

· 研究进展 ·

深部充填开采岩层控制理论与方法研究进展

张吉雄^{1,2} 巨峰² 李猛^{3*} 马丹¹ 张强¹ 周楠¹

1. 中国矿业大学 矿业工程学院 深部煤炭资源开采教育部重点实验室,徐州 221116
2. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室,徐州 221116
3. 中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室,徐州 221116

[摘要] 我国深部煤炭资源丰富,煤炭开发已逐步向深部转移,深部灾害防控和矸石等矿山固废排放问题日趋严峻。充填开采是实现灾变调控、地表沉陷控制和矿山固废处置的重要手段,已在我国煤矿绿色开采、矿压控制与岩层移动等领域广泛应用。然而,相对浅部,深部“三高一扰动”条件下充填开采岩层控制更为复杂,因此,构建深部绿色充填开采岩层控制理论与方法体系,对于深部煤炭资源安全高效开采具有重要意义。本文在系统分析深部充填开采岩层控制面临挑战基础上,提出了深部充填开采关键科学问题、研究目标与总体思路,并从多场耦合作用下充填体-围岩交互作用机理、强扰动条件下充填采场矿压分析模型、深部充填开采岩层控制方法、充填体与地下水环境互相影响四个方面阐述了相关研究进展。

[关键词] 深部充填;岩层移动;充填体;本构关系;矿压控制

煤炭作为我国的基础能源和工业原料,长期以来为经济社会发展和国家能源安全稳定供应提供了有力保障,随着浅部煤炭资源逐渐枯竭,资源开发不断走向深部^[1-4]。据统计,我国2000米以浅探明煤炭资源储量中超千米占53.3%。目前煤炭开采最大深度已超过1500m(孙村煤矿),开采深度超千米煤矿的数量近50个,且以每年10~25m速度向深部延伸,深部将逐渐成为我国煤炭资源开发的主战场^[5-10]。2016年,我国确立了“三深”(深空、深海、深地)战略,明确提出了“向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”,向深部要资源已成为国家重大战略需求。然而,深部资源开发将面临重大挑战,主要来自异于浅部的“三高一扰动”(高地应力、高地温、高渗透压和强扰动)复杂开采环境^[11-15],给深部煤炭资源安全开发带来了巨大困难。

采动岩层运动是煤矿生态环境损害与灾害发生的根源,充填开采技术(如图1)是煤矿绿色开采核心技术之一,也是调控深部开采环境的重要手段,通



张吉雄 中国矿业大学教授、博士生导师,现任中国矿业大学党委常委、副校长。享受国务院政府特殊津贴专家、国家杰出青年科学基金项目获得者、国家“万人计划”科技创新领军人才。主要从事矿山负碳充填开采与岩层控制、矿山固废处置与利用及矿山绿色功能材料等方面的科研工作。主持国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重点项目等30余项,获国家技术发明奖二等奖及省部级科学技术进步奖一等奖等科技奖励7项,授权发明专利80余件,制定国家或行业标准9项,发表学术论文100余篇,出版学术专著4部。



李猛 中国矿业大学副研究员、博士生导师。入选国家博士后创新人才支持计划,获煤炭青年科技奖、全国高校矿业石油与安全工程领域优秀青年科技人才提名奖等。主要从事绿色充填开采、矿山固废处置与利用等方面的科研工作。主持国家自然科学基金面上项目与青年科学基金、国家重点研发计划项目子课题、江苏省自然科学基金面上项目等30余项,获江苏省科学技术奖一等奖、中国煤炭工业协会科学技术奖一等奖等科技奖励10余项,作为第一或通讯作者发表学术论文46篇,授权发明专利60余件。

收稿日期:2021-07-17;修回日期:2022-01-10

* 通信作者,Email: limeng1989@cumt.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(51725403)的资助。

过限制岩层运动、缓解采场应力分布状态,从根本上解决采动岩层移动破坏中的灾变问题、有效利用矸石等废弃物控制开采沉陷并保护矿区土地资源、水资源和生态环境以及提高煤炭资源的采出率^[16-21],实现矿区资源开采与环境保护的协调发展。2013年,在“生态优先、绿色发展”原则下,国务院明确要求加快推进绿色矿山建设,并将充填开采作为先进适用技术优先推广使用;2019年,国家安全生产监督管理局建议,“三下”开采、坚硬顶板、水害严重且具备条件的煤矿,必须采用充填开采;2021年,煤炭工业“十四五”高质量发展指导意见指出,因地制宜推广充填开采等绿色低碳开采技术;2024年,国家能源局明确,推广应用智能充填开采等绿色开采技术,推动矿区智能绿色协同发展。

多年来,充填开采技术得到快速发展与广泛应用,但尚未形成系统的深部绿色充填开采岩层控制理论与方法。基于此,在国家杰出青年科学基金项目(编号:51725403)资助下,结合国家“深地”资源开发的重大需求,围绕散体充填物料受压力学性能、深部充填采场顶板力学行为和充填采煤散体物料渗流特性 3 个关键科学问题,以构建深部煤矿安全高效低生态损害的充填开采岩层控制理论与方法为目标,开展了散体充填物料本构关系模型、深部充填采场矿压及其控制方法、深部充填体与围岩交互作用机理和充填物料与地下水环境互相影响 4 个方面研究,取得了 4 项主要研究成果。

1 深部充填开采岩层控制面临挑战

相比浅部,深部煤炭资源开采面临更为复杂的开采环境,主要表现在“三高一扰动”^[5-7],深部充填开采岩层控制将面临严峻挑战(如图 2 所示)。从采动应力环境看,深部地应力显著增加,开采扰动引起的岩层运动更为强烈,对围岩变形与矿压控制带来挑战;从地下水环境看,高水压影响深部充填体长期

