高径比差异条件下花岗岩和砂岩动态特性及破裂形态研究

周 俊[1, 2]，赵光明[2, 3]，孟祥瑞[2]，孙金山[1]，于美鲁[3]，汪聪聪[3]，燕 磐[3]

（1. 江汉大学 精细爆破全国重点实验室，湖北 武汉 430056；2. 安徽理工大学 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室，安徽 淮南 232001；3. 安徽理工大学 煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室，安徽 淮南 232001）

摘要：岩石的力学行为差异对地下工程灾害防护具有重要影响。为研究强冲击载荷下砂岩和花岗岩动态尺寸效应，利用直径为 50 mm 分离式霍普金森杆（SHPB），对高径比分别为 0.5，0.6，0.7，0.8，0.9，1.0 的砂岩和花岗岩试样在 0.75 MPa 冲击气压下进行冲击压缩试验，研究不同高径比砂岩和花岗岩试样破坏时的应力－应变曲线、动态抗压强度、动态峰值应变和动态弹性模量的变化，并进行岩石能量分析；通过高速摄影记录砂岩和花岗岩的冲击破坏过程，采用数字图像相关法（DIC）和素描对岩石破裂形态的差异进行深入研究；通过欧拉公式进一步分析围岩破坏与岩板长度的关系。结果表明：2 种岩石动态尺寸效应的规律存在共性和差异性，砂岩试样的应力－应变曲线更为“光滑”，花岗岩试样的应力－应变曲线各阶段斜率变化明显；砂岩动态抗压强度随长度的变化量比花岗岩大，且砂岩动态抗压强度与高径比呈正相关，花岗岩动态抗压强度与高径比呈弱相关；砂岩和花岗岩动态峰值应变均与高径比呈负相关，即随高径比增大而减小，且砂岩动态峰值应变的变化量大于花岗岩；砂岩和花岗岩的动态弹性模量与高径比均呈非线性正相关关系，即随高径比增大而增大，砂岩动态弹性模量随长度的增加量小于花岗岩；单位体积岩石的耗散能随长度增大而减小，能量耗散率方面，砂岩低于花岗岩。将岩石破坏模式分为破裂形态一和破裂形态二，发现砂岩和花岗岩破坏形式均以轴向破坏为主，随着高径比增大，岩样表面更易出现折断，且动载作用下围岩屈曲应力与长度呈负相关。研究成果可为巷道围岩稳定性控制提供参考。

关键词：岩石力学；压缩试验；力学特性；尺寸效应；屈曲破坏

中图分类号：TU 45 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－6915(2025)09－2379－12

Dynamic characteristics and fracture morphology of two rocks with different length to diameter ratios

ZHOU Jun[1, 2], ZHAO Guangming[2, 3], MENG Xiangrui[2], SUN Jinshan[1], YU Meilu[3], WANG Congcong[3], YAN Pan[3]

(1. *State Key Laboratory of Precision Blasting*, *Jianghan University*, *Wuhan*, *Hubei* 430056,*China*; 2. *National Key Laboratory of Safe Mining of Deep Coal and Environmental Protection*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan*, *Anhui* 232001, *China*; 3. *State Key Laboratory of Digital Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan*, *Anhui* 232001, *China*)

Abstract: The differences in rock mechanical behavior significantly influence mine disaster protection. To investigate the size effect of granite and sandstone under dynamic impact, the impact compression tests on

收稿日期：2024－11－28；**修回日期：**2025－05－21

基金项目：国家重点研发计划项目（2021－008，2023YFC2907602）；国家自然科学基金资助项目（52304118）

Supported by the National Key Research and Development Program (Grant Nos. 2021－008 and 2023YFC2907602) and National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52304118)

作者简介：周 俊（1994－），男，博士，2016 年毕业于江西理工大学安全工程专业，现任讲师，主要从事岩石动力学方面的教学与研究工作。E-mail：zj3333206@163.com。通讯作者：赵光明（1976－），男，博士，现任教授。E-mail：guangmingzhao@163.com

DOI：10.3724/1000-6915.jrme.2024.0912

sandstone and granite specimens with length-to-diameter ratios of 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 and 1.0 using split Hopkinson pressure bar (SHPB) system at an impact pressure of 0.75 MPa were conducted. The stress-strain curves, compressive strengths, peak strains, and elastic moduli of sandstone and granite specimens with varying length-to-diameter ratios were examined. The analysis of energy for rocks with different length-to-diameter ratios is included. The differences between sandstone and granite during the impact process using digital image correlation (DIC) and sketches were compared, and the rock fracture morphologies were analyzed. Furthermore, the relationship between rock failure and slab length using the Euler formula were examined. The results indicate that the two types of rock exhibit distinct and common patterns. The stress-strain curve of sandstone is relatively "smooth", while the slope changes at each stage of the stress-strain curve for granite are pronounced. The variation in sandstone strength with length is greater than that of granite. Specifically, the compressive strength of sandstone is positively correlated with the length-to-diameter ratio, increasing as the ratio rises. In contrast, granite shows no significant size effect on strength. The peak strains of both sandstone and granite are negatively correlated with the length-to-diameter ratio, decreasing as the ratio increases; notably, the reduction in peak strain for sandstone is more substantial than that for granite. The elastic moduli of both sandstone and granite are positively correlated with the length-to-diameter ratio, with both increasing as the ratio grows. However, the increase in elastic modulus for sandstone with length is less than that for granite. In these tests, transverse cracks were observed on the surfaces of both sandstone and granite. As the length increased, the energy dissipation per unit volume of rock decreased, and the energy dissipation rate for sandstone was lower than that for granite. Additionally, as the length-to-diameter ratio increased, both rocks were more susceptible to fracturing. The buckling stress of the surrounding rock exhibited a negative correlation with length under dynamic loading conditions. The findings of this study can provide valuable insights for the stability control of roadway surrounding rock.

Key words: rock mechanics; compression test; mechanical properties; size effect; buckling failure

1 引 言

岩石作为地质体的基本构成单元，是由单质矿物或多相矿物经地质成岩作用形成的具有一定结构构造的集合体，其内部有微裂隙、空洞、软弱结构面等缺陷，微观结构复杂，力学性质具有典型的尺寸效应。岩石的力学行为差异直接影响地下矿山的稳定性。砂岩作为典型沉积岩代表，广泛赋存于煤矿床层；花岗岩作为火成岩代表，常见于金属非金属矿床。结构特性导致岩石力学参数具有显著的动态尺寸效应，具体表现为抗压强度、弹性模量等关键指标随岩样尺寸变化呈现不同的演化规律。

得益于试验技术的发展，动态岩石力学研究取得了巨大进展[1-4]。以往研究通过改变岩石长度或直径，分析岩石动态尺寸效应。G. Guangfa[5]通过深入波传播理论分析，考虑了岩石尺寸因素，探讨了岩石在工程中的应力－应变曲线与试验应力－应变曲线的偏差特征及其原因。Y. Xie 等[6]通过建立新的尺度建模方法，对不同尺寸的砂岩试件进行落锤冲击试验，研究了不同尺度对岩石动态韧性的影响。R. G. Andersen 和 K. L. Nielsen[7]通过建立理论模型，研究了冲击试验中随尺寸变化的材料动态响应，随着尺寸的减小，材料在塑性状态会发生强化作用(表现为屈服应力的增加)，而不是硬化。Z. Song 等[8]通过对不同孔径材料进行压缩试验发现，孔径的增加会导致材料应变率敏感性降低。Z. Han 等[9]通过对砂岩和砂岩复合材料进行冲击压缩试验发现，中间层在变形过程中会起到缓冲作用，裂纹演化以拉伸开裂为主。岩石动态尺寸效应研究中，采用 SHPB 系统冲击岩石是最常见的技术方式。赵光明等[10-11]通过对不同高径比的花岗岩进行动态冲击试验，研究其力学特性、能量及分形特征，结果表明花岗岩强度尺寸效应与高径比呈弱相关关系，高径比会影响破碎块度分布。M. M. Khan 和 M. A. Iqbal[12]通过对不同直径混凝土冲击试验，得出试件尺寸会影响拉伸强度与 *DIF*，且大直径混凝土出现大块度碎块。王 磊等[13-15]通过对不同长径比煤样进行动态压缩和剪切试验，得出煤样抗压强度与长度呈正相关，剪切强度与煤样长度呈负相关。Z. Guan 等[16]利用直径 74 mm 的 SHPB 试验装置，对高径比为 0.29～2.33 的混凝土进行冲击压缩试验，研究表明混凝土表现出明显的尺寸效应，压缩强度随高径比增大而变化显著。吴拥政等[17]对不同高径比煤样进行动静

