

煤矿矿区普适性拓展型固体改性充填采煤技术与装备

刘建功^{1,4,7}, 赵家巍^{2,7}, 刘扬³, 杨军辉⁵, 史艳楠⁶, 王毅颖^{1,8,9}, 陈锋⁵

(1. 河北工程大学 机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 3. 中国矿业大学(北京) 机械与电气工程学院, 北京 100083; 4. 国家能源充填采煤技术重点实验室, 河北 邢台 054000; 5. 冀中能源股份有限公司 邢东矿, 河北 邢台 054000; 6. 河南理工大学 物理与电子信息学院, 河南 焦作 454003; 7. 河北省煤矿生态保护开采产业技术研究院, 河北 邯郸 056038; 8. 河北省智能工业装备技术重点实验室, 河北 邯郸 056038; 9. 河北省冀南新区现代装备制造协同创新中心, 河北 邯郸 056038)

摘要: 从我国煤炭行业绿色发展趋势和要求出发, 分析了煤炭企业对不同充填开采方式选择的考量因素, 以及影响充填开采技术推广的制约因素, 针对不同矿区地域分布特征和充填需求差异性, 划分了煤矿充填开采“保护生态环境优先、保护地面建筑优先、处理煤矸固废优先、提高经济效益优先”4类优先原则, 提出了“以充填开采作为煤矿保护生态环境的调节工具, 建设全过程全息立体生态矿山”的生态开采目标。依据充填开采顶板限定变形力学模型, 阐述了影响充填开采目标岩层下沉量的构成因素, 构建了生态环境保护、地面建筑保护、矸石固废处置3种充填工程模式下的工作面支护强度计算及覆岩变形控制方程。介绍了我国煤矿普适性充填采煤技术发展现状及发展方向, 涵盖散状原研固体充填、类贫混凝改性充填、矸石混凝土充填、薄煤层充填、区域性保护充填、巷道充填、选充留协同等适应各类煤矿需求的充填采煤技术, 详细描述了不同充填技术的材料制备、运输、充填工艺特点及适应性充填装备。为实现煤矿充填智能化, 建立了全面的数据感知系统, 通过空间规划及充填效果判定来实现从单元到整体充填工作面的智能化过程, 结合传感器网络和人工智能算法, 实时监测和控制煤矿固体充填过程, 提高充填质量和充填效率。煤矿充填开采在我国绿色矿山建设的远景规划中将扮演更加重要的角色, 加强基于主动充填的煤矿生产全过程生态矿山建设、普适性充填技术工艺体系构建、新型固体充填材料研制、智能化充填开采研发等4个方向的科技攻关, 我国煤矿充填开采会有极为广阔的发展前景。

关键词: 绿色开采; 充填开采; 生态保护; 智能化充填; 立体生态矿山

中图分类号: TD821 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)01-0380-20

General-purpose expansion type solid modification backfilling mining technology and equipment for coal mines

LIU Jianguo^{1,4,7}, ZHAO Jiawei^{2,7}, LIU Yang³, YANG Junhui⁵, SHI Yannan⁶, WANG Yiyi^{1,8,9}, CHEN Feng⁵

(1. School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 4. National Energy Backfilling Mining Technology Key Laboratory, Xingtai 054000, China; 5. Xingdong Coal Mine, Jizhong Energy Group Co., Ltd., Xingtai 054000, China; 6. School of Physics & Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 7. Hebei Coal Mine Ecological Protection Mining Industry Technology Research Institute, Handan 056038, China; 8. Key Laboratory of Intelligent

收稿日期: 2023-10-22 修回日期: 2024-01-22 责任编辑: 王凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1356

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2020402064); 中央引导地方科技发展资金资助项目(236Z1503G); 河北省高等学校科学技术研究资助项目(CXY2023002)

作者简介: 刘建功(1956—), 男, 山东沾化人, 教授, 博士生导师。E-mail: liujg@jzeg.cn

通讯作者: 赵家巍(1988—), 男, 河北南宫人, 高级工程师, 博士后。E-mail: hbzhaojw@163.com

引用格式: 刘建功, 赵家巍, 刘扬, 等. 煤矿矿区普适性拓展型固体改性充填采煤技术与装备[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 380-399.

LIU Jianguo, ZHAO Jiawei, LIU Yang, et al. General-purpose expansion type solid modification backfilling mining technology and equipment for coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 380-399.



移动阅读

Industrial Equipment Technology of Hebei Province, Handan 056038, China; 9. Collaborative Innovation Center for Modern Equipment Manufacturing of Jinan New Area (Hebei), Handan 056038, China)

Abstract: Based on the green development trend and requirements of China's coal industry, this paper analyzed the factors that coal mines consider in choosing filling mining methods and the constraints that affect the promotion of filling mining technology. According to the geographical distribution characteristics of different mining areas and the differences in filling demands, four types of priority principles of "protecting the ecological environment, protecting surface buildings, addressing coal gangue and solid waste, and improving economic efficiency" for coal mine filling mining were defined. The ecological mining goal of "building the whole process holographic intelligent ecological mine by adopting filling mining as a regulation tool to protect the ecological environment in coal mines" was put forward. Based on the finite deformation mechanical model of the roof in filling mining, the factors affecting the subsidence of target rocks in filling mining were expounded, and the supporting strength calculation and overburden deformation control equations under three filling engineering modes such as ecological environment protection, ground building protection and gangue treatment were established. In addition, the paper introduced the development status and direction of universal filling technology in coal mines in China, including solid filling of raw gangue waste, modified solid filling, gangue concrete filling, integrated mining-filling-charging, large amount of gangue filling, filling method in thin coal seam, filling method for regional protection, filling method in continuous mining roadway and other filling technologies that meet various needs of coal mines. The material preparation and transportation of different filling technologies, the characteristics of filling process and the adaptive filling equipment were described in detail. In order to realize the intelligent filling of coal mines, a comprehensive data perception system was established, which realized the intelligent process from unit to whole filling working face through spatial planning and filling effect judgment. The sensor network and artificial intelligence algorithm were combined to monitor and control the solid filling process of coal mine in real time, and improve the filling quality and filling efficiency. Coal mine filling mining will play a more important role in the long-term planning of China's green mine construction. Strengthening the scientific and technological research of the whole process of coal mine production based on active filling, the construction of universal filling technology and process system, the development of new solid filling materials, and the research of intelligent filling mining, will help the filling mining technologies in China's coal mines have a very broad prospect.

Key words: green mining; filling mining; ecological protection; intelligent filling; steric ecological mine

近年来,我国生态文明建设持续推进,尊重自然、顺应自然、保护自然的生态文明理念日渐深入人心。煤矿充填开采作为资源获取与生态保护的重要协调工具,在我国煤炭工业发展中占据越来越重要的地位。煤矿充填开采是一种生态保护性开采技术,是从源头上防控岩层移动及地表沉陷,实现以最小的生态扰动获取煤炭资源的有效方法^[1],通过充填开采把对生态环境、水土资源和基础设施的影响限制在可控范围内,促进煤炭开采和生态环境协调共融发展。采用充填开采防控地表沉陷并建设生态矿山,涵盖煤矿安全生产、生态环境治理、废弃物资源化利用等多个领域,符合煤矿高质量转型发展和生态文明建设的发展战略。

经过行业科技工作者的共同努力,我国建立了充填开采理论、技术与装备体系。理论方面,国内学者针对充填开采的岩层控制、应力分布、地表移动变形等问题展开基础研究,相继提出了“条带充填模型”

“间隔条带充填模型”“等价采高”“连续曲形梁模型”等几种有代表性的理论模型^[2],在一定程度上揭示了充填开采充填体与上覆岩层相互作用下岩层移动的本质问题。材料方面,相继研发了矸石固体、矸石膏体、矸石浆体、高水速凝充填材料、矸石改性固体、矸石聚合物型材料等不同种类的充填材料^[3-7],其中以矿区矸石固体废弃物为主要充填材料的充填开采在成本、环保等方面具有优势,应用范围较广,普及率较高。工艺方面,形成了长壁工作面充填、巷道充填、离层区注浆充填、采空区注浆充填、厚煤层分层充填、区域性大面积充填等多种充填工艺^[8-13]。装备方面,我国已研发出了固体、膏体、浆体等充填材料制备、转载运输、有控充填等系列化、成套化装备,并对其中的关键充填装备进行了迭代升级,例如固体充填液压支架先后研制了“顶梁+尾梁”结构、“双级推实”结构、“四柱双顶梁”结构、“垂直导柱”结构、“推实/挡矸”结构等不同架型^[14-16],形成了目前的四柱双顶梁结构

的成熟架型。

自2002年伊始,河北省率先建成了无矸石外排绿色示范矿井,并陆续在河南、山东、安徽、山西、内蒙古等省区推广应用。在应用实践的过程中发现,对于不同地域、不同矿区对充填开采的需求不尽相同^[17],需要选择符合煤炭企业自身需求的充填方法。当前我国充填开采技术与装备的发展^[18-21],可以适应和满足煤炭企业的各类需求,可以在生态保护和环境再造、地面建筑物保护和矸石固废处理等多方面发挥作用,并且充填产能和矸石处理量逐步提升、充填成本不断下降,推动充填开采在煤矿绿色开采体系中发挥着越来越大的作用。

1 充填开采技术对煤炭企业需求的适应

我国煤矿应用的充填开采有多种方法,在多种充填开采工艺中,充填开采的投资、产量、矸石处理能力和充填成本等都是煤炭企业如何选择充填方式以及是否能把充填开采持续下去的关键考量要素。

1.1 基于充填开采的矿区立体生态环境再造

煤炭开采是在向大自然获取资源,开采过程会对自然生态环境造成破坏,虽然煤炭工作者为保护生态环境做出了不懈的努力,但先破坏后治理的基本模式没有改变,而生态环境的破坏很大程度是不能逆转的,即便付出再大的修复代价,采煤沉陷、固废污染和原始水系破坏对生态环境的影响也不能完全恢复。

充填开采虽然不能作为主流采煤方法,但是,当煤炭开采与地表沉陷、地面建筑保护、井上下水系和其他伴生资源开采发生矛盾的时候,充填开采会起到主流采煤方法所起不到的作用,可在最需要的地方从

源头上消除地表沉陷、保护生态环境、保护水资源。煤炭行业应该根据发展和生态环境的要求,把能主动保护生态环境的充填开采嵌入到煤炭生产过程中。建井伊始,就要把地质勘探、矿井设计、煤炭开采、附近城市建设、地面保护、水资源保护、生态再造和恢复全过程统一考虑。

基于充填开采主动保护理念,树立立体生态观念,把充填开采作为煤矿保护生态环境的调节工具立体化利用,按照矿区地面环境和井上下水系保护的立体生态规划设计要求,控制地表沉陷区域和沉陷程度,进行采煤动态全程地质分析,井上下统一设计、规划充填开采,建设全过程全息立体生态矿山(图1):

(1) 研究充填开采的上覆岩层运移规律,不同地质条件、不同充填材料、不同充填密实度、不同时间和区间的上覆岩层演变机理,利用微震技术进行动态监测,为充填开采液压支架设计、充填工艺制定、充填区域确定、精准充填提供理论支撑。

(2) 根据地面生态环境和地面水系径流方向,以及附着物的状况,确定保护范围和保护等级,研究保护方式,统一规划和再造煤炭开采过程中和开采后的地面生态环境,使煤矿开采和生态环境息息相关。

(3) 煤田地质全程全息采集、分析和解释,利用地质勘探资料和采矿过程揭露的地质信息,动态修正约束条件,动态分析和解释地质构造状况,建立煤矿全过程、全信息地质分析、解释体系,及时反演出能准确指导生产的采煤工作面地质模型和充填工作面地质模型,为立体生态建设提供动态的地质变化数据。

