



移动扫码阅读

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 Yuantian, et al. Research progress of roadway surrounding strata rock control technologies under complex conditions [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 29-45.

复杂条件下巷道围岩控制技术研究进展

李桂臣^{1,2},杨森^{1,2},孙元田^{1,2},许嘉徽^{1,2},李菁华^{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:煤炭资源开采正不断向深部迈进,面临的复杂地质条件问题也日益突出。深部资源开采、地下空间开挖等深部岩石工程活动迅速增加,而这些工程活动的开展和巷道的稳定性密切相关。重点总结了复杂条件下煤矿巷道围岩控制领域的相关成果,梳理了当下巷道围岩控制面临的主要复杂条件,划分了工程地质条件和开采技术条件 2 类巷道复杂条件。阐明了各类复杂条件下巷道围岩的变形破坏特征,指出了围岩应力、围岩性质和支护结构是巷道围岩控制的 3 类基本对象,明确了围岩应力环境恶化、围岩性质劣化和支护体性能弱化 3 种失稳形式,在此基础上揭示了不同地质环境与采掘时空关系下回采巷道的失稳机制。分析了现阶段困难巷道围岩控制基本机理:改善围岩应力环境、改良围岩性质与强化围岩承载结构;详述了基于卸压、改性、支护与协同控制的围岩控制技术在不同复杂条件巷道的阶段性理论研究与技术应用现状。同时,分析了泥质采动巷道渗流失稳与围岩控制的典型工程案例,揭示了该类复杂困难条件的巷道围岩失稳机理,提出了疏水泄压、泥岩置换、分级注浆、高强度封层支护结构与底板结构等多种方法协同作用的高强度综合修复与控制技术体系。最后,基于上述 4 方面研究,结合工程实践,展望了未来复杂条件下巷道围岩控制技术的发展趋势。

关键词:复杂条件;巷道围岩;失稳机理;围岩控制;巷道支护

中图分类号:TD353 文献标志码:R 文章编号:0253-2336(2022)06-0029-17

Research progress of roadway surrounding strata rock control technologies under complex conditions

LI Guichen^{1,2}, YANG Sen^{1,2}, SUN Yuantian^{1,2}, XU Jiahui^{1,2}, LI Jinghua^{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 mining of coal resources is constantly advancing to the depths, and the problems of complex geological conditions are becoming increasingly prominent. Deep rock engineering activities such as deep resource mining and underground space excavation are increasing rapidly, and the development of these engineering activities is closely related to the stability of roadway. This paper focuses on summarizing the relevant achievements in the field of coal mine roadway enclosure control under complex conditions, combining the main complex conditions faced by the current roadway surrounding rock control, and dividing the engineering geological conditions and mining technical conditions into two types of complex roadway conditions. The deformation and failure characteristics of the surrounding rock of the roadway under various complex conditions are clarified, and it is pointed out that the surrounding rock stress, surrounding rock properties and supporting structure are the three basic objects of the surrounding rock control of the roadway. Three forms of instability, namely, deterioration of the stress environment of the surrounding rock, deterioration of the nature of the surrounding rock and weakening of the performance of the support body, are clearly identified. On this basis, the instability mechanisms of mining roadway under different geological environments and spatial-temporal relationship of mining are revealed. The basic mechanism of surrounding rock control in difficult roadways at this stage is analyzed: improving the surrounding rock stress environment, improving the surrounding rock properties and strengthening the surrounding rock bearing structure. The current status quo of the stage theoretical research and technology application of the surrounding rock control

收稿日期:2021-10-02 责任编辑:朱恩光 DOI:10.13199/j.cnki.est.2022-0304

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52174089, 52104106);中国矿业大学未来杰出人才助力计划资助(2022WJJCRCZL024)

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

通讯作者:杨森(1997—),男,山西临汾人,硕士研究生。E-mail:ts2020064a31tm@cumt.edu.cn

technology based on pressure relief, modification, support and synergistic control in different complex conditions of the roadway was also detailed. At the same time, the typical engineering cases of seepage stability and surrounding rock control in muddy mining roadway were analyzed, revealing the mechanism of surrounding rock instability in such complex and difficult conditions of roadway, and proposing a high-strength integrated repair and control technology system with the synergy of various methods such as water drainage and pressure relief, mud rock replacement, graded grouting, high-strength sealing support structure and bottom plate structure. Finally, based on the above four aspects of research, combined with engineering practice, the future development trend of roadway enclosure control technology under complex conditions is prospected.

Key words: complex conditions; roadway surrounding rock; instability mechanism; surrounding rock control; roadway support

0 引言

目前我国每年煤矿井下需要新掘巷道超过10 000 km,其中煤巷占比极高^[1-2]。巷道在煤矿开采过程中承担着举足轻重的任务,巷道的稳定对生产运输、材料运输、通风行人等系统的正常运转具有重要意义。随着理论知识的不断进步,工业技术的不断革新,巷道围岩控制积累了丰富的经验与成就。但是近年来,伴随着煤炭资源开采逐步向深部转移的趋势,高地应力、软岩、强采动影响、冲击矿压以及富水环境等复杂困难条件也越来越多,其条件特殊性、多样性和随机性给巷道围岩控制带来了严峻挑战^[3-4]。以往的支护理念与方法在应对复杂地质条件和复杂赋存条件时适应性不足等问题日益突出。围绕复杂困难条件巷道围岩控制,科研工作者展开了理论分析、实验室试验与现场应用等一系列研究,取得了丰富的理论成果与技术成果,不断丰富巷道围岩控制技术体系,为煤矿安全生产提供了坚实有力的保障。笔者总结了我国现阶段在复杂条件下巷道围岩控制领域所取得的相关成果,简要介绍了近年来巷道围岩控制方面的创新研究,最后展望了未来巷道围岩控制发展的方向。

1 巷道围岩控制复杂条件分析

康红普院士^[5]将我国复杂困难巷道划分为9类,包括遇水软化膨胀巷道、极破碎巷道、深部高应力巷道、大断面巷道、强动力巷道、煤顶/全煤巷道、沿空掘巷、沿空留巷和底鼓巷道。经过数十年发展,学者深入研究采动巷道失稳机理,已经形成较为体系的防治方法^[6]。随着矿井煤炭资源开采强度不断提高,极破碎巷道的工程背景逐渐从地质构造扩充到急倾斜煤层和近距离采空区,对超前加固技术提出了新的要求^[7-9]。根据近十年来巷道围岩控制原理和技术的发展,在已有分类标准基础上进行整合和补充,将复杂条件分为富水环境、地质构造、深部高应力、软弱围岩、强烈动压、软弱夹层顶板、冲击矿压、大断面、坚硬顶板和极近距离煤层遗留煤

柱等。

1.1 巷道复杂条件影响因素分析

1)富水环境。顶板砂岩含水层、底板灰岩含水层与邻近采空区积水是煤矿井下常见水源类型。当围岩裂隙导通含水层形成渗水通道,水岩作用将使围岩出现力学性能劣化与承载结构失效。特别是煤系地层中泥岩、页岩、泥质砂岩等弱胶结岩体在水岩作用下还将发生显著的泥化、软化、崩解现象^[10]。同时,金属材料支护结构在水环境中会发生显著的性能退化现象,如图1所示^[11]。金属棚架与金属网在顶板淋水情况下出现表面腐蚀,导致其强度、塑性、韧性等力学性能降低。在围岩渗水区域内,锚杆杆体-锚固剂-围岩耦合界面强度显著劣化,诱发顶板松脱垮冒、帮部松散煤体垮冒等事故。



图1 淮北矿区桃园煤矿受水侵蚀顶板支护失效^[11]

Fig.1 Roof support failure caused by water erosion in Taoyuan Coal Mine of Huabei Mining Area^[11]

2)地质构造。在煤系地层中,断层、褶曲、陷落柱等地质构造是常见不良地质现象。在地质构造区域附近,地层中通常因强构造应力而形成破碎带。在强构造应力区域中,巷道围岩极易产生大变形、强流变和严重底鼓,特别在岩体严重破碎区域内,通常并发网兜、漏顶、连续片帮、大范围垮冒等碎胀变形^[12]。同时,由于构造应力具有不对称特性,支护体承载结构可能出现偏载现象,引发围岩非对称变形与支护体破坏失效。当断层、陷落柱以泥质填充物为主时,水岩作用下围岩还极易发生剪切滑移破坏,引发围岩整体承载结构的破坏^[13]。

3)深部高应力。我国中东部煤矿大部分已经进入深部开采阶段,迫使巷道围岩面对深部复杂力学环境^[14]。在高地应力环境作用下,煤系岩层从脆性转为延性(图2^[15]),巷道围岩发生长时间流变、显著大变形、围岩破碎松散。顶板出现不均匀变形、台阶下沉、大面积网兜或冒落,帮部片帮现象普遍^[16]。同时,巷道塑性破坏区范围进一步扩大,通常超出普通锚杆锚固长度,导致发生锚杆(索)脱落与锚固体整体挤出的现象^[17]。特别在深部高地应力软岩巷道中,“前掘后修、边采边修”的困境仍未被较好地解决,严重限制着采掘效率的提高。

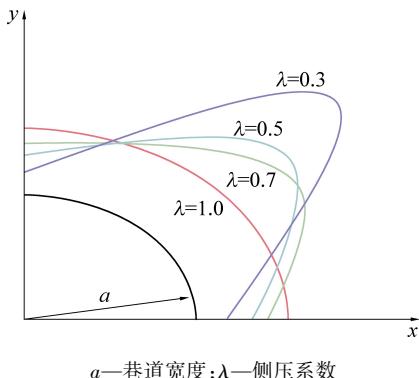


图2 侧压系数与塑性区形态^[15]

Fig.2 Relationship between side pressure coefficient and shape of plastic zone^[15]

4)软弱围岩。我国西北地区煤系地层以中生代侏罗白垩纪为主,岩性普遍呈现弱胶结特性,这导致巷道围岩控制过程中,极易出现锚杆脱落及锚固力快速衰减现象^[18]。特别是煤系地层中的泥质岩体,不仅力学性能较差,对支护强度要求高,还具有遇水膨胀、泥化、崩解、劣化围岩承载性能等特性。同时,厚煤层分层开采过程中,托顶煤回采巷道通常具有掘进期间自稳定性差、强回采扰动下软弱顶煤碎胀变形等特点,导致频繁出现顶煤剥离、下沉形成网兜,甚至出现金属网变形折断、浅部锚杆支护失效等现象,如图3所示^[19]。

