

深部强采动大巷硐室修护补强技术

——以万家庄煤矿为例

申志鑫

(山西煤炭进出口集团蒲县万家庄煤业有限公司, 山西 临汾 041204)

摘要: 以万家庄煤业2#煤层深部强采动一号变电所硐室为工程背景,探究深部大巷硐室强采动破坏机理及强采动围岩稳定性控制原理,分析深部强采动大巷硐室修护补强方案,并结合现场工业性试验优化相关支护技术参数。研究表明:2#煤层顶板为复合软岩顶底板,极易受到采场周围的岩层运动、应力集中和应力重新分布的影响,导致一号变电所硐室围岩矿压显现剧烈;煤壁前方支承压力幅值随着远离工作面呈现出近场快速增加、远场缓慢降低的趋势;硐室受到的采动影响较为剧烈,在两翼工作面回采期间,围岩最大变形量为155.8 mm,支护效果显著改善,有力地保障了工作面安全高效回采。

关键词: 强烈采动影响; 深部复杂硐室; 修护补强技术; 工业性试验

中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)11-0218-06

煤炭开采的深部环境往往面临诸多挑战,巷道围岩的破碎、围岩大变形及其破坏机理是困扰深部煤炭开采的经典难题^[1-2]。深部强采动巷道围岩稳定性控制技术是以深部开采巷道围岩大变形破坏机理作为理论基础。在深部巷道煤层中掘进时必然引起巷道周围应力的重新分布及应力集中,导致巷道围岩的变形破坏^[3]。

为了研究巷道围岩应力分布情况,国内外学者都采用弹塑性理论作为基础,对深部强采动巷道进行深入研究^[4-12]。在深部巷道围岩强采动影响分析方面,针对围岩破碎化现象、损伤破坏过程以及其破坏形成机理等方面开展了大量的研究,并取得了一系列成果^[13-18]。

本文以万家庄煤业2#煤层一号变电所硐室为工程背景,围绕深部强采动大巷围岩破坏机理,结合2#煤层的综合地质特征,形成深部强采动大巷“先释后控”的修护补强技术,并成功应用于工程实践。

1 工程地质概况

万家庄煤业3条大巷,东西方向自南向北布置回风大巷、轨道大巷和运输大巷,3条巷道均沿2#煤层顶板布置,平均埋深约为528.5 m。大巷最低点设置采区变电所、水泵房及水仓,在轨道大

巷与回风大巷保护煤柱中间采用“Z”字形布置区变电所,硐室宽5.0 m,高3.0 m,具体布置方式如图1所示。

依据图2大巷附近钻孔柱状图所示,2#煤层厚度为0.59~2.84 m,平均为1.46 m,含0~1层夹矸,结构简单。煤层厚度由井田西南向东北、东南逐渐变薄。煤层顶底板10 m范围内无稳定的关键承载层,主要由泥岩、砂质泥岩、细砂岩、煤等软弱薄层所构成的复合软岩顶板。顶板多为泥岩,局部为砂质泥岩、细砂岩,由于泥岩结构松软遇水作用易发生软化(经测试软化系数为0.53),从而降低顶板稳定性。底板多为富含植物根化石的泥岩和泥质页岩,这种岩石遇水后膨胀,容易发生底鼓现象。因此,万家庄煤业3条开拓大巷及一号变电所硐室处于典型的复合软岩地层中。

