

基于DIC方法下板岩动态巴西劈裂试验的变形破坏研究

许涛¹, 刘运思²

¹湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

²岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室, 湖南 湘潭

收稿日期: 2024年6月10日; 录用日期: 2024年6月30日; 发布日期: 2024年7月11日

摘要

巴西劈裂法是国际上用以测试岩石抗拉强度最广泛的方法, 其优点在于成本低廉, 方法简单, 测试环境要求低, 近年来有不少学者利用SHPB装置测试动态岩体的抗拉强度, 但对于此方法下影响岩石动态抗拉强度准确度的因素并不清楚。本文利用SHPB装置进行了层状板岩的动态巴西劈裂试验, 并借助高速摄影仪和数字图像相关技术(DIC)分析了动态测试下板岩的破坏形态和微应变分布云图, 发现层理角度不同, 试样内部的微应变分布也会发生改变, 而层理角度为75°时岩石的破坏模式从拉伸破坏变为剪切破坏模式。这表明动态巴西劈裂测试方法对于层状岩体的抗拉强度精度影响较大, 当岩石的破坏模式发生改变时, 既不满足中心起裂准则, 也不满足拉伸破坏原则, 此时测试精度误差最大。

关键词

巴西劈裂, SHPB, 层理角度, 破坏模式, DIC

Damage Study of Dynamic Brazilian Splitting Test in Slate Based on DIC Methodology

Tao Xu¹, Yunsi Liu²

¹School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

²Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering Stability Control and Health Monitoring, Xiangtan Hunan

Received: Jun. 10th, 2024; accepted: Jun. 30th, 2024; published: Jul. 11th, 2024

Abstract

The Brazilian splitting method is the most widely used method to test the tensile strength of rocks

文章引用: 许涛, 刘运思. 基于 DIC 方法下板岩动态巴西劈裂试验的变形破坏研究[J]. 土木工程, 2024, 13(7): 1133-1142. DOI: 10.12677/hjce.2024.137122

in the international arena, and its advantages include low cost, simple method, and low requirement of testing environment, etc. In recent years, a number of scholars have utilized the SHPB device to test the tensile strength of dynamic rock bodies, but the factors affecting the accuracy of the dynamic tensile strength of rocks under this method are not clear. In this paper, the dynamic Brazilian splitting test of laminated slate was carried out using the SHPB device, and the damage pattern and microstrain distribution cloud map of the slate under the dynamic test were analyzed with the help of high-speed camera and digital image correlation (DIC), and it was found that the microstrain distribution inside the specimen would change with different angles of the laminae, and the damage mode of the rock at the laminae angle of 75° was changed from the tensile damage to the shear damage mode. This indicates that the dynamic Brazilian splitting test method has a greater impact on the accuracy of the tensile strength of the laminated rock body, and when the damage mode of the rock is changed, it does not satisfy either the center initiation criterion or the tensile damage principle, and the testing accuracy error is the largest at this time.

Keywords

Brazilian Splitting, SHPB, Stratigraphic Angle, Damage Pattern, Digital Image Correlation Techniques

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

层状岩体在自然界分布广泛,其构造具有沉积岩[1]-[3]的特征,在力学性能上表现为各向异性,明显区别于普通岩石材质。国际上通常采用巴西劈裂实验法[4]-[6]测试岩石的静态抗拉强度,巴西劈裂实验法优点在于成本低廉操作简单,近年来国内学者使用分离式霍普金森压杆系统(SHPB)对不同材质的岩石进行了动态巴西劈裂试验用以测试岩石的动态抗拉强度,对于层状岩体来说,不同破坏模式条件所测试出的动态岩石抗拉强度具有明显层差异,因此开展不同层理角度下板岩的动态巴西劈裂试验的破坏模式研究具有重要意义。

