文章编号：1673-3363-(2015)02-0291-07

亭南煤矿东翼轨道大巷底鼓力学机制及控制技术

王炯，郝育喜，郭志飚，朱国龙，韩战

(中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室，力学与建筑工程学院，北京 100083)

摘要 为解决亭南煤矿东翼轨道大巷底鼓问题，采用现场调查、围岩物化成分分析、吸水软化试验和数值分析等方法，研究了亭南煤矿软岩巷道底鼓特征、影响因素和变形力学机制。结果表明：底鼓主要是由于巷道底板岩层岩性软弱膨胀性强，底板在无支护状态下成为巷道变形和应力释放的主要空间，巷道底角软岩在两帮应力传递作用下产生剪切塑性大变形，向底板中部挤压形成底鼓。提出了底板隔水、加固、控制变形的治理原则，采用混凝土反底拱+金属焊接网+底角管缝式锚杆的支护形式，对底板进行加固。通过现场监测和数值分析，表明新支护能够改善底板围岩受力状态，切断底角剪切滑移变形，有效控制巷道底鼓变形。

关键词 底鼓；复合型软岩；变形力学机制转化；反底拱；数值分析

中图分类号 TD 353 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.02.019

Floor heave mechanism and control technology for east rail roadway of Tingnan coal mine

WANG Jiong，HAO Yuxi，GUO Zhibiao，ZHU Guolong，HAN Zhan

(State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering，School of Mechanics & Civil Engineering，China University of Mining &Technology (Beijing)，Beijing 100083，China)

Abstract In order to solve the floor heave problems in the east rail roadway of Tingnan coal mine, using in-site survey, the physical and chemical composition analysis of surrounding rock, the water softening experiments and numerical analysis methods, the soft rock characteristics, influence factors and deformation mechanics mechanism have been researched. It is concluded that the main reason for the floor heave is mainly due to the strata lithology with weak floor but strong expansibility. Main deformation of roadway and stress release will appear in the bottom when there is no supporting. And the soft rocks in base angle will have large plastic deformation under the stress transfer from both sides of roadway, then extrudes to the center of the floor, forming the floor heave. Hence, corresponding control technology including impermeable base, strengthening, and deformation control is put forward by using the concrete arch-metal welding net-base angle seam pipe bolt support forms. Field monitoring and numerical analysis show that the new support can improve the floor rock mass condition and reduce the base shear deformation.

Key words floor heave；composite soft rock；deformation mechanism；anti-heave arch；numerical analysis

收稿日期：2013-06-23
基金项目：国家自然科学基金项目(51374214)
作者简介：王炯(1984—)，男，安徽省蒙城县人，博士，从事冲击地压防治及深井软岩巷道支护方面的研究。
E-mail：wangjiong0216@163.com **Tel**：13810192953

随着煤炭开采深度逐年增加，在深部“三高一扰动”的开采环境下，常会面对巷道围岩变形量大，变形持续时间长，难以维护等困扰正常生产的问题，尤其是结交程度差、强度低的松散软弱岩层，在地应力作用下，易产生大变形破坏现象[1-3]，在巷道围岩变形破坏中，底鼓破坏占据其中大部分[4]。实际生产中由于支护条件限制或者认识的不足，多数巷道底板处于无支护的状态，成为巷道围岩稳定性最薄弱的环节，往往为软岩巷道破坏的关键点。严重的底鼓变形对正常的生产造成重大影响，因此底鼓作为矿井生产安全问题之一，一直是相关学者研究的热点问题。

何满潮等[5-8]研究了煤矿巷道底鼓原因，认为顶板和两帮的作用以及底板物化成分对底鼓有较大影响，提出围岩变形控制耦合支护理论，采用顶帮底三控技术限制底鼓的发生；姜耀东、陆士良[9-10]采用物理模拟方法研究了巷道底鼓的机理，并将其分为 4 种类型：挤压流动型、挠曲褶皱型、剪切错动型和遇水膨胀型，并对各类型的原因进行了分析；康红普[11]研究了巷道围岩物化和力学机理，提出加固法、卸压法等治理方法；刘泉声[12-13]针对高地应力破碎软岩巷道底鼓问题，提出底板超挖、预应力锚索、深孔注浆、拱角锚杆等联合支护技术。杨生彬、何满潮[14]研究了底脚锚杆控制底鼓的机理，并应用于实践。谢广祥[15]采用超挖锚注回填技术控制深部巷道底鼓。Sun Jin 等[16]提出软岩巷道底角切槽卸压技术等。

