

矿山地质层改性的理论架构、关键技术与工程应用

王 佟¹, 韩效忠², 吴兆剑³, 赵 欣⁴, 曹安业⁵, 张 彪⁶, 程 彦¹, 李聪聪^{7,8},
孙鹏杰⁶, 王伟超⁹, 宁建鸿²

(1. 中国煤炭地质总局, 北京 100038; 2. 中煤地质集团有限公司, 北京 100040; 3. 中广核铀业发展有限公司, 北京 100048; 4. 中国煤炭地质总局勘查研究总院, 北京 100039; 5. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 6. 北京大地高科地质勘查有限公司, 北京 100040; 7. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 8. 中国煤炭地质总局航空遥感局, 陕西 西安 710199; 9. 中国煤炭地质总局青海煤炭地质局, 青海 西宁 810001)

摘 要:新时代煤炭工业高质量发展对煤炭地质勘查工作提出了新要求,以资源勘查为主的传统地质勘查理论与技术方法需进一步优化、创新与发展,以适应矿山绿色勘查、高效安全智能化开采及生态环境友好绿色开发的新需求。研究指出,矿山开发过程中的资源、安全和生态问题归根结底是地质问题,与岩层等地质层(体)的地质属性密切相关,通过人工措施实现地质属性的定向改造已成为地质勘查工作的又一新内容,可有效提升矿山地质保障能力。据此,从地质条件变化研究入手,提出矿山地质层改性的概念,从理论架构、研究内容、工程技术应用和发展方向等方面尝试建立矿山地质层改性理论和技术体系。地质层改性的科学内涵是在不改变地壳浅层空间系统稳定性的前提下实现区域局部或部分岩层地质属性的正向改良,科学问题是先天条件和采动影响下地质层(体)地质属性的制约机制,核心技术是基于地质属性差异的矿山地质层(体)的精细识别和精准改良技术,技术目标是实现地质层(体)由不利于开发的负向属性向符合预设条件的正向属性转化,以改良制约资源综合利用的不良资源地质属性,弱化采动引发的冲击地压、水害、瓦斯突出等有害安全地质属性,消减地表沉降、地形地貌破坏、水系断流、矿井水污染等失衡生态地质属性,为矿山资源综合利用、煤炭安全开发以及生态环境友好提供地质保障。矿山地质层改性理论将地壳浅层空间地质层(体)系统的观念贯穿整个改性过程,突出场效应和多场叠加制约下的地质属性及演变规律的重要性,强调基于自然优良属性的仿生改良和近似恢复重构等改性技术的系统性,从源头保障地壳浅层空间系统的整体稳定性,一体化推进资源、安全和生态地质属性的系统改性,为矿山绿色安全高效生产地质保障提供全新的理论和技术支撑。

关键词:地质层改性;资源地质层;安全地质层;生态地质层;多场叠加效应;地质保障

中图分类号:P536;P611 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2025)01-0491-15

Theoretical framework, key technologies and engineering applications of geological layer modification in mining

WANG Tong¹, HAN Xiaozhong², WU Zhaojian³, ZHAO Xin⁴, CAO Anye⁵, ZHANG Biao⁶, CHENG Yan¹,
LI Congcong^{7,8}, SUN Pengjie⁶, WANG Weichao⁹, NING Jianhong²

(1. China Administration of Coal Geology, Beijing 100038, China; 2. China Coal Geology Group Corporation, Beijing 100040, China; 3. CGNPC Uranium

收稿日期: 2024-10-25 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1307

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2024ZD1002000), 国家重点研发计划资助项目(2023YFC2906701)

作者简介: 王 佟(1959—)男,甘肃会宁人,教授级高级工程师,博士生导师,博士。E-mail: wangtong517@126.com

引用格式: 王佟,韩效忠,吴兆剑,等. 矿山地质层改性的理论架构、关键技术与工程应用[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 491-505.

WANG Tong, HAN Xiaozhong, WU Zhaojian, et al. Theoretical framework, key technologies and engineering applications of geological layer modification in mining[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 491-505.



移动阅读

um Resources Co., Ltd., Beijing 100048, China; 4. Exploration and Research Institute, CNACG, Beijing 100039, China; 5. School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 6. Beijing Dadigaoke Geological Exploration Co., Ltd., Beijing 100040, China; 7. School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 8. China Coal Aerial Photogrammetry and Remote Sensing Group Co., Ltd., Xi'an 710199, China; 9. Qinghai Coal geological exploration Institute Bureau, Xining 810001, China)

Abstract: The modern coal industry has put additional demands on geological support work in its quest for superior development. Conventional geological exploration theories and technical approaches, which are mainly concerned with resource survey, need to be further improved in order to meet the new demands of efficient, safe, and intelligent mining, environmentally friendly and green development, and comprehensive mine resource utilization. According to this study, the resource, safety, and ecological problems that arise during the development of mines are essentially geological in nature and are closely related to the geological characteristics of geological bodies, or strata, like rock formations. The directed modification of geological properties through artificial measures has emerged as a new aspect of geological exploration work, effectively enhancing the geological support capability of mines. Starting from an investigation into the variations in geological conditions, this paper introduces the concept of mine geological modification. It establishes a theoretical and technical framework for mine geological modification in terms of its theoretical structure, research content, engineering and technological applications, and development directions. The scientific essence of geological modification lies in achieving positive improvement of local areas or partial rock stratum geological properties without compromising the stability of the shallow Earth system. The scientific inquiry revolves around the constraining mechanisms governing the geological properties of geological bodies under the influence of both original geological conditions and mining activities. The core technology revolves around precise identification and targeted modification of mine geological bodies based on differences in their geological properties. The technical objective is to transform geological bodies from negative properties that hinder development into positive properties that meet preset conditions. This involves improving adverse resource geological properties that hinder comprehensive resource utilisation, mitigating safety-related geological hazards such as rock bursts, water disasters, and gas outbursts induced by mining activities, and reducing ecological imbalances such as surface subsidence, landform destruction, watercourse drying up, and groundwater contamination in mines. This provides geological support for the comprehensive utilisation of mine resources, safe coal development, and environmental friendliness. The theory of mine geological modification integrates the concept of shallow Earth system geological bodies throughout the modification process, highlighting the significance of geological properties and their evolution patterns under the influence of field effects and multi-field superposition. It emphasises the systematic application of modification techniques such as bionic improvement and approximate restoration and reconstruction based on natural superior properties. This theory ensures the overall stability of the shallow Earth system from its source, systematically advancing the modification of resource, safety, and ecological geological properties in an integrated manner. It offers novel theoretical and technical support for geological safeguarding of green, safe, and efficient mine production.

Key words: Geological Layer Modification; Resource Geological Layer; Safety Geological Layer; Ecological Geological Layer; Multi field superposition effect; Geological guarantee

0 引 言

随着煤炭工业的技术创新和转型升级,现有的资源勘查精度和对地质条件的认知程度已难以满足日益大规模增长的煤矿开采强度和开采规模需求;以往基于地下静态地质条件变化研究评价的地质勘查工作已无法有效解决高强度开采导致的水害、瓦斯、火灾、顶板、冲击地压等隐蔽灾害,以及土地破坏、水土流失、生物多样性破坏、地面沉降、固废污染、土壤质量降低等生态环境问题。受煤炭工业高质量发展内

在需求的驱动,煤炭地质勘查工作被赋予了新的内涵^[1],煤矿开采地质保障技术得到迅速发展。

在煤炭资源综合利用方面,围绕煤基固废处理、瓦斯抽采、矿井水综合利用及煤系共生矿产勘查开发等方向^[2],开展了煤矸石绿色充填、注浆改性等资源综合利用^[3-4]、煤层压裂增透^[5-6]、超高压水力割缝^[7-8]、高矿化度矿井水处理^[9-10]等一系列研究。在煤矿安全开采方面,聚焦矿山压力与岩层控制^[11-12]、煤矿开采地质保障^[13]、水质评价与水害防治^[14-15]、矿井瓦斯防治与动态评价^[16-17]等方向,形成了冲击地压机

理与控制^[18]、顶底板水害防治^[19-20]、煤层防突模式^[21-22]等地质保障技术。在煤炭绿色开发方面,立足生态脆弱区保水采煤^[23]、矿井灾害精细预测^[24-25]、生态减损和修复^[26]、煤炭清洁利用等方向,创建了煤炭绿色开发地质保障理论和技术^[27];在矿山生态修复方面,研究形成地形地貌修复、地表水系重塑、土壤层重构以及“空天地时”一体化监测技术,提出了生态地质层理论^[28-29]。

上述相关研究有力推进了煤炭工业可持续发展,但面对我国能源产业绿色低碳转型新需求,煤炭地质工作应进一步加强如下研究:①加强地壳浅层空间系统观的应用,充分认识矿山开采地质条件变化的复杂性和复合性,力求解决旧问题的同时,不产生新的问题;②加强系统全面的煤炭地质勘查理论框架构建,深刻理解矿山资源综合利用、安全开采、生态破坏等问题的本质是矿山地质层(体)优良地质属性先天不足或后天被破坏;③加强矿山地质属性及制约其变化的物质场、应力场、流体场等多场叠加耦合机制的研究,精准刻画和改造影响资源精准开采和生态环境变化的矿山地质层(体)。

为此,笔者系统分析总结前人研究成果,着眼地壳浅层空间系统,提出矿山地质层(体)改性的概念和科学内涵,建立矿山地质层(体)理论和地质改性技术体系,划分出资源、安全、生态3种类型矿山地质层(体),论述地质层改性技术及其在资源综合利用、矿山安全开采、生态绿色矿山建设等方面的工程应用和改性措施,为矿山开发地质保障工作提供新的思路和方法。

