

松软破碎硐室群围岩应力分布及综合加固技术

康红普, 林 健, 杨景贺, 吴拥政, 高富强

(煤炭科学研究总院开采设计研究分院, 北京 100013)

摘 要: 采用现场试验与测试、理论分析、数值模拟相结合的研究方法, 开展了山西潞安屯留矿井底车场松软破碎硐室群围岩应力分布与综合加固技术研究。硐室群围岩属于中等地应力场下的松散破碎节理化软岩; 围岩应力分布特征表现为: 在硐室交叉处和拐角处, 出现应力集中与二次叠加, 应力峰值达到原岩应力的 2~3 倍; 高压注浆后进行高预应力、强力锚杆与锚索支护是松散破碎围岩有效的综合加固方式。高压注浆可充填和黏结裂纹, 提高节理化岩体的完整性与强度, 并可提高锚杆与锚索锚固力, 有利于支护阻力的传递与扩散。高预应力、强力锚杆与锚索能在围岩内形成拱形的压应力加固区域。井下试验表明: 综合加固技术有效控制了松软破碎硐室群围岩变形, 保持了其长期稳定。

关键词: 硐室群; 应力分布; 注浆加固; 锚杆; 锚索; 井下应用

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)05-0808-07

作者简介: 康红普(1965-), 男, 山西五台人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩石力学与巷道支护技术方面的研究与教学工作。E-mail: kanghp@163.com。

Stress distribution and synthetic reinforcing technology for chamber group with soft and fractured surrounding rock

KANG Hong-pu, LIN Jian, YANG Jing-he, WU Yong-zheng, GAO Fu-qiang

(Coal Mining and Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: A combination of study methods, including field tests, theoretical analyses and numerical simulations, is employed to investigate the stress distribution around the chamber groups with soft and fractured surrounding rock as well as the synthetic reinforcing techniques in the underground station in Tunliu Coal Mine of Lu'an Group in Shanxi Province. The surrounding rock of the chamber groups belongs to loose, broken and soft rock with medium stress fields. The features of the stress distribution in the surrounding rock are as follows: the secondary stress concentration occurs by overlapping adjacent stress fields at the intersections and corners of chambers, and the peak stress values reach 2-3 times the in-situ stresses. Grouting with high pressure followed by high pretension intensive bolts and cables is an effective synthetic reinforcing form for the soft and broken rock. The grouting with high pressure can fill and glue the fissures to improve the integrity and strengths of the jointed rock mass, meanwhile, it can increase the anchoring capacity of bolts and cables, and be in favor of transferring and diffusing the bolting force in rock mass. The high pretension and intensive bolts and cables can form a compressive reinforcing zone with arch shape. The underground practices indicate that the synthetic reinforcing technique effectively controls the displacement of the surrounding rock mass of the chamber groups, and ensures their long-term stability.

Key words: chamber group; stress distribution; grouting; bolt; cable; underground application

0 引 言

煤矿井底车场硐室群是矿井的关键部位。它与一般巷道相比, 具有以下特点^[1]: 硐室断面大且变化多, 长度比较短; 硐室往往与其他硐室、巷道相毗邻, 加之硐室本身结构复杂, 受力状态复杂; 硐室服务年限长, 支护设计与工程质量要求高。

进行矿井设计时, 应尽量将井底车场的层位选择在岩石条件较好的地段, 而且各硐室之间应有合理的距离。但由于井下地质条件复杂, 有时井底车场不可

避免地位于地质条件较差的岩层中。硐室围岩稳定性差, 各硐室施工时会出现相互扰动, 造成硐室群发生持续变形与破坏, 影响整个矿井的安全生产。

山西潞安屯留矿副井井筒深度达到 600 m。副井井筒与井底车场围岩主要以泥岩、粉砂岩为主, 并夹有多层小煤及煤线, 附近还有小断层, 属于典型的松

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2008AA062102);

国家科技支撑计划项目(2008BAB36B07)

收稿日期: 2010-01-18

软破碎岩体。井底车场硐室群施工时, 硐室围岩变形与破坏明显, 各硐室相互扰动强烈, 导致支护体破坏严重。如马头门采用锚网喷与锚索支护, 掘进时就出现顶板开裂, 顶板下沉达 1.2 m, 部分锚索破断。为此, 先后采用了锚杆与锚索支护、U 型钢支架、浇铸混凝土、锚索束及壁后注浆等支护加固方式。虽然经过数次加固, 并取得一定效果, 但围岩变形仍未稳定, 一直处于蠕变状态, 不能满足安全生产要求。

