

高压物理学报

CFRP部分包裹煤圆柱的约束机制与力学特征

李庆文 李玲 潘创创 钟宇奇 聂帆帆 杨浩

Constraint Mechanism and Mechanical Characteristics of CFRP Partially Wrapped Coal Columns

LI Qingwen, LI Ling, PAN Chuangchuang, ZHONG Yuqi, NIE Fanfan, YANG Hao

引用本文:

李庆文, 李玲, 潘创创, 等. CFRP部分包裹煤圆柱的约束机制与力学特征[J]. 高压物理学报, 2025, 39(6):064102. DOI: 10.11858/gywlb.20240919

LI Qingwen, LI Ling, PAN Chuangchuang, et al. Constraint Mechanism and Mechanical Characteristics of CFRP Partially Wrapped Coal Columns[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(6):064102. DOI: 10.11858/gywlb.20240919

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240919>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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

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

高压物理学报. 2025, 39(4): 045302 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240931>

纤维增强复合材料层合板抗侵彻的多尺度模拟方法

Multiscale Simulation Method for Anti-Penetration of Fiber-Reinforced Composite Laminates

高压物理学报. 2025, 39(5): 054201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240940>

短碳纤维增强仿生材料设计及其力学性能

Design and Mechanical Properties of Short Carbon Fiber Reinforced Biomimetic Materials

高压物理学报. 2023, 37(4): 044102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230639>

聚能侵彻体作用下钢-CFRP层合板的防护性能

Protective Performance of Steel-CFRP Laminates under Sharped Charge Projectile

高压物理学报. 2023, 37(2): 024202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220698>

水下接触爆炸作用下金属/CFRP复合层合板的防护性能

Protective Properties of Metal/CFRP Composite Laminates Subjected to Underwater Contact Explosion

高压物理学报. 2024, 38(6): 065101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240801>

CFRP 部分包裹煤圆柱的约束机制与力学特征

李庆文, 李 玲, 潘创创, 钟宇奇, 聂帆帆, 杨 浩

(辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 碳纤维增强复合材料 (carbon fiber reinforced plastic, CFRP) 包裹是一种极具吸引力的煤柱加固技术。三向受压煤柱因侧向膨胀受限, 其抗压强度明显高于单轴受压煤柱, 在巷道中 CFRP 加固预留煤柱比未加固煤柱更具优势。为此, 设计了不同 CFRP 层数和净间距比的煤圆柱试样, 通过单轴压缩试验, 测定了各试样的应力-应变曲线、峰值强度、极限应变等力学参数, 深入探讨了 CFRP 约束对煤圆柱力学行为的影响, 以及不同参数下煤圆柱的破坏模式。结果表明, CFRP 条带约束煤圆柱和 CFRP 全约束煤圆柱表现出相似的力学特性。CFRP 条带约束煤圆柱在单轴压缩下表现出显著的强化效果, 随着净间距比的减小和 CFRP 层数的增加, 煤圆柱的峰值强度和抗变形能力均显著增强。同时, CFRP 的约束作用能够有效抑制煤圆柱的横向膨胀, 改变其破坏模式, 延缓破坏的发生。此外, 基于 Richart 模型和 Hoek-Brown 模型, 利用试验数据进行修正和对比分析, 得到了 CFRP 条带约束煤圆柱的 Richart 修正强度模型。

关键词: 碳纤维增强复合材料; 煤圆柱; 净间距比; 环向应变; 强度模型

中图分类号: O346; O521.9; TD32

文献标志码: A

随着煤炭深采技术的发展和开采深度的增加, 矿场环境日益复杂。煤柱作为关键支护结构, 其稳定性对于矿工安全、巷道稳定及环境保护至关重要^[1-3]。目前, 最常见的煤柱加固措施包括锚索^[4-5]、注浆^[6-7]、喷射混凝土^[8]和充填墙^[9]等。然而, 传统加固措施在长期承载条件下的弱化不可避免, 通过减小煤柱尺寸以提高煤炭资源采出率方面的改善并不显著, 成本高、施工时间长、施工不便等缺点日益突出。纤维增强复合材料 (fiber reinforced plastic, FRP) 因其轻质、强度高、耐腐蚀等优异的性能, 逐渐成为建筑行业中加固与修复的关键材料, 在混凝土加固领域展现出显著优势^[10-16]。

近年来, 部分学者开始将 FRP 材料应用到煤柱加固领域, 探索约束状态下煤柱的力学性能。其中, Das 等^[17]首次采用碳纤维增强复合材料 (carbon fiber reinforced plastic, CFRP) 加固煤柱, 发现小尺寸煤柱在单轴试验中的承载能力和抗变形能力显著提高。Li 等^[18]研究了 CFRP 约束砂基材料柱的轴压性能, 提出新型 CSBM (CFRP-confined sand-based material) 柱, 在煤矿巷道围岩稳定性控制中具有潜在的技术和经济优势。白锦文等^[19]通过巴西劈裂试验指出, FRP 约束可显著提高煤充结构体的荷载承受能力, 减少界面裂纹, 降低脆性, 增强界面强度, 提升稳定性。Shi 等^[20]研究证实, FRP 能有效抑制裂纹扩展, 提升试件的稳定临界荷载和能量释放率, 从而解决煤回填复合结构界面应力集中导致的劈裂破坏问题。李庆文等^[21-24]、Li 等^[25]基于 CFRP 布约束煤柱的轴心受压试验, 发现 CFRP 的被动约束显著改变了煤柱的破坏形态, 提高了其轴向变形能力和峰值强度, 并利用有限差分法软件 FLAC 与颗粒离散单元法软件 PFC 耦合方法研究了缠绕层数对力学性能的影响。Xia 等^[26-27]对包裹 CFRP 布的煤样进行了

* 收稿日期: 2024-10-22; 修回日期: 2024-11-22

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、离散元-有限差分跨尺度耦合数值模拟研究. E-mail: lgjzlw@163.com

通信作者: 李 玲 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事计算颗粒力学研究. E-mail: 1957829590@qq.com

单轴压缩试验,并建立了损伤演化方程,结合分形理论分析了声发射(acoustic emission, AE)事件的时空分形特征,用于 CFRP 加固煤柱的稳定性监测和损伤评估。

综上所述,现有研究主要集中于 FRP 对试件的全约束形式,涉及 FRP 部分约束的研究相对较少,尤其是在煤柱加固领域。因此,本研究借鉴 FRP 加固混凝土柱的成功经验,结合煤柱加固的相关研究,提出采用 CFRP 条带对煤柱进行部分约束的方案,以小型煤柱为研究对象,开展 CFRP 条带部分约束的单轴压缩试验,通过调整 CFRP 的层数和条带净间距比,探讨这些因素对煤圆柱抗压强度和极限应变等力学性能的影响,分析 CFRP 条带部分约束与全约束煤圆柱在约束机制和破坏模式上的差异,建立 CFRP 条带部分约束煤圆柱的强度模型。

1 试 验

1.1 试样准备

试验所用煤圆柱采自同煤集团塔山煤矿,依据国际岩石力学学会(ISRM)推荐的试验方法^[28],将煤圆柱加工成直径为 50 mm、高度为 100 mm 的圆柱形试样。将试样的尺寸误差控制在 0.03 mm 以内,两端面的平行度偏差小于 0.05 mm,端面与轴线的垂直度偏差小于 0.25°,共制备了 39 个试件,如图 1 所示。对加工后的煤圆柱进行测试,得到其物理参数:密度为 1 400~1 600 kg/m³,含水率为 3.41%~5.82%,波速为 1 600~2 800 m/s。

