

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.12.022

深井煤矿硐室底臃控制对策与监测分析

刘泉声^{1,2}, 黄诗冰¹, 崔先泽¹, 龚光庆³, 陈根生³

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2.武汉大学 土木建筑工程学院 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072;

3.淮南矿业(集团)公司顾北矿, 安徽 淮南 232151)

摘 要: 针对淮南矿区顾北煤矿-648 m 水平绞车房硐室底板突出严重, 容易发生拉剪破坏的特点, 首先采用 FLAC^{3D} 对绞车房硐室支护前的围岩变形和应力分布特征进行了模拟分析: 变截面处和底角应力集中明显, 在高应力作用下底角剪切滑移和底板折断隆起是造成底臃的根本原因。基于分步联合支护理论, 对绞车房硐室底板支护方案进行了优化, 并对绞车房硐室表面与深部位移、锚索受力和基础内部应力进行了全方位监测, 结果表明: 原支护方案下巷道底板变形较大, 巷道底角发生剪切滑移诱使巷道断面圆形化, 注浆花管和底角地梁可以较好地抵抗底角处的剪切滑移; 巷道底板变形量受地应力方位影响较大, 采用新的底板联合支护方式不仅可以很好地满足绞车房硐室对底板变形的要求, 还能加强两帮稳定性, 同时保证了绞车房基础稳定。

关 键 词: 底臃; 应力集中; 位移监测; 锚索拉力; 混凝土应力

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 12-3506-10

Control measures and monitoring analysis for floor heave of the chamber in deep coal mine

LIU Quan-sheng^{1,2}, HUANG Shi-bing¹, CUI Xian-ze¹, GONG Guang-qing³, CHEN Gen-sheng³

(1.State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences,

Wuhan, Hubei 430071, China; 2.Hubei Provincial Key Laboratory of Geotechnical and Structural Engineering Safety,

School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

3. Gubei Coal Mine, Huainan Mining Industry (Group) Co., Ltd., Huainan, Anhui 232150, China)

Abstract: In this paper, the FLAC^{3D} software is applied firstly to simulate the deformation and stress distribution of the winch room at level of -648 m, considering the serious floor heave and characteristics of tensile-shear damage in Gubei Coal Mine of Huainan. From simulation results, obvious stress concentration is found at variable cross-sections and corners. The results also demonstrate that the fundamental reason of floor heave is caused by base shear slip and floor fracture uplift under high in-situ stress. Based on the theory of stepwise supporting, the supporting method for winch room floor is optimized. Moreover, the surface and deep displacement, anchor cable tensile force and the internal stress of concrete foundation are monitored. From the monitoring results, we can see that roadway floor heave occurs and the cross section of roadway tends to roundness with the original support method; the grouting tube and the base beam can well resist base shear slip; floor deformation is influenced greatly by in-situ stress orientation, and the newly combined supporting method can not only control floor deformation, but also effectively enhance the stabilities of roadway walls and concrete foundation of winch room.

Keywords: floor heave; stress concentration; displacement monitoring; anchor cable tensile force; concrete stress

1 引 言

人类对矿产资源的获取大多是通过地下开采方

式获得的, 随着浅部资源的逐渐减少和枯竭, 地下开采的深度越来越大。煤炭作为重要的资源, 每年正以 8~12 m 的速度向深部发展, 国内许多矿井已

收稿日期: 2014-04-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目 (No. 2014CB046904); 国家自然科学基金重点项目 (No. 41130742); 国家自然科学基金青年基金项目 (No. 41302237)。

Foundation item: Project supported by National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (Grant No. 2014CB046904), Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41130742) and Young Scholars of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41302237).

第一作者简介: 刘泉声, 男, 1962 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事裂隙岩体温度-水力-应力耦合分析、地下工程稳定性分析及岩土工程加固技术等方面的教学与研究工作。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn

进入了深部开采阶段^[1]。随着开采深度的不断增加，深部与浅部在赋存环境上的主要差别表现在“三高一扰动”，即高地应力、高地温、高孔隙水压和施工扰动^[2-3]。所以深部硐室经常出现变形速率快、持续时间长、底板突出、支护失效等问题，而同一断面上底板变形最为严重，在支护设计中也往往容易被忽略的弱面^[4-5]。随着煤巷向深部发展，底臌问题更加突出，底臌机制也一直是研究的热点。姜耀东等^[6]根据地质条件、底板围岩岩性和应力水平的差异，将底臌分为 4 种形式：挤压性底臌、挠曲褶皱性底臌、遇水膨胀性底臌以及剪切错动性底臌。事实上，底臌多是这 4 种型式的组合。康红普^[7]对深部软岩巷道稳定性进行了深入的研究，认为底臌是底板岩体塑性流动、岩石扩容、水理作用以及弯折断裂作用的结果。文献[8-10]研究表明，巷道顶板、两帮、底角和底板是一个整体系统，变形相互影响。初明祥等^[11]认为，底板隆起、底角滑移是造成底臌的根本原因，在已有对顶帮部的支护基础上，底臌治理主要集中在底板和底角。

大多数巷道在变形量较大时多采用刷孔和卧底的方式来维持巷道的工作空间，但对装有重要机电设备的绞车房硐室，刷孔和卧底都难以进行，且成本较高，所以必须找到针对该类硐室的有效支护措施。绞车房硐室对底板变形的要求严格，尤其是绞车房基础承受着绞车运营期间的拉应力，基础后缘容易产生拉裂破坏，直接影响下部巷道的开挖生产水平。而降低围岩应力、提高围岩强度和采用合理的支护技术是控制巷道围岩变形的关键技术途径^[12]，本文以淮南矿区顾北矿南翼轨道大巷 2.5 m 绞车房硐室为例，模拟了该类硐室受力特点并进行了支护方式优化，对方案优化后的绞车房硐室采用多重手段进行了全方位监测和结果分析。

2 工程概况

2.1 工程介绍

绞车房平面布置如图 1 所示。南翼轨道大巷 2.5 m 绞车房埋深 -648 m，位于南翼（8~6-2）采区轨道大巷与 -648 南翼轨道大巷相交处，巷道东侧为南翼回风大巷。巷道设计为宽 5.4 m，高 4.5 m。

