

煤矿软岩泥化巷道梯级强化控制原理与技术

李桂臣^{1,2}, 郝浩然^{1,2}, 孙元田^{1,2}, 李菁华^{1,2}, 杨 森^{1,2}, 邵泽宇^{1,2}, 沃小芳^{1,2}

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要:煤系沉积岩层普遍泥性显著、富水性强、岩性软弱, 软岩泥化巷道围岩稳定控制难题日益突显。以淮北矿区典型软岩泥化巷道为工程背景, 根据工程地质条件调研与实测, 分析了黏土矿物成分与宏观破坏特征, 明确了富水环境和应力环境是诱发泥质巷道变形破坏的重要因素, 围岩泥化失稳体现为泥质岩体水化作用、锚固结构承载失效、围岩泥态垮冒渐进破坏模式, 实现应力-渗水耦合作用下巷道围岩承载结构稳定控制起到决定性作用; 在此基础上提出了软岩泥化巷道梯级强化控制原理, 即在保障“支护-围岩”相互作用关系中高预紧力、高刚度、高强度锚杆(索)支护承载闭环结构的前提下, 根据泥岩水化程度判断工程失稳控制方法, 形成了锚注一体泥质围岩性质改良、旋喷注浆浅表桩群结构强化、逐层锚喷泥化岩体强力置换 3 项重要技术路径; 于芦岭煤矿西轨大巷应用了自主研发的矿用新型多钢绞线组合中空注浆锚索束进行底鼓治理, 首次在涡北煤矿 8204 机巷开展了井下高压旋喷注浆工程实践, 采用了人工构筑岩体强力置换泥态围岩的方式解决了朱仙庄矿 II 水平第二皮带大巷泥化围岩失稳难题, 巷道围岩变形量、支护围岩成型情况与钻孔窥视结果表明, 研究成果较好地解决了软岩泥化巷道控制问题, 多层次强化了泥质巷道围岩承载能力, 保障了围岩长期安全稳定, 为软岩泥化巷道围岩控制提供了有效的科学控制理念与技术支持。

关键词:软岩; 泥化; 梯级强化; 围岩控制; 煤矿巷道

中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)02-0810-14

Principle and technology of step strengthening control of soft rock argillization roadway in coal mine

LI Guichen^{1,2}, HAO Haoran^{1,2}, SUN Yuantian^{1,2}, LI Jinghua^{1,2}, YANG Sen^{1,2}, SHAO Zeyu^{1,2}, WO Xiaofang^{1,2}

(1. School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The sedimentary rock strata of the coal measure are generally characterised by significant argillity, high water content and weak lithology. The problem of controlling the stability of the surrounding rock in soft rock argillation roadways has become increasingly prominent. Taking the typical soft rock argillation roadway in Huaibei Mining area as the engineering background, based on the investigation and measurement of engineering geological conditions, the composition of clay minerals and the macro and micro failure characteristics are analyzed, and it is clear that the water-rich environment and stress environment are the important factors inducing the deformation and failure of argillation roadway. The

收稿日期: 2024-12-02 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0785

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U22A20165, 52174089); 新疆自治区重点研发任务专项资助项目 (2023B01010)

作者简介: 李桂臣 (1980—), 男, 河北衡水人, 教授, 博士生导师。E-mail: liguichen@126.com

通讯作者: 郝浩然 (2000—), 男, 河北邯郸人, 博士。E-mail: cumthhr@126.com

引用格式: 李桂臣, 郝浩然, 孙元田, 等. 煤矿软岩泥化巷道梯级强化控制原理与技术[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 810-823.

LI Guichen, HAO Haoran, SUN Yuantian, et al. Principle and technology of step strengthening control of soft rock argillation roadway in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 810-823.



移动阅读

mudification instability of surrounding rock is mainly reflected in the progressive failure mode of hydration of argillous rock mass, bearing failure of anchorage structure, and mud-state collapse of surrounding rock. It plays a decisive role to realize the stability control of bearing structure of surrounding rock in roadway under the coupling effect of stress-water. On this basis, the step strengthening control principle of soft rock argillation roadway is put forward. On the premise of ensuring the closed-loop structure with high preload, high stiffness and high strength anchor (cable) support in the interaction relationship between support and surrounding rock, the engineering instability control method is judged according to the hydration degree of mudstone. Three important technical paths have been formed to improve the properties of mudstone surrounding rock with anchor injection, strengthen the structure of shallow pile group with rotary grouting, and replace the mudstone mass with anchor injection layer by layer. The new multi-strand combined hollow grouting anchor cable bundle independently developed for mining is applied to the floor heave control in the west roadway of Luling Coal Mine. For the first time, the underground high pressure rotary-grouting engineering practice was carried out in the 8 204 roadway of Guobei Coal Mine. The instability problem of mudded surrounding rock in belt roadway of the second level of Zhuxianzhuang Coal Mine is solved by the method of strong displacement of mudded surrounding rock by artificial constructed rock mass. According to the deformation of surrounding rock of roadway, the supporting forming condition of surrounding rock and drilling into results show that the results better solve the problem of soft rock roadway control. It strengthens the bearing capacity of surrounding rock of muddy roadway at multiple levels, ensures the long-term safety and stability of surrounding rock, and provides effective scientific control concept and technical support for surrounding rock control of soft rock argillation roadway.

Key words: soft rock; argillization; step strengthening; surrounding rock control; coal mine roadway

0 引言

软岩泥化巷道是指在泥质矿物含量大于 50% 的煤系沉积岩层中开掘的能产生显著水岩作用、容易发生失稳大变形的工程通道, 软岩泥化巷道分布于我国安徽、贵州、内蒙古、新疆等地区水文地质条件复杂的矿井, 且随着煤炭资源开采深度和强度的增加, 极易发生泥化垮冒等工程灾害, 软岩泥化巷道变形失稳难题逐渐成为煤炭领域的研究焦点。软岩泥化巷道具有以下特征^[1-4]: ① 软岩泥化巷道围岩以泥质胶结为主, 强度普遍较低, 泥质岩体单轴抗压强度多处在 10~40 MPa, 其富含膨胀性黏土矿物在遇水条件下力学强度显著劣化, 是典型的低强度膨胀性软岩; ② 我国不同矿区煤系地层水文地质条件复杂, 如华北地区存在奥陶纪灰岩强含水层, 西北地区具有巨厚砂岩含水层, 西南地区受喀斯特地质环境影响, 巷道所处围岩环境富水性强, 泥质岩体遇水泥化、塑性变形特征明显; ③ 随着开采深度的增加, 巷道处在高地应力、高承压水环境中, 伴随工作面回采高应力强烈扰动影响, 围岩破碎裂隙贯通, 动静水压力较大, 巷道普遍遭受泥化失稳、垮冒大变形、突涌水等灾变威胁; ④ 因软岩泥化巷道潜在变形威胁大, 围岩控制方式普遍复杂, 包含主动支护(锚杆、锚索等), 被动支护(喷浆喷涂、支架等), 注浆改性, 卸压(钻孔、切顶等), 巷道服务周期内返修频次高, 支护成本难以估量。

长期以来, 国内外科研机构 and 学者针对软岩泥化巷道围岩控制问题进行了探讨和研究, 泥质软岩变形力学特征与矿物组分息息相关^[5-7], 如富含黏土矿物蒙脱石、高岭石、伊利石等, 水岩作用集中体现为岩体遇水泥化膨胀、吸水崩解等行为; 泥质软岩含水率不同, 抗压强度、变形模量、黏聚力和内摩擦角等参数变化差异明显, 导致渗水泥化后围岩结构承载能力急剧下降^[8-12], 如锚固结构性能劣化, 塑性软化范围扩大等; 诸多矿区巷道工程受采动应力、构造应力、原岩应力影响, 导水裂隙发育贯通, 围岩变形时效性显著, 强流变失稳垮冒成为灾变威胁的关键^[13-17]。软岩泥化巷道围岩控制成为困扰煤矿安全生产的共性难题, 通过长期现场工程实践经验, 学者们提出采用断面形状优化^[18,19]、增强预应力锚固结构^[20,21]、封堵水源抑制泥化^[22,23]、合理注浆加固围岩^[24,25]等控制理念解决软岩泥化巷道围岩失稳难题, 由于不同矿井泥质软岩巷道工程背景的复杂性^[26], 采取的围岩控制手段多样, 包含全断面锚杆锚索^[27,28]、U 型架棚^[29]、化学浆液深浅孔注浆^[30-32]、围岩快速锚喷封闭^[33]、钢管混凝土^[34,35]、反底拱结构^[36,37]等, 实际应用过程中软岩泥化巷道围岩控制技术呈现多种方法联合的情况^[38-41], 依据工程地质特征围岩控制各有不同的侧重方向, 且在施工顺序上存在一定差异。

煤矿软岩泥化巷道围岩稳定控制难题日益突显, 虽然国内外学者和工程技术人员在工程实践上取得

了有效进展,但仍然存在泥质巷道围岩泥化失稳机理不够完善,围岩控制方法缺乏系统归纳,相关控制技术未形成可靠体系等问题。笔者针对软岩泥化巷道围岩控制关键科学难题,分析了淮北矿区典型软岩泥化巷道变形破坏特征,阐述了软岩泥化巷道梯级强化控制原理,开展了“一级”锚注一体泥质围岩改性强化技术、“二级”旋喷注浆浅表桩群结构强化技术、“三级”逐层锚喷泥化岩体强力置换技术实践,巷道围岩控制效果良好,可为软岩泥化巷道围岩控制提供了有效的科学控制理念与技术支撑。