1.2 CFRP 拉伸试验

根据 GB/T 3354—2014《定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法》得到 CFRP 的拉伸曲线,如图 2^[22]所示,试件分组编号为 CFRP-1~CFRP-7。CFRP 试件的拉伸试验在 WDW-300 微机控制电子万能试验机上进行,恒定速率为 2 mm/min。最终得到 CFRP 材料的性能参数如表 1^[22]所示。

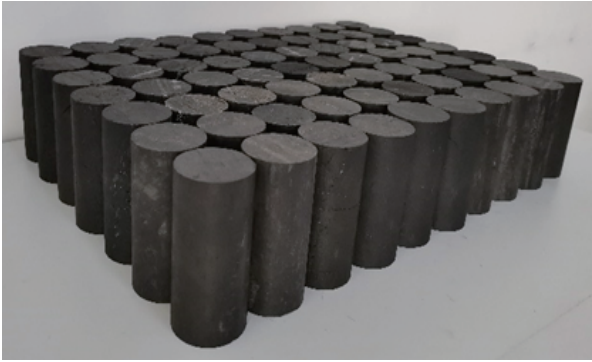


图 1 煤圆柱标准试样
Fig. 1 Standard coal columns specimens

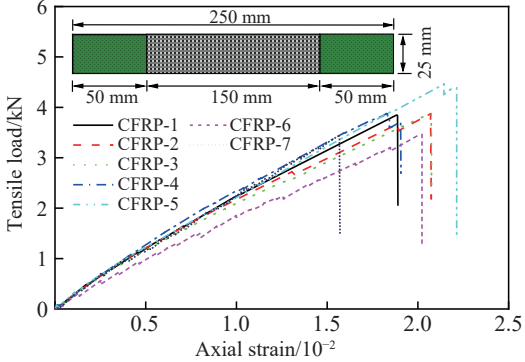


图 2 CFRP 布的拉伸载荷-应变曲线^[22]
Fig. 2 Tensile load-strain curves of CFRP sheets^[22]

表 1 CFRP 布的性能参数^[22]
Table 1 Parameters of CFRP sheets^[22]

Elastic modulus/GPa	Thickness/mm	Tensile strength/MPa	Ultimate tensile strain/%
47.54	0.167	918.07	1.94

1.3 试验方案

借鉴混凝土粘贴 CFRP 布的方式,采用湿法工艺^[29],将 CFRP 条带沿煤圆柱的圆周方向定向缠绕,搭接长度为 50 mm。在湿法工艺中,使用双组分高性能黏结剂将 CFRP 粘贴在煤圆柱上,A 组分为低黏度高性能环氧树脂,B 组分为固化剂,两者的质量比为 2 : 1。基本参数如表 2 所示。

表 2 A、B 胶参数
Table 2 Parameters of A and B glue

Type	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/MPa	Elongation ratio/%	Compressive strength/MPa
A	≥ 40	$\geq 2\,500$	≥ 1.5	≥ 70
B	≥ 30	$\geq 1\,500$	≥ 1.5	≥ 70

按照不同约束方案将煤圆柱试件进行分组,包括 3 个未约束试件、6 个 CFRP 全约束试件和 30 个 CFRP 条带约束试件,改变 CFRP 条带的净间距比,形成不同的约束方式,如图 3 所示,其中: D 、 H 分别为煤圆柱的直径和长度。缠绕完成后,将试样置于实验室阴凉通风处进行养护,直至试验开始。

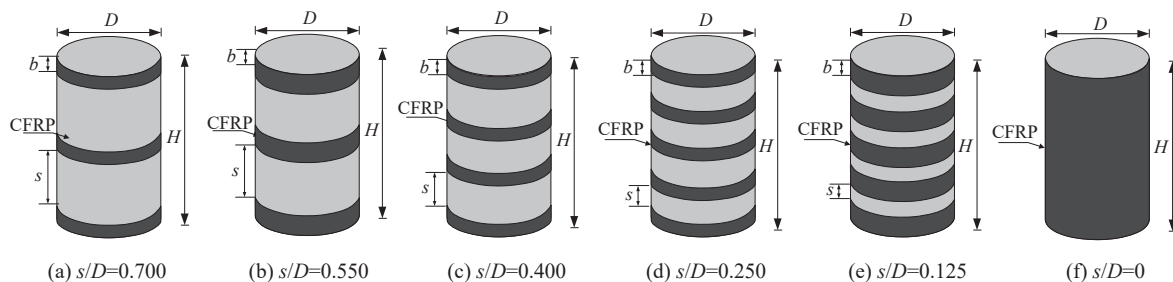


图 3 CFRP 约束煤圆柱示例

Fig. 3 Examples of coal columns constrained by CFRP

试件编号和 CFRP 条带的详细信息如表 3 所示,其中: s 为 CFRP 条带之间的间距, L 为约束层数, n 为试件个数, b 为条带宽度。表 3 中,第 1 组为未约束煤圆柱(SC),第 2 组为 CFRP 全约束煤圆柱(SF),第 3 组~第 5 组为在 1~3 层不同净间距比(s/D)下的 CFRP 条带约束煤圆柱(SP)。CFRP 条带约束煤圆柱试件的净间距比均小于 1,当 $s/D=0$ 时,则表示 CFRP 全约束煤圆柱。

表 3 试验方案
Table 3 Test scheme

Group No.	Specimen	s/D	L	s/mm	n	b/mm
1	SC		0		3	
2	SF-1	0	1	0	2	100
	SF-2	0	2	0	2	100
	SF-3	0	3	0	2	100
3	SP-1-0.700	0.700	1	35.00	2	10
	SP-1-0.550	0.550	1	27.50	2	15
	SP-1-0.400	0.400	1	20.00	2	10
	SP-1-0.250	0.250	1	12.50	2	10
	SP-1-0.125	0.125	1	6.25	2	15
4	SP-2-0.700	0.700	2	35.00	2	10
	SP-2-0.550	0.550	2	27.50	2	15
	SP-2-0.400	0.400	2	20.00	2	10
	SP-2-0.250	0.250	2	12.50	2	10
	SP-2-0.125	0.125	2	6.25	2	15
5	SP-3-0.700	0.700	3	35.00	2	10
	SP-3-0.550	0.550	3	27.50	2	15
	SP-3-0.400	0.400	3	20.00	2	10
	SP-3-0.250	0.250	3	12.50	2	10
	SP-3-0.125	0.125	3	6.25	2	15

1.4 试验装置

采用 SAM-2000 微机控制电液伺服岩石三轴压力试验机对试件进行单轴压缩试验, 如图 4(a) 所示, 加载速率为 0.12 mm/min。试验机可施加的最大轴向压力为 2 000 kN。为了监测煤圆柱的变形情况, 在试件各条带处、横向和纵向位置的中点处粘贴应变片以测量环向应变和轴向应变, 如图 4(b) 所示。其中: H1、H2、H3 和 H4 为横向应变片, S1、S2 为纵向应变片。采用 DH3816 静态应变测试系统采集应变片数据, 采样频率为 50 Hz。试验按照 GB/T 50266—2013《工程岩体试验方法标准》进行, 所有试验数据如荷载、位移和应变等均由数据记录仪同步记录。