(4) 针对不同保护区域和保护对象,结合充填工作面全息地质模型,研究出充填质量判据,结合不同充

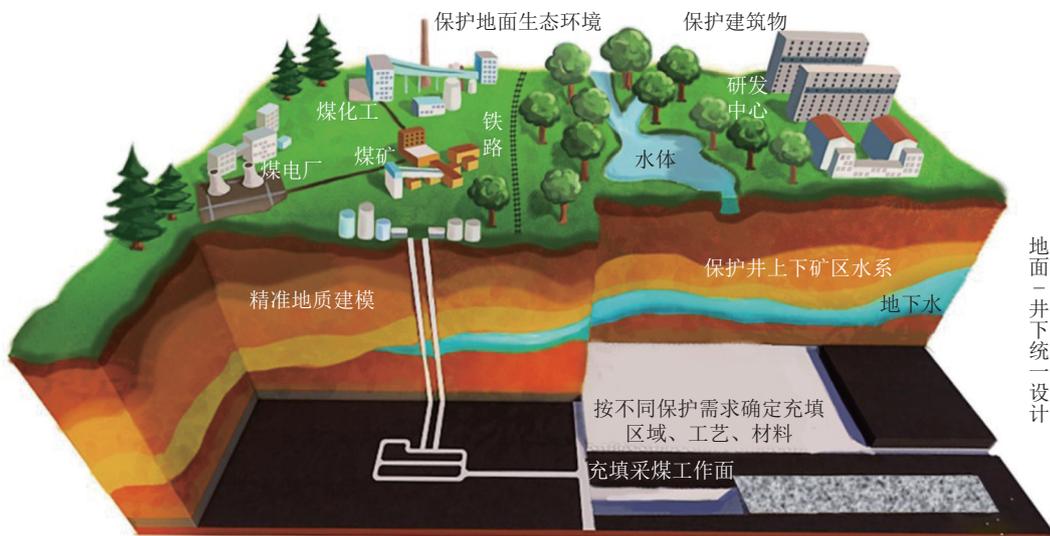


图1 全过程全息立体生态矿山

Fig.1 Whole process holographic three-dimensional ecological mine

填工艺,对特定区域实施精准充填,煤炭开采不再是生态环境的杀手,而与环境保护、生态再造互补共生、融为一体。

1.2 充填开采方式选择的优先原则

充填开采方法既可以主动保护生态环境,控制地表沉陷,又可以处理煤矸石,在不同的矿区和煤炭企业,对充填开采的目的取向有着不同的选择,也就出现了不同的优先选择原则。

(1) 保护生态环境优先原则。我国华北、中部城郊矿区、西部生态脆弱矿区对周边生态环境的影响较为敏感,对生态环境保护需求更为强烈。全面保护矿区生态环境,把井下采煤和地面生态环境统一规划、设计,协调井下开采和地面生态环境关系,合理安排充填采煤区域,分配矸石资源,保证必须保护区域的充填材料充足,使各类生态保护元素(山、水、林、田、湖、草)的目标保护层有序沉降,实现煤炭生产和环境保护双重效益最大化。

(2) 保护地面建筑优先原则。这种选择方式要控制地表沉陷,解放“三下”压煤,延长矿井服务年限;不少煤矿地面有建筑物和村庄,迁村费用高、时间长,况且,有些建筑物是不能搬迁的,这种条件下必须采用大面积连续充填开采方式,对充填开采的充填质量和效果一致性提出了更高的要求,充填材料、充填工艺、充填装备的选择要以控制影响地面建筑物的关键变形指标为主要依据,以充填开采上覆岩层演变机理为理论支撑。

(3) 处理煤矸固废优先原则。不少矿区地表没有建筑物,生态环境也没有太大的影响,只是矸石量太大,矸石成了污染环境的主要因素,需要在采煤过程中尽可能多地处理矸石,这也是环境保护的一种做法,其特点在于不对岩层控制作特殊要求,相应的充填装备适应性要增强,需满足岩层垮落和岩层连续2种条件下的顶板管理需求。

(4) 提高经济效益优先原则。充填目的以及充填方式的选择以提高经济效益为优先原则,例如高瓦斯煤层群保护层有控卸压充填开采,在处置矸石固废的同时改变瓦斯涌出规律,减少瓦斯治理方面的投入;对具有巨厚难垮落顶板的煤层实施阶段性充填开采方式,在不影响效率和保障安全的前提下实现技术经济效益最优;不规则块段资源采取巷道充填方式,能够以最小的充填投入提高资源采出率;遇到垂直于工作面推进方向的公路、铁路、线塔等需要保护的条形地面设施,此时可结合岩层地质条件,采取特殊设计的局部性充填开采方式,使经济效益最大化。

1.3 充填开采技术制约因素

(1) 充填方式的选择。充填方式是充填目的性的一个重要选择,限定了充填投资、充填成本和充填效果等诸多因素。对于煤炭企业,充填方式的选择是一件慎重的事情,因为充填方式选定后必须投入工程建设和装备,而且各种充填方式工艺相差很大,基础建设和充填装备都不通用,也不易更改,一旦达不到预期目的,坚持和放弃都很难决断,所以,企业根据不同地质条件,对不同充填方法进行研判,选择正确的充填方法对控制充填成本和保证充填效果至关重要。

(2) 地质条件。充填开采对煤层地质条件有一定的适应性,一般来说,煤层厚度适中、围岩条件良好、倾角较小的地质条件更有利于实施充填开采。特殊地质条件对充填开采材料、工艺、装备等方面有更高的要求,如软岩顶板要求充填材料早强性能好,在不影响推进速度的条件下快速起到支撑顶板的作用;薄煤层空间小,充填设备空间布局紧张,需选用具备良好后视空间的特殊设计的充填液压支架;特厚煤层需采用“分层充填”或“顶充底放”的充填工艺方式;倾角较大的煤层需调整工作面生产布局,尽可能地避免大倾角俯采充填。

(3) 充填开采的产量和矸石处理量。煤炭产量和矸石处理量是企业实施充填开采的重要取舍依据。采用充填开采时的煤炭产量和矸石处置能力是煤炭企业关心的关键问题。对于长壁工作面,充填是和采煤同时或略有滞后的一种工艺方法,必须先采出空间后再实施充填,如果充填的速度慢,不能和采煤同步,就会限制采煤的速度,影响充填工作面的产量。对于巷道充填,充填效率受制于巷道掘进速度,形不成规模化生产,产能有限,仅适应于边角余煤的回收或矸石量很小的矿井。充填开采尽管保护了地面,但低产量带来低效益甚至负效益,不符合企业的管理理念。充填开采是以体积换体积,以时间争空间,只有提高了煤炭产量,才能提升矸石处理能力,这是煤炭企业选择充填开采关键因素,要求研究适合的充填工艺和装备,满足提高煤炭产量和矸石处理量能力的要求。

(4) 初期投资和运营成本。充填是采煤附加的功能,必须在原来的基础上再增加一部分装备、材料和人员,必定会增加一部分成本,这也是充填开采推广中的不可逾越的问题。况且有的充填方式成本还比较高,煤炭市场行情好的时候还能维持,如果煤价降低,利润完成有困难甚至亏损的时候,则会造成企业对充填开采取舍的选择。初期投资是企业选择充填的重要因素,而后期运营成本是充填能不能长期维系的重要条件。充填开采是一个附加环境保护要求的

投资项目,并且短期内的产出回报难以完全收回建设投资,有的充填方式初期投资很大,直接影响了企业对充填开采投资的决心。矸石前期加工量是初期投资和运营成本提高的主要因素,如若充填材料前期加工量大,势必增加设备投资和充填成本,况且前期材料加工量大的充填方法,充填成本不随充填量增大而减少,而前期材料加工量小的充填方法,充填成本随充填量增大而减少,充填材料的附加加工成本是充填开采选择的又一重要因素。

(5) 充填效果。目前的充填开采处于小规模实施阶段,有的企业需要保护地面塌陷,有的是环保要求处理矸石,只是把充填开采当做临时采用的一种技术手段,还没有从矿区地面生态环境总体状况和井下采煤相结合,有目的地利用矸石产出量规划充填区域,所以,大部分实施充填开采的煤炭企业没有建成技术体系,没有专业化技术人员,致使充填效果差强人意,因此对充填失去信心,也会影响充填开采的推广应用。

2 不同充填需求的上覆岩层控制机理

不同的充填需求对顶板控制的要求也不同^[22-26],如保护地面建筑时以主关键层为主要控制对象,相应的标准为地面建筑所允许的变形标准^[27];保护生态环境时以保水层、保土层为主要控制对象,相应的标准为地下水环境保护、地面水土保持所允许的变形标准^[28];规模化处置矸石时以对工作面造成直接影响的近场覆岩为主要控制对象,相应的标准为确保工作面支架非密实充填条件下合理的受力状况。针对充填开采岩层控制,我国学者提出了众多理论模型^[2],本节主要基于连续曲形梁模型对不同岩层控制需求下的覆岩、充填体、充填支架相互作用机理展开分析。

2.1 充填开采覆岩变形控制

充填开采工作面上覆岩层中形成的近场覆岩(直接影响工作面压力显现的多层嵌固组合梁)由“煤壁-工作面支架-充填体”结构体系所支撑^[29-31](图2),远场覆岩直至地表由凝结压实的充填体及恢复稳定的近场覆岩所支撑^[32]。在岩层纵向运动方向上,近场覆岩变形活动可通过支架、材料、工艺的优化进行直接控制,远场覆岩变形则由特定地质条件下的岩性结构所决定,通过近场覆岩自下而上间接控制。

充填开采目标岩层下沉的因素构成可用式(1)描述的函数表示,即

$$h_b = f(h_1, h_2, h_3) \quad (1)$$

式中, h_b 为目标岩层下沉量,对应不同充填需求时的

岩层控制层位、标准; h_1 为充填前下沉量,在既定因素(煤体强度、地质条件、采充工艺)下,主要受控于液压支架的结构、工作阻力和支护强度; h_2 为充填过程下沉量,主要受充填材料力学性能影响; h_3 为覆岩岩性特征下沉量,与近场覆岩变形量及所形成的结构密切相关。

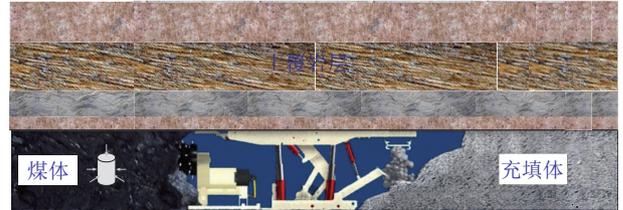


图2 “煤壁-工作面支架-充填体”支撑结构体系^[33]

Fig.2 “Coal wall - working face support - filling body” support structure system^[33]

当确定近场覆岩的组合运动条件后, h_1 和 h_2 可以直接主动控制,两者直接决定了近场覆岩的变形量, h_3 则需通过与近场覆岩的变形关系来间接控制,以规模化矸石处置为目的的充填开采时则无 h_3 项。

2.1.1 充填前下沉控制

充填前下沉是割煤完成还没有充填时形成的下沉,形成充填前下沉的可控因素是充填液压支架,其结构如图3所示。充填液压支架的结构、初撑力及工作阻力、支护强度是控制顶板充填前下沉的关键因素,必须根据所控制的顶板类型和需要加以考量。

(1) 固体充填支架结构。充填液压支架以限定直接顶变形为设计目标,要求整个液压支架顶梁上不能有薄弱点,支柱支撑力能够均匀地分布于顶梁,经过长期研究与实践,设计出了四柱中间铰接双顶梁结构,采煤部分是正四连杆结构,充填部分是反四连杆结构,前后顶梁共用一个平衡千斤顶,前后顶梁分别由两个立柱支撑,对顶板支撑无薄弱点。

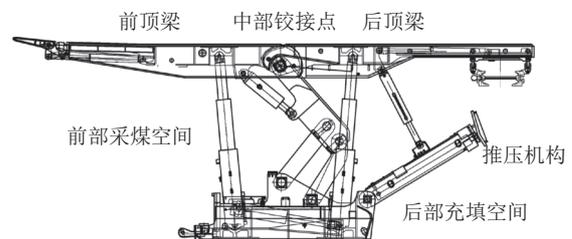


图3 充填液压支架结构

Fig.3 Backfilling hydraulic support structure diagram

(2) 工作阻力和初撑力。在充填开采的过程中,充填支架的工作阻力和初撑力有效地支护了顶板,给充填留出了空间,赢得了时间,才顺利完成充填工作,尽管充填完成后显现出来的支架工作阻力明显低于垮落法采煤,这是煤壁、支架和充填体共同支撑顶板现

象, 充填过程中, 充填体还没有形成支撑力的时间, 液压支架的工作阻力和初撑力发挥着关键作用。

(3) 支护强度。液压支架工作阻力的设计取决于支护强度, 充填开采液压支架控顶距大于垮落法开采液压支架控顶距, 相同工作阻力时充填支架的支护强度有所下降, 但由于充填体可以有效接力支护顶板, 降低了矿压显现程度, 在以往充填采煤实践中采用了低支护强度设计理念, 虽然在充填实践中也得到证明, 但并未重视充填开采长距离控顶导致前后顶梁受力差异较大的问题, 为严格控制充填前下沉, 应尽可能地缩短后顶梁长度, 加大支架后部的支护强度, 提高充填液压支架的支护强度, 确保在地质条件发生变化时支架依然有良好的适应性。

