

我国沿空留巷围岩控制技术研究进展与展望

张自政¹, 柏建彪^{2,3}, 王襄禹², 徐 莹², 闫 帅², 刘洪林⁴, 吴文达⁵, 张伟光^{2,3}

(1. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 新疆工程学院 矿业与地质工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023; 4. 新疆大学 地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 5. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:我国煤矿沿空留巷技术研究与应用已超过60 a, 形成了充填式沿空留巷和切顶式沿空留巷两大技术类型, 但是由于不同矿区煤层生产地质条件复杂多样、留巷巷道所处矿压显现强烈等诸多困难, 导致沿空留巷技术推广应用呈现起伏。首先梳理了近年来我国沿空留巷主要技术类型、围岩稳定原理、巷内支护技术、巷旁支护技术、适应性评价与围岩稳定性监测方面取得的成效和关键技术进展, 分析了现阶段不同技术的应用适用性。然后, 总结了目前沿空留巷技术面临的难题与挑战: 对强矿压工作面沿空留巷仍未能形成系统理论; 充填沿空留巷围岩与支护体相互机制的理论认识仍然存在缺陷; 巷旁支护体充填材料力学及变形特性尚不能适应深部、强矿压工作面沿空留巷; 沿空留巷底臃机理及控制技术尚不完善; 强动载或冲击地压沿空留巷充填体稳定控制研究尚处于空白。最后, 针对现阶段我国沿空留巷技术应用面临的难题和挑战, 提出了几项储备型技术: 厚煤层综放/一次采全高沿空留巷有控切顶-充填围岩协同控制技术、面向强矿压工作面含外加剂改性高水材料沿空留巷技术; 针对沿空留巷数值模拟岩石力学参数智能反演问题, 建立了一套沿空留巷数值模拟岩石力学参数智能反演 workflow, 提出了沿空留巷支护参数智能优选设计方法。

关键词:沿空留巷; 围岩控制; 巷内支护; 巷旁支护; 储备型技术

中图分类号:TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2023)11-3979-22

Review and development of surrounding rock control technology for gob-side entry retaining in China

ZHANG Zizheng¹, BAI Jianbiao^{2,3}, WANG Xiangyu², XU Ying², YAN Shuai², LIU Honglin⁴,
WU Wenda⁵, ZHANG Weiguang^{2,3}

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Mining and Geology, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China; 4. School of Geology and Mining, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 5. School of Mining, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The research and application of gob-side entry retaining (GER) technology in Chinese coal mines has been over

收稿日期: 2023-03-23 修回日期: 2023-06-28 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0382

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点资助项目 (U21A20107); 新疆维吾尔自治区重点研发任务专项——厅厅联动资助项目 (2022B01051)

作者简介: 张自政 (1988—), 男, 河南信阳人, 副教授, 博士生导师。E-mail: 1010096@hnust.edu.cn

通讯作者: 柏建彪 (1966—), 男, 江苏仪征人, 教授, 博士生导师。E-mail: bjbianb@163.com

引用格式: 张自政, 柏建彪, 王襄禹, 等. 我国沿空留巷围岩控制技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 3979-4000.

ZHANG Zizheng, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Review and development of surrounding rock control technology for gob-side entry retaining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 3979-4000.



移动阅读

60 years. Two major technical types including GER with filling and GER with roof cutting were developed. However, due to the complex mining and geological conditions of the mined-out coal seam in different mining areas, as well as the strong mining pressure behaviours in the retained roadway, the promotion and application of GER technology presented ups and downs. Firstly, the achievements and key technological advances in the main GER types in China, the principle of surrounding rock stability, road-in support technology, roadside support technology, adaptability evaluation and surrounding rock stability monitoring are summarized, and the application applicability of different technologies at this stage is analyzed. Then, the difficulties and challenges faced by current GER technology are summarized: there is still no systematic theory for GER with strong mining pressure; there are still shortcomings in the theoretical understanding of the interaction mechanism between the surrounding rock and the support body for GER with filling; the mechanical and deformation characteristics of the filling materials for the roadside support body are not yet suitable for GER in deep working faces or with strong mining pressure; the mechanism and control technology of floor heave for GER are not yet perfect; the research on stability control of filling body for GER under strong dynamic load or rock burst is still in a blank. Finally, concerned with such difficulties and challenges, several reserve technologies have been proposed: the coordinated control of controlled roof cutting and filling for GER in fully mechanized caving/ full-seam mining in the thick coal seam, and the GER technology with additive modified high-water materials in working faces with strong mining pressure; finally, a set of intelligent inversion workflow for rock mechanical parameters used in GER numerical simulations for GER is established, and an intelligent optimization design method for GER support parameters is proposed.

Key words: gob-side entry retaining; surrounding rock control; road-in support; roadside support; reserve technology

沿空留巷技术是无煤柱开采的重要途径之一,是在工作面回采期间,通过有效的支护技术,将本工作面的回采巷道保留下来^[1]。因此,其技术优越性体现在以下几方面^[2]:①降低巷道掘进率、缓解采掘接替紧张、提高煤炭采出率;②针对煤层群开采,取消遗留煤柱引起的应力集中或动力灾害等;③提供本煤层和邻近煤层瓦斯治理场所,解决上隅角瓦斯积聚问题,优化巷道作业环境等。

20 世纪欧洲主要采煤国家苏联、英国、德国、波兰相继开展煤矿沿空留巷技术研究与应用,2018 年德国关闭最后一座煤矿,进入 21 世纪俄罗斯仍在部分煤矿开展沿空留巷技术应用。我国煤矿沿空留巷技术研究与应用已超过 60 a,尤其是 20 世纪 80 年代后我国大力推行综合机械化开采和煤矿巷道锚杆支护技术后沿空留巷得到快速发展。2010 年以来,何满潮院士提出双向聚能张拉爆破切顶卸压沿空留巷并逐步提出 110 工法和 N00 工法,在部分煤矿得到良好的应用与发展^[3]。

笔者分析我国沿空留巷技术的主要类型、沿空留巷围岩稳定原理、沿空留巷围岩控制技术;介绍沿空留巷最新应用案例,并提出沿空留巷技术发展展望。

1 我国沿空留巷技术研究进展

1.1 我国沿空留巷技术主要类型

自 20 世纪 50 年代沿空留巷在我国开始应用以来,生产地质条件复杂导致沿空留巷技术类型形式多

样。根据沿空留巷留下巷道是否复用,沿空留巷可分为常见用作邻近工作面回采巷道的沿空留巷(图 1(a))和阶段式沿空留巷(图 1(b));阶段式沿空留巷主要应用于高瓦斯或煤与瓦斯突出矿井工作面实行多进多回的通风方式(如大宁煤矿“五进两回”^[4]、余吾煤业“三进一回”^[5])。阶段式沿空留巷与普通沿空留巷相比具有以下特点:①所留巷道较短,为 2 个联络巷之间的距离,通常不超过 150 m;②留巷用途不同。该留巷仅用作与外 U 型巷道保持通风顺畅即可,而一般留巷需要满足第 2 个工作面的使用要求;③留巷成本要求较低。因留巷长度较短,仅经几个周期来压的影响,达到后即废弃,不经受第 2 个工作面采动的影响,因而要求留巷成本较低。

根据沿空留巷是否构筑充填墙体,用作邻近工作面回采巷道的沿空留巷可分为充填式沿空留巷和切顶式沿空留巷(110/N00 工法)。根据切顶方法,切顶式沿空留巷主要有超前密集孔切顶^[6]、超前爆破预裂切顶^[7-8]、超前水力压裂切顶^[9]、超前链臂锯机械切顶^[10]。根据充填墙体构筑材料和构筑形式,充填式沿空留巷可分为金属支柱巷旁支护沿空留巷、木垛墙体沿空留巷、矸石袋墙沿空留巷^[11]、砌块沿空留巷^[12]、混凝土充填沿空留巷(柔模混凝土^[13]、普通混凝土^[14]、钢管混凝土^[15-17])、膏体混凝土充填沿空留巷^[18](CHCT 充填沿空留巷^[19-20])、高水材料充填沿空留巷^[21]、高水材料灰渣充填沿空留巷^[22]、墩柱沿空留巷^[23]、充填开采矸石充填沿空留巷^[24-26]等。

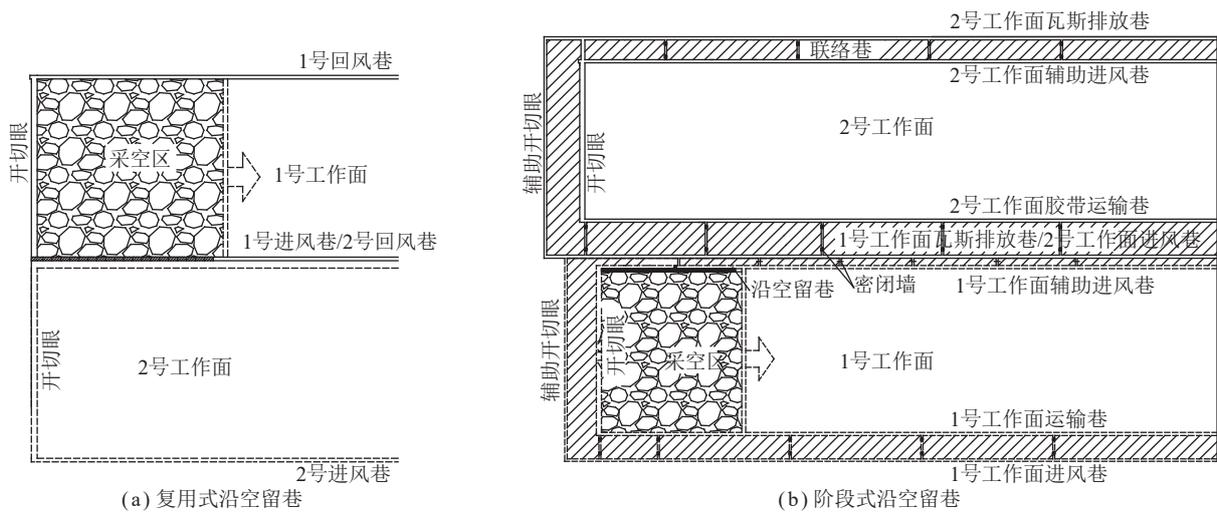


图 1 典型沿空留巷类型
Fig.1 Typical GER types

(1) 密集钻孔切顶沿空留巷。密集钻孔切顶沿空留巷是超前工作面在采空区侧顶板采取密集大直径钻孔构造人工非连续弱化带,经过超前支承应力作用后,采空区顶板沿人工非连续弱化带垮落充填采空区,巷内顶板则保持稳定。河南古汉山煤矿底分层 15032 工作面运输巷成功实施了密集钻孔切顶沿空留巷,钻孔的倾斜角度为 80°,钻孔深度为 18 m,钻孔间距(中-中)为 200 mm、钻孔直径为 50 mm^[6]。

(2) 爆破预裂切顶沿空留巷。爆破预裂切顶沿空留巷是工作面煤层回采前在回采巷道沿即将形成的采空区侧定向爆破预裂切顶,同时采用加强支护回采巷道顶板围岩,待工作面回采后在矿山压力作用下沿切缝将顶板切落形成巷帮。河南城郊煤矿 21304 工作面轨道巷成功实施了爆破预裂切顶沿空留巷,爆破孔与垂直方向夹角 15°,孔深 8 m,炮孔间距 600 mm,超前工作面一定距离进行双向聚能拉伸爆破^[3]。

(3) 金属支柱巷旁支护沿空留巷。金属支柱巷旁支护沿空留巷是在工作面回采后沿采空区架设密集金属支柱充当巷旁支护作用并实现切落一定高度顶板、阻挡采空区冒落矸石,进而将巷道保留下来。该类型留巷后来结合切顶沿空留巷思想还发展成密集单体液压支柱或者垛式单元支架配合 U 型钢等沿着留巷巷道边缘布置,利用金属支护的切顶作用和挡矸作用形成金属支柱切顶沿空留巷。山西老母坡煤矿 3101 薄煤层工作面成功实施了金属支柱巷旁支护沿空留巷。巷旁采用单体液压支柱(工作阻力 250 kN)配合铰接顶梁和十字铰接顶梁顺巷布置,巷内布置 3 排辅助单体支柱,柱距 500 mm,单体液压支柱穿复合铁鞋^[27]。

(4) 木垛墙体沿空留巷。木垛墙体沿空留巷是在

工作面回采后沿采空区堆叠一定宽度的木垛墙体充当巷旁支护作用,进而将巷道保留下来。木垛巷旁支护具有成本低、劳动强度低、较灵活等优点;其缺点是可缩量、支护阻力较小、不易控制巷道变形、不能有效隔离采空区、木材损失量大,仅适用于薄煤层。山西柳泉煤矿 7103 工作面沿空留巷工程在充填体两侧使用单体液压支柱和打木垛的技术作为临时支护及在采空区侧采用锚索加强支护的支护技术手段进行沿空留巷,效果良好。

(5) 矸石袋墙沿空留巷。矸石袋墙沿空留巷是在工作面回采后沿采空区堆叠一定宽度的矸石袋充当巷旁支护作用,进而将巷道保留下来。矸石带巷旁支护缺点为墙体初撑力小,初期受压变形量大,劳动强度大且隔离采空区效果差。山东王楼煤矿 11307 综采工作面运输巷成功实施了矸石袋墙沿空留巷^[11],巷旁采用了 4.0 m 宽锚栓网带矸石袋墙。

(6) 砌块沿空留巷。砌块沿空留巷是在工作面回采后沿采空区堆叠一定宽度的砌块墙体(常为地面制作混凝土砌块)充当巷旁支护作用,进而将巷道保留下来。混凝土砌块巷旁支护的优点是增阻速度快、支护阻力大、切顶效果好、隔离采空区效果好;缺点是可缩量较小、成本高、劳动强度大。山西沙曲矿 24202 工作面成功实施了混凝土砌块沿空留巷,砌块墙体采用一顺一丁砌筑方式(砌块强度 12.3 MPa)^[12]。

(7) 柔模混凝土沿空留巷。柔模混凝土沿空留巷是指在工作面回采后沿采空区构筑一定宽度的柔模混凝土墙体充当巷旁支护作用,进而将巷道保留下来。柔模混凝土支护具有支护强度高、墙体构筑工艺相对复杂的特点,易出现支护体切顶问题。陕西榆家梁煤矿 43308 工作面成功实施了柔模混凝土沿空留巷^[13]。

(8) 钢管混凝土沿空留巷。钢管混凝土沿空留巷是利用钢管混凝土结构的高承载力低成本优势,结合矸石袋墙体,形成以钢管混凝土墩柱为主承载体、矸石墙为辅助保护体的巷旁支护体,进而将巷道保留下来。内蒙古长城煤矿 1903 北回采工作面成功实施了钢管混凝土^[17]。

(9) 膏体混凝土充填沿空留巷。膏体混凝土充填沿空留巷是指在工作面回采后沿采空区构筑一定宽度的膏体混凝土墙体充当巷旁支护作用,进而将巷道保留下来。膏体材料与混凝土材料类似,最终强度同样与水泥用量有关,但膏体材料不含粗骨料,主要为粒径小于 0.25 mm 的细粒及混合料,具有更好的可泵性。山西沙曲矿 424207 工作面成功实施了膏体混凝土充填沿空留巷^[28]。

(10) 高水材料充填沿空留巷。高水材料充填沿空

留巷是指在工作面回采后沿采空区构筑一定宽度的高水材料充填体作为巷旁支护,进而将巷道保留下来,分为高水材料净浆充填和高水材料灰渣充填 2 种。山西新元煤矿 3107 工作面成功实施了高水材料充填沿空留巷^[29]。