1 地质层改性理论

1.1 概念与科学内涵

地质层改性是以地壳浅层空间系统理论为指导,精准识别制约矿山开采活动的特征地质层(体),精确查明场效应和多场叠加机制对矿山地质层(体)地质属性的制约机理,精细刻画矿山地质层(体)不良地质属性及其动态变化规律,通过仿生改良或近似恢复重构的工程技术手段优化改造矿山地质层(体),实现矿山资源综合利用、煤炭安全开发和生态环境友好的一项新的综合性矿山地质保障工作。

地质层改性的实质,是对岩层、矿层或岩石及条件的改性,针对矿山某一区域煤层及其底板、顶板、断层破碎带、塌陷区等问题,通过地面或井下施工钻孔进行压裂或注浆等工程措施,实现岩石物性的改变,解决矿井涌水突水、瓦斯突出、冲击地压、采空区塌陷等影响矿山安全生产的问题^[1]。其科学内涵是指在

矿山勘查开采地质保障过程中,坚持地壳浅层空间的系统观,在改良矿山地质属性的同时,保障矿山地质系统协同稳定。在实施工程中,需查明矿山地质层(体)在场效应或多场叠加制约下的地质属性及其动态变化,界定和判别地壳浅部系统中对初始条件改变起主导控制作用的特征地质层(体),通过仿生改良或近似恢复重构,实现特征地质层(体)内采动失稳要素的分解、原生不良因素的弱化和生态地质功能的重建,以确保解决现有问题且不产生或较少产生新的问题。

1.2 目标对象

王佟等^[2]在煤炭生态地质勘查基本架构中提出了4类研究对象,包括①煤系矿产资源,②与煤炭开采紧密相关的水资源等自然资源,③与煤炭安全开发密切相关的關鍵层位,④显著影响矿山生态环境的地理要素和地质信息等。该团队在青海木里矿区生态修复治理中,将第四类研究对象进一步提炼为生态地质层,指出矿山勘查开采对生态环境破坏的实质是对生态地质层的破坏,并运用生态地质层理论成功解决了高寒高海拔地区因煤炭开采导致的土壤层和冻土层缺失^[30]、地形地貌破坏^[31]、水系断流^[32]等一系列生态环境问题。

基于上述前期研究认识,笔者进一步提出矿山地质层(体)改性理论,依据地质功能和改性目标,将煤炭生态地质勘查中的4类研究对象进一步凝练为资源地质层(体)、安全地质层(体)和生态地质层(体)3类,指出矿山开采中各类地质问题的实质是这三类地质层(体)原始平衡状态被破坏。其中,资源地质层(体)是资源勘查与开发问题研究的核心,安全地质层(体)、生态地质层(体)的研究是其保障,三者之间存在紧密的内在联系(图1)。例如,鄂尔多斯盆地北部白垩系砂岩组广泛发育,当煤矿开采向深部延伸时,开采范围的扩大导致上部白垩系巨厚砂岩组破断,频繁诱发高能级矿震活动,常引起地表明显震感,并易诱发井下冲击地压灾害。同时,砂岩组破断引起地表水位下降致使植被干枯。白垩系砂岩组即是保障蒙陕矿区煤炭资源安全生产的安全地质层,又是维持矿区生态环境的生态地质层。因此,三类地质层(体)是认识和解决矿山地质灾害和生态环境破坏等问题的有效单元,也是提升多资源综合开发的关键所在。

1) 资源地质层(体)。资源地质层(体)是指地壳浅部系统中能被开采利用、具有资源属性的地层或地层组合。矿山开采的实质是对资源地质层(体)的开发,就煤系矿产来讲主要包含对各类煤层,煤系气储层,煤系中金属或非金属矿层,含水层以及深部热储层等。资源高效利用的关键是系统改造资源地质层

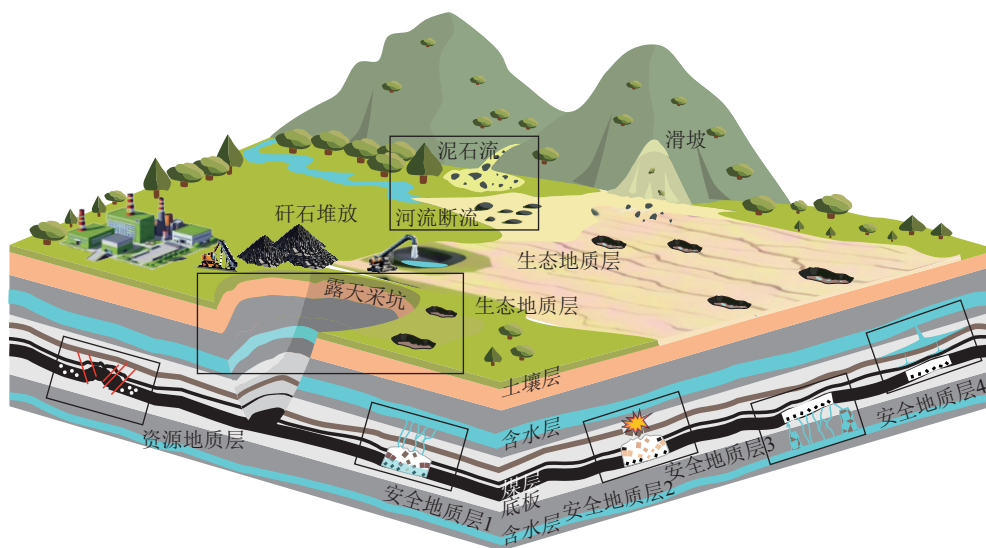


图1 矿田地壳浅部资源、安全、生态三类地质层(体)及其空间结构关系

Fig.1 Diagram of Spatial Structural Relationships Among Resource Geological Bodies, Safety Geological Bodies, and Ecological Geological Bodies (Layers) in the Shallow Crust of Mines

(体)的地质属性,最大限度开采有益资源,减少资源遗漏。

2) 安全地质层(体)。安全地质层(体)是指地壳浅部系统中对采动引发的矿山灾害具有控制属性的地层或地层组合层段。煤矿开采产生矿山地质灾害的实质是对安全地质层(体)的破坏,如采动条件下煤层坚硬难垮顶板的突然坍塌、高压煤层和瓦斯的突出、导水裂隙带持续发育连通含水层等。矿山灾害防治的关键是通过有针对性的地质改性正向提升安全地质层属性,构建和修复安全地质层(体)。

3) 生态地质层(体)。生态地质层(体)是指对区域生态环境具有控制属性作用的地层或地层组合层段。矿山勘查开采对生态环境破坏的实质是对生态地质层(体)的破坏,它包括露天开采导致的地形地貌破坏、土壤层破坏,井工开采导致的地面沉降和地裂缝、生态水位的破坏和地下水越层污染等。矿山生态修复治理的关键是采用人工干预和仿生、相似材料模拟的方式,构建和修复与原始地层相似属性的类岩性生态地质层(体)。

1.3 多场叠加效应对地质属性约束机制

地壳浅部系统是指人类勘查和采矿能达到和影响的一定空间范围内的地质层(体),由固、液、气三态物质的有序集合组成。地壳浅部系统包括各类固态和流态矿床及其围岩等构成的资源地质层(体)和安全地质层(体),以及土壤、植被、水体、大气等构成的生态地质层(体)。各要素层之间彼此关联、互为补充、层次清晰、又相互渗透的动态稳定复杂系统。地壳浅部系统观是地质改性的精髓,它贯穿于整个改性过

程。

地壳浅部系统中的任一地质体,在受某个具体场作用时,物质状态发生规律性的物理、化学性质改变,最后达到动态平衡的过程,称为场效应。地壳浅部系统往往叠加发育多重场效应,主要包括煤岩体和地层自身物质属性的物质场、能有效改变煤岩体和围岩结构构造的应力场、能制约煤层气和水等流体赋存运移规律的流体场、能驱动地层间化学成分改变的化学场以及制约矿山生态环境的生态场等。系统内部某一质点的物理、化学及生态属性往往是多场叠加平衡的产物,开采扰动导致平衡破坏,该质点会受到多个场的共同制约(图2a—图2g)。

矿山地质层(体)在矿山生产活动中,受应力场、流体场、化学场、生态场等多场效应叠加控制,能够制约矿山资源开采利用效率的特征地质层(体),或对外部扰动(如露天开采或井工开采等)做出特征反应。如煤层瓦斯渗流受流体场和应力场的共同制约,当开采形成采空区时,应力场导致不同区域裂隙发育程度的差异和瓦斯解吸条件的差异,流体场则导致浓度梯度的差异,两者共同制约采空区瓦斯的浓度和发生爆炸的可能性。因此,场效应及多场叠合机制是矿田地壳浅部系统研究的关键科学问题,为矿山开采活动和地质层改性提供重要理论依据。