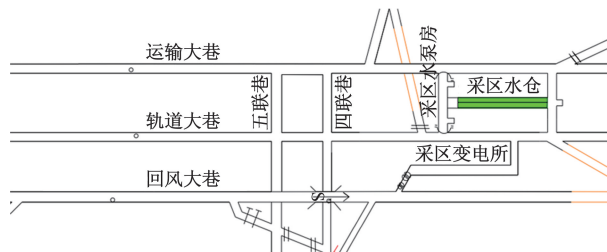


图1 采区变电所硐室布置平面图

收稿日期: 2024-03-18

作者简介: 申志鑫(1989—),男,山西临汾人,工程师,研究方向为矿业生产技术。

岩石特征	地层倾角/(°)	质量指数RQD/%	岩芯长度/m	采取率/%	深度/m	厚度/m	
灰黑色砂质泥岩: 含砂泥质结构, 块状构造		75	1.87	74.80	412.50	2.50	
灰黑色泥岩: 泥质结构, 块状构造		65	3.83	76.60	417.50	5.00	
灰白色细粒砂岩: 成分以石英为主, 含较多泥质, 钙质胶结		75	1.37	91.33	419.00	1.50	
灰色泥岩: 局部为深灰色, 硅质胶结, 交错层理		75	4.13	76.48	424.40	5.40	
煤: 性脆, 质轻, 成分以亮煤为主			0.43	86.00	424.90	0.50	
灰黑色砂质泥岩: 含砂泥质结构, 块状构造	6°	67	3.70	97.40	428.70	3.00	
煤: 成分以亮煤为主, 内生裂隙发育, 易破碎, 质纯 结构为0.20(0.15)1.35			1.55	91.20	430.40	1.70	
深灰色泥岩: 块状, 含植物化石		76	1.31	81.88	432.00	1.60	
煤: 成分以亮煤为主, 少量暗煤			0.45	90.00	432.50	0.50	
深灰色泥岩: 块状构造, 底部含少量炭质		62	3.00	82.00	435.50	3.00	
煤: 黑色, 粉末状			0.18	90.00	435.70	0.20	
深灰色泥岩: 泥质结构, 块状构造		60	3.50	87.50	439.70	4.00	
煤: 性脆, 质轻, 成分以亮煤为主			0.48	96.00	440.20	0.50	
灰黑色泥岩: 泥质结构, 块状构造		70	5.30	77.94	447.00	6.80	
灰色粉砂岩: 含白云母片, 具泥质构造		71	2.73	71.84	450.80	3.80	

图2 复合软岩顶板钻孔柱状图

2 深部强采动大巷硐室变形破坏机理

2.1 深部大巷硐室强采动破坏机理分析

万家庄煤业 2# 煤层达到设计生产能力时,共需布置 2 个综采一次采全高工作面,分别位于南北两翼。目前,一号布置 5 个回采工作面:南翼布置 20102、20104 两个回采工作面;北翼布置 20101、2010 和 20105 这 3 个回采工作面。原设计的开拓大巷保安煤柱线距大巷 30 m。

2# 煤层在开采的过程中必然会引起采场周围的岩层运动、应力集中和应力重新分布,使得回采空间周围的应力分布变得十分复杂,从而对巷道围岩的变形、破坏和维护产生严重的影响。

对于万家庄煤业 3 条大巷及一号变电所硐室而言,采动力源主要是受工作面回采引起的超前采动应力的影响,如图 3 所示。一般来讲,煤层、直接顶以及老顶的强度、厚度和层位结构都显著影响着超前采动应力的分布范围与应力集中程度,超前采动应力的分布与工作面老顶运动状态密切相关。

2.2 深部大巷硐室强采动应力范围分析

为进一步揭示万家庄煤业 3 条开拓大巷采动应

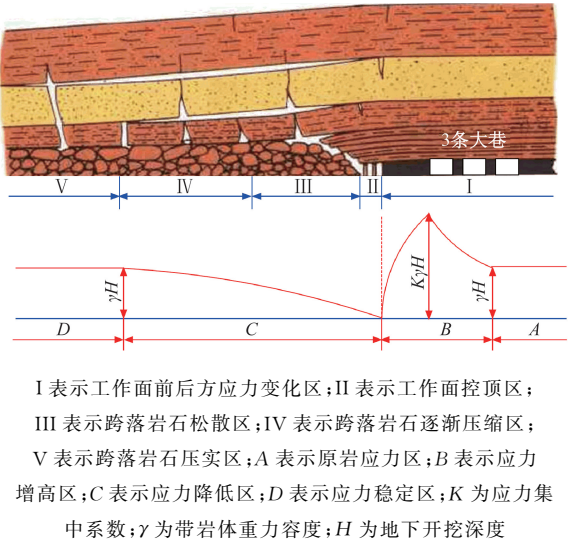


图3 采动应力对大巷的影响情况

力影响程度,结合万家庄煤矿的地质条件以及生产技术现状,利用 3DEC 软件建立南翼 20102 工作面、北翼 20101 工作面回采的三维数值计算模型,如图 4 所示。模型长 629.5 m,高 60 m,厚 1 m,计算模型采用摩尔-库仑(M-C)本构模型。模型上边界

施加大小为 12.5 MPa 的上覆岩层载荷,底部、四周边界均施加位移约束,水平方向侧压系数分别取 1.2 和 0.8。开挖方式为分布开挖,北翼 20101 工作面、南翼 20102 工作面均开挖 250 m,前 200 m 每次开挖 50 m,后 50 m 每次开挖 10 m;以模拟实际工程中采空区顶板垮落及压实的真实情况。