5)强烈动压。当前煤矿开采普遍面临采掘接替紧张的问题。为提高煤炭资源的采出率,小煤柱沿空掘巷、沿空留巷得到广泛应用。沿空巷道不仅受到自身掘进采动影响,还承受邻近采空区“长臂梁”顶板的侧向支承压力的影响,普遍存在围岩大变形、强流变等问题。另一方面,随着开采强度和深度的不断增加,回采期间沿空巷道经历采动影响愈发强烈^[20]。在多次强采动的叠加影响下,巷道围岩破坏范围逐渐向深部拓展,极易产生发育的蝶形塑性区^[21]。巷道的变形破坏特征十分复杂,主要表现



(a) 顶帮碎胀变形突出



(b) 喷层大面积开裂、剥落

图3 邢东矿-980水平围岩及支护体系破坏实照^[19]

Fig.3 Images of damage situations of -980 level surrounding rock and supporting system in Xingdong Mine^[19]

为顶板下沉量大并有明显的离层现象、两帮超量移近、底鼓严重以及非对称变形等问题,如图4所示^[22]。

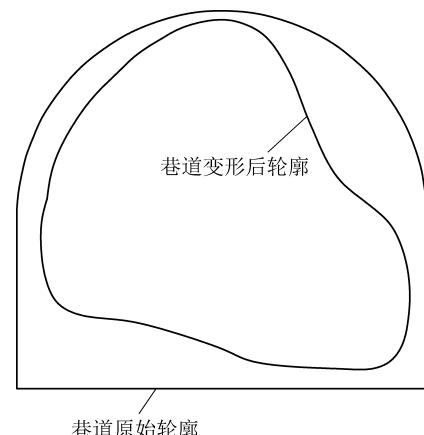


图4 巷道非对称变形^[22]

Fig.4 Asymmetric deformation of roadway^[22]

6)软弱夹层顶板。软弱夹层顶板是一种广泛分布于煤矿巷道中的顶板结构,具有呈层状或带状、胶结能力弱等特点。相关研究将巷道顶板岩层结构类型划分为7种,如图5所示^[23]。尽管软弱夹层相对其他岩层厚度较薄,却通常是影响巷道稳定性的关键因素^[24]。软弱夹层顶板巷道在开挖后,围岩变形量、变形速率、变形时间均明显增加,给巷道围岩安全控制带来了严峻挑战。含高黏土软弱夹层极易风化,遇水情况下伴有严重的泥化现象,导致软弱夹

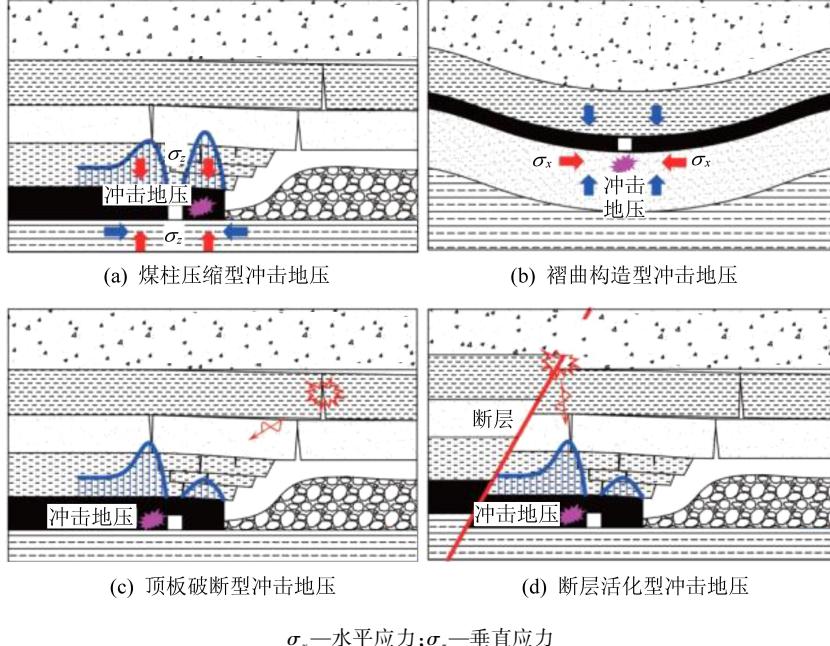
层的物理力学性质骤降,并在水平地应力作用下促使相邻岩层间错动,锚杆、锚索发生剪切破坏,进而诱发支护结构失稳失效,引发离层冒顶等危害^[25-26]。



图 5 巷道顶板岩层结构类型^[23]

Fig.5 Rock structure types of roadways roof^[23]

7) 冲击地压。冲击地压是巷道围岩弹性能突然释放而将煤岩体抛入巷道的动力现象,具有瞬时性和强破坏性的特征。大量研究表明,冲击地压发生原因十分复杂,煤层厚度、开采深度、地质构造以及顶底板岩性等均是影响冲击地压的主要因素^[27]。有学者将冲击地压分为如图 6 所示的 4 种类型^[28]:煤柱压缩型、褶曲构造型、顶板破断型、断层滑移型。冲击地压给巷道安全控制造成了严重影响,尤其是进入深部开采以后,冲击灾害发生的频率快速升高,极易破坏巷道支护系统,甚至造成巷道的瞬间垮塌,特别是在工作面超前支承压力影响范围内的巷道。



σ_x —水平应力; σ_z —垂直应力

图 6 冲击地压类型^[28]

Fig.6 Rockburst types^[28]

8) 大断面巷道。回采巷道断面尺寸对维持运输、通风等系统的正常运行有重要作用,近年来回采工作面设备尺寸逐渐增大的趋势要求巷道断面也愈来愈大,深部巷道跨度可达到 6 m,巷道高度可达到 4.5 m,大断面巷道的围岩控制难度也大幅增加。大断面巷道在回采期间围岩变形主要呈现非对称的特性,巷道煤柱侧顶板肩角破碎下沉严重,如图 7 所示^[29]。由于巷道跨度大,顶板离层明显,底板底鼓显著,同时底板变形破坏一般严重于顶板,巷道高度的增加对帮部变形的影响程度较大,且高度较大时以剪切破坏为主,巷道跨度的增加对顶板变形的影响程度较大,且跨度较大时以拉伸破坏为主^[30]。

9) 坚硬顶板巷道。我国山西、内蒙古、陕西及东北等地矿区厚坚硬顶板赋存普遍,该类顶板在上区段工作面开采完成后难以及时垮落,如图 8 所



图 7 掘进期间围岩及支护破坏实照^[29]

Fig.7 Damage situation of surrounding rock and supporting system during excavation period^[29]

示^[31],导致下区段工作面受到厚坚硬顶板及上覆岩层自重载荷的强烈影响,工作面水平应力和垂直应

力均处于较高的集中状态,回采巷道围岩变形速度快、时间长。另一方面,研究表明坚硬顶板是回采巷道发生冲击地压的主导地质条件^[32],当厚坚硬顶板暴露至一定距离后发生破断垮落时,易引发剧烈的矿压显现,对巷道围岩造成严重破坏,甚至形成冲击地压。



图 8 坚硬顶板巷道^[31]

Fig.8 Hard roof roadway^[31]

10)极近距离煤层遗留煤柱。极近距离煤层群开采过程中煤层间距小,煤层之间的相互影响不可避免。下行开采过程中,上部煤层开采完成后在采空区形成卸压保护区但同时也对底板即下部煤层的顶板造成了不同深度的破坏,整体性和强度均大幅降低,其中对下部煤层影响最为明显的是上部采空区遗留煤柱。遗留煤柱向底板的应力传递非均匀性显著^[33],在煤柱下方应力集中程度达到最大,并向两侧骤降,下部煤层回采巷道在该类复杂应力环境下极易导致局部达到承载峰值而破坏。

1.2 巷道复杂条件分类

工程地质与开采技术是影响巷道围岩控制的关键因素^[1]。结合现场工程实践,对巷道复杂条件分为工程地质条件和开采技术条件二大类,如图9所示。工程地质条件的影响因素相对广泛复杂,高应力是巷道围岩的失稳的最主要因素,高应力巷道包括深部高应力和构造高应力,目前千米深井的深部资源开采逐渐成为资源开发新常态,高地应力已是普遍现象;构造区域煤岩体不仅结构面发育,还承受断层、褶曲等复杂地质构造产生的附加应力。软岩巷道泛指在岩石工程活动中极易产生塑性变形破坏的一类岩体,如破碎松散围岩、软弱膨胀性岩体及弱胶结岩层等,这类岩石具有遇水易膨胀、低强度、软弱、破碎、强流变等一种或多种特性。除此之外,还有坚硬顶板巷道的大面积来压、冲击地压巷道的强烈动力灾害及富水巷道支护体性能劣化等其他特殊

工程地质条件;开采技术条件的影响因素则较为单一,但也给巷道围岩控制增加了难度,如强采动巷道的叠加应力、大断面巷道支护难度大以及近距离煤层采空区遗留煤柱的集中应力传递等困难条件。

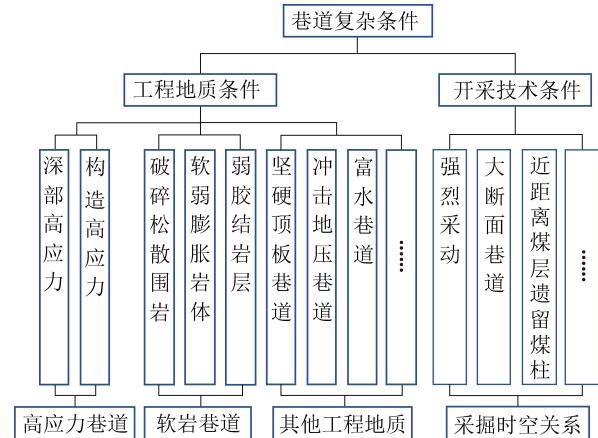


图 9 巷道复杂条件分类

Fig.9 Classification of roadway complex conditions

2 复杂条件下巷道围岩失稳机理

复杂条件巷道失稳由多种内、外因共同引发,围岩应力、围岩性质和支护结构是巷道围岩控制的3类基本对象,复杂条件下巷道失稳的本质是3类对象的性能不足或性能劣化。

2.1 应力诱发机理

巷道掘进过程是岩体从三向受载转为单向卸载的动态过程。为避免巷道表面岩体持续变形而发生破坏,并下通常借助棚架、锚杆等围岩支护结构提供表面约束力和锚固力,尽可能使围岩恢复到三向受力状态。但是,在围岩应力作用下仍会产生显著塑性变形和持续大变形^[34-35]。

