

文章编号: 1001-1455(2008)05-0455-07

用短棒试件测试无烟煤的动态断裂韧度*

单仁亮,高文蛟,程先锋,刘天宇
(中国矿业大学土木工程系,北京 100083)

摘要:介绍了设计的新型圆台式压头及配套的衬片加载部件,推导了采用新的加载部件进行冲击断裂实验时的断裂韧度计算公式。采用 SHPB 实验装置,用新加载部件对带有 V 形切口的无烟煤短棒试件的裂纹尖端施加拉伸载荷,测定了无烟煤的动态断裂韧度。结合准静态实验数据得到了无烟煤断裂韧度随加载率 $\lg \dot{F}$ 的总体变化规律:当 $\lg \dot{F} < 6$ 时,无烟煤的断裂韧度缓慢上升,但当 $\lg \dot{F} > 6$ 以后,无烟煤的断裂韧度随加载率的增加快速增大。实验表明:圆台式加载比刀刃式加载更具优越性和适应性,是测试岩石类材料短棒试件动态断裂韧度较好的方法。

关键词: 固体力学;动态断裂韧度;圆台式加载;无烟煤;短棒试件;SHPB 实验

中图分类号: O347.3 **国标学科代码:** 130·1545 **文献标志码:** A

1 引 言

岩石力学研究中,岩石材料的各种力学性能参数的测定占有非常重要的地位,这些力学参数对硐室、隧道、边坡及岩石类工程构筑物的稳定性分析、设计和岩石破碎过程(如钻孔、爆破、隧道掘进、岩石切割与粉碎)均是不可缺少的先决条件。岩石动态断裂韧度是岩石材料在动载荷作用下,动态应力强度因子的极限值,是材料的韧性参数。它作为现代损伤容限设计中的材料参数,可以弥补设计中材料基本参数没有考虑惯性效应及加载率的影响,不能预测动载作用下材料及结构的安全性。因此,在岩石断裂力学方面,进行了大量的研究,作为岩石材料基本参数断裂韧度的测试也是研究的热点^[1-7]。继研究无烟煤的准静态断裂韧度^[8]之后,本文中将继续研究它的动态断裂韧度测试问题,为爆破采煤、综掘机割煤的刀具选择、割煤速度、割煤厚度、采场顶板地压力管理、无烟煤块率的提高等设计、研究提供参考。

Hopkinson 压杆实验技术经过多年的发展越来越成熟,数据分析也随计算机技术的发展也越来越方便,数据计算精度也越来越高,因此,SHPB 实验装置用来测试材料的动态断裂韧度方便简捷,且应变率变化范围大,近几年很受重视。用 SHPB 装置测试动态断裂韧度,有应力波反射拉伸加载法^[9]、尖劈冲击加载法^[10-11]、旋转圆盘直接拉伸法^[12]等,其中尖劈冲击加载法应用较广泛,如张宗贤^[3]就用刀刃式压头来测试大理岩、辉长岩等岩石的动态断裂韧度。本文中应用 SHPB 实验装置,采用不同的压头对无烟煤短棒试件进行加载,测试其动态断裂韧度,探讨不同压头对测试结果的影响。

2 实验方法

2.1 试样的采集与准备

由于无烟煤是一种强度较低、层理、节理裂隙、微小孔洞非常丰富的多孔介质,这些层理、节理裂隙和微小孔洞的存在,严重影响无烟煤的物理力学性能。因此,对无烟煤进行动态断裂韧度测试,其主要目的是了解其动态力学性质,把实验结果用于煤巷支护设计、提高无烟煤块率,直接指导无烟煤的生产和采煤机具的设计。因此,在进行无烟煤的动力学实验时,为了使实验结果和准静态条件下的实验结果具有可比性,所使用的实验试样与准静态的实验试样均是在同一块质量大于 400 kg 且较完整的大块煤样

* 收稿日期: 2007-04-03; 修回日期: 2007-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(50374070)