在摩尔-库仑(M-C)本构模型下,通过 3DEC 软件计算得到随着工作面推进距离的增加采场前方支承压力的分布变化情况。将 20101 工作面推进 250 m,其前方 120 m 范围内的煤层顶板支承压力绘成曲线,如图 5 所示。煤壁前方支承压力幅值随着远离工作面呈现出近场快速增加、远场缓慢降低的趋势。

如图 5 所示,采场前方应力受强采动不断变化的这一过程表现为支承压力峰值出现了明显的变化,支承压力的峰值与工作面的推进度成正相关性,从开采 5 m 产生的 19.59 MPa,到开采 8 m 达到了 21.02 MPa。在煤层开采 50~70 m 的过程中,工作面前方支承压力集中系数(煤体中的原岩应力为 13.6 MPa)达到 1.44~1.54,该值已经远远超出煤岩体材料的承载能力。

如图 6 所示,距离 30 m 煤柱较近的运输大巷和

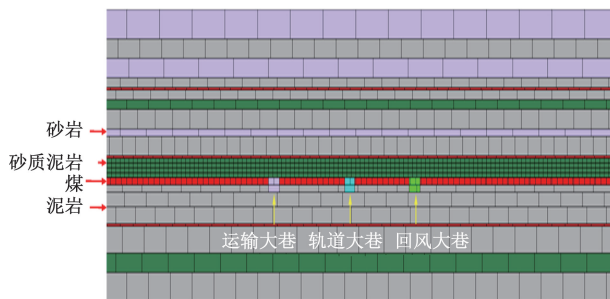


图4 20101工作面、20102工作面推进数值模型

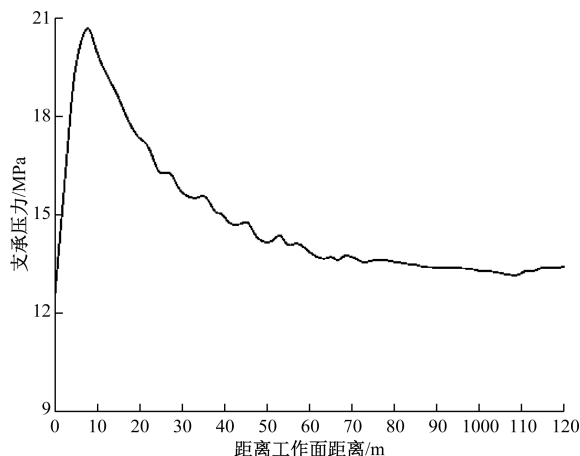


图5 强采动应力分布影响范围

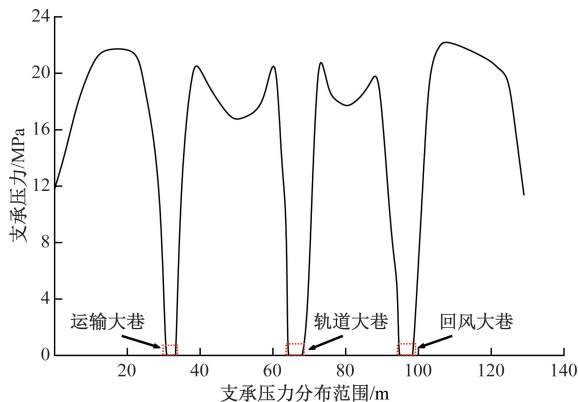


图6 强采支承压力分布影响范围

回风大巷受超前采动的影响程度较大,二者两侧煤柱上支承压力的峰值分别为 21.75 MPa、21.35 MPa,支承压力集中系数达到了 1.60、1.57。由于两翼超前采动应力的叠加,轨道大巷受到的采动影响最为剧烈,其煤柱侧支撑压力峰值达到了 22.49 MPa,煤柱上最大垂直应力为原岩应力 1.65 倍,这势必会导致煤柱发生一系列破坏。

2.3 深部大巷硐室强采动现场破坏情况分析

高采动应力环境下围岩剪切破坏不可避免,进而形成宏观裂缝和滑移块体。万家庄煤业一号变电所位于轨道大巷与回风大巷保护煤柱中间,硐室与大巷之间煤柱宽度仅 10 m。由于受强烈采动影响,变电所硐室围岩矿压显现剧烈。

