

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.1124

辉绿岩单轴压缩过程变形场的 DIC 监测与模拟

冯慧坤¹, 吕原君^{1*}, 罗战友¹, 刘广建²

(1. 宁波大学 岩石力学研究所, 浙江 宁波 315211; 2. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 作为贮备丰富和应用广泛的辉绿岩, 其内在的力学特性及破坏模式影响着辉绿岩矿的开采和使用安全. 以辉绿岩标准试样为研究对象, 利用万能试验机和三维全场应变测量系统获取其单轴压缩过程的力学参数, 通过数字图像相关技术(Digital Image Correlation, DIC)获取试样测试过程的位移和应变, 利用颗粒流分析软件(Particle Flow Code, PFC)建立基于试验参数的二维模型, 给出应变场获取方法并实施单轴压缩模拟试验. 结果表明: DIC 技术能反映出试样表面压缩断裂过程的位移场及应变场, 但试样表面颗粒跌落后存在无法监测的缺陷; PFC 可以模拟全过程的应变场, 且试样起裂位置及裂纹扩展路径与 DIC 监测结果匹配, 但应变场测量精度受到测量圆、布局方式等参数设置的影响. DIC 监测技术和数值分析技术的有效结合能更好揭示试样破坏过程的应变演化规律, 研究成果可为岩石试样破坏的应变演化提供参考.

关键词: 辉绿岩; 单轴压缩; 数字图像相关技术; 数值分析; 应变场

中图分类号: TU458+.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 05-0027-08

辉绿岩是一种常见的基性浅成岩体, 岩性致密坚硬, 抗风化能力较强, 应用场景广泛^[1]. 然而, 不同地区及不同地层的辉绿岩力学特性存在较大差异, 因此获取辉绿岩破坏机理及力学特性对辉绿岩的矿山开采、灾害防治和应用有着重要意义. 目前, 一些学者开展了辉绿岩单轴压缩条件下的变形及破坏特性研究. 比如沈君等^[2]分析了辉绿岩强度和变形特性; 梁冰等^[3]测试了辉绿岩单轴压缩蠕变特性; 苗圣军等^[4]获得了辉绿岩的能量演化过程与破坏机制; Vaisberg 等^[5]研究了单轴压缩加载速率对辉绿岩孔隙空间结构的影响; 王强等^[6]研究了含不同弱面辉绿岩试样的强度特性及破坏模式; Petrov 等^[7]测得高应变速率下辉绿岩的强度和变形特性. 由当前研究成果可知, 对辉绿岩力学性能的研究以试验分析为主, 未涉及单轴压缩条件下的表面变形场监测分析, 也未涉及破坏过程中应变演化机理的数值模拟分析. 随着科技的发展, 一些新的测试工具和数值分析软件已被应用于岩石的

力学研究. 比如 DIC 技术通过跟踪物体表面的散斑图案并计算散斑域灰度值以得到物体表面变形数据, 一些学者^[8-9]使用该技术获得了岩石在加载条件下的表面变形场; PFC 模拟技术擅长岩土体等不连续、非均质介质的计算, 同样有学者^[10-11]利用该技术获得了岩石的力学特征.

在开展辉绿岩单轴压缩试验时, 本文引入 DIC 技术获取辉绿岩压缩破坏过程的表面位移及应变, 利用 PFC 数值模拟技术获取全过程的应变演化, 同时分析了两种技术的差异性, 并给出了模拟技术优化方案, 以期能为岩石破坏过程的应变演化分析提供技术参考.

1 单轴压缩试验 DIC 技术应用与结果分析

试验辉绿岩试样选自福建省古田县衫洋镇的辉绿岩矿. 按照国际岩石力学学会试验方法, 试样预制成高度为 100 mm, 直径为 50 mm 的圆柱体标准尺寸(图 1(a)), 试验设备采用微机控制电液伺服

收稿日期: 2023-11-17.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(42277147); 宁波市自然科学基金(2023J085).

第一作者: 冯慧坤, 硕士研究生, 主要研究方向: 岩石断裂力学. E-mail: f577941553@163.com

*通信作者: 吕原君, 副研究员, 主要研究方向: 岩石力学及相关试验仪器开发. E-mail: lvyuanjun222@163.com

万能试验机(图 2)。本次试验采用控制位移的加载方式,加载速率设置为 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,采用三维全场应变测量系统^[12]对喷涂散斑(图 1(b))的试样获取表面位移场和变形场,需要注意的是散斑制作、相机标定、光源设置等因素都会对 DIC 的监测精度产生影响。

