

三轴 SHPB 岩石材料动力学特性试验研究的现状和发展趋势

宫凤强^{1,2}, 李夕兵¹, Jian ZHAO², 叶洲元³

1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083
2. 瑞士洛桑联邦理工大学岩石力学实验室, 瑞士洛桑 CH-1015
3. 湖南科技大学能源与安全工程学院, 湖南湘潭 411201

摘要 岩石材料的三维动力特性试验研究是岩石冲击动力学中很重要的一个领域,也是目前研究的一个热点。本文论述了三轴 SHPB 岩石力学试验机的研制情况,对各类试验机的特点进行了比较。综合分析了三轴 SHPB 试验相关研究文献,总结了一些共有规律:①在围压一定的情况下,岩石的动态抗压强度会随着应变率的增加而增加,呈现出线性函数或者指数函数增加形式,并且脆性减弱,塑性显著增加;②在应变率一定的情况下,岩石抗压强度会随着围压的增大而增大,线性关系比较显著;③岩石动静组合加载时,在轴压一定时,岩石的动静组合抗压强度会随着围压的增大而增大,呈现出近似线性增加趋势;在围压固定时,抗压强度随着轴向静压的增大呈现出先增大后减小的趋势。由于 SHPB 试验装置和岩石材料本身的特点,目前在一些基本问题上,如加载应力波形、试样尺寸要求等方面,还没有统一的试验规范要求,很多试验结果只能进行定性比较,无法在统一尺度上进行定量分析。最后,针对该领域的发展趋势进行了论述,指出尽快建立一套国际性的建议试验方法是将来的一个关键问题。

关键词 岩石材料;三轴分离式 Hopkinson 压杆装置;冲击;动力特性

中图分类号 TU 458

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)18-0106-06

Experimental Research Progress of Dynamic Characteristics for Rock Materials on Triaxial SHPB Apparatus

GONG Fengqiang^{1,2}, LI Xibing¹, ZHAO Jian²,
YE Zhouyuan³

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
2. Rock Mechanics Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, Lausanne CH-1015, Switzerland
3. School of Energy & Safety Engineering, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, Hunan Province, China

Abstract The study of three-dimensional dynamic characteristics

of the rock materials is an important field and hot topic in rock dynamic mechanics. The historical developments of triaxial SHPB apparatus were reviewed and the characteristics of various types of testing machines were compared. A comprehensive analysis of related research literatures on triaxial SHPB tests and some common conclusions were summarized: (1) the dynamic compressive strength of rock will increase with a linear or exponential function as strain rate increases under a constant confining pressure, the brittleness of rock will reduce while plasticity increases; (2) a significant linear relationship is shown between the dynamic compressive strength of rock and confining pressure when strain rate is in a certain circumstance; (3) the compressive strength coupled dynamic and static loads shows a similar linear-increase trend with the increase of confining pressure under a constant axial pressure, while it shows a rising trend firstly and then decline with axial pressure increasing under a constant confining pressure. However, due to the characteristics of triaxial SHPB apparatus and the rock material itself, some basic issues, such as stress loading waveform, the sample size requirements, there is no uniform test specification for

收稿日期: 2009-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(10872218);《科技导报》“博士生创新研究资助计划”项目(kjdb20090102-3);中南大学研究生学位论文创新选题资助项目(2008yb001,1343-74334000025)

作者简介: 宫凤强,博士研究生,研究方向为岩石动力学、岩土工程稳定性及可靠性分析,电子信箱:fengqiangg@126.com;李夕兵(通信作者,中国科协所属全国学会个人会员登记号:S330730015M,S032200319M),教授,研究方向为岩石动力学、采矿工程、岩土工程灾害控制,电子信箱:xbli@mail.csu.edu.cn

tests. Many results of historical documents can only be compared qualitatively and don't be analyzed on a unified scale. In the future, developing an international suggested method about triaxial SHPB test will be a key work.