(4) h_1 的定量描述。充填支架对近场覆岩起限定变形作用, 充填开采近场覆岩限定变形力学模型如图 4 所示。

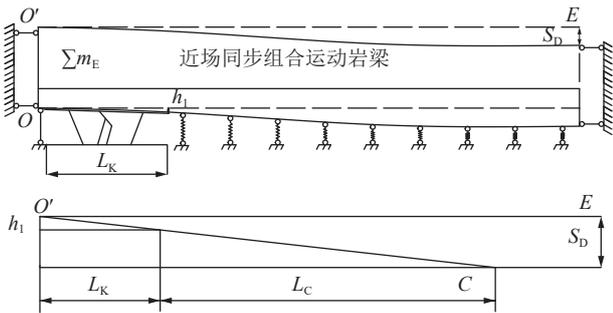


图 4 充填开采近场覆岩限定变形力学模型

Fig.4 Finite deformation mechanics model of near field overlying rock in filling mining

支架支护强度对充填前下沉有重要影响, h_1 可用式 (2) 描述^[34-35], 即

$$h_1 = \frac{\sum m_E \gamma_E (L_K + L_C)^3 L_K - P_z L_K^4}{8EI K_T} \quad (2)$$

其中, $\sum m_E$ 、 γ_E 为支架控制的近场覆岩厚度、容重; P_z 为支架支护强度; L_K 为支架控顶距; L_C 为充填体支撑条件下近场覆岩的水平压实步距; EI 为近场覆岩下部坚硬岩层的弯曲刚度; K_T 为岩重分配系数, 可通过文献^[36]介绍的超静定岩梁结构模型进行确定。

将式 (2) 进一步变换得

$$h_1 = \frac{(\sum m_E \gamma_E - P_z) L_K^4 + \sum m_E \gamma_E (3L_K^3 L_C + 3L_K^2 L_C^2 + L_K L_C^3)}{8EI K_T} \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出, 提高支架支护强度和缩短支架控顶距离均有助于减小 h_1 的值。

2.1.2 充填过程下沉量控制

充填材料力学特性是控制充填过程下沉的关键。充填率是充填空间和充填物的容积关系, 密实度是充填体初充和形成不可压缩体比例关系。最后衡量充填效果的是充填区达到充分采动后的充填率 k_b 与密实度 k_{ys} 的乘积, 可定义为密实充填率, 用 k_b 表示, 那么充填过程下沉量 h_2 可表示为

$$h_2 = (m_c - h_1)(1 - k_b) \quad (4)$$

其中, m_c 为煤层厚度。可见, 在既定的煤层赋存条件下, h_1 和 h_2 的值由式 (2) 和式 (4) 联立确定, 从主动控制的角度来说, h_1 以受支架控制为主, h_2 以受充填材料控制为主。

为满足不同需求下的充填开采控制充填过程下沉的需要, 采用细粒级高活性胶凝材料^[37], 提高骨粒穿透性能, 降低水化热, 提高胶凝材料与矸石的结合强度, 使矸石基充填材料具有早强快硬、体积不缩、环保无害和物理性能稳定的特点, 保证各种需求的充填效果, 减少和避免充填过程下沉。

2.1.3 岩性特征下沉量控制

充填采场顶板及覆岩自下而上形成连续曲形梁, 在连续曲形梁形成与发展的过程中, 远场覆岩经过空间运动达到新的平衡状态, 调整至平衡状态的空间位移大小与其自身岩层特征、近场覆岩变形量及所形成的结构密切相关, 沿走向方向符合负指数函数关系曲线^[38], 可表示为

$$h_3 = h_m (1 - e^{-az^b}) \quad (5)$$

其中, h_m 为近场覆岩移动稳定后的位移量, 稳定后 $h_m = (h_1 + h_2)$; $Z = x/L$, x 为以工作面位置为原点的走向距离为 x 处的位移量, L 为近场覆岩基本稳定点离工作面的距离; a, b 为随岩层离煤层的距离以及岩性特点的不同而变化的系数。

从式 (5) 可以看出, h_1 和 h_2 限制着 h_3 的变形量, 在充填过程中, 顶板岩石虽然特性各异, 只要液压支架的支护状态和充填效果足够好, 就能控制顶板的运移, 进而控制岩石特征下沉。

2.2 生态环境保护充填控制

针对矿区各类生态元素的不同保护需求, 统一规划大面积充填布局, 有选择的确定保水、保土标准, 达到隔水层有效控制、地表有序沉降目标。

分类确定生态保护层不同区域允许变形值

$$\begin{cases} [h_{Gi}] \geq h_{bi}, i = 1, 2, 3, \dots, n \\ [h_{Tj}] \geq h_{bj}, j = 1, 2, 3, \dots, m \end{cases} \quad (6)$$

式中, $[h_{Gi}]$ 、 $[h_{Tj}]$ 分别为水、土生态保护层对应的允许

变形值; n 为矿区内需要保护的水类系别 (河流、湖泊、湿地、潜水、承压水等) 的数量, i 为 1, 2, 3, \dots , n 的遍历取值; m 为矿区内需要保护的陆地类别 (山地、林地、农田、草地、沙地等) 数量, j 为 1, 2, 3, \dots , m 的遍历取值。

联立式 (2)~(6), 生态保护层不同区域的支护强度 P_z 和密实充填率 k_b^{Gi} 、 k_b^{Tj} 应满足式 (7)。

$$\begin{cases} [h_{Gi}] \geq \left[m_c(1-k_b^{Gi}) + \frac{\sum m_E \gamma_E (L_K + L_C)^3 L_K - P_z L_K^4}{8EIK_T} k_b^{Gi} \right] \times \\ (1 - e^{-az^b}) \\ [h_{Tj}] \geq \left[m_c(1-k_b^{Tj}) + \frac{\sum m_E \gamma_E (L_K + L_C)^3 L_K - P_z L_K^4}{8EIK_T} k_b^{Tj} \right] \times \\ (1 - e^{-az^b}) \end{cases} \quad (7)$$

通过分类别分区域确定生态保护层判据, 统一协调井下开采和生态环境关系, 合理安排采充工艺, 对不同区域实施差异化充填, 确定保护范围和目标, 有的放矢地进行充填。

2.3 地面建筑保护充填控制

根据矿区建筑物的保护等级, 确定地表移动变形设防标准。在地下开采影响下, 建筑物的变形与破坏是由于开采区上方及其周围地表产生的移动与变形作用于建筑物的基础, 导致建筑物受到附加应力的作用而产生的。地表变形分为倾斜、曲率、水平变形, 它们分别由下沉和水平移动导出。

采用充填开采保护地面建筑时需采用充填开采与沿充留巷组合充填工艺^[39], 以确保形成大面积充分采动条件时地面受护建筑处于均匀下沉区域, 从而将开采扰动对建筑物的影响降至最小。在充填开采过程中通过控制 h_1 、 h_2 、 h_3 三个下沉值控制地表沉降变形, 进而控制地表的动态倾斜、曲率、水平变形, 联立式 (2)~(5) 并求导得到式 (8)~(10), 即

$$\frac{dh_K}{dx} = \left[m_c(1-k_b) + \frac{\sum m_E \gamma_E (L_K + L_C)^3 L_K - P_z L_K^4}{8EIK_T} k_b \right] \times \frac{1}{L} abZ^{b-1} e^{-az^b} \leq [i_K] \quad (8)$$

$$\frac{d^2 h_K}{dx^2} = \left[m_c(1-k_b) + \frac{\sum m_E \gamma_E (L_K + L_C)^3 L_K - P_z L_K^4}{8EIK_T} k_b \right] \times \frac{1}{L^2} abZ^{b-2} [(b-1) - abZ^b] e^{-az^b} \leq [K_K] \quad (9)$$

$$\varepsilon(x) = br \left[m_c(1-k_b) + \frac{\sum m_E \gamma_E (L_K + L_C)^3 L_K - P_z L_K^4}{8EIK_T} k_b \right] \times \frac{1}{L^2} abZ^{b-2} [(b-1) - abZ^b] e^{-az^b} \leq [\varepsilon_K] \quad (10)$$

式中, h_K 为控制地表移动的关键层垂直位移量; $[i_K]$ 为关键层倾斜变形允许值; r 为主要影响半径; $[\varepsilon_K]$ 为水平变形允许值; K_K 为目标岩层的容许曲率变形值。

由于对建筑物有直接影响的倾斜变形、曲率变形、水平变形分别是下沉函数的一阶、二阶导数以及二阶相关导数, 因此控制好 h_1 、 h_2 就能控制好 h_3 , 从而将地面建筑物变形指标控制在允许范围内。

2.4 处置矸石优先充填控制

以处理矸石为优先原则时充填的目的为快速消纳矸石, 要求更快的充填速度、更高的充填效率, 对充填质量和充填效果则要求不高, 该充填模式下充填液压支架需进行特殊设计, 将密实推压机构更改为挡矸机构, 同时顶板管理由护顶模式改为切顶模式。

类似于垮落法开采工作面, 按照顶板弯拉和剪切 2 种破坏方式进行支架支护强度设计, 即

$$A \leq p \leq A + \frac{m_B \gamma_B L_0}{4L_K} \quad (11)$$

其中, p 为支架支护强度; A 为支撑垮落岩层 (直接顶) 所必须的支护阻力, Pa; m_B 为基本顶的厚度, m; γ_B 为基本顶容重, kN/m³; L_0 为基本顶初次断裂步距或跨度, m; L_K 为控顶距, m。

$$p \geq A + m_H \gamma_H L_G / (2L_K) \quad (12)$$

$$\varepsilon \geq m_c(1-k_b) - m_z(K_A - 1) \quad (13)$$

其中, m_H 为可能整体切断的岩层厚度, m; γ_H 为可能整体切断的岩层平均容重, kN/m³; L_G 为可能整体切断的岩层极限跨度 (或切断步距), m; ε 为支柱的额定缩量; m_z 为直接顶厚度, K_A 为直接顶碎胀系数。

3 普适性固体改性充填开采方法

普适性大颗粒集矸充填开采是以加工量小、制备简便、成本低的大颗粒矸石集料为基础 (矸石散体材料: 矸石颗粒最大粒径 ≤ 100 mm; 类贫混凝改性材料: 矸石颗粒最大粒径 ≤ 40 mm; 矸石混凝土材料: 矸石颗粒最大粒径 ≤ 40 mm), 通过研发多样化的充填材料、适应不同需求的充填工艺、适应不同工况的充填装备, 形成普适性的、多样性的、体系化的充填开采技术。以矸石固废材料为基础, 将洗煤厂产出的矸石不加工或简易加工后, 直接或与辅助性物料制备成大颗粒矸石基充填材料, 输送方式可采用胶带输送机运输或大

直径管道泵送, 该类充填方法对充填材料的前期加工量小、加工设备少、工艺简单、成本低, 可根据不同充填需求采用不同的充填方法, 保证预期充填效果, 是一种源于矸石固体的适应于不同地域、不同矿区的普适性充填开采方法。

3.1 多样化大颗粒集矸充填材料

以矸石固废处置为目的的充填开采可采用大颗粒集矸直接作为充填材料, 矸石颗粒最大粒径控制为 100 mm。但是以矸石为主要充填材料的散体物料, 因为颗粒间无黏结性, 没有变形协调约束, 具有明显的流动性、压硬性, 在失去约束后, 仍然表现出明显的散体特征, 充填后会产生滑落, 松散度大、接顶困难。当以控制岩层为目的的保护性充填开采时, 必须改变充填材料的散体特征, 研究改性充填材料, 提高充填质量和效果。

(1) 类贫混凝改性材料。散状固体改性材料, 要具有良好的空隙填充能力和颗粒粘合作用, 并使充填体经推实后短时间内实现自稳。同时, 因为使用地点在地层深处, 不能有任何污染物质, 对地下水环境造成影响。利用无害化处理后的工业固废(矿渣、钢渣、脱硫石膏等), 研制高性能胶结材料, 作为固体改性充填胶凝物, 通过机械活化和添加高效激发剂, 有效激活固废潜在胶凝活性。将胶凝材料能和矸石料(矸石颗粒最大粒径控制为 40 mm) 在地面完成干式制备, 垂直投放或斜井运输并转载到工作面后按比例添加水份, 充填后经加压短时间进行水和反应, 快速形成高强度充填体, 改变了散状固体的散体特性, 具有抗压能力, 形成一种类贫混凝改性充填材料(图 5), 碾压固化后单轴抗压强度可达到 5 MPa。

(2) 矸石混凝土(矸石矸) 充填材料。类贫混凝改性材料解决了矸石散体特征的问题, 提高了充填效果, 但仍然采用胶带运输的方式没有改变, 对于特殊地质条件和特殊需求的区域还是受到限制。

在改性充填材料基础上改变各组分材料的配合



(a) 成型前

(b) 成型后

图 5 类贫混凝改性充填体试块

Fig.5 Lean cement of modified backfill test block

比, 仍采用 40 mm 大颗粒矸石, 经充分搅拌制成图 6 所示的矸石矸充填材料, 洗煤厂的矸石经简易破碎后直接利用, 避免了矸石前期大量加工, 矸石矸料浆可以利用大颗粒混凝土输送泵远距离输送, 也可利用小型移动泵站工作面泵送, 充入采空区后形成的矸石矸早强性能好, 脱模时间可控制在 2 h 以内, 硬化后单轴抗压强度能够在 5~15 MPa 间调节。创新性的矸石矸制备、输送工艺及良好的力学性能, 拓宽了矸石充填的适用范围, 提高了特殊环境下的充填适应性。



