

# 软岩大变形巷道底臃破坏机制与支护技术研究

郑朋强<sup>1</sup>, 陈卫忠<sup>1,2</sup>, 谭贤君<sup>1</sup>, 戴永浩<sup>1</sup>

(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. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:** 随着资源开采由浅部向深部转移, 如何有效地控制底臃成为深部软岩巷道支护中首要考虑的问题。针对国投新集刘庄煤矿围岩破坏严重、难支护的情况, 结合刘庄煤矿制冷硐室所处的地质环境特点, 在巷道围岩的物理力学特性、岩石矿物成分分析、现场地应力测量、现场大型真三轴流变试验的基础上, 分析巷道底臃的主控因素, 研究表明: 本巷道底臃变形主要是由于软弱围岩在较高的水平构造应力作用下, 产生明显的流变变形所致。在此基础上, 对该巷道进行支护设计优化, 提出一种由U型钢可压缩支架和泡沫混凝土填充结合预应力锚索的被动卸压与主动施压相结合的底臃变形控制方案, 并通过数值方法验证该方案的合理性。

**关键词:** 采矿工程; 煤矿; 软岩; 巷道; 底臃; 大变形; 支护技术

**中图分类号:** TD 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2015)增1-3143-08

## STUDY OF FAILURE MECHANISM OF FLOOR HEAVE AND SUPPORTING TECHNOLOGY IN SOFT ROCK OF LARGE DEFORMATION ROADWAY

ZHENG Pengqiang<sup>1</sup>, CHEN Weizhong<sup>1,2</sup>, TAN Xianjun<sup>1</sup>, DAI Yonghao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

**Abstract:** As underground resources exploitation goes deeper and deeper, how to effectively control the floor heave becomes a key problem in roadway support. Considering the surrounding rock damage serious and difficult to support of Liuzhuang coal mine in Xinji, combined with the geological environment characteristics of refrigeration cavern of Liuzhuang coal mine, a large number of in-situ and laboratory tests were done including geostress measurement, true triaxial rheological test, physico-mechanical properties of roadway surrounding rock and rock mineral composition analysis. The research results show that floor heave of this roadway is mainly caused by the flowing deformation of the weak wall rock under the influence of high horizontal tectonic stress. Optimized support design is carried out for this roadway based on analysis above, proposing the floor heave control strategy of compressible steel arch and foam concrete combined with pre-stressed anchor cable. The rationality of the scheme is verified by means of numerical simulation.

**Key words:** mining engineering; coal mine; soft rock; roadway; floor heave; large deformation; supporting technique

**收稿日期:** 2014-02-25; **修回日期:** 2014-07-11

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51208499, 51379007, 51309217)

**作者简介:** 郑朋强(1985-), 男, 2008年毕业于山东科技大学采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事煤矿及地下工程锚固机制与支护技术及计算机仿真方面的研究工作。E-mail: pqzheng\_1231@163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0185

## 1 引言

软岩巷道大变形是煤矿生产建设中的难题,目前国内外尚未很好解决这一技术问题。进入深部开采后,底臃量已占据巷道变形量的主要部分<sup>[1-3]</sup>,因此,开展软岩大变形巷道底臃破坏机制与支护技术研究具有重要意义。

对巷道底臃机制的研究已经有不少成果,康红普和陆士良<sup>[4]</sup>采用弹塑性薄板理论对底板岩层进行了挠曲和承载能力的分析。姜耀东和陆士良<sup>[5]</sup>在大量现场研究、实验室模型试验和数值计算的基础上,全面讨论了煤矿巷道的底臃特征及其机制,认为底臃包括底板岩层挠曲、泥岩遇水膨胀、底板岩层在偏应力的作用下扩容、流变等。为有效控制底臃,国内外学者进行了大量的研究工作,提出了许多控制技术。其中代表性的工作包括:何满潮等<sup>[6]</sup>以徐州矿区发生非线性大变形破坏现象的深部煤巷围岩结构体为研究对象,从围岩3个部位相互作用的角度,提出了利用锚网注浆增加两帮岩体强度及减小收缩量,限制两帮对底板两侧形成的固定约束向深处转移,以减小发生底臃的底板宽度;对底角施加刚性锚杆及注浆,分解来自两帮的挤压应力,提高底角抵抗剪切滑移破坏的强度来控制底臃的新方法。刘泉声等<sup>[7]</sup>根据顾北煤矿南翼(11-2)胶带机巷道实际工程,依据长期的现场调查和变形监测,提出了采用混凝土反拱地坪、深浅孔注浆、高预应力组合锚索的针对深井软岩破碎巷道底臃综合处置技术,同时研制开发底板锚索钻机,解决了底板组合锚索孔施工困难。康红普<sup>[8]</sup>针对新汶矿区千米深井巷道条件,分析了锚杆支护作用,提出高预应力、强力支理论,通过大幅度提高支护系统的初期支护刚度与强度,保持围岩的完整性,减少围岩强度降低;开发出高预应力、强力支护系统,包括强力锚杆、强力钢带及强力锚索系列材料。此外,不少学者还提出了底角锚杆支护技术、超挖锚注回填技术、切槽卸压技术、加固帮角技术等<sup>[9-19]</sup>。特别需要指出的是,国内外大量专家学者对难以可靠支护的软岩巷道围岩控制问题进行了大量的重点攻关,特别是对软岩巷道变形机制及支护技术做出了许多有益的探索,也取得了不少成果,为解决松软围岩巷道的围岩控制与技术应用方面奠定了深入研究的基础。