Keywords rock materials; triaxial split Hopkinson pressure bar; dynamic; dynamic characteristics

0 引言

目前,分离式 Hopkinson 压杆 (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB) 装置仍是研究应变率段 $10^1 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 岩石类材料动态性能的经典测试系统。该装置最初由 B. Hopkinson 提出,后经 Davis 和 Kolsky 完善,逐渐形成了现代常用的 SHPB 系统。常用的 SHPB 装置主要用于材料的单轴动态抗压性能的测试^[1-7]。但在大多数情况下,岩石以及其他工程材料往往处于多向受力状态。因此,在 SHPB 装置上研究岩石类材料的三维动力特性很有必要。

常规的 SHPB 装置不能直接应用于三轴冲击试验,必须加以改进。很多研究人员在试验装置的研制设计方面做了大量工作。1972 年, R. J. Christenson 等^[8]首次对岩石进行了围压下的动力试验。之后,川北稔等^[9]利用北海道大学的岩石三轴 SHPB 试验系统进行了一些研究。欧盟联合研究中心^[10-11]设计了用于岩石和混凝土的三维加载冲击试验机。2000 年, S. Nemat-Nasser 等^[12-13]设计了一种改进的三轴 SHPB 装置,并对混凝土砂浆进行了冲击试验研究。国内从 20 世纪 80 年代开始,北京科技大学、重庆大学相继研制了加围压的 SHPB 装置,并进行了一些相关的岩石动态试验研究^[14-21]。最近,李夕兵等研制了新型的动静组合加载 SHPB 装置,实现了适用于岩石类材料的三轴动静组合加载,并进行了一系列相关研究^[22-29]。

与岩石静载试验相比,岩石动载试验因为涉及的试验参数和物理变量众多,试验装置的设计和试验过程分析要复杂很多。因此,本文旨在详细介绍上述几种典型的三轴 SHPB 动力试验装置的基础上,通过总结对比相关研究成果,就目前存在的一些问题和发展趋势进行阐述和讨论,为该领域内的相关研究提供一定的参考。

1 三轴 SHPB 冲击试验机装置概况

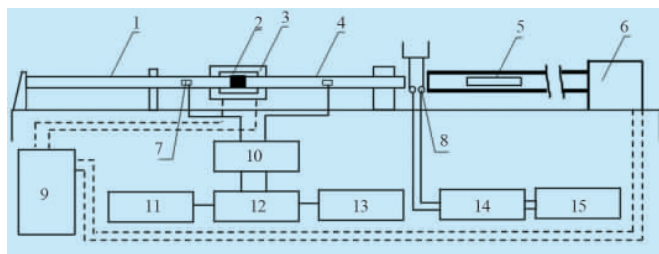
目前,三轴 SHPB 冲击试验机从装置构造特征和实现的功能上可以分为两大类:常规三轴 SHPB 试验机和动静组合加载三轴 SHPB 试验机。

1.1 常规三轴 SHPB 试验机

常规的三轴 SHPB 试验机是参照静态试验机的工作原理设计的,即在普通 SHPB 试验机的基础上,设计一个加围压的装置,施加围压后进行冲击试验。该类试验机以犹他州立大学、北海道大学、加州大学圣地亚哥分校和北京科技大学的冲击试验机为代表。该类试验机由于入射杆、透射杆及试样

均为圆柱形,所以施加的围压在径向二维方向上相同。不过,对该类试验机,按照施加围压装置的不同,还可细分为油压驱动和固体套筒加压的两类试验机,前一类以犹他州立大学、北海道大学和北京科技大学的试验机为代表,后一类以加州大学圣地亚哥分校的试验机为代表。下面分别选取两类典型试验机进行详细介绍。

北京科技大学的试验系统如图 1 所示^[14],在普通 SHPB 试验机上增加了使试样处于静水压力的油压缸。入射杆和透射杆的直径为 30 mm,长度分别为 700 和 500 mm。油压缸耐压为 100 MPa,将套有橡胶套的岩石试样装入油压缸进行密封,利用轴向油压系统将试样两段夹紧,再用侧向压力系统使试样周围施加一定围压,冲击系统沿着入射杆-试样-透射杆轴向发射一定质量和速度的加载杆撞击入射杆,加载杆速度可达 40 m/s。为使应力波持续时间为 100 μs ,加载杆长度选择为 266 mm。



1—透射杆;2—试样;3—油压缸;4—入射杆;5—加载杆;
6—空气炮;7—电阻片;8—激光测速器;9—操纵台;
10—超动态应变仪;11—示波器;12—波形存储器;
13—计算机;14—光电转换放大器;15—频率计

图 1 北京科技大学试验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of triaxial SHPB apparatus of University of Science and Technology Beijing

