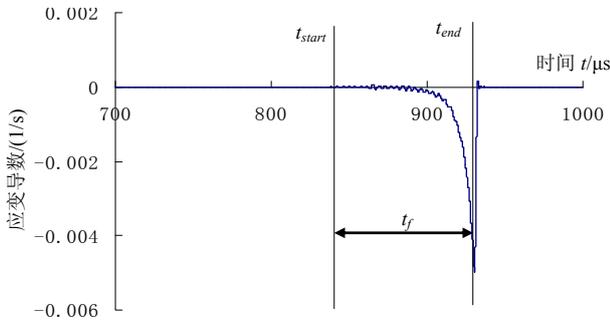


图 7 试样起裂时间  $t_f$  的确定方法  
Fig.7 Determination of fracture time  $t_f$

## 3 计算和分析结果

### 3.1 动态断裂韧度的计算

采用文[16]的方法, 利用 ANSYS 有限元软件计算动态应力强度因子  $K_I(t)$  的时间-历程曲线。由于对称性, 只需对试样 1/2 模型进行分析, 有限元模型如图 8 所示。将式(2)中得到的载荷输入有限元程序, 得到动态应力强度因子  $K_I(t)$  的时间-历程曲线, 再根据起裂时间  $t_f$  来确定其动态断裂韧度,

如图 9 所示。

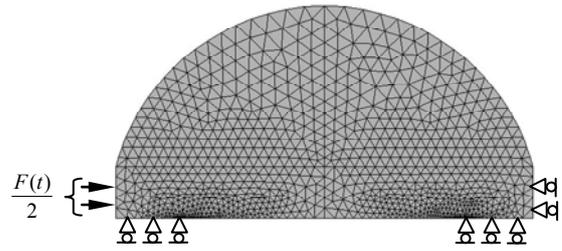


图 8 中心直裂纹平台巴西圆盘有限元模型  
Fig.8 The finite element model for CSTFBD

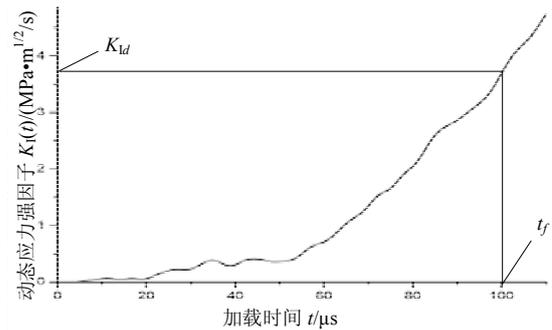


图 9 动态断裂韧度  $K_{I_d}$  的确定  
Fig.9 Determination of dynamic fracture toughness  $K_{I_d}$

定义加载率  $\dot{K}_I$  为:

$$\dot{K}_I = \frac{K_{I_d}}{t_f} \quad (3)$$

表 2—表 4 给出了实验-数值法的计算结果。

表 2 直径  $D=80\text{mm}$  的试样的实验计算结果  
Table 2 Experimental-numerical results for specimens with diameter  $D=80\text{mm}$

试样编号	$t_f / \mu\text{s}$	$\dot{K}_I / (10^4 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s})$	$K_{I_d} / (\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
D1-1	125.5	7.17	9.0
D1-2	76.2	1.57	1.2
D1-3	79.2	2.27	1.8
D1-4	72.1	3.30	2.38
D1-5	68.7	3.57	2.45
D1-6	68.5	3.84	2.63
D1-7	68.3	3.75	2.56
D1-8	66.6	3.76	2.5
D1-9	67.9	3.79	2.57
D1-10	59.7	3.89	2.32
D1-11	66.3	4.10	2.72
D1-12	64.1	4.39	2.81
D1-13	61.8	4.72	2.92
D1-14	62.8	5.18	3.25
D1-15	57.3	5.40	3.09
D1-16	55.3	5.53	3.06
D1-17	54.3	6.12	3.32
D1-18	49.5	7.33	3.63
D1-19	54.4	7.28	3.96

表 3 直径  $D=122\text{mm}$  的试样的实验计算结果

Table 3 Experimental-numerical results for specimens with diameter  $D=122\text{mm}$

