曹丽丽,浦海,李明,等. 煤系砂岩动态拉伸破坏及能量耗散特征的试验研究[J]. 煤炭学报,2017,42(2):492-499. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.6030

Cao Lili,Pu Hai,Li Ming,et al. Experimental research on the dynamic tensile fracture and the energy dissipation characteristics of coal-serial sandstone[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(2):492-499. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.6030

煤系砂岩动态拉伸破坏及能量耗散特征的试验研究

曹丽丽[1],浦　海[1,2],李　明[1],茅献彪[2],张连英[3]

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州　221116;2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院,江苏 徐州　221116;3. 徐州工程学院 土木工程学院,江苏 徐州　221018)

摘　要: 我国深部开采过程中,围岩处于显著的高应力扰动环境。动载作用下岩石拉伸力学特性的研究,是实现矿井围岩稳定性有效控制及安全生产的重要基础。利用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验系统,对煤层顶板砂岩进行动态巴西圆盘试验。研究结果表明:砂岩动态拉伸强度随加载速率的升高逐渐增强,这种依赖性在较高加载速率时更加显著;砂岩动态拉伸破坏经历主裂纹产生、微裂纹发育及裂纹相互贯穿 3 个阶段;随着加载速率的升高,试样破坏方式逐渐从单一张拉破坏逐渐发展为张拉破坏与局部剪切破坏共存,碎块平均体积逐渐减小,破坏程度逐渐提高;试验过程中,试样破坏所需的耗散能量随加载速率的升高逐渐增加,并且其占输入能量的比例逐渐提高,即砂岩破坏过程中能量利用率逐渐提高。

关键词: 煤系砂岩;动态拉伸;巴西圆盘;能量耗散

中图分类号: TD315　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253-9993(2017)02-0492-08

Experimental research on the dynamic tensile fracture and the energy dissipation characteristics of coal-serial sandstone

CAO Li-li[1],PU Hai[1,2],LI Ming[1],MAO Xian-biao[2],ZHANG Lian-ying[3]

(1. *State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering,China University of Mining and Technology,Xuzhou*　221116,*China*;2. *School of Mechanics and Civil Engineering,China University of Mining and Technology,Xuzhou*　221116,*China*;3. *School of Civil Engineering,Xuzhou Institute of Technology,Xuzhou*　221018,*China*)

Abstract: The surrounding rock is in a high-stress disturbed environment in the process of deep mining. A detailed study on the tensile mechanical properties of rock under dynamic loading is an important foundation for the effective control of the stability of surrounding rock and safe production. Dynamic Brazilian disc tests on coal roof sandstone were performed through Hopkinson pressure bar (SHPB) test system. The following conclusions can be drawn: the dynamic tensile strength of sandstone gradually increases as the loading rate increases, which is more significant at higher loading rates; the dynamic tensile failure of sandstone can be divided into three stages: the generation of main crack, the development of micro-crack and crack penetration; under the influence of increasing loading rate, the failure mode of the specimen gradually develops from the single tensile failure to the coexistence between tensile failure and local shear failure with decreasing average fragment size and more obvious deterioration; in addition, the dissipated energy required by the failure of the specimen increases with the increasing loading rate, and the proportion of input energy

收稿日期: 2016-08-10　　**修回日期:** 2016-10-26　　**责任编辑:** 韩晋平

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2015CB251600);国家自然科学基金资助项目(51421003);国家自然科学基金优秀青年基金资助项目(51322401)

作者简介: 曹丽丽(1986—),女,山东临沂人,博士研究生。E-mail:caolili429@126.com。**通讯作者:** 浦　海(1978—),男,江苏盐城人,教授,博士生导师。Tel:0516-83885205,E-mail:haipu@cumt.edu.cn

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

gradually augments, that is, the energy utilization rate of sandstone gradually increases.

Key words: coal-serial sandstone; dynamic tensile; Brazilian disc; energy dissipation

近年来,随着浅部资源的减少,煤炭资源逐渐进入深部开采,高应力扰动对煤矿安全生产提出严峻的挑战[1]。此外,巷道爆破掘进、机械割煤等矿山开采活动所形成的应力波对巷道围岩产生强烈的扰动作用,严重影响巷道及工作面附近围岩稳定性[2-3]。动载作用下煤系岩层介质力学响应是决定巷道围岩结构稳定性与资源安全高效开采的关键。由于岩石抗拉强度远小于抗压强度,在实际工程中岩体结构主要因为岩石张拉破坏造成[4],所以动载作用下煤系岩层介质拉伸力学性能研究的实际意义更大。