美国加州大学圣地亚哥分校冲击试验机试验系统如图 2 所示^[12-13],包括气炮、冲头、两个入射杆、入射管、透射杆、透射管、塑料套筒和铝质套筒等。和普通的 SHPB 系统相比较,主要是增加了一个入射杆、入射管、透射管及施加围压的套筒装置。入射杆 1 直径为 27 mm,入射杆 2 直径为 19 mm。试样直径和入射杆 2 及透射杆的直径相同,安装在塑料套筒内。铝质套筒材料参数如下:弹性模量 70 GPa,泊松比 0.3,可以承受 500 MPa 的压力,保证试验过程中施加足够的围压。进行试验时,首先由冲头冲击入射杆 1,杆 1 上的应变片记录下入射应力波型;应力波由入射杆 1 冲击入射杆 2 和入射管,并由入射杆 2 传递到试样上,再由试样传递给透射杆,透射杆上的应变片记录下透射波型,并按照一维应力波理论对试验数据进行处理。

对比上述两类试验机,从装置本身结构上可以看出有以下特点:前一类试验机利用油压驱动实现围压加载,这一点和静载假三轴试验类似。其优点是可以随意调节施加围压的范围,操作起来也很方便,但是目前还不能和静载三轴试验

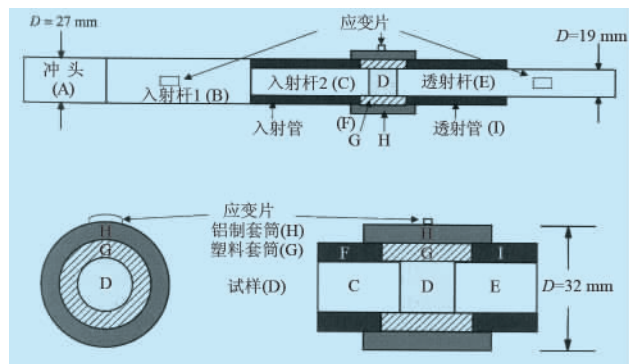


图2 美国加州大学圣地亚哥分校试验装置示意图
Fig. 2 Sketch map of triaxial SHPB apparatus of University of California, San Diego

机一样实现伺服控制,大多数靠手动加压。加州大学圣地亚哥分校的冲击试验机由于利用铝制套筒包裹一个塑料套筒进行加压,对围压的测量和读数相对于油压驱动试验机要复杂一些。

1.2 动静组合加载三轴 SHPB 试验机

常规的三轴 SHPB 试验机只能实现单纯加围压的冲击试验。实际上,在自然界和工程实践中,很多岩石材料在承受动载荷之前已经处于一定的静应力或地应力状态。即岩石处于一维或三维受力状态下,再在某一维方向上受到冲击作用,受到动静组合加载作用。特别是深部岩体开采问题,其岩体受一定的高地应力和开采扰动甚至地震等动载荷作用,属于典型的岩石动静组合加载问题^[30-32]。因此,有必要对这一类问题进行室内试验研究。研究该问题的试验机称为动静组合加载试验机。该类试验机分为两类,以欧盟联合研究中心的冲击试验机和中南大学动静组合加载试验机为代表。

欧盟联合研究中心的冲击试验系统在原来的一维冲击试验机上改造而成^[10-11],可以在三维方向上预先施加轴向压力,并在某一维方向上进行冲击加载。如图3所示,试验装置主要包括1个冲击系统(包括预应力杆和脆性联合器),1个入射杆和5个出射杆。5个出射杆可以按照要求施加轴向方向的静预应力。入射杆和透射杆长度为2 m,杆的截面是长度为10 cm的正方形。该系统可以实现幅值为3 MN和持续时间为800 μs 的矩形波加载。整个系统长度为8 m。

中南大学的岩石动静组合加载试验系统如图4所示^[22-24]。

在入射杆和透射杆端部处安设薄挡板4和轴压加载装置11,利用金属框架9连接起来,即可以加载与冲击载荷方向一致的静载荷;在试样7安装处架设围压加载装置10,即可以加载与冲击载荷方向垂直的围压。同时加载轴向静压和围压,从而可以进行三轴预应力下的冲击试验。所用 SHPB 试验系统杆件采用40Cr合金钢,密度为7.810 g/cm³,弹性波速为5 410 m/s,杆直径为50 mm,入射杆和透射杆长度分别为2.00 m和1.50 m,子弹采用双端锥形结构(异型冲头),可以消除P-C振荡,实现稳定的半正弦波(加载波上升段稳定在100 μs 左右)加载,其材质和弹体最大直径分别与对应的入

