

高压物理学报

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

李庆文 高翔 谭正林 张帅帅 徐康康 才诗婷

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

LI Qingwen, GAO Xiang, TAN Zhenglin, ZHANG Shuaishuai, XU Kangkang, CAI Shiting

引用本文:

李庆文, 高翔, 谭正林, 等. 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[J]. 高压物理学报, 2025, 39(2):024201. DOI: 10.11858/gywlxb.20240861

LI Qingwen, GAO Xiang, TAN Zhenglin, et al. Microscopic Simulation Study on Uniaxial Compressive Creep Characteristics of Coal Samples Constrained by Different Numbers of Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(2):024201. DOI: 10.11858/gywlxb.20240861

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240861>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤岩组合体巴西劈裂动态力学特征数值分析

Numerical Analysis of Dynamic Mechanical Characteristics of Brazilian Splitting of Coal-Rock Combination Bodies

高压物理学报. 2022, 36(5): 054204 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220589>

深部煤层水压爆破裂纹扩展规律

Crack Propagation Regularity of Hydraulic Blasting in Deep Coal Seam

高压物理学报. 2022, 36(3): 035301 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20210912>

单裂隙岩石-混凝土组合体断裂特征颗粒流模拟

Particle Flow Simulation of Fracture Characteristics of Rock-Concrete Combination with Single Crack

高压物理学报. 2024, 38(5): 054202 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240723>

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/gywlxb.20220699>

非均质岩石动态断裂损伤细观特征模拟分析

Simulation Analysis of Mesoscale Characteristics in the Dynamic Fracture Damage of Heterogeneous Rock

高压物理学报. 2023, 37(4): 044204 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230638>

碳纤维增强复合材料夹芯板的砰击损伤特性

Damage Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Composite Sandwich Panels Subjected to Water Slamming Loading

高压物理学报. 2023, 37(1): 014203 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220653>

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

李庆文, 高 翔, 谭正林, 张帅帅, 徐康康, 才诗婷

(辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要:为探究不同数量碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)条带对轴压煤样蠕变力学特性的影响,耦合 PFC^{3D} 软件与 FLAC^{3D} 软件,结合伯格模型(Burger's)模型与平行黏结(Linearbond)模型,建立混合接触的细观数值模型。根据未约束煤与 6 条带 CFRP 约束煤样单轴压缩蠕变室内试验,验证了数值模型的可靠性。研究了 2~7 条带 CFRP 约束煤样在单轴压缩蠕变下的力学特性及能量演化。研究表明:随着条带数的增加,煤样在初始阶段的轴向应变整体呈现增大趋势,加速蠕变阶段轴向应变明显增大;混合接触模型内部接触的最大力整体呈现增大趋势;伯格模型接触数量与平行黏结模型接触数量的比值约为 1:9 时,数值模拟模型能够反映出煤样蠕变的力学特性;增加 CFRP 条带数,煤样的径向变形受到限制,产生的剪切微裂纹增多,煤样内部的剪切破坏更加严重,煤样的破坏形态由张拉破坏逐渐向剪切破坏转变;随着碳纤维布条带数量的增加,煤样的总能量、弹性能、耗散能均增加,在煤样发生蠕变失稳前,弹性能的变化与总能量的变化较为相似。

关键词:碳纤维增强复合材料;条带数;单轴压缩蠕变;伯格模型;PFC^{3D}-FLAC^{3D} 耦合

中图分类号: TU45; O521.9

文献标志码: A

根据英国石油公司发布的 2022 版《BP 世界能源展望》,我国在未来很长一段时间仍将稳居全球能源消费榜首^[1]。我国主要产煤区域多采用沿空掘巷留设煤柱的开采方式,留设煤柱主要用于支撑采空区,以保证巷道稳定与矿工安全^[2-3],还可以用于控制地面沉陷与防止水侵^[4-5]。煤柱在支撑过程中长期遭受载荷作用,发生蠕变变形^[6]。因此,煤柱加固成为热点研究课题之一。目前,加固煤柱主要采用锚索^[7]、注浆^[8]及充填墙^[9-10]等一种或多种方法联合的方式,但加固效果并不显著。

纤维布复合材料具有轻质、高强、耐疲劳、耐腐蚀、力学性能优越和便于施工等优点^[11-13],在建筑行业被大量用于结构或构件的加固和材料修复等方面。作为新兴材料,纤维布复合材料在土木工程中也引起了研究热潮,在混凝土和煤柱加固方面展现出极大的优势,其中,碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)的应用最广,效果最为明显。Jyoti 等^[14]首次采用纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)加固煤柱的新方法,开展了室内试验和数值模拟计算,结果表明,FRP 能有效提高煤样的承载能力和变形能力,加固效果显著。Zou 等^[15]提出的纤维增强复合材料(包括纤维增强聚合物和纤维增强水泥基)已被广泛用于提高混凝土结构的承载能力和延展性。Xu 等^[16]的研究结果表明,碳纤维增强复合材料 and 外包钢加固可以有效提高震损双层高架桥框架墩的强度和延性。马超等^[17]对 CFRP 加固的钢筋混凝土柱进行了抗震性能试验,分析了 CFRP 对钢筋混凝土柱侧向刚度和变形能

* 收稿日期: 2024-07-23; 修回日期: 2024-08-06

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

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: lgjzlqw@163.com

通信作者: 高 翔(1998—),男,硕士研究生,主要从事离散元-有限差分跨尺度耦合细观模拟研究。E-mail: 1693985067@qq.com

力的影响规律, 试验结果表明, CFRP 加固的地铁站中的钢筋混凝土柱能够降低地震作用带给地铁站结构的影响, 减小地震引起的混凝土柱的损伤。以上研究表明, 纤维复合材料加固结构或构件具有优越的性能, 但很少有针对条带包裹以及条带数对煤样单轴蠕变力学特性影响的研究。

煤岩蠕变研究始于 1939 年, Griggs^[18] 在砂岩、泥岩及粉砂岩研究中提出了流变本构关系式。Zhao 等^[19] 采用分级加载的方法, 研究了煤样在不同含水率下的蠕变特性, 结果表明, 随着含水率的增加, 煤样瞬时应变和蠕变增大。Wang 等^[20] 研究了预制裂隙的材料在不同围压下的蠕变特性, 结果表明, 围压增大时, 蠕变的应变变化率逐渐增大。此外, Xia 等^[21] 在经典伯格斯(Burger's)模型与颗粒流(particle flow code, PFC)程序中的平行黏结模型(Linearbond)结合的基础上, 提出了一种改进的模拟方法, 较好地模拟了软岩蠕变的全过程。袁海平等^[22] 基于摩尔-库伦准则, 将伯格斯模型与新提出的塑性元件串联, 构建出改进的伯格斯蠕变模型, 该模型能表现黏弹塑性偏量的特性和弹塑性体积力学行为, 并且推导出该模型对应的黏弹塑性本构关系。PFC 数值模拟使蠕变过程中的力学特性研究更加细观, 便于研究人员观察和了解蠕变过程中材料的力学特性。

