

高压物理学报

基于颗粒流软件探究不同CFRP布层数对轴压煤圆柱能量演化的影响

李庆文 潘创创 张学磊 钟宇奇 李玲 聂帆帆 李雯霞 徐梦娇

Effect of CFRP Layers on the Energy Evolution of Axial Compressed Cylindrical Coal Based on Particle Flow Software

LI Qingwen, PAN Chuangchuang, ZHANG Xuelei, ZHONG Yuqi, LI Ling, NIE Fanfan, LI Wenxia, XU Mengjiao

引用本文:

李庆文, 潘创创, 张学磊, 等. 基于颗粒流软件探究不同CFRP布层数对轴压煤圆柱能量演化的影响[J]. 高压物理学报, 2025, 39(4):045302. DOI: 10.11858/gywlb.20240931

LI Qingwen, PAN Chuangchuang, ZHANG Xuelei, et al. Effect of CFRP Layers on the Energy Evolution of Axial Compressed Cylindrical Coal Based on Particle Flow Software[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(4):045302. DOI: 10.11858/gywlb.20240931

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240931>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含裂隙岩石单轴压缩下力学性能及能量演化机制研究

Mechanical Properties and Energy Evolution Characteristics of Fracture-Bearing Rocks under Uniaxial Compression

高压物理学报. 2024, 38(1): 014201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230746>

不同含水率下岩石材料的能量与损伤演化特征

Energy and Damage Evolution Characteristics of Rock Materials under Different Water Contents

高压物理学报. 2023, 37(3): 034105 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220699>

单轴压缩下裂隙倾角对花岗岩-混凝土力学行为及能量演化的影响

Influence of Crack Angles on the Mechanical Behavior and Energy Evolution of Granite-Concrete under Uniaxial Compression

高压物理学报. 2024, 38(6): 064202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240803>

不同数量碳纤维布条带约束煤样的轴压蠕变特性细观模拟研究

Microscopic Simulation Study on Uniaxial Compressive Creep Characteristics of Coal Samples Constrained by Different Numbers of Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips

高压物理学报. 2025, 39(2): 024201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240861>

三轴压缩下裂隙岩体破坏模式及能量演化研究

Study on Failure Mode and Energy Evolution of Fractured Rock Body under Triaxial Compression

高压物理学报. 2024, 38(5): 054203 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240722>

三轴应力下花岗岩加载破坏的能量演化和损伤特征

Damage and Energy Evolution Characteristics of Granite under Triaxial Stress

高压物理学报. 2021, 35(2): 024102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200622>

基于颗粒流软件探究不同 CFRP 布层数对轴压煤圆柱能量演化的影响

李庆文¹, 潘创创¹, 张学磊², 钟宇奇¹, 李玲¹, 聂帆帆¹, 李雯霞¹, 徐梦娇¹

(1. 辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州 121001;
2. 中国建筑材料工业地质勘查中心辽宁总队, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 为探究不同碳纤维增强复合材料 (carbon fiber reinforced plastic, CFRP) 布层数对轴压煤圆柱力学特性及能量演化的影响, 结合室内单轴压缩试验, 采用有限差分-离散元法 (FDM-DEM) 进行数值模拟。试验结果表明, 无论是未约束煤圆柱, 还是 CFRP 约束样本, 应力-应变曲线均经历了压密、弹性、屈服和峰后 4 个阶段。CFRP 布约束样本在屈服和峰后阶段表现出明显的延性破坏, 其平均峰值应力、峰值应变和弹性模量分别比未约束样本高出约 2、2.5 和 1 倍。数值模拟结果显示: 随着 CFRP 布层数增加, 峰值应变和峰值应力分别提升至 733% 和 548%; 而弹性模量并未单调上升, 表明在设计 CFRP 布层数时需平衡强度与刚度。此外, CFRP 布层数的增加导致破坏机制由张拉破坏转变为剪切破坏, 表明其对煤圆柱的应力分布和破坏过程影响显著。煤圆柱的总能量和耗散能随着 CFRP 布层数的增加显著提升, 能量吸收效率最高可达 10.51 倍, 显示其抗失稳能力显著增强。为量化 CFRP 布的约束效应, 引入了“等效厚度”概念, 发现其随着 CFRP 布层数增加呈非线性增长趋势, 且在 6.78 层时, 等效厚度趋近于无穷大, 说明了 CFRP 布在提升煤圆柱结构稳定性方面的重要性, 为未来研究提供了重要参考。

关键词: 单轴压缩; 碳纤维增强复合材料布; 煤圆柱; 有限差分-离散元法; 能量演化; 等效厚度
中图分类号: TU45; O521.9 **文献标志码:** A

采空区地表沉降问题的根源在于废弃煤柱承载能力的逐渐丧失。在复杂的地质条件下, 煤柱不仅承受上覆岩层的压力, 还容易受到岩石蠕变、风化及其他地质作用的侵蚀, 进而对地表建筑、铁路和公路等基础设施的安全构成严重威胁^[1-5]。因此, 如何有效加固废弃煤柱, 以维持采空区的稳定性, 已成为岩石力学领域尤其是采空区沉降控制中的核心研究课题之一^[6]。目前, 矿柱加固技术研究主要依赖于大比例尺相似材料模型试验、数值模拟及现场监测等方法。

在煤柱加固方面, 学者们提出了多种方案。黄万朋等^[7]提出的窄煤柱双巷掘进法显著提升了开采率与煤柱稳定性, 并在巷道变形控制方面优于传统方法。谷长宛等^[8]通过研究胀锁式对穿锚索在沿空掘巷窄煤柱加固中的应用, 结合数值模拟与现场实验, 证明了该技术的有效性和优化潜力。张洪伟等^[9-10]提出的巷旁注浆加固技术显著提升了窄煤柱的稳定性, 且验证了充填率在 20% 左右时的效果最佳, 不会引发采空区火灾。冯国瑞等^[11]通过合理设计煤柱双侧充填体的宽度和高度, 提高了煤柱群的稳定性, 为链式失稳防控提供了理论依据。陈绍杰等^[12]的研究表明, 充填墙通过侧向约束和分担载荷可以显著增强煤柱的承载能力。

* 收稿日期: 2024-11-05; 修回日期: 2024-11-22

基金项目: 辽宁省自然科学基金 (2023-MS-298, 20180550297); 辽宁省教育厅基本科研面上项目 (JYTMS20230866); 辽宁省博士科研启动基金 (2019-BS-120)

作者简介: 李庆文 (1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学、新材料与新型组合结构及离散元-有限差分跨尺度耦合细观模拟研究. E-mail: lgjzlw@163.com

通信作者: 潘创创 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事计算颗粒力学研究. E-mail: panguoguo0602@163.com

然而,传统加固方法如锚索、注浆、喷射混凝土及充填墙等,虽然在一定程度上提升了煤柱的稳定性,但在提升煤柱长期承载力及适应复杂地质环境方面仍存在局限,且难以兼顾高效开采与煤柱稳定性。近年来,纤维增强复合材料(fiber reinforced plastic, FRP)因其轻质、高强度、施工便捷及耐腐蚀等特点,在土木工程领域得到了广泛应用^[13-15],其高强度和耐久性特别适用于煤矿恶劣环境下的长期加固需求,为煤柱结构提供了新的加固途径。已有一些学者开始将 FRP 运用到煤矿加固领域, Das 等^[16]首先提出将碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced plastic, CFRP)布应用于煤柱加固领域,通过单轴压缩试验及数值模拟进行了详细的稳定性分析,结果表明,CFRP 布显著提高了煤样的承载力和变形能力,从而评估了这种方法在地下采矿中的应用潜力。白锦文等^[17]通过巴西劈裂试验研究了 FRP 包裹对煤充结构体界面稳定性的增强作用,结果表明,FRP 包裹显著提升了界面强度,减少裂纹并改善了结构体的抗劈裂性能,为劈裂失稳防控提供了理论支持。Xia 等^[18]研究了 CFRP 包裹对煤样力学性能的影响,发现 CFRP 包裹提高了破坏应力阈值,改变了裂纹模式,并优化了声发射(acoustic emission, AE)事件分布。Xia 等^[18]还基于能量守恒原理,构建了煤样应力-应变关系的损伤本构模型。李庆文等^[19-23]从层数效应、加载速率及能量耗散等角度探讨了 CFRP 布约束煤样的轴压性能,结果表明,CFRP 布约束显著提高了煤样的承载能力。

综上所述,尽管已有研究尝试将 FRP 技术引入煤矿加固领域,但主要集中于宏观试验,缺乏对细观机制的深入探讨。基于此,本研究将通过室内单轴压缩试验与数值模拟相结合的方法,系统分析不同 CFRP 布层数对煤圆柱力学特性及能量演化的影响。通过试验测定 0~1 层 CFRP 布约束条件下煤圆柱的力学特性,并进一步通过有限差分-离散元法(finite difference method-discrete element method, FDM-DEM)耦合数值模拟分析 0~6 层 CFRP 布约束煤圆柱,特别是其强度、变形特性与能量吸收效率,以期 CFRP 加固技术在复杂地质环境下的工程应用提供新的理论参考。

1 能量计算方法

煤圆柱在轴向压缩变形过程中,经历了能量的输入、积累、耗散和释放,这是一个动态的能量演化过程^[24]。在不考虑温度产生热能的情况下,外荷载对煤圆柱所做的功分为两部分:一部分以弹性能的形式存储于煤圆柱中,另一部分则以塑性能、损伤能等形式耗散^[25]。当煤圆柱的储能达到极限时,其结构将发生失稳^[20],能量转换过程如图 1 所示,其中 σ 为应力。

