

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.001

组合静载条件下 SHPB 试件长径比优选研究^{*}

潘博¹,汪旭光¹,郭连军^{2,3},徐振洋²,闫大洋⁴

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 辽宁科技大学 矿业工程学院, 鞍山 114051;

3. 沈阳工业大学 建筑与土木工程学院, 沈阳 110870; 4. 鞍钢矿业爆破有限公司, 鞍山 114046)

摘要: 为优选三维静组合条件下冲击试验的试件最佳长径比, 利用改造的分离式霍普金森压杆(SHPB), 开展了5种不同长径比(直径50 mm, 长度分别为30 mm、40 mm、50 mm、60 mm和70 mm)混合花岗岩试件在恒定轴压(4 MPa)和围压(4 MPa)条件下的冲击试验。从试件应力平衡状态、应力差相对值以及动态应力特征的等方面, 分析了试件长径比对应力平衡时间、峰值强度的影响, 同时引入割线模量以更好说明试件在组合加载下塑性变形情况。结果表明: 试验过程中试件的应力平衡是实时变化的, 在应力准弹性增加的起点至应力峰值点的时程内处于相对平衡, 长径比不同平衡时间呈差异性, 平衡持续时长 $1.0 > 0.6 > 0.8 > 1.2 > 1.4$; 随长径比的递增, 满足均匀状态的试件两端应力差相对值所需的应力波反射次数增加, 峰值强度出现波动变化, 峰值点的割线模量逐渐增加且当长径比由1.2增至1.4时出现明显的阶跃; 由此可知, 在低水平(≤ 10 MPa)恒定轴压和围压组合静载条件下开展SHPB试验的试件最佳长径比为1.0, 与无组合静载伺服条件下的冲击试验结果不同, 可为其他岩种在类似条件下的长径比优选提供参考。

关键词: 岩石力学; 分离式霍普金森压杆(SHPB); 静载组合; 长径比

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2022)03-0001-09

Optimization of Slenderness Ratio of SHPB Specimens under Combined Static Load

PAN Bo¹, WANG Xu-guang¹, GUO Lian-jun^{2,3}, XU Zhen-yang², YAN Da-yang⁴

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Mining Engineering, University of Science and Technology

Liaoning, Anshan 114051, China; 3. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang

University of Technology, Shenyang 110870, China;

4. Angang Mining Blasting Co., Ltd., Anshan 114046, China)

Abstract: To optimize the length-diameter ratio of the impact test specimen under three-dimensional static combination conditions, five mixed granite specimens with different length-diameter ratios (diameter 50 mm, length 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm and 70 mm, respectively) under constant axial compression (4 MPa) and confining pressure (4 MPa) were test by a modified split Hopkinson pressure bar (SHPB). The influence of aspect ratio on stress equilibrium time and peak strength was analyzed from the aspects of stress equilibrium state, the relative value of the stress difference, and the dynamic stress characteristics. At the same time, a secant modulus is introduced to better illustrate the plastic deformation of the specimen under combined loading. The results indicate that the stress balance of the specimen changes in real-time during the test process, and it is in relative balanced in the period from the starting point of stress quasi-elasticity increase to the peak point of stress. The equilibrium time varies with the aspect ratio, and the equilibrium duration is $1.0 > 0.6 > 0.8 > 1.2 > 1.4$. With the increase in the length-diameter ratio, the number of stress wave reflection required by the relative value of stress difference between the two ends of

the specimen satisfying the uniform state increases, and the peak strength fluctuates. The secant modulus of the peak point increases gradually, and an obvious step occurs when the length-diameter ratio increases from 1.2 to 1.4. It can be seen that the best length-diameter ratio of SHPB test specimens under the condition of low level (≤ 10 MPa) constant axial compression and confining pressure combined with static load is 1.0. The impact test results are different from those without combined static load servo. It can provide a reference for the optimization of length-diameter ratio of other rock species under similar conditions.

Key words: rock mechanics; split Hopkinson pressure bar (SHPB); static load combination; length-diameter ratio

采空区是常见的矿山事故隐患之一,其失稳引发的后果严重影响生产循环效率,甚至危及人员设备安全,有别于地下采空区,露天矿山既有采空区围岩体受到的地应力作用较小,处理方式多以爆破崩落为主,因此掌握这类采空区围岩体的动力学性质,对爆破方案的优化有着重要的意义。SHPB 作为常用的研究动力学性质试验装置,在岩石类材料领域的得到了广泛的应用,如冲击荷载作用下岩石的动态破坏过程及损伤演化规律^[1,2],循环冲击荷载作用下力学性质^[3-5],以及温度对岩石力学性质的影响等^[6]。随着技术的发展,众学者又开展了压力伺服以及三轴动态压缩试验^[7,8]。通常试验结果与试件的长径比有关,ISRM (International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering) 给出了长径比建议范围,不同岩种的长径比对结果影响如何,众学者进行了研究:花岗岩的弹性变形模量与试件长径比呈正相关^[9],而试件最终破坏模式同样与长径比相关^[10];煤的峰值应变随着试件长径比的增加呈指数衰减^[11];石灰岩的峰值应力应随着试件长径比增加而减小,而动态模量则先增后减^[12]。如何确定试件的最佳长径比,也是研究热点:对于大直径 SHPB 试验,研究发现当长径比为 0.4 ~ 1.0 时试验结果能够较为真实的反应出材料性质^[13],刘殿书等研究结果显示^[14],长径比为 0.67 时为最优,并给出了长径比取值范围为 0.6 ~ 1.0;梁书锋等从应力波在试件中传播角度^[15],给出了部分脆性岩石长径比参考值为 0.7 ~ 0.8;宫凤强等给出了应力波在试件中传播次数查值表^[16],并基于岩石波速给出了试件尺寸计算关系。