本文针对国投新集刘庄煤矿围岩破坏严重、难

支护的情况,结合刘庄煤矿制冷硐室所处的地质环境特点,在巷道围岩的物理力学特性、岩石矿物成分分析、现场地应力测量、现场大型真三轴流变试验的基础上,从分析巷道底臃的主控因素入手,研究了底臃变形机制,并在此基础上,提出了一种由U型钢可压缩支架和泡沫混凝土填充结合预应力锚索的被动卸压与主动施压相结合的底臃变形控制方案,并通过数值方法验证了方案的合理性。

## 2 工程概况

国投新集矿区位于安徽省北部,矿井分布在淮南和阜阳境内。可采煤层13,18层,单斜构造,大部分属缓倾斜及倾斜煤层,局部为急倾斜煤层,现各矿均处于深部开采,平均采深在-700 m以下,地应力水平较高。从地质构造来看,刘庄矿东起F5断层,西起F12断层,南以F1断层及上部可采煤层17-1煤-1000 m至地面投影线为界,北至1煤层露头,围岩节理裂隙较为发育。现场围岩主要以砂岩和泥岩为主,砂岩较完整,而泥岩裂隙发育,胶结差,极易破碎,取芯时泥岩受水浸蚀后迅速损伤破坏,风化开裂。根据现场的地质条件,巷道主要采用喷锚网加金属支架的支护方案,但是该支护方案在煤矿巷道掘进和运营过程中,出现了大量底臃、大变形巷道,成为了制约煤矿安全高效生产的瓶颈问题(见图1)。

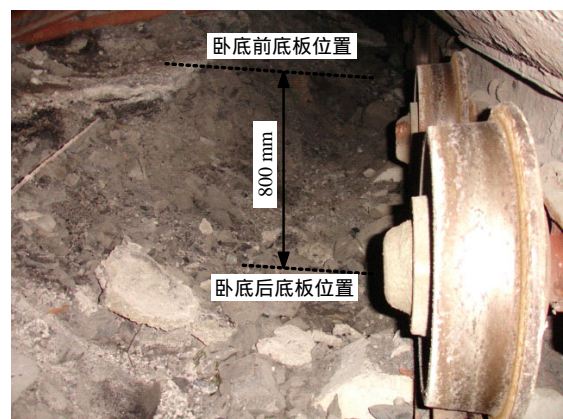


图1 刘庄煤矿软岩巷道底板卧底前后位置示意图

Fig.1 Sketch of floor position of Liuzhuang coal mine soft roadway before and after dinting

## 3 制冷硐室底臃机制分析

为了探清制冷硐室底臃破坏的原因,进行了巷道围岩的物理力学特性、岩石矿物成分分析、现场

地应力测量、现场大型真三轴流变试验等。通过研究发现，导致制冷硐室巷道底臃的因素主要有以下几点：

### 3.1 围岩强度低

从现场揭示的岩性可知，制冷硐室巷道底臃大变形段主要以泥岩为主。现场取芯得到的泥岩试样的单轴试验结果如图 2 所示，其平均单轴抗压强度为 14.52 MPa，强度较低，在高地应力作用下容易产生较大变形。