2.2 地质条件

绞车房硐室距 11-1 煤底 10.1~12.9 m，围岩以泥岩和砂质泥岩为主，呈相间分布，中间夹有厚度约为 0.27 m 的煤线，岩层较破碎，产状为 $35^\circ \angle 13^\circ$ 。距底板约 8 m 与 10 m 处分别有一层厚度为 1.3 m 和 2.2 m 的细砂岩。硐室主要以裂隙渗水和滴

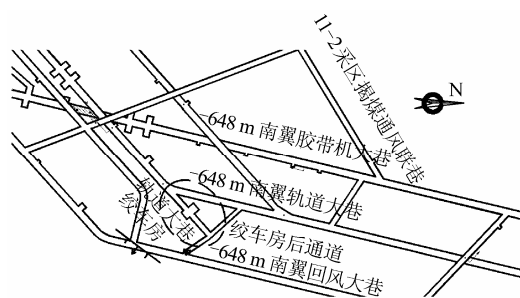


图 1 南翼轨道大巷 2.5 m 绞车房平面布置图
Fig.1 The layout plane of 2.5 m winch room of south wing rail roadway

水为主，但由于绞车房基础要开挖深 2.5 m 的基坑，基坑渗水十分严重，泥岩遇水软化且透水性较差，基坑存在垮塌威胁。

2.3 地应力条件

淮南矿区顾北矿深部地应力场以水平应力为主，构造应力占绝对优势，属于典型的构造应力场类型，地应力量级属高应力水平。最大主应力达到了 19 MPa，方位为 $NE30.9^\circ$ ，倾角为 -5.4° ^[13]。针对绞车房硐室围岩条件差，返修难度极大的特点，必须研究出一种一次到位的支护措施。

3 绞车房底板支护对策研究

3.1 原支护方案介绍与分析

顾北矿绞车房原有加固思路与流程（以南翼 11-2 绞车房为例）：

基于联合支理论，巷道全断面先采用高强预应力锚杆+U 型钢拱架+喷层进行一次支护；再进行预应力锚索二次支护和全断面滞后注浆补强加固，顶板和两帮支护参数见表 1。

表 1 南翼 11-2 绞车房帮顶支护参数
Table 1 Sides and top supporting parameters of winch room 11-2 of south wing

支护材料	支护参数
锚杆	$\Phi 22$ $L=2\ 500$ mm、间排距 700 mm \times 700 mm 预应力 50~70 kN
锚索	$\Phi 22$ $L=6\ 300$ mm、间排距 1 600 mm \times 2 000 mm 预应力不小于 150 kN
喷浆	C20 水泥 喷层 100 mm 水灰比 0.4~0.5 孔深 1 500 mm、管长 800 mm、间排距 2 500 mm \times
注浆	2 100 mm 注浆压力不小于 1.5 MPa，水灰比为 0.6~0.8
U 型钢拱架	U36 钢拱架、排距 500 mm

底板加固流程：1.2 m 浅孔预注浆→施加 $\Phi 22$ L （长度）= 11 000 mm@1 600 mm \times 2 000 mm 底板锚索→底板深孔注浆→浇筑 400 mm C30 底板混凝

土面层。

基础加固流程可分为以下几步：基坑帮部 $\Phi 22$ $L=2\ 500\ \text{mm}@800\ \text{mm}\times 800\ \text{mm}$ 锚杆支护与挂网→基础底部槽钢与 $\Phi 22$ $L=11\ 000\ \text{mm}@1\ 000\ \text{mm}\times 1\ 000\ \text{mm}$ 锚索→基础底部注浆，注浆压力为 $3\ \text{MPa}$ →立模（绑钢筋）→基础整体浇筑。

对采用原底板支护方案下的南翼 11-2 绞车房硐室进行了帮部和底板变形监测。在原支护方案下，南翼 11-2 绞车房硐室沿巷道底角、变截面处存在明显的应力集中现象，绞车滚筒所在的位置也是一个相对薄弱的部分。在集中应力作用下，底角向内剪切滑移，两个变截面处、滚筒位置处及其周边产生了明显的底臃，而且基础在朝向滚筒一侧缺乏足够支撑，导致其在沿巷道走向方向存在明显不均匀倾斜，图 2 为基础后缘处拉伸开裂和沿绳道走向开裂形成的十字交叉裂缝。通过长期的现场监测和理论分析表明，南翼 11-2 绞车房的支护方式存在缺陷，无法满足绞车房硐室对底板变形的高要求。为了保证绞车房安全运营，自建成以来每年要进行两次局部卧底，浪费了大量的人力和财力，也对施工期间的运营构成了威胁。



图 2 2.0 m 绞车基础后缘裂缝

Fig.2 Trail edge crack of 2.0 m winch room foundation

3.2 变截面绞车房硐室应力分布特征模拟

3.2.1 建立模型

由于绞车房位置和断面形状的独特性，其围岩受力特点不同于等截面巷道，利用数值方法对南翼轨道大巷 2.5 m 绞车房硐室支护前应力和位移分布情况进行模拟，目的在于找出应力集中区域和薄弱地带，加以强化支护，从而达到控制硐室变形量的目的，保证硐室底板和绞车房基础稳定。因绞车房硐室涉及非等高巷道变截面交叉问题，而 $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ 前处理功能不佳，本案例借助 ANSYS 建模，划分网格，再导入 $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ 进行运算。

根据前期地应力测试结果，同时参考在淮南矿区进行的大量地应力测试结果^[13]，本次模拟的地应力场取值为：垂直方向为 $17.8\ \text{MPa}$ ，水平方向为

$20\ \text{MPa}$ 。模型采用的具体参数见表 2。

计算模型如图 3 所示，选取了 3 个不同方向的截面（见图 4），数值计算得到的应力分布等值线图和预计最大底臃量分别如图 5 所示。

表 2 岩体力学参数取值

Table 2 Mechanics parameters selection of rockmass					
密度 /(g/cm^3)	内摩擦角 /($^\circ$)	黏聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
2.35	25	0.2	0.13	2.0	0.325