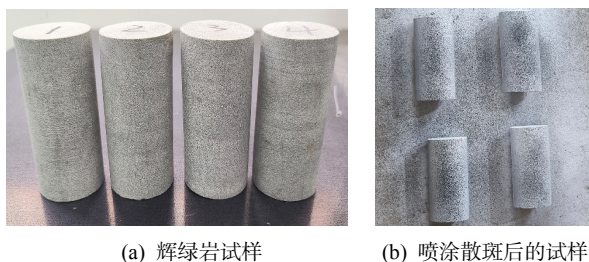


图 1 辉绿岩试样制备

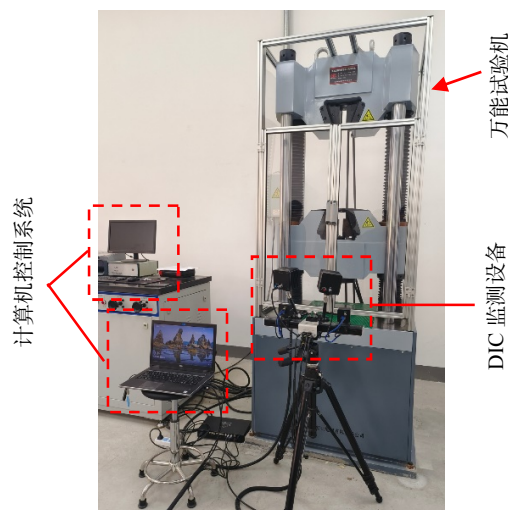


图 2 试验设备

位移场能描述物体在受力作用下的变形情况,而岩样表面位移场变化过程可反映破坏面的变形演化规律和破坏特征,能够清晰呈现试件裂纹的起裂位置和扩展规律。试样表面垂向位移场的演变过程如图 3 所示,其中,图 3(a)为 4%峰值应力处,图 3(b)为 20%峰值应力处,图 3(c)为 90%峰值应力处,图 3(d)~(f)分别为峰值应力后期的裂纹起裂、裂纹扩展及试样破坏瞬间。由图 3(a)可知,辉绿岩试样中部的各观测点位移值较小,而两端位移值较大。在试样不断被压密过程中,各观测点的位移值由两端向中间处逐渐增加(图 3(b)),呈现较为明显的上下条状分布区域,且试样左侧观测点区域位移值小于右侧。在达到峰值应力前,除试样左上角的观测点位移值较小外,其他区域各观测点位

移值相差很小(图 3(c))。当达到峰值应力时,位移值较大区域位于试样底部(图 3(d))。随着应力不断下降,试样表面产生裂纹并扩展。需要注意的是,试样开裂部位从试样上端位移值较小区域贯穿到底部位移值较大区域。此后,辉绿岩试样形成一条垂向分割线,开裂后,裂纹左右两侧各观测点的位移值分布有较为明显差异,即试样两端是位移较大区域,最大位移值达到 0.835 mm (图 3(e))。最后,在试样产生裂纹的中部出现小碎块跌落,散斑点处出现了一段黑色区域(图 3(f)),此时位移最大值和最小值分别位于试样上端靠近裂纹起裂处的两侧。

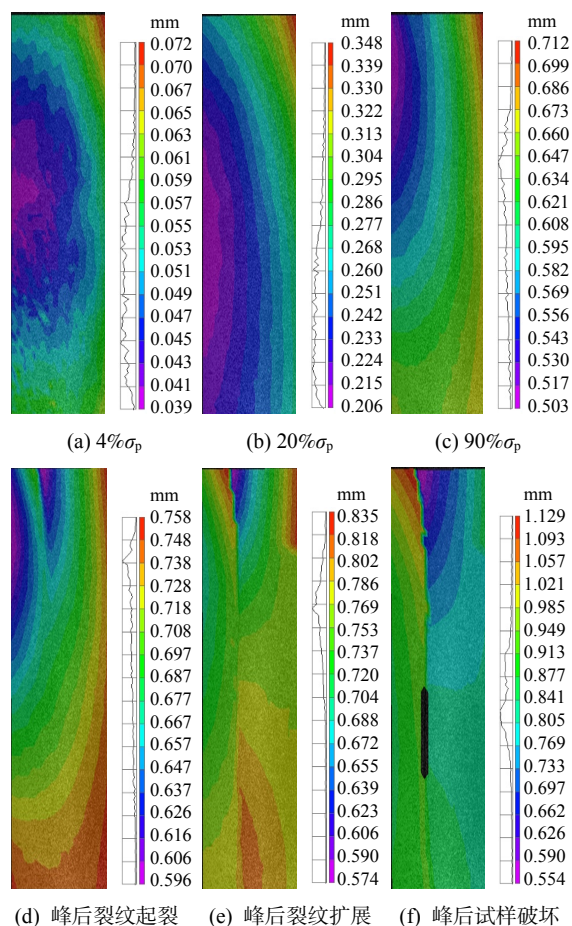


图 3 DIC 监测试样单轴压缩时的位移场演变

需注意的是试样从开始测试到裂纹起裂阶段,试样右侧区域的位移值相比左侧较大(图 3(a)~(d)),可能是试样加载面存在高度差引起的。而当试样从裂纹扩展到表面破坏时(图 3(e)和(f)),试样上部裂纹的左侧位置成为主要承压区域,原因可能是右侧位置发生较大位移而造成局部破坏。