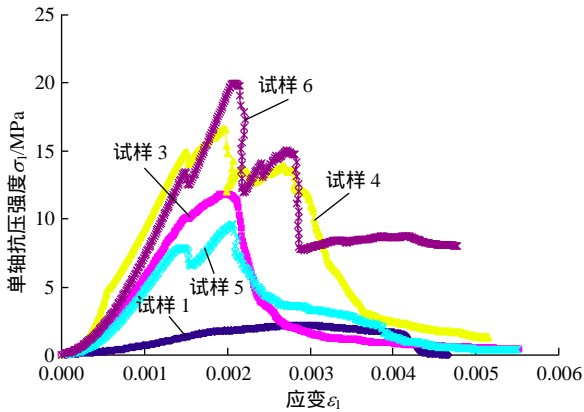


图 2 泥岩单轴试验结果

Fig.2 Results of axial compression test of mudstone samples

矿物分析表明，现场泥岩主要由高岭石、石英、少量的菱铁矿和伊利石等组成，蒙脱石含量为 20%，高岭石含量为 25%，伊利石含量为 10%左右，黏土矿物的总含量为 55%左右，导致泥岩在遇水后容易产生膨胀变形，膨胀率可达 5%(见图 3)。因此该泥岩在遇水后，力学性质进一步劣化，饱和状态下泥岩的单轴抗压强度仅为 2.18 MPa，仅为其自然状态的 15%。



图 3 泥岩遇水崩解试验图片

Fig.3 Pictures of disintegration test of mudstone

由于巷道围岩力学性质较低，导致巷道开挖后，围岩产生的塑性区范围较大，围岩变形破坏由隧道浅部向深部扩展，加上巷道底部容易积水，进一步加剧了岩体的软化，导致巷道底部围岩变形量增大，产生较大的底臃变形。总之，巷道泥岩强度低和遇

水易软化是产生明显底臃变形的主要内在因素。

### 3.2 地应力水平较高

巷道穿过地层的地质构造较为复杂，泥岩和砂岩交替成层分布，且节理裂隙较为发育。为得到该区地应力的分布情况，采用水压致裂法，对该区进行了地应力测试研究。地应力的测试初步结果如表 1 所示，可以看出该区最大的水平应力达到了 23.65 MPa，为其自然状态单轴抗压强度的 1.63 倍，饱和单轴抗压强度的 10.85 倍，为典型的高地应力软岩巷道。制冷硐室开挖后，巷道底部层状分布的围岩，在较高的水平构造应力作用下，很容易产生压曲失稳破坏，导致巷道底部围岩破碎程度进一步加剧，底臃变形不断增大。

表 1 制冷硐室水压致裂初步成果

Table 1 Preliminary results by hydraulic fracturing method in refrigeration cavern

测点深度/m	破裂压力 $P_b$ /MPa	重张压力 $P_r$ /MPa	关闭压力 $P_s$ /MPa	最大主应力 $\sigma_{H1}$ /MPa	最小主应力 $\sigma_{H3}$ /MPa
21	14.12	13.31	12.32	23.65	12.32
18	16.10	12.50	10.17	18.01	10.17
15	13.35	8.53	6.30	10.37	6.30

### 3.3 围岩流变效应明显

制冷硐室底臃变形发展规律表明，巷道的底臃变形并不是隧道开挖完成后立即发生，而是随着时间的增加逐渐增大，具有明显的时间效应，这与破碎围岩的流变特性密切相关。

为了研究制冷硐室围岩的流变变形特性，进行了现场的三轴蠕变试验研究<sup>[20]</sup>，不同荷载水平下，围岩变形随时间的蠕变曲线如图 4 所示。从图中可以看出，轴向应力水平为 3.75 MPa 时，围岩的蠕变变形主要以衰减蠕变为主，很快趋于稳定；当轴向应力水平为 5.76 MPa 时，围岩出现了明显的稳定蠕变阶段，当轴向应力水平达到 6.20 MPa 时，围岩的蠕变变形迅速增大，并很快产生了破坏。

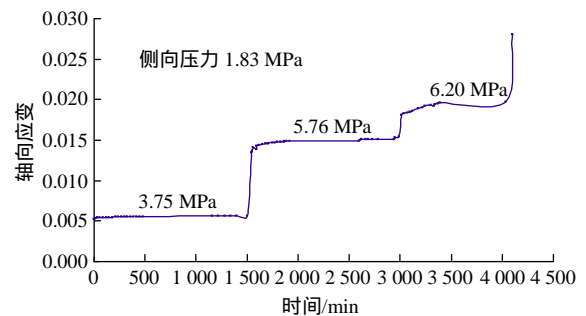


图 4 现场三轴试验蠕变曲线

Fig.4 Field creep tests curves in the roadway



从图 4 可以看出，制冷硐室围岩在较低的偏应力水平下，即会发生明显的稳定蠕变，这将会导致围岩的底臃变形随着时间的增加而不断增大。如底臃变形得不到有效控制，将最终导致巷道的破坏。

从上面的分析可以看出，制冷硐室底臃变形的主要原因是：软弱围岩在较高的水平应力作用下，流变变形过大所致。此外，现场采用的直墙拱锚喷混凝土加工字钢钢拱架的支护方案(见图 5)，既没有形成封闭的支护结构，又不能与围岩蠕变协调变形，进一步加剧了巷道底臃破坏的发展。

