

高阻尼橡胶用于岩石动载冲击防护的 吸能特性试验研究

乔 兰, 周 明, 杨建明, 李庆文

(北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 10008)

摘要: 为了有效控制和减少深部高应力岩体冒落、硐室失稳及岩爆等工程动力灾害, 借助于高阻尼橡胶材料在抗冲击、抗剪及能量吸收等方面的优越性能, 拟研发带有高阻尼橡胶材料的深部新型硬岩小应变吸能锚杆, 其吸能效果主要取决于高阻尼橡胶材料性能, 为了系统评价高阻尼橡胶用于岩石冲击防护的吸能特性, 文中利用 $\phi 50$ mm 分离式 Hopkinson 冲击压缩试验系统, 对高阻尼橡胶、花岗岩-花岗岩组合试件以及高阻尼橡胶-花岗岩组合试件开展不同加载速率条件下的冲击试验, 探讨对比高阻尼橡胶的吸能规律及其吸能效果。研究表明: 高阻尼橡胶吸收的能量随入射能增加呈线性增加, 说明吸收的能量占入射能的比例恒定; 花岗岩与花岗岩组合试件分形维数增长速度比橡胶花岗岩组合试件快 5.5 倍, 反映高阻尼橡胶在外荷载激振下具有良好的吸能特性; 不同厚度的高阻尼橡胶材料存在最佳吸收能量, 入射能在 200~250 J 范围内橡胶最佳厚度为 15~20 mm, 研究成果将为吸能锚杆的研发提供理论和数据支撑。

关键词: 岩石力学; 深部硬岩; 小应变; 动力灾害; 高阻尼橡胶; 吸能特性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2018)04-0961-08

Experimental study on energy absorption of high damping rubber for rock under dynamic loads

QIAO Lan, ZHOU Ming, YANG Jianming, LI Qingwen

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to control and reduce rockfall, chamber instability, rockburst and other engineering dynamic, a new energy absorbing bolt is developed, taking advantage of the excellent properties of high damping rubber such as resisting impact effect, resisting shearing and absorbing energy. In this paper, to evaluate the energy absorbing characteristics of high damping rubber on impact protection of rock, a series of impact tests were conducted by SHPB system of $\phi 50$ mm. The energy absorbing characteristics of rubber samples, granite samples and rubber-granite samples under different loading rates were obtained. Results shows that the energy absorbed by high damping rubber increases linearly with incident energy, which indicates that the energy absorbing rate is nearly constant. For granite samples, the growth rate of fractal dimension is 5.5 times that of rubber-granite samples, which reflects good energy absorbing characteristics of high damping rubber under dynamic loading. In addition, the optimal relationship between rubber thickness and absorbed energy is confirmed. When the incident

收稿日期: 2017-09-04; **修回日期:** 2018-01-01

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFC0600703); 中国博士后科学基金项目资助(2016M600044, 2017T100039)

Supported by the State Key research Development Program of China(Grant No. 2016YFC0600703) and China Postdoctoral Science Foundation(Grant Nos. 2016M600044 and 2017T100039)

作者简介: 乔 兰(1963-), 女, 1983年毕业于华北水力水电学院工程地质水文地质专业, 现任教授, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: lanqiao@ustb.edu.cn。通讯作者: 李庆文(1986-), 男, 现任讲师。E-mail: qingwenli@ustb.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1096

energy is between 200 - 250 J, the recommended rubber thickness of rubber is 15 - 20 mm. The research results can provide design guidance and theoretical foundation for the development of energy absorbing bolts.

Key words: rock mechanics; deep hard rock; small strain; dynamic disaster; high damping rubber; energy absorbing

1 引言

我国矿产资源开采强度与开采深度逐年增加,深部岩体所处“三高一扰动”深部地质环境复杂,岩爆等动力灾害问题凸显,据不完全统计,众多金属矿山由于深部开采扰动引起岩体弹性变形能积聚,局部能量集中,进而导致岩石冒落、硐室失稳及岩爆等动力灾害现象频繁发生,给人员和设备的安全生产带来极大危害。我国现已进入深部开采的红透山铜矿、冬瓜山铜矿等矿山均面临着严重的岩爆灾害威胁^[1]。同时,深部复杂地质环境也导致巷道支护难度显著增加。近 10 a 来,我国矿山巷道的支护成本增长了约 13 倍,近 40% 的深部巷道由于动力灾害影响而亟待治理^[2]。因此,亟需开发能主动吸收和改善可调控围岩积聚能量的支护结构,以控制或降低深部金属矿开采的动力灾害。

针对深部岩体动力灾害问题,国内外学者从围岩防护结构开展了大量研究工作。1990 年,南非首次提出支护结构冲击防护吸能的概念^[3],并据此研发可有效吸收冲击能量的锥形锚杆^[4]。此后,国内外学者相继研发了大量的吸能锚杆,如 Roofex 大变形锚杆^[5],D 形锚杆^[6-7],恒阻大变形锚杆^[8-9],高抗冲击杆体^[10]等,大量的研究成果已在矿山尤其是煤矿矿山中进行了广泛的应用。