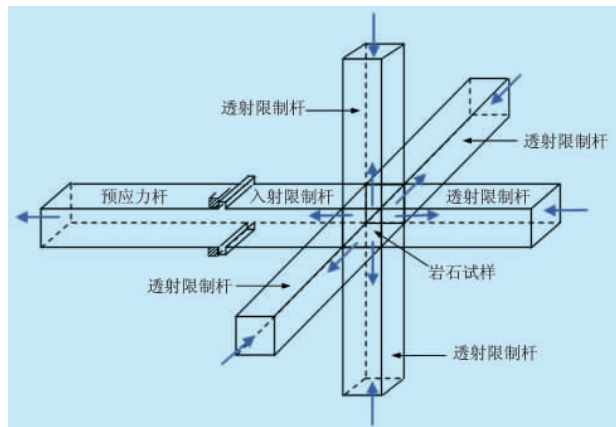
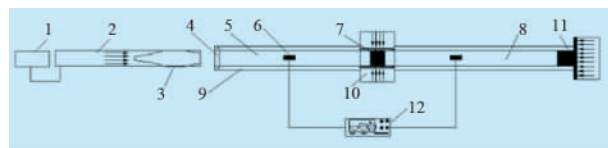


图3 欧盟联合研究中心试验装置示意图
Fig. 3 Sketch map of triaxial SHPB apparatus of European Commission's Joint Research Centre



1—高压气罐;2—高压气室;3—异型冲头;4—轴压装置前端;
5—入射杆;6—应变片;7—试样;8—透射杆;9—轴压加载框架;
10—围压装置;11—轴压加载部件;12—数据采集处理单元
图4 中南大学动静组合加载试验系统结构示意图

Fig. 4 Modified SHPB apparatus coupled static and dynamic loads of Central South University

射、透射杆相同。该系统目前可实现岩石轴向静压0~200 MPa、围压0~200 MPa、冲击动载0~500 MPa的同时加载,试样应变率在 $10^0 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 段。

比较上述两种动静组合加载试验机可以看出,对于欧盟联合研究中心的试验机,由于入射杆、透射杆及试样均为方形,因此可以实现三维方向不同预应力下的冲击试验。但由此带来的应力波在方形杆中的传播规律,能否满足一维应力波传播的条件假设还有待商榷。而且利用方形的 SHPB 束加载轴向力,在试验过程中要保证每个 SHPB 束受力一致,不论是设计制作过程还是试验过程都有一定难度。中南大学冲击试验机的入射杆、透射杆和试样均为圆柱形,不但可以实现单纯加围压的冲击试验,还可以实现单纯加轴压和轴压围压同时加载的冲击试验。但该试验机不能实现三维预应力分别不同情况下的冲击试验。

2 三轴 SHPB 试验机上试验结果的综合分析

国内外很多研究人员利用上述介绍的三轴 SHPB 试验机进行了大量室内试验,并发表了很多研究文献。通过对这些文献的分析和总结,可以得到如下规律。

1) 在围压一定的情况下,岩石的动态抗压强度会随着应

变率的增加而增加;相应的应变也会增大,塑性显著增加。如川北稔等^[9]采用多种岩石和煤进行(长径比 1:1,长度为 25.4 mm)有围压的冲击试验。研究结果表明,砂岩的动态试验最大应力和静载试验比较,有明显增大。在不同围压条件下,岩石强度在从低应变率到中应变率的范围内,有缓慢增加的趋势,但是在应变率 10 s^{-1} 以上范围内,增加趋势呈现出指数函数形式。

2) 在应变率一定的情况下,岩石抗压强度会随着围压的增大而增大,线性关系比较显著,这一点和低应变率下岩石表现出的规律类似。Christenson^[8]利用砂岩(nugget-sandstone)进行有围压的冲击试验(试样长度 12.7 mm,长径比 2:1)。研究表明,在有围压的条件下,高应变率下的动态强度要比准静态强度高出 15%~20%。于亚伦^[14]对大理岩、石英磁铁矿和混合花岗岩的研究(长径比取为 1:1,长度均为 30 mm)表明:在应变率一定时,随着围压的增加,破坏强度呈线性增大。

3) 针对岩石的动静组合加载问题,叶洲元等^[27-28]采用均质性较好的粉砂岩进行(长径比取为 1:1,长度为 50 mm)冲击试验。根据围压分成 4 个系列:2,4,6 和 8 MPa,轴向静压分成 5 个系列:22.5,36,72,81 和 90 MPa,上述组合分别搭配进行加载试验。结果表明,在围压固定时,岩石的动静组合抗压强度随着轴向静压的增大首先会出现近似线性递增的趋势;当轴向静压增大到岩石静载抗压强度 80%左右时,动静组合抗压强度会出现急剧下降的趋势。在轴压一定时,岩石的动静组合抗压强度会随着围压的增大而增大,呈现出近似线性增加趋势;当没有围压或者围压较低时,在轴向静压达到静载强度 80%时,岩石动静组合抗压强度会低于其他轴压系列的强度值。