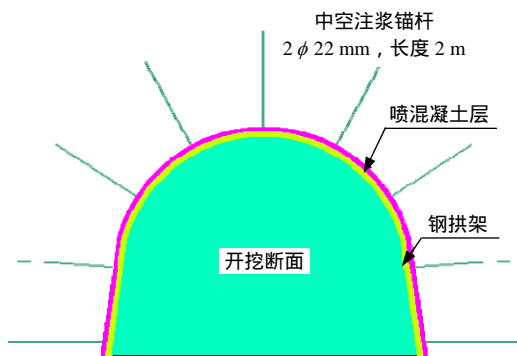


图 5 刘庄煤矿制冷硐室原支护设计

Fig.5 The original support design of Liuzhuang coal mine refrigeration cavern

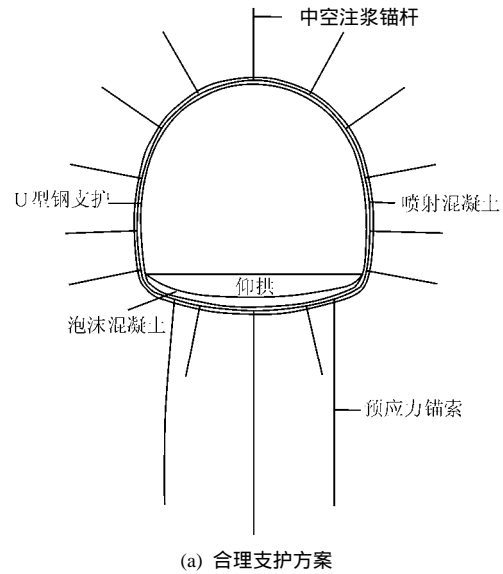
## 4 考虑底臃时间效应的支护设计优化

### 4.1 合理的支护方案研究

从节 3 的分析可知，制冷硐室底臃主要是由于软弱围岩，在较高的水平构造应力作用下，产生明显的流变变形所致，因此巷道仰拱结构的受力主要以形变压力为主。在这种情况下，采用提高仰拱深度的刚性支护方案，由于仰拱与围岩之间不能协调变形，还是容易出现仰拱由于形变压力过大而发生开裂破坏，达不到治理底臃变形的效果。合理的仰拱支护方案一方面要具有与底臃协调变形的能力，能够有效地释放围岩的形变压力，另一方面又要有一定的主动支护强度，防止底臃变形过大，导致底部围岩过于破碎而威胁整个巷道的安全稳定。

基于上述分析，本文提出了一种被动卸压与主动施压相结合的底臃变形控制方案：在传统支护方案的基础上，采用全封闭的 U 型钢可压缩支架代替工字钢钢拱架，为保证 U 型钢可压缩支架在仰拱施工后的缩动性能，在仰拱混凝土与 U 型钢之间填充变形能力较高的泡沫混凝土材料。为防止底臃变形过大，导致围岩破碎而完全失去自承能力，巷道底

部围岩施工了能够提供主动支护力的预应力锚索，增加底部围岩的完整性(见图 6)。



(a) 合理支护方案



(b) 合理支护方案现场施工

图 6 控制底臃的合理支护方案

Fig.6 Reasonable support schemes for controlling floor heave

针对刘庄矿制冷硐室采用 29 号 U 型钢支护，仰拱与围压之间设置有厚度为 30 cm 的泡沫混凝土，在拱底垂直向下施作 3 根预应力锚索，左右两根  $\phi 19.8 \text{ m} \times 6.3 \text{ m}$ ，中间一根  $\phi 19.8 \text{ m} \times 9.3 \text{ m}$ ，预应力为 200 kN。

### 4.2 合理支护方案支护效果分析

#### 4.2.1 围岩蠕变模型建立

为了分析文中提出的支护方案对底臃变形的控制效果，本节采用数值方法进行验证。首先需要建立能够反映底臃变形时间效应的围岩蠕变模型。从围岩现场三轴蠕变试验结果的分析可以看出，围岩的蠕变变形随着偏应力和时间的增大而不断增大，可以采用常用的幂指数模型来反映其蠕变特性。幂指数模型的函数表达式可以表示为

$$\varepsilon = Aq^m t^n \tag{1}$$

式中： $A, m, n$  均为待定参数； $\varepsilon$  为应变； $q$  为蠕

变应力； $t$  为时间。

采用最小二乘法对现场三轴蠕变试验结果进行拟合，以期得到现场围岩的蠕变参数。拟合结果如图 7 所示，可以看出幂指数模型可以很好地反映围岩的蠕变特性。拟合得到的围岩的蠕变参数如表 2 所示。