(11) 充填开采矸石充填沿空留巷。充填开采矸石充填沿空留巷是指工作面采用矸石充填开采,同时在工作面回采充填后沿采空区构筑一定宽度的矸石墙体作为巷旁支护,进而将巷道保留下来。山东花园煤矿 1316 矸石充填工作面成功实施了矸石充填沿空留巷。

沿空留巷的典型应用场景及应用效果可详见表 1。

1.2 沿空留巷围岩稳定原理

研究实践表明^[38],掘进阶段待留巷巷道围岩变形较小,超前采动应力作用阶段受本工作面采动影响待留巷巷道变形增大,留巷阶段受本工作面滞后支承应

表 1 沿空留巷的典型应用场景及应用效果

Table 1 Typical application scenarios and application effects for GER

留巷类型1	留巷类型2	应用矿井	应用工作面及巷道条件	应用技术	应用效果
阶段式 沿空留巷	充填式沿空 留巷	山西大宁煤矿 ^[4]	304综放工作面,埋深360 m,煤层平均厚4.94 m,留巷断面2.5 m宽3.5 m高(沿底掘进)	1.2 m宽、1.5:1水灰质量比高水材料充填体,巷内锚网支护,阶段长度60 m	顶底板最大移近量小于140 mm,两帮移近量小于70 mm
		山西余吾煤业 ^[5]	N2105综放工作面,埋深575 m,煤层平均厚6.3 m,留巷断面4.8 m宽3.6 m高(沿底掘进)	1.5 m宽、1.5:1水灰质量比高水材料充填体,巷内锚网支护,阶段长度80 m	顶底板移近量527 mm,两帮移近量515 mm
		山西沙曲矿 ^[12]	24202综采工作面,埋深471 m,煤层平均厚2.56 m,留巷断面4.2 m宽2.8 m高(沿顶掘进)	1.6 m宽、强度介于4.3 MPa和9.3 MPa的一顺一丁砌块墙体,巷内锚网支护,阶段长度120 m	断面收缩率为30.8%
复用式 沿空留巷	充填式沿空留巷(高水材料)	山西柳家庄煤矿 ^[30]	4211工作面,埋深240 m,煤层平均厚4.0 m,留巷断面4.5 m宽、4.0 m高(沿底掘进)	3.0 m宽、1.5:1水灰质量比高水材料充填体,巷内锚网支护	顶板下沉量为443 mm,两帮移近量为644 mm
	充填式沿空留巷(矸石袋)	山东王楼煤矿 ^[11]	11307综采工作面,埋深657 m,煤层平均厚1.8 m,留巷断面4.0 m宽3.5 m高(沿顶掘进)	4.0 m宽锚栓网带矸石袋墙,巷内锚网支护	顶底板平均移近量452 mm,两帮平均移近量365 mm,平均断面收缩率22%
	切顶式沿空留巷	哈拉沟煤矿 ^[31]	12201综采工作面,埋深60~100 m,煤层平均厚1.92 m,留巷断面5.2 m宽、2.5 m高(沿顶掘进)	聚能预裂爆破切顶高度6 m,切顶角度与竖直方向呈20°;爆破孔间距为600 mm,巷内锚网支护(恒阻大变形锚索搭配普通锚索)	顶底板平均移近量452 mm,两帮平均移近量365 mm,平均断面收缩率22%
复用式 沿空留巷	充填式沿空留巷(普通混凝土)	河南顺和煤矿 ^[32]	2401综采工作面,埋深平均473 m,煤层平均厚2.3 m,倾角8°,留巷断面4.6 m宽、2.8 m高(沿顶掘进)	聚能预裂爆破切顶高度8.5 m,切顶角度与竖直方向呈15°,爆破孔间距为600 mm;采空区侧配合使用36U型钢棚+金属网支护顶板、挡矸,巷内锚网支护(恒阻大变形锚索搭配普通锚索)	顶板下沉量为207 mm,底臃量为250 mm,左帮移近量为205 mm,右帮(采空区侧帮部)最大移近量为86 mm
		四川金刚煤矿 ^[14]	3117综采工作面,埋深500~592 m,煤层平均厚2.1 m,留巷断面2.8 m宽、2.1 m高(沿顶掘进)	1.0 m宽、矸石(粒度<40 mm)为骨料且425号硅酸盐水泥为胶凝材料水灰质量比0.5:1的混凝土墙体,巷内锚网支护	顶底板移近量260 mm
		安徽南谢家集第一煤矿 ^[33]	5121B10综采工作面,埋深700 m,煤层平均厚1.4 m,倾角22°,留巷断面5.0 m宽、2.8 m中高(沿顶掘进)	巷旁充填体采用高强度膏体充填材料,其7 d抗压强度为15 MPa,充填体宽高比设为1,巷内锚网支护	顶板总下沉量达到199.3 mm,底臃量达到395.2 mm,煤帮位移量为283.0 mm

续表

留巷类型1	留巷类型2	应用矿井	应用工作面及巷道条件	应用技术	应用效果
	充填式沿空留巷(钢管混凝土)	内蒙古长城煤矿 ^[17]	1903 北回采工作面,埋深355 m,煤层平均厚1.85 m,倾角20°,留巷断面4.0 m、宽2.9 m上高(沿顶掘进、梯形)	高度2.9 m、钢管型号 $\phi 299$ mm \times 8 mm的空钢管墩柱,墩柱间距0.8 m,C40混凝土灌注钢管内;巷内锚网支护;巷旁3排研石袋连续墙,总宽1.5 m	顶板下沉量小于200 mm
	充填式沿空留巷(CHCT膏体混凝土)	山西沙曲矿 ^[28]	424207工作面,埋深520 m,煤层平均厚4.2 m,留巷断面3.0 m宽、3.8 m高(沿顶掘进)	4.0 m宽C20 CHCT膏体混凝土墙体(1 d强度不小于2 MPa,终强可达20 MPa以上),巷内锚网支护	两帮最大变形量为665 mm,顶底最大变形量为597 mm,变形稳定后留巷断面尺寸平均8.0 m ² 以上
	充填式沿空留巷(高水灰渣材料)	江苏夹河矿 ^[34]	7423工作面,埋深280 m,煤层平均厚2.3 m,倾角12°,留巷断面3.0 m宽、2.3 m上高(沿顶掘进、梯形)	1.5 m宽高水灰渣材料充填体(采用矸石粉(粒径 < 5 mm):高水速凝材料(质量比)=3:2,水体积为70%配比作为充填材料)抗压强度1 d为3.64 MPa,7 d为6.03 MPa),顶板金属锚杆两帮木锚杆支护	顶底板上帮侧为265~335 mm,两帮相对移近量为278~324 mm,断面收缩率为18.97%~21.93%
复用式沿空留巷	充填式沿空留巷(墩柱)	山东济宁2号矿 ^[35]	93 _下 06工作面工作面,埋深520 m,煤层平均厚2.54 m,倾角4°,留巷断面6.4 m宽、3.1 m高(沿顶掘进)	上节外径为426 mm,内径为410 mm;下节外径为406 mm,内径为390 mm墩柱(砂石材料配合比为1.0:1.6),巷内锚网支护	顶底板相对移近量约346.4 mm,其中底臃量约254.9 mm,两帮移近量约107.1 mm
	充填式沿空留巷(充填开采矸石充填)	山东花园煤矿 ^[25]	1316充填采煤工作面,埋深500~800 m,煤层平均厚2.5 m,倾角12°,留巷断面3.4 m宽、3.5 m高(沿顶掘进)	3.0 m宽垒砌巷旁充填体,充填材料均为粒径不大于50 mm矸石,巷内锚网支护	两帮最大移近量仅为157 mm,顶底板最大移近量为104 mm
		山东新巨龙煤矿 ^[36]	2305S-2号工作面,埋深920~974 m,主采3号煤,3号煤分为3上煤和3下煤,3上煤厚平均3.06 m、3下煤厚3.0~6.0 m,夹矸厚3.9~19.3 m。3上煤为稳定煤层,倾角7°~10°,平均8°,坚固性系数1.59,留巷断面4.8 m宽、4.0 m高	采用“3.0 m厚矸石墙+直径159 mm,壁厚6 mm钢管混凝土立柱”作为巷旁支护结构;顶板和上帮采用锚杆+W钢带+钢筋网支护,下帮采用锚杆+锚带+塑料网支护	隔离墙与实体煤帮的相对移近量不大,顶板完整性较好,且顶板下沉量不大,但是底臃量较大
	充填式沿空留巷(柔模混凝土)	内蒙古上湾煤矿 ^[37]	12上308大采高工作面,埋深222.5~277.4 m,煤层平均厚3.8 m,留巷断面3.5 m宽、3.6 m高(沿顶掘进)	1.2~1.5 m宽、3.6 m高C30柔模混凝土墙体,巷内锚网支护、一梁三柱单体配 π 梁加强支护	顶板移近量主要在工作面后方0~300 m,顶底板移近总量在200 mm以内,两帮移近量为44 mm
		陕西榆家梁煤矿 ^[13]	43308综采工作面,埋深100 m,煤层平均厚1.87 m,留巷断面4.5 m宽、2.1 m高(沿顶掘进)	1.0 m宽C20柔模混凝土墙体,巷内	顶底板最大移近量60 mm

力调整和覆岩剧烈运动留巷巷道变形迅速增大;二次回采阶段受邻近工作面超前采动应力作用复用巷道变形进一步增大。图2给出了沿空留巷全周期内围岩变形量、变形速率和留巷顶板应力演化普适性规律。由图2可知,沿空留巷围岩稳定跟顶板岩层运动特征息息相关。

1.2.1 沿空留巷顶板岩层运动特征

沿空留巷顶板岩层运动具有明显的阶段特征。根据时间或者沿空留巷顶板岩层运动可以划分为多个阶段。表2给出了不同学者对于沿空留巷顶板岩层运动划分及相应特征。

由此可见,沿空留巷顶板破断模式尚未有统一认识。一部分学者(孙恒虎、漆泰岳等)认为留巷基本顶

首先在采空区侧受充填体切顶作用发生一次破断,在实体煤侧受基本顶旋转下沉作用发生二次破断;另一部分学者(陈勇、柏建彪等)认为受工作面周期来压影响留巷基本顶首先在实体煤侧发生一次破断,在采空区侧受充填体切顶作用发生二次破断。沿空留巷顶板破断模式跟上覆坚硬岩层厚度及强度、煤层开采条件、充填体支护阻力等多个因素均有关系。对于切顶卸压沿空留巷来说,由于在采空区侧人工超前预裂基本顶,留巷后基本顶岩梁将在采空区一侧预裂面发生破断。

沿空留巷顶板运动特征是不同时期沿空留巷巷内支护、巷旁支护参数确定的重要依据,也是建立适宜沿空留巷围岩力学模型的基础。

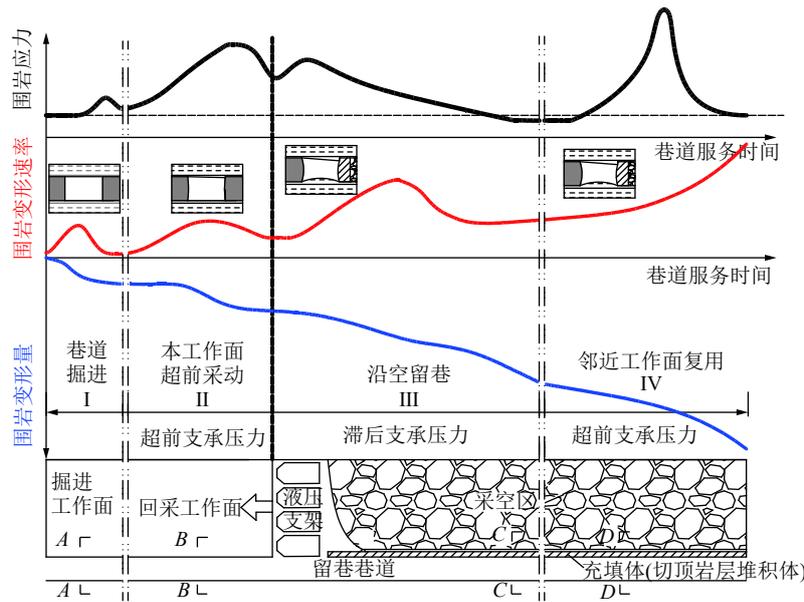


图 2 沿空留巷全周期内围岩变形量、变形速率和应力演化规律

Fig.2 Deformation amount, deformation rate, and stress evolution of surrounding rock during the GER full cycle

表 2 沿空留巷各时期顶板岩层活动特征

Table 2 Roof strata movement features during different GER stages

学者	时期划分	顶板岩层活动特征
郭育光 ^[39] (1992)	充填体切断直接顶	充填体与巷内支护共同作用维护直接顶并阻止直接顶与基本顶离层, 充填体切断采空区侧直接顶
	充填体切断基本顶	充填体具有的支护阻力可沿充填体侧切断基本顶, 切断基本顶岩层后垮落的矸石充填采空区
	充填体平衡上位顶板下沉	充填体切断基本顶后, 冒落矸石体积增大, 使上位岩层由冒落矸石和煤体支撑, 下位基本顶在煤体和充填体的作用下重新取得平衡
孙恒虎 ^[40] (1992)	前期活动	顶板向采空区旋转折断, 自下而上发展, 即一次破断
	过渡期活动	巷道顶板“二次破断”
	后期活动	顶板岩层发生二次破断, 一次破断已经稳定的顶板岩层上方未垮岩层失去平衡, 产生下沉
漆泰岳 ^[41] (1999)	巷旁支护初期	整体浇注护巷带具有切断部分下位基本顶的能力, 顶板首先在靠护巷带采空区侧发生“第1次断裂”
	巷旁支护后期	当切顶达到一定高度时, 护巷带没有能力继续切断基本顶岩层, 基本顶岩层就会在靠巷道煤帮一侧上方发生“第2次断裂”
李化敏 ^[42] (2000)	前期活动	留巷侧直接顶沿巷旁充填体边缘一次破断, 直接顶垮落及基本顶下沉
	过渡期活动	待直接顶或者基本顶垮落至充满采空区, 上位基本顶形成“砌体梁”结构
	后期活动	随着矸石的逐渐压实, “砌体梁”结构上位顶板岩层破断下沉, 留巷上方顶板岩层产生平行下沉
陈勇、 柏建彪 ^[43] (2012)	一次采动影响阶段	位于第1个工作面后方100 m范围内。基本顶弧形三角块首先在实煤体侧上方发生第1次断裂, 然后在巷旁充填体外侧边缘发生第2次破断
	留巷稳定阶段	随着采空区矸石逐渐压实和应力转移, 基本顶关键块间形成稳定的“砌体梁”结构
	二次回采超前影响阶段	一般位于第2个工作面前方40 m左右, 基本顶关键块第2个工作面的超前支承压力作用, 其下方的直接顶、实煤体和巷旁充填体进一步压缩下沉
韩昌良、 张农 ^[44] (2013)	掘巷期间	顶板的扩容变形, 有离层出现
	工作面回采留巷初期	采动影响以及支架反复支撑导致次生裂隙大量发育, 首先引发采空区直接顶板垮落
	顶板垮落期	直接顶上方力学参数相似的数层岩层同期断裂垮落, 并与直接顶之间形成初期垮落离层, 而与上覆稳定岩层之间形成临时性离层
谭云亮 ^[45] (2016)	顶板活动稳定期	厚层坚硬的关键层断裂下沉并形成砌体结构, 临时性离层在上方岩层旋转下沉后闭合, 顶板活动趋向稳定, 最终在顶板岩层产生多个离层
	坚硬顶板岩梁开始下沉至岩梁断裂阶段	随着采空区中部岩梁破断沉降运动, 实体煤侧坚硬顶板岩梁开始下沉, 直至实体煤内部或其边缘发生断裂。岩梁断裂时弯曲下沉量较小
	坚硬顶板岩梁断裂后快速下沉至岩梁触矸阶段	以实体煤侧岩梁断裂位置为中心坚硬顶板岩梁快速旋转弯曲沉降, 岩梁处于剧烈沉降运动状态, 极易产生动压冲击
	坚硬顶板岩梁触矸至其稳定阶段	采空区矸石压缩量不断增加, 坚硬顶板岩梁下沉速度逐渐降低, 直至坚硬顶板稳定, 矸石基本处于密实状态