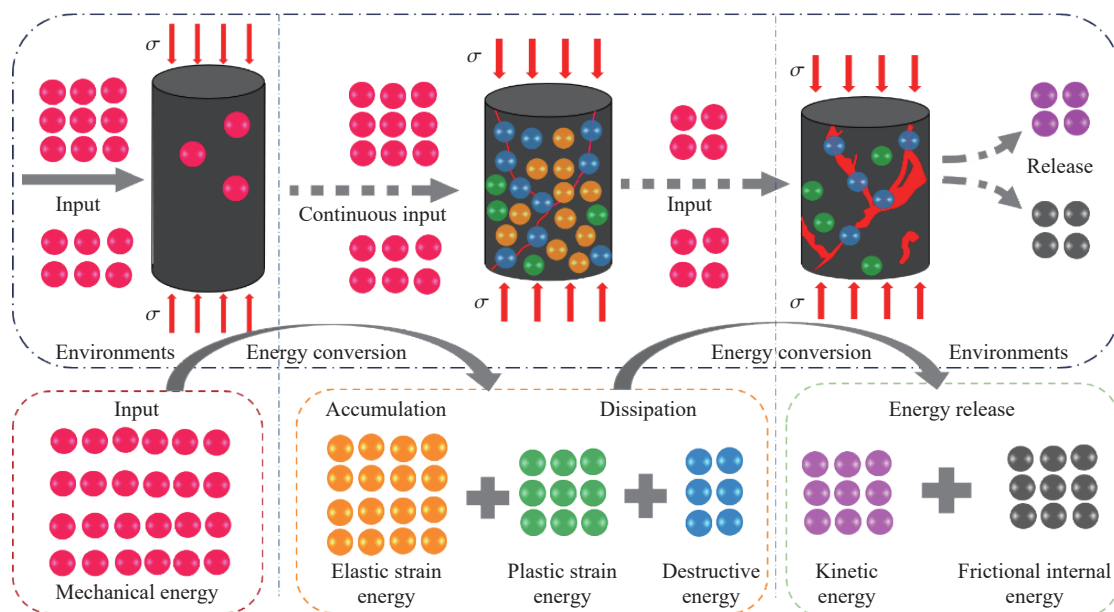


图 1 煤圆柱的能量转换过程

Fig. 1 Energy conversion process of cylindrical coal samples

设试验过程中外力对 CFRP 布约束煤圆柱做功产生的总能量为 U , 包括弹性应变能 U_e 、耗散能 U_d 和释放能 U_r 3 部分^[18], 单位为 J/m^3 。根据热力学定律, U 可表示为^[26-27]

$$U = U_e + U_d + U_r \quad (1)$$

然而, 与素煤不同的是, CFRP 布约束煤圆柱的应变能必须分别根据煤和 CFRP 布的应变能计算得出。由于 CFRP 布是一种线弹性材料, 因此可以合理地假设在试样损坏之前, CFRP 布中没有发生塑性损坏。此外, 对于 CFRP 布约束煤圆柱, U_r 比 U 小得多^[18], 因此, 式 (1) 可简化为

$$U = U_e + U_d \quad (2)$$

根据文献 [22, 24], 总能量 U 和弹性应变能 U_e 分别为

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (3)$$

$$U_e = \frac{1}{2} (\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3)] \quad (4)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一、二、三主应力, ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为第一、二、三主应力对应的应变, E 为试件的弹性模量, ν 为试件的泊松比。

基于本研究的试验条件, 可确定 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 式 (3) 和式 (4) 可简化为

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 \quad (5)$$

$$U_e = \frac{\sigma_1^2}{2E} \quad (6)$$

利用定积分原理, 总能量 U 可等效为

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 = \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_1^i + \sigma_1^{i+1})(\varepsilon_1^{i+1} - \varepsilon_1^i)}{2} \quad (7)$$

式中: σ_1^i 为轴向应力-应变曲线中每个点的应力, MPa; ε_1^i 为应力-应变曲线中每个点的应变, %。

将式 (6)、式 (7) 代入式 (2), 最终得到耗散能

$$U_d = U - U_e = \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_1^i + \sigma_1^{i+1})(\varepsilon_1^{i+1} - \varepsilon_1^i)}{2} - \frac{\sigma_1^2}{2E} \quad (8)$$

2 试验概况

2.1 CFRP 布拉伸试验

试验所用碳纤维布为高强度 II 级纤维布, CFRP 布制备及拉伸试验参考文献 [28] 和国标^[29-30] 进行。试验时, 将制备好的 CFRP 条带用实验仪器的夹头紧紧夹住, 并保持试件的轴心与夹头重合, 共制备了 7 个 CFRP 布条带 (CFRP-1~CFRP-7), 如图 2 所示。通过 DH3816 静态应变测试仪与应变片相连采集拉伸变形数据, 拉伸试验采用位移控制法, 加载速度为 2 mm/min。

图 3 为 CFRP 布拉伸荷载-应变曲线, 分析可知: 在达到最大荷载前, 曲线中的应力与应变基本呈线性关系; 达到峰值荷载后, 应力迅速下降, 表明试件开始破坏。CFRP 条带呈脆性破坏模式。

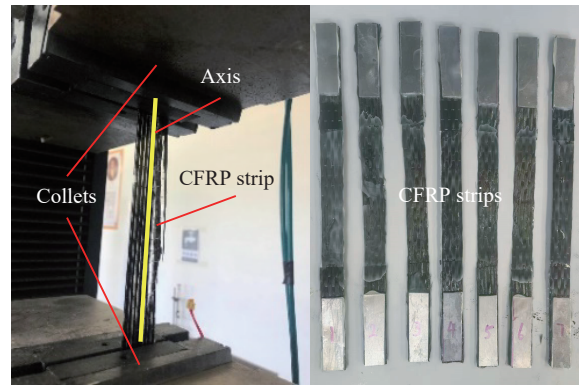


图 2 CFRP 条带制作

Fig. 2 Preparation of CFRP strips

从图 3 中可以发现, CFRP 条带承受的拉伸力在 3.40~4.77 kN 之间, 平均值为 3.83 kN; 能承受的拉应变在 1.56%~2.14% 之间, 平均值为 1.94%; 最大拉应力在 816.2~1 068.9 MPa 之间, 平均值为 918.1 MPa。7 个 CFRP 条带的具体试验结果见表 1, 其中: F_{CFRP} 、 $\varepsilon_{\text{CFRP}}$ 、 T_{CFRP} 分别为 CFRP 条带承受的最大拉伸力、拉应变和抗拉强度, x 为峰值应力处的位移。

表 1 中, CFRP 条带的拉应变 $\varepsilon_{\text{CFRP}}$ 和抗拉强度 T_{CFRP} 分别为

$$\varepsilon_{\text{CFRP}} = x/l_{\text{CFRP}} \quad (9)$$

$$T_{\text{CFRP}} = F_{\text{CFRP}}/ad \quad (10)$$

式中: l_{CFRP} 、 a 、 d 分别为 CFRP 条带的长度、宽度和厚度, 取 250、25 和 0.167 mm。

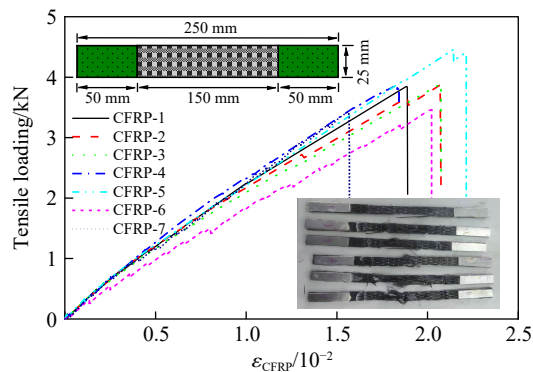


图 3 CFRP 条带荷载-应变曲线

Fig. 3 Load-strain curves of CFRP strips

表 1 CFRP 布的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of CFRP sheets

CFRP No.	F_{CFRP}/N	x/mm	$\varepsilon_{\text{CFRP}}/\%$	$T_{\text{CFRP}}/\text{MPa}$
CFRP-1	3 846.0	4.71	1.88	921.2
CFRP-2	3 880.5	5.19	2.07	929.5
CFRP-3	3 889.5	5.18	2.07	931.6
CFRP-4	3 877.5	4.57	1.83	928.7
CFRP-5	4 462.5	5.35	2.14	1 068.9
CFRP-6	3 466.5	5.05	2.02	830.3
CFRP-7	3 408.0	3.91	1.56	816.3
Average value	3 832.9	4.85	1.94	918.1

2.2 单轴压缩试验

本研究通过对 CFRP 布涂抹浸渍胶来达到对小煤圆柱侧向约束的效果, 试样尺寸按照国际岩石力学学会 (International Society for Rock Mechanics, ISRM) 的推荐, 制备成直径 (D) 为 50 mm, 高 (H) 为 100 mm 的标准圆柱体, 试件两端的不平行度和端面不垂直度均小于 0.02 mm^[31]。其中, CFRP 布宽度按照试件的高度进行裁剪, 长度^[21]为

$$l_{\text{CFRP}} = n\pi D + l_{\text{DJ}} \quad (11)$$

式中: n 为 CFRP 层数; D 为煤圆柱直径; l_{DJ} 为搭接长度, 50 mm。1 层对应 CFRP 布长度为 207.08 mm。

采用 WDW-300 型微机控制电子式万能试验机以及 DH3820N 分布式信号测试分析系统进行本次单轴压缩试验, 试验设备如图 4 所示。试验以 CFRP 布层数为变量, 取值范围为 0~1 层, 开展对未约束煤圆柱和 CFRP 布约束煤圆柱的单轴压缩试验, 研究其力学特性。试验加载方式采用位移控制, 加载速率设为 0.12 mm/min。将试件按层数进行分类并编号, 进行多次试验。根据 GB/T 50266—2013《工程岩体试验方法标准》^[32] 开展试验。试验方案见表 2, 其中: C0 表示未约束煤圆柱, C1 表示 1 层 CFRP 布约束下的煤圆柱。

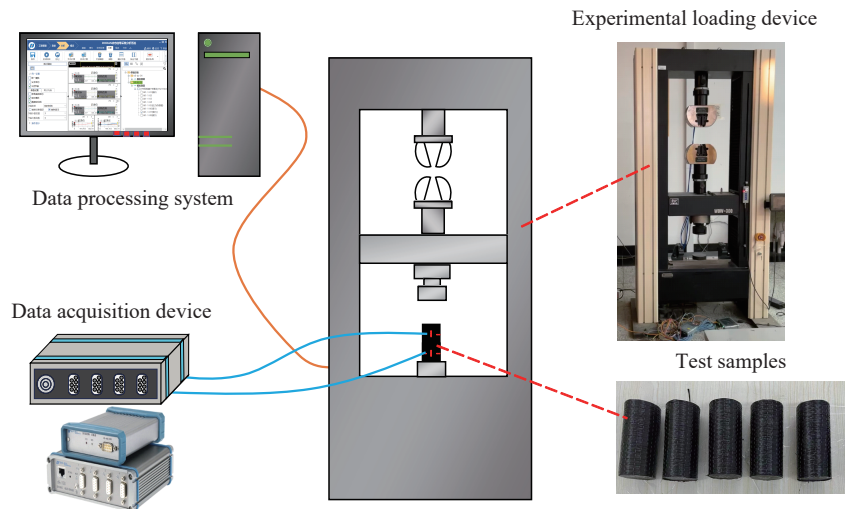


图 4 试验设备及采集系统

Fig. 4 Test equipment and acquisition systems

表 2 单轴压缩试验方案

Table 2 Uniaxial compression test scheme

Specimen No.	Layer	Number of samples	Loading rate/(mm·min ⁻¹)
C0	0	3	0.12
C1	1	3	0.12