组合加载研究，表明煤样高径比增大时，破碎耗能密度减小，破碎程度增强，且煤样破坏模式随高径比的增大由张拉破坏向剪切破坏转变。王志亮等[18]对不同长径比岩石进行动静加载试验模拟，得出岩石强度随长径比增大而增大，动静组合加载条件下岩石以剪切破坏为主，随长径比增加破坏程度减弱。张 盛等[19-20]通过对不同直径砂岩进行压缩和劈裂试验，结果表明岩石尺寸过大时，试件两端受力不均匀，且主裂纹扩展时间长，破碎块度大。岩性的差异导致岩石力学行为存在差异，杨仁树等[21]通过对红砂岩、花岗岩和灰砂岩试件进行动态冲击试验，表明加载速率对红砂岩拉伸强度影响最明显，花岗岩次之，灰砂岩最弱。周 磊等[22]通过对 3 种砂岩进行冲击试验研究发现，岩石动态破坏强度主要是由晶体强度和晶体黏结强度决定的。

关于岩石尺寸效应的研究集中于力学特性方面，对岩石的冲击破坏进行了特征描述，鲜有深入研究尺寸影响下岩石的动态破裂形式。基于尺寸的差异，本试验采用花岗岩和砂岩这 2 种代表性岩样，通过 SHPB 试验装置冲击不同高径比的岩样，比较砂岩和花岗岩的动态力学行为，定量分析了不同岩石动态尺寸效应，并对试验中出现的破裂形态与围岩屈曲变形进行了对比研究。这有助于更好地揭示围岩动力灾害特性，对地下工程防护减灾有一定意义。

2　岩样制备与试验设备

2.1　岩石试件制备

本试验以淮北芦岭煤矿砂岩和某采石场的花岗岩为研究对象，通过取芯、切割、打磨等一系列工序，得到符合要求的岩样，如图 1 所示。为适应试验平衡条件[23]，制作的砂岩和花岗岩岩样直径均为 50 mm，高径比 0.5，0.6，0.7，0.8，0.9 和 1.0 对应岩样长度分别为 25，30，35，40，45，50 mm，每组岩样在同一冲击载荷 0.75 MPa 条件下进行 3 次 SHPB 冲击压缩试验，数据取平均值。

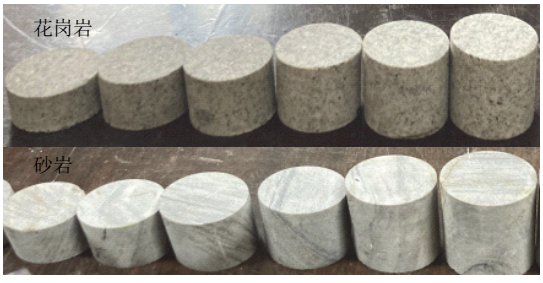


图 1　部分花岗岩和砂岩岩样

Fig.1　Rock sandstone and granite specimens

2.2　试验设备及原理

采用直径 50 mm 的 SHPB 装置冲击岩石，试验设备如图 2 所示。

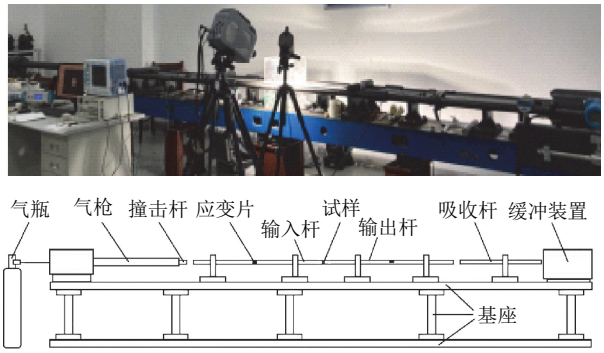


图 2　SHPB 试验装置

Fig.2　SHPB experimental device

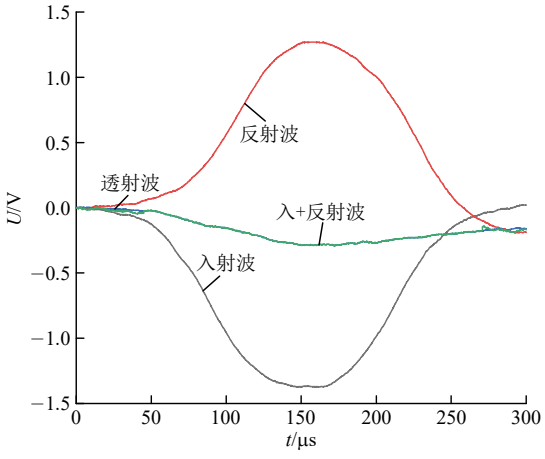
采用三波法计算应力、应变和平均应变率，表达式如下：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{\mathrm{s}} &= \frac{AE}{2A_{\mathrm{s}}}[\varepsilon_{\mathrm{t}}(t)+\varepsilon_{\mathrm{r}}(t)+\varepsilon_{\mathrm{i}}(t)]\\ \dot{\varepsilon} &= \frac{C}{L}[\varepsilon_{\mathrm{t}}(t)+\varepsilon_{\mathrm{r}}(t)-\varepsilon_{\mathrm{i}}(t)]\\ \varepsilon_{\mathrm{t}} &= \frac{C}{L}\int_0^{\mathrm{t}}[\varepsilon_{\mathrm{t}}(t)+\varepsilon_{\mathrm{r}}(t)-\varepsilon_{\mathrm{i}}(t)]\mathrm{d}t\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

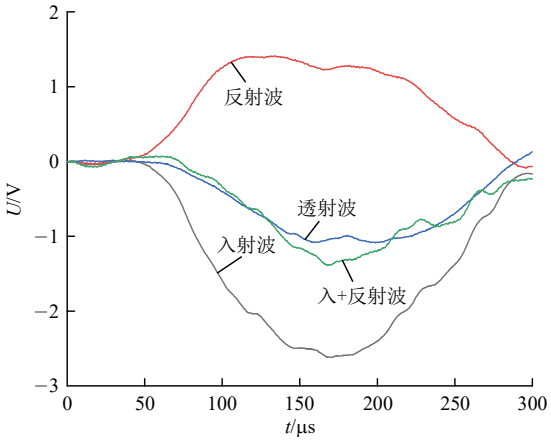
式中：σ_{s} 为岩样的应力；A 为杆的横截面积；E 为杆的弹性模量；A_{s} 为岩样端面面积；$\varepsilon_{\mathrm{i}}(t)$，$\varepsilon_{\mathrm{r}}(t)$，$\varepsilon_{\mathrm{t}}(t)$ 分别为试验中 t 时刻形成的入射波、反射波和透射波的应变；$\dot{\varepsilon}$ 为岩样应变率；C 为弹性压缩波的波速；L 为岩样长度；ε 为岩样应变。

2.3　应力波平衡

取砂岩和花岗岩典型应力波平衡图，如图 3 所示，岩样两端受力均等，平衡曲线大部分重合，满足动态应力平衡条件。



(a) 砂岩



(b) 花岗岩

图 3　砂岩和花岗岩应力波平衡图

Fig.3　Stress wave equilibrium diagrams of sandstone and granite

3　岩石冲击力学特性及结果分析

砂岩和花岗岩动态力学特性如表 1 所示。

表 1　砂岩和花岗岩物理力学特性

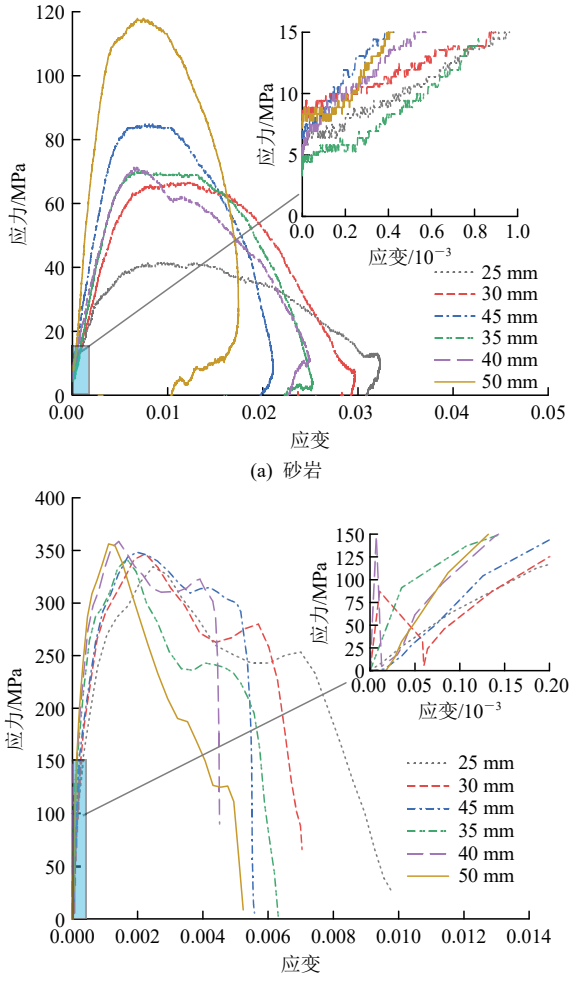
Table 1　Physico-mechanical properties of sandstone and granite