1 煤矿软岩泥化巷道变形破坏特征

1.1 软岩泥化巷道典型工程地质背景

软岩泥化巷道围岩控制难题不单是泥质岩体水化作用所造成的,更多的是一种由围岩性质(黏土矿物、孔隙裂隙、富含水量)、围岩应力(原岩应力、构造应力、采动应力)、支护-围岩结构(锚固圈层、承载性

能、稳定程度)共同影响决定的。其中,原生孔隙裂隙、膨胀性黏土矿物、富水源头是巷道失稳的本质原因,原岩应力、构造应力、采动应力是巷道失稳的重要外因,锚固岩体泥化破碎致使结构承载能力劣化是巷道失稳的直接诱因。泥质软岩在井巷工程中分布广泛,复杂水文地质条件不可忽视,煤炭资源开采扰动不可避免,当三者相互作用时,巷道围岩的变形破坏会变得更加剧烈,笔者以淮北矿区芦岭煤矿、涡北煤矿和朱仙庄煤矿 3 个典型软岩泥化巷道围岩失稳工程为例,具体工程概况见表 1。通过从现场收集的泥质岩块碾成粉末,采用 X 射线衍射仪进行 XRD 实验分析,得到泥质岩体中黏土矿物的相对含量,测试结果如图 1 所示,测试结果可知芦岭煤矿所取泥岩黏土矿物含有 5.9% 高岭石、81.6% 绿泥石、12.5% 伊利石;涡北煤矿取得的泥岩黏土矿物约含有 93% 高岭石、7% 绿泥石;朱仙庄矿现场所取泥岩黏土矿物包括 72% 蒙脱石、14% 伊利石、7% 高岭土、4% 伊蒙混层、3% 绿泥土。

表 1 软岩泥化巷道工程概况
Table 1 General situation of soft rock argillation roadway engineering

工程地点	埋深	围岩类型	地质构造	水文条件
芦岭煤矿西轨大巷	~590 m水平	顶底板岩性以砂岩和泥岩间隔呈现	较简单,无明显褶皱、断层	水源主要有砂岩裂隙含水层、采空区积水、石炭系上统太原组灰岩水,钻孔涌水量0.002 02~0.003 54 L/(s·m),渗透系数0.001 5~0.002 3 m/d;
涡北煤矿8204机巷	659.2~694.7 m	底板主要为泥岩、局部粉砂岩	0~10 m断层(5条); 10~15 m断层(4条); 0~40 m(1条)	顶、底板砂岩裂隙水、来源工作面老空水,正常涌水量为2.0 m³/h,最大涌水量为50 m³/h
朱仙庄矿Ⅱ水平第二皮带大巷	676.2~683.6 m	围岩以泥岩与砂质泥岩为主	4条正断层落差均≥5 m	底板灰岩高承压水(6.5 MPa),灰岩探查孔起始出水量约6~7 m³/h,水量小、水压大

泥质岩体水化作用机理十分复杂,通过实验手段表征水化作用过程可为工程泥化围岩治理提供有效依据。芦岭煤矿西轨大巷泥岩黏土矿物以绿泥石和伊利石为主,通过现场取样开展泥岩试样浸水实验,SEM 测试结果如图 2 所示,黏土颗粒吸水泥化、膨胀现象较为普遍、明显,新的裂隙首先在不同位置形成并在区域内逐步相互贯通,宽度大多在 4 μm 左右,并具有向外延伸的趋势,裂隙沿结构边缘扩展,胶结状态劣化,产生明显泥化、溶蚀和颗粒脱落等现象。涡北煤矿泥质岩样初始单轴抗压强度为 13.7 MPa,水化过程中黏土矿物以高岭石为主,宏观裂隙逐渐扩张,泥化崩解效应显著,浸水饱和状态单轴抗压强度为 2.6 MPa,孔隙度天然状态下为 5.2%,吸水膨胀后降为 4.7%,孔隙表面积增加,由原来的 2.855 9 m²/g 增加为 3.423 7 m²/g,初步判断岩体崩解裂隙发育是岩石各主要物理力学参数指标明显降低的主要原因。朱仙庄矿巷道表层泥化现象严重,泥岩黏土矿物组成主要

为膨胀性蒙脱石,相较于其他黏土矿物蒙脱石的吸水能力与离子交换特性最强,膨胀变形可达 50% 以上,较大的膨胀应变和膨胀压力导致结构破坏,完全浸水状态下蒙脱石为主要成分的泥岩产生渗透水化作用,1 g 蒙脱石可吸收 10 cm³ 水,细观结构疏松多孔,间距可膨胀至 13 μm,裂隙分布呈现不规则结构状态。

笔者工程案例中软岩泥化巷道多为拱形断面,原支护方案以常规锚网喷为主,如芦岭煤矿西轨大巷采用“钢笆网+三节式 U29 型钢金属支架+喷浆”支护;涡北 8204 机巷采用全断面锚网喷+钢筋网支护;朱仙庄矿Ⅱ水平第二皮带大巷采用锚网喷+29U 可缩型支架支护,具体支护参数和断面形状见表 2。

1.2 软岩泥化巷道变形破坏特征

芦岭煤矿西轨大巷掘进成巷过程中随着围岩稳定变形的长期积累以及受四周相邻巷道掘进与硐室开挖的扰动影响,“围岩-支护”结构由“点破坏”逐步恶化为“区段性破坏”,巷道泥质围岩主要受砂岩裂隙

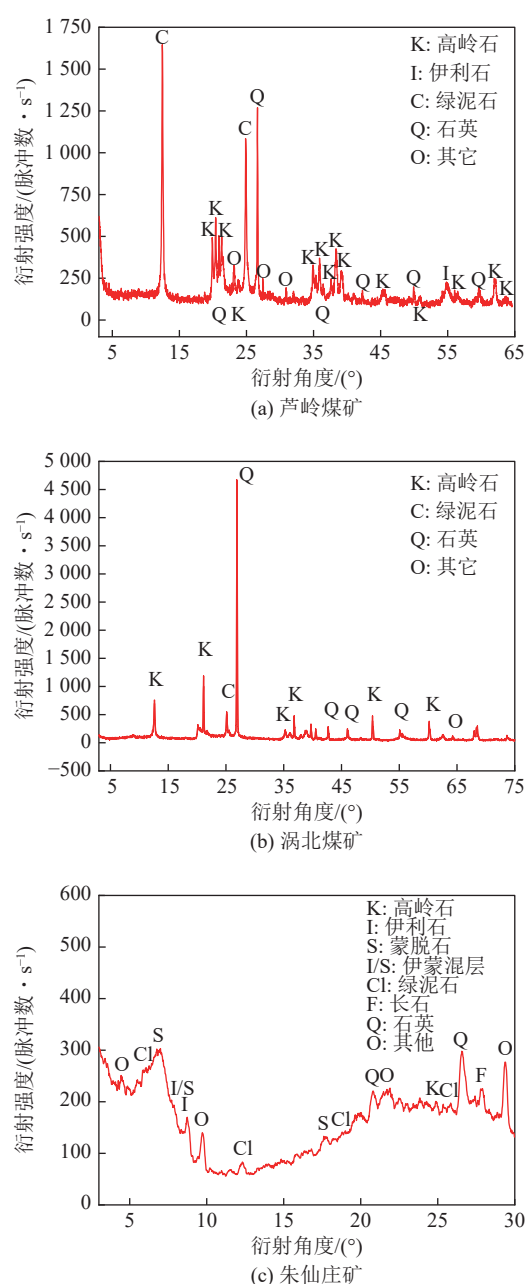


图1 泥质岩样 X 射线衍射黏土矿物分析图谱

Fig.1 Analysis of clay minerals in argillaceous rock samples by X-ray diffraction

含水层长期渗水影响,绿泥石与伊利石等泥质矿物成

分虽然膨胀性不强,但受多次采动应力扰动影响,巷道变形情况如图3所示,主要破坏形式为:喷浆层普遍破裂严重,破裂区多伴有渗水现象,金属支架及钢筋网腐蚀现象严重;U29型钢金属支架棚腿弯折明显,金属支架棚腿多由成巷初期的外扎演变为整体弯曲内扎或向巷内弯折;巷道底板挤压型底鼓显现强烈,巷道两帮下部渗水分界线清晰可见,泥质底板明显长期遭受渗流水作用,底鼓表现为挤压型非对称底鼓,水沟侧底鼓量明显大于另一侧。

渦北煤矿 8204 机巷泥质围岩呈现明显的时效特性,即围岩的流变性质,如图4围岩变形监测数据所示,随着时间的增长,巷道两帮及顶底板的收敛逐渐增大,巷道的两帮变形远大于顶底板变形,两帮收缩量达到 880 mm 以上,顶底板收敛量为 310 mm 左右。巷道成型 30 d 内,两帮收敛达到 600 mm 左右,巷道变形大约是总体变形的 70%,巷道帮部收敛变形速率高于顶底板,两帮变形速率最高可达 33 mm/d,顶底板为 22 mm/d,在 60 d 左右巷道基本处于稳定变形阶段,处于长期流变状态。