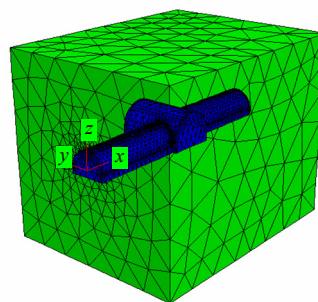


图 3 $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ 计算模型

Fig.3 Calculation model of $\text{FLAC}^{3\text{D}}$

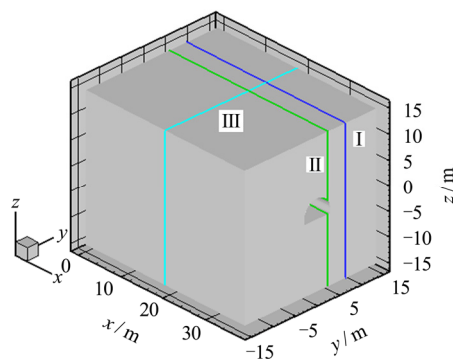


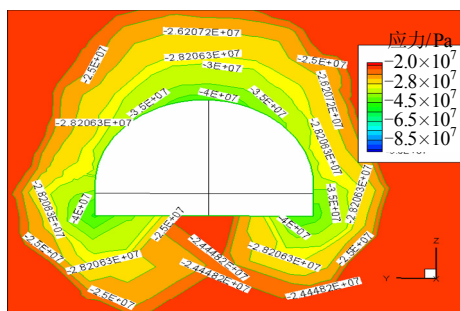
图 4 截面位置示意图

Fig.4 Schematic of the cross section position

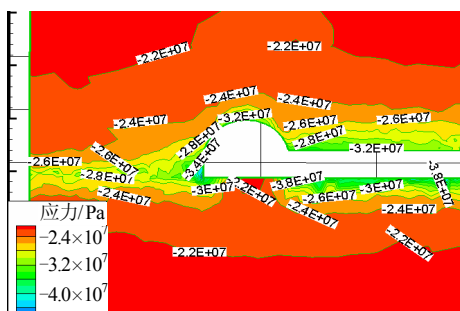
3.2.2 模拟结果与分析

从图 5 可知，底角是应力分布集中区，计算得到最大底臃量超过 $0.8\ \text{m}$ ，底板竖向位移主要集中在底板浅表 $10\ \text{m}$ 范围内，相对离层位移动达 $0.7\ \text{m}$ 以上。结合图 6 可知，绞车房硐室的主要应力释放区为底板、硐室帮部及硐室与巷道搭接处，硐室底板破坏以剪切和张拉破坏为主，硐室与绳道交接处存在大范围压剪破坏，这些区域都应加强支护强度。绞车房横断面与纵断面的位移矢量图如图 7 所示，可以看出，绞车房硐室顶板下沉严重，变截面处帮部由于顶部围岩下沉引起挤入性大变形，绳道底角剪切滑移引起底板突出。

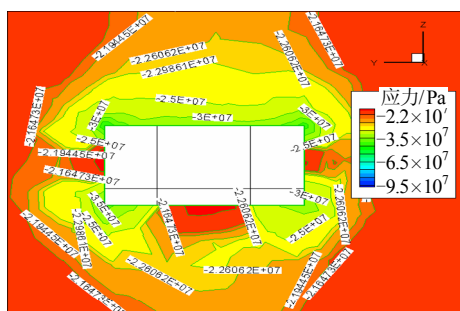
从以上分析可以看出，造成变截面巷道底板变形的主要原因是高地应力引起局部区域应力集中，



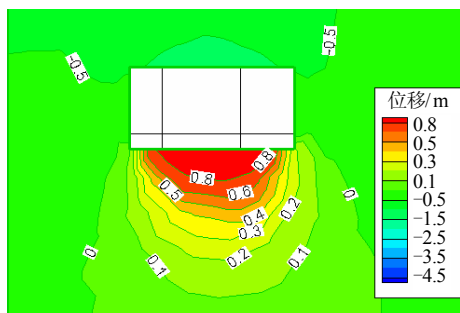
(a) 截面 I 最大主应力



(b) 截面 II 最大主应力



(c) 截面 III 最大主应力



(d) 截面 III 垂直位移

图 5 应力分布及底脚量等值线图

Fig.5 Isoclines of stress and bottom displacement

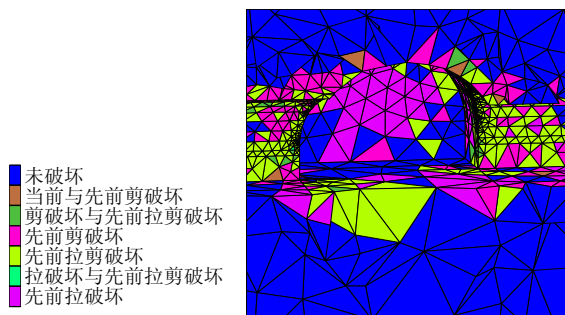
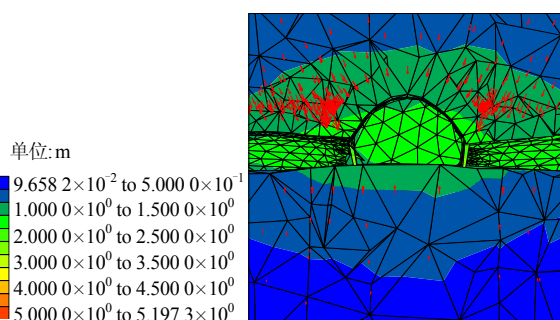
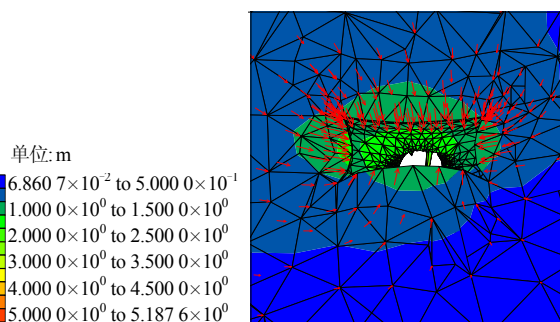


图 6 纵断面单元破坏形态

Fig.6 Failure patterns of the vertical section



(a) 纵断面



(b) 横断面

图 7 位移矢量图

Fig.7 Contour of displacement vector

导致底角发生剪切滑移和巷道底板流动挤入，深部软弱围岩自身承载能力不足，实际表现为巷道底板折断隆起，因此，应在以往支护对策的基础上加强绳道和硐室底角的抗剪切能力，改善巷道围岩接触不连续状况，加强底板的锚固深度和注浆效果。