试样编号	$t_f / \mu\text{s}$	$\dot{K}_I / (10^4\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s})$	$K_{I_d} / (\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
D2-1	89.8	2.15	1.93
D2-2	89.1	2.74	2.44
D2-3	77.7	3.29	2.56
D2-4	74.4	3.78	2.81
D2-5	74.4	4.77	3.55
D2-6	65.9	6.12	4.03
D2-7	66.3	5.73	3.80

表 4 直径  $D=155\text{mm}$  的试样的实验计算结果

Table 4 Experimental-numerical results for specimens with diameter  $D=155\text{mm}$

试样编号	$t_f / \mu\text{s}$	$\dot{K}_I / (10^4\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s})$	$K_{I_d} / (\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
D3-1	97.1	2.27	2.19
D3-2	84.1	3.57	3.00
D3-3	81.7	3.84	3.14
D3-4	80.4	4.42	3.55
D3-5	76.5	5.01	3.83
D3-6	83.6	3.94	3.29

其中从表 2 中可以看出, 试样 D1-1 的实验计算结果与其它试样实验结果相差很远, 可能是由于应变片信号记录有误, 因此可认为这个数据是无效的, 在以后的计算中, 将不再使用试样 D1-1 的数据。

### 3.2 动态断裂韧度的尺寸效应

由于加载率  $\dot{K}_I$  和试样尺寸  $D$  对动态断裂韧度都具有明显的影响, 在其他条件相同时,  $D$  也要影响  $\dot{K}_I$ , 因此, 这两种因素是耦合在一起的, 它们对动态断裂韧度的影响难以分清, 给动态尺寸效应研究带来了极大的困难<sup>[4-8]</sup>。所以, 在研究加载率对材料动态断裂韧度的影响时, 应该采用相同尺寸的试样, 以消除尺寸效应的影响; 而要分析尺寸对试样动态断裂韧度的影响时, 则应该使试样处于相同的加载率下, 以消除不同加载率对动态断裂韧度的影响。然而, 由于事先很难控制载荷的加载率, 特别是对于不同尺寸的试样, 动态断裂韧度的测试结果往往不是处于相同的加载率下, 因此很难进行动态尺寸效应的研究。在本次实验中, 加工了三组不同尺寸的相似试样, 各组试样的直径分别为 80mm、122mm、155mm。每组试样都进行了多种加载率的动态冲击实验。

#### 3.2.1 动态断裂韧度与加载率的关系

根据表 2—表 4 的数据, 得到试样动态断裂韧

度随加载率的变化趋势如图 10 所示, 根据文[9]的试验结果, 在  $10^4\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s} - 10^6\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s}$  的大范围加载率区间,  $K_{I_d} - \dot{K}_I$  的变化处于非线性状态, 而在  $\dot{K}_I$  处于  $10^4\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s} - 10^5\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s}$  时的较小范围加载率区间内,  $K_{I_d} - \dot{K}_I$  线基本为一条直线。本文实验所得的加载率正好处于  $10^4\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s} - 10^5\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s}$ , 为此, 只需利用各组试样的动态断裂韧度对加载率进行线性回归, 从而得到  $10^4\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s} - 10^5\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s}$  范围下  $K_{I_d} - \dot{K}_I$  关系。从各条回归线可以看出, 各组试样的动态断裂韧度随着加载率的增大而增大, 而且试样越大, 加载率对断裂韧度的影响越大。另外, 从图 10 中还可以看出, 在同一加载率下, 试样的直径越大, 动态断裂韧度也越大, 说明动态断裂韧度存在明显的尺寸效应。

