

尹升华,董福松. 矿山充填体多尺度力学机制与流固耦合特性研究进展[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2026, 8(2): 023052.

YIN Shenghua, DONG Fusong. Research progress on multi-scale mechanical mechanism and fluid-solid coupling characteristics of mining backfill[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2026, 8(2): 023052.

## 矿山充填体多尺度力学机制与流固耦合特性研究进展

尹升华<sup>1,2</sup>, 董福松<sup>1,2</sup>

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 随着矿产资源开采向深部延伸, 胶结充填体在维持采场稳定、实现绿色开采中的重要性日益凸显。充填体作为多相非均质材料, 将充填料浆充填进入采场后, 充填体力学性能受材料组成、养护条件、外部荷载及渗流场等多因素耦合影响, 表现出显著的时空演化与非线性特征, 解决渗流作用诱发的充填体质量问题对于保障矿山安全、高效、绿色开采具有深远的理论价值和工程实践意义。近年来, 在充填体宏-细-微多尺度下的力学演化特征、破坏特性及流固耦合响应等方面取得了丰硕成果。首先, 从胶凝材料类型、配比参数、养护条件等方面总结了充填体强度的影响因素及演化规律, 阐明了充填体时空演化特性; 其次, 归纳了充填体在静态与动态荷载下的破坏模式与裂纹扩展行为, 并与类岩石材料破坏理论进行对比分析; 进一步总结了基于扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线衍射 (XRD) 和 CT 扫描、声发射 (AE) 等多尺度观测手段在揭示充填体微细观结构演化与宏观力学行为之间的内在关联方面的应用成果; 重点阐述了充填体在渗流-应力耦合作用下的力学响应与损伤演化机制, 评述了室内试验与数值模拟方法的特点与局限; 最后, 针对当前研究中本构模型普适性不足、多尺度机理不明确、现场应用脱节等问题, 提出了构建时变损伤-渗流耦合模型、发展多尺度协同观测与仿真平台、推动“室内试验-数值模拟-现场监测”的闭环研究体系等未来发展方向, 以期为深部复杂环境下充填体性能提升、稳定性评估与工程应用提供理论支撑与技术参考。

**关键词:** 流固耦合; 强度演化规律; 宏观结构演化; 损伤破坏特征; 结构劣化机制

中图分类号: TD853

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2026)02-3052-33

## Research progress on multi-scale mechanical mechanism and fluid-solid coupling characteristics of mining backfill

YIN Shenghua<sup>1,2</sup>, DONG Fusong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education of China for Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** As the mining of mineral resources extends to depths, the importance of cemented backfill in maintaining stope stability and achieving green mining has become increasingly prominent. The cemented backfill is a multi-phase heterogeneous material. After the filling slurry is filled into the stope, the mechanical

收稿日期: 2025-06-16

修回日期: 2025-12-30

责任编辑: 张晓茜

DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2025-1217

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFC2904103); 中国五矿集团有限公司科技专项计划“揭榜挂帅”资助项目 (2025ZX A01)

作者简介: 尹升华 (1981—), 男, 江西吉安人, 教授, 博士, 主要从事矿山绿色开采和矿山岩石力学等方面研究。E-mail: csuysh@csu.com

通信作者: 董福松 (1995—), 男, 云南保山人, 博士研究生, 主要从事矿山绿色开采和矿山岩石力学等方面研究。E-mail: dfsong@foxmail.com

properties of the cemented backfill are affected by the coupling of multiple factors such as material composition, maintenance conditions, external loads, and seepage fields. It shows significant spatiotemporal evolution and nonlinear characteristics. Solving the quality problems of the cemented backfill induced by seepage has far-reaching theoretical value and engineering practical significance for ensuring safe, efficient, and green mining of mines. In recent years, fruitful results have been achieved in the mechanical evolution characteristics, failure characteristics and fluid-solid coupling response of cemented backfill at macro-fine-micro scales. First, the influencing factors and evolution rules of the strength of the cemented backfill are summarized from the aspects of cementitious material type, proportioning parameters, maintenance conditions, etc., and the spatiotemporal evolution characteristics of the cemented backfill are clarified. Second, the failure mode and crack propagation behavior of the cemented backfill under static and dynamic loads are summarized, and a comparative analysis is conducted with the failure theory of rock-like materials. Furthermore, the application results of multi-scale observation methods based on SEM, XRD, CT scanning, acoustic emission and other methods in revealing the intrinsic relationship between the microstructure evolution and macroscopic mechanical behavior of the cemented backfill are summarized; the mechanical response and damage evolution mechanism of the cemented backfill under the action of seepage-stress coupling are focused on, and the characteristics, limitations of indoor tests and numerical simulation methods are reviewed. Finally, in view of the problems in current research such as insufficient universality of constitutive models, unclear multi-scale mechanisms, and disconnected field applications, future development directions such as constructing a time-varying damage-seepage coupling model, developing a multi-scale collaborative observation and simulation platform, and promoting a closed-loop research system of "indoor experiments-numerical simulation-field monitoring" are proposed, in order to provide theoretical support and technical reference for performance improvement, stability evaluation, and engineering applications of the cemented backfill in deep complex environments.

**Key words:** fluid-solid coupling; strength evolution law; macro-meso structural evolution; damage and failure characteristics; structural degradation mechanisms

矿产资源构成了人类社会生存发展的物质基石,其稳定供应直接关系到国家经济安全和国防安全,尤其金属矿产多为不可再生资源,这决定了其稀缺性与战略价值。因此,对金属资源的开采实现矿产资源的高效集约化开发,已成为当代矿山企业构建绿色矿山、实现可持续发展的核心理念<sup>[1-3]</sup>。伴随矿产资源需求的急剧攀升,充填采矿法因其突出的矿石回收率、低贫化率、环境友好性及显著的经济效益而获得广泛应用<sup>[4-7]</sup>。矿山开采不断向深部延伸,面临着深度加大、地压剧增及深部地质条件复杂化的挑战,充填采矿法在此背景下展现出日益重要的应用价值和发展潜力,同时对充填体性能提出了更高的要求。

当前,根据中国有色金属工业协会发布的《全国有色金属资源开采公示信息核查分析报告》,充填采矿法在我国有色金属矿山和黄金矿山的应用

比例分别达到 45% 和 37% 以上,其在推动绿色矿山建设进程中扮演着至关重要的角色。矿产资源需求的持续增长导致大量尾矿堆积(据《全国尾矿库环境风险评估报告》及国家环保部门统计,我国金属矿山尾矿存量已超 146 亿 t),给生态环境带来沉重负担。为应对此问题,《中华人民共和国安全生产法》《中华人民共和国环境保护税法》等法规明确规定,新建矿山若无特殊豁免证明,必须采用充填采矿技术。

可持续发展理念的深化和充填技术的进步,使尾砂胶结充填采矿法成为推动矿山实现无废开采目标的有效途径。大量研究和工程实例表明,胶结充填采矿法能否大量推广应用、能否发挥最大效益,与充填体强度能否与矿山开采条件、所选采矿工艺有效匹配息息相关,充填体强度设计是胶结充填采矿法应用成败的决定性因素。

胶结充填体 (Cemented Paste Backfill, 简称 CPB) 是一种人工合成的多相复合材料, 其微观结构包含气相 (表现为微孔隙和气泡)、液相 (主要为孔隙水) 以及固相 (以尾砂和胶凝材料为主体)。充填体性能, 主要是指充填体质量要求, 不仅包含充填强度, 同时包含充填体在进入充填采场后的整体质量, 其性能稳定性是保障采充作业协调性与矿山安全生产的关键要素<sup>[8]</sup>。

在实际生产过程中, 胶结充填料浆采用自流或者泵送方式充填进入井下采场 (图 1), 随后在水化作用下凝结硬化, 此种方式形成的充填体通常强度不高、刚度有限, 在外力作用下极易产生显著变形。这种变形会促进充填体内部微孔隙、微裂纹等初始缺陷的萌生、扩展与贯通, 导致其内部渗流通道数量增加, 渗透性的增强加剧了渗流效应, 进而诱发充填体损伤, 最终使其力学性能持续产生劣化。充填体力学性能的劣化使其承载能力下降, 破坏模式趋于复杂。一旦外部载荷超过其剩余承载力, 充填体将发生破坏失稳, 不仅带来巨大经济损失、严重威胁矿山生产安全, 甚至可能酿成重大人员伤亡事故。

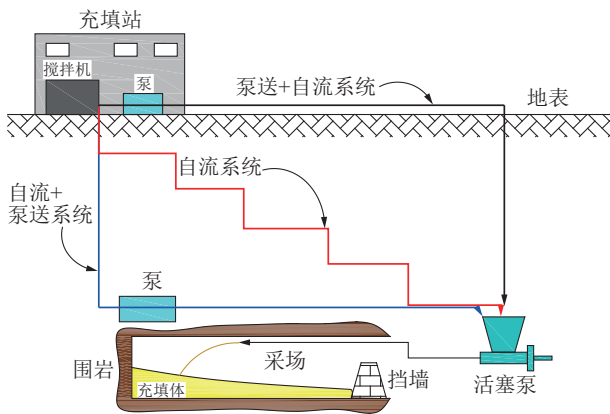


图 1 矿山充填系统示意<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Illustration of the underground mine backfill system<sup>[9]</sup>

在矿山开采活动中, 地下水作为一种广泛存在于自然环境中的流体介质, 是矿山工程安全的首要威胁之一。近年来, 冒顶、片帮和透水事故频发, 究其根源, 多是地下水弱化作用导致顶板或围岩力学强度显著下降所致。特定条件下, 地下水渗入岩体裂隙, 一方面通过渗透压力削弱岩石强度, 另一方面其化学成分可能与岩体矿物发生反应, 共同导致岩石承载能力降低, 进而引发各类安全事故, 对矿山人员生命财产安全构成严重威胁。

将充填料浆充填进入采场后, 由于处于一个封

闭空间, 其强度难以准确获取, 且在由料浆形成充填体的过程中, 受地下水作用影响, 充填体受渗流场、力学场共同作用, 处于流固耦合作用环境中, 其强度具有显著的流固耦合特性, 强度演化特性更加难以掌握。

充填体强度偏低则无法有效控制地压, 采矿安全和效率将会受到影响, 表现为胶结充填采矿法安全性差、生产效率低, 无法满足安全高效开采要求; 充填体强度偏高虽然能有效控制地压, 保证采矿安全, 但充填成本大幅增加, 矿山的生产成本也随之提高, 胶结充填采矿法的优势和效益依然得不到体现。

以上向水平分层充填法为例 (图 2), 作为人工假底的充填体需要足够长的养护时间以获得合理的强度保障井下开采的顺利进行, 同时, 为保证采场顶板安全, 需要尽可能地减少顶板暴露时间, 充填体养护时间与顶板暴露时间二者相互冲突, 给现场生产带来调度管理和安全隐患, 影响矿山生产效率。究其根源, 这一矛盾的本质与充填体在复杂水文地质环境下的力学行为密切相关, 尤其在考虑其流固耦合特性时更为显著。然而, 在针对充填体的流固耦合特性研究中, 大多只考虑了室内试验过程中的流固耦合性能, 而实际生产过程中, 进入采场的充填体会受到来自地下水渗流作用的影响<sup>[10]</sup>。渗流作用会诱发充填体微细观结构演化, 势必改变充填体的渗透特性和强度特性。

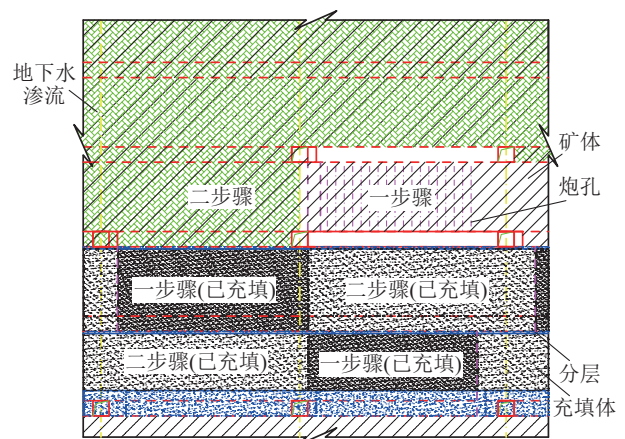


图 2 上向水平分层充填法示意

Fig. 2 Illustration of the upward horizontal cut-and-fill mining method

为解决渗流作用下诱发的充填体质量问题, 如何科学、准确地获取充入采场的充填体强度特征, 及时掌握充填体强度演化规律, 对于保障矿山安全、

高效、绿色开采,提升其可持续发展水平具有深远的理论价值与工程实践意义。

为攻克这一难题,国内外研究者在多个层面开展了广泛而深入的研究工作。在材料科学与宏观力学层面,系统探索了胶凝材料种类与掺量(灰砂比)、料浆质量浓度、养护龄期及不同养护温度条件等关键配比参数对充填体强度发展规律的影响,并建立了若干经验与半经验预测模型。在破坏机理研究方面,借助单轴、三轴、SHPB等试验手段,揭示了充填体在静载、动载及循环荷载下的宏观破坏模式、应力-应变响应、能量吸收与耗散特征。在微观结构表征领域,扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射(XRD)、CT扫描、核磁共振(NMR)及声发射(AE)等先进观测技术的应用,使得研究者能够直观地揭示水化产物形貌、孔隙结构分布、裂纹扩展路径等细微观特征,并尝试建立其与宏观力学性能的定性或半定量关联。在流固耦合这一前沿方向,研究者们也已着手研发改进能考虑渗流作用的室内力学试验装置,探索基于孔隙弹性理论、损伤力学及多孔介质流体力学的耦合模型,并运用FLAC3D、COMSOL、PFC等数值模拟软件进行耦合场仿真分析。

尽管已取得上述进展,但是当前研究体系中,仍存在诸多亟待弥合的断层与局限:首先,多数研究呈现“尺度割裂”状态,即宏观力学试验、细观结构观测与微观机理分析往往独立进行,对于“微观水化与孔隙演化-细观裂纹萌生与扩展-宏观强度劣化与渗流突变”的跨尺度链式响应与耦合机制,尚缺乏系统性的试验揭示与统一的理论描述框架;其次,现有的流固耦合本构模型大多基于岩石力学与土力学经典理论,未能充分考虑到充填体作为一种水硬化材料所特有的时变性(强度与模量随龄期增长)、非均质性(尾砂颗粒分布、分层效应)以及损伤演化与渗流耦合所表现出的高度非线性特征,导致模型预测能力在复杂条件下的准确性受限;最后,也是制约成果转化的关键之一,即当前大量研究结论源于实验室尺度下均质、理想边界条件的试件,与尺度巨大、受复杂三维地质边界与动态采动扰动影响、且充填体结构非均质的井下实际工程之间存在较为显著的尺寸效应,使得许多实验室优化方案与理论模型在指导现场工程设计、稳定性评估与风险预测预警时的可靠性与适用性面临严峻挑战。

## 1 充填体力学特性演化规律

深部矿产资源开采过程中,胶结充填体作为维持采场稳定的关键之一,其力学性能演化规律直接关系到井下安全与回采效率。充填体全生命周期中,其力学行为受材料组成、养护条件及外部荷载等多因素耦合控制,具有典型的时空演化特征。系统揭示充填体力学性能演化机制,是优化充填设计、预测长期稳定性的理论基础。图3为充填体力学特性演化规律研究框架。

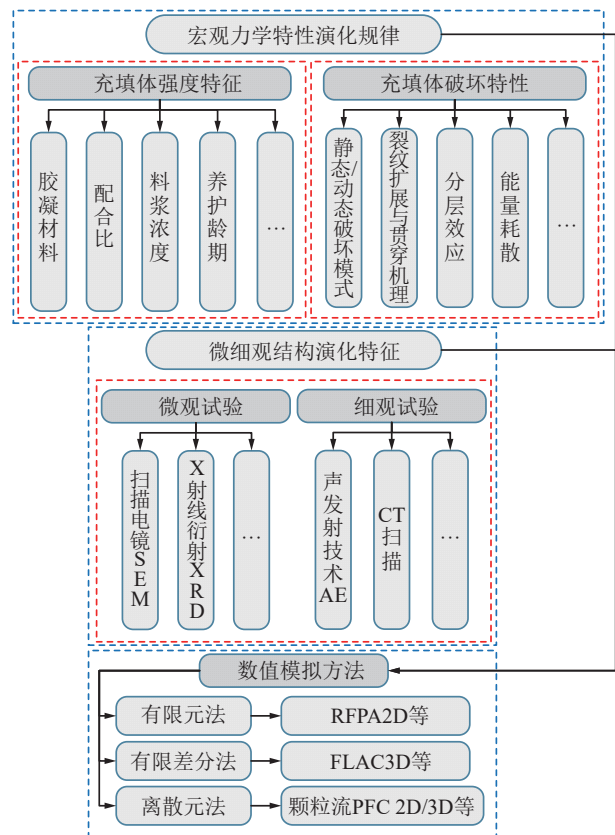


图3 充填体力学特性演化规律研究框架

Fig. 3 Research framework on the evolution rules of mechanical properties of backfill

### 1.1 充填体强度特征

胶结充填采矿法以其绿色安全的特点在矿山中得到推广应用,其中的胶结充填体作为新型的工程材料具有很高的关注度。针对充填体的强度演化规律,目前主要是围绕各强度影响因素开展相关研究,如水泥替代材料、配合比、养护龄期等。

针对水泥胶凝材料替代材料研究方面,CHEN<sup>[11]</sup>、WANG<sup>[12]</sup>、CAO<sup>[13]</sup>、JIANG<sup>[14]</sup>等研究了改性剂,如非极性有机硅烷、聚羧酸系、聚丙烯(PP)纤维等材料作为胶结材料对充填体的强度影

响; LI<sup>[15]</sup>、YANG<sup>[16]</sup> 在不同的固化时间测试了不同浓度的水泥磷石膏充填料浆, 研究了水泥磷石膏充填体的强度; NIROSHAN<sup>[17]</sup>、WU<sup>[18]</sup>、SUN<sup>[19]</sup>、LIU<sup>[20]</sup> 等通过测试土工聚合物胶结煤矸石粉煤灰充填体 (GCGFB) 的力学特性, 探讨了粉煤灰掺量对充填体强度的作用机理; 为优化胶结充填成本并提升材料对矿山条件的适应性, 吴爱祥等<sup>[21]</sup> 对比分析了碱激发材料、高水材料、胶固粉及 CH 半水磷石膏等 4 种胶凝剂的性能特征; 阮竹恩等<sup>[22]</sup> 以矿用精炼渣基通过建立早强胶凝材料的充填体单轴抗压强度响应回归方程, 确定了最佳胶凝配比; XUE<sup>[23]</sup>、JIANG<sup>[24]</sup>、温震江<sup>[25-26]</sup>、朱庚杰<sup>[27]</sup> 等通过采用矿渣替代水泥作为粘结剂的浆体充填体 (CPB), 研究了当胶凝剂为矿渣时对充填体的强度影响。学者们从材料科学角度系统探讨了不同胶凝材料及外加剂对充填体强度的作用机制, 而这些材料的性能表现本质上均通过充填体硬化过程实现其力学特性的演化。屈慧升等<sup>[28]</sup> 研究了不同配比下以煤气化

渣作为胶凝材料的煤矸石-煤气化渣胶结充填体的充填性能; 杨晓炳等<sup>[29]</sup> 以工业固废钢渣作为胶凝材料, 通过构建确定配比方案的 GA-SVM 模型, 确定了最佳配比; 李科技等<sup>[30]</sup> 采用生物质电厂灰经水合热与低温煅烧制作胶凝材料, 研究了水合热与低温煅烧对胶凝材料的影响, 分析不同因素水平组合得到了最佳组合。