1.2.2 沿空留巷围岩力学模型

上述分析可见,沿空留巷围岩稳定性跟顶板侧向破断结构息息相关,留巷围岩稳定时间同时跟顶板侧向破断结构稳定和主控关键层结构稳定有关。因此,在设计充填式沿空留巷巷旁支护力学参数时,众多学者建立了一些相关的沿空留巷围岩力学模型,包括分离岩块法、倾斜岩梁法、叠加层板法、弹性薄板顶板运动力学模型、弧形三角块稳定法、结构协调承载力力学模型等。各沿空留巷围岩力学模型主要假设和支护阻力计算式见表 3。

可见,我国学者根据不同工况下沿空留巷特点和留巷顶板运动特征,建立了相应的留巷围岩力学模型,得到了不同顶板运动时期的充填体所需支护阻力计

算式,为沿空留巷巷旁支护关键参数设计和留巷围岩变形预计提供了理论基础。

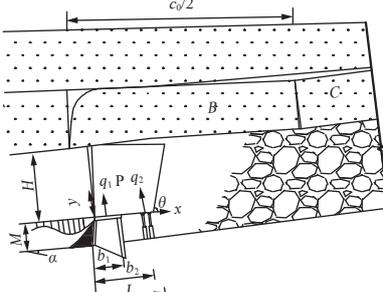
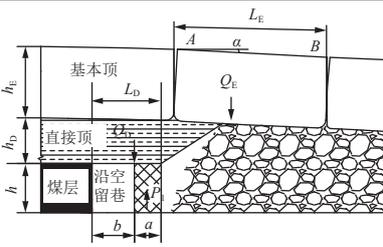
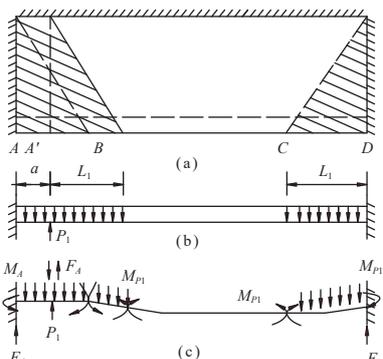
(1) 沿空留巷围岩变形、受力和稳定性受工作面端头处形成的“弧形三角板(块)”稳定性制约,沿空留巷围岩力学模型建立、充填体支护参数确定均需考虑“弧形三角板(块)”的形成与稳定运动。

(2) 无论基本顶是否出现“二次破断”现象,绝大部分学者认为基本顶在实体煤帮一侧的断裂位置位于实体煤帮弹塑性分界处。

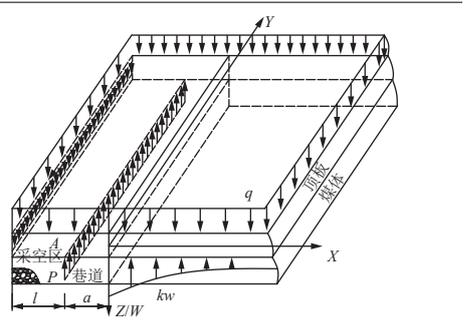
(3) 沿空留巷所需巷旁充填体支护阻力处于变化。在沿空留巷初期,即采空区侧基本顶破断前,巷旁充填体要有快速增阻和一定支护强度;在基本顶破断或者主控关键层破断前后,巷旁充填体要有足够的支护

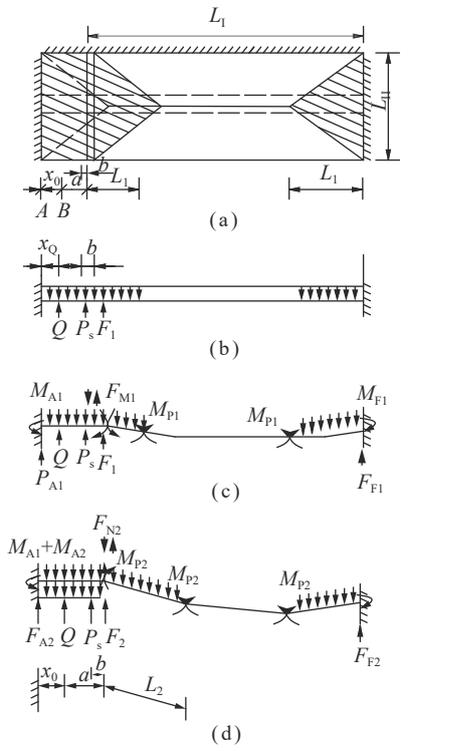
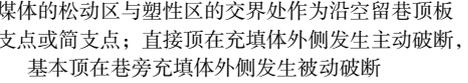
表 3 沿空留巷围岩力学模型、主要假设和支护阻力计算式

Table 3 Mechanical model, main assumptions, and calculation formula of support resistance of surrounding rock for GER

留巷围岩力学模型	巷旁支护阻力计算式	模型简图主要假设
分离岩块法 ^[46] (何廷峻, 1998)	$q_2 = (L\gamma H^2 g \cos \alpha \cot \theta + L^2 \gamma H g \cos \alpha - L\gamma H^2 g \sin \alpha - 2q_1 b_1) / (2b_2)$ <p>L为岩块P宽度; γ为岩块容重; H为岩块P厚度; g为重力加速度; α为煤层倾角; θ为直接顶破断角; q_1为巷道支护载荷; q_2为巷旁支护载荷; b_1为巷道支架载荷中心到O点的距离; c_0为基本顶侧向破断长度; b_2为巷旁支架载荷中心到O点的距离</p>	 <p>将巷道支架载荷和巷旁支架载荷视为均布载荷; 直接顶沿煤壁处断裂</p>
倾斜岩梁法 ^[17] (王军, 2015)	$P_1 = 1/2 [\gamma_E h_E (L_E + L_D + h_D \cot \alpha) + \gamma_D h_D L_D]$ <p>P_1为巷旁支护阻力; γ_D为直接顶容重; γ_E为基本顶容重; h_E为基本顶岩层厚度; h_D为直接顶岩层厚度; L_E为基本顶岩梁长度, 小于或等于基本顶周期来压步距; L_D为巷道支护区域宽度, $L_D = a + b$; a为充填体宽度; b为巷道宽度; Q_E为基本顶重力; Q_D为直接顶重力</p>	 <p>基本顶垮落位置在巷道顶板上方, 直接顶垮落填充采空区</p>
叠加层板法 ^[40] (孙恒虎, 1992)	$P_m = \sum_{i=1}^m \gamma_i h_i \left(a + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j \right)^2 / 2 + M_{Pm} + \sum_{i=1}^m F_{A'i} \left(a + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j \right) - \sum_{i=1}^m M_{A'i}$ <p>P_m为巷旁支护前期支护阻力; a为巷道维护宽度; m为顶板前期活动岩层最高垮落层的层号; γ_i为第i层岩层的容重; h_i为第i层岩层的层厚; α_j为第j层岩层的破断角的余角; $F_{A'i}$为第i层岩层破断时岩层残留边界A'点受到破断岩块$A'B$向下的剪力; L_1为岩层破断特征尺寸; P_1为顶板前期活动第1层岩层巷旁支护阻力; M_{Pm}为第i层岩层极限破断弯矩; $M_{A'i}$为第i层岩层在A点受到支承边界的抗弯弯矩</p>	 <p>以沿空留巷巷帮为固支边界, 采空区侧基本顶受充填体顶压作用发生一次破断</p>

续表

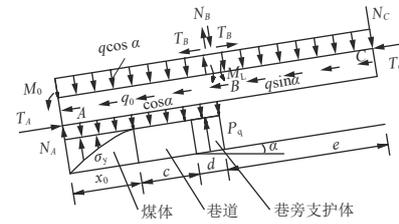
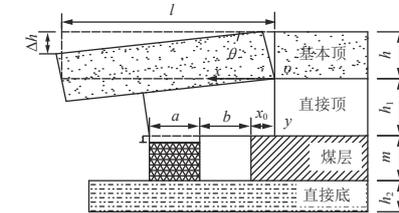
留巷围岩力学模型	巷旁支护阻力计算式	模型简图主要假设
	切顶前充填体支护阻力 P : $P = \frac{[B_1 + B_2(l+a)]\lambda ql + [B_1 + B_2(l+a)/2]q(l+a) + B_3q}{1/K_p + B_1 + B_2a}$ 切顶后充填体支护阻力 P_{mn} : $P_{mn} = ql(\lambda + 1) + \sqrt{q^2 l^2 (2\lambda + 1) + \frac{\sigma_c q}{3} l^2}$	
弹性薄板顶板运动力学模型 ^[47] (涂敏, 1999)	$B_1, B_2, B_3 \text{ 为常数, } B_1 = -\frac{a^3}{6D} + \frac{a}{2A^2D} + \frac{1}{2A^3D},$ $B_2 = \frac{a^2}{2D} + \frac{a}{AD} + \frac{1}{2A^2D}, B_3 = \frac{a^4}{24D} + \frac{1}{k};$ $q \text{ 为基本顶承受的上覆岩层的载荷; } k \text{ 为弹性地基刚度; } l \text{ 为基本顶岩层的切落宽度; } a \text{ 为巷道宽度; } \lambda \text{ 为基本顶及上覆松散岩层质量与原岩应力比值, } 0 \leq \lambda \leq 1; \sigma_c \text{ 为基本顶岩层的极限抗拉强度}$	把沿空巷道上方的顶板视为弹性地基上的薄板条结构; 顶板为同性连续介质, 忽略板条的自重; 巷旁支护沿工作面全长, 忽略支护带宽度; 忽略水平挤压力作用, 考虑板的自由边的剪应力

叠加层板法 ^[48-49] (华心祝, 2005; 阚甲广, 2011)	第1层顶板破断所需支护阻力: $F_1(a+x_0) = M_{p1} + q_1(a+x_0)^2/2 + F_{N1}(a+x_0) - M_{A1} - Qx_0 - P_s(x_0+a-b)$ 第2次顶板破断所需支护阻力: $F_2(a+x_0) = \sum_{i=0}^2 \gamma_E h_E \left(a+x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j \right)^2 / 2 + M_{p2} - \sum_{i=1}^2 M_{A1} + \sum_{i=1}^2 F_{Ni} \left(a+x_0 + \sum_{j=0}^{i-1} h_j \tan \alpha_j \right) - Qx_0 - P_s(x_0+a-b)$ $F_{N1} = q_1 L_1 \text{ 为 } C \text{ 点岩层破断产生的向下剪力, } F_{N1} = \gamma_1 h_1 \text{ 为层自重集度; } L_1 \text{ 为岩层破断特征尺寸; } \gamma \text{ 为岩层容重; } h_1 \text{ 为岩层厚度; } M_{A1} \text{ 为岩层抗弯弯矩; } M_{p1} \text{ 为岩层极限弯矩; } i \text{ 为第 } i \text{ 层顶板岩层; } j \text{ 为第 } j \text{ 层顶板岩层; } \alpha \text{ 为岩层破断角}$	
弧形三角块稳定法 ^[50-51] (李迎富, 2012; 陈勇, 2012)	一次采动影响阶段巷旁充填体所需的支护阻力: $\sigma_d \geq \frac{1}{\int_{x_0+c}^{x_0+c+d} \left[\frac{-2}{\tan \alpha} (x-L_2) \right] x dx} \left\{ \frac{1}{3} R_1 H_E^2 e \cot \alpha - \int_0^{x_0} \sigma_m \left[\frac{-2}{\tan \alpha} (x-L_2) \right] x dx - (1-k_0^2) F_Z x_c - 2(1-k_0) T_{CB} \cos \alpha \left[H_E - s - \frac{1}{2} (L_2 - e) \sin \theta_1 \right] + F_{Hx_c} + 2k_0 T_{CB} \left(\frac{H_E}{2} - s \right) \cos^2 \alpha + k_0 (2F_{CB} - k_0 F_Z) (L_2 - e) \cos \alpha + 2(1-k_0) F_{CB} \frac{L_2 - e}{2} \cos \theta_1 \right\}$ $x_0 \text{ 为基本顶断裂线距实煤体帮表面的距离; } c \text{ 为留巷宽度; } d \text{ 为充填体宽度; } L_2 \text{ 为侧向断裂跨度; } h_E \text{ 为基本顶厚度; } R_1 \text{ 为基本顶抗拉强度; } \sigma_m \text{ 为实煤体帮承载力; } k_0 = e/L_2; F_Z \text{ 为中间关键块及其上覆软弱岩层的重力; } x_c \text{ 为梯形 } ACKJ \text{ 的重心; } T_{CB} \text{ 和 } F_{CB} \text{ 为中间块体对块体的水平推力和剪力; } s \text{ 为关键块对中间关键块的作用位置的参数; } F_H \text{ 为直接顶岩层的重力; } \theta_1 \text{ 为基本顶的旋转角度; } \sigma_d, H_E, e, x_c \text{ 分别为充填体的实际支撑强度、中间关键块的厚度、三角块二次破断处到 } B \text{ 点距离、梯形 } ACKJ \text{ 的重心; 模型简图中 } F_M, F_R, F_C \text{ 分别为实煤体的支撑力、充填体的支撑力、采空区矸石对中间关键块的支撑力}$	

巷帮煤体的松动区与塑性区的交界处作为沿空留巷顶板的固支点或简支点; 直接顶在充填体外侧发生主动破断, 基本顶在巷旁充填体外侧发生被动破断

前后关键块对中间关键块的作用力相等; 垂直剪力和水平力作用点均在 EF 的中点上; 基本顶关键块以“给定变形”的方式作用于其下方煤岩; 中间关键块在巷帮煤体塑性交界处断裂