针对上述存在的问题, 本文在详细的硐室群围岩地质力学参数测试与分析的基础上, 研究硐室群空间应力分布特征与规律、围岩变形与破坏特征, 进而提出有效的支护加固方法。将支护加固方案实施于井下, 通过矿压监测数据评价加固效果, 力图解决煤矿建设与生产中遇到的此类岩层加固难题。

1 硐室群布置与地质力学参数测试

1.1 井底车场硐室群布置

井底车场设计为环行卧式。在副井井底附近设有中央变电所、主排水泵房、等候室等; 在井底车场的南侧设有水仓、爆破材料库; 在主井井底清理巷道的两侧分别布置电机车修理间, 消防材料库。副井周围各硐室具体位置见图 1。其中①为中央变电所, ②为主排水泵房, ③为管子道, ④为气控室, ⑤为信号与电控室, ⑥为保健室, ⑦为等候室, ⑧为工具室。

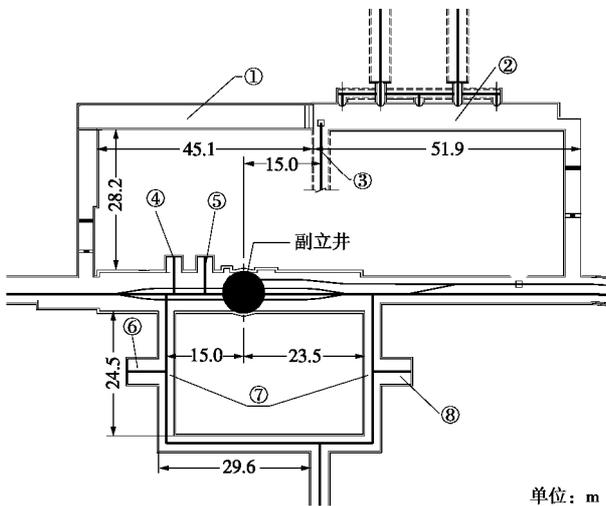


图 1 井底车场硐室群布置图

Fig. 1 Layout of chamber groups in shaft bottom

1.2 地质力学参数测试与分析

针对井底车场硐室群处于泥岩、粉砂岩和有多层煤线的恶劣条件, 为全面了解煤岩体地质力学参数, 在井底车场附近、大巷及其它巷道中进行了地质力学测试, 内容包括地应力测量、煤岩体强度测定、钻孔节理裂隙观察。

(1) 地应力测量

地应力测量采用水压致裂法, 仪器采用 SYY-56 型水压致裂地应力测量装置^[1]。地应力测量在井底车场附近、围岩比较完整的南翼胶带大巷中进行。钻孔在巷道顶板中部垂直向上布置, 深度 30 m, 钻孔直径 $\Phi 56$ mm, 测量水平面上的最大与最小水平主应力, 垂直应力由上覆岩层自重计算得出。

测量结果如表 1。其中 H , s_v , s_H , s_h , a 分别为测点埋深、垂直主应力、最大水平主应力、最小水平主应力及最大水平主应力方向。

所测区域地应力场类型为 $s_v > s_H > s_h$, 地应力总体上以垂直应力为主。最大主应力值均不大于 13 MPa, 属于中等地应力场。最大水平主应力方向都集中在 NNE 方向。

表 1 大巷地应力测量结果

Table 1 Results of in-situ stress measurements in main roadway

测站	H/m	s_v/MPa	s_H/MPa	s_h/MPa	a
1	520	13.00	9.60	5.42	N44.8°E
2	515	12.88	6.56	3.41	N37.5°E
3	518	12.95	6.41	3.78	N30.0°E

(2) 煤岩体强度测试

煤岩体强度测试采用钻孔触探法。测试仪器为 WQCZ-56 型煤岩体强度测定装置。在南翼胶带大巷完成 3 个测站的测量, 其中第 2 个测站的测试结果见表 2。煤层强度最大为 18.5 MPa, 最小为 8.5 MPa, 大部分处于 10~15 MPa。

表 2 顶板岩层抗压强度测试结果

Table 2 Results of compressive strengths for roof strata

岩性	累计厚度/m	厚度 /m	强度 /MPa	岩性描述
泥岩	10.37	2.12	34.6	纵向裂隙发育。
软泥	8.25	0.20	6.7	极软, 容易堵孔。
泥岩	8.05	0.60	28.3	层理及纵向裂隙发育。
中砂岩	7.45	0.45	62.1	小段状, 较破碎。
砂质泥岩	7.00	2.44	49.7	纵向裂隙、层理发育。
中砂岩	4.56	0.63	51.4	段状, 纵向裂隙发育。
泥岩	3.93	3.93	45.4	较破碎, 部分完整。