岩石属典型的脆性材料,通过直接拉伸方法测试其抗拉性能较为困难,因此,大多采用间接拉伸测试岩石抗拉力学性能,其中,巴西圆盘试验是当前普遍采用的一种试验方法[5]。采用这一方法,国内外学者对不同类型岩石的静态拉伸力学性能进行了测试,获得了岩石抗拉强度及其破坏特征等[6-9]。在静态巴西圆盘试验基础上,学者利用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验系统进行巴西圆盘试验,实现对岩石动态抗拉性能的试验测试。许金余等[10]对斜长角闪岩、绢云母石英片岩和砂岩动态拉伸力学性能进行测试,结果表明,岩石拉伸力学性能具有较强的应变率敏感性,但不同岩石力学性能随应变率变化规律存在差异; 宋小林等[11]通过动态巴西圆盘试验,指出大理岩的动态抗拉强度随应变率的增加而提高; Dai 等[12-14]通过试验测试,得到加载速率能够有效提高花岗岩的动态抗拉强度; 满轲等[15]对不同赋存深度的玄武岩试件进行动态断裂韧性和单轴抗拉强度测试,定量分析了两者之间的关系; 李地元等[16]对黄砂岩动态力学性能进行了测试,给出层理面夹角对其动态抗拉性能的影响; 卢玉斌等[17]利用 SHPB 试验系统,测试证明混凝土抗拉强度随加载速率的升高而提高,而微裂纹惯性是产生这一效应的根本原因。除了试验研究之外,一些学者采用理论方法对动态巴西圆盘试验中试样应力分布进行研究[18],也有学者利用数值模拟手段对岩石动态拉伸力学特性进行分析[19-20]。

当前研究成果中,岩石动态拉伸力学性能的研究对象大多为大理岩、花岗岩等,煤系岩层介质动态拉伸力学性能系统性研究成果较少。然而煤系岩层是一类典型的沉积岩,与大理岩、花岗岩相比,其物质组分、充填物种类更加复杂,内部节理、裂纹、孔洞等缺陷更加丰富,力学性能具有显著的应变率效应[21-22]。近年来,随着煤矿动力扰动灾害事故的增多,一些学者开始对煤系介质动态拉伸力学性能展开研究,平琦等[23]通过 SHPB 试验系统对煤系砂岩进行了巴西圆盘试验,给出了砂岩动态拉伸强度随平均应变率的关系; 赵毅鑫等[24]对煤样的动态拉伸破坏过程中能量耗散特征进行了讨论。目前,与其他类型岩石相比,煤系岩层介质动态拉伸力学性能研究成果较少,对工程开展的指导有限。为了进一步丰富煤系岩层介质动态拉伸力学性能研究成果,笔者将在现有研究基础上,以煤系岩层介质中典型煤层顶板砂岩为研究对象,对其动态抗拉力学性能及其破坏过程中的能量耗散规律进行研究,为深部矿山资源开采过程中,巷道掘进爆破参数、支护结构设计提供指导。

1　煤系砂岩动态拉伸试验

1.1　试样采集及制备

本文试验采用岩样为典型煤层顶板砂岩,取自徐州夹河矿 -1 000 m 掘进工作面,其基本物理力学参数见表 1。通过 X 射线衍射试验,得到自然状态下该岩石物质组成主要包括: 长石(73.00%)、高岭石(11.60%)、石英(10.48%)、微斜长石(4.50%); 利用扫描电镜试验(SEM)系统,观测得到了自然状态下煤系砂岩内部细观结构,如图 1 所示。按《岩石试验方法标准》(GB50218—94),将岩样加工为直径 50 mm,高 25 mm 的圆柱体。

表 1　煤系砂岩基本物理力学特性参数

Table 1　Physical and mechanical properties of coal-serial sandstone

密度 ρ/(kg·m^{-3})	纵波波速 v/(m·s^{-1})	杨氏模量 E/GPa	泊松比 μ	抗压强度 σ_c/MPa	抗拉强度 σ_t/MPa
2 450	2 500	6.36	0.25	74.65	3.62

1.2　试验设备

冲击加载试验采用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验系统,系统装置组成如图 2 所示。SHPB 试验系统包括加载驱动系统、压杆系统、能量吸收系

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

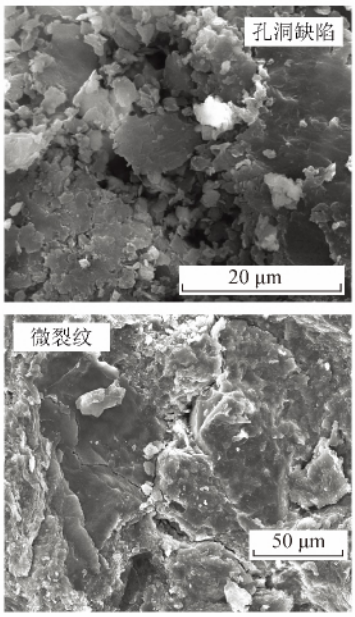


图 1 砂岩内部细观结构

Fig. 1 Internal microstructure of sandstone

统、信号采集系统与信号处理系统 5 部分，试样放置于入射杆与透射杆之间。试验过程中，撞击杆在高压气体的推动下与入射杆碰撞，在入射杆中形成入射脉冲；入射脉冲在入射杆中传播到达试样的两面时，该应力脉冲作用到试样上并在两端试样－压杆界面多次反射透射，造成试样的高速变形；与此同时，一部分脉冲被反射，另一部分脉冲通过试样透射到入射杆中，分别形成了反射脉冲信号和透射脉冲信号。通过弹性压杆上的应变片，信号分别被记录到采集系统内。

1.3 试验方法

采用动态巴西圆盘试验对砂岩动态拉伸力学性能进行测试，通过改变输入气压为砂岩试样提供不同的加载速率。本次试验设计 6 组加载气压，分别为 P = 0.30，0.35，0.40，0.45，0.50，0.55 MPa。