深井软岩底鼓是煤矿巷道围岩变形控制的主要问题之一，尤其是在底板岩石膨胀性强、地质构造应力显著、巷道立体交叉处底鼓问题更为突出。对于底鼓治理问题，在充分认识底鼓机理的基础上，提出具有针对性的控制措施，才能达到控制底鼓和保障良好经济效益并行的目的。

本文在总结已有底鼓控制技术的基础上，结合亭南煤矿东翼轨道大巷工程实际，对深井底板膨胀性软岩底鼓控制技术进行研究。根据现场调查，总结巷道底鼓变形特征，对底鼓大变形破坏主控因素和变形力学机制进行分析，提出隔水、加固、控制变形的治理原则，采用混凝土反底拱+金属焊接网+底角管缝式锚杆的底鼓控制对策。

1 工程概况

东翼轨道大巷设计长度为 458 m，巷道埋深 518 m，与东翼回风巷和东翼胶带巷平行，与东翼一面胶带平巷相交，与已经施工完毕的 113 回风平巷立体交叉，其顶板与 113 回风平巷底板最小距离为 600 mm。东翼轨道大巷沿 8#煤层掘进，留底煤 1.5 m。

东翼轨道大巷断面形状为矩形，宽 4 200 mm，高 3 000 mm，原支护形式为锚网喷+锚索支护，顶部锚杆规格 Φ18 mm×L2100 mm，帮部锚杆规格 Φ16×L1600 mm，间排距均为 800 mm×800 mm；顶部中间布置 1 根 Φ15.24 mm×L6500 mm 锚索。在原支护基础上发生严重底鼓现象，影响生产和安全。

2 工程地质条件

2.1 巷道围岩岩性

亭南井田开采 8#煤位于中下侏罗统延安组含煤地层，煤层平均厚度 11.4 m，单轴抗压强度为 36 MPa，巷道直接顶为泥岩、砂质泥岩，平均厚度 2.65 m，单轴抗压强度为 30.5 MPa，易冒落，属不稳定顶板；基本顶为 11.28 m 厚的细砂岩，单轴抗压强度为 79.2 MPa；直接底为 3.3 m 厚铝质泥岩，节理、裂隙发育，岩层较为破碎，单轴抗压强度为 16.2 MPa；基本底为 3.71 m 泥岩，单轴抗压强度为 20.4 MPa。可见，巷道围岩强度特点为：泥岩强度<煤的强度<砂岩强度，即底板强度<两帮强度<基本顶强度。

2.2 围岩物化成分分析

对东翼轨道大巷围岩试样进行全岩矿物以及黏土矿物 X 射线衍射分析测试，得到了其顶板岩层的全岩矿物成分和黏土矿物成分，结果见表 1，2 所示。

表 1 矿物 X-射线衍射全岩分析结果

Table 1 Mineral compositions of rock by X-ray diffraction analysis

层位	岩性	矿物种类和含量/%							非晶质	黏土矿物总量/%
		石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	莫莱石		
顶板	砂质泥岩	40.8	7.1	—	5.5	3.2	2.7	—	9.1	42.7
直接底	铝质泥岩	28.6			—	—	—	14.2	—	57.2
基本底	泥岩	39	8.8	—	—	—	—	10.1	—	52.1

表 2　矿物 X-射线衍射黏土矿物分析结果

Table 2　Mineral compositions of clay by X-ray diffraction analysis

层位	岩性	黏土矿物相对含量/%					混层比(%S)		
		S	I/S	I	K	C	C/S	I/S	C/S
顶板	砂质泥岩	—	35	5	51	9	—	35	—
直接底	铝质泥岩	—	62	4	34	—	—	25	—
基本底	泥岩		26	2	60	12		28	