宫凤强等[7]提出了一种基于微积分原理下,通过对试样中心的拉应变积分,推导得出一种巴西劈裂试验中拉伸模量的解析算法,对于不同种类的岩石材料来说,利用动态巴西劈裂测试的抗拉强度往往高于动态直接拉伸强度,因此许多学者对利用动态巴西劈裂测试法确定的拉伸强度作为岩石材料动态拉伸强度的有效性提出了质疑。张少华等[8]分别使用了三种不同的试验测试方法,并对多种岩石进行了抗拉强度测试,结果发现方法不同,测定的岩石抗拉强度相差较大;喻勇[9]认为巴西圆盘试验拉伸强度公式实际是二维平面方程的弹性解,而在实际情况中进行巴西圆盘测试时还应考虑试样高径比和材料的泊松比等因素;张盛等[10]考虑到了圆盘厚度对巴西劈裂测试准确度的影响,通过有限元分析了不同厚度圆盘的起裂位置。综合以上研究表明,目前使用动态巴西圆盘法测试岩石的拉伸强度仍存在一定误差,对于层状岩体的动态巴西测试拉伸强度的研究还存在一定的不足,研究不同层理角度下板岩动态巴西劈裂试验的破坏模式可以分析圆盘的起裂过程,从而探究动态巴西圆盘测试的拉伸强度准确度,并为实际岩土相关工程提供理论参考。近年来随着计算机技术的进步,数字图像相关技术(DIC)被引入材料力学研究中,研究者通过岩石或混凝土材料破坏过程中计算机分析图像分析来探究应力波传递过程和试样破坏过程。孙文进等[11]通过 DIC 技术记录了高温下砂岩的劈裂过程中应变场的演化过程,DIC 结果表明温度为 800°

时为砂岩抗拉劣化的温度临界值, 超过这一温度后砂岩内部裂隙扩展速率激增。陈徐东等[12]利用 DIC 技术对冲击劈拉荷载作用下 UHPC 的破坏过程进行了一系列的研究, 着重讨论了 UHPC 应变率与试样的耗散能、动态抗拉强度及动态弹性模量的关系。

本文通过利用分离式霍普金森压杆系统(SHPB), 对 7 种层理角度下的炭质板岩进行了动态巴西测试, 并借助高速摄像机拍摄圆盘的破坏过程, 利用数字图像相关技术(DIC)分析圆盘的微应变云图, 最后对两者的图像进行了比对分析, 探讨了圆盘的破裂过程和破坏模式的差异。

2. SHPB 层状岩体冲击试验

2.1. SHPB 试验方案

试验装置主要由常规分离式 SHPB 压杆装置和示波器组成, 分离式 SHPB 压杆装置由发射腔、冲头、入射杆、透射杆、能量吸收杆和数据采集系统组成, 入射杆和透射杆均采用直径为 50 mm 的高强度钢, 如图 1 所示。试验所需板岩原材料均取自于湖南怀化山区。岩样制备过程是将 50 mm 的钻头平行于层理方向岩块钻进取样, 岩柱取出后然后再切割成厚度为 25 mm 的标准试件。如图 2 所示, 试件标准尺寸为直径 50 mm, 厚度为 25 mm。试件直径误差控制在 ± 1 mm, 厚度误差不超过 ± 0.25 mm, 表面平整度控制在 $\pm 0.25^\circ$ 。

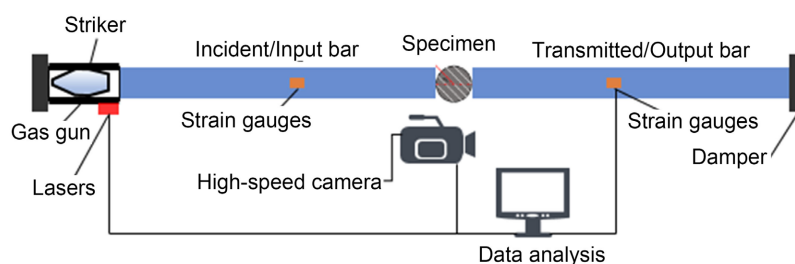


Figure 1. SHPB system Brazil splitting schematic

图 1. 分离式霍普金森压杆系统

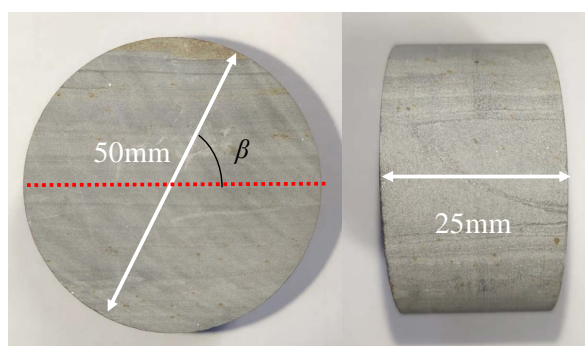


Figure 2. Schematic diagram of slate specimen

图 2. 板岩试样示意图

动态巴西劈裂试验使用分离式霍普金森杆对层理角度为 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° 和 90° 的层状板岩构件展开测试, 如图 2 所示。在入射杆和透射杆上粘贴应变片, 距离试样距离大概 1 m。将应变片与采集仪连接后先进行空冲, 输出波形满足应力平衡后才可进行试样加载。测试开始前需要先用量角器等工具绘制出层理面加载角度。为使试块与两杆之间保持稳定, 加载前需在试件及杆端均匀涂抹凡士林。实验中通过控制层理角度, 分别改变罐内气压大小进行动态拉伸试验, 同时利用高速摄影机辅助拍摄,

