

一维爆炸应力波传播规律的试验方法及装置

余浩然¹, 陈骏^{1,2}, 朱锐¹, 易辉¹, 杨仁树³

(1. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083; 2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266590; 3. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要: 钻爆法在我国工程施工应用中地位极为突出, 为进一步控制岩石破碎效果并理解岩石破碎过程中爆生气体的作用效果, 提出一套一维爆炸应力波在介质中传播规律的试验方法和装置. 该试验系统由爆炸加载装置、应变采集装置、高速摄影装置 3 个主要部分组成. 使用红砂岩制备长杆试件, 通过试验验证该试验方法和系统的可行性. 结果表明, 该试验方法和系统能较好地模拟爆炸荷载作用下介质中爆炸应力波的传播过程, 且能避免应力波受到局域效应的影响范围, 具有加载方式简单、能实现多种爆炸约束形式的特点. 在同药量不同边界条件下, 爆炸应力波于长边方向 4 倍于试件半径处达到均一, 视为一维爆炸应力波. 相同药量下爆炸应力波作用效果相同, 对介质试件所施加的约束越强, 爆生气体参与介质试件的爆炸过程越多.

关键词: 一维应力波; 爆炸荷载; 约束条件; 爆生气体

中图分类号: TD 235 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)02-0448-10

Experimental method and apparatus for the propagation law of one-dimensional explosive stress waves

YU Haoran¹, CHEN Jun^{1,2}, ZHU Rui¹, YI Hui¹, YANG Renshu³

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control(Ministry of Education), Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 3. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The drilling and blasting method plays a crucial role in engineering construction in China. To better control rock fragmentation and understand the impact of explosive gases during rock bursting and crushing, this study proposes an experimental method and device for investigating the propagation law of one-dimensional explosive stress waves in media. The system comprises three primary components: an explosive loading device, a strain acquisition system, and a high-speed photography apparatus. Red sandstone specimens were prepared in the form of long rods, and experiments were conducted to verify the feasibility of the proposed method and system. The results indicate that the experimental method and system can effectively simulate the propagation process of explosive stress waves in media under explosive loading conditions, minimizing the influence of local effects caused by the loading method. This

收稿日期: 2024-05-15 修回日期: 2024-10-18 DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.2024.02.03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52227805); 国家重点研发计划项目(2021YFB3401501); 矿山灾害预防控制教育部重点实验室开放课题基金项目(JMDPC202103)

通信作者: 陈骏(1990—), 男, 山西省晋中市人, 副编审, 工学博士, 从事岩土工程、矿山建设工程方面的研究.

E-mail: cj0354@cumt.edu.cn Tel: 17888826882

引用格式: 余浩然, 陈骏, 朱锐, 等. 一维爆炸应力波传播规律的试验方法及装置[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(2): 448-457.

YU Haoran, CHEN Jun, ZHU Rui, et al. Experimental method and apparatus for the propagation law of one-dimensional explosive stress waves[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(2): 448-457.

approach is simple and can accommodate various explosion constraint forms. Under identical explosive quantities and different boundary conditions, the explosive stress wave propagates uniformly along the long side of the specimen at four times its radius, forming a one-dimensional explosive stress wave. Under the same explosive stress wave effect, stronger constraints on the media specimen result in greater involvement of explosive gases in the rock fragmentation process.

Key words: one-dimensional stress wave; explosion load; constraint conditions; explosive gas

钻爆法^[1-4]在我国井巷工程施工中应用最为广泛。由于爆炸过程的瞬态性,炸药能量释放快速而强烈,对岩石破碎效果的控制难以准确把握,全面地理解爆破过程是岩石爆破破碎、损伤演化和爆破地震效应等动力分析的基础和前提。诸多工程实践和研究^[5-8]认为,改变炸药性能和装药结构,不但能有效调节爆生气体能量和冲击波能量的比例大小,还可改变冲击波作用的峰值和时间,使爆炸能量传递与岩体破碎有更好的匹配关系。为了解决这些问题,需要从原理上研究破岩工作中炸药爆炸的能量释放规律和传输规律^[9-12],改进爆破设计参数,使爆炸能量向有利于工程目标的方向发展。

爆破试验一直是研究炸药爆炸与岩石破碎的重要手段之一。常见的岩石爆破试验包括爆破漏斗试验、动态光弹/焦散试验、侵彻试验等。文献[13]在现场开展单孔爆破漏斗试验,利用钻孔声波波速试验测得炮孔周边岩石的纵波波速,并根据提出的损伤值测定法,对爆破漏斗和爆破损伤区的几何特征进行了定量比较与分析。文献[14]应用动态焦散线测试系统模拟断续节理岩体断裂爆破过程,进行了有机玻璃(PMMA)模型透射式动态焦散线试验,研究了无充填和充填断续节理对切缝药包断裂控制爆破裂纹扩展规律的影响和裂纹扩展的机理。文献[15]利用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验系统并结合高速数字图像相关技术(DIC),分别对冻融循环为0,10,20,40次的砂岩试件进行不同冲击速度下的动态劈裂试验,研究分析了不同冻融循环次数下冻结砂岩在动态拉伸应力下的强度特征、变形过程与破坏形态。这些试验方法各有优缺点:爆破漏斗试验直接在工程现场实施,用以指导爆破设计方案,能够获得宏观上的试验结果,难以同步观测岩石破坏、质点位移速度和边界应变等指标的变化;动态光弹/焦散试验采用光测手段,在分析爆炸应力波传播和裂纹扩展上优势明显;采用标准试件进行室内SHPB试验相比传统的爆破试验有所进步,其能够以应

力-应变等信息来解释材料破坏和本构特征;常规爆破试验难以模拟与工程实际吻合的爆破设计、装药结构和耦合条件,不能较好地深入分析爆炸产物的能量利用效率和爆炸能量在岩石中的传递效率,不能更深层次剖析爆炸能量的分配形式。

