文章编号：1673-3363-(2015)02-0247-06

亭南煤矿深部软岩巷道底鼓“四控”机理及应用

杨军，石海洋

(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 针对亭南煤矿深部软岩巷道底鼓大变形现象进行深入研究，综合采用现场工程地质调查、物化分析、数值模拟计算、现场测试等方法，分析得出西翼轨道巷道底鼓的复合型变形力学机制，提出采用“四控一措施”新技术将复合型变形力学机制转化为单一型变形力学机制，即将顶板、两帮、底角和底板四部位看作是相互联系的整体，综合控制各部位变形，并结合防治水措施，达到有效控制底鼓的目的。“四控”是指：在顶板施加锚杆并在关键部位施加锚索，有效降低来自顶板并传递至底板上的应力；通过施加底角锚杆，利用材料自身抗弯刚度，切断底板基角塑性滑移线；帮部打入锚杆，增强帮部岩体强度，减小发生底鼓底板宽度；施加反底拱对底板作用均匀一致的支护反力，形成封闭的支护体系。“一措施”是指：及时设置排水沟，避免排水不畅积水浸入底板造成膨胀性底鼓；对顶板及两帮围岩做喷浆处理切断裂隙水路径；巷道挖底后立即铺设干石灰粉垫层封闭底板围岩。工程实践表明，该项新技术在亭南矿有效地控制了软岩巷道底鼓变形。

关键词 底鼓；反底拱；防治水措施；数值模拟

中图分类号 TD 353 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.02.012

Mechanics and application of four floor heave control technology of deep soft rock roadway in Tingnan coal mine

YANG Jun，SHI Haiyang

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

Abstract In response to the floor heave with large deformation of roadway in deep soft rock in Tingnan coal mine, an in-depth study has been done in this paper based on the methods of geological survey, physicochemical test, numerical calculation, in-situ test. The complex deformation mechanism in the west pathway floor heave has been analyzed, and a new technology called “four control and one measure” to transform from the complex deformation mechanism to a simple one has been proposed. In the technology, the roof, two sides, base angle, and floor of the roadway are related to each other as a whole to control the deformation of each position and attain the goal of controlling the floor heave with water control measure. The “four control” includes four countermeasures. First, the anchor bolt is added to the roof and the anchor cable is added to the key position to reduce the stress acting on the floor from the roof. Second, the base angle bolt is used to cut off the plastic slip line of the floor base angle with its own flexural stiffness of the material. Third, the bolts are embedded into the two sides of the roadway to enhance the strength of rock and decrease the width of floor heave. Fourth, the counter-force acting on

收稿日期：2014-04-14
基金项目：国家自然科学基金项目(51304210)；教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目
作者简介：杨军(1979—)，男，山东省泰安市人，讲师，工学博士，从事软岩工程岩体力学、岩土工程加固技术等方面的研究。
E-mail：yjlr@163.com **Tel**：010-51733713

the inverted arch floor is exerted to bring uniform support and form a closed supporting system. The “one control” includes constructing the drainage in time to avoid the ponding immerging the floor to form floor heave, guniting on the roof and sides to cut off the path of fissure water, and spreading dry lime powder after cutting bottom to close the surrounding rocks of floor. Engineering practice shows that this new technology has effectively controlled the floor heave of soft rock roadway in Tingnan coal mine.

Key words floor heave；inverted arch；water control measure；numerical simulation

当前我国很多矿山均已进入深部开采，由于深部“三高一扰动”的复杂环境，随之出现的非线性大变形问题变得日益突出[1]。长期以来，在控制巷道变形中，巷道底鼓一直是煤矿开采等地下工程中难以解决的问题之一。

国内外针对巷道底鼓机制及控制方面做了大量研究工作。H.Einstein 等[2]提出了巷道底鼓的影响因素；谢卫红等[3]进行了相似材料模拟实验；姜耀东[4-5]将巷道底鼓机理分为挤压流动性底鼓、挠曲褶皱性底鼓、剪切错动性底鼓和遇水膨胀性底鼓。另外很多学者对巷道底鼓提出很多控制技术。康红普等[6]对锚杆成套支护技术在巷道支护中的应用做了详细介绍；刘泉声等[7]提出采用混凝土反底拱结合注浆、锚索技术来治理软岩巷道底鼓问题；谢广祥等[8]研究了超挖锚注回填控制深部巷道底鼓技术。