因此, 本研究采用 PFC 与 FLAC 耦合进行连续和非连续的细观数值模拟, 并基于已有的试验数据, 开展 2~7 条 CFRP 条带约束煤样的单轴压缩蠕变特性及能量演化的细观模拟研究。

1 CFRP 条带约束下煤样的细观模拟建模

1.1 煤样的细观模拟建模

在 PFC^{3D} 6.0 数值模拟软件中加载 FLAC^{3D} 6.0 软件以实现两款软件的耦合。加载 FLAC^{3D} 6.0 软件完毕后, 构建与试验相同的煤样模型。煤样模型的半径为 25 mm, 高为 100 mm。依据文献[23-25]中煤样的数值模拟模型, 煤样模型由 8881 个颗粒组成, 颗粒的粒径均匀分布在 1.4~1.6 mm 范围内。数值模拟采用由平行黏结模型与伯格斯模型构成混合接触模型。

PFC^{3D} 6.0 中的平行黏结模型能够很好地模拟岩石的细观力学特性。颗粒与颗粒之间设置为平行黏结模型。平行黏结模型既可传递颗粒与颗粒之间的力, 还可传递力矩。平行黏结模型的接触如图 1 所示, 其中: F 为合力, F_n 为法向力, F_s 为切向力, M_n 为法向弯矩, M_s 为切向力矩, R 为黏结键半径, $R^{(A)}$ 和 $R^{(B)}$ 为颗粒的半径。

伯格斯模型是线性黏弹塑性模型, 可以用来描述煤样的初始蠕变变形和稳态蠕变变形。伯格斯模型是 PFC^{3D} 6.0 程序中内置的接触模型, 用于模拟颗粒间或颗粒与边界间的复杂接触行为, 能够表征颗粒材料在长期加载条件下的宏观时效力学响应。伯格斯模型由 Maxwell 体和 Kelvin 体串联而成, 如图 2 所示, 其中: E_1 为 Maxwell 体的弹性模量, E_2 为 Kelvin 体的弹性模量, η_1 为 Maxwell 体中黏性阻尼器的黏度系数, η_2 为 Kelvin 体中黏性阻尼器的黏度系数, μ 为滑动器的摩擦因数, K_{ms} 为 Maxwell 体的切向刚度系数, C_{ms} 为 Maxwell 体的切向黏性系数, C_{ks} 为 Kelvin 体的切向黏性系数, K_{ks} 为 Kelvin 体的切向刚度系数, K_{kn} 为 Kelvin 体的法向刚度系数, C_{kn} 为 Kelvin 体的法向黏性系数, K_{mn} 为 Maxwell 体的法向刚度系数, C_{mn} 为 Maxwell 体的法向黏性系数。

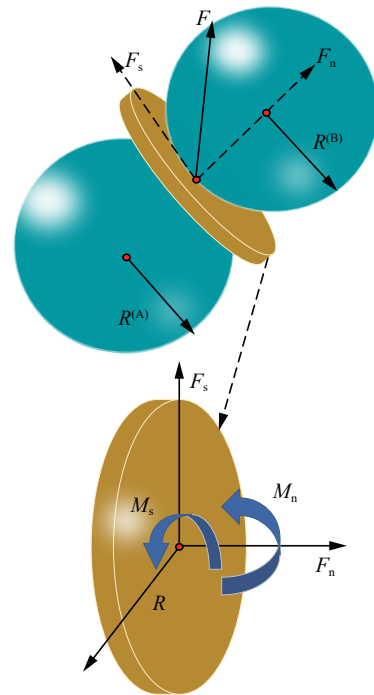


图 1 平行黏结模型接触示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the parallel bonding model for contact

混合接触模型的建立分为 3 步(见图 3): 首先, 将模拟试件中所有颗粒间的接触设置为平行黏结模型; 其次, 使用 loop foreach 函数遍历所有接触, 将接触模型存储为一个变量, 通过 if 语句判断变量是否为平行黏结模型, 再执行 math.random.uniform 函数生成一个在 0~1 之间的随机浮点数; 最后, 使用 if 语句进行判断, 如果随机浮点数小于 0.1, 则赋予该接触为伯格模型, 反之依旧为平行黏结模型。

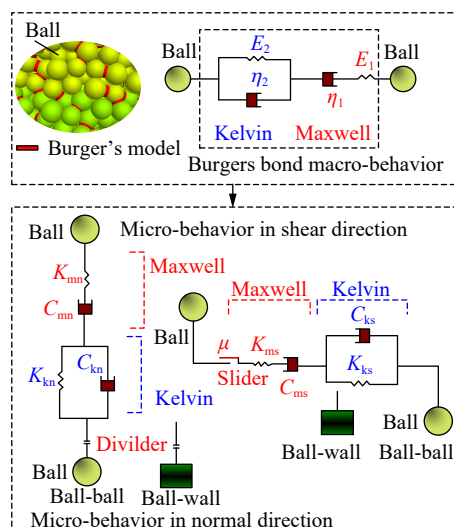


图 2 伯格模型接触示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the Burger's model for contact

Li 等^[26]对伯格模型接触占混合模型总接触的比例进行了深度的研究, 得出伯格模型占比适中时计算结果能够很好地反映岩石的蠕变力学特性。分配过多的伯格模型接触会导致颗粒与颗粒之间的接触过于光滑, 从而引起蠕变曲线的波动, 与试验的蠕变曲线产生较大差异; 分配过少的伯格模型接触则不能反映岩石的蠕变力学特性。经过多次尝试, 发现伯格模型接触占比在 10%~15% 范围内时, 计算结果能够匹配宏观岩石的力学特性。本研究通过试错法, 即多次调试伯格模型接触占比的方法, 最终确定伯格模型接触与平行黏结模型接触的比例为 1:9 时最合适。图 4 显示了数值模拟中试件颗粒间接触的构建, 其中, 绿色代表平行黏结模型接触, 红色代表伯格模型接触。

在采用“试错法”对细观模型参数进行模拟和验证^[27-29]的过程中, 不断改变 PFC^{3D} 6.0 软件中参数的数值来进行数值模拟计算, 直至计算获得的未约束煤样的蠕变-时间曲线与试验所得的结果在规定的误差范围之内。图 5 为模拟和试验所得的应变-时间曲线, 其中, S-1 为通过室内试验得出的结果, SM-1 为参数科学标定后数值模拟获得的结果。由图 5 可得未约束煤样的细观参数, 具体参数列于表 1。