朱仙庄煤矿 II 水平第二皮带大巷主要担负矿井运煤、排水等任务,皮带大巷与轨道大巷的中间联巷交叉点是变形最为严重区域,现场破坏情况如图5所示,由于该交叉点处于断层破碎带位置(F19、F19-1断层带),前期交岔点及附近区段内巷道顶板淋水严重,导致巷道严重变形、支护崩解,断层破碎带将位于底板下方的灰岩高承压水导通,破碎带岩体在承压水的冲击下形成富含液体的泥化流体,进而阻碍承压水流通排泄,致使底板承压水压不断上升、流变体不断喷出,利用钻孔窥视仪测试发现巷道壁后 20 m 范围内岩体均存在泥化现象,围岩结构发生改变,造成巷道围岩长期失稳,巷道支护极其困难。

综合现场实测调研及围岩变形破坏特征分析,软岩泥化巷道工程尺度上呈现泥化作用-锚固失效-失稳垮冒递进式灾变威胁。其中,芦岭煤矿主要体现为强应力扰动与渗水作用耦合作用下,泥化围岩崩解膨

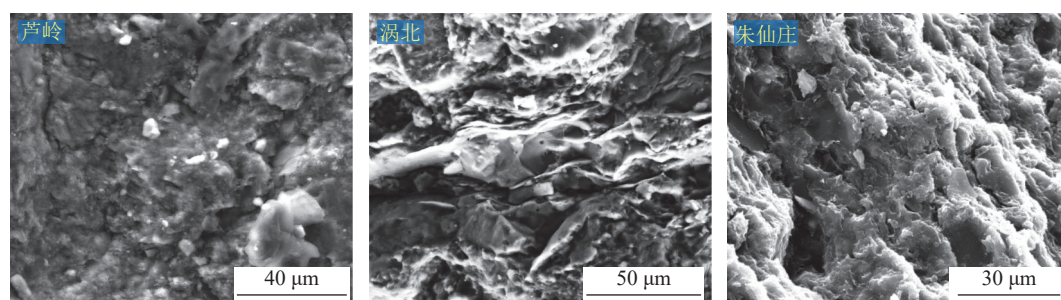


图2 泥质岩样浸水 7~10 天后扫描电镜细观结构图像

Fig.2 SEM microstructural images of argillaceous rock samples after 7 to 10 days of water immersion

表 2 软岩泥化巷道工程支护条件

Table 2 Supporting conditions of soft rock argillation roadway engineering

工程地点	断面形状	原始支护方案
芦岭煤矿 西轨大巷	拱形 4 600 mm×3 500 mm	U29型钢金属支架支设棚距500 mm，顶帮施工 $\phi 22\times 2\ 800$ mm高强锚杆，间排距800 mm×1 000 mm，顶板施工3根 $\phi 17.8$ mm×6 300 mm锚索，间排距2 000 mm×1 000 mm；距底板1 000 mm处各施工1根 $\phi 17.8\times 4\ 500$ mm锚索，排距1 000 mm
涡北煤矿 8204机巷	拱形 4 800 mm×3 800 mm	采用全断面锚网喷支护，锚杆规格采用 $\phi 22$ mm×2 800 mm，间排距为800 mm×800 mm，全断面铺设钢筋网
朱仙庄矿Ⅱ 水平第二 皮带大巷	马蹄形 4 800 mm×3 750 mm	采用锚网喷+29U可缩型支架支护，锚杆规格为 $\phi 22$ mm×2 500 mm，间排距为800 mm×1 000 mm，支架反底拱厚800 mm



图 3 芦岭煤矿西轨大巷变形破坏现场^[42]

Fig.3 Luling Coal Mine roadway deformation failure site^[42]

胀导致围岩变形、支护结构失效；涡北煤矿巷道泥质围岩软化强度大幅降低，松软围岩随着时间增长工程岩体流变特性明显；朱仙庄皮带大巷泥质围岩蒙脱石含量较高，吸水膨胀后围岩表面呈现完全泥态化，特殊构造区域围岩失稳几乎丧失承载能力。综上如图 6 所示，富水环境和应力环境是诱发泥质巷道变形破坏的重要因素，亟待解决的共性难题是如何实现应力-

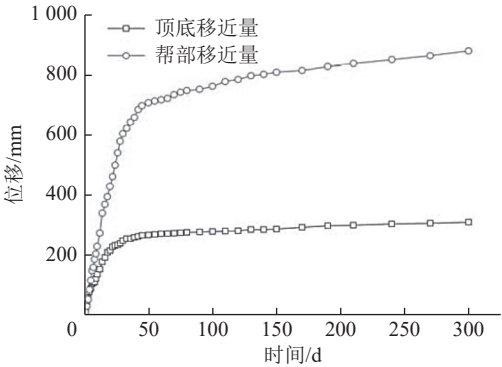


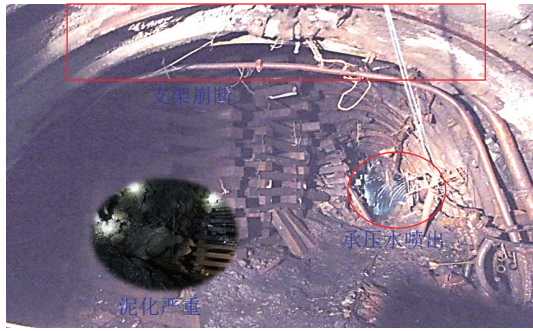
图 4 涡北煤矿 8204 机巷实测巷道围岩变形^[43]

Fig.4 Deformation of surrounding rock measured in 8204 roadway of Guobei Coal Mine^[43]

渗水耦合作用下巷道的稳定控制。

2 软岩泥化巷道梯级强化控制原理

软岩泥化巷道失稳变形主要体现在泥质岩体水致泥化，围岩-锚固剂界面黏脱失效导致锚固体脱出，浅层围岩承载能力显著降低，伴随动压与动静水长期侵扰最终失稳破坏。因此，软岩泥化巷道围岩控制难

图5 朱仙庄煤矿Ⅱ水平第二部皮带大巷变形破坏现场^[44]Fig.5 Deformation and failure site of belt roadway in Zhuxianzhuang Coal Mine^[44]

题的解决思路离不开支护与围岩相互作用,由经典的

Kastner 式 (1)—式 (2) 可知,改善围岩力学性能,优化围岩应力状态,提高支护阻力对控制围岩变形具有极其重要的作用^[45,46]。

$$R = r \left[\frac{(p_0 + C \cdot \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{p_i + C \cdot \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (1)$$

$$u_0 = \frac{\sin \varphi}{2G \cdot r} (p_0 + C \cdot \cot \varphi) R^2 \quad (2)$$

式中: R 为塑性区半径, m ; r 为巷道半径, m ; p_0 为原岩应力, MPa ; p_i 为支护阻力, kN ; C 为黏聚力, MPa ; φ 为内摩擦角, $^\circ$; u_0 为巷道围岩位移量, m ; G 为围岩剪切模量, GPa 。

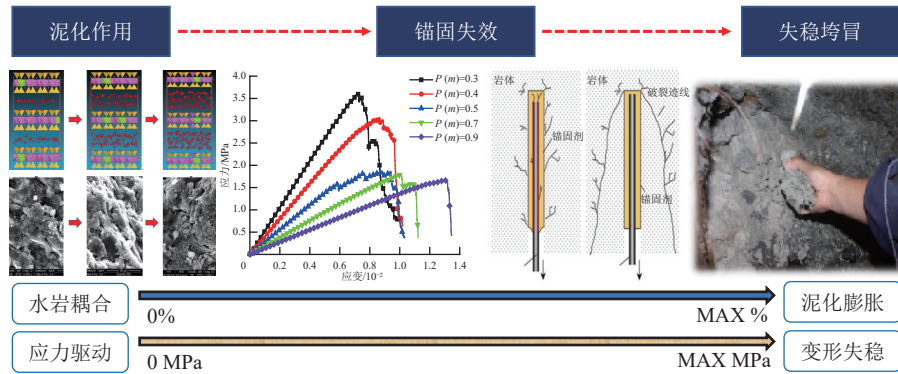


图6 应力-渗水耦合作用下软岩泥化巷道变形原因

Fig.6 Deformation causes of soft rock argillation roadway under the coupling effect of stress and water seepage