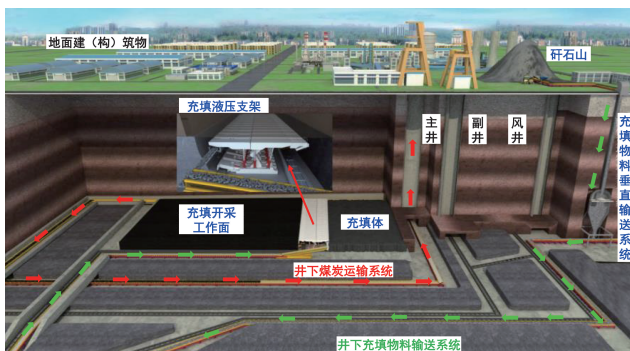


图 1 充填开采技术示意

稳定性,对多场耦合条件下充填体的承载功能保障带来挑战;从开采空间环境看,深部动力灾害突出,能量积聚表现出较高的非均衡性,对深部充填开采岩层控制带来挑战。因此,深部充填开采的核心目的不仅是支撑顶板与岩层,并同时实现深部复杂环境的调控。

由此可见,浅部与深部充填开采岩层控制具有显著的差异,见表 1。

2 深部充填开采岩层控制研究总体框架及目标

针对深部充填开采面临的重大科学难题,围绕“深部充填开采岩层控制”这一主题,安全、绿色、高效的充填开采要从浅部走向深部,需要创新与发展深部充填开采的岩层控制理论与技术体系。为此,需要深入研究解决深部充填开采基础性关键科学问题,具体包括:(1)散体充填物料受压力学性能;(2)深部充填采场顶板力学行为;(3)充填开采散体物料渗流特性。开展 4 个方面的研究工作:(1)散体充填物料本构关系模型研究;(2)深部充填采场矿压及其控制方法;(3)深部充填体与围岩交互作用机理;(4)充填物料与地下水环境互相影响。

项目总体的研究目标:(1)建立散体充填物料本构关系模型,揭示散体充填物料的细观机理与宏观规律;(2)揭示深部充填采场矿压显现规律,提出深部充填采场围岩变形控制方法;(3)研究深部开采“三高一扰动”条件下散体充填物料力学行为,形成安全高效绿色的充填开采岩层控制理论;(4)研究采空区散体物料渗流特性,构建散体物料影响地下水环境的评价体系。

围绕 4 个方面的研究内容,采用理论分析、数值分析、物理模拟、实验测试和工程实践等研究手段,开展系统的基础理论与应用研究,研究总体框架如图 3 所示。

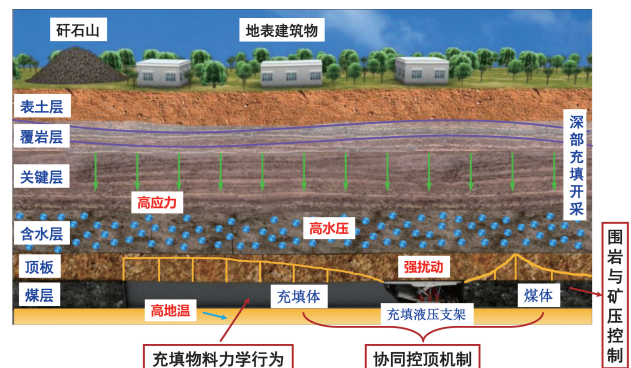


图 2 深部开采岩层控制面临挑战

表 1 浅部与深部充填开采岩层控制的差异

| 类型 | 难点 | 特点 | 关键点 |
|----|---|---|---|
| 浅部 | (1) 充填空间维护 (2) 充填通道创建 (3) 充填动力保障 | 主要围绕近采场围岩变形与矿压显现 | 揭示岩层移动变形与矿压显现规律 |
| 深部 | (1) 强扰动下的采充空间维护 (2) 多场耦合条件下的充填体长期稳定性控制 (3) 非均衡能量积聚的充填调控 | (1) 需要考虑全覆岩结构演化及矿压分布 (2) 需要考虑多物理场的环境效应 (3) 需要考虑时间效应 | (1) 揭示协同控顶机制 (2) 分析多场耦合充填物料力学行为 (3) 开发基于能量调控的充填开采方法 |