目前大多数底鼓控制方法只是围绕巷道底板做加固，缺乏对其他部位进行整体研究。而多项研究[9-14]表明，巷道底板稳定性与巷道顶板、两帮和底角的强度和刚度均有关，它们是相互作用、相互影响的。所以，通过综合控制巷道各部位变形进行底鼓防治无疑是一种新的尝试。

本文提出有效控制底鼓的“四控一措施”新技术，即采取支护措施控制顶板、两帮、底角和底板四部位变形，同时结合防治水措施。

1 底鼓机理分析及控制原理

1.1 底鼓机理

亭南矿井位于彬长矿区中部，巷道原有支护形式为底板开放式支护。由于原支护与围岩结构不耦合，围岩裂隙水较为发育，且排水沟年久失修，以及未对底板进行任何加强支护措施，同时在地应力和岩性影响下，巷道发生多次底鼓，底鼓量平均 400~500 mm，破坏范围占巷道 3/4 以上。

软岩工程变形、破坏和失稳的原因是多方面的，但根本原因是具有复杂的变形力学机制[15-16]。针对亭南煤矿西翼轨道大巷底鼓问题，首先要确认底板非线性大变形力学机制，才能“对症下药”，有效控制底鼓发生。

根据对西翼轨道巷底板泥岩所作 X 射线衍射分析结果，该大巷围岩黏土矿物中伊/蒙混层和高岭石含量较高。帮顶围岩裂隙水发育，同时底板水沟严重失修并积水，通过水沟裂缝渗入到底板内部，加速底板围岩的体积膨胀和强度丧失。因此，该巷道变形力学机制为 I_{AB} 型，即分子吸水膨胀型和胶体膨胀型。

巷道底板泥岩为一软弱岩层，泥岩质软易碎，岩体结构强度低而水平构造应力很大，掘进过程中出现了底鼓严重现象，具有结构变形型软岩的特性。因此该巷道变形力学机制为 II_{ABD} 型，即构造应力型+重力型+工程偏应力型。

根据已掘巷道所作的实测地质剖面及巷道围岩宏观结构特征，巷道底板泥岩为一软弱岩层，巷道方向与弱层走向近似平行。因此该巷道变形力学机制为III_{BA}型，即弱层走向型。

综上所述，该巷道围岩的变形力学机制为 $\mathrm{I}_{AB}\mathrm{II}_{ABD}\mathrm{III}_{BA}$ 的复合型变形力学机制。

1.2 亭南矿底鼓控制原理及力学机制转化技术

在确定了变形力学机制之后，就要有针对性地选取相应的力学对策来将复合型变形力学机制转化成单一型变形力学机制[16]。巷道底鼓治理方面，前人往往仅围绕底板进行，忽略顶板和两帮变形对底板的影响；本文则强调应把巷道作为一个整体来治理，不能仅仅只对底板采取措施，应同步考虑顶、帮的治理，同时结合治水措施。

针对 I_{AB} 型的分子吸水膨胀型和胶体膨胀型软岩，应做好治水措施。亭南矿西翼轨道大巷底板泥岩层本身不含水源，但顶板和两帮裂隙水发育，而排水沟年久失修严重破坏，导致积水渗入底板深部围岩，造成严重底鼓。因此最重要的是修建排水沟并对排水沟部位进行加强措施；对顶板和两帮围岩进行喷浆处理，切断裂隙水路径；挖底后及时铺

干石灰粉，通过吸收空气中的水分，使其自身固化，形成一定强度的隔离层封闭底板围岩，作为控制底鼓对策。

针对 II_{ABD} 型的构造应力型+重力型+工程偏应力型软岩，应在顶板、两帮施加锚杆并在底板施加反底拱进行力学机制转化，控制底鼓。加固顶板可以使应力更大程度向顶板集中，使得由顶板经两帮传到底板的应力得以降低，底板所承载的应力相应减小。由于上部应力经两帮传至底板，当巷道两帮加固后，相当于增大了底板受约束范围，底板发生底鼓宽度减小；而底鼓量的大小与底板的宽度呈正相关，因为松动围岩下的底板宽度越小，在水平应力作用下越不容易产生剪切破坏或压曲，底板水平位移和底鼓量越小。混凝土反底拱作用有 2 点：1) 抑制底鼓，反底拱具有较高且均匀一致作用于巷道底板上的支护阻力，从而可以约束底板变形；2) 形成围岩支护体封闭式结构，有利于提高支护效果。通过施加反底拱，岩体结构得到加强，大大提高围岩的承载能力，并且可以使底板岩层应力状态得到改善，提高岩体稳定的可靠度。同时由于混凝土兼有防水的作用，因此可以减少水理作用对底板围岩的影响。