2.3 试验结果分析

未约束和 CFRP 约束煤圆柱在单轴压缩下的变形过程均分为压密、弹性、屈服和峰后 4 个阶段, 各阶段如图 5(a) 所示。图 5(b) 为单轴压缩试验试样的应力-应变曲线。(1) 初始压密阶段(OA), 加载初期应力-应变曲线呈“上凹”开口, 由于煤为非均质材料, 内部的微裂隙、气孔等原生缺陷在轴向荷载下逐渐闭合, 表现出非线性特征; (2) 弹性变形阶段(AB), 曲线进入线性区域, 裂隙稳定发展, 力学性能基本不变; (3) 屈服变形阶段(BC), 曲线斜率减小, 较小应力导致较大变形, 产生应力集中和裂隙扩展, 直至试样整体破坏; (4) 峰后破坏阶段(CD), 试样达到承载极限后, 应力迅速下降, 裂隙迅速贯通形成宏观断裂面, 表现出脆性破坏。

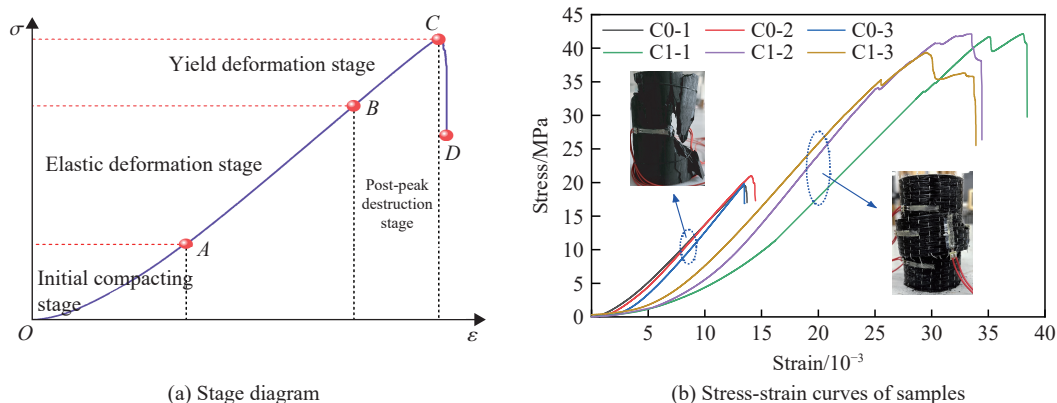


图 5 单轴压缩试验的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of uniaxial compression tests

可以看到, CFRP 布约束煤圆柱与未约束煤圆柱的应力-应变曲线相似, 但在屈服阶段和峰后阶段表现出了不同的特征。具体而言, CFRP 布约束煤圆柱在屈服阶段曲线出现明显波动, 峰后阶段则表现

出“跌落式上升”的应力现象。这是由于 CFRP 布对煤圆柱形成了环向约束,即使发生破坏,试样仍能保持完整,具备一定的承载能力,从而呈现出延性破坏特性。

未约束和 1 层 CFRP 约束煤圆柱(各 3 个试样)的试验结果见表 3。CFRP 布约束煤圆柱的平均峰值应力大约是未约束煤圆柱的 2 倍左右,平均峰值应变大约是未约束煤圆柱的 2.5 倍左右,平均弹性模量大约是未约束煤圆柱的 1 倍左右,表明 CFRP 布的存在使煤圆柱的极限承载力和轴向变形能力得到了显著提升。

表 3 煤圆柱单轴压缩试验结果

Table 3 Uniaxial compression test results of cylindrical coal specimens

Test No.	Layer	D/mm	H/mm	σ/MPa	$\varepsilon/10^{-3}$	E/GPa
C0-1	0	50.05	100.21	19.50	13.53	1.72
C0-2	0	49.08	100.06	21.00	14.10	1.79
C0-3	0	50.01	100.13	19.81	13.46	1.95
Average				20.10	13.70	1.82
C1-1	1	49.04	100.00	42.14	38.04	1.61
C1-2	1	49.06	100.04	42.12	33.49	1.95
C1-3	1	49.81	100.37	39.38	29.55	1.92
Average				41.21	33.69	1.83

3 数值模拟概况

3.1 FDM-DEM 耦合原理

本研究采用颗粒流程序(particle flow code, PFC)和连续快速拉格朗日分析软件(fast Lagrangian analysis of continua, FLAC), PFC 常用于模拟离散介质的细观力学特性,而 FLAC 则用于模拟连续介质的宏观力学行为。PFC 在处理复杂几何模型时效率较低,而 FLAC 在该方面有所突破。采用 PFC^{3D}-FLAC^{3D} 的离散-连续耦合方法,可以在细观分析的同时满足大尺度分析需求,耦合原理如图 6 所示,其中: CP、GP、A 分别为接触点、网格点和划分区域, $f_1 \sim f_3$ 为接触力, $x_1 \sim x_3$ 为接触力方向。本研究采用界面耦合,通过基于边界控制的墙体方法实现耦合。

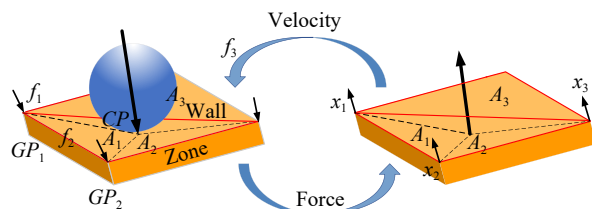


图 6 PFC^{3D}-FLAC^{3D} 耦合计算原理

Fig. 6 Calculation principle of PFC^{3D}-FLAC^{3D} coupling

3.2 建立数值模型

PFC 包含滑动模型、刚度模型和黏结模型共 3 种接触模型。滑动模型适用于无黏聚材料,不适合模拟煤岩体;黏结模型用于模拟材料内部的黏聚力,适合模拟含黏结结构的煤岩体;刚度模型包含线性模型和赫兹模型,其中赫兹模型适用于无黏结材料,而在颗粒与墙体的相互作用中则选择线性模型。

黏结模型包括接触黏结模型和平行黏结模型。接触黏结模型适用于土类材料,仅能传递力,不能传递弯矩;平行黏结模型适用于岩石和混凝土,既可传递力又可传递弯矩。因此,本研究选用平行黏结模型模拟煤圆柱^[33-34],如图 7 所示,其中: F_c 、 M_c 、 D_c 分别为接触力、接触力矩和颗粒之间的接触距离, k_n 、 k_s 分别为平行黏结法向刚度和切向刚度, μ 、 g_s 、 $\bar{\sigma}_c$ 、 $\bar{c}$ 、 $\bar{\varphi}$ 分别为摩擦系数、颗粒黏结间隙、黏结拉应力、黏结强度和摩擦角。

在 PFC^{3D} 中生成尺寸与试样相同的数值模型, 模型包括 8 881 个颗粒, 颗粒半径范围为 1.4~1.6 mm, 密度为 2 650 kg/m³, 孔隙比为 0.4。CFRP 布通过 FLAC^{3D} 的土工格栅单元模拟, 并与 PFC^{3D} 耦合。未约束模型通过删除 CFRP 布实现, 如图 8 所示。

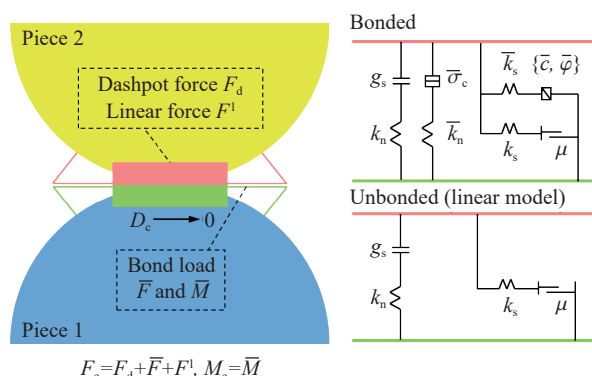
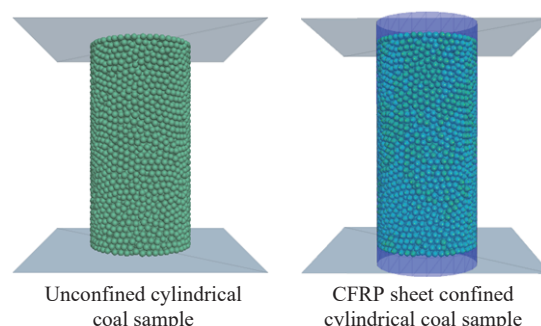
图 7 平行黏结模型^[33-34]Fig. 7 Parallel bonding model^[33-34]

图 8 煤圆柱模型

Fig. 8 Model of cylindrical coal samples

3.3 CFRP 布拉伸模拟

在进行 CFRP 布约束煤圆柱数值模拟前, 需先进行 CFRP 布的拉伸模拟, 以标定细观参数并反映其宏观力学特性。构建尺寸为 250 mm×60 mm 的土工格栅单元, 施加等大反向力并以 2 mm/min 的位移控制进行拉伸。7 组 CFRP 布拉伸模拟的结果显示: 平均最大试验力为 3.83 kN, 相对误差为 0.08%; 峰值力处位移平均值为 5.003 mm, 相对误差为 3.2%; 应变平均值为 2%, 相对误差为 3.1%; 最大拉应力平均值为 919 MPa, 相对误差为 0.1%。所有误差均在 5% 以内, 表明模拟符合试验要求, 模拟的应力-应变曲线如图 9 所示。