综上可知,长径比对试验结果有直接影响,但上述研究给出的最佳比均是在无轴压、无围压的试验条件下分析得出,这显然与岩体实际赋存环境不符,而对于轴压、围压伺服条件下,选用何种长径比的试件进行 SHPB 试验,获取更为准确的岩石动力学性质,还未见相关报道。因此,本文将以鞍钢矿山采空区岩样为例,开展静载组合条件下不同长径比试件 SHPB 试验,通过分析试件在轴压及围压伺服下对冲击荷载的响应情况,得出试件应力平衡状态、动态力学特征,确定试验条件下试件的最优长径比,并与无静载组合伺服条件下的试验所得最佳长径比结果进行对比,以说明研究的必要性,进而为后续获取可靠的围岩动力学性质奠定基础,同时也为相关研究中试件长径的优选提供参考。

1 试验装置及方案

1.1 试验装置及试件制备

试验采用自制 50 mm 分离式霍普金森压杆 (SHPB) 实验系统,如图 1 所示。试验装置包括电磁控制系统、动力系统、液压轴压及侧向围压伺服系统、冲击弹体、入射杆、透射杆、吸收杆及数据采集系统。其中入射杆长为 2100 mm、透射杆长为 1800 mm,吸收杆长度为 800 mm,材质均为 C50 高强度钢,弹性模量为 210 GPa。

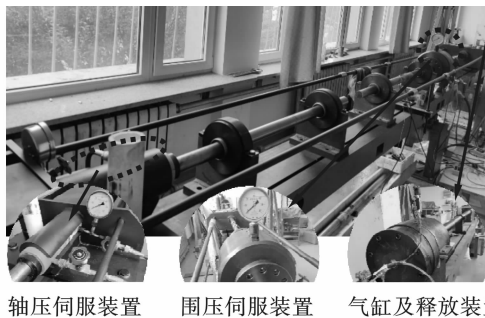


图 1 分离式霍普金森压杆实物图

Fig. 1 Split Hopkinson pressure bar system

本次试验试件取自鞍钢矿业齐大山铁矿 -150 m 水平既有采空区围岩体,岩性以混合花岗

收稿日期:2022-03-17

作者简介:潘 博(1989-),男,内蒙古赤峰人,博士研究生,主要从事矿岩破碎及露天爆破优化方向研究,(E-mail) bopan07@foxmail.com。

通讯作者:徐振洋(1982-),男,河南洛阳人,博士、副教授,主要从事采矿工程及工程爆破教学研究,(E-mail) xuzhenyang10@foxmail.com。

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0801603);国家自然科学基金资助项目(51974187);辽宁省教育厅高等学校科研项目(LJKZ0282)

岩为主,基本力学参数见表1,对岩芯进行加工处理,保证两端面平整度符合 ISRM 要求,试件直径为

50 mm,根据相关研究成果^[16],制备长径比为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 的试件,成品如图2所示。

表1 采空区围岩基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of surrounding rock in goaf

弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	泊松比	摩擦角/°	粘聚力/MPa	密度/(kg·m ⁻³)	波速/(m·s ⁻¹)
42.5	7.4	119.7	0.17	46.4	31.4	2691	4776

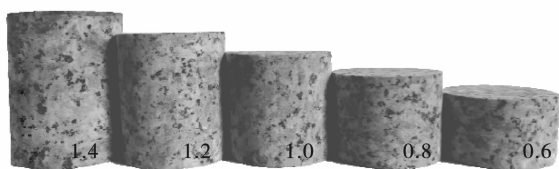


图2 试验试件

Fig. 2 Test specimen

1.2 试验方案

结合实际围岩的赋存情况,参照文献[17]采用低侧向围压(4 MPa),4 MPa 轴向压力,对五种长径比试件进行冲击作用。由于试件受围压及轴向压力约束,同时可实现装置系统的单脉冲加载的动能陷阱技术^[18],即弹头撞击入射杆产生的应力波作用于试件,削减了杆件的相对运动带来的二次冲击作用,试件不易被冲破,因此,结合现场爆破作用应变率情况,采用 0.5 MPa 冲击作用气压进行试验。

2 试验数据分析

2.1 应力平衡分析

使用 SHPB 获取岩石的本构特征的前提是,有效获取被测岩石试件处于应力平衡状态时的数据,那么试件两端的应力平衡状态维持时间的长短则决定是否可以获取足够多的有效数据,岩石类材料的应变通常处于 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 量级(如图3),加之岩石材料各向异性的特点,导致在相同冲击荷载条件下试件发生不均匀形变。试件长径比的改变将直接影响应力波在试件内的单程传播时间,进而对应力平衡过程的持续时间产生影响。引入应力平衡因子(记作 η),即试件在某一时刻两端的应力幅值之比,该比值越接近于 1,则认为试件两端应力越接近于平衡状态,那么当 $\eta = 1$ 时,则认为试件两端应力达到平衡状态^[19]。

$$\eta = \frac{\sigma_T}{\sigma_I + \sigma_R} \quad (1)$$

式中, σ_T 、 σ_I 、 σ_R 分别为试件透射端透射应力及入射端入射应力和反射应力。

基于此,在试件加载过程中,则可通过应力平衡因子来描述试件的两端应力平衡情况,将 $\eta = 1 \pm$

0.1 视作应力平衡,如图4所示,在冲击荷载作用初期,0~23 μs 区域,应力状态逐渐由波动趋于平衡,这是由于初始阶段试件两端应力差值过大致使试件内部应力无法均匀化,所以应力平衡因子曲线呈现出明显的波动;23 μs 后,各长径比试件两端逐渐达到应力平衡状态,保持了一定时长的应力均匀化,且最短准平衡时长维持了近 120 μs ,为充分获取数值提供了基础;175 μs 后,各长径比试件的平衡因子曲线再次波动,试件无法继续保持平衡状态。