充填体由充填料浆形成, 随着时间发生硬化; 料浆由尾砂与水泥浆液形成, 具有相对较高的未结合水。受重力作用及水泥水化作用影响, 料浆发生沉降并初凝形成具有充填体骨架与包裹空气的空间, 水化反应完成后体积减小, 整个充填体形成硬化, 其充填硬化过程如图 4 所示, 整个过程不仅是材料性能实现的物理化学基础, 也为各类胶凝材料 (如矿渣、磷石膏、碱激发材料等) 的作用提供了共性机制框架, 即不同胶凝剂通过影响水化反应速率、孔隙结构形成及界面结合强度, 最终决定充填体宏观力学行为机制。

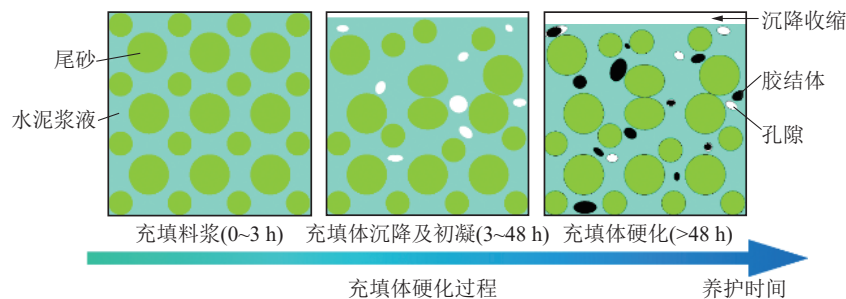


图 4 充填体硬化过程<sup>[31]</sup>

Fig. 4 Hardening process of the backfill mass<sup>[31]</sup>

针对配比、浓度及养护龄期等方面, 郭廷儒等<sup>[32]</sup> 通过设置灰砂比 1:6、1:8、1:10 的试验组, 系统研究了水泥尾砂充填体的固结行为和强度特性, 评估了其工程应用的可行性, 并寻求成本控制与经济效益的平衡点; 许前等<sup>[33]</sup> 基于不同配比的充填料浆流变学测试确定了料浆最佳输送浓度, 并在此基准下开展了多组充填体强度试验; 张贺等<sup>[34]</sup> 通过不同养护龄期的充填体单轴压缩试验及破坏断口形貌扫描试验, 揭示了不同龄期充填体力学损伤特性与断口形貌分形特征; 李文臣等<sup>[35]</sup> 采用单轴压缩、基质吸力、含水率及孔隙率的多参数耦合测试的方法, 阐明了硫酸盐环境-胶凝材料-龄期对尾砂充填体早期强度与基质吸力演化的交互机制; 褚衍玉等<sup>[36]</sup> 基于无侧限单轴抗压正交试验, 建立了灰砂比-

浓度-龄期与抗压强度的非线性映射模型及多因素回归方程; HE 等<sup>[37]</sup> 通过不同温度养护条件下的不同龄期充填体强度试验, 分析了充填体强度失效模式与损伤-应变变化特征; 刘炜震等<sup>[38]</sup> 开展了不同养护温度下的充填体三轴抗压试验, 分析了卸荷过程全应力-应变规律。

针对料浆流动性能以及泌水性能等方面, 彭啸鹏等<sup>[39]</sup> 采用测试模具探索了不同配比、不同级配下的泌水性能对充填体的影响; 徐毅安等<sup>[40]</sup> 通过充填料浆泌水特性试验研究了物料、浓度及胶凝材料含量对泌水性能的影响规律; 尹升华<sup>[41]</sup>、侯永强<sup>[42]</sup>、周林邦<sup>[43]</sup> 等研究了不同物料组分下充填体的料浆流变特性。

针对工程应用需求角度, 李占金等<sup>[44]</sup> 通过灰砂

比-龄期-浓度三因素正交试验, 解析了充填体力学响应的敏感性特征; 牛鹏等<sup>[45]</sup>采用全面法试验设计, 在复杂现场条件下构建了料浆浓度-砂灰比双指标配比优化域; 李祥龙等<sup>[46]</sup>借助 SHPB 冲击试验, 量化了 4 种配比充填体的应力应变响应特征、

动态抗压强度与应变率相关性 & 破坏模式演变规律, 由不同配比充填体在不同应变率条件下的破坏形态 (图 5) 可知, 同一应变率范围内, 配比越高则形成的水化产物越多, 其破坏程度就越小, 相同配比下, 随着应变率的增大试样逐渐变得破碎。



图 5 不同配比充填体破坏模式<sup>[46]</sup>

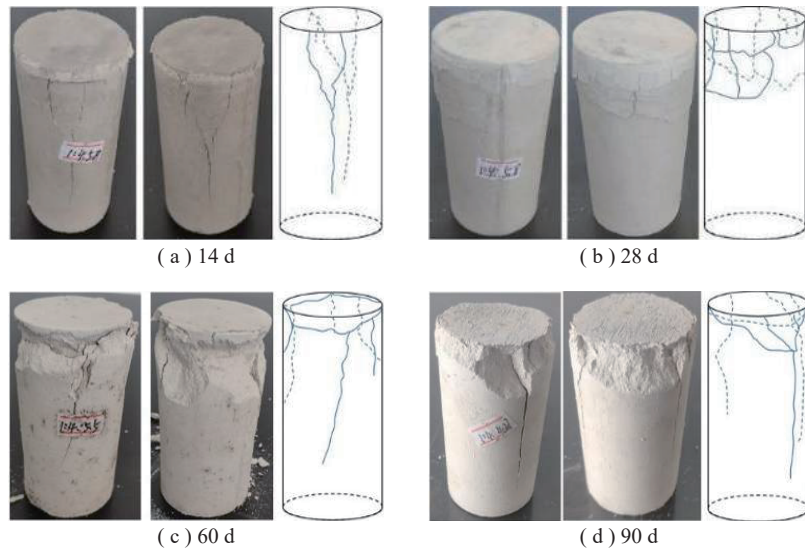
Fig. 5 Damage patterns of backfill with different ratios<sup>[46]</sup>

此外, 曹帅等<sup>[47]</sup>通过分层充填体单轴试验, 揭示了充填次数对力学性能与破坏机制的渐进弱化效应; 寇云鹏等<sup>[48]</sup>聚焦于分级细尾砂胶结体长期性能, 指出充填体的破坏形式以拉剪破坏为主, 如图 6 所示, 从宏观尺度揭示了其强度时效演化规律与失稳阈值。

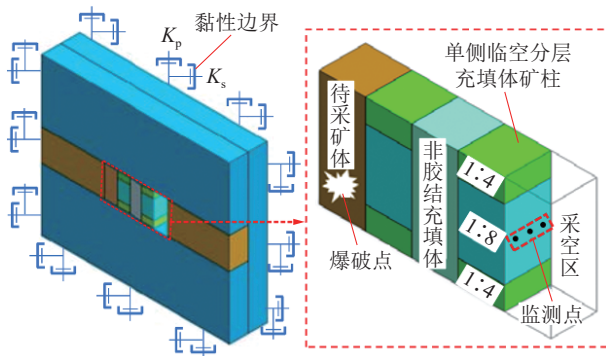
与上述充填体强度影响因素相比, 胶结充填体由地表充填站制备经管道输送进入井下充填采场

后的强度问题也是学者们关心的关键问题, 并由此开展了大量相关研究。

朱鹏瑞<sup>[49-50]</sup>、姜立春<sup>[51]</sup>等在矿柱回收回采过程中, 分析了充填体的结构特征及其与围岩、周边充填体的相互作用, 建立胶结充填体的抗压强度与声波波速的数学模型与结构响应模型, 构建结构响动力模型并设置监测点, 揭示了井下充填动力响应机制, 如图 7 所示。魏丁一<sup>[52]</sup>、刘鹏亮<sup>[53]</sup>等研究了

图6 不同养护龄期充填体破坏模式<sup>[48]</sup>Fig. 6 Damage pattern of backfill at different conservation ages<sup>[48]</sup>

充填采矿法中胶结充填体的水化放热作用, 现场实测充填体温度, 并对充填体散热的影响及治理进行了研究。

图7 井下充填模型<sup>[51]</sup>Fig. 7 Downhole backfill model<sup>[51]</sup>

张钦礼<sup>[54]</sup>、王志凯<sup>[55]</sup>等研究深井矿山全尾砂胶结充填体的早期强度特性, 并开展了不同养护龄期的胶结充填体单轴压缩试验, 制备了不同灰砂比和料浆浓度的充填体试样, 分析了不同养护龄期的胶结充填体在固结后不同强度激发期对充填体单轴抗压强度的影响规律, 并借助扫描电镜对充填体微观结构进行观察与分析。

李文臣<sup>[35]</sup>、褚衍玉<sup>[36]</sup>、贺桂成<sup>[56]</sup>、聂亚林<sup>[57]</sup>等采用废石、水泥、黄土、不同硫酸盐浓度的尾砂等集料以及不同胶凝材料配置不同配比胶结充填体试样来进行试验, 分别对不同龄期的试样系统进行了单轴抗压强度、基质吸力、含水率和孔隙率测试, 得到了不同灰砂比、不同浓度、不同龄期参数与

充填体单轴抗压强度的曲线关系和多参数线性回归方程式, 同时分析了影响充填体抗压强度的主次因素。

焦国芮<sup>[58]</sup>、李凯兵<sup>[59]</sup>、刘超<sup>[60]</sup>、赵国彦<sup>[61]</sup>等对胶结充填体在深井开采过程中受到高温影响和低温高寒地区的资源开发问题进行研究, 分别对试件进行不同温度的热处理之后, 进行单轴抗压试验, 分析了温度、料浆浓度和灰砂比对充填体强度的影响规律。

王志会<sup>[62]</sup>、王明旭<sup>[63]</sup>、王瑞鹏<sup>[64]</sup>等在地下采场胶结充填体强度设计过程中, 考虑接触带区域应力环境的复杂性, 模拟了围岩与充填体接触区域的非均匀受力情况, 得出充填体围岩界面峰值抗剪强度是充填体安全系数计算的重要参数, 给出了一定充填体侧压力下充填体围岩界面峰值抗剪强度预估方法, 使用非线性拟合能力强大的神经网络进行预估。

胶结充填体在维持采场岩体稳定性方面主要充当一种支护材料, 为地下采矿作业创造有利的工作条件, 郑明强等<sup>[65]</sup>分析了二步矿体中的应力分布, 指出采场最后能否维持稳定取决于胶结充填体与二步矿体之间的相互作用, 以此研究了充填体对二步回采矿体的作用机理来保障采场稳定和安全。

充填体强度的形成是一个多因素共同作用的过程, 包括材料构成、料浆配比、工艺条件及工程应用等。当前研究中, 胶凝材料逐渐由传统水泥基转向工业固废基, 在保障强度的同时兼顾了环保要求;

加载方式从静态扩展至动态, 聚焦分层效应、加载过程及熵焓关系对强度的累积影响; 强度评价由单一指标发展为系统稳定性评估, 重点研究充填体与围岩协同作用, 并借助神经网络、颗粒流等手段进行预测与优化。

## 1.2 充填体破坏特性

相较于岩石及类岩石材料在压缩状态下破坏特征已形成的较为系统的理论体系与研究模式, 充填体在类似载荷条件下的破坏机理研究仍处于发展阶段, 研究成果相对有限。目前, (类) 岩石材料在破裂模式、裂纹扩展行为及宏观力学响应方面的研究已较为成熟, 为其破坏机制的深入理解奠定了坚实基础。基于此, 近年来充填体的破坏特征研究也逐渐受到重视, 现有工作主要围绕其宏观破坏形态、细观裂纹演化路径以及充填工艺 (如料浆浓度、固化条件等) 对力学性能的影响展开, 初步揭示了其在受压过程中的力学特性与破坏规律。

### (1) (类) 岩石破坏特征研究

岩石裂纹演化机理研究已形成较完善的理论体系。程立潮等<sup>[66-68]</sup>通过砂岩表面裂纹定量表征, 基于自主研发试验装置揭示了剪切破坏过程中法向应力与饱和度对细观裂纹贯通模式的调控机制; ZUO 等<sup>[69]</sup>基于岩石阶段性变形响应, 解析了围压约束下裂纹动态扩展行为; CHEN 等<sup>[70-71]</sup>结合单轴、三轴压缩试验, 阐明了热力耦合场中花岗岩的跨尺度破坏机理。针对冲击载荷效应, 赵洪宝等<sup>[72]</sup>采用落锤冲击系统, 量化了煤体表面裂纹扩展规律。在复杂岩石条件研究方面, ALIABADIAN 等<sup>[73]</sup>通过巴西劈裂试验, 建立了各向异性岩石破裂准则; 王登科等<sup>[74]</sup>揭示了煤体在热-力交变环境下裂隙网络演化特征; 田文岭等<sup>[75]</sup>通过不同预制共面双裂隙破裂裂隙倾角变化的室内与数值模拟试验, 分析了共面双裂隙破坏特征, 如图 8 所示, 基于 PFC2D 数值仿真, 再现了围压梯度下砂岩裂纹演化的分形特性。

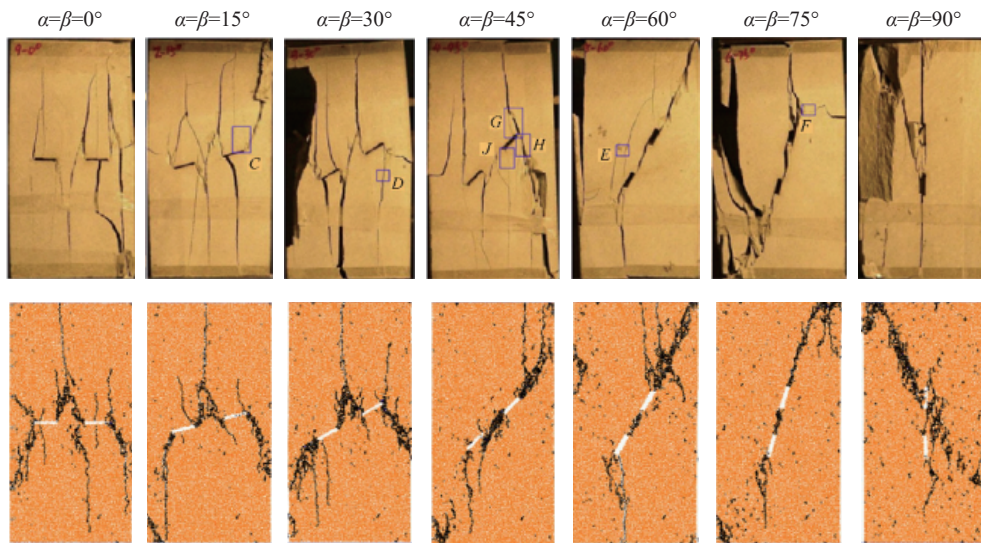


图 8 单轴压缩下共面双裂隙砂岩破裂模式试验与模拟结果<sup>[75]</sup>

Fig. 8 Experimental and simulation results of rupture mode of coplanar bifurcated sandstone under uniaxial compression<sup>[75]</sup>

类岩石材料裂纹演化机理研究方面, 学者们做了大量的研究工作。赵程等<sup>[76-77]</sup>基于 3D 数字图像相关技术, 揭示了预制单裂纹试件在单轴压缩中的变形局部化与裂纹分叉规律; 李树刚等<sup>[78]</sup>采用自主研发 YYW-II 无侧限压缩仪, 量化了含裂隙类岩石材料渐进破坏过程的裂纹贯通阈值; WONG 等<sup>[79-81]</sup>通过石膏压缩试验耦合粒度分析, 建立了裂纹成核位置与骨料粒径分布的定量构效关系。

针对增强充填体力学性能的混合材料方面, 焦

华喆等<sup>[82-83]</sup>证实纤维掺入可显著改变混凝土裂纹扩展路径及能量耗散模式; 唐礼忠等<sup>[84]</sup>基于 PFC2D 数值模拟, 分析了单轴压缩下微裂隙倾角变化规律; 黄彦华等<sup>[85]</sup>则通过巴西劈裂试验重构了裂纹扩展全过程的细观应力场-损伤场协同演化机制。

### (2) 充填体破坏特征研究

充填体裂纹演化机制研究相对较少。徐文彬等<sup>[86-87]</sup>结合三点弯曲试验与 PFC2D 颗粒流模拟, 重构了温度-裂隙耦合场中裂纹全程扩展的跨尺度

断裂机制; 周科平等<sup>[88]</sup> 基于渗透压调控单轴试验, 揭示了渗流压力对充填体强度劣化的阈值效应及非线性变形响应。

针对动态荷载方面, 谭玉叶等<sup>[89]</sup> 通过 SHPB 单次及循环冲击试验, 量化了充填体在冲击荷载下的强度衰减率与损伤累积规律; 杨世兴等<sup>[90]</sup> 采用 SHPB 冲击试验探讨了不同养护龄期充填体的动力学性能; 吴再海等<sup>[91]</sup> 则借助低温单轴压缩试验, 阐明了 NaCl 含量对充填体力学行为时效演化的化学-力学耦合机制; 针对不同加载速率条件, 孙思瑞等<sup>[92]</sup> 通过单轴压缩试验, 结合 DIC 与声发射技术手段, 分析了不同加载速率下充填体的能量耗散特征; 刘洪磊等<sup>[93]</sup> 自主研发了变刚度加载试验系统, 在不同刚度条件下进行试验, 研究了充填体的破坏规律。

以上学者们的研究多聚焦于不同荷载条件对充填体宏观力学性能的调控, 其内部微观机制尚不明晰。王永定等<sup>[94]</sup> 通过渣粉粒径梯度试验, 揭示了

骨料粒度分布与充填体强度演化的跨尺度关联; 付自国等<sup>[95]</sup> 基于超细料浆显微结构分析, 建立了配合比参数与充填体强度的定量构效模型。针对工业主流全尾砂充填体系方面, 郭育霞等<sup>[96]</sup> 对充填体试件压缩过程进行声发射及电阻监测, 采用 SEM 进行微观形貌观测, 分析了充填体的损伤破坏规律; 曹帅<sup>[97]</sup>、贺桂成<sup>[98]</sup> 等采用分层充填体单轴试验, 阐明料浆浓度与填充次数对强度劣化的协同效应; 王金星等<sup>[99]</sup> 借助 3D 打印技术, 利用 PFC2D 数值方法, 分析了分层充填体不同浓度、灰砂比及充填间隔时间下的胶结面粗糙度与充填体损伤破坏间的规律; 程爱平<sup>[100]</sup>、兰文涛<sup>[101]</sup>、孟庆彬<sup>[102]</sup> 等通过多尺度试样对比, 如图 9 所示, 证实尺寸效应诱导的强度弱化规律; 充填体试样受压发生破坏, 各表面裂纹形成贯穿裂纹, 且具有对称性和邻近性<sup>[103]</sup>, 如图 10 所示; 徐文彬等<sup>[104-105]</sup> 则结合单轴、三轴压缩试验, 剖析了灰砂比-浓度耦合场中充填体破坏模式的相变临界点。