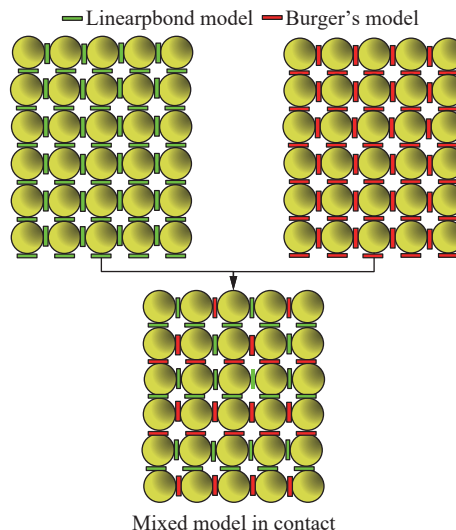


图 3 混合接触模型构建原理

Fig. 3 Construction principle of mixed contact model

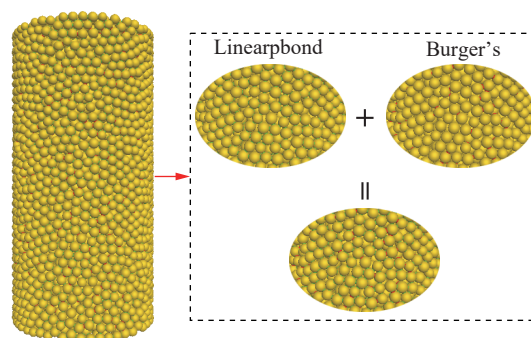


图 4 数值模拟中试件接触的构建

Fig. 4 Specimen contact construction for numerical simulation

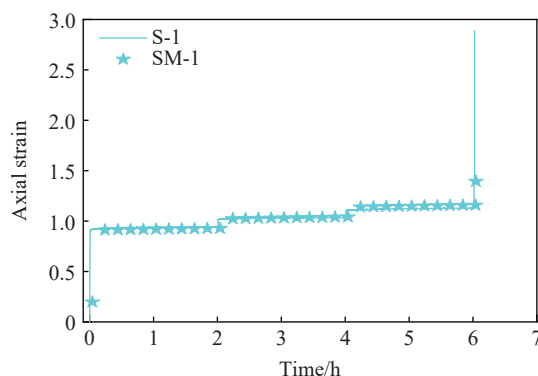


图 5 模拟和试验获得的素煤样的单轴蠕变-时间曲线

Fig. 5 Uniaxial creep-time curves of unconfined coal sample obtained by simulation and experiment

表 1 接触模型的细观参数
Table 1 Microscopic parameters of contact model

Linearbond model					
Linearbond effective modulus/GPa	Linearbond stiffness ratio	Normal bond strength/MPa	Tangential bond strength/MPa	Coefficient of friction	Angle of friction/(°)
1	1.4	10	10	1.5	50
Burger's model					
Maxwell bulk modulus/MPa	Maxwell viscosity coefficient/(MPa·s)	Kelvin bulk modulus/MPa	Kelvin viscosity coefficient/(MPa·s)	Coefficient of friction	
1	90	10	1	1.5	

1.2 CFRP 条带拉伸模拟

为确保 CFRP 条带对煤样约束的可靠性,对 CFRP 进行拉伸试验数值模拟。在 PFC^{3D} 6.0 数值模拟软件的 FLAC^{3D} 模块中建立 CFRP 条带模型,计算获得应力-应变曲线。图 6 为 CFRP 条带室内拉伸试验^[30]与数值模拟所得的载荷-应变曲线,数值模拟与室内试验结果比较吻合。图 6 中,CFRP-N(N 取 A~G)代表相同加载条件下室内试验得到的数据,M 代表基于科学参数标定方法的数值模拟结果。CFRP 条带的各项参数见表 2,其中, T_g 为 CFRP 条带的平均抗拉强度, E_g 为 CFRP 条带的平均弹性模量, t 为 CFRP 条带的层厚, ϕ_i 为界面摩擦角。

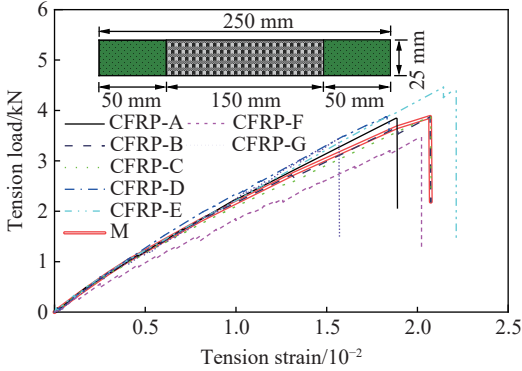


图 6 CFRP 条带载荷-应变曲线
Fig. 6 Tensile load-axial strain curves of CFRP sheets

表 2 CFRP 条带模型参数
Table 2 Model parameters of CFRP sheets

T_g /MPa	E_g /GPa	t /(mm·ply ⁻¹)	ϕ_i /(°)
918.07	47.54	0.167	30

1.3 CFRP 条带加固煤样模拟

利用 PFC^{3D} 6.0 软件将建立好的 CFRP 条带模型与煤样模型组合在一起,获得 CFRP 条带加固的煤样模型,如图 7 所示。依照李庆文等^[30]的全约束煤样轴压试验,采用位移控制方式进行加载,设置顶、底板以 0.1 mm/min 加载速度施加轴向载荷,直至试件破坏,得到峰值应力与峰值应变。然后,利用峰值应力与峰值应变的关系调整蠕变数值模拟中的应力。应力分为 4 级,初始的应力为单轴压缩试验极限强度的 80%,之后每级的增量都为 5% σ (σ 为单轴压缩试验极限强度)。图 8 为 6 条带 CFRP 约束煤样的应变-时间曲线,其中:S 代表室内试验;SM 代表数值模拟, S-1-6-10 和 SM-1-6-10 中的第 1 个数字代表 CFRP 条带包裹煤样的层数,第 2 个数字代表 CFRP 条带包裹煤样的

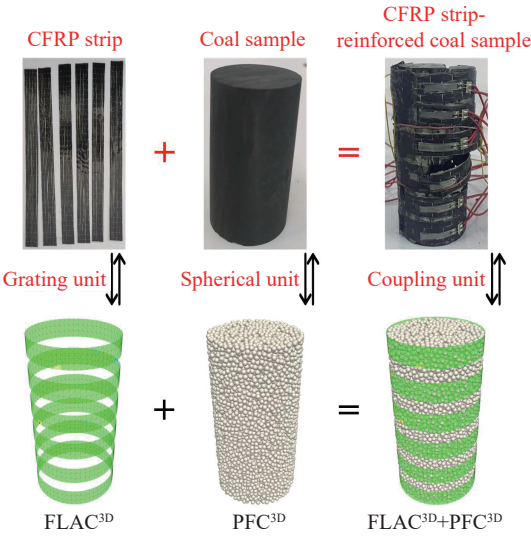


图 7 CFRP 条带约束煤样细观模型

Fig. 7 Microscale model of coal sample constrained by CFRP strips

条带数, 第 3 个数字代表 CFRP 条带包裹煤样的宽度(单位为 mm)。

1.4 细观数值模拟结论

由图 8 可知, 对于 6 条 CFRP 条带包裹的煤样, 在第 1 级加载时, 数值模拟的轴向应变略小于室内试验的轴向应变; 第 2 级加载时, 数值模拟和试验获得的轴向应变一致; 第 3 级加载时, 数值模拟获得的轴向应变略大于室内试验获得的轴向应变。总体而言, 数值模拟结果与室内试验结果较为一致, 应变精度达 93%, 达到精度要求。因此, PFC^{3D}-FLAC^{3D} 耦合方法可行, 参数设置较为科学准确。以下将采用该数值模拟方法开展不同数量 CFRP 条带约束煤样的单轴蠕变特性研究。

