葛泉矿软岩大巷底鼓机理及控制研究

李树清[1,2]，冯 涛[1]，王从陆[1,2]，潘长良[2]
(1. 湖南科技大学，湖南 湘潭 411201；2. 中南大学 资源与安全工程学院，湖南 长沙，410083)

摘要：－190 南翼运输大巷底鼓一直是困扰葛泉煤矿的重大问题。以该巷道大范围内的岩体为研究对象，通过对围岩主要物理和力学性质的室内测试、底鼓影响因素的理论分析和支护效果的数值模拟，掌握了原支护条件下巷道围岩塑性区范围和巷道周边应力分布状况，得出围岩性质、水和支护形式是产生底鼓的主要因素，提出了底鼓控制途径和全断面注浆、帮角锚杆加固控制底鼓的方案，并通过数值模拟优化了支护参数。现场观测表明，该方案取得了良好的底鼓控制效果。

关键词：采矿工程；软岩巷道；底鼓机理；数值模拟；底鼓控制
中图分类号：TD 313 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－6915(2005)08－1450－06

STUDY ON MECHANISM AND CONTROL OF SOFT ROCK ROADWAY FLOOR HEAVE IN GEQUAN COAL MINE

LI Shu-qing[1,2], FENG Tao[1], WANG Cong-lu[1,2], PAN Chang-liang[2]
(1. *Hunan University of Science and Technology, Xiangtan* 411201, *China*;
2. *School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha* 410083, *China*)

Abstract: Serious floor heave of the haulage tunnel at the southern –190 m level was a great problem in Gequan coal mine in China. The main physical and mechanical properties of surrounding rocks around the roadway are tested. On the basis of the study of large range of rock mass around the roadway, the factors resulting in the floor heave are analyzed. Through numerical modeling with UDEC3.1, the plastic region and stresses distribution around the roadway are understood under the original support. Thus, the principal factors resulting in floor heave i.e., the properties of surrounding rock, water, and support form, are released. With the recognition of the mechanism of the floor heave, the control scheme that whole section grouting is combined with side and corner bolt reinforcement is put forward. Through numerical modeling, the support parameters of the new scheme are optimized. In-situ measurement shows that good result of controlling the floor heave is obtained with the scheme.

Key words: mining engineering; soft rock roadway; mechanism of floor heave; numerical simulation; control of floor heave

1 引 言

在软岩巷道中，底鼓是围岩变形和破坏的主要形式之一。底鼓导致巷道断面缩小，阻碍运输和人员行走，妨碍通风，甚至造成整个巷道报废，严重影响矿山的生产和安全。根据河北金牛能源股份有限公司葛泉矿的统计，－190 m 南翼运输大巷底鼓已造成的经济损失达 500 万元以上，给巷道维护工作带来了极大的困难，底鼓成为制约该矿发展的主

收稿日期：2003－07－25；**修回日期**：2003－09－03
基金项目：湖南省自然科学基金资助项目(01JJY3020，01JJY2154)
作者简介：李树清(1969－)，男，1994 年于湖南科技大学采矿工程专业获硕士学位，现为博士研究生、副教授，主要从事矿山安全工程与软岩支护方面的教学与研究工作。E-mail：lsq_hnust@163.com。

万方数据

要问题之一。本文应用软岩巷道支护理论[1~5]，通过现场观测、理论分析、数值计算等手段分析了该巷道底鼓的机理，提出了合理的底鼓控制方案，并在现场应用中取得了良好的技术经济效果。

2 工程背景

−190 m 南翼运输大巷位于葛泉井田东南部的向斜轴部，埋深 305 m，与−180 m 南翼回风大巷水平间距为 34 m，高差为 10 m。该大巷为穿层巷道，穿过的主要岩层有粉砂岩、细砂岩、泥岩和野青灰岩，但大部分区段为粉砂岩。巷道穿过地层的构造非常复杂，地质勘测资料表明巷道将穿过 F6 - 1，DF14 等 12 条断层。巷道断面形状为直墙半圆拱，断面尺寸为 4.4 m×3.5 m(长×宽)，支护参数为：ϕ22 mm×2 000 mm 的高强螺纹钢锚杆，锚杆间排距 900 mm×900 mm，正方形布置，全断面挂网；永久支护为喷射混凝土，厚度为 100 mm。

