

孙晓冬,黄志增,郑建伟,等.复采工作面无煤柱开采技术[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(3):1-6. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.03.001

Sun X D, Huang Z Z, Zhen J W, et al. Technology of Non-pillar Mining with Concrete Partition in Remining Longwall Panel[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 35(3): 1-6. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.03.001

复采工作面无煤柱开采技术

孙晓冬^{1,2,3*}, 黄志增¹, 郑建伟¹, 焦宁⁴

(1.天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013;2.中国科学院 地质与地球物理研究所,北京 100029;
3.中国科学院大学,北京 100049;4.山西高平科兴南阳煤业有限公司,山西 晋城 048400)

摘要:由于剩余煤层赋存不规则,破碎区较多,复采工作面多存在巷道掘进及支护困难、通风线路漏风系数大、生产系统安全可靠性的问题。基于沿空留巷工艺,本文提出复采工作面浇筑隔墙无煤柱开采技术:沿工作面新掘巷道煤柱侧浇筑800~1 200 mm宽度隔墙,墙体可隔离破碎区和老空区,杜绝通风线路漏风问题;开发的低成本矿粉混凝土浇筑材料,实测终凝强度大于35.4 MPa,使得每米隔墙可提供31 000 kN以上的支护阻力,并具有一定的主动支撑能力;破碎区段巷道临时支护采用“小间距前探梁+迎头支柱”,永久支护采用“工字钢棚+隔墙”支护,显著提高了支护强度和掘进速度;浇筑的隔墙为本工作面创造了较为完整和稳定的生产系统,同时,临近巷道可沿隔墙掘进,实现了无煤柱开采。采用该技术对山西某矿3#煤层复采工作面进行了方案设计,与传统方案相比,具有更高的安全性和可靠性,并可创造可观的经济效益。

关键词:复采工作面;充填材料;混凝土隔墙;沿空掘巷;无煤柱

中图分类号:TD315 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2020)03-0001-06

Technology of Non-pillar Mining with Concrete Partition in Remining Longwall Panel

Sun Xiaodong^{1,2,3}, Huang Zhizeng¹, Zheng Jianwei¹, Jiao Ning⁴

(1. Coal Mining and Design Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China;
2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Shanxi Gaoping Kexing Nanyang Coal Industry Co., Ltd., Jincheng 048400, China)

Abstract: Due to the irregularity of occurrence and plenty of crushing zones in residual seams, re-mining panel had many issues, such as difficult roadway tunneling and supporting, large ventilation line leakage coefficient, low production system safety and reliability. Based on the technology of gob side entry retaining, a new non-pillar technology was proposed for re-mining longwall panel: pouring a 800~1 200 mm width concrete partition wall along the coal pillar side in the newly digging roadway which could isolate the crushing and goaf areas, eliminate the air leakage in ventilation lines. A added low cost waste gangue concrete material was development, its actual final compressive strength was more than 35.4 MPa, which provided a support resistance of greater than 31 000 kN per meter of partition wall and had a certain initiative support capacity. In the crushing section of the roadway, the temporary support system employed the “small spacing horizontally placed anchor beam + single

收稿日期:2019-03-02

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51504135);科技部重点研发项目资助(2017YFC0603002)

*通信作者,E-mail: sunxiaodong@tdkcsj.com

hydraulic prop”, and the permanent support system employed the “I-steel shed + partition wall”, which greatly improved the supporting strength and the tunneling speed. The partition created a more complete and stable production system for the current working panel. Also, the roadway of adjacent panel could be driven along the partition wall, thus, non-pillar mining was realized. A target coal mine in Shanxi deployed this technology to design its re-mining panel mining scheme, compared with previous design, it had higher safety and reliability and created considerable economic benefits.