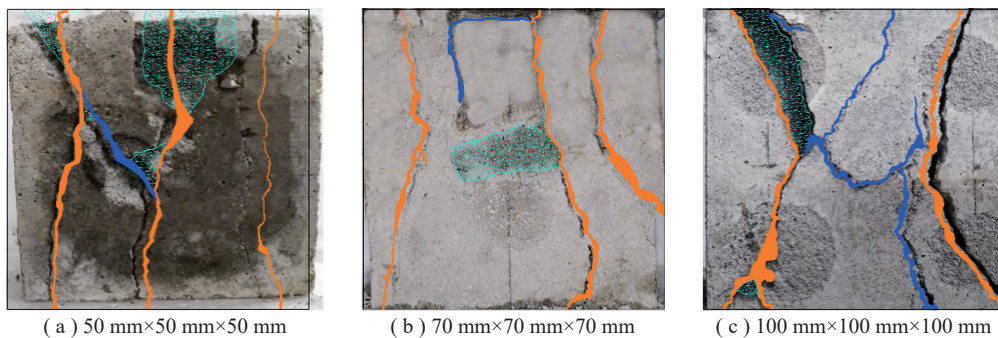


图 9 不同尺寸充填体破坏形态<sup>[100]</sup>

Fig. 9 Damage patterns of different sizes of backfill<sup>[100]</sup>

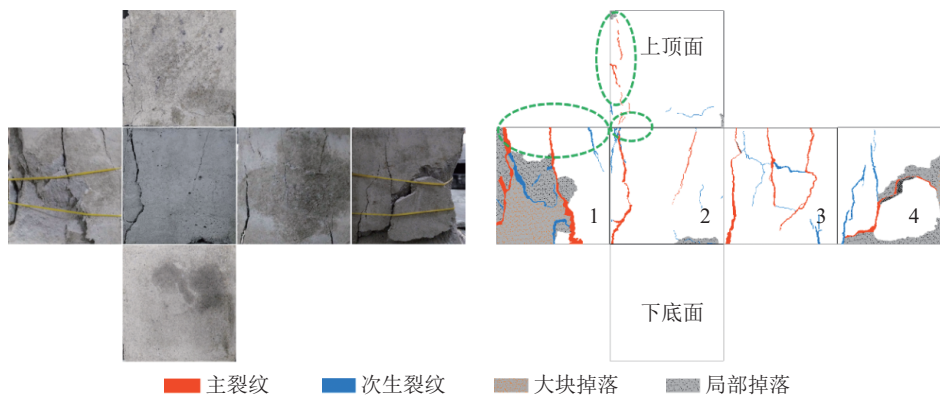


图 10 充填体试样各表面破坏形式<sup>[103]</sup>

Fig. 10 Damage forms on each surface of the backfill body specimen<sup>[103]</sup>

充填工艺中颗粒级配差异导致采场内分层效应, 诱发力学响应各向异性。张云海<sup>[106]</sup>、刘志

义<sup>[107]</sup>、宋学朋<sup>[108-109]</sup> 等基于 SHPB 冲击试验, 利用分离式 Hopkinson 杆系统, 揭示了动载作用下分层

充填体破坏阈值及能量传递路径; 曹帅等<sup>[47, 97]</sup>通过分层胶结充填体的浓度-充填次数双梯度试验, 建立了分层界面强度衰减与充填工艺参数的定量关联模型, 如图 11 所示, 不同浓度与充填次数下的充填体破坏形式表明, 分层面间存在明显的低强度夹层, 从而导致受压后出现不同程度的分离与错动, 对充填体强度具有折减效应。针对分层结构失效机

理研究方面, 陈国瑞等<sup>[110]</sup>解析了灰砂比梯度下分层体端部应力集中导致的剪切滑移机制, 如图 12 中 4 种不同充填次数的充填体破坏形态具有明显的分层特征; 汪杰等<sup>[111]</sup>量化了水平分层充填体损伤累积-强度退化的时空演化规律; 宋卫东等<sup>[112]</sup>则发现了充填次数对能耗分配与损伤模式的分形控制效应。



图 11 不同浓度充填体试样破坏形式<sup>[47]</sup>

Fig. 11 Damage forms of specimens backfill with different concentrations<sup>[47]</sup>



图 12 分层充填充填体破坏形态<sup>[110]</sup>

Fig. 12 Destruction of the layered backfill<sup>[110]</sup>

充填体在静载、动载条件下的力学响应相比(类)岩石材料呈现显著的渐进破坏特征, 动载加剧

了内部损伤积累, 静载下损伤演化则多表现为局部化破坏与裂纹稳定扩展, 形成“加载-损伤-破坏”的关联机制。现有研究借助 CT 扫描、声发射及颗粒流模拟等手段, 揭示了充填体从细观损伤至宏观破坏的全过程机理, 为其工程稳定性分析提供了依据。

### 1.3 充填体微细观结构演化特征

宏观尺度的研究对揭示胶结充填体力学行为存在固有的局限, 难以全面表征其性能本质。究其原因, 胶结充填体的宏观力学响应根本上受控于其内部微观结构, 特别是水化产物形态、孔隙分布特征以及骨料颗粒的排列组合方式, 需从微细观角度对胶结充填体的内部结构特征进行研究。

针对充填体微观结构性能, 当前研究主要借助扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射 (XRD) 等微观分析技术。徐文彬等<sup>[113]</sup> 通过不同条件下充填体的微观结构演化与强度试验, 探究胶结产物对其力学性质的影响; 阮竹恩<sup>[22,114]</sup>、朱德福<sup>[115]</sup> 等采用 XRD 与 SEM 进行微观分析, 探索了胶凝水化产物与微观结构之间的变化规律; 朱庚杰等<sup>[27]</sup> 利用 X 射线衍射与扫描电镜, 通过探究水化产物与微观结构揭示了充填体强度形成机制; 李鑫<sup>[116]</sup>、陈绍杰<sup>[117]</sup> 等结合 XRD、热重分析和电镜, 建立了充填体宏观力学特性与水化产物 (如种类、数量、微观结构等) 的关联; 如图 13 所示, 通过 XRD 图谱进行微观分析, 根据衍射峰分析水化产物及水化过程; 甘德清等<sup>[118-119]</sup> 对比不同配比及浓度养护下充填体的力学特性变化,

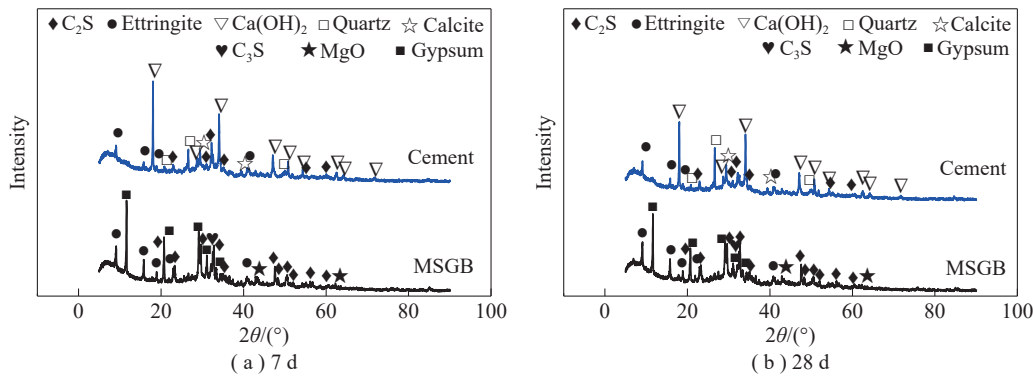


图 13 XRD 曲线<sup>[124]</sup>  
Fig. 13 XRD curves<sup>[124]</sup>

针对胶结充填体细观力学研究主要采用数值模拟与试验两种方法。细观数值模拟基于多相非均质脆性材料的细观参数设定与分析, 探究细观参数对宏观力学特性的影响, 如颗粒流软件模拟。试验手段则主要包括 CT 扫描与声发射技术; WEI<sup>[125]</sup>、易雪枫<sup>[126]</sup> 等运用 CT 扫描三维重建技术, 如图 15 所示, 对充填体进行三维重建, 揭示了不同应力状态下充填体孔隙结构的演化规律及孔隙率变化; 孙光华等<sup>[127]</sup> 结合宏观试验数据与细观力学理论, 构建了满足 Weibull 统计分布的细观损伤模型, 从细观层次深入解析了胶结充填体单轴压缩下的损伤破坏机制; 程爱平<sup>[128-129]</sup>、刘艳章<sup>[130]</sup>、李杨<sup>[131]</sup> 等采用声发射技术, 实时监测受载充填体内部微裂隙的萌生与发展, 通过捕获声波信号获取特征参数, 并将其与声发射空间分布规律和细观力学参数关联, 如图 16 所示, 完整揭示了从微破裂扩展、贯通直至

并利用 SEM 比较微观结构, 揭示了微观差异导致宏观性能差异的原因, 使用扫描电镜从微观尺度探索了充填体早期损伤对后期力学特性的影响机制; 魏晓明等<sup>[120]</sup> 通过 SEM 和能谱分析, 分析了全尾砂料浆固结演化过程, 并基于宏微观分析揭示了自重压力对充填体宏观力学性能及微观孔隙结构的作用机理; 吴疆宇等<sup>[121]</sup> 对骨料粒径满足分形理论的充填体进行微观扫描, 如图 14 所示, 从微细观层面阐明骨料分布对力学特性的影响机制; 王炳文等<sup>[122]</sup> 设计不同灰砂比、浓度和龄期试块, 测试单轴抗压强度, 并借助 XRD、SEM 分析其物相组成和微观形貌; LIU 等<sup>[123]</sup> 则对不同浓度充填体进行微观试验, 采用颗粒及孔隙识别与分析系统 (PCAS) 处理孔隙图像并进行敏感度分析。

宏观破坏的全过程演化规律, 重构了微裂隙萌生—贯通—宏观破坏的全时序演化路径; 宋学朋等<sup>[109]</sup> 通过实现充填体爆破扰动模拟, 研究了动载下充填体的细观结构响应规律; 杨柳华等<sup>[132]</sup> 利用激光颗粒显微成像技术 (PVM) 获取料浆的细观结构图像, 应用 Avizo 处理得到团聚体直径, 探究了充填料浆在搅拌作用下的细观演化; 张雯等<sup>[133]</sup> 利用数值模拟手段进行单轴压缩试验, 探索了细观条件下充填体的裂纹扩展规律、能量耗散特征与损伤演化规律。

学者们采用不同的数值模拟手段研究了充填体颗粒条件下的力学行为特征。许长新等<sup>[134]</sup> 基于有限元理论和 Weibull 统计函数, 建立了 RFPA2D 模型, 揭示了充填体非均质性并分析其细观破坏演化及声发射特性; 王煜等<sup>[135]</sup> 则结合岩石—充填体耦合试件的室内试验, 利用 PFC 软件通过控制变量法调整耦合接触界面细观属性, 开展单轴压缩模拟,

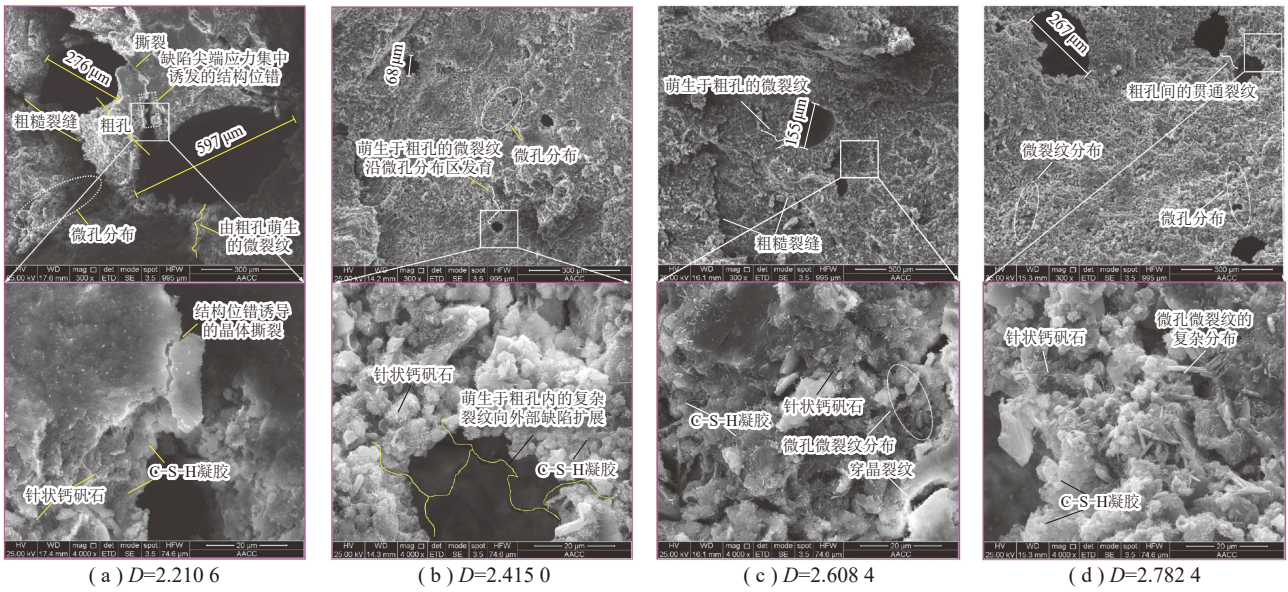


图 14 骨料粒径分布对胶结充填体微观结构的影响<sup>[121]</sup>

Fig. 14 Effect of aggregate particle size distribution on the microstructure of cemented backfill<sup>[121]</sup>

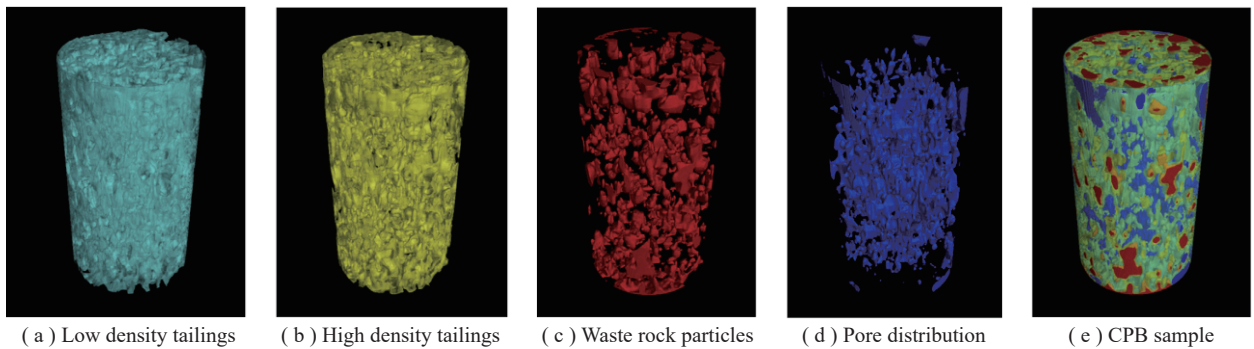


图 15 充填体三维重构<sup>[125]</sup>

Fig. 15 3D reconstruction of the backfill body<sup>[125]</sup>

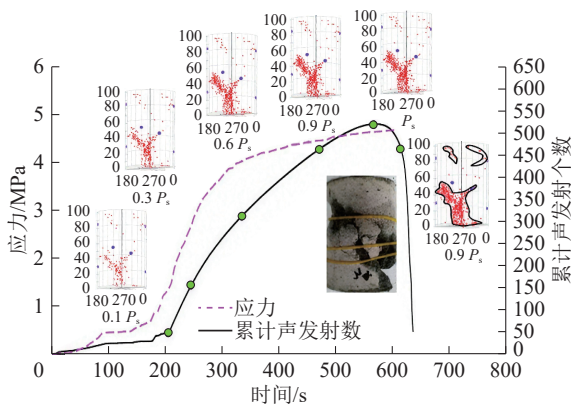


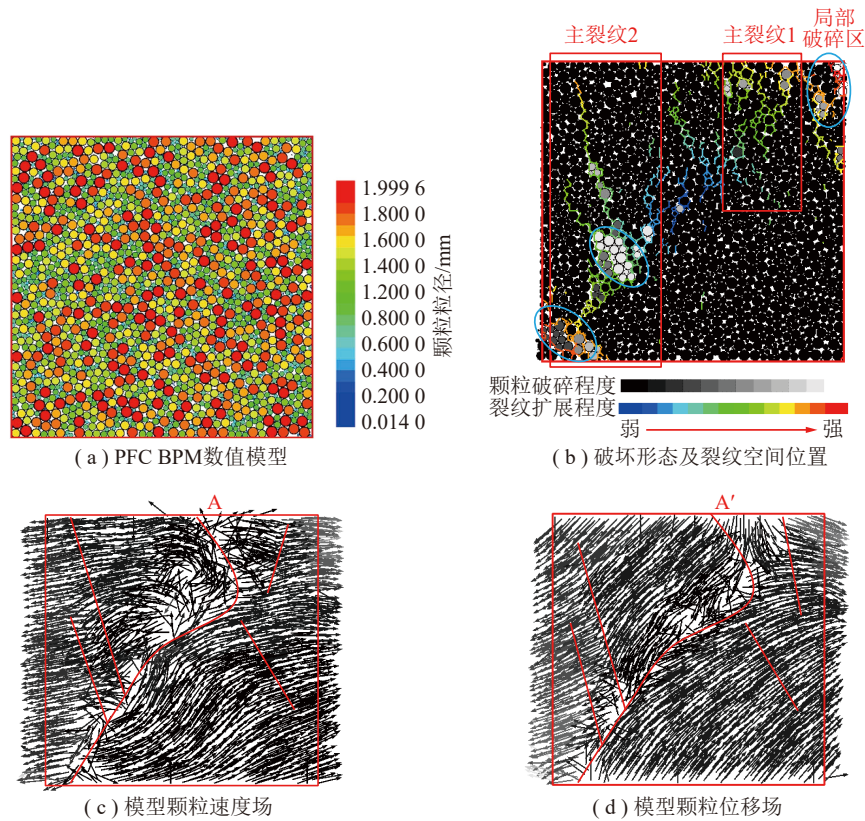
图 16 单轴压缩声发射<sup>[129]</sup>

Fig. 16 Uniaxial compressed acoustic emission<sup>[129]</sup>

以试验结果为基准探讨了界面影响规律;程爱平等<sup>[105,136-137]</sup>运用 PFC 软件建立充填体二维模型,如图 17 所示,采用 BPM 模型得到其破坏形态及颗粒

场,通过控制变量法模拟受压破坏,并系统研究了细观参数敏感性及其对宏观力学特性的影响规律;胡世杰等<sup>[138]</sup>通过 PFC3D 中的平行黏结模型实现单轴/三轴压缩模拟,探索了不同养护时间的高水充填体细观损伤特性;罗怀廷等<sup>[139]</sup>采用 PFC3D 结合 Clump 模型,聚焦破碎碎石在三轴压缩下的宏微观力学响应与运动特性;何泽全等<sup>[140]</sup>利用颗粒流 PFC3D 重构 Cluster 模型,分析了循环荷载下充填体细观变形特征;巨峰等<sup>[141]</sup>利用 PFC2D 构建煤矿矸石模型,重点分析了不同颗粒配比体系的细观演化特征,并探讨了颗粒力链分布、裂隙发展等细观特征间的关联。

胶结充填体在应力场-渗流场作用下的力学响应应具有显著的流固耦合特征。水化产物的类型与数量、孔隙分布与连通性等微观结构决定了充填体

图 17 PFC 充填体模型及破坏分析<sup>[105]</sup>Fig. 17 PFC backfill body model and damage analysis<sup>[105]</sup>

的宏观强度与渗透性等宏观性能。在外部荷载与渗流作用下, 孔隙水压力通过降低有效应力削弱其强度, 而损伤则改变了内部孔隙结构, 进一步影响了渗透性能。借助 CT 扫描、声发射等技术实时捕捉损伤演化过程, 从细观尺度阐明破坏机理, 并建立相应的损伤本构模型。同时, 借助颗粒流等数值模拟方法, 从细观角度解释配比、颗粒级配等因素对宏观力学行为的影响机制, 为深入理解充填体在复杂环境下的力学行为提供了重要依据。然而, 目前流固耦合研究仍多集中于岩石渗流领域, 针对充填体在渗流场-应力场下的流固耦合作用的损伤演化机理与本构关系的研究仍较为有限, 有待进一步系统深入探讨。