3 三轴 SHPB 试验中存在的问题

虽然大量研究人员在三轴 SHPB 试验系统上对岩石类材料力学特性进行了研究,但是动载试验不同于静载试验,涉及到的方面很多,如试样长径比、围压、应变率、尺寸效应等,众多因素耦合在一起,复杂性特别显著。具体到现有的试验条件和试验方法,并且通过对历史上相关文献的分析比较,目前仍然存在以下值得探讨的基本问题。

1) 大多数试验装置是在常规的 SHPB 装置上进行改进完成的,产生的应力波为矩形波(梯形波),但是由于矩形波不适用于岩石类脆性材料的冲击试验,导致得到的试验结果精确度不高。首先,由于矩形波包含不同频率的应力波,在传输过程中会出现很明显的弥散现象,试验过程中不能满足一维应力波传播条件,也无法实现对岩石类材料恒应变率加载,得到的应力应变曲线出现很大振荡。另一方面,对于岩石类脆性材料,动态冲击失效应变只有千分之几。使用矩形波加载时,陡峭的上升段脉冲会导致试样两端的应力不均匀,甚至有可能导致试样入射面已经破坏而透射面还未受力或受力很小。因此,对于岩石类材料,必须利用具有平缓上升段脉冲的应力波加载,并实现恒应变率加载,得到的结果才会

更加精确。但是多数三轴冲击试验,尤其是早期的试验(包括单轴冲击试验)都没有考虑应力波整形问题。

2) 相对于岩石的静态强度,动态强度的提高,是因为应变率的影响还是试样直径变化带来的影响,无法明确判断。我们知道,静载强度是指在长径比 2:1,试样直径为 50 mm,应变率为 $10^{-6}\sim 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 条件下得到具体强度值。在长径比一定的情况下,静载强度会随着试样直径的减小呈现增大的趋势。这一点在动态冲击试验中没有得到很好的考虑。图 5 是参考文献 [8]、[9]、[13]、[15]、[21]、[27]、[28],统计在上述三维 SHPB 试验机上试验的试样直径比较图。其中,1 为犹他州立大学试验机,2 为北海道大学试验机,3 为加州大学试验机,4 为重庆大学试验机,5 为北京科技大学试验机,6 为中南大学试验机。

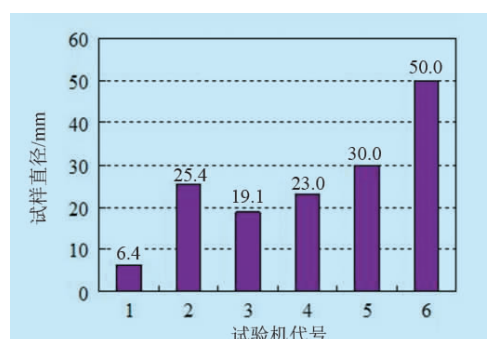


图 5 试样直径比较

Fig. 5 Comparison of rock specimen diameters

可以看出,岩石试样直径从 6.35 到 50 mm 不等。但是,应变率一定时,在直径小于 50 mm 情况下得到的动态强度,必须和相同直径的静载强度进行对比,才有可比性。另外需要指出的是,对于岩石类材料,尤其是对于混凝土材料,试样尺寸过小进行试验,所得到的结果代表性值得商榷。但是试样直径过大,要满足一维应力波传播条件则有一定难度。此外,大量单轴冲击试验结果表明,岩石类动态抗压强度受应变率影响较大,即存在率效应,特别是在中应变率段,可能有突然递增的趋势。因此在试样长径比、围压和轴压一定时,冲击试验所得结果应尽量在各自应变率比较接近的情况下进行比较。但是在不同围压及轴压情况下,试样冲击破坏的临界应变率可能有所不同。

3) 绝大多数动态试验没有考虑消除惯性力的影响,所得到的动态强度准确性值得商榷。图 6 是参考文献 [8]、[9]、[13]、[15]、[21]、[27]、[28],统计得到的试样长径比较图。其中,1 为犹他州立大学试验机,2 为北海道大学试验机,3 为北京科技大学试验机,4 为重庆大学试验机,5 为中南大学试验机。可以看出,长径比从 1 到 2 不等。试样长径比过长会带来几个方面的影响。首先是应力波没有足够的时间在试样内部传播,无法使两端达到应力平衡。其次,长径比过长带来的惯性效应十分显著。为此,Davies 和 Hunter 提出了消除试样中惯性效应的修正公式^[33],该式表明消除试样惯性效应所需的长