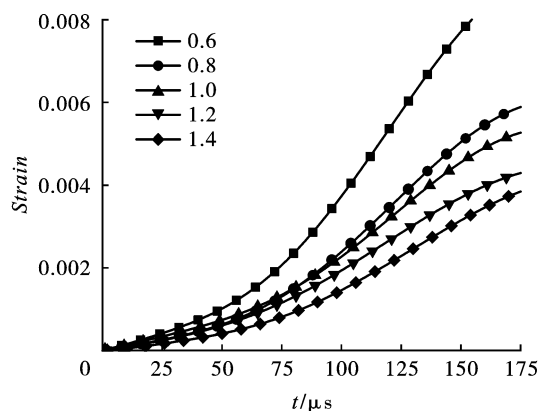


图3 应变时程曲线

Fig. 3 Strain time history curve

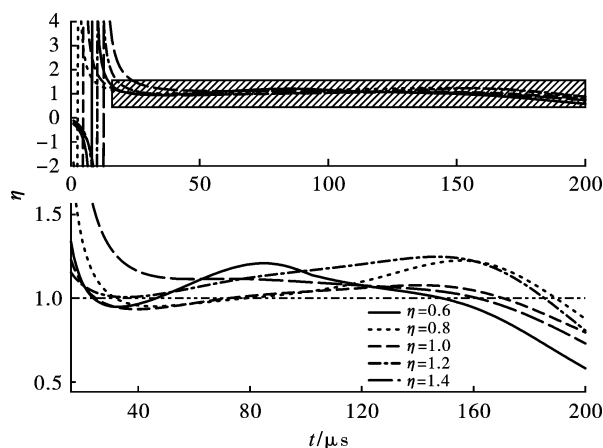


图4 应力平衡因子时程变化曲线

Fig. 4 Stress balance factor time history curve

通过各长径比试件应力平衡因子曲线变化可知,同等加载条件下试件长径比的改变,试件两端达到应力平衡状态的时间随之变化,且应力平衡阶段

持续时间不同。长径比为 0.6 的试件,达成应力平衡状的耗时最短,但后程出现一定幅度的状态波动。长径比为 1.0 的试件,应力平衡状态维持时间最长,且持续时程中波动较小。当试件长径比为 0.8 时,试件虽然较早的达到了平衡状态,但维持时间较短,这说明合适的长径比对试件维持较好的应力平衡状态有一定的帮助。因为试件在整个过程中均未与压杆分离,应力平衡状态的达成是应力波在试件内几经反射的结果,如图 5 所示,长径比的差异导致了应力波在试件内单程传播时间不同,小长径比的试件单程传播时间小于大长径比试件,小长径比试件可在较短时间内实现应力平衡。

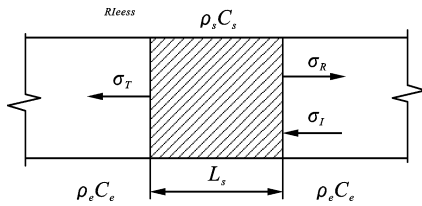


图 5 应力波传播历时影响因素

Fig. 5 Influence factors of stress wave propagation duration

由于 SHPB 的试验原理是遵循一维应力波假设,依前文所述应力波在试件内经过几次透反射后试件可近似视为应力平衡,故入射应力 σ_I 、反射应力 σ_R 和透射应力 σ_T 之间存在如下关系^[19]

$$\sigma_R(t) = \lambda \sigma_I(t) \quad (2)$$

$$\sigma_T(t) = (1 + \lambda) \sigma_I(t) \quad (3)$$

$$\lambda = (\rho_s C_s - \rho_e C_e) / (\rho_s C_s + \rho_e C_e) \quad (4)$$

式中: λ 为应力波由入射杆传入试件的反射系数; ρ_s 、 C_s 分别为试件弹性杆密度和弹性波速; ρ_e 、 C_e 分别为系统杆件的密度和弹性波速。

透反射系数是由被测试材料类型决定(本文试验研究对象该系数为 $-0.58 \sim -0.51$),所以在揭示不同类型试件的应力平衡问题时,需要明确在延续时间内,入射波在试件内的透、反射次数与试件尺寸之间关系,具体分析试件两端的应力差值情况。

2.2 应力差相对值

图 6 为实测不同长径比试件的应力时程曲线,可以看出在相同冲击荷载作用下五种长径比围岩试件入射波时程曲线特征基本相同,均为近似的矩形波。且应力波作用时间 t 约为 $250 \mu s$,应力加载峰值点在 $125 \mu s$ 左右。