续表

留巷围岩力学模型	巷旁支护阻力计算式	模型简图主要假设
<p>块体平衡法^[17, 21] (李化敏, 2000; 柏建彪, 2004)</p>	$P_q = \left[M_L + (N_C + eq \cos \alpha)(x_0 + c + d) + \frac{1}{2}(q + q_0)(x_0 + c + d)^2 \cos \alpha - \right. \\ \left. M_0 - (T_C + eq \sin \alpha)(h - \Delta S_B) - \int_0^{x_0} \sigma_y(x_0 - x)dx - \right. \\ \left. q \sin \alpha (x_0 + c + d) \left(\frac{h}{2} - \Delta S_B \right) \right] \left(x_0 + c + \frac{d}{2} \right)$ <p>α为煤层倾角; c为巷道宽度; d为巷旁支护体宽度; h为基本顶岩层厚度; P_q为巷旁支护体的切顶阻力; M_L为基本顶岩层的极限弯矩; M_0为A端基本顶的残余弯矩; q为基本顶及其上部软弱岩层单位长度的自重; q_0为直接顶单位长度自重; N_C、T_C、σ_y分别为基本顶块体在C点的剪切力、基本顶块体在C点的水平力、σ_y实煤体的支撑应力; ΔS_B为基本顶垮落后B端的下沉量</p>	 <p>基本顶破断前矸石对结构块AC的支撑力为0; 采空区上方直接顶与基本顶, 以及基本顶之上软弱岩层与更上位岩层之间离层, 认为其间的剪力为0; 下位基本顶以煤体弹性塑性交界处为旋转轴向采空区侧旋转倾斜</p>
<p>结构协调承载力学模型^[28](韩昌良, 2014)</p>	<p>留巷初期基本顶断裂前充填体强度σ_1:</p> $\sigma_1 = \frac{(a + b + x_0)n\gamma m}{a}$ <p>给定变形作用下留巷后期充填体强度σ_x:</p> $\sigma_x = \frac{[m - (K - 1)h_1]x - l\delta}{l \left(\frac{m}{E} + \frac{h_1}{E_1} + \frac{h_2}{E_2} \right)}$ <p>a为充填体宽度; b为巷宽; x_0为基本顶旋转基点到煤帮的水平距离; θ为关键块的旋转角度; l为基本顶关键块长度; h、h_1、m、h_2分别为基本顶、直接顶、煤层和直接底的厚度; K为直接顶膨胀系数; δ为空顶距; E、E_1和E_2分别为巷旁充填体、直接顶和直接底的弹性模量; $n=4\sim 8$</p>	 <p>基本顶断裂基点以实体煤帮弹性分界线; 留巷后期结构具有“给定变形”的特点</p>

强度和适量的可缩量。

1.3 沿空留巷巷内支护技术发展现状

1.3.1 沿空留巷巷内基本支护形式

煤矿巷道支护主要分为主动支护和被动支护 2 种形式。其中木支护、砌碛支护、型钢支护均为被动支护; 锚杆(索)支护为主动支护形式。早期沿空留巷巷内基本支护形式主要为型钢支护(工字钢棚、U 型钢棚), 该类支护形式支护阻力小、可缩量有限, 难以适应留巷阶段围岩大变形, 巷道维护效果差, 导致复用前还需进行大量返修工作。20 世纪 90 年代我国引进澳大利亚锚杆支护技术后, 煤巷锚杆支护大大提高, 锚杆支护成为回采巷道的主要基本支护形式。在此之后, 我国沿空留巷巷道巷内支护基本以锚杆(索)支护为主, 局部破碎地段型钢加强支护。受强烈采动影响的沿空留巷, 围岩变形速度快、变形量大、破碎区大, 沿空留巷巷内支护需要采用高预紧力、高强度的锚杆(索)支护, 通过高强锚杆与锚索施加高预紧力, 并有效扩散到围岩, 有效控制围岩中裂隙张开和新裂纹产生、结构面离层与滑动, 保持留巷围岩在服务期间的完整性。

1.3.2 沿空留巷巷内锚杆支护机理及设计

锚杆支护对沿空留巷围岩的支护机理主要体现在以下 3 个方面:

(1) 锚杆支护提高沿空留巷围岩承载能力。锚杆支护作为主动支护, 有效提高锚固体的峰值强度和残

余强度, 提高围岩自身承载能力^[52-53]。具体来说一方面通过锚杆(索)将留巷巷道顶板组合成整体提高锚固范围内岩层的抗弯弯矩, 增大了顶板的承载能力, 尤其是通过锚索发挥顶板深部岩层承载能力^[54]; 另一方面通过锚杆(索)甚至注浆提高留巷实体煤帮的峰值强度, 进而提高实体煤帮的承载能力^[55]。

(2) 锚杆支护提高沿空留巷围岩抗变形能力。锚杆自身具有较大的延伸率, 在保持高支护阻力的同时, 允许并能适应巷道围岩大变形, 释放围岩变形能^[56]。具体来说, 锚杆(索)支护在保持对围岩高阻力支护的同时, 将巷道顶板组合成整体, 控制了顶板层间离层, 减小留巷期间基本顶的旋转下沉带来的“给定变形”^[57]; 锚杆(索)支护通过提高实体煤帮抗变形能力, 减小实体煤帮塑性区范围, 向煤帮深部转移了留巷期间基本顶的破断位置, 减小顶板下沉量和充填体载荷^[58]; 对于部分留巷巷道, 采用锚杆加固底板与巷帮底角区域提高底板的抗变形能力, 减小底板^[59-60]。

(3) 锚杆支护降低沿空留巷巷旁支护需求。对于充填沿空留巷来说, 采用锚杆支护的留巷顶板完整性好, 可以有效传递充填体支护阻力, 与充填体共同作用切断采空区侧一定高度的顶板; 对于切顶沿空留巷来说, 采空区边缘的锚杆尤其是锚索支护具有明显的“切顶”效应, 可以有效降低超前预裂顶板的需求。

目前, 沿空留巷巷内锚杆支护设计主要是沿用煤

巷锚杆支护设计方法,传统的悬吊、组合梁、组合拱等锚杆支理论是根据处于弹性状态的完整岩体提出的,而且适用于特定的条件。锚杆支护设计方法主要有工程类比法、理论计算法、数值模拟分析法。动态系统设计方法是以数值模拟为主,并辅以工程类比和理论计算的一种综合方法,是目前煤巷锚杆支护设计

的主要方法^[53, 61-62]。具体来说,韩昌梁^[63]、唐建新^[64]等提出以控制留巷巷内直接顶离层为指标的巷内顶板支护载荷理论计算方法;陈勇^[51]提出以锚固区实体煤帮的极限平衡状态为指标的实体煤帮锚杆支护载荷理论计算方法。沿空留巷巷内锚杆支护载荷计算式见表 4,计算流程如图 3 所示。

表 4 沿空留巷巷内锚杆支护载荷计算
Table 4 Calculation of road-in bolt support load for GER

锚杆支护区域	锚杆支护载荷计算式	控制目标
留巷巷内顶板	$\sigma = \frac{E_1 h_1^3 [f_L(x) q_2 - g(x) p]}{(E_1 h_1^3 - E_2 h_2^3) [f_i(x) - 4h(x)]} - \frac{E_2 h_2^3 [f_L(x) q_1 - g(x) p]}{(E_1 h_1^3 - E_2 h_2^3) [f_i(x) - 4h(x)]}$ $f_L(x) = (x^2 - 4Lx + 6L^2)x^2; f_i(x) = (x^2 - 4lx + 6l^2)x^2;$ $g(x) = 2b(6l + 3b - 2x)x^2; h(x) = (x - d)d^3; E_i, h_i, q_i \text{ 分别为第 } i \text{ 层岩层的弹性模量、厚度和岩层载荷;}$ $p \text{ 为充填体支撑载荷; } L \text{ 为顶板岩梁旋转基点至悬臂末端的长度; } l \text{ 为岩梁旋转基点到充填体体的距离;}$ $b \text{ 为充填体宽度; } d \text{ 为岩梁旋转基点到巷道的距离}$	直接顶与上方顶板不离层
实体煤帮	$p_x = \bar{\sigma} \frac{1 - \sin \varphi^*}{1 + \sin \varphi^*} e^{-\frac{2fx}{m} \left(\frac{1 + \sin \varphi^*}{1 - \sin \varphi^*} \right)}$ <p>$\bar{\sigma}$为锚固范围内实体煤帮平均铅垂载荷; f为顶底板与煤层间的摩擦因数; m为煤层厚度; x为实体煤帮内锚杆(索)最大锚固长度; φ^*为实煤体残余摩擦角</p>	实体煤帮达到极限稳定状态

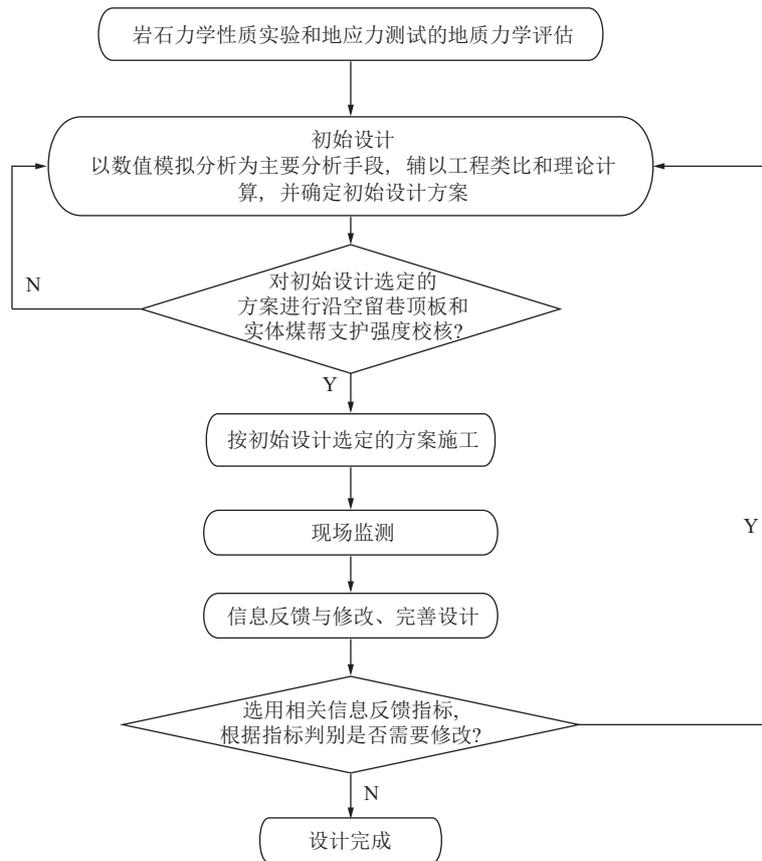


图 3 沿空留巷巷内锚杆支护设计流程

Fig.3 Design process of road-in bolt support for GER

1.3.3 沿空留巷巷内加强支护

对于沿空留巷, 不仅受到本工作面超前支承应力作用, 更受到留巷后工作面滞后支承应力的动压作用;

而无论是充填沿空留巷还是切顶沿空留巷, 位于采空区边缘的充填体需一定时间增阻或者矸石堆积体需一定时间压缩平衡, 因此均需要设置高阻力的加强支

护,阻止顶板过大下沉和顶板岩层层间离层。目前,沿空留巷巷内加强支护形式主要有单体液压支柱配

合铰接顶梁、单体液压支柱配合长钢梁、巷内加强支护液压支架等,如图 4 所示。

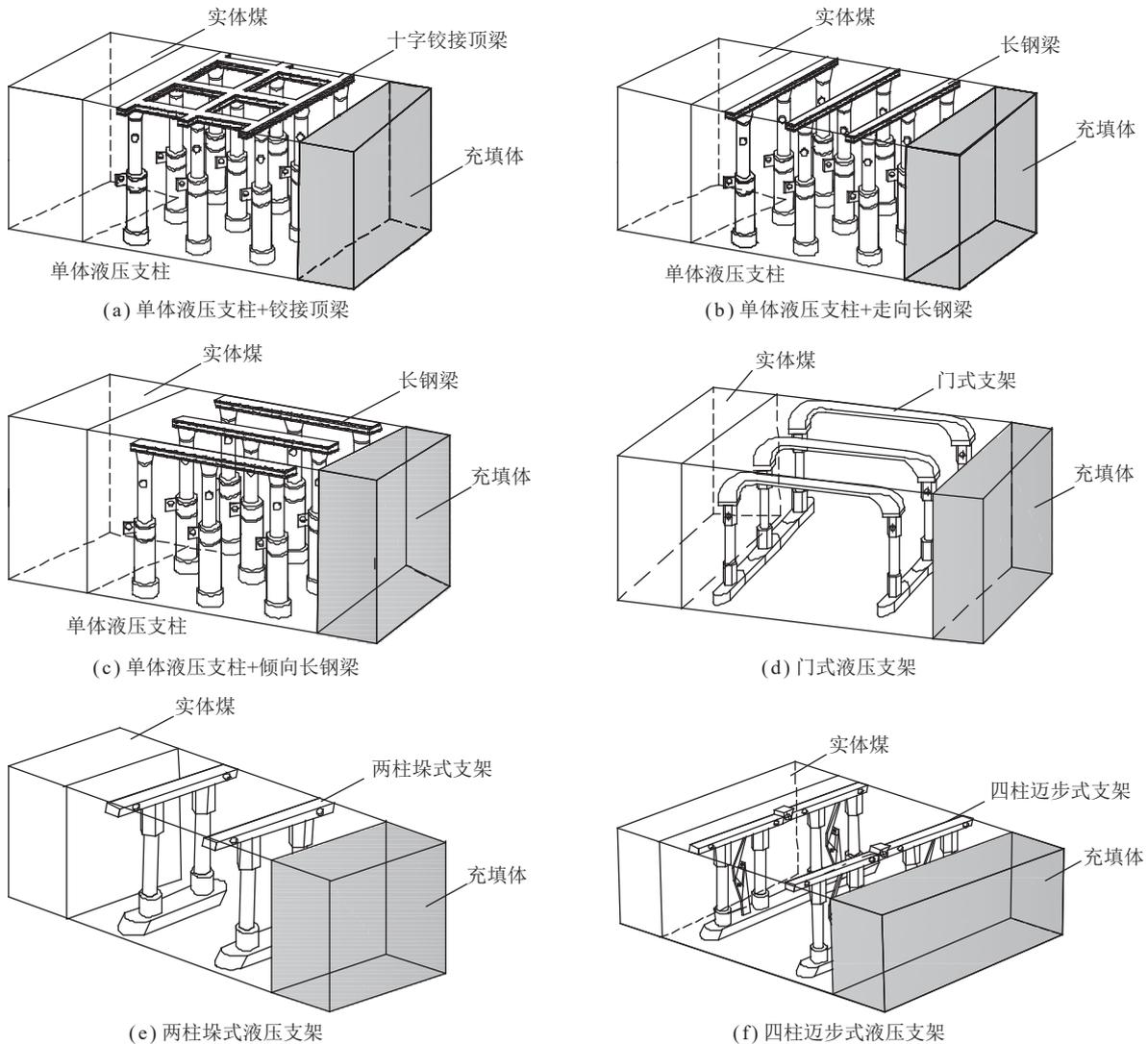


图 4 沿空留巷巷内加强支护类型

Fig.4 Type road-in reinforced support for GER

1.4 沿空留巷巷旁支护技术发展现状

1.4.1 沿空留巷巷旁支护及设计

根据充填墙体构筑材料,沿空留巷巷旁支护有木垛、金属支柱、矸石袋、砌块、混凝土、高水材料、钢管混凝土墩柱等。根据充填墙体构筑材料力学特性可将巷旁支护分为刚性、有限可缩、大可缩量等。木垛、矸石袋巷旁支护均为大可缩量巷旁支护,支护阻力小;金属支柱、砌块、混凝土、钢管混凝土墩柱巷旁支护均为有限可缩巷旁支护;高水材料巷旁支护属于有限可缩巷旁支护,早期支护阻力大、塑性变形量大。为了实现充填体的有限可缩,宁建国^[65]、徐金海^[66]等还设计了不等强充填体(上软下硬材料组合而成)支护,上部为让压接顶层,下部为高强承载层。

根据沿空留巷顶板岩层运动特征,结合多位专家

提出的沿空留巷围岩力学模型分析,沿空留巷巷旁支护机理主要体现在以下 4 个方面:

(1) 巷旁支护的高增阻速度。工作面推进后,后方构筑的充填体快速增阻达到一定的支护强度,阻止充填区域直接顶与上方岩层发生离层,保持整个顶板的完整性。同时,达到一定强度的巷旁支护沿充填体外侧边缘切顶直接顶等软弱顶板岩层^[67]。

(2) 巷旁支护的高支护阻力。留巷达到一定长度后,充填体增阻达到长时强度(充填体高支护阻力),在上覆岩层和充填体的共同作用下,采空区侧基本顶甚至更上位岩层沿充填体边缘被切断,冒落的煤矸石能够充填满采空区。为保持留巷巷道在邻近工作面复用期间具有一定的断面大小,需要充填体具有较高的强度防止充填体出现较大变形。

(3) 巷旁支护的高塑性变形能力。巷旁支护无法阻止基本顶旋转下沉带来的“给定变形”。在基本顶下沉时充填体应具有高塑性变形能力,通过塑性变形让压适应基本顶的旋转下沉,减少对巷旁支护的压力,实现控顶载荷向侧向煤体及采空区冒落矸石转移。

(4) 巷旁支护的良好密闭性能。对于自然发火周期较短的煤层,沿空留巷充填体还应具有良好的密闭性能,充填体构筑期间能够实现良好的接顶效果,防止采空区漏风与自然发火。

充填沿空留巷巷旁支护关键参数主要包括充填体支护阻力(充填体宽度和充填体强度)和充填体刚度。目前常见的充填体支护阻力理论计算方法有分离岩块法、倾斜岩梁法、叠加层板法、弹性薄板顶板运动力学分析法、弧形三角块稳定法、结构协调承载力学分析法等。实际上,为了提高巷旁支护效果,对于部分顶板条件不好的沿空留巷会在工作面液压支架架间超前补打锚索或者液压支架带压移架后迅速补打锚索加强支护,延缓待充填区域直接顶与上部岩层的离层^[68];对于那种随采随冒顶板,往往超前工作面开挖缺口(充填体宽度)并对缺口进行锚网支护^[68]。

韩昌梁、张农等^[69-70]指出“如何匹配各个部分(顶板、充填体和底板)的刚度以提高支撑系统抵抗变形

的能力对于围岩结构的稳定性至关重要”。为了确定合理的充填体刚度,建立了将直接顶、巷旁充填体和底板视为具有不同刚度的可变形体的关键层破断大结构下“直接顶-墙体-底板”的巷旁支撑系统力学模型。

1.4.2 沿空留巷巷旁充填材料

根据公开的沿空留巷实践文献可知,常用的沿空留巷巷旁充填材料有以水泥混凝土为主的低水灰质量比膏体材料、以高水速凝材料为主的高水灰质量比充填材料两大类,详见表5。

1.4.3 沿空留巷巷旁临时支护

沿空留巷充填体构筑期间,为了保障人工作业的安全和操作空间,往往在采空区存在一定宽度的临时支护区域(一般不超过2~3 m)。目前,沿空留巷采空区临时支护主要有密集单体支柱配合顶梁、专用沿空留巷采空区挡矸支架(图5)。研究表明:在充填区域外侧临时支护区域,采用专用沿空留巷采空区挡矸液压支架适当提高对顶板的临时支护宽度有利于控制直接顶与上方顶板的离层变形^[74]。

1.5 沿空留巷适应性评价与围岩稳定性监测

目前,全球矿业朝着数字化、信息化、智能化方向发展,自20世纪90年代学者们将人工智能技术等引入多个煤矿开采和掘进领域。然而,与金属矿山人工

表5 沿空留巷充填材料介绍

Table 5 Introduction to filling materials for GER

充填材料类型	应用矿井工作面	充填材料组分及配比(质量比)	充填材料力学特性
普通混凝土	四川金刚煤矿 ^[14]	矸石(粒径<40 mm)为混凝土骨料,胶凝材料为425号硅酸盐水泥,且不加任何速凝材料及改性剂,采用水灰质量比为0.5:1的混凝土	3 d强度7.75 MPa, 28 d可达23.5 MPa
CHCT混凝土	淮南矿业集团 ^[19,71]	CHCT充填材料由水泥、粉煤灰、石子、砂、水和复合外加剂组成,复合外加剂由减水剂、保水剂、引气剂和早强剂等组成	充填材料1、2、3、7、28 d抗压强度分别可达5、10、12、15和28 MPa
柔模混凝土	陕西榆家梁煤矿43308工作面 ^[13]	柔模混凝土用于沿空留巷为自密实混凝土、混凝土号多为C15~C30,主要有碎石、山砂、水泥、粉煤灰及专用外加剂	混凝土的强度在第1、2、3 d分别达到10、15、20 MPa
灰渣高水速凝材料	江苏夹河矿-450 m水平西一采区7423工作面 ^[34]	采用矸石粉(粒径簇<5 mm):ZKD高水速凝材料=3:2,水体积为70%的配比作为充填材料,即矸石粉480 kg/m ³ 、ZKD速凝材料320 kg/m ³ 、水700 kg/m ³ ,水灰质量比为2.2:1	配制的充填材料经实验室测定,10~12 min初凝,4 h强度2.03 MPa,1 d强度3.64 MPa,3 d强度5.53 MPa,7 d强度6.03 MPa,28 d强度6.62 MPa
净浆高水速凝材料	山西常村煤矿S2-6综放工作面 ^[72-73]	采用了水灰质量比2:1的净浆高水速凝材料	7 d后充填体稳定强度可达4~5 MPa
改进型高水材料	山西新元煤矿3107工作面 ^[74]	采用了水灰质量比1.5:1的改进型高水材料	充填体2 h强度4.4 MPa,1 d强度9.1 MPa,7 d强度10.4 MPa
组合充填材料	姜家湾煤矿8-2号煤层2109巷道沿空留巷试验巷旁支护采用不等强充填体 ^[65]	不等强充填体上部为尤乐I号充填材料,抗压强度(2 h后)为3 MPa,充填高度600 mm,可压缩量为500 mm;下部为水泥基膏体,由水泥、煤矸石(粒径小于20 mm)和水配制而成,水泥:煤矸石:水=1:3:0.5(质量比)	该类型的组合充填材料主要应用于坚硬顶板沿空留巷,较大的充填体可缩变形适应坚硬顶板的下沉

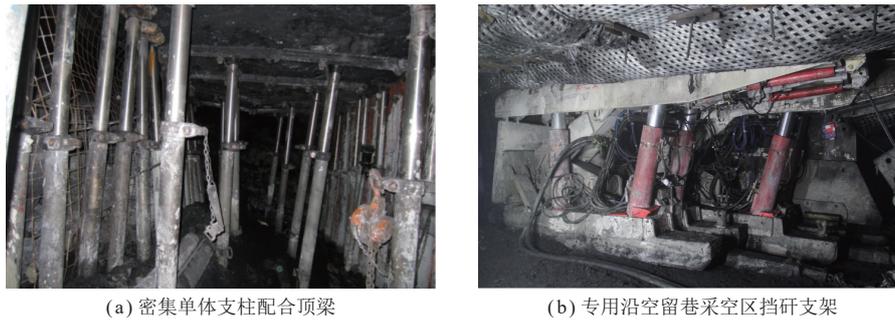


图 5 沿空留巷巷旁临时支护形式

Fig.5 Temporary support types for GER

智能技术相比,煤矿人工智能技术难度更大,主要原因在于开采煤层赋存条件复杂、开采技术条件多样化,尤其是沿空留巷相关大数据积累不足。目前,沿空留

巷人工智能研究较少,主要为数字化和信息化在沿空留巷当中的应用,集中在沿空留巷适应性评价和围岩稳定性监测 2 个方面(表 6)。

表 6 沿空留巷适应性评价与围岩稳定性监测现状及应用效果

Table 6 Review of the adaptability evaluation and surrounding rock stability monitoring in GER development

应用领域	特色算法与技术	应用矿井	应用效果	使用条件与存在不足
适应性评价	层次分析法和模糊综合评判法	西南矿区 ^[75]	能够实现对沿空留巷适应性进行评价	因素集选择性是否合理、专家评分主观性
	用层次分析和物元评价法	淮南潘一矿 ^[76]	实现了对沿空留巷顶板、充填体、煤帮、底板和围岩整体稳定性等级判定	评价指标权值存在专家主管打分的局限性
围岩稳定性监测	准分布式光纤布拉格光栅(FBG)传感技术和云技术	柠条塔矿 ^[77]	能够实现及时准确的现场数据采集,反馈实时生产信息,实现良好的监控性能	对数据数量和质量要求高
	GPRS数据收发单元、5G通信模块	乌兰木伦煤矿 ^[78]	实现井下监测信息的无线传输,有效提高了网络流数据传输的可靠性监测,实时显示各检测区的压力、应力及离层情况	对数据数量和质量要求高

1.5.1 沿空留巷适应性评价中的信息化与数字化

信息化与数字化技术在沿空留巷的适应性评价可以根据相关规定、统计数据和实践经验,调查每个等级的适应等级和范围,并提供每个等级支持的方法。现有研究表明,影响沿空留巷适应性评判的因素复杂^[75, 77, 79]。首先,合理选择因素集是正确评判沿空留巷适应性的关键,在确定因素集时要遵循重要性原则、独立性原则、可分性原则和普遍性原则等。其次,根据规范规定,结合煤层赋存情况,参照专家经验,确定各个因素对应不同等级的指标区间,确定各个因素对应的指标值。最后选用合适的评判方法(模糊综合评判法、物元评价法、神经网络法等),图 6 为采用模糊综合评判法分析沿空留巷适应性流程。

1.5.2 沿空留巷围岩变形监测中的信息化与数字化

沿空留巷围岩变形监测系统由信息感知、数据传输和数据智能处理平台等子系统构成的复杂系统,能够通过各种传感器和智能数据处理平台实现沿空留巷围岩应力、围岩位移和锚杆(索)应力等信息动态监测功能^[78]。数据智能处理平台常用的计算算法为

CNN 卷积神经网络、BP 神经网络、RNN 循环神经网络等人工智能算法。目前人工智能模型多达 40 种,每种结构不尽相同,其能够通过修正层与层之间的权系数来对欲解决的问题进行分类或预测。总体而言,采用不同的智能算法系统对围岩变形进行实时动态监测,可以为智能预测围岩变形情况提供参考价值。图 7 为人工智能在沿空留巷围岩变形预测中的应用示意。

2 我国沿空留巷面临的难题与挑战

尽管我国在薄及中厚煤层、部分厚煤层工作面沿空留巷技术取得成功应用,但是复杂多变工程地质条件下沿空留巷一直是制约我国沿空留巷技术应用的重大难题。近年来,沿空留巷一次采全高工作面采高仍未能突破 5 m,综采放顶煤工作面沿空留巷煤层厚度少有超过 7 m。例如,神东矿区大柳塔煤矿 52605 工作面运输巷开展充填沿空留巷,开采 52 煤层均厚 4.3 m、埋深为 99~238 m^[80];潞安矿区五阳煤矿 7602 综放工作面开展充填沿空留巷,开采煤层平均厚

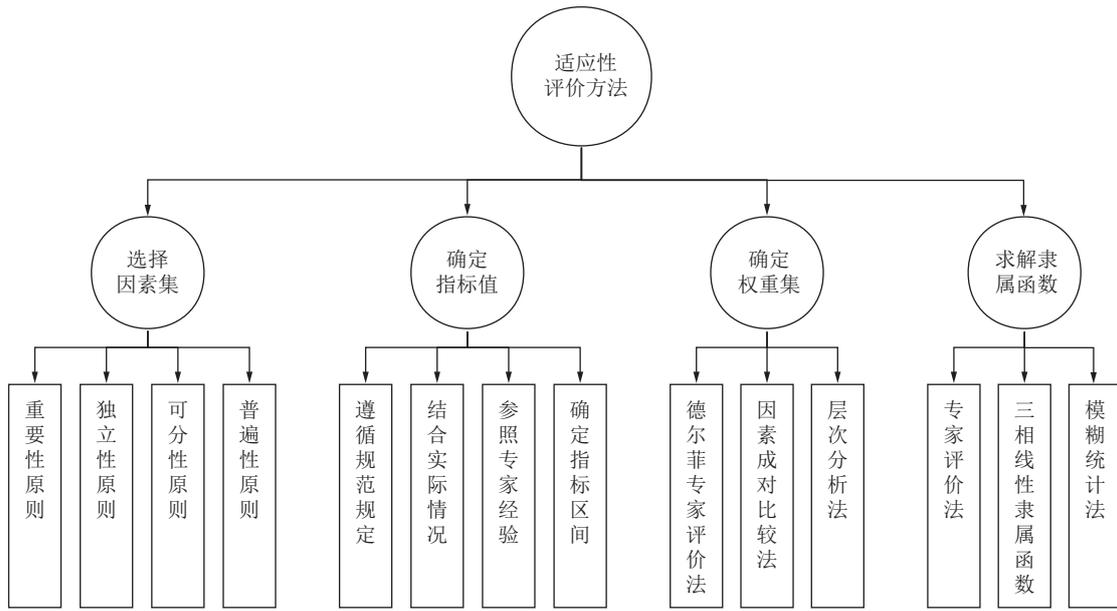


图 6 沿空留巷适应性评价方法

Fig.6 Adaptability evaluation method for GER

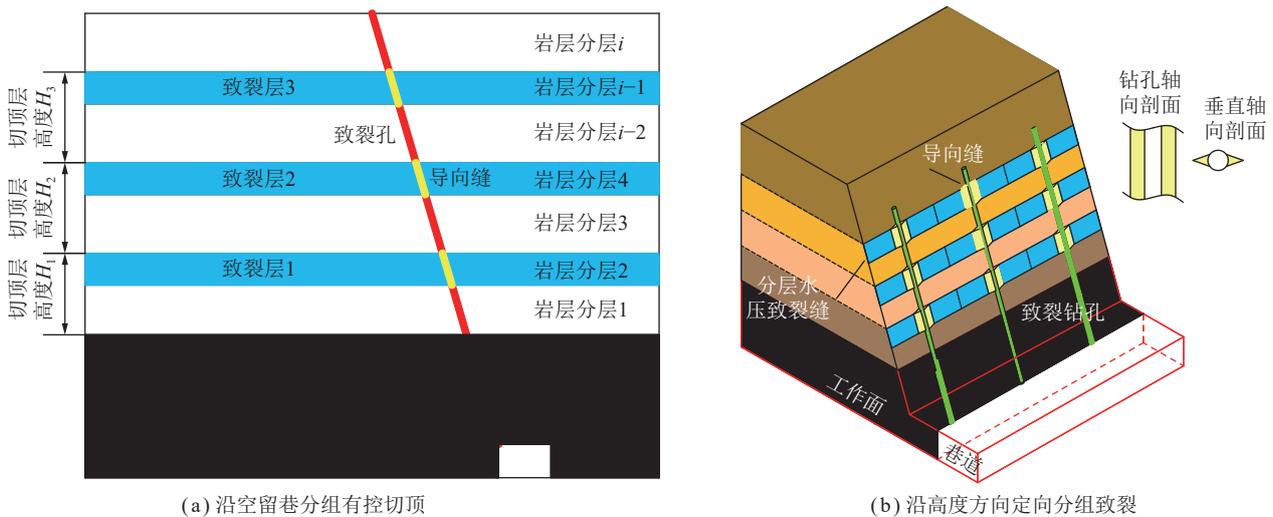


图 7 人工智能在沿空留巷围岩变形预测中的应用示意

Fig.7 Application of artificial intelligence in surrounding rock deformation prediction for GER