巷道变形的主要特征为：(1) 底鼓强烈，一般 2～3 个月须卧底一次，深度为 300～500 mm；(2) 两帮变形量大，严重地段平均巷宽约 3.2 m。岩样取样化验分析表明，泥岩中粘土矿物含量为 84%～92%，砂岩中粘土矿物含量为 37%～48%，其中，粘土矿物中均含有伊/蒙混层矿物和高岭石。通过实验室试验测得的泥岩和砂岩主要物理、力学性质如表 1 所示。

3 −190 m 南翼大巷底鼓影响因素分析

3.1 围岩性质

该巷道围岩以粉砂岩为主，并夹有泥岩，2 种岩石都含有伊/蒙混层和高岭石矿物。伊/蒙混层矿物具有显著的膨胀特性，其亲水性介于伊利石和蒙脱石之间，当它的含量高时，软岩的膨胀性显著。由于泥岩中伊/蒙混层矿物的含量比砂岩高，因此，泥岩的膨胀性比砂岩强。高岭石遇水崩解，具有弱膨胀性，对软岩变形有一定影响。扫描电子显微镜和 9310 型微孔分析仪观测结果表明：泥岩和砂岩的微观结构发育，天然裂隙度较高，因此，水很容易侵入巷道底板岩体内。

3.2 地质构造和构造应力

由于该巷道穿过地层的地质构造非常复杂，断层和节理裂隙发育，而且还存在大量的陷落柱，巷道围岩的完整性被严重破坏，断层等结构弱面控制了岩体抗拉强度、抗压强度、弹性模量、渗透系数等巷道周围工程岩体的物理力学参数，围岩抵抗外界破坏的能力和自承能力大幅度降低，使巷道支护体系要承受更大的外力(矿山压力)作用，因此，更易引发巷道变形破坏。

地质构造在影响岩体强度的同时，也改变了巷道所处的应力环境。由图 1 可知，−190 m 南翼运输大巷布置在向斜轴部，因而受到局部构造应力的作用，导致其破坏方式具有明显的水平方向的变形破坏特征[6]，主要表现为：两帮开裂严重且收敛量大，底鼓严重。

3.3 水

水对巷道底鼓的影响主要通过水理作用表现出来。由于迎头或返修工作面后面的巷道底鼓量不一，水沟受挤压破坏严重等因素的影响，巷道涌水往往无法及时排出，大部分水渗入巷道底板内，或泡在巷道底板上，使底板围岩和部分巷旁岩体长期受到

表 1 泥岩、砂岩的主要物理力学性质

Table 1 Main physical and mechanical properties of mudrock and sandstone

试验条件	物理性质		力学性质				水理性质	
	密度 ρ/g·cm^{-3}	孔隙度 n/%	抗压强度 σ_c/MPa	抗拉强度 σ_t/MPa	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 φ/(°)	膨胀压力 σ_s/MPa	膨胀率 Θ_D/%
天然泥岩	2.52	5.1	13.70	1.14	2.33	26	–	–
浸水饱和泥岩	2.55	4.6	2.60	–	–	–	0.38	33.2
风化泥岩	2.54	5.6	3.15	–	–	–	–	–
天然砂岩	2.47	5.9	28.20	3.21	7.17	34	–	–
浸水饱和砂岩	2.55	6.5	10.30	–	–	–	0.21	24.4
风化砂岩	2.32	12.5	9.59	–	–	–	–	–

注：失水再浸水后，岩样完全碎化，主要参数未再进行测量。

万方数据

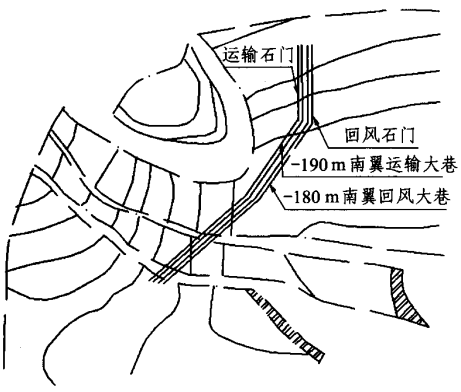


图 1　－190 m 南翼运输大巷位置、方位示意图

Fig.1　Sketch map of location and orientation of the haulage tunnel at southern –190 m level