## 2 充填体流固耦合特性

深部矿产资源开采面临着高地应力与高孔隙水压力共存的复杂地质环境, 在此环境下, 作为维持深部井下地压稳定的充填体稳定性受到渗流场与应力场耦合作用的显著影响, 其全生命周期的损伤演化过程关乎整个矿山井下的安全生产。

流固耦合的力学机制与理论模型是充填体流

固耦合研究的基础, 贯序耦合通过求解多物理场相互作用问题, 是流固耦合研究中模型试验与数值模拟两种主要技术手段的基础<sup>[142]</sup>。总结室内试验与数值模拟研究成果, 归纳充填体在流固耦合作用下的宏观响应, 即力学特征与损伤演化规律, 以期揭示流固耦合作用下充填体的破坏失效机理, 为相关理论研究与工程实践提供系统性参考。随着高精度试验设备与先进数值模拟技术的快速发展, 近年来渗流-应力耦合场中工程材料力学行为研究取得重要突破。图 18 为充填体流固耦合特性研究框架。

### 2.1 流固耦合力学机制与理论模型

地下水是矿山工程中最常见的流体介质, 其对工程安全的威胁不容忽视。统计数据显示, 超过 60% 的矿山工程失效事故与地下水活动密切相关<sup>[143]</sup>。早期研究 (CHUGH<sup>[144]</sup>、DYKE<sup>[145]</sup>、HAWKINS<sup>[146]</sup>、朱珍德<sup>[147]</sup> 等) 已证实地下水显著削弱岩石强度, 这促使学术界和工程界高度重视地下水与岩体工程稳定性之间的相互作用。

由于深部井下围岩与充填体中大量微裂隙、微孔洞等缺陷的存在, 深部赋存环境中的岩体同

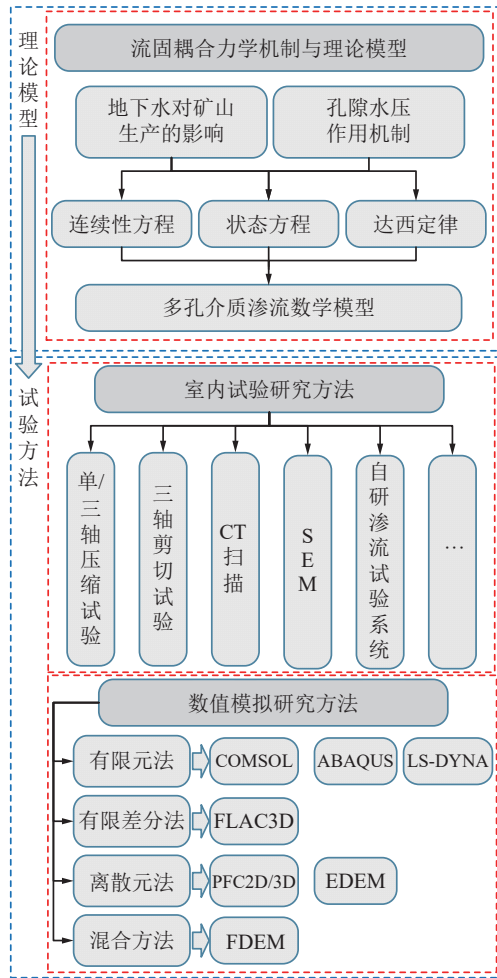


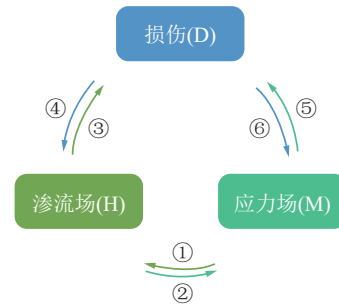
图 18 充填体流固耦合特性研究框架

Fig. 18 Research framework for fluid-solid coupling characteristics of backfill

时承受地下水渗流与高地应力共同作用, 导致其内部初始损伤持续劣化, 表现为裂隙扩展和损伤累积。

研究表明, 孔隙水压力对岩石强度及变形特性存在显著影响<sup>[148-149]</sup>: 一方面通过降低有效应力弱化岩体承载能力<sup>[150]</sup>, 另一方面驱动孔隙结构动态调整, 包括孔隙度演变和裂隙宽度差异<sup>[151]</sup>。这种流固相互作用会进一步引发材料性质时变劣化, 形成复杂的双向耦合机制: 应力重分布促使裂隙网络演化, 进而改变渗透特性; 与此同时, 细观损伤的持续累积最终触发宏观力学性能的阶段性突变, 具体损伤模式如图 19 所示。损伤模式的具体作用过程分为: ①水压力影响应力变化; ②孔隙度和裂隙宽度变化; ③流体诱发变形; ④材料性质变化导致流体特性发生变化; ⑤应力诱导损伤; ⑥细观损伤引起力学特性变化。

在水力学中<sup>[153]</sup>, 方程求解通常基于孔隙水流动



①—水压力影响应力变化; ②—孔隙度和裂隙宽度变化; ③—流体诱发变形; ④—材料性质变化导致流体特性发生变化; ⑤—应力诱导损伤; ⑥—细观损伤引起力学特性变化。

图 19 流固耦合损伤模式<sup>[152]</sup>

Fig. 19 Fluid-solid coupling damage model<sup>[152]</sup>

的连续性方程(式(1))和状态方程(式(2)), 而在渗流力学中, 往往对于流体的流动速度并不是很关心, 因此, 可以结合达西定律(式(3)), 通过将达西定律代入连续性方程并消去流速项  $V$ , 可将式(1)简化为一个仅包含孔隙压力  $p$  和流体密度  $\rho$  的控制方程, 即连续性方程的一般常用形式为式(4)。

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = q\rho \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mu &= \mu(p, T), e = e(p, T) \\ h &= h(p, T), s = s(p, T) \end{aligned} \quad (2)$$

$$Q = K\omega = \frac{h}{L} = K\omega l' \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} - \nabla \cdot \left[ \frac{\rho K}{\mu} (\nabla p - \rho g) \right] = \rho q \quad (4)$$

式中,  $\phi$  为多孔介质的孔隙率, %;  $t$  为时间, s;  $V$  为速度矢量, m/s;  $q$  为源汇项;  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $p$  为孔隙压力, Pa;  $T$  为温度, K;  $\mu$ 、 $e$ 、 $h$ 、 $s$  分别为动力黏度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )、比内能 ( $\text{J/kg}$ )、比焓 ( $\text{J/kg}$ )、比熵 ( $\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$ );  $Q$  为体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $K$  为渗透系数或导水率, m/s;  $\omega$  为截面积 (渗流横截面积),  $\text{m}^2$ ;  $h$  为水头差, m;  $L$  为流动路径长度, m;  $l'$  为等效长度系数 (与流动路径相关);  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

上述方程为解决多孔介质中水的流动性问题提供了一个完整的数学模型:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \phi) + \nabla \cdot (\rho_w u_w) = Q_m \quad (5)$$

式中,  $\rho_w$  为水的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $u_w$  为水的渗流速度, m/s;  $Q_m$  为质量源汇项, 用于表示多孔介质渗水率。

由于胶结充填体是一种多孔介质, 因此式(5)也适用于本研究中的胶结充填体结构。

对于尾砂胶结充填体来说, 大量的学者研究得出了其对于水的相对渗透率如式(6)。

$$k_{rw} \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \sqrt{\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \left[ 1 - \left( 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{x}} \right)^{x^2} \right]} \quad (6)$$

式中,  $k_{rw}$  为水的相对渗透率;  $\theta$  为体积含水量;  $\theta_r$  为残余含水量;  $\theta_s$  为饱和含水量;  $x$  为经验参数, 与水分特征曲线参数  $n$  有关,  $x=n/(n-1)$ 。

### 2.2 流固耦合的室内试验研究方法

在模型试验研究方面, 常借助室内力学设备进行岩石等材料的渗流耦合试验。李文亮<sup>[154]</sup> 利用三轴试验系统, 研究了饱水阳江花岗岩的峰前力学行为, 并探讨了围压与水力梯度对峰后非线性渗流的影响及其物理成因; 胡云进等<sup>[155]</sup> 自主研发了裂隙非饱和渗流试验系统, 整个系统分为 7 个子系统, 如图 20 所示, 基于此系统分析了不同应力条件下岩体裂隙的非饱和渗流特性及其影响因素。

学者们对流固耦合问题进行了深入研究, 但相

较于岩石等材料, 渗流场下充填体特性的研究相对较少, 相关学者主要通过试验手段开展探索。王苏生<sup>[156]</sup>、王伟<sup>[157]</sup> 等通过试验验证了考虑孔隙水压力的岩石损伤本构模型, 确定了岩石的临界损伤点; 陈娇娇等<sup>[158]</sup> 聚焦胶凝砂砾石料, 通过连接两个相邻四面体体点, 定义了渗流网格单元(图 21(a)), 并将所有渗流单元连接形成渗流格构系统(图 21(b)), 基于此研究了渗流耦合作用下的破坏特性, 揭示了水优先向裂纹尖端迁移导致材料脆性破坏增强的细观机理; 杨金保<sup>[159]</sup>、LI<sup>[160]</sup> 等研究发现, 岩石和充填体在不同受力阶段的渗透率演化规律显著影响其环向和轴向应变, 更进一步探讨了孔隙水压力与模型参数、损伤变形特性之间的响应机制, 为流固耦合岩石工程安全分析提供了重要参考。

当前流固耦合研究多聚焦于岩石渗流领域, 针对充填体的相关探讨尚显不足, 表 1 对充填体流固

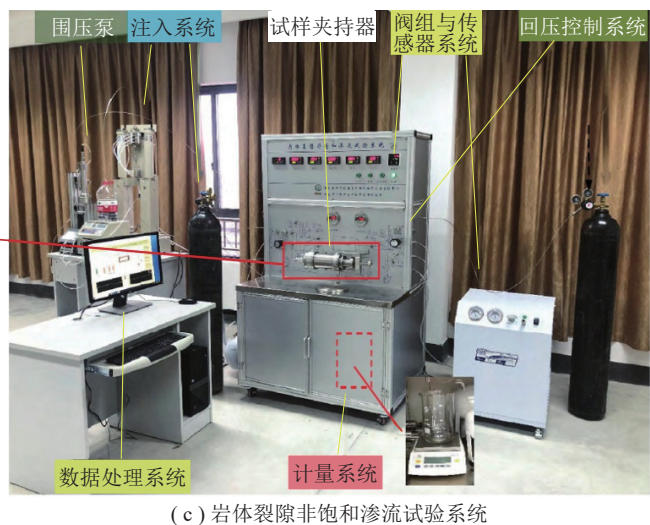
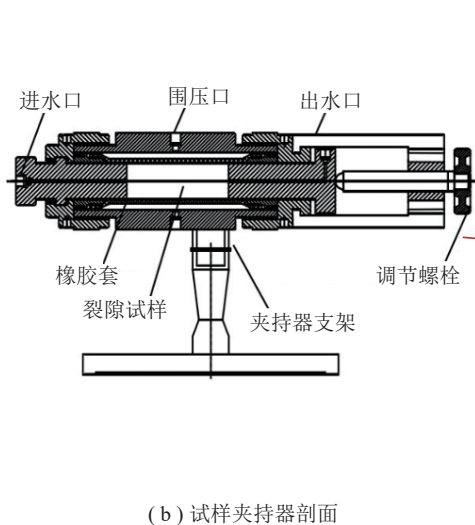
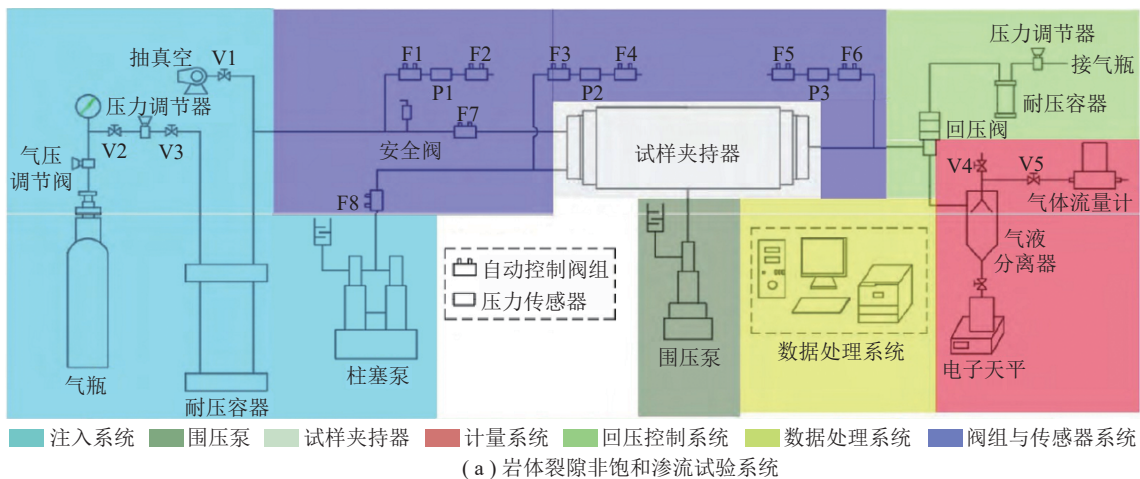


图 20 岩体裂隙非饱和和渗流试验系统<sup>[155]</sup>

Fig. 20 Unsaturated seepage test system for rock fissures<sup>[155]</sup>

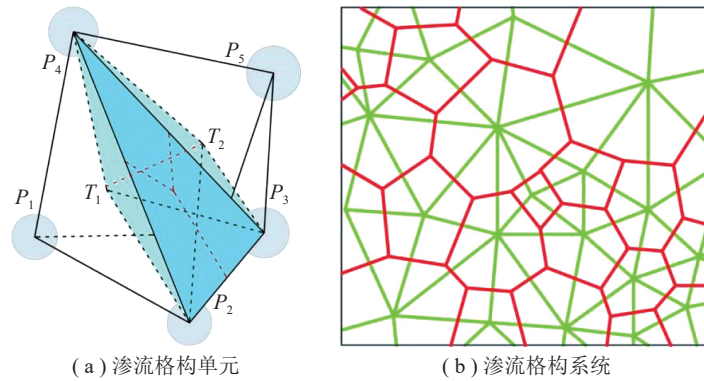


图 21 渗流格构系统<sup>[158]</sup>  
Fig. 21 Seepage lattice system<sup>[158]</sup>

耦合室内试验研究方法及研究成果进行了总结对比。渗流-应力耦合作用下充填体的力学响应表现出明显的流固耦合损伤演化特征: 应力重分布促使裂隙网络演化, 进而改变渗透特性; 与此同时, 细观损伤的持续累积最终触发宏观力学性能的阶段性突变。深部井下的孔隙水压力通过降低有效应力

和物理化学作用对充填体力学性能具有显著的弱化, 具体表现为峰值强度和残余强度的降低, 以及应力-应变曲线向更明显脆性特征的转变。胶结充填体的损伤演化本质是微观缺陷在流固耦合作用下的微裂隙萌生、稳定扩展至宏观破裂的贯序过程, 其宏观表现为力学性能劣化与渗透特性突变。

表 1 流固耦合试验方法及研究成果对比

Table 1 Comparison of experimental methods and research results of fluid-solid coupling

类别	文献作者	试验方法	关键参数	代表性成果
渗流-力学耦合试验	KE <sup>[161]</sup> 、HOU <sup>[162]</sup> 、WANG <sup>[163]</sup> 等	三轴渗流-强度试验、渗流-应力耦合试验	渗透压力、轴向应力、渗透率、破坏模式	揭示渗流与加载共同作用下强度、孔隙率和渗透率演化规律
水浸作用下的渗流试验	SOLISMAA <sup>[164]</sup> 、LI <sup>[165]</sup> 等	渗流柱试验(矿水-CPB反应)、干湿循环+渗透率测试	pH、离子浓度、渗透系数、强度损伤	明确高盐或酸性环境下渗流-化学反应导致孔隙结构劣化
多场耦合与模型研究	AL-MOSELLY <sup>[166]</sup> 、SAFARI <sup>[167]</sup> 等	力学-渗流-化学多场耦合试验, 改进Cam-Clay模型	流变参数、屈服面形态、外加剂作用	提出多场耦合强度演化规律, 修正模型适配屈服特性
细观结构与成像监测	XU <sup>[168]</sup> 、GAO <sup>[169]</sup> 、HE <sup>[170]</sup> 等	CT/ $\mu$ CT扫描、NMR孔隙结构分析、DIC应变场监测	孔隙率、裂隙分布、 $T_2$ 弛豫时间、局部应变	揭示渗流作用下细观孔隙与裂隙网络的演化过程
实时监测与声学响应	CHILOANE等 <sup>[171]</sup>	声发射(AE)、超声波传导结合三轴渗流试验	AE事件数、振幅、能量、超声波波速	捕捉渗流破坏过程中微裂隙起裂、扩展和贯通过程, 揭示裂隙-渗透率耦合机理

当前, 在充填体流固耦合室内试验研究方面, 王伟男等<sup>[172]</sup>利用自主设计的渗流仪, 对胶结充填体开展了恒水头和变水头渗流试验, 揭示了充填物料对渗透系数的影响及料浆充填后的渗透规律; 王永岩等<sup>[173]</sup>基于质量、动量和能量守恒定律, 以贯序耦合方式推导了流固耦合控制方程, 但其模型未考虑初始损伤效应; 李西龙等<sup>[174]</sup>基于Biot孔隙弹性理论, 分析了料浆充填过程中的充填孔隙水压演化过程; 李文臣<sup>[175]</sup>采用恒定水头法, 测试了饱水状态下不同硫酸盐浓度、养护龄期和胶结剂的充填体试块渗透率, 并研究了渗透率与孔隙率的关系; ABDUL-

HUSSAIN等<sup>[176]</sup>通过渗流试验测定非饱和胶结充填体渗透系数, 进而分析其剩余水分含量变化规律; 张磊等<sup>[177]</sup>针对细粒级、高保水性尾砂影响充填体质量的问题, 通过理论分析与室内试验对比, 探索了充填体内部脱水及加速脱水的方法; HOU等<sup>[178]</sup>基于损伤力学引入反应渗流效应与裂纹效应的损伤变量, 进行不同渗透水压的胶结矸石-粉煤灰充填体力学试验, 探讨了流固耦合下胶结矸石-粉煤灰充填体的力学性能与损伤演化规律, 基于离散元分析了流固耦合微观损伤机理; 王成<sup>[179]</sup>通过不同渗透水压的单轴压缩试验, 获取了不同渗透水压的

充填体力学性能参数变化规律, 采用核磁共振与扫描电镜等技术, 探索了渗透水压对充填体微观结构的损伤破坏演化规律, 并进一步建立了在不同渗透压下的充填体损伤本构模型; XIU 等<sup>[180]</sup> 进行不同排水条件下的胶结充填体三轴压缩试验, 通过峰值偏差应力和内聚力对胶结充填体的力学性能进行了分析; 侯吉峰<sup>[181]</sup> 采用流固耦合三轴压缩试验, 分析了渗透水压对充填体强度与变形参数的影响规律, 结合扫描电镜试验, 揭示了流固耦合作用下胶结充填体损伤破坏的微观力学机制; 李利平等<sup>[182]</sup> 通过改进三维流固耦合压力室与密封加载系统(图 22), 研制了大比尺三轴应力-渗流耦合试验系统, 分析研究了流固耦合赋存条件下充填介质的力学、渗流特性及破坏机制; 徐文彬等<sup>[183-184]</sup> 借助三轴剪切渗透试验, 通过养护龄期-水泥掺量-围压三维试验, 结合微观分析方法探讨了全尾砂胶结充填体不同维度组合条件下的内在渗透机制; 曾杰<sup>[185]</sup> 结合扫描电镜与三轴试验, 分析了流固耦合作用下不同灰砂比胶结充填体的力学性能与损伤破坏演化规律; WANG 等<sup>[186]</sup> 基于 CT 扫描进行三维重构, 揭示了充填体损伤形成的破坏界面成为优先渗透通道, 孔隙水压将显著促进裂纹扩展, 加速损伤演化过程; 柯愈贤等<sup>[187]</sup> 通过三轴压缩试验与电镜扫描技术, 获取了充填体不同水压作用下的力学变化特征, 并建立了考虑渗透水压的充填体损伤本构模型。

