

10-25-2024

Advances in research on the evolution of trans-scale discontinuous structures during the creeps of strongly disturbed coals

ZHANG Liang

Deep Mining and Rockburst Research Institute, CCTEG Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China; State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Jiaozuo 454003, China; State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China, zhangliang9106@hotmail.com

WANG Laigui

School of Mechanics & Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

REN Ting

School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong, NSW 2522, Australia

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

Recommended Citation

ZHANG Liang, WANG Laigui, REN Ting, et al. (2024) "Advances in research on the evolution of trans-scale discontinuous structures during the creeps of strongly disturbed coals," *Coal Geology & Exploration: Vol. 52: Iss. 10, Article 6.*

DOI: 10.12363/issn.1001-1986.24.04.0261

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol52/iss10/6>

This Mechanism is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact 380940179@qq.com.

Advances in research on the evolution of trans-scale discontinuous structures during the creeps of strongly disturbed coals

Authors

ZHANG Liang, WANG Laigui, REN Ting, LI Xiangchun, GAO Ke, LI Haitao, and ZHAO Shankun



移动阅读

张良, 王来贵, REN Ting, 等. 强扰煤岩体蠕变过程中跨尺度非连续结构演化研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(10): 47-59. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.04.0261

ZHANG Liang, WANG Laigui, REN Ting, et al. Advances in research on the evolution of trans-scale discontinuous structures during the creeps of strongly disturbed coals[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(10): 47-59. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.04.0261

强扰煤岩体蠕变过程中跨尺度非连续结构演化研究进展

张 良^{1,2,3}, 王来贵⁴, REN Ting⁵, 李祥春⁶, 高 科⁷, 李海涛^{1,3}, 赵善坤^{8,9}

- (1. 煤炭科学研究总院有限公司 深部开采与冲击地压防治研究院, 北京 100013; 2. 河南省瓦斯地质与治理重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454003; 3. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室, 北京 100013; 4. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 5. School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong NSW 2522, Australia; 6. 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083; 7. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 8. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013; 9. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 北京 100013)

摘要: 【目的和方法】巷道围岩时效变形破坏、蠕变型冲击地压等灾害是深井面临的重大威胁, 加之深部采动与结构变化的影响, 亟需研究强扰煤岩体蠕变过程中跨尺度非连续结构演化规律, 系统回顾煤岩体力学性质的尺度效应、非连续结构与多物理场效应, 以及煤岩体长时稳定性、蠕变演化规律与力学模型。【结果和结论】强调不同尺度(细观-宏观-工程尺度)、不同尺寸(REV 范围内)煤岩体变形破裂过程中非连续结构(包括裂隙和矿物)与物理力学性质存在密切的关联特征。指出煤岩体跨尺度非连续结构导致应力场非均匀分布, 造成力学各向异性、尺度效应及尺寸效应, 进而出现非协调宏观破裂现象。透明解析与推演煤岩体变形破裂过程中跨尺度非连续结构与多物理场演化规律, 是认识煤岩灾变内禀机制的关键。明确指出现有蠕变实验与蠕变模型在煤岩表面变形及破裂方面具有优势, 但无法预测煤岩内部变形与非连续结构; 为此提出了全尺寸 CT 扫描重构、数字体图像相关(DVC)、跨尺度等效岩体-等效晶质建模(SRM-GBM)相结合的破解方法。对扰动煤岩体蠕变前沿问题进行了讨论, 阐明了非连续结构与应力引起内部变形损伤诱发蠕变这一新观点, 指出非连续结构和应力是煤岩非协调蠕变的主控因素, 最后建立了强扰煤岩体蠕变过程中跨尺度非连续结构与多物理场演化的精细化建模及透明解析新方法。研究成果为相关矿山灾害的发生机理、预警与防控提供理论基础。

关键词: 强扰煤岩体; 蠕变本质; 跨尺度非连续结构; 内部应变场; 损伤演化; 透明解析; CT 扫描与数字重构; 精细化建模

中图分类号: TD313; TD324; TU45 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2024)10-0047-13

Advances in research on the evolution of trans-scale discontinuous structures during the creeps of strongly disturbed coals

ZHANG Liang^{1,2,3}, WANG Laigui⁴, REN Ting⁵, LI Xiangchun⁶, GAO Ke⁷, LI Haitao^{1,3}, ZHAO Shankun^{8,9}

- (1. Deep Mining and Rockburst Research Institute, CCTEG Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Jiaozuo 454003, China; 3. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China; 4. School of Mechanics & Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 5. School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong, NSW 2522,

收稿日期: 2024-04-24; 接收日期: 2024-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52304222, U23B2093, 52274245); 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地开放基金项目(WS2022B02)

第一作者: 张良, 1991 年生, 男, 湖北麻城人, 博士, 副研究员。E-mail: zhangliang9106@hotmail.com

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

Australia; 6. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 7. Safety Science and Engineering College, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China; 8. CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 9. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Beijing 100013, China)

Abstract: [Objective and Methods] Disasters associated with surrounding rocks in roadways, such as time-dependent deformation failure and creep-induced rock bursts, severely threaten deep mines in China. These disasters, coupled with the impacts of deep mining and structural changes, render it urgent to explore the evolutionary patterns of trans-scale discontinuous structures during the creeps of strongly disturbed coals. This study systematically reviews the scale effects of coals' mechanical properties, the discontinuous structures and multi-physics field effects of coals, and the long-term stability, creep evolutionary patterns, and mechanical models of coals. It highlights the close correlation between discontinuous structures (including their fractures and minerals) and physical and mechanical properties during the deformation and failure of different scales (mesoscopic, macroscopic, and engineering scales) and sizes (within the range of representative elementary volume (REV)) of coals. **[Results and Conclusions]** The results indicate that the trans-scale discontinuous structures of coals cause the nonuniformly distributed stress field, which results in mechanical anisotropy, scale effects, and size effects. Consequently, disharmonic macroscopic rupture will occur. The key to understanding the intrinsic disaster mechanisms of coals is the transparentized analysis and deduction of the evolutionary patterns of both trans-scale discontinuous structures and the multi-physics field during the deformation and rupture of coals. It is clear that existing creep experiments and models enjoy advantages in revealing the surface deformations and failure of coals. However, they fail to predict the deformations and discontinuous structures within coals. Hence, the authors of this study developed an approach that combines full-size computed tomography (CT) scanning and digital reconstruction, digital volume correlation (DVC), and trans-scale synthetic rock mass and grain-based modeling (SRM-GBM). This study explores the leading-edge issues related to the creeps of disturbed coals, introducing the new point of view that the creeps of coals are induced by internal deformation and damage caused by their discontinuous structures and stress. Accordingly, it proposes that discontinuous structures and stress serve as the dominant factors governing the disharmonic creeps of coals. Finally, this study developed new methods for fine-scale modeling and transparentized analysis for exploring the evolution of both trans-scale discontinuous structures and the multi-physics field during the creeps of strongly disturbed coals. The results of this study will lay the theoretical foundation for the occurrence mechanisms, early warning, and prevention and control of relevant mine disasters.

Keywords: strongly disturbed coal; creep essence; trans-scale discontinuous structure; internal strain field; damage evolution; transparentized analysis; computed tomography (CT) scanning and digital reconstruction; fine-scale modeling

巷道围岩时效变形破坏、冲击地压等灾害严重制约我国煤矿安全高效生产。特别是我国许多大型矿井正向深部延伸或已进入深部开采,煤岩体面临着高水平地应力和强烈的开采扰动等复杂力学环境^[1-3],煤岩体力学特性的时间效应与尺度效应更加显著^[4],使得巷道围岩长时变形破坏、蠕变型冲击地压等深井地质灾害频发^[5-6]。掌握巷道围岩时效变形破坏、蠕变型冲击地压等灾害的发生机理、预警与防控技术对于保障深部煤炭资源安全高效开采具有重要的现实意义。

由于深部煤岩体承受着上覆岩层自重产生的较大垂直应力与地质构造产生的构造应力,加之强扰动、强时效以及大量跨尺度非连续结构^[7],诱发煤岩体工程响应强流变性、强动力灾害^[8],影响深部煤炭资源安全高效开采。在采矿工程领域,依据载荷变化率可将煤矿载荷状态划分为静载荷、动载荷和扰动载荷^[9],变化率为 1~10 MPa/s 的载荷为强扰载荷。据统计,从开采深度看,截至 2024 年 2 月,我国有 600 m 以浅的矿井 3 503 座, 600~800 m 矿井 231 座, 800~1 000 m 矿井 113 座,

1 000 m 以深的矿井 40 座。以安徽口孜东矿(典型的千米深井)为例,巷道围岩垂直应力达 25.12 MPa,高应力强扰动作用下巷道围岩变形破坏与结构失稳具有强烈的时间效应^[5]。经过 2~3 个月顶板下沉量达 600 mm,底鼓量达 1 500 mm。井下采矿作业过程中,高应力强扰动不仅会造成巷道围岩时效变形破坏与结构失稳,还会诱发蠕变型冲击地压事故。据统计,我国有 161 处冲击地压矿井(截至 2024 年 2 月),而 90% 以上的冲击地压事故均发生在巷道中^[10]。巷道冲击地压不仅破坏力强,还可能诱发煤与瓦斯突出、煤尘爆炸等次生灾害。例如,山东星村煤矿 3302 工作面上平巷掘进工作面(埋深 1 260 m)发生一起蠕变型冲击地压事故,巷道严重变形破坏以及结构失稳,损坏巷道达范围 150 m^[6]。由此可见,诸多矿井地质灾害背后的科学问题是高应力强扰动作用下煤岩体流变损伤破裂耦合机制。