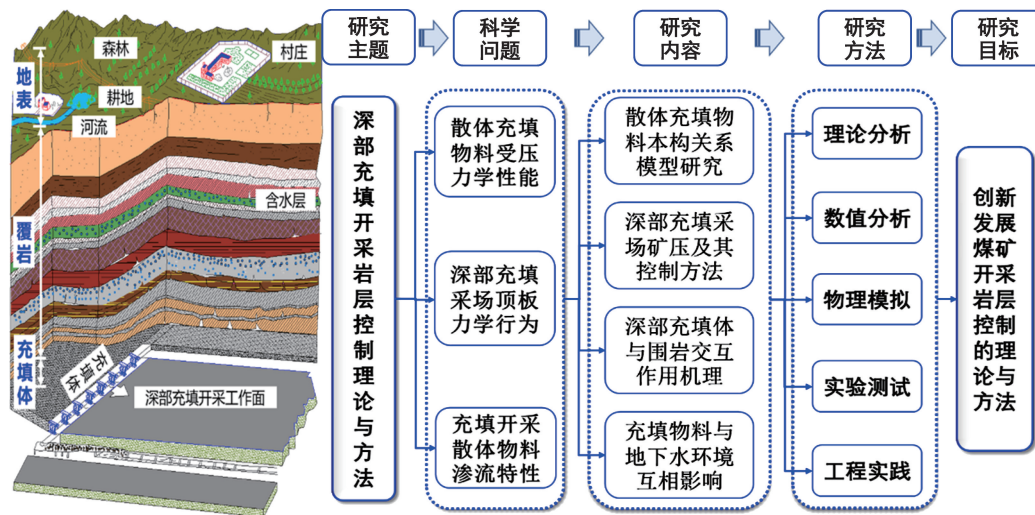


图 3 深部充填开采岩层控制研究总体框架

3 深部充填开采岩层控制研究进展

3.1 多场耦合作用下充填体—围岩交互作用机理

在深部多场耦合作用下，充填体与围岩之间具有复杂的非线性关系，也表现出一定的时效性。因此，研究散体充填物料在多场耦合作用下的瞬时与蠕变压缩过程，对于充填开采覆岩移动、采场矿压控制具有重要理论意义。

(1) 散体充填物料本构关系

考虑时间效应，散体充填物料瞬时承载压缩变形和长期承载压缩变形有一定差异，前者体现了充填体对顶板变形的抵抗能力，后者则体现了充填体在多场耦合环境下的弱化特征。

结合现场实际充填开采情况，提出了散体充填物料承载压缩力学特性测试方法，并形成了相关标准，采用自制的散体物料双向加载试验系统，测试得到了矽石岩性、粒径级配、侧向应力与侧压次数 4 种主控因素与充填物料瞬时承载压缩特性的关系^[22]，引入散体充填物料粒径级配参量，利用多元非线性回归方法，构建了多因素耦合作用下矽石充填物料

瞬时承载压缩变形本构方程^[23, 24]，见式(1)。

$$\begin{aligned} \epsilon_v = & ((2.8774e^{0.0433\sigma_v} - 2.3085)\sigma_c^{(-0.0038\sigma_v - 0.2386)} \\ & + (-2.5943E - 5\sigma_v^2 - 6.1352E \\ & - 4\sigma_v - 0.0036)B_g^2 \\ & + (3.2061E - 4\sigma_v^2 + 0.0076\sigma_v + 0.0439)B_g \\ & + (112074.0765e^{-6.9231E-8\sigma_v} - 112074.0838)\sigma_h \\ & + (476924.2089e^{-8.9060E-8\sigma_v} - 476924.1670) \\ & \cdot e^{(0.0363\sigma_v^3 - 1.2704\sigma_v^2 - 6.9657\sigma_v - 13.7931)n} \\ & + 44019.7229\ln(4.0787E - 7\sigma_v + 0.9999) \\ & / \ln(2.7216\sigma_v^2 - 36.5364\sigma_v + 148.4808) \end{aligned} \quad (1)$$

式中： ϵ_v 为试件应变； σ_c 为试件单轴抗压强度； σ_h 为试件侧向应力； σ_v 为轴向应力； B_g 为粒径级配参量； n 为侧压次数。

采用 Burgers 蠕变模型描述了矽石蠕变特性，通过分数阶粘壶替代，构建了分数阶散体充填物料蠕变承载压缩 NMK 本构模型，进一步推导了 NMK 本构模型的三维蠕变方程，辨识了 NMK 本构模型参数^[25]，见式(2)：

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) = & \frac{\sigma_v(1+2\lambda)}{9K_e} + \frac{\sigma_v(1-\lambda)}{3G_e} + \frac{2\sigma_v(1-\lambda)}{3\eta_v^\alpha} \frac{t^\alpha}{\Gamma(1+\alpha)} \\ & + \frac{\sigma_v(1-\lambda)}{3G_{ev}} \left(1 - e^{-\frac{G_{ev}t^\beta}{\eta_{ev}^\beta}}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中： $\varepsilon(t)$ 为试件蠕变应变； λ 为侧压系数； G 为剪切模量； K 为体积模量； t 为时间； η 为黏性系数； Γ 为Gamma函数； β 为分数阶阶数。将NMK模型三维蠕变本构转化成有限差分形式，通过FLAC^{3D}数值模拟软件实现了蠕变承载压缩NMK本构模型的二次开发。

考虑水化学溶液对承载压缩力学性能的影响，采用平均割线模量定义水化学损伤变量，用于表征矽石承载压缩力学参数随水化学损伤的演化规律，具体见式(3)：

$$D = 1 - \frac{\bar{E}_g}{\bar{E}_{g0}} = 1 - \frac{\int_0^{\varepsilon_d} \sigma_d d\varepsilon}{\int_0^{\varepsilon_0} \sigma d\varepsilon} \quad (3)$$

式中： D 为蠕变化学损伤变量； E_g 、 E_{g0} 分别为岩石腐蚀前后的割线模量； σ 为轴向应力； ε 为应变。

采用改进的H-P-C Burgers蠕变模型，构建了考虑水物理化学作用的矽石蠕变损伤本构模型，具体见式(4)：

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{a-bT^c} + \frac{\sigma(e^{\eta T} - 1)}{\eta N \gamma} + \frac{\sigma}{E_{HN}} \left(1 - e^{-\frac{E_{HN}(1-e^{\eta T})}{\eta EN}}\right) + \alpha t^{\beta T}, & T > 1 \\ \frac{\sigma}{a-bT^c} + \frac{\sigma(e^{\eta T} - 1)}{\eta N \gamma} + \frac{\sigma}{E_{HN}} \left(1 - e^{-\frac{E_{HN}(1-e^{\eta T})}{\eta EN}}\right) + \alpha t^{\beta}, & T \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中： T 为浸泡时间； E_H 为弹性模量； η_N 为黏性系数； a 、 b 、 α 、 β 为模型的拟合参数。