工程中常常对炸药爆轰过程^[16-18]产生的巨大能量进行有益地使用,例如在地下巷道爆破开挖时,需要精准地控制爆炸产物携带的能量,防止对围岩体、结构体过度破坏,并防止过量的爆破振动对地面建筑造成损伤。一些学者通过改进或创新已有试验方法,尝试对炸药爆炸产物的能量分配比例进行定量分析、对爆炸应力波在岩石中的传播规律进行描述。文献[19]以有机玻璃为试验材料采用实验室模型试验的方法,结合非线性动态分析软件(LS-DYNA)进行爆破数值模拟分析,研究了爆炸应力波与爆生气体对被爆介质的作用效应,结果表明,爆炸应力波的作用是粉碎区微裂纹形成的主要原因,爆生气体的作用是裂隙区裂纹形成的主要动力。文献[20]通过机械手段产生高压气体,实现了无爆炸应力波影响的爆生气体单独作用的破岩试验,结果表明,爆生气体单独作用时,岩体内力可以按准静态计算,岩石表现为拉伸破坏。

根据圣维南原理^[21],在静态或准静态条件下,载荷的空间分布只影响受载物体与载荷距离较近部分的应力分布,而距载荷距离较远的部分其应力分布仅受载荷合力或合力矩的影响。动态圣维南原理猜想动态载荷对受载物体远端应力分布的影响同样只受限于其动态合力或合力矩。其另一种阐述是:当结构外载荷动态合力及合力矩为0时,载荷对于结构远端应力分布无影响。对于短时间下的动载荷下,需要考虑结构的惯性效应^[22-23]以及材料应变率效应^[24-25]。而结构的几何非线性破坏以及本构关系和破坏准则的改变使得动态下的圣维南原理分析相比于静态下更为困难。在现实工程中,由于爆炸所产生的偏心荷载^[26]使得爆炸作用所产生的应力波在岩石中的传播极其复

杂,爆炸近区岩石中应力波受到局域效应的影响变得极为紊乱、难以分析. 确定局域效应的影响范围,获取稳定的一维爆炸应力波区域,可保证后续试验数据的稳定性.

本文提出了一种测量一维爆炸应力波在介质中传播规律的试验方法和装置. 针对井巷工程中岩石爆破设计关键参数,通过改变试验装置中炸药装药结构和约束形式,分别模拟了实际工程中以破岩为出发点的炸药耦合条件、封堵条件,以防护为出发点的药包约束条件;基于波传播反演分析方法,获得了岩石动态响应与损伤解耦的本构特征. 通过案例分析,验证了试验方法和装置的可行性,分析了不同药量下的 3 种约束状态中爆炸应力波与爆生气体的分配关系,通过爆炸近端岩石中局域效应的影响范围,获得了稳定一维爆炸应力波. 并利用电测法与 DIC 分析法相结合的方式研究一维爆炸应力波的特征,将爆生气体和爆炸应力波在爆炸作用时的具体分配关系进一步量化,为爆炸产物能量分配效率和在岩石介质中的传递特征研究提供试验基础.

1 一维爆炸应力加载试验装置

基于一维应力波的传播理论,设计了如图 1 所示的一维爆炸应力加载试验系统.

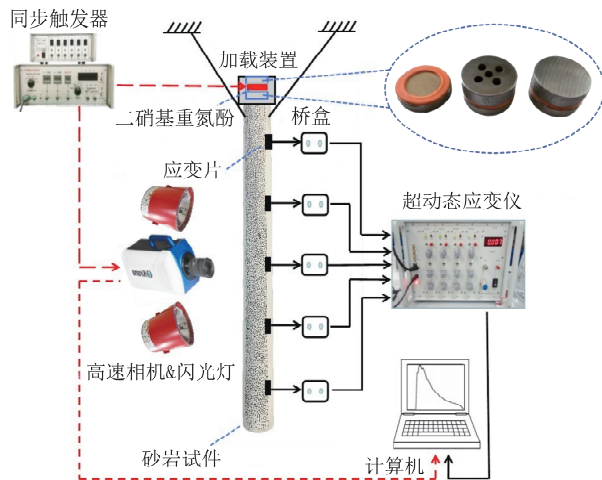


图 1 一维爆炸应力加载试验系统

Fig. 1 One-dimensional explosion stress loading experimental system

试验系统包括试验试件、爆炸加载装置、应变采集装置、高速摄影装置. 爆炸加载装置装载在垂直于地面且悬吊的杆状试件端面,确保爆炸荷载沿着试件长边方向施加;高速摄影装置采集爆炸加载过程中试件表面的质点位移速度,利用 DIC 检测整个爆炸过程中应变场的变化;应变采集装

置与计算机连接,采集爆炸过程中岩石表面的电信号变化,与 DIC 分析法形成验证和对照. 爆炸发生装置通过爆炸加载于垫片,垫片将爆炸应力波传递到岩杆,获得平稳的一维爆炸应力波. 采用高速摄影装置获取试件在一维爆炸应力波作用下的质点位移速度,利用电测方式获得岩杆在一维爆炸应力波作用下的受力以及形变状态,直观地表明试件的应变-时间历程和宏观破坏形式. 通过改变装药结构的约束作用强弱程度,实现爆炸动静作用分离的目的,进一步区分爆炸应力波和爆生气体的具体作用比例;通过应变波形特征变化分析爆炸过程中爆生气体对试件的应力、应变状态的影响.

1.1 试验试件

试验试件为圆杆状岩石试件. 取无明显裂痕的岩块进行切割和取岩芯,将岩块加工成尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的圆柱体试件. 为防止端面平整度不足导致爆炸应力波加载不满足一维应力波理论假设,采用角磨机对装载端面进行整平,保证平行度和垂直度的误差在 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 范围内. 为了保证材料的均质性,对岩杆试件进行筛洗,避免节理裂隙和缺陷等偶然因素影响;通过人工筛选的方式剔除有宏观裂纹和孔洞的试件;利用声波测速和密度测量的方式剔除掉有内部裂纹和缺陷的试件,最终保证参与试验的试件具有良好的均质性.