然而,煤岩体力学特性的时间效应与尺度效应是这一科学问题背后的瓶颈,尽管学术界对这一难题已进行过广泛而深入的研究^[4],但煤岩体非协调时效变形与长

期强度仍是悬而未决的问题。主要原因是,煤岩体非连续结构及其演化引起的应力场与变形场耦合机理不明。因此,笔者综述强扰煤岩体蠕变过程中跨尺度非连续结构演化规律,总结该领域的研究现状和重点攻关方向,完善岩石力学中的蠕变损伤破裂理论,形成该领域的新理论、新观点、新方法,为实现煤炭资源高效绿色开采及矿山灾害超前预警防控提供研究基础与参考。

1 煤岩体力学性质的尺度效应、非连续结构与多物理场效应

1.1 尺寸效应和尺度相关性理论

深部开采煤岩体面临高应力、强扰动、强时效等复杂力学环境(图 1a—图 1c),使得巷道围岩长时变形破坏、蠕变型冲击地压等灾害频发(图 1d—图 1f),这类深

井地质灾害的有效防治得益于基础理论研究以及技术发展。从细观尺度、宏观尺度跨越至工程尺度,煤岩力学性质具有明显的尺度效应,煤岩非连续结构(包括裂隙结构和矿物条带)与应力场是煤岩力学性质尺度效应和非协调变形破裂的主控因素。图 2a 给出了细观尺度(微米级)煤孔裂隙结构与矿物元素分布状态,图 2b 给出了宏观尺度(厘米级)标准圆煤柱的 CT 扫描重构二维切面(包含煤基质、裂隙结构与矿物条带)。煤岩体类型与尺度不同,力学性质也存在显著差异。当煤岩体尺度达到米量级及以上,认为是较大体积,否则认为是较小体积。图 2c 说明了工程尺度(米级)范围内,对于较小体积的煤,节理裂隙分布显著影响其宏观强度,各向异性明显;而对于较大体积的煤,结构效应减弱,宏观性质趋于各向同性。

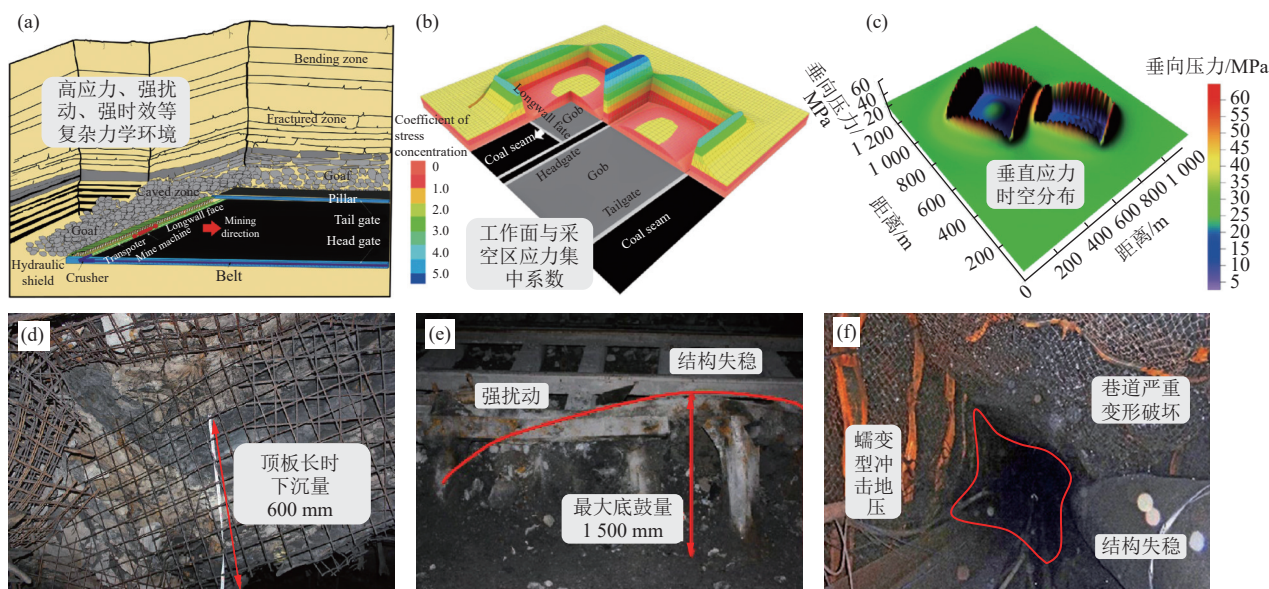


图 1 高应力强扰动作用下巷道围岩时效变形破坏、结构失稳^[3,5]与蠕变型冲击地压^[6]

Fig.1 Time-dependent deformation failure, structural instability^[3,5], and creep-induced rock burst^[6] of the surrounding rocks of roadways under high stress and strong disturbance

由此可见,煤岩力学性质具有各向异性、尺寸效应和尺度相关性,而局部力学性质可用表征单元体相关性趋于稳定时的最小体积(REV)^[11]等效表征。图 2d 刻画了介质力学性质的尺寸效应,当煤(非均匀介质)体积处于 REV 范围内时,力学性质会随着体积的变化趋于恒定,呈现出各向同性;小于 REV 时,力学性质会随着体积的变化显著波动。而且,在细观损伤力学中,往往需要先选取材料内某点的 REV,借助一定的平均化方法在该体内导出材料的宏观性质;再定义损伤变量并确定损伤本构方程及破坏准则,从而揭示各种工程材料的宏观行为与细观结构及其演化之间的关系。因此,煤岩力学性质各向异性、尺寸效应和尺度相关性与非连续结构密切相关,如何准确有效确定煤岩 REV 是破解

问题的关键。

由于工程岩体的缺陷(裂隙、裂缝、孔隙、断层等)位于微细观尺度之上与宏观宇观尺度之下,找到某个统计尺度的 REV 具有挑战性^[4]。周创兵等^[12]提出了岩体 REV 的 3 种确定方法,即能量迭加法、地质统计法和数值实验法。这 3 种方法各有优缺点,能量迭加法假定岩体在产生明显的塑性变形前,节理、裂隙等结构面没有扩展,没有能量损失,运用形变势能叠加原理分析裂隙岩体的各向异性弹性参数,并在此基础上研究裂隙岩体的 REV。地质统计法是根据统计理论,假设岩体体积达到其内部结构面的统计特征与总体的统计特征一致时,该体积即为 REV。能量迭加法和地质统计法能计算随机节理裂隙岩体 REV 且二者的计算结果接近,

但前者是将问题限于弹性变形,后者则需要大量的地质统计样本且计算结果易受岩体变异系数影响。数值实验法需要现场地质勘查,得到真实岩体内不同尺度结构面的几何特征与空间分布规律;对于各个分区需要通过各种实验手段研究岩块与裂隙的力学性质,提供数值实验所需的各种力学参数;继而确定各个分区内裂隙岩体的 REV。相比而言,数值实验法确定岩体 REV 较为准确可行,但计算流程较为复杂。在岩石试样力学性质的尺寸效应方面,室内单轴压缩实验或数值模拟方法应用较多,主要包括强度、弹性模量、声发射、能量耗散等参数的变化规律。前人研究表明,试样单轴抗压强度(UCS)、耗散能随试样尺寸(高度 40~300 mm)、高径比的增大而减小^[13-17],为工程设计与施工提供了理论依据。

1.2 煤体非连续结构与多物理场效应透明推演方法

井下采矿活动打破了地层初始应力平衡状态,引起围岩应力场重分布,诱发矿山地质灾害,若能透明解析和推演煤岩非连续结构与多物理场效应,则灾变机制将不再是一个“黑箱”问题。为此,在 REV 尺度范围内基于 CT 扫描数据构建反映内部跨尺度结构的岩石 REV 模型,可研究岩石灾变非连续结构与多物理场效应^[7]。此外,在多物理场演化方面,张天军^[18]、杨科^[19]、彭守建^[20]、张庆贺^[21]、王本鑫^[22]等利用数字图像(DIC)相关或表面三维 DIC 技术,测得煤样压缩破坏过程中表面和离面的变形及裂隙演化特征;Mao Lingtao 等^[23]采用 CT 扫描和数字体图像(DVC)相关技术,实现煤样内部体积应变的直观定量表征。