以开滦唐山矿充填工作面为案例进行验证分析，充填工作面的原岩应力达到18 MPa，在兼顾采空区充填效率及设备选型要求的基础上，确定4种主控因素的取值分别为岩性砂岩、粒径级配0~

30 mm、侧向应力2 MPa与侧压次数5次。将以上数值代入式(1)，计算得到了多因素耦合作用下矽石充填物料瞬时承载压缩应变为0.279。同时，采用式(2)中的NMK本构模型对试验数据进行参数辨识，并通过辨识得到的参数计算得到了矽石充填物料承载压缩应变为0.302，相比瞬时承载压缩应变，蠕变承载压缩应变仅为0.023。

(2) 多场耦合下散体充填物料承载压缩孔隙演化及渗流规律

采用多场耦合数值计算软件COMSOL Multiphysics，研究了水化学侵蚀作用下散体充填物料在承载压缩过程中孔隙率的演化规律，分析了渗流时间、轴向应力对散体充填物料承载变形及孔隙分布的空间展布特征，揭示了非均质散体充填物料中渗流场分布规律(图4)，阐明了水在散体充填物料颗粒间的渗透与运移特征^[26-28]。

(3) 多场耦合作用下充填体—围岩相互影响机制

散体矽石充入采空区后，一般埋藏在由应力场、渗流场及水化学场等构成的采动空间的地质环境中，矽石充填体的应力—渗流—化学耦合作用是动态演化及逐步协调和变异的过程，如图5所示。

分析图5可知，散体矽石在充填入采空区后，在上覆载荷作用下矽石颗粒被逐渐压缩、破碎及旋转等，而流体在充填体内部渗透扩散过程中，渗透体积力和渗透压力改变充填体内部应力分布，渗流速度对固体骨架的变形、强度产生影响；同时，化学溶液对矽石的腐蚀，会改变其微观的结构和形貌。因此，在多场耦合作用下矽石充填体承载压缩性能会被弱化。

在多场耦合作用下矽石充填体与围岩是相互影响，充填体性能直接关系到采场围岩的控制效果。当矽石充填体承载压缩性能较差时，即非密实充填状态，顶板变形较大，在达到极限强度后，顶板将发生破断，整个采场围岩变形较大；当矽石充填体承载压缩性能较好时，即密实充填状态，充填体的密实度较高，在充填体的支撑下，顶板不发生破断，整个采场围岩变形控制效果较好。

表2 NMK本构模型参数取值

| 加载应力/MPa | 模型参数 | | | | | | |
|----------|------------|------------|--------------------------|----------|---------------|----------------------------|---------|
| | K_e /MPa | G_e /MPa | η_v^α /MPa·min | α | G_{ev} /MPa | η_{ev}^β /MPa·min | β |
| 18 | 108.83 | 23.32 | 97 853.49 | 0.38 | 315.01 | 3 651.44 | 0.61 |