应变场可描述物体在受力作用下发生的应变, 岩样表面的应变场反映了破坏过程中内部损伤演化状态下体现出的应变在边界上的变化情况. DIC 技术监测的试样表面应变场变化如图 4 所示, 其中, 图 4(a)~(f)的应变场与图 3(a)~(f)的位移场时间同步. 由图 4(a)和(b)可知, 在加载的初始阶段($20\%\sigma_p$ 内), 试样表面各观测点的应变分布不均匀. 当荷载达到 $90\%\sigma_p$ 时, 各观测点应变分布不均匀现象有明显减少的趋势(图 4(c)), 此时在试样顶部出现应变明显增大区域. 由图 4(d)和(e)可知, 当达到最大荷载峰值后, 应变值最大值所在区域产生裂纹并向试样底部扩展, 而裂纹扩展之外的区域应变值仍然较小. 最后, 试样表面形成一条贯穿裂纹(图 4(f)). 由此可知, 试样产生裂纹的位置与应变集中的发育路径一致, 即应变场演化揭示了试样裂纹起裂与扩展过程.

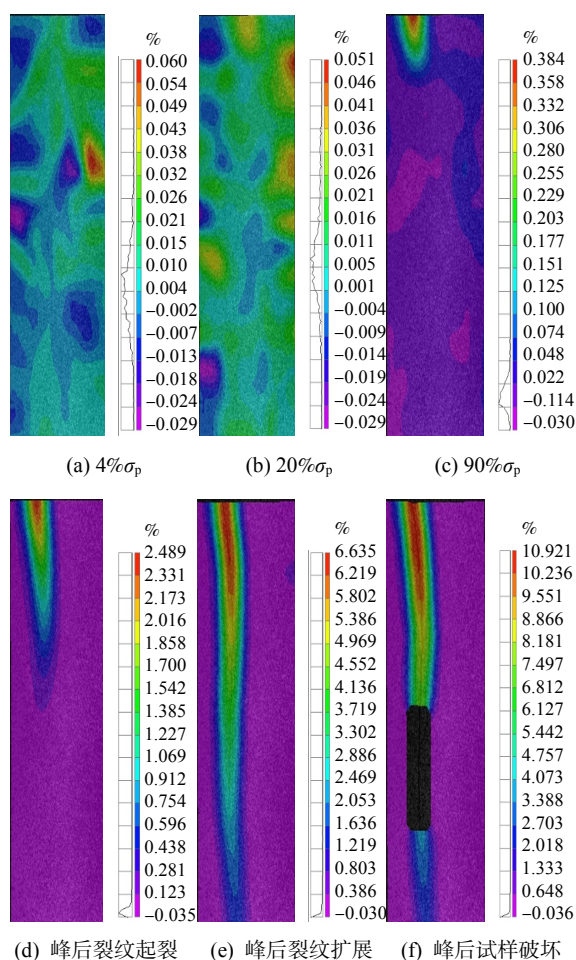


图 4 单轴压缩 DIC 应变场

需要注意的是, DIC 技术获取的变形场主要依

靠试样表面的散斑, 但是在荷载峰值后的破坏阶段往往会伴随着试样表面颗粒剥落的现象, 这将会使依附在表面的散斑点局部丢失, 并随着裂纹的扩展和张开, 计算网格断开也会逐渐丢失, 导致试样表面应变场色块丢失^[13], 从而无法继续观测应变场(图 5). 由于应力峰值后阶段是裂纹扩展并形成主破坏面的过程, 也是应变集中区域快速发展的阶段^[9], 该阶段应变场的失效对试样失稳破坏过程的研究产生极大影响, 这也是 DIC 技术存在的一大缺陷. 为解决峰后应变场的监测缺陷, 将采用数值模拟方法以弥补 DIC 技术的不足.

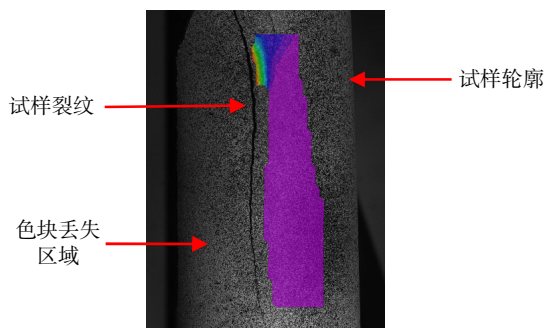


图 5 DIC 检测到的大部分区域应变场丢失现象

2 单轴压缩数值模拟分析

2.1 应变场建立方法

PFC 软件自带获取应变工具——测量圆, 它是长期以来对如何定义测量圆尺寸及布局方式以获取当试样应变场未给定时的一种有效方法. 为此, 本文提出了针对辉绿岩单轴压缩模拟试验获取应变场的实施步骤.

步骤 1 建立基于试验数据的平面试样模型. 颗粒间接触模型为线性平行黏结模型, 颗粒半径与密度由经验直接给定, 其余参数通过标定方式获取. 为减少标定次数, 假定颗粒接触模量和刚度比等于平行黏结接触模量和平行黏结接触刚度比, 并通过试错法调整接触模型中的细观参数. 其中, 颗粒的相应细观参数见表 1. 平面模型底部进行限位约束, 上部采用前述的位移控制加载方式.

