

高峰,石蒙,汪占领,等.浅埋深特厚煤层小煤柱沿空掘巷强力支护技术研究[J].矿业安全与环保,2019,46(6):72-76.
文章编号:1008-4495(2019)06-0072-05

浅埋深特厚煤层小煤柱沿空掘巷强力支护技术研究

高峰¹,石蒙¹,汪占领¹,张腾²

(1.天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013;2.榆林市千树塔矿业投资有限公司,陕西 榆林 719000)

摘要:根据千树塔煤矿浅埋深特厚煤层地质条件,采用数值模拟并结合工程类比的方法,分析确定该煤矿沿空掘巷护巷煤柱宽度为8 m。提出了千树塔煤矿小煤柱沿空掘巷护巷的基本支护思路:保证围岩整体有足够的支护强度和刚度;薄弱部位进行重点控制;遵循控制效果与经济成本的合理平衡原则。提出了千树塔煤矿小煤柱沿空掘巷护巷高预应力强力支护技术方案并进行了现场实践,结果表明:运输巷道掘进期间围岩整体变形量在100 mm以内;工作面回采期间围岩最大变形部位为煤柱侧帮,最大位移量约为295 mm。实现了巷道掘进和工作面回采期间运输巷围岩的稳定与安全。

关键词:浅埋深;特厚煤层;小煤柱;沿空掘巷;支护技术;数值模拟;工程类比

中图分类号:TD353 **文献标志码:**A

Study on Supporting Technology of Gob-side Roadway with Small Coal Pillar at Shallow Buried Depth Extra Thick Coal Seam

GAO Feng¹, SHI Meng¹, WANG Zhanling¹, ZHANG Teng²

(1. Coal Mining & Designing Department, Tiandi Science Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China;

2. Yulin Qianshuta Mining Investment Co., Ltd., Yulin 719000, China)

Abstract: According to the geological conditions of the shallow buried depth extra thick coal seam in Qianshuta Coal Mine, numerical simulation and engineering analogy method were used to determine that the coal pillar size of gob-side roadway was 8 m. The basic supporting idea of the small coal pillar of gob-side roadway in Qianshuta Coal Mine was proposed; the whole surrounding rock should be guaranteed to have sufficient support strength and rigidity; the weak parts need focus control measures; following the principle that control effect and economic cost should be reasonably balanced. The technical scheme of high prestress and strong support for small coal pillars in gob-side roadway of Qianshuta Coal Mine was put forward and the field practice was carried out. The results show that the total deformation of surrounding rock during roadway excavation is within 100 mm; the maximum deformation of surrounding rock is lateral wall of coal pillar and the maximum displacement is about 295 mm during stoping, the stability and safety during roadway excavation and mining are realized

Keywords: shallow buried depth; ultra-thick coal seam; small coal pillar; gob-side roadway; supporting technology; numerical simulation; engineering analogy

近年来,随着人们对矿压规律的逐步深入认识,以及巷道支护技术的不断发展,越来越多的煤矿在回采巷道中应用小煤柱沿空掘巷技术。该技术可以减小原有煤柱尺寸,节约煤炭资源,创造更大的经济效益^[1-2]。但是煤柱尺寸缩小后,会引起一些巷道维护的问题,围岩变形量加大,可能出现较严重的围

岩破坏,如控制不当则会影响工作面正常生产^[3-5]。因此,针对小煤柱沿空掘巷方式,应根据煤矿具体生产地质条件,研究并采取合理的巷道支护技术,充分保障巷道围岩在掘进和回采期间的稳定性。

针对小煤柱沿空掘巷围岩控制技术,国内外学者进行过深入研究,取得了较为丰富的研究成果。许兴亮等^[6]提出了煤柱中性面极限承载区的概念,通过研究发现提高锚杆支护强度可有效增强煤柱强度;赵国贞等^[7]通过研究得出采用煤柱分阶段注浆加固的方法,可提高煤柱承载能力;陈才贤等^[8]分析了留窄煤柱沿空掘巷在突出煤层中的适用性,现场

收稿日期:2019-02-28;2019-10-25 修订

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFC0804305-4)