2.1.1 应力扩容内在机理

在理论分析与室内试验研究过程中,学者们普遍发现岩石具有显著的应力扩容现象、峰后塑性变形现象和恒载流变现象。笔者^[36]开展了砂岩真三轴卸荷试验,试验中砂岩以张剪复合形式破坏,同时沿卸荷方向伴有强烈的扩容现象。如图10所示,研究表明当应力超过H点时,恒载作用下岩石将发生蠕变变形,变形量平行x轴延伸直至与蠕变停止轨迹线相交;若应力超过G点,蠕变变形延伸线与峰后破坏线相交,此时意味着恒载作用下岩石将发生不稳定蠕变,持续大变形直至发生破坏。因此,泥岩、页岩、煤体等单轴抗压强度小于25 MPa的软弱岩体,在较低应力环境下便会产生持续大变形,并在峰后破坏阶段呈现出显著塑性变形。砂岩、石灰岩

等坚硬岩体,不稳定蠕变临界应力点相对较高,持续大变形多发生在深部高应力和局部应力集中区域。同时,岩石峰后破坏特征随应力环境增高将发生脆延性转化,因此,在深部高应力环境中,部分中硬岩石巷道表现出软岩塑性大变形力学行为。另一方面,节理等结构面会明显弱化力学强度,在破碎围岩巷道中,载荷作用下岩块将沿弱结构面剪切滑移,表现出显著的应力扩容行为^[37]。若结构面中以泥质充填物为主,巷道围岩还将表现出一定的塑性变形特征。

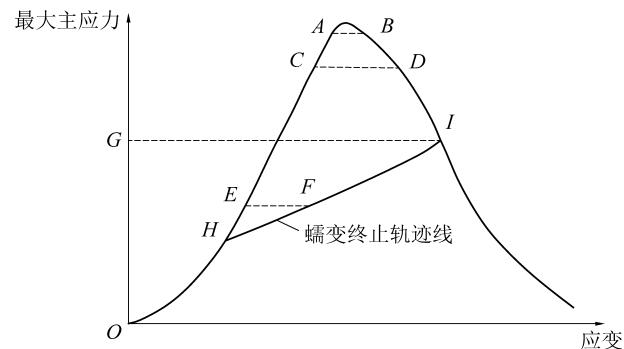


图 10 岩石蠕变终止轨迹线应变

Fig.10 Rock creep termination trajectory

2.1.2 应力变化诱发巷道失稳

1)高地应力。在深部矿井和地质构造区域,巷道围岩通常具有较高的原始地应力,特别是在地质构造区域,岩体中水平应力最大能达到垂直应力的2.5倍。该类巷道围岩的大变形行为,其主要诱因是高应力环境中岩石脆延性转变,和不稳定蠕变临界应力点的突破。此外,高水平应力赋予了局部围岩较高的弹性能,在构造高应力扰动下动力灾害频发。

2)应力集中。在沿空掘巷、沿空留巷及近距离煤层开采等采动影响巷道中,采场覆岩结构破断、回转运动产生强烈的采动应力场和巷道原岩应力场耦合作用下,工作面形成了较高的叠加支承应力,在巷道围岩中形成较高的应力集中现象^[38-39],应力集中程度达到或超出围岩不稳定蠕变临界应力点时首先在巷道薄弱支护位置发生破坏,进而造成围岩整体的显著变形。

3)动静载叠加。巷道在采掘、支护、失稳过程中围岩应力一直处于动态变化,当爆破、岩层断裂以及构造运动等产生的动载传播到巷道围岩时,动载与静载叠加达到围岩体的极限承载能力诱发巷道围岩动力冲击。基于动静载叠加试验,学者们分别研究了煤矿浅部发生的强动载型和煤矿深部发生的高静载型2类冲击地压^[40-41]。在煤矿浅部原岩应力

较低,此时顶板破断等引起的高强度应力波是诱发冲击地压的主导因素,而在煤矿深部表现为复杂高应力状态,此时巷道围岩在较小的动载荷叠加作用下就能达到极限应力状态从而诱发强烈的动力灾害。

2.2 围岩性质劣化诱发机理

2.2.1 围岩破碎松散诱发巷道失稳

破碎松散围岩具有完整性差、裂隙发育的特点,通常位于地质构造区域的巷道和采动巷道。在强烈的构造挤压作用下,构造区域形成破碎带,岩体结构面发育。同时,经历了采掘活动的工作面如沿空掘巷、沿空留巷和近距离上采空区底板等,巷道围岩多以极破碎岩体为主。该类复杂条件下围岩破碎岩体沿结构面的剪切滑移和扩容导致巷道塑性大变形。

2.2.2 软弱膨胀岩体诱发巷道失稳

干燥状态下的软弱膨胀岩体一般强度高、稳定性强,不会对工程安全构成威胁,但是经过开挖后的软弱膨胀岩体,加上水的侵蚀作用,巷道围岩的不稳定性会随之加剧。采动作用下巷道围岩通常有大量发育裂隙,在富水环境中诱发围岩渗水、顶板淋水等不良现象。特别我国西南地区矿井由于地质条件特殊,存在涌水量大、涌水时间长、疏水困难问题^[13]。

渗水裂隙导通后围岩泥化、软化膨胀变形明显。该类巷道的遇水软化膨胀失稳行为,主要诱因是水化学环境中黏土矿物的多尺度物理化学反应。笔者^[42]采用物理模拟材料制备泥岩试样,从宏细观角度分析黏土矿物含量与泥岩强度、弹性模量等力学参数的关系。相关研究表明,蒙脱石与伊利石等黏土矿物晶胞具有叠层结构,分子间作用力下水分子将进入叠层内部,促使晶胞在层叠方向产生膨胀变形^[43]。另一方面,由于黏土矿物晶胞断面、端面和类质同象取代,黏土颗粒(粒径<2 μm)通常对外表现出负电性,并在水环境中表现出显著的胶体特性^[44]。研究表明,水分子作用下黏土颗粒表面将形成扩散双电层,促使黏土颗粒之间相互排斥远离。因此,黏土矿物在晶胞尺度和颗粒尺度上的物理化学行为,是导致富黏土巷道在富水环境产生显著软化膨胀的主要原因。

2.2.3 弱胶结岩层诱发巷道失稳

在煤层开采过程中顶板软弱夹层是常见的弱胶结岩层,其通常具有强度低、弱胶结、节理发育和风化显著等特点,包括富黏土碎屑、糜棱岩和薄层软弱岩石。软弱夹层顶板巷道失稳诱因主要与夹层的低抗剪强度和强蠕变特征有关。笔者基于层次分析法研究了影响软弱夹层顶板巷道安全性的10个因素,

结果表明软弱夹层层位是此类巷道稳定性关键影响因素。根据锚杆锚固基岩与软弱夹层层位关系,软弱夹层顶板巷道失稳机理一般划分为2类。

1)锚杆剪切破坏。当软弱夹层处于锚固范围内,顶板锚杆通常发生剪切破坏,导致顶板支护结构失效。其主要机理是水平应力作用下,低抗剪强度软弱夹层段产生较大变形,导致锚杆杆体承受岩层水平错动力,最终顶板锚杆剪切破坏诱发顶板支护失效。

2)顶板松脱垮冒。当地质勘探不足,导致锚杆锚固段位于软弱夹层时,通常出现锚固力不足或失效现象。在较高水平应力作用下,软弱岩层松动膨胀导致锚杆预紧力丧失,严重时软弱岩层与锚固体将同步弯曲下沉,导致顶板发生松脱型垮冒,具体如图11所示^[45]。当软弱夹层位于锚杆锚固范围外时,支护结构无法约束软弱夹层变形。在水平应力作用下,软弱夹层可能产生明显离层下沉,同样可能诱发顶板大范围的离层垮冒。

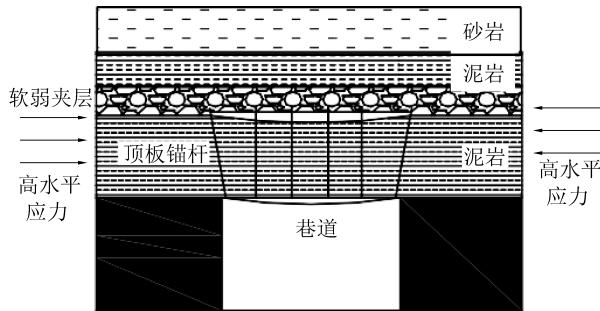


图11 软夹层顶板松脱垮冒^[45]

Fig.11 Loose and straddle caving of soft interlayer roof^[45]

2.3 支护体性能弱化诱变机理

锚杆安装过程中淋水不仅会冲刷固化剂,还会混入树脂胶泥中劣化锚固剂黏结力和固化强度,这导致疏水困难巷道中锚杆安装困难,锚杆安装后锚固力通常也无法达到核算标准。笔者^[46]建立了“三介质-两界面”模型,如图12所示,揭示了泥岩与锚固剂界面稳定性遇水软化机理,指出泥岩与锚固剂界面的剪应力与含水率呈负相关。

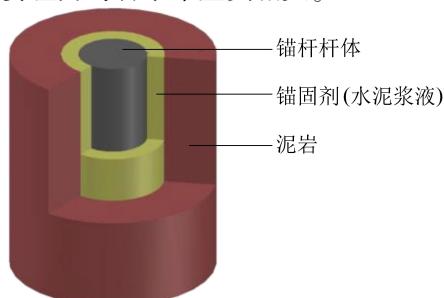


图12 锚固体“三介质-两界面”模型^[46]

Fig.12 Anchor solid “three media–two interface” model^[46]

钻孔淋水对已安装锚杆同样具有腐蚀性^[47]。研究表明,当钻孔淋水量小于128 mL/min时,锚杆锚固力保持不变;当钻孔淋水量大于583 mL/min时,锚固力将下降35%以上^[48]。如图13所示,笔者在贵州矿井现场实践中发现,金属支护体表面普遍腐蚀。有学者在实践中发现严重腐蚀情况下4.0 mm金属网有效线径仅余2.0 mm左右,对力学性能产生显著影响。