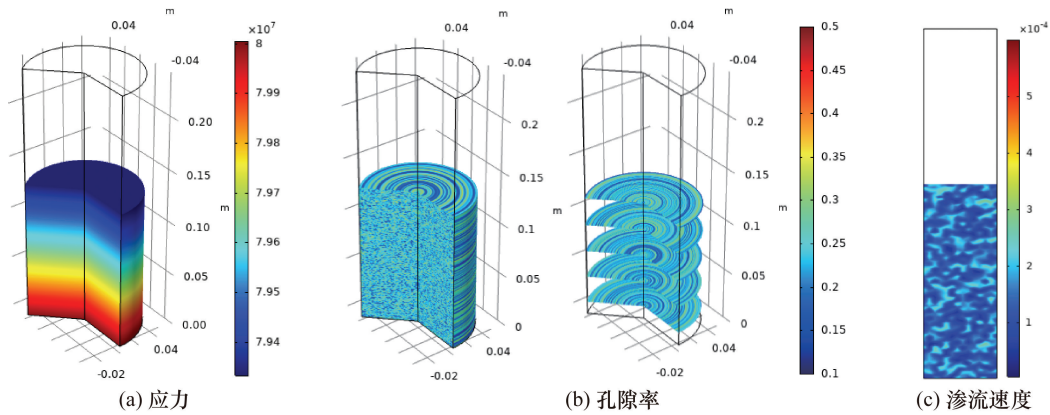


图 4 散体充填物料承载压缩渗流规律

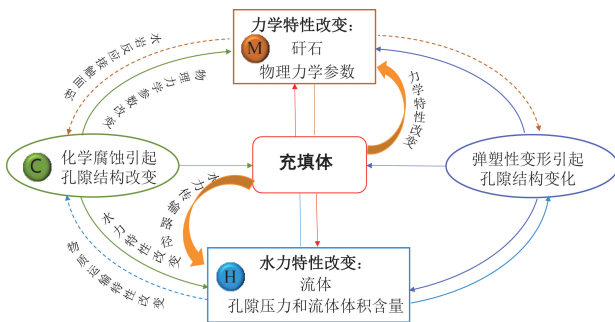


图 5 矽石充填体的应力—渗流—化学耦合作用

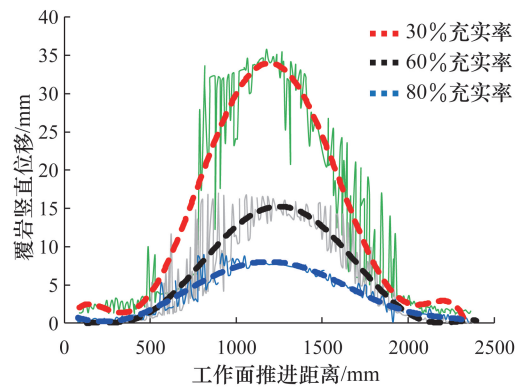


图 6 不同充实率顶板变形曲线

3.2 强扰动条件下充填采场矿压分析模型

深部充填采场矿压显现不同于浅部充填开采，综合采用数值模拟、相似模拟和现场实测等方法，研究了深部充填采场顶板变形及应力分布特征，建立了深部充填采场矿压分析模型，揭示了充填体协同充填支架控顶机理。

(1) 深部充填采场顶板变形及应力分布特征

建立了深部充填开采岩层运动物理相似模型，分析了开采深度、充实率及开采尺寸等因素影响下充填采场围岩变形、裂隙发育及应力演化规律^[29] (图 6、图 7)。研究了深部充填开采地表沉陷控制特征^[30]；提出了基于综合平衡井下围岩控制与地表沉陷设防指标、兼顾覆岩结构和永久煤柱控制作用的深部充填开采岩层运动和地表沉陷的控制原理^[31]。

(2) 深部充填采场矿压分析模型

分析得到了非密实与密实充填 2 种状态下充填开采岩层移动特征，建立了充填采场力学模型，采用 Mohr-Coulomb 准则分析了工作面前方非弹性区长度；基于多因素耦合作用下矽石充填体瞬时承载压缩变形本构方程，采用非线性 Winkler 地基梁模型分别建立了非密实与密实充填状态下矽石充填体控制采场顶板下沉力学模型^[32] (图 8、9)。

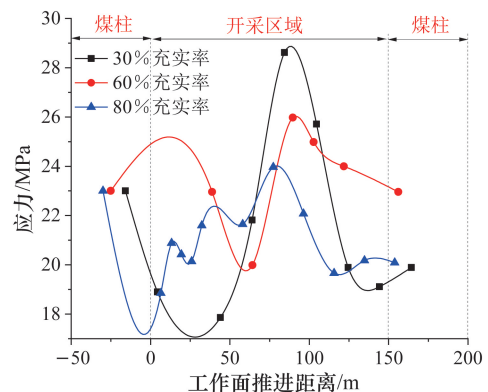


图 7 不同充实率应力变化曲线

(3) 充填体协同充填支架控顶机理

深部充填采场矿压控制的本质是充填体、煤体和充填支架协同控顶，改变了传统垮落法开采顶板破断形态与应力演变方式，采空区充实率起到了决定性作用。不同充实率条件下充填采场围岩变形、裂隙发育及应力演化规律随之变化，根据充填开采目标不同，分为密实充填和非密实充填。不同充实率下顶板挠度、弯矩分布形态具有明显差异性(图 10、11)，高充实率下顶板最大弯矩发生在充填段末端，低充实率下顶板最大弯矩发生在煤壁前方^[33, 34]。

3.3 深部充填开采岩层控制方法

充填开采技术经历了“矸石处理—岩层运动局部控制—岩层运动严格控制—岩层位态精准控制”过程,根据实际充填需求不同,形成了全采全充、全采局充、局采全充和局采局充4种典型的充填系统布置方式^[17]。充填采场矿压反映了采空区充填密实程度,从而决定了适用的充填开岩层控制方法。结合充填体协同充填支架控顶机理与深部充填工作面应力分布特征,提出了深部充填采场矿压控制方法设计流程,如图12所示。

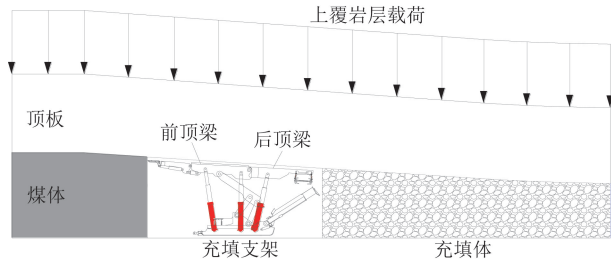
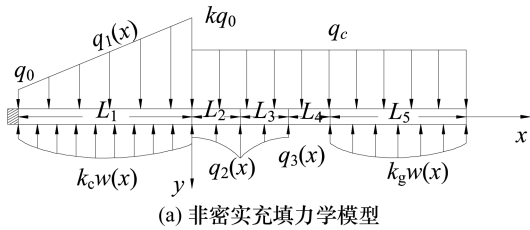
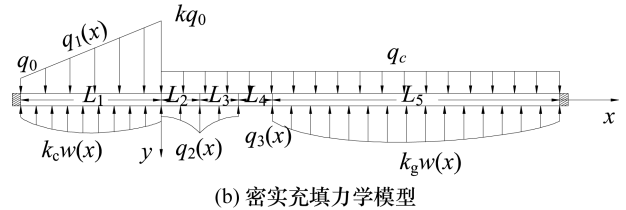