1.2 爆炸加载装置

爆炸加载装置由下层钢制垫片、橡胶圆环和内部圆形盛药区域以及上层钢制盖片组成,炸药采用二硝基重氮酚(DDNP),如图 2~3 所示.

下层钢制垫片与上层钢制盖片均采用 45 号钢制成,下层垫片尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$;如图 3 所示,上层盖片按照试验需求从右到左依次可分为如下 3 种规格:

1) 强约束爆炸加载:视为有较少爆生气体溢出,爆生气体参与比例更大. 盖片尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$.

2) 弱约束爆炸加载:视为有较多爆生气体溢出,爆生气体的参与比例减少. 盖片尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,且中心布置一个 $\varnothing 8 \text{ mm}$ 的空孔,在其四周对称布置 4 个等规格的贯穿孔.

3) 无约束爆炸加载:不放置盖片,视为爆生气体完全溢出,忽略爆生气体的作用.

制作爆炸加载装置时,在下层钢制垫片上平铺一层塑料薄膜以减少炸药导线与金属钢片直接

接触导致的试验误差. 将合适大小的橡胶圆环放置在垫片上, 并使炸药均匀地散铺在圆环内部, 充分压实, 保证一定的装药密度. 炸药覆盖住起爆线一端, 在橡胶圆环上方按试验需求放置不同规格的钢制盖片. 通过更换不同规格的盖片, 改变装药结构, 达到改变爆生气体与爆炸应力波参与爆炸作用参与比例的目的, 进一步分析和理解爆生气体在爆炸过程中对岩石破碎的作用和影响效果.

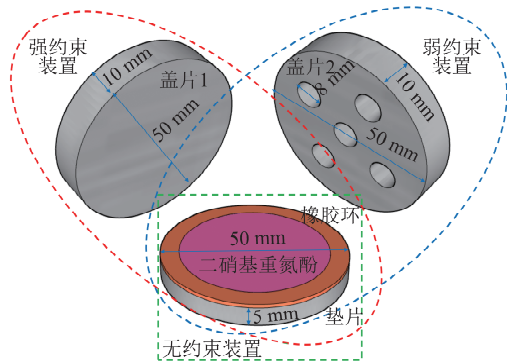


图 2 一维爆炸应力加载装置
Fig. 2 One-dimensional explosive stress loading device

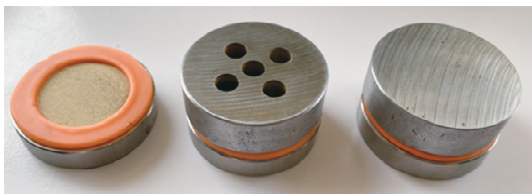


图 3 装药结构实物
Fig. 3 Charging structure diagram

1.3 应变采集装置

应变采集装置由 LK2400 超动态应变仪、LK2400 采集仪、多组应变片、若干桥盒以及计算机组成. 该套装置具有精度高、操作方便以及稳定性良好等优点, 普遍应用于爆炸和冲击试验的应变数据采集, 具体参数见表 1 和表 2. 本试验所选择的采样率为 40 MHz, 采样时间为 0.001 s, 触发方式为通道触发.

岩石杆件在爆炸加载过程中的应变变化导致电阻值的变化, 与其相连接的电桥失去平衡从而产生电压信号. 电压信号可依据放大系数换算为时域应变信号, 进而获得试件在爆炸应力波作用下的传播规律和破坏特征. 试验采用的应变片为普通电阻应变片, 其电阻值为 120 Ω , 灵敏度为 2.0 mV/V, 基底尺寸为 6.9 mm \times 3.9 mm, 丝栅尺寸为 3 mm \times 2 mm, 采用 30 cm 长的绝缘电子线作为引线. 沿着砂岩试件长边方向设置 5 组应变片, 由于试件表面可能凹凸不平或应变片与试件轴线

不平行, 会导致试验结果有一定误差, 因此试验中应变片采用全桥接线法; 各组应变片分别接入桥盒, 各个桥盒分别与超动态应变采集仪的接口连接, 测量出沿试件延伸方向试件表面的一维应力波传播过程.

表 1 超动态应变仪参数
Table 1 Super-dynamic strain gauge parameters

型号	供桥电压/V	电桥电阻/k Ω	增益	应变系数 K	平衡范围 $\mu\epsilon$
LK2107A	2	0.12~1.00	100	2.00	15 000 微调: ± 100

表 2 采集仪技术指标
Table 2 Technical index of capture card

型号	AD 转换率/MHz	AD 分辨率/bit	采样率/MHz	带宽/MHz	量程/V	输入电压/V
LK2400	40	14	40	0~12	± 10	± 10

1.4 高速摄影装置

高速摄影装置由超高速摄影仪、闪光灯和计算机输出端组成. 超高速摄影仪型号为 Kirana-05M, 最高拍摄帧率可达 500 万帧; 闪光灯型号为 SI-AD500 光源, 可以为拍摄提供长达 2 ms 的稳定光场, 如图 4 所示.