1.5 细观数值模拟方案设计

在煤样尺寸、加载速率、颗粒数不变的情况下, 采用 PFC^{3D}-FLAC^{3D} 耦合方法模拟 CFRP 条带包裹煤样的单轴压缩蠕变特性。数值模拟敏感性因素为 CFRP 条带数 n (n 取 2~7), 每个蠕变阶段的加载时间为 2 h, 轴压蠕变级数为 4。

2 细观数值模拟分析

2.1 应变-时间曲线

图 9 为数值模拟获得的 CFRP 条带包裹煤样的轴压蠕变-时间曲线。为了便于观察, 在应变-时间曲线上取 4 个特征点, 即 A、B、C、D。从图 9 可以看出, 条带约束煤样的应变-时间曲线可分为瞬时变形阶段 OA (蠕变时间为零时的变形)、衰减蠕变阶段 AB (蠕变速率从大到小的阶段)、稳态蠕变阶段 BC (蠕变速率趋于稳定) 及加速蠕变阶段 CD (蠕变速率快速增大)。综合分析不同数量 CFRP 条带包裹煤样的蠕变曲线发现, 初始应变随约束条带数的增加而增加。对比 2 条带包裹煤样与 3 条带包裹煤样的蠕变曲线发现, 3 条 CFRP 条带包裹煤样的初始轴向应变明显增大, 说明增加煤样中间部位的约束后, 煤样的抵抗变形能力明显加强。对比 3~7 条 CFRP 条带包裹煤样的蠕变曲线发现, 其初始轴向应变都明显增加, 且初始轴向应变的增加幅度较一致。对于 2~7 条 CFRP 条带包裹的煤样, 衰减蠕变阶段与稳态蠕变阶段无明显不同, 且每一级增加的应变幅度大致相同。在加速蠕变阶段, 轴向应变随着约束条带数的增加呈现明显增大的趋势, 直至煤样丧失承载力而发生破坏。从图 10 可以看出: 2~7 条 CFRP 条带包裹煤样的破坏形态呈现出相似的破坏特征, 均发生在试件的中间位置; 均匀分布的 3~7 条带的约束作用非常显著, 而布置在煤样两端的 2 条带约束效果并不明显。可见, CFRP 条带的布置数量及其位置对煤样的破坏形态具有重要影响, 尤其是中部条带能够更有效地增强煤样的侧向约束, 延缓破坏的发生。

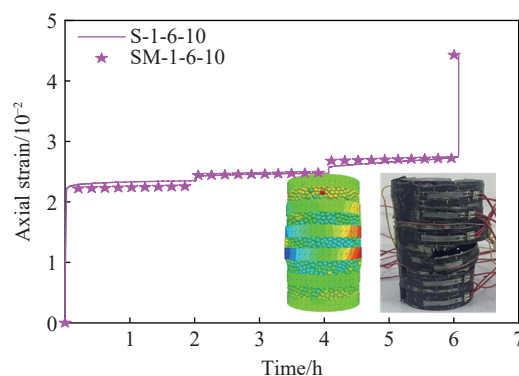


图 8 6 条 CFRP 条带约束煤样的应变-时间曲线

Fig. 8 Strain-time curve of coal sample constrained by 6 CFRP strips

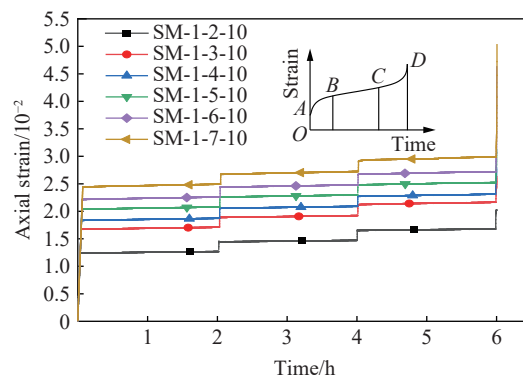


图 9 不同数量 CFRP 条带约束煤样的应变-时间曲线

Fig. 9 Strain-time curves for coal samples constrained by different numbers of CFRP strips

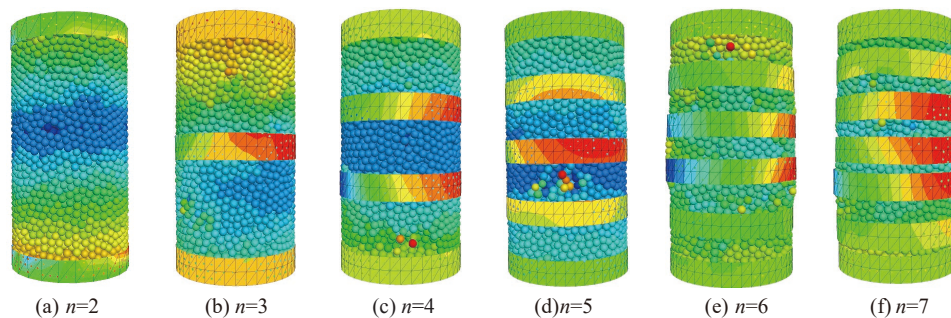


图 10 不同数量 CFRP 条带约束的煤样的破坏形态

Fig. 10 Damage patterns for coal samples constrained by different numbers of CFRP strips

2.2 接触力链

图 11 为 2~7 条 CFRP 条带约束煤样最终破坏模型的接触力链图。可见,煤样内部包括平行黏结接触模型与伯格斯接触模型,两者组成混合接触模型。表 3 为不同数量 CFRP 条带约束煤样破坏时力链的统计信息。随着条带数的增加,虽然从 3 条带约束到 4 条带约束以及从 6 条带约束到 7 条带约束,煤样的接触数量略增,但接触数量总体上呈现出不断减少的趋势;最大接触力总体上随着条带数的增加而增大,仅在 4 条带约束煤样到 5 条带约束煤样时最大接触力呈现出减小的趋势。

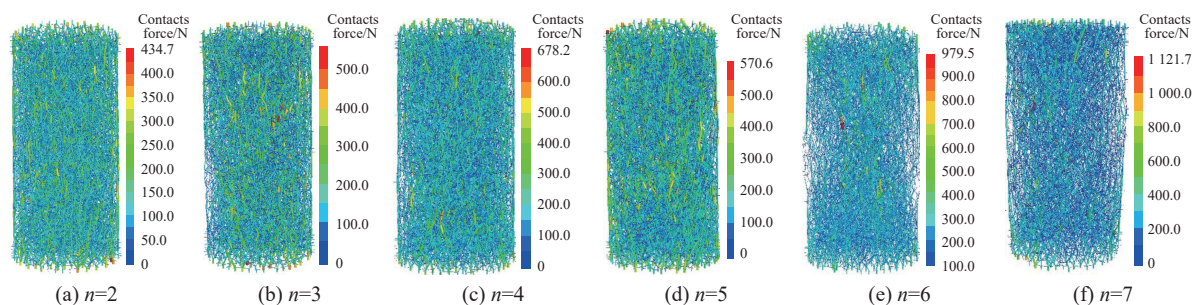


图 11 不同数量 CFRP 条带约束煤样破坏时混合接触模型

Fig. 11 Mixed contact model for coal samples at failure constrained by different numbers of CFRP strips