通过 X-射线衍射分析结果可知，直接顶砂质泥岩中黏土矿物含量较高为 42.7%，黏土矿物中伊/蒙混层含量为 35%，高岭石为 51%；底板铝质泥岩和泥岩中石英和黏土矿物为主要成分，其中黏土矿物含量高，均超过 50%，黏土矿物中伊/蒙混层最高含量为 62%，基本底泥岩中高岭石含量高达 60%。可见，巷道围岩中含有大量黏土矿物，尤其是底板岩层具有强吸水性和膨胀性的高岭石和伊/蒙混层的含量高，因此吸水膨胀性强[17]。

2.3　吸水软化特征

对巷道底板铝质泥岩进行室内吸水强度试验，试验曲线如图 1。

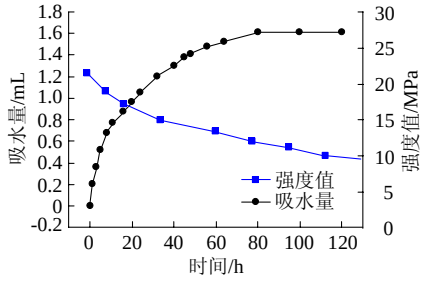


图 1　底板铝质岩石室内吸水试验

Fig.1　Floor aluminous rocks water absorption test

从试样吸水曲线可知，在吸水过程中，吸水量随时间而增大，初始吸水速率比较大，吸水量呈线性增长，随吸水时间增加到一定时间后，吸水速率逐渐减小，曲线变缓，最终达到平衡；试样强度随吸水量的增加而减小，泥岩遇水的软化特性较为强，约 25 h 后，强度衰减系数为 0.62，最终强度衰减系数为 0.39。

现场调研和室内试验分析可知，东翼轨道巷底板岩性为软弱泥岩，节理裂隙发育；黏土矿物成分含量高，吸水性膨胀性强，吸水后强度衰减严重，底板揭露后遇水、空气后迅速风化、软化和崩解，造成岩石黏聚力和弹性模量迅速降低[18]，且巷道埋深较大，应力较高，使得巷道底板变形量大，给支护带来困难。从现场破坏情况、工程地质条件和工程岩体特性分析可知，该巷道工程软岩类型为高应力-节理化-膨胀性复合型软岩[19]。

3　巷道变形破坏机制分析

3.1　巷道变形破坏特征

东翼轨道巷在原支护形式下，围岩产生大变形破坏现象，为了确定该巷道底鼓量及底鼓破坏范围，对巷道底鼓段破坏情况进行现场调研，进行详细的实地测量并绘制出巷道底鼓断面示意图，如图 2 所示。从现场实际观测可知，该巷道底鼓具有以下特征。

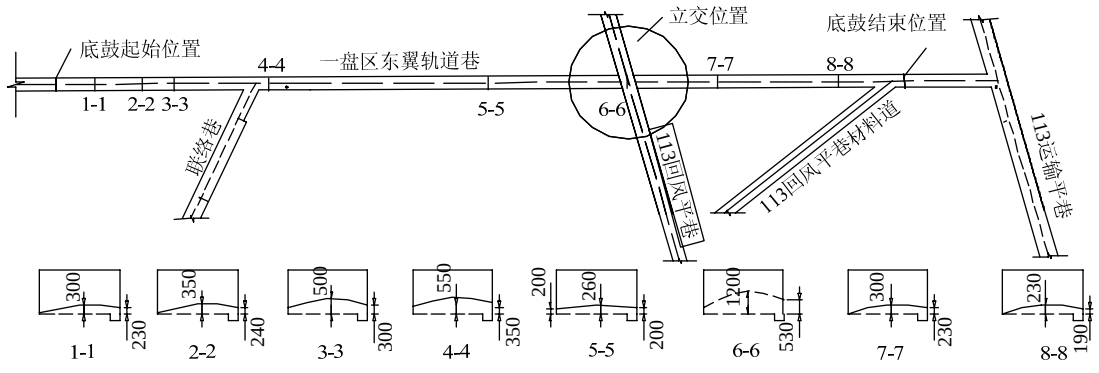


图 2　巷道底鼓量调查　(mm)