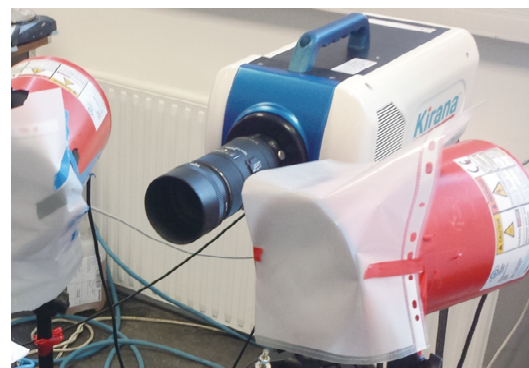


图 4 Kirana-5M 型超高速摄影仪及 SI-AD500 型闪光灯
Fig. 4 Kirana-5M ultra high speed camera and SI-AD500 flash

本试验中, 超高速摄影仪距离试件约 2 m 距离, 以保证岩杆散斑区域处于摄影仪视场中. 超高速摄影仪正对试件表面散斑一侧, 通过记录在爆炸加载过程中试件表面散斑在不同时刻的位移变化规律, 利用内置算法计算得到岩杆在受载过程中的位移场和应变场数据. 由于岩杆尺寸较大, 难以全部拍摄, 以及设置了 2 m 的相机安全距离, 拍摄帧率需降低为 20 万 fps, 触发方式采用外触发.

1.5 试验步骤

试验的步骤如图 5 所示.

1)用细绳将岩杆试件一端垂直吊起,使岩杆另一端悬空,保证岩杆在爆炸过程中处于自由端状态,无其他边界条件.

2)将岩杆试件上等间距预置的应变片与对应应变仪桥盒依次连接,确保应变仪和采集仪信号无误.

3)调整超高速摄影仪和闪光灯的位置、高度、焦距以及光圈,确保在信号输出端口能够清晰地观察到完整的岩杆试件以及提前绘制在岩杆试件表面的直径为 2 mm 的黑色圆形斑点,从而监测爆炸过程中试件表面的质点位移速度.

4)为了减少由于端面不平引起的试验误差,在岩杆吊起一端的端面涂抹凡士林,将如图 3 所示的预制爆炸加载装置平稳放置在端面,使其与端面完全接触.

5)将起爆线连接起爆器,利用高压起爆器向爆炸加载装置施加电压引爆其内部的炸药.炸药爆炸产生的爆炸应力波会传递到爆炸加载装置下部的钢制垫片内,应力波继续由圆形钢制垫片均匀传递到岩杆试件内部.爆炸产生的一维应变信号会通过应变仪转化为电压信号输出,产生的位移信号则通过超高速摄影仪记录.整套系统完整地采集到爆炸过程中一维应力波在岩杆试件中的传播过程.

6)改变试验条件,重复试验,获取足够的试验数据.

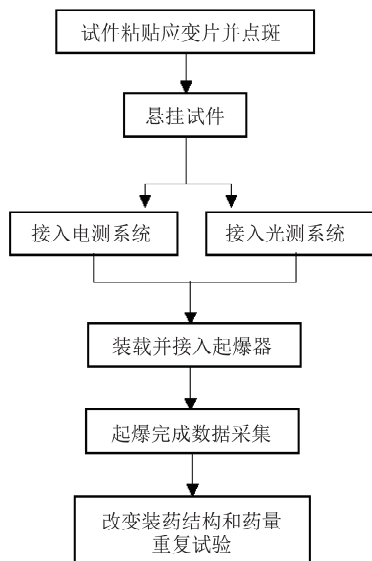


图 5 试验步骤示意

Fig. 5 Schematic diagram of experimental procedure

2 一维应力波的均匀性验证

为了验证该试验系统能否提供稳定的一维爆

炸应力曲线,以及不同约束条件下爆炸应力波的应力波差异特征,使用尺寸为 $\varnothing 50\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的圆柱状红砂岩试件,红砂岩的基本力学性质见表 3.炸药类型为 DDNP,其基本参数见表 4.试件材料的平整度和炸药的稳定性均满足试验要求.

表 3 红砂岩基本力学性质

Table 3 Basic mechanical properties of red sandstone

密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	纵波 波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	单轴抗 压强度/ MPa	抗拉 强度/ MPa	弹性 模量/ GPa
2.27	2 504	28.56	2.21	3.5

表 4 炸药基本性质

Table 4 Basic properties of explosives

炸药类型	爆热/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	爆容/ ($\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$)	爆速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
DDNP	1 400	600	6 600

基于一维应力波理论和圣维南原理可知,弹塑性体受到外在荷载作用的情况下,荷载的空间分布只影响受载物体与荷载距离较近部分的应力分布,而距荷载距离较远的部分其应力分布仅受荷载合力或合力矩影响.为探究爆炸荷载近端岩石的应力波传播过程,以及一维爆炸应力波在荷载合力作用下稳定传播的区域,需减少边界尺寸及加载范围对于应力波的影响,为后续试验提供稳定一维爆炸应力波的检测范围,以保证数据的准确性.

基于一维应力波理论进行了 400 mm 长岩杆试件的爆炸试验.试验在等效荷载(等质量炸药)下使用弱约束爆炸装置进行,改变药包几何形态(使用直径分别为 30,35,40 mm 的小圆饼状药包)以达到不同边界条件的目的.将预制的应变片设置在爆炸近区.5 组应变片分别距离爆炸端 $1r, 2r, 3r, 4r, 5r$ (r 为岩杆端面半径),即距离岩杆端面 25,50,75,100,125 mm.图 6 是 3 种几何形态药包试验组中砂岩各个特征尺寸处的应变时程曲线.

由图 6 可见,应变片距爆炸端 $4r$ 长度之后的应力波峰值、应变率及加载时间等均逐渐趋于相同,边界条件对后端爆炸应力波的影响可忽略不计,由此确保试验装置对红砂岩试件在 $4r$ 长度(即应变片距离爆炸端面 100 mm 处)之后所取得应力波是均匀可靠的,即不受局域边界条件影响的稳定一维应力波.