表 3 不同数量 CFRP 条带约束煤样破坏时的力链

Table 3 Force chains in coal samples at failure constrained by different numbers of CFRP strips

Number of strips	Number of contacts	Maximum contact force/N
2	30 511	434.7
3	28 852	534.9
4	29 378	678.2
5	28 609	570.7
6	25 655	979.5
7	25 747	1 121.7

2.3 不同数量 CFRP 条带包裹煤样的细观裂纹

开展单轴蠕变数值模拟时, PFC^{3D} 6.0 软件能够很好地呈现煤样内部微裂纹的演化过程。图 12 为不同数量 CFRP 条带约束煤样破坏时的裂隙空间分布, 其中, 粉色为剪切裂纹, 红色为拉伸裂纹。表 4 列出了相应的裂隙数量统计。综合分析图 12 和表 4 可知, 2 条 CFRP 条带包裹煤样的裂纹主要为拉伸裂纹, 剪切裂纹数量仅为 7, 剪切裂纹占比微乎其微, 裂纹在煤样中较均匀分布, 最终破坏形态表现为张拉破坏。3 条 CFRP 条带包裹煤样的裂纹主要为拉伸裂纹, 相比于 2 条 CFRP 条带包裹煤样, 其剪切裂纹数量明显增多, 剪切裂纹数量与拉伸裂纹数量之比大致为 1 : 9, 破坏形态表现为张拉破坏, 局部发生

剪切破坏, 裂纹开始向煤样中部集中。4 条 CFRP 条带包裹煤样的裂纹主要为拉伸裂纹, 但拉伸裂纹总数比 3 条 CFRP 条带包裹煤样的拉伸裂纹总数少, 剪切裂纹增多, 剪切裂纹数量与拉伸裂纹数量之比大致为 1.5 : 8.5, 破坏形态表现为拉伸破坏, 局部发生剪切破坏, 裂纹主要集中在中间 2 条附近, 裂纹总量减少。相比于 4 条 CFRP 条带包裹煤样, 5 条 CFRP 条带包裹煤样的拉伸裂纹数量增多, 剪切裂纹数量也明显增多, 剪切裂纹数量与拉伸裂纹数量的比值(约为 3 : 7)明显增大, 破坏形态表现为拉伸破坏, 但局部剪切破坏增多, 裂纹主要集中在中间 3 条带附近, 裂纹总量增多。6 条带包裹煤样的拉伸裂纹数量急剧增加, 剪切裂纹数量是 5 条 CFRP 条带包裹煤样剪切裂纹数量的 2 倍左右, 剪切裂纹数量与拉伸裂纹数量的比值(约为 2.6 : 7.4)与 5 条 CFRP 条带包裹煤样的比值相比, 呈下降趋势, 破坏形态表现为拉伸破坏, 局部剪切破坏明显, 裂纹主要集中在中间 4 条带部分, 且裂纹十分密集, 裂纹总量明显增多。7 条 CFRP 条带包裹煤样的拉伸裂纹数量较 6 条 CFRP 条带包裹煤样的拉伸裂纹数量明显减少, 剪切裂纹数量是 6 条带的 2 倍左右, 剪切裂纹数量明显增加, 剪切裂纹数量与拉伸裂纹数量之比约为 5.3 : 4.7, 剪切裂纹数量多于拉伸裂纹数量, 破坏形态表现为剪切破坏, 局部发生拉伸破坏, 裂纹主要集中在中间 5 条带附近, 且裂纹非常密集, 裂纹总量最多。

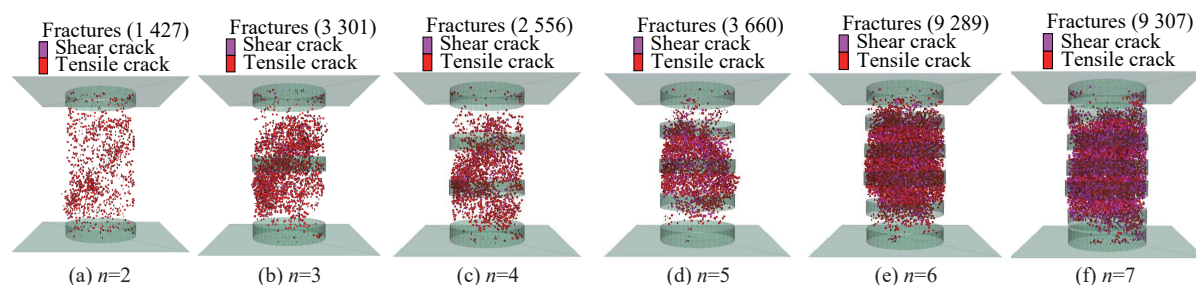


图 12 不同数量 CFRP 条带约束煤样破坏时的裂隙空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of cracks in damaged coal samples constrained by different numbers of CFRP strips

表 4 不同数量 CFRP 条带约束煤样破坏时的裂隙数量

Table 4 Number of cracks in the failure of coal samples constrained by different numbers of CFRP strips

Number of strips	Number of tension cracks	Number of shear cracks	Total number of cracks
2	1420	7	1427
3	3014	287	3301
4	2167	389	2556
5	2553	1107	3660
6	6832	2457	9289
7	4295	5012	9307

随着 CFRP 条带数的增加, 煤样的剪切裂纹数量逐渐增加, 煤样的破坏形态由张拉破坏为主逐渐向剪切破坏为主转变。这说明, 随着 CFRP 条带数的增加, CFRP 条带的约束能力不断增强, 煤样的径向变形受到限制, 煤样内部的剪切破坏更加严重, 产生的剪切微裂纹数量也越多。随着 CFRP 条带数的增加, CFRP 条带对煤样侧表面约束效果越显著, 从而限制了煤样的侧向变形, 促使煤样内部裂隙发育更加完善, 最终导致煤样破坏时裂纹总数不断增加。

2.4 不同数量 CFRP 条带包裹煤样的裂纹演化

图 13 为不同数量 CFRP 条带约束煤样轴压蠕变时的裂纹演化曲线, 煤样的裂纹累积量随时间变化的规律与轴向应变随时间变化的规律一致。结合图 9 中的蠕变特征点, 可将微裂纹扩展分为初始扩展阶段(衰减蠕变 AB 段)、稳定扩展阶段(稳定蠕变 BC 段)、加速扩展阶段(加速蠕变 CD 段), 其中, 稳定裂纹扩展阶段的时间最长, 与文献 [31] 的结论一致。煤样发生瞬时弹性变形时未产生裂纹, 裂纹演化