岩样类型	岩样长度 L/mm	动态抗压强度 σ /MPa	动态峰值应变 ε /10^{-2}	动态弹性模量 E_{50}/GPa
砂岩	25	41.882	1.312	13.002
	30	66.568	1.233	13.403
	35	70.173	1.079	16.112
	40	71.283	0.785	17.303
	45	84.874	0.842	22.301
	50	117.88	0.718	36.214
花岗岩	25	334.25	0.247	38.921
	30	346.678	0.224	51.908
	35	348.25	0.198	68.406
	40	349.65	0.167	77.005
	45	358.403	0.142	105.602
	50	356.125	0.131	121.011

3.1　岩石动态应力－应变分析

采集试验中入射杆和透射杆的电压信号，并对数据进行处理，得到岩样的应力－应变曲线。图 4 为不同长度(25，30，35，40，45，50 mm)的砂岩和花岗岩试件在冲击气压为 0.75 MPa 下的应力－应变曲线。

砂岩和花岗岩应力－应变曲线先上升后下降，表现为 4 个阶段：第一阶段为微裂纹闭合阶段，表现为向上弯曲[24]，其中砂岩曲线上升更为明显；第二阶段为弹性变形阶段，曲线表现为直线状态；第三阶段为塑性变形阶段，砂岩曲线较为光滑，斜率缓慢变化，花岗岩曲线斜率转折明显；第四阶段为破坏阶段，砂岩峰后曲线下降相对光滑，花岗岩峰后出现“次峰”，曲线再明显下降。



(a) 砂岩

(b) 花岗岩

图 4　不同长度的岩样应力－应变曲线

Fig.4　Stress-strain curves of specimen with different lengths

3.2　岩石强度分析

砂岩和花岗岩试件的动态抗压强度与长度的关系如图 5 所示。

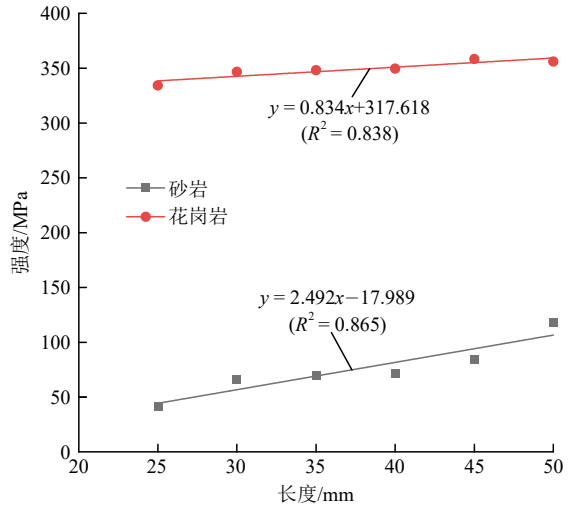


图 5　岩样长度与动态抗压强度关系

Fig.5　Relationship between rock sample length and compressive strength

S. Kao 等[25]对砂岩进行冲击压缩试验发现，砂岩动态抗压强度随长度增大而增大。同等冲击载荷作用下，随长度增大砂岩动态抗压强度从 41.882 MPa 增加至 117.88 MPa，增加幅值为 75.998 MPa；随长度增加，花岗岩动态抗压强度从 334.25 MPa 增加至 356.125 MPa，增加幅值为 21.875 MPa。与静态加载条件下高径比越小，岩石受端面摩擦效应越大的机制不同，岩样在高冲击载荷作用下达到应力平衡时，动态力学性质由尺寸效应起主导作用，岩样强度与长度呈正比，岩样强度随长度增大而增加，其中砂岩表现出更为明显的强度尺寸效应。

3.3　岩石应变分析

砂岩和花岗岩试件的动态峰值应变与长度的关系如图 6 所示。

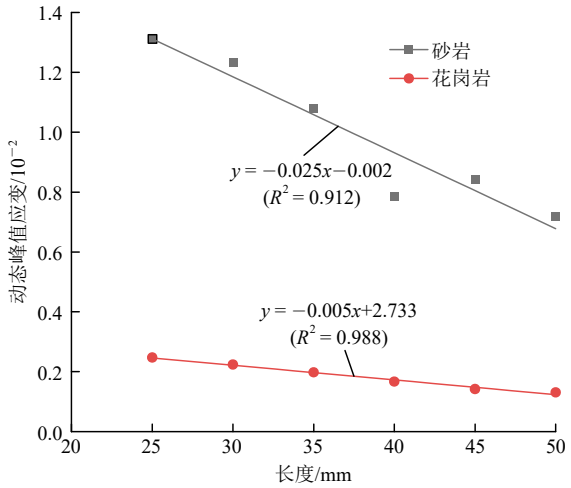


图 6　岩样长度与动态峰值应变关系

Fig.6　Relationship between rock sample length and dynamical peak strain

平　琦等[24]对不同长度石灰岩试件进行冲击试验发现，动态峰值应变随长度增加而减小。砂岩和花岗岩试件动态峰值应变与长度关系一致：同等冲击载荷作用下，随长度增大砂岩试件动态峰值应变从 0.013 12 减小至 0.007 18，下降幅值为 0.005 94；花岗岩试件动态峰值应变从 0.002 47 减小至 0.001 31，下降幅值为 0.001 16。峰值应变尺寸效应明显，岩石动态峰值应变与长度呈负相关，动态峰值应变随长度增大而减小，随长度增大，砂岩动态峰值应变的降低幅值大于花岗岩。鉴于花岗岩与砂岩结构特性差异，砂岩孔隙率高于花岗岩，砂岩动态峰值应变大于花岗岩。

3.4　岩石弹性模量分析

动载压缩曲线无法准确确定变形模量的起止点，以动态弹性模量作为衡量指标：

$$E_{50}=\sigma_{50}/\varepsilon_{50} \tag{2}$$

式中：E_{50} 为岩石的动态弹性模量，σ_{50} 为动态抗压强度为 50%时的应力值，ε_{50} 为 σ_{50} 对应的轴向应变值。

砂岩和花岗岩试件的动态弹性模量与长度关系如图 7 所示。

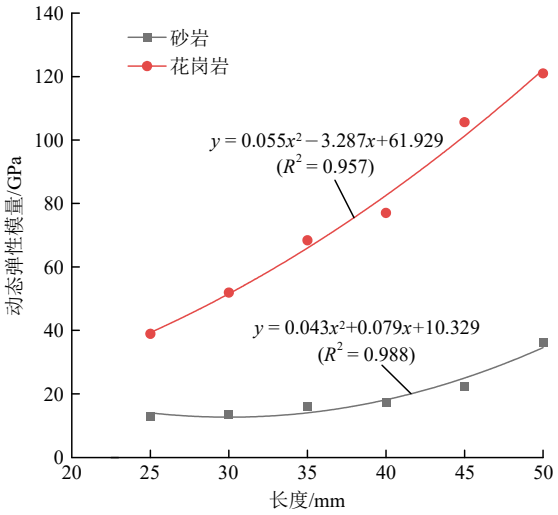


图 7　岩样长度与动态弹性模量关系

Fig.7　Relationship between rock specimen length and dynamical elastic modulus

谢　璨等[26]通过不同高径比岩石进行光弹试验得出，动态弹性模量随高径比增大而增大。砂岩和花岗岩试件动态弹性模量与长度关系一致：同等冲击载荷作用下，随长度增大，砂岩试件动态弹性模量从 13.002 GPa 增大至 36.214 GPa，增加幅值为 23.212 GPa；花岗岩试件动态弹性模量从 38.921 GPa 增大至 121.011 GPa，增加幅值为 82.09 GPa。岩石动态弹性模量与长度呈正相关，动态弹性模量随长度增大而增大。相同试验条件下，岩石动态弹性模量表现出明显的尺寸效应，长度与动态弹性模量呈非线性关系，这可能是由于惯性效应和摩擦效应引起应力场重分布的相对范围发生变化所致。