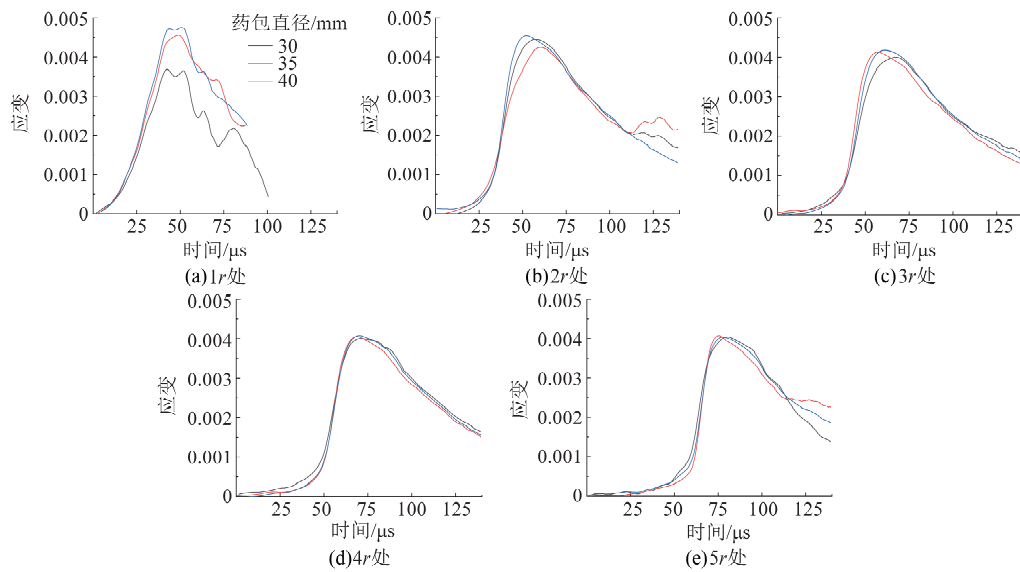


图 6 砂岩各个特征尺寸处的应变时程曲线
Fig. 6 Strain time history curve at various characteristic sizes of sandstone

3 一维爆炸应力波装置试验成果

在第 2 节试验结果的基础上,将预制应变片分别设置在距离岩杆上端面 100, 150, 200, 250, 300 mm 处.应变片的长边方向与岩杆试件长边方向一致,测量在爆炸作用下岩杆试件该位置的纵向压缩应变.

另外,对红砂岩试件进行浮灰清洗,待其彻底晾干后,对试件表面喷涂一层哑光白漆.由于试件为曲面,首次喷涂的白漆会相对较薄,因此待白漆干燥后进行二次白漆喷涂,待其彻底干燥固化后,用黑色记号笔进行手动黑斑处理.研究结果表明,当单位散斑尺寸为 3~7 个像素点时,DIC 分析结果相对准确,因此为了避免喷斑分布不均匀,本文采取手动点斑的方式在试件表面形成散斑.本试验中的人工散斑经过测量发现约为 5 个像素点,可以认为散斑效果良好.以此取得爆炸作用下红砂岩的 DIC 信号,如图 7 所示.



图 7 红砂岩试件及电测、DIC 预处理示意
Fig. 7 Red sandstone specimens and DIC pretreatment diagram

3.1 电测法

通过改变约束条件和药量来控制变量,利用

电测法得到红砂岩长杆试件在爆炸荷载作用下一维应力波的传播过程,如图 8 所示.以图 8a 中 2 g 药量强约束下应变片 2 为例,整个应力波形主要由线性加载段、卸载段、叠加段 3 个阶段组成.当爆炸加载装置起爆之后,应力波经过约 67 μs 的传播到达应变片 2 所在的位置,开启短暂且迅速的应力波加载过程,在 86 μs 处达到峰值,整个加载过程持续约 20 μs .当应变到达峰值后出现卸载现象,卸载段的斜率远远小于加载段斜率,呈现出“长尾效应”.由于岩杆试件尾端悬空,应力波传播至尾端后继续反向拉伸传播,在第 255 μs 时,应变信号出现明显的拐点,这意味着应力波进入叠加段.正向压应力波和反向拉伸波在拐点处叠加,在强脉冲拉应力作用下,试件中应变快速由压应变转换为拉应变,并在 397 μs 时达到峰值,随后应变缓慢回到零点.整个应力波传播过程表现出“强加载、缓卸载”的特征.对图 8a 中不同应变片的整体波形进行比较分析可知,各个测点处应力波加载段的时间均大致在 20 μs 左右,而卸载段的时间均远远超出加载时间.不同测点处应力波波形的表现形式也有所区别,在距爆炸加载端较近的测点,波形在加载段后表现为斜率较小的第二次线性加载,应变变化较为平滑,增幅明显;而在距爆炸加载端较远的测点,在线性加载段后,应变增幅、增速均较小,甚至有平台段出现,部分结果为在线性加载段后即刻发生卸载.随着距爆炸加载端距离的增加卸载段的斜率明显增大,应力波形回归零点的时间显著减少.

结合图 8a~8c 可以看出,在 2 g 固定药量的

前提下改变约束结构,距离爆炸端最近处的应变片 1 的应变峰值随着约束的减少而减小.在强约束条件下的应变片 1 的应变峰值为 0.006 1,弱约束下应变片 1 的应变峰值为 0.005 2,无约束条件下的应变片 1 的应变峰值为 0.002 5.约束条件的增加使得应变片 1 的应变峰值增加了 0.002 7,表明在弱约束加载条件下,爆生气体参与爆炸作用所占的比例为 54%,而在强约束加载条件下,爆生气体参与爆炸作用所占的比例为 60%.另外,在 2 g 药量强约束条件下,从距离爆炸端最近处到最远处应变峰值的衰减比例约为 26.2%,而在弱约束下以及无约束条件下,从距离爆炸端最近处到最远处应变峰值的衰减比例分别为 36%,39.2%.爆生气体和爆炸应力波混合加载后的岩杆中应变峰值衰减比例相较于纯爆炸应力波加载的衰减比例更小,岩石爆破效果更好,爆破范围更大.