始于衰减蠕变阶段, 该阶段的裂纹数量增长缓慢。随着时间的推移, 煤样的蠕变损伤程度加深, 裂纹的增量不断变大, 裂纹进入加速发展阶段。煤样经过长时间蠕变, 裂纹逐渐发展为宏观裂隙, 最终导致煤样破坏。

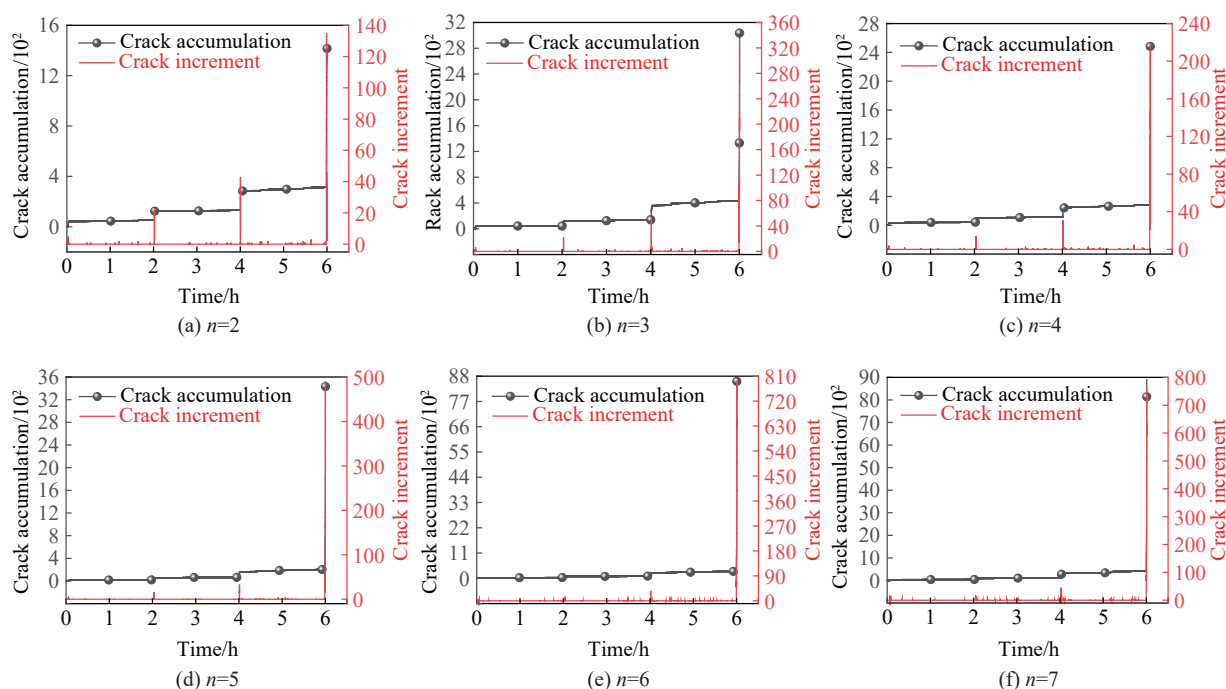


图 13 不同数量 CFRP 条带约束煤样轴压蠕变时的裂纹演化曲线

Fig. 13 Crack evolution curves for coal samples constrained by different numbers of CFRP strips under axial compression creep test

由图 13 可知, 在加速蠕变阶段, 随着条带数的增加, 裂纹数量的增量整体呈现增长趋势, 说明条带约束煤样的裂纹大量发展时才会发生失稳破坏, 条带的约束作用很强。对比不同条带包裹下煤样发生衰减蠕变时 (AB 段) 的裂纹增量: 第 1 次发生衰减蠕变时, 裂纹增量最少; 第 2、3 次发生衰减蠕变 (AB 段) 时, 裂纹增量增加; 最后, 在加速蠕变阶段 (即最后的上升段), 裂纹增量最多。对比 3 次瞬时变形阶段发现, 随着条带数的增加, 裂纹增量加大, 说明条带约束越多, 煤样在抗压强度增大的同时, 内部损伤发展的程度加深。

3 CFRP 条带数对煤样能量演化规律的影响

3.1 能量计算原理

不同数量 CFRP 条带约束下煤样单轴蠕变的破坏过程也是内部能量的演化过程, 如图 14^[32-33] 所示。煤样破坏过程中, 外部施加的载荷对煤样做功。当煤样经历塑性形变时, 这部分功发生转化: 一部分转化为塑性应变能, 储存在煤样的形变结构中; 一部分则因煤样内部微裂缝的萌生与扩展转化为损伤能; 同时, 有一定比例的能量以其他形式耗散掉; 最后, 剩余的能量以弹性能的形式储存在煤样中。弹性能具有可逆性, 会逐渐累积直至煤样达到破坏临界点, 之后, 大量能量会迅速释放, 一部分导致损伤加剧, 另一部分以热辐射、热交换等微小形式散失, 其数值通常很小, 一般情况下可忽略不计。岳少飞等^[34] 采用能量耗散规律进行分析, 进一步阐释了无烟煤蠕变过程中的“硬化-损伤”机制。杨磊等^[35] 通过颗粒流数值程序 PFC^{2D}, 获得了能够较真实地反映煤样宏观力学特性的细观参数, 分析了不同冲击倾向性煤在单轴压缩下的能量演化规律和损伤特征。基于能量守恒定律, 可得

$$U = U^d + U^e \quad (1)$$

式中: U 为蠕变过程的总输入能, U^d 为以塑性能和损伤能为主的耗散能, U^e 为储存在煤样内部的弹性能。

煤样内部各部分能量为

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (2)$$

$$U^e = \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1^e + \frac{1}{2} \sigma_2 \varepsilon_2^e + \frac{1}{2} \sigma_3 \varepsilon_3^e \quad (3)$$

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

将式 (4) 代入式 (3), 可得

$$U^e = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (5)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第 1 主应力、第 2 主应力、第 3 主应力, 本研究中 σ_1 也称为轴向应力, σ_2 、 σ_3 也可称为侧向应力; ε_1^e 、 ε_2^e 、 ε_3^e 分别为主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 对应的弹性应变; ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 对应的应变; E 为初始弹性模量; ν 为泊松比。本研究的单轴蠕变过程中, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 故弹性应变能为

$$U^e = \sigma_1^2 / 2E \quad (6)$$

因为

$$E = \sigma_1 / \varepsilon_1 \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (6), 可得

$$U^e = \frac{\sigma_1 \varepsilon_1}{2} \quad (8)$$

综上分析可得, 破坏应力-应变曲线与横轴应变所构成的面积即为蠕变总能量, 依据定积分面积计算原理, 单轴压缩蠕变总能量为

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_1^i + \sigma_1^{i+1}) (\varepsilon_1^{i+1} - \varepsilon_1^i) \quad (9)$$

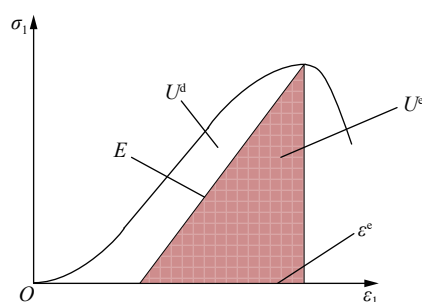


图 14 能量计算原理^[32-33]