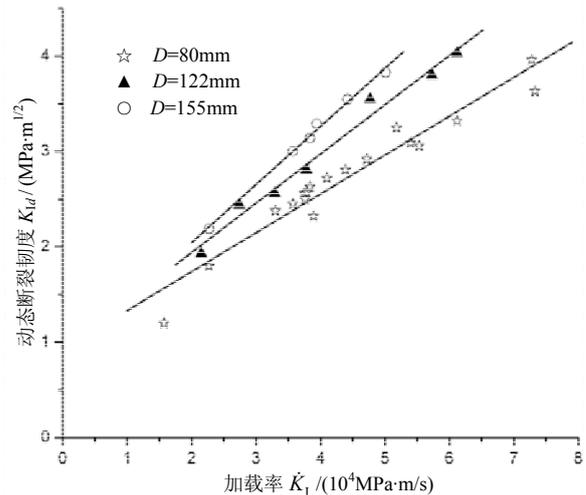


图 10 各组同直径试样的动态断裂韧度对加载速率的线性回归

Fig.10 Curve fitting of  $K_{I_d}$  with respect to  $\dot{K}_I$  for each group of specimens with identical diameter

#### 3.2.2 动态断裂韧度与试样尺寸的关系

由于各回归线很好地描述了试样的动态断裂韧度随加载率的变化规律, 因此通过各回归公式可以计算出不同尺寸试样在相同加载率下的动态断裂韧度, 从而解决了加载率效应与尺寸效应相互耦合的问题, 由此可以研究动态断裂韧度的尺寸效应。图 10 中各回归公式如式(4)所示:

$$K_{I_d} = a\dot{K}_I + b \quad (4)$$

式中:  $K_{I_d}$  的单位是  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ,  $\dot{K}_I$  的单位是  $10^4\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s}$ 。对于不同直径的试样有:

$$D=80\text{mm}: a=0.40756, b=0.92504;$$

$D=122\text{mm}$ :  $a=0.51641$ ,  $b=0.90872$ ;

$D=155\text{mm}$ :  $a=0.60877$ ,  $b=0.82799$ .

利用式(4)可以近似求出各组试样实验范围内任意加载率下的动态断裂韧度,因此可取  $\dot{K}_1=2.5$ ,  $\dot{K}_1=3$ ,  $\dot{K}_1=3.5$ ,  $\dot{K}_1=4$ ,  $\dot{K}_1=4.5$ ,  $\dot{K}_1=5$ , 分别代入式(4)求出不同尺寸试样的动态断裂韧度,计算结果见表5。

表5 不同尺寸试样在相同加载率下的动态断裂韧度  $K_{ld}$  /( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )

Table 5 The  $K_{ld}$  for different sizes of specimens under the same loading rates

$\dot{K}_1 / (10^4 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s})$	$D/\text{mm}$		
	80	122	155
2.5	1.94	2.20	2.35
3.0	2.15	2.46	2.65
3.5	2.35	2.72	2.96
4.0	2.56	2.97	3.26
4.5	2.76	3.23	3.57
5.0	2.96	3.49	3.87

文[19-20]研究了静态情况下断裂韧度  $K_{Ic}$  的尺寸效应,提出了静态断裂韧度的尺度律公式。而动态断裂韧度,不仅与断裂过程区长度有关,而且受到孕育时间的影响。当加载率一定时,可以认为孕育时间的影响也是一定的,即在相同加载率下研究尺度律效应时,可以不考虑孕育时间的影响。基于这种假设,本文将其尺度律公式应用到动态,如式(5)所示:

$$K_{ld} = \frac{K_{ld}^m}{\sqrt{1 + \frac{D_0}{D}}} \quad (5)$$

其中:  $K_{ld}$  为几何相似不同直径的试样测试的动态断裂韧度;  $K_{ld}^m$  为对应于大尺寸试样的材料动态断裂韧度,与加载率有关;  $D_0$  为过渡尺寸,与试样几何和加载率有关,对于几何相似试样,则仅与加载率有关,此时  $D_0$  表征了加载率对尺寸效应的影响;  $D$  为试样直径。

对于静态情况,  $K_{Ic}^m$  为常数,  $D_0$  为仅与试样几何有关的常数。而对于动态情况,  $K_{ld}^m$  和  $D_0$  还与加载率有关。为了对式(5)进行线性回归,可将其转化为下式:

$$Y = B + CX \quad (6)$$

其中:

$$Y = 1/K_{ld}^2, \quad X = 1/D \quad (7)$$

利用表5和公式(6)可以得到与加载率有关的常

数  $B$  和常数  $C$ , 则断裂特性可由  $K_{ld}^m = \sqrt{1/B}$ ,  $D_0 = C/B$  得到,结果如表6所示。从表6可以看出,过渡尺寸随加载率的增大而增大。