图 6 矸石混凝土(矸石矸) 充填材料

Fig.6 Gangle concrete filling material

3.2 适应不同需求的充填工艺

以煤矸石单独或添加适量的粉煤灰、黄土作为充填材料的散状固体充填工艺目前应用已经较为成熟, 适用于矸石固废处置为优先原则的充填开采。但是, 当面临岩层控制更为严格、充填材料力学性能要求更高或遇到特殊地质条件、工况条件时, 需要在原有充填工艺基础上进一步拓展, 形成适应不同条件和需求的多元化充填工艺。

(1) 类贫混凝改性充填工艺。改性材料充填要求矸石粒径小于 40 mm, 严格控制充填物料配合比, 制成的充填材料通过输送运输系统运至采空区进行连续充填作业, 适用于以保护生态环境或保护地面建筑为优先原则的充填开采。图 7 为混合式改性充填技术的地面充填站布置示意图, 图 8 为类贫混凝改性充填工艺效果。该种充填工艺矸石前期加工也很少、吨矸成本低、井上下充填系统简单、管理难度低, 矸石处理能力大, 地表控制能力强, 有效避免了固体的散状特性的影响。

(2) 大颗粒矸石矸充填工艺。将洗选矸石粗破碎后配以适当比例的胶结材料, 经充分搅拌制成矸石矸

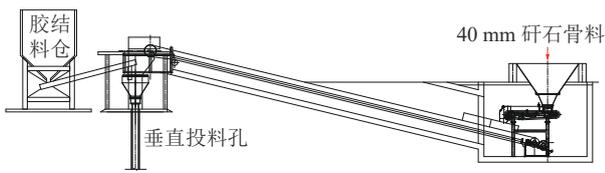


图 7 类贫混凝改性技术地面充填站

Fig.7 Ground filling station with modified solid backfilling technology



图 8 类贫混凝改性充填工艺效果

Fig.8 Filling effect of modified backfilling material

料浆,由大颗粒混凝土输送泵将料浆泵送至充填作业区。这种充填材料最明显的特征是大颗粒、高比率,前期加工少、成本低、生产能力大、制作工序简便;相比改性固体材料,矸石砗材料均匀性更好、承载性能更高,利用大直径管道泵送充填的工艺方式能够适应于以保护地面建筑为优先原则且煤层条件为薄煤层的区域。图 9 为大颗粒矸石混凝土充填工艺。

(3) 随采移动式矸石砗充填工艺。当前我国山西、内蒙古地区井田面积大、工作面推进距离长,不可避免地产生了充填材料长距离输送问题。长距离输送为避免堵管而要求材料凝固速度慢,但是工作面高效充填要求材料凝固速度快,长距离输送与材料凝固之间的矛盾极为突出,采用图 10、11 所示的“胶带-管输”随采移动式充填泵站可有效的解决这一难题,一方面移动建站将管道运输距离缩至最短,充填材料在

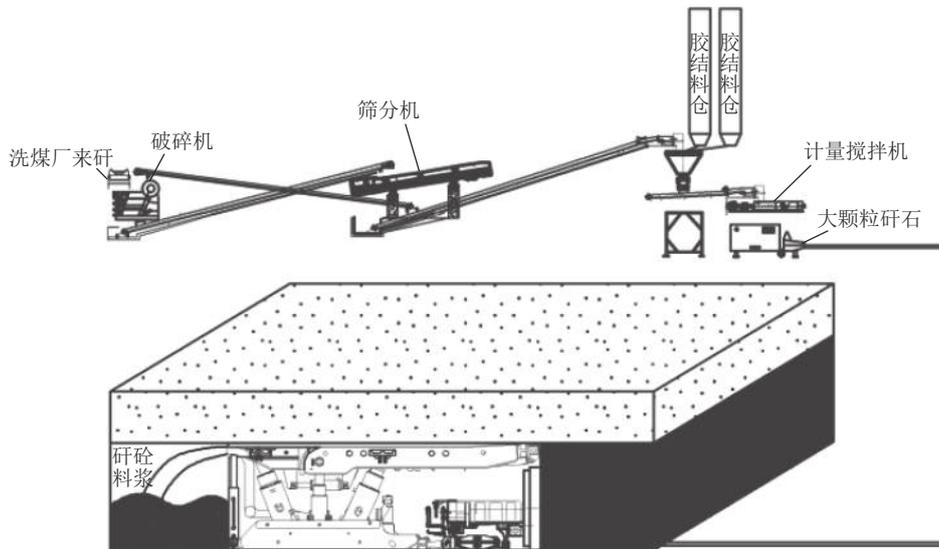


图 9 大颗粒矸石混凝土充填工艺

Fig.9 High concentration and large particle size gangue concrete filling diagram

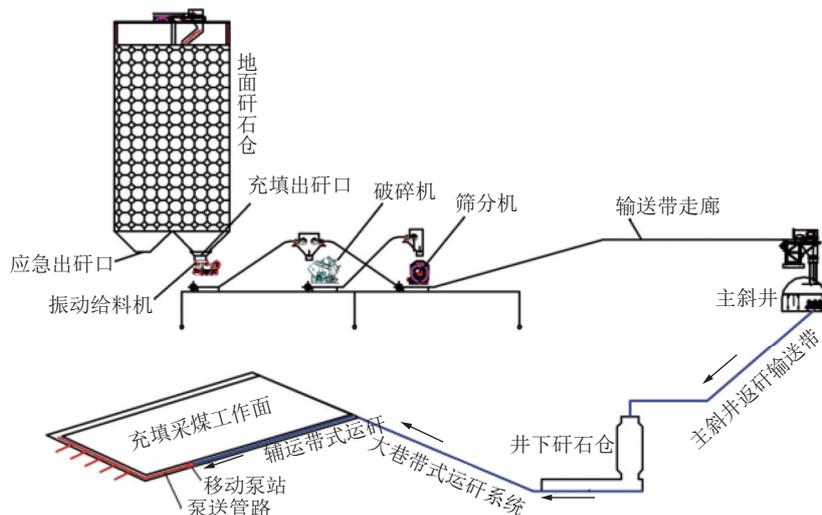


图 10 大颗粒矸石砗“带式输送-管道输送”接力输送充填布置

Fig.10 “Belt - pipe transport” relay conveying and filling arrangement for large particle concrete

管道中输送时间短、堵管风险极大降低, 凝结速度可以匹配工作面高效充填的快速凝结要求, 兼顾了管流动性与脱模后快速成型, 对矿井条件的适应性大大增强, 同时管道冲洗也不再困难; 另一方面, 移动建站

将大部分的输送距离由管道输送变为皮带输送, 给生产管理带来极大的便捷。该充填工艺适用于以保护地面建筑为优先原则、薄煤层且充填材料输送距离的充填开采。

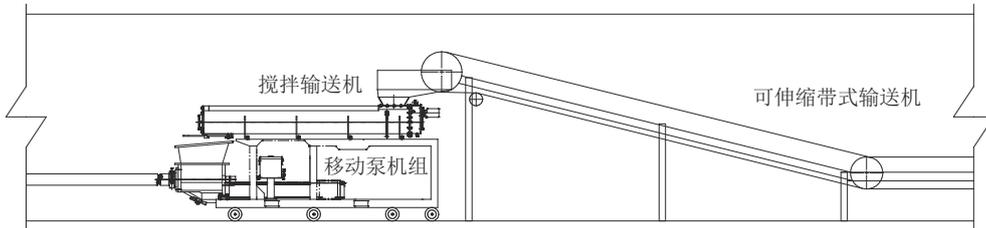


图 11 大颗粒矸石砼移动泵机组布置

Fig.11 Mobile pump unit layout for large granular concrete

(4) 区域性保护充填采煤工艺。目前充填开采在单一工作面或局部范围成功应用, 但是, 当主动保护生态环境、大规模处置矸石固废、高效回收建下压煤并且还能取得良好的经济效益时, 仅靠小范围充填难以实现, 必须实施大面积规模化连续充填开采。

充填材料密实接顶 (图 13) 并达到设计强度, 有目的的保护地面建筑物。

矿区大面积需要地面保护性开采时, 如井田范围内存在密集村庄、工业厂区、湿地保护区 (图 12) 等, 要实施大面积规模化连续充填开采, 要采用承载性能优良的充填材料, 保证严格的充填质量和一致性, 且必须实施留巷, 取消区段煤柱带来的不均匀沉降影响。



图 13 区域性保护充填密实接顶效果

Fig.13 Regional protective filling and dense roof joint effect

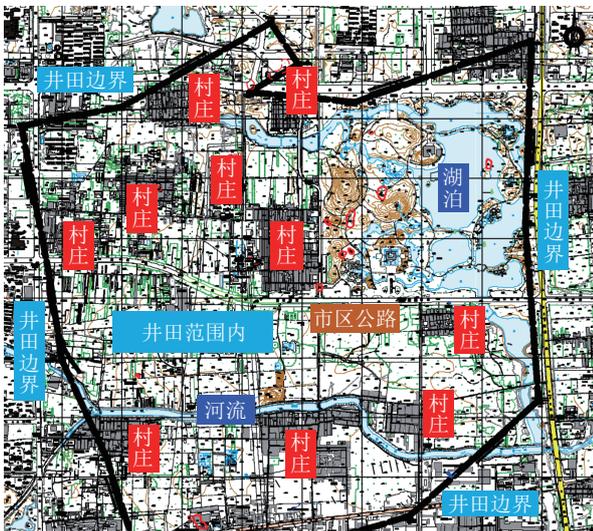


图 12 邢东矿井田范围内保护对象赋存状况

Fig.12 Occurrence of protected objects in Xingdong mine field

根据矿区地质条件建立充填开采覆岩薄板力学模型, 结合充填承载强度与岩层变形相互作用机理, 按照地面建筑物变形等级要求研究上覆岩层的变形条件, 确定大面积充填开采密实充填率, 采用适合大面积充填开采的易成型、快承载的改性充填材料或矸石混凝土充填材料, 强化充填材料推实装置, 根据充填判据建立自动化充填控制系统, 确保每台支架后部

(5) 巷道充填开采工艺。针对小范围“三下”压煤、工广煤柱、边角煤、不规则块段煤等不适合布置综采工作面的煤炭资源, 采用巷道充填方法, 根据岩层控制需求选取合理的矸石基充填材料, 实现矸石处置、岩层控制和呆滞资源回收的多重效益, 相比综采工作面充填开采, 投资小、见效快、系统布置灵活简便, 适用原则为经济效益优先。

根据矿井生产地质条件和充填需求, 间隔掘进充填支巷, 按照充填材料及输送方式不同, 有矸石固体巷道充填 (图 14) 和矸石混凝土巷道充填 (图 15) 2 种工艺可选择。

矸石固体巷道充填利用带式输送机输送矸石充填材料, 配合巷道密实充填机将充填材料充入巷道空间并推压密实。矸石混凝土巷道充填利用泵送系统进行充填, 待充填体满足强度要求后, 再将支巷间煤柱进行回收。巷道充填技术特点是投资小、见效快、生产管理简单、采充互不干扰, 与综采充填相比能力低, 但可回收不宜布置综采工作面的不规则块段资源。