在图 8d~8f 中,在药量均为 4 g 的情况下,约束结构的不同对砂岩中的波形幅值有明显影响.在强、中、弱 3 种不同约束作用下,对应应变片 1 的应变峰值分别为 0.006 8,0.006 2,0.004 2,相较于无约束条件下,弱约束状态对应的应变峰值增幅约为 47.6%,强约束状态对应的应变峰值增幅约为 61.2%.在弱约束条件下,爆生气体参与爆炸作用所占的比例为 30%,在强约束条件下,爆生气体参与爆炸作用所占的比例为 39%.约束作用越强,爆炸应力波初始幅值越大.分析认为,相同药量下起爆,爆炸应力波作用相同,但由于约束作用的存在,参与爆炸作用的爆生气体的量不同,强、弱、无约束分别对应较多、较少以及无爆生气体参与爆炸作用,这对试件中爆炸应力波的初始幅值产生了明显的影响.

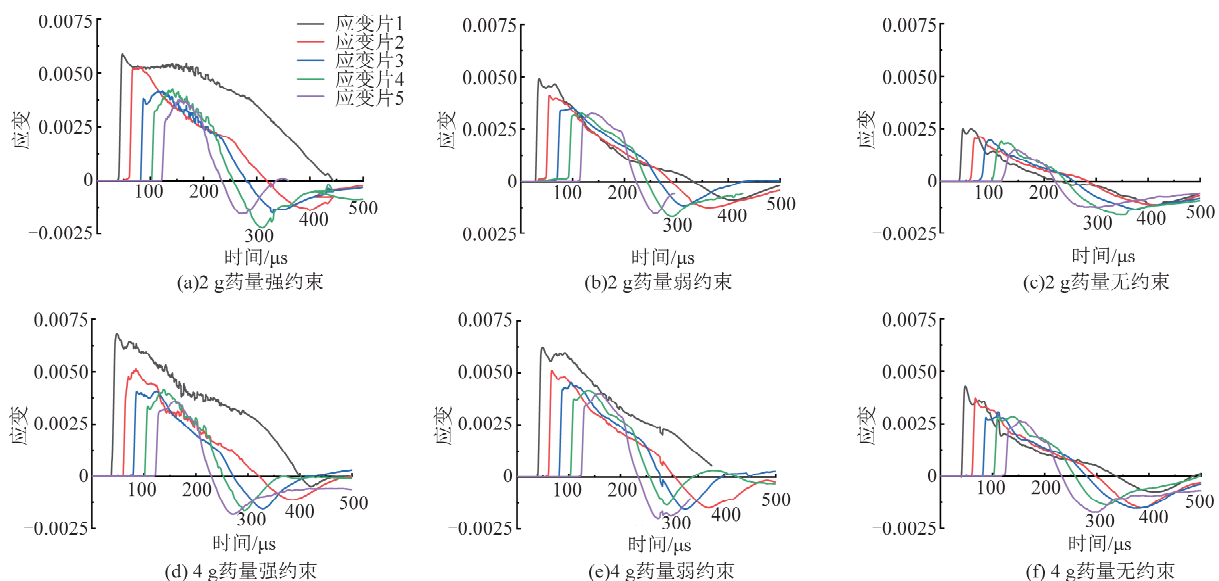


图 8 红砂岩的应变时程曲线
Fig. 8 Strain time history curve of red sandston

3.2 DIC 分析法

通过高速摄影系统对爆炸加载下红砂岩动态破坏全过程进行捕捉,试验拍摄频率为 20 万帧,单次试验可以获得 180 张照片,图像分辨率为 924 像素 \times 768 像素,使用 VIC-2D 软件对图片进行分析,以 2 g 药量的拍摄结果为例,得到不同装药结构、不同时刻红砂岩试件中的应力波传播规律及裂纹扩展情况,如图 9 所示.计算结果中压缩应力波产生的应变值为负值,拉伸应力波产生的应变值为正值.

1)以 2 g 药量弱约束状态为例,第 0~85 张照片,每张照片间隔约 5 μ s,即爆炸压缩波由加载端

传递到试件末端的时间为 420 μ s.由应变演化云图(蓝色部分为压应力)可知,压缩应力波的传播方向为自上而下向自由面传播,当应力波经过自由面时,应力波完全反射形成拉伸应力波,并与压缩应力波产生叠加,体现在第 100~170 张照片中,即第 500~850 μ s,此阶段云图中红色部分为拉应力.装药端随着爆炸作用的加载,应变幅值不断提高,岩杆端面爆炸近区由于侧向并未受到约束,达到应变峰值后,会在爆炸应力波的作用下产生张拉裂纹,裂纹随着加载时间的延长不断扩展.当距离加载端较远处的叠加应力达到试件的最大拉应力时,试件表面开始出现拉伸裂纹,拉伸裂纹首先

出现在距离自由面近端,随着拉伸裂纹扩展,形成新的自由面,试件中又开始出现后续拉伸裂纹。

2)横向比较3组试验结果发现:无约束条件下,试件整体保持完整,试件两端分布明显的拉应变区,中部为压应变集中区,正向压缩波和反射拉伸波影响下均未超过试件的抗压强度和抗拉强度极限,试件没有出现损坏现象;弱约束条件下,距离自由面近区首先出现应变集中,并在对应位置开始出现裂纹,随着裂纹扩展,试件中部开始出现第2个应变集中区并伴随第2条拉伸裂纹出现,最后结合加载后的实际试件情况,统计一共出现3条

裂纹;强约束条件下,拉伸裂纹的演化规律与弱约束条件下基本相同,裂纹出现在拉应力集中区域,一共出现3条拉伸裂纹,装药端近区受压缩波影响,达到屈服强度,出现了张拉裂纹,最后结合加载后的实际试件情况,统计一共出现4条裂纹。

3)通过对比3种约束情况下爆炸加载试件表面的应变演化以及断裂情况,发现规律基本符合预期,即约束作用越强,正向压缩波和反射拉伸波的强度越大,体现在颜色加深以及应变幅值变大,同时红砂岩试件破坏越严重,体现在爆炸近端的破碎以及远端的断裂。