(3) 煤岩体钻孔结构观察

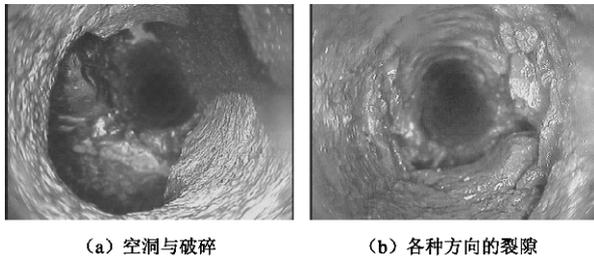
采用 KDVI-400 型矿用电子钻孔窥视仪, 在井底车场硐室群围岩钻孔中进行了围岩结构观察。图 2 是南马头门围岩窥视结果。由图 2 可见围岩非常破碎, 裂隙发育, 属于典型的松散破碎的节理化软岩。

综上所述, 井底车场硐室群围岩属于中等地应力场下的松软破碎节理化软岩。

2 数值模拟

深入研究硐室群周围应力场分布特征, 对分析硐

室群围岩的稳定性及支护加固设计非常必要。下面采用三维有限差分软件 FLAC^{3D} 进行模拟计算, 分析从副井到硐室群开挖后围岩应力场分布及影响因素。



(a) 空洞与破碎

(b) 各种方向的裂隙

图2 马头门围岩钻孔窥视结果

Fig. 2 Borehole observation results in surrounding rock mass of horsehead

2.1 数值计算模型

(1) 模拟对象

为了全面分析硐室群的应力分布, 模拟范围取井底车场水平上下 81 m 及周围硐室群。模型长 188 m, 宽 150 m, 高 81 m, 共划分 219372 个单元。

(2) 模拟计算参数的选择

根据表 1 (测站 1)、表 2 确定计算模型的基本参数。模拟采用莫尔-库仑屈服准则。

(3) 模拟方案

首先模拟副井及硐室群开挖后围岩应力场的变化与分布特征。其次, 变化结构面力学参数: 凝聚力 c 和内摩擦角 φ , 模拟结构面强度小、中等和大时的围岩变形与破坏状况。第三, 变化岩石强度, 模拟软、中等和硬岩的围岩变形与破坏状况。

2.2 数值模拟结果及分析

(1) 硐室群应力场分布

硐室开挖后, 两帮围岩内出现应力集中现象, 应力集中系数最大可达到原岩应力的 1.5 倍。应力集中区域沿硐室轴线在两帮分布, 垂直硐室轴线方向上延伸到约 2 倍的硐室宽度。在硐室交叉处和拐角处, 应力集中进行二次叠加, 叠加后的应力峰值达到原岩应力的 2~3 倍。硐室内拐角较外拐角应力集中系数高, 应力集中范围大。在这些区域, 围岩应力达到塑性屈服条件, 两帮发生塑性流动, 出现剪切屈服和拉伸破坏区域, 其中拉伸破坏主要处于交叉点。

(2) 岩体强度与结构面对围岩应力的影响

岩体强度、结构面强度较小时, 硐室两帮形成应力集中区域范围较大, 向两帮内延伸到约 2 倍的硐室宽度处, 应力集中系数较小。由于岩体承载能力低, 硐室帮部破坏, 出现剪切和拉伸屈服区域, 帮部应力集中向围岩深部转移。相邻硐室的应力集中区域相互叠加, 造成更大范围的应力集中, 应力集中系数也较

单个硐室大。随着岩体强度、结构面强度增大, 硐室两帮形成的应力集中区域范围逐渐缩小, 剪切屈服和拉伸屈服区域也明显减小, 帮部应力集中系数逐渐变大。相邻硐室的应力集中叠加区域减小甚至不再叠加。可见, 提高岩体、结构面强度, 可减小或避免硐室之间的相互影响, 对维护硐室群的稳定性极为有利。

3 松软破碎硐室群综合加固设计

3.1 综合加固方案

基于现场测试与数值模拟结果, 提出深孔高压注浆配合强力锚杆、锚索的加固方案: 先深孔高压注浆, 然后进行锚杆、锚索支护, 最后喷浆封闭。

注浆的目的是充填裂隙, 将破碎软岩黏结, 恢复或构成完整岩体结构, 提高岩体的整体强度^[2-3]。同时, 注浆对后续的锚杆、锚索支护非常有利: 一方面为锚杆、锚索提供可锚基础, 提高锚固力^[4-5]; 另一方面可以保证锚杆、锚索预应力与工作阻力能有效扩散到围岩中, 提高支护效果。因此, 深孔注浆是整个加固的基础, 是保证加固效果的基本条件。