(a) 顶板淋水



(b) 支护体腐蚀

图13 顶板支护情况

Fig.13 Roof support

3 复杂条件下巷道围岩控制技术

3.1 改善巷道围岩应力环境

随着煤矿井下开采深度、开采强度以及开采难度的不断增加,多种应力叠加劣化了巷道围岩应力场,巷道围岩内部形成了复杂的高应力环境,并诱发巷道围岩大变形和冲击地压^[49-50]。为预防和应对复杂高应力巷道的变形破坏问题,众多学者开展了优化巷道围岩应力环境的研究,提出包括合理布置巷道、钻孔卸压、切顶卸压等技术,其中,人工主动卸压技术在近年来得到成熟发展。

3.1.1 钻孔卸压技术

钻孔卸压是在复杂高应力区的巷道围岩中进行钻孔,在应力作用下钻孔受压变形甚至压塌,并在钻孔周边产生小范围的破碎区。多个钻孔共同作用下在巷帮形成大范围的破碎带,该范围内的围岩弹性能得到释放,承载能力降低,应力向煤层深部转移,

如图14所示。

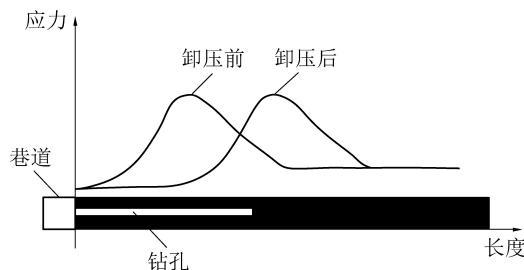


图14 卸压钻孔对煤体应力分布的影响

Fig.14 Influence of pressure relief drilling on stress distribution of coal

王爱文等^[51]从钻孔煤样在单轴抗压试验中的能量损失角度进行研究,结果表明,煤岩体原始的积聚能量和破坏时耗散的能量都在钻孔卸压后明显降低。朱斯陶等^[52]提出了掘进工作面布置斜向钻孔的卸压方式,有效消除了巨厚煤层掘进工作面的冲击隐患。

卸压钻孔参数显著影响着卸压效果,是钻孔卸压技术的关键因素,良好的卸压能力是应对井下复杂高应力环境的基本要求。此外,合理的钻孔卸压参数在改善巷道围岩应力场的同时,也能够避免巷道产生大变形,盖德成等^[53]运用数值模拟研究了不同强度煤体与卸压钻孔参数之间的关系。围岩应力集中转移和巷道变形量减少是钻孔卸压最直观的技术效果。王猛等^[54]通过研究不同长度、不同直径的钻孔及其布置方式对卸压效果的影响机制,总结了3类卸压效果,并相应给出了钻孔参数的设计方法。

3.1.2 切顶卸压技术

切顶卸压是将煤层上覆顶板以回采巷道为界切断,采空区顶板受压后垮落。采空区覆岩自重载荷传递路径发生改变,不再影响巷道与下区段工作面回采,实现应力向深部煤岩体转移从而降低巷道围岩的应力集中。何满潮院士^[55]指出人为将基本顶断裂位置转移至采空区侧,使顶板悬臂长度减小的同时发挥碎胀矸石支撑上覆岩层的作用;并提出了“围岩结构-巷旁支护体”力学模型,构建了采矿损伤不变量的开采模型。

现阶段聚能爆破和水力压裂等定向预裂切顶卸压技术已经广泛应用。聚能爆破通过特殊结构、特殊材质的聚能管借助于炸药爆炸产生的冲击波形成聚能效应,产生定向张拉应力集中而使顶板按预设方向扩展裂纹并断裂^[56]。华心祝等^[57]提出预裂爆破切顶是动静载叠加作用于顶板的过程,爆破应力过大则会破坏回采巷道顶板稳定性,爆破应力过低则不能充分达到切顶目的;并建立了动静载叠加力

学模型,提供了爆破参数优化方法。马新根等^[58]通过现场试验,进行了装药结构调整与顶板岩性变化的关联性分析。

水力压裂技术主要由封孔、高压水压裂、保压注水3道工序组成。一般垂直巷道走向在巷道顶板按照一定的仰角打设钻孔,并在钻孔内壁预制径向切槽;完成制孔并封孔后利用高压水泵注水压裂,顶板岩层产生裂纹并扩展,与其他钻孔产生的裂纹贯通后达到切断顶板的效果^[59]。煤岩体的原始裂纹能明显影响后期水力压裂过程中裂纹扩展,为此,刘正和等^[60]基于预制裂缝试样开展了定向压裂实验室试验,结果表明,起裂方向和起裂压力均受预制裂缝角度的影响。赵善坤等^[61]为水力压裂防冲效果评价提供了微震事件、周期来压步距、锚杆应力等多种参考依据。

3.2 改良围岩物理力学性质

注浆加固技术是加固软弱围岩和控制浅部破碎围岩的常用手段。注浆使巷道浅部破碎围岩胶结,浆液充满破碎岩体裂隙,能够有效降低空气、水等侵蚀作用并提高破碎岩体胶结性。近年来发展的深浅孔联合注浆,有效将浅部围岩和深部围岩胶结为整体结构,提高了围岩整体稳定性^[62]。

选择有利于现场施工条件的注浆工艺与合理的注浆参数,对改善巷道围岩物理力学性质至关重要,众多学者对此进行了深入研究。康红普院士团队^[63]采用微纳米无机有机复合材料对千米深井软岩巷道开展了高压劈裂注浆试验,SEM电镜扫描结果显示巷道围岩宽度2 μm以上的裂隙均能密实固结,微观裂隙扫描电镜照片如图15所示。笔者^[64]提出了“两介质-三界面”煤岩注浆加固模型,分析了颗粒配比和胶结体孔隙率对散煤注浆加固效果的影响规律,从细观角度为注浆设计提供了依据。李文洲等^[65]以裂隙煤岩体为对象,研究了其破坏特征及影响其破坏的主要因素,提出了首先分析围岩应力结构特性,进而优选注浆压力,最后明确注浆过程压力损耗的围岩注浆改性思路,提升了现场围岩改性效果。董红娟等^[66]选取多种粒径的石灰岩岩块,

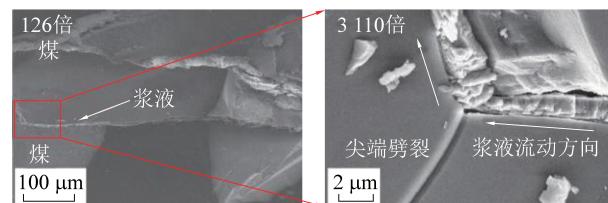


图15 微观裂隙扫描电镜照片^[63]

Fig.15 SEM micrograph of cracks^[63]

并设计不同水灰比的注浆液,在不同注浆压力的作用下制备了注浆试件,基于抗压强度及其变形破坏特征,指出注浆体强度在一定范围内随粒径和注浆压力的增大而增大,随水灰比的升高而降低。

注浆作为改善巷道围岩性质的主要技术,广泛应用于煤矿巷道围岩控制,因此,注浆过程中需考虑其加固效果,因此,研究学者开展了大量注浆效果检测与评价的研究。目前大量研究通过监测声波在岩体中的传播速度来表征岩体的裂隙情况,CHEN等^[67]分析了注浆对波速变化的影响规律,结果表明波速大小及其变化幅度是预测注浆加固效果的可靠依据。注浆效果可以用注浆后的岩体强度来表示,高红科等^[68-69]对钻头在钻进注浆岩体过程中的参数进行了统计,结合岩体的抗压强度,建立了两者的关系模型,形成了高效评价注浆岩体强度的方法。

3.3 强化围岩承载结构性能

我国煤矿主要以井工开采为主,巷道支护一直以来都是煤矿安全生产的重要保障。巷道支护从最原始的木支护发展到砌碹支护,再到型钢支护,最后到目前使用最广泛的锚杆支护,这一过程是被动支护向主动支护的演变。下面主要介绍巷道锚固技术,锚杆支护经过长足的发展,已经形成了锚杆支护成套技术。

多年来,众多学者先后创新了锚杆支护的理论模型,为锚杆支护技术不断革新、体系不断完善提供了理论基础。康红普院士^[1]提出高预应力锚杆支护理论,如图16所示,预应力通过锚杆传递到围岩,使围岩处于压应力状态,有效控制顶板离层,并指出围岩与支护是维持巷道稳定性共同承载体,锚杆支护保障了围岩的完整性,提高了围岩的抗冲击性,为冲击地压巷道如何合理地选择支护形式指明了方向。张农等^[70]提出了连续梁控顶理论,分析了顶板结构对煤帮的影响,如图17所示,当连续梁形成后,帮部应力集中程度降低,顶板应力平缓分布。左建平等^[71]分析了巷道顶板弯曲正应力分布规律,提出等强梁支护理念,采取以巷道中线为中心,锚杆长度

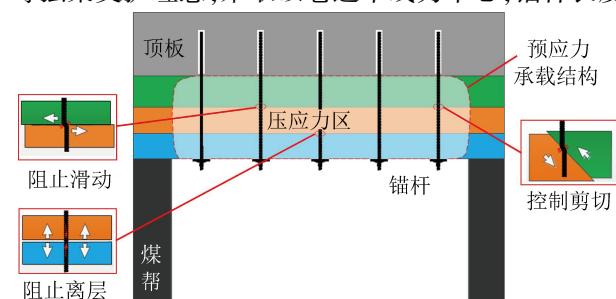


图 16 预应力锚杆支护原理^[1]

Fig.16 Reinforcement principle for pretension rock bolting^[1]

和强度向两端递减的支护工艺。董恩远等^[72]将围岩蠕变本构模型和锚杆锚固本构模型相结合,分析了锚固基础作用点位对控制围岩变形的影响规律,指出围岩弹性区是端锚的最佳锚固点位。