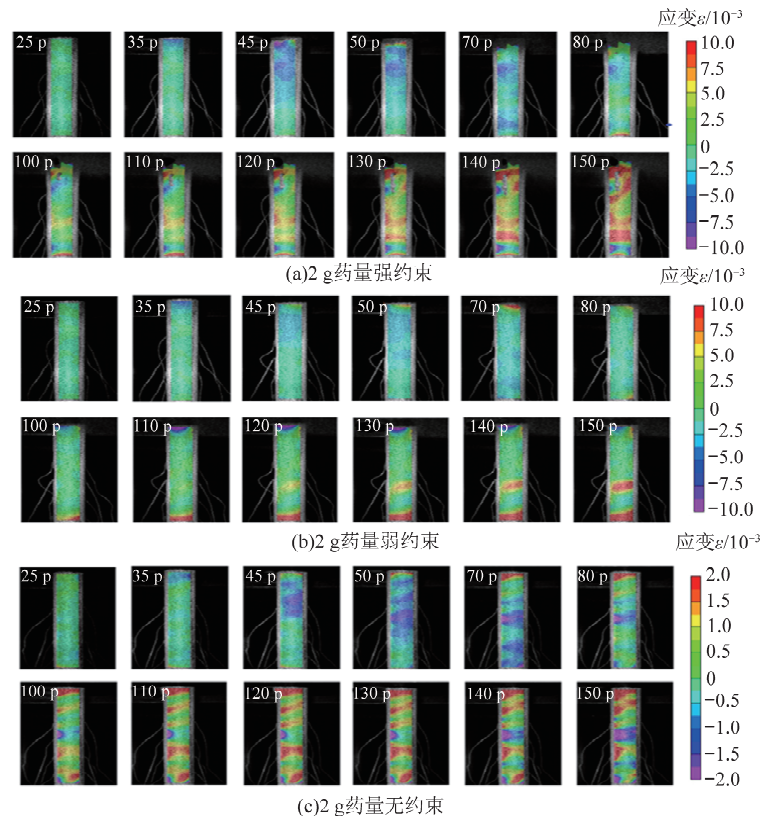


图9 爆炸加载下红砂岩应变演化规律及裂纹扩展情况
Fig. 9 Strain evolution law of red sandstone under explosion loading

4 结论

1)基于圣维南原理,对动态爆炸作用下介质的局域效应的影响范围进行确定.对于砂岩试件,距离爆炸端长4倍半径处应力波达到均一,具有一定的稳定性,视为一维应力波,为后续试验的可靠性提供理论和试验支撑。

2)使用电测法和DIC分析法相结合的方式来确定爆炸荷载作用下爆炸应力波在砂岩介质中传播过程的特点和差异.电测法所得到的应力时程曲线与DIC分析法得到的应变演化规律相互验

证,相互补充,保证该试验所得到的应力波数据是合理的、准确的.验证了该套试验系统在研究爆炸作用下岩石中一维应力波的传播特征及衰减规律方面有一定的可行性。

3)对红砂岩进行爆炸加载时,随加载约束作用的不同,试件表现出明显的破坏差异,具体表现为在相同药量下进行爆炸加载时,约束作用越强,试件爆炸近区的张拉破坏越严重,说明爆炸应力波与爆生气体结合作用时,爆炸加载强度要显著高于爆炸应力波单独作用.另外,随着药量的提高,爆炸应力波参与到爆炸作用的比例提

高,2 g 药量下参与比例由 40%~46%,上升至 61%~70%。

参考文献:

- [1] 付文俊,贾振刚.立井钻爆法施工智能化现状与展望[J].建井技术,2023,44(5):27-30.
FU Wenjun, JIA Zhengang. Present situation and prospect of intelligent construction of shaft drilling and blasting method construction[J]. Mine Construction Technology, 2023, 44(5): 27-30.
- [2] 许爱辉.“六顶三腰”钻爆法在巷道掘进工艺的应用与研究[J].世界有色金属,2021(24):109-111.
XU Aihui. Application and research of the "Six Top and Three Waist" drilling and blasting method in tunnel excavation technology [J]. World Nonferrous Metals, 2021(24): 109-111.
- [3] 杨仁树,王渝,宫国慧,等.弓长岭铁矿巷道掘进掏槽孔超深长度优化试验研究[J].金属矿山,2020(7):16-24.
YANG Renshu, WANG Yu, GONG Guohui, et al. Experimental study on optimization of ultra deep length of excavation holes in Gongchangling iron mine roadway [J]. Metal Mine, 2020(7): 16-24.
- [4] 赵宏伟.我国煤矿岩巷快速掘进技术现状及展望[J].煤炭科学技术,2012,40(1):5-7.
ZHAO Hongwei. Current situation and prospects of rapid excavation technology for coal mine rock tunnels in China [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(1): 5-7.
- [5] 杨国梁,杨博壹,梁光一,等.轴向不耦合装药爆破下页岩的动态应变分布及损伤分形特征[J].工程爆破,2023,29(6):10-15.
YANG Guoliang, YANG Boyi, LIANG Guangyi, et al. Dynamic strain distribution and damage fractal characteristics of shale under axial decoupled charge blasting [J]. Engineering Blasting, 2023, 29(6): 10-15.
- [6] 刘朕,杨仁树,左进京,等.新型双聚能药包裂纹扩展规律及周边控制爆破试验研究[J].中国矿业大学学报,2024,53(6):1171-1184.
LIU Zhen, YANG Renshu, ZUO Jinjing, et al. Experimental study on crack growth law of new dual-charge and peripheral controlled blasting [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(6): 1171-1184.
- [7] 苏洪,龚悦,杨仁树,等.爆炸荷载作用下预裂缝宽度对裂纹扩展的影响[J].中国矿业大学学报,2021,50(3):579-586.
SU Hong, GONG Yue, YANG Renshu, et al. Influence of pre-splitting crack width on crack propagation under blast loading[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 579-586.
- [8] 杨仁树,左进京,李永亮,等.不同切缝管材质下切缝药包爆炸冲击波传播特性研究[J].中国矿业大学学报,2019,48(2):229-235.
YANG Renshu, ZUO Jinjing, LI Yongliang, et al. Experimental study of slotted cartridge explosion shock wave propagation characteristic with different cutting seam pipe material[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(2): 229-235.
- [9] 冷振东,高启栋,卢文波,等.岩石钻孔爆破能量调控理论与应用技术研究进展[J].金属矿山,2023(5):64-76.
LENG Zhendong, GAO Qidong, LU Wenbo, et al. Research progress in theory and technology of energy regulation for rock drilling and blasting [J]. Metal Mine, 2023(5): 64-76.
- [10] 冷振东.岩石爆破中爆炸能量的释放与传输机制[D].武汉:武汉大学,2017.
LENG Zhendong. Explosion energy release and transmission mechanism in rock blasting [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [11] 贝建刚.爆破能量传递规律研究与应用[J].矿业装备,2012(8):42-44.
BEI Jiangan. Research and application of blasting energy transfer law [J]. Mining Equipment, 2012(8): 42-44.
- [12] 曹祺,颜事龙,韩早.岩石爆破中爆炸能量分布规律的研究现状[J].煤矿爆破,2007(4):25-28.
CAO Qi, YAN Shilong, HAN Zao. Status and development of explosive distribution in rock blasting [J]. Coal Mine Blasting, 2007(4): 25-28.
- [13] 龙尧,肖源杰,陈俊桦.基于爆破漏斗试验的单孔爆破损伤范围研究[J].工程爆破,2023,29(6):68-74.
LONG Yao, XIAO Yuanjie, CHEN Junhua. Study on damage zone of single-hole blasting based on blasting funnel test [J]. Engineering Blasting, 2023, 29(6): 68-74.
- [14] 杨仁树,岳中文,董聚才,等.断续节理介质爆生裂纹扩展的动焦散实验研究[J].中国矿业大学学报,2008,37(4):467-472.
YANG Renshu, YUE Zhongwen, DONG Jucui, et al. Experimental study on dynamic caustics of explosive crack propagation in discontinuous jointed media [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(4): 467-472.
- [15] 杨国梁,尚卓,邹泽华,等.冻融循环下砂岩的动