6.0 m^[81]; 晋城矿区成庄矿 4311 综放工作面开展充填沿空留巷, 开采 3 号煤层, 煤层平均厚度 6.3 m, 平均倾角 3°, 埋深 348~479 m^[82]。造成复杂多变工程地质条件下工作面沿空留巷围岩稳定控制难的主要原因有:

(1) 一次采全高工作面和综放工作面开采煤厚度大、工作面推进速度快, 矿山压力显现强烈, 垮落带高度大, 上覆关键层形成的大结构稳定状况直接影响下方沿空留巷围岩的应力环境和稳定^[50]。强矿压工作面沿空留巷围岩受覆岩大结构的旋转下沉“给定变形”带来的高应力作用, 留巷围岩稳定所需时间长。强矿压工作面沿空留巷在覆岩运动不同时期下巷内支护

和巷旁支护强度、支护时机仍未能形成系统理论。

(2) 充填沿空留巷围岩与支护体相互机制的理论认识仍然存在缺陷。特别是对充填沿空留巷基本顶是否存在二次破断, 以及二次破断的先后顺序缺乏严谨的理论认识, 目前的结论大都是基于各种假设条件, 影响了巷旁支护体相关参数的准确设计。

(3) 巷旁支护体充填材料力学及变形特性尚不能适应深部、强矿压工作面沿空留巷。目前常用的沿空留巷充填材料是高水充填材料和混凝土材料。其中, 高水材料在 1.5 : 1 水灰质量比条件下峰值强度为 10.4 MPa, 无法仅靠充填体的支护阻力切断足够高度的顶板, 常需要超前辅助切顶卸压; 用于沿空留巷的

混凝土材料强度往往处于 20~40 MPa 内,但是充填体可缩性较差不能适应较大的顶板旋转下沉“给定变形”,存在巷内切顶或钻底的威胁。

(4) 沿空留巷底臃机理及控制技术尚不完善。受多次采动应力影响的沿空留巷底臃是所有回采巷道中最严重的^[83]。目前,针对沿空留巷底臃主要认识有直接底压曲、基本底挠曲、底板膨胀性软岩底臃、软岩底板向临空侧挤压流动等^[60, 84-85]。

(5) 强动载或冲击地压沿空留巷充填体稳定控制研究尚处于空白。目前,常用采空区下或上煤层遗留煤柱影响范围内下煤层沿空留巷易受上覆岩层二次运动或遗留煤柱集中应力带来的强动载显现;多层坚硬顶板工作面沿空留巷易产生强动载或冲击地压危害。

(6) 沿空留巷施工工艺比较复杂,施工机械化程度低,导致效率低、用人多、速度慢,不能满足采煤工作面快速推进的要求。因此,沿空留巷施工工艺优化、施工设备机械化、自动化改造,甚至智能化升级是非常必要的。

3 我国沿空留巷储备型技术与发展展望

降本提质、融入智能化矿山建设是沿空留巷技术持续推广的关键。针对现阶段我国沿空留巷技术应

用面临的难题和挑战,笔者提出了几项储备型技术与展望。

3.1 沿空留巷围岩控制储备型技术

3.1.1 厚煤层综放/一次采全高沿空留巷有控切顶-充填围岩协同控制技术

目前切顶留巷一般采用聚能爆破切顶,成功应用于薄及中厚煤层。但是,厚煤层综放/一次采全高工作面采出煤层厚、垮落带高度大,切顶岩层厚度显著增大,而聚能爆破切顶钻孔间距一般 0.5~0.8 m,厚煤层综放/一次采全高切顶留巷的钻孔量和炸药消耗量大、留巷效率低、巷道稳定性差、次生动力灾害风险高,而且隔离采空区性能差,易发生采空区遗煤自燃和瓦斯渗漏,切顶留巷在厚煤层综放/一次采全高工作面应用较少。笔者团队在获批的 2021 年区域创新发展联合基金项目《综放开采分组有控切顶沿空留巷基础理论与关键技术研究》中提出了沿空留巷有控切顶-充填围岩协同控制技术,即沿高度方向大范围精准定向分组有控致裂切顶,沿采空区边缘构筑狭窄的留巷隔离体,形成留巷隔离体-矸石组合帮协同承载并有效隔离采空区;有控切顶是指采用磨料射流沿钻孔轴向切割导向缝、水压致裂裂缝沿巷道轴向定向有控扩展、分组切断厚层坚硬顶板,如图 8 所示。

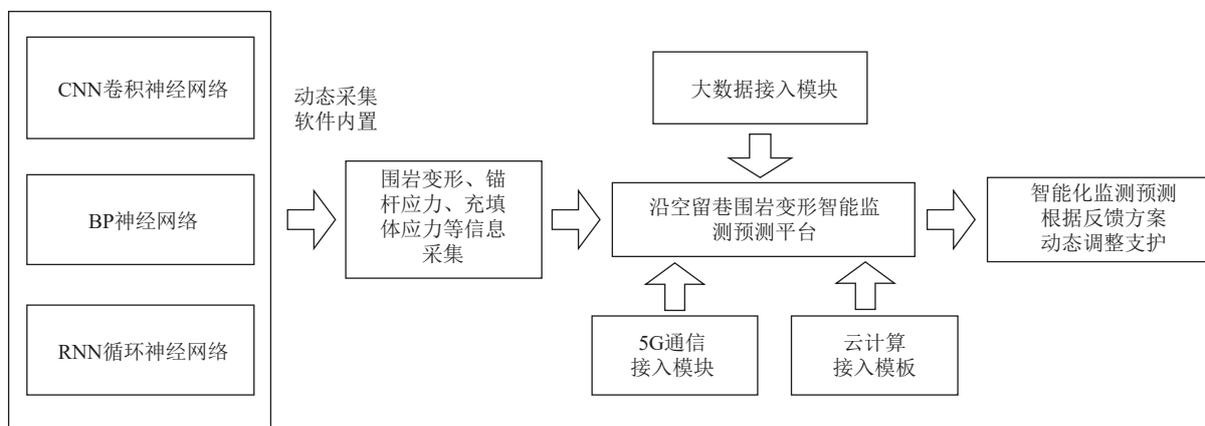


图 8 厚煤层综放/一次采全高沿空留巷有控切顶-充填围岩协同控制示意

Fig.8 Coordinated control of controlled roof cutting and filling for GER in fully mechanized caving/ full-seam mining in the thick coal seam

3.1.2 面向强矿压工作面含外加剂改性高水材料沿空留巷技术

目前,高水材料在 1.5 : 1 水灰质量比条件下峰值强度为 10.4 MPa,无法适应一些矿压显现剧烈的留巷工作面。然而,高水材料具有良好的塑性特性和高应变承载特性,具有沿空留巷巷旁支护所需要的可缩性。目前,熊祖强团队开展了不同发泡剂、聚丙烯纤维、复合早强剂等类型外加剂改性高水材料试验^[86-87],刘长

武团队开展了粉煤灰-电石渣双掺、聚乙烯塑料 (PE) 改性高水充填材料物理力学性能研究^[88-89]。常规高水材料沿空留巷技术在强矿压工作面可能会面临充填体支护强度不足的难题。因此,可根据不同外加剂类型及外加剂掺量开展改性高水材料力学特性及微观实验分析,根据不同工程地质条件下沿空留巷巷旁支护参数优选确定改性高水材料的外加剂类型及外加剂掺量。该类改性的高水材料充填体单轴抗压强

度应能达到 15~20 MPa, 充填体应变达到 0.1~0.2 阶段仍能保持 10 MPa 以上的承载能力。

3.2 沿空留巷支护设计储备型技术

煤矿智能化是“十四五”煤炭行业科技创新的重要方向, 笔者团队提出了沿空留巷数值模拟参数智能反演、沿空留巷支护参数智能优选设计等方面的思路。

传统的沿空留巷数值模拟参数多是依赖岩石力学试验结果和工程技术人员经验, 对所建立的数值计算模型和采用的岩石力学参数缺乏校验。针对沿空留巷数值模拟岩石力学参数智能反演问题, 笔者团队建立了一套沿空留巷数值模拟岩石力学参数智能反演 workflow (图 9)。该方法包括以下步骤: ① 采集邻近工作面生产地质数据和支护参数、邻近工作面及回采巷道支护设计和矿压显现数据, 建立邻近工作面生产地质特征数据-工作面及巷道矿压显现一体化数据库; ② 采用数值模拟软件 (如 FLAC3D) 建立含邻近工作面的沿空留巷数值计算模型; ③ 针对不同岩层选择合适的本构模型并分别校验, 根据岩石力学结果初步确定各岩层参数, 以邻近工作面及其回采巷道矿压显现参数 (变形、应力等) 为反演目标进行迭代计算; ④ 采用 K 邻近算法 (简称 KNN)、支持向量机 (简称 SVM)、随机森林 (简称 RF)、神经网络 (简称 NN) 等

人工智能算法, 构建邻近工作面及其回采巷道矿压显现的代理模型, 并采用遗传算法实现自动历史拟合; ⑤ 最后, 采用反演的岩石力学参数进行沿空留巷巷内支护和巷旁支护设计模拟分析, 从而评价沿空留巷支护设计方案的围岩控制效果。

笔者团队提出沿空留巷支护参数智能优选设计方法 (图 10)。该方法包括以下步骤: ① 采集已留巷工作面生产地质特征数据、已留巷工作面支护设计和留巷矿压显现数据, 建立已留巷工作面生产地质-工作面及巷道矿压显现一体化数据库; ② 采用特征工程技术挖掘数据间的关系, 确定沿空留巷围岩变形的主控因素; ③ 采用机器学习、深度学习技术, 以已留巷工作面生产地质和留巷支护设计特征数据集作为输入, 以留巷工作面及巷道矿压显现作为输出, 建立沿空留巷围岩变形智能预测模型; ④ 计算巷旁支护、巷内支护等留巷费用、确定沿空留巷延米费用; ⑤ 采用多目标优化算法, 以留巷工作面生产地质特征数据为物理约束, 以围岩变形量允许指标、沿空留巷延米费用最低为多目标优化沿空留巷巷内支护和巷旁支护参数, 从而指导现场施工。该方法可为优化沿空留巷支护设计、提高沿空留巷围岩控制效果、降低沿空留巷支护成本提供理论依据和方法支撑。

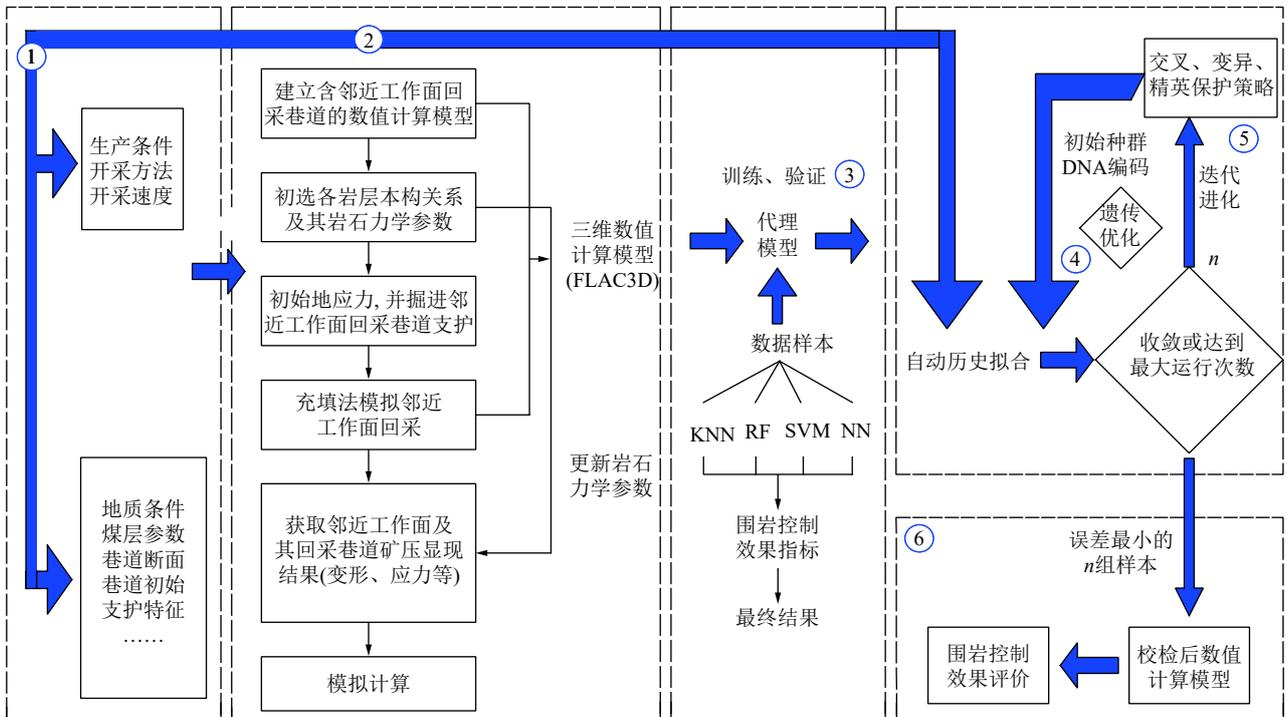


图 9 沿空留巷数值模拟岩石力学参数智能反演 workflow

Fig.9 Intelligent inversion of rock mechanical parameters used in numerical simulations for GER