然而,现有国内外学者研发的吸能锚杆大多采用锚杆结构高强度、可大变形,实现围岩和支护体的协调变形进而吸收、释放围岩能量的方式进行动力灾害防护。对于深部金属矿山岩体,虽然在地应力条件下岩体岩性可能发生一定的脆延转化,但当开采进行到深部时,临空面岩体不再承受高压,此时岩体岩性表现极强弹脆性^[11]。使得深部金属矿山的脆性硬质围岩的开挖通常在极小的变形情况下就已经发生岩爆^[12-13]。因此,上述多采用协调变形机制的深部岩体冲击防护方案存在一定的工程局限性。基于此,本文考虑深部硬岩动力灾害机制,借鉴高阻尼橡胶在抗震工程中的应用理念,拟研发一

种高强度、小变形吸能锚杆。为了深入系统评价高阻尼橡胶材料用于岩石冲击防护的吸能特性,本文通过改进 SHPB 试验方法,对高阻尼橡胶、花岗岩-花岗岩组合试件以及高阻尼橡胶-花岗岩组合试件开展了不同加载速率条件下的冲击试验,研究高阻尼橡胶的吸能规律及其吸能效果;最后,在相同冲击条件下,通过对比不同厚度高阻尼橡胶的吸能规律,探讨了高阻尼橡胶的最佳厚径比。

2 高阻尼橡胶吸能机制

高阻尼橡胶能够在较小变形时产生大阻尼大量消耗进入支护系统能量,基于此,其能够实现对于深部岩石动载冲击下的吸能防护作用。

试验中所用的高阻尼橡胶是由橡胶、塑料和配合剂等配制的高分子聚合物材料,它具有弹性固体的储存能量和黏性液体的损耗能量的双重特性,其阻尼比可达 0.2~0.5 以上。与泡沫铝等金属吸能材料相比,泡沫铝在受外力压缩过程中,利用应力-应变曲线上高而宽的应力平台吸收大量的压缩能量。但当材料再次受到压缩时,已发生塑性变形部分失去吸能作用,使得材料难于实现二次吸能利用。而高阻尼橡胶是一团不规则曲折状的大分子链段聚合物,利用大分子链段间的内摩擦力将外力功转变为热能,从而实现材料的吸能特性。所以当材料再次受到外力作用时不会因为上一次分子链段间相对运动而大幅度降低材料的吸能能力,使得材料实现二次吸能利用。与沥青类阻尼材料相比,橡胶材料不会散发出有毒有害气体。高阻尼橡胶本质是一种黏弹性材料,其应变总滞后于应力^[14]见图 1。

在应力-应变图中,滞回环面积就是被耗散掉的能量(见图 2)。其耗能原理是橡胶在分子间拉伸(OAB)过程中,外力对橡胶所做的功分为两部分:一部分用于大分子链伸展;另一部分用于克服大分子链间阻力。回缩过程中(BCD),橡胶对外做功也分两部分:一部分用于卷曲拉伸时伸展的大分子,另一部分用于克服大分子链间阻力。因此,在一个

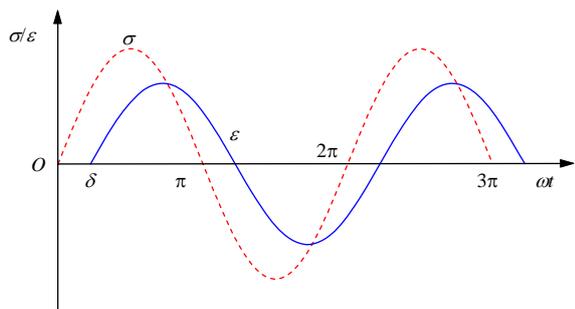


图 1 高阻尼橡胶对正弦应力的响应

Fig.1 The response of high damping rubber to sinusoidal stress

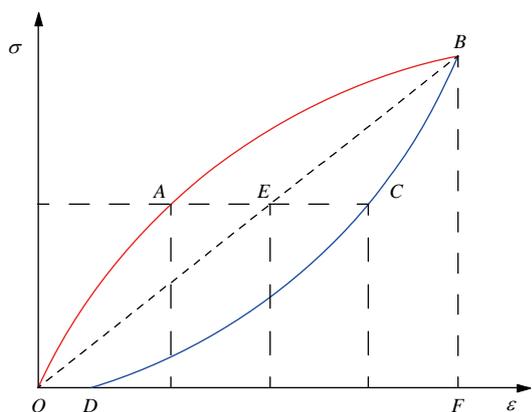


图 2 橡胶的应力 - 应变曲线

Fig.2 The stress-strain curves of rubber

拉伸 - 回缩循环过程中，外力对橡胶做的功用于克服大分子链间阻力，最终以热能损耗^[15-16]。

根据模量的定义，定义随时间同步变化的应力与应变的比值为储能模量 E' (GPa)，反映在往复的形变过程中大分子链拉伸卷曲运动，常称“贮能模量”；定义相位差 δ 的应力与应变比值为损耗模量 E'' ，反映材料克服大分子链间阻力所做的功，通常以热能形式耗散掉，见下式：