2 矿山地质层(体)改性技术架构

地质层改性的理论由多场叠加效应、矿山地质层(体)理论、地质层改性技术体系3部分组成。针对矿山地质勘查、开采阶段扰动后产生的资源开采与采

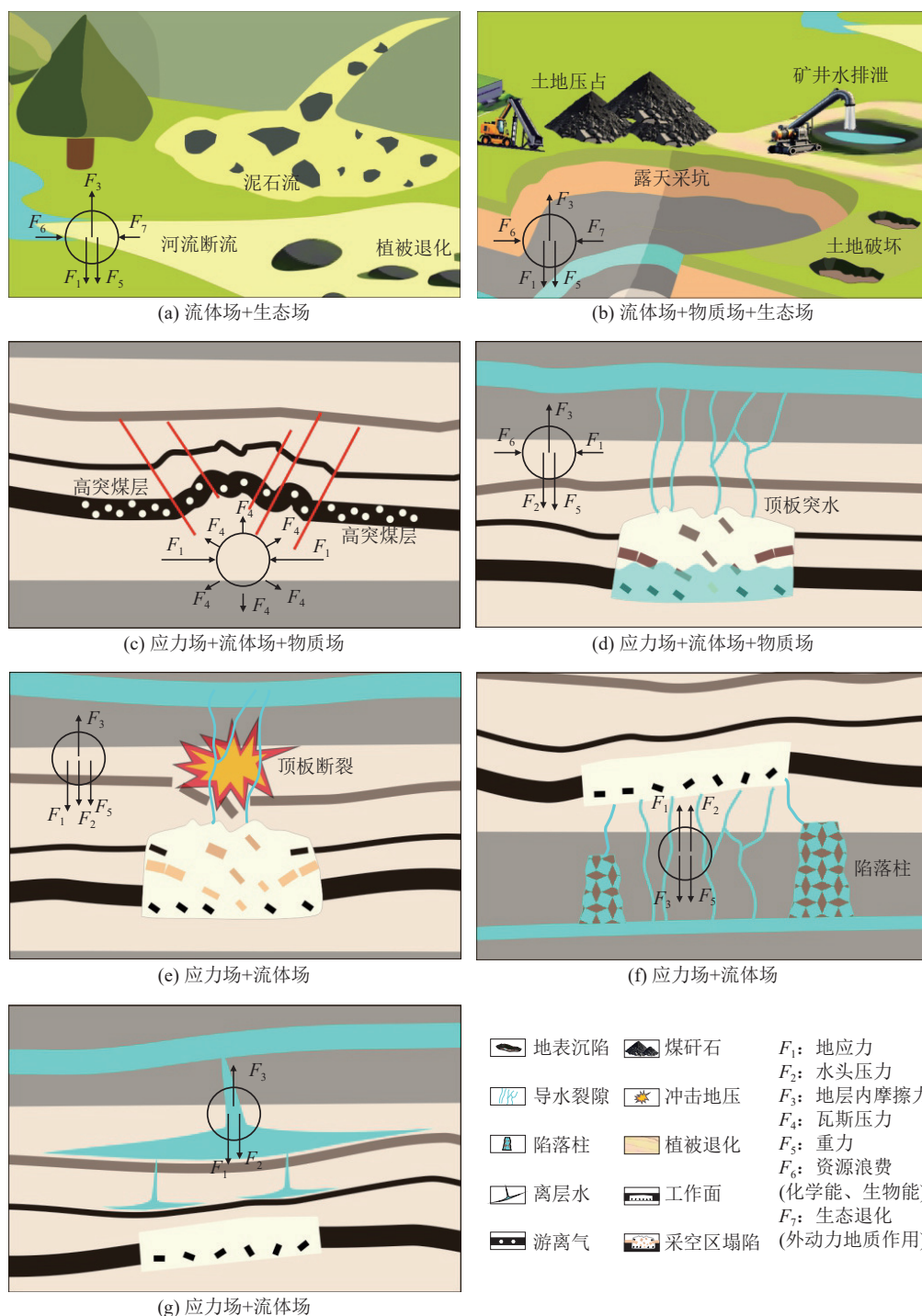


图 2 矿山典型多场叠加效应示意

Fig.2 Typical Multi-field Superposition Effect in the Mine

出、地层物性参数的改变、生态环境破坏等一系列问题,以最大程度地减小勘查开采活动对原始地质条件和生态环境的扰动和影响为科学目的,通过地下多场叠加耦合分析、“五位一体”矿山地质层(体)识别、矿山地质层改性技术 3 个重要环节的实施,实现对制约开采活动的矿山地质层(体)不良地质属性的正向改性,形成新的地壳浅部地质系统,以有效保障矿山资源综合利用、煤炭安全开发和生态环境友好(图 3)。

2.1 矿山地质层(体)识别技术

矿山地质层(体)是地壳浅部系统开展地质改性的基本单元,其具体层位的三维空间定位和发育特征的精细识别是开展地质层改性的基础。前人在矿井致灾因素及致灾地质体属性探查方面开展了大量探索性试验,为矿山地质层(体)识别提供了依据。

本文基于不同矿山地质层(体)地质属性或场效应的差异,提出构建“地质研究+物探+钻探+模拟+监

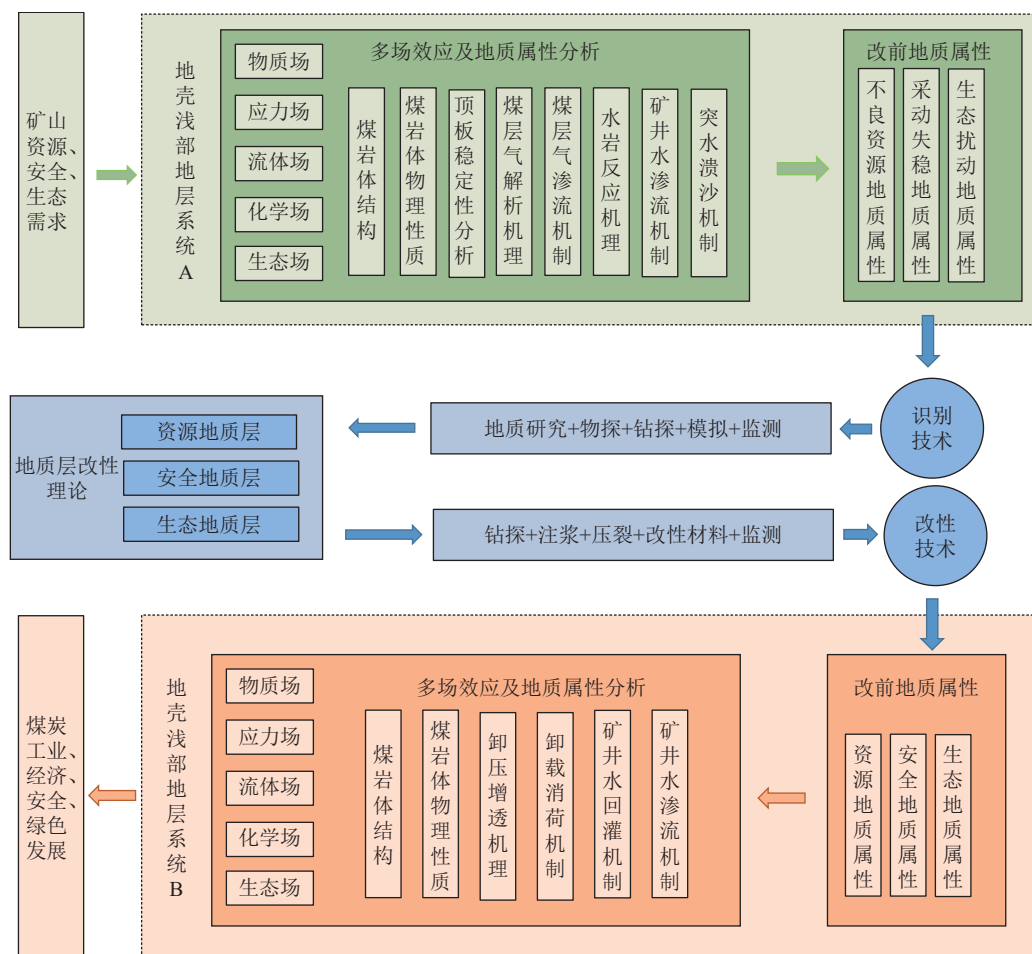


图3 地质条件改性理论架构

Fig.3 Theoretical Framework of Geological Modification

测”五位一体的识别技术,其中地质研究用于地质条件的调查评价、判定识别改性的对象等;物探、钻探、监测和模拟是主要的识别手段;物探和钻探也是用于识别结果的主要查证手段(图4)。具体步骤如下:

1) 基于矿山开采中亟需解决的地质问题,判断待识别地质层(体)的类别,查明其资源、安全或生态的改性需求。

2) 针对待识别地层的改性需求及地质属性的特征差异,选择物探、监测及模拟等识别方法或方法组合。其中,对老空区、离层区、采动导水裂隙带的富水属性,可采用高密度电法、可控源音频大地电磁法、瞬变电磁法、地探雷达、槽波地震等方法进行探测^[33-34];对离层、陷落柱等可采用密集台阵噪声成像、三维地震^[35]、电波透视^[36]、低频地质雷达^[37]等方法进行探测;对地表沉降或地形地貌破坏可采用“空天地时”一体化地表变形监测^[38];对井下瓦斯爆炸、矿震等灾害等选择瓦斯浓度监测^[39]、应力监测^[40]、微震监测^[41]等长期监测手段;而浅层地壳稳定性、地应力场^[42]、冲击地压^[43]、地下水活动^[44]等则充分应用计算机模拟技术查明应力、水力的发展演化过程。

3) 基于物探、监测和模拟的识别结果,通过钻探等工程查证,进一步评价施工质量、调整识别技术方法或方法组合。

2.2 矿山地质层(体)改性技术

大多数矿山灾害防治和生态修复技术都属于地质层改性技术的研究范畴。本文基于地壳浅部系统论的观点,针对矿山开发中的资源、安全、生态修复三类地质层(体)的负向地质问题,提出模拟和改良、仿生修复的地质层改性思路,通过模拟和仿照高产资源储层、低灾害风险矿井与野外地质剖面的地质属性,改变矿山地质层(体)的物理属性、化学属性和生态属性(图4),实现正向改性。例如,构造煤的瓦斯抽采,对照高产煤层气井的地质属性,对构造煤泄压增透,改良其渗透率和裂隙孔隙度;冲击地压的治理,研究岩层或岩石稳定矿井所需的地应力场特征,结合地层结构等地质属性,对潜在冲击地压的地层进行弱化处理;顶底板水害的防治,对照有效隔水层的地质属性,对导水裂隙进行改性。