在应力波入射延续时间内,为提取数据并获得试件真实动态响应特征,需要明确应力波在试件内的单程历时,可由式(5)进行计算。

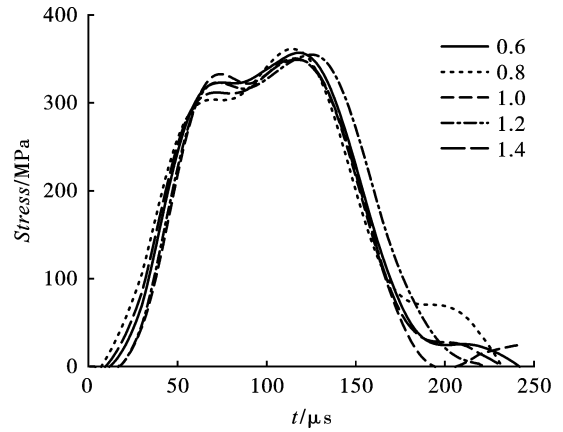


图 6 入射应力时程曲线

Fig. 6 Incident stress time history curve

$$\Delta = \frac{L_s}{C_s} \quad (5)$$

式中: Δ 为应力波单程历时; L_s 为试件长度; C_s 为试件的弹性波波速。

那么可将应力波初峰段作用时间 t 内,在试件内传播次数记作 k ,则有

$$k = \frac{t}{\Delta} \quad (6)$$

应力波经过反射后,在试件两端的应力差值就变的很小,当应力差值在 1% 时,可视为应力应变逐渐开始达到平衡,引入试件两端应力差相对值

$$\Delta \sigma_k = |\sigma_{2k+1} - \sigma_{2k}| \quad (7)$$

$$\bar{\sigma}_k = \frac{\sigma_{2k+1} + \sigma_{2k}}{2} \quad (8)$$

$$\alpha_k = \frac{\Delta \sigma_k}{\bar{\sigma}_k} \times 100\% \quad (9)$$

式中: $\Delta \sigma_k$ 为被测试件两端应力差绝对值; σ_k 为第 k 次反射应力值; α_k 为试件两端相对应力差值。

由上式可知,应力差相对值与作用于试件两端应力平均值有关,由于试件与压杆之间的波阻抗不同,即受反射系数 λ 影响应力波无法全反射,随着反射次数的增加应力差相对值 α_k 将发生变化。

2.3 试件准均匀态分析

为探讨试件的长径比差异对应力状态的影响,需对应力脉冲时间内不同长径比试件两端的应力情况进行计算。根据研究成果,可设定某一限值来描述试件的均匀状态^[20],该界限值通常需要根据不同的试验材料进行调整,因此定义当试件两端应力差相对值 $\alpha_k \leq 6\%$ 时,视作试件内部应力达到准均匀态,基于 6% 的统计结果对本文试验结果进行分析。

图 7 为不同长径比试件在相同冲击荷载作用下的应力差相对值 α_k 情况。如图 7(a) 所示,长径比

为 0.6 的试件,可视为在第 7 次达到应力近似平衡,应力差相对值 α_k 满足了设定的界限小于 6%,随着反射次数的增加逐渐减小;第 10~11 次时 α_k 值达到最小值,此后试件两端的应力差相对值出现小幅增加,当反射次数达到第 13~14 次时 α_k 值再次临界 6%,至此试件应力状态视做平衡态。14 次以后,试件两端的应力差值逐渐增加但增加幅度略有差异,其中相近的两次反射, α_k 最大涨幅达 17% 试件无法继续保持平衡状态。

图 7(b) 中长径比为 0.8 的试件应力波的反射次数关系与 0.6 长径比试件相比有所减小。初始阶段试件处于应力失衡状态,至应力波传播反射至 8 次时,试件内部首次达到应力均匀。而后 α_k 继续小幅下降到最小值,再回落至 6% 以内,此后在界限值附近波动。反射至第 14 次后,试件相对值超出基准值,可近似认为在应力波反射第 7 次至 13 次的时间内,试件保持了平衡状态,而后 α_k 开始上涨,试件内部的均匀化被完全打破。

由图 7(c) 中可看出,试件内部首次达到应力均匀需要的应力波反射次数在 8~9 次,当试件在应力波反射至第 8 次基本满足 $\alpha_k < 6\%$,其中个别试件需在反射第 9 次时实现近似均匀。至应力波反射第 15 次试件保持了较好的应力均匀。当应力波反射超过 15 次后,个别试件无法继续保持内部的应力均匀化状态,至第 16 次后所有试件的应力差相对值 α_k 均超出界限值,个别试件涨幅达到 14%,无法再保持内部应力均匀状态。

图 7(d) 为长径比 1.2 的试件数据曲线,应力波在试件内部反射至第 8 次时,除个别试件外,基本达到应力内部均匀,在此后的反射过程中 α_k 呈先减小再增的变化趋势,至第 12 次时处于界限值 6% 内。当应力波反射至第 13 次时,个别试件内部应力突破失衡临界值,当反射次数至 14 次时,所测试件两端的应力差相对值均超出界限值,随后该指标持续增加,试件内部已无法重新达成应力均匀。同样,由图 7(e) 可以看出,长径比为 1.4 的试件,在监测范围 ($\alpha_k = 0 \sim 40\%$) 内,反射作用第 8 次时,个别试件实现内部应力均匀,随后 α_k 值均在界限值变化。当反射至第 9 次时,所有试件均实现准应力均匀状态,并保持至应力波反射至第 12 次,而后超出 6%。

3 动态力学指标分析

3.1 应力-应变曲线

基于应力均匀性及一维应力波两个假设,将 SHPB 试验采集到的电信号依式 (10) 进行处理^[21],即可得到被测试件的平均应力 σ_s 及平均应变 ε_s ,进