步骤 2 在软件中加入应变场以获取代码. (1) 布置测量圆. 在模型中生成阵列式排布的测量圆, 设定测量圆直径为 5 mm, 间隔为 5 mm(图 6). (2) 设置收敛条件. 以每隔 2 500 个时间步长保存一次计算结果, 并将应力值达到峰值应力的 10% 作为收

表1 数值模拟细观参数

细观参数	数值
$R_{\min}/\text{mm}$	0.2
$R_{\max}/\text{mm}$	0.4
$\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 700
E/GPa	3.458 2
K_n/k_s	2.08
σ_c/MPa	65.1
c/MPa	46.5
μ	0.5
$\Phi/(\circ)$	50
λ	1

注: $R_{\min}$ 和 $R_{\max}$ 为最小和最大颗粒半径; ρ_s 为颗粒密度; E 为平行黏结接触模量; K_n/k_s 为平行黏结接触刚度比; σ_c 为法向黏结强度; c 为切向黏结强度; μ 为颗粒摩擦系数; Φ 为平行黏结摩擦角; λ 为半径乘子系数。

敛条件。(3)加载测试. 测试过程中实时读取各测量圆所在区域的横向和竖向应变值。(4)保存数据. 测试结束后获取各保存点的测量圆圆心位置和应变值, 其中的圆心位置作为插值坐标。(5)数值计算. 将获取数据进行插值处理并绘制应变云图, 获取测试过程的试样应变场。

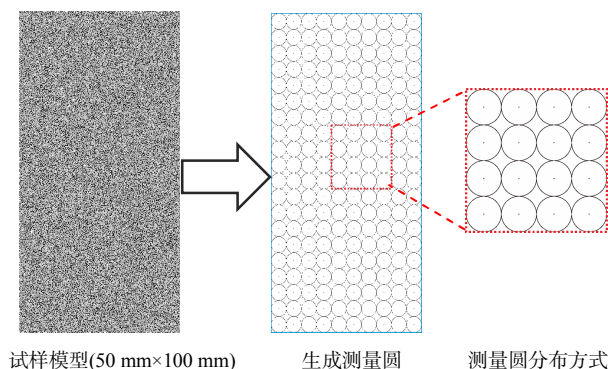


图6 建立模型及测量圆布置方案

2.2 参数设置与特征分析

通过 PFC 计算获取应力—应变曲线(图 7), 其中室内试验曲线来自于 4 个试样测试后最接近平均峰值应力的曲线, 室内试验与数值模拟应力—应变曲线大致贴合并在 N 点(ε_{50} , σ_{50})重合, 标定的力学参数见表 2, 与试验结果对比, 单轴抗压强度(UCS)误差为 0.8%, 割线模量(E_{50})误差为 0.1%, 泊松比(ν)误差为 0.8%。对比室内试验的试样破坏特征、数值模拟的试样破坏特征和数值模拟的微裂纹分布特征(图 8)可知, 室内试验与数值模拟的试样

破坏特征很接近, 即由试样左上方向右下方产生剪切破坏, 同时在试样右侧存在垂向张拉裂纹引起的开裂现象。由此可知, 基于表 1 参数进行的单轴压缩模拟试验符合实际情况。