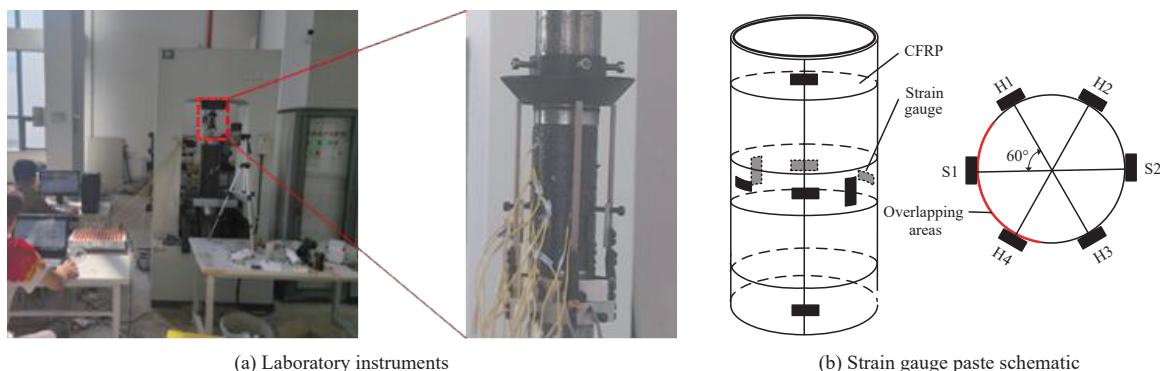


图 4 单轴压缩试验

Fig. 4 Uniaxial compression test

2 试验结果分析

2.1 破坏模式

不同 CFRP 约束形式下煤圆柱的破坏形态呈现出显著差异, 如表 4 所示。可以看到, 未约束煤圆柱的破坏模式呈现出以拉伸破坏为主、剪切破坏为辅的拉-剪混合破坏。煤圆柱在轴向应力的作用下出现应力集中, 使得局部区域产生拉应力与剪应力耦合, 易引发破坏。同时, 煤圆柱内部的微裂隙、孔隙等缺陷的非均质特性导致局部区域在受力下更易产生拉应力或剪应力, 这些缺陷的扩展加剧了应力不均匀, 进一步促进了拉-剪混合破坏的形成。

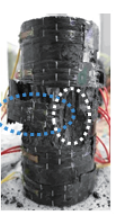
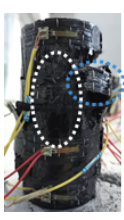
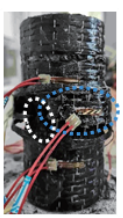
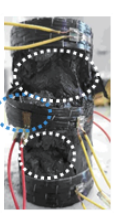
$s/D=0$ 的全约束煤圆柱的破坏模式与未约束煤圆柱明显不同, 具体表现为全约束煤圆柱中部或端部的 CFRP 发生环向受拉断裂, 导致煤圆柱失去轴向承载力而破坏。此破坏模式的成因是 CFRP 的约束作用和能量积累。外部载荷的增加会导致系统内的应变能逐渐积累; 由于 CFRP 的高强度和煤圆柱的脆性, 煤圆柱可能在低应力水平下出现微观裂纹和破裂; 但是, 这些损伤不能有效释放足够的能量, 致使能量继续在系统内积聚, 积聚的能量无法通过进一步的弹性变形来吸收, 而是迅速释放, 能量的释放过程将导致条带断裂。这种破坏模式体现了 CFRP 对煤圆柱的强约束作用, 以及 CFRP 材料在承受环向拉力时的极限性能。

$s/D \neq 0$ 的条带约束煤圆柱的破坏机制是 CFRP 条带断裂与煤圆柱局部破碎的混合破坏模式^[30]。此破坏模式主要受到净间距比的影响和 2 种破坏机制的综合作用。CFRP 条带约束情况下, 试件存在非约束区, 不同区域的约束效果差异将导致承载力与变形能力的不匹配, 进而影响破坏模式。CFRP 的失效导致周围区域的应力集中, 进而加速煤圆柱的局部破坏, 带动应力重新分布, 并加剧 CFRP 条带的受力, 使其断裂。其中, CFRP 条带断裂主要发生在条带约束煤圆柱的中部。当煤圆柱受压膨胀时, CFRP 承受环向拉力。当其环向抗拉强度不足以抵抗环向拉力时, 便发生断裂, 导致煤圆柱失去承载力^[31]。另外, 煤圆柱局部破碎主要发生在无约束区域。这是由于无约束区域的约束力小于 CFRP 条带约束区域的约束力, 在轴向载荷作用下, 易引发无约束区域的煤圆柱受拉变形破坏。

随着 CFRP 层数增加, 在相同净间距比下, 煤圆柱的变形承受能力增强, 但破坏程度也加剧^[32]。当

s/D 较大时, CFRP 条带之间的间距较大, 在轴向应力作用下, 煤圆柱的无约束区域产生较大变形和应力集中, 导致无约束区域局部失效, 形成明显破坏。CFRP 条带对煤圆柱的局部约束作用使得无约束区域出现较为剧烈的破坏。当 s/D 较小时, CFRP 条带间的约束力显著增强, 有效限制了煤圆柱的变形。在更高密度的约束下, 能量能够更好地在结构中传递和耗散, 降低了剧烈破坏的可能性, 但局部剥落仍是应力释放的一种形式。这反映了在较小的 s/D 下 CFRP 对煤圆柱具有强约束能力, CFRP 能够更好地与煤圆柱接触并提供强有力的支撑, 从而提升煤圆柱的承载能力。

表 4 不同 CFRP 约束形式下煤圆柱的破坏模式
Table 4 Failure modes of coal columns under different CFRP confinement

L	s/D						Unconfined coal column
	0	0.125	0.250	0.400	0.550	0.700	
1							
2							
3							

Note: The areas circled by the white dashed lines in the table indicate localized crushing of the coal column, while the areas circled by the blue dashed lines indicate the fracture of the CFRP strips.

综上所述, 煤圆柱的破坏模式主要受到 s/D 和 CFRP 层数的影响。其中, 未约束煤圆柱主要表现出自由变形和应力释放特性; 全约束煤圆柱由于 CFRP 的强约束作用, 主要发生 CFRP 断裂; 而 CFRP 条带约束煤圆柱由于 s/D 的改变则呈现出 CFRP 条带断裂与煤圆柱局部破碎的混合破坏模式。

2.2 应力-应变曲线

图 5 展示了不同 s/D 下 CFRP 约束煤圆柱的应力-应变曲线, 其中: σ_1 为轴向应力, ε_1 为轴向应变。这些曲线清晰地显示了未约束、全约束和条带约束对煤圆柱力学性能的影响。

未约束煤圆柱的应力-应变曲线中, 应力达到抗压强度后迅速下降, 表现出典型的脆性破坏特征。在 CFRP 的强约束作用下, 试件的破坏过程复杂化, 全约束煤圆柱展示了完全不同的力学行为。在达到抗压强度前, CFRP 提供了环向约束, 延缓了试件的破坏过程, 使应力-应变曲线经历了较长的上升阶段。当接近抗压强度时, CFRP 开始断裂, 试件失去承载力, 应力迅速下降。由于煤是非均质脆性材料, 在受到外力作用时, 煤圆柱上的裂纹容易扩展, 应力瞬间下降。在 CFRP 的约束作用下, 曲线会出现“跌落上升”现象。CFRP 材料具有较高的强度和一定的延展性, 但其约束作用的发挥需要逐步加载到较高的应变水平。当煤圆柱处于低应力水平时, CFRP 还未完全发挥作用, 因而出现“跌落”; 而随着应变

增加, CFRP 对煤圆柱的约束更强, 抑制了应力的下跌, 使应力水平恢复并持续上升, 呈现出动态应力集中、裂纹扩展与闭合过程。此外, 随着 CFRP 层数的增加, 试件的抗压强度和极限应变均增加。