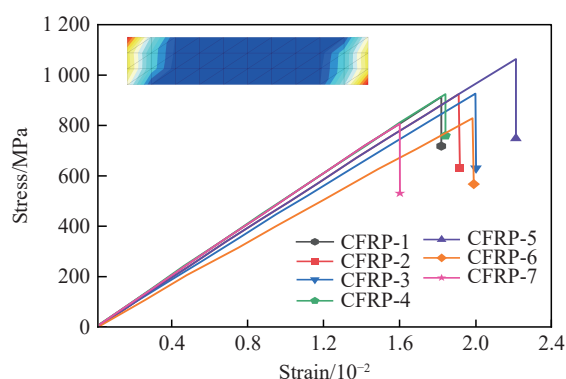


图 9 CFRP 条带的应力-应变模拟曲线

Fig. 9 Simulated stress-strain curves of CFRP strips

3.4 单轴压缩试验模拟及细观参数标定

如图 10 所示, 采用位移控制的上、下加载板以 0.12 mm/min 速率进行压缩, 直至模型破坏。模拟破坏形态与试验结果相似, 且数值模拟的应力-应变曲线与室内试验曲线大致相同。主要的不同之处在

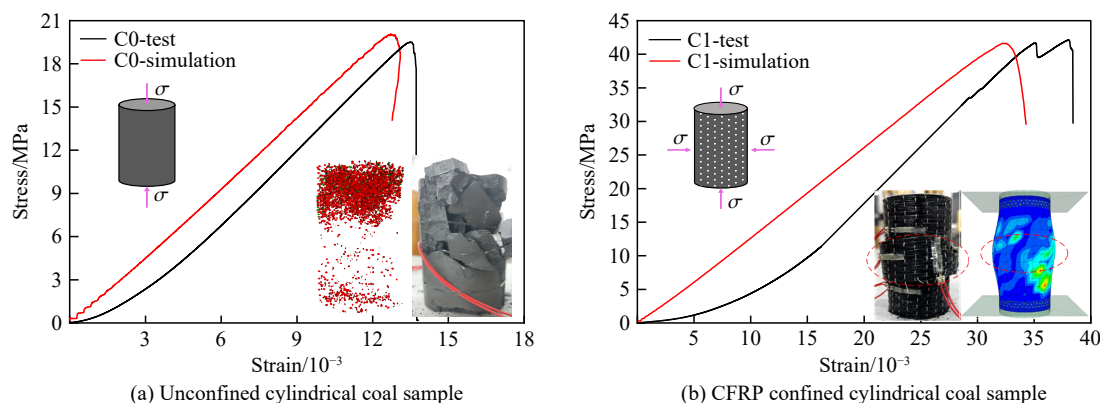


图 10 试验与模拟验证

Fig. 10 Verification of tests and simulations

于模拟曲线的应变小于试验曲线,可能是由于 PFC 中颗粒为刚性,且在模型平衡后内部均匀排列,不存在原始缺陷,导致缺乏初始压密阶段^[35-36]。

为更好地反映模拟的可靠性,通过“试错法”验证和修改参数^[37-38],得到模拟与试验基本物理参数的对比情况,见表 4。可以看出:未约束煤圆柱数值模拟与室内试验得到的峰值应力 σ_p 、峰值应变 ε_p 及弹性模量 E 的相对误差分别为 3.0%、6.1% 和 5.2%;约束煤圆柱数值模拟与室内试验得到的峰值应力、峰值应变及弹性模量的相对误差分别为 1.2%、9.8% 和 8.1%。误差均在 10% 以内,表明该参数适用于本次数值模拟研究,具体细观参数见表 5,其中: E_c 、 $\bar{E}_c$ 、 k 、 σ_b 、 τ_b 、 ϕ 分别为有效模量、黏结有效模量、黏结刚度比、法向黏结强度、切向黏结强度、摩擦角, T_g 、 ε_g 、 E_g 、 d 、 K_s 、 c_i 、 ϕ_i 分别为抗拉强度、极限拉应变、弹性模量、CFRP 布厚度、界面剪切刚度、界面黏聚力、界面摩擦角。

表 4 试验与模拟煤圆柱样品的力学参数对比

Table 4 Comparison of mechanical parameters of cylindrical coal sample between test and simulation

Sample	σ_p			ε_p			E		
	Test/MPa	Sim./MPa	Error/%	Test/ 10^{-3}	Sim./ 10^{-3}	Error/%	Test/GPa	Sim./GPa	Error/%
Unconfined	19.50	20.08	3.0	13.53	12.71	6.1	1.72	1.63	5.2
CFRP confined	42.14	41.63	1.2	37.04	33.40	9.8	1.61	1.48	8.10

表 5 煤圆柱和 CFRP 布的细观参数

Table 5 Microscopic parameters of cylindrical coal sample and CFRP sheet

Sample	E_c /GPa	$\bar{E}_c$ /GPa	k	σ_b /MPa	τ_b /MPa	$\phi/(^\circ)$	μ
Cylindrical coal	1.2	1	1	18.9	11	50	0.5
Sample	T_g /MPa	$\varepsilon_g/\%$	E_g /GPa	d /mm	$K_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	c_i/kPa	$\phi_i/(^\circ)$
CFRP sheet	918.07	1.94	47.54	0.168	3.5×10^6	10	30

3.5 数值模拟方案

在保持试验样品尺寸、加载速率和颗粒数不变的前提下,以 CFRP 布层数为变量,进行 0~6 层 CFRP 布约束煤圆柱的单轴压缩数值模拟,分别从宏观和细观角度研究其力学特性。细观模拟方案见表 6,其中: DZ-C0~DZ-C6 中的 DZ 表示单轴压缩, C 表示煤, 0~6 表示约束层数。

表 6 数值模拟方案

Table 6 Numerical simulation scheme

Sample	Size/(mm×mm)	Layer	Number of particles	Loading rate/(mm·min ⁻¹)
DZ-C0~DZ-C6	50×100	0~6	8 881	0.12

4 CFRP 布约束煤圆柱模拟结果

4.1 应力-应变曲线特征

图 11 展示了模拟得到的不同 CFRP 布层数下煤圆柱单轴压缩的应力-应变曲线。结果表明,随着 CFRP 布层数的增加,煤圆柱的峰值应力和峰值应变均呈上升趋势。此外,约束试样的峰值应变明显高于无约束试样,与试验结果一致。

图 12 给出了煤圆柱试样的破坏形态,其中,红色和绿色分别代表剪切裂纹和拉伸裂纹。可见,微裂纹集中汇聚形成破坏。结合图 12 中的裂纹数量可以看出: 1~2 层 CFRP 约束时,破坏集中在煤圆柱

的中部区域,以剪切裂纹为主,拉伸裂纹为辅,形成了剪-拉复合破坏;随着 CFRP 层数增至 3 层,拉伸裂纹比例上升,破坏模式逐渐转变为拉-剪复合破坏,并开始表现出剪切破坏的宏观特征;CFRP 层数增至 4 层时,拉-剪破坏带贯穿整个煤圆柱,形成“X”形结构;随着 CFRP 层数增至 5~6 层,宏观破坏模式转变为显著的剪切破坏,右侧对角线区域出现了明显的剪切破坏带,同时中部的裂纹数量显著减少。上述结果表明,CFRP 层数的增加增强了煤圆柱的侧向约束,抑制了侧向变形,并改变了应力分布,使得宏观破坏机制逐步由拉伸破坏向剪切破坏转变。为更直观地呈现力学参数的变化,表 7 列出了具体的力学参数。

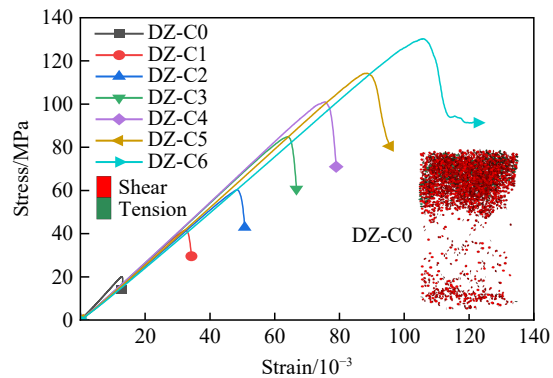


图 11 模拟不同 CFRP 层数下煤圆柱的应力-应变曲线

Fig. 11 Numerical simulated stress-strain curves of cylindrical coal samples with different CFRP layers

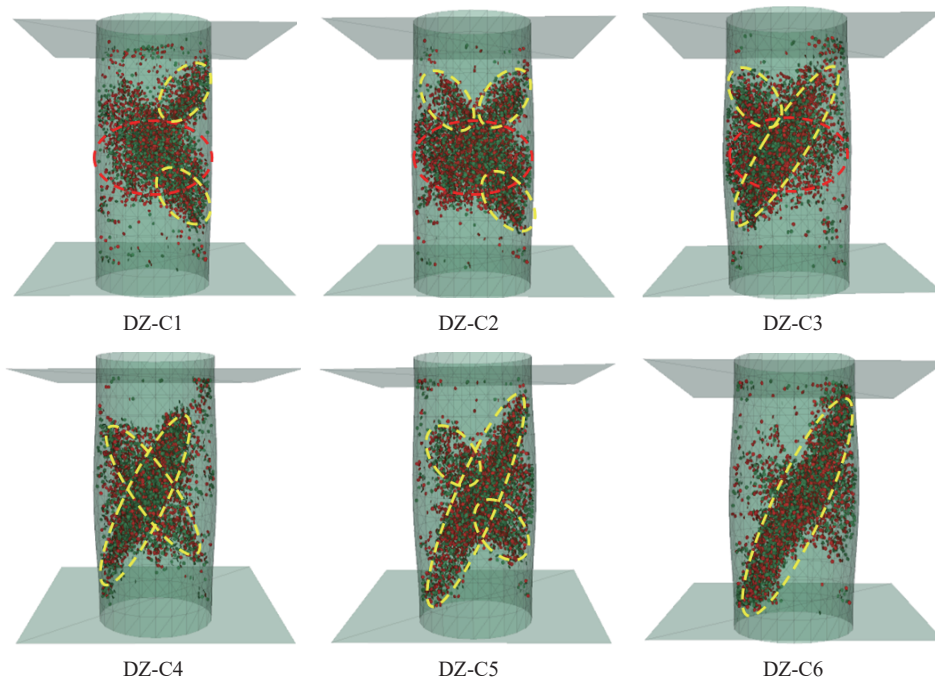


图 12 煤圆柱的破坏形态

Fig. 12 Damage patterns of the cylindrical coal samples

表 7 不同 CFRP 布层数下煤圆柱的力学参数

Table 7 Mechanical parameters of cylindrical coal samples with different CFRP sheet layers