作者简介: 单仁亮(1964—),男,博士,教授,博士生导师。

上所取得的,取样方式、方向等都与准静态实验时保持一致。大块样品及实验前所取的煤芯试样图、试样实测的物理力学参数表、按照国际岩石力学学会^[13]推荐的 V 形切口短棒试件的要求、几何形状示意图及加工后尺寸等均见文献^[8]。

2.2 实验方法

2.2.1 实验系统

利用 SHPB 实验装置实现对短棒无烟煤试件的冲击加载,实验测试系统如图 1 所示^[14]。实验前,按要求将衬片用环氧树脂贴到加工好的试件上,中间所留缝隙不大于 2 mm,且和试件的中间切缝平行对齐,贴好后保养 24 h 以上,保证粘贴牢固,如图 2(a)、(c)所示。实验时,在压杆之间将压头与试件如图 2(b)、(d)所示的连接好。

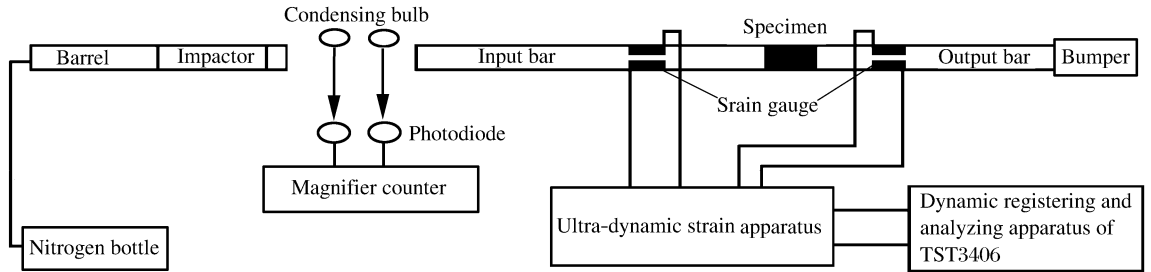
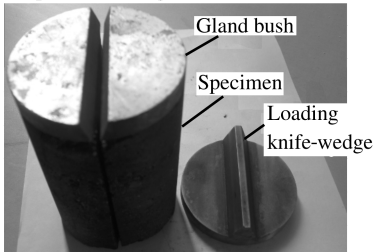


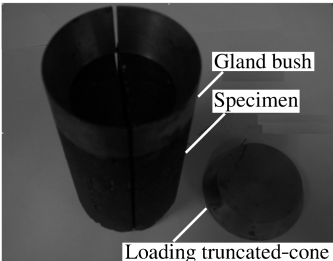
图 1 无烟煤动态断裂韧性 SHPB 测试系统

Fig. 1 Dynamic fracture toughness testing system of anthracite using SHPB

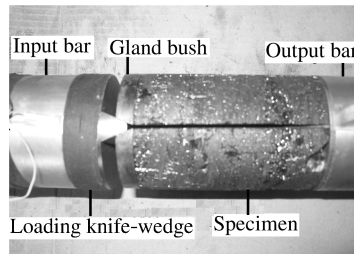
(a) Loading knife-wedge, specimen, and gland bush



(c) Loading truncated-cone, specimen and gland bush



(b) Knife-wedge loading



(d) Truncated-cone loading

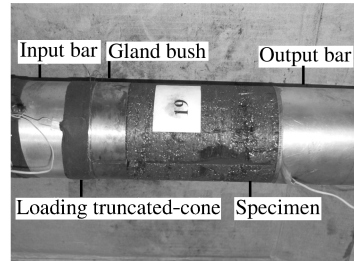


图 2 加载部件、试件及压杆之间的连接

Fig. 2 Connection of loading components, specimen and pressure bar

2.2.2 压头设计

在 SHPB 装置上测试短棒试件的动态断裂韧性时,关键是设计一个恰当的压头,压头可以设计成图 2(a)