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta \quad (1)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta$$

$$E = E' + E'' \quad (2)$$

3 试验与波形计算原理

3.1 试验系统与基本原理

试验选用直径 50 mm 分离式 Hopkinson(简称 SHPB)测试系统。纺锤形子弹长 360 mm，入射杆与透射杆长等长皆为 2 000 mm，压杆弹性模量 250 GPa。

试验过程中，子弹在高压气体的推动下以一定速度撞击入射杆，并在入射杆中形成入射波；当入射波到达压杆与试件界面时会多次反射透射，反射部分形成反射波 ε_r ，透射部分形成透射波 ε_t ，如图 3 所示。

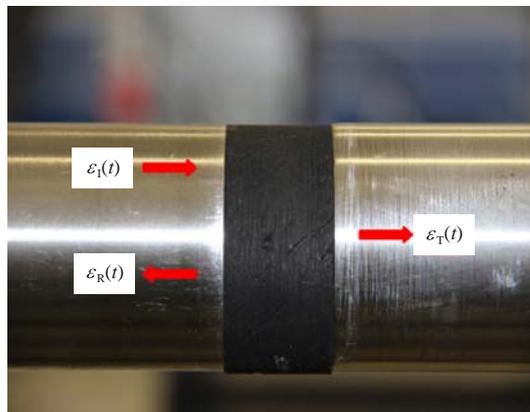


图 3 橡胶试件 SHPB 冲击压缩试验原理

Fig.3 SHPB compression test of rubber specimen

SHPB 试验结果分析基于下面 2 个假设。首先，假设不仅在应变片处测点应变波形已知，而且杆上其他各点的应变波形也完全已知。由于入射杆和透射杆都处于一维弹性波状态，根据一维弹性波理论，应力等于应变乘以弹性模量，同时其他各点的应力波形完全可以由测量点的波形平移得到。因此，根据入射杆上应变片测量得到的输入波和透射杆上应变片测量得到的透射波，可得到试件与输入杆、输出杆界面处的应力和应变波形。第二个基本假设是，试样中的应力场和应变场沿着试件长度方向是均匀的。根据试件两端的力和速度场，可得到试样的应力 - 应变曲线。

综合考虑入射波、反射波和透射波 3 组应变信号，得到 SHPB 分析的三波公式^[17]如下：

$$\sigma(t) = \frac{A_e}{2A_0} E(\varepsilon_T + \varepsilon_R + \varepsilon_I) \quad (3)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{c_e}{L_s} \int_0^l (\varepsilon_T - \varepsilon_R - \varepsilon_I) dt \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{c_0}{L_s} (\varepsilon_T - \varepsilon_R - \varepsilon_I) \quad (5)$$

其中，

$$W_s(t) = W_i(t) - W_r(t) - W_t(t)$$

式中： ε_i ， ε_r 分别为输入杆上测到的入射波和反射波的应变； ε_t 为输出杆上测到的透射波的应变； L_s 为试件长度(m)； A_0 为相应的压杆横截面面积(m²)，

由于试验所用压杆是等截面, 故 $A_0 = A_s$, A_s 为试件的截面积(m^2); c_0 为应力波在 SHPB 杆中的传播速度; E_0 为 SHPB 杆的弹性模量。试样的应力 - 应变曲线由式(1)~(3)获得。应用三波公式可以导出试样在对应某一应变率下的应力 - 应变关系曲线。

3.2 试验方案

试验所用的高阻尼橡胶尺寸有 50 mm(直径)×5 mm(厚度), 50 mm×10 mm, 50 mm×15 mm, 50 mm×20 mm, 50 mm×25 mm 的圆柱体。花岗岩尺寸为 50 mm×25 mm 的圆柱体。为了避免试件端面应力集中, 试件两端面的不平行度控制在 0.05 mm 内。试样所用部分试件见图 4。试验所用橡胶和花岗岩均取自同一橡胶块和试块加工制成。



图4 试件实物

Fig.4 Photos of rubber and granite samples

为了研究高阻尼橡胶的吸能特性, 分别用以下 3 种方案进行冲击试验: (1) 进行不同速率下的 50 mm×25 mm 圆柱体高阻尼橡胶试样的冲击试验; (2) 将高阻尼橡胶与花岗岩组合成 50 mm×50 mm 试件和花岗岩与花岗岩组合成 50 mm×50 mm 试件进行冲击后花岗岩破碎度对比; (3) 进行不同加载速度不同厚度的橡胶冲击试验。试验中在试件与压杆接触的两端面涂上凡士林, 减小“入射杆 - 试件”和“试件 - 透射杆”界面之间摩擦力。