强采动环境造成巷道围岩产生较大范围的破碎带,破裂带内裂隙极其发育,如图 7 所示。方向各异的众多裂隙结构面发生开裂、滑移等,导致了巷道围岩体力学性能参数相比初始状态发生了严重的衰减劣化,围岩体强度低、应力传递能力差,一方面造成锚杆锚索脱粘,无法有效传递锚杆锚索支护反力;另一方面导致锚固力无法有效传递到裂隙面,锚杆锚索作用范围和控制角大大缩小,最终导致支护失败。因此,深部强采动大巷硐室围岩稳定性控制技术的难点在于如何有效恢复碎裂化围岩体的强度力学性能,提高围岩载荷传递能力。



图7 强采动巷道高度裂隙化围岩体

3 深部强采动大巷硐室修护补强方案

3.1 “先释后控”围岩稳定性控制原理

巷道围岩稳定性控制的理想情况是通过锚杆锚索等支护措施,提高围岩承载能力,防止其发生剪切破坏,即支护后围岩能够实现“自稳”。但是,对于大埋深复杂构造区强采动复合顶板巷道不论采取何种支护方式都无法阻止围岩初期剪切破坏,只能在后续阶段采取有效措施提高围岩的承载能力,防止块体剪切滑移。这就是强采动巷道稳定性“先释后控”的基本思想。

如图8所示,对于一号变电所高应力环境下大巷硐室,最终实现围岩稳定性有效控制的关键应当在于对围岩破裂面剪切滑动、碎胀扩容等不连续变形的有效控制。即在大巷围岩发生剪切滑移破坏后及时采取锚杆锚索支护、注浆加固等措施,阻止围岩沿着破坏面剪切错动,抵抗破裂块体滑移运动,增加围岩的整体黏聚力和内摩擦角,有效提高围岩抗剪切滑移的极限承载能力。

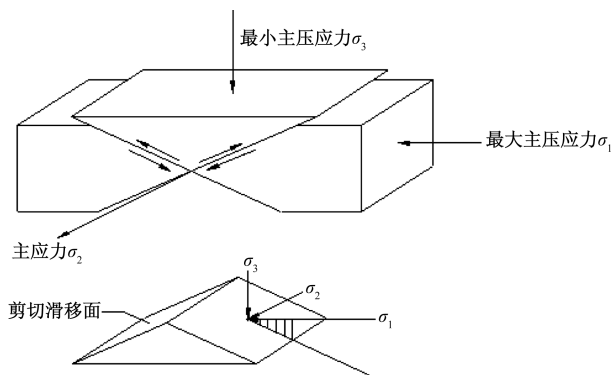


图8 强采动大巷硐室顶板剪切滑移变形特征

3.2 “重构再生”围岩稳定性控制原理

注浆改性对围岩和支护的稳定起较大作用,可为加固范围外的围岩体提供高抗力的结构性约束。破碎围岩注浆改性结构的承载作用机理主要包括如下几个方面。

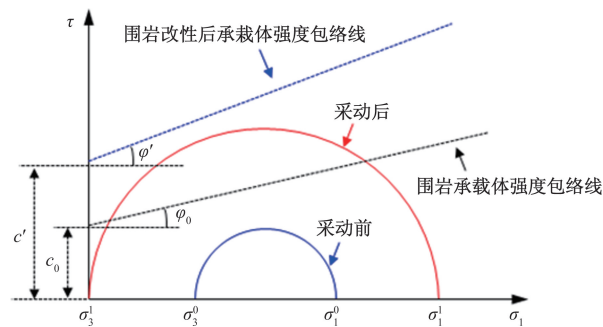
(1)改善破裂岩体物理力学状态。浆液充填和封堵围岩裂隙可减轻围岩风化,防止围岩被水浸湿而软化。

(2)显著提高多层组合拱结构的可靠性与承载能力。注浆加固形成多层组合拱由喷网组合拱、锚固压力锥作用形成岩锚拱和浆液扩散形成加固拱组成。

(3)高约束力阻止深部围岩塑性区发展。注浆加固针对峰后软化和残余变形段的破裂岩体,其初始应力状态较低,加固后转化为理想弹塑性体,承

载能力显著提高。

如图9所示,通过对围岩进行注浆重构改性,可以大大提高围岩的固有强度(黏结力 c 和内摩擦角 φ),增强围岩的自承载能力。软弱破碎围岩注浆重构改性后围岩完整性及强度的提高,不仅提高了巷道围岩的承载效果,还将大大提升锚杆锚索支护的效果,实现锚注协同,因此注浆重构改性技术对于软弱破碎巷道围岩稳定性控制具有重要意义。