为了获得更加可靠的动态力学特性参数，试验采用厚度 1 mm，直径 30 mm 的 T2 黄铜片作为波形整形器。图 3 给出了未装载试样时的信号波形，由图 3 可以看到：入射波波形呈半正弦波，在传播过程中未产生明显的横向振动，测试符合应力波传播的一维假设；入射波上升沿达到 1 600 μs，为试样达到均匀应力提供了充足时间，入射波与反射波波形叠加等于透射波，试验过程符合应力均匀性假设。

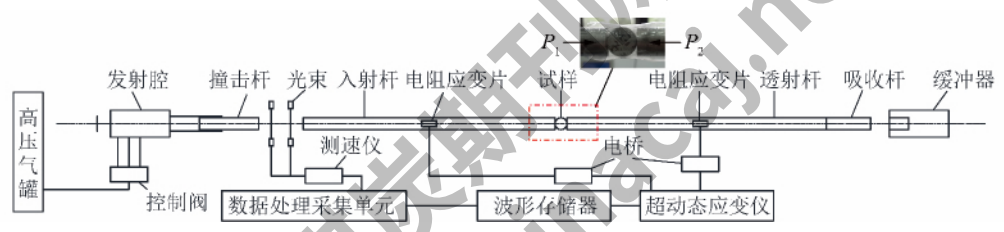


图 2 分离式霍普金森压杆试验系统

Fig. 2 SHPB testing system

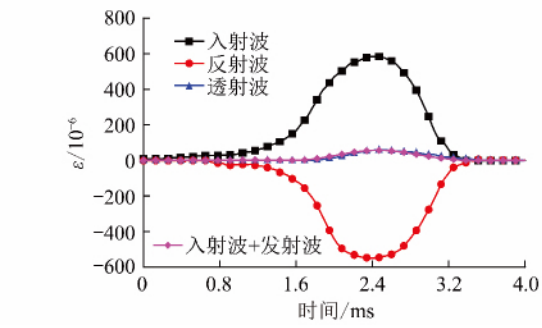


图 3 典型 SHPB 应力波形及假设验证

Fig. 3 Typical SHPB stress waveforms and hypothesis verification

1.4 加载速率确定

动态巴西圆盘试验中，试样中心点拉伸应力计算公式为

$$\sigma = \frac{P_1 + P_2}{\pi DB} \tag{1}$$

式中，P_1，P_2 分别为试样两端压杆作用载荷，如图 2 所示；D，B 分别为试样直径与厚度，分别为 50，25 mm。

根据弹性压杆理论[25]，P_1，P_2 计算公式为

$$\begin{cases} P_1 = AE_b(\varepsilon_i + \varepsilon_r) \\ P_2 = AE_b\varepsilon_t \end{cases} \tag{2}$$

式中，A 为压杆面积，$\pi D^2/4$；E_b 为压杆材料弹性模量，210 GPa；ε_i，ε_r，ε_t 分别表示入射、反射、透射应变信号。

由图 2 可以看出，试验过程符合应力均匀假设，即存在

$$\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t \tag{3}$$

将式(2)，(3)代入式(1)可得

$$\sigma = \frac{2AE_b\varepsilon_t}{\pi DB} \tag{4}$$

图 4 给出了动态巴西圆盘试验中砂岩试样典型应力时程($\sigma - t$)曲线，其中，在 0.18 ~ 0.22 ms，应力

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

-时间关系大致为直线,这段之间的斜率即为动态巴西劈裂试验试样加载速率 $\dot{\sigma}$ [25]。图 5 给出了加载速率随气压 P 的变化规律(图中数据均为 3 次试验平均值),由图 5 可以看出,加载速率随加载气压基本呈线性变化,提高加载气压能够有效提高试验的加载速率。

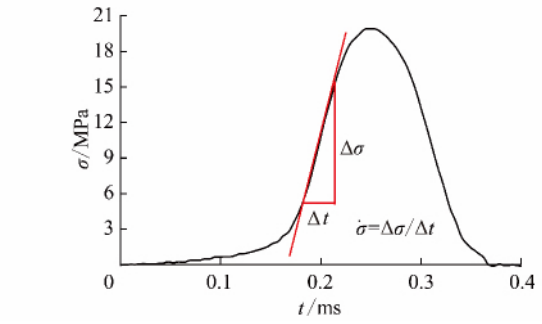


图 4　应力时程($\sigma-t$)曲线

Fig. 4　Stress-time curves

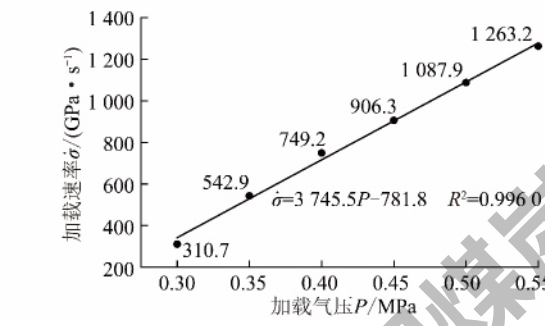


图 5　加载速率 $\dot{\sigma}$ 随加载气压 P 的变化曲线

Fig. 5　Relationship between loading rate and pressure

2　煤系砂岩动态拉伸力学性能的加载速率效应

2.1　砂岩动态抗拉强度的加载速率效应

将透射应变波代入式(4),得到不同加载速率下试样动态拉伸应力时程曲线,曲线峰值即为相应的动态抗拉强度。图 6 给出了砂岩动态抗拉强度对加载速率的变化曲线,由图 6 可以看出: 静载作用下砂岩抗拉强度为 3.69 MPa,远小于动载作用下的抗拉强度; 砂岩动态抗拉强度随加载速率的升高逐渐增大,加载速率由 310.7 GPa/s 升高到 1 263.2 GPa/s,动态抗拉强度 σ_{dt} 由 20.19 MPa 提高到 41.32 MPa,幅值为 104.66%。通过拟合,砂岩动态抗拉强度与加载速率呈指数变化形式,如式(5)所示,表明随着加载速率的升高,砂岩极限承载能力对加载速率的敏感性逐渐增强。