Sample	n	$\varepsilon_p/10^{-3}$	σ_p/MPa	E/GPa
DZ-C0	0	12.71	20.083 11	1.63
DZ-C1	1	33.40	41.633 61	1.48
DZ-C2	2	48.31	60.295 11	1.30
DZ-C3	3	63.95	84.836 69	1.38
DZ-C4	4	75.46	101.037 46	1.41
DZ-C5	5	88.68	114.252 65	1.35
DZ-C6	6	105.91	130.264 86	1.29

试验数据表明,随着 CFRP 布层数的增加,峰值应变和峰值应力均显著上升,从无 CFRP 时的 1.271% 和 20.08 MPa 增大至 6 层 CFRP 时的 10.591% 和 130.26 MPa,分别增长约 733% 和 548%。然而,弹性模量的变化并不呈现单调上升的趋势:在无 CFRP 时,弹性模量为 1.63 GPa;随着 CFRP 层数的增加,弹性模量先降至 2 层 CFRP 时的 1.30 GPa,之后略有回升;最终在 6 层 CFRP 时降至 1.29 GPa。这种波动情况说明,尽管增加 CFRP 层数能提升材料的强度,但可能导致弹性模量下降,影响材料的刚性。因此,在设计和应用中需权衡强度与刚度的需求,从而优化材料的性能。例如:在需要高承载能力的结构中,可考虑使用 6 层 CFRP;而在要求高刚度的应用中,则应限制层数,以避免刚度降低。该研究为 CFRP 材料的设计和 optimization 提供了重要的理论依据。

4.2 不同 CFRP 布层数下煤圆柱的裂隙数量分布及破坏特征

在裂纹分布方面,如图 13 所示,裂隙数据揭示了 CFRP 布层数对试样拉伸和剪切裂纹数量的影响。随着 CFRP 布层数的增加,拉伸裂纹数量从 1 层 CFRP 时的 2565 增加至 4 层 CFRP 时的 3021,随后在 5~6 层 CFRP 时有所下降。剪切裂纹数量在 2 层 CFRP 时达到峰值(2900),4 层 CFRP 时降至 2479,并在 6 层 CFRP 时回升至 2759。总体裂纹数量随 CFRP 层数的增加呈递增趋势,但增速逐渐放缓。图 13 中显示,剪切裂纹在 1~2 层 CFRP 时占比较大,而从 3 层 CFRP 开始,拉伸裂纹逐渐占主导。图 13 中的无约束煤圆柱(浅蓝虚线)的裂纹数为 4612,对比有约束煤柱发现,增加 CFRP 布层数会增加整体的裂纹数量。

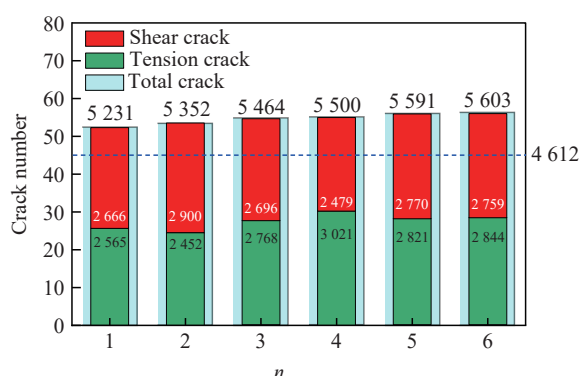


图 13 不同 CFRP 层数下煤圆柱的裂纹数量

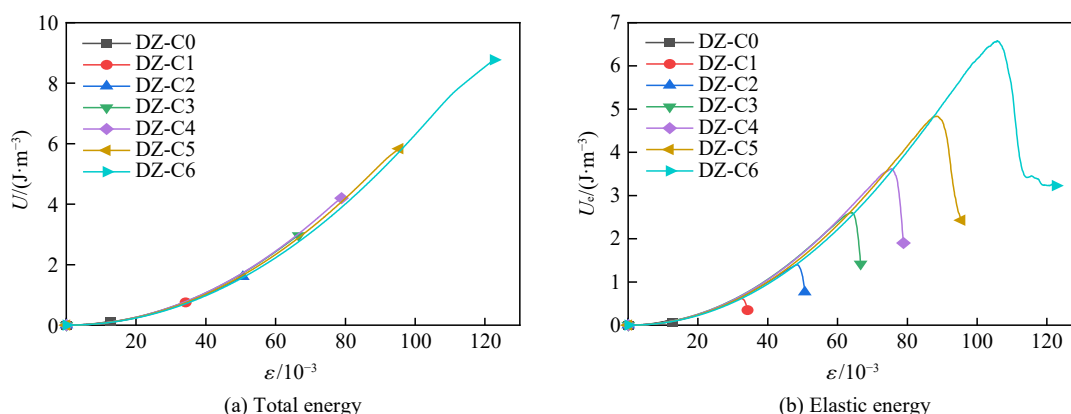
Fig. 13 Number of cracks in cylindrical coal samples with different CFRP layers

5 CFRP 层数对煤圆柱能量演化的影响

5.1 CFRP 约束煤圆柱的能量演化规律

依据式 (6)、式 (7) 和式 (8),得到不同 CFRP 布层数下煤圆柱的总能量、弹性能和耗散能演化曲线,如图 14 所示。

总能量和耗散能均随着 CFRP 层数的增加而显著增大,弹性能虽然与应变无明显相关性,但也随着 CFRP 层数的增加而增大。这种现象可能是由于增加 CFRP 层数后煤圆柱的整体刚度和韧性得到提升,从而在不出现显著形变的条件下能够储存更多的弹性能;同时,增加层数优化了应力分布,使得能量可以以弹性形式存储,而不依赖于具体的应变水平。这种现象表明,增加 CFRP 层数有助于提升煤圆柱在受力状态下吸收或耗散能量的能力,对于提高工程结构的能量管理和防护性能具有重要意义。



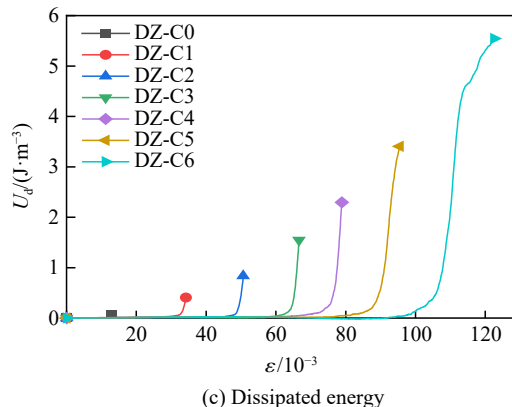


图 14 不同 CFRP 层数下煤圆柱的能量演化规律

Fig. 14 Energy evolution law of cylindrical coal samples with different CFRP layers

5.2 CFRP 约束煤圆柱的能量吸收效率

为了更好地评估 CFRP 约束对煤圆柱的作用,采用广泛的能量吸收效率法定义 CFRP 约束煤圆柱的能量吸收效率 $\eta^{[39]}$,用以评估煤圆柱在弹性变形下的性能表现

$$\eta = \frac{1}{\sigma(\varepsilon)} \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon_{cd}) d\varepsilon_{cd} \quad (12)$$

式中: ε_{cd} 为压实应变,由能量吸收效率-应变曲线的极值点对应的应变确定^[33, 40-41]。一般情况下,能量吸收效率的极值点通常是唯一的。然而,对于某些曲线,由于存在多个极值点,可能需要结合曲线的整体走势来判断极值点的位置。根据 3.1 节中的应力-应变曲线分析,并未出现多个极值点的情况。

图 15 为不同 CFRP 层数下煤圆柱的能量吸收效率曲线。可以观察到,随着 CFRP 层数的增加,在拐点之前,各曲线的能量吸收效率基本重合。然而,能量吸收效率的极值点随着 CFRP 层数的增加而增大,表明增加 CFRP 层数可以提升能量吸收效率的极值,从而影响煤圆柱的能量吸收性能。1~6 层 CFRP 布约束煤圆柱的能量吸收效率与无 CFRP 布约束相比分别提升了 2.64、3.92、5.16、6.27、7.88 和 10.51 倍,表明随着 CFRP 层数的增加,能量吸收效率显著提升,体现了 CFRP 层数对煤圆柱能量吸收性能的积极影响。

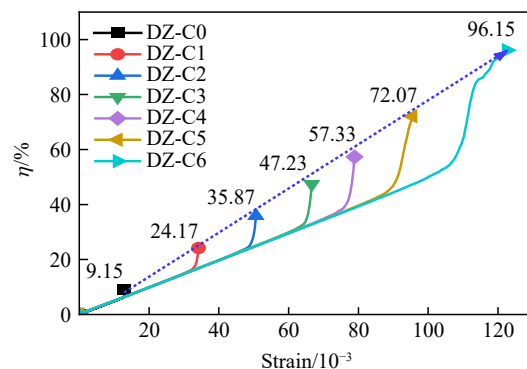


图 15 不同 CFRP 层数下煤圆柱的能量吸收效率曲线

Fig. 15 Energy absorption efficiency curves of cylindrical coal samples with different CFRP layers

5.3 CFRP 层数对煤圆柱失稳及能耗比的影响

在局部高应力的作用下,煤圆柱的强度失效不一定直接导致整体失稳,但目前的强度分析方法和准则对非均质煤体的强度变异性和整体失稳特征的解释存在局限性^[42]。针对 CFRP 布对煤圆柱的被动约束效果,可从能量演变的角度分析其内部裂隙扩展过程,通过研究总能量中耗散能与弹性能的比值关系,构建基于能量突变的失效判据,从而为进一步分析被动加固矿柱的整体稳定性提供理论依据。为此,引入弹性能耗比这一概念,即 CFRP 布约束煤圆柱的耗散能与弹性能之比(ξ),两者之间的关系如图 16 所示。

ξ 能够实时反映 CFRP 布约束煤圆柱在变形破坏过程中的能量耗散与储能变化状态^[22, 43]

$$\xi = \frac{U_d}{U_e} \quad (13)$$

根据 5.1 节中不同 CFRP 层数约束煤圆柱的弹性能和耗散能数据, 利用式 (13) 换算得到弹性能耗比曲线, 其中未约束煤圆柱的弹性能耗比曲线如图 17 所示, 1~6 层 CFRP 约束煤圆柱的弹性能耗比曲线如图 18 所示。可以看到, 在峰前阶段, 弹性能耗比 ξ 随着轴压的增加而迅速下降至某一拐点值, 然后缓慢上升, 在峰值应力对应的拐点处开始突增, 最后形成类似于“倒勾”的特征曲线。