根据锚杆支护围岩强度强化理论^[47],锚固范围内岩体形成的承载结构在围岩破坏前后对锚固岩体的力学参数(弹性模量 E 、黏聚力 C 、内摩擦角 φ)均有提高作用,软岩泥化巷道围岩控制同样符合围岩强度强化思想,由于软岩泥化巷道围岩变形量较大,体现在由支护组成的锚固承载闭环向巷道空间收缩、挤压,高强锚固结构对围岩起到的加固作用存在局限性,单独采用锚杆支护很难控制围岩达到稳定,一般认为

$$u_0 \cdot \left(p_i + \frac{C}{\tan \varphi} \right)^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} = \frac{(1 + \mu)}{E} \left(p_0 + \frac{C}{\tan \varphi} \right)^{\frac{1}{\sin \varphi}} (1 - \sin \varphi)^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \cdot r \sin \varphi \quad (u_0 \leq a)$$

$$p_i = A_1 \cdot \exp(A_2 u_0 + A_3) \quad (u_0 > a) \quad (3)$$

式中: E 为围岩弹性模量, GPa ; μ 为围岩的泊松比; a 为弹塑性变形与破坏变形的临界值, m ; A_1 、 A_2 、 A_3 为系数参量。

2.1 “三高一环”强化承载支护结构

软岩泥化巷道围岩控制属于“支护-围岩”相互作用范畴内,在软岩巷道锚固控制工程实践中,首要的是早期形成较强的约束力,减小围岩结构变形以承载围岩复杂应力扰动影响。锚杆(索)支护过程中高预紧力、高刚度特性,能够保障早期围岩结构变形的静

围岩表层位移与支护阻力之间存在类双曲线特征,如式 (3) 所示。根据前文软岩泥化巷道变形破坏特征可知围岩控制的目的主要有 3 个方面: ① 抑制围岩泥化,降低泥质岩体水岩作用速率,形成围岩稳定力学结构基础; ② 强化锚固结构,保障锚固单体界面的充分粘结,维持锚固预应力的有效施加; ③ 控制围岩变形,形成巷道支护-围岩承载结构,保证煤矿生产过程安全畅通。

定控制,高强度特性能够提供较强的约束力,有利于围岩应力变形的约束与预紧力的扩散。因此,首先应形成巷道锚杆(索)高预紧力、高强度、高刚度和支护承载闭环的“三高一环”强化承载支护结构,一方面形成锚杆索强力支护应力场、构建围岩强化支护承载闭环,另一方面形成巷道主动隔水屏障作用模式,保障泥质软岩巷道顶板下沉、底鼓及帮部内挤的安全稳定控制,如图 7 所示。

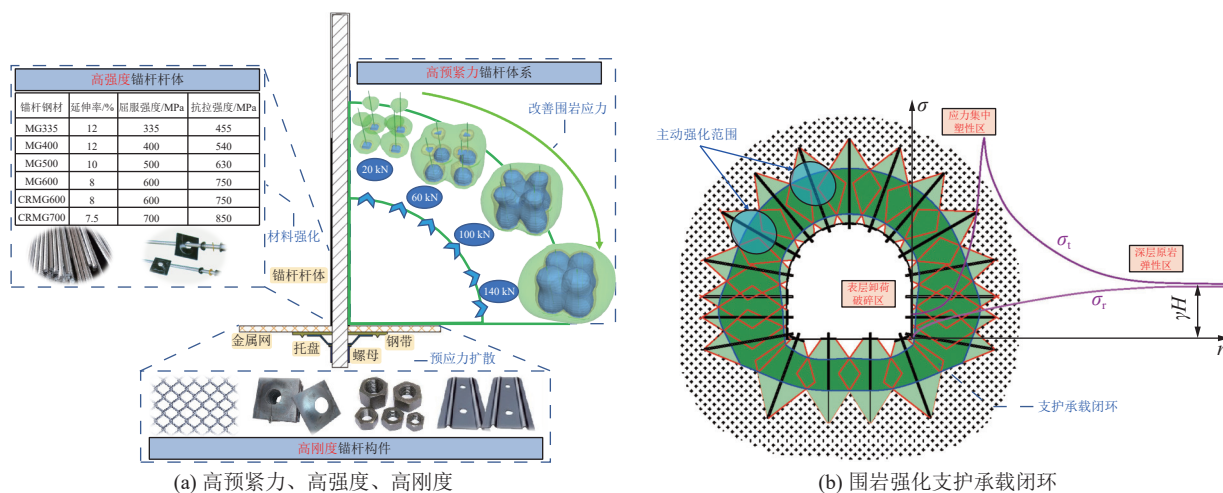


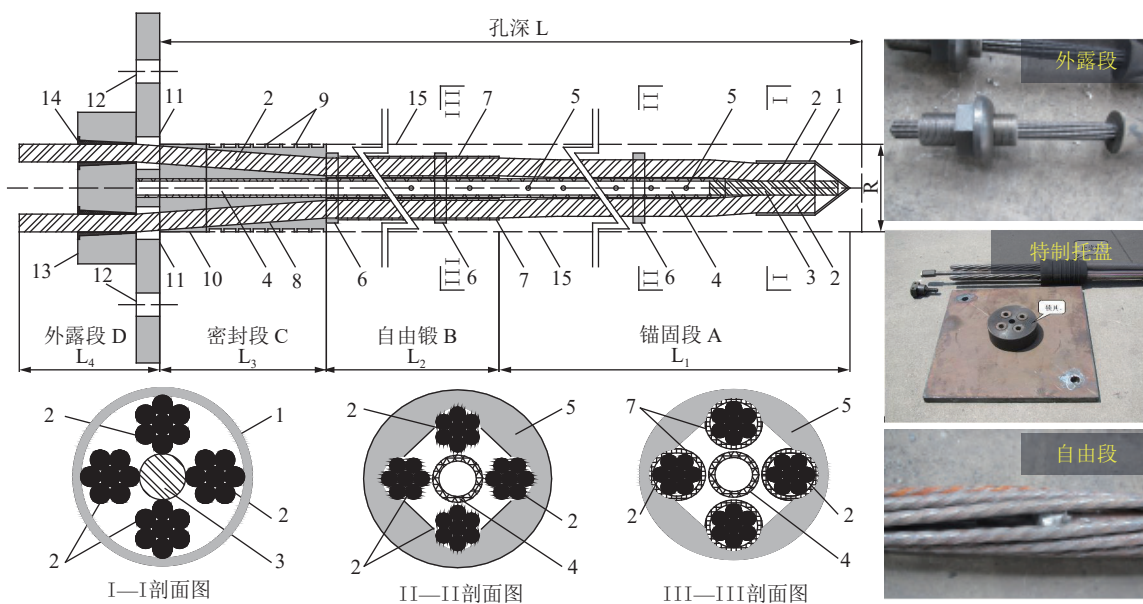
图7 “三高一环”强化承载支护结构

Fig.7 "Three high and one ring" to strengthen the bearing support structure

2.2 锚注一体泥质围岩性质改良

围岩注浆能够有效填充岩体裂隙,起到胶结作用强化锚固承载结构。注浆强化作用一定程度上能够恢复泥质软岩的变形特性,提升锚固岩体的力学参数 E 、 C 、 φ 等。图8为笔者团队自主研发设计的矿用新型多钢绞线组合中空注浆锚索束来实现锚注一体泥质围岩性质改良技术路径,该结构可弥补已有主动支护技术在适应强动压影响和围岩连续长时非线性变形方面的不足,传递高径向阻力至深部围岩,有效控制范围增至1.5倍以上。面对泥岩水化作用强、可注性和固结效果差等难题,提出滞后注浆理念,随着采

掘活动影响下岩体逐渐破坏,选取合适的时机向裂隙发育的巷道围岩施工注浆,充分保证了浆液可注性,并且从注浆材料流动性能、粒径尺寸等方面,采用有机-无机复合跨尺度粒径浆材,最小可注入尺寸降至 $20\ \mu\text{m}$,配合矿用新型多钢绞线组合中空注浆锚索束使用,如图9所示软弱泥质围岩巷道控制围岩变形所需支护强度较高,采用滞后注浆加固后围岩性质改良,围岩稳定所需支护阻力将下降,“三高一环”强化承载支护结构可充分发挥效果,同时将使得弹塑性变形-破坏临界点 a 位置迁移到更高的围岩变形状态,提高了锚固围岩的承载能力上限。

图8 矿用新型多钢绞线组合中空注浆锚索束^[48]Fig.8 A new type of hollow grouting anchor cable bundle with multiple steel strand for mine^[48]

2.3 旋喷注浆浅表桩群结构强化

泥质岩体锚固承载能力一般能够满足稳定控制

需求,但发生渗水劣化行为后锚固结构稳定性急剧降低,伴随复杂应力扰动影响,导致锚固结构失效、围岩

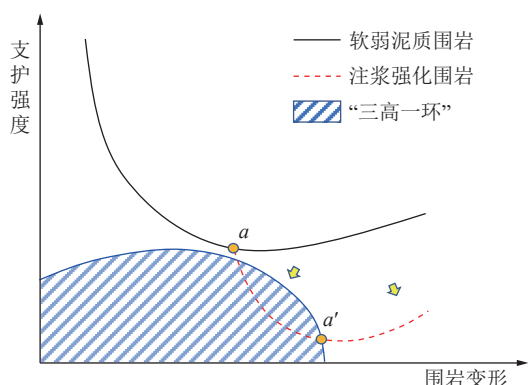


图9 泥质围岩性质改良“支护-围岩”特性曲线

Fig.9 Properties of mud surrounding rock improved support-surrounding rock characteristic curve