$$\sigma_{dt} = 15.19e^{7.60\times10^{-4}\dot{\sigma}} \tag{5}$$

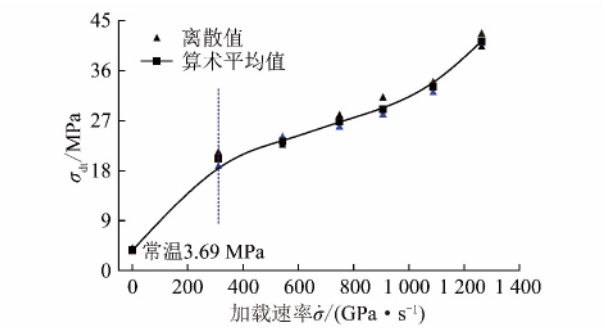


图 6　砂岩抗拉强度 σ_{dt} 随加载速率 $\dot{\sigma}$ 的变化曲线

Fig. 6　Variation of dynamic tensile strength with loading rate

2.2　砂岩动态破坏特征的加载速率效应

(1) 试样动态破坏过程

动态巴西圆盘试验中,试验破坏过程主要分为 3 个阶段[26],如图 7 所示: 首先,试样中心在拉应力的作用下形成一条沿着加载方向扩展的主裂纹; 其次,随着载荷的持续作用,中心主裂纹迅速向加载两端扩展,同时,靠近加载端产生了大量微裂纹; 最后,中心主裂纹扩展到裂纹两端,试样被破坏成两部分,与此同时,加载两端局部区域微裂纹之间相互贯穿,产生大量由于剪切作用而形成的小碎块。

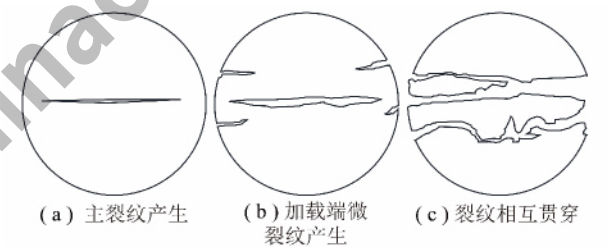


图 7　砂岩试样动态拉伸破坏过程

Fig. 7　Failure process of dynamic tension in the samples

(2) 试样破坏形态

图 8 给出了不同加载速率下试样破坏后的碎块形态。对试样破坏后竖直高度 $c>2$ cm 的碎块形态进行统计分析,得到砂岩试样劈裂拉伸破坏后碎块截面形状主要有 3 种,如图 8(b),(c),(d)所示。随着加载速率的升高,碎块破坏形态的演化过程表现为(图 9): ① 较低加载速率($\dot{\sigma}$ = 301.7 GPa/s)下,试样破坏后碎块为较大体积的 I 型截面碎块; ② 随着应变率的升高($\dot{\sigma}$ = 542.9 GPa/s, $\dot{\sigma}$ = 749.2 GPa/s, $\dot{\sigma}$ = 906.3 GPa/s),碎块形态以大体积 I 型截面碎块为主,存在部分小体积 II 型截面碎块; ③ 当应变率进一步升高($\dot{\sigma}$ = 1 087.9 GPa/s, $\dot{\sigma}$ = 1 263.2 GPa/s),试样破坏后存在大体积 I 型截面碎块,存在部分小体积 II 型截面碎块,同时还包含一定量的粉末状 III 型截面碎块。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