所示的刀刃式^[3]。刀刃的夹角为 46°,衬片由直径为 75 mm 的钢板切开而成,切缝宽度为 2 mm,其中心 V 形槽的夹角为 42°,材料为 45 钢。

从图 2(a)可以看出,刀刃式压头的两肩与试件的连接处距离较近,当子弹高速撞入射杆后,入射杆快速向试件运动时,由于压头的两肩到试件距离有限,压头两肩很容易撞到被楔开的试件上,使试件受到第二次撞击,并可能产生二次破碎,因此,这种压头的撞击速度不能高,尤其是对强度较低的大直径煤样。为了避免刀刃式加载装置的不足,设计了图 2(c)所示的圆台式加载装置,圆台的锥角也为 46°,衬片为空心圆台切开而成,切缝为 2 mm,其内锥角为 42°。为了对比这两种压头的优、劣,在实验时,两种压头均被采用,且对所测的数据进行比较。

2.2.3 动态断裂韧性计算

短棒试件用 SHPB 实验装置测试动态断裂韧性的计算,还没有统一的方法。实验时选用的撞击杆长度 $L = 800$ mm,其撞击入射杆后在入射杆中产生的应力波波长 $\lambda = 2L$ 远大于压头和试件的总长度 (15~16 倍),因此,实验中可以近似认为入射波在对压头、试件的加载过程是准静态的。所以,动态断裂韧性计算仍是在 ISRM 建议方法的基础上进行,即按照准静态处理方法进行计算。

根据 ISRM 方法推荐的 I 级实验计算短棒试件断裂韧度公式

$$K_{ID} = 24C_K F_C / D^{3/2} \quad (1)$$

式中： K_{ID} 为无烟煤的动态断裂韧度， C_K 为试件加工误差的修正系数， D 为试件的直径， F_C 为作用在试件端部的临界拉伸载荷。

根据实验计算结果^[8]：试件加工几何上的误差对无烟煤断裂韧度值影响不大，造成的误差最大约 2.4%，因此，在计算断裂韧度时忽略几何修正的计算。即按下式计算

$$K_{ID} = 24F_C / D^{3/2} \quad (2)$$

作用在试件端部的临界拉伸载荷 F_C 按如下方法求取。

(1) 使用刀刃式加载时，作用在试件端部两边的最大拉伸载荷^[3]

$$F_C = P_{max} / [2 \tan(\alpha/2 + \arctan \mu)] \quad (3)$$

式中： P_{max} 为压头施加给试件的最大轴向力， $\alpha = 46^\circ$ 为压头的夹角或锥角， $\mu = 0.15$ 为压头和衬板之间的摩擦系数。

(2) 使用圆台式加载时，计算作用在试件端部两边的最大拉伸载荷 F_C ，目前还没有具体计算公式。下面用准静态力学方法推导 F_C 的计算式。

采用隔离法，圆台受力如图 3 所示。设圆台受到应力波的纵向作用力 P ，衬片的反作用力 N ，衬片对圆台的摩擦力 f ，当试件破裂时，在准静态条件下隔离体应处于力平衡状态。在竖直方向有

$$P_{max} = \int_0^{2\pi} \int_0^L [N \sin(\alpha/2) + \mu N \cos(\alpha/2)] r d\theta dl = \int_0^{2\pi} \int_{R-H\tan(\alpha/2)}^R [N + \mu N \cot(\alpha/2)] r d\theta dr \quad (4)$$

则有

$$N = \frac{P_{max}}{\pi [1 + \mu \cot(\alpha/2)] [2RH \tan(\alpha/2) - H^2 \tan^2(\alpha/2)]} \quad (5)$$

圆台给一个衬片的最大水平作用力 F_C 与该衬片的反作用力 N 、 f 在水平方向的作用力平衡。即

$$F_C = \int_0^\pi \int_0^L [N \cos(\alpha/2) - \mu N \sin(\alpha/2)] r \sin \theta d\theta dl = \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_{R-H\tan(\alpha/2)}^R N [\cot(\alpha/2) - \mu] r dr \quad (6)$$