而绘制试件的动态应力-应变曲线。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s &= \frac{EA(\varepsilon_l + \varepsilon_R + \varepsilon_T)}{2A_s} \\ \dot{\varepsilon}_s &= C \frac{\varepsilon_T - \varepsilon_R - \varepsilon_l}{L_s} \\ \varepsilon_s &= \frac{C}{L_s} \int_0^t (\varepsilon_l - \varepsilon_R - \varepsilon_T) dt \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: ε_l 、 ε_R 、 ε_T 分别为入射杆及透射杆所采集的入射、反射及透射应变信号; C 、 E 分别为系统压杆波速和弹性模量; A 和 A_s 分别为系统压杆及试件横截面积; $\dot{\varepsilon}_s$ 为试件的应变率。

在 0.5 MPa 冲击气压及 4 MPa 轴向和 4 MPa 侧向压力伺服条件下,试件的长径比差异对动荷载响应表现明显的不同。如图 8 所示,为试验获取的 5 种长径比试件应力-应变曲线。由于试验装置的冲击弹头为圆柱体且冲击动能较大,因此即使经过整形片滤波作用,P-C 振荡对曲线的影响仍然存在^[22],各长径比试件对应的曲线变化趋势存在明显的“双峰一谷”现象。图中可以看出,长径比影响了试件弹性变形,试件的弹性变形结束时刻应变处于 0.001~0.002 之间。由图 3 可知,不同长径比试件达到该应变值的时间基本一致,均为 50 μ s 左右,说明加载应力波输入的稳定性,而随着长径比的增加,曲线弹性阶段的斜率逐渐增加。当试件弹性变形结束后,曲线出现了下凹发展,随后光滑上升达到曲线峰值点。可以看出,长径比不同峰值应力点的差值相差不大,处于 350~360 MPa 范围内,由于试件的宏观损伤较小,因长径比而产生的尺寸效应对峰值应力的影响处于较低的水平。当曲线经过动态应力峰值点后,开始光滑下降,长径比为 0.8~1.2 的试件曲线至阶段最大应变点处开始呈闭口收缩,至动态强度达到 100 MPa 附近,曲线再次呈开口发展趋势。而长径比为 0.6 及 1.4 的试件则表现出了应变缓慢增加一定值后,同样存在驻点使得曲线的应变增加变快。

由上述描述可知,如果不考虑设备本身的误差影响,即加载波的能量恒定,那么长径比的差异对动荷载的响应,主要表现在峰值点的应变大小以及曲线的整体开口程度。有研究指出曲线与应变轴所围的面积是冲击加载过程中的耗散能^[23],那么可知试件的长径比越小同等条件下能消耗更多的能量。如图中显示长径比为 0.8 时面积略小,在 1.0~1.4 范围内时所围面积基本相等。受此启发,在工程实际中应充分考虑每个炮孔爆炸能量破岩作用范围,进而确定孔网参数,爆炸能量充分利用的同时,最大限度的减小炸药消耗而产生的碳排放。