图8 深部充填体、充填支架与围岩相互关系



(a) 非密实充填力学模型



(b) 密实充填力学模型

图9 不同充填状态采场顶板力学模型

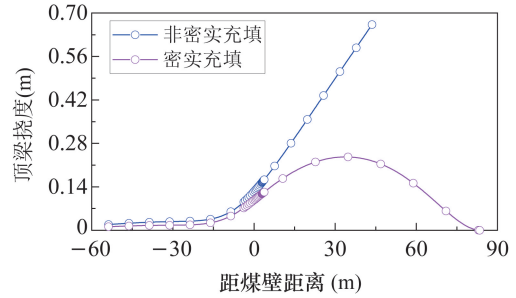


图10 距煤壁不同位置顶梁挠度趋势

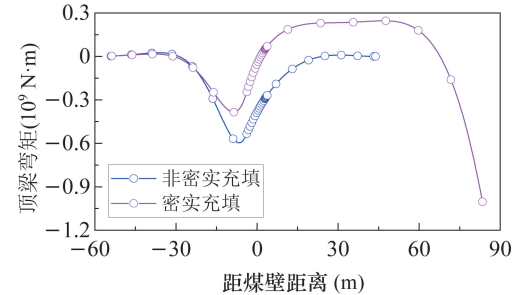


图11 距煤壁不同位置顶梁弯矩趋势

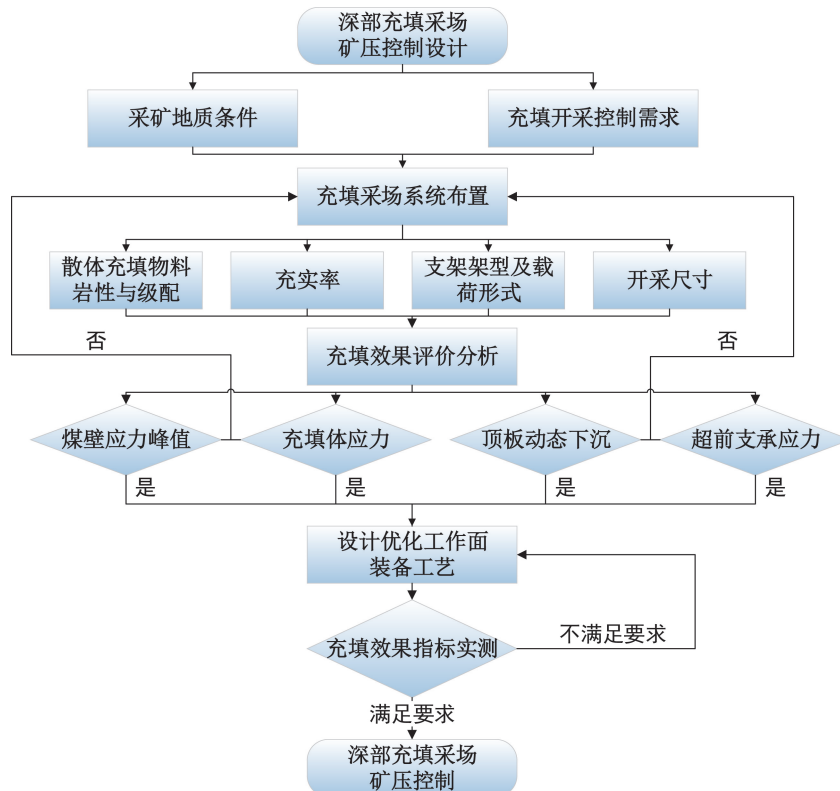


图12 深部充填采场矿压控制方法设计流程

3.4 充填体与地下水环境互相影响

(1) 散体充填物料中重金属元素溶解—释放规律

采用实验室静态浸泡试验的方法,研究了散体充填物料中重金属元素的溶解释放规律(图 13);揭示了散体充填物料中重金属元素溶出与浸泡时间的关联,确定了重金属随着浸泡时间的变化曲线形式;优化得到了散体充填物料中重金属元素的溶出数学模型^[28, 35]。

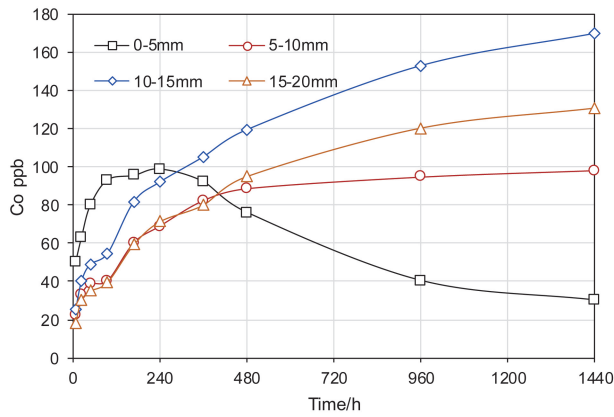
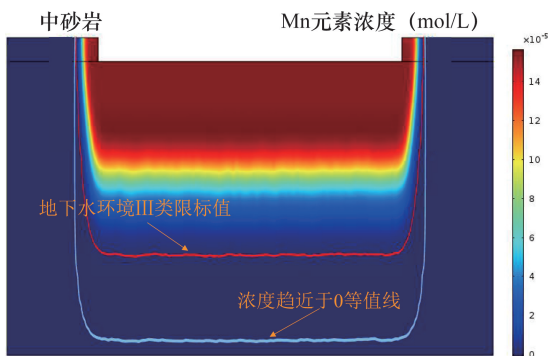


图 13 重金属析出浓度随时间变化曲线

(2) 充填体重金属释放—迁移规律

采用 COMSOL 数值模拟方法,建立了应力场—渗流场—浓度场耦合二维模型,模拟得到了迁移时间、应力水平、底板岩性与元素类型 4 种影响因素对重金属浓度分布的影响(图 14),分析得到了充填体重金属释放—迁移的特征,揭示了在充填体及采空区底板范围内重金属迁移的浓度空间分布;评估了长期累积作用下重金属的富集与归宿对地下水环