针对 III_{BA} 型即弱层走向型特性软岩，在底板施加底角锚杆。煤矿巷道一般是在非均质岩层中开挖，破坏现象通常首先出现在塑性区较为集中的角部。加固巷道两底角可以抑制两帮对底板的挤压，切断底板基角塑性滑移线，同时也可以提高反底拱的抵抗力，从而降低底鼓量。

通过以上支护技术将亭南矿软岩巷道复合型变形力学机制转化为单一型变形力学机制，转化过程如图 1。

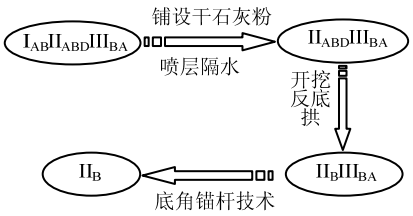


图 1　复合型变形力学机制转化过程

Fig.1　Transformation technique of compose deformation mechanism

2　底鼓控制数值模型的建立

2.1　计算模型及参数

本次数值模拟以+457.85 m 西翼轨道大巷为研究对象，该巷道断面为直墙半圆拱形，掘进净断面尺寸为 4.6 m×1.6 m。采用有限差分软件 FLAC^{3D} 建立三维数值模型，确定模型尺寸 30 m×40 m×38 m(长×宽×高)，共划分 134 760 个单元、142 188 个节点。该模型两侧限制 X 方向位移，底边固定约束，上表面施加 11.6 MPa 竖向荷载。根据地应力实测结果，取 X 方向荷载大小为 20 MPa，Y 方向荷载大小为 21 MPa。材料破坏符合 Mohr-Coulomb 强度准则。根据以上条件建立地质模型及网格划分如图 2 所示，计算所采用的数值模拟参数如表 1 所列。

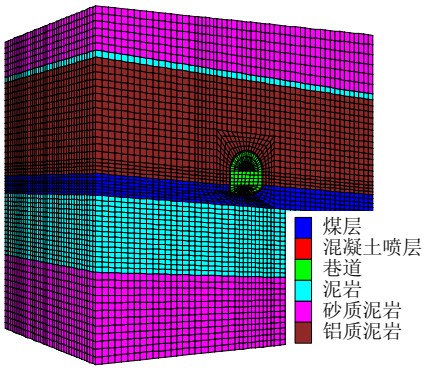


图 2　模型的网格划分

Fig.2　Numerical calculation model and mesh division

表 1　围岩物理力学参数

Table 1　Physico-mechanical parameters of surrounding rock

岩性	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
砂质泥岩	2 200	3.80	2.50	24	2.0
煤岩	1 400	2.26	0.85	21	0.3
铝质泥岩	1 650	5.00	2.30	20	1.0
泥岩	2 000	5.00	2.30	22	1.2

2.2　数值模拟方案

亭南矿西翼轨道大巷原支护形式采用在巷道顶部和帮部打入锚杆，加强巷道围岩刚度和抵抗变形的能力；同时在顶部施加锚索，调动深部坚硬岩层的强度，对围岩和支护体起到挤压和悬吊作用。但采取上述措施后底鼓现象却很严重。针对这种情况，在西翼轨道大巷底鼓治理中采用“四控一措施”新技术，即在原支护基础上+反底拱＋底角锚杆的联合支护形式，同时采取防治水措施。由于黏土矿物吸水膨胀是物理过程，对此我们不做模拟分析。何满潮、张国锋[10,17]对底鼓“三控”技术做了部分模拟分析及理论研究，将顶部、两帮和底角 3 部位看作相互联系的整体，综合控制巷道底鼓，并研究了该技术的作用机制和规律。在此，不再做顶板和

两帮对底鼓影响研究，而着重分析巷道底角锚杆、反底拱对巷道底鼓的影响。本次数值模拟分为以下 3 个方案：1) 原支护方案；2) 原支护方案+开挖混凝土反底拱；3) 原支护方案+开挖混凝土反底拱+底角锚杆。