破碎、长时流变行为凸显,尤其是泥质巷道表层结构

锚杆施工困难、托盘等支护构件难以贴合。笔者团队通过创新井下高压旋喷成桩核心方法,研发了井下高压旋喷成桩机与双喷嘴旋喷头、大直径钻头(120 mm)、高压注浆泵(≥ 36 MPa)等配套装备,实现井下旋喷装备小型化,促使软弱破碎围岩在喷射冲蚀、离心力等作用下,形成强度、刚度兼备的岩-浆固结体柱状承载结构,保障承载结构锚固力的连续传递和有效扩散,如图10所示。泥质破碎岩体锚固结构抑制变形所需支护阻力远超过锚杆(索)支护性能,掘进初期采用高压旋喷加固软弱岩体后,围岩性质强化围岩破坏变形临界值增加,抑制围岩变形所需的支护阻力下降,浅表桩群配合“三高一环”锚固承载结构,充分发挥锚杆(索)支护作用,恢复软弱岩体锚固结构一定的承载能力,如图11所示。

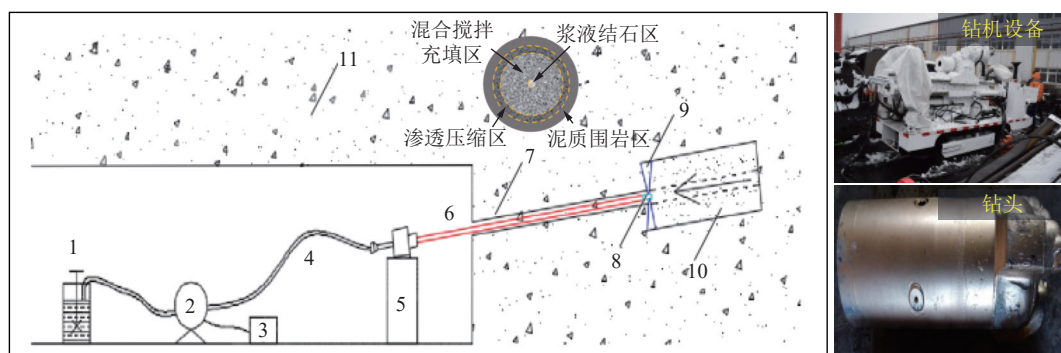
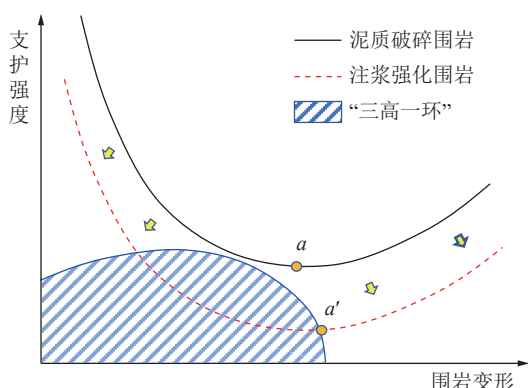
图10 旋喷注浆施工设备及示意^[43]Fig.10 Rotary grouting construction equipment and schematic diagram^[43]

图11 旋喷注浆结构强化“支护-围岩”特性曲线

Fig.11 Structure of rotary jet grouting strengthening support-surrounding rock characteristic curve

2.4 逐层锚喷泥化岩体强力置换

大量现场工程实践证明,泥质巷道围岩渗水劣化范围大、浅表流动性强,目前技术水平难以逆转泥质围岩渗水泥化行为。针对围岩物理状态趋近于液态,完全不具备承载性能的工程难题,提出逐层锚喷泥化岩体强力置换技术思想,如图12所示。首先采用高

强混凝土结构置换泥态围岩,多层锚固、钢丝绳嵌套、逐层喷浆构筑浅层承载结构,最后通过注浆强化深层围岩承载能力,重筑泥质巷道围岩性质、应力环境、锚固结构系统。如图13所示,完全泥化巷道围岩变形流动性强,弹塑性破坏阶段后呈现流动变形状态,不同于正常围岩特性曲线演化过程,常规支护手段无法实现围岩稳定控制,采用重新构筑围岩体结构恢复“支护-围岩”特性曲线,以重塑围岩为主要支护依托,构建局部多层次支护体系,实现强水化泥质岩体巷道围岩结构的逐步维控。

笔者结合近年来本研究团队开展并完成的软岩泥化巷道稳定控制相关课题工程实践研究,聚焦泥质软岩巷道围岩承载能力多层次强化,提出了煤矿软岩泥化巷道梯级强化控制原理,在保证“支护-围岩”相互关系中的高预紧力、高刚度、高强度锚杆(索)支护承载闭环的前提下,根据泥岩水化程度不同工程特征,形成了“一级”锚注一体泥质围岩性质改良、“二级”旋喷注浆浅表桩群结构强化、“三级”逐层锚喷泥化岩体强力置换重要技术原理,如图14所示。

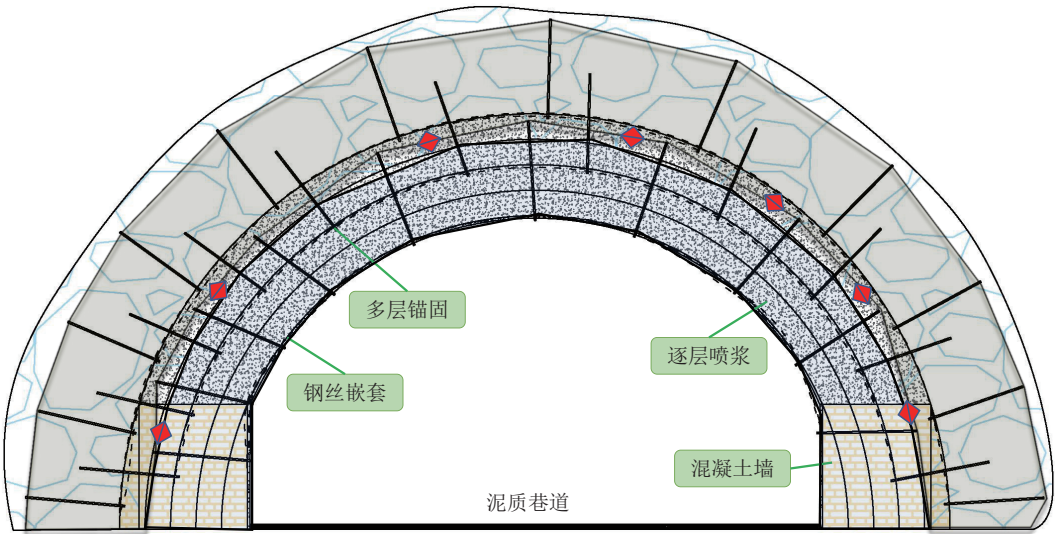


图 12 逐层锚喷泥化岩体强力置换示意

Fig.12 Schematic diagram of strong displacement of rock mass by layer shotcrete

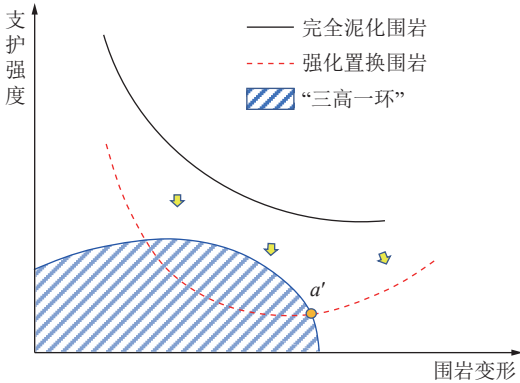


图 13 泥化围岩强力置换“支护-围岩”特性曲线

Fig.13 Strong displacement of mud surrounding rock support - surrounding rock characteristic curve

3 工程实践

3.1 锚注一体泥质围岩改性强化技术实践

芦岭煤矿-590 西轨大巷剧烈变形的根本原因在于邻近工作面回采超前支承压力及底板渗流-应力耦合作用,裂隙水渗流导致底板岩层几乎为完全浸水状态;同时受回采动压的影响,底板裂隙发育,底板稳定性持续恶化会直接影响到两帮稳定性。现场选择采用矿用新型多钢绞线组合中空注浆锚索束控制受强采动影响下煤层底板巷道的剧烈变形。通过提高注浆压力使浆液充满钻孔,实现中空注浆锚索束全长锚固,对围岩起到黏结固化效果,从而有效地控制围岩变形并保证巷道支护的长期稳定,形成一套典型的泥质巷道围岩锚固性能强化控制方法。

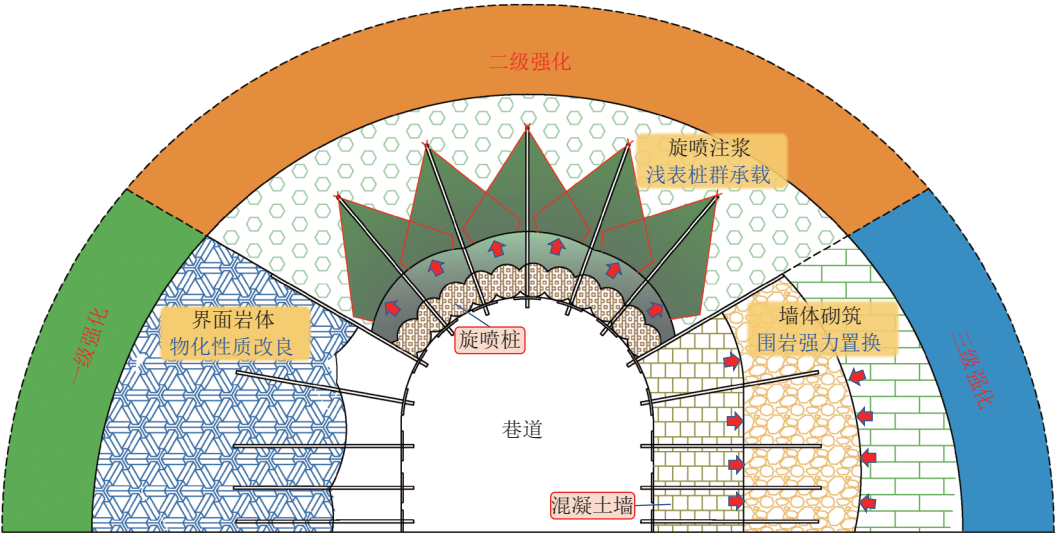


图 14 煤矿软岩泥化巷道梯级强化控制技术路径

Fig.14 Technical path of step strengthening control of soft rock argillation roadway in coal mine