对(6)式积分，再把(5)式代入可得圆台式压头在冲击时，作用在试件端部两边的最大拉伸载荷

$$F_C = P_{max} / [\pi \tan(\alpha/2 - \arctan \mu)] \quad (7)$$

SHPB 测试系统中，撞击杆撞击入射杆后在入射杆中产生一个压缩应力波，压缩波经入射杆传播到加载部件，然后通过加载部件对试件实施加载。由于圆台是钢制的且为变截面，而入射杆是铝杆，应力波在入射杆和加载部件之间要发生反射和透射，同样，在加载部件和试件之间，试件和透射杆之间都会发生反射和透射，这个过程很复杂，难以定量研究。但由于入射波长远大于加载部件与试件的长度之和，从准静态的观点看，试件两端上的力是相等的，即压头作用到试件上的力 P 等于透射杆中的力

$$P = EA \epsilon_T(t) \quad (8)$$

式中： P 为外力， E 为透射杆的弹性模量， A 为透射杆的截面积， ϵ_T 为实测的透射杆上的微应变，压头施加给试件的最大轴向作用力 P_{max} 就是透射杆中的最大力，即

$$P_{max} = EA \epsilon_{T,max} \quad (9)$$

式中： $\epsilon_{T,max}$ 为透射波的最大峰值。因此，无烟煤在 SHPB 上测试动态断裂韧度的计算，就可以通过透射杆中所测的应变来确定。联立式(2)、(3)、(7)、(9)，可以求得无烟煤动态断裂韧度的计算式

$$\text{刀刃式加载} \quad K_{ID} = 12EA \epsilon_{T,max} / [D^{3/2} \tan(\alpha/2 + \arctan \mu)] \quad (10)$$

$$\text{圆台式加载} \quad K_{ID} = 24EA \epsilon_{T,max} / [\pi D^{3/2} \tan(\alpha/2 - \arctan \mu)] \quad (11)$$

至此，刀刃式加载和圆台式加载，只需要测得透射杆的应变最大值，就可得到被测试件的断裂韧度。

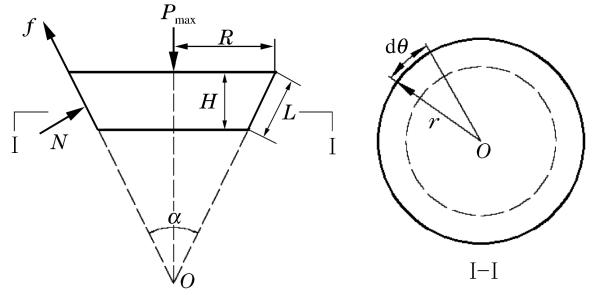


图 3 加载圆台的受力分析图

Fig. 3 Force analysis sketch of a loading truncated cone

3 实验结果及分析

3.1 实验结果

共对 17 个无烟煤试件进行了实验,其中,6 个试件采用刀刃式加载方式,其余 11 个试件用圆台式加载方式加载。实验后发现试件韧带全部被拉开,破裂后的状态如图 4 所示。实验时所测得的典型应力波形如图 5 所示。

从图 4~5 可以看出,圆台式加载比刀刃式加载更具优越性。首先,刀刃式加载中压头的两肩离试件太近,当子弹速度大于 3.60 m/s 时,压头的两肩与试件的两翼容易产生二次碰撞,对煤样产生严重的破坏,如试件 D21。二次碰撞还容易产生错误的的数据,影响数据的判读。而圆台式加载不存在这个问题,在本实验中冲击速度达到 3.85 m/s 后,楔开的试件两翼还能保持完整,说明圆台式加载可以适用于较大冲击速度的实验,能测到更高应变率下的断裂韧度值。其次,圆台式加载明显比刀刃式加载的透射波信号强,说明圆台式加载有利于应力波的传递,当透射波中的干扰信号一定时,可以减少干扰信号在真实有用信号中的比例,从而提高实验精度。另外,实验过程中夹放试件时,如果试件受到同样的夹制作用,圆台式加载比刀刃式加载更易夹稳,使试件更易与压杆之间成一水平直线,减小弯曲波的影响,使实验数据更精确。