- 态劈裂特性与应变演变机理[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(2): 199-208.
- YANG Guoliang, SHANG Zhuo, ZOU Zehua, et al. Study on dynamic splitting and evolution mechanism of sandstone under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(2): 199-208.
- [16] 杨仁树, 苏洪. 基于动态焦散线实验的护壁药包机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(3): 467-473.
- YANG Renshu, SU Hong. The mechanism of wall-protecting explosion based on dynamic caustic test[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(3): 467-473.
- [17] 冷振东, 赵明生, 卢文波, 等. 基于非理想爆轰的炸药-岩石相互作用过程[J]. 工程爆破, 2018, 24(6): 1-9.
- LENG Zhendong, ZHAO Mingsheng, LU Wenbo, et al. Explosive-rock interactions based on non-ideal detonation[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(6): 1-9.
- [18] 周洪强, 于明, 孙海权, 等. 炸药爆轰的连续介质本构模型和数值计算方法[J]. 物理学报, 2014, 63(22): 247-251.
- ZHOU Hongqiang, YU Ming, SUN Haiquan, et al. A continuum constitutive model and computational method of explosive detonation[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(22): 247-251.
- [19] 杨仁树, 丁晨曦, 王雁冰, 等. 爆炸应力波与爆生气体对被爆介质作用效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增2): 3501-3506.
- YANG Renshu, DING Chenxi, WANG Yanbing, et al. Study on the effect of explosive stress waves and explosive gas on the explosive medium[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup 2): 3501-3506.
- [20] 王家来, 程玉生. 爆生气体作用过程的模拟试验研究[J]. 爆破, 1998, 15(2): 5-9.
- WANG Jialai, CHENG Yusheng. Simulating test on the working process of explosion gases[J]. Blasting, 1998, 15(2): 5-9.
- [21] 王礼立, 王永刚. 应力波在用 SHPB 研究材料动态本构特性中的重要作用[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(1): 17-25.
- WANG Lili, WANG Yonggang. The important role of stress waves in studying the dynamic constitutive properties of materials using SHPB[J]. Explosion and Shock, 2005, 25(1): 17-25.
- [22] 吕亚洲, 曾晟. 基于 SHPB 试验的岩石应变率效应分析[J]. 黄金, 2019, 40(6): 40-42.
- LYU Yazhou, ZENG Sheng. Strain rate effect analysis of rock based on SHPB test[J]. Gold, 2019, 40(6): 40-42.
- [23] 向达, 王志华, 王根伟. 混凝土动态劈裂试验中的惯性效应研究[J]. 太原理工大学学报, 2017, 48(2): 237-242.
- XIANG Da, WANG Zhihua, WANG Genwei. Investigation on inertia effect in the dynamic splitting test of concrete[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017, 48(2): 237-242.
- [24] 孟庆彬, 韩立军, 浦海, 等. 尺寸效应和应变速率对岩石力学特性影响的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(2): 233-243.
- MENG Qingbin, HAN Lijun, PU Hai, et al. Effect of the size and strain rate on the mechanical behavior of rock specimens[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(2): 233-243.
- [25] 滕振超. 圣维南原理的有限元模拟[J]. 价值工程, 2018, 37(24): 188-190.
- TENG Zhenchao. Finite element simulation of saint-venant's principles[J]. Value Engineering, 2018, 37(24): 188-190.
- [26] PAN C, XIE L X, LI X, et al. Numerical investigation of effect of eccentric decoupled charge structure on blasting-induced rock damage[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(2): 663-679.

(责任编辑 沈春妮 全腾)