Fig. 14 Principle of energy calculation^[32-33]

3.2 不同数量 CFRP 条带包裹煤样的能量演化规律

基于 PFC^{3D}-FLAC^{3D} 耦合的数值模拟计算获得的应力-应变数据, 计算了单轴压缩蠕变下不同条带数 CFRP 条带包裹煤样的总能量、耗散能和弹性能, 结果见图 15。图 15 中, 横轴为轴向应变; 纵轴为能量密度, 单位 J/cm³。由图 15 可知, 随着条带数的增加, CFRP 条带包裹煤样的总能量整体上呈上升趋势, 耗散能整体上也呈现不断上升趋势。在产生瞬时应变时, 曲线出现轻微抖动。煤样的弹性能和耗

散能的总和为总能量。不同数量 CFRP 条带包裹煤样的弹性能整体上呈不断上升的趋势。在蠕变的瞬时变形阶段, 曲线光滑上升。在衰减蠕变阶段和稳态蠕变阶段, 弹性能曲线发生“台阶状”抖动, 在此阶段, 当保持荷载不变时, 弹性能曲线的斜率呈现出微小的增长趋势, 当瞬间增大荷载进入下一蠕变阶段时, 弹性能瞬间增大。在加速蠕变阶段, 弹性能并没有增大, 反而出现了减小的趋势。在蠕变的瞬时变形阶段, 耗散能曲线呈现光滑上升趋势。在衰减蠕变阶段和稳态蠕变阶段耗散能呈现“锯齿状”抖动, 且抖动幅度随着轴向应变的增大而增大。在加速蠕变阶段, 耗散能呈现出明显的上升趋势, 且增长幅度明显大于瞬时变形阶段的耗散能。

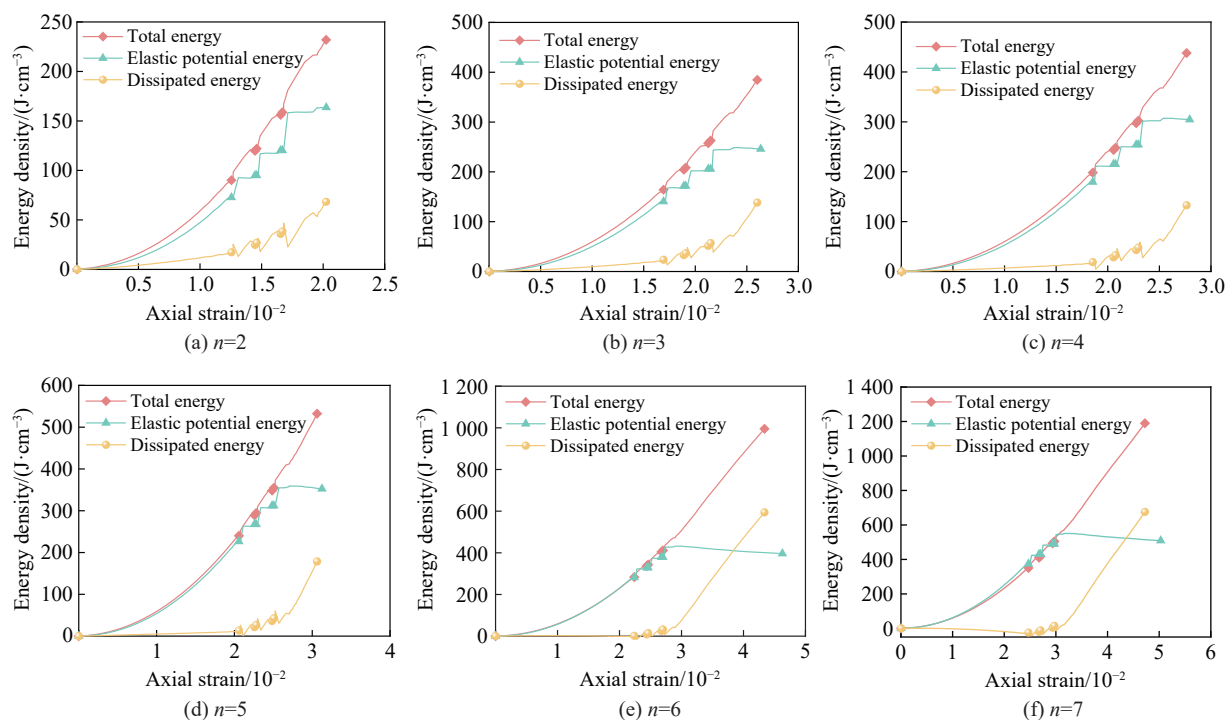


图 15 2~7 CFRP 条带约束煤样的能量演化

Fig. 15 Energy evolution in coal samples constrained by 2~7 CFRP strips

4 结 论

(1) 利用 PFC^{3D} 和 FLAC^{3D} 软件进行数值模拟试验, 耦合伯格斯模型与平行黏结模型, 获得了混合接触模型; 建立了 CFRP 条带包裹煤样的跨尺度数值模拟模型, 并开展了单轴蠕变试验。单轴蠕变的数值模拟结果能够很好地反映室内蠕变试验特性, 并能够很好地反映瞬时蠕变、衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变 4 个阶段。

(2) 随着 CFRP 条带数的增加, 煤样在瞬时蠕变阶段的初始轴向应变增加较为明显; 在衰减蠕变阶段与稳态蠕变阶段, 轴向应变无明显变化; 在加速蠕变阶段, 轴向应变明显增加, 尤其是 6 条带约束和 7 条带约束的情形。

(3) 随着 CFRP 条带数的增加, 混合接触模型内部的接触数量整体上呈现减少趋势, 混合接触模型的内部最大接触力整体上也呈现增加趋势。

(4) 随着 CFRP 条带数的增加, 环向约束效果越显著, 剪切裂纹与总裂纹的数量也逐渐增长, 致使煤样的破坏形态由张拉破坏逐渐向剪切破坏转变。

(5) 随着 CFRP 条带数的增加, 总能量、弹性能、耗散能均增加, 在煤样发生蠕变失稳前, 弹性能的变化与总能量的变化较相似

参考文献:

- [1] 蒋威. 厚硬基本顶综放开采沿空巷道变形破坏机制及控制 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2021.
JIANG W. Deformation mechanism and stability control of roadway along goaf in fully mechanized top coal caving face with thick and hard roof [D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2021.
- [2] ZHAO T B, GUO W Y, TAN Y L, et al. Case studies of rock bursts under complicated geological conditions during multi-seam mining at a depth of 800 m [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(5): 1539–1564.
- [3] ZHU W B, CHEN L, ZHOU Z L, et al. Failure propagation of pillars and roof in a room and pillar mine induced by longwall mining in the lower seam [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(4): 1193–1209.
- [4] JIANG S Y, FAN G W, LI Q Z, et al. Effect of mining parameters on surface deformation and coal pillar stability under customized shortwall mining of deep extra-thick coal seams [J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 2138–2154.
- [5] CAO Y, XU J H, CHEN L, et al. Experimental study on granite acoustic emission and micro-fracture behavior with combined compression and shear loading: phenomenon and mechanism [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 22051.
- [6] YANG Y J, DUAN H Q, XING L Y, et al. Fatigue characteristics of coal specimens under cyclic uniaxial loading [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2019, 42(2): 331–346.
- [7] 王波, 谷长宛, 王军, 等. 对穿锚索加固作用下沿空掘巷留设煤柱承压性能试验研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(2): 262–270.
WANG B, GU C W, WANG J, et al. Bearing capacity experimental study of coal pillar in the gob-side entry driving under the reinforcement of inflatable lock-type anchor [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(2): 262–270.
- [8] 赵国贞, 马占国, 孙凯, 等. 小煤柱沿空掘巷围岩变形控制机理研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2010, 27(4): 517–521.
ZHAO G Z, MA Z G, SUN K, et al. Research on deformation controlling mechanism of the narrow pillar of roadway driving along next goaf [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2010, 27(4): 517–521.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] WANG Z Y, FENG P, ZHAO Y, et al. FRP-confined concrete core-encased rebar for RC columns: concept and axial compressive behavior [J]. *Composite Structures*, 2019, 222: 110915.
- [12] SIWOWSKI T, RAJCHEL M. Structural performance of a hybrid FRP composite-lightweight concrete bridge girder [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 174: 107055.
- [13] AL-SAADIN T K, MOHAMMED A, AL-MAHAIDI R, et al. A state-of-the-art review: near-surface mounted FRP composites for reinforced concrete structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 209: 748–769.
- [14] JYOTI D A, KUMAR M P, NATH G C, 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.
- [15] ZOU X X, D'ANTINO T, SNEED L H. Investigation of the bond behavior of the fiber reinforced composite-concrete interface using the finite difference method (FDM) [J]. *Composite Structures*, 2021, 278: 114643.
- [16] XU C X, WU Y A, LIU X Q, et al. Experimental research on seismic behavior of seismic-damaged double-deck viaduct frame pier strengthened with CFRP and enveloped steel [J]. *Materials*, 2022, 15(23): 8668.
- [17] 马超, 王作虎, 路德春, 等. CFRP 加固地铁车站结构中柱地震损伤评价研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(12): 2249–2256.
MA C, WANG Z H, LU D C, et al. Seismic damage evaluation of CFRP-strengthened columns in subway stations [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(12): 2249–2256.
- [18] GRIGGS D. Creep of rocks [J]. *The Journal of Geology*, 1939, 47(3): 225–251.
- [19] ZHAO Z, WU P, WANG L, et al. Influence of moisture content on creep mechanical characteristic and mic-fracture behavior of water-bearing coal specimen [J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 4014462.
- [20] WANG D B, ZLOTNIK S, DÍEZ P, et al. A numerical study on hydraulic fracturing problems via the proper generalized

- decomposition method [J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2020, 122(2): 703–720.
- [21] XIA C, LIU Z, ZHOU C Y. Burger's bonded model for distinct element simulation of the multi-factor full creep process of soft rock [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(9): 945.
- [22] 袁海平, 曹平, 许万忠, 等. 岩石粘弹塑性本构关系及改进的 Burgers 蠕变模型 [J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(6): 796–799.
- YUAN H P, CAO P, XU W Z, et al. Visco-elastoplastic constitutive relationship of rock and modified Burgers creep model [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(6): 796–799.
- [23] HE P F, KULATILAKE P H S W, YANG X X, et al. Detailed comparison of nine intact rock failure criteria using polyaxial intact coal strength data obtained through PFC^{3D} simulations [J]. *Acta Geotechnica*, 2018, 13(2): 419–445.
- [24] 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.
- [25] 王刚, 王锐, 武猛猛, 等. 渗透压-应力耦合作用下煤体常规三轴试验的颗粒流模拟 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(Suppl 1): 537–546.
- WANG G, WANG R, WU M M, et al. Simulation of conventional triaxial test on coal under hydro-mechanical coupling by particle flow code [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Suppl 1): 537–546.
- [26] LI W J, HAN Y H, WANG T, et al. DEM micromechanical modeling and laboratory experiment on creep behavior of salt rock [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 46: 38–46.
- [27] 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]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(9): 136–145.
- [28] 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.
- [29] 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.
- SHI C, ZHANG Q, WANG S N. Numerical simulation technology and application with particle flow code (PFC 5.0) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [30] 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.
- [31] 胡光辉, 徐涛, 陈崇枫, 等. 基于离散元法的脆性岩石细观蠕变失稳研究 [J]. *工程力学*, 2018, 35(9): 26–36.
- HU G H, XU T, CHEN C F, et al. A microscopic study of creep and fracturing of brittle rocks based on discrete element method [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(9): 26–36.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 岳少飞, 王开, 张小强, 等. 不同加载速率无烟煤蠕变特性及能量演化规律 [J]. *煤炭学报*, 2023, 48(8): 3060–3075.
- YUE S F, WANG K, ZHANG X Q, et al. Creep properties and energy evolution of anthracite coal with different loading rates [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(8): 3060–3075.
- [35] 杨磊, 王晓卿, 李建忠. 不同冲击倾向性煤单轴压缩下能量演化与损伤特征 [J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(6): 111–118.
- YANG L, WANG X Q, LI J Z. Energy evolution and damage characteristics of coal with different bursting liability under uniaxial compression [J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(6): 111–118.

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

LI Qingwen, GAO Xiang, TAN Zhenglin, ZHANG Shuaishuai, XU Kangkang, CAI Shiting

(School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China)

Abstract: To investigate the influence of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strip with different number on the creep mechanical properties of coal samples under axial compression, a coupled numerical simulation using PFC^{3D} and FLAC^{3D} software was conducted, and a hybrid contact model combining the Burger's model and the Linearpbond model was established. The reliability of the numerical model was validated based on laboratory uniaxial compressive creep tests of unconstrained coal and coal samples constrained with 6 strips of CFRP sheet. The mechanical properties and energy evolution of coal samples constrained with 2 to 7 strips of CFRP sheet under uniaxial compression were studied by numerical simulations. The results show that as the number of strips increases, the initial axial strain of the coal sample tends to increase overall, with a significant increase in axial strain during the accelerated creep stage, and the maximum internal contact force in the hybrid contact model tends to increase overall. The ratio of the contact quantity of Burger's model to that of Linearpbond model is about 1 : 9, and this ratio in the numerical simulation model could reflect the creep mechanical properties of coal samples. Increasing the number of CFRP strips restricts radial deformation, increases the number of shear micro-cracks, causes more severe shear damage within the coal sample, and the failure mode of the coal sample changes from tensile failure to shear failure. As the number of strips increases, the total energy, elastic energy, and dissipated energy all increase, and the change in elastic energy is similar to the change in total energy before the coal sample experiencing creep instability.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer; strip number; uniaxial compressive creep; Burger's model; PFC^{3D}-FLAC^{3D} coupling