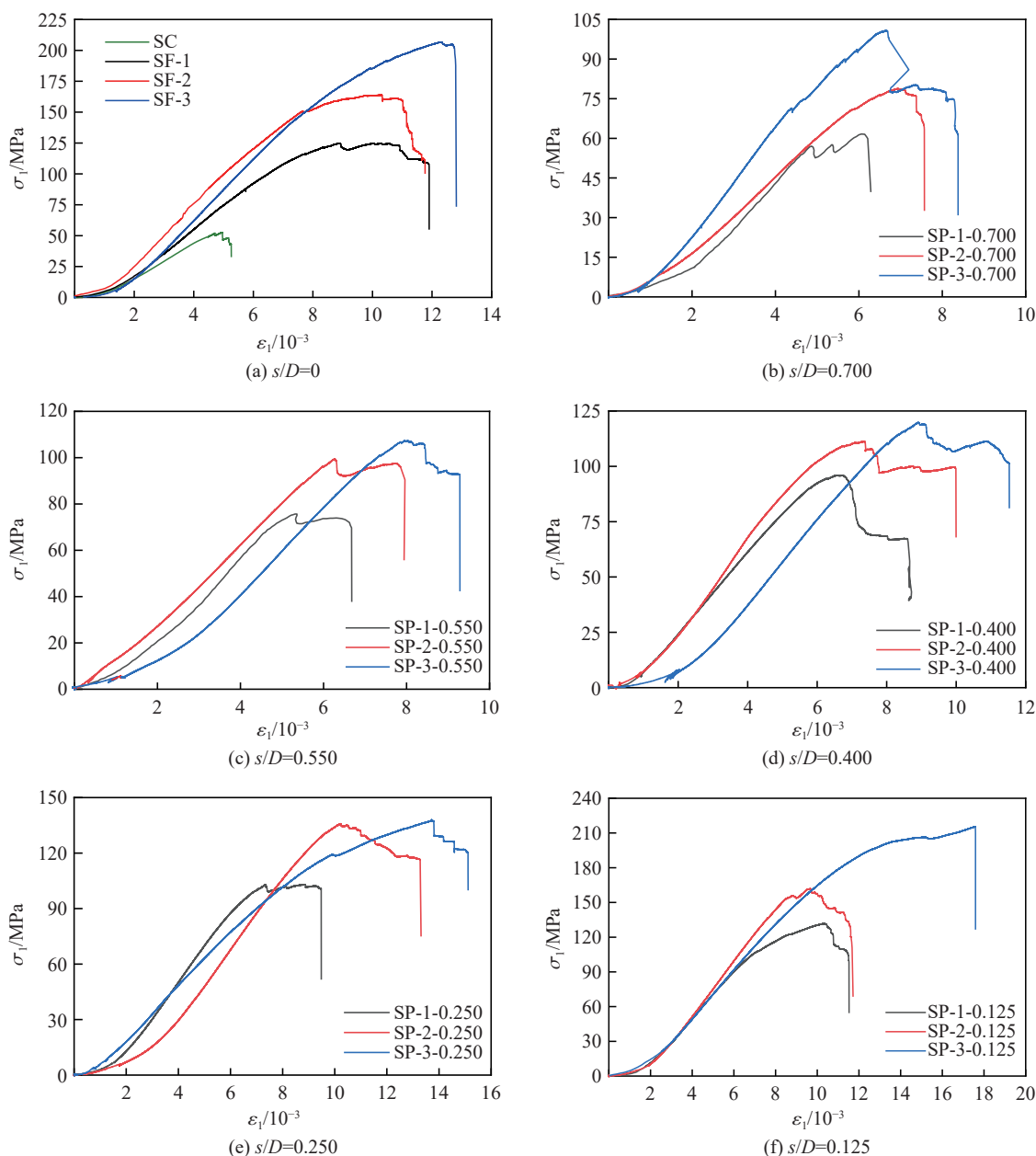


图 5 不同净间距比下煤圆柱的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of coal columns under different net spacing ratios

条带约束煤圆柱的应力-应变曲线则表现出与全约束煤圆柱类似的塑性破坏特征。随着应变的增加, 应力同样出现“跌落后上升”现象。在达到极限抗压强度后, 轴向应力缓慢下降, 而非脆性破坏时则急剧下降, 且与未约束煤圆柱相比, 条带约束煤圆柱的抗压强度与抗变形能力显著提升。此外, 条带约束煤圆柱的应变增长慢于未约束煤圆柱, 表明条带约束提高了煤圆柱的初始刚度。

2.3 抗压强度

图 6 展示了不同 CFRP 层数及 s/D 对煤圆柱抗压强度 f_{cu} 的影响, 其中: $R=0$ 代表全约束煤圆柱的抗压强度基准线; 虚线为全约束煤圆柱 ($s/D=0$) 的抗压强度参考线, 用于对比条带约束与全约束的效果差异; 3 条折线分别表示 1 层 (红色)、2 层 (紫色)、3 层 (绿色) CFRP 条带约束下煤圆柱抗压强度的变化趋

势。在相同的 CFRP 层数下,与未约束煤圆柱相比(未约束煤圆柱抗压强度为 52.6 MPa),CFRP 条带约束煤圆柱的抗压强度有所提升。CFRP 层数从 1 增加至 3 时: $s/D=0.700$ 时,抗压强度分别提高 17.03%、49.83%、91.32%; $s/D=0.550$ 时,抗压强度分别提高 42.59%、89.09%、103.91%; $s/D=0.400$ 时,抗压强度分别提高 82.34%、111.41%、127.23%; $s/D=0.250$ 时,抗压强度分别提高 95.75%、157.56%、161.93%; $s/D=0.125$ 时,抗压强度分别提高 150.11%、207.59%、309.36%。随着 s/D 的增加,煤圆柱的抗压强度呈下降趋势,相较于未约束煤圆柱,抗压强度的提升幅度也随之减小。这是由于净间距比的增大增强了条带约束的拱效应,从而间接降低了条带约束对试样的影响。

当 s/D 相同时,随着 CFRP 层数的增加,CFRP 条带约束煤圆柱的约束效果显著增强,抗压强度也随之增大。图 6 显示:当 $s/D=0.125$ 时,3 层 CFRP 条带的抗压强度分别比 1 层和 2 层 CFRP 条带时提高了 63.67% 和 33.09%;当 $s/D=0.700$ 时,抗压强度分别提高了 63.48% 和 27.69%。此外,当全约束煤圆柱($s/D=0$)的 CFRP 层数从 1 增加到 3 时,其抗压强度与 $s/D=0.125$ 时 1 层到 3 层条带约束煤圆柱的抗压强度大致相同,加固效果差异不大。因此,在实际工程应用中,使用 CFRP 条带约束能够更有效地节省材料和降低成本。CFRP 条带显著增强了煤圆柱的抗压强度,可通过调整 CFRP 条带的层数与净间距比提升材料的承载能力。

2.4 极限轴向应变

图 7 展示了不同 CFRP 层数及 s/D 对煤圆柱极限轴向应变的影响,其中: $R=0$ 代表全煤圆柱的极限轴向应变;虚线为全约束煤圆柱($s/D=0$)的极限轴向应变参考线,用于对比条带约束与全约束的变形能力差异;3 条折线分别表示 1 层(红色)、2 层(紫色)、3 层(绿色)CFRP 约束下煤圆柱极限轴向应变的变化趋势。

从图 7 可以看出,当 CFRP 为 3 层时, $s/D=0.125$ 时煤圆柱的极限轴向应变达到最大值,相比同层数全约束煤圆柱提升了 37.21%。在相同的 CFRP 层数下,随着 s/D 的增大,CFRP 条带约束煤圆柱的极限轴向应变均减小,并在 $s/D=0.700$ 时达到最小值。与未约束煤圆柱相比,不同层数 CFRP 条带约束煤圆柱的极限轴向应变均有所提高:在 $s/D=0.700$ 时分别提高了 19.58%、43.92%、59.32%, $s/D=0.550$ 时分别提高了 26.99%、51.33%、76.62%, $s/D=0.400$ 时分别提高了 64.56%、89.92%、119.20%, $s/D=0.250$ 时分别提高了 80.23%、152.47%、187.42%, $s/D=0.125$ 时分别提高了 119.11%、121.48%、234.41%。这表明 CFRP 约束提高了煤圆柱的抗变形能力,使其在高应变条件下更长时间地保持结构的完整性^[33]。