改性技术的实现,离不开定向钻进、注浆、压裂或割缝等技术以及改性装备、改性材料等。其中,定向

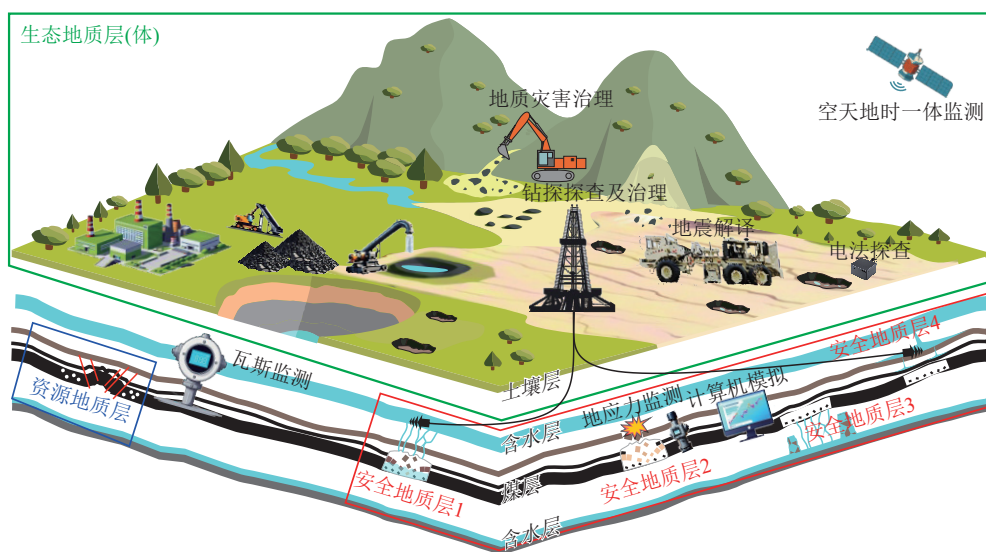


图4 矿山地质层(体)改性技术

Fig.4 Mining geological layer modification technology

钻井技术是从地面对地下地质层改性的基础,注浆技术是减小地质层(体)孔隙度、渗透率的有效方法,压裂或割缝技术等则是破坏岩体结构、增大孔隙度和渗透率的常用手段,改性材料,如化学、煤基固废、土壤重构等材料是改变地质层(体)结构和属性必要的物质基础。

3 矿山地质层改性关键技术工程应用

在实际工程应用时,由于目标和作用不同,地质层改性技术通常针对资源地质层(体)、安全地质层(体)和生态地质层(体)中的某一个层进行具体地质改性,在一些特殊情况 and 时段时,矿山地质层之间存在相互作用和属性功能的转化。下面结合我国煤矿勘查和开采实际情况,介绍矿山地质层(体)属性识别和工程场景应用。

3.1 碎软煤层资源地质层(体)地质改性

构造碎软煤层常呈煤体碎软、瓦斯含量高、渗透率低、压力大等特点,一般具有较大突出危险。该类煤层顺层钻进难度大,瓦斯抽采效率低,一方面导致构造碎软煤层开采难度大,另一方面造成瓦斯逸出等资源浪费和大气污染。前人针对松软煤层,孔隙裂隙不发育等地质属性,探索采用原始煤层强化抽采、掘进巷道边抽边采、深孔控制预裂爆破增透等瓦斯抽采技术。近年来,采用地面水平井煤层顶板分段压裂区域超前治理技术,在淮南潘集、淮北芦岭等地成功实现煤层气高效抽采,释放了高突煤层的地应力。现以淮南潘集某矿为例,介绍碎软低渗煤层地质改性工程实践。

3.1.1 多场效应叠加下的资源地质属性

淮南煤田为近东西向展布的对冲构造盆地,在煤

田南北缘发育逆冲推覆构造,中间发育复式向斜构造。逆冲推覆构造对煤层影响巨大,造成矿井地质条件复杂,不利于煤炭开采。另外,这种复杂的构造,不仅显著改变了煤层的产状和厚度,而且强烈破坏了煤体结构,导致煤层松软,煤层流变成碎粒或碎粉状,煤层渗透率显著降低,不利煤层瓦斯解吸。采动条件下瓦斯突出风险加大。因此,煤炭及瓦斯资源的安全高效采出是该矿山开采面临的主要地质问题,而与该问题紧密相关的地质层(体)为由高突碎软煤层及赋存其中瓦斯组成的、具有资源属性的系统整体。

3.1.2 矿山资源地质层(体)的识别

淮南潘集某矿主采煤层B₈煤层含气量为8~14 m³/t,具备良好的资源属性。但是,部分工作面进入深部开采,瓦斯压力增大,部分地段应力异常集中,瓦斯压力达2~4 MPa,瓦斯突出风险影响了煤层的开采。

以地壳浅部的系统观为指导,综合研究潘集矿区煤层气地质和成藏条件,认为复杂的构造活动是引起矿山资源地质属性改变与破坏的主控因素。根据地质层改性理论,通过地震属性反演等技术精准解释出煤系地层的构造发育程度、形态和样式、弹性模量等岩石力学特征分区;通过力学模拟系统研究煤层和瓦斯的受力状态,查明应力强烈集中的构造地段;通过钻井取样开展物理性质、力学性质测试等分析;模拟计算地质改性参数,确定制约资源采出、应开展改性的地质层(体)和改性参数。

3.1.3 矿山资源地质层(体)的地质改性

综合考虑地层应力、煤层构造形态和瓦斯赋存特点,识别出制约该区瓦斯抽采的主要因素在于部分地段煤层压力大,煤体对瓦斯吸附力强。据此,对于断

裂构造错动强烈、煤层上部松软破碎的情况,利用地面分支水平井正常顺层钻进,采用空气动力掏煤造穴卸压,吸出煤粉,诱导垮塌,有效释放煤层压力,增大瓦斯解吸能力(图 5a);对厚度较薄(主采煤层厚均

4 m)、顶底板较为坚硬且连续发育的煤层,采取水平井顶板分段压裂,形成向下贯穿整个煤层的压裂缝,有效增大煤层的渗透率,释放煤层压力,诱导瓦斯的大量解吸(图 5b)。

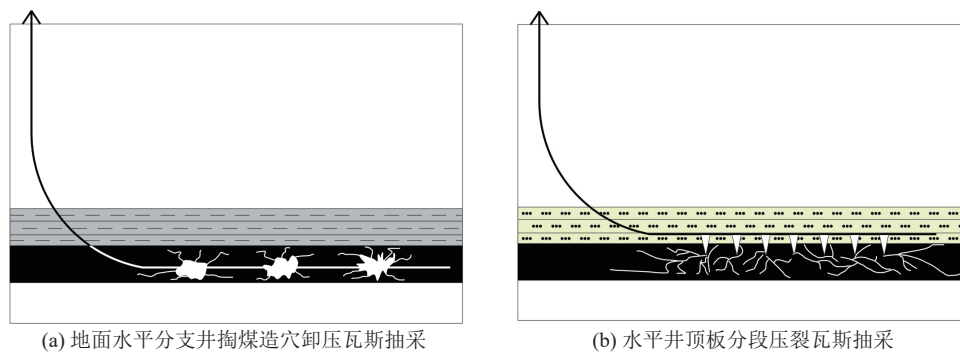


图 5 构造碎软煤层的地质改性

Fig.5 Geological Modification of Structurally Fractured and Soft Coal Seams

中国煤炭地质总局特种技术勘探中心应用上述技术在淮南潘集某矿煤层地质改性实践中,改性后大幅提升碎软煤层孔隙度和渗透率,4口井平均日产气量 4 000 m³,最高单井日产气量超过 10 000 m³,不仅实现了瓦斯的综合利用,而且有效释放了高突倾向煤炭资源。

3.2 煤层上部厚层砂岩安全地质层(体)地质改性

近年来,我国中西部煤炭开采逐渐由浅部向深部转移。由于煤岩体物理性质、应力场及流体场的显著变化,深部矿井地质灾害的致灾机理、触发机制和演变规律等均明显异于浅部的特征,灾害类型由单一灾害转变为冲击地压、顶底板水害等相结合的复合型灾害。针对强矿压,常采用水力压裂、钻孔爆破等顶板预裂弱化技术防治,但顶板弱化会加大顶板水害危险性;而针对顶板水害的威胁,常采用的帷幕截流、疏水降压、注浆治理等路径,但又无法降低冲击地压的危险。为有效解决矿山深部开展复合灾害问题,以陕西彬长矿区某矿为例,运用地质层改性理论,剖析应力场和流体场对研究区的综合效应,开展如下工程实践。

3.2.1 多场效应叠加下的安全地质属性

该矿主采延安组 4 煤层,平均煤厚 9.43 m,赋存介于 800~1 000 m。矿井地质条件复杂,矿井范围内煤层顶板洛河组承压含水层厚度最大达 580 m,是彬长矿区煤层埋深最大、洛河组厚度最大、富水性最强的强冲击危险矿井。

该矿目前采掘范围内煤层顶板呈典型的巨厚高承压含水层结构(图 6)。覆岩承压水的运移和厚层安全地质层的破断对井下围岩应力环境产生巨大干扰。整体而言,冲击地压和顶板水害风险是该矿开采面临