观察试件的破坏情况。

2.2. 试验原理及方法

在一维应力波传播条件下, 在入射杆和透射杆上安装应变片, 测量应力波的应变信号。采用三波法计算加载过程中层状板岩的应变速率, 根据应力均匀性假设, 应力波在短时间内达到径向均匀性。根据能量守恒定律, 岩体的吸收能等于入射能减去透射能与反射能之和。因此, 根据三波理论, 试件的应力 $\sigma(t)$ 、应变 $\varepsilon(t)$ 和应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$ 可由下式计算:

$$\sigma(t) = \frac{E_0 A_0}{2A_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C_0}{l_s} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_0}{l_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \quad (3)$$

式中: ε 为应变值, 其中下标 i , r 和 t 分别代表入射信号, 反射信号和透射信号; E_0 为杆子的弹性模量; A_0 为杆子的横截面; C_0 为杆子的弹性波速; A_s 为试件的横截面; l_s 为试件的长度; t 为弹性波持续时间。

杆子的波速 C_0 计算如下式:

$$C_0 = \sqrt{E_0 / \rho_0} \quad (4)$$

式中: ρ_0 为杆子的密度。根据一维弹性波理论, 可得到 1, 2 接触端荷载与时间的关系:

$$P_1(t) = EA_e [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] \quad (5)$$

$$P_2(t) = EA_e \varepsilon_t(t) \quad (6)$$

两杆端平均荷载 $P(t)$ 为

$$P(t) = \frac{P_1(t) + P_2(t)}{2} = EA_e \frac{\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)}{dx} \quad (7)$$

根据应力平衡假设, 当试样两端应力平衡时:

$$\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_t(t) \quad (8)$$

将式(7)代入(5)和(6)中, 我们可以得到

$$P(t) = EA_e \varepsilon_t(t) \quad (9)$$

式中, P_1 和 P_2 分别代表岩石试样和入射杆和透射杆界面处的加载力; ε_i , ε_r , ε_t 分别表示入射, 反射和透射应变波, 由粘贴在入射杆和透射杆上的应变片监测; E 代表杆子的杨氏模量; L 为岩样长度; A 为杆的截面面积

根据静态巴西劈裂原理, 试样的抗拉强度表示为:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (10)$$

式中, P 为破坏时的荷载, D 为试件直径, t 为试件厚度。但由于动态巴西劈裂测试下试件开裂一般不会中心起裂, 因此通过结合式(6)和式(7)可得动态巴西劈裂的抗拉强度:

$$\sigma_t = \frac{2P(t)_{\max}}{\pi DL} = \frac{2EA_e \varepsilon_t(t)_{\max}}{\pi DL} \quad (11)$$

2.3. 应力波形图

图 3 显示了试验过程中应变片测量到的应力波形的电信号随时间的变化, 可以发现入射波和透射波均为负电信号的压缩波, 反射波为正电信号的[13], 由于波阻抗差异, 透射波峰值一般来说远小于入射波峰值。