作者简介:高峰(1977—),男,山东邹城人,硕士,高级工程师,主要从事煤矿生产管理工作。E-mail:77532316@qq.com。

应用窄煤柱后降低了煤巷掘进过程中的突出危险性;陈昌云等^[9]从分析小煤柱沿空掘巷特殊应力环境和围岩力学结构入手,强调应立足于高强预应力锚杆(索)的支护路线改善岩体自身的力学性能,从而控制围岩失稳变形;王文新等^[10]提出高预应力锚杆(索)配合注浆的围岩变形联合控制方案,并在枣泉煤矿6 m小煤柱巷道成功应用。

综合前人的研究成果来看,小煤柱沿空掘巷围岩控制技术的主要核心在于提高支护体系强度,以提高巷道围岩尤其是煤柱的承载能力^[11-15]。对于榆林地区浅埋深条件下厚煤层沿空掘巷,在巷道围岩自身条件较好的情况下,研究采用何种支护技术,既能提供足够的支护刚度保证围岩的稳定性,又能提高掘进效率和经济适用性,具有重要的现实意义。

1 工程概况

榆林千树塔煤矿3-1#煤层厚度为9.75~11.21 m,煤层埋深约为250 m,平均抗压强度约为25 MPa,节理裂隙不发育,完整性较好。直接顶以粉砂质泥岩为主,厚度为0.59~15.25 m,平均厚度为3.40 m;基本顶岩性以细砂岩为主,厚度为9.23~38.09 m,平均厚度为22.66 m;直接底以泥岩为主,厚度为1.27~3.15 m,平均厚度为1.95 m。

该矿原区段煤柱宽度为18.5 m,此煤柱尺寸下,服务周期内回采巷道变形破坏不明显。为了充分回收煤炭资源,提高经济效益,采用小煤柱沿空掘巷技术,在11301工作面运输巷进行初步试验。

11301工作面运输巷邻近11300工作面采空区,11300工作面已回采结束约1 a时间,运输巷道与采空区之间净煤柱计划在原设计方案18.5 m基础上进一步优化。运输巷道为全煤巷,沿煤层底板掘进,顶板煤层厚度为6.70 m左右,运输巷道设计长度为1 600 m左右。

2 沿空掘巷煤柱尺寸确定

合理煤柱尺寸设计方法主要有理论计算法、数值模拟法和工程类比法等。笔者采用数值模拟并结合工程类比的方法,对千树塔煤矿沿空掘巷条件下的煤柱尺寸进行优化。

2.1 数值模拟法

采用有限差分软件FLAC^{3D}建立数值模拟模型,主要模拟沿空掘巷小煤柱宽度分别为6、8、10、12 m条件下,巷道围岩及煤柱内部应力、位移和塑性破坏区分布情况,通过这几项指标得出合理煤柱尺寸。

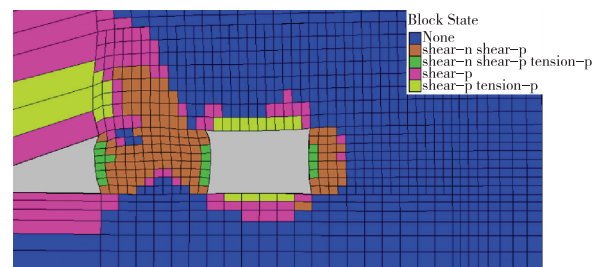
根据千树塔煤矿11301工作面和运输巷实际地质条件建立模型,共划分185 341个单元和167 457个节点,模型边界条件为四周绞支,底部固支,上部施加垂直应力,采用莫尔-库仑本构模型。岩层力学参数如表1所示。