境的影响,结合矸石充填量与渗入矿井水量,计算得到了重金属元素的污染范围,预测了其对于地下水环境产生潜在污染的风险性^[28]。

(3) 充填体重金属环境效应调控方法

提出了材料预处理、梯度调控、重金属消减和防渗阻隔 4 项技术,给出了重金属潜在污染调控的设计流程(图 15)。

4 结 语

深部煤炭资源开发已成必然,由于面临的开采环境极其复杂,给深部充填开采岩层控制带来了诸多挑战,一方面要适应深部多场耦合环境条件,另一方面还要满足岩层精准控制的需求,因此,建立一套系统性的深部充填开采岩层控制理论十分必要。在国家杰出青年科学基金项目支持下,在把握深部充填开采岩层控制难点与关键点基础上,凝练出了 3 个关键科学问题,提出了深部充填开采岩层控制总体研究思路,在充填物料本构关系模型、深部充填采场矿压及其控制方法、深部充填体与围岩交互作用机理、充填物料与地下水环境互相影响 4 个方面取得了重要研究进展,初步构建完成了深部充填开采岩层控制理论体系。然而,深部充填开采研究领域极具挑战性,特别是深部煤炭资源开采越来越严峻的灾害控制问题,涉及学科多、技术难度大,需综合采用大数据、人工智能等多种现代化技术手段。下一步,需瞄准深部开采灾变的本质科学问题,从能量角度出发,持续开展充填开采对深部采动应力场的调控作用研究,开发深部充填开采岩层精准控制方法。