2.3 数值模拟结果

分别对以上 3 种方案进行数值模拟，得到水平应力场和竖向应力场如图 3 所示，不同方案巷道变形值如表 2 所列。

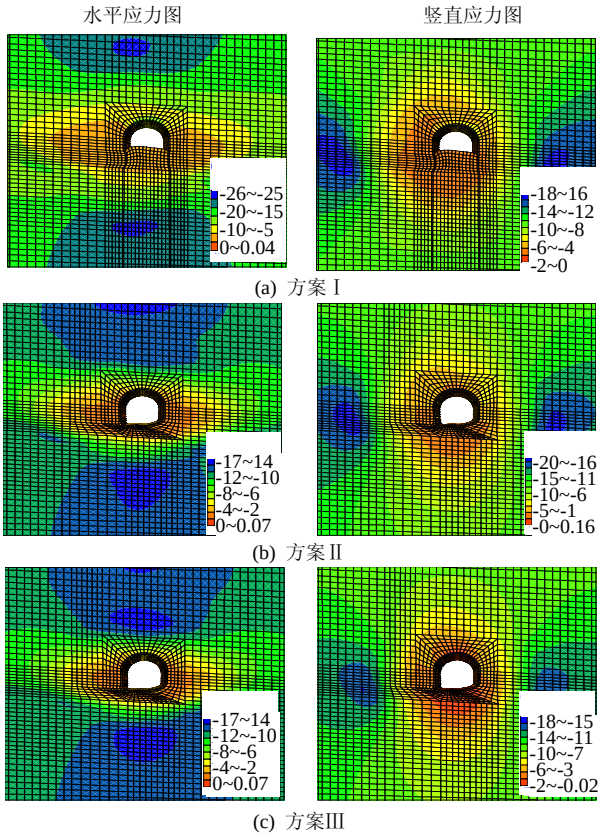


图 3 巷道应力场图 (MPa)

Fig.3 Stress distributions of surrounding rock of different schemes

表 2 不同方案的巷道变形值

Table 2 Deformation values of different schemes

方案编号	最大顶沉量/mm	最大底鼓量/mm	最大帮缩量/mm	
			左帮	右帮
I	97	510	300	100
II	75	194	150	100
III	60	100	80	80

原支护顶板采用锚索锚杆共同支护，帮部采用锚杆加固。数值模拟结果显示，原支护方案巷道底板存在 0.3 MPa 左右的垂直拉应力区，不利于底板稳定。顶板及两帮变形收缩不明显，但底鼓量最大达到 510 mm。水平方向最大位移区主要集中于两帮角下部，其最大位移量达到 300 mm，在复杂高应力作用下两帮角处围岩向内运动造成底板围岩向巷道临空面鼓出变形。此外，由于巷道底板泥岩暴露后处于开放无支护形态，底板围岩遇水软化强度降低，加之受水平应力的挤压，最终导致底板围岩沿滑移面滑动产生底鼓。

在原支护+反底拱支护状态下，底板出现了 2 MPa 左右的垂直压应力，水平压应力较原支护减小了 60%左右。底板应力集中区域明显减小，但深部岩层的应力集中区域扩大，调动了深部岩体的强度，说明反底拱支护具有将底板岩层应力转移到深部岩层的能力。从应力场总体分析，由于反底拱的拱形受力特性以及围岩支护体的封闭式结构，明显改善了整个巷道围岩受力状态，尤其是使巷道两侧底板围岩受力区域范围均匀化。同时，反底拱有效控制了底鼓及两帮处水平位移，最大底鼓量减小至 194 mm，较原支护减小了 62%，底鼓控制效果明显，可见开挖反底拱可以有效抑制底鼓。

在原支护+反底拱+底角锚杆联合支护状态下，底板垂直压应力在 2 MPa 左右，底角锚杆有效地切断了底板基角塑性滑移线，深部岩层应力集中区域扩大，相应降低了巷道浅部围岩应力集中程度，说明该支护措施充分调动了深部坚硬岩层的强度，应力向岩体深部传递。同时消除了巷道帮角位移集中现象，减轻了水平位移对底板泥岩的挤压程度，帮角处水平位移减小至 60~80 mm，底鼓最大处为 100 mm，较原支护减小了 80%，底鼓得到全面有效的控制，满足变形控制要求。