Fig.2　Surveying roadway floor heave

1) 底鼓破坏范围大：底鼓范围占巷道总长 3/4 以上，其中底鼓量超过 500 mm 的巷道长度约占巷

道总长度 1/2，在与 113 回风平巷立体交叉点应力集中处底板变形最为严重，底鼓量达到 1 200 mm。

2) 顶板和两帮变形较小而底鼓严重，底板中部开裂，巷道靠近水沟一侧底鼓量较另一侧大，呈现明显的非对称变形。

3) 巷道底板揭露铝质泥岩部位破坏相对严重。

3.2 原支护围岩变形破坏数值分析

为分析巷道在原支护形式下的变形破坏过程，应用有限差分程序 FLAC^{3D}[20]，构建三维计算模型，进行数值分析。计算范围长×宽×高＝40 m×30 m×40 m，共划分 13 200 个单元。

该模型限制侧面水平移动，底部固定，模型上表面为应力边界，施加的荷载为 14 MPa，模拟上覆岩体的自重边界，材料采用 Mohr-Coulomb 本构模型。巷道支护力学模型如图 3。

经过对模型的数值计算，得到巷道表面位移和塑性区分布情况，如图 4，5。

表 3 岩体物理力学参数表

Table 3 The parameters of rock mass

岩层	密度/(kg·m^{-3})	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
粉砂岩	2 650	6.0	7.6	8.1	9.2	35
砂质泥岩	2 550	5.0	4.3	2.1	5.1	28
煤	1 530	3.0	2.0	2.2	3.1	20
铝质泥岩	2 520	5.0	1.0	1.3	1.7	29
泥岩	2 580	5.7	4.0	1.6	2.3	32
砂质泥岩	2 500	4.0	4.5	2.2	5.8	33

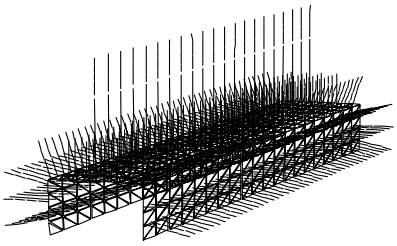
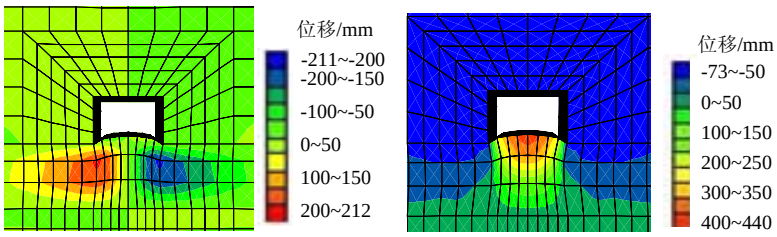


图 3 原支护力学模型

Fig.3 Mechanical model of original supporting



(a) 水平 (b) 垂直

图 4 巷道表面位移

Fig.4 Roadway surface displacement

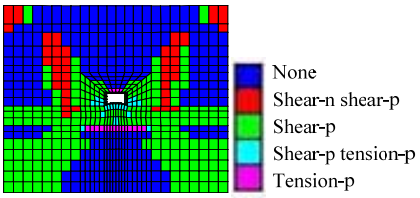


图 5 巷道塑性区分布

Fig.5 The distribution of plastic zone

由图 4 可见，巷道顶板和两帮变形量均在 50~80 mm，变形量不大；而底板垂直变形量达到 440 mm，两底角围岩水平变形量均超过 210 mm，变形量均较大，表现为巷道底鼓严重。