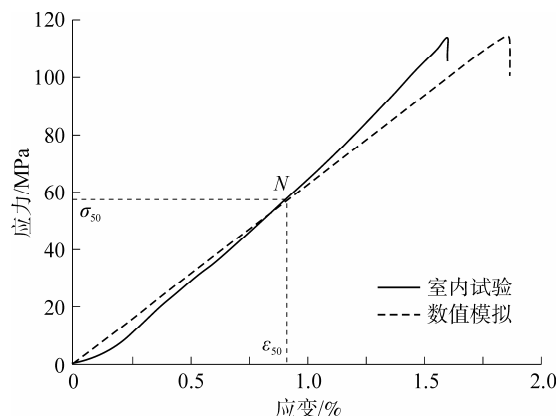


图7 室内试验与数值模拟的应力—应变曲线对比

表2 室内试验与数值模拟力学参数对照

项目	UCS/MPa	E_{50}/GPa	ν
室内试验	113.9	2.264	0.250
数值模拟	114.8	2.261	0.252

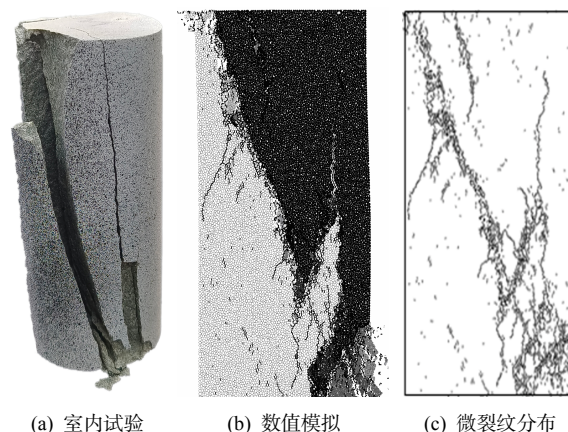


图8 室内试验和数值模拟的试样破坏模式对比

2.3 应变场模拟分析

通过上述应变场获取方法, 对标定完成后的试样分别获取横向和竖向应变场, 图 9 为应力—应变曲线中不同时刻应力施加值所对应的参考点, 其中, A 点位于接近峰值应力的 1/2 处, 应力值为 58.1 MPa, B 点位于接近峰值应力处, 应力值为 114.7 MPa。峰值应力后的 C 、 D 、 E 和 F 分别为间隔相同时间步长的参考点。图 10 为对应图 9 的各参考点横向应变场和竖向应变场, 其中 $A_1 \sim F_1$ 为横向应变场, $A_2 \sim F_2$ 为竖向应变场。

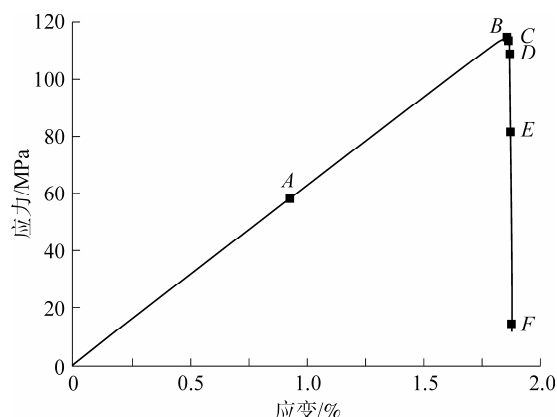


图 9 加载过程中各应力值对应的参考点

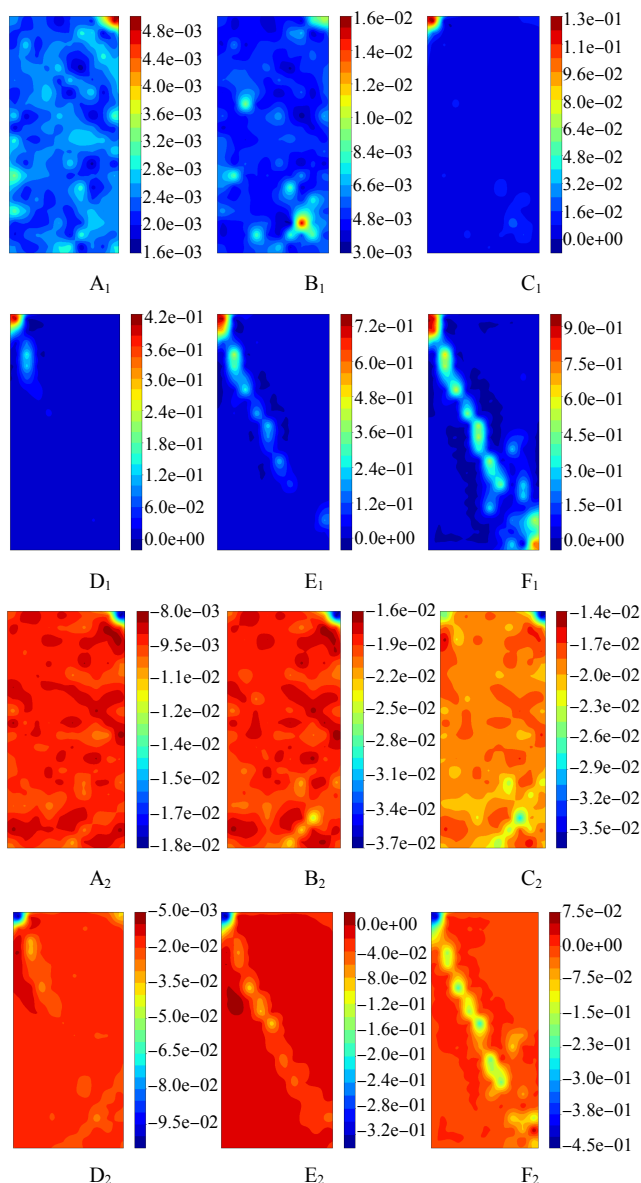


图 10 数值模拟的应变场图

横向应变主要为拉应变, 应变值为正值。由图

10 可知, 在 A 点位置, 横向应变场呈现不均匀“棉絮状”分布(图 10(A₁)). 当加载到应力峰值时, 试样的横向应变场呈现“颗粒状”分布(图 10(B₁)), 最大和最小应力值相差变大. 随后, 当应力达到峰值后的 C 点时, 试样左上角出现应变集中现象, 而其他区域的应变场呈均匀分布状态(图 10(C₁)), 此时最大应变值为 0.13. 最后, 从试样左上角向右下角方向的斜线上, 依次不断形成由“环状”应变集中点连接组成的应变集中带(图 10(D₁)~(F₁)), 最大应变值不断上升并达到 0.9, 而其他区域的最小应变值始终为 0. 需要指出的是在峰值应力前, 各测量圆在不同区域测得的应变值差异较小, 应变场呈现不均匀分布而没有明显的应变集中点. 当超过应力峰值后, 试样破坏区域的应变值明显增大, 使其他区域的应变场相对呈现均匀分布现象. 竖向应变主要为压应变, 应变值为负值. 竖向应变场与横向应变场相比, 其变化趋势相似, 且部分竖向应变值远大于横向应变值.