(6) 采选充留充填开采工艺。煤矿生产都是煤炭

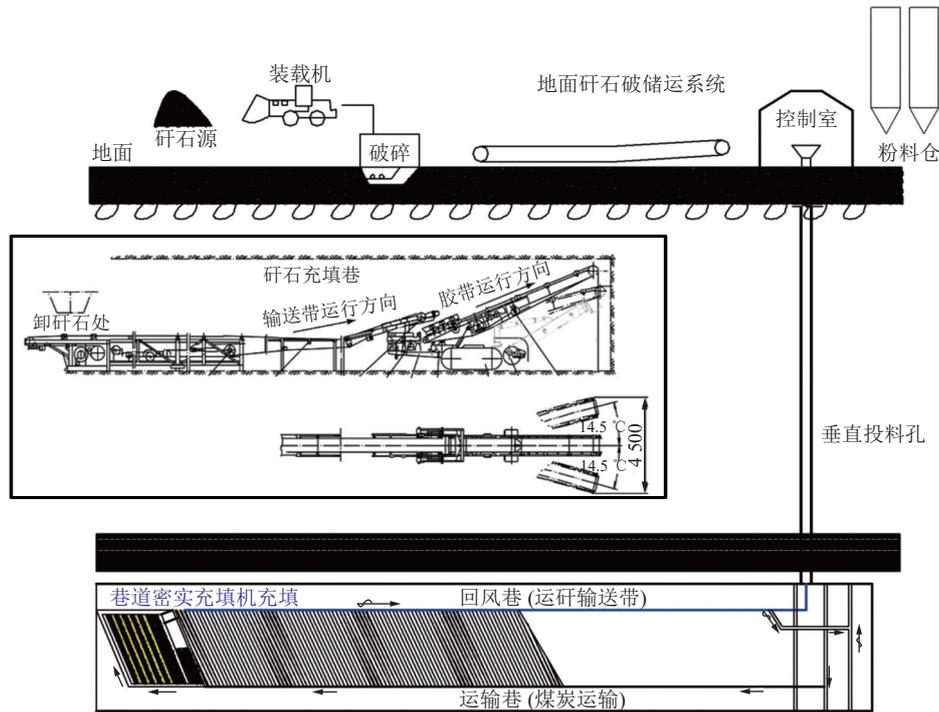


图 14 固体巷道充填工艺

Fig.14 Process diagram of continuous stoping and filling with solid material

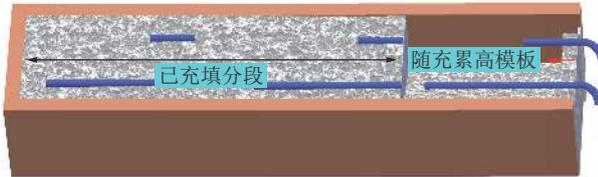


图 15 矸石混凝土巷道充填工艺

Fig.15 Process diagram of continuous stoping and filling with gangue concrete material

与矸石混合运输提升, 占用了有效的提升能力和分选能力。井下煤矸分选是指原煤及矸石进入煤仓之前在井下分选硐室将煤矸进行分选, 以减少矸石等的无效运输。井下小型化智能化 X 射线和图像识别的煤矸分选系统是将原煤筛选后的筛上物平铺后, 利用 X 射线对煤与矸石进行数字化识别, 再通过高压风将煤矸分开。井下分选硐室布置如图 16 所示。

研究了与长壁工作面充填工艺相匹配的机械化快速留巷工艺, 利用充留协同作业专用留巷装置, 限制充填散体矸石的自由度, 采用充-注作业工艺, 工作面端部充填和注浆同步作业, 完成松散充填体内高压稳定注浆, 保证充填体稳定成形、快速承载, 沿充填体形成平整的巷道壁, 实现快速高效沿充留巷与充填作业协同, 如图 17 所示。

在我国当前生态文明建设与环境保护的大背景下, 煤炭工业向绿色发展转型的步伐逐渐加大^[40-44], 将充填采煤与井下分选、无煤柱留巷、自动化控制相

结合, 形成“井下煤矸分选、就近充填、沿充留巷”生产模式^[45](图 18), 是煤炭生产全过程的一项重大创新。采选充留充填开采工艺能够同时实现生态环境保护、地面建筑保护、规模化矸石固废处置、显著经济效益等目标。

3.3 适应不同工况的充填装备

(1) 散体矸石充填液压支架。大型生产矿井和新建矿井面临着大量矸石固废处置的问题, 这类矿井的矸石充填开采需求以矸石处置为主, 要求充填工作面充矸量大、推进速度快、不影响出煤量, 而充填效果要求较低或无要求, 为提高充矸效率, 设计了如图 19 所示的散体矸石充填支架, 支架设置隔离升降挡矸板, 取消推实装置, 随采随充, 可采用输送机输送, 也可采用管道泵送, 不影响采煤速度, 可实现大规模处理矸石。

散体矸石充填支架后部挡矸机构设计简便、灵活, 不与后顶梁悬挂的底卸充填输送机相互干涉, 大大降低了矸石充填液压支架的设计难度, 对煤层高度、地质条件、矿井生产非均衡性适应能力很强, 完全实现采煤-充填平行作业模式, 极大地提高了充填作业效率。

(2) 类贫混凝改性充填液压支架。研制了适用于类贫混凝改性材料的充填液压支架(图 20), 将类贫混凝改性材料利用胶带输送机运输至工作面, 借助刮板式充填输送机、充填支架充入采空区, 设计具有液压激振器的后部推实机构, 充填材料经推压和振动夯实

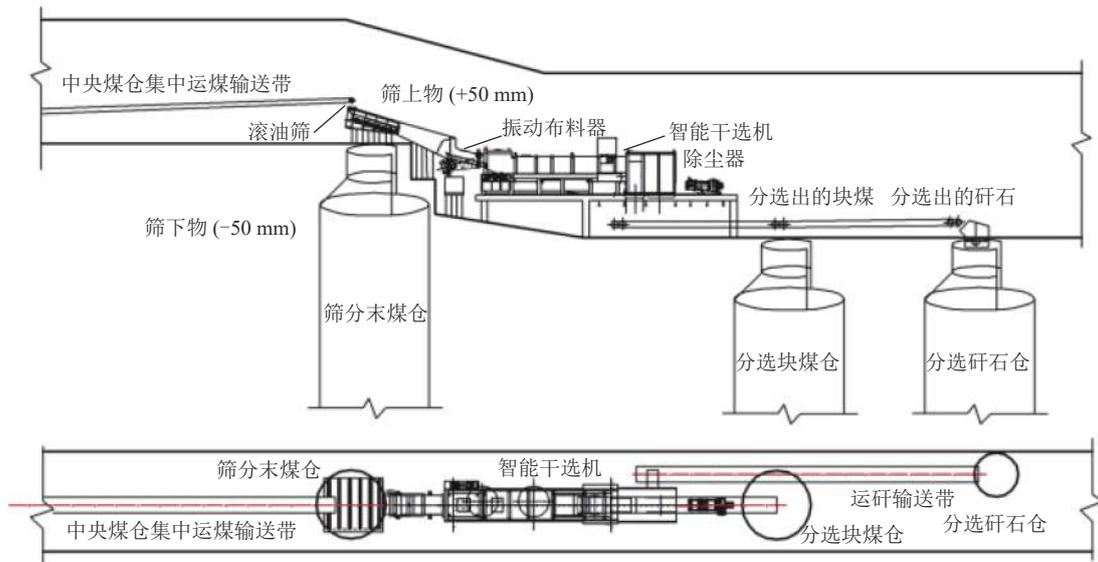


图 16 井下分选硐室布置示意

Fig.16 Underground selecting chamber layout diagram

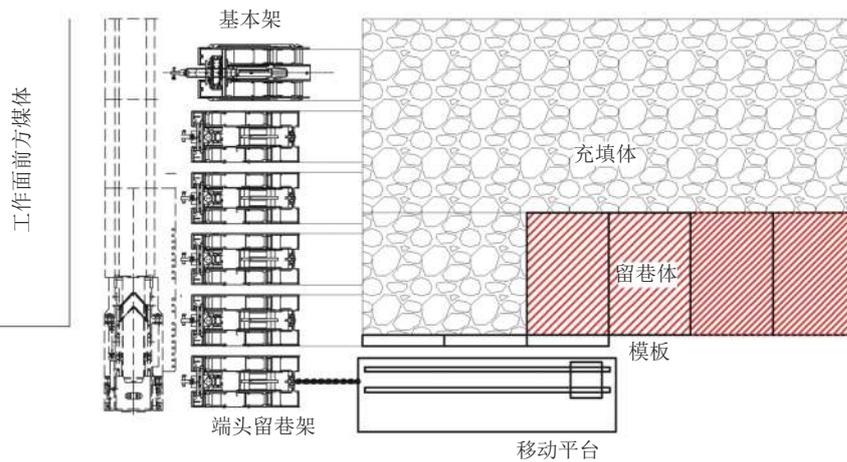


图 17 长壁工作面沿充留巷工艺

Fig.17 Longwall face roadway retaining technology diagram



图 18 煤矿井下“采选充留”协同系统

Fig.18 Integrated system of 'mining, selecting, filling and retaining' in coal mine

形成高强度充填体,大大提高了岩层控制能力。

(3) 薄煤层充填液压支架。薄煤层充填开采时由于液压支架四连杆结构后部空间小,可视条件差,充填效果和充填质量控制受限,为此,专门设计了具备

良好后视空间的垂直导柱液压支架(图 21),后顶梁可安装运输机或安设充填管道,接顶效果好。

薄煤层固体充填液压支架采用垂直导柱式设计,前后顶梁及导向柱三点合一铰接在一起,导向柱分布在两侧,使中间完全解放,提供足够大的可视空间,对于后部充填的操作更加安全。

(4) 矸石混凝土(矸石砼)充填装备。研制出了大颗粒、高浓度矸石混凝土充填工业泵(图 22),优化了矸石砼泵送充填系统,为成分复杂的高含固充填物料提供安全可靠的远距离输送系统,可根据现场工况要求进行快速匹配设计,动力装置与泵体工作部分为独立部件,现场布置更加灵活。

根据矸石砼充填材料特点,设计了专用液压支架(图 23),支架后部采用可伸缩栅栏式护顶装置,保证充填材料充分接顶。

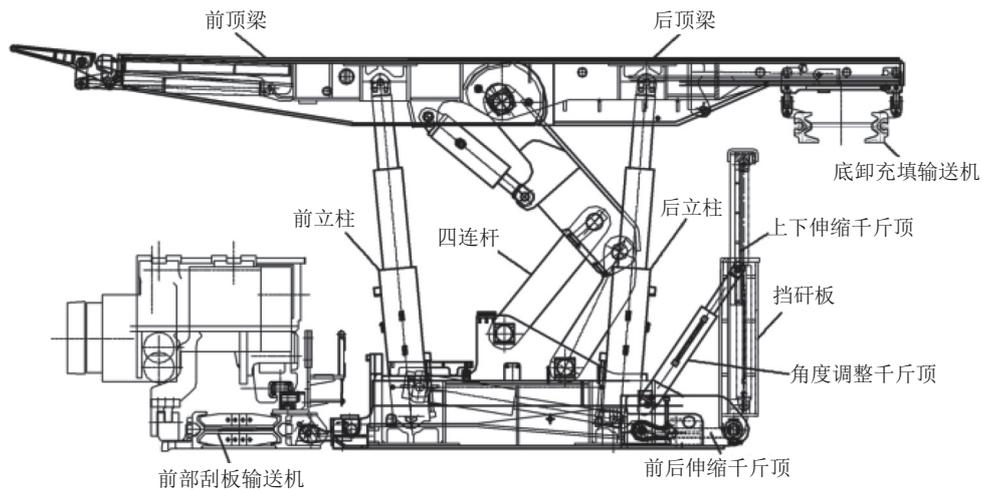


图 19 散体矸石充填支架

Fig.19 Backfilling hydraulic support for disposal of bulk gangue

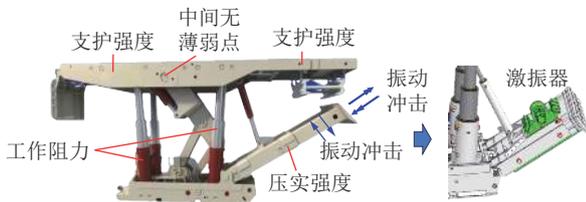


图 20 适用于类贫混凝改性材料的充填液压支架

Fig.20 Backfilling hydraulic support suitable for of lean concrete modified material



(a) 动力系统



(b) 搅拌泵送液压系统

图 22 大颗粒、高浓度矸石混凝土充填泵

Fig.22 Gangue concrete filling pump for large particle and high concentration

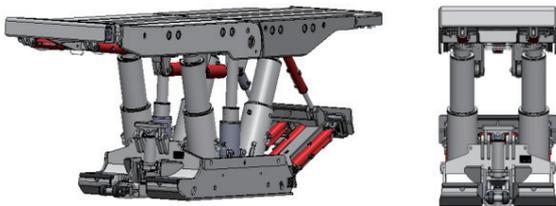


图 21 薄煤层充填液压支架

Fig.21 Backfilling hydraulic support for thin coal seam

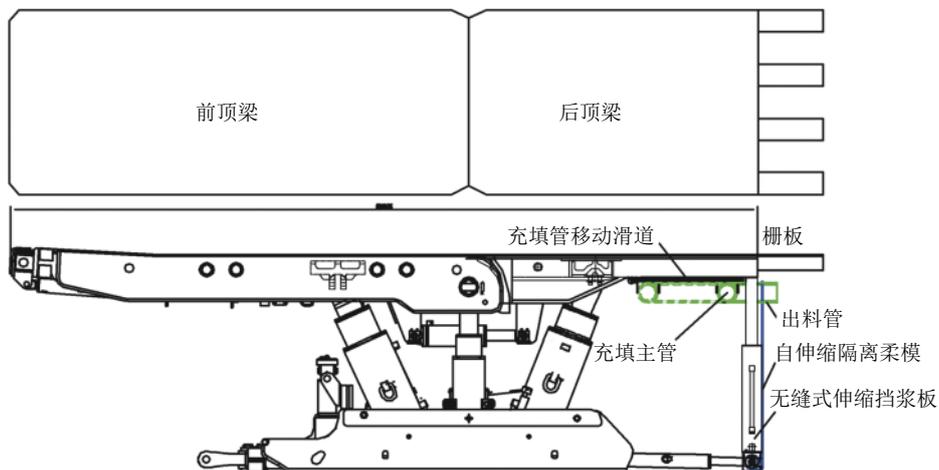


图 23 矸石砼充填液压支架

Fig.23 Hydraulic support for gangue concrete filling

4 煤矿充填智能化控制

实现煤矿充填智能化需要先建立全面的数据感知系统, 再通过空间规划及充填效果判定来实现从单元到整体充填工作面的智能化过程, 结合传感器网络和人工智能算法等技术, 能够实时监测和控制煤矿充填过程, 确保充填的质量和效率。