由图 5 可见：该软岩巷道塑性区集中在巷道底板和两帮底部，巷道顶板两肩部在高应力作用下出现剪切破坏，较高的自重应力通过顶板和两帮的传递，作用到软弱的底板，底角出现压剪破坏，从而使底角围岩向底板挤压，开放无支护的底板在受到两帮压力作用下产生拉伸破坏，产生水平和垂直的变形；且由于水的作用使得软岩矿物膨胀，产生严重底鼓。因此在进行巷道耦合支护设计时应充分考虑底角的剪切破坏作用和底板的受力状态，加强底角支护，同时改善底板围岩受力状态。

3.3 原支护围岩变形破坏分析

通过以上对巷道变形破坏特征和围岩特性的分析可知，底鼓的主要原因有以下几点：

1) 围岩岩性差。底板围岩强度低，节理裂隙发育；底板岩石富含蒙脱石矿物，吸水性膨胀性强；岩石揭露以后和空气中的水分子或工程用水发生作用，容易风化、软化和裂隙化，极容易造成岩石层间黏聚力和弹性模量骤降，强度随暴露时间而降低。

2) 深度大应力高。东翼轨道巷埋深在 500~520 m 之间，同时与 113 回风平巷立体交叉形成应力集

中区，自重应力在 13 MPa 左右，集中应力约在 20 MPa；巷道处于两褶皱交叉点，且位于其中一条褶皱的轴部(如图 1)，受构造应力影响较大。因此巷道在高应力作用下强度较低的泥岩发生塑性破坏，围岩变形量较大。

3) 底板无支护。巷道底板为裂隙发育，松散软弱泥岩，然而底板、底角无支护，处于开放状态，开挖后底板围岩由三向受力变为两向受力状态，整体强度降低，在受到两帮应力作用后，软弱泥岩向底板中部挤压和滑移，形成较大的挤压流动性底鼓，造成底板大变形破坏[21]。

4　巷道稳定性控制对策

4.1　变形力学机制转化

该巷道底板围岩特点为，伊/蒙混层和高岭石等膨胀性矿物含量较高，节理裂隙发育，巷道受自重应力和构造应力较大，因此，该巷道变形力学机制为：分子吸水膨胀型和胶体膨胀机制(I_{AB})+构造应力型和重力变形机制(II_{AB})+弱层影响的结构变形机制(III_{BA})的复合变形力学机制[19]。因此，对每一种变形力学机制进行力学转化，将复合型变形力学机制转化成单一的变形力学机制，从而控制巷道底鼓。

对于 I_{AB} 型变形力学机制，采用喷层防水和底板石灰层防水措施，尽可能隔断底板与水的接触；对于 III_{BA} 型变形机制，采用卧底返修和反底拱刚柔层支护技术，消除弱层影响，提高底板围岩自身承载能力；对于 II_{AB} 型变形机制，采用锚网索支护及底角锚杆控制技术，提高支护强度，切断底角剪切滑移，和反底拱刚柔层形成一体化支护结构，改善围岩受力状态，提高围岩的稳定性。通过以上 3 种转化过程，将不稳定的复合型变形力学机制转化为稳定的单一重力型力学机制。其力学机制转化过程如图 6 所示。

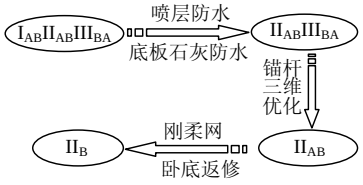


图 6　复合型变形力学机制转化过程

Fig.6　Mechanics mechanism transformation

4.2　底鼓控制支护方案

由于东翼轨道巷变形主要集中在底板，两帮及顶板变形很小，因此新支护保持巷道顶板和两帮原始支护方式不变，主要对底板实施支护措施。综合以上分析，在保持顶帮支护不变的情况下，提出底板采用混凝土反底拱+金属焊接网+底角管缝式锚杆的支护形式。

将上述支护方案在该大巷进行应用，支护材料及设计参数如下。

1) 巷道顶板。顶板锚杆采用 6 根 *Φ*18 mm×*L*2200 mm 等强螺纹钢树脂锚杆，间排距 800 mm×800 mm，平行布置，巷道肩部 2 根锚杆与垂线夹角为 15°。预紧力不小于 70 kN。顶板中间布置 1 根 *Φ*15.24 mm×*L*6500 mm 钢绞线锚索，排距为 800 mm。