总结国内外文献发现,有 3 种途径可实现(类)岩石材料灾变非连续结构和多物理场效应的透明解析与推演:3D 打印、基于 CT 扫描的三维数字重构、数值模拟。利用 3D 打印技术和光敏树脂制作含复杂结构的三维试样,采用应力冻结和光弹方法,能直观显示煤岩内部裂隙结构及应力场,实现非连续结构和多物理场效应的透明解析与推演。近年来,3D 打印技术出现在矿山岩石力学^[24-25]领域,3D 打印和数值模拟相结合可实现岩石破裂过程可视化研究^[26],3D 打印技术在岩石物理模型力学实验研究中的应用效果综述详见文献^[27],此处不再赘述。目前,在岩石力学领域应用较多的 3D 打印技术主要有光固化技术、熔融沉积成型技术、选择性激光烧结技术等,这些技术各有优缺点^[28]。此外,从材料物性及物理力学性能角度来看,3D 打印模型与天然岩石尚有差距,需从分子结构层面设计打印材料,增添不同成分微观结构来模拟天然岩石并改进打印模型的物理力学性质等^[7]。

基于 CT 扫描的三维数字重构和数值模拟是研究煤岩非连续结构与多物理场效应的重要手段。利用

CT 扫描成像技术和三维数字重构算法,可直接得到煤体内部的煤基质、矿物、裂隙(图 2b),实现煤岩非连续结构演化的透明推演。国际上,Teda 率先将 CT 技术引入岩石力学领域,自 2000 年之后,我国学者相继开展基于 CT 扫描的煤体细观损伤破裂特性研究^[4,29-31]。近年来,随着原位加载工业 CT 成像系统和三维数字重构技术的发展,学者们研究了不同载荷条件下煤岩试样(高度 5~200 mm)裂隙表征、裂隙扩展、裂隙率、分形维数、变形、渗流、声发射等^[32-36];利用该技术,能得到煤岩压缩破坏过程中三维裂隙演化、应力-应变、分形维数等。张良等^[37-38]利用高精度显微 CT 扫描重构方法,对比分析了冲击倾向性煤样裂隙结构与矿物条带的表征参数;进而,利用原位加载显微 CT 技术和分形理论,得到了冲击倾向性煤样压缩破坏全过程中的裂隙演化规律。虽然有多种方法能够实现裂隙表征,但适用于大尺寸试样的高精度原位加载 CT 系统仍在不断升级完善中。利用 CT 扫描结果和数值模拟(RFPA、FLAC^{3D}、PFC^{2D})相结合的方法^[39-41],可得到煤体损伤演化与裂纹扩展规律。其中,数值分析可直观得到煤体变形场、应力场、裂隙场的演化过程,实现透明解析与推演。然而,无论是连续数值分析方法(有限单元法、有限差分法等),还是非连续数值分析方法(颗粒离散元法、块体离散元法等),都面临着能否准确反映煤岩体非连续结构与物理力学性质的多尺度精细化数值模拟这一难题。

1.3 工程岩体非连续结构精细化建模技术及应用

岩体中的非连续结构对地下工程的建造与长期运行安全有重要影响,甚至是决定性作用,而连续介质力学的数值仿真方法(有限单元法、有限差分法、边界元法等)已经不能满足裂隙岩体工程稳定性分析的要求。发展三维裂隙岩体建模尤其是精细化建模技术,对于准确模拟实际工程的岩体结构有重要意义。离散元法(DEM)和离散裂隙网络模型(DFN)^[42]在分析煤岩跨尺度变形破裂特性方面具有明显的优势,使其在采矿、大坝、地下空间与隧道等工程领域中得以大量尝试与应用。

原生裂隙网络是裂隙岩体力学性质的主控因素,D. MasIvars 等^[43]基于 DFN、颗粒体模型(BPM)和光滑节理模型(SJM)提出了等效岩体技术(SRM)。该技术是研究宏观尺度和工程尺度煤岩非连续结构与多物理场效应的有效方法。K. Esmaili 等^[44]以美国 Brunswick 矿为例,利用 PFC^{3D}构建了多尺寸 SRM 模型,确定了裂隙岩体的 REV,认为该矿岩体的 REV 尺寸为 7 m×7 m×14 m。吴顺川等^[45]以露天矿为例,利用 SRM 数值模拟方法研究了岩石力学参数的尺寸效应,认为该矿岩体 REV 尺寸为 15 m×15 m×15 m。

此外,除了裂隙结构,矿物(又称晶质物)也会影响煤岩宏观破裂特性。为了再现岩石内部晶体矿物细

观结构, Potyondy 基于统计学和 Voronoi 镶嵌技术, 率先提出了等效品质模型(GBM)^[46], 该技术已被广泛应用于岩石力学研究。由于随机 GBM 建模方法会导致岩石强度与破裂特性的偏差, 国内外学者在 GBM 建模方法中引入数字图像处理技术(DIP)^[39], 克服了传统基于统计学随机 GBM 建模方法的缺陷, 提高了模拟精度。在此基础上, 李博等^[46]利用高精度显微 CT 技术对不同矿物进行分离提取, 获得岩石内部晶体结构截面图像, 提出了一种 CT-GBM 岩石颗粒流(PFC)建模方法。在岩石矿物条带影响机制方面, 基于 CT 扫描和 DIP 技术的 GBM 离散元 PFC 建模方法是一种有效手段。

综上可知, 国内外大量研究充分表明, 不同尺度(细观-宏观-工程尺度)、不同尺寸(REV 范围内)煤岩变形破裂过程中非连续结构与物理力学性质存在广泛的关联特征。煤岩体跨尺度非连续结构导致应力场非均匀分布, 造成力学各向异性、尺度效应及尺寸效应, 出现非协调宏观破裂现象。透明解析与推演煤岩变形破裂

过程中跨尺度非连续结构与多物理场效应, 是认识煤岩灾变内禀机制的关键。然而, 煤岩压缩破裂过程中非连续结构尺寸效应与物理力学性质之间的关联性仍不明确, 且如何实现三维裂隙煤岩体多尺度精细化数值模拟仍需进一步研究。

2 煤岩体长时稳定性、蠕变演化规律与力学模型

2.1 煤岩蠕变特性、长期强度判定方法及尺寸效应

煤岩力学性质的时间效应及尺度效应是采矿、地下空间及隧道等工程建造与长期稳定运行的重要研究内容, 国内外学者对煤岩蠕变及长期强度^[47]进行了广泛而深入的研究。如图 2e 所示, 当载荷达到煤岩裂纹起裂应力阈值时, 随着时间的推移, 煤岩出现稳定蠕变现象; 当载荷超过裂纹损伤应力阈值时, 则出现非稳定蠕变现象, 若进入蠕变拐点区域则会出现加速蠕变现象。因此, 裂纹损伤应力不仅是裂纹非稳定扩展的起始应力, 还是煤岩长期强度的判定依据。

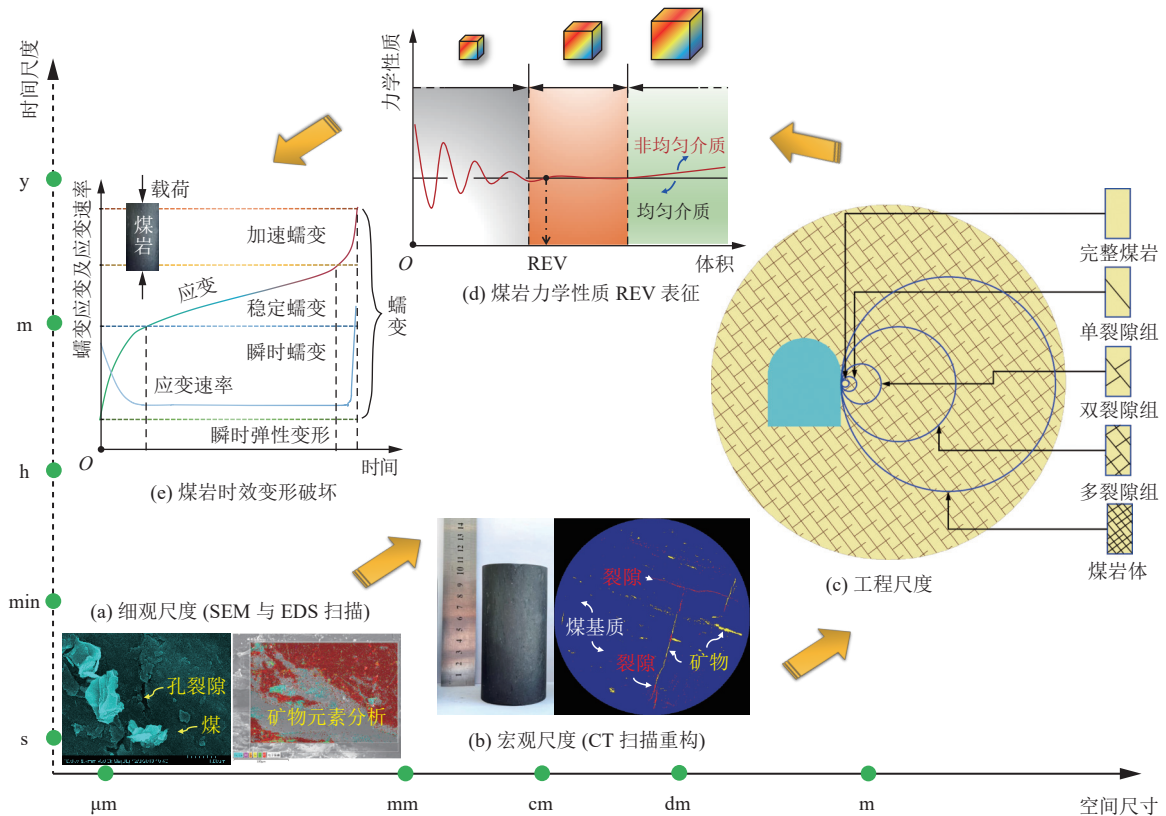


图 2 煤岩非连续结构与力学性质的尺度效应和时间效应

Fig.2 Discontinuous structures of coals and the scale and time effects of coals' mechanical properties