Keywords: re-mining panel; filling material ;concrete partition; gob-side entry driving; non-pillar

国内很多开采时间较长的矿井,由于技术和赋存条件限制,原有煤层开采回收率低,造成开采区域剩余大量余煤.随着开采技术的进步和部分矿区资源近乎枯竭,复采技术在我国十多个矿区得到了应用,如晋城莒山矿和大桥矿、安徽百善矿、邢台西庞矿、甘肃红会一矿、鹤岗益新矿、福建永春矿、沈阳林盛矿、山东石屯矿、江西东方红矿等.余煤复采可充分挖掘煤炭资源,延长衰老矿井的服务年限,还可以从根本上解决由于残煤自然发火而引发的煤矿安全问题和环境污染问题^[1].

基于已有的复采工作面,国内学者进行了较为丰富的研究.工作面顶板运移及矿压显现规律方面,徐忠和等^[2]研究了不同走向布置方式时的顶板垮落规律;刘畅等^[3-5]通过理论分析和相似模拟研究了工作面过空巷基本顶超前破断压架机理,并建立了该条件下基本顶破断的力学模型;马文强等^[6]认为复采再生顶板的结构具有分带特征,可分为“四带”,即胶结再生带、弱胶结压实带、裂隙带和弯曲下沉带,并推导出支架载荷计算式;郭兵兵等^[7]通过实测,认为复采工作面来压明显,但来压步距较短且压力分布不均匀.巷道支护方面,赵通^[8]和李刚^[9]分别设计了复采工作面巷道临时和永久支护方案;魏胜利^[10]基于三软煤层复采工作面条件,通过实测分析认为仅采用工字钢梯形棚式支护会造成巷道稳定性差、底鼓严重等问题,应加强主动支护.充填开采方面,孙希奎等^[11]分析了膏体充填复采条带残留煤柱的可行性,并根据实际条件设计了充填工艺参数;周保精等^[12]对小窑采空区注浆充填机理、小窑充填区域承载关键层的稳定性进行了系统分析,认为可采用分层注浆充填技术回采特厚煤层小窑采空区;马占国等^[13]对残留煤柱综合机械化固体充填复采采场稳定性进行了研究分析,认为房柱式充填开采不存在直接顶及基本顶周期来压现象,煤柱内部应力受回收顺序影响较小,采场最大下沉值可减少30%~60%.另外,张斌等^[14]分析了浅埋深条件下房柱开采遗留区段煤柱的受力特征及稳定性;屠洪盛等^[15]利用弹塑性力学半平面体理论和刀柱采空区煤岩受力特点,建立了刀柱工作面煤岩体力学模型,并提出了刀柱应力释放措施.

如上所述,已有的研究成果多是学者对传统复采技术的完善和优化,未能有效改变或提高复采生产系统本质不安全、不稳定的特点.复采工作面的安全隐患在于原有煤层多为无序开采,顶板破碎,剩余煤层呈现不规则,老空区水和有害气体积聚.由于频繁过空巷和破碎区,工作面巷道掘进和支护极其困难,通风线路漏风系数大,工作面煤层自燃危险性高,通防工作变得复杂和困难.如何解决复采工作面通风线路漏风问题和提高复采工作面生产系统安全可靠,关系到复采技术的推广应用和这部分资源能否安全回采.

1 无煤柱复采技术方案

我国沿空留巷技术开始于20世纪50年代,初期巷旁支护主要采用矸石垛、密集木支柱等,且仅限于在薄煤层中应用^[16].沿空留巷可实现偏Y或Y型通风,对高瓦斯工作面具有较好的适应性,近十几年来,在我国得到了广泛的推广应用.据统计,60%以上的高瓦斯突出矿井应用过沿空留巷技术,常用的沿空留巷巷旁支护材料包括高水材料和混凝土材料.