在相同 s/D 下,CFRP 层数越多的煤圆柱的极限轴向应变越大。增加 CFRP 层数虽然有助于增强煤圆柱的抗变形能力,但在 s/D 较大时效果较弱。3 层 CFRP 时极限应变相对最高,并在 $s/D=0.125$ 处达到最大值,随着 s/D 的增大,极限轴向应变逐渐减小。CFRP 条带因其高强度和刚度,为煤圆柱提供了额

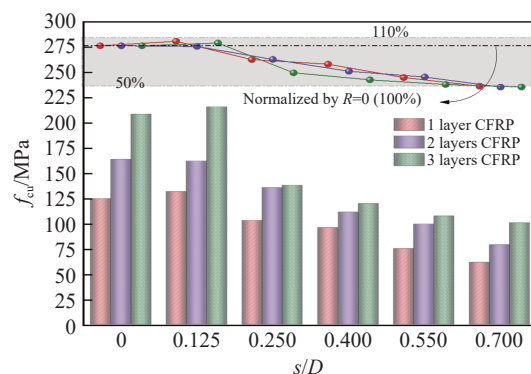


图 6 不同包裹方案下试样抗压强度的比较

Fig. 6 Comparison of compressive strength of specimens under different wrapping schemes

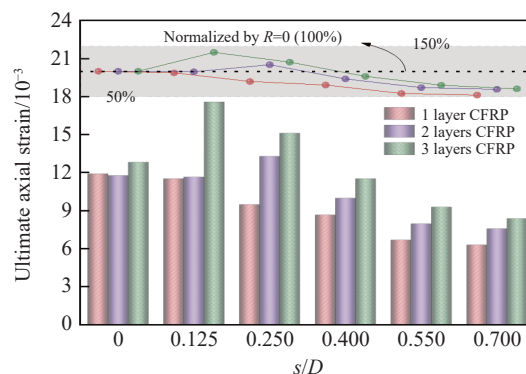


图 7 不同包裹方案下试样极限轴向应变的比较

Fig. 7 Comparison of ultimate axial strain of specimens under different wrapping schemes

外的支撑,随着 CFRP 条带层数的增加,这种支撑作用增强,从而提高了煤圆柱的极限轴向应变。此外, s/D 越小, CFRP 层数的增加对煤圆柱极限轴向应变的提升效果越明显。

2.5 环向应变

为了更直观地比较不同 s/D 下 CFRP 条带约束煤圆柱在不同高度的环向应变 ε_3 , 分析了峰值应力点处的环向应变^[22, 34]。图 8 以灰色长方形代表煤圆柱, 黄色为柱体不同高度处的应变片, 分别以数字 1、2、3、4 和 5 标注。对比图 8(a) 和图 8(b) 可以看出, 未约束煤圆柱破坏时的最大环向应变为 0.003~0.005, 全约束煤圆柱的最大环向应变为 0.007~0.010, 表明 CFRP 约束能显著提高煤圆柱破坏时的最大环向应变。对于部分约束煤圆柱, 当 s/D 由 0.700 减小至 0.125 时, 煤圆柱破坏时的最大环向应变由 0.007 增加至 0.012, 表明 s/D 的减小可以增加煤圆柱破坏时的最大环向应变。总体而言, 无论是全约束还是部分约束, CFRP 材料的约束作用都能使煤圆柱的应力分布更为均匀, 在压缩加载下, 试样呈现出相似的环形应变分布特征。