表1 岩层力学参数

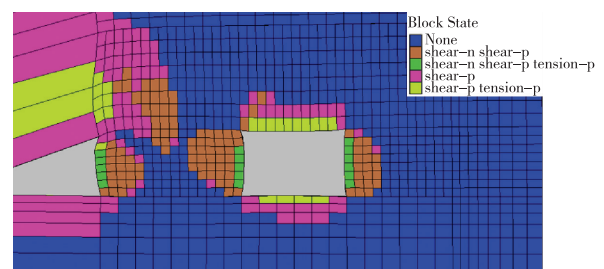
岩层类别	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积 模量/ GPa	切变 模量/ GPa	黏聚 力/ MPa	内摩 擦角/ ($^{\circ}$)	抗拉 强度/ MPa
顶板细砂岩	2 670	8.62	5.43	2.92	35	1.74
顶板粉砂质泥岩	2 450	5.53	3.25	2.34	32	1.21
煤层	1 420	2.45	1.26	1.23	27	1.06
底板泥岩	2 350	5.31	3.16	2.27	32	1.27

模拟11301工作面运输巷断面宽为6.00 m,高为3.85 m,采用锚杆(索)支护,模拟支护参数按照原巷道支护设计,锚杆间排距为900 mm×900 mm,顶板锚索每排为2根,排距为1 800 mm。

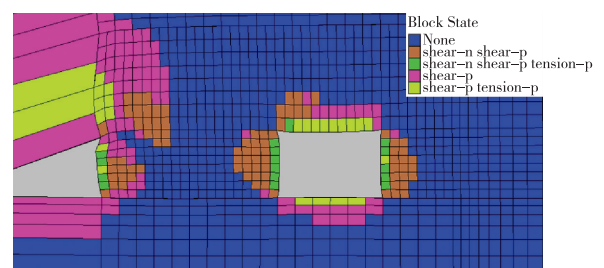
不同煤柱宽度下煤柱内塑性区分布模拟结果如图1所示。



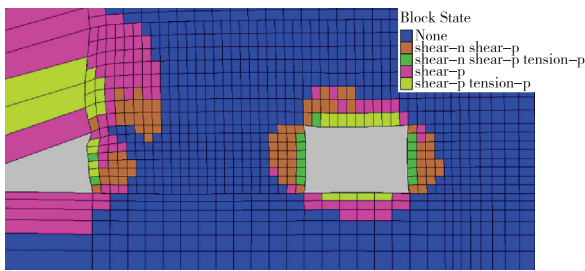
(a) 煤柱宽度6 m



(b) 煤柱宽度8 m



(c) 煤柱宽度10 m

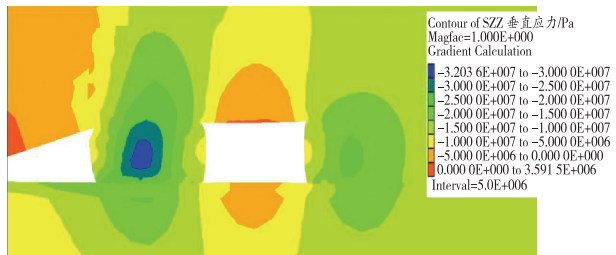


(d) 煤柱宽度 12 m

图1 不同煤柱宽度下煤柱内塑性区分布情况

由图1可知,当煤柱宽度为6 m时,煤柱内塑性区相互贯通,整个煤柱基本都处于塑性状态;当煤柱宽度为8 m以上时,煤柱内部存在一定的弹性区,弹性区完整性较好,没有发生严重破坏。

不同煤柱宽度下煤柱内垂直应力分布模拟结果如图2所示。



(a) 煤柱宽度 6 m



(b) 煤柱宽度 8 m



(c) 煤柱宽度 10 m



(d) 煤柱宽度 12 m

图2 不同煤柱宽度下煤柱内垂直应力分布情况

由图2可知,当煤柱宽度为6、8、10、12 m时,煤柱内最大垂直应力分别为32.04、29.23、28.01、27.14 MPa;当煤柱宽度为8 m以上时,煤柱内垂直应力集中程度有了明显降低,应力分布更加均匀,可避免应力过度集中,不至于使煤柱出现冲击破坏风险。