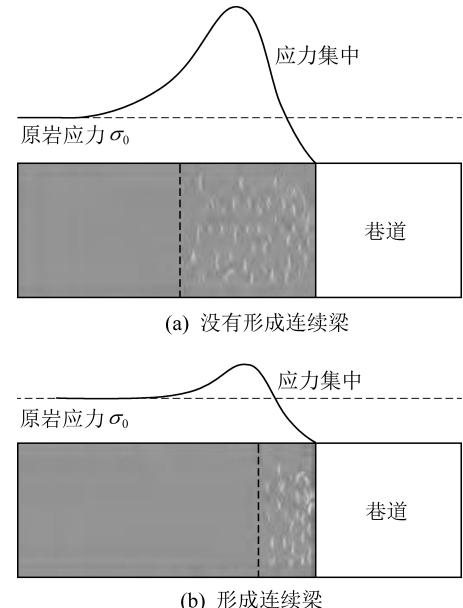


图 17 顶板结构对煤帮的影响^[70]

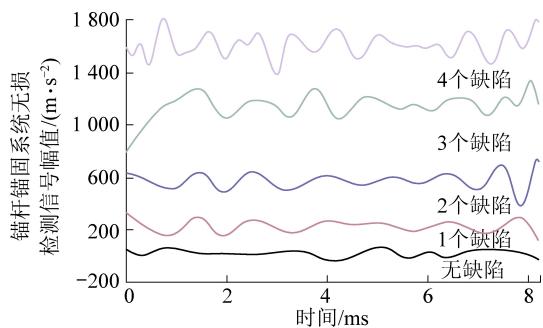
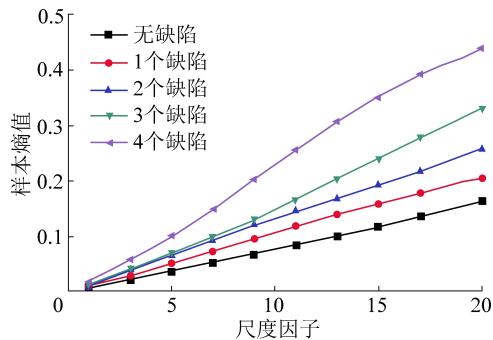
Fig.17 Influence of roof structure on coal slope^[70]

在关于锚杆预应力相关研究中,李建忠等^[73]运用UDEC-Trigon 数值模拟方法揭示了高预紧力锚杆对节理面的保护机制,分析了锚杆支护应力场的组成形式。张剑^[74]研究了锚杆预紧转矩、锚杆安装偏斜角度以及煤岩体强度对预应力的影响,结果表明,预应力大小与预紧转矩和岩体强度呈正相关,与锚杆安装偏斜角度呈负相关。刘金海等^[75]结合高预紧力锚杆的受力情况及其破断特征,揭示了高预紧力锚杆的变形破坏机理,指出拉弯复合作用是破断的主要诱因。在锚固长度方面,靖洪文等^[76]在煤矿井下开展了现场拉拔试验,结果显示在一定范围内锚固长度越长,锚杆锚固力越大。李英明等^[77]研究了全长锚固锚杆的失效过程,揭示了失效时应力分布特征,明确了锚杆长度对锚杆全长锚固工作性能的影响规律。

锚杆支护作为煤矿井下的关键技术,锚固质量尤为重要。张雷等^[78]研制了锚固质量无损检测装置,检测过程中有缺陷锚固系统的检测信号相对复杂,且检测信号的多尺度熵值较高,统计结果如图18、图19所示。董建军等^[79]研制了锚杆 FBG 应力传感器,精准监测锚杆整体的应力情况。王昱栋等^[80]采用算法实时提取巷道锚杆特征,实现智能化监测锚杆异常。

3.4 巷道围岩协同控制技术

当前我国煤矿井下开采面临的条件十分复杂,

图 18 预处理后的检测信号^[78]Fig.18 Preprocessed detection signals^[78]图 19 预处理后的检测信号的多尺度熵曲线^[78]Fig.19 MSE curves of preprocessed detection signals^[78]

对于深部软岩巷道、破碎围岩巷道、复合顶板巷道等困难巷道,需要多种围岩控制技术协同支护,学者们为此展开了深入了研究。

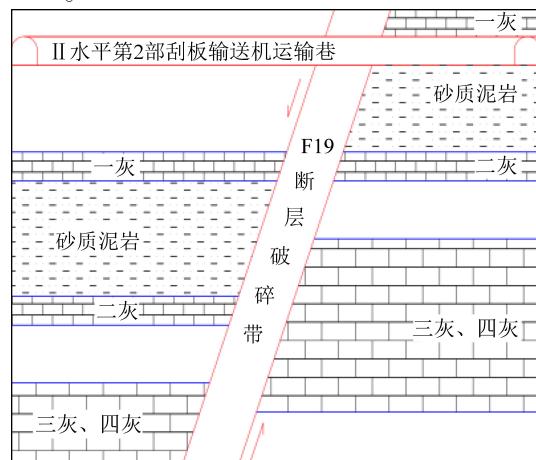
康红普等^[81]针对千米深井软岩巷道提出了巷道支护-改性-卸压联合控制技术,采用“三高”锚杆和锚索支护、纳米材料注浆改善围岩性质、水力压裂卸压3种措施控制围岩大变形,锚杆、锚索的损伤破坏情况得到显著改善。此外,针对孜东矿工作面运输巷松软煤帮锚杆(索)锚固性能弱化、煤体风化后结构劣化的难题,提出了锚注喷协同控制技术,锚杆(索)施加高预应力进行主动支护,高压锚注提高锚固场长度的同时改善煤帮结构性能,提升整体承载性能,煤帮表面喷浆隔绝空气、降低风化影响,锚注喷一体化的围岩控制理念最大限度地提高了锚杆(索)的主动支护能力^[82]。王洪涛等^[83]从锚固和注浆结合的角度研发了中空注浆锚杆,该锚杆具有高预应力、全长锚固、锚注结合等优点,现场应用后围岩变形控制效果显著。深部巷道软岩在高应力环境下伴有持续大变形现象,刘天啸等^[84]提出了“卸压-让压”协同控制技术,钻孔卸压优化应力环境,锚杆让压适应围岩变形,减少了锚杆破断现象。王成等^[85]分析了泥化巷道的失稳过程,提出以控制泥化为主体的思路,针对性地设计了新型“三高”锚杆强化支护和滞后注浆的联合控制技术方案,同时明

确了注浆时机。王琦等^[86]模拟了不同煤柱、地应力、顶板强度及切顶位置等因素下切顶自成巷与沿空掘巷2种巷道围岩应力场演化规律及围岩控制效果,在此基础上优选了“强锚注+切顶”的围岩控制方法,提高了巷道前期完整性和后期稳定性。左健平等^[87]分析了综放工作面大断面巷道围岩破碎机理,从优化巷道整体协同承载的角度出发,设计了全断面桁架锚索协同控制系统,系统通过金属网、钢带和托架将顶板、两帮和底板的独立支护耦合,相互作用,弱化巷道局部应力集中,解决了常规支护下巷道非对称变形难题。常村煤矿回采巷道过断层破碎带时随机节理型围岩在复杂应力环境下变形严重,为此陈晓祥等^[12]提出了锚网索辅以超前预注浆的联合控制技术,并通过数值模拟和工业试验验证,有效控制了围岩大变形。多年来,冲击地压一直困扰着巷道围岩控制,吴拥政等^[88]在分析冲击地压巷道围岩破坏特征的基础上从应力和能量变化2个方面阐明了围岩冲击破坏机制,借助“卸压-支护-防护”3种防控手段应对深部巷道冲击地压,采取不同长度的压裂孔对巷道不同范围内的围岩进行卸压,选取“四高”锚杆、锚索支护,巷道内布设钢棚、防护支架,并增加缓冲垫层共同吸收冲击能量,保障了冲击地压巷道的稳定。

4 典型泥质采动巷道渗流失稳控制工程案例

4.1 工程地质条件

朱仙庄矿开采10号煤层,Ⅱ水平第2部刮板输送机运输巷位于矿井南部Ⅱ水平Ⅱ3采区下部,设计全长1 025 m,标高-676.2~ -683.6 m。巷道揭露岩性主要为泥岩、砂质泥岩。巷道位置剖面如图20所示^[89]。

图 20 巷道位置剖面^[89]Fig.20 Roadway location profile^[89]

4.2 泥质采动巷道渗流失稳机理

朱仙庄矿Ⅱ水平第2部刮板输送机运输巷前期顶板淋水严重,巷道变形量大,原有支护破坏。采动过程中断层成为导水通道,破碎岩体涌入巷道,以泥岩为主体巷道围岩遇水泥化、崩解,巷道修复和支护难度大。为实现此类复杂困难巷道围岩的有效控制,笔者团队^[89]对泥质采动巷道渗流失稳机理进行了深入研究,并首先分析了现场巷道失稳关键诱因。



图 21 泥化巷道全断面失稳^[89]

Fig.21 Full section instability of argillaceous roadway^[89]

1)围岩破碎。巷道失稳区域处于断层破碎带内,巷道围岩裂隙发育,自身失去承载能力,同时为空气、水源的侵蚀提供了原始通道。

2)渗流水影响。巷道底板含有承压水且水压较高,高压渗流水沿着裂隙进入巷道。巷道围岩以泥岩为主,泥岩富含伊利石、蒙脱石、高岭石等黏土矿物,具有胶结强度低、塑性强等特性,遇水极易泥化膨胀,巷道围岩的不稳定性会随之加剧。

3)应力叠加影响。巷道埋深较大,原岩应力高,巷道变形大,并具有强流变性;巷道穿断层布置,巷道在构造应力作用下承受高集中静载荷;回采期间巷道受到强采动影响,应力集中程度高。



图 22 泥质软岩巷道渗流失稳过程^[89]

Fig.22 Argillaceous soft rock roadway seepage instability process^[89]

4.3 泥质采动渗流失稳巷道综合控制技术

围岩渗流场、应力场、损伤场三场耦合是泥质采动巷道渗流失稳变形的本质,对该类巷道进行修复和复后支护也应同时考虑三场之间的相互影响,形成一套完善的泥质采动渗流巷道控制体系。

1)疏水泄压。巷道底板承压水是水害的主要来源,因此,采取关键出水点开掘导水洞和分散出水点布设导水钢管联合疏水泄压,降低含水层水位。

2)强化围岩性质。①泥岩置换。封闭大断面巷道区域,利用混凝土置换小断面巷道泥化严重区域,先小断面后大断面,循序渐进,直至覆盖巷道整体,形成稳定的墙体结构。②分级注浆。注浆与泥岩置换按照以下原则交替进行:泥流特别严重不注,半泥流体少注,松散岩体多注。同时,根据区域围岩性质及时调整注浆参数。