3.5　岩石能量分析

对岩石进行能量分析，结合一维弹性应力波理论和均匀假定基础，入射能、反射能及透射能计算公式如下所示：

$$\left.\begin{aligned} W_{\mathrm{i}}&=\frac{A}{\rho C}\int_0^t\sigma_{\mathrm{i}}^2(t)\mathrm{d}t\\ W_{\mathrm{r}}&=\frac{A}{\rho C}\int_0^t\sigma_{\mathrm{r}}^2(t)\mathrm{d}t\\ W_{\mathrm{t}}&=\frac{A}{\rho C}\int_0^t\sigma_{\mathrm{t}}^2(t)\mathrm{d}t \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中：W_{i}，W_{r}，W_{t} 分别为入射能、反射能及透射能。

(1) 岩石吸收能分析

表 2　不同长度岩样能量特性

Table 2　Energy properties of rock specimen with different lengths

岩样类型	长度 L/mm	入射能 W_i/J	反射能 W_r/J	透射能 W_t/J	吸收能 W_d/J	单位体积岩石破碎耗能 W_{wd}/(10^{-3} J • mm^{-3})	能量耗散率 n
砂岩	25	591.173	350.243	204.169	36.761	0.749	0.062
	30	595.221	322.209	259.503	13.509	0.229	0.022
	35	600.841	254.192	273.591	73.058	1.063	0.121
	40	584.490	256.194	312.083	16.213	0.206	0.027
	45	589.130	193.244	334.773	61.113	0.692	0.103
	50	593.116	116.689	460.714	15.713	0.160	0.026
花岗岩	25	549.467	229.157	73.465	246.845	5.028	0.449
	30	596.616	105.870	163.629	327.117	5.553	0.548
	35	576.332	93.082	159.533	323.717	4.710	0.561
	40	599.985	76.562	225.049	298.374	3.799	0.497
	45	575.203	98.889	157.418	318.896	3.609	0.554
	50	594.575	245.137	45.242	304.196	3.098	0.511

忽略岩样及杆界面损失的能量，岩样吸收能可表示为

$$W_d = W_i - (W_r + W_t) \tag{4}$$

王德荣等[27]通过对砂岩和花岗岩试件进行冲击试验研究发现，砂岩和花岗岩试件的破坏程度与能量存在显著关系。岩样入射能、反射能、透射能和吸收能与长度关系如图 8 所示。

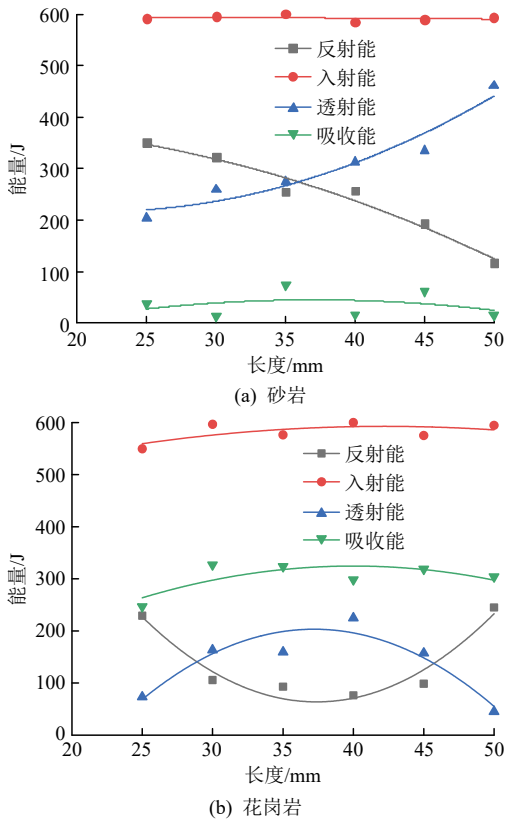


图 8　岩样长度与能量关系

Fig.8　Relation between length of rock specimen and energy

入射能大小取决于冲击载荷大小，同一冲击气压条件下，不同长度砂岩和花岗岩试件的入射能比较一致，砂岩和花岗岩试件的反射能规律不同：随长度增加，砂岩试件的反射能减小，从 350.243 J 降至 116.689 J，下降幅值为 233.554 J；随长度增加，花岗岩试件的反射能呈先减小后增大规律，其中长度 40 mm 花岗岩试件的反射能最低，为 76.562 J。砂岩和花岗岩试件的透射能规律与反射能规律相反：随长度增加，砂岩试件的透射能逐渐升高，从 204.169 J 增至 460.714 J，增加幅值为 256.545 J；随长度增加，花岗岩试件的透射能先增大后减小，其中长度 40 mm 花岗岩试件的透射能最高，为 225.049 J。砂岩与花岗岩试件的吸收能与长度无关，但吸收能与入射能规律一致。其中，花岗岩吸收能值高于砂岩，即在冲击过程中花岗岩试件的耗散能量大于砂岩；砂岩和花岗岩的反射能和入射能规律上的差异表明，反射能、入射能和吸收能均与岩性差异有关，这一现象可通过细观试验进一步研究。

(2) 单位体积岩石耗散能分析

岩样吸收能与长度呈弱相关，且吸收能几乎都用于岩石破碎。由于岩样体积差异，为反映其吸收能量的情况，可采用单位体积岩石的耗散能来表示，公式如下：

$$w_{wd} = \frac{W_d}{V} \tag{5}$$

式中：w_{wd} 为岩样单位体积耗散能(J/cm^3)。

图 9 为单位体积岩石耗散能与长度关系。

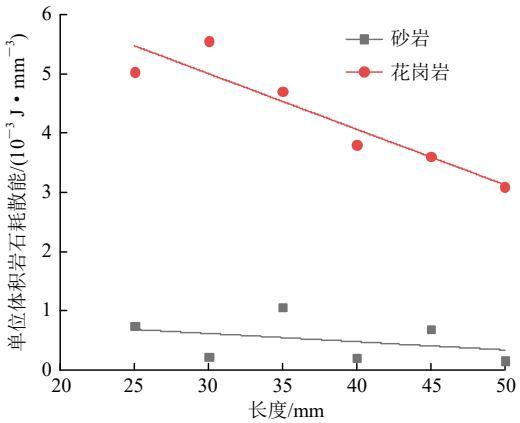


图 9　单位体积岩石耗散能与长度关系

Fig.9　Relation between length and energy dissipation per unit volume of rock

砂岩和花岗岩试件长度与单位体积岩石耗散能呈负相关关系，随长度增加，单位体积岩石耗散能减少。鉴于花岗岩吸收能高于砂岩，花岗岩单位体积岩石耗散能减少速率更为明显。单位体积岩石耗

散能越小，在一定程度上说明用于岩样破碎的能量越少，因此同等条件下岩石更易产生大块碎块[10]。花岗岩为晶质结构，致密性较好；砂岩由砂粒压实胶结而成，孔隙率较高。岩石破坏本质是能量驱动下的缺陷主导行为，因此在同等冲击条件下，砂岩所需的破碎能量低于花岗岩，其单位体积岩石耗散能也低于花岗岩。