2) 巷道两帮。两帮分别采用 3 根 *Φ*18 mm×*L*2200 mm 等强螺纹钢锚杆，间排距 800 mm×800 mm，平行布置，最上面 1 根锚杆距离顶板 400 mm，仰角 15°，中间 1 根锚杆垂直于巷帮，最下面 1 根锚杆水平向下 15°。

3) 巷道底角。底角锚杆采用 *Φ*43 mm×*L*2500 mm 管缝式锚杆，内插钢筋并灌注水泥浆，底角锚杆与水平夹角为 45°。

4) 巷道底板。底板采用反底拱，拱深 800 mm，从下往上依次为生石灰粉 100 mm，混凝土 200 mm，混凝土中间铺设一层钢筋网，炉渣充填至底板 200 mm 处，浇筑混凝土至设计标高。钢筋网采用 *Φ*8 mm 钢筋焊接成，网格尺寸为 100 mm×100 mm；混凝土强度为 C30，混凝土中加入 8%的 FS-B 型混凝土防水剂。支护图如图 7。

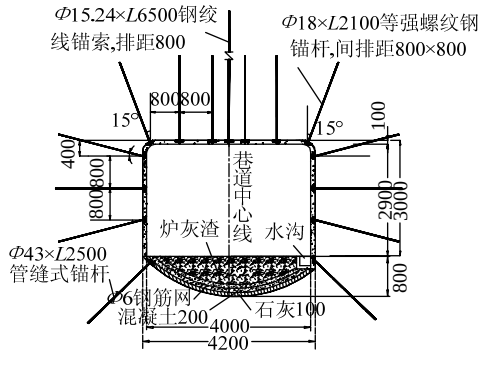


图 7　新支护断面设计图　(mm)

Fig.7　New support section design diagram

5　应用效果分析

5.1　新支护数值分析

为验证东翼轨道巷新支护方案的可行性，利用

FLAC^{3D} 对支护方案建立模型进行数值模拟计算，材料采用 Mohr-Coulomb 本构模型，结果如图 8。

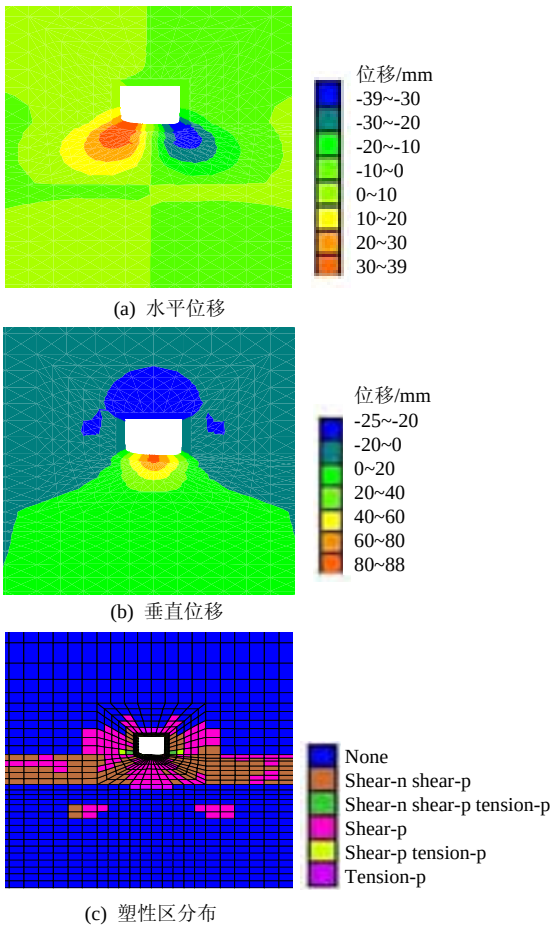


图 8 新支护数值分析

Fig.8 New supporting numerical analysis

由图 8 可知，在新支护形式下，主要变形区出现在巷道底板，其水平最大移近量为 39 mm，底板垂直位移量最大为 87 mm，巷道底鼓量远小于原支护底鼓变形量，巷道变形满足支护要求。