进行 SHPB 测试试验时, 通过改变冲击气压大小为试件提供不同的加载速率。第一种方案设计 5 组试验, 每组 3 个试件, 气压分别为 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5 MPa; 第二种方案设计 3 组试验, 每组 3 个高阻尼橡胶与花岗岩组合试件(下文简称“橡 - 岩”试件)和 3 个花岗岩与花岗岩组合试件(下文简称“岩 - 岩”试件), 气压分别为 0.7, 0.8, 0.9 MPa。在进行橡胶与花岗岩组合试件冲击时, 沿着子弹冲击方向花岗岩在前橡胶在后面, 如图 5 所示; 第三种方案设计 4 组试件, 每组 3 个试件, 气压分别为 0.3, 0.4, 0.45, 0.5 MPa。

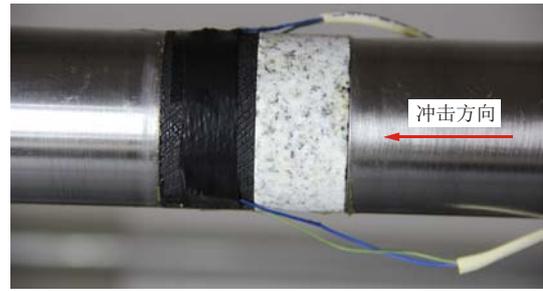


图5 橡胶与花岗岩组合试件加载方向

Fig.5 Rubber-granite composite sample under impact loading

4 试验结果分析

4.1 试验中试件吸能计算

在 SHPB 冲击试验过程中假设压杆与试件接触界面间摩擦作用产生的能量忽略不计, 那么根据能量守恒原理可获得试件的吸收能量为

$$W_s(t) = W_i(t) - W_r(t) - W_T(t) \quad (6)$$

式中: $W_s(t)$ 为试件吸收的能量; $W_i(t)$, $W_r(t)$, $W_T(t)$ 分别为入射波、反射波和透射波所携带能量(J), 可通过下式^[18]计算求得

$$W_x(t) = \int_0^t A_x \sigma_x(t) C_0 \varepsilon_x(t) dt \quad (7)$$

$$\sigma_x(t) = E_0 \varepsilon_x(t) \quad (8)$$

式中: 下标 x 分别代表与入射波、反射波和透射波相应性质; A_x 为相应的压杆横截面积(m^2), 由于试验所用压杆是等截面, 故 $A_x = A$; C_0 为应力波在 SHPB 杆中的传播速度; E_0 为 SHPB 杆的弹性模量; $\sigma_x(t)$ 分别为入射波、反射波和透射波的应力时程; $\varepsilon_x(t)$ 分别为入射波、反射波和透射波的应变时程。将式(8)代入式(7)中得

$$\left. \begin{aligned} W_i(t) &= E_0 C_0 A_0 \int_0^t \varepsilon_i^2(t) dt \\ W_r(t) &= E_0 C_0 A_0 \int_0^t \varepsilon_r^2(t) dt \\ W_T(t) &= E_0 C_0 A_0 \int_0^t \varepsilon_T^2(t) dt \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

根据式(9)对冲击试验进行处理, 典型的动载冲击下的能量时程曲线如图 6 所示。

4.2 橡胶的吸能分析

通过计算获得橡胶试件在 SHPB 冲击试验中入射能量、反射能量和透射能量及试件吸收能量随子弹速度变化关系, 如图 7 所示。入射能量和反射能量均随时间增加而呈乘幂增加, 而试件吸收能随入射能增加呈线性增加。透射能总体稳定在 0.16~0.2 J