(3) 能量耗散率分析

为衡量岩石在同等条件下的耗散能力，定义吸收能占入射能的百分率为能量耗散率：

$$n=\frac{W_{\mathrm{d}}}{W_{\mathrm{i}}} \tag{6}$$

式中：n 为岩样能量耗散率(%)。

图 10 为砂岩和花岗岩试件能量耗散率与长度的关系。

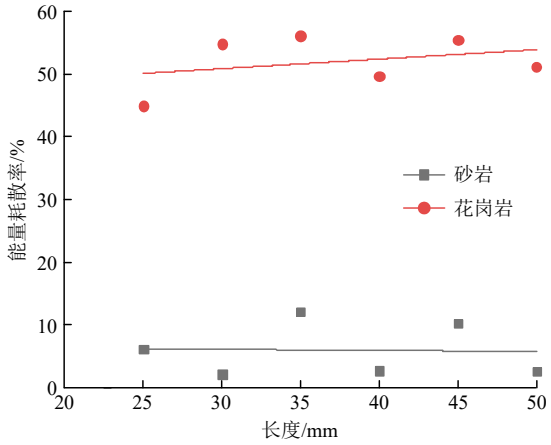


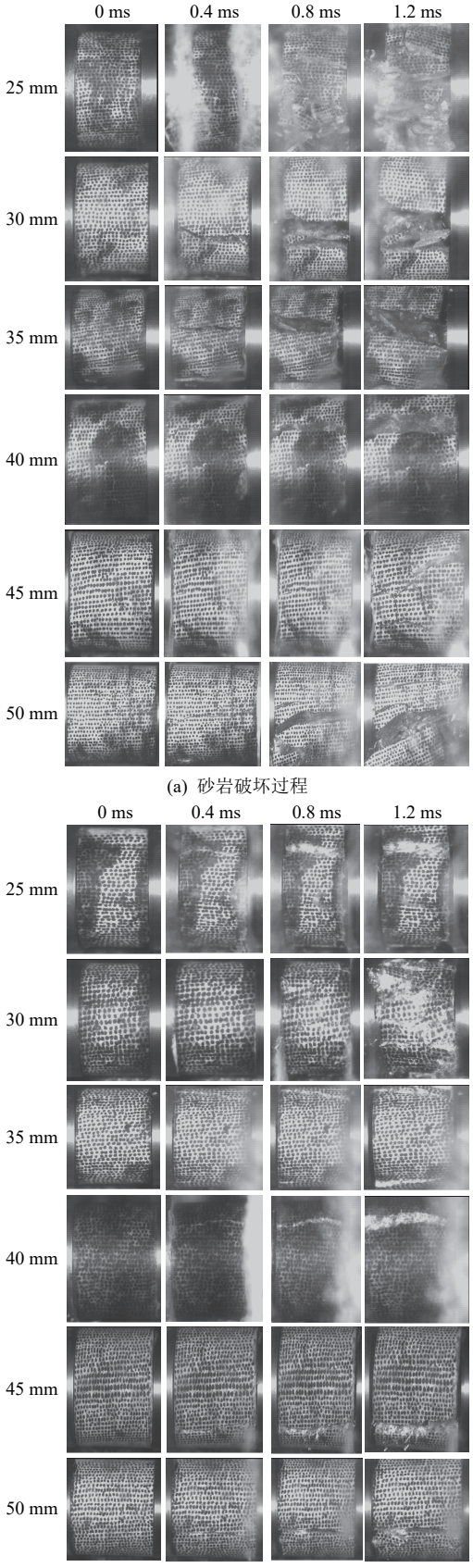
图 10　岩样能量耗散率与长度关系

Fig.10　Relationship between energy dissipation rate and length of rock specimen

岩石试件吸收能与长度呈弱相关，不同长度砂岩和花岗岩试件的能量耗散率基本一致。其中，不同长度花岗岩试件的能量耗散率波动较大，且花岗岩的能量耗散率远高于砂岩，这直接体现为花岗岩耗散的能量更大，对碎块大小有显著影响[11]。岩石耗散能力的强弱主要取决于其孔隙结构及矿物硬度等。花岗岩耗能主要依赖裂隙摩擦和晶格变形，加之其矿物组成中石英、长石的硬度较高，弹塑性耗能也较多；砂岩则更多通过孔隙和塑性变形耗散能量。正是由于岩性结构的差异，导致花岗岩的能量耗散率高于砂岩。

3.6　岩石破坏过程

对不同高径比砂岩和花岗岩试件进行了喷描，部分岩样表面深色突出部分是摆放过程中浸染了装置上的油渍。冲击气压 0.75 MPa 下岩样冲击破坏过程如图 11 所示。



(a) 砂岩破坏过程

(b) 花岗岩破坏过程

图 11　不同长度岩样破坏过程

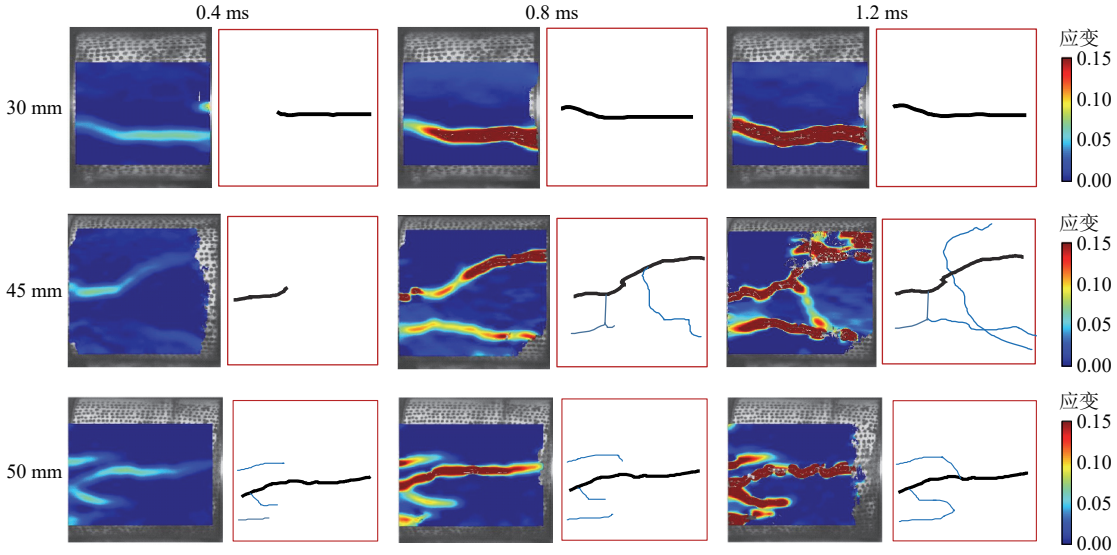
Fig.11　Failure process of rock specimens with different lengths

砂岩和花岗岩试件破裂过程中，均先出现轴向裂纹，后出现径向裂纹。同等冲击载荷条件下，相

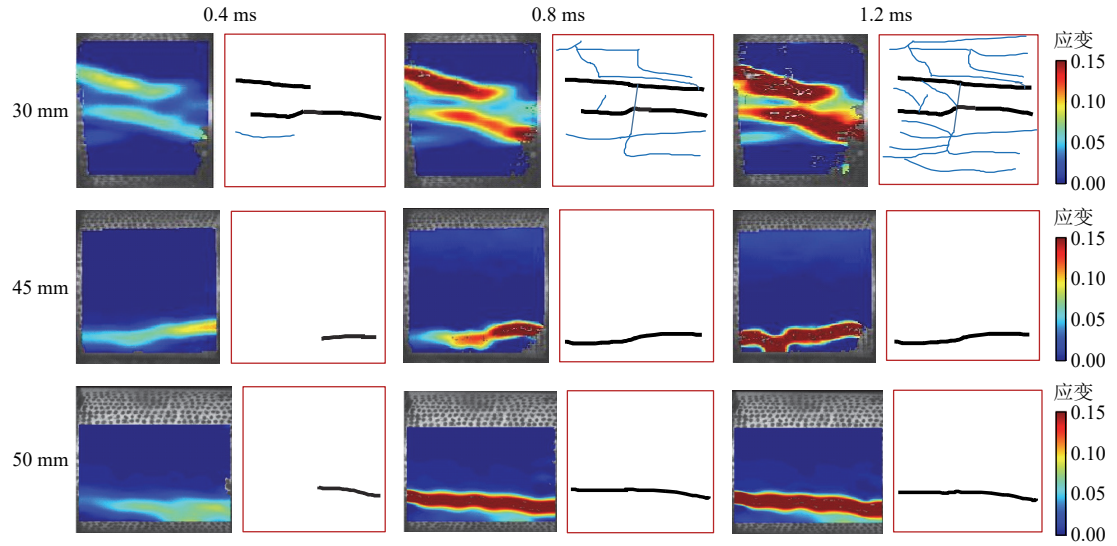
同长度砂岩试件强度低于花岗岩，因此砂岩破坏时产生的轴向裂纹更多，相较于花岗岩，其破裂程度更为严重。不同长度的岩石试件在冲击压缩试验中均表现为拉破坏，形成轴向裂纹。其中，长度为 25 和 45 mm 的砂岩及长度为 30 mm 花岗岩试件，在破坏过程中均出现轴向和径向裂纹，破碎块度较小。这一方面是由于岩石自身裂纹发育，受到冲击后，裂隙沿脆弱面扩展形成径向裂纹；另一方面是因为冲击破坏产生的岩石碎块在表面尚未弹射出去时，再次与杆发生撞击，导致碎块折断。

以岩样初始散斑图作为参考图像，选取不同高径比岩样在加载过程中的典型时刻的散斑图作为变形图像，利用 Matlab 处理软件，对岩样的散斑图像进行分析，并根据冲击破坏过程使用素描对岩样裂隙扩展进行分析。以长度 30，45 和 50 mm 岩样为例，破裂演化规律如图 12 所示。