径比值为 0.866μ (μ 为泊松比), 一般材料泊松比在 $0.2\sim 0.5$ 之间, 相应的长径比应在 $0.17\sim 0.433$ 之间。但是长径比过小, 试样两端和杆之间摩擦带来的二维效应会比较显著。该式同时也表明, 只要实现恒应变率加载, 则惯性效应就会消除。Samanta 也进行了相关分析, 所得公式也表明要消除惯性效应的方法是长径比在 $0.17\sim 0.433$ 之间或者恒应变率加载^[34]。综合几个方面的情况, 试验过程中必须在试样两端涂黄油或者润滑剂, 尽量减小端面摩擦。另外, 在实现恒应变率加载的同时, 也为了保持应力波在试样内部有足够的传播时间达到两端受力平衡, 可以考虑试样长径比取 $0.5\sim 1.0$ 之间。

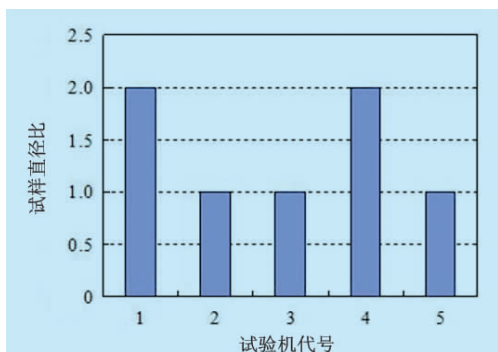


图 6 试样长径比较

Fig. 6 Comparison of the ratio of length to diameter

4) 绝大多数三维 SHPB 试验机虽然能施加较高的围压, 但是没有考虑轴向加载, 不能实现真正三维受力下的冲击试验。为此, 李夕兵等^[2]专门研制了适用于一维和三维动静组合加载的 SHPB 试验装置。综合起来, 该试验系统有如下特点: ① 可以实现单纯加轴压、单纯加围压和轴压围压组合加载下的冲击试验。② 利用自行研制的异型冲头, 产生半正弦波进行冲击。半正弦波在杆中传播不会发生弥散效应, 同时可以实现恒应变率下的组合冲击试验。而且半正弦波的上升段脉冲大约在 $100\mu s$ 左右, 该最大升时与子弹的撞击速度和波形的最大幅值无关, 可以保证应力波有足够的时间在试样内部来回传播, 达到受力均匀状态。③ 试样长径比取 $0.5\sim 1.0$ 之间, 尽量靠近 0.5 , 在实现恒应变率加载的情况下, 尽量消除惯性效应。④ 入射杆和透射杆及岩石试样直径为 50 mm , 所得结果方便与标准静载试验结果进行比较。

4 三轴 SHPB 试验机发展趋势

上述分析可以看出, 三轴 SHPB 试验机将来的研制设计要重点解决 3 个问题。① 实现岩石试样在三维受力下的冲击试验。在一般的三轴 SHPB 试验机上 (入射杆、透射杆和试样截面为圆形), 由于受一维应力波传播理论的限制, 此处所指的三维受力还是一种“假三轴”试验状态。以圆柱形试样为例, 目前只能实现轴向预应力加载同时径向二维围压加载相同的冲击试验。② 解决好加载应力波整形的问题。针对岩石类材料, 应力波整形的要点是通过增加入射脉冲的平缓上升沿和调整加载波形的形状, 实现试样受力均匀和恒应变率加

载。应力波整形的解决方法有多种, 目前还没有统一的标准方法, 因此整形器的设计方案只要能实现试样受力均匀和恒应变率加载即可, 同时也要兼顾操作方便和可重复性的要求。③ 需要在试样标准尺寸要求方面取得共识。对于静载和准静载试验, 大家已有共识, 可以在直径 50 mm , 长径比为 $2:1$ 的试样上进行。对于 SHPB 试验, 可以考虑选取直径为 50 mm , 长径比为 0.5 的试样作为参考尺寸标准。尺寸标准确定后, 再考虑围压、轴压和应变率的相互影响, 得到的结果也方便和静载试验进行比较。