胶结充填体在应力场-渗流场下的力学响应呈现显著的流固耦合特征, 孔隙水压力通过消减有效应力降低强度性能, 而损伤演化通过改变孔隙结构调控渗透特性, 形成“应力-损伤-渗透”的正反馈循环。这些研究为深入分析充填体在复杂环境下的力学行为提供了重要依据。然而, 当前流固耦合研究仍多聚焦于岩石渗流领域, 针对充填体的相关研究尚显不足, 需要进一步深入探讨充填体在渗流-应力耦合作用下的损伤演化机理和本构关系。

### 2.3 流固耦合的数值模拟研究方法

随着计算机技术的进步, FLAC3D、COMSOL、PFC 等软件已成为多场耦合分析的主要工具, 各采用不同数值模拟方法的流固耦合数值模拟软件计算优势与局限性对比分析见表 2。LIU 等<sup>[188]</sup> 利用 COMSOL 模拟浆水泉隧道上方山体地下河流, 分析渗流作用下岩体稳定性, 为隧道安全施工提供防护建议; CHEN 等<sup>[189]</sup> 采用 DDA 模型, 探究了开挖

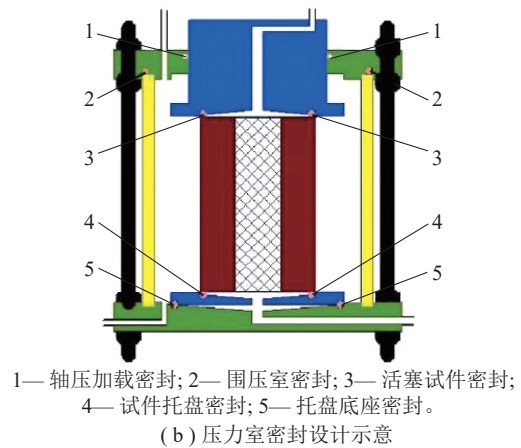
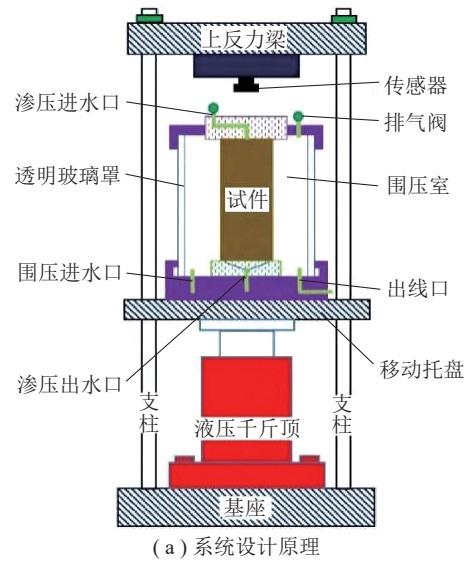


图 22 三维渗流-应力耦合系统装置<sup>[182]</sup>

Fig. 22 Three-dimensional coupled seepage-stress system device<sup>[182]</sup>

稳定性与渗透率关系及水压对地应力的影响; LIU 等<sup>[190]</sup> 在 PFC 中模拟室内三轴流固耦合试验, 优化 DEM 计算程序(图 23), 与真实试验结果进行了对比分析; SHI 等<sup>[191]</sup> 通过 COMSOL 与 MATLAB 进行耦合计算的方法, 建立并求解了损伤-应力-渗流耦合模型, 探究了采空区充填体的破坏机制。

对于数值模拟在充填体渗流-应力耦合下的力学性能研究方面的应用, 张国辉<sup>[209]</sup> 利用自主设计的渗流试验系统, 开展了矸石充填体在酸性环境下的渗流试验, 采用 COMSOL 模拟了渗流-应变变化特征; 余昕<sup>[152]</sup> 采用三轴流固耦合试验结合数值模拟方法, 揭示了流固耦合下岩-充组合体变形破坏性能与渗流特性; 王成<sup>[179]</sup>、曾杰<sup>[185]</sup> 利用颗粒流数值模拟分析了渗流作用下充填体的微观力学性能; 沈阳<sup>[210]</sup> 将三轴压缩室内试验与 PFC2D 数值模拟相结合, 从宏微观对流固耦合作用下的胶结充填体

表 2 流固耦合数值模拟方法使用软件优势与局限性对比

Table 2 Comparison of the advantages and limitations of the use of fluid-solid coupling numerical simulation method

文献作者	数值模拟方法	优势	局限性
程立朝 <sup>[192]</sup> 、LUO <sup>[193]</sup> 、CAI <sup>[194]</sup> 等	EDEM(DEM)	精确模拟颗粒级配、接触力链及压实特性 (如矸石级配优化) 支持复杂形状颗粒建模 (多球体组合)	计算效率低, 高体积分数 (>90%) 时需简化假设 (如球形颗粒) 无法直接耦合流体, 需联合 CFD 软件
侯吉峰 <sup>[181]</sup> 、王文哲 <sup>[195]</sup> 、周睿 <sup>[196]</sup> 等	FLAC3D(FDM)	适用于充填体-围岩相互作用 (如拱应力分析) 支持蠕变模型 (Cvise) 分析长期稳定性	颗粒尺度行为需等效参数化 流固耦合功能较弱, 需插件扩展
侯吉峰 <sup>[181]</sup> 、赵树果 <sup>[197]</sup> 等	PFC2D/3D(DEM)	细观尺度模拟颗粒接触力链、裂纹扩展 支持渗流-应力耦合 (如裂隙充填体破坏)	计算规模受限, 难以处理大规模工程问题 流体耦合需额外开发
吴迪 <sup>[198]</sup> 、YIN <sup>[199]</sup> 、姚直书 <sup>[200]</sup> 、张纪云 <sup>[201]</sup> 等	COMSOL Multiphysics	多物理场耦合能力强 (如渗流-蠕变耦合) 支持非牛顿流体界面追踪 (水平集法)	大规模颗粒系统效率低, 需连续介质简化 复杂接触算法需自定义开发
王平等 <sup>[202]</sup>	LS-DYNA(ALE 算法)	擅长动力响应模拟 (如爆破扰动) KCC 模型精准描述胶结充填体动态破坏	计算成本高, 需精细参数标定 稳态渗流模拟能力有限
SONG <sup>[203]</sup> 、ZHANG <sup>[204]</sup> 等	ABAQUS(SPH 方法)	适用于大变形自由界面问题 (如管道充填) 支持有限元-SPH 耦合	拉伸不稳定问题显著 质量分布精度低, 表面载荷限制多
ZEGHAL <sup>[205]</sup> 、DIVIC <sup>[206]</sup> 、ZHANG <sup>[207]</sup> 、YAN <sup>[208]</sup> 等	FDEM(如 Y-GUI)	结合 FEM 与 DEM, 模拟颗粒破碎 (内聚界面单元) 适用于复杂形状颗粒应力传递	计算成本极高, 仅限小规模问题 流固耦合需外部求解器

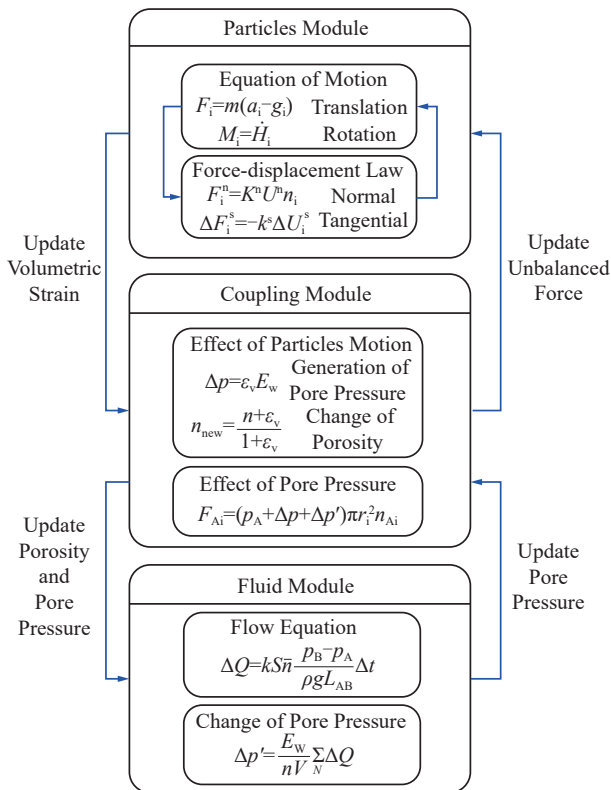


图 23 流固耦合 DEM 模型计算流程<sup>[190]</sup>

Fig. 23 Flowchart of flow-solid coupling DEM model calculation<sup>[190]</sup>

损伤破坏规律性进行了深入分析; YUAN 等<sup>[211]</sup>结合理论计算与 FLAC3D 数值模拟, 验证了富水矿区内应用流固耦合模型进行评估的重要性, 基于此提出了综合理论分析、三维流固耦合数值模拟和基于遗传算法的填充序列优化方法; 向学敏等<sup>[212]</sup>通过

三维渗流模拟了水泥-粉煤灰-矿渣复合尾砂充填体抗渗性能; ZHENG 等<sup>[213]</sup>通过建立准静态裂纹扩展模型, 发现裂纹尖端应力集中现象显著, 如图 24 所示, 并结合理论与数值分析推导出准确的流固耦合孔隙损伤本构模型, 对岩石力学研究具有重要意义。

通过数值模拟, 利用数值模拟的可重复性在虚拟环境中复现室内试验, 可揭示渗流-应力耦合下的损伤演化、裂隙扩展与渗透率变化规律。然而, 现有数值模拟方法在刻画充填体的非均质性、损伤-渗流动态耦合等方面仍存在不足, 未来需进一步发展高保真、多尺度耦合的数值模型, 并结合机器学习等方法提升模拟效率与预测精度。

### 3 讨论

近年来, 关于矿山胶结充填体力学特性与流固耦合效应的研究取得了显著进展, 形成了从理论模型、试验研究到数值模拟的多层次研究体系。但现有研究成果在模型的普适性、微细观演化机理及工程应用方面仍存在不足。充填体作为典型的多相非均质材料, 其在渗流场-应力场共同作用下表现出显著的时变性与非线性特征, 使得传统理论难以准确地揭示其损伤演化规律及破坏机制。因此, 有必要从本构模型的适用性、多尺度损伤演化机制及工程现场应用三方面进行综合讨论, 为流固耦合条件下充填体性能研究与工程应用提供理论指导与发展方向。

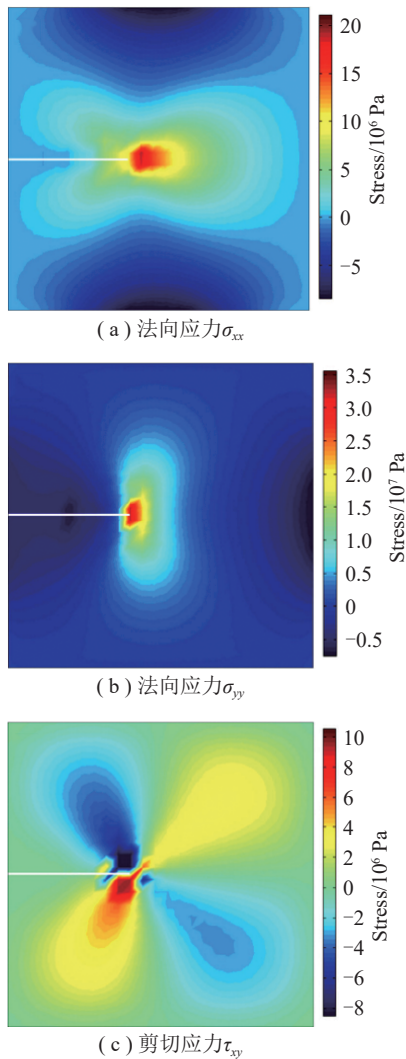


图 24 渗流作用下岩体法向和剪切应力等值线<sup>[213]</sup>  
Fig. 24 Normal and shear stress contours of the rock mass under seepage<sup>[213]</sup>

### 3.1 流固耦合本构模型的适用性

现有充填体流固耦合理论多建立于 Biot 孔隙弹性与达西定律的线性框架中, 假设介质孔隙结构稳定、参数恒定, 主要适用于均质岩土介质。该类模型虽能描述充填体的基本渗流特征, 但难以反映其在水硬化与应力扰动过程中表现出的显著时变性与非线性。胶结充填体在形成过程中, 其内部水化产物不断生成、孔隙结构持续演化, 导致孔隙率、渗透率及抗压强度具有显著的时空效应。同时, 孔隙水压力与充填体所受应力状态间存在相互反馈作用, 渗流诱发的微裂隙扩展将反过来改变渗流场分布, 形成强耦合非线性响应。

因此, 传统本构模型难以准确表征“孔隙演化-结构损伤-渗流强化”这一过程。未来研究应构建包含时间、孔隙率、渗透率及损伤变量的时变流固

耦合本构模型, 为充填体长期稳定性与安全性分析提供理论支撑。

### 3.2 多尺度损伤演化与宏观力学响应机制

胶结充填体在渗流场-应力场共同作用下的破坏过程具有显著的多尺度演化特征。微观层面上, 水化产物的生成与分布直接决定了颗粒间胶结强度及孔隙网络稳定性; 细观尺度上, 颗粒级配、分层特征影响应力集中与裂纹扩展路径; 宏观层面上, 裂隙逐步贯通形成主破裂面, 造成充填体破坏, 实现“应力-损伤-渗流”正反馈机制。

然而, 现有研究更多地侧重于流固耦合下充填体的宏观力学试验与微观特征, 缺乏细观损伤与宏观响应间的力学机制。裂隙连通度、孔径分布及其内部结构变化与强度衰减之间的关系尚未形成统一描述, 导致流固耦合效应精度有限。未来研究应立足于建立多尺度力学响应特征体系, 通过 CT、SEM 及声发射等技术获取细观结构参数, 与宏观力学性能及渗流特性演化规律进行耦合分析, 构建以统计力学与损伤理论为基础的多尺度流固耦合演化方程。同时, 通过在数值模拟中引入裂隙连通度、渗透突变率等损伤判据, 实现从细观损伤到宏观失稳全过程的可视化分析。

### 3.3 矿山现场推广应用

当前, 流固耦合试验大多在室内条件下进行, 试样尺寸小、边界条件理想化, 且未能充分模拟井下高应力、高渗流赋存的复杂环境。充填体在实际充填过程中存在分层效应, 输送与充填过程中会导致较为明显的各向异性, 与实验室制备试样存在较大的差异性。

为提高研究成果在现场应用中的适用性, 构建“室内试验-数值模拟-现场监测”的正反馈体系, 通过在井下采场布设孔隙水压、声发射及应变监测等装置, 利用现场监测数据反演校正模型参数, 构建基于流固耦合机理的稳定性评价与预警体系, 实现充填体力学性能的动态化评估与风险预警, 为深部矿山充填体的安全设计与长期运行提供科学依据。

## 4 结语与展望

### 4.1 结语

社会经济的飞速发展驱动矿产资源需求急剧攀升, 促使深部矿产资源逐渐成为未来开采的主战场。生态环境是人类生存发展的根基, 保护生态、

建设绿色矿山已成为行业共识。发展安全、高效、环境友好的采矿技术是矿山领域的核心目标,而充填采矿法在实现绿色矿山愿景中发挥着不可替代的关键作用。

围绕充填体这一新型工程材料,综合运用理论建模、实验室试验、数值计算及现场实测等多元化手段,学者们初步揭示了胶凝材料类型、配比参数、料浆浓度、养护龄期及输送等各种因素对胶结充填体强度演化规律的影响,并对胶结充填体的破坏模式及裂纹演化特征进行了有益探索;同时,借助宏-细观观测手段,结合常规测试方法,探讨了充填体在常规试验条件下的微结构演化与流固耦合性能,为理解其力学行为提供了基础。研究成果为充填技术的初步推广与应用奠定了理论支撑。

## 4.2 展望

充填体在流固耦合作用下的力学响应与演化规律研究,是深部矿山安全高效开采的重要科学问题。流固耦合不仅影响充填体的渗透特征和力学强度,还主导其损伤演化、破坏模式及长期稳定性。尽管现阶段已取得了较多理论与试验成果,但从微观机理解析到工程应用的体系化研究仍存在明显不足,并且多数研究仍建立在实验室尺度,无法充分地反映深部井下采场内的高地应力、复杂渗流场与地质构造耦合作用下的真实环境。这种条件差异导致现有理论难以准确揭示充填体在真实采场中的长期力学行为、破坏机制与结构演化规律,制约了在流固耦合条件下的充填技术发展及现场工程可靠性的进一步提升。

基于此,为应对深部开采的严峻挑战,持续推动充填技术向精准化、智能化发展,未来研究应在以下方向重点突破:

(1) 构建考虑时变与损伤的非线性流固耦合理论模型。通过引入孔隙率、渗透率及损伤变量的耦合演化方程,采用试验与数值模拟进行反演校正,有效地实现真实反映理论与复杂应力-渗流条件下的充填体性能预测。

(2) 发展宏-细-微观多尺度协同观测与关联分析方法。深度融合 CT 扫描、数字图像技术 (DIC)、SEM、声发射等多源监测技术,结合人工智能图像识别与数据挖掘,定量建立微观结构参数、细观损伤模式与宏观渗流-力学性能的映射关系,揭示跨尺度损伤演化与渗流突变的临界机制。

(3) 建立“室内试验-数值模拟-现场监测”闭环反馈的研究机制。发展大尺度、真三维、可模拟复杂边界条件的物理模型试验系统,推动高性能数值仿真与井下实时监测 (孔隙水压、微震、应变) 数据的深度融合,通过数据同化与模型反演技术,动态修正理论模型,实现充填体稳定性状态的在线评估与预报预警。

(4) 推动基于流固耦合机理的工程应用体系转化。将理论成果转化为工程设计指南,包括优化材料组成以增强抗渗劣化能力、改进充填工艺以控制分层与孔隙水压力,最终形成融合机理模型、监测数据与智能算法的充填体全生命周期安全管理平台。

## 参考文献 (References):

- [1] 解世俊. 金属矿床地下开采[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986.  
XIE Shijun. Underground mining of metal deposits[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986.
- [2] 李峰, 赵涛, 朱瑞庚. 绿色生态材料在矿山高边坡防护中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S2): 5297-5300.  
LI Feng, ZHAO Tao, ZHU Ruigeng. Application of green ecological material to mine high slope protection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5297-5300.
- [3] 徐青云, 宁掌玄, 朱润生, 等. 综放工作面充填过空巷顶板失稳机理及控顶研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(3): 505-512.  
XU Qingyun, NING Zhangxuan, ZHU Runsheng, et al. Study on instability mechanism and top control of over-filled roof in fully mechanized caving face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(3): 505-512.
- [4] 瞿群迪, 姚强岭, 李学华, 等. 充填开采控制地表沉陷的关键因素分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 458-462.  
QU Qundi, YAO Qiangling, LI Xuehua, et al. Key factors affecting control surface subsidence in backfilling mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 458-462.
- [5] KESIMAL A, ERCIKDI B, YILMAZ E. The effect of desliming by sedimentation on paste backfill performance[J]. Minerals Engineering, 2003, 16(10): 1009-1011.
- [6] 余伟健, 冯涛, 王卫军, 等. 充填开采的协作支撑系统及其力学特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 2803-2813.  
YU Weijian, FENG Tao, WANG Weijun, et al. Coordi-