3.3 底板综合支护优化对策研究

现有的底板优化方法主要从改善断面形状和加强底板支护措施等方面进行。根据主应力方向和侧压系数，高应力巷道选择圆形或椭圆形断面形状最为理想^[14-15]，避免了不连续接触处的应力集中问题，但限制了断面的有效使用面积。对于一些重要的深部软岩硐室可以采用混凝土反底拱的方式^[16]，但其施工较为复杂、成本较高。李学华等^[17]指出，对于高应力的巷道，在不计成本的情况下可以采用巷道应力转移技术，开掘辅助巷道，也取得了较好的效果。常聚才等^[18-19]提出了控制底脚的超挖锚注回填技术。笔者针对深部巷道进行了长期的研究，曾提出针对深部软岩巷道的分布联合支理论^[20]，并成功应用于淮南^[21]和平顶山等矿区，取得了良好的经济效益和社会效益。而对于绞车房此类变截面永久性支护硐室，对变形要求高，底板变形控制尤其严格，为解决这个关键问题，本文基于联合支理论，从改善断面应力集中状况以及加强底板支护措施上对绞车房硐室底板的支护对策进行研究，此外还对巷道顶板和两帮的支护参数进行了优化。

3.3.1 底板围岩承载力增强及支护参数选取

研究表明, 巷道开挖后底板破裂区的深度达到了 0.8 倍的巷道宽度^[6], 顾北矿南翼轨道大巷 2.5 m 绞车房底板破碎区深度至少在 4 m 以上, 数值计算结果表明, 绞车房底板位移离层范围达到了 0.7 m。绞车房底板可认为是泥岩和砂岩互层的组合梁结构^[22], 而砂质泥岩层全部处于破裂带, 泥岩遇水软化, 体积膨胀也是引起底臃的主要原因^[23-25], 这突出了底板及时注浆的重要性。中空注浆锚索具有针对底板加固的独特优势, 首先注浆锚索从内部芯管向四周注浆, 采用了反向注浆, 避免了产生气穴空洞的可能, 注浆压力也得到了较大的提高; 其次, 锚索安装后可立即施加预应力, 起到主动支护的效果。因此, 采用中空注浆锚索同时起到对底板软弱下卧层进行注浆加固和限制岩层垂直方向离层的作用, 将底板与下层厚砂岩串联成组合梁结构, 共同抵抗底板向巷道内部释放的高地压。巷道开挖后底角会形成剪切滑移带^[26], 而注浆花管可以有效地抵抗剪切作用, 切断潜在剪切滑移线, 改善底板围岩受力状态, 与底角锚杆的作用机制相同^[27], 但抗剪切能力得到加强, 如图 8 所示, 图中 p_i 为竖直地应力荷载, φ 为岩石内摩擦角。

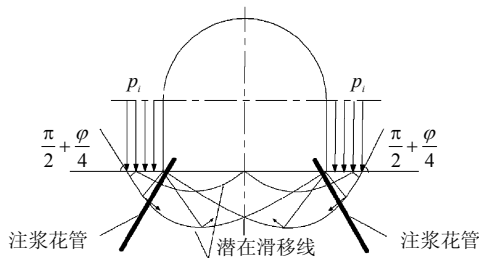


图 8 底板剪切滑移力学模型
Fig.8 Mechanical model of floor shear slip

根据数值计算结果, 底角剪切带范围达到了 1/2 的巷道宽度, 注浆花管长度应覆盖整个剪切带; 绞车房底板离层范围主要集中在底板 10 m 以内, 底板以下 10 m 处有一层厚度为 2.3 m 的细砂岩, 可以作为注浆锚索的端部锚固体。综合以上分析, 绞车房支护参数选择如图 9、10 所示: 图 9 为绞车房底板锚索平面布置, 图 10 为断面支护结构布置, 其中绳道 2-2 断面、3-3 断面支护结构与 4-4 断面相同。

3.3.2 底角应力集中荷载转移

深部巷道在高地压下断面形状会趋于椭圆形。对于直墙半拱形硐室, 底角处容易产生应力集中, 常表现为底角的剪切滑移, 引起巷道底板鼓起和混凝土面层开裂。利用底角三角地梁+注浆花管的形

式(见图 11、12)可以改善底角断面形状、切断剪切滑移线, 三角地梁能够承受较大的压应力和剪应力, 可以有效地缓解底角处由于断面形状不光滑过渡引起的应力集中现象, 从而与混凝土面层形成一个整体式的抗压和抗剪承载结构。

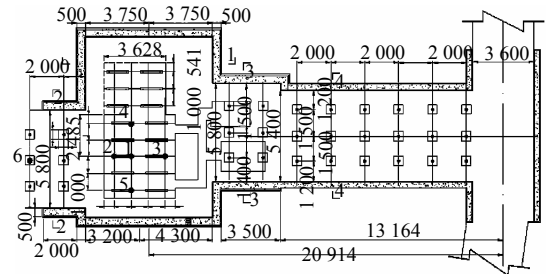


图 9 绞车房与绞车基础锚索布置平面图(单位: mm)
Fig.9 The layout plane of anchor cable distribution in winch room (unit: mm)

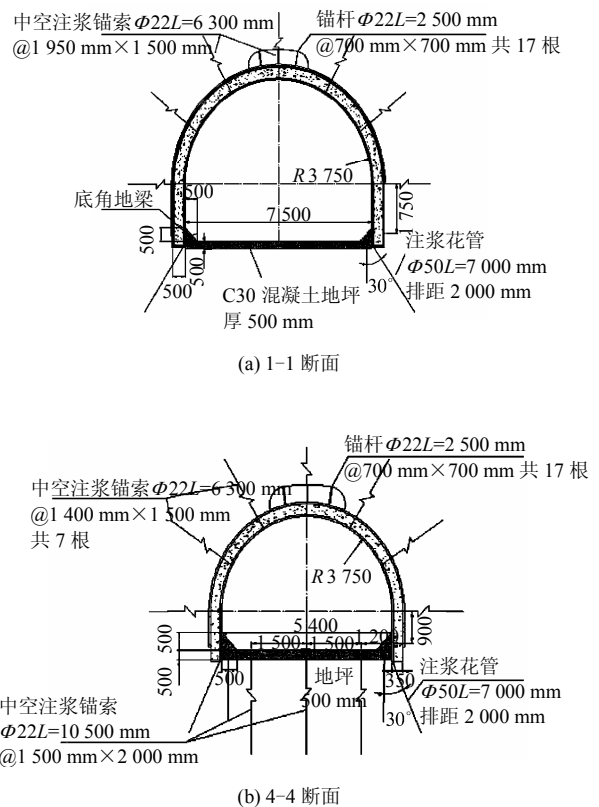


图 10 绞车房支护结构布置(单位: mm)
Fig.10 Supporting structure of the winch room (unit: mm)