裂纹起裂应力和裂纹损伤应力是 2 个重要的特征应力, 准确客观地判定这两个特征应力阈值较为困难, 国际岩石力学学会(ISRM)一直未给出推荐方法。M. Nicksiar 等^[48]对比分析了体积应变法(VS)、环向应变法(LS)和声发射法(AE)等优势与不足, 提出了环向应变响应法(LSR)。其中, LSR 法是一种较为客

观的特征应力判定方法, 被广泛采用。在此方面, 我国学者发现含水率、层理倾角、围压、轴压加载速率是影响岩石起裂应力和裂纹损伤应力的重要因素^[49-51]。

除了裂纹损伤应力, 通过蠕变实验也能确定煤岩长期强度。王军保等^[52]利用盐岩单轴压缩蠕变实验结果, 对比了等时曲线法和稳态蠕变率拐点法, 提出了改进的

稳态蠕变率拐点法。刘新喜等^[53]通过蠕变实验确定砂岩长期强度(70.5%UCS, 其中 UCS 指单轴抗压强度), 指出等时曲线法受主观因素影响, 过渡蠕变法只能确定岩石长期强度的大致区间, 而稳态黏塑性速率法较为准确。赵伦洋等^[54]利用多尺度损伤蠕变模型推导了硬脆性岩石长期强度的解析表达式。王青元等^[55]借助有限元软件开展了 7 种不同尺寸试样单轴压缩蠕变的数值模拟实验, 分析了长期强度的尺寸效应, 认为长期强度随试样尺寸的增大而减小。目前, 煤岩蠕变及长期强度尺寸效应的发生机理仍不清晰, 有待进一步研究。

2.2 煤岩蠕变力学模型及蠕变过程中表面应变场与裂隙场演化规律

为了预测煤岩体长时变形量, 学者们在实验室及现场开展了大量蠕变实验, 建立了多种蠕变模型及失稳判据。F. S. Rassouli 等^[56]对比分析了页岩短期(4 h)和长期(4 周)蠕变变形量, 发现蠕变柔量因子基本一致, 认为短期循环蠕变后进行 1 d 蠕变实验基本上能预测岩体长时变形量。预测煤岩体长时变形量及工程稳定性, 需要先建立蠕变力学模型及判据。

自陈宗基^[57]将流变学引入我国以来, 学者们对煤岩流变力学(主要是蠕变及长期强度)开展了大量研究, 提出了多种类型的蠕变力学模型。由于经典蠕变模

型(西原正夫模型、Burgers 模型等)无法体现加速蠕变特征, 学者们通常采用两种方法建立非线性蠕变模型, 再利用实验室或现场蠕变实验结果求解模型参数并用于工程实践。学术界现有的非线性蠕变模型存在成百上千种, 大致可分为两类: 一类是在经典蠕变模型中引入非线性元件^[58-64], 建立非线性蠕变模型; 另一类是在蠕变模型中引入损伤力学和断裂力学等理论^[65-69], 描述非线性蠕变损伤破裂特性(表 1)。其中, 基于经典模型建立的非线性蠕变模型能在一定程度上反映加速蠕变, 但是模型的可靠性值得商榷, 夏才初等^[70]详细讨论了这一问题, 此处不再赘述。需要注意的是: 虽然非线性蠕变模型在描述三阶段蠕变方面具有优势, 但是蠕变实验测得的应变是表面应变, 蠕变过程中内部应变尚不清晰。

利用数值模拟与 DIC 技术等实验手段^[71-76], 可获得煤岩蠕变过程中表面变形或裂隙的演化规律。孙长伦等^[77]采用纳米压痕技术研究了砂岩内部不同矿物组分的蠕变特性, 指出砂岩内部不同矿物组分具有不同的流变特性, 松软的方解石和黏土矿物高岭石流变参数较小, 加剧砂岩的流变变形, 而石英和钠长石等坚硬矿物抑制这种流变大变形现象, 认为宏观非均质砂岩体流变变形是一种非协调的变形。Huang Peng 等^[78]研究了不同初始损伤程度煤样的蠕变特性, 发现随着初始损

表 1 两类典型非线性蠕变力学模型本构方程
Table 1 Two types of typical nonlinear creep mechanical models and their constitutive equations

方法	模型名称	蠕变模型	蠕变方程	应用效果
	改进的西原正夫模型 ^[58]		$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{2E_1} + \frac{\sigma}{2E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_1}\right)\right), \sigma < \sigma_s \\ \frac{\sigma}{2E_1} + \frac{\sigma}{2E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_1}\right)\right) + \frac{\sigma - \sigma_s}{2\eta_2} \left(\frac{1}{3}t^3 - \frac{1}{2}\frac{B}{A}t^2 + \frac{C}{A}t\right), \sigma \geq \sigma_s \end{cases}$	可描述瞬时蠕变、稳定蠕变、加速蠕变
	非线性蠕变模型 ^[59]		$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\eta_1}{E_2} \dot{\varepsilon} + \varepsilon - \frac{E_1 + E_2}{E_1 E_2} \sigma = 0, \sigma < \sigma_s \\ \dot{\varepsilon} + \frac{E_2(\varepsilon)}{\eta_1} \varepsilon - \frac{E_2(\varepsilon)}{\eta_1 \eta_2} (\sigma - \sigma_s), \sigma \geq \sigma_s \end{cases}$	可分析三阶段蠕变、稳定性及判据
引入非线性元件	河海模型 ^[61]		$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_1}\right)\right) + \frac{\sigma}{E_3} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_3 t}{\eta_2}\right)\right) + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_3} t^n$	可描述绿片岩三阶段蠕变, 但元件多
	分数阶蠕变模型 ^[63]		$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} \frac{t^\beta}{\Gamma(\beta+1)}, \sigma < \sigma_s \\ \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} \frac{t^\beta}{\Gamma(\beta+1)} + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2} \frac{t^\Gamma}{\Gamma(\Gamma+1)}, \sigma \geq \sigma_s \end{cases}$	可描述盐岩瞬时蠕变、稳定蠕变
	非线性分数阶蠕变模型 ^[64]		$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{\eta_2^\beta} \frac{t^\beta}{\Gamma(\beta+1)}, \sigma < \sigma_s \\ \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{\eta_2^\beta} \frac{t^\beta}{\Gamma(\beta+1)} + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_3} H(t - t_F), \sigma \geq \sigma_s \end{cases}$	能描述软岩三阶段蠕变

续表 1

方法	模型名称	蠕变模型	蠕变方程	应用效果
	变参数蠕变损伤模型 ^[65]		$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{(1-D_t)E_1} + \frac{\sigma}{(1-D_t)\eta_1} + \frac{\sigma}{(1-D_t)E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2}t\right)\right), \sigma < \sigma_s \\ \frac{\sigma}{(1-D_t)E_1} + \frac{\sigma}{(1-D_t)\eta_1} + \frac{\sigma}{(1-D_t)E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2}t\right)\right) + \varepsilon^p, \sigma \geq \sigma_s \end{cases}$	能描述软岩瞬时蠕变、稳定蠕变及损伤劣化效应
引入损伤力学和断裂力学等理论	BNMC蠕变损伤模型 ^[66]		损伤变量 $D = 1 - (1 - t/t_R)^{1/(\gamma+1)}$ 黏聚力损伤方程 $c(t) = c_0(1 - D)$ 内摩擦角损伤方程 $\phi(t) = \phi_0(1 - D)$	能描述二辉橄榄岩三阶段蠕变
	非线性蠕变损伤模型 ^[67]		$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t \exp(\lambda) + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2}t\right)\right), \sigma < \sigma_s \\ \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t \exp(\lambda) + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2}t\right)\right) + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_3} t, \sigma \geq \sigma_s, \varepsilon \leq \varepsilon^* \\ \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t \exp(\lambda) + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2}t\right)\right) + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_3} t \exp[\beta(t - t^*)^m D_{mi}^{n+1}], \sigma \geq \sigma_s, \varepsilon > \varepsilon^* \end{cases}$	可描述砂岩三阶段蠕变
	非线性蠕变模型 ^[69]		损伤变量 $D = 1 - E(\sigma, t)/E_0$ 非线性蠕变方程 $\varepsilon = \sigma \exp(at)/E_0 + B\sigma^{(1-r)}t^\beta$	可描述胶结充填体三阶段蠕变