为了解压缩过程中试样微裂纹分布区域与应变集中区域的对应关系, 分别获取 D 、 E 和 F 点对应的试样内部微裂纹分布图, 并分别将它们与横向应变场分布图进行叠加处理(图 11). 由图可知, 微裂纹分布区域与应变场的应变集中带存在多处重合, 其中各个斑点为颗粒间接触连接键破坏位置生成的微观裂纹, 它们经发育后贯通形成了宏观裂缝. 由图 8(b)与(c)对比可知, 微观裂纹的产生与分布在一定程度上体现了试样破坏趋势与宏观裂缝的生成路径, 与应变集中区域高度重合的微观裂纹贯通演变为宏观裂缝区域. 需要指出的是, 并非所有微观裂纹都会发育成为宏观裂缝, 即应

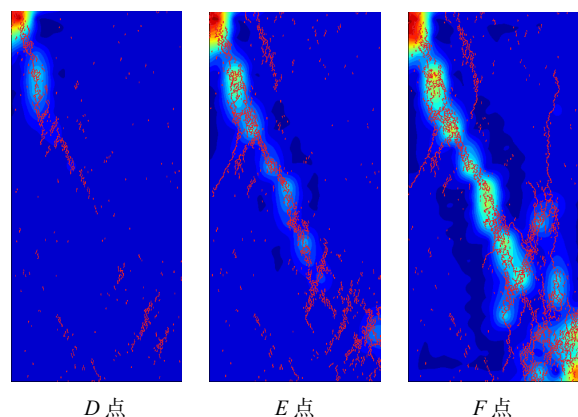


图 11 不同阶段试样微裂纹与应变场叠加状态

变集中区域与宏观裂纹扩展区域虽然重合度较高,却难以做到与微观裂纹完全对应。

3 应变场获取技术的对比与优化分析

3.1 DIC 监测和 PFC 模拟技术对比

两种技术测量方式类似,应变场由试样中分布的每个最小应变测量区域的应变共同组成。其中,最小测量区域分别对应 DIC 技术的测量子区与数值模拟技术的测量圆。DIC 技术通过在试样表面划分计算网格形成矩形测量子区,而数值模拟中的测量圆则可根据需求生成指定圆形测量区域,并通过测量圆直接获取的应变率与时间步长相乘累加获得测量圆区域内的应变^[14]。虽然 DIC 技术能真实揭示试验过程中试样的表面应变,但当应变值低于应变测量精度值(50×10^{-5})时往往难以识别,而且一旦产生散斑点跌落就无法监测。数值模拟技术则能展示全过程的应变演化,但需基于试验数据,且模拟数据还需借助实际试验的检验。

为了解两种技术的差异性,以 DIC 技术获得的应变场(图 4)与 PFC 技术获得的横向应变场(图 10)为例进行对比。在单轴压缩初始阶段, DIC 技术获得的应变场存在应变不均匀区域较少和应变场分布更加均匀的现象。在出现应变集中区域及应变集中带阶段,两者较好地展现了裂纹起裂及扩展路径。需要指出的是, DIC 应变场的应变集中带呈现明显的“条状”,且应变场平滑连续,而 PFC 技术获得的应变场具有明显“颗粒状”,且应变集中带轮廓起伏不平。应变集中带的轮廓差异受应变场演化差异的影响, DIC 技术获得的应变场演化是由一个应变集中点沿破坏区域不断扩展,最终在试样破坏区域发育成一条应变集中带;而 PFC 技术获得的应变场则是在试样破坏区域依次出现应变集中点,并在新的应变集中点产生后与原有应变集中点连接,最终在试样破坏区域形成应变集中带。

3.2 影响数值模拟精度的因素与优化方案

通过分析发现,最小应变测量区域形状的不同会导致应变场表现形式存在上文所述差异,这跟测量区域的大小和分布有密切关系。为提高应变场的模拟精度,在试验数据基础上调整测量圆直径和分布方式。由于在 PFC 中增加测量圆的数

量会大大影响计算时间,为了在同一次加载过程中获取不同方案生成的指定区域应变场,仅对试样左上角 1/4 的裂纹出现区域生成测量圆(图 12)。本文采用两种优化方案,与图 6 所示的初始方案相比,方案 1 将测量圆直径由 5 mm 减小至 2.5 mm,间距由 5 mm 减小至 2.5 mm;方案 2 将测量圆的分布方式调整为重叠分布,即测量圆直径仍为 5 mm,间距由 5 mm 减小至 2.5 mm。以下重点分析两种优化方案在峰值应力后 C 点至 F 点的横向应变场。