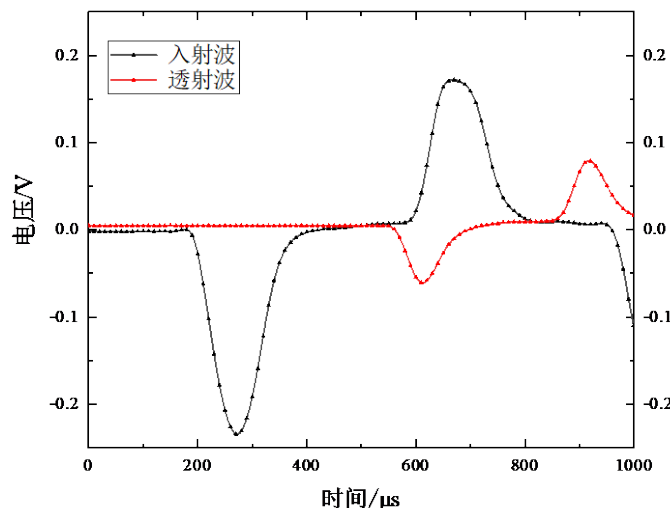


Figure 3. Stress waveform curve

图 3. 应力波形曲线

2.4. 应力平衡

岩石试件两端能否实现应力平衡, 即入射波与反射波之和与透射波趋势是否相同, 决定了这组试件是否成功。图 4(a)是一组试样的应力波形图, 其中入射波 + 反射波趋势基本与透射波一致, 说明此时试样两端的应力是平衡状态。图 4(b)是一组失败的试件, 可以发现入射波+反射波趋势与透射波存在明显误差。

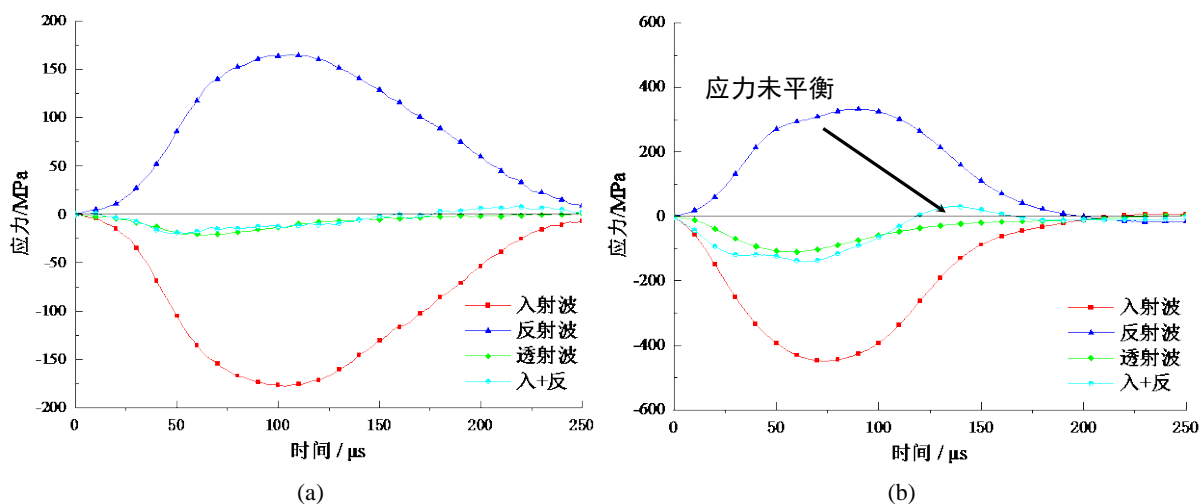


Figure 4. Stress balance diagram

图 4. 应力平衡图

2.5. 层理角度

自然界中沉积岩分布广泛, 岩石在长期的地质运动中形成了特殊的如层理、片理、天然裂隙等结构,

导致其力学上具有明显的横观各向同性, 研究表明应力作用于沉积岩体时, 应力方向与层理面之间角度的差异是影响岩石整体受力性能的一个重要因素。如图 5 所示, 本试验将炭质板岩层理面与动载加载方向之间的夹角设置为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 总计 7 种角度, 通过比较不同角度下板岩的变形破坏特征分析层状板岩的力学特性和破坏模式。