通过分析可知，首先采用隔水处理技术，隔断底板膨胀性岩层与水的接触，最大限度减少其膨胀变形；采用刚柔相济的混凝土喷层和金属网形成反底拱，使得底板围岩受力状态由两向受力变为三向受力，改善了围岩受力状态，减少层间剪切滑移破坏，同时增加了底板围岩整体强度和受载能力，有效抑制了底板变形，反底拱开挖可以有效释放底板变形能，起到卸压作用；底角 45°锚杆能够提高底角围岩整体强度，增强对两帮压力的抵抗能力，避免底角发生剪切滑移，从而减弱两帮对底板的挤压破坏作用；两帮和顶板锚杆锚索支护能改善围岩受力，抑制顶沉和帮缩，有效减小顶板和两帮变形对底角的应力作用。

5.2 现场应用效果

为检测支护效果，在巷道新支护段设置 2 个监测点，主要对巷道底板和巷帮底部位移进行监测，监测曲线如图 9，结果表明，采用新支护后 35 d 左右巷道进入稳定期。最大底鼓量为 19 mm，两帮底部最大收缩量为 30 mm，新支护对底鼓的变形控制较好，巷道整体稳定，支护效果良好。

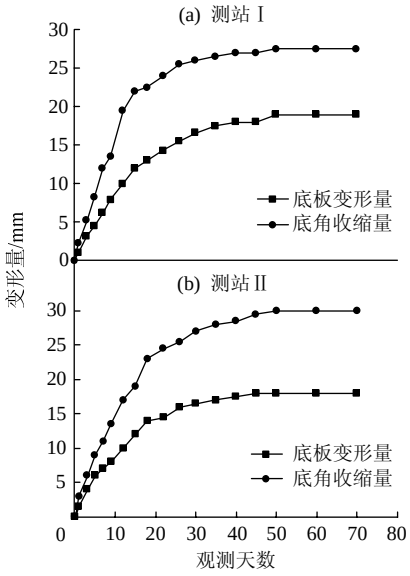


图 9 底板及底角位移曲线

Fig.9 Displacement curve

6 结 论

1) 东翼轨道巷底板围岩岩性软弱，含有较多膨胀性矿物，吸水后软化崩解，同时裂隙发育，且底板开放无支护，巷道底角受顶帮较高应力作用产生滑移变形，进而挤压底板产生严重的底鼓变形现象。

2) 通过分析认为该巷道底板工程软岩类型为高应力-节理化-膨胀性软岩；其围岩变形力学机制为多因素复合变形力学机制；底板围岩岩性软弱、含膨胀性黏土矿物成分高、地应力大和支护不当是造成底鼓的主要原因。

3) 提出混凝土反底拱+金属焊接网+底角管缝式锚杆的支护对策，改善底板受力状态，提高底板整体强度。数值模拟和现场观测表明，新支护形式下巷道底板变形量较小，有效地控制巷道底鼓变形。

参考文献：

[1] 何满潮，谢和平，彭苏萍，等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与程学报，2005，24(16)：2803-2814. 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)：2803-2814.

[2] 何满潮，钱七虎．深部岩体力学基础[M]．北京：科学出版社，2010：5-8.

[3] WANG Jiong，GUO Zhibiao，YAN Yubiao，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，2012，22：295-299.

[4] 刘泉声，肖虎，卢兴利，等．高地应力破碎软岩巷道底鼓特性及综合控制对策研究[J]．岩土力学，2012，33(6)：1703-1711.
LIU Quansheng，XIAO Hu，LU Xingli，et al．Research on floor heave characteristics of broken soft rocks with high geostress and its comprehensive control measures [J]．Rock and Soil Mechanics，2012，33(6)：1703-1711.

[5] 何满潮，孙晓明．中国煤矿软岩巷道工程支护设计与施工指南[M]．北京：科学出版社，2004：35-36.