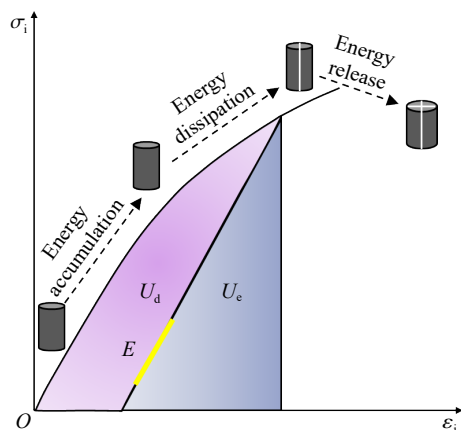


图 16 CFRP 约束煤圆柱的弹性能与耗散能的关系^[20]

Fig. 16 Relationship between elastic strain energy and dissipated energy of CFRP-confined cylindrical coal samples^[20]

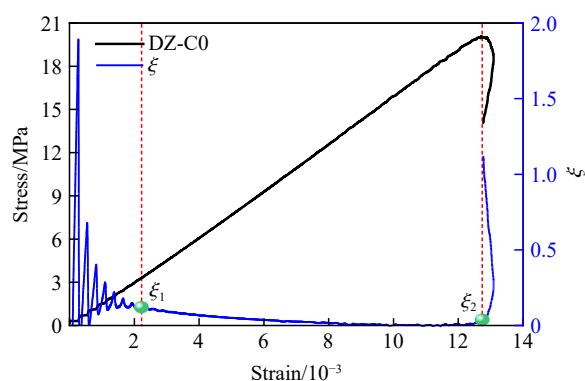
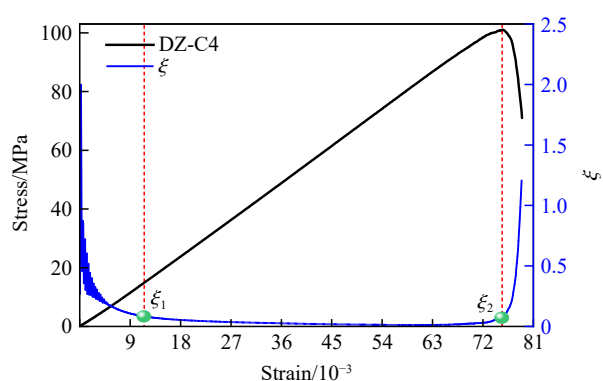
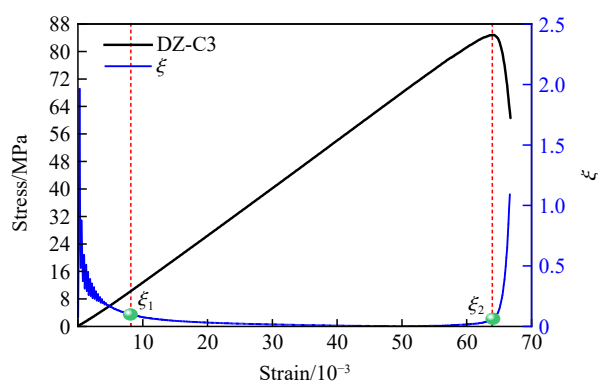
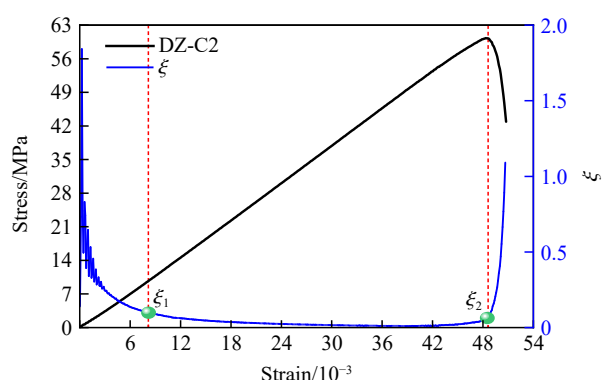
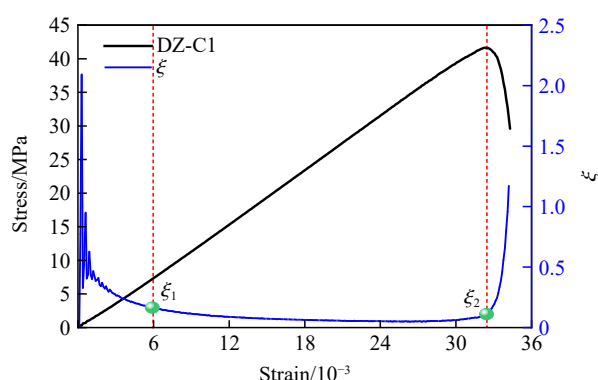


图 17 未约束煤圆柱的弹性能耗比曲线

Fig. 17 Elastic energy consumption ratio curves of unconfined cylindrical coal sample

可以看到, 不同 CFRP 层数下煤圆柱的弹性能耗比曲线特征与未约束的煤圆柱相似, 均出现“拐点”, 与文献 [22, 44] 中的结论一致。随着 CFRP 层数的增加, 弹性能耗比曲线逐渐向右延展, 拐点 (ξ_1 和 ξ_2) 对应的应变值逐步增大, 表明煤圆柱在失稳前可承受更高的应变和能量耗散。因此, 可以将失稳准则定义为: 当弹性能耗比达到拐点 ξ_1 对应的应变时, 煤圆柱进入稳定阶段; 当弹性能耗比达到拐点 ξ_2 对应的应变时, 煤圆柱进入失稳阶段。随着 CFRP 层数的增加, 失稳临界应变也相应增大, 体现出 CFRP 层对煤圆柱抗失稳能力的增强。



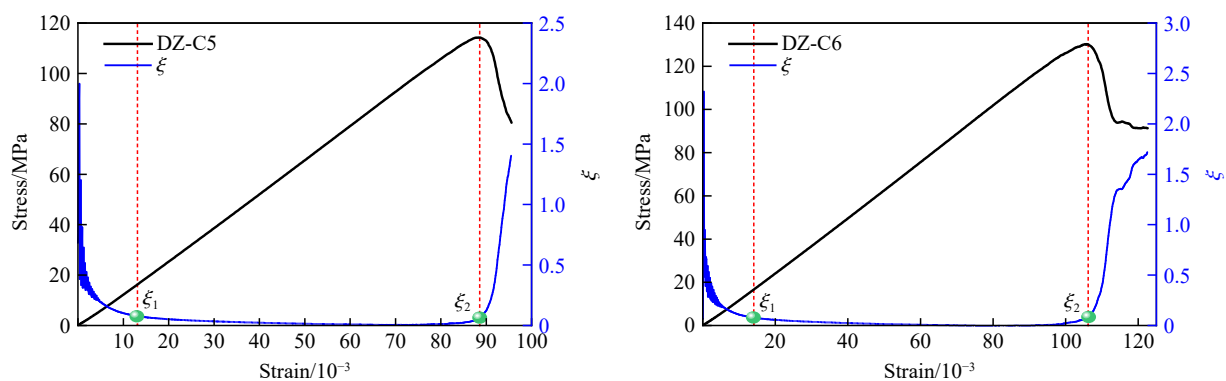


图 18 不同 CFRP 层数下煤圆柱的弹性能耗比曲线

Fig. 18 Elastic energy consumption ratio curves of cylindrical coal samples with different CFRP layers

6 CFRP 布等效厚度量化分析与讨论

本研究从能量的视角出发,深入探讨了 CFRP 布对煤柱的约束机理。CFRP 布主要通过以下机制实现煤柱力学性能的提升:首先,CFRP 布包覆于煤柱表面后,其高强度纤维的约束效应有效增强了界面强度和黏结力,显著提高了界面的稳定性,抑制了界面裂纹的形成和扩展;其次,CFRP 布包覆改善了煤柱表面的应力分布,缓解了局部应力集中的现象,从而增强了煤柱在复杂应力条件下的整体稳定性;此外,CFRP 布加固显著提升了煤柱的韧性,使其在劈裂失稳前能够吸收更多能量,并经历更充分的裂纹扩展过程,从而有效延缓失稳破坏的发生。这些机制为 CFRP 布在煤柱加固中的应用提供了理论支撑,进一步拓展了其在复杂地质条件下的适用性。为进一步定量分析 CFRP 布的约束效应,本研究引入了“等效厚度”概念,以系统评估不同包覆层数下的约束性能,为加固效果的精确分析与后续研究方向的拓展奠定基础。

图 19 显示了 CFRP 约束煤圆柱的机制,可以将 CFRP 布的约束视作一种具有一定厚度的煤套^[45-46]。基于此,提出采用等效厚度来量化 CFRP 布约束。根据煤圆柱截面内的平衡条件,可以计算出煤圆柱的约束应力

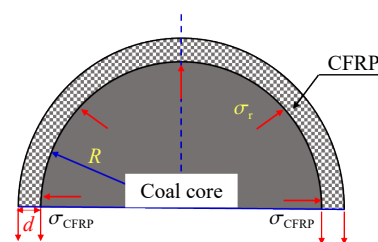


图 19 CFRP 布约束煤圆柱的机制

Fig. 19 Mechanism of CFRP-confined cylindrical coal samples

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{\text{CFRP}} d}{R} \quad (14)$$

式中: σ_r 为煤圆柱的约束应力, σ_{CFRP} 为 CFRP 布的环向应力, R 为煤圆柱的半径。

根据 2.1 节,考虑到 CFRP 布在破坏前处于线弹性,其应力-应变关系可以表示为

$$\sigma_{\text{CFRP}} = \varepsilon_{\text{cir,CFRP}} E_{\text{CFRP}} \quad (15)$$

式中: $\varepsilon_{\text{cir,CFRP}}$ 为 CFRP 布的环向应变, E_{CFRP} 为 CFRP 布的弹性模量。

根据煤圆柱截面内方向的兼容性,CFRP 布的环向应变可以视为与煤圆柱的环向应变 ε_{cir} 一致

$$\varepsilon_{\text{cir}} = \varepsilon_{\text{cir,CFRP}} \quad (16)$$

将式 (15) 和式 (16) 代入式 (14),可以得到环向应力与环向应变的关系

$$\sigma_{\text{cir}} = \frac{\varepsilon_{\text{cir}} E_{\text{CFRP}} d}{R} \quad (17)$$