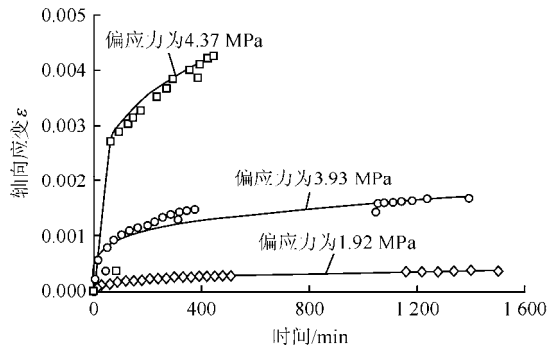


图 7 蠕变试验拟合值与试验值对比

Fig.7 Comparison between results from numerical and measured creep strain

表 2 岩体蠕变参数

Table 2 The creep parameters of rock mass

偏应力水平/MPa	$A/10^{-5}$	$m$	$n$
1.92	5	1.2	0.012 2
3.93	5	1.2	0.234 0
4.37	5	1.2	0.401 0
均值	5	1.2	0.216 0

为模拟 U 型钢可压缩支架的支护效果，采用田洪铭等<sup>[21]</sup>提出的接头单元模型模拟 U 型钢卡缆的作用。计算过程中假设 U 型钢卡缆所提供的稳定支护阻力设为 200 kN，卡缆允许的最大滑移量为 20 cm。

为保证仰拱施做后 U 型钢可压缩支架的支护效果，仰拱与底部围岩之间添加了一层泡沫混凝土材料<sup>[21]</sup>。泡沫混凝土材料是利用机械方式将发泡剂(水溶液)制作成泡沫，再将泡沫混入到硅质材料(砂、粉煤灰)、钙质材料(水泥、石灰)等以及各种外掺料和水组成的混合料在泥浆中搅拌，在搅拌过程中，硬质颗粒黏附到泡沫的外壳，使其变为相互隔开的单个气泡，这些气泡的存在一方面降低了混凝土强度，另一方面增大了混凝土的变形能力，可以保证 U 型钢在仰拱施工之后仍具有缩动性能。本次分析过程中泡沫混凝土材料采用理想弹塑性模型进行模拟，其基本物理力学参数如表 3 所示。

预应力锚索支护效果的模拟一直是一个难点，本次分析过程中，对预应力锚索的支护作用进行了一定的简化，将锚索预应力转化为施加在围岩底部

表 3 岩体物理力学参数

Table 3 Physico-mechanical parameters of rock mass

围岩类别	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	黏聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
粉砂岩	8.0	0.25	1.00	45.0	2 500
泥岩	2.0	0.30	0.40	35.0	2 500
砂质岩	4.0	0.30	0.45	38.0	2 500
煤	3.0	0.30	0.30	40.0	2 500
碳质页岩	1.0	0.35	0.20	27.0	2 500
锚杆	210.0	0.30			7 800
锚索	210.0	0.10			7 800
泡沫混凝土	0.6	0.45	0.20	25.0	800
初期支护	30.0	0.27	2.38	58.7	2 500
二次衬砌	74.5	0.27	10.50	39.5	2 500

的均布支护力。此外，围岩的弹塑性力学参数以及其他支护结构的物理力学参数如表 3 所示。

#### 4.2.2 有限元模型的建立

根据制冷硐室煤层底板等高线图，制定三维计算模型尺寸为 100 m×100 m×100 m，制冷硐室长度为 100 m，硐室埋深 750 m，分布于粉砂岩层中。模型顶部施加上部岩层压力。根据制冷硐室区域钻孔柱状图，并适当合并部分较薄地层，在计算区域内，共划分 12 个岩层，从模型顶部向下依次为：粉砂岩、细砂岩、砂质泥岩、煤 17-1、粉砂岩、泥岩、细砂岩、泥岩、粉砂岩、细砂岩、粉砂岩、细砂岩。三维模型岩层分布如图 8 所示，模型网格划分如图 9 所示，制冷硐室预应力锚杆与锚索布置如图 10 所示。

根据制冷硐室的实际施工步骤，本次数值分析过程共分为 5 步进行：(1) 初始地应力平衡；(2) 西区 2 号石门开挖与支护；(3) 制冷硐室全断面开挖，沿硐室径向方向超开挖 20 cm；(4) 架设钢拱架，施作预应力锚杆、锚索，喷射混凝土，围岩注浆支护；(5) 硐室围岩流变 10 a。