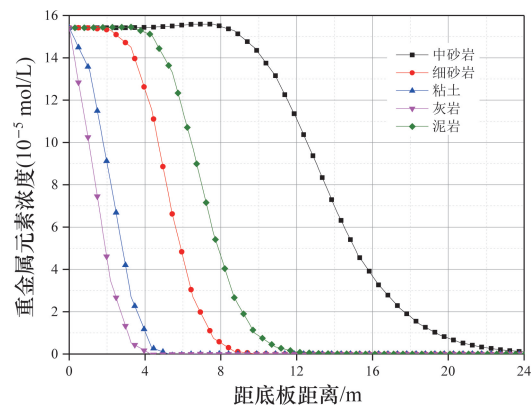


图 14 重金属元素在底板中浓度分布规律

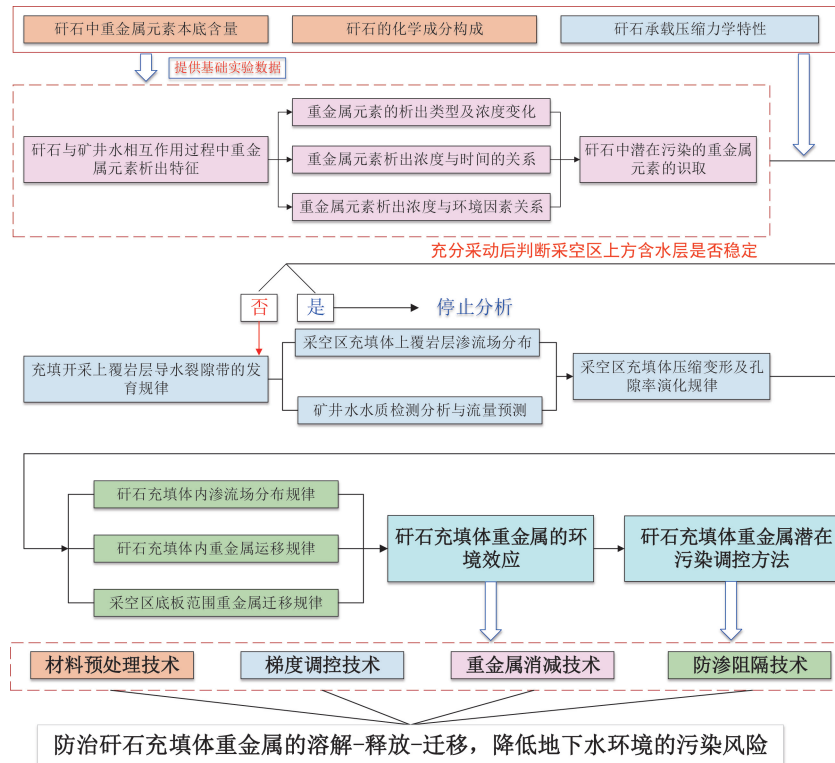


图 15 重金属潜在污染调控设计流程

参 考 文 献

- [1] 谢和平, 张茹, 张泽天, 等. 深地科学与深地工程技术探索与思考. 煤炭学报, 2023, 48(11): 3959—3978.
- [2] Xie HP, Ju Y, Gao F, et al. Groundbreaking theoretical and technical conceptualization of fluidized mining of deep underground solid mineral resources. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 67: 68—70.
- [3] 吴爱祥, 王洪江, 尹升华, 等. 深层金属矿原位流态化开采构想. 矿业科学学报, 2021, 6(3): 255—260.
- [4] 刘志强, 宋朝阳, 纪洪广, 等. 深部矿产资源开采矿井建设模式及其关键技术. 煤炭学报, 2021, 46(3): 826—845.
- [5] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 1—16.
- [6] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究及探索. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161—2178.
- [7] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803—2813.
- [8] 张朝鹏, 高明忠, 张泽天, 等. 不同瓦斯压力原煤全应力应变过程中渗透特性研究. 煤炭学报, 2015, 40(4): 836—842.
- [9] 谢和平, 周宏伟, 刘建锋, 等. 不同开采条件下采动力学行为研究. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1067—1074.
- [10] 蓝航, 陈东科, 毛德兵. 我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 39—46.
- [11] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深部开采的定量界定与分析. 煤炭学报, 2015, 40(1): 1—10.
- [12] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283—1305.
- [13] 袁亮. 破解深部煤炭开采重大科技难题的思考与建议. 科技导报, 2016, 34(2): 1.
- [14] 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考. 煤炭学报, 2012, 37(4): 535—542.
- [15] 谭云亮, 郭伟耀, 辛恒奇, 等. 煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究. 煤炭学报, 2019, 44(1): 160—172.
- [16] 谢和平, 张吉雄, 高峰, 等. 煤矿负碳高效充填开采理论与技术构想. 煤炭学报, 2024, 49(1): 36—46.
- [17] 张吉雄, 巨峰, 李猛, 等. 煤矿矸石井下分选协同原位充填开采方法. 煤炭学报, 2020, 45(1): 131—140.
- [18] Zhang JX, Li BY, Zhou N, et al. Application of solid backfilling to reduce hard-roof caving and longwall coal face burst potential. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 88: 197—205.
- [19] Li M, Zhang JX, Li AL, et al. Reutilisation of coal gangue and fly ash as underground backfill materials for surface subsidence control. Journal of Cleaner Production, 2020, 254: 120113.
- [20] 张吉雄, 周楠, 高峰, 等. 煤矿开采后空间矸石注浆充填方法. 煤炭学报, 2023, 48(1): 150—162.
- [21] 张强, 张吉雄, 王佳奇, 等. 充填开采临界充实率理论与工程实践. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3081—3088.
- [22] 李猛, 张吉雄, 黄鹏, 等. 深部矸石充填采场顶板下沉控制因素及影响规律研究. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(2): 227—238.
- [23] Li M, Meng GH, Zhang JX, et al. Sensitivity analysis of key factors influencing compression-induced deformation of waste rocks for backfilling to reduce environmental pollution. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(14): 16707—16717.
- [24] Meng GH, Zhang JX, Li M, et al. Prediction of compression and deformation behaviours of gangue backfill materials under multi-factor coupling effects for strata control and pollution reduction. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(29): 36528—36540.

- [25] Li M, Zhang JX, Meng GH, et al. Testing and modelling creep compression of waste rocks for backfill with different lithologies. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 125: 104170.
- [26] Qi WY, Zhang JX, Zhang Q. Compression of aggregates of acid-leached coal gangues: implications for coal mine backfill. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018(1): 1—13.
- [27] 张吉雄, 张强, 周楠, 等. 煤基固废充填开采技术研究进展与展望. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4167—4181.
- [28] 齐文跃. 煤矿井下矸石充填体环境效应试验研究. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [29] Li M, Peng YF, Zhang JX, et al. Effects of compressive deformation of backfill materials on strata movement and stress evolution in deep gangue backfill mining. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(9): 361.
- [30] 曹鑫. 唐口煤矿深部充填开采地表变形规律研究. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [31] 张强, 杨康, 张昊, 等. 固体充填开采矿压显现弱化规律及表征研究. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(3): 479—488.
- [32] 李猛, 张卫清, 李艾玲, 等. 矸石充填材料承载压缩变形时效性试验研究. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(1): 147—154.
- [33] 黄鹏, 张兴军, 郭宇鸣, 等. 充填体协同支架控顶效应研究. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(1): 128—135.
- [34] 张强, 武中亚, 杜二宝, 等. 充填采煤液压支架工作阻力设计方法研究. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(1): 118—127.
- [35] Liu HF, Zhang JX, Li BY, et al. Long term leaching behavior of arsenic from cemented paste backfill made of construction and demolition waste: experimental and numerical simulation studies. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 416: 125813.

Research Progress of Strata Control Theory and Method in Deep Backfilling Mining

Jixiong Zhang^{1, 2} Feng Jv² Meng Li^{3*} Dan Ma¹ Qiang Zhang¹ Nan Zhou¹

1. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining of Ministry of Education, School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116

2. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116

3. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116

Abstract Deep coal mining in China developed rapidly in recent years because of abundant deep-lying coal resources in this country, and, at the same time, the problems of deep geological disaster and disposal of solid waste like gangue get worse. Solid backfilling mining is an efficient method for problems including disaster prevention & control, subsidence control and solid waste disposal, and thus widely used in engineering field like green mining, strata and mining pressure control. However, unlike shallow coal mining, overlying strata control in solid backfilling mining become more complex under the influence of geological environments with three “high” and one “disturbance”. Therefore, building theoretical and method system for overlying strata control in deep solid backfilling mining is of important to safety and efficient deep-lying coal resources mining. Based on systematic analyzing difficulties confronted by overlying strata control in deep solid backfilling mining, this paper proposes the key scientific problems, research purpose and overall approach of deep solid backfilling mining. Four important research progress, including interaction mechanism between backfilling body and surrounding rock under multi-field coupling, theoretical model of deep solid backfilling mining pressure under the environment of strong distribution, strata control method for deep solid backfilling mining and interaction effect between solid backfilling body and underground water, are also summarized.

Keywords deep backfilling; strata movement; backfilling materials; constitutive relation; mine pressure control

(责任编辑 陈鹤 张强)

* Corresponding Author, Email: limeng1989@cumt.edu.cn