底板中空注浆锚索方案设计与实施情况如图15所示,注浆材料采用硫铝酸盐水泥,主要作用是封堵大型裂隙和加固浅层破碎围岩。注浆锚杆孔深2.8 m;注浆锚杆长度为2.0 m,采用4分钢管制成。注浆压力一般不超过3.0 MPa,从底角眼孔开始依次向上低

压注浆。中空注浆锚索束 $\phi 22 \times 6\ 300$ mm,排距1 600 mm,搭配300 mm $\times$ 300 mm $\times$ 15 mm高强度金属托盘,注浆时机根据矿压监测数据确定,初始实施滞后迎头30 m,注浆压力为5~7 MPa。

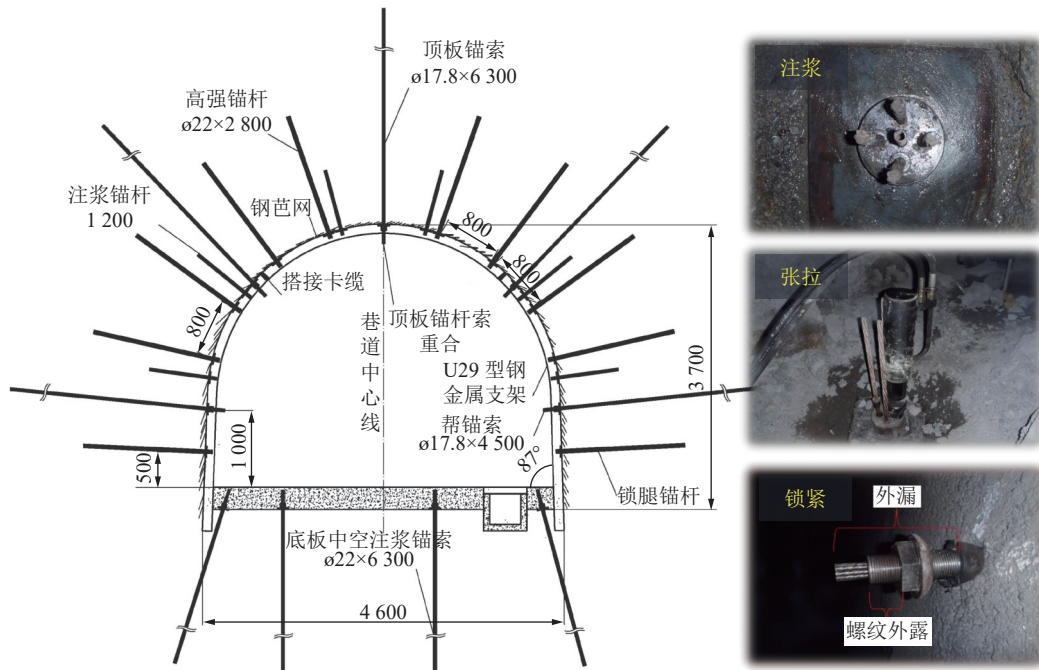


图15 底板中空注浆锚索方案设计与实施情况

Fig.15 Design and implementation of anchor cable for hollow grouting on bottom plate

注浆工作完成后进行了钻孔窥视查看注浆效果,巷道部分测点表面移近量与钻孔窥视注浆效果如图16所示,围岩裂隙区注浆充填效果较好,巷道围岩整体承载能力提升,巷道顶底板及两帮移近量均较少,在巷道掘进一段时间后巷道围岩表面移近速度迅速降低并维持在一个较小的值;围岩完整性较好,基本能保持稳定,说明采用中空注浆锚索束强化加固能够有力地控制受强采动影响下巷道围岩的稳定性和整体性,支护方案达到了预期的目标,控制变形效果较好。锚注一体泥质围岩改性强化技术应用所采用的

矿用新型多钢绞线组合中空注浆锚索束相比较普通注浆锚杆索成本较高,但锚索束强度大、锚固能力稳定,降低支护密度30%、劳动强度降低,不仅有效控制巷道稳定性和返修率,同时优化了矿井工人劳动施工环境,适用于大多数受渗水泥化影响的煤矿巷道。

3.2 旋喷注浆浅表桩群结构强化技术实践

湖北煤矿8204机巷在掘进前,参考相邻条件巷道顶底板及两帮软弱岩体破碎且流变现象显著,掘进期采用水平旋喷注浆加固破碎泥质岩体工程实践,通过观测水平旋喷在破碎岩体中的成桩直径和浆液渗透情况等,综合判断围岩承载能力,及时调整支护方案设计,形成一套系统的破碎泥质软岩巷道超前旋喷加固围岩控制流程。

工程现场采用高压旋喷清水扩孔再进行低压注水泥浆工艺,工艺流程及施工现场如图17所示。钻孔仰角 $8^{\circ} \sim 10^{\circ}$,孔深25 m,钻头直径为123 mm,钻进速度根据现场动态调整,将高压旋喷管伸入钻孔底部,旋喷压力23 MPa,同时钻杆旋转缓慢后退,旋转速度为60 r/min,后退速度为0.2 m/min,利用高压水的冲刷、击碎切割作用,扩大钻孔孔径,改变孔径范围内围岩体结构,当旋喷高压水至孔口2 m时停止旋喷,进

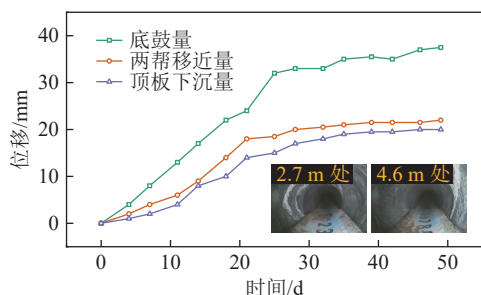


图16 巷道围岩变形曲线与钻孔窥视注浆效果

Fig.16 Deformation curve of roadway surrounding rock and grouting effect of borehole observation

行封孔作业,选用 P.O 325 硅酸盐水泥,水灰比为 0.8,注浆压力为 4~5 MPa,对完成旋喷扩孔后的钻孔水泥注浆,现场施工过程水岩作用时间有限,且掘进期周围岩体裂隙发育未受强采动影响,率先在扩孔范围内形成岩-浆固结体,巷道表面稳定施加支护结构,实时监测旋喷成孔范围、岩浆固结强度、水泥桩直径等。

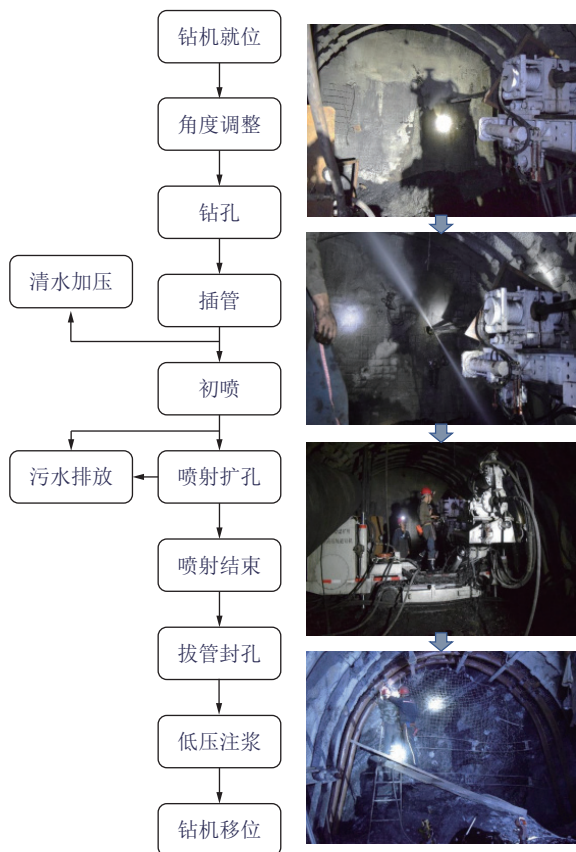


图 17 旋喷注浆浅表桩群结构强化技术工艺流程

Fig.17 Process flow of strengthening technology of shallow surface pile group by rotary jet grouting