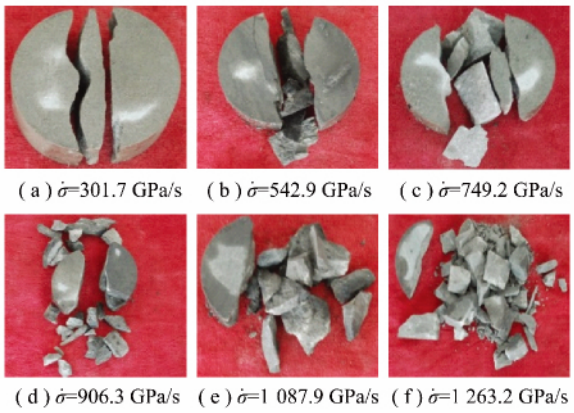


图 8 砂岩试样动态拉伸破坏后碎块形态

Fig. 8 Fracture morphology after dynamic tension

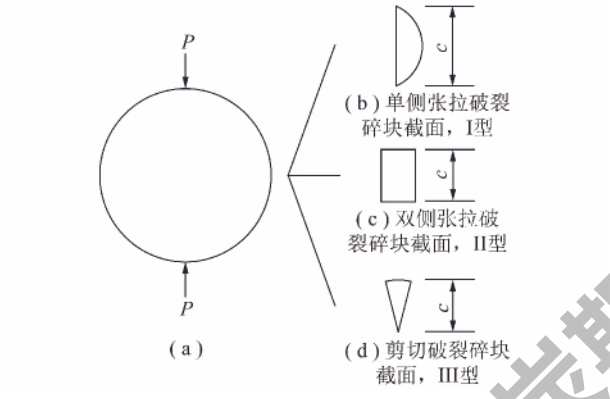


图 9 碎块形态横截面

Fig. 9 Cross-section morphologies of fragment

(3) 试样破坏程度

为了定量分析加载速率对砂岩拉伸破坏程度的影响，对破坏后碎块的平均粒径进行了分析。利用分级筛将碎块进行筛分(筛分等级为 0 ~ 2.5，2.5 ~ 5.0，5.0 ~ 8.0，8.0 ~ 10.0，10.0 ~ 12.0，12.0 ~ 15.0，15.0 ~ 20.0，>20.0 mm，粒径编号 n 分别为 1 ~ 8)，计算得到了各粒径范围碎块质量占整体质量百分比 W_{sn}。根据式(6)计算得到不同加载速率下试样破坏后碎块平均粒径，r 值越小，碎块平均粒径越小，说明试样破坏程度越高。

$$r = \sum_{n=1}^{8} W_{sn} d_{vn} \tag{6}$$

式中，d_{vn} 表示每组粒径范围的平均粒径，即粒径范围内最大粒径与最小粒径的平均值，其中 $n=8$ 时，最小粒径为 20.0 mm，最大粒径为试样直径 50.0 mm。

图 10 给出了碎块平均粒径随加载速率的变化曲线(图中数据均为 3 次试验平均值)，由图 10 可以看出：随着加载速率的升高，平均粒径呈直线形式减小，加载速率由 310.7 GPa/s 升高到 1 263.2 GPa/s，碎块平均粒径由 25 mm 减小到 15.74 mm，幅值为 37.04%。由此说明，随着加载速率的升高，砂岩动态劈裂拉伸破坏程度逐渐提高。

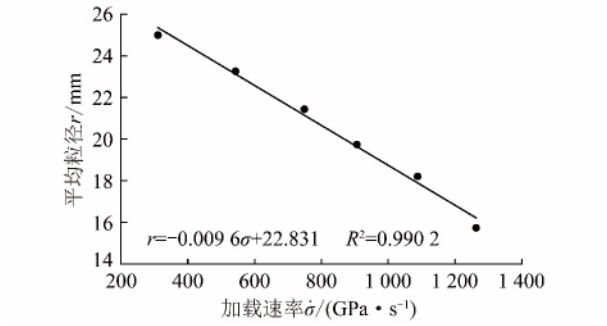


图 10 碎块平均粒径 r 随加载速率 $\dot{\sigma}$ 的变化曲线

Fig. 10 Relationship between average particle size of fragments and loading rate

(4) 试样破坏的力学机理

巴西圆盘试验中，试样受力示意如图 11 所示，根据平面应力问题的弹性力学解析解[27]，截面任意一点 A 所受 x 方向的拉应力表达式为

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi}\left(\frac{\sin^2\theta_1\cos\theta_1}{r_1} + \frac{\sin^2\theta_2\cos\theta_2}{r_2}\right) - \frac{2P}{\pi d} \tag{7}$$

式中，P 为试样两端载荷；θ_1，θ_2，r_1，r_2 为 A 点的位置参量，具体意义如图 11 所示；d 为试样横截面直径。

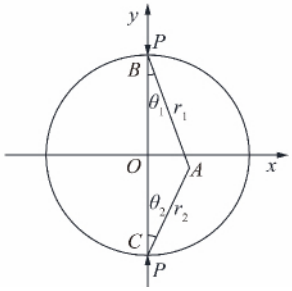


图 11 试样动态劈裂拉伸受力示意

Fig. 11 Sketch map of mechanical characteristics in dynamic splitting tensile tests

设试样两端载荷 $P=1$ kN，试样直径 $d=50$ mm，代入式(7)得到了试样横截面水平拉应力等值线图，如图 12 所示，由图 12 可以看出，一定加载条件下，试样截面中心 O 处拉应力最大，即加载过程中试样首先从试样中心处产生张拉破坏。

根据图 12 中试样拉应力分布可知：当作用在试样两端冲击荷载 P_1，P_2 较小时，即加载速率较小时，试样中心处达到砂岩抗拉强度，裂纹在张拉应力的作用下迅速扩展，将试样贯穿为两块相等的 I 型截面碎块，试样碎块平均粒径较大；随着加载速率的增大，除了试样中心处产生一条主裂纹之外，靠近加载端的一定区域内会产生由于张拉及剪切共同作用形成的微裂纹，随着载荷的持续作用相互贯穿，最终导致试样破坏，碎块中除了具有 I 型截面碎块之外，还存在一