不同高径比岩样的冲击破裂应变场演化和裂隙扩展(粗线代表主裂纹，细线代表次生裂纹)存在对应关系。不同长度的砂岩和花岗岩试件在冲击初始阶段均先出现主裂纹，主裂纹既可能从最先受到冲击力的接触端起裂，也可能从另一端受力端起裂，且均沿着岩样内部的最弱面扩展。次生裂纹存在 2 种扩展方式：一种是从主裂纹上产生并向弱连接处扩展(45 mm 砂岩试件)；另一种是从弱连接处产生并向主裂纹延伸(50 mm 砂岩试件)。此外，次生裂纹还可再次分叉形成新的细微裂纹(30 mm 花岗岩试件)。对比应变场云图可知，不同长度岩样的主裂纹处应变最为集中，且应变集中区域从受力端开始呈深色，并随裂纹扩展方向延伸贯穿整个岩样；次生裂纹的应变集中程度明显小于主裂纹，在云图



(a) 砂岩试件破坏应变场演化和裂纹扩展素描



(b) 花岗岩试件破坏应变场演化和裂纹扩展素描

图 12　不同长度岩样破坏演化图

Fig.12　Failure evolution of rock samples with different lengths

上呈浅色。岩样冲击破坏均先产生主裂纹(轴向裂纹)，后产生次生裂纹(径向或轴向裂纹)。由于岩石具有非均质性，裂纹均不会以直线形式扩展。

4　讨　论

根据砂岩和花岗岩冲击过程中的破裂形式，将岩石加载破坏分为 2 种破坏模式，即破裂形态一和破裂形态二，如图 13 所示。岩样张拉破坏产生轴向裂纹，表面岩样被抛掷出去，出现破裂形态一；未完全弹射出去的碎块也会受到二次碰撞，碎块折断，出现破裂形态二。

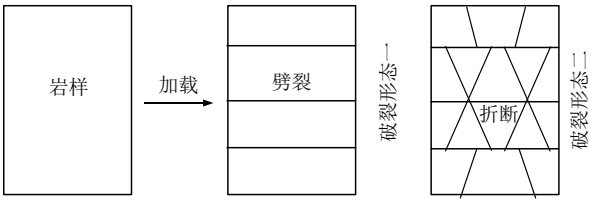


图 13　岩石加载破坏形态示意图

Fig.13　Rock failure pattern in loading

针对冲击荷载下不同长度岩样出现的 2 种破裂形态，通过补充试验对不同长度岩石的破裂形态进行研究：新增 0.75 MPa 气压条件下，长度为 25，35 和 60 mm 的花岗岩试件(与前文试验花岗岩试件有差异)的冲击压缩试验，结果如图 14 所示。观测试验过程可知，0.75 MPa 冲击载荷下，25 mm 岩样破坏过程中出现多条轴向裂纹(破裂形态一)；35 和 60 mm 岩样破坏过程中，除出现多条裂纹外，还伴随中间折断现象(破裂形态二)。其中，在出现折断现象(破裂形态二)前，岩样在产生多条劈裂裂纹的同时，均先出现鼓包现象。对比 0.75 MPa 冲击载荷下长度 25，35 和 60 mm 岩样的破坏过程可知，同等冲击破坏条件下，随着岩样长度增加，岩样更易出现多条轴向裂纹。

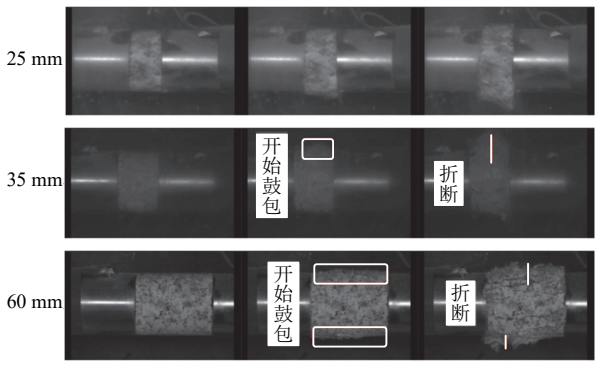


图 14　0.75 MPa 冲击载荷下花岗岩破坏过程

Fig.14　Granite failure process under 0.75 MPa impact load

蒋志坚等[28]通过增大冲击气压对岩石进行冲击试验，得出冲击气压越大，破碎块度的平均尺寸越小的结论。依据冲击试验过程中出现的破坏模式，并考虑尺寸差异，绘制出如图 15 所示的岩石破坏示意图。武仁杰等[29]通过不同载荷冲击千枚岩的试验发现，随着载荷增大，破碎块度逐渐减小。岩石具有一定强度，当冲击载荷超过其抗拉强度时，岩样会发生破坏，其破坏程度与尺寸及载荷大小均相关：尺寸增加时，岩石在冲击过程中更易产生横、纵向裂纹，破裂形态更为破碎；载荷增大时，岩石在冲击过程中会出现更多横、纵向裂纹，破裂形态同样表现得更为破碎。

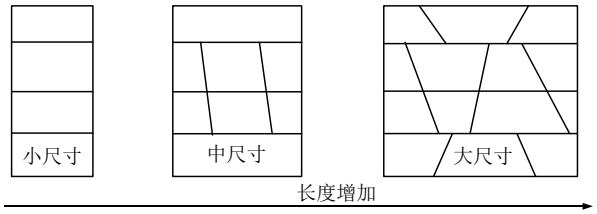


图 15　不同尺寸岩石破裂形态示意图

Fig.15　The correlation with rock specimen fracture pattern in different sizes

以 60 mm 岩样的冲击破坏为例，对折断现象(破裂形态二)进行机制分析：冲击过程中，岩样先发生劈裂破坏，随后出现多层劈裂裂纹，紧接着产生鼓包现象；在惯性力作用下冲击持续进行，试件出现鼓包折断并弹射出去，撞击透射杆后发生回弹，进而撞击入射杆，这一过程加剧了碎屑的产生，最终碎块完全弹射出去。由于高速冲击作用具有能量大、时间短的特点，可忽略试件重力作用，将其冲击力学过程简化如图 16 所示。入射杆以 V_0 速度冲击试件，导致产生劈裂破坏。定义裂纹间的试件部分为劈裂试件，此过程中劈裂试件因拉伸破坏出现鼓包现象并发生折断。撞击透射杆后，碎块以速度 V_1 回弹，撞击入射杆后产生断裂(碎块在空中相互碰撞)，最终形成碎屑。

如图 17 所示的巷道围岩，将侧壁围岩看作完整试件，岩板看作劈裂试件。不同长度岩样折断破坏机制是一致的，分析尺寸效应对其影响。劈裂试件简化成两端简支的细岩柱，使用欧拉公式，假设 F 为轴心应力，绕中轴面的转动惯量为 I，水平变形用 $V(x)$表示(x 表示劈裂试件竖直方向的位置)。由于所受冲击载荷较大，自重作用可忽略不计。故建立弯矩平衡方程[30]：