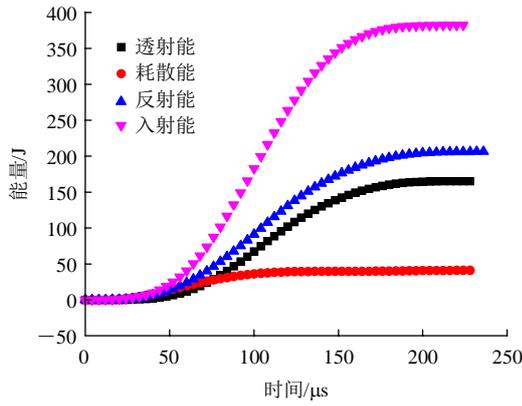


图 6 典型动态冲击能量时程曲线

Fig.6 Time curves for typical dynamic impact energy

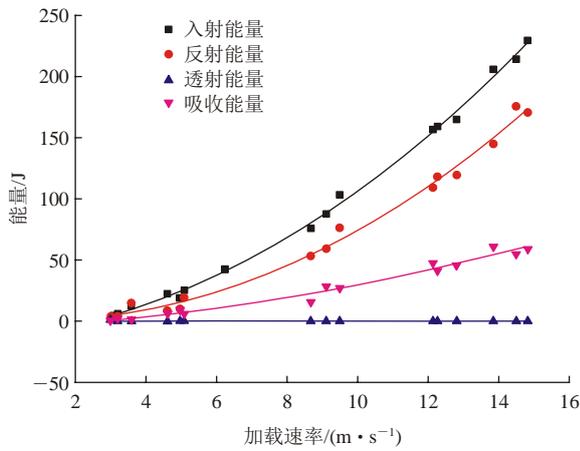


图 7 加载速率与能量关系

Fig.7 Relations between loading rate and energy

范围内，与子弹速度近似呈水平关系。从图 7 还可看出，透射能量远小于反射能量，这是因为入射能量到达入射杆与试件端面时，除了一大部分返回入射杆中形成反射能量，剩余能量大部分在高阻尼橡胶试件中传播时被橡胶吸收，形成吸收能量。

图 8 给出高阻尼橡胶试件吸收能量与入射能的关系曲线，从图中可以看出，随着入射能增加高阻尼橡胶的吸收能量呈线性增加。当入射能量从 4.05 J

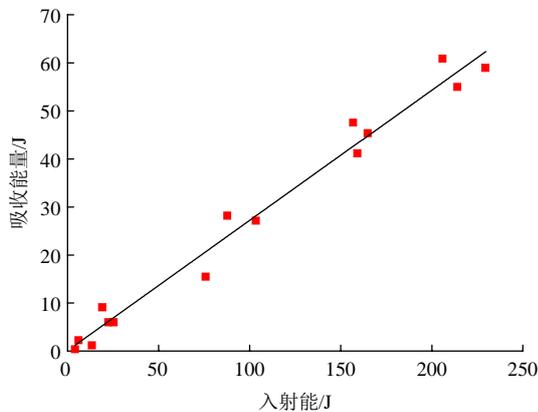


图 8 入射能与吸收能量关系

Fig.8 Relation between incident and absorption energy

增加到 205.8 J 时，橡胶吸收能量从 0.39 J 增加到 60.89 J，提高 156 倍，反映高阻尼橡胶受外界激振时，克服大分子链间阻力大量吸收能量的特性。

由于橡胶试件尺寸的加工误差，所以为了更加客观反映高阻尼橡胶的吸能情况，将试件的加工尺寸误差考虑内，采用橡胶的单位体积吸能，即试件的吸能密度。从图 9 可以看出，橡胶试件的吸收能量密度随着入射能的增加呈线性增加趋势。

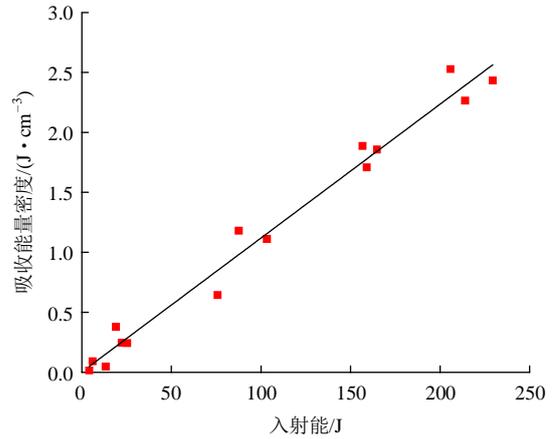


图 9 入射能与吸收能量密度关系

Fig.9 Relation between incident and absorption energy density

4.3 组合试件分形特征

根据破碎块度的尺度范围，通常采用碎块长(宽、厚)度 - 数量、碎块尺寸 - 数量和碎块尺寸 - 质量的关系进行分形研究^[19]。岩样的破坏形态与能耗密度有关，当能耗密度越大，岩石越破碎，分形维数越大^[20]，所以为了定量描述组合试件冲击破坏后碎块度分布状况，本文采用碎块的尺寸 - 质量分布进行分形维数计算^[21]：

$$a = \frac{\lg(M_r / M_t)}{\lg r} \quad (10)$$

$$D = 3 - a \quad (11)$$

式中： M_r 为直径小于 r 的碎块累计质量(kg)， M_t 为试件总质量， r 为破损物颗粒粒径， a 为 $\lg(M_r / M_t)$ 和 $\lg r$ 双对数斜率， D 为碎块的分维值。计算结果见表 1。

图 10 为冲击破碎块度分布，由图可以看出各试件具有很好相似性。根据计算出的组合试件分维值，绘制图 11，从图中可以看出组合试件破碎后分形维数随着入射能量的增加而呈线性增大。说明入射能量越大组合试件破坏后的分形维数越大，试样的破碎粒径越小、破坏越剧烈，与谢和平等^[20]结论一致。同时还发现，随着入射能的增大，“岩 - 岩”组合试

表 1 组合试件冲击破坏后碎块筛分结果
Table 1 Screening test result of impact fragment of combined specimens