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

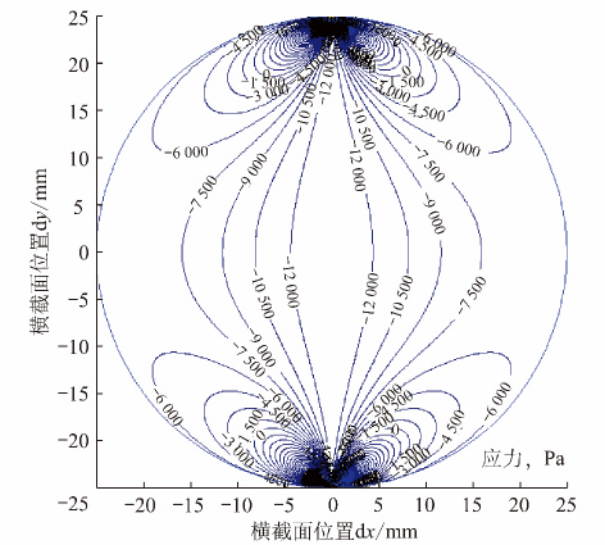


图 12　试样水平张拉应力等值线

Fig. 12　Stress contour of horizontal tension

定量的小体积 II,III 型截面碎块,碎块平均粒径较小。

3　煤系砂岩动态拉伸破坏的能量耗散特征

能量耗散是岩石力学性能随加载速率变化的根本原因。由热力学定律可知,能量转化是物质物理过程的本质特征,物质破坏是能量驱动下的一种状态失稳现象。从矿山工程作业角度,明确不同加载速率下砂岩破坏的能量耗散规律,有利于确定工程爆破中的载荷量,同时对能量的合理化利用也具有一定的指导意义。

3.1　能量耗散计算方法

动态巴西圆盘试验试验中系统能量包括入射、反射、透射及耗散能量,根据弹性波理论,前 3 部分能量[28]计算公式为

$$\begin{cases} W_{\mathrm{I}} = ACE_{\mathrm{b}} \int_0^t \varepsilon_{\mathrm{i}}^2(t)\,\mathrm{d}t \\ W_{\mathrm{R}} = ACE_{\mathrm{b}} \int_0^t \varepsilon_{\mathrm{r}}^2(t)\,\mathrm{d}t \\ W_{\mathrm{T}} = ACE_{\mathrm{b}} \int_0^t \varepsilon_{\mathrm{t}}^2(t)\,\mathrm{d}t \end{cases} \tag{8}$$

其中,C 为弹性波在压杆中的传播的波速; W_{I},W_{R},W_{T} 分别为系统入射、反射及透射能量。

那么,试样在破坏过程中的耗散能量表示为

$$W_{\mathrm{L}} = W_{\mathrm{I}} - (W_{\mathrm{R}} + W_{\mathrm{T}}) = ACE \int_0^t \{\varepsilon_{\mathrm{i}}^2(t) - [\varepsilon_{\mathrm{r}}^2(t) + \varepsilon_{\mathrm{t}}^2(t)]\}\,\mathrm{d}t \tag{9}$$

试验过程中,W_{L}大致包含了 3 部分: 试样裂纹扩展及破坏的能量耗散 W_{Ld}; 试样破坏后碎块运动能量耗 W_{Lv}; 其他能量消耗 W_{Ls},如热能以及摩擦消耗的能量等。研究成果表明,后两种耗散能量占整体能量比例大约在 5% 以内,超过 95% 的能量都将用于试样宏观破坏,即 $W_{\mathrm{Ld}} = W_{\mathrm{L}}$。

3.2　能量耗散的加载速率效应

将 ε_{i},ε_{r},ε_{t}代入式(8),(9)即可得到不同加载速率下砂岩动态拉伸破坏过程中的各组能量。图 13 给出了试样破坏过程中系统各能量随加载速率的变化曲线,由图 13 可以看出: 随着加载速率的升高,入射、反射及耗散能量均成直线形式增加,而透射能量则基本呈直线形式减小,拟合表达式如式(10)所示; 加载速率由 310.7 GPa/s 升高到 1 263.2 GPa/s,入射、反射、耗散能量分别提高 3.47 倍(96.48 J 增加到 528.34 J)、3.45 倍(81.3 J 增加到 443.32 J)及 6.15 倍(10.32 J 增加到 84.12 J),透射能量降低了 82.10%(4.86 J 减小到 0.87 J)。

$$W_i = a_i\dot{\sigma} + b_i \quad (i = \mathrm{I},\mathrm{R},\mathrm{T},\mathrm{L}) \tag{10}$$

式(10)中参数 a_i,b_i值见表 2。

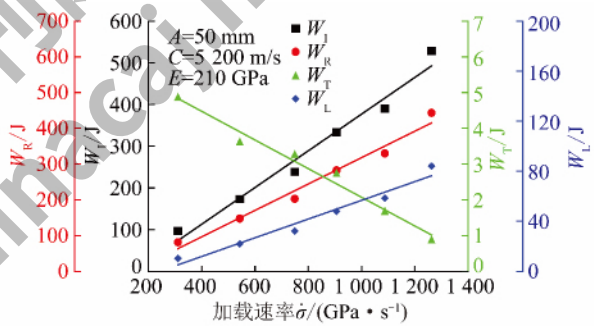


图 13　各能量随加载速率的变化曲线

Fig. 13　Relationship between energy and loading rate

表 2　能量 - 加载速率关系式的参数

Table 2　Parameters in Formula (10)

参数	$W_{\mathrm{I}}-\dot{\sigma}$	$W_{\mathrm{R}}-\dot{\sigma}$	$W_{\mathrm{T}}-\dot{\sigma}$	$W_{\mathrm{L}}-\dot{\sigma}$
a_i	0.440 0	0.370 0	−0.004 0	0.075 0
b_i	−62.83	−50.91	6.08	−18.00
R^2	0.973 5	0.976 3	0.977 8	0.959 4