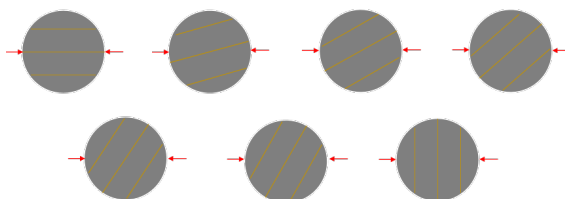


Figure 5. Schematic diagram of loading angle
图 5. 加载角度示意图

3. 板岩破坏模式分析

3.1. 高速摄影下板岩的变形破坏分析

采用相同的气压来推动子弹撞击入射杆, 并利用高速摄影仪拍摄岩石破坏瞬间的图片, 所得图像如图 6 所示, 可以发现不同层理倾角下岩石的破坏模式不同: 当板岩层理角度 $\theta = 0^\circ$ 时, 板岩的基本只有一条贯穿的中心裂纹, 方向沿层理面; 当板岩倾角 $\theta = 15^\circ$ 时, 板岩此时有两条主要贯通裂纹, 方向沿层理面发展; 当板岩倾角 $\theta = 30^\circ$ 时, 板岩此时有一条主要贯通裂纹, 但端部的次生裂纹发展方向仍受层理面影响较大; 当板岩倾角 $\theta = 45^\circ$ 时, 板岩此时有两条主要贯通裂纹, 但两条裂纹都是由右侧端部发展而来, 但在自然裂隙较多处开始分化; 当板岩倾角 $\theta = 60^\circ$ 时, 板岩此时有一条主要贯通裂纹, 但还有多条扩展明显的次生裂纹, 此时圆盘的形态进一步破碎; 当板岩倾角 $\theta = 75^\circ$ 时, 板岩此时有两条平行裂纹, 裂纹并不贯通, 从端部发展后沿呈 75° 快速扩展后试样破坏, 圆盘形态较为完整; 当板岩倾角 $\theta = 90^\circ$ 时, 此时板岩有一条贯通裂纹, 垂直于层理面, 并且次生裂纹数量较多, 破坏形态较为碎散。

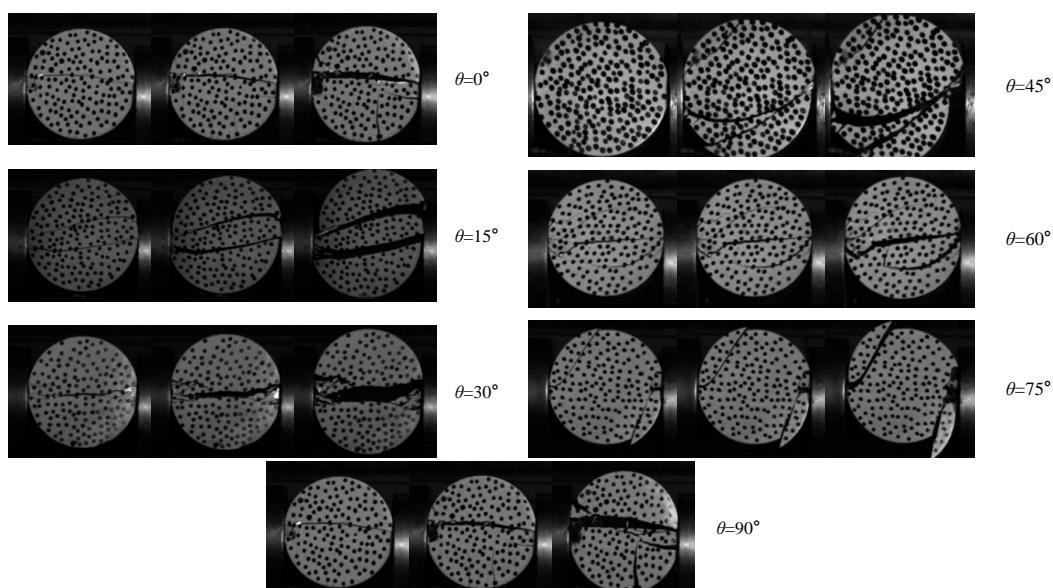


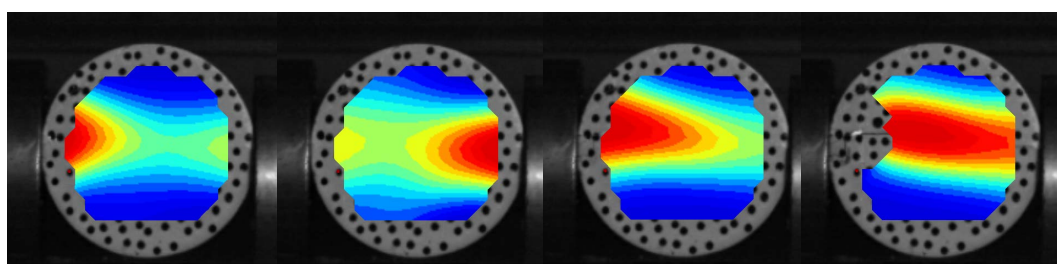
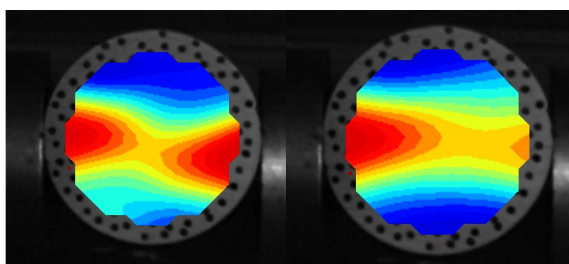
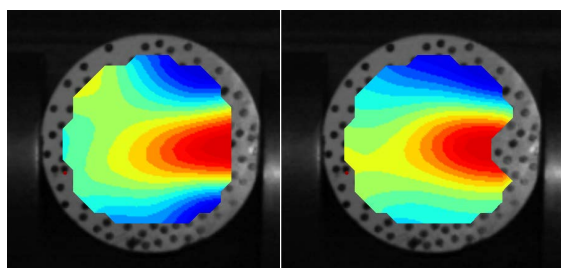
Figure 6. Instantaneous destruction of slate under high-speed photography
图 6. 高速摄影下板岩瞬间破坏图