深孔高压注浆后, 松散软岩基本上恢复连续状态, 但承载能力还是比较低, 一旦受到动压扰动, 就会再次发生破坏。注浆后还应采用锚杆、锚索支护进行加固, 给硐室周边提供约束, 控制锚固区围岩再发生离层、滑动、裂隙张开等扩容变形, 抑制围岩拉伸与剪切破坏, 保持锚固区围岩完整性, 减小强度再降低^[6-8]。

为了清楚地分析锚杆、锚索在围岩中产生的应力场, 一是不考虑原岩应力 (零原岩应力场); 二是认为破碎围岩注浆后已形成连续体, 采用 FLAC^{3D}, 以屯留矿等候硐室为模型, 计算了锚杆、锚索产生的支护应力场, 如图 3 所示。

高预应力锚杆在围岩中能够产生范围较广、较大的压应力, 而且应力区彼此相连, 在围岩内形成了拱形的有效支护区域, 锚杆主动支护作用得到充分发挥。锚索的预应力与长度比锚杆大, 产生的压应力更大, 分布范围更广。但是, 由于锚索密度小, 锚索之间的距离大, 锚索之间中部围岩的压应力小, 支护作用不明显。锚杆与锚索联合支护, 显著提高了锚杆锚固区内的压应力值。使得锚杆端部的拉应力区消失, 转换成有一定压应力值的压缩区。压应力区覆盖了锚杆锚固区内和锚索自由段长度范围内的大部分区域, 连接、叠加成一个范围很大的主动支护区, 形成厚度较大的拱形预应力承载结构。

因此, 决定采用高预应力锚杆与锚索支护。

3.2 深孔高压注浆材料与参数

(1) 注浆材料

注浆材料一般分为水泥基材料与高分子材料。水泥基材料可通过各种添加剂改变其物理力学性质^[9], 高分子材料又有多种类型^[10]。根据围岩条件与加固要求, 确定深孔注浆采用水泥类注浆材料。根据井下钻孔窥视结果, 围岩裂隙开度一般均在 1~3 mm 之间, 局部存在 5 mm 左右的裂隙。注浆材料选择高标号水泥浆液, 局部裂隙开度较大的部位采用水泥-水玻璃浆液。水泥浆采用 525#普通硅酸盐水泥配合 XPM 纳米注浆添加剂, 水灰比一般在 0.5:1, XPM 添加剂用量为水泥重量的 6%~8%; 水泥-水玻璃浆液, 水泥浆和水玻璃的体积比 1:0.3~1:0.6。

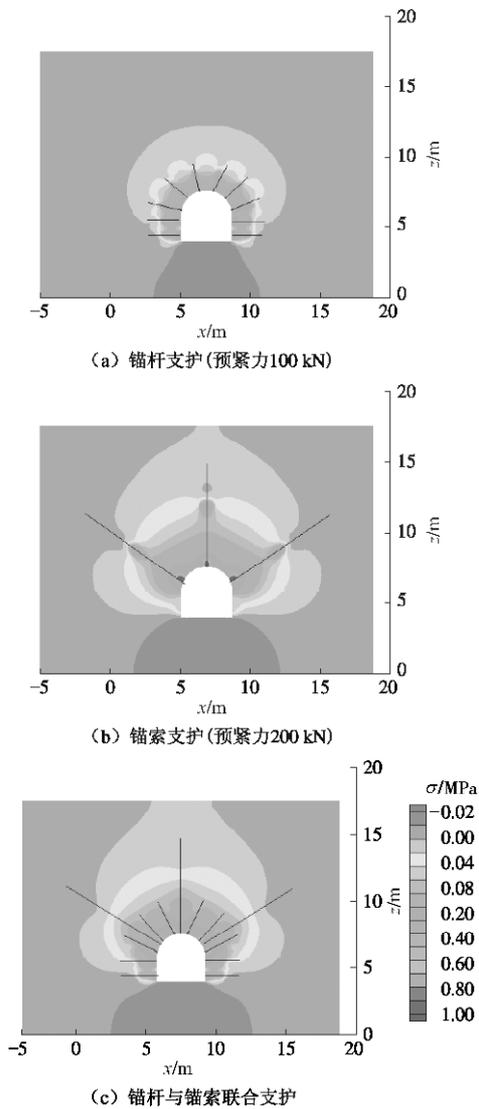


图 3 锚杆与锚索支护应力场分布

Fig. 3 Distribution of bolting stress fields for bolts and cables

(2) 深孔高压注浆加固参数

注浆加固参数的选择应使浆液能够有效扩散到围岩节理、裂隙与裂纹中, 并获得较大的黏结强度^[11-13]。根据地质力学测试结果, 确定注浆孔排距为 3 m, 间距为 2 m, 施工开始后根据具体情况进行调整。如在硐室交叉处与拐角处, 由于应力叠加导致围岩破坏范