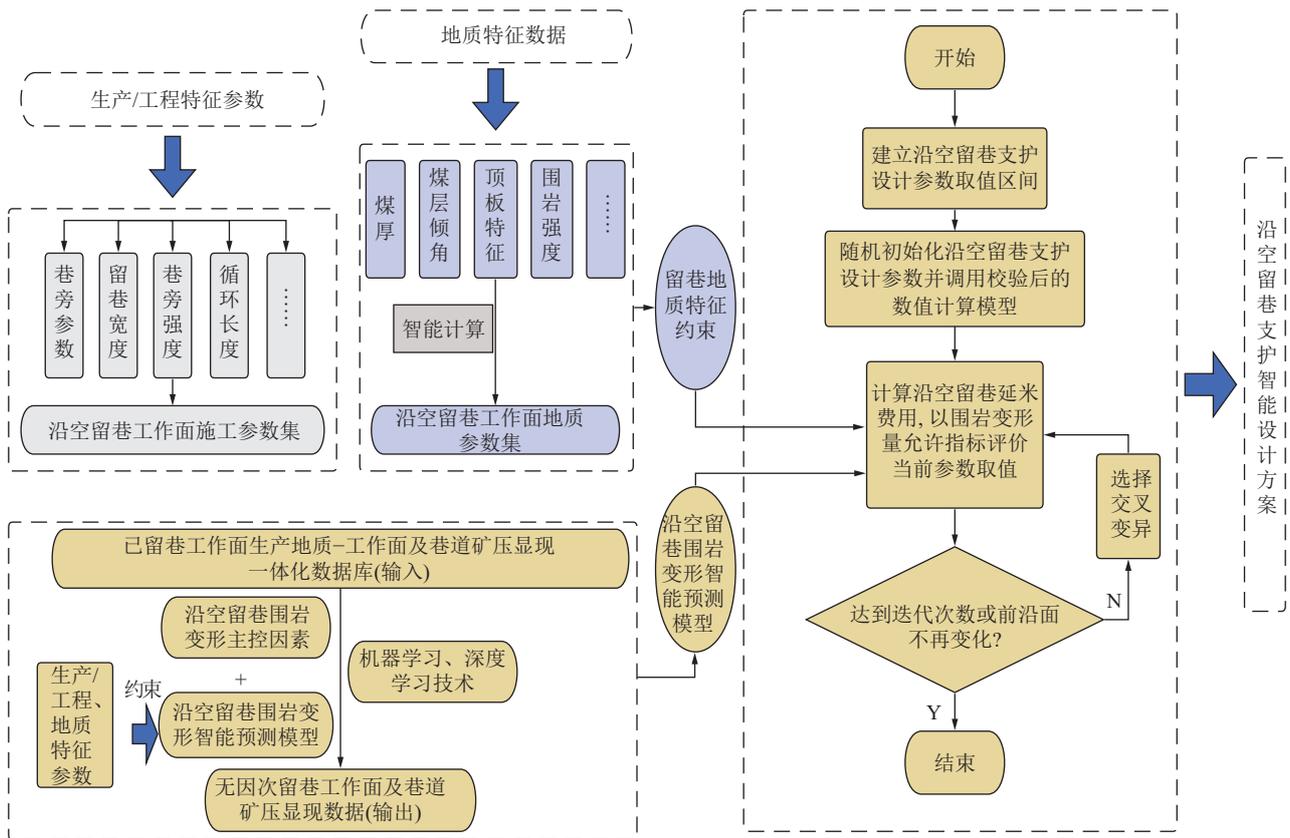


图 10 沿空留巷支护参数智能优选设计思路

Fig.10 Intelligent design of GER support parameters

4 结 论

(1) 沿空留巷技术是井工煤矿无煤柱开采的重要途径。目前,我国在不同技术类型沿空留巷、沿空留巷围岩稳定原理、巷内支护技术、巷旁支护技术方面均取得了较大突破,并逐步将人工智能应用到沿空留巷技术当中。沿空留巷技术类型方面,阶段式沿空留巷主要应用于高瓦斯矿井,复用式沿空留巷仍为主要应用类型,充填式沿空留巷应用范围较切顶沿空留巷更为广泛;沿空留巷围岩稳定方面,沿空留巷顶板运动特征是不同时期沿空留巷巷内支护、巷旁支护参数确定的重要依据,也是建立适宜沿空留巷围岩力学模型的基础,主要围岩力学模型包括分离岩块法、倾斜岩梁法、叠加层板法、弹性薄板顶板运动力学模型、弧形三角块稳定法、结构协调承载力学模型等;沿空留巷巷内支护方面,基本支护主要形成了以锚杆(索)支护等主动支护为主,加强支护主要形成了单体液压支柱配合铰接顶梁、单体液压支柱配合长钢梁、巷内加强支护液压支架等;沿空留巷巷旁支护方面,主要形成了高水材料高塑性变形充填体和混凝土高支护阻力有限可缩充填体两大类,巷旁临时支护从密集单体支柱配合顶梁发展到专用沿空留巷采空区挡矸支

架;数字化与信息化应用方面,主要集中于沿空留巷适应性评价和围岩变形监测 2 个方向,智能化水平不断提高。

(2) 我国沿空留巷应用逐渐向厚煤层综放/一次采全高、多层硬顶(强动载)工作面推广。但受限于复杂的生产地质条件,缺乏不同矿压显现特征下沿空留巷围岩与支护体相互机制的理论认识、适当变形力学特性的巷旁支护体充填材料,也缺少沿空留巷底臆机理及控制技术体系。降本提质、融入智能化矿山建设是沿空留巷技术持续推广的关键。

(3) 针对现阶段我国沿空留巷技术应用面临的难题和挑战,笔者团队提出了几项储备型技术:厚煤层综放/一次采全高沿空留巷有控切顶-充填围岩协同控制技术、面向强矿压工作面含外加剂改性高水材料沿空留巷技术;针对沿空留巷数值模拟岩石力学参数智能反演问题,建立了一套沿空留巷数值模拟岩石力学参数智能反演 workflow、提出了沿空留巷支护参数智能优选设计方法。

参考文献(References):

[1] 侯朝炯团队. 巷道围岩控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2013.
 [2] 康红普, 张晓, 王东攀, 等. 无煤柱开采围岩控制技术及应用[J]. 煤

- 炭学报, 2022, 47(1): 16–44.
- KANG Hongpu, ZHANG Xiao, WANG Dongpan, et al. Strata control technology and applications of non-pillar coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 16–44.
- [3] 何满潮, 宋振骥, 王安, 等. 长壁开采切顶短壁梁理论及其 110 工法——第三次矿业科学技术变革[J]. 煤炭科技, 2017, 38(1): 1–9.
- HE Manchao, SONG Zhenqi, WANG An, et al. Theory of longwall mining by using roof cutting shortwall team and 110 method—the third mining science and technology reform[J]. Coal Technology, 2017, 38(1): 1–9.
- [4] 韩俊效, 马晋民, 石晋松, 等. 大宁煤矿阶段式高水材料充填沿空留巷技术应用研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(4): 6–11.
- HAN Junxiao, MA Jinmin, SHI Jinsong, et al. Application of staged gob-side entry retaining with high water material filling in Daning Coal Mine[J]. Coal Engineering, 2020, 52(4): 6–11.
- [5] ZHANG Zizheng, BAI Jianbiao, CHEN Yong, et al. An innovative approach for gob-side entry retaining in highly gassy fully-mechanized longwall top-coal caving[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 80: 1–11.
- [6] 李东印, 张景轩, 郑立军, 等. 密集钻孔弱化底分层顶板沿空留巷技术[J]. 煤矿安全, 2022, 53(7): 111–118, 125.
- LI Dongyin, ZHANG Jingxuan, ZHENG Lijun, et al. Dense boreholes for weakening bottom layer by cutting roof and pressure relief of gob-side entry retaining[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(7): 111–118, 125.
- [7] 孙晓明, 刘鑫, 梁广峰, 等. 薄煤层切顶卸压沿空留巷关键参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1449–1456.
- SUN Xiaoming, LIU Xin, LIANG Guangfeng, et al. Study on key parameters of self-formed roadway without coal pillar by roof cutting and pressure relief in medium and thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1449–1456.
- [8] 何满潮, 马新根, 牛福龙, 等. 中厚煤层复合顶板快速无煤柱自成巷适应性研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2641–2654.
- HE Manchao, MA Xingen, NIU Fulong, et al. Adaptability research and application of rapid gob-side entry retaining formed by roof cutting and pressure releasing with composite roof and medium thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2641–2654.
- [9] 颜丙双. 浅埋大采高工作面支卸组合沿空留巷技术研究与应用[J]. 煤炭工程, 2022, 54(9): 18–23.
- YAN Bingshuang. Support-unloading combined technology for gob-side entry retaining in shallow high-cutting working face[J]. Coal Engineering, 2022, 54(9): 18–23.
- [10] 冯振江. 云冈矿切顶卸压自动成巷无煤柱开采技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- FENG Zhenjiang. Research on the technology of the pressure relief at the top of the roadway type of gob-side entry retaining in Yungang coal industry company [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [11] 林东才, 贾传洋, 栾恒杰, 等. 锚栓网带矸石袋墙沿空留巷技术及其应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2015, 34(2): 1–6.
- LIN Dongcai, JIA Chuanyang, LUAN Hengjie, et al. Gob-side entry retaining technology of gangue bags wall with anchor bolt net and its application[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Science Edition), 2015, 34(2): 1–6.
- [12] 韩昌良, 张农, 王晓卿, 等. 沿空留巷砌块式墙体结构承载特性及应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5): 673–678, 685.
- HAN Changliang, ZHANG Nong, WANG Xiaoqing, et al. Bearing behavior of block wall structure in gob-side entry retaining and its application[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(5): 673–678, 685.
- [13] 张子飞, 贺安民. 浅埋煤层柔模混凝土沿空留巷支护及稳定性分析[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 24–28.
- ZHANG Zifei, HE Anmin. Analysis of surrounding support and stability on gob-side entry retaining with flexible-formwork concrete in shallow seam[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 24–28.
- [14] 唐建新, 胡海, 涂兴东, 等. 普通混凝土巷旁充填沿空留巷试验[J]. 煤炭学报, 2010, 35(9): 1425–1429.
- TANG Jianxin, HU Hai, TU Xingdong, et al. Experimental on roadside packing gob-side entry retaining for ordinary concrete[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(9): 1425–1429.
- [15] 王军, 杨光, 黄万朋, 等. 顶升可缩式钢管混凝土支柱柱试验研究与工程应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3052–3068.
- WANG Jun, YANG Guang, HUANG Wanpeng, et al. Experimental research and engineering application of jacking and shrinkage concrete-filled steel tube pillar[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3052–3068.
- [16] 陈东. 钢管混凝土墩柱沿空留巷支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(S1): 1–3, 6.
- CHEN Dong. Technology of gob side entry retraining support by steel tube concrete pier column[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(S1): 1–3, 6.
- [17] 王军, 高延法, 何晓升, 等. 沿空留巷巷旁支护参数分析与钢管混凝土墩柱支护技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(6): 943–949.
- WANG Jun, GAO Yanfa, HE Xiaosheng, et al. The analysis of roadside supporting parameters and the support technology in the concrete filled steel tubular column in goaf-side entry retaining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(6): 943–949.
- [18] 徐金海, 付宝杰, 周保精. 沿空留巷充填体的流变特性分析[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(5): 585–589.
- XU Jinhai, FU Baojie, ZHOU Baojing. Backfill rheological properties for gob-side entry retaining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(5): 585–589.
- [19] 袁亮. 低透气性煤层群无煤柱煤气共采理论与实践[J]. 中国工程科学, 2009, 11(5): 72–80.
- YUAN Liang. Theory and practice of integrated pillarless coal production and methane extraction in multiseams of low permeability[J]. Chinese Engineering Science, 2009, 11(5): 72–80.
- [20] 薛俊华, 韩昌良. 大采高沿空留巷围岩分位控制对策与矿压特征分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 466–473.
- XUE Junhua, HAN Changliang. Strata behavior and control countermeasures for the gob-side entry retaining in the condition of large mining height[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012,

- 29(4): 466-473.
- [21] 柏建彪,周华强,侯朝炯,等.沿空留巷巷旁支护技术的发展[J].中国矿业大学学报,2004,33(2): 59-62.
BAI Jianbiao, ZHOU Huaqiang, HOU Chaojiong, et al. Development of support technology beside roadway in goaf-side entry retaining for next sublevel[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 59-62.
- [22] 易宏伟,周华强,张连信,等.高水灰渣充填材料基本性能的研究[J].矿山压力与顶板管理,1991,8(4): 13-17.
YI Hongwei, ZHOU Huaqiang, ZHANG Lianxin, et al. Study on basic properties of high water ash and slag filling materials[J]. Mine Pressure and Roof Management, 1991, 8(4): 13-17.
- [23] 胡明明,周辉,张勇慧,等.宽断面预留墩柱沿空留巷墩柱支护阻力计算研究[J].岩土力学,2018,39(11): 4218-4225.
HU Mingming, ZHOU Hui, ZHANG Yonghui, et al. Analysis of supporting resistance of reserved pier column for gob-side entry retaining in wide roadway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11): 4218-4225.
- [24] 龚鹏.深部大采高矸石充填综采沿空留巷围岩变形机理及应用[D].徐州:中国矿业大学,2018.
GONG Peng. Strata behavior and control countermeasures for the gob-side entry retaining in the condition of large mining height [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [25] 张吉雄,姜海强,缪协兴,等.密实充填采煤沿空留巷巷旁支护体合理宽度研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(2): 159-164.
ZHANG Jixiong, JIANG Haiqiang, MIAO Xiexing, et al. The rational width of the support body of gob-side entry in fully mechanized backfill mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(2): 159-164.
- [26] 黄艳利,张吉雄,张强,等.综合机械化固体充填采煤原位沿空留巷技术[J].煤炭学报,2011,36(10): 1624-1628.
HUANG Yanli, ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, et al. Technology of gob-side entry retaining on its original position in fully-mechanized coalface with solid material backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1624-1628.
- [27] 花锦波,刘娜,郑西贵.浅埋煤层无墙体沿空留巷及切顶组合支架试验研究[J].煤炭科学技术,2017,45(3): 14-19.
HUA Jinbo, LIU Na, ZHENG Xigui. Experimental study on non-pillar gob-side entry retaining and roof-cutting combination support in shallow buried coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(3): 14-19.
- [28] 韩昌良,张农,李桂臣,等.大采高沿空留巷巷旁复合承载结构的稳定性分析[J].岩土工程学报,2014,36(5): 969-976.
HAN Changliang, ZHANG Nong, LI Guichen, et al. Stability analysis of compound bearing structure of gob-side entry retaining with large mining height[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 969-976.
- [29] 张自政,柏建彪,王卫军,等.沿空留巷充填区域直接顶受力状态探讨与应用[J].煤炭学报,2017,42(8): 1960-1970.
ZHANG Zizheng, BAI Jianbiao, WANG Weijun, et al. Study on stress state of immediate roof above backfill area in gob-side entry retaining and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 1960-1970.
- [30] 张自政,柏建彪,陈勇,等.沿空留巷不均承载特征探讨与应用分析[J].岩土力学,2015,36(9): 2665-2673.
ZHANG Zizheng, BAI Jianbiao, CHEN Yong, et al. Investigation and application analysis of unbalanced bearing characteristics of gob-side entry retaining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2665-2673.
- [31] 何满潮,陈上元,郭志飏,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.
- [32] 孙广建,张洋,常晓亮,等.大松动圈围岩沿空留巷切顶卸压-恒阻补强分区支护技术[J].采矿与岩层控制工程学报,2022,4(4): 39-51.
SUN Guangjian, ZHANG Yang, CHANG Xiaoliang, et al. Technology of partition support by cutting-roof pressure relief and constant resistance reinforcement for double-used roadway with deep excavation-induced damage zone[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(4): 39-51.
- [33] 康红普,牛多龙,张镇,等.深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术[J].岩石力学与工程学报,2010,29(10): 1977-1987.
KANG Hongpu, NIU Duolong, ZHANG Zhen, et al. Deformation characteristics of surrounding rock and supporting technology of gob-side entry retaining in deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1977-1987.
- [34] 侯朝炯,易安伟,柏建彪,等.高水灰渣速凝材料巷旁充填沿空留巷的试验研究[J].煤炭科学技术,1995,23(2): 2-5, 34, 63.
HOU Chaojiong, YI Anwei, BAI Jianbiao, et al. Experimental study on gob-side roadway retention with high water ash and slag quick-setting material[J]. Coal Science and Technology, 1995, 23(2): 2-5,34,63.
- [35] 贾民,徐营,姜希印,等.超前立柱式沿空留巷技术研究[J].采矿与安全工程学报,2017,34(2): 228-234.
JIA Min, XU Ying, JIANG Xiyin, et al. Technology of gob-side entry retaining with advance standing props[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(2): 228-234.
- [36] 王平,曾梓龙,孙广京,等.深井矸石充填工作面沿空留巷围岩控制原理与技术[J].煤炭科学技术,2022,50(6): 68-76.
WANG Ping, ZENG Zilong, SUN Guangjing, et al. Principle and technology of surrounding rock control for gob-side entry retaining in deep mine gangue backfilling face[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 68-76.
- [37] 杨俊哲.厚煤层机械化柔模快速沿空留巷技术应用研究[J].煤炭科学技术,2015,43(S2): 1-5.
YANG Junzhe. Analysis and application of rapid mechanization gob-side entry retaining technology with flexible-formwork in thick seam[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(S2): 1-5.
- [38] 柏建彪,张自政,王襄禹,等.高水材料充填沿空留巷应力控制与围岩强化机理及应用[J].煤炭科学技术,2022,50(6): 16-28.
BAI Jianbiao, ZHANG Zizheng, WANG Xiangyu, et al. Stress control of goaf retaining roadway and strengthening mechanism of surrounding rock with high water material filling and its application[J].

- Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 16–28.
- [39] 郭育光, 柏建彪, 侯朝炯. 沿空留巷巷旁充填体主要参数研究[J]. 中国矿业大学学报, 1992, 21(4): 4–14.
GUO Yuguang, BAI Jianbiao, HOU Chaojiong. Study on main parameters of side filling body of goaf retaining roadway[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1992, 21(4): 4–14.
- [40] 孙恒虎, 吴健, 邱运新. 沿空留巷的矿压规律及岩层控制[J]. 煤炭学报, 1992, 17(1): 15–24.
SUN Henghu, WU Jian, QIU Yunxin. Rules of ground pressure and strata control in gateways maintained in goaf[J]. Journal of China Coal Society, 1992, 17(1): 15–24.
- [41] 漆泰岳. 沿空留巷整体浇注护巷带主要参数及其适应性[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(2): 122–125.
QI Taiyue. The main parameters and adaptability of the integral casting belt for retaining roadway along goaf[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(2): 122–125.
- [42] 李化敏. 沿空留巷顶板岩层控制设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 651–654.
LI Huamin. Control design of roof rocks for gob side entry[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 651–654.
- [43] 陈勇, 柏建彪, 王襄禹, 等. 沿空留巷巷内支护技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 903–910.
CHEN Yong, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Support technology research and application inside roadway of gob-side entry retaining[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6): 903–910.
- [44] 韩昌良. 沿空留巷围岩应力优化与结构稳定控制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
HAN Changliang. Stress optimization and structure stability control for the surrounding rock of gob-side entry retaining [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [45] 谭云亮, 于凤海, 宁建国, 等. 沿空巷旁支护适应性原理与支护方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 376–382.
TAN Yunliang, YU Fenghai, NING Jianguo, et al. Adaptability theory of roadside support in gob-side entry retaining and its supporting design[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 376–382.
- [46] 何廷峻. 应用 WILSON 铰接岩块理论进行巷旁支护设计[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 63–67.
HE Tingjun. Gateside supports designed by Wilson theory of hinged rock block[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 63–67.
- [47] 涂敏. 沿空留巷顶板运动与巷旁支护阻力研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 1999, 18(4): 347–351.
TU Min. Study on roof movement and roadway-side supporting resistance of remained roadway[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 1999, 18(4): 347–351.
- [48] 阚甲广, 张农, 李宝玉, 等. 典型留巷顶板条件下巷旁充填体支护阻力分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2778–2784.
KAN Jiaguang, ZHANG Nong, LI Baoyu, et al. Analysis of supporting resistance of backfilling wall for gob-side entry retaining under typical roof conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2778–2784.
- [49] 华心祝, 马俊枫, 许庭教. 锚杆支护巷道巷旁锚索加强支护沿空留巷围岩控制机理研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2107–2112.
HUA Xinzhu, MA Junfeng, XU Tingjiao. Study on controlling mechanism of surrounding rocks of gob-side entry with combination of roadside reinforced cable supporting and roadway bolt supporting and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2107–2112.
- [50] 李迎富, 华心祝. 沿空留巷上覆岩层关键块稳定性力学分析及巷旁充填体宽度确定[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1134–1140.
LI Yingfu, HUA Xinzhu. Mechanical analysis of stability of key blocks of overlying strata for gob-side entry retaining and calculating width of roadside backfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1134–1140.
- [51] 陈勇. 沿空留巷围岩结构运动稳定机理与控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
CHEN Yong. Study on stability mechanism of rockmass structure movement and its control in gob-side entry retaining [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [52] 侯朝炯, 勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 342–345.
HOU Chaojiong, GOU Panfeng. Mechanism study on strength enhancement for the rocks surrounding roadway supported by bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 342–345.
- [53] 侯朝炯. 煤巷锚杆支护的关键理论与技术[J]. 矿山压力与顶板管理, 2002, 19(1): 2–5.
HOU Chaojiong. Key theory and technique of coal entry bolt supporting[J]. Mine Pressure and Roof Management, 2002, 19(1): 2–5.
- [54] 张镇, 康红普. 深部沿空留巷巷内锚杆支护机理及选型设计[J]. 铁道建筑技术, 2011(9): 1–5.
ZHANG Zhen, KANG Hongpu. Mechanism and selection design of bolt support in deep goaf retaining roadway[J]. Railway Construction Technology, 2011(9): 1–5.
- [55] 于宪阳. 沿空留巷滞后段煤帮采动破坏机理及注浆重构技术[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
YU Xianyang. Rib breakage mechanism and reconstruction technique in lagging part of gob-side entry retaining [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [56] 权景伟, 柏建彪, 种道雪, 等. 沿空留巷锚杆支护技术研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(12): 60–61, 68.
QUAN Jingwei, BAI Jianbiao, CHONG Daoxue, et al. Research and application of bolt support technology for gob-side entry retaining[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(12): 60–61, 68.
- [57] 石建军, 马念杰, 白忠胜. 沿空留巷顶板断裂位置分析及支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(7): 35–37.
SHI Jianjun, MA Nianjie, BAI Zhongsheng. Analysis on roof broken location of gateway retained along goaf and technology of roof support[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(7): 35–37.
- [58] 张自政, 王卫军, 于宪阳. 深部沿空留巷实体煤帮变形影响因素及规律[J]. 矿业工程研究, 2017, 32(3): 39–44.
ZHANG Zizheng, WANG Weijun, YU Xianyang. Deformation factors and law of solid coal rib in gob-side entry retaining with buried deep[J]. Mineral Engineering Research, 2017, 32(3): 39–44.

- [59] 杨军, 石海洋, 齐干. 巷道底角锚杆控制底鼓机理及选型试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(4): 643–648.
YANG Jun, SHI Haiyang, QI Gan. Research on mechanism for floor heave control in the roadway by base-angel-bolt and its type selection test[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(4): 643–648.
- [60] 徐营, 周辉, 柏建彪, 等. 沿空留巷底鼓特性与控制方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 4235–4243.
XU Ying, ZHOU Hui, BAI Jianbiao, et al. Research on mechanism for floor heave control in the roadway by base-angel-bolt and its type selection test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 4235–4243.
- [61] 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.
- [62] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道支护技术的研究与应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1809–1814.
KANG Hongpu, WANG Jinhua, LIN Jian. Study and applications of roadway support techniques for coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1809–1814.
- [63] 韩昌良, 张农, 李桂臣, 等. 覆岩分次垮落时留巷顶板离层形成机制[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(6): 893–899.
HAN Changliang, ZHANG Nong, LI Guichen, et al. Bed separation mechanism under sequential roof collapse condition in a gob-side entry retaining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(6): 893–899.
- [64] 唐建新, 邓月华, 涂兴, 等. 锚网索联合支护沿空留巷顶板离层分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1827–1831.
TANG Jianxin, DENG Yuehua, TU Xing, et al. Analysis of roof separation in gob-side entry retaining combined support with bolting wire mesh[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1827–1831.
- [65] 宁建国, 马鹏飞, 刘学生, 等. 坚硬顶板沿空留巷巷旁“让-抗”支护机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 369–374.
NING Jianguo, MA Pengfei, LIU Xuesheng, et al. Supporting mechanism of “yielding-supporting” beside roadway maintained along the goaf under hard rocks[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(3): 369–374.
- [66] 孙垒, 曹悦, 徐金海, 等. 沿空留巷双层充填墙体材料力学性能研究及应用[J]. 煤炭工程, 2022, 54(7): 56–60.
SUN Lei, CAO Yue, XU Jinhai, et al. Mechanical properties of double-layer filling wall for gob-side entry retaining and the engineering application[J]. Coal Engineering, 2022, 54(7): 56–60.
- [67] 阚甲广, 袁亮, 张农, 等. 留巷充填区域顶板承载性能研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(9): 1429–1434.
KAN Jiaguang, YUAN Liang, ZHANG Nong, et al. Bearing capacity of backfilling area roof in gob-side entry retaining[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(9): 1429–1434.
- [68] 张自政, 柏建彪, 王卫军, 等. 沿空留巷充填区域锚索锚固区内外顶板离层力学分析与工程应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5): 893–901.
ZHANG Zizheng, BAI Jianbiao, WANG Weijun, et al. Mechanical analysis of roof separation within and outside anchorage zone above backfill area of gob-side entry retaining and its engineering application[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(5): 893–901.
- [69] 张农, 韩昌良, 阚甲广, 等. 沿空留巷围岩控制理论与实践[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1635–1641.
ZHANG Nong, HAN Changliang, KAN Jiaguang, et al. Theory and practice of surrounding rock control for pillarless gob-side entry retaining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1635–1641.
- [70] 韩昌良, 张农, 姚亚虎, 等. 沿空留巷厚层复合顶板传递承载机制[J]. 岩石力学, 2013, 34(S1): 318–323.
HAN Changliang, ZHANG Nong, YAO Yahu, et al. Transfer bearing mechanism of thick composite roof in gob-side entry retaining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 318–323.
- [71] 袁亮. 低透气性高瓦斯煤层群无煤柱快速留巷 Y 型通风煤与瓦斯共采关键技术[J]. 中国煤炭, 2008, 34(6): 9–13.
YUAN Liang. Key technology for simultaneous extraction of coal/gas in low permeable high gas content coal seam cluster under pillarless gob-side entry retained with Y type ventilation[J]. China Coal, 2008, 34(6): 9–13.
- [72] 张东升, 马立强, 冯光明, 等. 综放巷内充填原位沿空留巷技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1164–1168.
ZHANG Dongsheng, MA Liqiang, FENG Guangming, et al. The technique of gob-side entry retaining with entry-in packing on its original position in fully-mechanized coalface with top-coal caving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1164–1168.
- [73] 张东升, 缪协兴, 冯光明, 等. 综放沿空留巷充填体稳定性控制[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(3): 23–26.
ZHANG Dongsheng, MIAO Xiexing, FENG Guangming, et al. Research on stability control technology of filling body in gob-side entry retaining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(3): 23–26.
- [74] 张自政. 沿空留巷充填区域直接顶稳定机理及控制技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
ZHANG Zizheng. Investigation on stability mechanism and control techniques of immediate roof above backfill area in gob-side entry retaining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [75] 曹树刚, 王帅, 范映冲, 等. 模糊综合评判在西南矿区沿空留巷适应性评价中的应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(3): 431–436.
CAO Shugang, WANG Shuai, FAN Yingchong, et al. The application of fuzzy synthesis assessment method to adaptability of gob-side entry retaining in southwest[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(3): 431–436.
- [76] 赵勇强, 何富连, 谢福星, 等. 沿空留巷围岩稳定等级综合评判及返修控制技术研究[J]. 矿业科学学报, 2017, 2(6): 550–558.
ZHAO Yongqiang, HE Fulian, XIE Fuxing, et al. Study on comprehensive evaluation of surrounding rock stability grade and repair control technology of gob-side entry retaining[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, 2(6): 550–558.

- [77] TAO Zhigang, ZHENG Xiaohui, ZHU Chun, et al. Framework and application of a big data monitoring system for mining with a pillar-free self-forming roadway[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9: 2111.
- [78] 姜晓宇, 史洪恺, 张国恩, 等. 柔模沿空留巷矿压智能动态监测系统[J]. *中国煤炭*, 2022, 48(Z1): 38-42.
JIANG Xiaoyu, SHI Hongkai, ZHANG Guoen, et al. Design of intelligent dynamic monitoring system for ground pressure in gob-side entry retaining with flexible formwork[J]. *China Coal*, 2022, 48(Z1): 38-42.
- [79] YANG Hongyun, CAO Shugang, WANG Shouquan, et al. Adaptation assessment of gob-side entry retaining based on geological factors[J]. *Engineering Geology*, 2016, 209: 143-151.
- [80] 杨俊彩, 王文, 张广杰. 柔模砌墙沿空留巷围岩变形规律及控制技术[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(S1): 89-99.
YANG Juncai, WANG Wen, ZHANG Guangjie. Study on surrounding rock deformation law and control technology of flexible formwork concrete[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(S1): 89-99.
- [81] 李胜, 李军文, 范超军, 等. 综放沿空留巷顶板下沉及其影响因素研究[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(1): 44-48.
LI Sheng, LI Junwen, FAN Chaojun, et al. Roof subsidence and its influential factors on the gob-side entry retaining in fully mechanized top-coal caving face[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(1): 44-48.
- [82] 胡黎明, 张耀辉, 熊祖强. 成庄矿 4311 综放工作面沿空留巷技术[J]. *煤矿安全*, 2015, 46(9): 144-147.
HU Liming, ZHANG Yaohui, XIONG Zuqiang. Gob-side entry retaining technology of 4311 fully-mechanized caving face in Chengzhuang coal mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2015, 46(9): 144-147.
- [83] 李胜, 范超军, 罗明坤, 等. 综放沿空留巷底鼓变形及其控制研究[J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(7): 116-122.
LI Sheng, FAN Chaojun, LUO Mingkun, et al. Study on floor heave of gob-side entry retaining in fully-mechanized top-coal caving face and its control[J]. *China Safety Science Journal*, 2015, 25(7): 116-122.
- [84] 华心祝, 杨明, 刘钦节, 等. 深井沿空留巷底鼓演化机理模型试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(1): 1-9.
HUA Xinzhu, YANG Ming, LIU Qinjie, et al. Model test on evolution mechanism of floor heave in gob-side retaining entry of deep mine[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2018, 35(1): 1-9.
- [85] 杨明, 华心祝. 我国沿空留巷底鼓研究现状及展望[J]. *煤矿安全*, 2015, 46(12): 214-217.
YANG Ming, HUA Xinzhu. Development orientation and status of floor heave for gob-side entry retaining in China[J]. *Safety in Coal Mines*, 2015, 46(12): 214-217.
- [86] 李西凡, 熊祖强, 张耀辉, 等. 沿空留巷高水充填材料改性试验及工程应用[J]. *重庆大学学报*, 2020, 43(4): 94-106.
LI Xifan, XIONG Zuqiang, ZHANG Yaohui, et al. Modification test and engineering application of high-water filling material in gob-side entry retaining[J]. *Journal of Chongqing University*, 2020, 43(4): 94-106.
- [87] 李西凡, 熊祖强, 王鹏. 高水巷旁充填材料力学性能改进试验研究[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(5): 95-100.
LI Xifan, XIONG Zuqiang, WANG Peng. Experimental study on improvement of mechanical properties of high-water filling materials in gob-side entry retaining[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(5): 95-100.
- [88] 张钊, 刘长武, 王一冰, 等. 改性高水材料抗压、抗剪强度特征及对比分析[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(4): 552-560.
ZHANG Zhao, LIU Changwu, WANG Yibing, et al. Characteristics and comparative analysis of compressive and shear strengths of modified high-water materials[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(4): 552-560.
- [89] 时松, 刘长武, 吴海宽, 等. 粉煤灰-电石渣双掺改性高水充填材料物理力学性能研究[J]. *材料导报*, 2021, 35(7): 7027-7032.
SHI Song, LIU Changwu, WU Haikuan, et al. Study on physical and mechanical properties of modified high-water filling material with fly ash and calcium carbide slag[J]. *Materials Review*, 2021, 35(7): 7027-7032.