σ_1 为最大主应力; σ_3 为最小主应力; φ 为内摩擦角; c 为黏聚力

图9 重构破裂围岩承载体系的作用机理

3.3 深部强采动大巷硐室修护补强技术

万家庄煤业一号变电所位于轨道大巷与回风大巷保护煤柱中间,由于受强烈采动影响,变电所硐室围岩矿压显现剧烈。因此,需考虑对一号变电所全断面整修,采用“先释后控-重构再生”修护补强技术。具体支护方式如图10所示。

图10显示,采用“高强锚杆+锚杆注浆装置+钢筋网”支护方式,顶、帮、底全断面锚杆选择 $\phi 22 \text{ mm} \times 2\,600 \text{ mm}$ 左旋无纵筋螺纹钢锚杆,钻孔直径 $\phi 28 \text{ mm}$,锚杆排距 800 mm ;顶板、两帮和底板选择与高强螺纹钢锚杆配套的浅孔注浆装置,规格

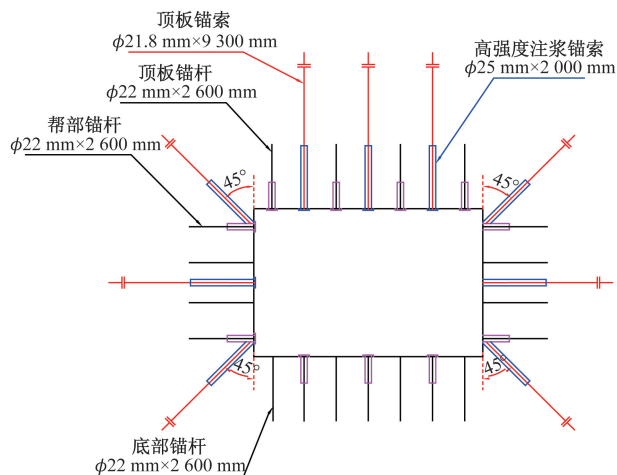


图10 一号变电所硐室围岩控制技术方案

为 $\phi 25 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$, 锚杆注浆装置排距为 $1\,600 \text{ mm}$ 。注浆材料采用 P. O. 42.5 普通硅酸盐水泥配合高性能改性剂使用, 浆液水灰比为 $0.5 \sim 0.6$; 改性剂用量为 $5\% \sim 10\%$, 注浆压力不超过 4 MPa ; 锚杆注浆在巷道受强采动影响完成之后再实施, 浆液水灰比为 $0.6 \sim 0.7$, 注浆压力不超过 2 MPa 。

4 深部强采动大巷硐室修护补强效果

为了检验深部强采动大巷硐室的修护补强效果, 采用围岩变形激光测距仪等矿压综合监测系统, 在巷道两翼工作面回采推进期间, 对大巷修护补强区段实施在线连续观测巷道矿压显现规律, 为准确评价大巷修护补强效果提供重要数据基础。

图 11 为大巷采用“先释后控-重构再生”修护补强支护后的巷道表面位移变化监测曲线。可以看出, 在两翼工作面回采期间, 围岩最大变形量为 155.8 mm 。总体而言, 2# 煤层深部强采动大巷硐室在“先释后控-重构再生”修护补强技术有效约束下, 巷道围岩总体位移量不大, 围岩较为稳定, 验证了深部强采动大巷硐室修护补强方案的有效性。

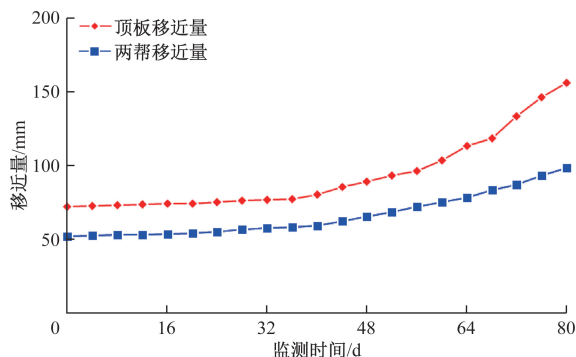


图 11 强采动巷道表面位移变化监测曲线

5 结论

针对深部强采动大巷硐室修护补强技术, 以万家庄煤业 2# 煤层一号变电所硐室为工程背景, 探究了深部强采动大巷硐室围岩破坏机理, 分析了强采动围岩稳定性控制原理, 提出了“先释后控-重构再生”修护补强技术, 结合现场工业性试验优化相关支护技术参数, 得到如下结论。