围大, 适当缩小注浆孔的间排距。为保证注浆效果和防止漏浆, 采用隔排注浆和交叉注浆。由于副井井筒受其周围硐室群开挖影响较大, 导致井筒下沉与破坏范围大, 故在井筒附近向上布置 6 个深 40 m 的钻孔, 而且钻孔距井筒壁的距离控制在 5 m。副井井筒向下布置 6 个钻孔, 孔深 20 m。其余钻孔深度为顶孔和帮孔 20 m, 底板孔深度为 5~6 m, 钻孔直径为 $\phi 56$ mm。

根据现场情况, 采用分段注浆或全长注浆。采用分段注浆时, 每段长度为 10 m, 根据钻孔破碎情况选择由内向外或由外向内注浆。

注浆压力根据现场情况进行调整。为了保证注浆施工不破坏井筒, 井筒附近注浆压力控制在 3 MPa 以内; 在硐室交叉处与拐角处围岩破碎, 也不能采用过大的注浆压力, 一般不超过 4 MPa; 极破碎硐室底板注浆压力为 1.5~2.0 MPa; 其余注浆孔注浆压力控制在 6 MPa 左右。

3.3 强力锚杆与锚索材料与参数

潞安矿区已经大面积推广应用高强度锚杆与锚索支护技术^[14-15]。但考虑到硐室群的支护难度及对变形的严格要求, 结合国外锚杆支护材料的发展状况^[16], 开发出强力锚杆与锚索^[6], 并应用于硐室群支护。

(1) 强力锚杆

强力锚杆杆体为 BHRB600 型左旋无纵筋螺纹钢, 屈服强度 ≥ 600 MPa, 破断强度 ≥ 800 MPa。

锚杆直径 $\phi 25$ mm, 长度 2.4, 3 m 两种, 长度 3 m 的锚杆用于马头门、中央变电所、主排水泵房及井筒加固, 其余硐室采用长度 2.4 m 的锚杆。锚固方式为树脂加长锚固。采用大托板与钢筋网护顶、护帮。锚杆垂直岩面布置, 底脚两根锚杆下倾 $10^\circ \sim 15^\circ$ 。锚杆间排距一般为 1 m, 在硐室交叉处与拐角处前后, 将锚杆排距缩小到 0.8 m。锚杆预紧力矩为 500 N·m。

(2) 强力锚索

锚索索体为高强度低松弛钢绞线, 公称直径 19 mm, 极限拉断力 400 kN, 延伸率 4%。

顶板与帮锚索长度为 20 m, 锚固方式采用树脂端部锚固与注水泥浆全长联合锚固。锚索垂直岩面布置, 锚索间排距均为 2 m。设计锚索预紧力 ≥ 200 kN。

北马头门锚杆、锚索支护布置如图 4。

3.4 硐室底鼓治理方案

主排水泵房和中央变电所靠近外水仓, 由于外水仓一直进行爆破施工, 引起变电所通道注浆过程中发生底鼓, 导致井筒与其它硐室多处变形。为防止主排水泵房与中央变电所发生底鼓, 危及矿井排水安全, 对其底板进行加固。

(1) 主排水泵房底板加固

主排水泵房底板深 3 m 范围内岩层以泥岩为主,

松软破碎。水泵基础占用水泵房长度 38 m，宽度 2 m，高密度支护实施困难。为此，确定采用强力锚索支护配合底板浅层注浆综合加固技术。

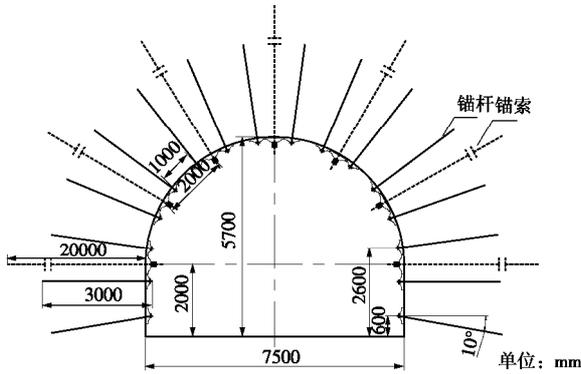


图4 北马头门锚杆与锚索支护布置图

Fig. 4 Layout of bolts and cables in north horsehead

底板锚索长度 9.5 m，钻孔直径 $\phi 56$ mm。先树脂端部锚固，然后水泥浆全长锚固。水泵基础周边及硐室中线锚索垂直底板布置，其它部位靠近两帮的锚索向两帮倾斜 10° 。锚索安装时加装 $\phi 20$ mm 钢筋托梁。设计锚索预紧力为 120 kN。