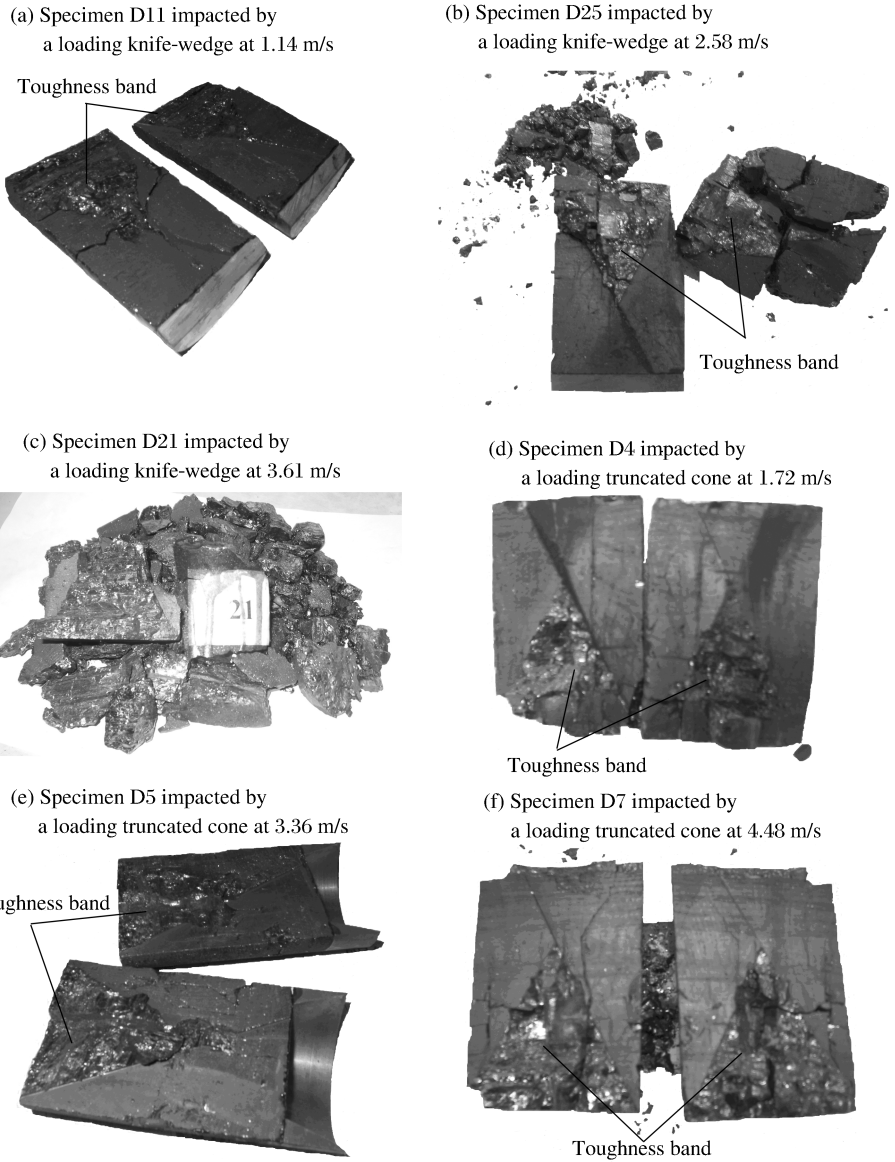


图 4 冲击破裂状况

Fig. 4 Photographs of fractured anthracite after impact

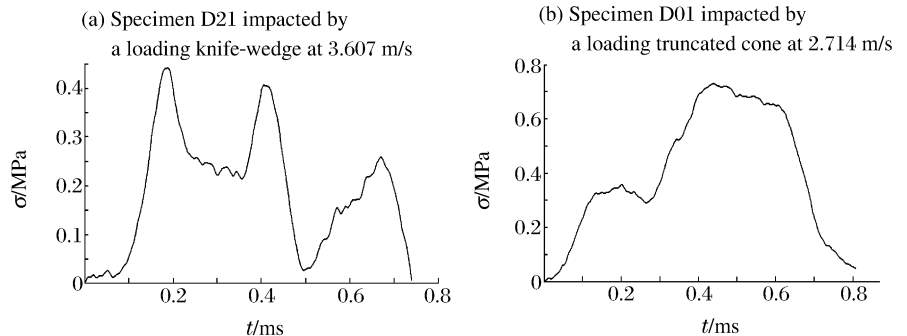


图 5 实验测得的典型加载应力波形

Fig. 5 Measured typical loading stress waves

从图 5 实验加载应力波形图来看, 刀刃式加载时, 无烟煤的起裂应力要高于应用圆台式加载时的起裂应力, 由于其起裂应力较高使裂纹开裂后的扩展速度高于圆台式加载的速度, 因此裂纹开裂后应力有一个明显的下降过程。圆台式加载的加载应力波形图和准静态加载时相似, 也就是起裂后应力稍微回落, 然后应力又逐渐上升达到最大值, 因而, 试件起裂的时刻为应力回落的时刻。

3.2 数据分析

用短棒试件对无烟煤不同加载率下的断裂韧度进行了测试, 其中准静态实验做了 10 个试件; 冲击动态实验做了 17 个试件。计算时以加在试件两翼顶端的拉力 F 随时间 t 的平均变化率作为加载率, 即载荷 F 从零到断裂时最大拉力的变化率 dF/dt 。准静态实验的 dF/dt 为: I 型加载实验是最大拉力 F_{max} 除以从零升到最大拉力时所用时间, II 型加载实验只计算载荷达到最大拉力时的那个循环, 也是拉伸载荷除以从零升到最大拉力时所用时间; 冲击动态实验的 dF/dt 为: 透射杆中的最大压应力经换算成拉力 F_c 以后, 除以从零升到最大压应力时所用时间。根据该计算规则, 测试无烟煤断裂韧度时的加载率及对应的断裂韧度见表 1~2, 准静态断裂韧度值只进行几何修正不进行塑性修正, 其中 \dot{S} 为加载位移率, v 为冲击速度。断裂韧度随加载率的变化关系见图 6。

表 1 无烟煤准静态断裂韧度测试数据

Table 1 Measured quasi-static fracture toughness of anthracite

试件编号	加载水平	$\dot{S}/(\text{mm}/\text{min})$	$\dot{F}/(\text{N}/\text{s})$	$\lg \dot{F}$	$K_{ID}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
D29	II	1	6.966	0.843 0	0.071
D32	I		2.949	0.469 7	0.083
D16	I		1.784	0.251 4	0.134
D26	II		5.145	0.711 4	0.152
D09	II	10	25.909	1.413 4	0.144
D20	II		57.929	1.762 9	0.179
D27	I		83.075	1.919 5	0.209