3.2. 基于 DIC 技术下的板岩微应变分析

数字图像相关技术又称数字散斑相关法, 是一种二维至三维, 无接触测量任何材料的位移、震动和应变的光学测试系统。DIC 测试流程和原理主要如下: 首先拍摄试样变形前后的两幅数字图像, 通过计算机和相关程序计算获得所需区域的应变信息。其基本原理是先对变形前图像中所需区域进行网格划分, 通过喷涂上的散斑点来确定子区域。对每个子区域, 计算机程序通过试样变形前后散斑点所在区域的位置可计算所有子区域, 最终得到试样破坏前所需区域的微应变场信息。该方法对静态和准静态测试的材料精度较高, 且对于试验场地要求较低, 借助高速摄影仪也可对高应变率下材料的破坏变形过程进行分析。

此次试验借助高速摄影仪拍摄到的试样破坏前的图片, 使用 DIC 技术分析得到不同层理角度下板岩破坏瞬间的内部应变云图。根据图 7(a)所示, 当层理倾角 $\theta = 0^\circ$ 时, 可以明显看出动态荷载下应力波的传递具有不平衡性, 最开始板岩的左侧应变较大, 随着应力波的传递, 大应变移动至右侧, 经过若干次传递后, 板岩左侧应力首先达到抗拉强度, 随后裂纹从端部延伸向右边侧延伸并导致试样整体破坏; 根据图 7(b)中层理角度 $\theta = 15^\circ$ 时的圆盘微应变分布可以看出层理角度对于动载下板岩的应力分布具有重构影响;

可以发现不同层理角度下的板岩微应变分布并不完全相同, 但微应变变化趋势仍然受应力波传递方向影响较大。观察图 7(f)当层理倾角 $\theta = 75^\circ$ 时, 此时圆盘的应变分布明显区别于其他角度, 圆盘的端部沿两侧呈 75° 延伸, 板岩在此角度下的破坏模式发生明显转变, 结合图 7 中层理倾角 $\theta = 75^\circ$ 时板岩的破坏面可以得知此时破裂端口光滑, 并无其他次生裂纹出现, 圆盘此时的破坏模式为剪切破坏。