为解决原有复采工作面易与老空区导通、通风线路漏风系数大、巷道支护强度低和生产系统安全系数低的问题,基于现有沿空留巷工艺,提出复采工作面浇筑隔墙无煤柱开采技术(技术方案如图1所示):在巷道掘进作业后部,沿煤柱侧浇筑800~1200 mm宽

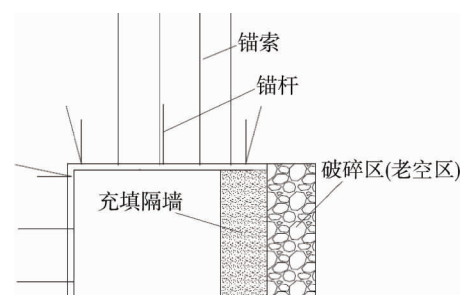


图1 技术方案

度隔墙,墙体可对顶板进行有效支撑,并可隔离破碎区和老空区,杜绝通风线路漏风问题.正常段巷道支护采用高强度锚杆(索)支护,过空巷和破碎段巷道支护采用特殊设计支护.

该方案的优点:(1)浇筑的隔墙极大地降低了通风线路的漏风概率,为复采工作面创造了较为完整的系统.(2)隔墙起到了隔离破碎区和老空区的作用,选择高强度浇筑材料下,每米隔墙可提供 31 000 kN 以上的支护阻力,提高了安全生产水平.(3)实现了无煤柱开采,可节省 10~20 m 的区段煤柱.(4)隔墙为下一工作面的巷道掘进创造了一侧支护条件,提前隔离了采空区,改良了后续工作面复采条件.

2 试验工作面条件

试验矿井位于山西省晋城市,设计生产能力 90 万 t/a,开采 3[#]煤层,拟开采的 3307 工作面煤层厚度 4.7~6.3 m,平均厚度 5.63 m,属镜无烟煤,硬度系数 1~2,煤质较坚硬,无夹矸,煤层倾角平均约 4°.煤层直接顶板为粉砂岩或泥岩,伪顶为炭质泥岩或泥岩,底板为砂质泥岩或黑色泥岩.工作面采用放顶煤采法,设计采高 2.8 m,放煤高度 2.83 m;工作面设计长度 150 m,一面两巷布置,即运输顺槽和回风顺槽,均沿底板掘进.运输顺槽长度为 530 m,回风顺槽长 510 m,可推进长度 490 m.试验工作面所处区域为小窑破坏区,为旧时巷柱式采煤破坏,且原有小窑开采未保存任何地质及开采资料.图 2 为工作面煤层柱状图.

名称	厚度/m	岩性描述	柱状
老顶	7.59	砂岩或石灰岩	
直接顶	6~12	粉砂岩或泥岩	
伪顶	0.3~0.5	粉砂岩或泥岩	
煤层	5.63	3 [#] 煤	
底板	1.4	炭质泥岩或泥岩	

图 2 煤层柱状图

3 浇筑隔墙合理参数

3.1 充填体强度确定

综放工作面留巷顶板条件复杂,使得综放工作面沿空留巷较薄煤层留巷难度更大.如图 3 所示,综放工作面沿空留巷是在采空侧浇筑充填体,以维护顶煤和直接顶的整体性,充填体的强度不宜过低,否则巷道变形量大,充填体易破坏失稳.在保证巷道稳定的基础上,充填体应具有一定的强度,可将顶煤、直接顶在外侧切断,减小直接顶和老顶之间的离层,使上覆老顶的斜跨结构向采空区侧移动;同时,充填体应具有一定的宽度,可使采空区外侧顶板破碎变形不影响巷内顶板.

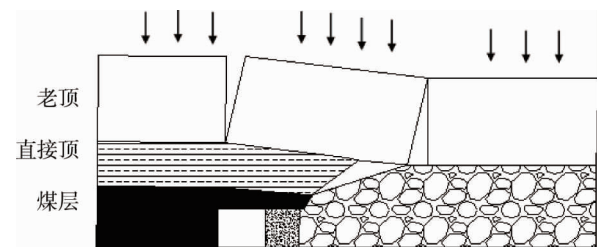


图 3 综放面沿空留巷顶板结构

为了研究充填体强度对围岩稳定性的影响,采用 FLAC^{3D} 模拟软件,根据 3[#]煤层条件建立数值分析模型,对不同强度充填体材料下的巷道稳定性进行了模拟.表 1 为模型采用的岩层物理力学参数.模拟的充填体单轴抗压强度分别为 5,15,25 MPa.