从数值模拟结果分析来看，综合控制巷道顶板、两帮、底角和底板 4 个部位能有效抑制底板变形，底鼓控制效果明显。

3 工程应用实例

亭南矿西翼轨道大巷原支护形式采用在巷道顶部和帮部打入锚杆，但底鼓现象严重。根据工程地质条件，以及通过对上述不同支护方案数值模拟结果分析，该轨道大巷返修段底鼓治理采取在原支护方案基础上+反底拱+底角锚杆，同时补打帮部锚杆并结合防治水措施，即底鼓“四控一措施”新技术，进而在根本上控制巷道底鼓。两帮角上部各补打 1 根锚杆 Φ18 mm×L2100 mm、底角每侧 2 根 Φ43 mm×L2000 mm 管缝式锚杆，倾角为 45°，内插 Φ20 mm×L1800 mm 螺纹钢锚杆，并注水泥浆。反底拱

采用 C30 钢筋混凝土，反底拱中间采用 *Φ*6.5 mm 钢筋连接底角锚杆，形状设计为椭圆弧形。及时设置排水沟，放大水沟尺寸，巷道浇注混凝土反底拱的同时将水沟砌出，然后统一浇注，保证水沟与反底拱连接最薄的部位厚度要求，避免因积水渗入底板泥岩而底鼓；对顶板和帮部围岩喷浆切断裂隙水路径，挖底后立即铺设 100 mm 厚的干石灰粉垫层，吸收空气水分后，在自身固化作用下形成一定强度的隔离层封闭底板围岩。支护参数设计如图 4 所示。

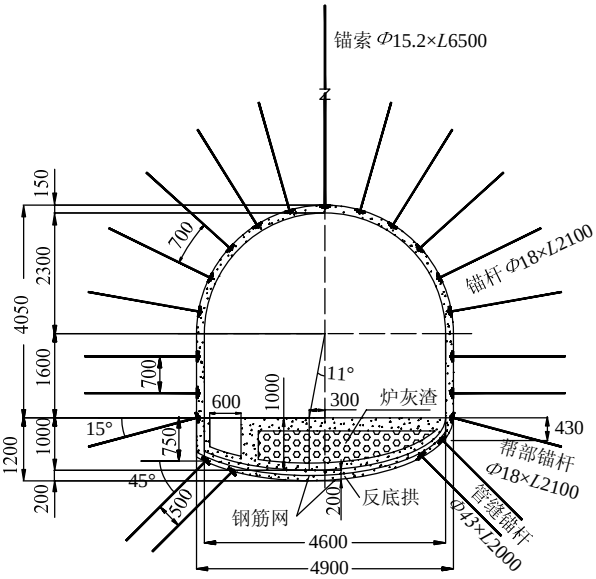


图 4　西翼轨道大巷支护参数设计图　(mm)

Fig.4　Design parameters of supporting of the gateway

依据上述确定的亭南矿西翼轨道大巷底鼓治理支护方案，开始进行返修段的施工，试验段长度为 64 m。为检验设计方案的返修效果，根据矿压监测要求，巷道返修后先后共设立了 4 个表面位移观测测站，配备专门人员进行将近 3 个月的周期性监测。监测数据表明，巷道底鼓得到有效控制，其中 4#测站位移-时间曲线如图 5 所示。

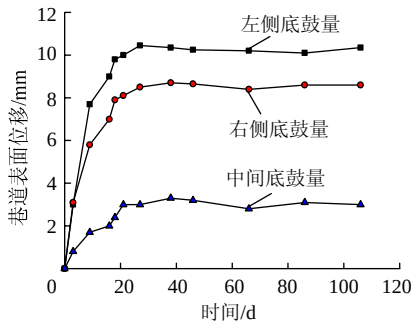


图 5　4#测站位移-时间曲线

Fig.5　Monitoring curves of displacements vs. time of test station 4

由图 5 可以看出：巷道返修后的 4~20 d 围岩变形曲线急剧上升，占最终变形量的 90%左右；之后 20~40 d 围岩变形量逐渐减小并趋于稳定；返修 40 d 之后围岩基本处于稳定状态，不再发生新的变形。试验段巷道左帮底鼓量最大值为 10.35 mm，右帮底鼓量最大值为 8.6 mm，中间底鼓量最大值只有 3 mm。整体而言，巷道的底鼓控制效果明显，返修对两帮及顶板的影响较小，总体变形量在允许变形范围之内。从监测曲线来看，“四控一措施”新支护技术效果良好，从根本上控制了底鼓，同时保证了巷道全断面的稳定。