锚索支护施工完成后，对水泵房底板浅层进行注浆。钻孔直径 $\phi 56$ mm，孔深 5 m；沿水泵基础两侧布置两排注浆孔，排距 2.6 m，间距 4~8 m。注浆材料为 525# 普通硅酸盐水泥配合 XPM 添加剂。采用快硬水泥封孔。注浆压力为 1.5~2.0 MPa。

(2) 中央变电所底板加固

中央变电所底板深 3 m 以内岩层以泥岩、煤、砂质泥岩为主，原水泥硬化层下部岩体破碎。为此，对底鼓区域先进行注浆，然后再进行强力锚杆支护。

锚杆杆体为 BHRB600 型左旋无纵筋螺纹钢。锚杆直径 $\phi 25$ mm，长度 2.4 m，树脂加长锚固。锚杆间排距均为 1.5 m，每排 4 根锚杆。靠近两帮的锚杆倾向两帮 $10^\circ \sim 15^\circ$ 安装。底部铺设 $\phi 6.5$ mm 钢筋网，并采用 $\phi 16$ mm 钢筋托梁。锚杆预紧扭矩为 500 N·m。变电所底板支护见图 5。

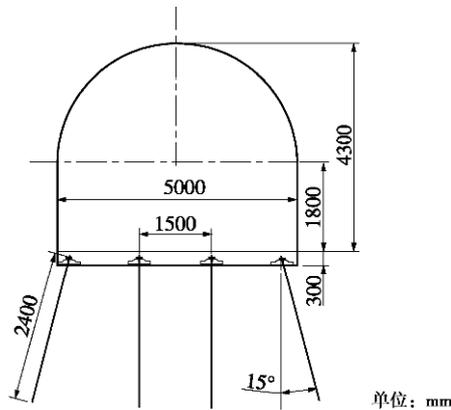


图5 中央变电所底板锚杆支护布置图

Fig. 5 Layout of floor bolts in central transformer station

4 综合加固效果检测与矿压监测

4.1 注浆效果检测与分析

(1) 钻取岩芯

在候车硐室南通道注浆围岩中钻取岩芯。钻孔深度 20 m，与注浆孔深度相同。岩芯参数如表 3 所示。注浆后煤岩体得到很好的胶结和充填，岩芯中随处可见水泥结石体和充填物，整体岩芯采取率 93%。

表3 候车硐室注浆检测孔岩芯描述

Table 3 Core log for grouting inspection in waiting chamber

岩性	孔深 /m	层厚 /m	岩芯长度/m	取芯率 /%	岩芯累计/m
混凝土层	0.5	0.5	0.5	100	0.5
泥岩	4.9	4.4	4.2	95.5	4.7
煤	5.4	0.5	0.5	100	5.2
泥岩	9.1	3.7	3.5	94.6	8.7
煤	9.4	0.3	0.3	100	9.0
粉砂质泥岩	11.8	2.4	2.4	100	11.4
中砂岩	17.3	5.5	5.1	92.7	16.5
煤	17.5	0.2	0.1	50.0	16.6
泥岩	20.0	2.5	2.0	80.0	18.6

变电所底板注浆后，裂隙基本被充填，破碎煤岩块被黏接在一起，效果非常明显。注浆效果如图 6 所示。

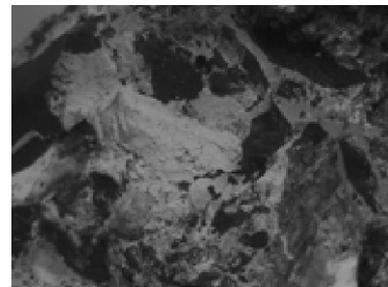
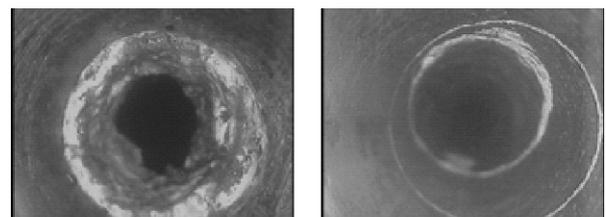


图6 中央变电所底板注浆加固效果

Fig. 6 Floor grouting effect in central transformer station

(2) 钻孔窥视

采用矿用电子钻孔窥视仪，在各硐室进行了注浆效果检测。典型的钻孔窥视结果如图 7。围岩中的节理裂隙被有效充填，浆液渗透到极破碎岩体内部，形成了较完整的水泥固结体，为后续强力锚杆、锚索支护施工创造了良好条件。