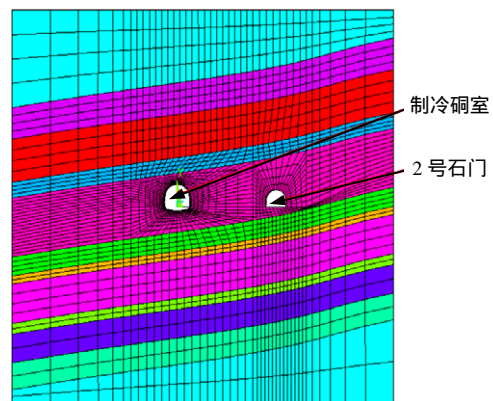


图 8 三维模型岩层分布图

Fig.8 3D numerical model of rock mass distribution

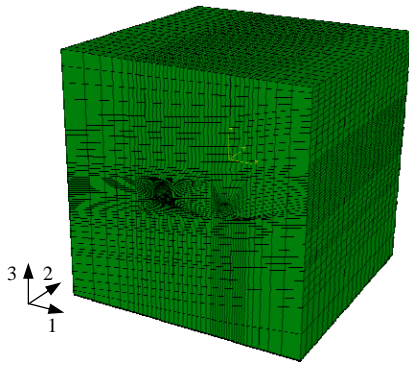


图9 制冷洞室三维计算模型

Fig.9 3D numerical model of refrigeration cavern

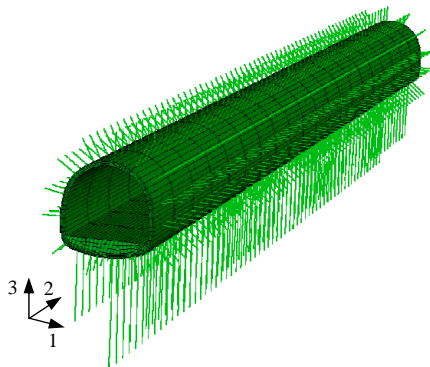


图10 制冷洞室预应力锚杆与锚索布置

Fig.10 Layout of prestressed bolt and cable in refrigeration cavern

### 4.2.3 计算结果分析

洞室开挖完成后，破碎岩体在高地应力作用下必然会产生明显的流变变形，巷道开挖 10 a 后，围岩的蠕变应变分布如图 11 所示，可以看出在巷道的底部和拱顶围岩均有明显的蠕变应变分布，而巷道底部蠕变变形的增大是导致巷道底臃变形不断增大的主要原因。

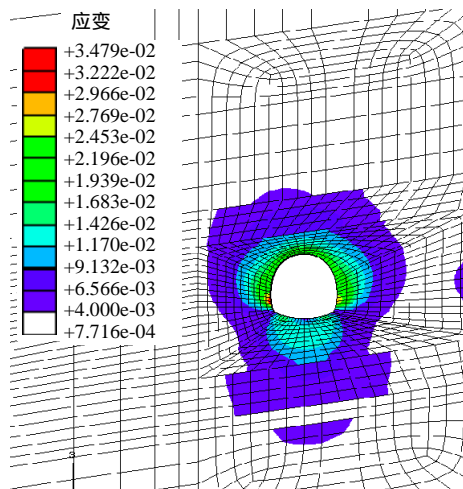


图 11 巷道开挖 10 a 后蠕变应变分布

Fig.11 Distribution of creep strain of roadway after 10 years excavation

巷道底臃变形随时间的变化规律如图 12 所示，从图中可以看出，本次采用的 U 型钢支护允许围岩产生一定的蠕变变形，预应力锚索提供的主动支护力又可以将底臃变形控制在允许的范围之内，巷道建成 10 a 后底部围岩的变形被控制在 0.15 m 的范围之内，量值相对较小，不会对巷道稳定产生影响。

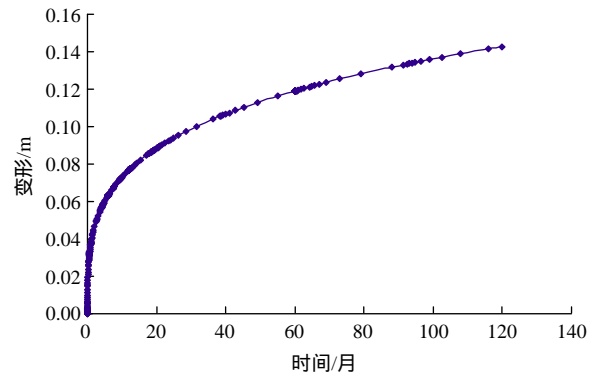
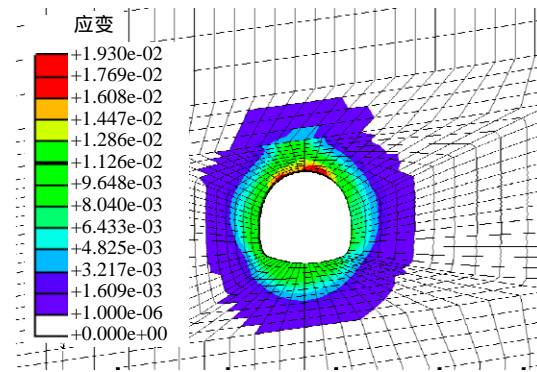