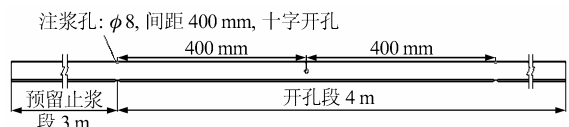


图 11 注浆花管结构图
Fig.11 Structure diagram of grouting tube

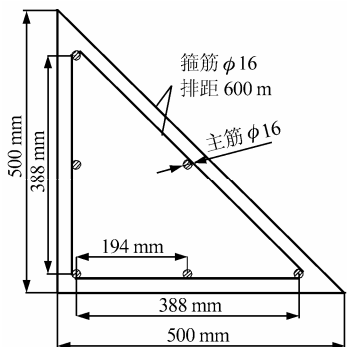


图 12 底角地梁钢筋配置
Fig.12 Reinforcement configuration of the base ground beam

3.3.3 绞车房底板与基础加固流程

基于联合支护原理，优化方案中绞车房底板加固流程可以分为以下几步： $L = 1\ 500\ \text{mm} @ 2\ 500\ \text{mm} \times 2\ 100\ \text{mm}$ 浅部注浆→挖卸压槽→中空注浆锚索施工→锚索注浆封孔→底角注浆花管→底角地梁→C30 混凝土面层。

绞车房基础深 2.5 m，以泥岩为主，岩性较差，基坑帮部有塌方危险，施工过程采用锚网喷对基坑帮部进行加固，挖一段锚一段。基础底板施加槽钢组合中空注浆锚索，锚索端部深入底板以下的细砂岩；为了维护帮部稳定和承受基础偏心受拉在后缘产生的拉应力，距基础底部 1 m 处施加水平中空注浆锚索，帮部锚索/杆与基础浇筑成整体。基础加固流程可分为以下几步：基坑帮部 $\Phi 22\ L = 2\ 500\ \text{mm} @ 800\ \text{mm} \times 800\ \text{mm}$ 锚杆支护→距基础底部 1 m 处沿水平方向施加 $\Phi 22\ L = 10\ 500\ \text{mm}$ ，间距为 1 600 mm 中空注浆锚索→基础底部槽钢与 $\Phi 22\ L = 10\ 500\ \text{mm} @ 1\ 000\ \text{mm} \times 1\ 000\ \text{mm}$ 中空注浆锚索→ $\Phi 50\ L = 7\ 000\ \text{mm}$ ，间距为 2 000 mm 注浆花管施工与注浆→基础底部中空锚索注浆，注浆压力为 6 MPa→立模（绑钢筋）→基础整体浇筑。

4 支护效果监测分析

为观测支护方案的优化效果，按照南翼 11-2 绞车房的布点位置对轨道大巷 2.5 m 绞车房两帮和底板变形进行了监测分析（见图 13），此外还采用深部位移计对底板离层情况以及采用应力计对基础混凝土内部应力进行了监测（见图 14）。

表面位移监测采用十字布点法，利用中国科学院武汉岩土力学研究所自行设计的 WRM-3 型丝尺两用收敛计，精度可达 0.01 mm。深部位移监测采用南京水利部南京自动化研究所研发的振弦式多点位移计，如图 14 所示。

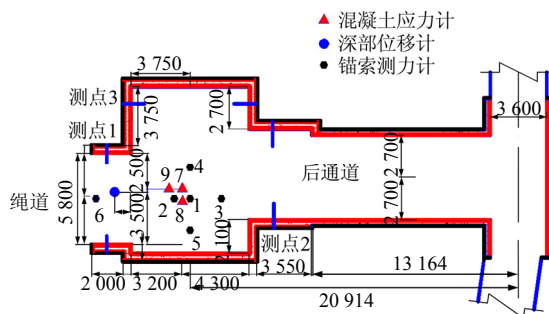


图 13 轨道大巷 2.5 m 绞车房测站位置
Fig.13 Station location of 2.5 m winch room of the south wing rail roadway

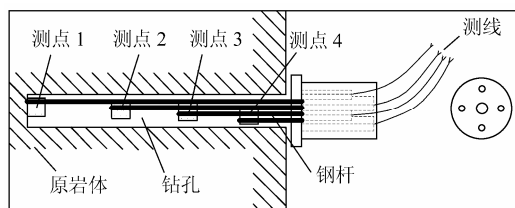
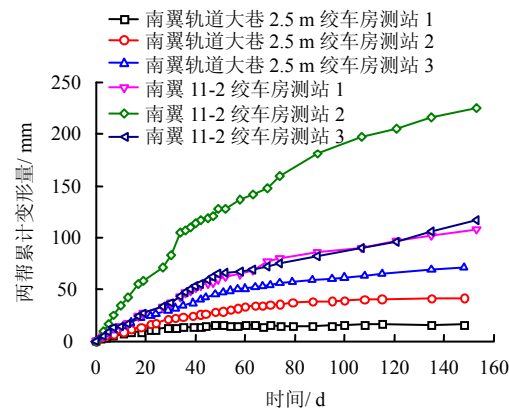
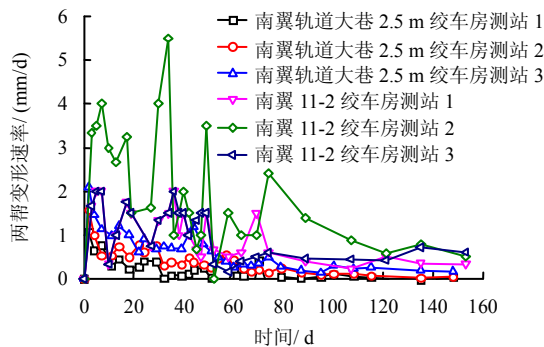


图 14 多点位移计底板测孔深度布置示意图
Fig.14 Depth of hole arrangement of multipoint extensometer in the roadway floor