3)构建高强度支护体系。①高强度支护结构。依次喷射混凝土、打设锚杆、架接钢丝绳,该工序重复4次,最后整体喷射混凝土,形成四锚五喷的强韧封层支护结构。②高强度底板结构。巷道两帮底各浇筑半封闭混凝土基础,以应对水平应力对整体支护结构的破坏,同时保留使非对称应力和承压水压力的释放空间。具体支护体系如图23所示^[89]。

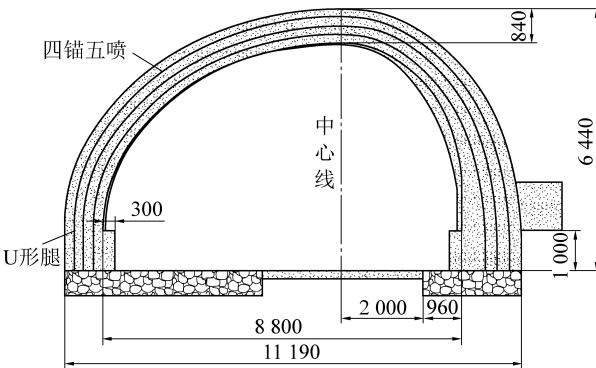


图 23 朱仙庄矿运输大巷高强度支护体系^[89]

Fig.23 High strength support system of transportation roadway in Zhuxianzhuang Mine^[89]

5 结 论

1)总结了现阶段我国煤矿井下巷道围岩控制面临的复杂困难条件,并划分为工程地质条件和开采技术条件2类。

2)阐明了各类复杂条件下巷道围岩的变形特征、破坏形式,揭示了不同地质条件与采掘时空关系下巷道支护的损伤破坏机理。复杂条件下巷道失稳的本质是围岩应力、围岩性质和支护结构3类巷道围岩控制对象的性能不足或性能劣化。

3)分析了巷道围岩控制的3种基本原理:改善围岩应力环境、改良围岩性质与强化围岩承载结构。从卸压、改性、支护及协同控制4个角度详述了当下煤矿巷道围岩控制技术,并分别讨论了其实验室阶段试验进展与现场应用情况。

4)分析了泥质采动巷道渗流失稳控制的典型工程案例,提出了高强度综合修复与控制技术体系,为深部矿井高承压水致断层破碎带大断面巷道泥化失稳与长期流变的围岩状态下的巷道控制提供范例。

6 展 望

1)卸压与注浆工艺参数设计虽然在实验室阶段有很大进展,但不少矿井现场由于时间、空间制约,在合理选择适用于本矿井生产地质条件的工艺参数方面仍受到一定限制。应在广泛收集不同复杂条件矿井、巷道的典型卸压与注浆工艺参数基础上,形成智能算法,实现工艺参数精准、动态、实时设计。

2)当前我国煤矿巷道的掘进速度仍不理想,尤其是在复杂困难条件下采掘失衡已是常态,锚杆支护作为巷道围岩控制的关键技术,应充分利用锚杆的主动支护能力,研发快速掘进与支护技术及设备。

3)原岩应力场、采动应力场与支护应力场的叠加作用为围岩稳定提供了应力环境,复杂的地质条件和采掘时空关系导致了原岩应力场和采动应力场的多变性,不同的支护方式、支护强度产生的支护应力场也有所不同,3种应力场的耦合机制研究还有欠缺,特别是在各类复杂条件背景下。在认清其耦合机理的基础上,明确不同条件下的最佳支护应力场形式,进而指导支护形式的选择。

4)煤矿开采进入深部后,开采环境愈加复杂,何满潮院士针对高应力软岩研发了NPR锚杆(索)新材料,为应对其他极端复杂条件巷道的围岩控制提供了方向。当下面对不同的困难巷道,支护形式不断创新,而研发适应不同支护形式的更高强度、更高刚度的新支护材料还需进一步研究。

5)选择合理的巷道支护方式能有效降低冲击地压巷道的动力灾害发生的频率和强度,不同地质条件、开采方法、巷道布置决定了冲击地压发生的复杂多样性,在不同地区的矿井差异化更大,而目前实践中借助工程经验进行防冲支护设计的较多。在明确冲击地压与巷道围岩、巷道支护的相互作用关系的基础上,建立面向各类冲击地压巷道的防冲支护设计方法的工作仍需继续推动。

6)煤矿井下的开采条件具有多样性、特殊性、

随机性等特点,在应对复杂极端条件下的巷道围岩控制难题时,多元性、针对性、精准性地融合控制技术体系仍是未来发展趋势。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 单仁亮,彭杨皓,孔祥松,等.国内外煤巷支护技术研究进展[J].岩石力学与工程学报,2019,38(12):2377-2403.
SHAN Renliang,PENG Yanghao,KONG Xiangsong,*et al*.Research progress of coal roadway support technology at home and abroad [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(12):2377-2403.
- [3] 何满潮.深部建井力学研究进展[J].煤炭学报,2021,46(3):726-746.
HE Manchao. Research progress of deep shaft construction mechanics[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46 (3) : 726-746.
- [4] 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.
- [5] 康红普,王金华.煤巷锚杆支护理论与成套技术[M].北京:煤炭工业出版社,2018:361.
KANG Hongpu,WANG Jinhua.Rock bolting theory and complete technology for coal roadways [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House,2018:361.
- [6] KANG H P.Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: A review[J].International Journal of Coal Science & Technology,2014,1(3):261-277.
- [7] 曹耀华,李云婷.深部近距离下位煤层回采巷道围岩变形控制[J].煤炭科学技术,2021,49(9):76-81.
CAO Yaohua,LI Yunting.Deformation control of surrounding rocks of mining roadway in deep and close lower coal seam[J].Coal Science and Technology,2021,49(9):76-81.
- [8] 沈平,姜永东,杨启军,等.大倾角煤层沿空留巷弓形柔性掩护支架控制技术[J].煤炭科学技术,2021,49(3):37-42.
SHEN Ping,JIANG Yongdong,YANG Qijun,*et al*.Control technology of flexible bow-shield-supporting system for gob-side entry retaining in highly inclined seam [J]. Coal Science and Technology,2021,49(3):37-42.
- [9] LIU H L,XU C,WANG H Z,*et al*.Investigation on surrounding rock stability control technology of high stress roadway in steeply dipping coal seam [J]. Advances in Civil Engineering, 2021;5269716.
- [10] 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 sur-

- rounding rock control technology of weakly cemented water-rich roof in roadway [J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(1): 88–92.
- [11] 王成, 韩亚峰, 张念超, 等. 渗水泥化巷道锚杆支护围岩稳定性控制研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(4): 575–579.
WANG Cheng, HAN Yafeng, ZHANG Nianchao, et al. Study on surrounding rock control technology of weakly cemented water-rich roof in roadway [J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 31(4): 575–579.
- [12] 陈晓祥, 吴俊鹏. 断层破碎带中巷道围岩大变形机理及控制技术研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(5): 885–892.
CHEN Xiaoxiang, WU Junpeng. Study on the mechanism and control technology of large deformation of roadway surrounding rock in the fault fracture zone [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(5): 885–892.
- [13] 蔡金龙, 涂敏, 张华磊. 侏罗系弱胶结软岩回采巷道变形失稳机理及围岩控制技术研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(6): 1114–1122.
CAI Jinlong, TU Min, ZHANG Hualei. Deformation and instability mechanism and control technology of mining gateway for Jurassic weak-cemented soft rock roadways [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(6): 1114–1122.
- [14] 侯朝炯, 王襄禹, 柏建彪, 等. 深部巷道围岩稳定性控制的基本理论与技术研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(1): 1–12.
HOU Chaojong, WANG Xiangyu, BO Jianbiao, et al. Basic theory and technology study of stability control for surrounding rock in deep roadway [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(1): 1–12.
- [15] 王卫军, 郭罡业, 朱永建, 等. 高应力软岩巷道围岩塑性区恶性扩展过程及其控制 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40(12): 2747–2754.
WANG Weijun, GUO Gangye, ZHU Yongjian, et al. Malignant development process of plastic zone and control technology of high stress and soft rock roadway [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(12): 2747–2754.
- [16] ZHANG P, GEARHART D, VAN DYKE M, et al. Ground response to high horizontal stresses during longwall retreat and its implications for longwall headgate support [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29(1): 27–33.
- [17] 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.
- [18] 谭云亮, 于风海, 马成甫, 等. 弱胶结软岩巷道锚杆索-围岩变形协同控制方法研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(1): 198–207.
TAN Yunliang, YU Fenghai, MA Chengfu, et al. Research on collaboration control method of bolt/cable-surrounding rock deformation in coal roadway with weakly cemented soft rock [J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 198–207.
- [19] 何富连, 张广超. 深部破碎软岩巷道围岩稳定性分析及控制 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(5): 1397–1406.
HE Fulian, ZHANG Guangchao. Analysis and control of stability of the fractured soft rock surrounding a deep roadway [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(5): 1397–1406.
- [20] KANG H P, WU Y Z, GAO F Q. Deformation characteristics and reinforcement technology for entry subjected to mining-induced stresses [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2011, 3(3): 207–219.
- [21] 袁越, 王卫军, 袁超, 等. 深部矿井动压回采巷道围岩大变形破坏机理 [J]. *煤炭学报*, 2016, 41(12): 2940–2950.
YUAN Yue, WANG Weijun, YUAN Chao, et al. Large deformation failure mechanism of surrounding rock for gateroad under dynamic pressure in deep coal mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(12): 2940–2950.
- [22] 陈上元, 宋常胜, 郭志飚, 等. 深部动压巷道非对称变形力学机制及控制对策 [J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 246–254.
CHEN Shangyuan, SONG Changsheng, GUO Zhibiao, et al. Asymmetric deformation mechanical mechanism and control countermeasure for deep roadway affected by mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 246–254.
- [23] 蒋力帅, 马念杰, 白浪, 等. 巷道复合顶板变形破坏特征与冒顶隐患分级 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(7): 1205–1211.
JIANG Lishuai, MA Nianjie, BAI Lang, et al. Deformation and failure characteristics and roof caving hidden danger classification of roadways compound roof [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(7): 1205–1211.
- [24] 付玉凯, 王涛, 孙志勇, 等. 复合软岩巷道长短锚索层次控制技术及实践 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(2): 237–245.
FU Yukai, WANG Tao, SUN Zhiyong, et al. Layered control technology and practice of long and short anchor cable in composite soft rock roadway [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(2): 237–245.
- [25] 张泽林, 王涛, 吴树仁, 等. 泥岩中软弱夹层的剪切力学特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(4): 713–724.
ZHANG Zelin, WANG Tao, WU Shuren, et al. The study of shear mechanical properties on mudstone with weak intercalation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(4): 713–724.
- [26] SEEDSMAN R W. Practical strength criterion for coal mine roof support design in laminated soft rocks [J]. *Mining Technology*, 2013, 122(4).
- [27] 陈岩峰, 李学军, 吴宏斌, 等. 冲击地压机理及防控现状与发展态势分析 [J]. *煤炭科技*, 2021, 42(5): 70–75.
CHEN Yanfeng, LI Xuejun, WU Hongbin, et al. Control status and development trend of rockburst mechanism and prevention in China [J]. *Coal Science & Technology Magazine*, 2021, 42(5): 70–75.
- [28] 蔡武. 断层型冲击矿压的动静载叠加诱发原理及其监测预警研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
CAI Wu. Fault Rockburst induced by static and dynamic loads superposition and its monitoring and warning [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [29] 张广超, 何富连. 大断面强采动综放煤巷顶板非对称破坏机制 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(5): 1397–1406.