不同煤柱宽度下沿空掘巷围岩表面位移模拟结果如图3所示。

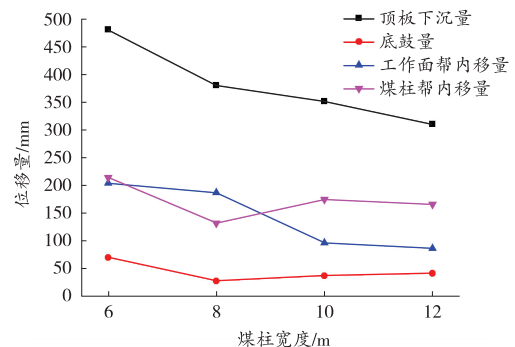


图3 不同煤柱宽度下围岩表面位移量

分析图3可知,随着煤柱宽度增加,巷道围岩整体位移量都呈现逐渐降低的趋势;8 m宽煤柱相对于6 m宽煤柱,巷道位移量明显减小;8、10、12 m煤柱宽度下巷道位移量差距相对较小。

综合以上数值模拟结果可知,当煤柱宽度为8 m以上时,小煤柱内弹性区范围较大,承载能力较强,煤柱内应力集中程度和围岩变形量都较小,煤柱和巷道稳定性较高,是千树塔煤矿11301工作面沿空掘巷较为适宜的煤柱尺寸。

2.2 工程类比法

与千树塔煤矿邻近的柳巷煤矿也主采3-1[#]煤层,煤层平均厚度为11.05 m,煤层结构致密,节理裂隙不发育。煤层埋深一般为240~270 m,平均倾角为0.3°;3-1[#]煤层干燥抗压强度为27.7 MPa,饱和抗压强度为19.2 MPa。直接顶为深灰色厚层状泥岩,基本顶为灰白色块状粗粒长石砂岩,平均厚度为21.00 m。底板以泥岩、粉砂质泥岩为主。采用综采放顶煤开采,采高为3.8 m。

柳巷煤矿井下煤层巷道条件与千树塔煤矿类似,可作为工程类比目标巷道。柳巷煤矿30105回风巷为沿空掘巷,与采空区之间的煤柱宽度为8 m,采用高强度锚杆(索)支护。从巷道支护效果来看,巷道掘进期间围岩变形量较小,回采期间巷道整体变形量不大,稳定性较好^[11],柳巷煤矿沿空掘巷条件下,8 m煤柱宽度是可行的。

通过工程类比结果可知,当煤柱宽度大于8 m时,沿空掘巷巷道围岩应力集中程度、围岩变形量和

塑性区分布范围较小,能够满足保障巷道稳定性的要求。

2.3 煤柱尺寸的确定

数值模拟结果表明,当煤柱宽度大于8 m时,沿空掘巷巷道围岩应力集中程度、围岩变形量和塑性区分布范围较小,满足保障巷道稳定性要求;通过与千树塔煤矿类似条件的柳巷煤矿的煤柱优化实践类比可知,8 m煤柱宽度下沿空掘巷巷道稳定性程度较好。因此,综合数值模拟和工程类比分析结果,将千树塔煤矿沿空掘巷护巷煤柱宽度定为8 m。

3 沿空掘巷围岩控制整体思路

1) 保证围岩整体有足够的支护强度和刚度

沿空掘巷巷道不同于一般的回采巷道,如围岩控制不当,其在掘进期间则会发生大变形或严重破坏,回采期间围岩的控制难度加大。沿空掘巷所需围岩的支护强度和刚度更大,因此需选取支护强度较高的支护材料,并使其有效发挥主动控制作用,大幅提高围岩的支护刚度^[12-16]。

2) 薄弱部位重点控制

根据实践经验,对于小煤柱沿空掘进巷道,往往煤柱侧的变形破坏程度最为显著,且矩形断面巷道煤柱侧直角部位容易出现内挤和网兜现象,是巷道围岩的薄弱部位。因此,需针对煤柱侧直角部位进行加强支护,主要途径为及时施加和有效扩散支护体的高预应力。

3) 遵循控制效果和经济成本的合理平衡

对于小煤柱沿空掘巷,既需要增加巷道支护强度以提高围岩控制效果,也要兼顾支护材料成本和掘进速度。因此,有必要对巷道围岩稳定部位和薄弱部位进行差异化支护设计,尽量用较少的资金投入并通过工艺优化提高巷道支护效率。