4.1 煤矿充填智能感知系统

煤矿充填全面感知系统的主要任务是通过将充

填工作面所有元素的空间位置关系、充填装备姿态信息、充填效果判定信息等所有数据进行全面感知, 将数据通过通信网络集中到算力中心进行处理融合, 建立数据分析的基础, 实现智能控制。煤矿充填智能化感知系统的感知对象和目标如图 24 所示, 在整个感知系统里, 感知系统可通过该感知系统的 20 类传感器, 经过多源传感器数据融合, 得到充填体配料比、充填工作区域状态、充填执行机构位姿状态、充满状态等充填工作面状态关键特征, 输入到控制决策系统中。

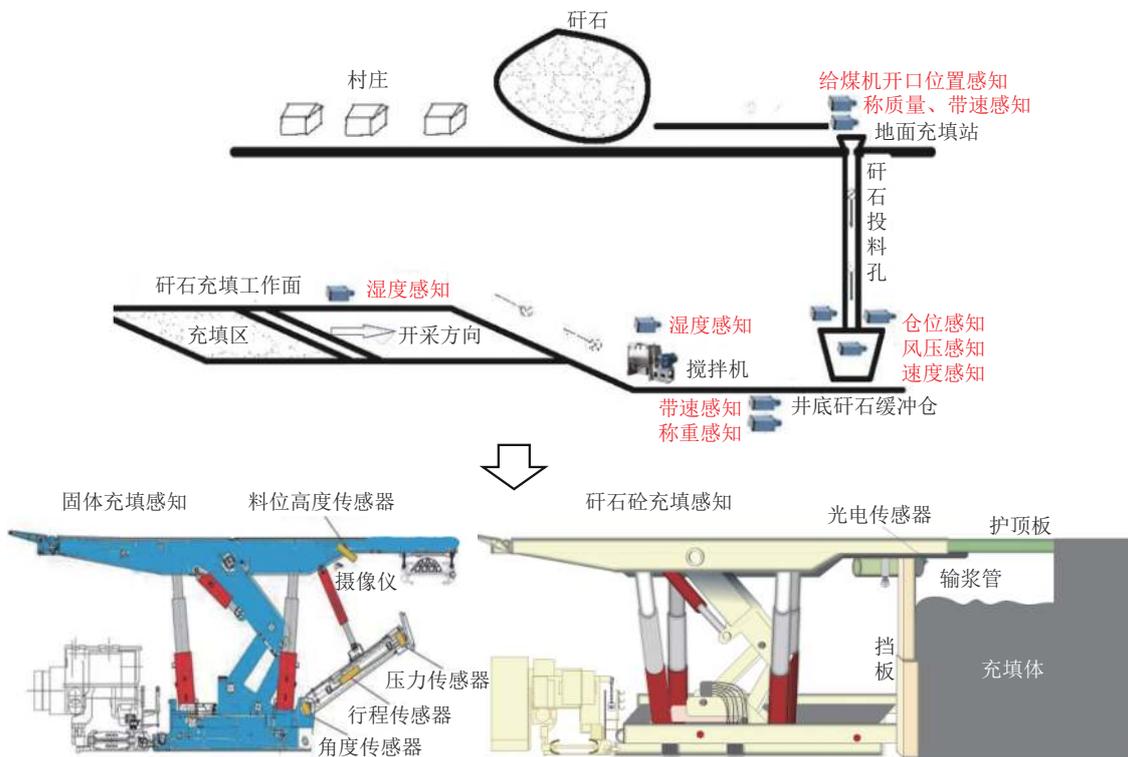


图 24 智能化充填感知系统的感知对象^[46]

Fig.24 Sensing objects of intelligent backfilling sensing system^[46]

4.1.1 煤矿固体充填空间信息感知

通过激光雷达扫描待充空间 (图 25, ${}^A P$ 为矢量 P 处于坐标系 A ; ${}^B P$ 为矢量 P 处于坐标 B), 得到待充空间信息状态的三维坐标点云数据, 再通过对点云数据进行配准, 提高数据的质量、逼真度和准确性, 滤波去除一定程度的噪声和离群点, 最后通过处理、重建和拟合, 生成待充空间的曲面模型。

点云处理是在三维立体扫描仪中, 点云数据可能包含噪声和离群点, 这些点会影响后续处理和分析。为了去除这些点, 可以采用点云滤波技术。采用高斯滤波方法对点云数据进行平滑处理。

点云重建是从点云数据中重建三维物体的过程。首先, 输入点云通过三维检测器模块在稀疏的三维场景中产生包围盒的参数, 接着空间转换器模块过滤冗余包围盒 (负样本), 并对包围盒内的点进行聚合与

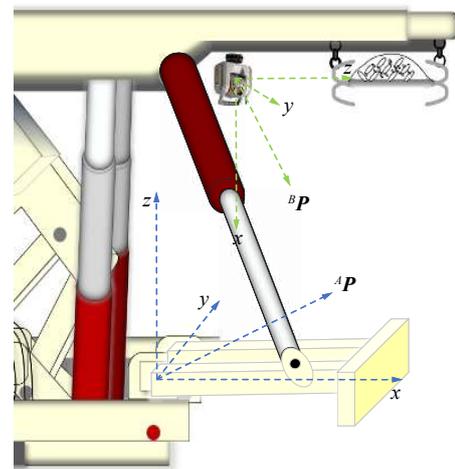


图 25 待充空间信息状态扫描

Fig.25 Status scan of the space to be backfilled

对齐。最后,聚合的物体点云通过形状生成模块将其转换至规范坐标系,再独立的学习一个隐式的空间占用函数来重建形状。

点云拟合是将点云数据拟合成一个二次或高次曲面模型,以便进行后续分析和处理的过程。选用最小二乘法将扫描的得到的三维空间曲面信息与充填空间模型相结合,可得到充填工作面的状态信息,包括充填体距离,平整度,充填落料的曲面,范围等,对接下来的目标分析路径规划做基础。

将充填区域划分为 3 部分,即设备和充填体等障碍区、充填落料区和空白区,如图 26 所示。充填推压板首先经过材料区,在考虑充填材料重力和内部应力变化情况下逐步向待充填区域移动,直至将充填材料压实成稳定的充填体。

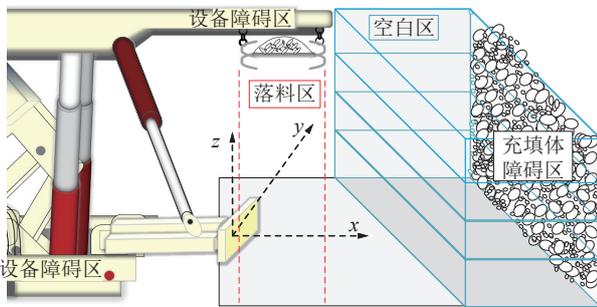


图 26 充填区域划分

Fig.26 Backfilling area division

随着充填开采作业的不断推进,充填支架在开采后进行移架动作,即充填区域。在空间建模中,对充填区与进行分层规划。

4.1.2 煤矿矸石砼充填液面高度感知

对于矸石砼充填,主要根据充填环境来判断充填注浆量,保证充填体得接顶,将充填浆体液面位置传感器组装在支架的顶板处,如图 27、28 所示。漫反射微型光电传感器组的发射端与接收端都在同侧,没有监测到浆体时,光信号为断开状态,当注浆高度到达顶板高度时,发生漫反射使光电传感器的光信号瞬间导通。

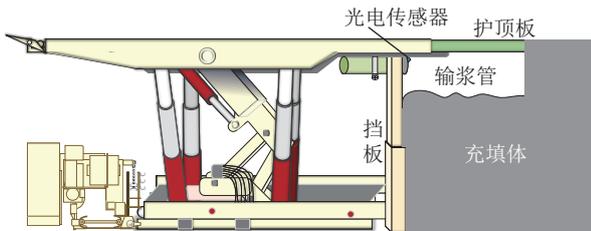


图 27 矸石砼充填液面监测

Fig.27 Liquid level monitoring of gangue concrete filling

4.2 煤矿智能化充填控制系统

4.2.1 充填支架位姿分析

要实现智能化和无人化的充填开采,需要感知充

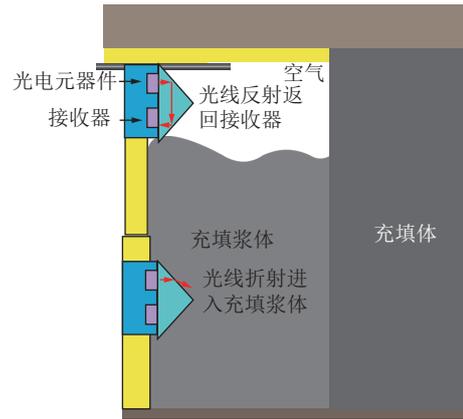


图 28 光电开关监测

Fig.28 Photoelectric switch monitoring

填支架与充填体的相对位置关系。井下环境存在许多限制因素,如有限的光照条件、复杂的地质结构和局部封闭空间等,这些因素使得大多数位姿感知方法难以感知精确的空间位置关系(图 29)。因此,利用感知系统的数据,计算出支架坐标系下的位移和速度以及倾角等位姿信息。

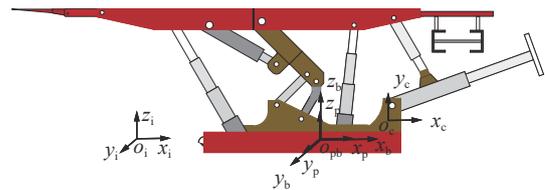


图 29 充填液压支架坐标系布置

Fig.29 Layout of coordinate system of filling hydraulic support

坐标系建立后进行姿态解算,将充填支架的姿态信息为 3 个姿态角的数值,分别为俯仰角、横滚角和偏航角。充填支架坐标系(B系)相对地理坐标系(N系)的位置即为姿态角。通过姿态算法可以由姿态矩阵求出监测部位的姿态角,同时姿态矩阵可以用来完成加速度坐标转换,得到平台坐标系下的加速度信号,进而求得机体的速度与位移,位置可通过速度积分求得

$$\begin{cases} X = \int v_x^p dt + X_0 \\ Y = \int v_y^p dt + Y_0 \\ Z = \int v_z^p dt + Z_0 \end{cases} \quad (14)$$

其中, X 、 Y 、 Z 为支架动态位置坐标; v_x 、 v_y 、 v_z 为机体速度分量; X_0 、 Y_0 、 Z_0 为支架初始位置坐标; v_x^p 、 v_y^p 、 v_z^p 为充填支架在平台坐标系 p 中 x 、 y 、 z 方向的速度分量。得出支架的姿态后,可以较为方便地建立充填过程的状态模型。

4.2.2 充填体的密实度模型

充填体的状态模型能够精确地描述充填支架过程中的充填体分布、密度和压力等关键因素。基于充

填状态模型, 可以通过模拟和分析不同的充填方案, 找到最优的充填策略。通过模拟和分析充填过程, 可以根据充填体的状态模型预测充填效果。

$$E = \begin{bmatrix} d_{0,0,0} & d_{0,0,1} & \cdots & d_{0,0,n_1} \\ d_{0,1,0} & d_{0,1,1} & \cdots & d_{0,1,n_1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n_2-1,n_3-1,0} & d_{n_2-1,n_3-1,1} & \cdots & d_{n_2-1,n_3-1,n_1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中, $d_{i,j,k}$ 为充填体在位置 (i,j,k) 处的密度; E 为密度矩阵; n 为将充填工作面划在 x 、 y 、 z 三个方向分别划分为 n_2 、 n_3 、 n_1 等份。

内部压力矩阵 P 为

$$P = \begin{bmatrix} p_{0,0,0} & p_{0,0,1} & \cdots & p_{0,0,n_1} \\ p_{0,1,0} & p_{0,1,1} & \cdots & p_{0,1,n_1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n_2-1,n_3-1,0} & p_{n_2-1,n_3-1,1} & \cdots & p_{n_2-1,n_3-1,n_1} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, $p_{i,j,k}$ 为充填体在位置 (i,j,k) 处的压力。