综上所述, 岩石冲击动力学问题之所以复杂, 一方面涉及到试验装置本身的问题, 更重要的一个方面是迄今为止还没有一套比较规范的、公认的标准试验方法。即使在 SHPB 系统上进行单轴冲击试验, 在诸如加载波形、试样直径、长径比等方面, 暂时也还没有形成统一意见。因此, 在三轴 SHPB 系统上进行冲击试验, 目前也只能进行定性比较, 动态本构及理论分析还有待深入。在今后的工作中, 应该重点对存在的问题进行深入研究, 以便为该领域的进展提供重要参考。

5 结语

对历史上岩石类材料三轴 SHPB 试验相关文献进行了综述。对各种代表性的试验装置进行了详细介绍, 并比较了其中的异同点和优缺点。对历史上相关的研究结果也进行了总结。虽然很多专家学者进行了大量研究, 但是由于岩石冲击动力学问题本身的复杂性, 在某些方面还需要继续深入研究。本文旨在对历史上有关文献进行简要概述, 提出了将来研究中特别需要注意的问题, 希望能对这一领域的研究起到一定的参考作用。

参考文献 (References)

- [1] Kumar A. The effect of strain rate and temperature on strength of basalt and granite[J]. *Geophysics*, 1968, 33(3): 501-510.
- [2] 李夕兵, 古德生. 冲击载荷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, 13(2): 125-131.
Li Xibing, Gu Desheng. *Explosion and Shock Waves*, 1993, 13(2): 125-131.
- [3] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994.
Li Xibing, Gu Desheng. *Rock impact dynamics* [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994.
- [4] Zhao J, Zhou Y X, Hefny A M, et al. Rock dynamics research related to cavern development for ammunition storage [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1999, 14(4): 513-526.
- [5] Lok T S, Li X B, Liu D, et al. Testing and response of large diameter brittle materials subjected to high strain rate[J]. *J Mater Civil Eng ASCE*, 2002, 14(3): 262-269.
- [6] Li X B, Lok T S, Zhao J, et al. Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus and resultant complete dynamic stress-strain curves for rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(7): 1055-1060.
- [7] Li X B, Lok T S, Zhao J. Dynamic characteristics of granite subjected to intermediate loading rate [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2005, 38(1): 21-39.