试件编号	筛下累计质量/kg											总质量/kg	分形维数
	0.15 mm	0.3 mm	0.6 mm	1.18 mm	2.36 mm	4.75 mm	9.5 mm	13.2 mm	16 mm	19 mm	26.65 mm		
HH1	1.7	2.3	3.9	5.9	10.6	34.6	24.0	34.6	29.6	12.6	4.2	164.0	2.14
HH2	3.9	4.0	7.3	9.9	19.1	34.3	37.2	15.3	12.4	12.9	6.4	162.7	2.29
HH3	4.4	3.5	5.3	9.3	15.8	37.2	15.7	28.2	15.7	22.4	5.7	163.2	2.30
GH1	1.7	1.8	3.0	5.4	11.3	23.8	21.3	5.9	3.9	2.6	0.0	80.7	2.23
GH2	1.1	0.9	2.0	3.3	7.1	15.9	8.1	2.3	12.1	28.2	1.6	82.6	2.20
GH3	0.8	0.9	1.3	1.5	2.0	4.7	12.1	12.0	0.0	11.9	34.7	81.9	2.17

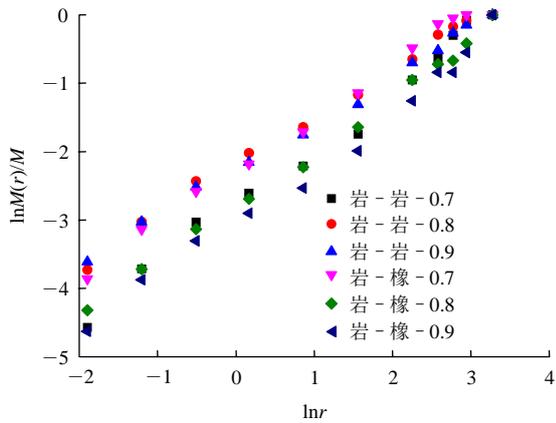


图 10 冲击破碎块度曲线

Fig.10 Variations of impact fragmentation

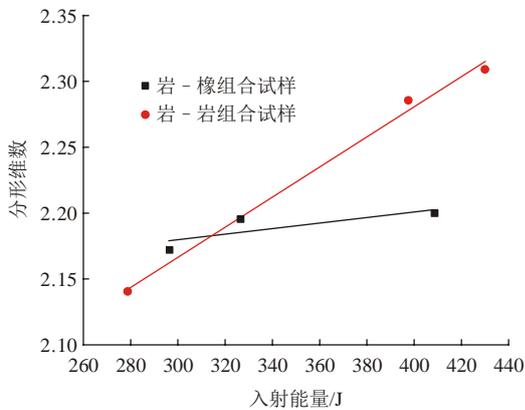
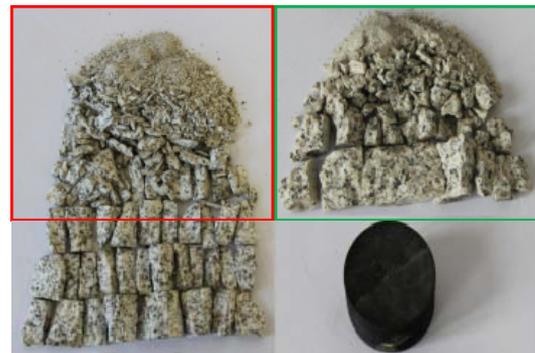


图 11 入射能与分形维数关系

Fig.11 Relations between incidence energy and fractal dimension

件分形维数的增长速度是“橡-岩”组合试件的 5.5 倍。说明橡胶的吸能特性在一定程度上可以有效地减少了花岗岩破碎程度。

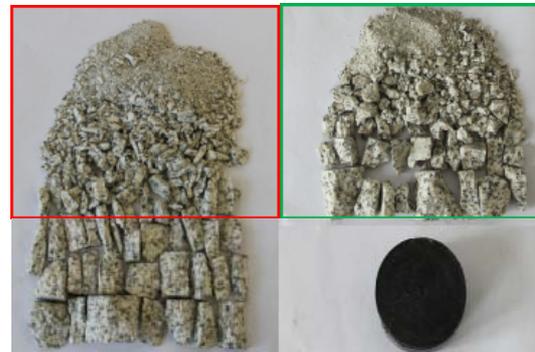
图 12 为组合试件的冲击破碎形态，从图中可以直观看出，在相同冲击气压下“橡-岩”组合试件的碎块尺度显著大于“岩-岩”组合试件，而且随着冲击气压增加“岩-岩”组合试件和“橡-岩”