表6 各加载率下大理岩的材料动态断裂韧度

Table 6 The dynamic fracture toughness of the marble material under different loading rates

$\dot{K}_1 / (10^4 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s})$	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$D_0/\text{mm}$	152	188	250	286	364	444
$K_{ld}^m / (\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	3.30	3.93	4.77	5.47	6.50	7.57

将表5的数据按式(7)的方式表示得到图11,在图11中,同一加载率下的各实验计算点(如表5所示)基本处于同一直线上,这说明式(5)能够很好地描述相同加载率下动态断裂的尺寸效应。

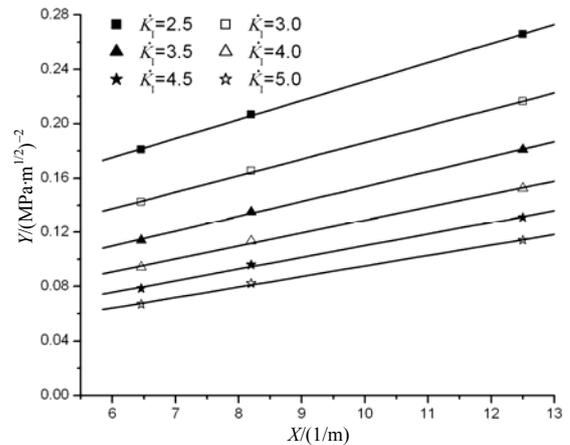


图11 动态断裂韧度在不同加载率下的尺寸效应

Fig.11 The size effect of  $K_{ld}$  under different loading rate

利用表6的数据得到材料动态断裂韧度如图12所示。从图12可以看出,在实验范围内,材料动态断裂韧度随加载率的增大而增大。

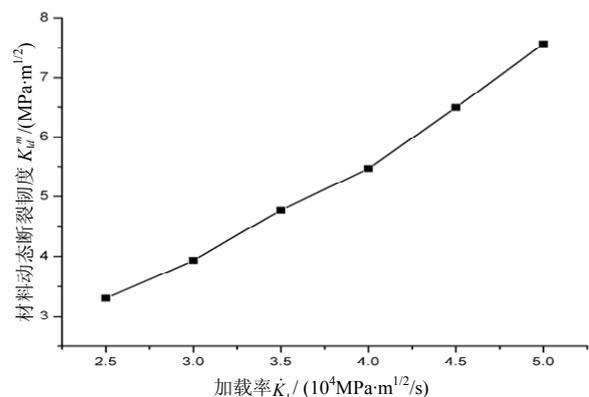


图12 不同加载速率下大理岩的材料动态断裂韧度

Fig.12 The dynamic fracture toughness of the marble material under different loading rates

## 4 结论

(1) 首先对动态断裂韧度随加载率的变化进行线性回归, 得到三组几何相似试样的动态断裂韧度随加载率变化趋势的回归公式, 利用此公式可以计算出不同尺寸几何相似的试样在同一加载率下的动态断裂韧度。

(2) 将 Bazant 的静态尺度律公式应用到动态, 并对相同加载率下不同尺寸试样的断裂韧度再次进行线性回归, 从而可以预测不同加载率下的材料动态断裂韧度。

(3) 在加载率为  $2.5 \times 10^4 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s} - 5.0 \times 10^4 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$  时, 大理岩的材料断裂韧度随加载率的增大而增大。