D30		500	496.808	2.696 2	0.143
D15	I		217.436	2.337 3	0.171
D28			324.414	2.511 1	0.186

表 2 无烟煤动态断裂韧度测试数据

Table 2 Measured dynamic fracture toughness of anthracite

试件编号	加载方式	$v_0/(\text{m}/\text{s})$	$\dot{F}/(\text{N}/\text{s})$	$\lg \dot{F}$	$K_{ID}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	备注
D13	刀刃式压头	4.502 8	$5.244 6 \times 10^7$	7.719 7	8.535 7	严重破坏
D21		3.606 5	$8.441 1 \times 10^6$	6.926 4	1.854 3	严重破坏
D31		2.796 0	$1.546 9 \times 10^7$	7.189 5	3.145 1	完整
D25		2.579 7	$2.099 1 \times 10^7$	7.322 0	2.649 0	完整
D33		1.332 2	$5.193 3 \times 10^6$	6.715 4	1.068 0	完整
D11		1.138 4	$5.695 2 \times 10^6$	6.755 5	0.845 2	完整
D07		4.478 5	$4.716 3 \times 10^7$	7.673 6	4.298 5	严重破坏
D14		3.852 8	$5.740 4 \times 10^6$	6.758 9	3.722 7	完整
D19		3.823 9	$2.239 9 \times 10^7$	7.350 2	2.879 0	完整
D06		3.716 2	$9.482 1 \times 10^6$	6.976 9	4.044 0	完整
D08		3.483 2	$4.617 4 \times 10^6$	6.664 4	2.228 2	轻微破坏
D05	3.358 9	$9.074 2 \times 10^6$	6.957 8	4.400 2	完整	
D12	3.101 7	$3.813 3 \times 10^6$	6.581 3	2.530 9	轻微破坏	
D01	圆台式压头	2.714 5	$3.802 7 \times 10^6$	6.580 1	1.955 1	完整
D03		2.489 0	$2.475 2 \times 10^6$	6.393 6	1.339 1	完整
D23		2.023 7	$1.350 7 \times 10^6$	6.130 6	0.883 8	完整
D04		1.723 9	$2.817 8 \times 10^6$	6.449 9	1.277 5	完整