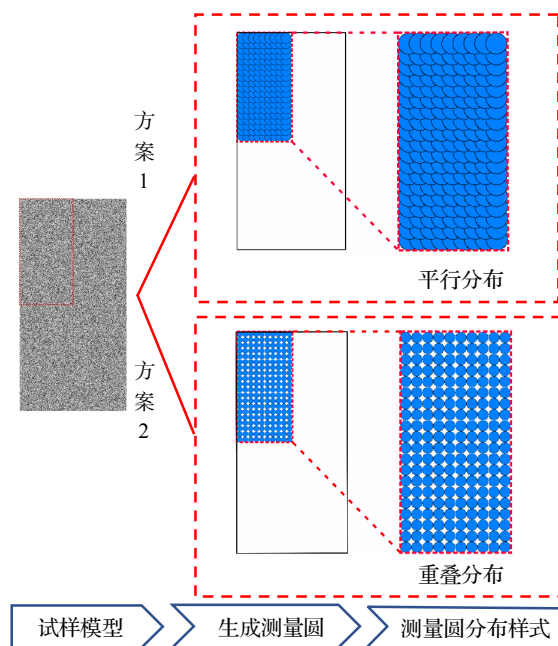


图 12 改进方案

对比初始方案与方案 1(图 13(C₃)~(F₃))的应变场可知,虽然测量圆直径不同,应变场演化过程却较为类似,并且方案 1 的应变集中发育速度明显加快,应变集中带的连贯性更强。这是由于测量圆通过测量圆内平均变形来计算应变,测量区域变小有利于更准确地表现出变形区域的位置和大小,使应变场的精确度与敏感性有显著增强。方案 2(图 13(C₄)~(F₄))获得的应变集中带“颗粒”现象显著减少,具有“条状”特点。方案 1 由于采用减小测量圆直径的方法,对变形的产生和位置显示更为准确,但是模拟时间更长,对计算机性能要求更高。对比两种测量圆排布方式可知,方案 1 和初始方案的测量圆之间存在的空白区域变形值无法被监测,方案 2 采用的测量圆重叠方法使相邻测量圆所测得的应变值关联度大而变得更加连续,但每

个测量圆与相邻测量圆重合区域的应变值会被平均计算,造成局部精度的降低。值得注意的是,方案1中的试样左上角应变集中区域出现整体向下移动现象,主要原因在于测量圆尺寸较小,试样位

移大于测量圆直径,导致顶部测量圆内无法监测应变值。

4 结论

基于单轴压缩试验的 DIC 监测技术获得了辉绿岩试样全过程变形场的演化,基于试验参数的 PFC 数值模拟技术获取了辉绿岩的应变场。分析并获得了两种技术获取应变场的差异性,探究了影响数值模拟应变场的主要因素及优化方案。

(1) DIC 监测技术能有效监控辉绿岩单轴压缩过程的位移场、应变场,尤其是裂纹起裂位置及扩展过程的应变值分布,即破坏区域的应变值明显高于其他区域,但是试样表面颗粒的跌落破损会导致应变场部分数据的丢失。

(2) 基于试验数据,给出了 PFC 数值模拟应变场的方法,对比 DIC 监测数据,数值模拟方法能有效计算出压缩过程类似的应变分布和裂纹扩展规律,但是测量圆直径和分布方式会影响应变场的数值精度。

(3) 依据 DIC 检测技术获得结果,优化数值模拟技术以获得单轴压缩全过程的应变场并提升应变场精度,有利于深入开展试样在外力作用下断裂破坏的应变场研究。

参考文献:

- [1] 蔡美峰,何满朝,刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2013.
- [2] 沈君,刘保国,程寅,等. 辉绿岩单轴及常规三轴压缩下力学特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(13): 5297-5304.
- [3] 梁冰,张涛,王俊光,等. 裂隙辉绿岩蠕变试验及模型研究[J]. 实验力学, 2019, 34(2):351-357.
- [4] 苗胜军,段懿轩,尹紫微,等. 不同应力路径下辉绿岩能量演化与破坏机制研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(14): 154-161.
- [5] VAISBERG L A, KAMENEVA E E. Loading rate effect on pore space structure in rocks[J]. Gornyi Zhurnal, 2021(11):17-21.
- [6] 王强,周扬一,李元辉,等. 基于声发射监测的含天然弱面辉绿岩变形和强度特性实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 2):3646-3653.
- [7] PETROV Y, BRAGOV A, EVSTIFEV A, et al. Structural-temporal approach for dynamic strength