- nation support systems in mining with filling and mechanical behavior[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(S1): 2803–2813.
- [7] WU D, FALL M, CAI S. Coupled modeling of temperature distribution and evolution in cemented tailings backfill structures that contain mineral admixtures[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2012, 30(4): 935–961.
- [8] 曹帅. 胶结充填体结构与动力学特性研究及应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.  
CAO Shuai. Research on structural characteristics and dynamic effects of cemented tailing backfilling and its application[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [9] BELEM T, BENZAAZOUA M. Design and application of underground mine paste backfill technology[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2008, 26(2): 147–174.
- [10] BENZAAZOUA M, FALL M, BELEM T. A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill[J]. *Minerals Engineering*, 2004, 17(2): 141–152.
- [11] CHEN X, SHI X Z, ZHOU J, et al. Compressive behavior and microstructural properties of tailings polypropylene fibre-reinforced cemented paste backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 190: 211–221.
- [12] WANG Y, FALL M, WU A X. Initial temperature-dependence of strength development and self-desiccation in cemented paste backfill that contains sodium silicate[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2016, 67: 101–110.
- [13] CAO S, YILMAZ E, SONG W D. Fiber type effect on strength, toughness and microstructure of early age cemented tailings backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 223: 44–54.
- [14] JIANG H Q, FALL M, LI Y H, et al. An experimental study on compressive behaviour of cemented rockfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 213: 10–19.
- [15] LI D Y, LIU B, HE J, et al. Strength and transportability of cemented phosphogypsum paste backfilling slurry[A]. *Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*[C]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017: 328–336.
- [16] YANG X, YANG J, YIN S, et al. Cementation characteristics and hydration mechanism of magnesium slag-phosphogypsum composite cementitious materials[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 41: 110547.
- [17] NIROSHAN N, SIVAKUGAN N, VEENSTRA R L. Laboratory study on strength development in cemented paste backfills[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(7): 04017027.
- [18] WU D, DENG T F, ZHAO R K. A coupled THMC modeling application of cemented coal gangue-fly ash backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 158: 326–336.
- [19] SUN Q, LI B, TIAN S, et al. Creep properties of geopolymer cemented coal gangue-fly ash backfill under dynamic disturbance[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 644–654.
- [20] LIU W, LIU X, ZHANG L, et al. Rheology, mechanics, microstructure and durability of low-carbon cementitious materials based on circulating fluidized bed fly ash: a comprehensive review[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134688.
- [21] 吴爱祥, 姜关照, 王贻明. 矿山新型充填胶凝材料概述与发展趋势[J]. *金属矿山*, 2018(3): 1–6.  
WU Aixiang, JIANG Guanzhao, WANG Yiming. Review and development trend of new type filling cementing materials in mines[J]. *Metal Mine*, 2018(3): 1–6.
- [22] 阮竹恩, 武鹏杰, 吴爱祥, 等. 矿用精炼渣基早强胶凝材料配比优化与水化机理[J]. *中国有色金属学报*, 2023, 33(9): 3064–3076.  
RUAN Zhuen, WU Pengjie, WU Aixiang, et al. Ratio optimization and hydration mechanism of early strength cementitious material based on refining slag for mining[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2023, 33(9): 3064–3076.
- [23] XUE G L, YILMAZ E, SONG W D, et al. Compressive strength characteristics of cemented tailings backfill with alkali-activated slag[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(9): 1537.
- [24] JIANG H Q, QI Z J, YILMAZ E, et al. Effectiveness of alkali-activated slag as alternative binder on workability and early age compressive strength of cemented paste backfills[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 218: 689–700.
- [25] 温震江, 高谦, 王永定, 等. 基于熵权多属性决策的充填胶凝材料开发及料浆配比优化[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(6): 8–16.  
WEN Zhenjiang, GAO Qian, WANG Yongding, et al. Development of filling cementitious material and optimization of slurry proportion based on entropy weight multi-attribute decision[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(6): 8–16.
- [26] 温震江, 高谦, 杨志强, 等. 金川镍渣充填胶凝材料力学性能与水化机理[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(4): 1074–1083.  
WEN Zhenjiang, GAO Qian, YANG Zhiqiang, et al. Mechanical properties and hydration mechanism of Jinchuan nickel slag filling cementitious material[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(4): 1074–1083.

- [27] 朱庚杰, 朱万成, 齐兆军, 等. 固废基充填胶凝材料配比分步优化及其水化胶结机理[J]. 工程科学学报, 2023, 45(8): 1304–1315.  
ZHU Gengjie, ZHU Wancheng, QI Zhaojun, et al. Step optimization of a solid waste-based binder for backfill and a study on hydration and cementation mechanism[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(8): 1304–1315.
- [28] 屈慧升, 索永录, 刘浪, 等. 改性煤气化渣基矿用充填材料制备与性能[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1958–1973.  
QU Huisheng, SUO Yonglu, LIU Lang, et al. Preparation and properties of modified coal gasification slag-based filling materials for mines[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1958–1973.
- [29] 杨晓炳, 闫泽鹏, 尹升华, 等. 基于 GA-SVM 的钢渣基胶凝材料开发及料浆配比优化[J]. 工程科学学报, 2022, 44(11): 1897–1908.  
YANG Xiaobing, YAN Zepeng, YIN Shenghua, et al. Development of steel-slag-based cementitious material and optimization of slurry ratio based on genetic algorithm and support vector machine (GA-SVM)[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(11): 1897–1908.
- [30] 李科技, 戚庭野, 冯国瑞, 等. 生物质电厂灰制备胶凝材料及其充填材料应用[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 263–276.  
LI Keji, QI Tingye, FENG Guorui, et al. Preparation of cementitious materials from biomass power plant ash and the application of cementitious materials in backfill material[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 263–276.
- [31] GHIRIAN A, FALL M. Coupled behavior of cemented paste backfill at early ages[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015, 33(5): 1141–1166.
- [32] 郭廷儒, 李占金. 铁矿尾砂胶结充填体的合理配比试验研究[J]. 中国金属通报, 2017(9): 112–113.  
GUO Tingru, LI Zhanjin. Experimental study on reasonable proportioning of cemented filler of iron ore tailings[J]. China Metal Bulletin, 2017(9): 112–113.
- [33] 许前, 郭利杰, 陈寅, 等. 矿山胶结充填胶凝材料最佳添加量优化研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(S1): 186–189.  
XU Qian, GUO Lijie, CHEN Yin, et al. Optimum research on cementitious material dosage in mine cemented filling[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(S1): 186–189.
- [34] 张贺, 刘艳章, 黄诗冰, 等. 不同龄期与灰砂比胶结充填体力学损伤特性及断面形貌分形特征研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(11): 3976–3985.  
ZHANG He, LIU Yanzhang, HUANG Shibing, et al. Mechanical damage characteristics and fracture morphology fractal characteristics of cemented filling body at different ages and cement/sand ratios[J]. China Mining Magazine, 2024, 43(11): 3976–3985.
- [35] 李文臣, 郭利杰, 许文远. 尾砂胶结充填体试样早期强度原位监测探索研究[J]. 中国矿业, 2018, 27(8): 139–143.  
LI Wenchen, GUO Lijie, XU Wenyuan. Exploratory study on early strength in-situ monitoring of cemented tailing backfill sample[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(8): 139–143.
- [36] 褚衍玉, 任高峰, 张卅卅, 等. 尾砂胶结充填体与岩体耦合作用机理研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(6): 860–866.  
CHU Yanyu, REN Gaofeng, ZHANG Sasa, et al. Proportion optimization of cemented tailings backfill and its interaction mechanism with rocks in room-and-pillar stope: a case study[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(6): 860–866.
- [37] HE X, WEI L, YANG K, et al. Effects of curing temperature and age on the mechanical properties and damage law of coal-based solid waste cemented backfill[J]. Case Studies in Construction Materials, 2025(23): e04937.
- [38] 刘炜震, 郭忠平, 黄万朋, 等. 不同温度养护后胶结充填体三轴卸围压力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(11): 2268–2282.  
LIU Weizhen, GUO Zhongping, HUANG Wanpeng, et al. Experimental study on mechanical characteristics of cemented backfill under triaxial unloading confining pressure after cured at different temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(11): 2268–2282.
- [39] 彭啸鹏, 郭利杰, 陈鑫政. 尾砂充填料浆泌水特性及其对充填体影响研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(1): 93–99.  
PENG Xiaopeng, GUO Lijie, CHEN Xinzheng. Study on bleeding characteristics of tailings backfill slurry and its influence on cemented backfill[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(1): 93–99.
- [40] 徐毅安, 邓博团. 粗骨料充填料浆泌水特性及其对充填体性能的影响[J]. 金属矿山, 2022(11): 271–276.  
XU Yian, DENG Botuan. Bleeding characteristics of coarse aggregate filling slurry and its influence on the performance of backfill[J]. Metal Mine, 2022(11): 271–276.
- [41] 尹升华, 曹永, 吴爱祥, 等. 玻璃纤维增强含硫尾砂胶结充填体的力学及流动性能研究[J]. 材料导报, 2023, 37(13): 242–248.  
YIN Shenghua, CAO Yong, WU Aixiang, et al. Study on mechanics and flow behavior of glass fiber reinforced cemented sulfur tailings backfill[J]. Materials Reports, 2023, 37(13): 242–248.
- [42] 侯永强, 尹升华, 赵国亮, 等. 聚丙烯纤维增强尾砂胶结

- 充填体力学及流动性能研究[J]. 材料导报, 2021, 35(19): 19030–19035.
- HOU Yongqiang, YIN Shenghua, ZHAO Guoliang, et al. Study on the mechanical and flow properties of polypropylene fiber reinforced cemented tailings backfill[J]. Materials Reports, 2021, 35(19): 19030–19035.
- [43] 周林邦, 孙星海, 刘泽, 等. 大掺量粉煤灰基矿井充填材料的制备、工作性能与微观结构的研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4536–4548.
- ZHOU Linbang, SUN Xinghai, LIU Ze, et al. Study on preparation working performance and microstructure of coal mine filling material with large amount of fly ash[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(12): 4536–4548.
- [44] 李占金, 程豪杰, 杨美宏. 基于正交试验的胶结充填体力学性能及配比优化方案研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(5): 95–98.
- LI Zhanjin, CHENG Haojie, YANG Meihong. Study on mechanical property and proportion optimization of cemented filling body based on orthogonal test[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(5): 95–98.
- [45] 牛鹏, 王洪江, 陈志强. 基于双指标响应值法对充填材料理想配比值域研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(4): 15–19.
- NIU Peng, WANG Hongjiang, CHEN Zhiqiang. An ideal range of proportion for backfill materials based on the method of dual index response value[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(4): 15–19.
- [46] 李祥龙, 周青莲, 王建国, 等. 中等应变率下不同配比充填体的动态力学特征[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(8): 2707–2714.
- LI Xianglong, ZHOU Qinglian, WANG Jianguo, et al. Dynamic mechanical characteristics of backfill with different proportions under medium strain rates[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(8): 2707–2714.
- [47] 曹帅, 宋卫东, 薛改利, 等. 考虑分层特性的尾砂胶结充填体强度折减试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2869–2876.
- CAO Shuai, SONG Weidong, XUE Gaili, et al. Tests of strength reduction of cemented tailings filling considering layering character[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2869–2876.
- [48] 寇云鹏, 韩冲冲, 齐兆军, 等. 分级细尾砂胶结充填体长期力学特征研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(2): 43–49.
- KOU Yunpeng, HAN Chongchong, QI Zhaojun, et al. Study on long-term mechanical characteristics of cemented backfill with graded fine tailings[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(2): 43–49.
- [49] 朱鹏瑞, 宋卫东, 曹帅, 等. 爆破动载下胶结充填体的张拉力学响应机制[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(3): 605–611.
- ZHU Pengrui, SONG Weidong, CAO Shuai, et al. Tensile mechanical response mechanism of cemented backfills under blasting load[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(3): 605–611.
- [50] 朱鹏瑞, 宋卫东, 徐琳慧, 等. 冲击荷载作用下胶结充填体的力学特性研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(12): 131–137, 166.
- ZHU Pengrui, SONG Weidong, XU Linhui, et al. A study on mechanical properties of cemented backfills under impact compressive loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(12): 131–137, 166.
- [51] 姜立春, 苏勇, 代庆松. 远场爆破水平应力波扰动下分层胶结充填体矿柱的动力响应机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 34–44.
- JIANG Lichun, SU Yong, DAI Qingsong. Dynamic response mechanisms of layered cemented backfill pillars under horizontal stress wave disturbance of far-field blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 34–44.
- [52] 魏丁一, 杜翠凤, 张宏光, 等. 胶结充填体水化放热规律及其影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(10): 138–143.
- WEI Dingyi, DU Cuifeng, ZHANG Hongguang, et al. Study on hydration heat release laws of cemented backfill body and its influence[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(10): 138–143.
- [53] 刘鹏亮. 胶结充填体水化温度场特征及对煤自燃特性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11): 74–80.
- LIU Pengliang. Characteristics on hydrated temperature field of cementing filling body and affected to coal spontaneous combustion features[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 74–80.
- [54] 张钦礼, 王钟葶, 荣帅, 等. 深井矿山全尾砂胶结充填体早期强度特性及微观影响机理分析[J]. 有色金属工程, 2019, 9(6): 97–104.
- ZHANG Qinli, WANG Zhongwei, RONG Shuai, et al. Early strength characteristics and microcosmic influence mechanism analysis of cemented filling body of full tailings in deep mine[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(6): 97–104.
- [55] 王志凯, 吕文生, 杨鹏, 等. 尾砂胶结充填体固结后强度激发特性研究[J]. 金属矿山, 2017(9): 30–34.
- WANG Zhikai, LYU Wensheng, YANG Peng, et al. Study on strength excitation characteristics of cemented tailings backfill after consolidation[J]. Metal Mine, 2017(9): 30–34.
- [56] 贺桂成, 刘生龙, 黄炳香, 等. 废石胶结充填体与砂页岩合理匹配研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2): 371–377.
- HE Guicheng, LIU Shenglong, HUANG Bingxiang, et

- al. Reasonable matching for cemented waste rock backfill and sand shale[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(2): 371–377.
- [57] 聂亚林, 王晓军, 黄广黎, 等. 不同含水率纯尾砂胶结充填体强度及损伤模型分析[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(6): 2008–2013.  
NIE Yalin, WANG Xiaojun, HUANG Guangli, et al. Strength and damage model analysis of pure tailings cemented filling body with different water content[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(6): 2008–2013.
- [58] 焦国芮, 郝益民, 杨子龙, 等. 胶结充填体受温度作用的影响分析[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(3): 46–49.  
JIAO Guorui, HAO Yimin, YANG Zilong, et al. Influence of temperature on the cemented backfill[J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(3): 46–49.
- [59] 李凯兵. 温度影响下尾砂胶结充填体单轴压缩的力学及声发射特性研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2019.  
LI Kaibing. Study on mechanical and acoustic emission characteristics of uniaxial compression of cemented tailings backfill subjected to temperature[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2019.
- [60] 刘超, 韩斌, 孙伟, 等. 高寒地区废石破碎胶结充填体强度特性试验研究与工业应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(1): 139–147.  
LIU Chao, HAN Bin, SUN Wei, et al. Experimental study of strength of backfillings of cemented rock debris and its application under low temperature condition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(1): 139–147.
- [61] 赵国彦, 周礼, 马举, 等. 低温高寒环境下尾砂胶结充填体强度特性研究[J]. *矿冶工程*, 2013, 33(3): 24–26, 30.  
ZHAO Guoyan, ZHOU Li, MA Ju, et al. Study on strength properties of cemented tailings backfill under low temperature condition[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2013, 33(3): 24–26, 30.
- [62] 王志会, 吴爱祥, 王洪江. 基于 PSO-BPNN 的充填体围岩界面抗剪强度预测[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(3): 130–134.  
WANG Zhihui, WU Aixiang, WANG Hongjiang. Prediction on the interface shear strength of backfill and surrounding rock based on PSO-BPNN algorithm[J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(3): 130–134.
- [63] 王明旭. 胶结充填体与围岩复合体的力学特性[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(2): 445–453.  
WANG Mingxu. Mechanics characteristics of cemented filling and surrounding rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(2): 445–453.
- [64] 王瑞鹏, 金爱兵, 吴振坤, 等. 单侧揭露后侧受压胶结充填体稳定性分析[J]. *金属矿山*, 2018(8): 23–28.  
WANG Ruipeng, JIN Aibing, WU Zhenkun, et al. Analysis of the stability of the cemented backfill with unilateral exposure and posterior compression[J]. *Metal Mine*, 2018(8): 23–28.
- [65] 郑明强, 付厚利, 秦哲, 等. 胶结充填体对二步矿体作用机理分析[J]. *金属矿山*, 2016(10): 11–14.  
ZHENG Mingqiang, FU Houli, QIN Zhe, et al. Mechanism of cemented tailings backfill acting on the second-step ore body[J]. *Metal Mine*, 2016(10): 11–14.
- [66] 程立朝, 许江, 冯丹, 等. 岩石剪切破坏裂纹演化特征量化分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(1): 31–39.  
CHENG Lizhao, XU Jiang, FENG Dan, et al. Quantitative analysis on development of surface cracks of rocks upon shear failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(1): 31–39.
- [67] 程立朝, 许江, 冯丹, 等. 岩石剪切细观开裂演化与贯通机制分析[J]. *岩土力学*, 2016, 37(3): 655–664.  
CHENG Lizhao, XU Jiang, FENG Dan, et al. Analysis of mesoscopic cracking propagation and coalescence mechanisms of rocks subject to shearing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(3): 655–664.
- [68] 程立朝, 许江, 冯丹, 等. 法向应力对岩石剪切裂纹演化与贯通机理的影响[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(4): 741–746, 753.  
CHENG Lizhao, XU Jiang, FENG Dan, et al. Effects of normal stresses on crack propagation and coalescence mechanisms of rocks upon shear[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(4): 741–746, 753.
- [69] ZUO J P, CHEN Y, LIU X L. Crack evolution behavior of rocks under confining pressures and its propagation model before peak stress[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 26(11): 3045–3056.
- [70] CHEN G, LI T, LI G, et al. Influence of temperature on the brittle failure of granite in deep tunnels determined from triaxial unloading tests[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2017, 22(sup1): 1–17.
- [71] CHEN G, WANG J, LI J, et al. Influence of temperature on crack initiation and propagation in granite[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(8): 04018094.1–04018094.15.
- [72] 赵洪宝, 张欢, 王中伟, 等. 冲击载荷对煤样表面裂纹扩展特征影响研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(2): 280–288.  
ZHAO Hongbao, ZHANG Huan, WANG Zhongwei, et al. Experimental research on evolution of surface cracks in coal mass under impact load[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(2): 280–288.
- [73] ALIABADIAN Z, ZHAO G F, RUSSELL A R. Crack development in transversely isotropic sandstone discs