(a) 顶板水泥充填效果

(b) 帮水泥充填效果

图7 钻孔窥视注浆加固效果

Fig. 7 Borehole observation of grouting reinforcing effect

4.2 矿压观测结果及分析

对硐室群进行了详细的表面位移及锚杆受力监测。下面以中央变电所与马头门为例进行介绍。

(1) 中央变电所表面位移

中央变电所顶板在注浆过程中及随后的时间内没有发生明显位移。两帮与底板位移监测曲线如图 8。在注浆过程中, 变电所两帮位移变化不大, 但在局部地段底鼓明显, 最大达 170 mm。分析其主要原因是受到外水仓施工的扰动。之后随着注浆工作和外水仓施工的停止, 该处底板基本保持稳定, 没有发生进一步底鼓。

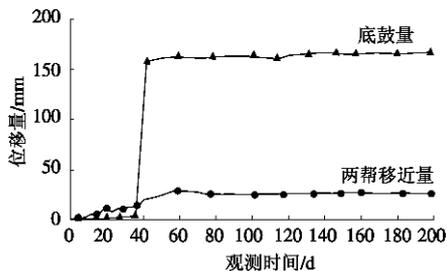


图 8 中央变电所表面位移监测曲线

Fig. 8 Convergence curves of central transformer station

(2) 马头门附近表面位移

北马头门位移监测曲线如图 9。两帮移近量在前 3 个月累计不超过 10 mm, 属于缓慢蠕变。但在随后半个月, 两帮移近量急剧增加, 增加量在 20 mm 左右, 之后基本趋于稳定。马头门顶板基本一直处于稳定状态, 没有发生明显变形。但在靠近井筒部位的顶板, 由于井筒附近注浆施工导致顶板下沉 40 mm 左右。马头门底板部分地段发生底鼓, 底鼓量为 17~24 mm, 之后一直处于稳定状态。底鼓主要由底板注浆引起。

可见, 由于邻近硐室的施工扰动及注浆施工的影响, 引起了马头门明显变形。但注浆与锚固施工结束后, 围岩保持了稳定, 再没有出现明显变形。

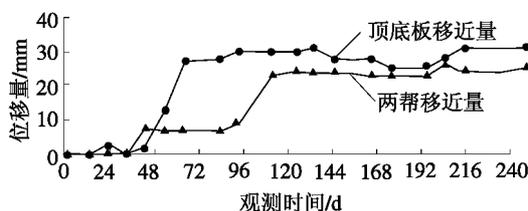


图 9 北马头门表面位移监测曲线

Fig. 9 Convergence curves of north horsehead

(3) 锚杆受力观测

锚杆受力监测数据表明, 硐室拱顶部位的锚杆受力较小, 并且锚杆受力待硐室变形稳定后有下降趋势。两帮锚杆受力明显高于拱顶部位, 有些锚杆达到了屈服极限。但无论硐室哪个部位的锚杆, 施加较高的预

紧力不仅在控制硐室围岩变形方面, 还是在提高硐室抗扰动能力方面, 都是非常有效的。

综上所述, 综合加固有效控制了松软破碎硐室群变形与破坏, 保持了围岩的长期稳定。

5 结 论

(1) 屯留矿井底车场硐室群位于松散、破碎节理化软岩中。硐室密度大, 围岩应力复杂, 受到相邻硐室施工扰动, 产生严重变形与破坏。

(2) 硐室开挖后出现应力集中现象。在硐室交叉处和拐角处, 应力集中进行二次叠加, 应力峰值达到原岩应力的 2~3 倍。围岩中出现剪切屈服和拉伸破坏, 其中拉伸破坏主要处于交叉点。岩体强度与结构面对围岩应力的影响很大, 提高岩体、结构面强度, 可减小或避免硐室之间的相互影响, 对维护硐室群的稳定性极为有利。

(3) 深孔高压注浆与强力锚杆、锚索联合加固是比较适合松散、破碎软岩的加固方式。注浆可充填裂隙, 将破碎软岩黏结, 恢复或构成完整岩体结构, 为锚杆、锚索提供可锚基础, 保证其预应力与工作阻力能有效扩散到围岩中。注浆后采用强力锚杆、锚索支护, 在围岩中形成较大范围的主动、叠加的压应力区, 形成厚度较大的拱形预应力承载结构, 以保持锚固区围岩完整性, 控制锚固区围岩再发生离层、滑动、裂隙张开等扩容变形。