距离矩阵 D 为

$$D = \begin{bmatrix} l_{0,0,0} & l_{0,0,1} & \cdots & l_{0,0,n_1} \\ l_{0,1,0} & l_{0,1,1} & \cdots & l_{0,1,n_1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ l_{n_2-1,n_3-1,0} & l_{n_2-1,n_3-1,1} & \cdots & l_{n_2-1,n_3-1,n_1} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中, $l_{i,j,k}$ 为充填体在位置 (i,j,k) 处的距离。

4.2.3 充填材料与支架的相互作用模型

充填支架与充填材料的相互作用模型可以为构建系统模型提供重要的基础和支持。这种相互作用模型可以描述充填过程中充填支架和充填材料的动态行为和相互作用, 从而为系统模型提供输入和边界条件。通过建立相互作用模型, 可以预测不同充填策略和操作条件下的充填效果, 从而优化系统设计和操作。这可以帮助提高充填效率和质量。

其主要表现为不同作用力下充填材料的形变量:

$$\Delta x_{ijk} = \text{Deform}0 + K \cdot F_{ijk} \quad (18)$$

式中, Δx_{ijk} 表示第 i 行、第 j 列和第 k 层网格的形变量; $\text{Deform}0$ 表示初始量; K 为一个常数矩阵, 表示材料的弹性常数; F_{ijk} 表示第 i 行、第 j 列和第 k 层网格受到的作用力。

可将充填工作面简化为长方体, 长、宽、高分别为 L 、 W 和 H 。将充填支架划分为 dx 、 dy 、 dz 个网格, 式中, dx 、 dy 和 dz 为在 x 、 y 和 z 方向上的网格大小。

不同作用力下充填材料的内部压力

$$P_{ijk} = P_0 + R \cdot F_{ijk} \quad (19)$$

式中, P_0 为初始内部压力; R 为一个常数, 表示材料的

流体弹性常数。

4.2.4 充填支架控制策略模型训练

由于充填支架组的推压过程是一个连续且大规模的动作过程, 且存在扰动性强等问题, 采用深度确定性策略梯度算法 (Deep Deterministic Policy Gradient, 简称 DDPG), 对于解决上述问题有独特优势, 其算法流程如图 30 所示 (图中, Q 为动作函数, $Q(S, A, W)$ 为 DDPG 网络结构中的动作值函数, 用于分析在给定当前状态 S 、动作 A 以及价值网络的权重参数 W 的情况下的预期收益。 R 为当前状态 S 执行动作 A 后所得到的即时奖励; γ 为折扣因子, 介于 0 和 1 之间的值; W' 为目标网络的参数, 用于增加训练的稳定性; S' 为下一步的状态; A' 为下一步的动作)。在充填过程中, 充填工作面需要几十或者上百台充填支架的连续推压, 随着液压支架的移架, 充填体也在不断积累和推进。采用 DDPG 算法可以有效地学习并优化这些连续动作, 在推压过程中不断优化, 实现更精确和有效的协同控制。对于充填环境中的强干扰问题, DDPG 算法通过优化价值网络来逼近动作价值函数, 并不断优化策略网络参数, 使得输出的动作在价值网络中获得更高的评分。这种机制使得 DDPG 算法能够学习并适应复杂环境中的不确定性扰动, 适用于多充填支架组推压机构的学习控制。

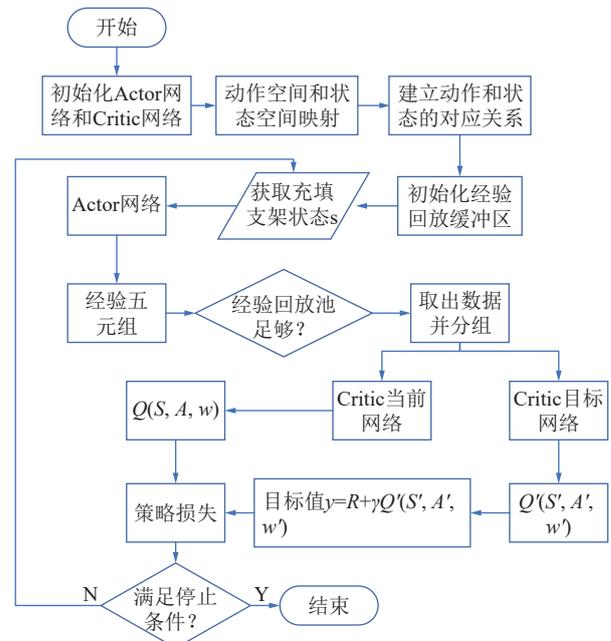


图 30 充填支架控制算法流程

Fig.30 Control algorithm flow of filling support

针对充填工作面的一致性目标, 设计基于 DDPG 算法的充填目标学习模型制定整个智能充填的预定策略。通过与环境的交互进行学习和优化。根据奖

励函数与学习网络,设计充填一致性观测器实现充填支架组件控制,实时调整充填一致性控制策略。

根据充填支架密实充填的 DDPG 网络结构,对充填支架组协同控制策略模型进行训练。在训练过程中,充填支架组协同控制策略模型会根据当前状态和动作空间,通过 Actor 网络选择最优的动作,并执行该动作。然后,环境会给出奖励和新的状态,Critic 网络会根据新的状态和当前状态计算目标值,并根据目标值和实际值的差值计算策略损失,通过反向传播更新 Actor 网络和 Critic 网络的参数。

当经验回放池充足时,可以存储足够多的历史经验,从而增加算法的探索能力和数据利用率。充足的经验回放池可以提供更丰富、更多样的经验样本,有助于增强算法的泛化能力,提高控制的稳定性和准确性。

当经验回放池不充足时,算法的学习可能会受到限制,需要支架的自适应控制方式占主导地位,根据当前环境出最佳的动作。随着充填作业不断进行,经验不断增加,根据经验的控制方式逐渐增大对充填动作的影响。

通常,在当前网络参数更新时,使用当前网络进行计算和更新,实时地根据当前环境和经验来更新策略,提高算法的适应性。目标网络的参数通常是固定或缓慢更新的,通常用于提供一个稳定的目标值函数。目标网络的作用是提供一个相对稳定的参考值,以稳定学习过程并提高算法的收敛性。

4.3 煤矿智能化协同控制系统

充填工作面是由多台液压支架共同作业,因此要保证充填工作面的一致性和稳定性,需要构建充填支架的协同控制架构,考虑和分析各充填支架之间的影响关系。

4.3.1 煤矿充填支架协同控制架构

集群式充填支架协同控制的作业模式,是传统集中式和分布式的混合体系结构,适合于规模大、任务复杂的充填支架集群编队系统。该体系结构包括地面监控站、主控充填支架和充填支架单元 3 部分。地面站和主控充填支架组成上层结构,地面监控站对主控充填支架进行决策和控制,主控充填支架将小组执行任务信息反馈给地面监控站;主控充填支架和充填支架单元组成下层结构,充填支架单元间进行信息交互和分工合作,在主控充填支架指挥下执行多种任务。充填支架单元在执行任务过程中,实时收集环境信息,供主控充填支架决策。这种结构结合了集中式和分布式的优点,适用于规模大、任务复杂的集群编队系统,是未来可用于实际执行任务的主要体系结构。

4.3.2 煤矿充填支架协同控制方法

为了提高充填效率和充填效果,通常是 3~5 台充填液压支架作为一组同步充填作业,即分解为多个充填支架小组。考虑充填支架之间的影响过程,对充填支架进行赋能,使其具备学习前者充填效果调整自身充填动作的能力,从而实现充填支架之间的协同控制。分析充填支架的动作状态,对充填支架做一致性的调整和规划,使充填体的充填质量和充填效果保持一致。利用充填支架分布式观测器采集分析各充填支架的作业状态(图 31),采用一致性滑膜控制算法对充填支架压实机构进行分布式优化控制。其目标是将速度控制、压力控制和时间控制合并为一个控制器。通过对跟随者充填姿态进行分析,与组内其他跟随者的姿态进行比较,及时做出调整,从而实现充填的一致性。

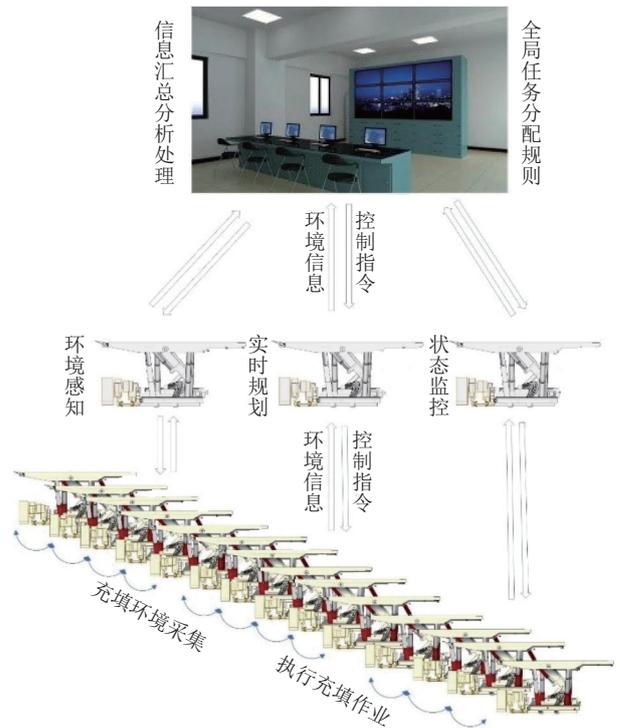


图 31 充填支架分组分层控制架构

Fig.31 Backfilling support group stratified control architecture

5 普适性充填开采技术体系的发展

我国首部绿色矿山建设行业标准—《非金属行业绿色矿山建设规范》提出:在矿产资源开发全过程中,实施科学有序开采,对矿区及周边生态环境扰动控制在可控范围内,实行矿区环境生态化、开采方式科学化、资源利用高效化、管理信息数字化和矿区社区和谐化的矿山。绿色矿山建设已然成为我国煤炭工业发展的主题,充填开采作为绿色矿山建设的重要技术

手段,在我国绿色矿山建设的远景规划中将扮演更加重要的角色,我国煤矿充填开采会有广阔的发展前景。

(1) 主动充填建设煤矿立体生态矿山。把煤炭矿区的生态矿山建设向立体化发展,生态矿山的建设和生产同步进行,把地面生态环境原始状态和井下煤层赋存状况作为基础条件,把对生态环境改善的愿景和开采设计结合起来,地面和井下统一布局、科学规划,使井下煤炭生产和矿区的生态建设融为一体,利用充填技术对地面的建筑、水源等区域重点保护,规划矿区所有区域、等级保护、沉降有序,充分利用资源再造生态环境,让煤炭生产成为生态环境再造者。

(2) 构建普适性充填技术工艺体系,助力推广充填开采。普适性技术是指所有煤矿都可以选择使用的技术,都可以像综采、综掘那样所有煤矿都可以得心应手地运用,不存在技术障碍,不再是技术攻关,成为煤矿生产的常规技术。充填开采的普适性就要使充填开采的推广没有煤矿规模限制,没有地质条件限制,没有煤层厚度限制,凡需要充填的煤矿都可采用充填技术,进一步完善充填开采技术,做到技术标准化、工艺规范化、装备系列化,让煤矿的技术人员易于掌握,推广起来没有难度。

(3) 研发新型固体充填材料。煤矿可利用的原煤矸石率约 20%,煤矿的充填材料来源不足,导致煤矿充填开采规模不能满足需求,严重阻碍了煤矿充填开采技术的大规模推广应用。一是研发高效率、高质量、廉价、环保的新型充填材料,这是未来破解煤矿充填开采规模化和高成本难题的重要环节;二是与矿区地表生态治理紧密结合,充分利用地域资源,山区、丘陵地区可利用荒山秃岭废石、河沙作为充填材料。按照生态治理的统一规划,应用充填的方法进行生态治理;三是研发城市建筑垃圾作为充填材料,既解决城市高速发展过程中建筑垃圾带来的困扰,又可以换取煤炭资源;四是利用相邻金属矿山尾矿进行充填,进行生态共建,金属矿山的尾矿不仅量大,而且数量基本稳定,便于工业化利用。

(4) 向自动化智能化充填方向努力。充填开采技术控制点多、可变因素多,控制过程更为复杂,正因如此,加快推进充填开采的自动化、智能化进程,自适应地质条件变化,稳定充填质量,提升充填能力和效果显得更为迫切。煤炭行业要尽快形成煤矿智能化建设技术规范与标准体系,一段时间内各类煤矿基本实现智能化,构建多产业链、多系统集成的煤矿智能化体系,建成智能感知、智能决策、自动执行的煤矿智能化体系,充填开采要紧跟时代的步伐,加快充填开采自动化和智能化发展速度。