的主要地质灾害问题,而与该问题紧密相关的地质层(体)为由坚硬顶板和含水层组成的、具有安全控制属性的系统整体。

3.2.2 矿山安全地质层(体)识别

根据地质改性理论,通过力学试验、钻探探查、孔内应力测量等技术,精细查明特定地层的应力状态和流体充填特征,系统研究坚硬顶板和主要含水层的受力状态,确定具有冲击地压和水害风险、需开展改性的地质层(体)。

测试发现,洛河组上段地层发育厚度较大的粗砂岩,砂岩平均孔隙度为 15.44%,渗透系数为 0.92~1.55 m/d,具有较好的储水空间,单位涌水量为 1.305~2.248 L/(s·m),静储量丰富,且上段含水层主要接受地下水侧向径流补给,与区外连续分布,补给条件好,富水性强,水压最大达 7 MPa,且补给性较好,难以疏干,采掘过程中一旦导通将引发大规模突水。

目前开采区域最大主应力为 38.2~44.8 MPa,最小主应力为 14.4~24.8 MPa,垂直应力为 21.5~24.6 MPa,侧压系数为 1.27~1.33,煤层处于较高应力状态,岩石力学测试结果显示区内粗砂岩和细砂岩单轴抗压强度可分别高达 68 MPa 和 84 MPa。可见其地应力水平较高,同时岩层破断易释放大量弹性能,存在潜在冲击地压风险。

结合探测结果和地质层改性理论,二盘区煤层上方共存在 3 个安全地质层(图 6),其中主安全地质层和次安全地质层二位于洛河组内,富水性强,水害威胁较高;而次安全地质层一距离煤层较近,次安全地质层一(厚度 21.06 m)的破断将释放大量弹性能,造成冲击危险性的急剧升高,上述 3 个安全地质层的采

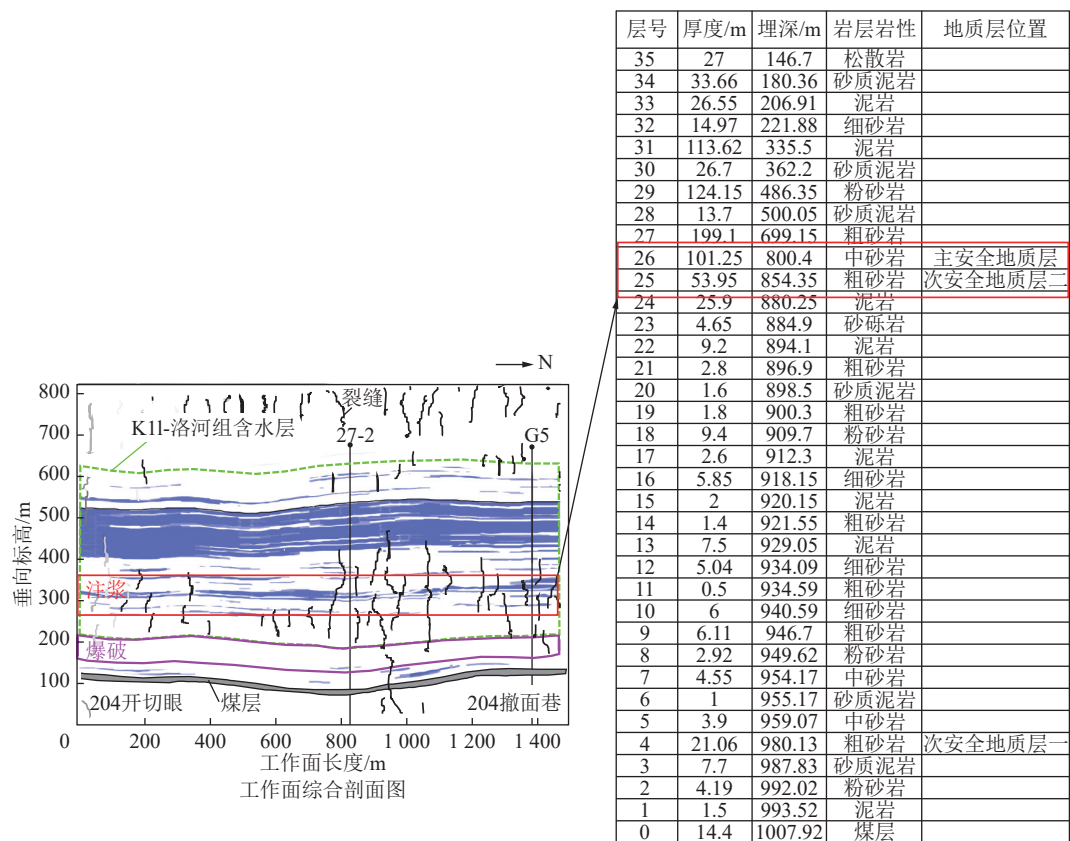


图 6 坚硬富水难垮落顶板地质改性示意

Fig.6 Diagram of Geological Modification for Hard, Water-Rich, and Hard-to-Collapse Roof

动断裂失稳,可能导致冲击地压和顶板水害的形成,甚至冲击-突水复合动力灾害的发生。

3.2.3 矿山安全地质层(体)的地质改性

为兼顾开采效率和治理成本,采取“注浆堵水+预裂爆破”的治理方式,较好解决冲击地压和顶板水害的制约。

采用地面竖直井+多分支水平井对该矿二盘区后期回采阶段洛河组巨厚含水层进行注浆堵水,注浆高度为煤层顶板 180~220 m,注浆层位为洛河组下段,即位于洛河组下部的次安全地质层二,该层位孔隙度小、富水性弱、导水性差,地下水径流条件相对滞缓,但其强度较弱,采动影响下裂隙发育,可导致上覆承压水涌入采空区。因此采用水平钻孔的方法在该层段内进行注浆封堵导水裂隙,累计注浆量约 33 280 t,注浆材料为水泥浆、粉煤灰或水玻璃,工作面回采后涌水量明显降低。利用深孔爆破可人工诱发顶板积聚能量释放的原理,采用低位深孔爆破技术对次安全地质层一进行处理,处理后工作面来压步距平均降低 36.3%,大能量微震事件明显减少,矿震活动明显减弱,再未发生冲击地压显现。

上述深部矿井地质改性工程应用实践,较好地融入周边岩层系统,极大程度减少对地层结构和原始应力状态的扰动。工程应用后,微震、应力、钻屑等监测指示矿井冲击地压危险性显著降低,矿井涌水量也明显减小,取得了良好的减灾效果。

3.3 煤层下部灰岩安全地质层(体)地质改性

煤层下伏灰岩高水压,常导致底板突水事故,这是华北型煤田最常见的矿井事故。煤层底板灰岩水地面超前区域治理技术已广泛应用于华北型煤田底板防治水,取得显著成效。为进一步提升治理效果和工程经济性,使用地质层改性理论技术开展安全治理工作。

3.3.1 多场效应叠加下的安全地质属性

豫东永城某矿主采煤层为山西组二₂煤层,二₂煤层底板为一套粉砂岩和泥岩。下部太原组上段发育 L₇~L₁₂ 层灰岩,以 L₉、L₁₀ 相对稳定,为主含水层,具有裂隙孔洞发育,富水性强等特点,是矿区底板水害的主要水源。二₂煤层底板下距太原组上段含水层顶面 33~62 m,尽管太原组灰岩上部为一层厚约 10 m 左右的灰黑色海相泥岩,是很好的隔水层,但太原组灰岩水头压力大,煤层底板下伏地层不足以形成安全隔水层。因此,底板水害防治是保障二₂煤层安全开采的关键,与该问题紧密相关的地质层(体)为由 L₇~L₁₂ 灰岩及其赋存其中的地下水组成。

3.3.2 矿山安全地质层(体)的识别

L_9 石灰岩厚度大, 一般约 12 m, L_{10} 灰岩相对较薄, 平均厚度 6.9 m, 全区亦基本稳定。 L_9 、 L_{10} 为区内二₂ 煤层直接充水水源, L_{10} 灰岩静水压近 5.0 MPa。因此, 如果治理选择 L_9 灰岩层为注浆层位注浆, 由于

灰岩层厚度较大、孔隙发育, 吃浆量较大, 工程经济性和时效性相对较差, 且 L_{10} 灰岩层仍然作为含水层具有较强的突水能力 (图 7)。因此, 只有选择 L_{10} 灰岩作为安全地质层(体)进行水害治理, 在其形成相对强度的隔水层, 是解决本区水害的关键。