CFRP 布的约束刚度 K_{CFRP} 可以表示为

$$K_{\text{CFRP}} = \frac{E_{\text{CFRP}}d}{R} \quad (18)$$

为了便于深入分析,利用煤圆柱的弹性模量对约束刚度进行归一化处理。同时,引入新的变量约束刚度比 λ

$$\lambda = \frac{E_{\text{CFRP}}d}{E_{\text{C0}}R} \quad (19)$$

式中: E_{C0} 为无约束煤圆柱的弹性模量。可以观察到,约束刚度与 CFRP 布的厚度成正比,表明通过调整约束煤圆柱表面的 CFRP 布层数可以改变约束刚度。

基于约束刚度相等的原则,可以计算出外围煤套的等效厚度^[47]。将煤套视为厚壁空心煤样,通过均匀内径压力作用下厚壁空心煤样的弹性解,能够得到径向应力与径向应变的关系。根据定义,煤圆柱的约束刚度可以通过径向应力与径向应变的比确定

$$K_c = \frac{E_c(r_t^2 - r^2)}{(1 + \nu)[r_t^2 - (1 - 2\nu_{\text{C0}})r^2]} \quad (20)$$

式中: ν 、 ν_{C0} 分别为 CFRP 约束煤圆柱和无约束煤圆柱的泊松比。

式 (18) 与式 (20) 的约束刚度相等,得到等效煤套厚度

$$d_{\text{eq}} = r_{\text{eq}} - r \quad (21)$$

式中: r_{eq} 为等效煤套半径, r 为煤圆柱半径, d_{eq} 为等效厚度。计算结果见表 8。可以看到,等效厚度随 CFRP 层数的增加呈非线性增大。

表 8 不同 CFRP 层数煤圆柱的约束刚度及等效厚度

Table 8 Confinement stiffness and equivalent thickness of cylindrical coal samples with different CFRP layers

n	d/mm	$E_{\text{CFRP}}/\text{GPa}$	$K_{\text{CFRP}}/\text{MPa}$	λ	d_{eq}/mm
1	0.167	47.54	317.57	0.165	1.86
2	0.334	47.54	635.13	0.329	4.37
3	0.501	47.54	952.70	0.494	7.99
4	0.668	47.54	1270.27	0.658	13.83
5	0.835	47.54	1587.84	0.823	25.53
6	1.002	47.54	1905.40	0.987	74.05

根据表 8 中的等效厚度绘制等效厚度曲线及其拟合曲线,如图 20 所示,其中,蓝色虚线为拟合曲线。拟合度表明拟合效果极佳。可以看到,等效厚度随 CFRP 层数增加迅速增大,且增速逐渐加快;当层数接近 6.78 时,等效厚度趋向于无限大,形成明显的“瓶颈”效应,说明等效厚度并不会随着层数的增加而无限增大。因此,在设计过程中,需要考虑等效厚度的同时避免资源浪费,达到优化材料利用率的目的。

7 结 论

结合 FDM-DEM 耦合数值模拟方法与室内单轴压缩试验,探讨不同 CFRP 布层数对煤圆柱能量演化的影响,得出以下结论。

(1) 单轴压缩试验结果显示,未约束和 CFRP 约束煤圆柱的应力-应变曲线均可分为压密、弹性、屈服和峰后 4 个阶段。CFRP 布约束煤圆柱在屈服和峰后阶段展现出明显的延性破坏特性,其平均峰值

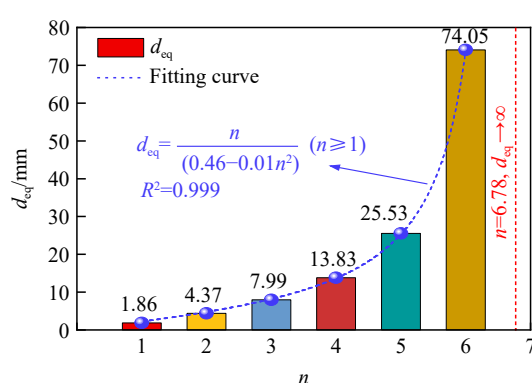


图 20 等效厚度柱状图及拟合曲线

Fig. 20 Equivalent thickness histograms and fitting curve

应力、峰值应变和弹性模量显著高于未约束煤圆柱,增幅分别约为 2、2.5 和 1 倍。

(2) 数值模拟结果表明,随着 CFRP 层数的增加,煤圆柱的峰值应变和峰值应力显著提升,增幅分别达到约 733% 和 548%,而弹性模量未呈现单调上升趋势,提示在设计应用中需综合考虑强度与刚度。随着 CFRP 层数增加,破坏机制由张拉破坏逐渐转变为剪切破坏,裂纹数量及分布特征的变化揭示了 CFRP 增强对应力分布和破坏过程的显著影响。

(3) 随着 CFRP 层数的增加,煤圆柱的总能量和耗散能显著提升,弹性能虽与应变无显著关系,但也呈上升趋势;能量吸收效率显著提高,最高可达 10.51 倍。同时,弹性能耗比曲线存在“拐点”,呈现出“倒勾”形状,表明煤圆柱能承受更高的应变与能量耗散,从而增强其抗失稳能力。基于此,提出了一种失稳判据,并给出了经验公式,明确了失稳临界应变与 CFRP 层数之间的关系。

(4) 引入“等效厚度”概念以量化 CFRP 布对煤圆柱的约束效应,从而系统评估不同 CFRP 层数条件下的约束性能。等效厚度随着 CFRP 层数的增加呈非线性增大,且在 6.78 层时,等效厚度趋近于无穷大,说明在设计过程中,需要考虑等效厚度的同时避免资源浪费,从而将材料利用率达到最优。

参考文献:

- [1] 任连伟, 宁浩, 邹友峰, 等. 采空区场地高速铁路路基变形控制研究现状与展望 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(8): 2534–2547.
REN L W, NING H, ZOU Y F, et al. Research status and prospect on deformation control of high-speed railway subgrade in goaf site [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2534–2547.
- [2] ZHANG C W, JIN Z X, FENG G R, et al. Double peaked stress-strain behavior and progressive failure mechanism of encased coal pillars under uniaxial compression [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(7): 3253–3266.
- [3] 孙克国, 刘旭, 袁子义, 等. 下伏缓倾煤层开采对既有铁路隧道安全性影响分析 [J]. *中国铁道科学*, 2022, 43(2): 86–95.
SUN K G, LIU X, YUAN Z Y, et al. Influence of excavation in underlying gently-inclined coal layer on the safety of existing railway tunnel [J]. *China Railway Science*, 2022, 43(2): 86–95.
- [4] 董建军, 李昕, 梅媛, 等. 老采空区地表变电站场地稳定性的 D-InSAR 监测 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(1): 62–71.
DONG J J, LI X, MEI Y, et al. D-InSAR monitoring of site stability for surface substation above old mine goaf [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(1): 62–71.
- [5] 郭庆彪. 煤矿老采空区上方高速公路建设安全性评价及其关键技术研究 [J]. *测绘学报*, 2019, 48(4): 532.
GUO Q B. Research on the safety evaluation and key technologies for the expressway construction on old goaf of coal mine [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(4): 532.
- [6] PRASSETYO S H, IRNAWAN M A, SIMANGUNSONG G M, et al. New coal pillar strength formulae considering the effect of interface friction [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 123: 104102.
- [7] 黄万朋, 赵同阳, 江东海, 等. 双巷掘进留窄小煤柱布置方式及围岩稳定性控制技术 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(3): 617–629.
HUANG W P, ZHAO T Y, JIANG D H, et al. Arrangement of double entry driving with a narrow coal pillar in the middle and stability control technology of surrounding rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(3): 617–629.
- [8] 谷长宛, 王波, 王军, 等. 基于胀锁式对穿锚索的沿空掘巷窄煤柱双向加固机理研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(4): 106–116.
GU C W, WANG B, WANG J, et al. Research on bidirectional-reinforcement mechanism of narrow coal pillar of gob-side entry driving based on inflatable lock-type anchor [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(4): 106–116.
- [9] 张洪伟, 万志军, 张源, 等. 工作面顺序接续下综放沿空掘巷窄煤柱稳定性控制 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(4): 1211–1219.
ZHANG H W, WAN Z J, ZHANG Y, et al. Stability control of narrow coal pillars in the fully-mechanized gob-side entry during sequenced top coal caving mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(4): 1211–1219.
- [10] 张洪伟, 万志军, 张源. 非充分稳定覆岩下综放沿空掘巷窄煤柱巷旁注浆加固机理 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(3): 489–495.
ZHANG H W, WAN Z J, ZHANG Y. Mechanism of grouted-reinforcement in last roadway for pillar in the fully-mechanized