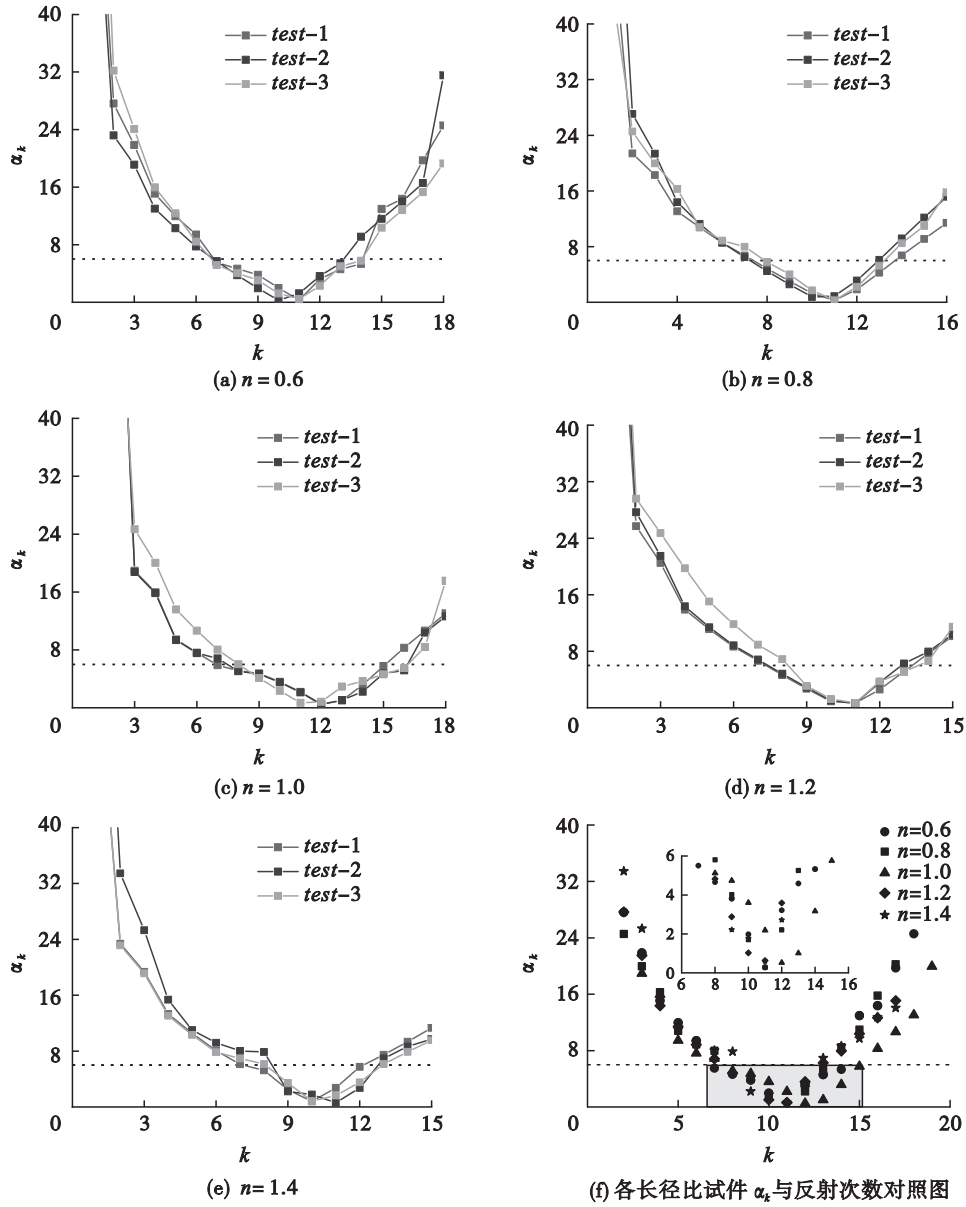


图7 应力差值相对值与传播次数关系曲线

Fig. 7 Relation between relative value of stress difference and propagation times

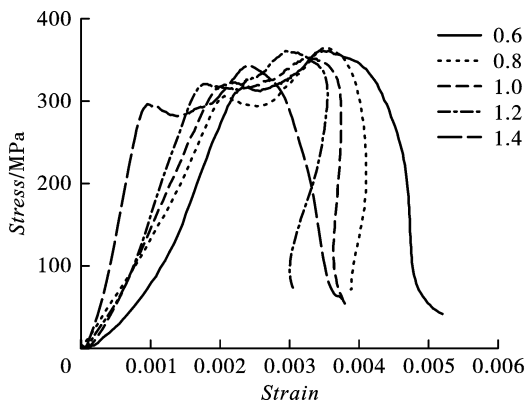


图8 不同长径比围岩试件应变-应力曲线

Fig. 8 Strain-stress curves of surrounding rock specimens with different length-to-diameter ratios

3.2 峰值强度分析

图9为不同长径比试件测试所得峰值强度结果,可以看出除长径比0.8的试件离散程度较大外,其余试件所测得的结果离散程度较小。造成离散的原因一是试件本身的差异,由于试件较为致密,虽然试验前已采用NMR(Nuclear Magnetic Resonance)技术进行差异化排除,但只能通过孔隙情况加以剔除,无法完成知晓内部潜在的结构特点或其他强度较为突出的成分含量;二是试验设备触发异常导致子弹的入射动能发生变化,使得测试结果显示出小幅增加。通过试验结果的平均值可以看出,5种长径比的试件均处于360 MPa附近,最小为 $n=1.0$ 试件的354.12 MPa,最大为 $n=0.8$ 试件的367.42 MPa,随着长径比的增加峰值强度呈现小幅波动。

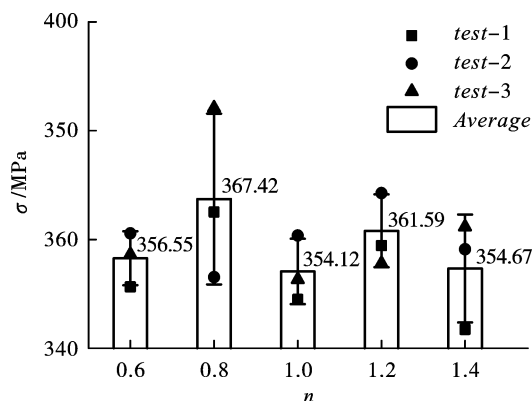


图9 峰值强度分布

Fig. 9 Peak intensity distribution

3.3 峰值点割线模量分析

由于试验过程中,试件并未发生破坏宏观的破坏,峰值应力值只能从一定程度上反应试件的动态强度,且应力-应变曲线中的应变在回弹后有再次增加的趋势,定量表征不同长径比的试件的变形性质略显不足。引入割线模量可以就试件弹性变形至极限强度的过程,对材料的塑性变形情况进行直观的描述。由图10可知,长径比的差异对峰值点割线模量的影响更为明显,长径比为1.0的试件数据离散程度最小,其余长径比试件离散程度均明显大于长径比1.0的试件结果。应力峰值点的割线模量峰值随着长径比的增加呈准线性增加趋势,当长径为1.2时该指标较0.6至1.0的增幅相对放缓,当长径比增至1.4时,动态峰值点割线模量大幅增加,均值为183.2 GPa,由此可知,随着长径比的增加,试件在相同冲击荷载作用下的塑性变形演化速率有所增加。离散程度的大小说明了重复试验的稳定性,即长径比为1.0的试件,自弹性阶段后产生塑性变形开始至屈服的过程相对较为稳定,这为后续其他组合形式的冲击荷载试验选定试件长径比提供了依据。