### 参考文献:

- [1] Bazant Z P, Chen E P. Scaling of structure failure [J]. Applied Mechanics Review, 1997, 50: 593—627.
- [2] Petrov Y V, Morozov N Y, Smirnov V I. Structural macro mechanics approach in dynamics of fracture [J]. Fatigue Fracture Engineering Material Structure, 2003, 26: 363—372.
- [3] Gonzalo Ruiz, Michael Ortiz, Anna Pandolfi. Three-dimensional finite-element simulation of the dynamic Brazilian tests on concrete cylinders [J]. International Journal of Numerical Method in Engineering, 2000, 48: 963—994.
- [4] Elfahal M M, Krauthammer T. Dynamic size effect in normal and high-strength concrete cylinders [J]. ACI Materials Journal, 2005, 102(2): 77—85.
- [5] Elfahal M M, Krauthammer T, Ohno T, Beppu M, Mindess S. Size effect for normal strength concrete cylinders subjected to axial impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31: 461—481.
- [6] Krauthammer T, Elfahal M M, Lim J H, Ohno T, Beppu M, Markeset G. Size effect in high-strength concrete cylinders subjected to axial impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28: 1001—1016.
- [7] Bindiganavile V, Banthia N. Discussion a comment on the paper: 'Size effect for high-strength concrete cylinders subjected to axial impact' by T. Krauthammer et al [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30: 873—875.
- [8] Elfahal M M, Krauthammer T. Authors' reply to comment on the paper: 'Size effect for high-strength concrete cylinders subjected to axial impact' [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30: 877—880.
- [9] Zhang Z X, Kou S Q, Yu J, Yu Y, Jiang L G, Lindqvist P A. Effects of loading rate on rock fracture [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36: 597—611.
- [10] 李战鲁, 王启智. 加载速率对岩石动态断裂韧度影响的实验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2116—2120.
- [11] Li Zhanlu, Wang Qizhi. Experimental research on effect of loading rate for dynamic fracture toughness of rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2116—2120. (in Chinese)
- [12] ISRM. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract, 1978, 15: 99—103.
- [13] 王启智, 吴礼舟. 用平台巴西圆盘试样确定脆性岩石的弹性模量、拉伸强度和断裂韧度——第二部分: 实验结果[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 199—204.
- [14] Wang Qizhi, Wu Lizhou. Determination of elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks by using flattened Brazilian disk specimen—part II: experimental results [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 199—204. (in Chinese)
- [15] Hughes M L, Tedesco J W, Ross C A. Numerical analysis of high strain rate splitting-tensile tests [J]. Computers & Structures, 1993, 47: 653—671.
- [16] Lambert D E, Ross C A. Strain rate effects on dynamic fracture and strength [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24: 985—998.
- [17] 山内良昭, 中野元博, 岸田敬三, 岡部達哉. 中央切欠円板を用いた混合モード衝撃下におけるぜい性材料の破壊じん性の測定[J]. 材料, 2000, 49(12): 1324—1329.
- [18] Yoshiaki Y, Motohiro N, Keizo K, Tatsuya O. Measurement of fracture toughness for brittle materials under mixed-mode impact loading using center-notched disk specimen [J]. Journal of Society of Material Science, Japan, 2000, 49(12): 1324—1329. (in Japanese)
- [19] 张盛, 王启智. 采用中心圆孔裂缝平台圆盘确定岩石的动态断裂韧度[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 723—728.
- [20] Zhang Sheng, Wang Qizhi. Method for determination of dynamic fracture toughness of rock using holed-cracked flattened disc specimen [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 723—728. (in Chinese)
- [21] 李伟, 谢和平, 王启智. 大理岩动态拉伸强度及弹性模量的 SHPB 实验研究[J]. 实验力学, 2005, 20(2): 200—206.
- [22] Li Wei, Xie Heping, Wang Qizhi. Experimental study for dynamic tensile strength and elastic modulus of marble using SHPB [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(2): 200—206. (in Chinese)
- [23] Gomez J T, Shukla A, Sharma A. Static and dynamic behavior of concrete and granite in tension with damage [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2001, 36: 37—49.
- [24] 吴智敏, 赵国藩. 混凝土断裂韧度的尺寸效应研究[J]. 工业建筑, 1995, 25(4): 21—25.
- [25] Wu Zhimin, Zhao Guofan. Studies on size effect of fracture toughness of concrete [J]. Industrial Construction. 1995, 25(4): 21—25. (in Chinese)
- [26] Bazant Z P, Kazemi M T. Size dependence of concrete fracture energy determined by RILEM work-of-fracture method [J]. International Journal of Fracture, 1991, 51: 121—138.