由图 18 可知,扩孔注浆后的岩浆体呈现椭圆状,高压水对破碎岩体的切割破坏作用明显。注入水泥浆液后,形成较好的椭圆状岩浆固结体,固结体长度大约在 400 mm 左右,扩孔效果良好,巷道围岩变形量总体较小且逐渐稳定。旋喷注浆浅表桩群结构强化技术应用效果明显,相比同类治理工艺如超前管棚、超前注浆等工艺存在适应性差,围岩稳定性弱等问题,旋喷注浆整机虽然成本较高,但控制效果好,能够有效改善巷道稳定性和降低返修率,保障掘进快速通过和煤炭高效运输,为富水环境下受采动影响强烈的松散破碎泥质巷道治理提供了新思路。

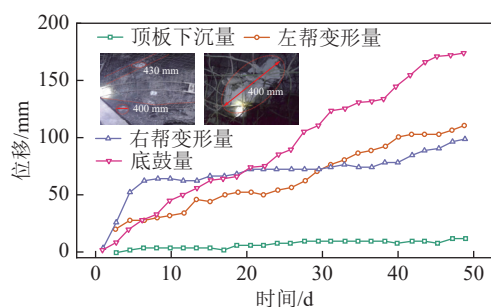


图 18 巷道围岩变形曲线与成桩效果

Fig.18 Deformation curve of roadway surrounding rock and pile forming effect

3.3 逐层锚喷泥化岩体强力置换技术实践

朱仙庄矿 II 水平第二皮带大巷在高承压水断层破碎带围岩完全泥化状态下,常规的巷道控制技术已无法满足巷道稳定。亟需在疏排高承压水的基础上,重新人工构筑围岩,恢复结构承载性能。具体技术实施方案如图 19 所示,通过孔、洞疏导承压水,泥岩置换,逐步注浆,逐层锚喷的方式恢复巷道远近承载结构。

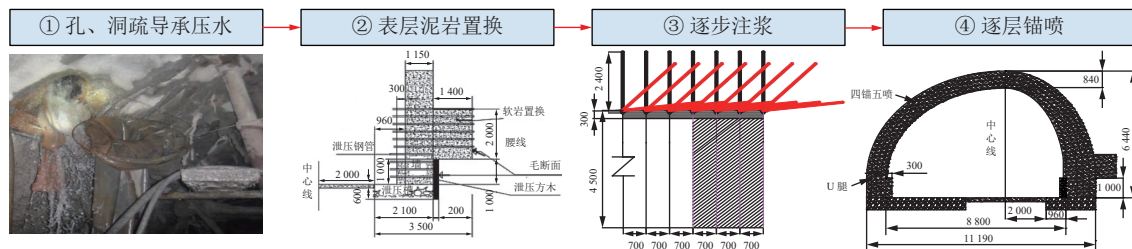


图 19 逐层锚喷泥化岩体强力置换技术实施过程

Fig.19 Implementation process of strong displacement technology of rock mass with layer by layer bolting and blasting

工程现场具体采取出水集中处导水洞导水、出水分散处管路疏水的方式,有效地降低断层带高承压水积聚的破坏势能。进而采取大断面封闭,小断面置换的方式,泥化围岩置换成混凝土墙体;每个小断面及时注浆加固,超前注浆锚杆长度 1 800 mm,眼孔深度 1 800~2 400 mm,材料选用 525 号水泥配制成的无机

浆液,形成小断面板块到大断面的叠加成巷,从而增加软岩巷道整体支护支撑力的注浆方式;断面形成后再次通过多层次锚杆钢绞线、注浆锚杆与胶结后的围岩紧密联合作用,每次喷浆厚度不小于 100 mm,间隔 700 mm 采用 GM22/2 500 mm 锚杆加固,通过钢丝绳嵌套连结,形成支护整体,一次围岩浅部注浆范围在

1 600~2 500 mm, 二次深部注浆控制范围在 4 000~6 000 mm。

采用逐层锚喷泥化岩体强力置换技术对巷道进行修复后, 围岩的变形过程平缓, 并逐渐趋于稳定。于交叉点处观测巷道表面位移, 整体位移量较小, 呈现稳定状态。修复后围岩变形曲线与成巷效果如图 20 所示。逐层锚喷泥化岩体强力置换技术所包含的孔洞导水、泥岩置换、逐步注浆和逐层锚喷等施工工序虽然复杂, 但面对巷道表层完全泥态围岩, 通过重塑围岩构建局部多层次支护体系, 实现强水化泥质岩体巷道围岩结构的逐步维控, 恢复承载性能是解决工程难题的关键, 该类工程巷道泥化区域范围有限, 重在解决安全隐患问题, 保障煤炭资源安全生产。

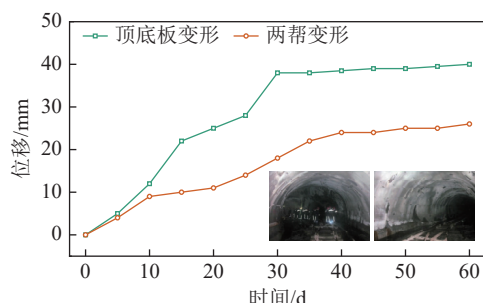


图 20 巷道围岩变形曲线与成巷效果

Fig.20 Deformation curve of roadway surrounding rock and roadway forming effect

4 结 论

1) 通过实验分析典型软岩泥化巷道泥质围岩相对黏土矿物含量、细观浸水裂隙结构与宏观支护-围岩变形特征, 表明富水环境和应力环境是诱发泥质巷道变形破坏的重要因素, 围岩泥化失稳重点体现在泥质岩体水化作用、锚固结构承载失效、围岩泥态垮冒收敛渐进破坏特征, 实现应力-渗水耦合作用下巷道围岩承载结构稳定控制是关键基础。

2) 提出软岩泥化巷道梯级强化控制原理, 即在保障“支护-围岩”相互作用关系中高预紧力、高刚度、高强度锚杆(索)支护承载闭环结构的前提下, 根据泥岩水化程度判断工程失稳控制方法, 形成了锚注一体泥质围岩性质改良、旋喷注浆浅表桩群结构强化、逐层锚喷泥化岩体强力置换 3 项重要技术路径。

3) 基于煤矿软岩泥化巷道梯级强化控制原理, 以淮北矿区芦岭、涡北、朱仙庄煤矿典型软岩泥化巷道为工程背景, 现场应用了自主研发的矿用新型多钢绞线组合中空注浆锚索束, 首次在煤矿井下开展了高压旋喷注浆工程实践, 采用了人工构筑岩体强力置换泥态围岩的方式控制软岩泥化巷道, 整体控制效果较好,

多层次强化了泥质巷道围岩承载能力, 保障了围岩长期安全稳定。

参考文献(References):

- [1] 何满潮. 深部软岩工程的研究进展与挑战[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1409-1417.
HE Manchao. Progress and challenges of soft rock engineering in depth[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1409-1417.
- [2] 袁亮, 薛俊华, 刘泉声, 等. 煤矿深部岩巷围岩控制理论与支护技术[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 535-543.
YUAN Liang, XUE Junhua, LIU Quansheng, et al. Surrounding rock stability control theory and support technique in deep rock roadway for coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 535-543.
- [3] 康红普. 我国煤矿巷道围岩控制技术发展 70 年及展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 1-30.
KANG Hongpu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 1-30.
- [4] 康红普, 李全生, 张玉军, 等. 我国煤矿绿色开采与生态修复技术发展现状及展望[J]. 绿色矿山, 2023(1): 1-24.
KANG Hongpu, LI Quansheng, ZHANG Yujun, et al. Development status and prospect of greenmining and ecological restoration technology of coal mines in China[J]. Journal of Green Mine, 2023(1): 1-24.
- [5] 李桂臣, 李菁华, 孙元田, 等. 泥岩多尺度模型与水岩作用特性研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1138-1154.
LI Guichen, LI Jinghua, SUN Yuantian, et al. Advance of multi-scale study on both analytic models and water-rock interaction characteristics of mudstone[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1138-1154.
- [6] 孟庆彬, 韩立军, 乔卫国, 等. 深部高应力软岩巷道变形破坏特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 481-486.
MENG Qingbin, HAN Lijun, QIAO Weiguo, et al. Research on deformation failure characteristics of the deep high-stress soft rock roadways[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(4): 481-486.
- [7] LIU B L, YANG H Q, KAREKAL S. Effect of water content on argillization of mudstone during the tunnelling process[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(2): 799-813.
- [8] 张农, 李桂臣, 许兴亮. 顶板软弱夹层渗水泥化对巷道稳定性的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(6): 757-763.
ZHANG Nong, LI Guichen, XU Xingliang. Argillization of a roof weak interlayer due to water seepage and its influence on roadway stability[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(6): 757-763.
- [9] 赵启峰, 张农, 彭瑞, 等. 大断面泥质巷道顶板离层突变垮冒演化相似模拟实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6): 1107-1114.
ZHAO Qifeng, ZHANG Nong, PENG Rui, et al. Similarity simulation experimental study on abrupt collapse of roof separation in large cross-section argillaceous roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(6): 1107-1114.