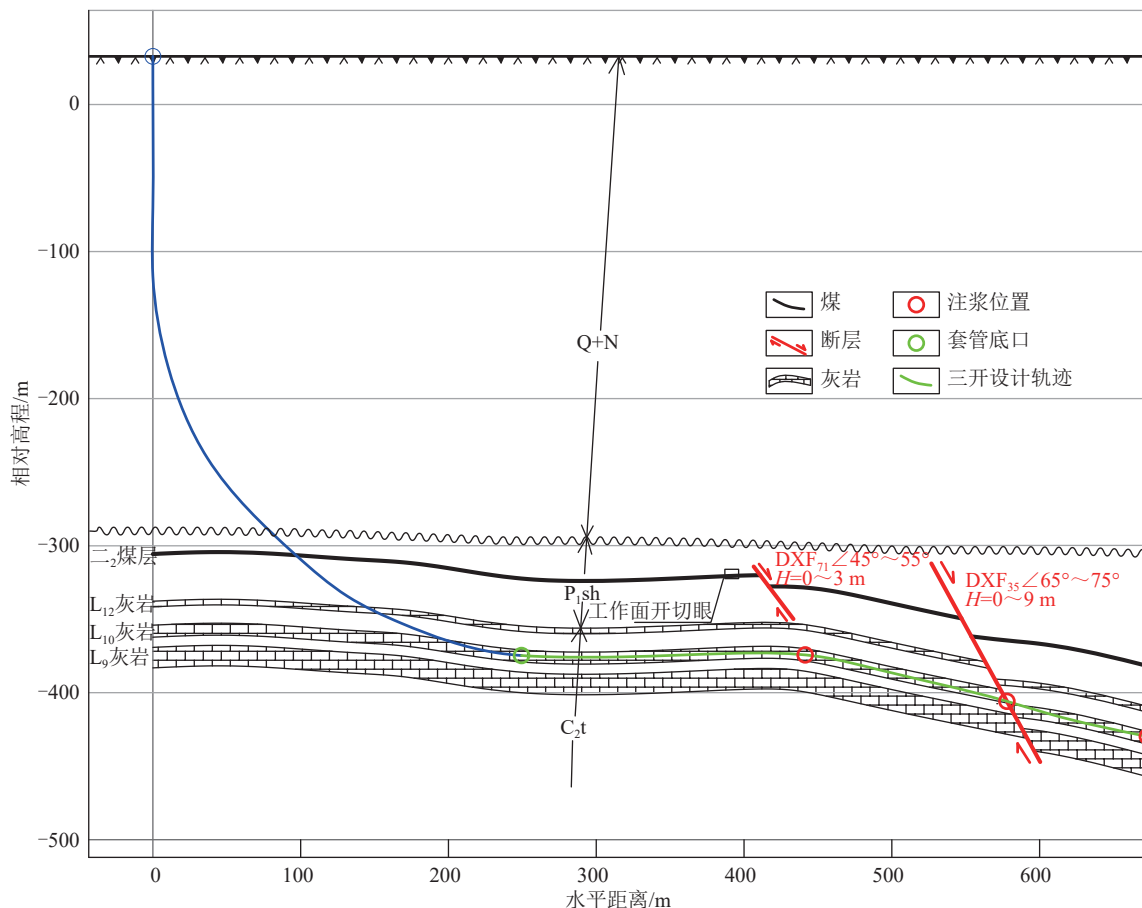


图 7 永城某矿 L_{10} 层灰岩注浆改性示意

Fig.7 Geological Modification Diagram of Grouting in Limestone at Layer L_{10} of a Mine in Yongcheng

通过对勘探和井下揭露资料分析, L_{10} 灰岩在治理范围基本稳定, 厚度都在 4.5~5 m 以上。综合研究太原组灰岩层的应力场和流体场, 认为当 L_{10} 灰岩层通过高压注浆将导水通道充填压密, 改性形成一定厚度强度的有效隔水层, 在治理区域范围内形成一个整体的“水平阻水墙”, 完全能阻隔来自 L_{10} 灰岩及 L_{10} 灰岩下部含水层中的地下水, 从而达到带压安全开采和区域超前治理的目标。为此, 采用长距离顺层钻孔对 L_{10} 灰岩超前钻探, 对治理区域 L_{10} 灰岩裂隙和隐伏构造实现超前探查, 进一步刻画了 L_{10} 灰岩地层结构、富水和岩溶发育状况, 产状变化与煤层类似, 是通过开展注浆改性、构建安全地质层的理想层位。

3.3.3 矿山安全地质层(体)的地质改性

中煤地质集团采用地面水平分支井超前注浆技术对 L_{10} 灰岩进行地质改性, 水平井按 60 m 间距布孔,

施工地面定向顺层孔组及定向孔组“开窗”技术实现对治理区的全覆盖 (图 7)。通过三级钻孔结构实现裸孔在治理区内的 L_{10} 灰岩含水层中部顺层钻进, 地层倾角从 10°到 30°, 再到 10°, 通过间序施工和变轨迹钻探, 分段探注结合, 多回次下行式高压劈裂注浆, 有效封堵 L_{10} 灰岩溶隙、裂隙通道。裸眼分段注浆, 钻进 200 m 或钻遇漏失严重段注浆。注浆材料采用单液水泥浆制浆工艺, 浆液浓度 1.2~1.7 g/cm³, 浆液浓度视岩溶裂隙发育程度动态而定。工作面治理区域内钻孔顺层段的 L_{10} 灰岩顺层率达到 90% 以上, 地面注浆孔注浆终止孔口压力确定为 8~10 MPa, 其中 8 MPa 为跑浆等异常情况的注浆合格压力, 正常块段注浆至 8~10 MPa, 单位进浆量 40~60 L/min 且稳定 15 min 以上。

上述煤层底板地质层改性工程应用实践, 通过系

统运用应力场和流体场多场叠加机制,精细识别 L_{10} 安全地质层(体),模拟注浆后隔水底板的应力场特征,利用地面水平分支井超前注浆技术精准改良 L_{10} 灰岩层含水性,和抗拉强度等措施有效增加安全隔水层厚度。大量井下钻探工程验证,矿井涌水量均小于 $10 \text{ m}^3/\text{h}$,取得了很好的底板水综合治理效果。

3.4 高寒地区渣土构建冻土层、土壤层等生态地质层(体)

露天矿山开采过程中,表土剥离、爆破采装、排石等作用常导致地形地貌改变、地质灾害、水土流失、煤层自燃等一系列生态环境破坏问题。本次以青海祁连山木里矿区为例^[29],运用地质层改性理论,开展如下工程实践。

3.4.1 多场效应叠加下的生态地质属性

木里矿区位于中祁连隆起带,含煤地层中侏罗统江仓组下段和木里组上段剥蚀出露地表或为第四系松散沉积物所覆盖。多年的露天无序开采,导致薄煤层乱采弃采、草原荒漠化、冻土层破坏、水源涵养功能近于丧失等矿山生态地质问题,破坏了矿区原始的物质场、渗流场、生态场。与该问题紧密相关的地质层(体)为由土壤层、冻土层、含水层、煤层及顶板岩层等具有生态控制属性的系统整体。

3.4.2 矿山生态地质层(体)的识别

以往矿山生态修复主要开展边坡治理、植被恢复、土壤复垦等工作,而受自然环境、地质条件、开采强度等一系列因素的制约,一些特殊地区诸如高寒高海拔地区、西部缺水生态脆弱区的矿山生态修复面临很大挑战,也存在较多失败案例。如西藏某矿山边坡复绿,选择挂网喷播技术,在首年较好的养护条件实现了复

绿,但在养护条件变化后第二年即发生植被大面积死亡。

以地壳浅部系统观为指导,认为采矿活动引起矿山环境的改变与破坏,归根到底是区域地壳浅层系统的变化,矿山生态修复核心问题是修复破坏的生态地质层。本次治理采用煤炭生态地质勘查技术,对区域原始地层剖面和产状、岩石结构等开展调查研究,识别划分出木里矿区主要存在土壤层破坏、冻土层破坏、地形地貌改变、煤层及上部岩层破坏等生态环境破坏类型。建立了针对破坏的土壤层、冻土层、煤层顶板岩层等不同研究对象的生态地质层(体)剖面。

3.4.3 矿山生态地质层(体)的改性

笔者采用模拟人造原始地层的方法,选用相似或相近材料,重构与原始地层具有相似地质和生态属性作用的岩性层段,或修复破损部分,近似恢复原始地层。针对上述生态地质层(体),开展如下地质改性工作:

1) 土壤层的仿生重构。针对土壤资源贫乏,在客土方案不经济的情况下,通过一千多次模拟原始土壤及其生态功能的测土配方科学实验,得出人造土壤的最佳配比方案,实现相似土壤再造;同时仿照原始土壤层剖面,建立下部的基底层、中部渣土改良层和上部人造土壤层3部分重构土壤层剖面(图8a),实现了物质场和植物生长生态场仿生构建。

2) 冻土层修复。解析冻土层原始结构和建立冻土层序,查明采动对冻土的挖损面积和冻土层结构的洞穿程度,分层开展季节性冻土层、多年冻土层的重构。对于季节性冻土层,选择尽量与周边原始地层岩性相似的渣土和碎石块,考虑水文地质单元中透水

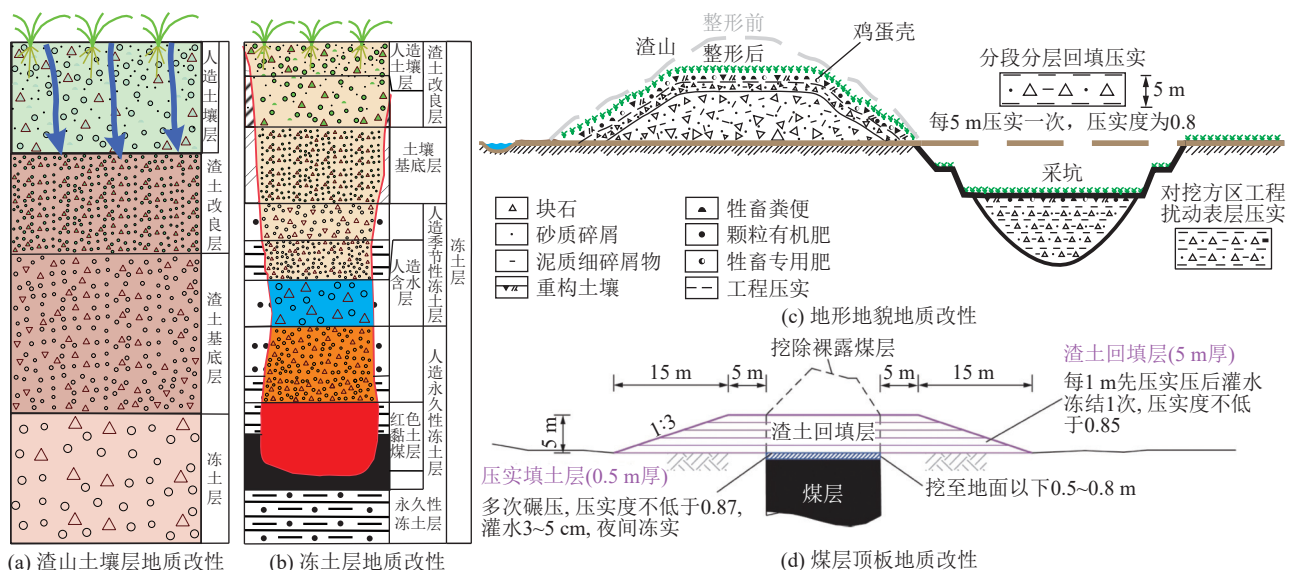


图8 木里露天煤矿生态地质层(体)地质改性^[28]