表 1 岩层物理力学参数

岩层	密度/(kg/m ³)	泊松比	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
中粒砂岩	2 740	0.27	18.50	14.10	40.10
粉砂岩	2 596	0.33	4.10	10.50	38.10
3 [#] 煤层	1 451	0.28	11.43	3.76	36.70
粗粉砂岩	2 725	0.23	15.55	13.20	62.80

图 4 为不同充填体单轴抗压强度下的围岩垂直应力分布图.

结果分析:如图 4a 所示,当强度为 5 MPa 时,充填体承载能力较弱,表现为整个墙体处于应力降低区,且墙体压缩变形量大,实体煤侧应力集中现象明显.如图 4b 所示,当强度增大至 15 MPa,顶板应力分布向

采空区侧稍偏移,实体煤侧应力集中现象得到改善,但墙体变形量仍然较大,留巷墙体安全系数较低.如图4c所示,当强度增大至25 MPa,围岩应力分布明显改善,墙体变形量维持在较低水平;此时,充填墙体内出现较高的应力集中,位于采空区侧,说明此时的墙体具有较强的支撑能力,也说明此条件下的沿空留巷墙体易出现外侧劈裂破坏.

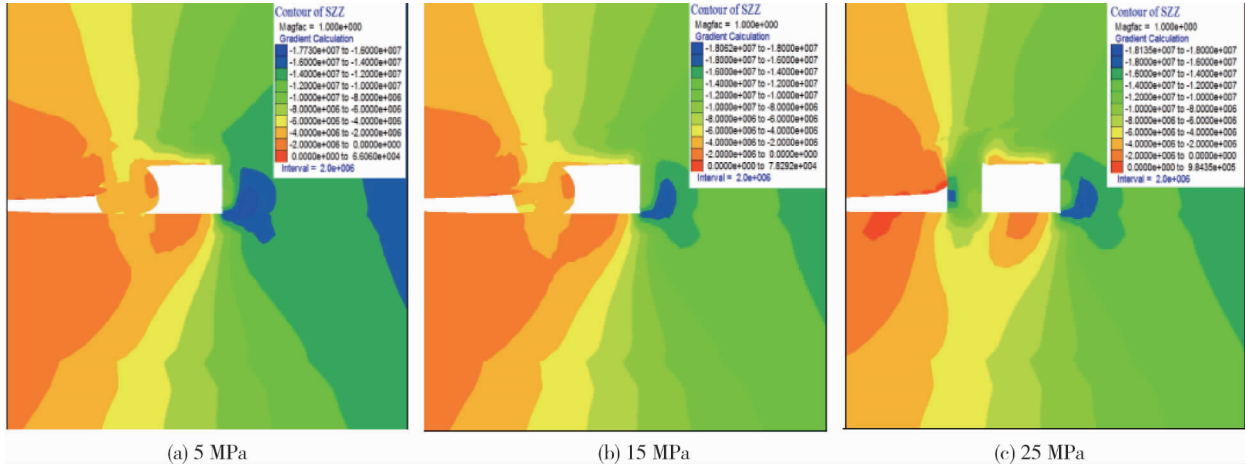


图4 垂直应力分布

图5为不同充填体强度下的围岩变形量.随着墙体承载能力的增加,围岩应力分布得到改善,留巷巷道围岩变形量减小.相较于5 MPa时的围岩变形,25 MPa时围岩顶板下沉量、底臃量、留巷侧墙体缩量及煤柱侧煤体内缩量分别减小了37.5%,37.5%,57.5%和54.5%.当强度增大至25 MPa时,充填体具有明显的切顶作用,如图6所示.采空区顶板冒落、断裂后,巷道采空区侧顶板依靠充填体的支撑保持其稳定,顶板能被充填体具有的初撑作用及时切断冒落,应力可向采空区转移,这在很大程度上减小了老顶下部与充填体上部之间岩层所受的力,从而保证了顶煤和顶板的稳定.根据模拟结果,工作面充填体的强度应达到25 MPa.