(4) 综合加固技术有效控制了松软破碎硐室群围岩的长期流变, 保证了硐室群的长期稳定, 消除了存在的重大安全隐患, 为矿井安全高效生产创造了良好条件。

参考文献:

- [1] 康红普, 王金华. 煤巷锚杆支护理论与成套技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007. (KANG Hong-pu, WANG Jin-hua. Rock bolting theory and complete technology for coal roadways[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2007. (in Chinese))
- [2] 李明远, 王连国, 易恭猷, 等. 软岩巷道锚注支护的理论与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001. (LI Ming-yuan, WANG Lian-guo, YI Gong-you, et al. The theory and practice of bolting and grouting support method for soft rock roadway[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2001. (in Chinese))
- [3] 王连国, 李明远, 王学知. 深部高应力极软岩巷道锚注支护技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2889 - 2893. (WANG Lian-guo, LI Ming-yuan, WANG Xue-zhi.

- Study on mechanisms and technology for bolting and grouting in special soft rock roadways under high stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(16): 2889 - 2893. (in Chinese))
- [4] 侯朝炯, 柏建彪, 张 农, 等. 困难复杂条件下的煤巷锚杆支护[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 84 - 88. (HOU Chao-jiong, BAI Jian-biao, ZHANG Nong, et al. Coal roadway bolting under difficult and complex conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(1): 84 - 88. (in Chinese))
- [5] 韩立军, 贺永年. 破裂岩体注浆加锚特性模拟数值试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, **34**(4): 418 - 422. (HAN Li-jun, HE Yong-nian. Numerical experimental study on mechanical characteristics of cracked rock mass reinforced by bolting and grouting[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, **34**(4): 418 - 422. (in Chinese))
- [6] 康红普, 王金华, 林 健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用[J]. 煤炭学报, 2007, **32**(12): 1233 - 1238. (KANG Hong-pu, WANG Jin-hua, LIN Jian. High pretensioned stress and intensive bolting system and its application in deep roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2007, **32**(12): 1233 - 1238. (in Chinese))
- [7] 康红普, 姜铁明, 高富强. 预应力锚杆支护参数的设计[J]. 煤炭学报, 2008, **33**(7): 721 - 726. (KANG Hong-pu, JIANG Tie-ming, GAO Fu-qiang. Design for pretensioned rock bolting parameters[J]. Journal of China Coal Society, 2008, **33**(7): 721 - 726. (in Chinese))
- [8] MARK C, MOLINDA G M, DOLINAR D. Analysis of roof bolt systems[C]// Proceedings of the 20th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, USA, 2001: 218 - 225.
- [9] 阮文军, 王文臣, 胡安兵. 新型水泥复合浆液的研制及其应用[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(2): 212 - 216. (RUAN Wen-jun, WANG Wen-chen, HU An-bing. Development and application of new kind of cement composite grout[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(2): 212 - 216. (in Chinese))
- [10] 冯志强. 极破碎煤岩体化学注浆加固材料开发及渗透扩散特性研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2007. (FENG Zhi-qiang. Material development and research of osmosis and diffusion on chemical grouting for extraordinary cracked coal and rockmass[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2007. (in Chinese))
- [11] 阮文军. 注浆扩散与浆液若干基本性能研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(1): 69 - 73. (RUAN Wen-jun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(1): 69 - 73. (in Chinese))
- [12] ERIKSSON M, STILLE H, ANDERSSON J. Numerical calculations for prediction of grout spread with account for filtration and varying aperture[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, **15**(4): 353 - 364.
- [13] BRANTBERGER M, STILLE H, ERIKSSON M. Controlling grout spreading in tunnel grouting—analyses and developments of the GIN-method[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, **15**(4): 343 - 352.
- [14] 胡学军, 范世民. 煤巷锚杆支护成套技术在潞安矿区的应用[J]. 煤炭科学技术, 2003, **31**(6): 33 - 35. (HU Xue-jun, FAN Shi-min. Completed set technology of bolt support for seam gateway applied to Lu'an mining area[J]. Coal Science and Technology, 2003, **31**(6): 33 - 35. (in Chinese))
- [15] 康红普, 林 健, 张冰川. 小孔径预应力锚索加固困难巷道的研究与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(3): 387 - 390. (KANG Hong-pu, LIN Jian, ZHANG Bing-chuan. Study on small borehole pretensioned cable reinforcing complicated roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(3): 387 - 390. (in Chinese))
- [16] GRAY P A, HUNT N, FABJANCZYK M W. New development in ground support with particular reference to high capacity, high load transfer rock bolts[C]// Proceedings of International Conference on Geomechanics/Ground Control in Mining and Underground Construction, Wollongong, Australia, 1998: 513 - 524.