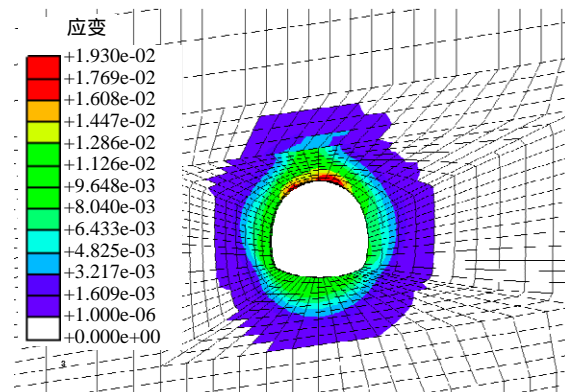
图 12 巷道底臃变形随时间的变化规律

Fig.12 Variation law of floor heave with time

此外，由于支护方案合理，巷道建成 10 a 后围岩的塑性破坏区基本没有进一步增大，如图 13 所示。可以看出巷道开挖 10 a 后，其底部的围岩塑性区仍控制在 1 倍洞径范围之内，没有形成大面积的塑性破坏区。



(a) 开挖初期



(b) 开挖 10 a 后

图 13 蠕变变形导致的巷道塑性区变化规律

Fig.13 Variation laws of plastic zones with time



由于 U 型钢加泡沫混凝土的支护方案可以有效地减小仰拱的形变压力, 因此巷道施工 10 a 后, 仰拱的压应力增加相对较小。如图 14 所示, 最大压应力为 10.6 MPa, 不会导致仰拱的受压破坏, 保证了巷道的安全运营。

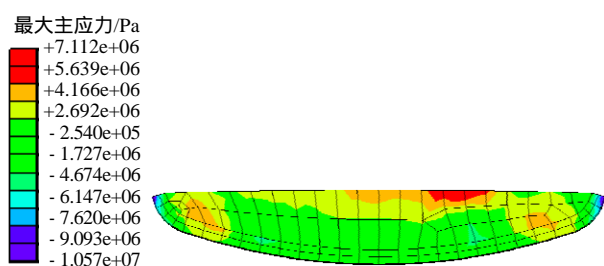


图 14 围岩体流变 10 a 后仰拱最大主应力云图

Fig.14 Maximum principle stress nephogram of inverted arch of surrounding rock after rheological deformation 10 years

## 5 结 论

本文针对国投新集刘庄煤矿围岩破坏严重、难支护的情况, 结合刘庄煤矿制冷硐室所处的地质环境特点, 在大量现场试验和室内试验的基础上, 研究了底臌变形机制。并根据制冷硐室的地质条件和地应力特征, 优化硐室的断面设计方案, 对制冷硐室的长期稳定性进行计算分析, 得到的主要结论如下:

(1) 从地应力测试结果可知, 巷道的地应力水平较高最大达 23.65 MPa, 而围岩的强度相对较低, 室内单轴强度仅为 14.52 MPa, 软弱围岩在高地应力的长期作用下, 产生了随时间不断增大的流变变形, 这是导致巷道底臌不断增大的主要原因。

(2) 根据仰拱受力主要以形变压力为主的特点, 提出了一种由 U 型钢可压缩支架和泡沫混凝土填充结合预应力锚索的被动卸压与主动施压相结合的底臌变形控制方案。

(3) 数值分析表明, 被动卸压与主动施压相结合支护方案, 一方面使支护有一定的变形能力, 减小了仰拱所受到的形变压力, 另一方面又可以提供足够的支护力, 使围岩的塑性破坏区控制在允许的范围之内, 防止变形过大而影响巷道整体稳定。

### 参考文献(References):

[1] 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): 2 803-2 813.(HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 803-2 813.(in Chinese))

[2] 陈宗基. 地下巷道长期稳定性的力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 1-20.(TAN Tjongkie. The mechanical problems for the long-term stability of underground galleries[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1982, 1(1): 1-20.(in Chinese))

[3] 刘泉声, 高 玮, 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: 3-25.(LIU Quansheng, GAO Wei, YUAN Liang. Stability control theory and support technology of roadway in deep coal and its application[M]. Beijing: Science Press, 2010: 3-25.(in Chinese))