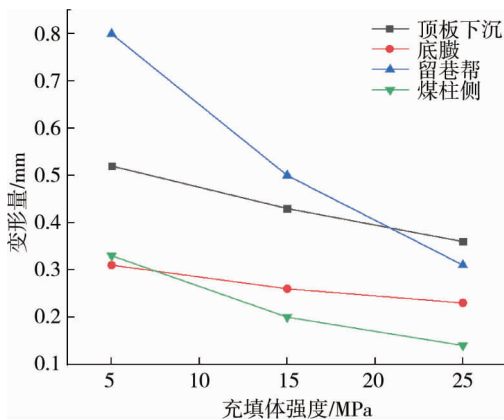


图5 围岩变形量

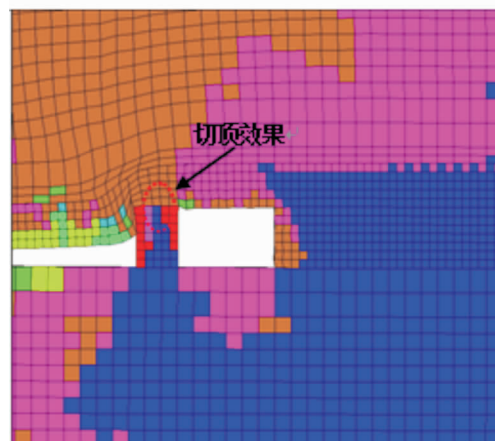


图6 充填体切顶效果

3.2 浇筑充填材料

近十几年来,国内应用较多的浇筑充填材料包括高水材料和建筑混凝土材料.高水材料优势为搅拌及泵送设备成本低,操作简单,不存在堵管问题,但材料成本较高,终凝强度低,实测7 d终凝强度7.35 MPa.建筑混凝土材料配比成熟,材料容易采购,强度大,采用C30泵注混凝土,实测28 d终凝强度35 MPa,缺点在于充填浇筑设备投资高,工艺复杂,易于堵管且处理困难,材料成本较高.经实际测算,潞安矿区高水速凝材料和混凝土材料沿空留巷的单米直接材料成本分别为5 560元和4 520元,综合成本在9 000元以上.

高水速凝材料强度不满足要求,而混凝土材料优点、缺点均较为明显,需要改良,所以开发经济可靠的浇筑充填材料尤为必要.该地区矿井、选煤厂较多,矸石、粉煤灰等废弃材料较多,且价格较低,为此基于泵送混凝土材料配比,添加了成本低廉的矸石粉和粉煤灰,配合外加剂,开发出了成本较低的矿粉混凝土充填浇筑材料.传统混凝土材料由按照一定比例配比的石子、水泥和砂子组成,矿粉混凝土由石子、矸石粉、水泥和粉煤灰配比构成,其中矸石粉和粉煤灰的重量占比大于30%,不含砂子.砂子干后体积会发生收缩,由于不含有砂子,矿粉混凝土的接顶能力增加,且改良了泵送效果.

按照设计配比,配合专用外加剂,制作了长宽高为150 mm×150 mm×150 mm的试样,并进行了井下同等条件养护,分别测试了不同养护龄期的单轴抗压强度,如图7所示.

测试结果显示,矿粉混凝土3 d平均强度为17.2 MPa,28 d平均强度为35.4 MPa.借鉴采用Bieniawski提出的煤柱强度计算公式来计算充填体的整体强度,如式(1)所示.

$$S_p = \sigma_m \left(0.64 + 0.36 \frac{w}{h} \right). \quad (1)$$

σ_m 取值35.4 MPa,充填体宽度 w 设计为1.2 m,井下实测部分区段巷道接顶高度最大为4.0 m,代入式(1)可得充填体隔墙整体强度 S_p 为26.5 MPa,每米隔墙提供的支护阻力大于31 000 kN.