注: 当前的蠕变模型与蠕变实验仅研究了表面应变, 扰动蠕变过程中的内部应变与非连续结构演化规律尚不清晰。

伤值的增加, 加速蠕变启动时间缩短。Zhang Liang 等^[79]研究了含瓦斯煤岩常规三轴分级加载蠕变和分级循环加卸载蠕变破裂特征。杨超等^[80]对比分析了不同特征应力区间单裂隙砂岩与完整岩石蠕变特性的相关关系, 指出先根据完整岩石特征应力推导裂隙岩体的特征应力, 再计算特征应力区间下的损伤变量便可实现完整岩石推导裂隙岩体的蠕变模型。现有研究成果虽然在一定程度上揭示了煤岩蠕变过程中的表面裂纹演化规律, 但是煤岩蠕变过程中内部非连续结构演化规律, 以及内部变形场、裂隙场、应力场耦合演化规律尚处于研究领域的空白区。

综上, 当前研究的蠕变实验与蠕变模型虽然能反映瞬时蠕变、稳定蠕变及加速蠕变现象, 能揭示煤岩表面变形及裂隙演化, 但是无法实现煤岩蠕变过程中内部变形和非连续结构演化的透明解析与预测。因此, 本文指出: 煤岩蠕变是一种非协调时效变形现象, 非连续结构与应力场非均匀分布是造成该现象的主要原因, 研究煤岩蠕变过程中非连续结构与应力场耦合演化规律是关键。

2.3 扰动煤岩蠕变破裂基础及应用

在工程尺度范围内, 井下采矿活动引起的应力扰动或动载荷^[81]与静载荷叠加, 使得巷道围岩时效变形破坏现象变得更加显著, 甚至诱发蠕变型冲击地压事故。依据载荷变化率将煤矿的载荷状态分为 3 类: 静载荷(小于 0.1 MPa/s)、动载荷(大于 10 MPa/s)、扰动载

荷(0.1~10.0 MPa/s), 其中变化率 1~10 MPa/s 的载荷属于强扰载荷^[9]。目前静载荷、动载荷或动静载荷作用下煤岩破裂特性已被大量报道, 然而强扰煤岩蠕变损伤破裂理论研究较少。

高延法^[82]较早在国内开展岩石单、三轴压缩蠕变扰动实验及本构关系方面的研究, 认为蠕变扰动效应产生的必要条件是: 岩石的应力状态处于岩石强度极限邻域内。黄万朋等^[83]认为岩石蠕变扰动效应理论的重点是研究煤岩进入蠕变状态后对外部冲击扰动载荷的力学响应特征。扰动岩石蠕变实验主要有两种: 落锤冲击扰动岩石蠕变实验以及循环扰动载荷作用下岩石蠕变实验。其中, 落锤冲击扰动岩石蠕变实验又分为落锤冲击扰动(单次冲击)蠕变实验^[84]以及单次扰动(含 10 次冲击)蠕变扰动效应实验^[85]。基于循环扰动载荷方法开展的扰动岩石蠕变实验, 即静载荷恒定后施加周期扰动载荷, 也是扰动岩石蠕变实验的常见实验方法之一。研究发现, 静载荷、扰动幅值和扰动频率对岩石蠕变变形量的影响程度依次减小^[86]。

综上所述, 利用裂纹损伤应力或蠕变实验可判定煤岩长期强度, 而且长期强度存在尺寸效应。利用实验室或现场蠕变实验结果基本上能预测煤岩长时变形量, 在蠕变模型中引入非线性元件、损伤力学或断裂力学理论能反映煤岩蠕变损伤破裂特性。强扰煤岩蠕变损伤破裂理论作为前沿研究方向, 对巷道围岩时效变形破坏、

蠕变型冲击地压等灾害的发生机理、预警及防控极为重要,但强扰煤岩蠕变过程中跨尺度非连续结构、应力场与内部应变场的演化规律尚不明晰。

3 扰动煤岩体蠕变科学问题与研究方法

现有成果集中在煤岩力学性质的尺度效应或时间效应,着重研究了煤岩表面变形破裂特性与蠕变模型。对于强扰煤岩蠕变过程中非连续结构响应的相关研究较少,需要进一步探讨的科学问题有:(1)煤岩压缩破裂过程中非连续结构尺寸效应与物理力学性质之间的关联性;(2)煤岩蠕变过程中非连续结构与内部应变场测定,以及关键力学模型;(3)从实验室宏观尺度跨至工程尺度,强扰煤岩体蠕变过程中非连续结构与多物理场演化规律透明解析。

笔者从工程需求和科学前沿出发,凝练出了巷道围

岩时效变形破坏、蠕变型冲击地压等深井地质灾害背后的基础科学问题是“强扰煤岩体蠕变过程中跨尺度非连续结构演化规律”。强调非连续结构与应力引起内部变形损伤诱发蠕变,非连续结构和应力是煤岩非协调蠕变的主控因素。建议研究煤岩体力学性质的时间效应与尺度效应,应该重点关注强扰煤岩体蠕变过程中跨尺度非连续结构、应力场、内部应变场与表面应变场演化的透明解析。针对这一问题,笔者提出了相应的研究方法:(1)采用CT扫描重构和DVC技术,获得煤岩内部体积应变,如图3所示。(2)利用全尺寸高精度原位加载CT扫描试验系统(该系统是中国煤科研制的大型工业试验平台,部分试验系统参考文献[37-38]),以及多尺度SRM-GBM精细化数值建模技术,实现强扰煤岩体蠕变过程中跨尺度非连续结构与多物理场透明解析,如图4所示。此处,利用全尺寸高精度原位加载

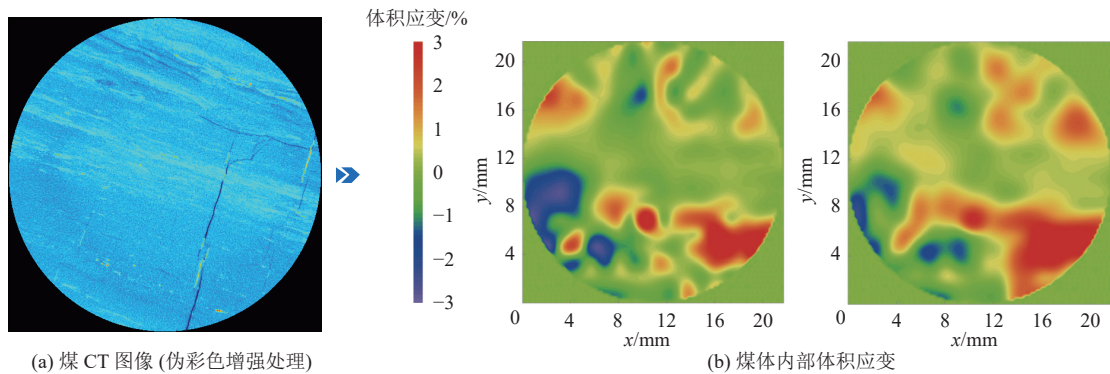


图3 煤体内部体积应变表征
Fig.3 Characterization of volumetric strain inside coals

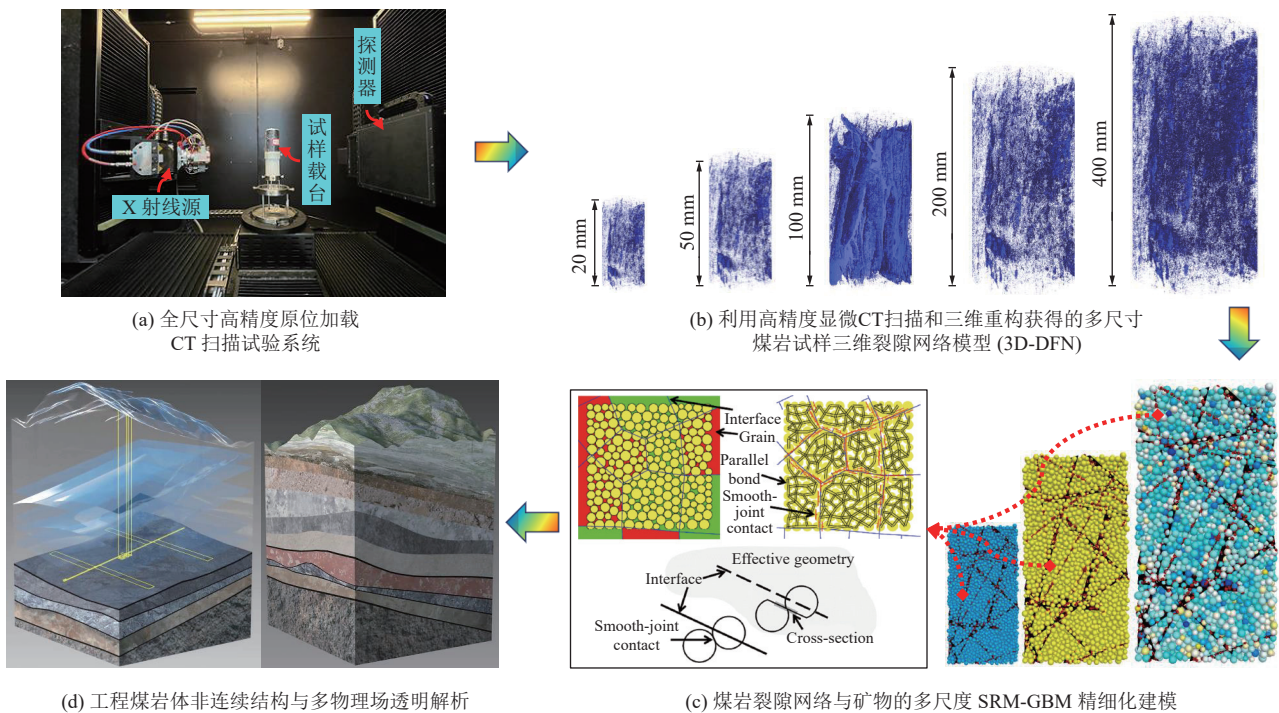


图4 强扰煤岩体蠕变过程中跨尺度非连续结构精细化建模及透明解析

Fig.4 Fine-scale modeling and transparent analysis of trans-scale discontinuous structures during the creeps of strongly disturbed coals