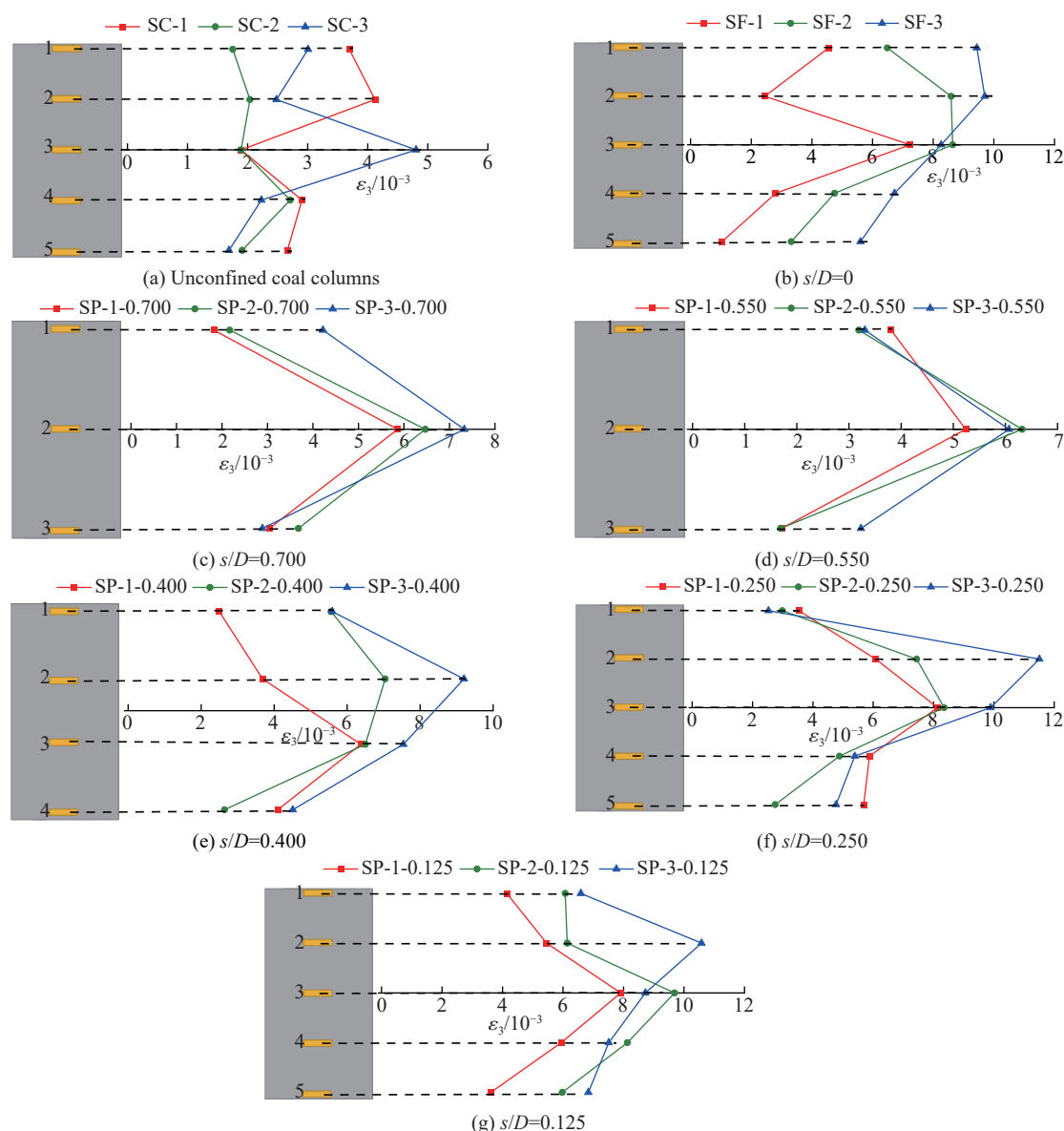


图 8 煤圆柱在不同高度处的环向应变

Fig. 8 Circumferential strain of coal columns at different heights

图 8(a) 显示了未约束煤圆柱在不同高度处的环向应变, 可以观察到不同高度位置的极限环向应变存在显著差异, 表现出不均匀性。这种不均匀性主要由应力集中效应和煤圆柱的微观结构差异共同引起: 在煤圆柱的不同高度位置, 端部效应引起的应力集中使得应力分布不均匀; 煤的微观结构差异(如孔隙、裂隙分布等)在不同高度位置有所不同, 局部区域在加载下的力学响应产生差异, 进一步导致了应变的空间不均匀性。图 8(b) 为全约束煤圆柱在不同高度处的环向应变。在外部载荷作用下, 环向应变表现出中上部较大而底部较小的特征, 由煤圆柱与 CFRP 材料之间的相互作用引起。在全约束条件下, 当载荷作用于煤圆柱顶部时, 中上部区域首先承受较大的应力集中, 导致较大的环向应变; 而在底部区域, 由于应力传递的延迟效应和 CFRP 的约束作用, 煤圆柱所承受的应力相对较低, 因此, 环向应变也较小。图 8(c)~图 8(g) 显示了不同 s/D 的 CFRP 条带约束煤圆柱的环向应变分布, 与全约束煤圆柱不同, 其环向应变呈现出中部大、两端小的分布特征。在 CFRP 条带局部约束与轴向载荷的共同作用下, 煤圆柱中部成为应力集中区域, 环向应变增大, 中部区域的微裂纹扩展速度加快, 最终导致 CFRP 条带的断裂和煤圆柱的压溃失效。

3 讨 论

3.1 约束机制

图 9 显示了煤圆柱在 CFRP 不同约束形式(全约束和条带约束)下的受力模型, 其中: $D-s/2$ 表征条带约束的有效约束宽度, 反映 CFRP 条带对煤圆柱的实际覆盖范围; F 为 CFRP 条带施加的环向约束力, 其方向垂直于煤圆柱表面, 大小由 CFRP 的拉伸刚度和环向应变决定。可以看到, 当 CFRP 用于约束煤圆柱时, 其高抗拉强度将煤圆柱的受力状态转变为三向受压状态^[17-19]。这种状态能够抑制煤圆柱内部的裂纹扩展, 延缓其破坏过程, 提高煤圆柱的承载能力和延性。试验表明, CFRP 层数从 1 层增加到 3 层时, CFRP 约束煤圆柱的抗压强度提高了数倍。在三向受压状态下, 煤圆柱的承载力及其破坏时的抗变形能力均增强。

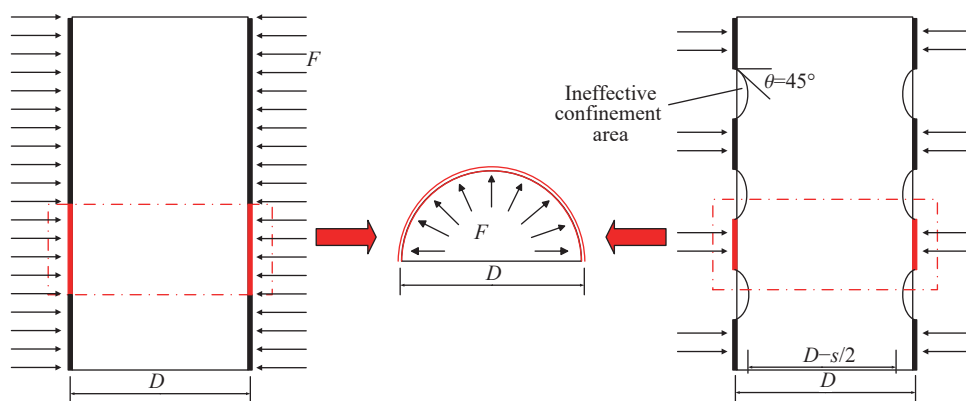


图 9 不同约束形式下的煤圆柱受力模型

Fig. 9 Force models of coal columns under different confinement

CFRP 全约束煤圆柱的破坏模式以 CFRP 拉断为主, 试样的裂缝扩展和破坏形态不会出现明显的局部破坏现象, 相较于未约束煤圆柱的脆性破坏更具延性。CFRP 的全约束使煤圆柱在受压过程中受到均匀约束, 从而有效限制煤圆柱的横向变形, 并通过 CFRP 与煤圆柱的协同作用, 提升抗剪切能力和稳定性。

CFRP 条带约束煤圆柱的破坏模式包含 CFRP 拉断和未约束部分的压溃, 其约束效果随 s/D 的减小而提升。CFRP 条带约束煤圆柱的核心优势在于局部形成高强度支撑区域, 这些增强区域可在试件受到剪切力时提供额外的支撑和约束, 从而限制其横向变形和剪切破坏, 形成“拱效应”。同时, 拱效应的存在使得煤圆柱在受压时能够将部分压力传递到无约束区域, 从而减轻约束区域的应力集中, 起到分

散载荷、提高整体承载能力的作用。

结合以上分析可知, CFRP 全约束能够显著提升煤圆柱的抗压强度和抗变形能力, 但采用 CFRP 条带约束同样能够有效增强其力学性能, 且在合理的 s/D 布置下, 条带约束效果甚至略优于全约束。条带约束不仅显著降低了材料消耗, 提高了加固过程的经济性和效率, 还允许煤圆柱在约束带之间具有更大的应力释放空间, 从而在局部保持一定的变形自由度, 增加能量耗散, 并延缓破坏过程。

3.2 强度模型

CFRP 材料在加固混凝土柱方面发展迅速, 国内外学者对其做了大量研究, 获得了 CFRP 材料约束混凝土的强度模型。Richard 等^[35]以主动约束混凝土为对象, 提出

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_1}{f'_{co}} \quad (1)$$

$$f_1 = \frac{2f_{trp}t_{trp}}{D} \quad (2)$$

式中: f'_{cc} 为受 CFRP 约束试样的抗压强度; f'_{co} 为未约束试样的抗压强度; f_1 为 CFRP 约束试样的侧向约束力; k_1 为约束有效性系数, 取值为 4.1; f_{trp} 为 CFRP 试样的抗拉强度; t_{trp} 为 CFRP 试样的总厚度。CFRP 全约束时, 由式 (2) 确定。式 (1) 和式 (2) 在 CFRP 约束煤圆柱中同样成立。

Hoek 和 Brown 基于非线性破坏的 Griffith 强度理论提出了 Hoek-Brown 破坏准则^[36-37], 其表达式为

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \frac{f_1}{f'_{co}} + \sqrt{m \frac{f_1}{f'_{co}}} + S \quad (3)$$

式中: m 为材料参数, 其取值取决于试件的类型; S 反映了岩石的不连续性, 取值范围为 0~1, 对于完整无破损的混凝土或岩石试件, $S=1$ 。

$$\frac{f_1}{f'_{co}} = \frac{1}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4}) \quad (4)$$

式中: f_1 为试样的抗拉强度, MPa。

$$m - \sqrt{m^2 + 4} = \frac{2}{C} f'_{co}{}^p \quad (5)$$

$$m = \frac{f'_{co}{}^p}{C} - \frac{C}{f'_{co}{}^p} \quad (6)$$

Hoek-Brown 模型可以表达为

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \frac{f_1}{f'_{co}} + \sqrt{\left(\frac{f'_{co}{}^p}{C} - \frac{C}{f'_{co}{}^p} \right) \frac{f_1}{f'_{co}}} + S \quad (7)$$

式中: p 为无量纲的指数参数, 用于描述煤的单轴抗压强度与 CFRP 约束效应之间的非线性关系; C 为经验性参数, 用于关联煤样的单轴抗压强度和 Hoek-Brown 准则中的材料常数 m 。