为了进一步明确加载速率对能量利用率的影响,计算得到了反射、透射及耗散能量随加载速率的变化规律,如图 14 所示。由图 14 可以看出: 反射能量所占比例基本维持在 85% 左右,即试验过程中,绝大多数能量被反射回入射杆中; 透射能量百分比随加载速率的升高呈指数形式减小; 耗散能量百分比呈直线形式逐渐增加,加载速率由 310.7 GPa/s 升高到 1 263.2 GPa/s,其提高了 5 个百分点,说明提高加载速率,能够有效的提高砂岩破坏的能量利用率。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

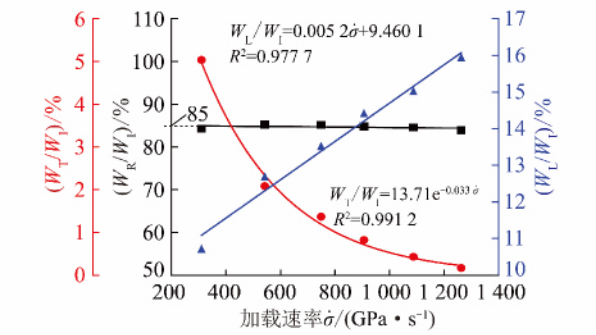


图 14 能量百分比随加载速率的变化曲线

Fig. 14 Variation of energy percentage with loading rate

能量耗散的加载速率效应是砂岩力学性能加载速率效应产生的根本原因。低加载速率下,只有消耗较少能量就可以扩展的微裂纹参与到砂岩破坏过程中,破坏后的试样存在大体积的碎块,而相应的试样抗拉强度较小;加载速率较高时,更多的裂纹消耗能量参与到岩石破坏过程中,破坏后碎块的体积较小,而对应的试样抗拉强度更大。

4 结 论

(1) 试验入射波形为半正弦波,在传播过程中未产生明显的横向振动,入射波上升沿达到 1 600 μs,同时,入射波与反射波波形叠加等于透射波。试验过程符合一维应力传播假设与应力均匀假设。

(2) 加载气压由 0.30 MPa 提高到 0.55 MPa,试验加载速率由 310.7 GPa/s 升高到 1 263.2 GPa/s,砂岩动态抗拉强度由 20.19 MPa 提高到 41.32 MPa;砂岩动态抗拉强度随应变率的升高呈指数形式增加,表明较高加载速率条件下砂岩极限承载能力对加载速率的敏感性逐渐更强。

(3) 砂岩动态拉伸破坏过程包括主裂纹产生、微裂纹发育及裂纹相互贯穿 3 个阶段;随着加载速率的升高,试样破坏后碎块形态逐渐从大体积 I 型碎块逐渐向小体积的 II,III 型碎块转化,并且在较高加载速率条件下局部会产生显著的剪切应力带;碎块平均粒径随加载速率升高呈直线形式逐渐减小,砂岩动态拉伸破坏程度逐渐提高。

(4) 随着加载速率的升高,砂岩拉伸破坏的耗散能呈直线线性增加,并且耗散能所占总输入能的比例逐渐增加,说明提高加载速率,能够有效的提高砂岩动态拉伸破坏的能量利用率。耗散能量的变化规律是导致砂岩拉伸强度及破坏程度逐渐增加的根本原因。

参考文献(References):

[1] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J]. 煤炭学报,2012,37(4):535-542.
Xie Heping,Zhou Hongwei,Xue Dongjie,et al. Research and consideration on deep coal mining and critical mining depth[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(4):535-542.

[2] 钱七虎. 中国岩石工程技术的新进展[J]. 中国工程科学,2010,12(8):37-48.
Qian Qihu. New progress of Chinese rock engineering[J]. Engineering Sciences,2010,12(8):37-48.

[3] 平琦. 煤矿深部岩石动态力学特性试验研究及其应用[D]. 合肥:安徽理工大学,2013:2-5.
Ping Qi. Experimental research and application of rock dynamic mechanical properties for coal mine deep part[D]. Hefei:Anhui University of Science and Technology,2013:2-5.

[4] 平琦,马芹永,张经双,等. 高应变率下砂岩动态拉伸性能 SHPB 试验与分析[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(A01):3363-3369.
Ping Qi,Ma Qinyong,Zhang Jingshuang,et al. SHPB test and analysis of dynamic tensile performance of sandstone under high strain rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(A01):3363-3369.

[5] International Society for Rock Mechanics(ISRM). Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts,1978,15(1):99-103.

[6] 赵娜,王来贵,习彦会. 巴西圆盘泥岩试件裂纹扩展及应变演化实验研究[J]. 实验力学,2015,30(6):791-796.
Zhao Na,Wang Laigui,Xi Yanhui. Experiment study of crack propagation and strain evolution of brazil disc mudstone specimen[J]. Journal of Experimental Mechanics,2015,30(6):791-796.

[7] 杨志鹏,何柏,谢凌志,等. 基于巴西劈裂试验的页岩强度与破坏模式研究[J]. 岩土力学,2015,36(12):3447-3455.
Yang Zhipeng,He Bai,Xie Lingzhi,et al. Strength and failure modes of shale based on Brazilian test[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(12):3447-3455.

[8] 尤明庆,陈向雷,苏承东. 干燥及饱水岩石圆盘和圆环的巴西劈裂强度[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(3):464-472.
You Mingqing,Chen Xianglei,Su Chengdong. Brazilian splitting strengths of discs and rings of rocks in dry and saturated conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(3):464-472.