4 小煤柱沿空掘巷试验巷道支护方案

以11301工作面运输巷为试验巷道,与11300工作面采空区之间的煤柱宽度为8 m,掘进净宽为6 000 mm,净高为3 850 mm。巷道采用综掘方式掘进,支护形式为高预应力锚杆(索)支护。

锚杆杆体均为500#左旋无纵筋螺纹钢,直径为20 mm,长度为2.4 m,锚杆排距为1 000 mm。顶板锚杆煤柱侧顶角处托板搭配W型钢护板进行强力护表,其余顶板锚杆托板搭配钢筋托梁构成组合构件;煤柱侧帮锚杆托板配W钢护板,工作面侧帮锚杆配钢筋托梁,锚杆预紧力不低于300 N·m。这样的差异化支护方案在保证围岩整体的高支护强度和刚度上,对薄弱部位进行重点支护,稳定部位适当选取成本较低的组合构件,能降低材料成本。

顶板锚索按每排2根的形式布置,锚索体材料为1×7股高强度低松弛预应力钢绞线,直径为17.8 mm,长度为6.3 m,锚索排距为2 000 mm,张拉预紧力不低于180 kN。

锚杆(索)布置及具体支护参数如图4所示。

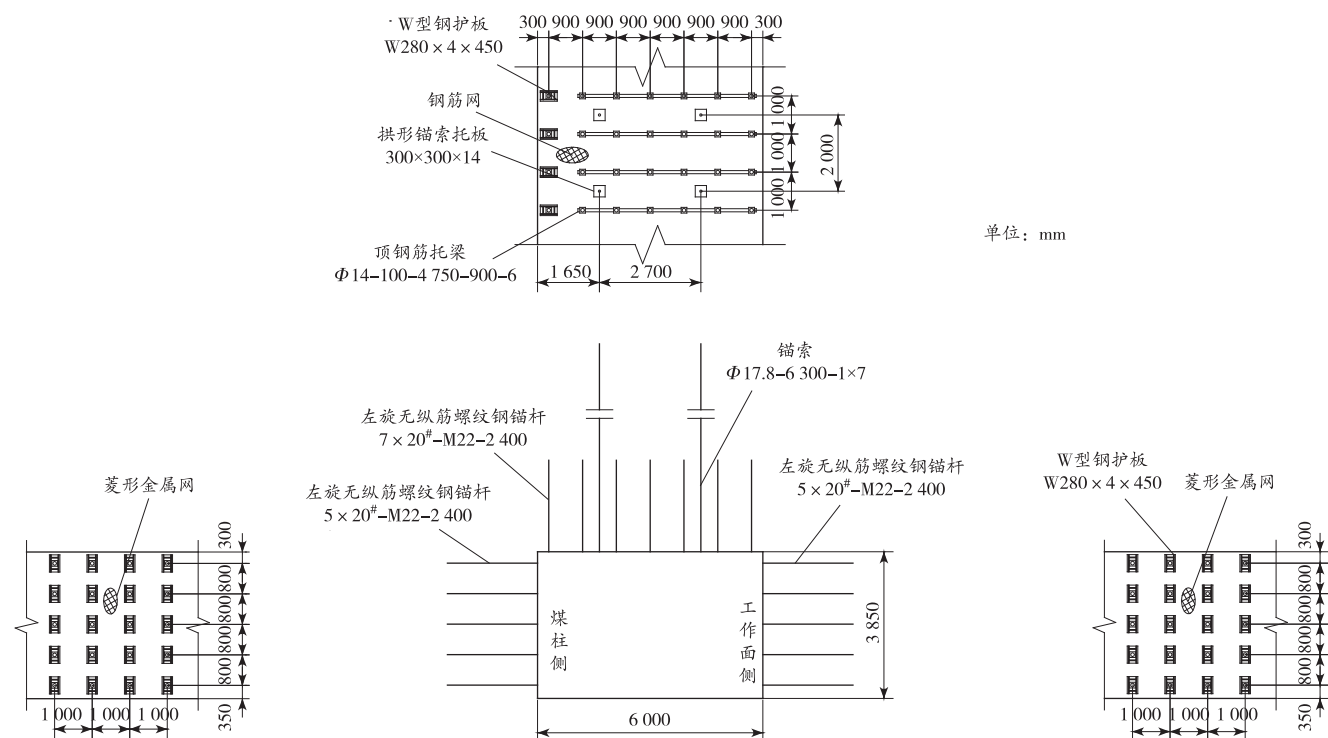
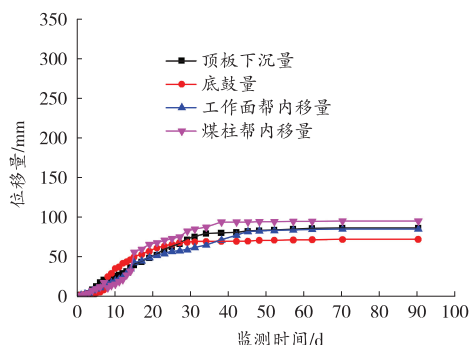