水理、风化作用，愈发加剧了围岩向巷道自由空间内的挤入趋势，加大了巷道底鼓量。除了迎头积水外，由于小的断裂构造较多，一些含水层中的水通过这些小断裂渗入巷旁围岩，并在巷道周围的岩体裂隙中渗透。在小断裂比较密集的地方，小构造附近的渗透区域已经联系在一起，形成多片大面积的淋水、浸水区域。这些区域的巷道破坏情况明显比围岩比较干燥的地方严重，底鼓程度也更严重。

3.4　巷道布置

由于－190 m 南翼运输大巷和－180 m 南翼回风大巷集中布置在一起，2 巷水平相距 30 m 左右，二者之间不仅在开掘巷道引起的应力重新分布等方面相互影响，而且 2 巷之间切割出的岩柱在断层的切断破坏作用下，被切割成一块块具有滑移弱面的岩块，这些岩块在各种外力的作用下，产生沿滑移弱面移动的趋势，这种趋势最终演化成外力作用在支护结构上，使断裂破坏带周围巷道支护结构的受力和变形破坏要比其他地段高出许多。

3.5　支护形式

原支护是一种常规支护形式，存在如下问题：

(1) 底板岩性差，遇水易崩解、膨胀，原设计中未采取任何措施，也未注意排水；

(2) 锚杆布置在松散、软弱、裂隙发育的软岩中，粘结剂不能保证锚杆与钻孔间形成有效的全面粘结，从而导致锚杆总的有效粘结长度较小，锚杆的粘结阻力也较小，最终造成锚杆抗拉拔阻力的大大降低，－190 m 南翼运输大巷锚杆拉拔试验测得的管缝式锚杆的拉拔力仅为 17 kN。

在上述 5 个影响巷道底鼓的因素中，围岩性质、水和支护形式是产生底鼓的主要因素，也是巷道底鼓控制的重点。

4　数值计算

为深入分析－190 m 南翼运输大巷的底鼓机理，利用 UDEC3.1 数值计算软件模拟原支护状态下的巷道变形情况。考虑到岩体结构比较松散破碎，本构模型采用 Ubiquitous Joint 模型，几何模型尺寸为 60 m×50 m(宽×高)，网格剖分保证巷道周边 10 m 范围内三角形网格最大边长小于 0.5 m。模型中原岩处于侧压系数近似为 1 的静水压力状态，原岩应力的大小按巷道上覆岩体的自重考虑。约束条件为：左右边界水平约束，铅垂自由，上边界承受垂直应力，水平自由，底边界铅垂约束，水平自由。

模拟过程为：首先模拟原岩应力状态，待模型平衡后再进行巷道开挖。当巷道周边一定范围岩体进入塑性状态后考虑岩石遇水软化效果，把巷道周边一定范围岩石的物理力学参数调整为软化后的参数。当巷道围岩释放一定的变形后，进行锚杆安设，考虑锚杆加固效果，再运行至平衡状态。对锚杆加固的模拟，应用 UDEC3.1 软件把锚杆划分为一维轴向锚杆单元[7]，考虑了锚杆单元轴向拉屈服和锚固屈服 2 种屈服模式。模拟中采用的参数见表 2，3。

数值计算得出的原支护状态下巷道变形量见表 4，它与现场观测值比较接近，说明计算是可靠的。图 2，3 分别为巷道围岩塑性区分布图和巷道周

表 2　岩体主要力学参数

Table 2　Main mechanical parameters of rock mass

岩体状态	密 度 ρ/kg·m^{-3}	抗拉强度 σ_t/MPa	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 φ/(°)	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	节理粘聚力 c'/MPa	节理倾角 θ/(°)	节理内摩擦角 φ'/(°)	节理膨胀角 ψ'/(°)
天然	2 520	1.14	2.33	26	1.22	0.27	0.5	20	14	10.5
软化	2 550	0.05	0.10	18	0.56	0.42				

注：前 6 项指标为岩石力学指标，后四项指标为不连续面力学指标。

万方数据

表 3　锚杆力学参数

Table 3　Mechanical parameters of blot

锚杆直径 ϕ / mm	弹性模量 E / GPa	屈服载荷 Y/kN	锚杆延伸率 ε / %	粘结强度 k_c/MPa	粘结刚度 k_s/GPa
20	5	141.5	23.3	1.5	30