(1) 2# 煤层复合软岩顶板 10 m 范围内均无稳定的关键承载层, 在开采的过程中必然会引起采场周围的岩层运动、应力集中和应力重新分布。由于受强烈采动影响, 变电所硐室围岩矿压显现剧烈。

(2) 基于强采动破坏机理及围岩稳定性控制原理分析, 提出了“先释后控-重构再生”支护技术为核

心的深部强采动大巷硐室修护补强方案, 并开展了现场工业性试验。

(3) 2# 煤层深部强采动大巷硐室现场综合矿压监测结果表明, 采用“先释后控-重构再生”的支护补强技术时硐室的围岩变形曲线最大变形量可达 155.8 mm , 支护效果显著改善, 有力地保障了工作面安全高效回采。

参考文献

- [1] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2022 [M]. 北京: 地质出版社, 2022.
- [2] 谢和平, 李存宝, 高明忠, 等. 深部原位岩石力学构想与初步探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 217-232.
- [3] 黄炳香, 张农, 靖洪文, 等. 深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 911-926.
- [4] 侯朝炯团队. 巷道围岩控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2013.
- [5] 陈立伟, 彭建兵, 范文, 等. 基于统一强度理论的非均匀应力场圆形巷道围岩塑性区分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 20-23.
- [6] 赵志强, 马念杰, 刘洪涛, 等. 巷道蝶形破坏理论及其应用前景[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(5): 969-978.
- [7] 高福全, 薛吉胜, 尹希文. 强烈动压影响下锚网支护巷道矿压显现规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 228-232.
- [8] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展, 2015, 35(1): 91-99.
- [9] 候化强, 王连国, 陆银龙, 等. 矩形巷道围岩应力分布及其破坏机理研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(S2): 1625-1629.
- [10] 王云刚, 康军保, 杜炳成, 等. 金能煤矿软岩掘进巷道变形破坏特征及控制技术[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(12): 5340-5347.
- [11] 王继兵, 岳鹏威, 魏晓刚. 大跨度矩形巷道围岩失稳破坏机制及数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(3): 991-997.
- [12] 夏辉, 侯克鹏, 孙华芬, 等. 某矿大断面运输巷道支护技术[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(5): 1835-1841.
- [13] 孙广京, 王平, 冯涛. 软弱破碎顶板巷道围岩变形机理及控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5): 209-215.
- [14] 陈昊祥, 戚承志, 李凯锐, 等. 深部巷道围岩分区破裂的非线性连续相变模型[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1032-1040.
- [15] 王明洋, 陈昊祥, 李杰, 等. 深部巷道分区破裂化计算理论与实测对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 2209-2218.
- [16] 赵万里, 杨战标. 深部软岩巷道强力锚注支护技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(12): 92-97.
- [17] 孟波. 软岩巷道破裂围岩锚固体承载特性及工程应用研

究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
[18] 孟波, 靖洪文, 杨旭旭, 等. 破裂围岩锚固体变形破坏

特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32
(12): 2497-2505.

Repair and Reinforcement Technology for Deep and Strongly Mining Alley Chambers: Taking Wanjiazhuang Coal Industry as an Example

SHEN Zhixin

(Shanxi Coal Import and Export Group Puxian Wanjiazhuang Coal Industry Co., Ltd., Linfen 041204, Shanxi, China)

Abstract: Taking the No. 1 substation chamber in the 2# coal seam of Wanjiazhuang Coal Industry as the background of the project, the damage mechanism of the deep mine chamber and the stability control principle of the strong mining surrounding rock are explored, and the repair and reinforcement plan for the deep strong mining chamber are analyzed. The relevant support technical parameters with the on-site industrial test are optimized. According to the numerical simulation results, the amplitude of the support pressure in front of the coal wall increases rapidly in the near field and decreases slowly in the far field as it moves away from the working face. Due to the superposition of the over-mining stresses on the two wings, the chamber was subjected to severe mining impacts. The main concept of the repair and reinforcement technology for the chamber in the deep, strongly-mined adit is to release and then control-reconstruct and regenerate, which is able to greatly improve the support strength of the deep adit. The maximum deformation of the surrounding rock was 155.8 mm during the mining of the two working faces, which significantly improved the support effect and strongly guaranteed the safe and efficient mining of the working faces.

Keywords: intense mining impacts; deep and complex chambers; repair and reinforcement techniques; industrial trials