4 破碎区巷道支护方案

复采工作面掘进是复采核心技术之一,也是面临的主要难题.原有刀柱工作面巷道布置层位不稳定,且巷道为木棚支护,年代久远,已全部垮落,巷道冒落至顶板以上,严重制约了复采工作面巷道掘进速度和安全水平.原有办法一般采用绕道施工、木质密棚施工或对破碎区注浆加固施工法.3307工作面破碎区段巷道临时支护设计采用“小间距前探梁+迎头支柱”,永久支护设计采用“工字钢棚+隔墙支护”,增加了支护强度,提高了掘进速度.

巷道掘进破碎冒落区过程中先利用锚杆钻机沿巷道顶超前施工钻孔,钻孔间距不大于500 mm,用 $\varphi 28$ 螺纹钢做超前支护穿杆,钻进穿入掘进工作面前方直至实体煤内,防止掘进过程中顶板冒落.在工作面迎头打有单体液压支柱作为护帮支柱,并挂有金属网防止迎头片帮.图8所示为巷道掘进过破碎区时的临时支护方案.

永久支护设计采用“工字钢棚+隔墙支护”,紧邻掘进工作面后方,沿非工作面侧充填浇筑矿粉混凝土隔墙,隔墙与工字钢棚联合形成永久支护方案,沿隔墙内侧架设单体液压支柱作为临时支护,在隔墙初凝期间对顶板进行补充支护.过空巷和冒高区时,空顶或空帮部分用不燃物充满填实.图9所示为巷道掘进过破碎区时的永久支护方案.混凝土隔墙不但可以提供较大的支撑能力,并且可以密闭隔离破碎采空区,杜绝巷道漏风问题.