CT 扫描试验系统, 得到多尺寸煤岩试样内部真实的非连续结构。进而, 采用多尺度 SRM-GBM 精细化数值建模技术, 建立三维裂隙网络模型 3D-DFN 与矿物的精细化模型, 并加以验证, 再推广应用至工程场景, 透明解析煤岩体非连续结构与多物理场演化规律。该方法可获得强扰煤岩体蠕变过程中跨尺度非连续结构演化等新规律, 完善岩石力学中的蠕变损伤破裂理论, 拓展三维裂隙煤岩体多尺度精细化离散元建模方法, 具有重要的科学意义和价值。

4 结论

(1) 不同尺度(细观-宏观-工程尺度)、不同尺寸(REV 范围内)煤岩变形破裂过程中非连续结构与物理力学性质存在密切关联特征。煤岩体跨尺度非连续结构导致应力场非均匀分布, 造成力学各向异性、尺度效应及尺寸效应, 出现非协调宏观破裂现象。透明解析与推演煤岩变形破裂过程中跨尺度非连续结构与多物理场效应, 是破解煤岩灾变内禀机制的关键。

(2) 现有蠕变实验与蠕变模型虽然能反映瞬时蠕变、稳定蠕变及加速蠕变现象, 能揭示煤岩表面变形及裂隙演化, 但是无法实现煤岩蠕变过程中内部变形和非连续结构演化的透明解析与预测。

(3) 煤岩蠕变是一种非协调时效变形现象, 非连续结构与应力场非均匀分布是造成该现象的主要原因, 研究煤岩蠕变过程中非连续结构与应力场耦合演化规律是关键, 形成了非连续结构与应力引起内部变形损伤诱发蠕变新理论。

(4) 建立了强扰煤岩体蠕变过程中跨尺度非连续结构与多物理场演化的精细化建模及透明解析方法, 即首先利用全尺寸高精度原位加载 CT 扫描试验系统, 获得多尺寸煤岩试样内部真实的非连续结构; 而后采用多尺度 SRM-GBM 精细化数值建模技术, 建立三维精细化模型, 以获得强扰煤岩体蠕变过程中跨尺度非连续结构演化等新规律。

(5) 研究成果能指导巷道围岩时效变形控制、蠕变型冲击地压预警与防控, 为地下工程建造和长期稳定性分析提供理论基础与参考。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [2] 高明忠, 王明耀, 谢晶, 等. 深部煤岩原位扰动力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2691-2703.
- [3] GAO Mingzhong, WANG Mingyao, XIE Jing, et al. In-situ disturbed mechanical behavior of deep coal rock[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2691-2703.
- [4] KANG Hongpu, GAO Fuqiang, XU Gang, et al. Mechanical behaviors of coal measures and ground control technologies for China's deep coal mines: A review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(1): 37-65.
- [5] 赵阳升. 岩体力学发展的一些回顾与若干未解之百年问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(7): 1297-1336.
- [6] ZHAO Yangsheng. Retrospection on the development of rock mass mechanics and the summary of some unsolved centennial problems[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(7): 1297-1336.
- [7] 黄炳香, 张农, 靖洪文, 等. 深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 911-926.
- [8] HUANG Bingxiang, ZHANG Nong, JING Hongwen, et al. Large deformation theory of rheology and structural instability of the surrounding rock in deep mining roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 911-926.
- [9] 姜福兴, 冯宇, KOUAME K J A, 等. 高地应力特厚煤层“蠕变型”冲击机理研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10): 1762-1768.
- [10] JIANG Fuxing, FENG Yu, A KOUAME K J A, et al. Mechanism of creep-induced rock burst in extra-thick coal seam under high ground stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(10): 1762-1768.
- [11] 鞠杨, 任张瑜, 郑江韬, 等. 岩石灾变非连续结构与多物理场效应的透明解析与透明推演[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 210-232.
- [12] JU Yang, REN Zhangyu, ZHENG Jiangtao, et al. Transparentized solutions and interpretation for the effects of discontinuous structures and multiphysics on rock failure[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 210-232.
- [13] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716-725.
- [14] YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716-725.
- [15] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1469-1476.
- [16] DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1469-1476.
- [17] 潘一山. 冲击地压工程学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2022.
- [18] LI Gen, TANG Chun'an. A statistical meso-damage mechanical method for modeling trans-scale progressive failure process of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 74: 133-150.
- [19] 周创兵, 陈益峰, 姜清辉. 岩体表征单元体与岩体力学参数[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1135-1142.
- [20] HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.

- ZHOU Chuangbing, CHEN Yifeng, JIANG Qinghui. Representative elementary volume and mechanical parameters of fractured rock masses[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(8): 1135–1142.
- [13] 伍法权, 乔磊, 管圣功, 等. 小尺寸岩样单轴压缩试验尺寸效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(5): 865–873.
WU Faquan, QIAO Lei, GUAN Shenggong, et al. Uniaxial compression test study on size effect of small size rock samples[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(5): 865–873.
- [14] 梁正召, 张永彬, 唐世斌, 等. 岩体尺寸效应及其特征参数计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(6): 1157–1166.
LIANG Zhengzhao, ZHANG Yongbin, TANG Shibin, et al. Size effect of rock masses and associated representative element properties[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(6): 1157–1166.
- [15] 郭育霞, 赵永辉, 冯国瑞, 等. 矽石胶结充填体单轴压缩损伤破坏尺寸效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(12): 2434–2444.
GUO Yuxia, ZHAO Yonghui, FENG Guorui, et al. Study on damage size effect of cemented gangue backfill body under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(12): 2434–2444.
- [16] 孟庆彬, 韩立军, 浦海, 等. 应变速率和尺寸效应对岩石能量积聚与耗散影响的试验[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(10): 2386–2398.
MENG Qingbin, HAN Lijun, PU Hai, et al. Experimental on the effect of strain rate and size on the energy accumulation and dissipation of rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(10): 2386–2398.
- [17] 刘刚, 肖福坤, 秦涛. 小尺寸效应下岩石力学特性及声发射规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(增刊 2): 3905–3917.
LIU Gang, XIAO Fukun, QIN Tao. Rock mechanics characteristics and acoustic emission rule under small-size effect[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 37(Sup.2): 3905–3917.
- [18] 张天军, 郭海龙, 景晨, 等. 含孔软煤试样破坏过程的细观裂纹损伤演化机制[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(12): 96–103.
ZHANG Tianjun, GUO Hailong, JING Chen, et al. Mechanism of meso-crack damage evolution in failure process of porous soft coal specimens[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(12): 96–103.
- [19] 杨科, 张寨男, 池小楼, 等. 循环荷载下含水砂岩裂纹演化与损伤特征试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(7): 1791–1802.
YANG Ke, ZHANG Zhainan, CHI Xiaolou, et al. Experimental study on crack evolution and damage characteristics of water bearing sandstone under cyclic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(7): 1791–1802.
- [20] 彭守建, 张倩文, 许江, 等. 基于三维数字图像相关技术的砂岩渗流-应力耦合变形局部化特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(5): 1197–1206.
PENG Shoujian, ZHANG Qianwen, XU Jiang, et al. Experimental study of deformation localization characteristics of sandstone under seepage-stress coupling based on 3D digital image correlation technology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(5): 1197–1206.
- [21] 张庆贺, 陈晨, 袁亮, 等. 基于 DIC 和 YOLO 算法的复杂裂隙岩石破坏过程动态裂隙早期智能识别[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1208–1219.
ZHANG Qinghe, CHEN Chen, YUAN Liang, et al. Early and intelligent recognition of dynamic cracks during damage of complex fractured rock masses based on DIC and YOLO algorithms[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1208–1219.
- [22] 王本鑫, 金爱兵, 赵怡晴, 等. 基于 DIC 的含 3D 打印起伏节理试样破裂特性及损伤本构[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(12): 2029–2039.
WANG Benxin, JIN Aibing, ZHAO Yiqing, et al. Fracture characteristics and the damage constitutive model of 3D printing undulating joint samples based on DIC[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(12): 2029–2039.
- [23] MAO Lingtao, HAO Nai, AN Liqian, et al. 3D mapping of carbon dioxide-induced strain in coal using digital volumetric speckle photography technique and X-ray computer tomography[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 147: 115–125.
- [24] 苏海健, 郭庆振, 靖洪文, 等. 基于 3D 打印的内置粗糙节理岩体力学特性研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(4): 840–846.
SU Haijian, GUO Qingzhen, JING Hongwen, et al. Mechanical properties of rock mass with built-in rough joints based on 3D printing[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(4): 840–846.
- [25] 王文海, 蒋力帅, 何鑫, 等. 基于砂型 3D 打印的复杂节理岩体变形破坏特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(3): 754–767.
WANG Wenhai, JIANG Lishuai, HE Xin, et al. Experimental study on deformation and failure characteristics of complex jointed rock mass based on sand-powder 3D printing[J]. *Chinese Journal of Rock and Mechanics and Engineering*, 2024, 43(3): 754–767.
- [26] ZHU J B, ZHOU T, LIAO Z Y, et al. Replication of internal defects and investigation of mechanical and fracture behaviour of rock using 3D printing and 3D numerical methods in combination with X-ray computerized tomography[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 106: 198–212.
- [27] 江权, 宋磊博. 3D 打印技术在岩体物理模型力学试验研究中的应用研究与展望[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(1): 23–37.
JIANG Quan, SONG Leibo. Application and prospect of 3D printing technology to physical modeling in rock mechanics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(1): 23–37.
- [28] 王乐华, 胡永搏, 付寅韬, 等. 3D 打印技术在岩石力学试验中的应用与展望[J]. *土木工程学报*, 2023, 56(11): 137–154.
WANG Lehua, HU Yongbo, FU Yintao, et al. Application and prospect of 3D printing technology in rock mechanics experiment[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2023, 56(11): 137–154.
- [29] 任建喜, 葛修润, 杨更社. 单轴压缩岩石损伤扩展细观机理 CT 实时试验[J]. *岩土力学*, 2001, 22(2): 130–133.
REN Jianxi, GE Xiurun, YANG Gengshe. CT Real-time testing on damage propagation microscopic mechanism of rock under uniaxi-