- Engineering, 2018, 35(6): 1107–1114.
- [10] GUO X F, LI Y E, ZHOU G D, et al. Stability analysis and reasonable layout of floor drainage roadway above confined water and under mining influence[J]. *Geofluids*, 2021, 2021: 5578717.
- [11] SAKHNO I, SAKHNO S. Numerical studies of floor heave mechanism and the effectiveness of grouting reinforcement of roadway in soft rock containing the mine water[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 170: 105484.
- [12] 程敬义, 魏泽捷, 白纪成, 等. 基于爆破卸压的深部构造应力富水软岩巷道底鼓控制技术[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(7): 117–126.
- CHENG Jingyi, WEI Zejie, BAI Jicheng, et al. Study on floor heave control technology of deep tectonic stress water-rich soft rock roadway based on blasting pressure relief[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(7): 117–126.
- [13] 许兴亮, 张农. 富水条件下软岩巷道变形特征与过程控制研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2007, 36(3): 298–302.
- XU Xingliang, ZHANG Nong. Study of control process deformation behavior and of soft rock drift under rich water condition[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, 36(3): 298–302.
- [14] 李桂臣, 张农, 许兴亮, 等. 水致动压巷道失稳过程与安全评判方法研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2010, 27(3): 410–415, 420.
- LI Guichen, ZHANG Nong, XU Xingliang, et al. Study on water-caused instability process of the dynamic pressure roadway and safety assessment[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2010, 27(3): 410–415, 420.
- [15] YANG Y S, FANG Z M, JI G Y, et al. Study on mechanical properties and control technology of surrounding rock in the fracture zone of a roadway[J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021(1): 6628593.
- [16] 黄炳香, 张农, 靖洪文, 等. 深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(3): 911–926.
- HUANG Bingxiang, ZHANG Nong, JING Hongwen, et al. Large deformation theory of rheology and structural instability of the surrounding rock in deep mining roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 911–926.
- [17] 李桂臣, 邵泽宇, 孙元田, 等. 煤矿掘采空间垮塌岩体稳定性与救援通道构建[J]. *绿色矿山*, 2024(1): 11–20.
- LI Guichen, SHAO Zeyu, SUN Yuan Tian, et al. Stability of collapsed rock body in coal mine excavation space and construction of rescue channel[J]. *Journal of Green Mine*, 2024(1): 11–20.
- [18] 李廷春, 卢振, 刘建章, 等. 泥化弱胶结软岩地层中矩形巷道的变形破坏过程分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(4): 1077–1083.
- LI Tingchun, LU Zhen, LIU Jianzhang, et al. Deformation and failure process analysis of rectangular roadway in muddy weakly cemented soft rock strata[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(4): 1077–1083.
- [19] 李桂臣, 张农, 王成, 等. 高地应力巷道断面形状优化数值模拟研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2010, 39(5): 652–658.
- LI Guichen, ZHANG Nong, WANG Cheng, et al. Optimizing the section shape of roadways in high stress ground by numerical simulation[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2010, 39(5): 652–658.
- [20] LI G, HU Y, TIAN S M, et al. Analysis of deformation control mechanism of prestressed anchor on jointed soft rock in large cross-section tunnel[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(12): 9089–9103.
- [21] QIAN D Y, CUI Q, JIAO H X, et al. Failure mechanism and control countermeasures for argillaceous surrounding rock of horse-head roadway under high stress[J]. *Materials*, 2023, 16(11): 4180.
- [22] 吴拥政, 郭罡业, 汪占领. 弱含水层下软岩巷道“一隔三强”控制原理与技术[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 72–82.
- WU Yongzheng, GUO Gangye, WANG Zhanling. The control principle and technology of “one obstruct and three strengthen” of soft rock roadways below weak aquifers[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 72–82.
- [23] 李廷春, 张仕林, 卢振, 等. 泥化弱胶结软岩巷道底板变形破坏机理分析[J]. *湖南科技大学学报 (自然科学版)*, 2015, 30(1): 1–7.
- LI Tingchun, ZHANG Shilin, LU Zhen, et al. Analysis of deformation and failure mechanism of roadway in the mud weakly consolidated soft rock strata[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 30(1): 1–7.
- [24] 阚甲广, 张农, 李桂臣, 等. 泥化巷道底板控制技术研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2011, 28(3): 356–360.
- KAN Jiaguang, ZHANG Nong, LI Guichen, et al. Floor controlling technology of argillization roadway[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(3): 356–360.
- [25] MA Z Q, LIANG X C, FU G S, et al. Experimental and numerical investigation of energy dissipation of roadways with thick soft roofs in underground coal mines[J]. *Energy Science & Engineering*, 2021, 9(3): 434–446.
- [26] 李桂臣, 杨森, 孙元田, 等. 复杂条件下巷道围岩控制技术研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(6): 29–45.
- LI Guichen, YANG Sen, SUN Yuan Tian, et al. Research progress of roadway surrounding strata rock control technologies under complex conditions[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 29–45.
- [27] LIN H, YANG R S, LI Y L, et al. Deformation mechanism and control technology of coal roadway with thin sand-mudstone interbed roof[J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2023, 40(1): 421–433.
- [28] 朱光亚, 李思超, 柏建彪, 等. 弱胶结富水巷道合理支护技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(3): 7–11.
- ZHU Guangya, LI Sichao, BAI Jianbiao, et al. Study on rational support technology of mine weakly consolidated watery roadway[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(3): 7–11.
- [29] ZHU L, YAO Q L, XU Q, et al. Large deformation characteristics of surrounding rock and support technology of shallow-buried soft rock roadway: A case study[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(2): 687.
- [30] XIANG Z, ZHANG N, PAN D J, et al. Basic consolidation and impermeability laws for nano-silica-Sol grouted mudstone[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 403: 133121.
- [31] CHEN Y L, LI Q, PU H, et al. Modeling and simulation of deformation mechanism of soft rock roadway considering the mine water[J]. *Geofluids*, 2020, 2020: 8812470.
- [32] ZENG C L, ZHOU Y J, XIAO Y H, et al. Research on soft rock damage softening model and roadway deformation and failure char-

- acteristics[J]. *Materials*, 2022, 15(17): 5886.
- [33] LIN W G, CHENG J L, LI D L, et al. Deformation characteristics and control technology of roadway in water-rich soft rock[J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 2234334.
- [34] 高延法, 何晓升, 陈冰慧, 等. 特厚富水软岩巷道钢管混凝土支架支护技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(1): 84–89.
GAO Yanfa, HE Xiaosheng, CHEN Binghui, et al. Study on support technology of concrete-filled steel tubular in roadway with huge thick and rich water soft rock[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(1): 84–89.
- [35] LI G, MA F S, GUO J, et al. Study on deformation failure mechanism and support technology of deep soft rock roadway[J]. *Engineering Geology*, 2020, 264: 105262.
- [36] 李磊, 文志杰. 软岩反底拱优化加固技术及应用: 以上海庙矿区为例[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(4): 1242–1252.
LI Lei, WEN Zhijie. Optimal floor heave control technology and its engineering application in soft rock roadway: A case study of Shanghaimiao mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(4): 1242–1252.
- [37] JING W, WANG X, HAO P W, et al. Instability mechanism and key control technology of deep soft rock roadway under long-term water immersion[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021(1): 6670379.
- [38] 康永水, 耿志, 刘泉声, 等. 我国软岩大变形灾害控制技术与方法研究进展[J]. *岩土力学*, 2022, 43(8): 2035–2059.
KANG Yongshui, GENG Zhi, LIU Quansheng, et al. Research progress on support technology and methods for soft rock with large deformation hazards in China[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(8): 2035–2059.
- [39] 侯朝炯. 深部巷道围岩控制的关键技术研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(5): 970–978.
HOU Chaojiong. Key technologies for surrounding rock control in deep roadway[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(5): 970–978.
- [40] CHEN X Y, WANG X F, ZHANG D S, et al. Creep and control of the deep soft rock roadway (DSRR): Insights from laboratory testing and practice in Pingdingshan mining area[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(1): 363–378.
- [41] 王襄禹, 张宏伟, 李国栋. 弱胶结富水顶板巷道围岩控制技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(1): 88–92.
WANG Xiangyu, ZHANG Hongwei, LI Guodong. Study on surrounding rock control technology of weakly cemented water-rich roof in roadway[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(1): 88–92.
- [42] 卫英豪. 富水条件下泥岩巷道长时变形失稳机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
WEI Yinghao. Study on long-term deformation and instability mechanism of mudstone roadway under water-rich conditions[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [43] 孙元田. 深部松散煤体巷道流变机理研究及控制对策[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
SUN Yuan Tian. Study on rheological mechanism of deep loose coal roadway and its control countermeasures[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [44] 蒋作函. 渗水泥化巷道失稳机理与安全控制对策[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
JIANG Zuohan. Instability mechanism and safety control countermeasures of cemented roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [45] H. 卡斯特奈著. 同济大学《隧道与坑道静力学》翻译组译. 隧道与坑道静力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [46] 侯朝炯, 等. 巷道围岩控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2013.
- [47] 侯朝炯, 勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(3): 342–345.
HOU Chaojiong, GOU Panfeng. Mechanism study on strength enhancement for the rocks surrounding roadway supported by bolt[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(3): 342–345.
- [48] 李桂臣, 孙辉, 张农, 等. 基于锚索剪应力分布规律的新型高强锚索束应用研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(5): 1008–1014.
LI Guichen, SUN Hui, ZHANG Nong, et al. Application research on new high-strength anchor cable bundle based on the shear stress distribution of anchor cable[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(5): 1008–1014.