- [8] Christensen R J, Swanson S R, Brown W S. Split-Hopkinson-bar tests on rock under confining pressure [J]. *Experimental Mechanics*, 1972, 12 (11): 508-513.
- [9] 川北稔, 木下重教, 于亚伦, 等. 用三轴霍甫金松高速冲击试验机对岩石进行冲击试验的研究[J]. 有色金属: 矿山部分, 1983(6): 32-36.
Minoru Kawakita, Shigenori Kinoshita, Yu Yalun, *et al.* *Nonferrous Metals: Mining Section*, 1983(6): 32-36.
- [10] Albertini C, Montagnani M. Study of the true tensile stress-strain diagram of plain concrete with real size aggregate; need for and design of a large Hopkinson bar bundle [J]. *Journal de Physique IV*, 1994, 4 (Supple): 113-118.
- [11] Albertini C, Cadoni E, Labibes K. Study of the mechanical properties of plain concrete under dynamic loading [J]. *Experimental Mechanics*, 1999, 39(2): 137-141.
- [12] Nemat-Nasser S, Isaacs J, Rome J. Triaxial Hopkinson techniques[M]// Knhn H, Medlin D. ASM Handbook, Vol 8: Mechanical Testing and Evaluation. ASM Int, 2000: 516-518.
- [13] Rome J, Isaacs J, Nemat-Nasser S. Hopkinson techniques for dynamic triaxial compression tests [C]//Gdoutos E E. Recent Advances in Experimental Mechanics. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002: 3-12.
- [14] 于亚伦. 用三轴 SHPB 装置研究岩石的动载特性 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 76-79.
Yu Yalun. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 14(3): 76-79.
- [15] 王林, 于亚伦. 三轴 SHPB 装置的研究[C]//第二届全国岩石动力学学术会议论文集. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1990: 492-499.
Wang Lin, Yu Yalun. Study of triaxial SHPB apparatus[C]//Proceedings of the Second National Conference on Rock Dynamics. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 1990: 492-499.
- [16] 王林, 于亚伦. 三轴 SHPB 冲击作用下岩石破坏机理的研究 [J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(1): 84-89.
Wang Lin, Yu Yalun. *Explosion and Shock Waves*, 1993, 13(1): 84-89.
- [17] 于亚伦. 高应变率下的岩石动载特性对爆破效果的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 345-352.
Yu Yalun. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1993, 12(4): 345-352.
- [18] 于亚伦, 蒋德全. 高应变率作用下岩石的微观损伤特征 [C]//第四届全国岩石动力学学术会议论文集. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1994: 8-12.
Yu Yalun, Jiang Dequan. Microscopic damaged specifics of rock under high strain rate[C]//Proceedings of the Fourth National Conference on Rock Dynamics. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1994: 8-12.
- [19] 蒋德全, 陈庆寿, 于亚伦. 高应变率作用下岩石的微观损伤特征[J]. 现代地质, 1996, 10(4): 566-569.
Jiang Dequan, Chen Qingshou, Yu Yalun. *Geoscience*, 1996, 10(4): 566-569.
- [20] 王林. 裂隙矿岩破碎块度的研究[J]. 爆破器材, 1997, 26(2): 3-5.
Wang Lin. *Explosive Materials*, 1997, 26(2): 3-5.
- [21] 吴德伦, 叶晓明, 张平. 围压 SHPB 试验理论与应用 [C]//第三届全国岩石动力学学术会议论文集. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1992: 85-94.
Wu Delun, Ye Xiaoming, Zhang Ping. The application and test theory of SHPB under confining[C]//Proceedings of the Third National Conference on Rock Dynamics. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 1992: 85-94.
- [22] 李夕兵, 周子龙, 邓义芳, 等. 动静组合加载岩石力学实验方法与装置: 中国, 200510032031[P]. 20060208.
Li Xibing, Zhou Zilong, Deng Yifang, *et al.* Testing technique and apparatus of rock subjected to coupled static and dynamic loads: China, 200510032031[P]. 20060208.
- [23] Li Xibing, Zhou Zilong, Lok Tat-Seng, *et al.* Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45 (5): 739-748.
- [24] 周子龙. 岩石动静组合加载实验与力学特性研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2007.
Zhou Zilong. Study on experimental and mechanical behaviors of rock static-dynamic coupling loads [D]. Changsha: School of Resources and Safety Engineering, Central South University, 2007.
- [25] 崔栋梁. 三维动静组合载荷下高应力岩体动力特性及岩爆研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2007.
Cui Dongliang. Study on rock dynamical characteristic and rockburst mechanism under three-dimensional static-dynamic coupling loading [D]. Changsha: School of Resources and Safety Engineering, Central South University, 2007.
- [26] 李夕兵, 周子龙, 叶洲元, 等. 岩石动静组合加载力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1387-1395.
Li Xibing, Zhou Zilong, Ye Zhouyuan, *et al.* *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(7): 1387-1395.
- [27] 叶洲元. 高应力岩石在动力扰动下力学特性研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2008.
Ye Zhouyuan. Study on mechanical characteristics of statically loaded rock under dynamic loads[D]. Changsha: School of Resources and Safety Engineering, Central South University, 2008.
- [28] 叶洲元, 李夕兵, 周子龙, 等. 三轴压缩岩石动静组合强度及变形特征的研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1981-1986.
Ye Zhouyuan, Li Xibing, Zhou Zilong, *et al.* *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(7): 1981-1986.
- [29] Ye Zhouyuan, Li Xibing, Liu Xiling, *et al.* Testing studies on rock failure modes of statically loads under dynamic loading [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2008, 14(S1): 530-535.
- [30] 李夕兵, 古德生. 深井坚硬矿岩开采中高应力的灾害控制与破碎诱变 [C]//香山第 175 次科学会议. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 101-108.
Li Xibing, GU Desheng. The hazard control and cataclastic mutagenesis induced by high stress in hard rock mining at depth[C]// The 175th Xiangshan Science Congress. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 101-108.
- [31] 马春德. 一维动静组合加载下岩石力学特性的试验研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2004.
Ma Chunde. Test and study of mechanical properties of rock under one-dimensional static-and dynamic combination load[D]. Changsha: School of Resources and Safety Engineering, Central South University, 2004.
- [32] 左宇军. 动静组合加载下的岩石破坏特性研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2005.
Zuo Yujun. Study on failure and fragmentation characteristics of rock under static-dynamic coupling loading[D]. Changsha: School of Resources and Safety Engineering, Central South University, 2005.
- [33] Davies E D H, Hunter S C. The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson bar [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1963, 11(3): 155-179.
- [34] Samanta S K. Dynamic deformation of aluminum and copper at elevated temperatures [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1971, 19(3): 117-135.

(责任编辑 代丽)