[9] 李果,艾婷,于斌,等. 不同岩性巴西劈裂试验的声发射特征[J]. 煤炭学报,2015,40(4):870-881.
Li Guo,Ai Ting,Yu Bin,et al. Acoustic emission characteristics of different lithologies under Brazilian splitting[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(4):870-881.

[10] 许金余,刘石,孙蕙香. 3 种岩石的平台巴西圆盘动态劈裂拉伸试验分析[J]. 岩石力学与工程学报,2014,49(S1):2814-2819.
Xu Jinyu,Liu Shi,Sun Huixiang. Analysis of dynamic split tensile tests of flattened brazilian disc of three rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,49(S1):2814-2819.

[11] 宋小林,谢和平,王启智. 大理岩动态劈裂试样的破坏应变

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

[J]. 岩石力学与工程学报,2005,40(16):2953 – 2959.
Song Xiaolin, Xie Heping, Wang Qizhi. Failure strain of brazilian disc samples of marble under dynamic split tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 40(16): 2953 – 2959.

[12] Dai F, Xia K. Loading rate dependence of tensile strength anisotropy of barre granite [J]. Pure and Applied Geophysics, 2010, 167(11): 1419 – 1432.

[13] Dai F, Chen R, Xia K. A semi-circular bend technique for determining dynamic fracture toughness [J]. Experimental Mechanics, 2009, 50(6): 783 – 791.

[14] Dai F, Xia K, Tang L. Rate dependence of the flexural tensile strength of Laurentian granite [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(3): 469 – 475.

[15] 满轲,周宏伟. 不同赋存深度岩石的动态断裂韧性与拉伸强度研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(8):1657 – 1663.
Man Ke, Zhou Hongwei. Research on dynamic fracture toughness and tensile strength of rock at different depths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1657 – 1663.

[16] 李地元,邱加冬,李夕兵. 冲击载荷作用下层状砂岩动态拉压力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(10):2091 – 2097.
Li Diyuan, Qiu Jiadong, Li Xibing. Experimental study on dynamic tensile and compressive properties of bedding sandstone under impact loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2091 – 2097.

[17] 卢玉斌,武海军,赵隆茂. 混凝土类材料动态拉伸强度的微观力学模型 [J]. 爆炸与冲击,2013,33(3):275 – 281.
Lu Yubin, Wu Haijun, Zhao Longmao. A micro-mechanical model for dynamic tensile strength of concrete-like materials [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(3): 275 – 281.

[18] 宫凤强,李夕兵,董陇军. 圆盘冲击劈裂试验中岩石拉伸弹性模量的求解算法 [J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(4):705 – 713.
Gong Fengqiang, Li Xibing, Dong Longjun. Algorithm to estimate tensile modulus of rock in disk impact splitting test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 705 – 713.

[19] 王蒙,朱哲明,谢军. 岩石Ⅰ – Ⅱ复合型裂纹动态扩展 SHPB 实验及数值模拟研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(12): 2474 – 2484.
Wang Meng, Zhu Zheming, Xie Jun. experimental and numerical studies of the mixed-mode I and II crack propagation under dynamic loading using SHPB [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(12): 2474 – 2484.

[20] 钱莹,杨军,王兵臣. 岩石巴西圆盘动态劈裂的流形元法模拟 [J]. 爆炸与冲击,2009,29(1):23 – 28.
Qian Ying, Yang Jun, Wang Bingchen. Numerical simulation on dynamic split of a rock Brazilian disc using the manifold method [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(1): 23 – 28.

[21] Zhao Y, Wan Z, Feng Z, et al. Triaxial compression system for rock testing under high temperature and high pressure [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 52(6): 132 – 138.

[22] 高文蛟,单仁亮. 无烟煤在冲击载荷下破坏模式与强度特性 [J]. 煤炭学报,2012,37(S1):13 – 18.
Gao Wenjiao, Shan Renliang. Failure pattern and strength properties of anthracite under impact loading [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S1): 13 – 18.

[23] 平琦,马芹永,袁璞. 岩石试件 SHPB 劈裂拉伸试验中能量耗散分析 [J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(3):401 – 407.
Ping Qi, Ma Qinyong, Yuan Pu. Energy dissipation analysis of stone specimensin SHPB tensile test [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(3): 401 – 407.

[24] 赵毅鑫,肖汉,黄亚琼. 霍普金森杆冲击加载煤样巴西圆盘劈裂试验研究 [J]. 煤炭学报,2014,39(2):286 – 291.
Zhao Yixin, Xiao Han, Huang Yaqiong. Dynamic split tensile test of Brazilian disc of coal with split Hopkinson pressure bar loading [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 286 – 291.

[25] 卢芳云,陈荣,林玉亮,等. 霍普金森杆试验技术 [M]. 北京: 科学出版社,2013.

[26] Yin T, Li X, Cao W, et al. Effects of thermal treatment on tensile strength of laurentian granite using brazilian test [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 28(8): 1 – 11.

[27] Muskhelishvili N I. Some basic problems of the mathematicaltheory of elasticity [R]. Groningen-Holland: P. Noordhoff Ltd., 1953.

[28] Li M, Mao X B, Lu A H, et al. Effect of specimen size on energy dissipation characteristics of red sandstone under high strain rate [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(2): 151 – 156.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net