4　结　论

1) 巷道底板稳定性是受顶板、两帮、底角和底板四部位共同影响的，同时结合防治水措施，即“四控一措施”。“四控”：加固顶板可以减轻底板应力，使应力集中程度向顶板转移，调动深部坚硬围岩强度；加固两帮可以减小围岩松动圈，减小发生底鼓底板宽度；加固底角可以切断底板基角塑性滑移线，抑制由两帮下沉造成的底鼓；反底拱加固底板使底板受力更加均匀，支护体系形成封闭结构。“一措施”：及时设置排水沟；对顶板及两帮围岩喷浆封闭切断裂隙水路径；巷道挖底后立即铺设干石灰粉垫层封闭底板围岩。

2) 由于反底拱的拱形受力特性及围岩支护体封闭式结构，使其作用于巷道底板的支护阻力具有均匀一致特性，底板的水平及垂直应力集中程度降低，整个巷道深部岩层的应力集中区域扩大；在开挖反底拱的基础上施加底角锚杆，可以更加明显改善巷道底板围岩受力状态，二者协同作用将底板岩层应力转移到深部岩层。

3) 对于一般底板岩性较好的巷道，采用底鼓“三控”技术，即综合控制顶板、两帮和底角即可有效控制底鼓量。但对于底板围岩蒙脱石、伊利石等膨胀性矿物含量较高的巷道，则采用底鼓控制“四控一措施”新技术更为理想，该技术更适用于服务年限较长的主巷道。

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]. 岩石力学与工程学报，2005，24(16)：2803-2813. 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)：2803-2813.

[2] EINSTEIN H. Suggested methods for laboratory testing of argillaceous swelling rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences and Geomechanics Abstracts，1989，26(5)：415-426.

[3] 谢卫红，陆士良，张玉祥. 挠曲褶皱性巷道底鼓机理分析及防治对策研究[J]. 岩石力学与工程学报，2001，20(1)：57-60.
XIE Weihong，LU shiliang，ZHANG Yuxiang. Mechanism analysis on flexible and folded floor lift and study of it's control countermeasure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2001，20(1)：57-60.

[4] 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 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(14)：2396-2401.

[5] 姜耀东，陆士良. 巷道底鼓机理的研究[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.

[6] 康红普，王金华，林健. 煤矿巷道支护技术的研究与应用[J]. 煤炭学报，2010，35(11)：1809-1814.
KANG Hongpu，WANG Jinhua，LIN Jian. Study and application of roadway support techniques for coal mines [J]. Journal of China Coal Society，2010，35(11)：1809-1814.

[7] 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)：566-571.
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.

[8] 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 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.

[9] 王卫军，侯朝炯. 回采巷道底鼓力学原理及控制研究新进展[J]. 湘潭矿业学院学报，2003，18(1)：1-6.
WANG Weijun，HOU Chaojiong. New development of mechanism and control technique study of extraction opening floor heave[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute，2003，18(1)：1-6.

[10] 张国锋. 三级系统控制底鼓技术原理及其工程应用[D]. 北京：中国矿业大学(北京)，2007.

[11] 李学华，王卫军，侯朝炯. 加固顶板控制巷道底鼓的数值模拟[J]. 中国矿业大学学报，2003，32(4)：436-439.
LI Xuehua，WANG Weijun，HOU Chaojiong. Controlling floor heave with strengthening roof in gateway by numerical analysis[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2003，32(4)：436-439.

[12] 王卫军，冯涛. 加固两帮控制深井巷道底鼓的机理研究[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.

[13] 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.
HOU Chaojiong，HE Yanan，LI Xiao，et al. Reinforcing sidewalls and corners of gateway to control floor[J]. Journal of China Coal Society，1995，20(3)：229-234.

[14] 柏建彪，李文峰，王襄禹，等. 采动巷道底鼓机理与控制技术[J]. 采矿与安全工程学报，2011，28(1)：1-5.
BAI Jianbiao，LI Wenfeng，WANG Xiangyu，et al. Mechanism of floor heave and control technology of roadway induced by mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2011，28(1)：1-5.

[15] 何满潮. 煤矿软岩变形力学机制与支护对策[J]. 水文地质工程地质，1997(2)：12-16.
HE Manchao. Soft rock deformation mechanism and transformation technique in coal mine[J]. Hydrogeology and Engineering Geology，1997(2)：12-16.

[16] 何满潮，景海河，孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京：科学出版社，2002：101-102.

[17] 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]. 岩石力学与工程学报，2009，28(1)：2593-2598.
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(1)：2593-2598.