表 4　不同支护状态下巷道变形情况

Table 3　Deformation under different supports

支护状态	两帮移近量 /mm	顶板下沉量 /mm	底鼓量 /mm
原支护	796.0	294.6	738.1
全断面注浆、帮角锚杆加固	104.8	50.0	59.8

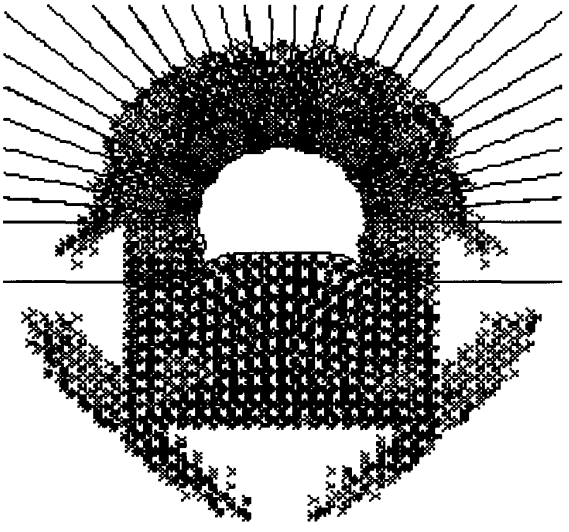


图 2　原支护状态巷道围岩塑性区分布图

Fig.2　Plastic region of surrounding rock around the roadway under the original support

边最大主应力等值线图。由图 2，3 可知，在原支护状态下，巷道围岩塑性区范围很大，其中底板岩层达 8 m 左右；最大主应力等值线远离巷道周边，特别是巷道底板。这说明，原支护不能使围岩形成承载环，这是该巷道变形量(特别是底鼓量)大的主要原因。

5　–190 m 南翼运输大巷底鼓控制

5.1　控制巷道底鼓的途径及方法

从上述对巷道底鼓机理的分析可得出控制该巷道底鼓的途径为：

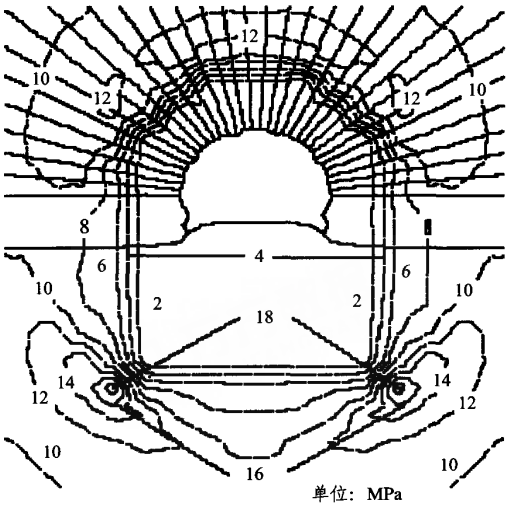


图 3　原支护状态巷道周边最大主应力等值线

Fig.3　Major principal stress contours around the roadway under the original support

(1) 改变围岩力学特性，提高围岩强度；

(2) 减小水(包括水汽)对巷道围岩的侵蚀作用；

(3) 缩小围岩塑性区；

(4) 改善锚杆的着力基础。

由于使用锚杆加固巷道帮角是一种控制巷道底鼓的有效措施[8]，在–190 m 南翼运输大巷的特定条件下采用该法可以实现上述途径(1)，(3)，而全断面注浆能实现上述途径(2)，(4)，故可采取全断面注浆与帮角锚杆加固相结合的办法实施底鼓控制。

5.2　巷道底鼓控制措施及实施

注浆材料采用 32.5 R 普通硅酸盐水泥，40Be 水玻璃作为速凝剂，水灰比为 1∶1，浆液与水玻璃比为 1∶0.03。注浆间排距均为 2.5 m，注浆孔深度一般为 2.5～3 m。采用单液注浆，布袋封孔，注浆压力控制在 1～2 MPa。

帮锚杆加固可通过加大锚杆布置密度或长度来实现。由于该工程是修复巷道，施工时巷道围岩的松动圈已比较大，因此，宜通过加大锚杆长度来实现对两帮加固，即将帮锚杆长度调整为 2 400 mm。“角锚杆”包括 2 组，分别称角锚杆和底锚杆，长度均为 2 400 mm，具体布置如图 4 所示。