- al compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(2): 130–133.
- [30] 丁卫华, 仵彦卿, 蒲毅彬, 等. 基于 X 射线 CT 的岩石内部裂纹宽度测量[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(9): 1421–1425.
DING Weihua, WU Yanqing, PU Yibin, et al. Measurement of crack width in rock interior based on X-ray CT[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(9): 1421–1425.
- [31] 文虎, 樊世星, 马砺, 等. 煤岩损伤研究的 CT 扫描技术发展现状及展望[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 44–51.
WEN Hu, FAN Shixing, MA Li, et al. CT Scanning Technology on coal-rock damage: A comprehensive review[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 44–51.
- [32] 张艳博, 徐跃东, 刘祥鑫, 等. 基于 CT 的岩石三维裂隙定量表征及扩展演化细观研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(10): 2659–2671.
ZHANG Yanbo, XU Yuedong, LIU Xiangxin, et al. Quantitative characterization and mesoscopic study of propagation and evolution of three-dimensional rock fractures based on CT[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(10): 2659–2671.
- [33] 王登科, 吴岩, 魏建平, 等. 基于灰度共生矩阵和工业 CT 扫描的受载含瓦斯煤裂隙动态演化特征[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(1): 31–43.
WANG Dengke, WU Yan, WEI Jianping, et al. Fracture dynamic evolution features of a coal-containing gas based on gray level co-occurrence matrix and industrial CT scanning[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(1): 31–43.
- [34] 王刚, 秦相杰, 江成浩, 等. 温度作用下 CT 三维重建煤体微观结构的渗流和变形模拟[J]. *岩土力学*, 2020, 41(5): 1750–1760.
WANG Gang, QIN Xiangjie, JIANG Chenghao, et al. Simulations of temperature effects on seepage and deformation of coal microstructure in 3D CT reconstructions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(5): 1750–1760.
- [35] 李兆霖, 王连国, 姜崇扬, 等. 基于实时 CT 扫描的岩石真三轴条件下三维破裂演化规律[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 937–949.
LI Zhaolin, WANG Lianguo, JIANG Chongyang, et al. Three-dimensional fracture evolution patterns of rocks under true triaxial conditions based on real-time CT scanning[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 937–949.
- [36] GUO Peng, LI Xiao, LI Shouding, et al. Quantitative analysis of anisotropy effect on hydrofracturing efficiency and process in shale using X-ray computed tomography and acoustic emission[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(11): 5715–5730.
- [37] 张良, 齐庆新, REN Ting, 等. 基于显微 CT 扫描和统计强度的煤岩损伤破裂特性研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(增刊 2): 1–12.
ZHANG Liang, QI Qingxin, REN Ting, et al. Study on the damage and fracture characteristics of coal rock based on the X-ray micro-CT scanning technology and statistical strength theory[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(Sup.2): 1–12.
- [38] ZHANG Liang, LI Xiaopeng, QI Qingxin, et al. Cracking evolution for deep hard coal using X-ray in-situ micro-CT technology and fractal theory[C]//15th International ISRM Congress 2023, Austria: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023: 2436–2441.
- [39] 于庆磊, 杨天鸿, 唐世斌, 等. 基于 CT 的准脆性材料三维结构重建及应用研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(11): 51–62.
YU Qinglei, YANG Tianhong, TANG Shibin, et al. The 3D reconstruction method for quasi-brittle material structure and application[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(11): 51–62.
- [40] 钟江城, 王子辉, 王路军, 等. 基于 CT 三维重构的深部煤体损伤演化规律[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(5): 1482–1494.
ZHONG Jiangcheng, WANG Zihui, WANG Lujun, et al. Characteristics of damage evolution of deep coal based on CT three-dimensional reconstruction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1482–1494.
- [41] 段永婷, 冯夏庭, 李晓. 页岩细观矿物条带对其宏观破坏模式的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(1): 43–52.
DUAN Yongting, FENG Xiating, LI Xiao. Study on the influence of meso-mineral bands on macroscopic failure modes of shale[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(1): 43–52.
- [42] 陈卫忠, 王鲁瑀, 谭贤君, 等. 裂隙岩体地下工程稳定性研究发展趋势[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(10): 1945–1961.
CHEN Weizhong, WANG Luyu, TAN Xianjun, et al. State-of-the-art and development tendency of the underground engineering stability of fractured rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(10): 1945–1961.
- [43] MAS IVARS D, PIERCE M E, DARCEL C, et al. The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modelling[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(2): 219–244.
- [44] ESMAIELI K, HADJIGEORGIOU J, GRENON M. Estimating geometrical and mechanical REV based on synthetic rock mass models at Brunswick Mine[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(6): 915–926.
- [45] 吴顺川, 高艳华, 高永涛, 等. 等效节理岩体表征单元体研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(6): 1120–1126.
WU Shunchuan, GAO Yanhua, GAO Yongtao, et al. Research on representative elemental volume of equivalent joint rock mass[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(6): 1120–1126.
- [46] 李博, 梁秦源, 周宇, 等. 基于 CT-GBM 重构法的花岗岩裂纹扩展规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(6): 1114–1125.
LI Bo, LIANG Qinyuan, ZHOU Yu, et al. Research on crack propagation law of granite based on CT-GBM reconstruction method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(6): 1114–1125.
- [47] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(6): 1081–1106.
SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(6): 1081–1106.
- [48] NICKSIAR M, MARTIN C D. Evaluation of methods for determining crack initiation in compression tests on low-porosity rocks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(4): 607–617.
- [49] 赵奎, 冉珊瑚, 曾鹏, 等. 含水率对红砂岩特征应力及声发射特性的影响[J]. *岩土力学*, 2021, 42(4): 899–908.
ZHAO Kui, RAN Shanhu, ZENG Peng, et al. Effect of moisture