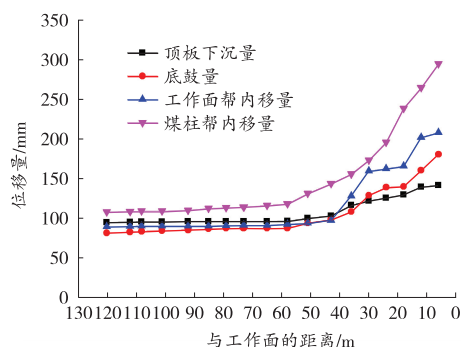
图4 沿空掘进巷道锚杆(索)布置及支护设计图

5 支护效果监测

11301 工作面运输巷采用图 4 所示方案进行支护,在运输巷内分段布置多个位移测点,对巷道掘进期间和工作面回采期间围岩的变形情况进行监测,典型围岩表面位移监测曲线如图 5 所示,该位移测点距离开切眼 500 m。



(a) 巷道掘进期间



(b) 工作面回采期间

图 5 典型围岩表面位移监测曲线

分析图 5 可知,运输巷道掘进后 30 d 内围岩趋于稳定,整体变形量在 100 mm 以内。工作面回采对围岩位移量变化影响较大,距工作面 40 ~ 50 m 位置,围岩位移量开始明显增大,最终变形量最大的部位为煤柱侧帮,最大位移量约为 295 mm;其次为工作面侧帮,而底板和顶板变形量较小。整体来看,运输巷围岩有一定变形,但在允许的变形范围之内,巷道支护效果良好。回采期间运输巷现场支护效果如图 6 所示。



(a) 顶板

(b) 煤柱侧帮

图 6 回采期间运输巷现场支护效果图

6 结论

1) 基于浅埋深厚煤层开采地质条件,采用数值模拟并结合类似条件下已有工程类比的方法,综合确定千树塔煤矿沿空掘巷护巷煤柱的合理宽度为 8 m。

2) 特厚煤层小煤柱沿空掘巷围岩维护难度大,支护强度和刚度要求高,煤柱侧帮是其薄弱部位。提出浅埋深小煤柱沿空掘巷围岩基本支护思路,即保证围岩整体有足够的支护强度和刚度、薄弱部位重点控制和遵循控制效果和经济成本的合理平衡。