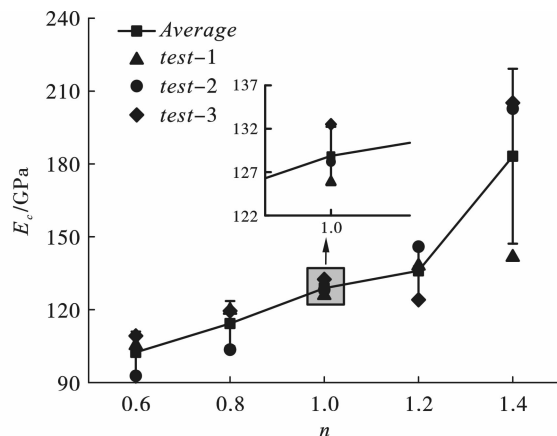


图10 动态峰值应力点割线模量分布

Fig. 10 Secant modulus distribution
of dynamic peak stress points

4 讨论

由应力平衡差值分析可知,随着试件长径比的增加,试件达到准平衡状态应力波在试件内的反射次数有所增加,由长径比0.6的第7次增加至第9次完全平衡。但试件两端应力差相对值满足限定值的次数,并不是按比例递减,在相同冲击荷载作用下,长径比为1.0的试件满足 $\alpha_k < 6\%$ 的次数最多,这与应力平衡因子曲线结果一致,且应力差相对值与传播次数关系曲线与文献[16]中描述基本吻合。对不同长径比试件 α_k 与反射次进行统计,各尺寸试件满足基准值的次数依次为:8次、7次、9次、6次和5次。达到基准值的次数越多,则说明试件内部的应力均匀性情况越好,同等条件下得到的试验结果更为可靠,以前文中的峰值点割线模量为例,长径比为1.0的试件数据离散程度明显小于其他组别,而试件长径比为1.4的数据离散程度最大。

同组别试件初次实现应力平衡出现差异性,一是由于岩石本身的各向异性及非连续性特点,随着应力波在岩石内部传播反射,将进一步使岩石的内部结构发生变化,因此随着传播次数的增加,试件两端的应力差相对值必将呈现出一定的波动,内部形成新的稳定结构有前后时差。二是应力波在传播过程中强度不断变化,而试件并未与杆件分离,试件内部的应力在趋于近似均匀过程中,两端的应力大小也在随着时间推移发生变化,杆件内的残余波对试件的影响作用有差异,使得试件两端应力差相对值变化不一致。

试件的长径比越大试件内部的应力波反射次数减少,试件的平衡状态必然会引起加载应变率的变化,进而影响其他动态力学指标,如长径比为0.8的试件,其动态峰值强度呈现出高离散性,相对应的加载应变率离散性也大于其他组别试验结果。与无静载约束冲击试验不同,在同等冲击气压作用下,三维静载组合条件下的试件保持了很好的完整性。因此,在进行岩石动力学性质探究时,在除去试件自身结构性影响的前提下,需要选择合理的试件长径比,以期得到较为稳定可靠的试验数据。相比与无静载约束冲击花岗岩、大理岩等脆性材料试件长径比优先范围的0.7~0.8^[15],结合本文数据分析结果,静载组合条件下的冲击试验宜选用长径比为1.0的试件开展后续试验研究,冲击荷载作用过程中加载变率的同时,试件两端应力能保持较长时的平衡状态,以得到更为真实的材料的本构关系。值得一提的是,虽然无法实现上述讨论中完美的应力平衡,但相

比实际工程中的炸药爆炸作用瞬间,已可以满足分析精度。由于文章所讨论的围压及轴压强度远小于致使试件强度离散的围压约束值^[24],因此,在低静载(≤ 10 MPa)约束条件下进行冲击试时,本文得出优选的长径比结果依然适用;但当施加的静载约束强度较大时,该结果是否依然适用,需进一步探讨。

5 结论

以鞍钢矿山采空区围岩为研究对象,进行了三维静载组合条件下 SHPB 试验,通过对试件应力平衡及动态力学指标进行分析,为相关试验优选试件长径比提供一定参考,得出如下结论:

(1)相同冲击条件下,试件达到应力平衡状所需的时间随长径比的增加而增加,在应力弹性增加初始点至应力峰值点的时间段内可以较好地保持平衡状态,但并非稳定不变而是有一定波动,长径比为 1.0 的试件应力平衡状态维持时长最优。

(2)随长径比的递增,满足均匀状态的试件两端应力差相对值所需的应力波反射次数增加,符合限定值的次数先增加后减小,符合次数越多,试件内部越易实现应力均匀,合理的长径比有助于试件快速实现并维持内部的应力均匀。

(3)相同冲击条件下动态力学指标随着试件长径比增加而呈不同的规律,应力-应变曲线峰值点强度呈先增后减的波动变化,而应力峰值点的割线模量则随长径比的增加而增加,且当试件的长径比由 1.2 增加至 1.4 时,出现明显的阶跃,试件塑性变形演化速率大幅增加。

(4)对比试验结果发现,试件长径比为 1.0 时,动态力学指标的结果离散性最小,该结果与无组合静载条件下的冲击试验所得结论不同。故在进行组合静载条件下的冲击试件时,应根据岩种具体分析最佳长径比,就本文采用的岩石种类及装置而言,宜选用长径比为 1.0 的试件开展后续相关研究。

参考文献 (References)