监测结果如图 15~19 所示。



(a) 累计变形量



(b) 变形速率

图 15 两帮表面累计收敛位移与速率
Fig.15 Total side deformation and side deformation rate

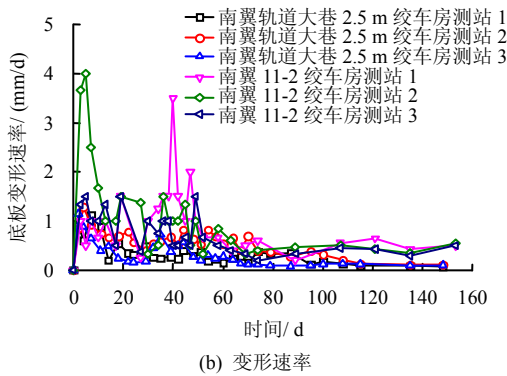
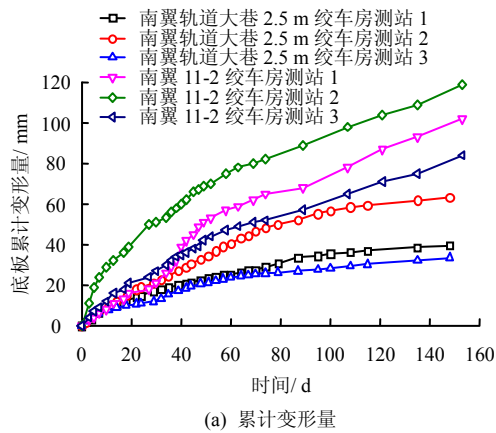


图 16 底板表面收敛位移与速率
Fig.16 Total floor heave deformation and deformation rate

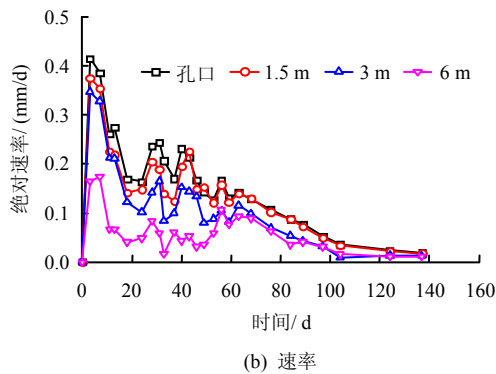
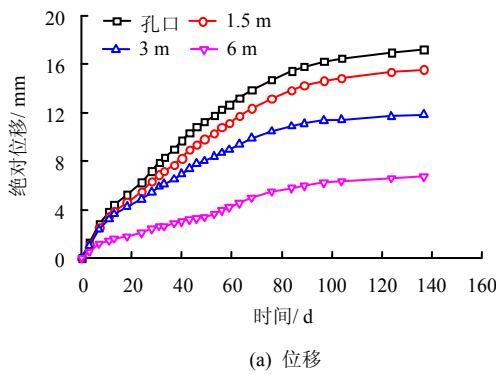


图 17 底板深部位移与速率
Fig.17 The deep deformation and deformation rate of the winch room floor

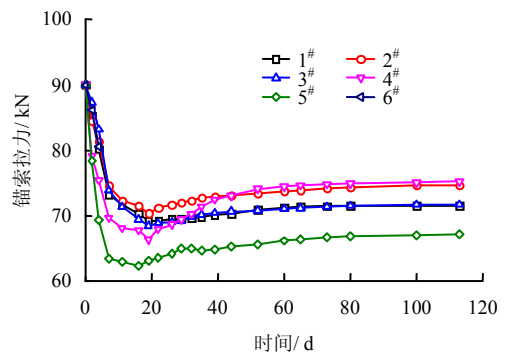


图 18 绞车房底板锚索拉力
Fig.18 The tension of anchor cable in the winch room floor

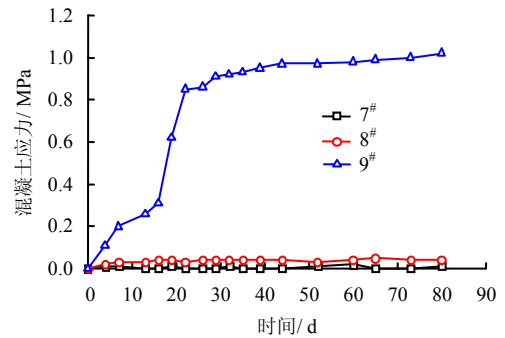


图 19 混凝土基础内部应力
Fig.19 The internal stress of concrete foundation

从图 15 可以看出, 相同时长, 南翼 11-2 绞车房两帮位移明显大于南翼轨道大巷 2.5 m 绞车房, 测站 2 处 148 d 累计变形量达到了 225 mm; 南翼轨道大巷 2.5 m 绞车房测站 3 处累计变形量最大, 在第 153 d 达到了 117 mm, 相对南翼 11-2 绞车房而言, 降低了近 50%。南翼轨道大巷 2.5 m 绞车房两帮从支护完成后开始变形速率较大, 经过近 80 d 的震荡调整后基本收敛, 3 个测站处的变形速率均低于 0.2 mm/d。

从图 16 可以看出, 南翼轨道大巷 2.5 m 绞车房底板变形速率在第 108 d 降低到了 0.2 mm/d 以下, 在第 135 d 以后基本上稳定在 0.1 mm/d, 收敛趋势明显, 说明新支护方案下底板变形得到了很好的控制。南翼 11-2 绞车房在第 153 d 底板变形速率仍处于 0.5 mm/d 以上, 累计变形最大达到了 119 mm, 对于绞车房硐室而言变形速率过大。

根据数值模拟结果和施工能力, 深部位移设置了 1.5、3.0、6.0、10.5 m 4 个深度。由于底板位移主要集中在 10 m 的范围内, 假定底板以下 10.5 m 测点处底板变形为 0, 其他各点的绝对位移如图 17 所示。可以看出, 在南翼轨道大巷 2.5 m 绞车房底板中没有出现明显的离层现象, 底板治理初期, 巷道深部位移发展较快, 主要集中在前 15 d, 之后 40 d