(a) $\theta = 0^\circ$ (b) $\theta = 15^\circ$ (c) $\theta = 30^\circ$

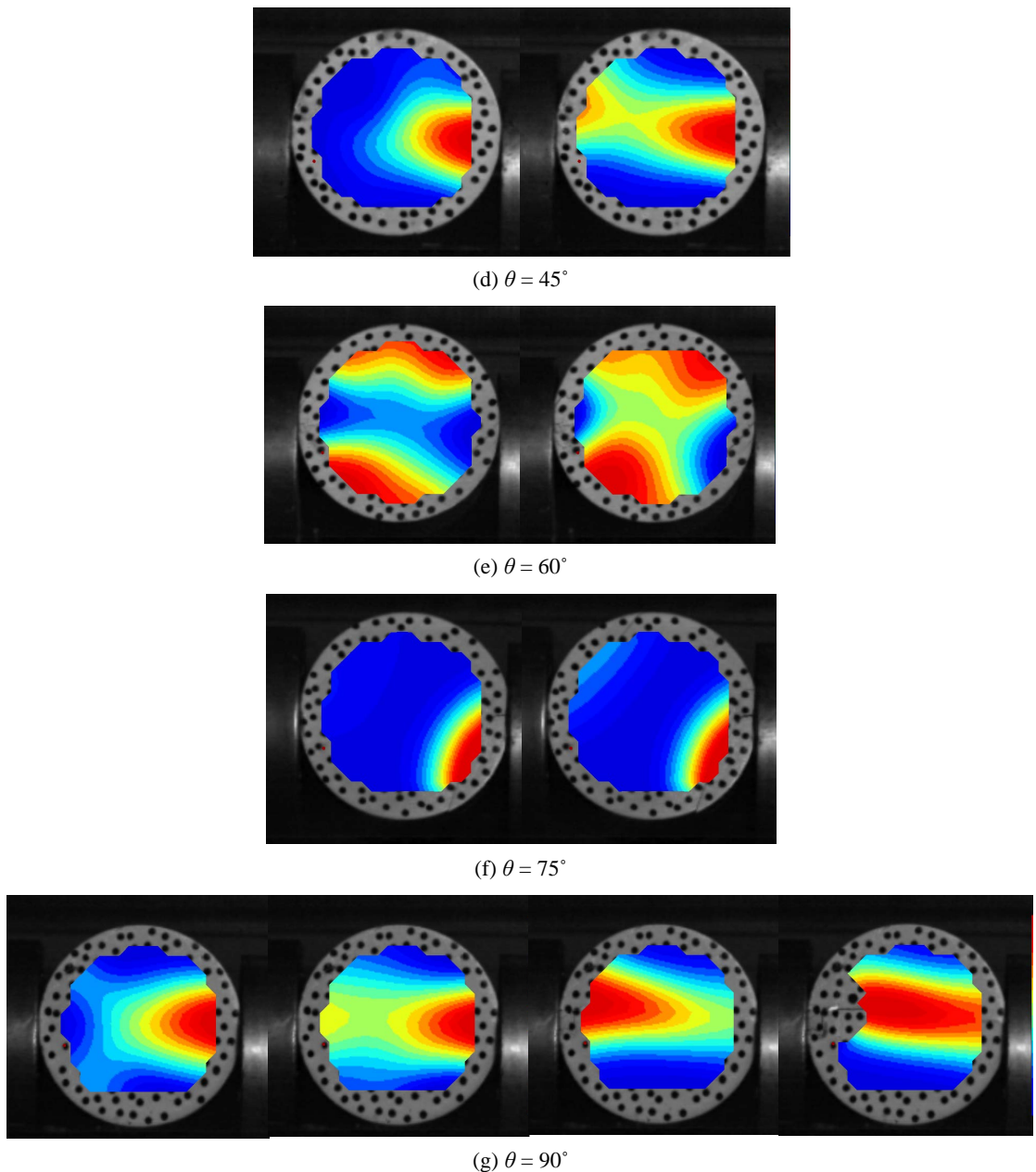


Figure 7. Microstrain analysis of slate at different lamination angles
图 7. 不同层理角度下板岩的微应变分析

观察图 7(g)可知,当板岩的层理倾角 $\theta = 90^\circ$ 时,圆盘破坏时微应变云图与层理倾角 $\theta = 0^\circ$ 时较为类似,但相较于 $\theta = 0^\circ$ 时,层理倾角 $\theta = 90^\circ$ 时板岩微应变分布更均匀,根据图 6 摄影仪拍摄图片中可以得知此时的板岩由于加载方向垂直层理面,导致次生的拉伸裂纹相较 $\theta = 0^\circ$ 时发育更多,这也导致圆盘的微应变分布并不完全按照层理面走向分布。

3.3. 试验误差分析

由于试验中采用的岩石内部材质分布并不均匀且具有随机分布的天然杂质和裂隙等影响,导致其在同一气压下的应变率和破坏形态具有显著差异,如图 8 所示,设置入射气压为 0.4 MPa,层理角度 $\theta = 75^\circ$

时板岩圆盘的破坏形态存在明显差异; 另一原因可能由于子弹发射前试样虽然固定在两杆之间, 但子弹发射后应力波还未传递至岩石时试样便与两杆错位, 导致其加载方向出现偏移。