- [1] 张明涛,王 伟,王奇智,等. 基于 SHPB 实验的砂岩动态破坏过程及应变-损伤演化规律研究[J]. 爆炸与冲击,2021,41(9):40-53.
- [1] ZHANG Ming-tao, WANG Wei, WANG Qi-zhi, et al. Dynamic failure process and strain-damage evolution law of sandstone based on SHPB experiments [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(9): 40-53. (in Chinese)
- [2] ZHOU Zi-long, ZHAO Yuan, JIANG Yi-hui, 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.
- [3] 刘 伟,曾 鹏,闫 雷,等. 循环冲击下弱风化岩石力学特性与渗透率演化[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1855-1863.
- [3] LIU Wei, ZENG Peng, YAN Lei, et al. Mechanical properties and permeability evolution of weakly weathered rocks under cyclic impact [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1855-1863. (in Chinese)
- [4] 闫 雷,刘连生,李仕杰,等. 单轴循环冲击下弱风化花岗岩的损伤演化[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(5): 96-105.
- [4] YAN Lei, LIU Lian-sheng, LI Shi-jie, et al. Damage evolution of weakly-weathered granite under uniaxial cyclic impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(5): 96-105. (in Chinese)
- [5] HU N, LI C, BODA E, et al. Characteristics of energy dissipation in the process of rock damage under cyclic impact [J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2021, 14(1): 71-78.
- [6] FAN Li-feng, LI Han, XI Yan. Evaluation of the effects of three different cooling methods on the dynamic mechanical properties of thermal-treated sandstone [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(4): 1-18.
- [7] MA Hai-yan, YUE Cheng-jun, YU Hong-fa, et al. Experimental study and numerical simulation of impact compression mechanical properties of high strength coral aggregate seawater concrete [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 137(Mar.): 103466. 1-103466. 13.
- [8] LIU K, ZHAO J. Progressive damage behaviours of triaxially confined rocks under multiple dynamic loads [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(6): 3327-3358.
- [9] 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): 1392-1401.
- [9] ZHAO Guang-ming, ZHOU Jun, MENG Xiang-rui, et al. Dynamic impact compression characteristics of granite rocks with different length-diameter ratios [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(7): 1392-1401. (in Chinese)
- [10] ZHOU Jun, MENG Xiang-rui, LIU Chong-yan, et al. Study on the rock size effect of quasistatic and dynamic compression characteristics [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021(6): 1-9.
- [11] YUAN Qiu-ping, XIE Guang-xiang, WANG Lei, et al. Experimental study on stress uniformity and deformation behavior of coals with different length-to-diameter ratios

- under dynamic compression[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021(3):1-12.
- [12] 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(S2):3891-3897.
- [12] PING Qi,ZHANG Hao,SU Hai-peng. Study on dynamic compression mechanical properties of limestone with different lengths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S2):3891-3897. (in Chinese)
- [13] 李胜林,刘殿书,李祥龙,等. ϕ 75 mm 分离式霍普金森压杆试件长度效应的试验研究[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(1):93-97.
- [13] LI Sheng-lin, LIU Dian-shu, LI Xiang-long, et al. The effect of specimen length in ϕ 75 mm split hopkinson pressure bar experiment[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1):93-97. (in Chinese)
- [14] 刘殿书,王洪强,杜玉兰,等.大尺寸 SHPB 试验 C30 混凝土试件合理长径比研究[EB/OL]. 北京:中国科技论文在线[2006-03-30]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200603-548>.
- [14] LIU Dian-shu, WANG Hong-qiang, DU Yu-lan, et al. Study on reasonable length-diameter ratio of Large size SHPB C30 concrete specimen[EB/OL]. Sciencepaper Online[2006-03-30]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200603-548>. (in Chinese)
- [15] 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.
- [15] LIANG Shu-feng, WU Shuai-feng, LI Sheng-lin, 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)
- [16] 宫凤强,李夕兵,饶秋华,等.岩石 SHPB 试验中确定试样尺寸的参考方法[J]. 振动与冲击,2013,32(17):24-28.
- [16] GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, RAO Qiu-hua, et al. Reference method for determining sample size in SHPB tests of rock materials[J]. Journal of Vibration and Shock, Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(17):24-28. (in Chinese)
- [17] 左宇军,李夕兵,唐春安,等.二维动静组合加载下岩石破坏的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006(9):1809-1820.
- [17] ZUO Yu-jun, LI Xi-bing, TANG Chun-an, et al. Experimental investigation on failure of statically loaded rock subjected to periodic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(9):1809-1820. (in Chinese)
- [18] SONG B, CHEN W. Loading and unloading split hopkinson pressure bar pulse-shaping techniques for dynamic hysteretic loops[J]. Experimental Mechanics, 2004, 44(6):622-627.
- [19] 徐小荷,余 静.岩石破碎学[M]. 北京:煤炭工业出版社.1984:165-178.
- [20] 洪 亮.冲击荷载下岩石强度及破碎能耗特征的尺寸效应研究[D].长沙:中南大学,2008:55-80.
- [20] HONG Liang. Size effect on strength and energy dissipation in fracture of rock under impact loads[D]. Changsha: Central South University, 2008:55-80. (in Chinese)
- [21] 平 琦,骆 轩,马芹永,等.冲击荷载作用下砂岩试件破碎能耗特征[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(S2):4197-4203.
- [21] PING Qi, LUO Xuan, MA Qin-yong, et al. Broken energy dissipation characteristics of sandstone Samples under uncompact loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2):4197-4203. (in Chinese)
- [22] 李夕兵,古德生,赖海辉.冲击荷载下岩石动态应力-应变全图测试中的合理加载波形[J]. 爆炸与冲击,1993(2):125-130.
- [22] LI Xi-bing, GU De-sheng, LAI Hai-hui. On the reasonable loading stress waveforms determined by dynamic stress-strain curves of rocks by SHPB[J]. Explosion and Shock Waves, 1993(2):125-130. (in Chinese)
- [23] 谢和平,鞠 杨,黎立云,等.岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(9):1729-1740.
- [23] XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9):1729-1740. (in Chinese)
- [24] 尤明庆.围压对岩石试样强度的影响及离散性[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(5):929-937.
- [24] YOU Ming-qing. Effect of confining pressure on strength scattering of rock specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5):929-937. (in Chinese)