普适性充填采煤技术已经形成理论、技术和装备体系,可以适应大多数煤矿充填开采的需求,充填速度可和采煤速度同步,并且充填成本大幅度降低,如果计算井下选矸、沿空留巷、矸石处理和环境治理费用,经济效果更显著。同时已经实现了充填自动化,在充填工作面也能做到“有人巡查,无人值守”。普适性充填开采将会在煤矿绿色开采、生态环境保护、沉陷区治理和回收建下资源发挥更大的作用。

6 结 论

(1) 基于充填开采主动保护理念,提出了以充填开采作为煤矿保护生态环境的调节工具。按照矿区地面环境和井上下水系保护要求,统一设计、统一规划,全程地质动态分析,控制地表有序沉降,实现“全过程全息立体生态矿山”的生态开采目标。

(2) 根据充填开采应用现状,分析了煤炭企业对不同充填开采方式选择的考量因素,以及影响充填开采技术推广的制约因素,针对不同矿区地域分布特征和充填需求差异性,划分了煤矿充填开采“保护生态环境”、“保护地面建筑”、“处置煤矸固废”、“提高经济效益”4类优先原则。

(3) 通过构建充填开采顶板限定变形力学模型,分析了影响岩层下沉量的因素,建立了生态环境保护、地面建筑保护和矸石固废处置3种充填工程模式下的工作面支护强度计算及覆岩变形控制方程。

(4) 对煤矿大颗粒集矸改性材料普适性充填采煤技术进行了阐述,包括散状原矸固体充填、类贫混凝改性充填、矸石混凝土充填等各类技术,详细描述了材料制备、输送、充填工艺及适应性充填装备。

(5) 为实现充填智能化控制,提出了建立全面的数据感知系统,通过空间规划和充填效果判定建立从单元到整体的充填工作面智能化系统,结合传感器网络和人工智能算法实时监测和控制煤矿固体充填过程,以提高充填质量和充填效率。

参考文献(References):

- [1] 刘建功. 冀中能源低碳生态矿山建设的研究与实践[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 317-321.
LIU Jianguo. Study and practice of low-carbon ecological mining construction of Jizhong Energy Group[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 317-321.
- [2] 左建平, 孙运江, 文金浩, 等. 岩层移动理论与力学模型及其展望[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 1-11, 87.
ZUO Jianping, SUN Yunjiang, WEN Jinhao, et al. Theoretical and mechanical models of rock strata movement and their prospects[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 1-11, 87.

- [3] 张吉雄, 缪协兴, 郭广礼. 矸石(固体废物)直接充填采煤技术发展现状[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 395-401.
ZHANG Jixiong, MIAO Xiexing, GUO Guangli. Development status of backfilling technology using raw waste in coal mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2009, 26(4): 395-401.
- [4] 周华强, 侯朝炯, 孙希奎, 等. 固体废物膏体充填不迁村采煤[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 30-34, 53.
ZHOU Huaqiang, HOU Chaojiong, SUN Xikui, et al. Solid waste paste filling for none-village-relocation coal mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2004, 33(2): 30-34, 53.
- [5] 朱磊, 宋天奇, 古文哲, 等. 矸石浆体输送阻力特性及采空区流动规律试验研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(S1): 39-48.
ZHU Lei, SONG Tianqi, GU Wenzhe, et al. Experimental research on transport resistance characteristics of gangue slurry and its flow trend in goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 39-48.
- [6] 陈勇. 散状固体改性充填技术及岩层控制研究与应用[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.
CHEN Yong. Research and application of modified filling technology of granular solid and rock stratum control[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2020.
- [7] 郑丽辉, 周跃进, 张雷鸣, 等. 矸石聚合物充填材料承载特性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(9): 222-229.
ZHENG Lihui, ZHOU Yuejin, ZHANG Leiming, et al. Experimental research on load-bearing characteristics of gangue polymer backfilling material[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(9): 222-229.
- [8] 杨军辉. 深部大采高综采面矸石充填开采技术[J]. 煤矿开采, 2014, 19(6): 77-80, 109.
YANG Junhui. Gangue stowing technology of full-mechanized mining face with large mining-height in deep mine[J]. Coal Mining Technology, 2014, 19(6): 77-80, 109.
- [9] 靳学乾, 邢世坤. 巷道矸石充填技术在邢东矿的应用[J]. 煤炭与化工, 2021, 44(4): 6-8, 12.
JIN Xueqian, XING Shikun. Application of roadway gangue filling technology in Xingdong Mine[J]. Coal and Chemical Industry, 2021, 44(4): 6-8, 12.
- [10] 钱鸣高, 许家林, 缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 5-10.
QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green mining technology of coal mine[J]. Xuzhou: Journal of China University of Mining and Technology, 2003, 32(4): 5-10.
- [11] 刘建功, 赵庆彪. 邢台矿建筑物下综合机械化固体充填采煤技术[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(3): 18-21.
LIU Jianguo, ZHAO Qingbiao. Coal mining technology with fully mechanized solid backfilling under the building structures in Xingtai Mine[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(3): 18-21.
- [12] 谢和平, 张吉雄, 高峰, 等. 煤矿负碳高效充填开采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 36-46.
XIE Heping, ZHANG Jixiong, GAO Feng, et al. Theory and technical conception of carbon negative and efficient backfill mining in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 36-46.
- [13] 孙希奎. 矿山绿色充填开采发展现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 48-55.
SUN Xikui. Present situation and prospect of green backfill mining in mines[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 48-55.
- [14] 毕锦明. 物料充填开采液支架的研究[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(11): 85-89.
BI Jinming. Research on hydraulic powered support for coal mining with material backfilling[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(11): 85-89.
- [15] 张强, 张吉雄, 邵阳, 等. 充填采煤液支架充填特性理论及工程实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(6): 845-851.
ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, TAI Yang, et al. The theoretical research on basic characteristics of backfilling hydraulic support and its application[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(6): 845-851.
- [16] 张恩显, 刘建功, 荆保平, 等. 垂直导柱式固体充填液支架研究分析[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 183-186.
ZHANG Enxian, LIU Jianguo, JING Baoping, et al. Research and analysis of vertical guide column solid filling hydraulic support[J]. Coal Technology, 2023, 42(4): 183-186.
- [17] 刘建功, 李新旺, 何团. 我国煤矿充填开采应用现状与发展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 141-150.
LIU Jianguo, LI Xinwang, HE Tuan. Application status and prospect of backfill mining in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 141-150.
- [18] 刘建功, 刘峰. 神奇的充填采煤[M]. 北京: 应急管理出版社, 2022.
- [19] 胡炳南, 刘鹏亮, 崔锋, 等. 我国充填采煤技术回顾及发展现状[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 39-47.
HU Bingnan, LIU Pengliang, CUI Feng, et al. Review and development status of backfill coal mining technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 39-47.
- [20] 许家林, 轩大洋, 朱卫兵. 充填采煤技术现状与展望[J]. 采矿技术, 2011, 11(3): 24-30.
XU Jialin, XUAN Dayang, ZHU Weibing. Current situation and Prospect of filling coal mining technology[J]. Mining Technology, 2011, 11(3): 24-30.
- [21] 张吉雄, 张强, 周楠, 等. 煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4167-4181.
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Research progress and prospect of coal based solid waste back-filling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4167-4181.
- [22] LI M, ZHANG J, LI A, et al. Reutilisation of coal gangue and fly ash as underground backfill materials for surface subsidence control[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254: 120113.
- [23] 王春娟, 刘建功, 王金喜, 等. 邯邢矿区承压水上充填采煤底板渗流规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 140-148.
WANG Chunjuan, LIU Jianguo, WANG Jinxi, et al. The seepage law of confined water in floor of backfilling working face in Hanxing Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 140-148.
- [24] ZHANG J, LI B, ZHOU N, et al. Application of solid backfilling to reduce hard-roof caving and longwall coal face burst potential[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 88: 197-205.
- [25] 高会春. 承压水上矸石充填采场围岩控制研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015.

- GAO Huichun. Research on surrounding rock controlling under gangue filling and above confined aquifers[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2021.
- [26] 赵家巍, 周宏伟, 刘泽霖, 等. 卸荷煤体分数阶渗透率模型参数探讨及其在渗流模拟中的应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2386–2395.
- ZHAO Jiawei, ZHOU Hongwei, LIU Zelin, et al. Research on parameters determination of fractional permeability model for unloading coal body and its application in seepage simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2386–2395.
- [27] 国家安全监管总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局, 国家铁路局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[Z]. 2017–05–17.
- [28] 萨娜, 赵金羽, 寇旭阳, 等. “山水林田湖草沙生命共同体”耦合框架、模型与展望[J]. 生态学报, 2023, 43(11): 4333–4343.
- SA Na, ZHAO Jinyu, KOU Xuyang, et al. Coupling mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-sandlands life community: framework, models and prospect[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4333–4343.
- [29] 刘建功, 赵家巍, 李蒙蒙, 等. 煤矿充填开采连续曲形梁形成与岩层控制理论[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 383–391.
- LIU Jianguo, ZHAO Jiawei, LI Mengmeng, et al. Continuous curved beam formation and strata control theory in coal backfill mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 383–391.
- [30] 张强. 固体充填体与液压支架协同控顶机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- ZHANG Qiang. Roof control mechanism by coordination with backfilled body and backfill support in solid backfill mining technology[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2015.
- [31] 赵家巍. 卸荷煤体随采充填条件下瓦斯流动的分阶导数模型研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
- ZHAO Jiawei. The fractional derivative model of gas flow in unloading coal seam under the condition of backfill mining[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2021.
- [32] 杨科, 赵新元, 何祥, 等. 原位充填覆岩三场时空演化规律及力学机制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(4): 643–655.
- YANG Ke, ZHAO Xinyuan, HE Xiang, et al. Study on the spatiotemporal evolution law and mechanical mechanism of the three-field of overlying strata in-situ backfill mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(4): 643–655.
- [33] ZHOU Hongwei, ZHAO Jiawei, SU Teng, et al. Characterization of gas flow in backfill mining-induced coal seam using a fractional derivative-based permeability model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138, 104571.
- [34] 刘建功, 赵家巍, 杨洪增. 充填开采连续曲形梁时空特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 41–47.
- LIU Jianguo, ZHAO Jiawei, YANG Hongzeng. Study on the time and space characteristics of continuous curved beam under backfilling mining condition[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 41–47.
- [35] 刘建功. 煤矿充填开采岩层控制理论与技术新进展[J]. 煤炭与化工, 2015, 38(3): 1–4.
- LIU Jianguo. New progress of filling mining strata control theory and technology[J]. Coal and Chemical Industry, 2015, 38(3): 1–4.
- [36] 刘建功, 赵家巍. 固体充填开采顶板多跨超静定结构分析与充填支架控制作用研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 85–93.
- LIU Jianguo, ZHAO Jiawei. Study on the multi-span statically indeterminate structure of roof in solid filling mining and the controlling effect of backfilling hydraulic supports[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 85–93.
- [37] 河北工程大学. 一种用于散状充填体改性的胶凝材料及其制备方法和应用: ZL202110622098.4[P]. 2022–08–23.
- [38] 钱鸣高, 石平五, 许家林, 等. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [39] 刘建功, 封明明, 荆保平, 等. 固体充填开采沿充留巷机械化设备与工艺研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(8): 1–5.
- LIU Jianguo, FENG Mingming, JING Baoping, et al. Equipment and process of mechanized filling-side entry retaining in solid backfill mining[J]. Coal Engineering, 2022, 54(8): 1–5.
- [40] 刘峰, 郭林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1–15.
- LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1–15.
- [41] 谢和平, 王金华, 王国法, 等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1187–1197.
- XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187–1197.
- [42] 许家林. 煤矿绿色开采 20 年研究及进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 1–15.
- XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 1–15.
- [43] 张吉雄, 屠世浩, 曹亦俊, 等. 煤矿井下煤矸智能分选与充填技术及工程应用[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 417–430.
- ZHANG Jixiong, TU Shihao, CAO Yijun, et al. Coal gangue intelligent separation and backfilling technology and its engineering application in underground coal mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 417–430.
- [44] 屠世浩, 郝定溢, 苗凯军, 等. 深部采选充一体化矿井复杂系统协同开采[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 431–441.
- TU Shihao, HAO Dingyi, MAO Kaijun, et al. Research of synergetic mining for mining, dressing and backfilling integrated deep mines with complicated systems[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 431–441.
- [45] 刘建功, 王翰秋, 赵家巍. 煤矿固体充填采煤技术发展回顾与展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 27–38.
- LIU Jianguo, WANG Hanqiu, ZHAO Jiawei. Review and prospect of development of solid backfill technology in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 27–38.
- [46] BO Lei, YANG Shangqing, LIU Yang, et al. Research on the data validity of a coal mine solid backfill working face sensing system based on an improved transformer[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 11092.