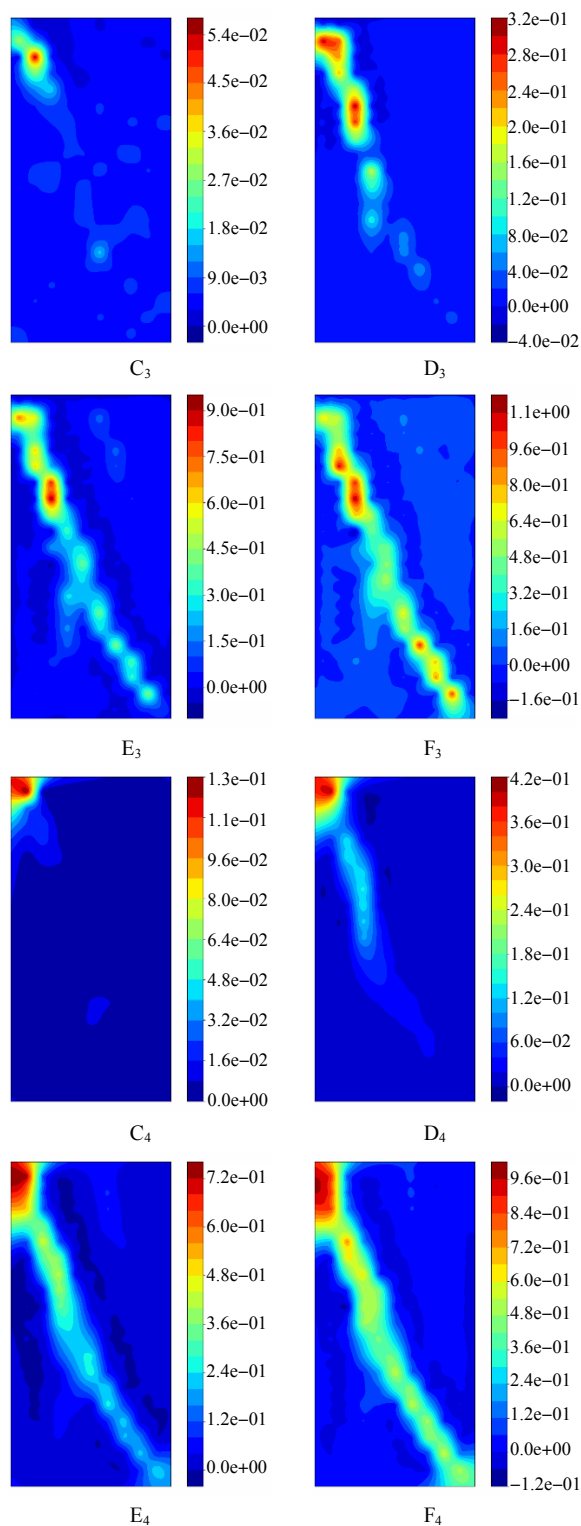


图 13 优化方案获得的应变场

- characterization of gabbro-diorite[J]. EPJ Web of Conferences, 2015, 94:01042.
- [8] YANG G, CAI Z X, ZHANG X C, et al. An experimental investigation on the damage of granite under uniaxial tension by using a digital image correlation method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 73:46-52.
- [9] MUNOZ H, TAHERI A, CHANDA E K. Pre-peak and post-peak rock strain characteristics during uniaxial compression by 3D digital image correlation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(7):2541-2554.
- [10] LI H, MA H L, SHI X L, et al. A 3D grain-based model for simulating the micromechanical behavior of salt rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(6):2819-2837.
- [11] 王兆会, 孙文超, 王雪冰, 等. 预制裂隙类岩石试件表面变形场演化与裂隙扩展机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10):72-82.
- [12] 吕原君, 杜时贵, 罗战友, 等. 单台多尺寸岩石压剪断裂试验装置的研制与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(10):2067-2081.
- [13] CHENG J L, YANG S Q, CHEN K, et al. Uniaxial experimental study of the acoustic emission and deformation behavior of composite rock based on 3D digital image correlation (DIC)[J]. Acta Mechanica Sinica, 2017, 33(6):999-1021.
- [14] 石崇, 张强, 王盛年. 颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

DIC monitoring and simulation of deformation field during uniaxial compression of diabase

FENG Huikun¹, LÜ Yuanjun¹, LUO Zhanyou¹, LIU Guangjian²

(1. Rock Mechanics Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

Abstract: Diabase with its abundant reserves and extensive applications has been widely studied, and its mechanical properties and failure modes have a significant impact on the mining and utilization of diabase. This study focuses on standard diabase specimens, utilizing a universal testing machine and a three-dimensional full-field strain measurement system to acquire mechanical parameters during the uniaxial compression process. Digital Image Correlation (DIC) technology is employed to observe displacement and strain in the specimens during the testing process, and Particle Flow Code (PFC) software is used to construct a two-dimensional model based on the parameters tested, conducting uniaxial compression simulation experiments. The results indicate that the DIC technology can accurately reflect the displacement and strain fields during the compression fracture process of the specimens. However there is problem of unable to monitor once the particles fall off the specimen surface. By comparing DIC monitoring data with PFC simulation data, it is found that the crack initiation location and crack propagation path of the specimens have high consistency, but the measurement accuracy of the strain field is affected by parameters such as the measurement circle and layout method. The combination of DIC monitoring technology and numerical analysis technology can reveal the strain evolution rules in the specimen failure process more deeply, providing valuable references for studying the failure of specimens under external forces.

Key words: diabase; uniaxial compression; digital image correlation; numerical analysis; strain field

(责任编辑 章践立)