- 与控制对策[J].岩石力学与工程学报,2016,35(4):806-818.
- ZHANG Guangchao, HE Fulian. Asymmetric failure and control measures of large cross-section entry roof with strong mining disturbance and fully - mechanized caving mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (4): 806-818.
- [30] 彭杨皓,张书鹏,张艺源,等.煤矿大断面托顶煤巷道围岩变形破坏机理[J].煤矿安全,2019,50(5):263-268.
- PENG Yanghao, ZHANG Shupeng, ZHANG Yiyuan, et al. Surrounding Rock Deformation Failure Mechanism of Large Section Gateway with Top Coal in Coal Mine [J]. Safety in Coal Mines, 2019,50(5):263-268.
- [31] 杨仁树,朱晔,李永亮,等.坚硬顶板条件下裸顶巷道煤帮稳定性分析及控制对策[J].采矿与安全工程学报,2020,37(5):861-870.
- YANG Renshu, ZHU Ye, LI Yongliang, et al. Coal ribs stability analysis and control countermeasures of bare roof roadway under hard roof condition [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020,37(5):861-870.
- [32] 韩军,崔露郁,贾冬旭,等.坚硬顶板回采巷道冲击地压的卸载滑脱机制[J].煤炭学报,2022,47(2):711-721.
- HAN Jun, CUI Luyu, JIA Dongxu, et al. Unloading - slippage mechanism of rock burst occurred in longwall roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2022,47(2):711-721.
- [33] 王龙飞,常泽超,杨战标,等.深井近距离煤层群采空区下回采巷道联合支护技术[J].采矿与安全工程学报,2018,35(4):686-692.
- WANG Longfei, CHANG Zechao, YANG Zhanbiao, et al. Combined support technology of roadway under mined gob of ultra-distance seams in deep mine [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018,35(4):686-692.
- [34] 杜贝举,刘长友,吴锋锋,等.深井高应力软弱围岩巷道变形机理及控制研究[J].采矿与安全工程学报,2020,37(6):1123-1132.
- DU Beiju, LIU Zhangyou, WU Fengfeng, et al. Deformation mechanism and control technology of roadway in deep mine with high stress and weak surrounding rock [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020,37(6):1123-1132.
- [35] YANG X J, WANG E Y, WANG Y J, et al. A study of the large deformation mechanism and control techniques for deep soft rock roadways [J]. Sustainability, 2018,10(4):1100.
- [36] 荣浩宇,李桂臣,赵光明,等.不同应力路径下深部岩石真三轴卸荷特性试验[J].煤炭学报,2020,45(9):3140-3149.
- RONG Haoyu, LI Guichen, ZHAO Guangming, et al. True triaxial test study on mechanical properties of deep rock mass in different stress paths [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45 (9): 3140-3149.
- [37] 孙广京,王平,冯涛,等.软弱破碎顶板巷道围岩变形机理及控制技术[J].煤炭科学技术,2020,48(5):209-215.
- SUN Guangjing, WANG Ping, FENG Tao, et al. Deformation mechanism and control technology of surrounding rock in soft and broken roof roadway [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (5) ;209-215.
- [38] 乔元栋,孟召平,朱帅,等.二次采动影响下区段煤柱破坏机制及围岩控制技术[J].煤炭科学技术,2020,48(6):71-77.
- QIAO Yuandong, MENG Zhaoping, ZHU Shuai, et al. Study on the Mechanism and Control of the Coal Pillar's Failure by the Secondary Mining [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (6): 71-77.
- [39] SU M, GAO X H, ZHANG J F. Research of the surrounding rock deformation control technology in roadway under multiple excavations and mining [J]. Shock And Vibration, 2021:6681184.
- [40] 窦林名,周坤友,宋士康,等.煤矿冲击矿压机理、监测预警及防控技术研究[J].工程地质学报,2021,29(4):917-932.
- DOU Linming, ZHOU Kunyou, SONG Shikang, et al. Occurrence mechanism, monitoring and prevention technology of rockburst in coal mines [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29 (4): 917-932.
- [41] 窦林名,何江,曹安业,等.煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J].煤炭学报,2015,40(7):1469-1476.
- DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40 (7) :1469-1476.
- [42] 李桂臣,孙长伦,何锦涛,等.软弱泥岩遇水强度弱化特性宏细观模拟研究[J].中国矿业大学学报,2019,48(5):935-942.
- LI Guichen, SUN Zhanglun, HE Jintao, et al. Macro and meso scalesimulation study of the strength- weakening property of soft mudstone affected by water [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019,48(5):935-942.
- [43] HO T A, CRISCENTI L J, GREATHOUSE J A. Revealing transition states during the hydration of clay minerals. [J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2019,10(13):3704-3709.
- [44] 柴肇云,杨攀,张海洋,等.电解液浓度对泥岩电化学改性效果的影响[J].煤炭学报,2020,45(S1):211-218.
- CHAI Zhaoyun, YANG Pan, ZHANG Haiyang, et al. Influence of electrolyte concentration on electrochemical modified effects mudstone [J]. Journal of China Coal Society, 2020,45 (S1) :211-218.
- [45] 张农,李桂臣,阙甲广.煤巷顶板软弱夹层层位对锚杆支护结构稳定性影响[J].岩土力学,2011,32(9):2753-2758.
- ZHANG Nong, LI Guichen, KAN Jiaguang. Influence of soft interlayer location in coal roof on stability of roadway bolting structure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(9):2753-2758.
- [46] 张苏辉.不同含水率泥岩与锚固剂界面稳定性遇水弱化机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
- ZHANG Suhui. Study on the Weakening Mechanism of Interfacial Stability of Mudstone and Anchor with Different Moisture Content. [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [47] 康红普,崔千里,胡滨,等.树脂锚杆锚固性能及影响因素分析[J].煤炭学报,2014,39(1):1-10.
- KANG Hongpu, CUI Qianli, HU Bin, et al. Analysis on anchorage performances and affecting factors of resin bolts [J]. Journal of China Coal Society, 2014,39(1):1-10.
- [48] 勾攀峰,陈启永,张盛.钻孔淋水对树脂锚杆锚固力的影响分析[J].煤炭学报,2004,29(6):680-683.

- GOU Panfeng, CHEN qiyong, ZHANG Sheng. Influence analysis of the anchor-hold of the resin bolt by the draining water in the drill hole [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(6): 680-683.
- [49] YANG H Q, ZHANG N, HAN C L, et al. Stability control of deep coal roadway under the pressure relief effect of adjacent roadway with large deformation: a case study [J]. Sustainability, 2021, 13(8).
- [50] HE Y L, GAO M S, XU D, et al. Investigation of the evolution and control of fractures in surrounding rock under different pressure relief and support measures in mine roadways prone to rockburst events [J]. Royal Society Open Science, 2021, 8(3): 10.1098/rsos.202044.
- [51] 王爱文,高乾书,潘一山,等.预制钻孔煤样冲击倾向性及能量耗散规律[J].煤炭学报,2021,46(3):959-972.
- WANG Aiwen, GAO Qianshu, PAN Yishan, et al. Bursting liability and energy dissipation laws of prefabricated borehole coal samples [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 959-972.
- [52] 朱斯陶,董续凯,姜福兴,等.硫磺沟煤矿巨厚强冲击煤层掘进工作面超前钻孔卸压失效机理研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(1):45-53.
- ZHU Sitao, DONG Xukai, JIANG Fuxing, et al. Failure mechanism of pressure relief with advance drilling in driving face of strong burst ultra thick coal seam in Liuhuanggou coal mine [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(1): 45-53.
- [53] 盖德成,李东,姜福兴,等.基于不同强度煤体的合理卸压钻孔间距研究[J].采矿与安全工程学报,2020,37(3):578-585.
- GAI Decheng, LI Dong, JIANG Fuxing, et al. Reasonable pressure-relief borehole spacing in coal of different strength [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(3): 578-585.
- [54] 王猛,王襄禹,肖同强.深部巷道钻孔卸压机理及关键参数确定方法与应用[J].煤炭学报,2017,42(5):1138-1145.
- WANG Meng, WANG Xiangyu, XIAO Tongqiang. Borehole de-stressing mechanism and determination method of its key parameters in deep roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1138-1145.
- [55] 何满潮,陈上元,郭志飚,等.切顶卸压沿空留巷围岩结构控制及其工程应用[J].中国矿业大学学报,2017,46(5):959-969.
- HE Manchao, CHEN Shangyuan, GUO Zhibiao, et al. Control of surrounding rock structure for gob-side entry retaining by cutting roof to release pressure and its engineering application [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(5): 959-969.
- [56] GONG S, TAN Y, LIU Y P, et al. Application of presplitting blasting technology in surrounding rock control of Gob-Side entry retaining with hard roof: A case study [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021: 1318975.
- [57] 华心祝,刘啸,黄志国,等.动静耦合作用下无煤柱切顶留巷顶板成缝与稳定机理[J].煤炭学报,2020,45(11):3696-3708.
- HUA Xinzhu, LIU Xiao, HUANG Zhiguo, et al. Stability mechanism of non-pillar gob-side entry retaining by roof cutting under the coupled static-dynamic loading [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3696-3708.
- [58] 马新根,王炯,武海龙,等.塔山煤矿回采工作面无煤柱开采切顶爆破试验研究[J].煤炭科学技术,2018,46(S1):27-32.
- MA Xingen, WANG Jiong, WU Hailong, et al. Experimental study on blasting of roof cutting with no pillar mining in working face of Tashan coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(S1): 27-32.
- [59] KANG H P, LYU H W, GAO F Q, et al. Understanding mechanisms of destressing mining-induced stresses using hydraulic fracturing [J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 196: 19-28.
- [60] 刘正和,杨录胜,廉浩杰,等.砂岩钻孔轴向预制裂缝定向压裂试验研究[J].煤炭学报,2019,44(7):2057-2065.
- LIU Zhenghe, YANG Lusheng, LIAN Haojie, et al. Experimental study of directional fracturing in sandstones with prefabricated cracks in the axial direction of borehole [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 2057-2065.
- [61] 赵善坤,张广辉,柴海涛,等.深孔顶板定向水压致裂防冲机理及多参数效果检验[J].采矿与安全工程学报,2019,36(6):1247-1255.
- ZHAO Shankun, ZHANG Guanghui, CHAI Haitao, et al. Mechanism of rockburst prevention for directional hydraulic fracturing in deep-hole roof and effect test with multi-parameter [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1247-1255.
- [62] SUN Y T, LI G C, ZHANG J F, et al. Stability control for the rheological roadway by a novel High-Efficiency jet grouting technique in deep underground coal mines [J]. Sustainability, 2019, 11(22): 6494.
- [63] 张振峰,康红普,姜志云,等.千米深井巷道高压劈裂注浆改性技术研发与实践[J].煤炭学报,2020,45(3):972-981.
- ZHANG Zhenfeng, KANG Hongpu, JIANG Zhiyun, et al. Study and application of high-pressure splitting grouting modification technology in coalmine with depth more than 1 000 m [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 972-981.
- [64] 李桂臣,孙长伦,孙元田,等.基于“两介质-三界面”模型的散煤注浆固结宏细观规律[J].煤炭学报,2019,44(2):427-434.
- LI Guichen, SUN Zhanglun, SUN Yuan Tian, et al. Macroscopic and microcosmic consolidation law of loose coal grouting based on the “two media-three interfaces” model [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 427-434.
- [65] 李文洲,康红普,姜志云,等.深部裂隙煤岩体变形破坏机理及高压注浆改性强化试验研究[J].煤炭学报,2021,46(3):912-923.
- LI Wenzhou, KANG Hongpu, JIANG Zhiyun, et al. Deformation failure mechanism of fractured deep coal-rock mass and high-pressure grouting modification strengthening testing [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 912-923.
- [66] 董红娟,张金山,姚贺瑜,等.不同参数大尺度注浆体试件力学特性与失稳机制[J].中国矿业大学学报,2021,50(1):