- subjected to Brazilian tests observed using digital image correlation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 119: 211–221.
- [74] 王登科, 张平, 浦海, 等. 温度冲击下煤体裂隙结构演化的显微 CT 实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(10): 2243–2252.  
WANG Dengke, ZHANG Ping, PU Hai, et al. Experimental research on cracking process of coal under temperature variation with industrial micro-CT[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10): 2243–2252.
- [75] 田文岭, 杨圣奇, 黄彦华. 不同围压下共面双裂隙脆性砂岩裂纹演化特性颗粒流模拟研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(6): 1207–1215.  
TIAN Wenling, YANG Shengqi, HUANG Yanhua. PFC<sup>2D</sup> simulation on crack evolution behavior of brittle sandstone containing two coplanar fissures under different confining pressures[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(6): 1207–1215.
- [76] 赵程, 刘丰铭, 田加深, 等. 基于单轴压缩试验的岩石单裂纹扩展及损伤演化规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(S2): 3626–3632.  
ZHAO Cheng, LIU Fengming, TIAN Jiashen, et al. Study on single crack propagation and damage evolution mechanism of rock-like materials under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(S2): 3626–3632.
- [77] 赵程, 田加深, 松田浩, 等. 单轴压缩下基于全局应变场分析的岩石裂纹扩展及其损伤演化特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(4): 763–769.  
ZHAO Cheng, TIAN Jiashen, MATSUDA Hiroshi, et al. Crack propagation and damage of rock under uniaxial compression based on global strain field analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4): 763–769.
- [78] 李树刚, 成小雨, 刘超. 类岩石材料压缩破坏力学特性及裂纹演化特征[J]. *西安科技大学学报*, 2017, 37(6): 771–778.  
LI Shugang, CHENG Xiaoyu, LIU Chao. Mechanics and crack evolution characteristics of rock-like material under compression failure[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2017, 37(6): 771–778.
- [79] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Crack coalescence in molded gypsum and carrara marble: part 1. macroscopic observations and interpretation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2009, 42(3): 475–511.
- [80] WONG L N Y, ZHANG X P. Size effects on cracking behavior of flaw-containing specimens under compressive loading[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(5): 1921–1930.
- [81] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(2): 239–249.
- [82] 焦华喆, 韩振宇, 陈新明, 等. 基于 NMR 技术的玄武岩纤维喷射混凝土韧性演化规律[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(10): 2990–2998.  
JIAO Huazhe, HAN Zhenyu, CHEN Xinming, et al. Flexural toughness evolution of basalt fiber reinforced shotcrete based on NMR technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(10): 2990–2998.
- [83] 焦华喆, 韩振宇, 陈新明, 等. 玄武岩纤维对喷射混凝土力学性能及微观结构的影响机制[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(8): 1926–1934.  
JIAO Huazhe, HAN Zhenyu, CHEN Xinming, et al. Influence mechanism of basalt fibre on the toughness and microstructure of spray concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(8): 1926–1934.
- [84] 唐礼忠, 宋祥霖. 含非共面重叠型微裂隙类岩石试样单轴受压宏观细观力学特性颗粒流模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(11): 2161–2171.  
TANG Lizhong, SONG Yanglin. Particle flow simulation of macro-and meso-mechanical properties of uniaxially compressed rock-like specimens with non-coplanar overlapping flaws[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(11): 2161–2171.
- [85] 黄彦华, 杨圣奇, 鞠杨, 等. 岩石巴西劈裂强度与裂纹扩展颗粒尺寸效应研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(4): 1272–1281.  
HUANG Yanhua, YANG Shengqi, JU Yang, et al. Study on particle size effects on strength and crack coalescence behavior of rock during brazilian splitting test[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(4): 1272–1281.
- [86] 徐文彬, 曹培旺, 程世康. 不同偏置裂纹充填体断裂特性试验[J]. *岩土力学*, 2018, 39(5): 1643–1652.  
XU Wenbin, CAO Peiwang, CHENG Shikang. An experiment on fracture characteristic behaviour of cemented backfill with different offset notch cracks[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(5): 1643–1652.
- [87] 徐文彬, 万昌兵, 田喜春. 温度裂隙对充填体强度耦合效应及裂纹扩展模式[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(3): 612–619.  
XU Wenbin, WAN Changbing, TIAN Xichun. Coupling effect of temperature and fracture on the strength and crack propagation mode of backfill mass[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(3): 612–619.
- [88] 周科平, 刘维, 周彦龙, 等. 不同渗透力的类充填体力学特性及损伤软化本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2019,

- 40(10): 3724–3732.
- ZHOU Keping, LIU Wei, ZHOU Yanlong, et al. Mechanical properties and damage-softening constitutive model of backfill with different osmotic pressures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(10): 3724–3732.
- [89] 谭玉叶, 汪杰, 宋卫东, 等. 循环冲击下胶结充填体动载力学特性试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(1): 184–190, 197.
- TAN Yuye, WANG Jie, SONG Weidong, et al. Experimental study on mechanical properties of cemented tailings backfill under cycle dynamic loading test[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(1): 184–190, 197.
- [90] 杨世兴, 王洪江, 侯永强, 等. 冲击加载下尾砂胶结充填体力学行为及变形破坏特征[J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(3): 908–919.
- YANG Shixing, WANG Hongjiang, HOU Yongqiang, et al. Mechanical behavior and deformation failure characteristics of cemented tailings backfill under impact loading[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32(3): 908–919.
- [91] 吴再海, 纪洪广, 姜海强, 等. 尾砂胶结含盐冻结充填体力学特性研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(6): 1874–1880.
- WU Zaihai, JI Hongguang, JIANG Haiqiang, et al. Study of mechanical properties of frozen saline cemented tailings backfill[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(6): 1874–1880.
- [92] 孙思瑞, 杜献杰, 冯国瑞, 等. 不同加载速率下岩充组合体的协同破坏特征研究[J]. *岩土力学*, 2025, 46(11): 3501–3512.
- SUN Sirui, DU Xianjie, FENG Guorui, et al. Synergistic failure characteristics of rock-backfill composite with different loading rates[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2025, 46(11): 3501–3512.
- [93] 刘洪磊, 李汶柯, 侯晨, 等. 变刚度加载条件下的充填单矿柱破坏特征[J]. *中国有色金属学报*, 2025, 35(7): 2561–2574.
- LIU Honglei, LI Wenke, HOU Chen, et al. Failure characteristics of backfill-single pillar system under variable stiffness loading[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2025, 35(7): 2561–2574.
- [94] 王永定, 温震江, 杨志强, 等. 矿渣微粉细度对胶结充填体强度的影响[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2019, 44(4): 1149–1155.
- WANG Yongding, WEN Zhenjiang, YANG Zhiqiang, et al. Influence of slag fineness on the strength of cemented backfill[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2019, 44(4): 1149–1155.
- [95] 付自国, 乔登攀, 郭忠林, 等. 超细尾砂胶结充填体强度计算模型及应用[J]. *岩土力学*, 2018, 39(9): 3147–3156.
- FU Zigu, QIAO Dengpan, GUO Zhonglin, et al. A Model for calculating strength of ultra-fine tailings cemented hydraulic fill and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(9): 3147–3156.
- [96] 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.
- [97] 曹帅, 宋卫东, 薛改利, 等. 分层尾砂胶结充填体力学特性变化规律及破坏模式[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(4): 717–722, 728.
- CAO Shuai, SONG Weidong, XUE Gaili, et al. Mechanical characteristics variation of stratified cemented tailing backfilling and its failure modes[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(4): 717–722, 728.
- [98] 贺桂成, 刘永, 丁德馨, 等. 废石胶结充填体强度特性及其应用研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(1): 74–79.
- HE Guicheng, LIU Yong, DING Dexin, et al. Strength characteristic of cemented waste rock backfills and its application[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(1): 74–79.
- [99] 王金星, 胡宗生, 焦华喆, 等. 基于 PFC2D 的结构面粗糙度对分层充填体强度的影响分析[J]. *工程科学学报*, 2025, 47(5): 984–994.
- WANG Jinxing, HU Zongsheng, JIAO Huazhe, et al. Influence of structural surface roughness on the strength of layered fill bodies based on PFC2D[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(5): 984–994.
- [100] 程爱平, 戴顺意, 张玉山, 等. 胶结充填体损伤演化尺寸效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(S1): 3053–3060.
- CHENG Aiping, DAI Shunyi, ZHANG Yushan, et al. Study on size effect of damage evolution of cemented backfill[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(S1): 3053–3060.
- [101] 兰文涛, 吴爱祥, 王贻明, 等. 半水磷石膏充填体离子固化与尺寸效应[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(1): 210–218.
- LAN Wentao, WU Aixiang, WANG Yiming, et al. Ionic solidification and size effect of hemihydrate phosphogypsum backfill[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(1): 210–218.
- [102] 孟庆彬, 韩立军, 浦海, 等. 尺寸效应和应变速率对岩石力学特性影响的试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(2): 233–243.

- MENG Qingbin, HAN Lijun, PU Hai, et al. Effect of the size and strain rate on the mechanical behavior of rock specimens[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(2): 233–243.
- [103] 程爱平, 董福松, 张玉山, 等. 单轴压缩胶结充填体裂纹扩展及汇集模式[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(1): 50–59.
- CHENG Aiping, DONG Fusong, ZHANG Yushan, et al. Crack propagation and convergence mode of cemented backfill under uniaxial compression[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(1): 50–59.
- [104] 徐文彬, 宋卫东, 王东旭, 等. 胶结充填体三轴压缩变形破坏及能量耗散特征分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(12): 3421–3429.
- XU Wenbin, SONG Weidong, WANG Dongxu, et al. Characteristic analysis of deformation failure and energy dissipation of cemented backfill body under triaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(12): 3421–3429.
- [105] 徐文彬, 宋卫东, 王东旭, 等. 三轴压缩条件下胶结充填体能量耗散特征分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(5): 808–814.
- XU Wenbin, SONG Weidong, WANG Dongxu, et al. Energy dissipation properties of cement backfill body under triaxial compression conditions[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(5): 808–814.
- [106] 张云海, 王新民, 魏冲, 等. 中等应变率条件下分层充填体的动态力学特性及失稳特征[J]. *中国有色金属学报 (英文版)*, 2017, 27(7): 1608–1617.
- ZHANG Yunhai, WANG Xinmin, WEI Chong, et al. Dynamic mechanical properties and instability behavior of layered backfill under intermediate strain rates[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(7): 1608–1617.
- [107] 刘志义, 甘德清, 甘泽. 早龄期胶结充填体的动态力学特性 (英文)[J]. *中南大学学报 (英文版)*, 2021, 28(7): 2079–2090.
- LIU Zhiyi, GAN Deqing, GAN Ze. Dynamic regimes of cemented backfill at early-age[J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(7): 2079–2090.
- [108] 宋学朋, 王石, 魏美亮, 等. SHPB 冲击荷载下碱化水稻秸秆基尾砂胶结充填体动态力学性能响应[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(9): 2583–2595.
- SONG Xuepeng, WANG Shi, WEI Meiliang, et al. Response of dynamic mechanical properties of alkali rice straw based cemented tailings backfill under SHPB impact Load[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(9): 2583–2595.
- [109] 宋学朋, 樊博文, 王石, 等. 动态荷载作用后尾砂胶结充填体再承载力学特性[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(12): 4785–4797.
- SONG Xuepeng, FAN Bowen, WANG Shi, et al. Reloading mechanical characteristics of cemented tailings backfill after dynamic loading action[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(12): 4785–4797.
- [110] 陈国瑞, 朱鹏瑞. 分层尾砂胶结充填体单轴抗压强度的测试研究[J]. *有色金属 (矿山部分)*, 2016, 68(3): 53–57, 62.
- CHEN Guorui, ZHU Pengrui. Study on uniaxial compressive strength of stratified cemented tailings backfill[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2016, 68(3): 53–57, 62.
- [111] 汪杰, 宋卫东, 谭玉叶, 等. 水平分层胶结充填体损伤本构模型及强度准则[J]. *岩土力学*, 2019, 40(5): 1731–1739.
- WANG Jie, SONG Weidong, TAN Yuye, et al. Damage constitutive model and strength criterion of horizontal stratified cemented backfill[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(5): 1731–1739.
- [112] 宋卫东, 汪杰, 谭玉叶, 等. 三轴加-卸载下分层充填体能耗及损伤特性[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(5): 1050–1057.
- SONG Weidong, WANG Jie, TAN Yuye, et al. Energy consumption and damage characteristics of stratified backfill under triaxial loading and unloading[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(5): 1050–1057.
- [113] 徐文彬, 潘卫东, 丁明龙. 胶结充填体内部微观结构演化及其长期强度模型试验[J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2015, 46(6): 2333–2341.
- XU Wenbin, PAN Weidong, DING Minglong. Experiment on evolution of microstructures and long-term strength model of cemented backfill mass[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(6): 2333–2341.
- [114] 阮竹恩, 吴爱祥, 付豪, 等. 秸秆纤维对含硫尾砂膏体充填体单轴抗压强度的影响机理[J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2023, 54(3): 837–848.
- RUAN Zhuen, WU Aixiang, FU Hao, et al. Influence mechanism of straw fiber on uniaxial compressive strength cemented paste backfill body of sulfur-bearing tailings[J]. *Journal of Central South University Science and Technology*, 2023, 54(3): 837–848.
- [115] 朱德福, 刘济广, 闫川, 等. 碱与硫酸盐环境下赤泥基充填材料的强度演化及硅铝活化机制[J]. *煤炭学报*, 2025, 50(8): 3868–3883.
- ZHU Defu, LIU Jiguang, YAN Chuan, et al. Strength evolution and silico-aluminous activation mechanism of red mud-based backfill materials in alkali-sulfate envi-

- ronments[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(8): 3868–3883.
- [116] 李鑫, 王炳文, 游家梁, 等. 尾砂胶结充填体力学性能与微观结构研究[J]. 中国矿业, 2016, 25(6): 169–172.  
LI Xin, WANG Bingwen, YOU Jialiang, et al. Study on mechanical properties and microstructure of the cemented tailings backfill[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(6): 169–172.
- [117] 陈绍杰, 刘小岩, 韩野, 等. 充填膏体蠕变硬化特征与机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 570–578.  
CHEN Shaojie, LIU Xiaoyan, HAN Ye, et al. Experimental study of creep hardening characteristic and mechanism of filling paste[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 570–578.
- [118] 甘德清, 申梦飞, 孙光华, 等. 高海拔地区矿山尾砂胶结充填体强度特性分析[J]. 化工矿物与加工, 2016, 45(3): 46–48.  
GAN Deqing, SHEN Mengfei, SUN Guanghua, et al. Analysis of strength characteristics of cemented tailings backfill in high altitudes[J]. Industrial Minerals & Processing, 2016, 45(3): 46–48.
- [119] 甘德清, 张雅洁, 刘志义, 等. 胶结充填体早期损伤对后期力学性能影响机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(4): 821–832.  
GAN Deqing, ZHANG Yajie, LIU Zhiyi, et al. Study on the mechanism of the influence of early damage of cemented backfill on later mechanical properties[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(4): 821–832.
- [120] 魏晓明, 郭利杰, 李宗楠. 基于宏微观耦合分析胶结充填体强度差异的研究[J]. 中国矿业, 2018, 27(6): 95–99.  
WEI Xiaoming, GUO Lijie, LI Zongnan. Study on the strength difference of cemented backfill based on macro-micro coupling analysis[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(6): 95–99.
- [121] 吴疆宇, 靖洪文, 浦海, 等. 分形研石胶结充填体的宏微观力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 2083–2100.  
WU Jiangyu, CHENG Hongwen, PU Hai, et al. Macroscopic and mesoscopic mechanical properties of cemented waste rock backfill using fractal gangue[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 2083–2100.
- [122] 王炳文, 高利晶, 赵文华, 等. 玲珑金矿胶结剂固结尾砂的微观实验[J]. 矿业科学学报, 2019, 4(6): 524–530.  
WANG Bingwen, GAO Lijing, ZHAO Wenhua, et al. Microscopic experiment of consolidating tailings by linglong cementitious material[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, 4(6): 524–530.
- [123] LIU L, ZHOU P, FENG Y, et al. Quantitative investigation on micro-parameters of cemented paste backfill and its sensitivity analysis[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(1): 267–276.
- [124] YANG X, DONG F, ZHANG X, et al. Review on comprehensive utilization of magnesium slag and development prospect of preparing backfilling materials[J]. Minerals, 2022, 12(11): 1415.
- [125] WEI S, HOU K, YANG Z, et al. X-ray CT three-dimensional reconstruction and discrete element analysis of the cement paste backfill pore structure under uniaxial compression[J]. Construction and Building Materials, 2017, 138: 69–78.
- [126] 易雪枫, 刘春康, 王宇. 金属矿尾废胶结充填体破裂演化过程原位 CT 扫描试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3365–3373.  
YI Xuefeng, LIU Chunkang, WANG Yu. Experimental study on the fracture evolution of cemented waste rock-tailings backfill (CWRB) of metal ore using in-situ CT scanning[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(10): 3365–3373.
- [127] 孙光华, 魏莎莎, 刘祥鑫, 等. 胶结充填体受压性能的非均质细观损伤研究[J]. 化工矿物与加工, 2015, 44(5): 41–44.  
SUN Guanghua, WEI Shasha, LIU Xiangxin, et al. Study on heterogeneous micro-mechanics damage in compress performance of cemented filling body[J]. Industrial Minerals & Processing, 2015, 44(5): 41–44.
- [128] 程爱平, 张玉山, 王平, 等. 胶结充填体应变率与声发射特征响应规律[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(10): 130–136.  
CHENG Aiping, ZHANG Yushan, WANG Ping, et al. Strain rate and acoustic emission characteristic response law of cemented backfill[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(10): 130–136.
- [129] 程爱平, 张玉山, 戴顺意, 等. 单轴压缩胶结充填体声发射参数时空演化规律及破裂预测[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 2965–2974.  
CHENG Aiping, ZHANG Yushan, DAI Shunyi, et al. Space-time evolution of acoustic emission parameters of cemented backfill and its fracture prediction under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 2965–2974.
- [130] 刘艳章, 李凯兵, 黄诗冰, 等. 单轴压缩条件下尾砂胶结充填体的损伤变量与比能演化[J]. 矿冶工程, 2019, 39(6): 1–4, 9.  
LIU Yanzhang, LI Kaibing, HUANG Shibing, et al. Analysis of damage variables and specific energy evolution for cemented tailings backfill under uniaxial compression condition[J]. Mining and Metallurgical Engi-

- neering, 2019, 39(6): 1-4, 9.
- [131] 李杨, 孙光华, 刘祥鑫, 等. 充填体声发射分形特征及损伤演化试验研究[J]. 实验力学, 2019, 34(6): 1053-1060.  
LI Yang, SUN Guanghua, LIU Xiangxin, et al. Experimental study on fractal characteristics and damage evolution of filling acoustic emission[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(6): 1053-1060.
- [132] 杨柳华, 高炆, 尹升华, 等. 基于 PVM 技术的充填膏体搅拌过程细观结构演化[J]. 煤炭学报, 2023, 48(S1): 325-333.  
YANG Lihua, GAO Yang, YIN Shenghua, et al. Meso-structure evolution of cemented backfill paste during mixing process based on PVM technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(S1): 325-333.
- [133] 张雯, 李泽峰, 郭利杰, 等. 围岩-充填体组合承载宏细观损伤演化机理[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(2): 277-290.  
ZHANG Wen, LI Zefeng, GUO Lijie, et al. Macro-meso damage evolution mechanism of surrounding rock-backfill combination bearing[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(2): 277-290.
- [134] 许长新, 路燕泽, 甘泽, 等. 基于细观尺度的胶结充填体破坏模拟试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2016(4): 18-22.  
XU Changxin, LU Yanze, GAN Ze, et al. Simulation research on cemented tailings backfill damage based on microscopic scale[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2016(4): 18-22.
- [135] 王煜, 付建新, 杨子龙. 岩石-充填体耦合接触面细观参数及其力学特性研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(3): 113-118.  
WANG Yu, FU Jianxin, YANG Zilong. Study on mesoscopic parameters and mechanical properties of rock-backfill coupled contact surface[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(3): 113-118.
- [136] 程爱平, 谭春森, 王为琪, 等. 基于颗粒流理论的充填体细观参数敏感性分析[J]. 金属矿山, 2016(12): 165-169.  
CHENG Aiping, TAN Chunsen, WANG Weiqi, et al. Sensibility analysis of backfill microscopic parameters based on particle flow theory[J]. Metal Mine, 2016(12): 165-169.
- [137] 程爱平, 舒鹏飞, 邓代强, 等. 单轴压缩下尾砂胶结充填体细观能量耗散与损伤表征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(6): 1227-1234.  
CHENG Aiping, SHU Pengfei, DENG Daiqiang, et al. Study on mesoscale energy dissipation and damage characterization of cemented tailings backfill under uniaxial compression[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(6): 1227-1234.
- [138] 胡世杰, 王方田, 高翔, 等. 三向应力状态下超高水材料固结体损伤特征及力学特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 128-135.  
HU Shijie, WANG Fangtian, GAO Xiang, et al. Damage characteristics and mechanical properties of superhigh-water material consolidated body under triaxial stress[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 128-135.
- [139] 罗怀廷, 李俊孟, 黄艳利, 等. 露天矿排放矸石三轴压缩宏-细观力学特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 170-178.  
LUO Huaiting, LI Junmeng, HUANG Yanli, et al. Study on macro and microcosmic mechanical properties of crushed gangue from pit mine under tri-axial compression[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(1): 170-178.
- [140] 何泽全, 巨峰, 肖猛, 等. 煤矸石充填材料在循环载荷作用下的细观变形特征分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(5): 1002-1010.  
HE Zequan, JU Feng, XIAO Meng, et al. Characterization of meso-deformation of gangue backfilling materials under cyclic loading[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(5): 1002-1010.
- [141] 巨峰, 宁湃, 何泽全, 等. 压实过程中煤矸石颗粒流细观演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 183-191.  
JU Feng, NING Pai, HE Zequan, et al. Study on particle flow mesoscopic evolution law of coal gangue in compaction process[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(1): 183-191.
- [142] 颜丙乾, 蔡美峰, 郭奇峰, 等. THMC 多场耦合作用下岩石力学实验与数值模拟研究进展[J]. 工程科学学报, 2021, 43(1): 47-57.  
YAN Binqian, CAI Meifeng, GUO Qifeng, et al. Research review of rock mechanics experiment and numerical simulation under THMC multi-field coupling[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(1): 47-57.
- [143] 李根, 唐春安, 李连崇. 水岩耦合变形破坏过程及机理研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(5): 593-619.  
LI Gen, TANG Chunan, LI Lianchong. Advances in rock deformation and failure process under water-rock coupling[J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(5): 593-619.
- [144] CHUGH Y P, MISSAVAGER A. Effects of moisture on strata control in coal mines[J]. Engineering Geology, 1981, 17(4): 241-255.
- [145] DYKE C G, DOBEREINER L. Evaluating the strength and deformability of sandstones[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1991, 24(1): 123-134.
- [146] HAWKINS A B, MCCONNELL B J. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1992, 25(2): 115-130.