Fig.8 Geological Modification of Ecological Geological Layer in the Open-pit Coal Mine of Muli Mining Area, Qinghai Province^[28]

层、隔水层的人工重构,通过强、弱不均衡压实处理,形成一定的空隙,构建出隔水层、透水层的交互组合,增强季节性冻土层的渗水、透水和储水能力,修复渗流场。对于多年冻土层的岩性特征,选用相似岩性修复的材料,通过分层回填和反复压实,配合人工施水或大气降雪,构建冻土生态地质层(图 8b)。

3) 渣山“鸡蛋壳”构建。通过采坑和沉陷压实回填、边坡和渣山治理等,重塑矿山地形地貌,达到与周边地貌与环境的协同统一(图 8c)。例如,在渣山上进行降高消坡外貌修复,构建坚硬的地形重塑层,形成类似鸡蛋壳一样的渣山外壳,起到渣山表层保温保水形成植被生长的温床,保持蓄水状态下渣山边坡的稳定,渣山内部有效封存有害物质不被雨水淋滤渗出,防止污染周围环境的作用。在渣山“鸡蛋壳”之上,再进行土壤层的构建^[31]。

4) 煤炭资源保护和顶板生态地质层修复。仿照煤层顶板泥岩结构,选用细黏土等材料通过多次反复加水 and 均衡压实,使回填后的地层达到一定强度和致密性,构建煤层顶板生态地质层,防止裸露煤层中瓦斯及有害气体逸散和煤层自燃(图 8d)。

上述工程实践,通过生态地质层(体)的地质改性,系统解决了高寒高海拔地区土壤稀缺、冻土层损坏、地形地貌挖损、煤层裸露风化等矿山生态环境治理与修复难题,通过人工修复助力自然修复进程,实现了木里矿区“两年见绿出形象”的修复目标。

4 发展方向

矿山开发所遇到的资源综合利用问题、安全开采问题和生态环境问题,归根结底都是地质问题。由于改性目标层和作用不同,在实际工程应用中,应采用“地质研究+物探+钻探+模拟+监测”五位一体的勘查技术识别资源地质层(体)、安全地质层(体)和生态地质层(体)中的地质赋存状态、构造应力条件、岩层结构构造等性质,对改性目标层精细刻画。其次,应用地质勘查协同技术,实现目标地质层(体)的改性。改性后还需要不断监测,以优化后续工程参数。

地质层改性可有效解决一系列矿产资源开发难题,在实际应用中如何加强对“三层(体)”与“五位一体”技术在同一地质层改性场景的有机结合和协同应用是实现地质改性工程能否成功的关键。未来,在改变煤炭开发形态特别是流、固一体矿产协同开发、地表沉陷规模量控制、保护和改造利用地下空间等方面具有广泛的应用前景,这也是今后煤炭地质勘查技术的主要研究与应用场所。

1) 坚持地壳浅部空间的系统观,注重场效应和多

场叠合效应对地质属性的制约机制,深化采动对地壳浅部系统破坏机理的认识,从源头保障地质改性的稳定性和系统性。

2) 深化和拓展“矿山地质层(体)”理论,精细刻画地壳浅部系统中对安全、资源、生态起主要制约作用的矿山地质层(体)的地质属性、约束作用机理和影响范围,确保解决原有问题的同时不产生新的问题,实现系统改性。

3) 加强钻探技术、注浆技术、改性装备、改性材料等研发,以达到高效精准揭露矿山特征地质层(体)、经济有效改造地质属性的目的。

4) 拓展地质层改性应用场景,进一步探索用于煤盆地其它矿产以及非煤矿产资源开发中特殊地质层(体)改性,例如解决地浸砂岩型铀矿床含矿含水层过于厚大、盐湖区直井深部采卤效率低等地质难题。

5) 随着地质大数据、AI 技术的发展,基于地质层多种场数据的智能分析,探索通过 AI 地质模拟研究地质层改性的模型和方向。

5 结 论

1) 矿山地质层改性的概念是以地壳浅层系统理论为指导,精准识别在矿山开采活动起主要控制作用的特征地质层(体),精确查明场效应和多场叠加机制对矿山地质层(体)地质属性的制约机理,精细刻画矿山开采对地质层(体)各类地质属性的影响及其动态变化规律,通过仿生改良或近似恢复重构的工程技术手段优化改造矿山地质层(体)的相应地质属性,实现矿山资源综合利用、煤炭安全开发和生态环境友好的一项综合性矿山地质保障工作。

2) 矿山地质层改性的科学内涵是指在矿山安全生产地质保障过程中,通过仿生改良或近似恢复重构,一体化推进资源、安全和生态地质属性的系统改性,实现特征地质层(体)内采动失稳要素的分解、原生不良因素的弱化和生态地质功能的重建,以保障地壳浅层系统的整体稳定性。

3) 矿山地质层改性的目标对象包括资源地质层(体)、安全地质层(体)和生态地质层(体)3 类,矿山开采中的各类地质问题的实质是这三类地质层(体)原始平衡状态被破坏,实践中了,应加强“地质研究+物探+钻探+模拟+监测”五位一体的矿山地质层(体)识别技术的有效协同,以保障确定不同场景下资源地质层,安全地质层和生态地质层的科学性。

参考文献(References):

[1] 王佟,韩效忠,邓军,等.论中国煤炭地质勘查工作在新条件下的定

- 位与重大研究问题[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(2): 27–44.
- WANG Tong, HAN Xiaozhong, DENG Jun, et al. Orientation and major research problems of coal geological exploration in China under new conditions[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(2): 27–44.
- [2] 王佟, 孙杰, 江涛, 等. 煤炭生态地质勘查基本构架与科学问题[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 276–284.
- WANG Tong, SUN Jie, JIANG Tao, et al. Basic configuration and scientific problems of coal eco-geological survey[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 276–284.
- [3] 杨科, 赵新元, 何祥, 等. 多源煤基固废绿色充填基础理论与技术体系[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4201–4216.
- YANG Ke, ZHAO Xinyuan, HE Xiang, et al. Basic theory and key technology of multi-source coal-based solid waste for green back-filling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4201–4216.
- [4] 王慧涛, 王晓晨, 翟明华, 等. 矸石基含水层注浆改造新型材料实验与应用[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(11): 2981–2988.
- WANG Huitao, WANG Xiaochen, ZHAI Minghua, et al. Experiment and application of new material for grouting of gangue based aquifer[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(11): 2981–2988.
- [5] 秦勇, 吴建光, 李国璋, 等. 煤系气开采模式探索及先导工程示范[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(7): 2513–2522.
- QIN Yong, WU Jianguang, LI Guozhang, et al. Patterns and pilot project demonstration of coal measures gas production[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2513–2522.
- [6] 徐凤银, 聂志宏, 孙伟, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气高效开发理论技术体系[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 528–544.
- XU Fengyin, NIE Zhihong, SUN Wei, et al. Theoretical and technological system for Highly efficient development of deep coalbed methane in the Eastern edge of Erdos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 528–544.
- [7] 徐雪战. 低透气煤层超高压水力割缝与水力压裂联合增透技术[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 311–317.
- XU Xuezhao. Combined permeability enhancement technology of ultra-high pressure hydraulic slot and hydraulic fracturing in low permeability coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 311–317.
- [8] 周雷, 彭雨, 卢义玉, 等. 基于物质点法的深部煤层气水力割缝卸压解吸增透规律数值模拟研究[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(9): 3298–3309.
- ZHOU Lei, PENG Yu, LU Yiyu, et al. Numerical simulation of deep CBM hydraulic slotting pressure relief and desorption and permeability enhancement based on the MPM[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(9): 3298–3309.
- [9] 刘遵义, 李小亮. 高矿化度矿井水处理技术应用现状[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(S2): 436–441.
- LIU Zunyi, LI Xiaoliang. Application status of mine water treatment technology with high salinity[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(S2): 436–441.
- [10] 李福勤, 薛甜丽, 高珊珊, 等. 高盐矿井水浓缩液双极膜电渗析试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(11): 248–254.
- LI Fuqin, XUE Tianli, GAO Shanshan, et al. Experimental study on bipolar membrane electrodialysis of high-salt mine water concentrate[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(11): 248–254.
- [11] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(5): 1283–1305.
- XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1283–1305.
- [12] 康红普, 冯彦军. 定向水力压裂工作面煤体应力监测及其演化规律[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(12): 1953–1959.
- KANG Hongpu, FENG Yanjun. Monitoring of stress change in coal seam caused by directional hydraulic fracturing in working face with strong roof and its evolution[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(12): 1953–1959.
- [13] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(7): 2331–2345.
- PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2331–2345.
- [14] 于智卓, 丁湘, 蒲治国, 等. 华昱矿区矿井水水质评价及零排放资源化利用[J]. *中国煤炭地质*, 2023, 35(2): 41–46.
- YU Zhizhuo, DING Xiang, PU Zhiguo, et al. MineWater quality evaluation and zero-emission resource utilization in Huayu mining area[J]. *Coal Geology of China*, 2023, 35(2): 41–46.
- [15] 赵世军, 鹿存金, 边凯, 等. 银星一号煤矿侏罗系煤层顶板砂岩岩害特征及防治技术[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(12): 76–84.
- ZHAO Shijun, LU Cunjin, BIAN Kai, et al. Water disaster characteristics and prevention technology of Jurassic coal seam roof sandstone in Yinxing No. 1 Coal Mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(12): 76–84.
- [16] 程志恒, 陈亮, 苏士龙, 等. 近距离煤层群井上下联合防突模式及其效果动态评价[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1635–1647.
- CHENG Zhiheng, CHEN Liang, SU Shilong, et al. Outburst prevention mode of ground and underground technology joint and its dynamic evaluation in contiguous coal seams[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1635–1647.
- [17] 杨百舸, 张军胜, 令狐建设, 等. 突出煤层 CO₂ 气相压裂高效抽采防突掘进技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(3): 85–94.
- YANG Baige, ZHANG Junsheng, LINGHU Jianshe, et al. An advanced CO₂ gas-phase fracturing technology for efficient methane drainage, outburst prevention and excavation in outburst coal seam[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(3): 85–94.
- [18] 翁明月, 苏士杰, 孙如达, 等. 多关键层窄煤柱冲击地压发生机理与三级协同防治技术[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(S1): 45–56.
- WENG Mingyue, SU Shijie, SUN Ruda, et al. Research on rock burst generation mechanism and three-level collaborative control technology of multi-key strata narrow coal pillar[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(S1): 45–56.
- [19] 尹尚先, 徐斌, 尹慧超, 等. 矿井水防治学科基本架构及内涵[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(7): 24–35.
- YIN Shangxian, XU Bin, YIN Huichao, et al. Basic structure and connotation of mine water prevention and control discipline[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(7): 24–35.
- [20] 王新国, 曹志国, 刘鹏. 超大采高工作面过沟回采精准防治水技术[J]. *煤炭工程*, 2023, 55(2): 75–80.