- content on characteristic stress and acoustic emission characteristics of red sandstone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(4): 899–908.
- [50] 李存宝, 谢和平, 谢凌志. 页岩起裂应力和裂纹损伤应力的试验及理论[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(4): 969–976.
LI Cunbao, XIE Heping, XIE Lingzhi. Experimental and theoretical study on the shale crack initiation stress and crack damage stress[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(4): 969–976.
- [51] CHEN Yan, GUO Wenbing, ZUO Jianping, et al. Effect of triaxial loading and unloading on crack propagation and damage behaviors of sandstone: An experimental study[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(12): 6077–6090.
- [52] 王军保, 刘新荣, 宋战平, 等. 基于反 S 函数的盐岩单轴压缩全过程蠕变模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(11): 2446–2459.
WANG Junbao, LIU Xinrong, SONG Zhanping, et al. A whole process creeping model of salt rock under uniaxial compression based on inverse S function[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(11): 2446–2459.
- [53] 刘新喜, 李盛南, 周炎明, 等. 高应力泥质粉砂岩蠕变特性及长期强度研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(1): 138–146.
LIU Xinxi, LI Shengnan, ZHOU Yanming, et al. Study on creep behavior and long-term strength of argillaceous siltstone under high stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(1): 138–146.
- [54] 赵伦洋, 赖远明, 牛富俊, 等. 硬脆性岩石多尺度损伤蠕变模型及长期强度研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(8): 3071–3080.
ZHAO Lunyang, LAI Yuanming, NIU Fujun, et al. Multi-scale damage creep model and long-term strength for hard brittle rocks[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(8): 3071–3080.
- [55] 王青元, 朱万成, 刘洪磊, 等. 单轴压缩下绿砂岩长期强度的尺寸效应研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(4): 981–990.
WANG Qingyuan, ZHU Wancheng, LIU Honglei, et al. Size effect of long-term strength of sandstone under uniaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(4): 981–990.
- [56] RASSOULI F S, ZOBACK M D. Comparison of short-term and long-term creep experiments in shales and carbonates from unconventional gas reservoirs[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(7): 1995–2014.
- [57] 陈宗基. 地下巷道长期稳定性的力学问题[J]. *岩石力学与工程学报*, 1982, 1(1): 1–20.
TAN Tjongkie. The mechanical problems for the long-term stability of underground galleries[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1982, 1(1): 1–20.
- [58] 曹树刚, 边金, 李鹏. 岩石蠕变本构关系及改进的西原正夫模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(5): 632–634.
CAO Shugang, BIAN Jin, LI Peng. Rheologic constitutive relationship of rocks and a modified model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(5): 632–634.
- [59] 王来贵, 何峰, 刘向峰, 等. 岩石试件非线性蠕变模型及其稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(10): 1640–1642.
WANG Laigui, HE Feng, LIU Xiangfeng, et al. Non-linear creep model and stability analysis of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(10): 1640–1642.
- [60] 张向东, 李永靖, 张树光, 等. 软岩蠕变理论及其工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(10): 1635–1639.
ZHANG Xiangdong, LI Yongjing, ZHANG Shuguang, et al. Creep theory of soft rock and its engineering application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(10): 1635–1639.
- [61] 徐卫亚, 杨圣奇, 褚卫江. 岩石非线性黏弹塑性流变模型(河海模型)及其应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(3): 433–447.
XU Weiya, YANG Shengqi, CHU Weijiang. Nonlinear viscoelasto-plastic rheological model (Hohai model) of rock and its engineering application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(3): 433–447.
- [62] 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 Haiping, CAO Ping, XU Wanzhong, et al. Visco-elastoplastic constitutive relationship of rock and modified Burgers creep model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(6): 796–799.
- [63] 吴斐, 谢和平, 刘建锋, 等. 分数阶黏弹塑性蠕变模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(5): 964–970.
WU Fei, XIE Heping, LIU Jianfeng, et al. Experimental study of fractional viscoelastic-plastic creep model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(5): 964–970.
- [64] 刘泉声, 罗慈友, 彭星新, 等. 软岩现场流变试验及非线性分数阶蠕变模型[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(4): 1348–1356.
LIU Quansheng, LUO Ciyu, PENG Xingxin, et al. Research on field rheological test and nonlinear fractional derivative creep model of weak rock mass[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(4): 1348–1356.
- [65] 张强勇, 杨文东, 张建国, 等. 变参数蠕变损伤本构模型及其工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(4): 732–739.
ZHANG Qiangyong, YANG Wendong, ZHANG Jianguo, et al. Variable parameters-based creep damage constitutive model and its engineering application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(4): 732–739.
- [66] 赵延林, 唐劲舟, 付成成, 等. 岩石黏弹塑性应变分离的流变试验与蠕变损伤模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(7): 1297–1308.
ZHAO Yanlin, TANG Jinzhou, FU Chengcheng, et al. Rheological test of separation between viscoelastic-plastic strains and creep damage model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(7): 1297–1308.
- [67] HOU Rongbin, ZHANG Kai, TAO Jing, et al. A nonlinear creep damage coupled model for rock considering the effect of initial damage[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(5): 1275–1285.
- [68] 李晓照, 班力壬, 戚承志. 高渗透压脆性岩石蠕变宏-细观力学模型研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(12): 3987–3995.
LI Xiaozhao, BAN Liren, QI Chengzhi. Study on the mechanical model of macro-micro creep under high seepage pressure in brittle rocks[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(12): 3987–3995.
- [69] 程爱平, 付子祥, 刘立顺, 等. 胶结充填体蠕变硬化-损伤特征及

- 非线性本构模型[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(3): 449-457.
- CHENG Aiping, FU Zixiang, LIU Lishun, et al. Creep hardening-damage characteristics and nonlinear constitutive model of cemented backfill[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(3): 449-457.
- [70] 夏才初, 金磊, 郭锐. 参数非线性理论流变力学模型研究进展及存在的问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 454-463.
- XIA Caichu, JIN Lei, GUO Rui. Nonlinear theoretical rheological model for rock: A review and some problems[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(3): 454-463.
- [71] 谭云亮, 范德源, 刘学生, 等. 煤矿深部超大断面硐室群围岩连锁失稳控制研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 180-199.
- TAN Yunliang, FAN Deyuan, LIU Xuesheng, et al. Research progress on chain instability control of surrounding rock for super-large section chamber group in deep coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 180-199.
- [72] 孙金山, 陈明, 姜清辉, 等. 锦屏大理岩蠕变损伤演化细观力学特征的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3601-3608.
- SUN Jinshan, CHEN Ming, JIANG Qinghui, et al. Numerical simulation of mesomechanical characteristics of creep damage evolution for Jingping marble[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(12): 3601-3608.
- [73] 何峰, 王来贵, 赵娜, 等. 煤岩蠕变破裂判定准则及应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 39-42.
- HE Feng, WANG Laigui, ZHAO Na, et al. Criteria for coal creep rupture and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(1): 39-42.
- [74] 赵娜, 张怡斌, 王来贵. 砂岩蠕变破裂多尺度演化试验研究[J]. 应用力学学报, 2023, 40(1): 87-95.
- ZHAO Na, ZHANG Yibin, WANG Laigui. Experimental study on multi-scale creep rupture evolution of sandstone[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2023, 40(1): 87-95.
- [75] JING Hongwen, YIN Qian, YANG Shengqi, et al. Micro-mesoscopic creep damage evolution and failure mechanism of sandy mudstone[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(3): 04021010.
- [76] XUE Yanchao, XU Tao, ZHU Wancheng, et al. Full-field quantification of time-dependent and-independent deformation and fracturing of double-Notch flawed rock using digital image correlation[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2021, 7(4): 100.
- [77] 孙长伦, 李桂臣, 许嘉徽, 等. 砂岩矿物组分流变特性纳米压痕实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 77-87.
- SUN Changlun, LI Guichen, XU Jiahui, et al. Rheological characteristics of mineral components in sandstone based on nanoindentation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(1): 77-87.
- [78] HUANG Peng, ZHANG Jixiong, SPEARING A J S, et al. Experimental study of the creep properties of coal considering initial damage[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 139: 104629.
- [79] ZHANG Liang, LI Xiangchun, REN Ting. A theoretical and experimental study of stress-strain, creep and failure mechanisms of intact coal[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(12): 5641-5655.
- [80] 杨超, 许轩, 王乐华, 等. 不同特征应力区间单裂隙砂岩与完整岩石蠕变特性的相关关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(7): 1347-1357.
- YANG Chao, XU Xuan, WANG Lehua, et al. Relationship between creep characteristics of intact rock and single-flawed sandstone under different critical stress intervals[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(7): 1347-1357.
- [81] 李夕兵, 宫凤强. 基于动静组合加载力学试验的深部开采岩石力学研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 846-866.
- LI Xibing, GONG Fengqiang. Research progress and prospect of deep mining rock mechanics based on coupled static-dynamic loading testing[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 846-866.
- [82] 高延法. 岩石流变及其扰动效应试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [83] 黄万朋, 孙远翔, 陈绍杰. 岩石蠕变扰动效应理论及其在深地动压工程支护中的应用[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(9): 1621-1630.
- HUANG Wanpeng, SUN Yuanxiang, CHEN Shaojie. Theory of creep disturbance effect of rock and its application in support of deep dynamic engineering[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(9): 1621-1630.
- [84] ZHU Wancheng, LI Shaohua, LI Shuai, et al. Influence of dynamic disturbance on the creep of sandstone: An experimental study[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(4): 1023-1039.
- [85] 王波, 刘重阳, 陈学习, 等. 蠕变扰动效应下红砂岩强度极限邻域试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 54-60.
- WANG Bo, LIU Chongyang, CHEN Xuexi, et al. Experimental study on range of strength limit neighborhood of red sandstone under effect of creep disturbance[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(9): 54-60.
- [86] 王俊光, 梁冰, 杨鹏锦. 动静载荷作用下片麻岩蠕变实验及非线性扰动蠕变模型[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 192-198.
- WANG Junguang, LIANG Bing, YANG Pengjin. Creep experiment and nonlinear disturbance creep model of gneiss under dynamic and static loads[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 192-198.

(责任编辑 范章群)