由于 CFRP 条带之间存在无约束区域, 在确定 CFRP 条带的围压时, 应考虑“拱效应”的影响。

$$f_{l,eff} = k_v f_1 \quad (8)$$

式中: $f_{l,eff}$ 为有效约束力, MPa; k_v 为 CFRP 的纵向有效约束系数, 可根据“拱效应”假设, 由有效约束区面积与整个截面面积的比值确定。

$$k_v = \left(1 - \frac{s}{2D} \right)^2 \quad (9)$$

国际混凝土结构协会规范^[38]中给出的侧向约束力为

$$f_1 = \frac{1}{2} \rho_f E_f \varepsilon_{h,rup} \quad (10)$$

式中: ρ_f 为 CFRP 的体积配置率; E_f 为 CFRP 材料的弹性模量, GPa; $\varepsilon_{h, \text{rup}}$ 为 CFRP 条带约束混凝土试件的极限环向应变。

$$\rho_f = \frac{4t_{\text{frp}}b}{D(s+b)} \quad (11)$$

通过修改约束有效性系数 k_1 , 得到 CFRP 约束煤圆柱强度模型。根据试验数据, 分析条带作用对条带约束煤圆柱抗压强度的影响, 通过修正 Richart 模型和 Hoek-Brown 破坏准则中的参数, 线性拟合得到 CFRP 条带约束煤圆柱的强度计算公式, 如图 10 所示, 表达式为

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + p_1 \left(\frac{f_{l, \text{eff}}}{f'_{co}} \right)^{p_2} \quad (12)$$

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \frac{f_{l, \text{eff}}}{f'_{co}} + \sqrt{\left(\frac{f'_{co}}{C} - \frac{C}{f'_{co}} \right) \frac{f_{l, \text{eff}}}{f'_{co}}} + S \quad (13)$$

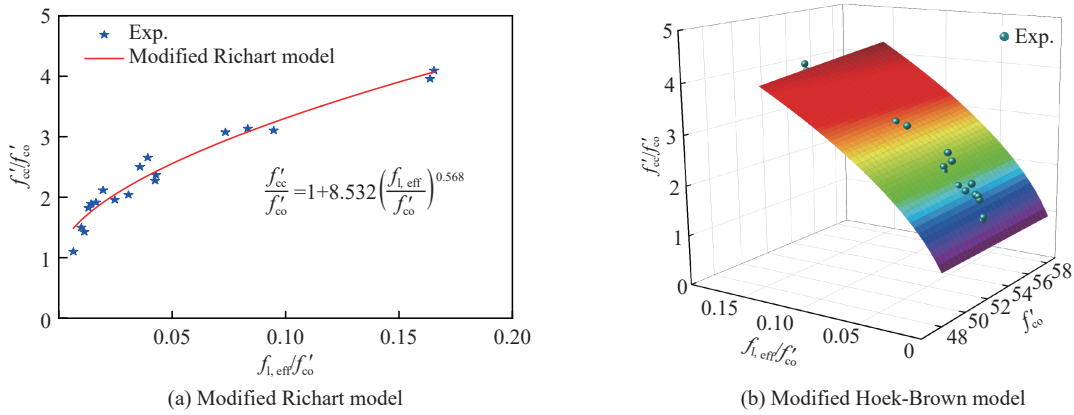


图 10 修正模型参数拟合

Fig. 10 Parameter fitting of modified model

经非线性拟合得到修正 Richart 模型中的参数 p_1 和 p_2 分别为 8.532 和 0.568, 相关系数为 0.95; 修正 Hoek-Brown 模型中参数 C 和 p 分别为 0.431 和 0.946, 相关系数为 0.94。修正 Richart 模型和修正 Hoek-Brown 模型表达式分别为

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 8.532 \left(\frac{f_{l, \text{eff}}}{f'_{co}} \right)^{0.568} \quad (14)$$

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \frac{f_{l, \text{eff}}}{f'_{co}} + \sqrt{\left(\frac{f'_{co}}{0.431} - \frac{0.431}{f'_{co}} \right) \frac{f_{l, \text{eff}}}{f'_{co}}} + 1 \quad (15)$$

采用整体绝对误差 (integral absolute error, IAE) 来评价模型的性能^[37]。IAE 是一种对预测精度非常敏感的精度指标, 表达式为

$$\delta_{\text{IA}} = \frac{\sum_{i=1}^N |x_{\text{exp}, i} - x_{\text{theo}, i}|}{\sum_{i=1}^N |x_{\text{exp}, i}|} \quad (16)$$

式中: δ_{IA} 为 IAE, $x_{\text{theo}, i}$ 为理论值, $x_{\text{exp}, i}$ 为试验值, N 为试验数据个数。

修正 Richart 模型和修正 Hoek-Brown 模型的理论值与测试值如图 11 所示。由图 11 可知, 采用式 (16) 计算得到的修正 Richart 模型和修正 Hoek-Brown 模型的 δ_{IA} 分别为 0.05 与 0.08。 δ_{IA} 越小, 模型精度越高。经比较, 修正 Richart 模型的精度更高, 计算 CFRP 条带约束煤圆柱强度时误差较小。因此, CFRP 条带约束煤圆柱的强度计算模型可用式 (14) 表示。

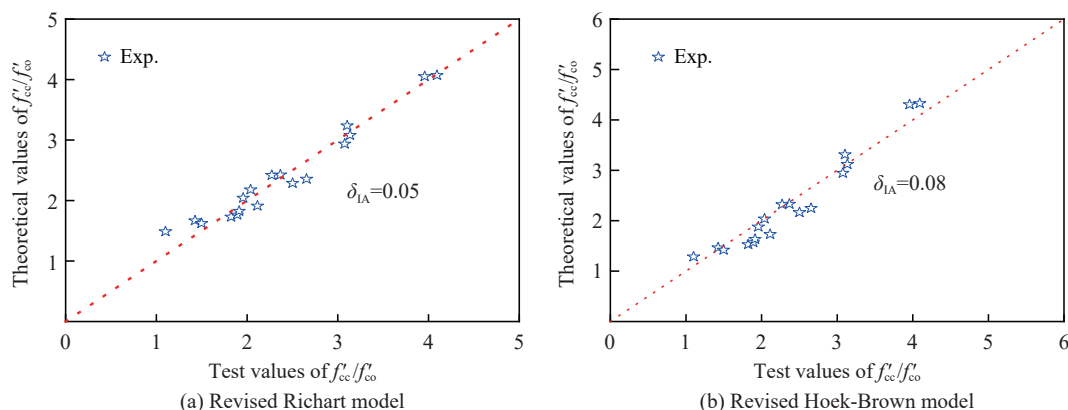


图 11 理论值与测试值的比较

Fig. 11 Comparison of theoretical and test values

4 结 论

研究了 CFRP 条带部分加固煤圆柱的加固方案,考察了 CFRP 层数、净间距比等因素的影响,分析了 CFRP 部分约束煤圆柱加固效果,揭示了其加固机理,基于 CFRP 条带约束煤圆柱在轴压载荷作用下的试验研究,得出以下结论。

(1) CFRP 约束可将煤圆柱受力转为三向受压,有效改善了煤圆柱的力学性能。CFRP 条带约束煤圆柱呈现出 CFRP 条带断裂与煤圆柱局部破碎的混合破坏模式,随着 CFRP 层数的增加和净间距比的增大,煤圆柱的变形承载能力增强,但破坏加剧。

(2) 因 CFRP 的强约束作用,条带约束煤圆柱表现出与全约束煤圆柱类似的塑性破坏特征,抗压强度和极限应变显著提升。与未约束煤圆柱相比,CFRP 条带约束煤圆柱的抗压强度最大提高率(SP-3-0.125)为 309.36%,极限轴向应变的最大提高率(SP-3-0.125)为 234.41%。合理的 CFRP 层数与适当的净间距比组合可优化材料的承载能力。

(3) 利用试验数据对 Richart 模型和 Hoek-Brown 模型进行修正并采用 IAE 评估其性能,结果表明,修正 Richart 模型可表征不同净间距比下 CFRP 条带约束煤圆柱的强度模型。

参考文献:

- [1] ZHOU Z L, ZANG H Z, CAO W Z, et al. Risk assessment for the cascading failure of underground pillar sections considering interaction between pillars [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 124: 104142.
- [2] POULSEN B A, SHEN B. Subsidence risk assessment of decommissioned bord-and-pillar collieries [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 60: 312–320.
- [3] LI Z, YU S C, ZHU W B, et al. Dynamic loading induced by the instability of voussoir beam structure during mining below the slope [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 132: 104343.
- [4] FAN D Y, LIU X S, TAN Y L, et al. Energy mechanism of bolt supporting effect to fissured rock under static and dynamic loads in deep coal mines [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 34(3): 371–384.
- [5] XIA Z, YAO Q L, XU Q, et al. Numerical-modeling-based assessment of the impact of two-end-type cable support on failure characteristics of yield pillars [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 128: 105619.
- [6] 张修峰, 陈洋. 煤柱型冲击地压类型、发生机理与防治对策研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(10): 1–11.
ZHANG X F, CHEN Y. Research on the type and occurrence mechanism and prevention of coal pillar rockbursts [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(10): 1–11.
- [7] HUANG S J, ZHAO G M, MENG X R, et al. Development of cement-based grouting material for reinforcing narrow coal pillars and engineering applications [J]. *Processes*, 2022, 10(11): 2292.

- [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] 崔博强, 白锦文, 冯国瑞, 等. 柱旁单侧充填煤充结构体的破坏响应特征与失稳机制 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2023, 54(6): 2431–2446.
- CUI B Q, BAI J W, FENG G R, et al. Failure response characteristics and mechanism of coal-backfilling structures in single pillar-side backfilling [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(6): 2431–2446.
- [10] CHAN C W, YU T, ZHANG S S, et al. Compressive behaviour of FRP-confined rubber concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 211: 416–426.
- [11] LI G Q, PANG S S, IBEKWE S I. FRP tube encased rubberized concrete cylinders [J]. *Materials and Structures*, 2011, 44(1): 233–243.
- [12] YOUSSEF O, HASSANLI R, MILLS J E. Mechanical performance of FRP-confined and unconfined crumb rubber concrete containing high rubber content [J]. *Journal of Building Engineering*, 2017, 11: 115–126.
- [13] RAFFOUL S, GARCIA R, ESCOLANO-MARGARIT D, et al. Behaviour of unconfined and FRP-confined rubberised concrete in axial compression [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 147: 388–397.
- [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] ISMAIL R, RASHID R S M, CHAN W C, et al. Compressive behavior of concrete cylinder fully and partially confined by carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 201: 196–206.
- [16] SHEN Q H, WANG J F, WANG J X, et al. Axial compressive performance of circular CFST columns partially wrapped by carbon FRP [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 155: 90–106.
- [17] 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.
- [18] LI G D, LIU H L, DENG W T, et al. Behavior of CFRP-confined sand-based material columns under axial compression [J]. *Polymers*, 2021, 13(22): 3994.
- [19] 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.
- [20] SHI X D, BAI J W, FENG G R, et al. Crack propagation law at the interface of FRP wrapped coal-backfilling composite structure [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 344: 128229.
- [21] 李庆文, 曾杏钢, 张向东, 等. 碳纤维布层数对煤圆柱力学特性影响的细观研究 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 73–85.
- LI Q W, ZENG X G, ZHANG X D, et al. Mesoscopic study on the effect of CFRP layers on the mechanical properties of coal circular-columns [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 73–85.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.

- [26] 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.
- [27] XIA Z, YAO Q L, LI X H, et al. Acoustic emission responses and damage estimation of coal with carbon fiber-reinforced polymer confinement under uniaxial compression [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(12): 5077–5094.
- [28] 唐劲舟, 唐文豪, 杨科, 等. 循环荷载作用下含倾斜单裂隙砂岩力学响应特征及渗流演化规律 [J]. *岩土力学*, 2025, 46(1): 199–212.
- TANG J Z, TANG W H, YANG K, et al. Mechanical response characteristics and seepage evolution law of sandstone with an inclined single fracture under cyclic loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2025, 46(1): 199–212.
- [29] YU L L, XIA J W, XIA Z, et al. Axial compressive behavior of basalt and carbon FRP-confined coal gangue concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 371: 130803.
- [30] LIANG J F, ZOU W J, LI W, et al. Behaviour of CFRP strips confined partially encased concrete columns under axial compressive load [J]. *Composite Structures*, 2021, 275: 114468.
- [31] YANG J L, WANG J Z, WANG Z R. Behavior and modeling of CFRP nonuniformly wrapped circular seawater sea-sand concrete (SSC) columns under axial compression [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 299: 123887.
- [32] YANG J L, WANG J Z, WANG Z R. Axial compressive behavior of partially CFRP confined seawater sea-sand concrete in circular columns—part I : experimental study [J]. *Composite Structures*, 2020, 246: 112373.
- [33] LI S, MA W T, LU Y Y, et al. Axial behavior of concrete cylinders retrofitted with a hybrid system of CFRP textile grid and engineered geopolymer composite [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 91: 109536.
- [34] 赵兵朝, 王京滨, 张晴, 等. 侧限条件下充填体-煤柱耦合承载协同作用机理 [J]. *煤炭学报*, 2023, 48(12): 4380–4392.
- ZHAO B C, WANG J B, ZHANG Q, et al. Synergistic mechanism of coupling bearing of backfill-coal pillar under lateral confinement condition [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(12): 4380–4392.
- [35] RICHARD R M, ABBOTT B J. Versatile elastic-plastic stress-strain formula [J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1975, 101(4): 511–515.
- [36] WU Y F, ZHOU Y W. Unified strength model based on Hoek-Brown failure criterion for circular and square concrete columns confined by FRP [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14(2): 175–184.
- [37] ZHANG Y, LU Z F, CAO Y G. Unified strength model based on the Hoek-Brown failure criterion for fibre-reinforced polymer-confined pre-damaged concrete columns with circular and square cross sections [J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(12): 3807–3820.
- [38] YANG J L, LU S W, WANG J Z, et al. Behavior of CFRP partially wrapped square seawater sea-sand concrete columns under axial compression [J]. *Engineering Structures*, 2020, 222: 111119.

Constraint Mechanism and Mechanical Characteristics of CFRP Partially Wrapped Coal Columns

LI Qingwen, LI Ling, PAN Chuangchuang, ZHONG Yuqi, NIE Fanfan, YANG Hao

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

Abstract: Carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) wrapping is a promising technique for enhancing the structural integrity of coal columns. When applied to coal columns in roadway environments, CFRP reinforcement offers significant advantages over unreinforced columns. Specifically, the compressive strength of coal columns subjected to triaxial compression is markedly higher than that of columns subjected to uniaxial compression, primarily due to the restricted lateral expansion in the former case. This study investigates coal column specimens with varying CFRP layer configurations and net spacing ratios,

evaluating mechanical properties such as stress-strain behavior, peak strength, and ultimate strain through uniaxial compression testing. The research explores the impact of CFRP confinement on the mechanical performance and damage modes of coal columns under different conditions. The results indicate that coal columns confined by CFRP strips or fully wrapped with CFRP exhibit similar mechanical behaviors. CFRP strip confinement provides a notable strengthening effect under uniaxial compression, with peak strength and deformation resistant capacity significantly improved as the net spacing ratio decreases and the number of CFRP layers increases. Additionally, the CFRP reinforcement effectively mitigates lateral expansion, alters the failure mode, and delays the onset of damage. Furthermore, using the Richart and Hoek-Brown models, the study incorporates the test data for model refinement and comparative analysis, leading to the development of a modified Richart strength model for CFRP-constrained coal columns.

Keywords: carbon fiber-reinforced plastic; coal column; net spacing ratio; hoop strain; strength model