- WANG Xinguo, CAO Zhiguo, LIU Peng. Precise water control technology for under-gully mining in super-high mining face[J]. Coal Engineering, 2023, 55(2): 75–80.
- [21] 张永将, 邹全乐, 杨慧明, 等. 突出煤层群井上下联合抽采防突模式与关键技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48(10): 3713–3730.
- ZHANG Yongjiang, ZOU Quanle, YANG Huiming, et al. Joint ground and underground gas extraction mode and its key technology for outburst coal seam group[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(10): 3713–3730.
- [22] 曹运兴, 张军胜, 田林, 等. 低渗煤层定向多簇气相压裂瓦斯治理技术研究与实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2631–2641.
- CAO Yunxing, ZHANG Junsheng, TIAN Lin, et al. Research and application of CO₂ gas fracturing for gas control in low permeability coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2631–2641.
- [23] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211–1221.
- PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River Basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211–1221.
- [24] 王双明, 孙强, 乔军伟, 等. 论煤炭绿色开采的地质保障[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 8–15.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, QIAO Junwei, et al. Geological guarantee of coal green mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 8–15.
- [25] 王双明, 段中会, 马丽, 等. 西部煤炭绿色开发地质保障技术研究现状与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(2): 1–6.
- WANG Shuangming, DUAN Zhonghui, MA Li, et al. Research status and future trends of geological assurance technology for coal green development in Western China[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 1–6.
- [26] 毕银丽, 武超, 彭苏萍, 等. 西部煤矿区微生物修复促进植物水分高效利用策略[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 1003–1010.
- BI Yinli, WU Chao, PENG Suping, et al. Strategies of high efficiency water usage promoted by microbial remediation in coal mining areas of western China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1003–1010.
- [27] 刘见中, 谢和平, 王金华, 等. 煤炭绿色开发利用的颠覆性技术发展对策研究[J]. 煤炭经济研究, 2017, 37(12): 6–10.
- LIU Jianzhong, XIE Heping, WANG Jinhua, et al. Study on disruptive technology development countermeasure of coal green development and utilization[J]. Coal Economic Research, 2017, 37(12): 6–10.
- [28] 王佟, 刘峰, 赵欣, 等. 生态地质层理论及其在矿山环境治理修复中的应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3759–3773.
- WANG Tong, LIU Feng, ZHAO Xin, et al. Theory of ecological geological layer and its application in mine environment remediation[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3759–3773.
- [29] 王佟, 杜斌, 李聪聪, 等. 高原高寒煤矿区生态环境修复治理模式与关键技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 230–244.
- WANG Tong, DU Bin, LI Congcong, et al. Ecological environment rehabilitation management model and key technologies in plateau alpine coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 230–244.
- [30] 王佟, 蔡杏兰, 李飞, 等. 高原高寒矿区生态地质层修复中的土壤层构建与成分变化差异[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2407–2419.
- WANG Tong, CAI Xinglan, LI Fei, et al. Soil layer construction and composition changes in restoration of ecological and geological layer in alpine mining area on plateau[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2407–2419.
- [31] 赵欣, 王佟, 李聪聪, 等. 露天矿区生态地质层修复中地形重塑层的构建技术及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(7): 113–122.
- ZHAO Xin, WANG Tong, LI Congcong, et al. Construction and restoration technology of terrain remodeling layer in the restoration of ecological geological layer in open-pit mining areas[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(7): 113–122.
- [32] 王伟超, 王佟, 王明宏, 等. 高寒冻土区露天矿水传输涵养系统构建模式及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 168–179.
- WANG Weichao, WANG Tong, WANG Minghong, et al. Construction mode and application of open-pit mineral water transmission and conservation system in alpine permafrost area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 168–179.
- [33] 张继锋, 孙乃泉, 刘最亮, 等. 电磁法在煤矿水害隐患探测方面的综述[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 301–316.
- ZHANG Jifeng, SUN Naiquan, LIU Zuiliang, et al. Electromagnetic methods in the detection of water hazards in coal mines: A review[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(2): 301–316.
- [34] 于景邗, 苏本玉, 薛国强, 等. 煤层顶板致灾水体井上下双磁源瞬变电磁响应及应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2356–2360.
- YU Jingcun, SU Benyu, XUE Guoqiang, et al. Transient electromagnetic response of double magnetic source in coal seam roof disaster caused by water and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2356–2360.
- [35] 陶明房. 随钻地震探测技术在陷落柱探查中的应用[J]. 煤炭科技, 2022, 43(5): 71–74.
- TAO Mingfang. Application of seismic detection while drilling technology in exploring collapsed columns[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2022, 43(5): 71–74.
- [36] 张军. 矿井孔-巷无线电磁波透视探测方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2856–2864.
- ZHANG Jun. Research on radio electromagnetic wave perspective detection method through borehole-roadway in mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2856–2864.
- [37] 李冬, 杜文凤, 许献磊. 矿井地质雷达超前探测方法及应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 223–228.
- LI Dong, DU Wenfeng, XU Xianlei. Study on advanced detection method and application of mine geological radar[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 223–228.
- [38] 李聪聪, 王佟, 王辉, 等. 木里煤田聚乎更矿区生态环境修复监测技术与方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1451–1462.
- LI Congcong, WANG Tong, WANG Hui, et al. Monitoring technology and method of ecological environment rehabilitation and treatment in Juhugeng mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1451–1462.
- [39] 丛琳. 煤矿井下钻孔内瓦斯浓度监测传感器研制[J]. 煤田地质与

- 勘探, 2022, 50(2): 150–155.
- CONG Lin. Development of a methane concentration monitoring sensor in underground boreholes of coal mines[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 150–155.
- [40] 张坤, 方海, 李邵东, 等. 大埋深坚硬顶板厚煤层冲击地压微震监测及防治措施[J]. *中国矿业*, 2021, 30(10): 77–83.
- ZHANG Kun, FANG Hai, LI Shaodong, et al. Microseismic monitoring and prevention of working face rockburst in thick coal seam with hard roof and large buried depth[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(10): 77–83.
- [41] 曹安业, 杨旭, 王常彬, 等. 基于深度迁移学习的矿山微震到时精确拾取与自动定位策略[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(12): 4393–4405.
- CAO Anye, YANG Xu, WANG Changbin, et al. High-precision phase picking and automatic source locating method for seismicity in mines based on deep transfer learning[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(12): 4393–4405.
- [42] 曹安业, 郭文豪, 温颖远, 等. 托顶煤巷道锚固“梁-拱”结构分类及顶板冲击失稳机制[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(4): 1752–1770.
- CAO Anye, GUO Wenhao, WEN Yingyuan, et al. Classification and instability mechanism of anchored “beam-arch” composite structure in rock burst roadways with top-coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(4): 1752–1770.
- [43] 曹安业, 王常彬, 杨旭, 等. 微震定位精度影响下采场裂隙表征与冲击地压预警[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(2): 1–9.
- CAO Anye, WANG Changbin, YANG Xu, et al. Fractures characterization in mining field considering seismic location accuracy and its application on pre-warning coal burst hazards[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(2): 1–9.
- [44] 白乐, 李怀恩, 何宏谋, 等. 煤矿开采区地表水-地下水耦合模拟[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(4): 931–937.
- BAI Le, LI Huaien, HE Hongmou, et al. Integrated simulation of surface water and groundwater in a high intensive coal mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(4): 931–937.