由于该巷道修复时巷道周边围岩非常破碎，预注浆加固是该工程成败的关键，特别是要对巷道底角进行充分注浆，这样能有效减少巷道底鼓量[9]。施工顺序为：喷水泥浆→浇筑底板混凝土→打注浆

万方数据

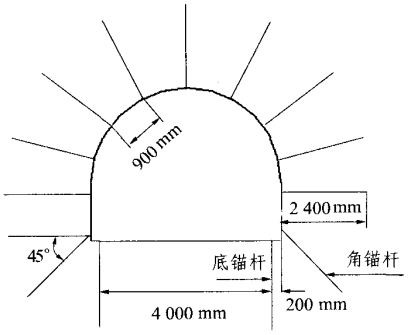


图 4　帮角锚杆加固示意图

Fig.4　Schematic diagram of reinforcement with side and corner bolt

孔→预注浆→扩巷→挂网→打顶锚杆→打帮、角锚杆→喷混凝土。

5.3　底鼓控制效果的数值计算

新支护方案施工是在扩巷以后进行的，模拟时，在原巷道变形的基础上，先模拟巷道周边岩体注浆，再将已变形超出巷道断面设计轮廓线的岩体去掉，将原锚杆删除，然后安设锚杆运行至新平衡状态。注浆的作用主要体现在遇水软化岩石强度的提高，模拟中只考虑遇水软化围岩注浆后强度值的改变，未考虑天然岩体注浆加固的效果。注浆后，软化岩石的粘聚力 c、内摩擦角 φ 分别取 1.0 MPa 和 20°。

新方案数值模拟结果[10]如图 5，6 所示，它表明：采用全断面注浆、帮角锚杆加固后，巷道围岩的残余强度得到提高，巷道围岩的塑性区范围大大减小，最大主应力等值线接近巷道周边，这说明该方案使得巷道四周已形成一个具有较高切向应力的

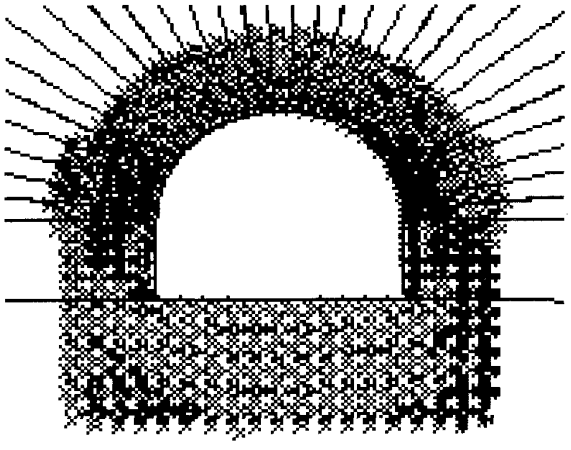


图 5　新支护方案巷道围岩塑性区分布图

Fig.5　Plastic region of surrounding rock around the roadway under the new support scheme

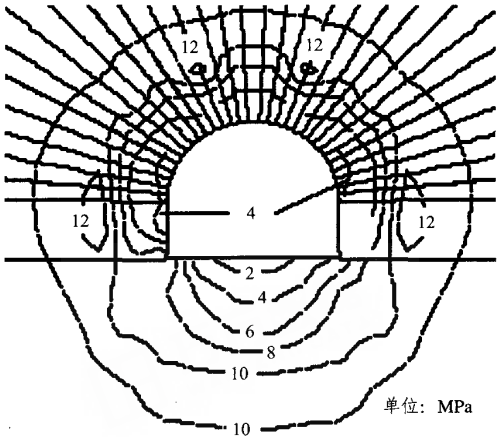


图 6 新支护方案巷道周边最大主应力等值线

Fig.6　Major principal stress contours around the roadway under the new support scheme

承载环，因而能有效控制巷道的变形，使底鼓量减小到原底鼓量的 8.8%。

5.4　巷道底鼓控制效果

整个试验巷道共设有 4 个测点，每 10 m 设 1 个测点，图 7，8 为 1# 测点的监测结果。由图 7，8 可知，采用全断面注浆、帮角锚杆加固后巷道变形趋向收敛，底鼓趋于停止，说明采用的底鼓控制措施有效。