- [147] 朱珍德, 邢福东, 张勇, 等. 红山窑膨胀红砂岩湿化特性试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1014–1018.  
ZHU Zhende, XING Fudong, ZHANG Yong, et al. Experimental research on slaking property of swelling red sandstone in hongshanyao[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1014–1018.
- [148] 颜丙乾, 任奋华, 蔡美峰, 等. THMC 多场耦合作用下岩石物理力学性能与本构模型研究综述[J]. 工程科学学报, 2020, 42(11): 1389–1399.  
YAN Binqian, REN Fenhua, CAI Meifeng, et al. A review of the research on physical and mechanical properties and constitutive model of rock under THMC multi-field coupling[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(11): 1389–1399.
- [149] 谭贤君, 陈卫忠, 伍国军, 等. 低温冻融条件下岩体温度-渗流-应力-损伤 (THMD) 耦合模型研究及其在寒区隧道中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 239–250.  
TAN Xianjun, CHEN Weizhong, WU Guojun, et al. Study of thermo-hydro-mechanical-damage (THMD) coupled model in the condition of freeze-thaw cycles and its application to cold region tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 239–250.
- [150] JIANG F F, ZHOU H, SHENG J, et al. Effects of temperature and age on physico-mechanical properties of cemented gravel sand backfills[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(10): 2999–3012.
- [151] 王子娟. 干湿循环作用下砂岩的宏细观损伤演化及本构模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.  
WANG Zijuan. Damage evolution characteristics and the accumulation damage model of sandstone under dry-wet cycle[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [152] 余昕. 三轴作用下岩-充组合物体宏细观力学特性及损伤破裂机理[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.  
YU Xin. Macro-Meso Mechanical properties and fracture evolution mechanisms of backfill-rock under triaxial effect[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.
- [153] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2020.  
KONG Xiangyan. Advanced seepage mechanics[M]. Hefei: China Science and Technology Press, 2020.
- [154] 李文亮. 饱和花岗岩力学特性及峰后非线性渗流试验研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.  
LI Wenliang. Experimental Studies on mechanical properties and post-peak non-linear flow of saturated granite rock[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.
- [155] 胡云进, 杨申东, 钟振, 等. 灰岩单裂隙非饱和渗流-应力耦合特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S1): 2846–2856.  
HU Yunjin, YANG Shendong, ZHONG Zhen, et al. Experimental study on unsaturated flow properties through a single limestone fracture under confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S1): 2846–2856.
- [156] 王苏生, 徐卫亚, 王伟, 等. 岩石统计损伤本构模型与试验[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2017, 45(5): 464–470.  
WANG Susheng, XU Weiya, WANG Wei, et al. The statistical damage constitutive model of rocks and its experiment[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5): 464–470.
- [157] 王伟, 田振元, 朱其志, 等. 考虑孔隙水压力的岩石统计损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 3676–3682.  
WANG Wei, TIAN Zhenyuan, ZHU Qizhi, et al. Study of statistical damage constitutive model for rock considering pore water pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3676–3682.
- [158] 陈姣姣, 蔡新, 施南峰. 胶凝砂砾石料渗流应力耦合作用细观模拟[J]. 人民长江, 2023, 54(3): 184–189.  
CHEN Jiaojiao, CAI Xin, SHI Nanfeng. Mesoscale simulation of cemented sand and gravel under coupling of seepage and stress[J]. Yangtze River, 2023, 54(3): 184–189.
- [159] 杨金保, 冯夏庭, 潘鹏志. 考虑应力历史的岩石单裂隙渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1629–1635.  
YANG Jinbao, FENG Xiating, PAN Pengzhi. Experimental study of permeability characteristics of single rock fracture considering stress history[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1629–1635.
- [160] LI C, HE S. Experimental study on seepage and fracture characteristics of cemented rock samples under triaxial stress[J]. Lithosphere, 2021, 24(7): 9893399.
- [161] KE Y, ZHANG J, ZHANG Q, et al. Mechanical properties and microstructure evolution of cemented tailing backfill under different seepage water pressures[J]. Frontiers in Materials, 2022, 8: 818698.
- [162] HOU J, LI J, ZHAO L. Experimental study on seepage-stress coupling failure characteristics and fracture fractal characteristics of cemented gangue-fly ash backfill with defects[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 122: 103658.
- [163] WANG J, MA D, ZHANG J, et al. Effect of wet-dry cycle on triaxial mechanical properties and constitutive models of solid waste cemented backfill[J]. Construction and Building Materials, 2024, 435: 136863.
- [164] SOLISMAA S, MUNIRUZZAMAN M, KUVA J, et al.

- Interaction of cemented paste backfill (CPB) and circum-neutral mine water during column experiments[J]. *Applied Geochemistry*, 2024, 165: 105965.
- [165] LI H, WANG H, BAI L. Research on the strength damage and permeability characteristics of cemented paste backfill under chlorine salt erosion and dry-wet cycles[J]. *Minerals*, 2024, 14(2): 177.
- [166] AL-MOSELLY Z, FALL M. Multiphysical testing of strength development of cemented paste backfill containing superplasticizer[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2024, 154: 105772.
- [167] SAFARI A, FALL M. A new yield surface for cemented paste backfill based on a modified structured cam-clay model[J]. *Minerals*, 2024, 15(1): 4.
- [168] XU W, WANG Z, ZHANG Y, et al. Mechanical properties, failure modes, and damage characteristics of layered cemented tailings backfill[J]. *Minerals*, 2024, 14(9): 917.
- [169] GAO Z, ZHAO Y, LIU Y, et al. Strength distribution of cemented waste rock backfill[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2024, 12: 1328421.
- [170] HE Q, CAO S, YILMAZ E. Characterizing mechanical and multiscale porosity features of cementitious high sulfur tailings backfill using CT technology[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, 194: 858–872.
- [171] CHILOANE N M. , SENGANI F, Mulenga F. An experimental and numerical study of the strength development of layered cemented tailings backfill[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 13926.
- [172] 王伟男, 徐曾和. 胶结充填体渗透性试验研究[J]. *矿业研究与开发*, 2018, 38(7): 56–60.  
WANG Weinan, XU Zenghe. Experimental research on the permeability of cemented backfill body[J]. *Mining Research and Development*, 2018, 38(7): 56–60.
- [173] 王永岩, 曾春雷, 卢灿东. 隧道围岩热力耦合的数值模拟研究[J]. *矿业研究与开发*, 2008, 28(1): 16–18.  
WANG Yongyan, ZENG Chunlei, LU Candong. Numerical simulation of coupled effect of heat and stress fields on tunnel's surrounding rock[J]. *Mining Research and Development*, 2008, 28(1): 16–18.
- [174] 李西龙, 张发源, 丁培培, 等. 尾矿连续沉积过程中超孔隙水压力演化的温度-渗流-力学-化学耦合模型[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(5): 1132–1139.  
LI Xilong, ZHANG Fayuan, DING Peipei, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical model for overpressure evolution in accreting mine fills[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(5): 1132–1139.
- [175] 李文臣. 硫酸盐对胶结充填体早期性能的影响及其机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- LI Wenchen. Characteristics and mechanism of sulphate effect on the early age properties of cemented paste backfill[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2016.
- [176] ABDUL-HUSSAIN N, FALL M. Unsaturated hydraulic properties of cemented tailings backfill that contains sodium silicate[J]. *Engineering Geology*, 2011, 123(4): 288–301.
- [177] 张磊, 吕力行, 吴昌雄. 某铜矿全尾砂充填体脱水研究[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2014, 66(4): 107–110.  
ZHANG Lei, LYU Lixing, WU Changxiong. Study on dehydration of unclassified tailings' filling body in a copper mine[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2014, 66(4): 107–110.
- [178] HOU J, GUO Z, LIU W, et al. Mechanical properties and meso-structure response of cemented gangue-fly ash backfill with cracks under seepage-stress coupling[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 250: 118863.
- [179] 王成. 渗流作用下膏体充填体力学性能演变及损伤机制[D]. 赣州: 江西理工大学, 2021.  
WANG Cheng. Evolution of mechanical properties and damage mechanism of cemented paste backfill under seepage[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2021.
- [180] XIU Z, WANG S, JI Y, et al. Experimental study on the triaxial mechanical behaviors of the cemented paste backfill: effect of curing time, drainage conditions and curing temperature[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 301: 113828.
- [181] 侯吉峰. 含裂隙胶结充填体渗流-应力耦合破裂机理及蠕变损伤模型研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2023.  
HOU Jifeng. Mechanism of seepage-stress coupling induced fracture and creep damage model study of cemented backfill with cracks[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2023.
- [182] 李利平, 柳尚, 李术才, 等. 应力-渗流耦合三轴渗透试验系统研制及其在充填介质渗透特性试验中的应用[J]. *岩土力学*, 2017, 38(10): 3053–3061.  
LI Liping, LIU Shang, LI Shucai, et al. Development of testing system for coupled seepage and triaxial stress measurements and its application to permeability characteristic test on filling medium[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(10): 3053–3061.
- [183] 徐文彬, 刘斌, 王雨兵, 等. 全尾砂胶结充填体的渗透特性试验设计与分析[J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(12): 99–103.  
XU Wenbin, LIU Bin, WANG Yubing, et al. Experiment design and analysis on the permeability characteristic of cemented unclassified tailings backfill[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(12): 99–103.

- [184] 徐文彬, 吴蔚律, 刘斌. 养护龄期、水泥掺量和围压对胶结充填体饱和渗流特性和三轴压缩行为影响(英文)[J]. 中南大学学报(英文版), 2023, 30(5): 1649–1661. XU Wenbin, WU Weilyu, LIU Bin. Effect of curing age, cement content and confining pressure on the saturated hydraulic conductivity and triaxial compressive behavior of cemented tailings backfill[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(5): 1649–1661.
- [185] 曾杰. 渗流-应力耦合作用下胶结充填体力学性质及破坏机制研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2023. ZENG Jie. Study on mechanical properties and damage mechanism of cemented backfill under seepage-stress coupling[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2023.
- [186] WANG Y, WANG H, ZHOU X, et al. In Situ X-ray CT investigations of meso-damage evolution of cemented waste rock-tailings backfill (CWRTB) during triaxial deformation[J]. Minerals, 2019, 9(1): 52.
- [187] 柯愈贤, 曾杰, 胡凯建, 等. 渗透水压作用下全尾砂胶结充填体的三轴力学特性及演变机制[J]. 有色金属科学与工程, 2024, 15(3): 422–431. KE Yuxian, ZENG Jie, HU Kaijian, et al. Triaxial mechanical properties and evolution mechanism of fully cemented unclassified tailings backfill under seepage pressure[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2024, 15(3): 422–431.
- [188] LIU C, LI S, ZHOU Z, et al. Numerical analysis of surrounding rock stability in super-large section tunnel based on hydro-mechanical coupling model[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(3): 1297–1310.
- [189] CHEN H M, ZHAO Z Y, CHOO L Q, et al. Rock cavern stability analysis under different hydro-geological conditions using the coupled hydro-mechanical model[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(2): 555–572.
- [190] LIU G, RONG G, PENG J, et al. Numerical simulation on undrained triaxial behavior of saturated soil by a fluid coupled-DEM model[J]. Engineering Geology, 2015, 193: 256–266.
- [191] SHI Y, LIN B, LIU T, et al. Multi-physics coupling analysis to predict rock failure and gas migration behavior in the gangue backfilling stope[J]. Measurement, 2025, 248: 116903.
- [192] 程立朝, 秦义岭, 李新旺, 等. 不同级配矸石压实特性数值模拟研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(1): 214–219. CHENG Lichao, QIN Yiling, LI Xinwang, et al. Numerical simulation study of compaction characteristics of different gradation gangue[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(1): 214–219.
- [193] LUO X Y, CAO P, LIN Q B, et al. Mechanical behaviour of fracture-filled rock-like specimens under compression-shear loads: an experimental and numerical study[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2021, 113: 102935.
- [194] CAI W Y, WANG Y, HE F J, et al. The seepage-destruction mechanism of water inrush channel of sandstone fault filling using the EDEM-fluent method[J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 2022: 3313013.
- [195] 王文哲, 杨小聪, 郭利杰. FLAC3D用于充填模拟分界面力学特性研究[J]. 矿冶, 2010, 19(2): 1–4. WANG Wenzhe, YANG Xiacong, GUO Lijie. Study on mechanical characteristics of interface in filling simulation with FLAC3D[J]. Mining and Metallurgy, 2010, 19(2): 1–4.
- [196] 周睿. 沿空留巷充填体蠕变特性数值模拟[J]. 煤矿安全, 2018, 49(3): 218–221. ZHOU Rui. Numerical simulation on creep properties of filling body of gob-side entry retaining[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(3): 218–221.
- [197] 赵树果, 范鹏凯, 卢宏建. 加载速率对充填混合材料力学特性影响研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(2): 42–45. ZHAO Shuoguo, FAN Pengkai, LU Hongjian. Study on the influence of loading rate on mechanical properties of mixed filling materials[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(2): 42–45.
- [198] 吴迪, 孙光华, 黄刚. 胶结尾砂充填体渗流特性的试验与模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(3): 1050–1058. WU Di, SUN Guanghua, HUANG Gang. Experimental and simulation study on seepage characteristics of cemented tailings backfill[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(3): 1050–1058.
- [199] YIN Q, JING H W, ZHU T T, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of fluid flow through large-scale 3d rock mass containing filling joints: an experimental and numerical study[J]. Geofluids, 2021(1): 8883861.
- [200] 姚直书, 乔帅星, 李欣慰, 等. 富水岩层中充填层流固耦合作用分析[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2022, 42(4): 1–6. YAO Zhishu, QIAO Shuaxing, LI Xinwei, et al. Analysis on fluid-solid coupling of filling layers in the water rich strata[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 42(4): 1–6.
- [201] 张纪云. 裂隙岩体渗流规律与高温富水破碎岩体注浆及充填体力学特性研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2022. ZHANG Jiyun. Research on the seepage characteristic of fractured rocks and the mechanical properties of grout-

- ing and fillings of high-temperature water-rich broken rock masses[D]. Jiaozuo: Henan University of Technology, 2022.
- [202] 王平, 景瑞华, 程爱平, 等. 基于 KCC 模型-ALE 算法的充填体动力响应数值模拟研究[J]. 化工矿物与加工, 2025, 54(1): 39-48.  
WANG Ping, JING Ruihua, CHENG Aiping, et al. Numerical simulation study on dynamic response of backfill based on KCC model and ALE algorithm[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2025, 54(1): 39-48.
- [203] SONG X P, HAO Y X, WANG S, et al. Dynamic mechanical response and damage evolution of cemented tailings backfill with alkalinized rice straw under SHPB cycle impact load[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 327: 127009.
- [204] ZHANG H X, LIU H J, ZHENG R C, et al. Application of ABAQUS Flow-Solid coupling model to evaluate sealing capability of sandstone formation interface based on the cracking behavior of cohesive force units[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 409: 133863.
- [205] ZEGHAL M, EL SHAMY U. Liquefaction of saturated loose and cemented granular soils[J]. *Powder Technology*, 2008, 184(2): 254-265.
- [206] DIVIĆ V, UZELAC I, PEROŠ B. Multiplicative decomposition based fdem model for membrane structures[J]. *Transactions of FAMENA*, 2014, 38(1): 1-12.
- [207] ZHANG A, JIANG M J, THORNTON C. A coupled CFD-DEM method with moving mesh for simulating undrained triaxial tests on granular soils[J]. *Granular Matter*, 2020, 22: 13.
- [208] YAN C, ZHENG Y, WANG G. A 2D adaptive finite-discrete element method for simulating fracture and fragmentation in geomaterials[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 169: 105439.
- [209] 张国辉. 酸性环境下矸石胶结充填体力学性能演化及渗流规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.  
ZHANG Guohui. Study on the evolution of mechanical properties and seepage law of gangue cemented backfill in acidic environment[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [210] 沈阳. 渗流作用下膏体充填体力学性能及宏观微观破损规律研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2024.  
SHEN Yang. Study on the mechanical properties and macro and micro damage laws of paste backfill under seepage[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2024.
- [211] YUAN X Z, LI X Q, LI X F, et al. Multi-factor analysis and graded remediation strategy for goaf stability in underground metal mines: fluid-solid coupling simulation and genetic algorithm-based optimization approach[J]. *Symmetry*, 2025, 17(7): 1024.
- [212] 向学敏, 文祝, 徐辉, 等. 火灾高温环境下复合尾砂充填体的损伤效应与性能劣化研究[J]. 金属矿山, 2025(4): 266-273.  
XIANG Xuemin, WEN Zhu, XU Hui, et al. Study on damage effect and performance degradation of composite tailings backfill under high temperature environment of fire[J]. *Metal Mine*, 2025(4): 266-273.
- [213] ZHENG A X, LUO X Q. Hydro-mechanical modeling of impermeable discontinuity in rock by extended finite element method[J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(11): 4337-4346.