(a) 气压 0.7 MPa



(b) 气压 0.8 MPa



(c) 气压 0.9 MPa

图 12 不同气压下组合试件冲击破碎图

Fig.12 Impact failure modes of composite specimens under different pressures

组合试件的细粒碎屑和微粒碎屑含量相差越显著, 说明在相同冲击条件下“岩-岩”组合试件用于破碎的能耗大于“橡-岩”组合试件, 使得“岩-岩”组合试件破碎越充分。

4.4 橡胶吸能厚度界定

论文仅对高阻尼橡胶的 SHPB 试验进行橡胶吸能厚度的初步界定。从图 13 可以明显看出, 在加载速率较小时, 不同厚度的高阻尼橡胶试件所吸收的能量值相差不大。通过多项式回归拟合发现, 不同厚度试件从加载速率 70 GPa/s 增加至 470 GPa/s, 其吸收能量呈不同程度提高, 说明加载速率能够有效提高试件的吸收能量。但加载速率在 280~470 GPa/s 范围, 随着试件厚度不同试件吸能效率的提高程度不同, 说明不同的长径比会影响试件的吸能效率。

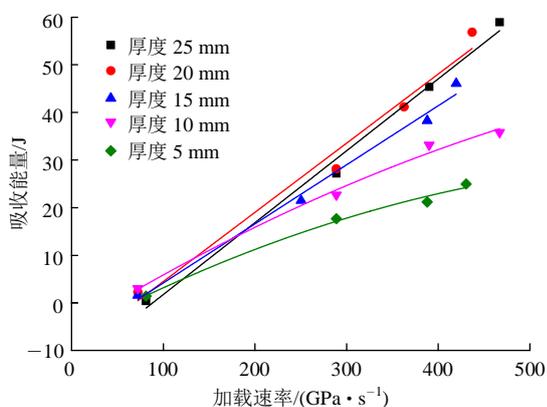


图 13 加载速率与吸收能量的关系

Fig.13 Relations between loading rate and absorption energy

从图 14 可以看出, 随着入射能量增加, 橡胶厚度为 $H = 20, 25$ mm 均呈线性增大, 而 $H = 15, 10, 5$ mm 存在拐点, 使得吸收能量的趋势趋于平稳。说

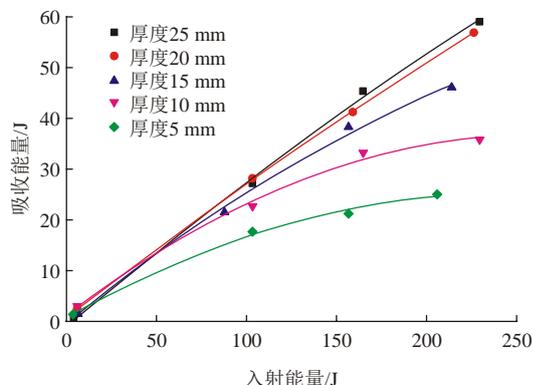


图 14 不同橡胶厚度下入射能量与吸收能量的关系

Fig.14 Relation between incidence energy and absorption energy under different rubber thickness

明橡胶直径恒定, 不同厚度的橡胶随着入射能量变化存在橡胶的最佳吸收能量。当入射能量 200~250 J 时, $H = 20, 25$ mm 的橡胶材料没有出现明显拐点, 说明材料吸能特性没有得到充分利用, 而 $H = 5, 10$ mm 出现拐点明显小于 $H = 15$ mm。故入射能在 200~250 J 时高阻尼橡胶最佳厚度为 15~20 mm。

5 结 论

利用 $\phi 50$ mm SHPB 系统, 对高阻尼橡胶、橡胶花岗岩组合试件和花岗岩组合试件进行不同加载速率冲击试验, 研究分析了橡胶试件的吸能规律和吸能效果。得到以下结论:

(1) 在不同冲击气压下, 高阻尼橡胶试件的入射能和反射能随加载速度增加呈乘幂增加; 试件吸收的能量随着入射能增加呈线性增加, 说明高阻尼橡胶受外界激振时, 克服大分子链间阻力所消耗的能量占入射能的比例恒定。

(2) 组合试件破碎具有较好的分形特征。分形维数越大, 试件破碎块度越小。随着入射能量的增大, 花岗岩与花岗岩组合试件分形维数增长速度比高阻尼橡胶与花岗岩组合试件快 5.5 倍, 反映高阻尼橡胶在外荷载激振下的高吸能特性。

(3) 高阻尼橡胶厚度随着入射能增大, 存在最佳吸能厚度。入射能在 200~250 J 时最佳吸能厚度为 15~20 mm。

参考文献(References):

- [1] 赵兴东, 李元辉, 刘建坡, 等. 红透山矿深部开采岩爆潜在区微震活动性研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 30(9): 1 330 - 1 333.(ZHAO Xingdong, LI Yuanhui, LIU Jianpo, et al. Study on microseismic activity in potential rockburst zone during deep excavation in Hongtoushan Mine[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2009, 30(9): 1 330 - 1 333.(in Chinese))
- [2] 李长洪, 卜磊, 魏晓明, 等. 深部开采安全机理及灾害防控现状与态势分析[J]. 工程科学学报, 2017, 39(8): 1 129 - 1 140.(LI Changhong, BU Lei, WEI Xiaoming, et al. Current status and future trends of deep mining safety mechanism and disaster prevention and control[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(8): 1 129 - 1 140. (in Chinese))
- [3] ORTLEPP W D. The design of support for the containment of rockburst damage in tunnels—an engineering approach[J]. Rock Support in Mining and Underground Construction, 1992: 593 - 609.
- [4] JAGER A J. Two new support units for the control of rockburst damage[J]. Rock Support in Mining and Underground Construction,