出现震荡调整,说明注入的水泥浆开始胶结,锚注发挥作用,底板变形逐渐稳定,与底板表面位移的变化规律基本一致。新方案对帮顶支护稍有加强(见表 1 和图 10),但主要差异体现在锚索选型和注浆时机上,南翼 11-2 绞车房采用常规锚索,锚索施工完成后,通过后期对帮部补注水泥—水玻璃双液浆,而南翼轨道大巷 2.5 m 绞车房帮顶采用中空注浆锚索,锚索施作完成后立即采用高压注浆,及时修复了围岩破裂区。此外,南翼轨道大巷 2.5 m 绞车房底角施工了注浆花管和底角地梁,加固了底角处的围岩并降低了应力集中效应,对帮部位移也起到了一定的限制作用。

从图 18 可以看出,锚索施加预应力后会有一个跌落过程,20 d 后锚索受力增大,说明锚索进一步约束底板变形。2[#]、4[#]锚索受力水平较 5[#]锚索高,说明基础底板中心附近的竖直位移较底角边缘大,而在未支护前用 FLAC^{3D} 进行的数值模拟结果表明,底角处的应力集中诱导剪切滑移引起的竖直位移最大(见图 5(c)、5(d)),说明底角注浆花管和底角地梁有效地控制住了底角剪切滑移作用。1[#]、2[#]、3[#]锚索拉力变化规律基本一致,且 1[#]、3[#]锚索拉力随时间变化曲线基本重合,这是由于 1[#]、2[#]、3[#]位于巷道同一纵断面上,底板变形规律相同(其中 6[#]锚索测力计损坏)。锚索拉力变化反映了基坑底板变形,从第 20 d 开始,锚索拉力变化较小说明基础底板累计变形较小。

为了获得南翼轨道大巷 2.5 m 绞车房混凝土基础内的应力分布和量值,至少需要布置 3 个混凝土应力计:7[#]混凝土应力计值反映绞车房基础横向应力(垂直于巷道走向),8[#]混凝土应力计值反映绞车房基础竖向应力,9[#]混凝土应力计值反映绞车房基础纵向应力(平行于巷道走向)。在基础浇筑完成后需将混凝土应力计进行调频归 0,所测得的应力是在基础浇筑完成后的附加应力,也只有这部分应力才能反映混凝土的后期变形。由图 19 可见,7[#]应力值一直在 0 附近波动,说明基础混凝土横向没有附加应力产生,基础横向挤压不明显;8[#]应力值基本稳定在 0.04 MPa,这是由于上覆混凝土的自重引起,且后期没有发生变化,说明底板稳定,混凝土竖直方向上没有产生附加应力;9[#]应力值先急剧增加,20 d 后逐步稳定在 1 MPa 左右,说明在基础浇筑完成后巷道纵向受到挤压,这与淮南矿区最大水平构造应力与巷道走向呈 16° 斜交有关,巷道底板内应力和变形受巷道走向与地应力的相对方位影响较大;但基础内应力远小于最大水平构造应力,主

要因为轨道大巷和绞车房后通道起到了辅助巷道作用,大部分应力发生转移。

5 结 论

(1) 数值模拟结果表明,变截面绞车房硐室底脚是由于底角剪切滑移导致底板向巷道内挤入引起,受底角应力集中程度影响较大。施作注浆花管+底角地梁限制了底角剪切滑移位移,改善了底角应力集中状况。

(2) 南翼轨道大巷 2.5 m 绞车房底板以泥岩为主,底板突出严重,中空注浆锚索可以有效地限制底板变形,并且通过高压注浆及时修复底板围岩。

(3) 底板和基础中的应力受区域地应力和临近巷道影响较大,最大水平构造应力会影响底板变形,对于绞车房硐室而言,巷道走向应尽可能沿平行于最大水平应力方向布置。

(4) 采用注浆锚索+注浆花管+三角地梁的底板联合支护方式不仅可以很好地满足绞车房硐室对底板变形的要求,还能显著降低两帮围岩变形,同时也保证了绞车房基础的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 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, 2005, 35(1): 91-99.
ZHOU Hong-wei, XIE He-ping, ZUO Jian-ping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths[J]. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(1): 91-99.
- [2] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [3] KANG YONGSHUI, LIU QUANSHENG, XI HAILONG. Numerical analysis of THM coupling of a deeply buried roadway passing through composite strata and dense faults in a coal mine[J]. *Bull Eng Geol Environ*, 2014, 73: 77-86.
- [4] 刘恺德,刘泉声,刘滨,等. 地质异常带巷道稳定控制对策及效果研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2486-2497.
LIU Kai-de, LIU Quan-sheng, LIU Bin, et al. Research on control measures and effects for roadway stability in geological anomaly zone[J]. *Chinese Journal of Rock*