$$E_{50}I\frac{\mathrm{d}^2v}{\mathrm{d}x^2}+Fv=0 \tag{7}$$

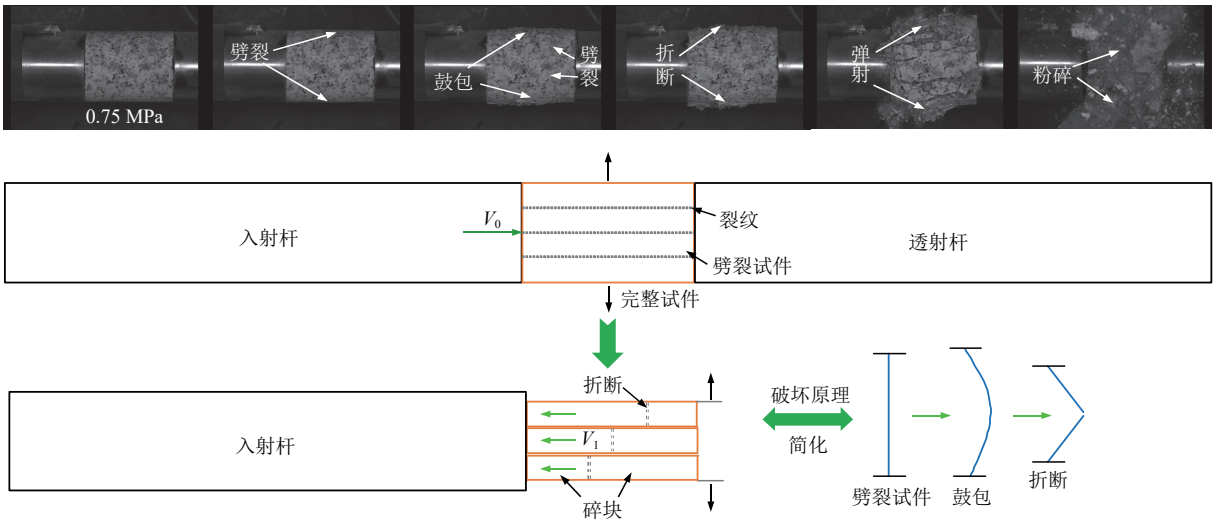


图 16　冲击破裂完整过程及破坏机制

Fig.16　Impact fracture process and rock failure mechanism

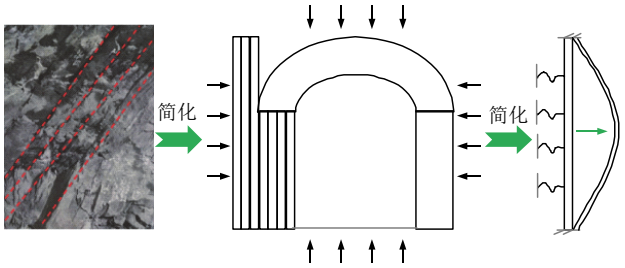


图 17　围岩洞壁劈裂及岩板力学模型

Fig.17　Mechanical model of surrounding rock instability

求解式(7)可以得到

$$v(x)=c_1\sin(\lambda x)+c_2\cos(\lambda x) \tag{8}$$

其中，

$$\lambda=\sqrt{F/E_{50}I}$$

式中：c_1和c_2均为系数，由柱体两端的边界约束条件决定。

根据材料力学压杆屈曲的计算理论，对于两端简支的岩柱，其发生屈曲变形的临界应力F_c为

$$F_c=\frac{\pi^2E_{50}I}{L^2} \tag{9}$$

因此，岩板发生鼓包的临界应力为

$$\sigma_c=\frac{F_c}{A}=\frac{\pi^2E_{50}I}{AL^2} \tag{10a}$$

其中，

$$I=\frac{1}{12}Ah^2 \tag{10b}$$

式中：h为岩板厚度，A为岩板截面积。

因此，式(10a)可写为

$$\sigma_c=\frac{E_{50}\pi^2h^2}{12L^2} \tag{11}$$

式(11)表明，试件的屈曲载荷是弹性模量及长度的函数，且与长度成反比。采场同一批花岗岩材料的性质一致，但在动载作用下，岩石的弹性模量随长度变化，呈动态特征。假设$k=E_{50}/L^2$，试验中不同长度花岗岩试件的动态抗压强度基本一致，故取同一σ_c值作为不同长度岩样发生鼓包的临界应力，则临界应力与长度关系，即为k与L的关系如图 18 所示。

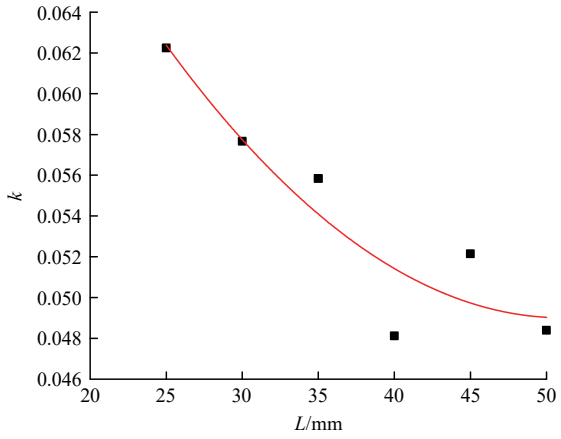


图 18　花岗岩临界应力与长度关系

Fig.18　Relationship between critical stress and length of granite

图 18 中的曲线很好地阐释了：随着试件长度增加，其产生鼓包破坏所需的应力越小，即岩样越容易折断。围岩的尺寸效应表现为：载荷作用下，围岩帮部发生板裂或层裂破坏的应力与其高度呈负相关。在一定冲击载荷条件下，冲击岩石出现的劈裂－折断现象与围岩的屈曲变形具有一致性。通过试验现象建立二者的联系，并结合理论分析阐释其尺寸效应，可为地下工程灾害防控提供参考。由于岩石

存在非均质性，试验选取的尺寸和岩石材料种类尚不足以全面揭示地下工程尺寸效应的灾害机制，在材料多样性、跨尺度机制、复杂工况模拟及工程应用等方面仍存在局限。同时，随着地下空间向深地发展，地应力作用日益显现，岩石的力学特性受地应力影响显著。下一步将针对围压加载条件下的岩石开展动态尺寸效应研究，以深化对岩石动态破裂机制的理解，并推动研究成果向工程实践转化。

5　结　论

为研究岩石尺寸差异引起的力学行为差异，开展了高径比 0.5～1 的花岗岩和砂岩试件在 0.75 MPa 载荷下的冲击试验，分析了岩石动力学特性的尺寸效应及破裂规律，主要结论如下：

(1) 岩石力学特性受尺寸影响明显，且不同岩石的尺寸效应存在差异。砂岩应力－应变曲线各阶段无明显斜率变化，花岗岩应力－应变曲线相邻阶段的斜率转折明显；花岗岩动态抗压强度与试件长度呈弱相关，砂岩动态抗压强度与试件长度呈正相关，且随试件长度增加呈线性增加趋势；砂岩和花岗岩的动态峰值应变均随试件长度增加呈线性减小趋势；两者的弹性模量均随长度增加而增大。

(2) 岩石能量特性受尺寸影响明显，砂岩和花岗岩能量规律存在差异，其中反射能与透射能呈现相反规律。砂岩反射能随试件长度增加而减小，透射能则增大；花岗岩反射能随试件长度增加先减小后增大，透射能则呈现相反的趋势。2 种岩石单位体积耗散能均随试件长度增加而减小；受岩性结构差异影响，花岗岩的单位体积耗散能及能量耗散率均高于砂岩。

(3) 岩石冲击过程中先出现主裂纹，后产生次生裂纹，主裂纹贯穿岩样，且次生裂纹均与主裂纹相连。受岩样尺寸影响，在一定冲击条件下，岩石受冲击后出现 2 种破裂形态：不同长度岩石冲击试验均出现轴向拉破坏，较长岩样还出现折断现象。岩石破坏程度随岩样长度增加而增大，也随载荷增大而增大；当长度或冲击载荷增大到一定程度时，岩样均会发生冲击折断。

(4) 在一定冲击条件下，岩样受冲击过程中首先出现劈裂裂纹，后出现鼓包现象，折断发生在鼓包处。折断现象和硐壁屈曲破坏现象一致，运用欧拉公式进行理论分析发现，岩体屈曲变形与长度呈反比关系；岩石尺寸效应表现为围岩帮部发生变形的概率随长度增加而增大。

参考文献(References)：

[1] 胡时胜，王礼立，宋　力，等. Hopkinson 压杆技术在中国的发展回顾[J]. 爆炸与冲击，2014，34(6)：641－657.(HU Shisheng，WANG Lili，SONG Li，et al. Review on the development of Hopkinson pressure bar technology in China[J]. Explosion and Shock Waves，2014，34(6)：641－657.(in Chinese))

[2] 宫凤强，李夕兵，刘希灵. 三轴 SHPB 加载下砂岩力学特性及破坏模式试验研究[J]. 振动与冲击，2012，31(8)：29－32.(GONG Fengqiang，LI Xibing，LIU Xiling. Tests for sandstone mechnical properties and failure model under triaxial SHPB loading[J]. Journal of Vibration and Shock，2012，31(8)：29－32.(in Chinese))

[3] ZHOU Z L，ZHAO Y，JIANG Y H，et al. Dynamic behavior of rock during its post failure stage in SHPB tests[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2017，27(1)：184－196.

[4] YAN Z，JIN J，WANG L，et al. Experimental and numerical study on the dynamic mode III fracture behaviors of rock using an axially notched flattened Brazilian disc in SHPB tests[J]. International Journal of Impact Engineering，2024，190：104976.

[5] GUANGFA G. Stress wave effects and their mechanisms on stress-strain curves in the elastic phase of SHPB tests[J]. International Journal of Impact Engineering，2024，193：105061.

[6] XIE Y，PENG Z，ZHU Z，et al. Low-medium loading rate effect on dynamic fracture toughness of sandstone scaled model[J]. Engineering Fracture Mechanics，2023，294：109731.