- gob-side entry [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(3): 489–495.
- [11] 冯国瑞, 马俊彪, 白锦文, 等. 关键柱柱旁双侧充填遗留煤柱链式失稳防控效果研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(5): 945–956.
- FENG G R, MA J B, BAI J W, et al. Study of the prevention and control effect of residual coal pillars' chain failure after key pillar-double side backfilling [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(5): 945–956.
- [12] 陈绍杰, 张俊文, 尹大伟, 等. 充填墙提升煤柱性能机理与数值模拟研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(2): 268–275.
- CHEN S J, ZHANG J W, YIN D W, et al. Mechanism and numerical simulation of filling walls improving performance of coal pillar [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(2): 268–275.
- [13] SHAYANFAR J, BARROS J A O, REZAZADEH M. Stress-strain model for FRP-confined circular concrete columns developing structural softening behavior [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2024, 28(1): 04023065.
- [14] WANG J Z, XIAO H Q, LU L T, et al. Axial stress-strain model for concrete in partially FRP wrapped reinforced concrete columns [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 416: 135028.
- [15] LI H C, WEI Y, HU Y F, et al. Experimental and theoretical analysis of FRP-confined square lightweight aggregate concrete columns under axial compression [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20: e02982.
- [16] DAS A J, MANDAL P K, GHOSH C N, et al. Extraction of locked-up coal by strengthening of rib pillars with FRP-a comparative study through numerical modelling [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(2): 261–267.
- [17] 白锦文, 杨欣宇, 史旭东, 等. FRP 包裹对煤充结构体劈裂破坏特征的影响 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(Suppl 1): 3541–3557.
- BAI J W, YANG X Y, SHI X D, et al. Influence of FRP restricting on the splitting failure characteristics of coal-backfilling composite structures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(Suppl 1): 3541–3557.
- [18] XIA Z, YAO Q L, LI X H, et al. Acoustic emission characteristics and energy mechanism of CFRP-jacketed coal specimens under uniaxial compression [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 342: 127936.
- [19] 李庆文, 高安梁, 禹萌萌, 等. 碳纤维布均匀约束下煤圆柱的损伤演化 [J]. *金属矿山*, 2024(2): 104–113.
- LI Q W, GAO A L, YU M M, et al. Damage evolution of coal cylinder under uniform confinement of carbon fiber sheets [J]. *Metal Mine*, 2024(2): 104–113.
- [20] 李庆文, 胡露露, 曹行, 等. CFRP 布均匀约束煤圆柱轴压性能 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(11): 5611–5624.
- LI Q W, HU L L, CAO H, et al. Axial compressive behavior of CFRP uniformly wrapped coal in circular columns [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(11): 5611–5624.
- [21] 李庆文, 高森林, 胡露露, 等. 不同加载速率下非均质煤样能量耗散损伤本构关系 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(Suppl 1): 90–102.
- LI Q W, GAO S L, HU L L, et al. Constitutive relation of energy dissipation damage of heterogeneous coal samples under different loading rates [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(Suppl 1): 90–102.
- [22] 李庆文, 禹萌萌, 高森林, 等. 加载速率对碳纤维布被动约束煤能量演化的影响 [J]. *煤炭学报*, 2024, 49(Suppl 1): 236–247.
- LI Q W, YU M M, GAO S L, et al. Effect of loading rate on energy evolution of coal confined passively by CFRP sheets [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(Suppl 1): 236–247.
- [23] LI Q W, NIE F F, PAN C C, et al. Energy dissipation damage constitutive relation of CFRP passively confined coal sample [J]. *Heliyon*, 2024, 10(18): e37586.
- [24] 张亮, 王桂林, 雷瑞德, 等. 单轴压缩下不同长度单裂隙岩体能量损伤演化机制 [J]. *中国公路学报*, 2021, 34(1): 24–34.
- ZHANG L, WANG G L, LEI R D, et al. Energy damage evolution mechanism of single jointed rock mass with different lengths under uniaxial compression [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(1): 24–34.
- [25] WANG J C, WANG Z H, YANG S L. A coupled macro- and meso-mechanical model for heterogeneous coal [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 94: 64–81.
- [26] CAI W, BAI X X, SI G Y, et al. A monitoring investigation into rock burst mechanism based on the coupled theory of static and dynamic stresses [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(12): 5451–5471.
- [27] CAI W, DOU L M, SI G Y, et al. A new seismic-based strain energy methodology for coal burst forecasting in underground coal mines [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 123: 104086.
- [28] BIENIAWSKI Z T, HAWKES I. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1978, 15(3): 99–103.

- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 煤和岩石物理力学性质测定方法 第 10 部分: 煤和岩石抗拉强度测定方法: GB/T 23561.10—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. Methods for determining the physical and mechanical properties of coal and rock—part 10: methods for determining tensile strength of coal and rock: GB/T 23561.10—2010 [S]. Beijing: China Standard Press, 2011.
- [30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法: GB/T 3354—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. Test method for tensile properties of orientation fiber reinforced polymer matrix composite materials: GB/T 3354—2014 [S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- [31] 武仁杰, 李海波. SHPB 冲击作用下层状千枚岩多尺度破坏机理研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(8): 083106.
- WU R J, LI H B. Multi-scale failure mechanism analysis of layered phyllite subject to impact loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(8): 083106.
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of engineering rock mass: GB/T 50266—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [33] 李庆文, 禹萌萌, 刘艺伟, 等. GFRP 布被动约束标准煤矸石混凝土圆柱轴压性能细观模拟 [J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(7): 2458–2471.
- LI Q W, YU M M, LIU Y W, et al. Mesoscopic simulation on axial compression performance of standard coal gangue concrete circular-columns confined by GFRP sheet [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(7): 2458–2471.
- [34] ZHANG L, REN T, LI X C, et al. Acoustic emission, damage and cracking evolution of intact coal under compressive loads: experimental and discrete element modelling [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 252: 107690.
- [35] XIA B W, LI Y, HU H R, et al. Effect of crack angle on mechanical behaviors and damage evolution characteristics of sandstone under uniaxial compression [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(11): 6567–6582.
- [36] 李庆文, 才诗婷, 李涵静, 等. 单裂隙岩石-混凝土组合体断裂特征颗粒流模拟 [J]. *高压物理学报*, 2024, 38(5): 054202.
- LI Q W, CAI S T, LI H J, et al. Particle flow simulation of fracture characteristics of rock-concrete combination with single crack [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2024, 38(5): 054202.
- [37] 郭润兰, 范雅琼, 王广书, 等. 基于 PFC^{3D} 的机床床身用树脂矿物复合材料损伤性能细观研究 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(2): 834–844.
- GUO R L, FAN Y Q, WANG G S, et al. Meso-scale study on damage performance of resin mineral composite material for machine tool bed based on PFC^{3D} [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(2): 834–844.
- [38] 谭鑫, 曹明, 冯龙健, 等. 土工织物包裹碎石桩力学特性的数值模拟研究 [J]. *中国公路学报*, 2020, 33(9): 136–145.
- TAN X, CAO M, FENG L J, et al. Numerical study on mechanical behaviors of geotextile-wrapped stone column [J]. *Chinese Journal of Highways*, 2020, 33(9): 136–145.
- [39] 周宏元, 于鸿鑫, 王小娟, 等. 玄武岩纤维平纹织物约束建筑固体废弃物颗粒力学性能及吸能特性 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(2): 695–706.
- ZHOU H Y, YU H X, WANG X J, et al. Mechanical properties and energy absorption characteristics of basalt fiber plain woven fabric constrained building solid waste particles [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(2): 695–706.
- [40] 郭璐, 刘志芳, 李世强, 等. 改进型 FCC 晶格材料设计与吸能特性 [J]. *高压物理学报*, 2022, 36(1): 014206.
- GUO L, LIU Z F, LI S Q, et al. Design and energy absorption characteristic of improved FCC lattice materials [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(1): 014206.
- [41] 王小娟, 崔浩儒, 周宏元, 等. 玄武岩纤维增强泡沫混凝土的单轴拉伸及准静态压缩性能 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(3): 1569–1585.
- WANG X J, CUI H R, ZHOU H Y, et al. Mechanical performance of basalt fiber reinforced foam concrete subjected to quasi-static tensile and compressive tests [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(3): 1569–1585.
- [42] LI P, CAI M F. Energy evolution mechanism and failure criteria of jointed surrounding rock under uniaxial compression [J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(6): 1857–1874.
- [43] MA Q, TAN Y L, LIU X S, et al. Experimental and numerical simulation of loading rate effects on failure and strain energy

- characteristics of coal-rock composite samples [J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(10): 3207–3222.
- [44] 李子运, 吴光, 黄天柱, 等. 三轴循环荷载作用下页岩能量演化规律及强度失效判据研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3): 662–670.
- LI Z Y, WU G, HUANG T Z, et al. Variation of energy and criteria for strength failure of shale under triaxial cyclic loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3): 662–670.
- [45] ZHANG B W, FANG K, WANG C, et al. Energy evolution characteristics of rock under different confining conditions [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 886134.
- [46] 周华飞, 洪恒达, 谢子令, 等. CFRP 约束地质聚合物混凝土轴向应力-应变关系 [J]. *复合材料学报*, 2024, 41(1): 414–425.
- ZHOU H F, HONG H D, XIE Z L, et al. Axial stress-strain behavior of CFRP-confined geopolymer concrete [J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2024, 41(1): 414–425.
- [47] 何满潮, 钱七虎. 深部岩体力学基础研究与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- HE M C, QIAN Q H. Research and application of deep rock mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2010.

Effect of CFRP Layers on the Energy Evolution of Axial Compressed Cylindrical Coal Based on Particle Flow Software

LI Qingwen¹, PAN Chuangchuang¹, ZHANG Xuelei², ZHONG Yuqi¹,
LI Ling¹, NIE Fanfan¹, LI Wenxia¹, XU Mengjiao¹

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China;

2. China Building Materials Industry Geologic Exploration Center Liaoning Branch, Shenyang 110004, Liaoning, China)

Abstract: To investigate the effects of different layers of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) on the mechanical properties and energy evolution of axially compressed cylindrical coal samples, the finite difference method-discrete element method (FDM-DEM) coupled numerical simulation and laboratory uniaxial compression tests are combined in this paper. The test results show that both unconfined cylindrical coal samples and CFRP-confined samples undergo four stages in the stress-strain curve, namely, compression-tightness, elasticity, yielding, and post-peak. The CFRP-confined samples show obvious ductile damage in the yielding and post-peak stages, and their average peak stresses, peak strains, and elasticity modulus are about 2, 2.5 and 1 times higher than those of the unconfined samples, respectively. Numerical simulations show that the peak strain and peak stress increased to 733% and 548%, respectively, with the increase in the number of CFRP layers. The elastic modulus does not increase monotonically, indicating that a balance between strength and stiffness is required when designing the CFRP layers. In addition, the increase of CFRP layers leads to the change of the damage mechanism from tensile damage to shear damage, indicating that it has a significant effect on the stress distribution and damage process of the cylindrical coal samples. The total and dissipated energy of the cylindrical coal samples significantly increased with the increase of CFRP layers, and the energy absorption efficiency reaches up to 10.51 times, showing a significant enhancement of their destabilization resistance. To quantify the confinement effect of CFRP sheets, the concept of “equivalent thickness” is introduced. It is found that the equivalent thickness increases nonlinearly with the number of CFRP layers, and at 6.78 layers, the equivalent thickness approaches infinity, which emphasizes the importance of CFRP sheet in improving the stability of cylindrical coal sample structure, and provides an important reference for future research.

Keywords: uniaxial compression; carbon fiber reinforced plastic sheet; cylindrical coal; finite difference method-discrete element method; energy evolution; equivalent thickness