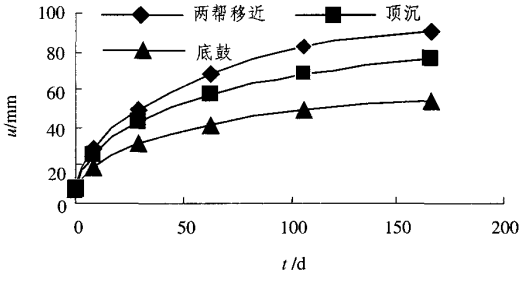


图 7　巷道变形量

Fig.7　Curves of deformation of the roadway

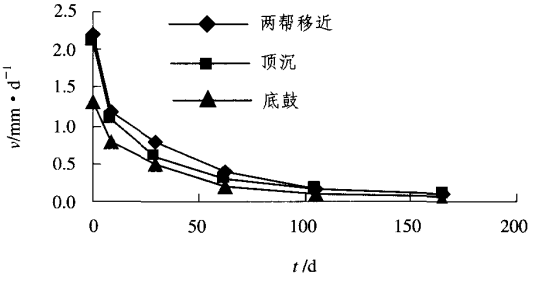


图 8　巷道变形速度

Fig.8　Curves of deformation velocity of the roadway

万方数据

6 结　语

(1) 围岩性质、水、和支护形式是引起该软岩巷道底鼓的主要因素。

(2) 在软岩中，锚杆的锚固作用往往得不到充分发挥，使得巷道围岩塑性区范围较大，巷道四周承载环不能形成。注浆后，锚固基础得到了改善，提高了锚杆锚固力，从而促使在巷道四周形成一个具有较高切向应力的承载环。

(3) 全断面注浆、帮角锚杆加固是一种控制软岩巷道底鼓的有效支护方法。它能提高巷道围岩强度，有效控制水对巷道底板的侵蚀作用，缩小巷道围岩塑性区范围，改善锚杆的锚固基础，从而获得良好的底鼓控制效果。

参考文献(References)：

[1] 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. 455 - 481.(Chen Yanguang，Lu Shiliang. Strata Control around Coal Mine Roadways in China[M]. Xuzhou：China University of Mining and Technology Press，1994. 455 - 481.(in Chinese))

[2] 康红普，陆士良. 巷道底臌机理的分析[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))

[3] 姜耀东，陆士良. 巷道底臌的机理研究[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))

[4] 王卫军，侯朝炯. 软岩巷道支护参数优化与工程实践[J]. 岩石力学与工程学报，2000，19(5)：647 - 650.(Wang Weijun，Hou Chaojiong. Optimum of supporting parameter of soft-rock roadway and engineering practice[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2000，19(5)：647 - 650.(in Chinese))

[5] 王卫军，侯朝炯. 回采巷道煤帮锚杆可靠性分析[J]. 岩石力学与工程学报，2001，20(6)：813 - 816.(Wang Weijun，Hou Chaojiong. Reliability analysis on coal wall bolting of extraction gallery[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2001，20(6)：813 - 816.(in Chinese))

[6] 刘长武，褚秀生. 构造应力对巷道维护的影响[J]. 矿山压力与顶板管理，1999，2：22 - 24.(Liu Changwu，Zhu Xiusheng. Effect of tectonic stress on roadway maintenance[J]. Ground Pressure and Strata Control，1999，2：22 - 24.(in Chinese))

[7] Itasca Consulting Group Inc.. UDEC3.1 Users Manual[M]. Minneapolis：Itasca Consulting Group Inc.，2002.

[8] 侯朝炯，何亚男. 加固巷道帮、角控制底臌的研究[J]. 煤炭学报，1995，20(3)：1 - 5.(Hou Chaojiong，He Ya′nan. Study on reinforcing sides and corners of roadway to control floor heave[J]. Journal of China Coal Society，1995，20(3)：1 - 5.(in Chinese))

[9] 王卫军. 回采巷道底鼓力学原理及控制技术研究[博士学位论文][D]. 徐州：中国矿业大学，2002. 95 - 96.(Wang Weijun. Study on mechanical principle and new control way of floor heave of extraction opening[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2002. 95 - 96.(in Chinese))

[10] 李树清. 葛泉矿软岩大巷底鼓机理及控制研究[硕士学位论文][D]. 长沙：中南大学，2003.(Li Shuqing. Study on mechanism and control of floor heave of soft-rock roadway in Gequan coal mine[M. S. Thesis][D]. Changsha：Central South University，2003.(in Chinese))

万方数据