3) 通过千树塔煤矿小煤柱沿空掘巷护巷支护技术的探索与现场实践,实现了巷道掘进和回采期间运输巷围岩的稳定与安全,对于类似地质条件下巷道围岩控制有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 张科学. 深部煤层群沿空掘巷护巷煤柱合理宽度的确定[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增刊 1): 28-35.
- [2] 谢生荣, 潘浩. 深部沿空掘巷围岩偏应力演化与控制[J]. 中国矿业, 2018, 27(8): 98-102.
- [3] 王成, 杜泽生, 钱德雨, 等. 孤岛工作面沿空掘巷煤柱宽度及其加固技术研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2012, 31(6): 655-659.
- [4] 范华霄. 大采高综放窄煤柱回采巷道围岩控制技术及其效果分析[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(3): 94-97.
- [5] 邵明明. 整合矿井沿空巷道围岩破坏机制及支护优化[J]. 中国矿业, 2017, 26(7): 105-110.
- [6] 许兴亮, 李俊生, 田素川, 等. 沿空掘巷小煤柱变形分析与中性面稳定性控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(3): 481-485.
- [7] 赵国贞, 马占国, 马继刚, 等. 复杂条件下小煤柱动压巷道变形控制研究[J]. 中国煤炭, 2011, 37(3): 52-56.
- [8] 陈才贤, 苏静, 汤铸, 等. 留窄煤柱沿空掘巷在突出煤层中的应用研究[J]. 矿业安全与环保, 2015, 42(5): 81-83.
- [9] 陈昌云, 郑西贵, 于宪阳, 等. 厚层砂岩顶板小煤柱沿空掘巷围岩变形规律研究[J]. 煤矿开采, 2011, 16(1): 7-10.
- [10] 王文新, 汪占领. 浅埋深小煤柱巷道锚杆支护技术研究[J]. 煤矿开采, 2012, 17(4): 70-72.
- [11] 汪占领, 孟宪志. 特厚煤层工作面沿空掘巷合理煤柱尺寸研究[J]. 中国煤炭, 2017, 43(4): 58-61.
- [12] 石蒙, 鞠文君, 汪占领. 高帮大断面硐室围岩稳定性及支护技术研究[J]. 煤矿开采, 2015, 20(2): 47-49.
- [13] 吴乐, 郭相平. 小煤柱沿空掘巷采动应力研究及支护对策[J]. 煤炭技术, 2018, 37(1): 104-106.

(下转第 83 页)

- 炭科学技术,2010,38(1):92-96.
- [6] 张淑莹,胡友彪,琚棋定.基于水化学特征分析判别朱集矿矿井突水水源[J].矿业安全与环保,2018,45(6):53-56.
- [7] 代革联,薛小渊,牛超.基于水化学特征分析的象山矿井突水水源判别[J].西安科技大学学报,2017,37(2):213-218.
- [8] 秦成,梁庆华,潘磊,等.基于粗糙集理论的矿井突水水源快速识别[J].矿业安全与环保,2014,41(6):81-84.
- [9] 马雷,刘思圆,吴蒙蒙.潘一煤矿地下水化学空间变化特征与水源识别分析[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2018,38(2):28-34.
- [10] 鲁金涛,李夕兵,官凤强,等.基于主成分分析与 Fisher 判别分析法的矿井突水水源识别方法[J].中国安全科学学报,2012,22(7):109-115.
- [11] 邵良杉,李相辰.基于 MIV-PSO-SVM 模型的矿井突水水源识别[J].煤炭科学技术,2018,46(8):189-196.
- [12] 张乐中,曹海东.利用水化学特征识别桑树坪煤矿突水水源[J].煤田地质与勘探,2013,41(4):42-45.
- [13] 冯亚娟,崔宁,王丹.矿井突水水源 Logistic 识别及混合模型[J].辽宁工程技术大学学报,2015,34(11):1228-1233.
- [14] 中华人民共和国煤炭工业部.煤矿水害防治水化学分析方法:MT/T 672—1997[S].北京:煤炭工业出版社,1998.
- [15] 杨志斌,边凯.基于特定水化学特征的矿井涌水量构成比例分析[J].西安科技大学学报,2015,35(6):727-731.
- [16] 邵良杉,李永利,赵琳琳.露天采矿爆破振动对民房破坏的 SVM 预测模型[J].中国安全科学学报,2013,23(9):26-32.
- [17] 温廷新,张波,邵良杉.矿井突水水源识别预测研究——以新庄孜矿为例[J].中国安全科学学报,2014,24(2):100-106.
- (责任编辑:逢锦伦)

=====

(上接第 76 页)

- [14] 代进,王春耀,李逢祥.大采高小煤柱沿空巷道大变形机理与支护技术研究[J].煤炭工程,2018,50(3):37-41.
- [15] 张鹏鹏,郝兵元,王凯,等.综放开采沿空掘巷小煤柱宽度留设及支护技术研究[J].煤炭科学技术,2018,46(5):40-46.
- [16] 诸葛长华.深井小煤柱沿空掘巷整体耦合让压支护实践研究[J].矿业安全与环保,2017,44(3):58-61.
- (责任编辑:逢锦伦)