- Mechanics and Engineering**, 2011, 30(12): 2486—2497.
- [5] 王其胜, 李夕兵, 李地元. 深井软岩巷道围岩变形特征及支护参数的确定[J]. 煤炭学报, 2008, 33(4): 364—367.
WANG Qi-sheng, LI Xi-bing, LI Di-yuan. Surrounding rock deformation properties and determination of support parameters of soft rock roadway in deep mine[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(4): 364—367.
- [6] 姜耀东, 赵毅鑫, 刘文岗, 等. 深部开采中巷道底鼓问题的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2396—2401.
JIANG Yao-dong, ZHAO Yi-xin, LIU Weng-gang, et al. Research on floor heave of roadway in deep mining[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(14): 2396—2401.
- [7] 康红普. 软岩巷道底鼓的机制及防治[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
Kang Hong-pu. Floor heave mechanism and control of soft roadway [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993: 69—105.
- [8] 王卫军, 冯涛. 加固两帮控制深井巷道底鼓的机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 808—811.
WANG Wei-jun, FENG Tao. Study on mechanism of reinforcing sides to control floor heave of extraction opening[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(5): 808—811.
- [9] 李树清, 王卫军, 潘长良, 等. 加固底板对深部软岩巷道两帮稳定性影响的数值分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 123—126.
LI Shu-qing, WANG Wei-jun, PAN Chang-liang, et al. Numerical analysis of influence of reinforcing floor on stability of sides in deep soft rock roadways[J]. **Journal of China Coal Society**, 2007, 32(2): 123—126.
- [10] 侯朝炯, 何亚男, 李晓, 等. 加固巷道帮, 角控制底鼓的研究[J]. 煤炭学报, 1995, 20(3): 229—234.
HONG Chao-jiong, HE Ya-nan, LI Xiao, et al. Reinforcing sidewalls and corners of gateway to control floor heave[J]. **Journal of China Coal Society**, 1995, 20(3): 229—234.
- [11] 初明祥, 王清标, 夏均民. 采空侧巷道底鼓形成机制与防治技术研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 413—417.
CHU Ming-xiang, WANG Qing-biao, XIA Jun-min. Study of formation mechanism of floor heave at goaf side of roadway and prevention technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.2): 413—417.
- [12] 陈炎光, 陆士良. 中国煤矿巷道围岩控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
CHEN Yan-guang, LU Shi-liang. Strata control around coal roadways in China [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1994: 68—99.
- [13] 刘泉声, 刘恺德. 淮南矿区深部地应力场特征研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2089—2098.
LIU Quan-sheng, LIU Kai-de. Characteristics of in situ stress field for deep levels in Huainan coal mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(7): 2089—2098.
- [14] 李桂臣, 张农, 王成, 等. 高地应力巷道断面形状优化数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(5): 652—658.
LI Gui-chen, ZHANG Nong, WANG Cheng, et al. Optimizing the section shape of roadways in high stress ground by numerical simulation[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2010, 39(5): 652—658.
- [15] 孟庆彬, 韩立军, 乔卫国, 等. 深部高应力软岩巷道断面形状优化设计数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(5): 650—656.
MENG Qing-bin, HAN Li-jun, QIAO Wei-guo, et al. Numerical simulation of cross-section shape optimization design of deep soft rock roadway under high stress[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2012, 29(5): 650—656.
- [16] 刘传孝, 王龙, 刘志浩, 等. 软岩硐室稳定性的复合结构柔性反底拱控制时效分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1464—1468.
LIU Chuan-xiao, WANG long, LIU Zhi-hao, et al. Time effects of flexible inverted arch with composite structures to control stability of chamber adjoining with soft rock masses[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(8): 1464—1468.
- [17] 李兴华, 黄志增, 杨宏敏, 等. 高应力硐室底鼓控制的应力转移技术[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3): 296—300.
LI Xue-hua, HUANG Zhi-zeng, YANG Hong-min, et al. Stress transfer technique of controlling chamber's floor heave under high mining stress[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2006, 35(3): 296—300.

- [18] 谢广祥, 常聚才. 超挖锚注回填控制深部巷道底臃研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1242—1246.
XIE Guang-xiang, CHANG Ju-cai. Study on overcutting-bolting & grouting-backfilling concrete to control the floor heave of deep mine roadway[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(8): 1242—1246.
- [19] 常聚才, 谢广祥. 深部岩巷底鼓机制及底板超挖锚注回填技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 361—369.
CHANG Ju-cai, XIE Guang-xiang. Floor heave mechanism and over-excavation & grouting-backfilling technology in rock roadway of deep mine[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2011, 28(3): 361—369.
- [20] 刘泉声, 高炜, 袁亮. 煤矿深部岩巷稳定控制理论与支护技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 187—192.
LIU Quan-sheng, GAO Wei, YUAN Liang. Stabilization control theory, supporting technique and application of deep rock laneway in coal mine[M]. Beijing: Science Press, 2010: 187—192.
- [21] 刘泉声, 康永水, 白运强. 顾桥煤矿深井岩巷破碎软弱围岩支护方法探索[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3097—3104.
LIU Quan-sheng, KANG Yong-shui, BAI Yun-qiang. Research on supporting method for deep rock roadway with broken and soft surround rock in Guqiao Coal Mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 3097—3104.
- [22] 张振刚, 张鸿儒, 张昀青, 等. 层状围岩隧道施工爆破与锚固研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(2): 74—77.
ZHANG Zhen-gang, ZHANG Hong-ru, ZHANG Yun-qing, et al. Research on dynamiting and anchor in tunneling of stratified rock[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2003, 16(2): 74—77.
- [23] 冒海军, 郭印同, 王光进, 等. 黏土矿物组构对水化作用影响评价[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2723—2728.
MAO Hai-jun, GUO Yin-tong, WANG Guang-jin, et al. Evaluation of impact of clay mineral fabrics on hydration process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2723—2728.
- [24] WANG J, GUO Z, YAN Y, et al. Floor heave in the west wing track haulage roadway of the Tingnan Coal Mine: Mechanism and control[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2012, 22(3): 295—299.
- [25] 李廷春, 卢振, 刘建章, 等. 泥化弱胶结软岩地层中矩形巷道的变形破坏过程分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1077—1083.
LI Ting-chun, LU Zhen, LIU Jian-zhang, et al. Deformation and failure process analysis of rectangular roadway in muddy weakly cemented soft rock strata [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(4): 1077—1083.
- [26] 刘泉声, 卢兴利. 煤矿深部巷道破裂围岩非线性大变形及支护对策研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3273—3279.
LIU Quan-sheng, LU Xing-li. Research on nonlinear large deformation and support measures for broken surrounding rocks of deep coal mine roadway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3273—3279.
- [27] 杨生彬, 何满潮, 刘文涛, 等. 底角锚杆在深部软岩巷道底臃控制中的机制及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 2913—2920.
YANG Sheng-bin, HE Man-chao, LIU Wen-tao, et al. Mechanics and application research on the floor anchor to control the floor heave of deep soft rock roadway[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.1): 2913—2920.
- [15] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation**, 1970, 9: 1629—1654.
- [16] LADD C C, FOOTT R, ISHIHARA K. Stress-deformation and strength characteristics, state of the Art. Reports[C]//Anon. Proc. 9th ICSMFE(Vol.2). [S. l.]: [s. n.], 1977: 421—440.
- [17] 李作勤. 黏土归一化性状的分析[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(5): 67—75.
LI Zuo-qin. Analysis of the normalized property of cohesive clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 9(5): 67—75.
- [18] 张光永, 徐辉, 王靖涛, 等. 等 p 路径下砂土本构关系的归一化特性及数值建模方法[J]. 固体力学学报, 2008, 29(1): 85—90.
ZHANG Guang-yong, XU Hui, WANG Jing-tao, et al. Normalization characteristic of sand under the stress path of constant p and the corresponding numerical modeling method[J]. **Chinese Journal of Solid Mechanics**, 2008, 29(1): 85—90.

 上接第 3505 页