[4] 康红普, 陆士良. 巷道底鼓机理的分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(4): 362-373.(KANG Hongpu, LU Shiliang. An analysis on the mechanism of roadway floor heave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(4): 362-373.(in Chinese))

[5] 姜耀东, 陆士良. 巷道底臌机制的研究[J]. 煤炭学报, 1994, 19(4): 343-351.(JIANG Yaodong, LU Shiliang. Investigation of mechanism of floor heave of roadway[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(4): 343-351.(in Chinese))

[6] 何满潮, 张国锋, 王桂莲, 等. 深部煤巷底臌控制机制及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 1): 2 593-2 598.(HE Manchao, ZHANG Guofeng, WANG Guilian, et al. Research on mechanism and application to floor heave control of deep gateway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.1): 2 593-2 598.(in Chinese))

[7] 刘泉声, 刘学伟, 黄 兴, 等. 深井软岩破碎巷道底臌原因及处置技术研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 566-571.(LIU Quansheng, LIU Xuewei, HUANG Xing, et al. Research on the floor heave reasons and supporting measures of deep soft-fractured rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 566-571.(in Chinese))

[8] 康红普. 软岩巷道和硐室的底臌机制及卸压技术的研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 1991.(KANG Hongpu. Research on mechanism of floor heave of soft rock tunnel and roadway and pressure relief technology[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 1991.(in Chinese))

[9] 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): 3 273-3 279.(LIU Quansheng, LU Xingli. 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): 3 273-3 279.(in Chinese))

[10] 刘泉声, 张 华, 林 涛. 煤矿深部岩巷围岩稳定与支护对策[J].

- 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 732 – 3 737. (LIU Quansheng, ZHANG Hua, LIN Tao. Study on stability of deep rock roadways in coal mines and their support measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 732 – 3 737. (in Chinese))
- [11] 柏建彪, 侯朝炯. 深部巷道围岩控制原理与应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(2): 145 – 148. (BAI Jianbiao, HOU Chaojiong. Control principle of surrounding rocks in deep roadway and its application[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, 35(2): 145 – 148. (in Chinese))
- [12] 张 农, 侯朝炯, 王培荣. 深井三软煤巷锚杆支护技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 437 – 440. (ZHANG Nong, HOU Chaojiong, WANG Peirong. On bolting support of roadway in deep mine's soft coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4): 437 – 440. (in Chinese))
- [13] 何重伦. 深井三软煤层巷道围岩控制技术与工程实践[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2006, 21(3): 9 – 12. (HE Chonglun. The control technology and engineering practice of the surrounding rock in deep mine's soft coal seam[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology: Natural Science, 2006, 21(3): 9 – 12. (in Chinese))
- [14] 王卫军, 冯 涛. 加固两帮控制深井巷道底臃的机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 808 – 811. (WANG Weijun, 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. (in Chinese))
- [15] STANKUS J C, PENG S S. Floor bolting for control of mine floor heave[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1994, 46(9): 1 099 – 1 102. (in Chinese))
- [16] 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): 1 242 – 1 246. (Xie Guangxiang, Chang Jucai. Study on overcutting-bolting and grouting-backfilling concrete to control the floor heave of deep mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1 242 – 1 246. (in Chinese))
- [17] SUN J, WANG L G. Numerical simulation of grooving method for floor heave control in soft rock roadway[J]. Mining Science and Technology(China), 2011, 21(1): 49 – 56. (in Chinese))
- [18] 侯朝炯, 何亚南, 李 晓, 等. 加固巷道帮、角控制底臃的研究[J]. 煤炭学报, 1995, 20(3): 229 – 234. (HOU Chaojiong, HE Yanan, 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. (in Chinese))
- [19] 王卫军, 彭 刚, 黄 俊. 高应力极软破碎岩层巷道高强度耦合支护技术研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 223 – 228. (WANG Weijun, PENG Gang, HUANG Jun. Research on high-strength coupling support technology of high stress extremely soft rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 223 – 228. (in Chinese))
- [20] 陈卫忠, 谭贤君, 吕森鹏, 等. 深部软岩大型三轴压缩流变试验及本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1 735 – 1 744. (CHEN Weizhong, TAN Xianjun, LU Senpeng, et al. Research on large-scale triaxial compressive rheological test of soft rock in depth and its constitutive model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1 735 – 1 744. (in Chinese))
- [21] 田洪铭, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 高地应力软岩隧道合理支护方案研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2 285 – 2 292. (TIAN Hongming, CHEN Weizhong, TAN Xianjun, et al. Study of reasonable support scheme for soft rock tunnel in high geostress zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2 285 – 2 292. (in Chinese))