断裂韧度的测试中,材料的断裂韧度不仅与材料的性质有关外,还与测试温度、应力状态有关。加载速率不仅提高了裂纹扩展的驱动力,同时还对材料抗断裂能力——断裂韧度有显著影响。实验表明,中、低强度材料随应变变率 $\lg \dot{F}$ (或者加载速率 dF/dt) 的增加,塑性降低,强度增高,而断裂韧度降低^[15]。但从图6可以得到,无烟煤的断裂韧度值总体上随着加载率的增加而增加,并且增加的速度越来越快,但在 $\lg \dot{F} < 6$ 时,其断裂韧度增加缓慢。

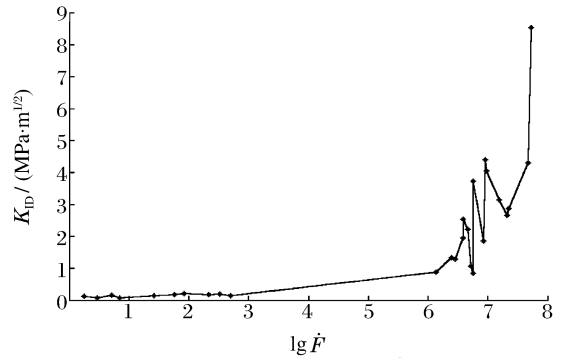


图6 无烟煤断裂韧度随加载率的变化

Fig. 6 Fracture toughness of anthracite varying with loading rate

4 结论

(1) 采用自行设计的圆台式加载部件,实现了应用 SHPB 装置对带有 V 形切口的无烟煤短棒试件的裂纹尖端施加拉伸载荷的目的,推导了采用新的加载部件进行冲击断裂实验时断裂韧度的计算式。

(2) 测定了无烟煤的动态断裂韧度,并且结合准静态实验数据得到了无烟煤断裂韧度随加载率 $\lg \dot{F}$ 的变化规律曲线。发现:当 $\lg \dot{F} > 6$ 以后,无烟煤的断裂韧度随加载率的增加而快速增大,当 $\lg \dot{F} < 6$ 时,断裂韧度缓慢提高。

(3) 试验表明:圆台式加载比刀刃式加载更具优越性和适应性,为软岩类材料短棒试件的动态断裂韧度测试提供了较好的方法。

参考文献:

- [1] 赵晓明,孙宗祺.用万能材料试验机进行岩石断裂韧度试验研究[J].中南矿冶学院学报,1990,21(5):467-472.
ZHAO Xiao-ming, SUN Zong-qi. Testing and research of rock fracture toughness with common universal material testing machine[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 1990,21(5):467-472.
- [2] 颜玉定,尹祥础,廖远群,等.某些测试条件对岩石断裂韧度 K_{Ic} 的影响[J].岩石力学与工程学报,1991,10(4):382-386.
YAN Yu-ding, YIN Xiang-chu, LIAO Yuan-qun, et al. Effect of certain test conditions upon rock fracture toughness K_{Ic} [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991,10(4):382-386.
- [3] 张宗贤,赵清,寇绍全,等.用短棒试件测定岩石的动静态断裂韧度[J].北京科技大学学报,1992,14(2):123-127.
ZHANG Zong-xian, ZHAO Qing, KOU Shao-quan, et al. Measuring static/dynamic fracture toughness of rock using a short rod specimen[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1992,14(2):123-127.
- [4] 段绍伟.切缝尺寸对大理岩动态断裂韧度的影响[J].湘潭矿业学院学报,1997,12(3):91-94.
DUAN Shao-wei. Influence of cut dimension on marble's dynamic fracture toughness[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 1997,12(3):91-94.
- [5] 张志强,鲜学福.用带中心孔巴西圆盘试样测定岩石断裂韧度的研究[J].重庆大学学报(自然科学版),1998,21(2):68-74.
ZHANG Zhi-qiang, XIAN Xue-fu. Research of measuring rock fracture toughness with brazilian disc specimen having a central hole[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science), 1998,21(2):68-74.
- [6] WANG Qi-zhi, JIA Xue-ming, KOU Shao-quan. More accurate stress intensity factor derived by finite element analysis for the ISRM suggested rock fracture toughness specimen—CCNBD[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003,40(2):233-241.
- [7] 吴礼舟,王启智,贾学明.用人字形切槽巴西盘(CCNBD)确定岩石断裂韧度及其尺度律[J].岩石力学与工程学报,2004,23(3):383-390.
WU Li-zhou, WANG Qi-zhi, JIA Xue-ming. Determination of model rock fracture toughness with cracked chevron

- notched brazilian disc(CCNBD) and application of size effect law[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(3):383-390.
- [8] 高文蛟,单仁亮,朱永,等.用短棒试件测试无烟煤准静态断裂韧度试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增刊2):3919-3926.
GAO Wen-jiao, SHAN Ren-liang, ZHU Yong, et al. Determining quasi-static fracture toughness of anthracite using short rod specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(Supp2):3919-3926.
- [9] Kothoff J F. Fracture behavior under high rates of loading[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1986,23(1):289-298.
- [10] Bassim M N. Investigation of dynamic J_{Id} for alloy steel weldments using the split Hopkinson bar[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1986,14(5):229-235.
- [11] Bayoumi M R, Kleppaczko J R, Bassim M N. Determination of fracture toughness JIC under quasi-static and dynamic loading conditions using wedge loaded specimens[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1984,12(5):316-323.
- [12] XIA Yuan-ming, RAO Shi-guo, YANG Bao-chang. A novel method for measuring plane stress dynamic fracture toughness[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1994,48(1):17-24.
- [13] Ouchterlony F. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1988,25(2):71-96.
- [14] 单仁亮,陈石林,李宝强.花岗岩冲击全程本构特性的实验研究[J].爆炸与冲击,2000,20(1):32-38.
SHAN Ren-liang, CHEN Shi-lin, LI Bao-qiang. Experimental study of granite constitutive properties under uniaxial impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(1):32-38.
- [15] 范天佑.断裂动力学引论[M].北京:北京理工大学出版社,1990:51-133.

Determining dynamic fracture toughness of anthracite by using a short-rod specimen

SHAN Ren-liang^{*}, GAO Wen-jiao, CHENG Xian-feng, LIU Tian-yu
(*Department of Civil Engineering, China University of Mining and Technology,
Beijing 10083, China*)

Abstract: This paper presents a newly-designed loading truncated cone, its associated two gland bushes, and an analytical formula for testing dynamic fracture toughness of anthracite. The impact fracture tests were carried out by using the SHPB and the newly-designed loading components. The dynamic fracture toughness of anthracite was measured on the short-bar anthracite specimens with the V-shaped notch. The relationship between the fracture toughness and loading rate $\lg \dot{F}$ of anthracite was obtained by combining with the experimental data gained from the quasi-static tests. The fracture toughness of anthracite increases gradually when $\lg \dot{F} < 6$, and it increases rapidly when $\lg \dot{F} > 6$. The tests prove that the newly-developed truncated cone is better than the conventional knife-wedge for measuring the dynamic fracture toughness of short-rod specimens of rocklike materials.

Key words: solid mechanics; dynamic fracture toughness; truncated cone loading; anthracite; short-bar specimens; SHPB test

* Corresponding author: SHAN Ren-liang
E-mail address: srl@mail.cumtb.edu.cn
Telephone: 86-10-62331019