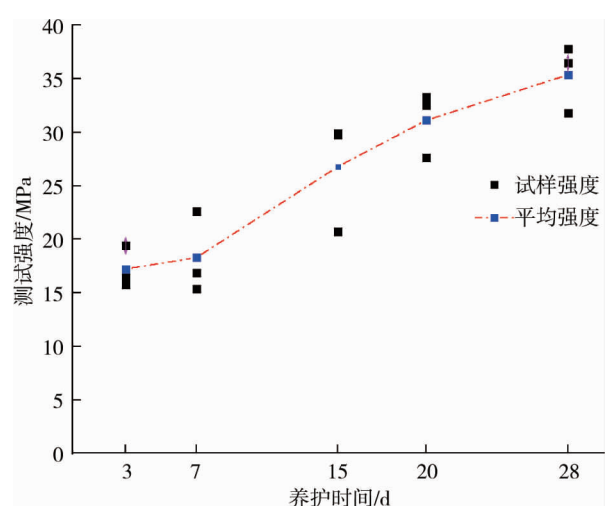


图7 试样单轴抗压强度

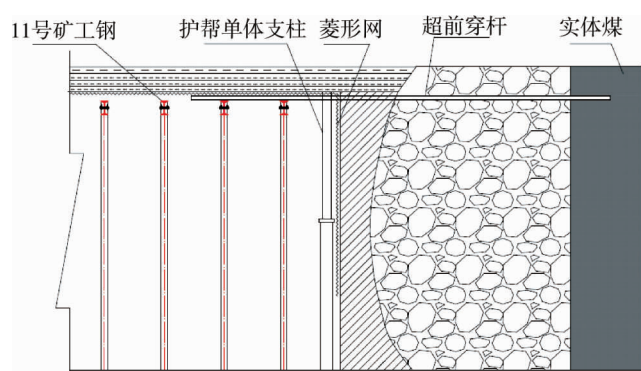


图8 临时支护方案剖面

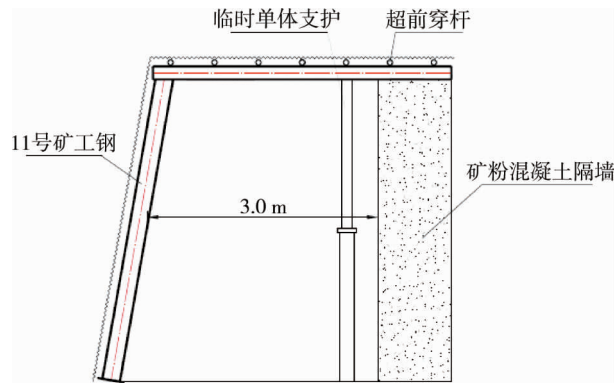


图9 永久支护方案断面

5 结论

采用矿粉混凝土隔墙无煤柱开采技术,实测试验工作面巷道月掘进进尺 210 m,下一工作面回风顺槽沿本工作面隔墙掘进,可实现无煤柱开采,节省 15 m 以上的煤柱,经济和安全效益明显。

1) 基于沿空留巷工艺,本文提出了复采工作面浇筑隔墙无煤柱开采技术,墙体可隔离破碎区和老空区,杜绝通风线路漏风问题,较原有复采技术具有更高的安全性和可靠性。

2) 开发的矿粉混凝土材料,由石子、矸石粉、水泥和粉煤灰配比构成,其中矸石粉和粉煤灰的重量占比大于 30%,降低了材料成本,并可减少矿井矸石排放量,实测 28 d 终凝强度 35.4 MPa,隔墙整体强度 26.5 MPa。

3) 破碎区段巷道临时支护设计采用“小间距前探梁+迎头支柱”,永久支护设计采用“工字钢棚+隔墙支护”,增加了支护强度,每米隔墙可提供 31 000 kN 以上的支护阻力,并具有良好的接顶能力。

参考文献:

- [1] 王平虎, 陕建龙. 晋城矿区残留煤复采工作面顶板及煤柱稳定性研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(8): 37-41.
- [2] 徐忠和, 赵阳升, 高红波, 等. 旧采残煤综合机械化长壁复采的几个问题[J]. 煤炭学报, 2015, 40(s1): 33-39.
- [3] 刘畅, 杨增强, 弓培林, 等. 工作面过空巷基本顶超前破断压架机理及控制技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 1932-1940.
- [4] 王开, 弓培林, 张小强, 等. 复采工作面过冒顶区顶板断裂特征及控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2080-2088.
- [5] 刘畅, 弓培林, 王开, 等. 复采工作面过空巷顶板稳定性[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 314-322.
- [6] 马文强, 王同旭, 马紫阳. 复采采场再生顶板结构及支架载荷确定[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1892-1900.
- [7] 郭兵兵, 陈国祥, 关鹏云. “三软”不稳定厚煤层复采工作面矿压显现特征研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(1): 85-87.
- [8] 赵通, 翟英达. 残采区破碎软岩巷道支护研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(8): 85-87.
- [9] 李刚. 复采综掘面临时支护系统的应用与研究[J]. 煤矿机械, 2015, 36(3): 195-198.
- [10] 魏胜利. 三软煤层复采工作面无煤柱沿空掘巷支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(12): 33-35.
- [11] 孙希奎, 赵庆民, 施现院. 条带残留煤柱膏体充填复采技术研究与应[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(4): 650-654.
- [12] 周保精, 徐金海, 吴锐, 等. 特厚煤层小窑采空区充填复采技术研究与应[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 317-321.
- [13] 马占国, 范金泉, 孙凯, 等. 残留煤柱综合机械化固体充填复采采场稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(4): 499-504.
- [14] 张斌, 王存文, 谭洪山, 等. 浅埋深煤层长壁式复采区段煤柱稳定性研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 25-27.
- [15] 屠洪盛, 屠世浩, 袁永, 等. 厚煤层刀柱采空区集中应力影响范围理论判据研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(8): 1345-1351.
- [16] 华心祝. 我国沿空留巷支护技术发展现状及改进建议[J]. 煤炭科学技术, 2006(12): 78-81.