- 79–89.
- DONG Hongjuan, ZHANG Jinshan, YAO Heyu, et al. Mechanical properties and instability mechanism of large scale grouting specimens with different parameters [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(1): 79–89.
- [67] CHEN M, LU W B, ZHANG W J, et al. An analysis of consolidation grouting effect of bedrock based on its acoustic velocity increase [J]. *Rock Mechanics And Rock Engineering*, 2015, 48(3): 1259–1274.
- [68] 高红科, 王 琦, 李术才, 等. 注浆岩体强度随钻评价试验研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(2): 326–333.
- GAO Hongke, WANG Qi, LI Shucai, et al. Experimental study on the while-drilling evaluation of the strength of grouted rock mass [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(2): 326–333.
- [69] WANG Q, GAO H K, YU H C, et al. Method for measuring rock mass characteristics and evaluating the Grouting – Reinforced effect based on digital drilling [J]. *Rock Mechanics And Rock Engineering*, 2019, 52(3): 841–851.
- [70] 张 农, 韩昌良, 谢正正. 煤巷连续梁控顶理论与高效支护技术 [J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2019, 1(2): 48–55.
- ZHANG Nong, HAN Changliang, XIE Zhengzheng. Theory of continuous beam control and high efficiency supporting technology in coal roadway [J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2019, 1(2): 48–55.
- [71] 左建平, 文金浩, 胡顺银, 等. 深部煤矿巷道等强梁支护理论模型及模拟研究 [J]. *煤炭学报*, 2018, 43(S1): 1–11.
- ZUO Jianping, WEN Jinhao, HU Shunyin, et al. Theoretical model and simulation study of uniform strength beam support in deep coal mine roadway [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(S1): 1–11.
- [72] 董恩远, 王卫军, 马念杰, 等. 考虑围岩蠕变的锚固时空效应分析及控制技术 [J]. *煤炭学报*, 2018, 43(5): 1238–1248.
- DONG Enyuan, WANG Weijun, MA Nianjie, et al. Analysis of anchor space-time effect and research of control technology considering creep of surrounding rock [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(5): 1238–1248.
- [73] 李建忠, 康红普, 高富强, 等. 原岩应力场作用下的锚杆支护应力场及作用分析 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S1): 99–109.
- LI Jianzhong, KANG Hongpu, GAO Fuqiang, et al. Analysis of bolt support stress field and bolt support effect under in-situ stress field [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S1): 99–109.
- [74] 张 剑. 煤矿巷道锚杆预应力井下试验研究 [J]. *煤炭工程*, 2019, 51(7): 49–52.
- ZHANG Jian. Field test study on bolt prestress of coal mine roadway [J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(7): 49–52.
- [75] 刘金海, 孙 浩, 张治高, 等. 高预紧力锚杆破断及其控制的宏观力学机制研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 91–96.
- LIU Jinhai, SUN Hao, ZHANG Zhigao, et al. Research on macro-mechanics mechanism of bolt fracturing and its control with high pre-tensioned force [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 91–96.
- [76] 靖洪文, 苏海健, 孟 波, 等. 巷道锚杆锚固力学特性现场试验研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(1): 16–23.
- JING Hongwen, SU Haijian, MENG Bo, et al. Field test research on anchorage mechanical characteristics of roadway bolt [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(1): 16–23.
- [77] 李英明, 赵呈星, 丛 利, 等. 基于实际围岩变形的全长锚固锚杆杆体应力分布特征分析 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(10): 2966–2973.
- LI Yingming, ZHAO Chengxing, CONG Li, et al. Analysis of stress distribution characteristics of fully anchored bolt based on actual surrounding rock deformation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(10): 2966–2973.
- [78] 张 雷, 黄志敏, 白 龙, 等. 锚杆锚固缺陷无损检测信号的多尺度熵分析 [J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(6): 1077–1086.
- ZHANG Lei, HUANG Zhimin, BAI Long, et al. Multiscale entropy analysis of non-destructive test signals of anchoring defects of rock bolts [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(6): 1077–1086.
- [79] 董建军, 谢郑权, 杨 婷, 等. 基于 fbg 传感器的回采巷道锚杆支护监测分析 [J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(5): 2013–2021.
- DONG Jianjun, XIE Zhengquan, YANG Di, et al. Monitoring and analysis of the bolt supporting for the mining roadways based on the FBG sensor [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(5): 2013–2021.
- [80] 王昱栋, 代 伟, 马小平. 基于机器视觉的锚杆异常快速检测方法 [J]. *工矿自动化*, 2021, 47(4): 13–18.
- WANG Yudong, DAI Wei, MA Xiaoping. Rapid detection method of bolt abnormality based on machine vision [J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(4): 13–18.
- [81] 康红普, 姜鹏飞, 黄炳香, 等. 煤矿千米深井巷道围岩支护-改性-卸压协同控制技术 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(3): 845–864.
- KANG Hongpu, JIANG Pengfei, HUANG Bingxiang, et al. Roadway strata control technology by means of bolting-modification-depressuring in synergy in 1 000 m deep coal mines [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 845–864.
- [82] 康红普, 姜鹏飞, 杨建威, 等. 煤矿千米深井巷道松软煤体高压锚注-喷浆协同控制技术 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 747–762.
- KANG Hongpu, JIANG Pengfei, YANG Jianwei, et al. Roadway soft coal control technology by means of grouting bolts with high pressure-shotcreting in synergy in more than 1 000 m deep coal mines [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 747–762.
- [83] 王洪涛, 王 琦, 蒋敬平, 等. 深部巷道全长预应力锚注支护机理研究及应用 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(4): 670–677.
- WANG Hongtao, WANG Qi, JIANG Jingping, et al. Supporting mechanism and application of full-length prestressed bolt-grouting in the deep roadways [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(4): 670–677.
- [84] 刘天啸, 闫 帅, 韩 力. 高应力大变形巷道卸压让压联合控制技术 [J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(S2): 269–276.

- LIU Tianxiao, YAN Shuai, HAN Li. Combined control technology of destressing and yielding support in high-stress and large deformation roadway [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(S2):269-276.
- [85] 王成,韩亚峰,张念超,等.渗水泥化巷道锚杆支护围岩稳定性控制研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(4):575-579.
WANG Cheng, HAN Yafeng, ZHANG Nianchao, et al. Surrounding rock stability control with bolt support in seepage argillaceous roadway [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(4):575-579.
- [86] 王琦,张朋,蒋振华,等.深部高强锚注切顶自成巷方法与验证[J].煤炭学报,2021,46(2):382-397.
WANG Qi, ZHANG Peng, JIANG Zhenhua, et al. Automatic roadway formation method by roof cutting with high strength bolt-grouting in deep coal mine and its validation [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2):382-397.
- [87] 左建平,孙运江,王金涛,等.大断面破碎巷道全空间桁架锚索协同支护研究[J].煤炭科学技术,2016,44(3):1-6.
ZUO Jianping, SUN Yunjiang, WANG Jintao, et al. Study on full space truss and anchor coordinative support of mine large cross section broken roadway [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3):1-6.
- [88] 吴拥政,付玉凯,何杰,等.深部冲击地压巷道“卸压-支护-防护”协同防控原理与技术[J].煤炭学报,2021,46(1):132-144.
WU Yongzheng, FU Yukai, HE Jie, et al. Principle and technology of “pressure relief-support-protection” collaborative prevention and control in deep rock burst roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1):132-144.
- [89] 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. Seepage argillaceous roadway instability mechanism and safety control measures. [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.