[6] 孙晓明，何满潮．深部开采软岩巷道耦合支护数值模拟研究[J]．中国矿业大学学报，2005，34(2)：166-169.
SUN Xiaoming，HE Manchao．Numerical simulation research on coupling support theory of roadway with in soft rock at depth[J]．Journal of China University of Mining & Technology，2005，34(2)：166-169.

[7] 何满潮，张国锋，齐干，等．夹河矿深部煤巷围岩稳定性控制技术研究[J]．采矿与安全工程学报，2007，24(1)：27-32.
HE Manchao，ZHANG Guofeng，QI Gan，et al．Stability control of surrounding rocks in deep entry of Jiahe Coal Mine[J]．Journal of Mining & Safety Engineering，2007，24(1)：27-32.

[8] 何满潮，张国锋，王桂莲，等．深部煤巷底鼓控制机制及应用研究[J]．岩石力学与程学报，2009，28(增刊 1)：2593-2599.
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(Sup 1)：2593-2599.

[9] 陆士良，姜耀东．支护阻力对软岩巷道围岩的控制作用[J]．岩土力学，1998，19(1)：1-6.
LU Shiliang，JIANG Yaodong．The control of support resistance over strata around roadway in soft rock[J]．Rock and Soil Mechanics，1998，19(1)：1-6.

[10] 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(7)：2396-2401.
JIANG Yaodong，ZHAO Yixin，LIU Wengang，et al．Research on floor heave of roadway in deep mining[J]．Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2004，23(7)：2396-2401.

[11] 康红普．软岩巷道和硐室的底鼓机理及卸压技术的研究[D]．徐州：中国矿业大学，1991.

[12] 刘泉声，高玮，袁亮．煤矿深部岩巷稳定性控制理论与支护技术及应用[M]．北京：科学出版社，2010：251-255.

[13] 刘泉声，刘学伟，黄兴，等．深井软岩破碎巷道底鼓原因及处置技术研究[J]．煤炭学报，2013，38(4)：566-572.
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)：566-572.

[14] 杨生彬，何满潮，王晓义，等．孔庄矿深部软岩大巷底鼓机制及控制对策研究[J]．中国矿业，2007，16(4)：77-80.
YANG Shengbin，HE Manchao，WANG Xiaoyi，et al．Study on mechanism and control of deep soft rock roadway floor heave in Kongzhuang coal mine[J]．China Mining Magazine，2007，16(4)：77-80.

[15] 谢广祥，常聚才．超挖锚注回填控制深部巷道底鼓研究[J]．煤炭学报，2010，35(8)：1242-1246.
XIE Guangxiang，CHANG Jucai．Study on over cutting-bolting & grouting-backfilling concrete to control the floor heave of deep mine roadway[J]．Journal of China Coal Society，2010，35(8)：1242-1246.

[16] SUN Jin，WANG Lianguo．Numerical simulation of grooving method for floor heave control in soft rock roadway[J]．Mining Science and Technology，2011，21：49-56.

[17] 何满潮，杨晓杰，孙晓明．中国煤矿软岩黏土矿物特征研究[M]．北京：煤炭工业出版社，2006：189-192.

[18] 张向东，李庆文，黄开勇，等．采动影响下大跨度煤巷耦合支护技术研究与应用[J]．岩石力学与工程学报，2014，33(1)：60-69.
ZHANG Xiangdong，LI Qingwen，HUANG Kaiyong，et al．Study of coupling support for large-span coal roadway under mining dynamic load and its application [J]．Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2014，33(1)：60-69.

[19] 何满潮，景海河，孙晓明．软岩工程力学[M]．北京：科学出版社，2002：144-145.

[20] 刘波，韩彦辉．FLAC 原理、实例与应用指南[M]．北京：人民交通出版社，2005：113-115.

[21] 刘少伟，张伟光，冯友良．深井煤巷滑移型底鼓岩体运移机理及控制对策[J]．采矿与安全工程学报，2013，30(5)：706-712.
LIU Shaowei，ZHANG Weiguang，FENG Youliang．Study on migration mechanism of slipping floor heave rock mass in deep roadway and its control countermeasure[J]．Journal of Mining & Safety Engineering，2013，30(5)：706-712.