- 1992: 621 - 631.
- [5] CHARETTE F, PLOUFFE M. Roofex-results of laboratory testing of a new concept of yieldable tendon[C]// POTVIN Y ed. Proceedings of the 4th International Seminar Deep and High Stress Mining. [S. l.]: [s. n.], 2007: 395 - 404.
- [6] LI C C. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47: 396 - 404.
- [7] LI C C, DOUCET C. Performance of D-bolts under dynamic loading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45: 193 - 204.
- [8] 何满潮, 郭志彪. 恒阻大变形锚杆力学特性及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1 297 - 1 308.(HE Manchao, GUO Zhibiao. Mechanical property and engineering application of anchor bolt with constant resistance and large deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1 297 - 1 308.(in Chinese))
- [9] HE M C, GONG W L, WANG J, et al. Development of a novel energy-absorbing bolt with extraordinarily large elongation and constant resistance[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 67: 29 - 42.
- [10] 康红普, 王金华, 林 健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1 233 - 1 238.(KANG Hongpu, WANG Jinhua, LIN Jian. Pretension stress and intensive bolting system and its application in deep roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1 233 - 1 238.(in Chinese))
- [11] 李夕兵, 姚金蕊, 宫凤强. 硬岩金属矿山深部开采中的动力学问题[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2 551 - 2 563.(LI Xibing, YAO Jinrui, GONG Fengqiang. Dynamic problems in deep exploitation of hard rock metal mines[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(10): 2 551 - 2 563.(in Chinese))
- [12] 何满潮, 任富强, 宫伟力, 等. 应变型岩爆物理模拟实验过程的温度特征[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(4): 692 - 698.(HE Manchao, REN Fuqiang, GONG Weili, et al. Temperature characteristics during physical simulation test of strain burst[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(4): 692 - 698.(in Chinese))
- [13] 何满潮, 赵 菲, 张 昱, 等. 瞬时应变型岩爆模拟试验中花岗岩主频特征演化规律分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 1 - 8.(HE Manchao, ZHAO Fei, ZHANG Yu, et al. Feature evolution of dominant frequency components in acoustic emissions of instantaneous strain-type granitic rockburst simulation tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 1 - 8.(in Chinese))
- [14] 龙 娟. EPDM/ENR 宽温域阻尼尼材料的制备与阻尼机理研究[硕士学位论文][D]. 广州: 华南理工大学, 2015.(LONG Juan. Preparation and damping mechanism study of EPDM/ENR damping material with broad temperature range[M. S. Thesis][D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.(in Chinese))
- [15] 方 舟, 仲建峰, 周 萌, 等. 聚氨酯阻尼尼材料改性研究综述[J]. 石油化工技术与经济, 2012, 28(3): 54 - 58.(FANG Zhou, ZHONG Jianfeng, ZHOU Meng, et al. Research progress on polyurethane damping materials[J]. Technology and Economics in Petrochemicals, 2012, 28(3): 54 - 58.(in Chinese))
- [16] 张一飞, 文庆珍, 朱金华, 等. 高分子阻尼尼材料的研究进展[J]. 材料开发与应用, 2011, 26(4): 85 - 89.(ZHANG Yifei, WEN Qingzhen, ZHU Jinhua, et al. Recent development of damping polymer materials[J]. Development and Application of Materials, 2011, 26(4): 85 - 89.(in Chinese))
- [17] 王礼立. 应力波基础[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2010: 39 - 64.(WANG Lili. Foundation of stress waves[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 39 - 64.(in Chinese))
- [18] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 269 - 289.(LI Xibing. Rock dynamics fundamentals and applications[M]. Beijing: Science Press, 2014: 269 - 289.(in Chinese))
- [19] 何满潮, 杨国兴, 苗金丽, 等. 岩爆实验碎屑分类及其研究方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1 521 - 1 529.(HE Manchao, YANG Guoxing, MIAO Jinli, et al. Classification and research methods of rockburst experimental fragments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1 521 - 1 529.(in Chinese))
- [20] 谢和平, 高 峰, 周宏伟, 等. 岩石断裂和破碎的分形研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(4): 1 - 9.(XIE Heping, GAO Feng, ZHOU Hongwei, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(4): 1 - 9.(in Chinese))
- [21] 易顺民, 唐辉明. 三轴压缩条件下三峡坝基岩石破裂的分形特征[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 24 - 28.(YI Shunmin, TANG Huiming. The fractal characteristics of fracture of dam foundation rock under triaxial compression in the three gorges project[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3): 24 - 28.(in Chinese))