[7] ANDERSEN R G，NIELSEN K L. Dynamic size effects across the scales：Localization in round notched bars[J]. International Journal of Solids and Structures，2022，258：111989.

[8] SONG Z，YU C，GUO D，et al. High-temperature dynamic failure behavior and compressive mechanical properties of alumina porous ceramic with various pore sizes[J]. International Journal of Impact Engineering，2024，192：105024.

[9] HAN Z，LI D，LI X. Dynamic mechanical properties and wave propagation of composite rock-mortar specimens based on SHPB tests[J]. International Journal of Mining Science and Technology，2022，32：793－806.

[10] 赵光明，周　俊，孟祥瑞，等. 高径比差异条件下花岗岩岩石动态冲击压缩特性[J]. 岩石力学与工程学报，2021，40(7)：1 392－1 401.(ZHAO Guangming，ZHOU Jun，MENG Xiangrui，et al. Dynamic impact compression characteristics of granite rocks under different height-diameter ratios[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2021，40(7)：1 392－1 401.(in Chinese))

[11] 周　俊，赵光明，孟祥瑞，等. 高径比差异条件下花岗岩动态冲击能量耗散及破碎特征[J]. 采矿与安全工程学报，2023，40(2)：379－386.(ZHOU Jun，ZHAO Guangming，MENG Xiangrui，et al. Dynamic impact energy dissipation characteristics of granite with different height-diameter ratios[J]. Journal of Mining and Safety Engineering，2023，40(2)：379－386.(in Chinese))

[12] KHAN M M，IQBAL M A .Strain rate and size effects on dynamic

tensile behaviour of standard and high-strength concrete： An experimental study[J]. Structures，2024，63：106325.

[13] 王 磊，袁秋鹏，谢广祥，等. 冲击载荷下煤样能量耗散与破碎分形的长径比效应[J]. 煤炭学报，2022，47(4)：1 534－1 546.(WANG Lei，YUAN Qiupeng，XIE Guangxiang，et al. Length-diameter ratio effect of energy dissipation and fractals of coal samples under impact loading[J]. Journal of China Coal Society，2022，47(4)：1 534－1 546. (in Chinese))

[14] 王 磊，陈礼鹏，袁秋鹏，等. 不同冲击气压下煤样动态剪切强度的长径比效应[J]. 岩土工程学报，2024，46(1)：131－139.(WANG Lei，CHEN Lipeng，YUAN Qiupeng，et al. Length-diameter ratio effects of dynamic shear strength of coal samples under different impact air pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2024，46(1)：131－139.(in Chinese))

[15] 王 磊，邹 鹏，谢广祥，等. 冲击载荷下不同尺寸煤岩动力学分析及损伤特性研究[J]. 振动与冲击，2023，42(22)：322－331.(WANG Lei，ZOU Peng，XIE Guangxiang，et al. Dynamic analysis and damage characteristics of coal and rock with different sizes under impact loading[J]. Journal of Vibration and Shock，2023，42(22)：322－331.(in Chinese))

[16] GUAN Z，LI Y，LAI Z，et al. Size effect of concrete based on split Hopkinson pressure bar(SHPB) test[J]. Construction and Building Materials，2024，441：137449.

[17] 吴拥政，孙卓越，付玉凯. 三维动静加载下不同长径比煤样力学特性及能量耗散规律[J]. 岩石力学与工程学报，2022，41(5)：877－888.(WU Yongzheng，SUN Zhuoyue，FU Yukai. Mechanical properties and energy dissipation laws of coal samples with different length-to-diameter ratios under 3D coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2022，41(5)：877－888.(in Chinese))

[18] 王诗杰，王志亮，封陈晨，等. 动静组合加载下长径比对岩样峰值应力与破坏形态影响研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报，2024，6(4)：130－140.(WANG Shijie，WANG Zhiliang，FENG Chenchen，et al. Study on the influence of aspect ratio on peak stress and failure mode of rock samples under the combined dynamic and static loading[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering，2024，6(4)：130－140.(in Chinese))

[19] 张 盛，王 峥，张旭龙，等. 不同尺寸砂岩动态力学性质和应力平衡性的试验研究[J]. 爆炸与冲击，2022，42(10)：22－38.(ZHANG Sheng，WANG Zheng，ZHANG Xulong，et al. Rock dynamic mechanical properties and dynamic stress balance of sandstone specimens with different sizes[J]. Explosion and Shock Waves，2022，42(10)：22－38.(in Chinese))

[20] 张 盛，喻炳鑫，王 峰，等. 不同尺寸含裂缝岩样动态破坏特征的实验研究[J]. 采矿与安全工程学报，2021，38(5)：1 045－1 054.(ZHANG Sheng，YU Bingxin，WANG Feng，et al. Rock dynamic mechanical properties and dynamic stress balance of sandstone specimens with different sizes[J]. Journal of Mining and Safety Engineering，2021，38(5)：1 045－1 054.(in Chinese))

[21] 杨仁树，李炜煜，李永亮，等. 3 种岩石动态拉伸力学性能试验与对比分析[J]. 煤炭学报，2020，45(9)：3 107－3 118.(YANG Renshu，LI Weiyu，LI Yongliang，et al. Comparative analysis on dynamic tensile mechanical properties of three kinds of rocks[J]. Journal of China Coal Society，2020，45(9)：3 107－3 118.(in Chinese))

[22] 周 磊，朱哲明，董玉清，等. 砂岩在不同应变率条件下的劈裂破坏特性[J]. 中南大学学报：自然科学版，2021，52(2)：555－567.(ZHOU Lei，ZHU Zheming，DONG Yuqing，et al. Fracture properties of sandstone materials at different strain rates[J]. Journal of Central South University：Natural Science，2021，52(2)：555－567. (in Chinese))

[23] 梁书锋，吴帅峰，李胜林，等. 岩石材料 SHPB 实验试件尺寸确定的研究[J]. 工程爆破，2015，21(5)：1－5.(LIANG Shufeng，WU Shuaifeng，LI Shenglin，et al. Study on the determination of specimen size in SHPB experiments of rock materials[J]. Engineering Blasting，2015，21(5)：1－5.(in Chinese))

[24] 平 琦，张 号，苏海鹏. 不同长度石灰岩动态压缩力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2018，37(增 2)：3 891－3 897.(PING Qi，ZHANG Hao，SU Haipeng. Study on dynamic compression mechanical properties of limestone with different lengths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2018，37(Supp.2)：3 891－3 897.(in Chinese))

[25] KAO S，ZHAO G，XU W，et al. Experimental study of the association between sandstone size effect and strain rate effect[J]. Journal of Mechanical Science and Technology，2020，34(9)：3 597－3 608.

[26] 谢 璨，李树忱，晏 勤，等. 不同尺寸裂隙岩石损伤破坏特性光弹性试验研究[J]. 岩土工程学报，2018，40(3)：568－575.(XIE Can，LI Shuchen，YAN Qin，et al. Photoelastic experiments on failure characteristics of fractured rock with different sizes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2018，40(3)：568－575.(in Chinese))

[27] 王德荣，刘昭言，刘家贵，等. 砂岩和花岗岩的动态性能与能量耗散分析[J]. 北京理工大学学报，2017，37(12)：1 217－1 223.(WANG derong，LIU Zhaoyan，LIU Jiagui，et al. Analysis of dynamic properties and energy dissipation of sandstone and granite[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology，2017，37(12)：1 217－1 223.(in Chinese))

[28] 蒋志坚，孙 灵，平 扬，等. 基于大直径 SHPB 的岩石动态响应特征试验[J]. 采矿与岩层控制工程学报，2021，3(4)：34－40.(JIANG Zhijian，SUN Bi，PING Yang，et al. Experimental study on dynamic response characteristics of rockusing based on large diameter SHPB[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering，2021，3(4)：34－40.(in Chinese))

[29] 武仁杰，李海波，李晓锋，等. 不同冲击载荷下层状千枚岩压缩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报，2019，38(增 2)：3 304－3 312.(WU Renjie，LI Haibo，LI Xiaofeng，et al. Dynamic mechanical properties of layered phyllite subject to different impact loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2019，38(Supp.2)：3 304－3 312.(in Chinese))

[30] 李地元. 高应力硬岩胞性板裂破坏和应变型岩爆机制研究[博士学位论文][D]. 长沙：中南大学，2010.(LI Diyuan. Study on the brittle spalling failure of hard rock and the mechanism of strainbust under high in-situ stresses[Ph. D. Thesis][D]. Changsha：Central South University，2010.(in Chinese))