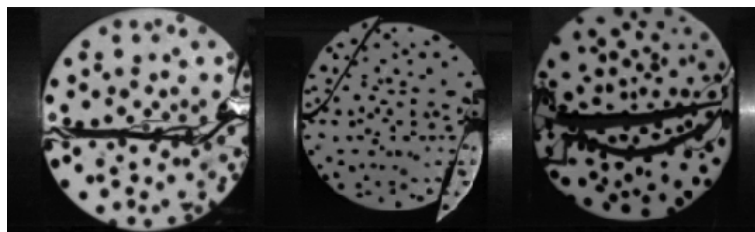


Figure 8. Slate damage pattern at 0.4 MPa air pressure and $\theta = 75^\circ$

图 8. 气压为 0.4 MPa, $\theta = 75^\circ$ 时板岩破坏形态图

3.4. DIC 技术的讨论

通过对实际高应变率下层状板岩破坏过程的 DIC 研究, 可以认为 DIC 技术在研究材料高应变率下的变形破坏过程具有独特优势, 其优势在于可清晰反映出材料内部微应变的变化规律, 为研究应力波传递和材料的性能提供有效的合理数据, 但由于 DIC 技术本质是对试验变化过程中每张图片上的子点进行位移分析, 这对于图片的清晰度和摄影仪的帧率都具有很高的要求, 而图片数量过多也对计算机的算力提出了更为严苛的要求, 这导致 DIC 技术在研究高应变率试验材料时成本较高, 操作难度较大。

4. 结论

通过 SHPB 系统对层状板岩进行动态巴西劈裂试验, 并借助高速摄影仪和 DIC 技术对板岩的破坏模式进行了研究分析, 介绍了板岩的动态巴西劈裂试验方案和过程以及 SHPB 的试验原理, 通过比对高速摄影图片和 DIC 分析的应变云图, 主要得出以下结论:

1) 动态巴西劈裂测试对于层状岩体所测得的抗拉强度受层理角度 θ 影响较大, 层理倾角 θ 使得板岩内部应力发生了重分布, 使得不同层理角度下板岩的破坏模式发生改变, 从而影响测试准确度。

2) 动态荷载下层理角度 $\theta = 75^\circ$ 时板岩的破坏模式发生改变, 破坏端面光滑且破坏形态较完整, 试件无贯穿裂纹, 此时岩石破坏是由层理面的剪切破坏引起的。

3) 通过研究不同层理倾角下板岩的动态拉伸试验, 可以发现含层理面的岩石材料在传统动态测试拉伸强度时具有一定误差, 试验前可通过数字图像技术(DIC)进行应变云观测分析, 通过确定破坏模式和开裂过程判断测试方法的有效性。

4) DIC 技术对研究高应变率下材料的变形破坏具有一定的优势, 但成本较高且操作难度相较于静态或准静态试验偏高, 其图像处理效果与图片质量和计算机性能有关。

参考文献

- [1] 姚嘉玮. 沉积岩层的原生构造及其特点研究[J]. 有色金属工程, 2024, 14(4): 189.
- [2] 何满潮, 彭涛, 王瑛. 软岩沉积特征及其力学效应[J]. 水文地质工程地质, 1996(2): 37-39, 43.
- [3] 孟召平, 潘结南, 刘亮亮, 等. 含水量对沉积岩力学性质及其冲击倾向性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 2637-2643.
- [4] 刘克, 杜洁. 巴西圆盘劈裂应变解[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(8): 55-59.
- [5] 赵文博, 邓丽梅, 赵大凯, 等. 高应变率下花岗岩动态力学性能试验及数值模拟研究[J]. 爆破, 2022, 39(3): 10-15.
- [6] 任义, 高永涛, 吴顺川, 等. 花岗岩巴西劈裂试验的矩张量反演研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 235-245.

- [7] 宫凤强, 李夕兵. 巴西圆盘劈裂试验中拉伸模量的解析算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 881-891.
- [8] 张少华, 缪协兴, 赵海云. 试验方法对岩石抗拉强度测定的影响[J]. 中国矿业大学学报, 1999(3): 43-46.
- [9] 喻勇. 质疑岩石巴西圆盘拉伸强度试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(7): 1150-1157.
- [10] 张盛, 梁亚磊, 李大伟. 圆盘厚度对岩石抗拉强度公式的影响性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 450-454.
- [11] 孙文进, 金爱兵, 王树亮, 等. 基于 DIC 的高温砂岩劈裂力学特性研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 511-518.
- [12] 陈徐东, 王许阳, 季韬, 等. 基于 DIC 的冲击劈拉荷载作用下 UHPC 动态抗拉力学性能研究[J/OL]. 工程科学与技术: 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20240531.0902.006.html>, 2024-07-09.
- [13] 周子龙, 李夕兵, 岩小明. 岩石 SHPB 测试中试样恒应变率变形的加载条件[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2445-2452.