

doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2015.01.001

泥化弱胶结软岩巷道底板变形破坏机理分析

李廷春¹, 张仕林¹, 卢振^{1,2}, 王超¹, 刘洪强^{1,3}

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 青岛经济技术开发区 建筑工务局, 山东 青岛 266500;
3. 煤炭工业济南设计研究院有限公司, 山东 济南 250031)

摘要:煤矿软岩巷道极易发生变形破坏, 底臃量大是其重要的特征. 以新上海一号煤矿副井绕道巷道为工程背景, 研究了泥化弱胶结软岩巷道底板的变形破坏机理. 从现场选取岩样进行室内实验, 研究发现围岩具有强度低、胶结程度差、遇水泥化软化、吸水膨胀等特殊的物理力学性质; 结合现场监测数据和数值模拟结果, 巷道底板变形速度快、持续时间长、总变形量大且不收敛, 是以流变和膨胀为主的非线性大变形; 底板破坏与变形增加的趋势一致, 塑性区发展速度前期快, 后期慢, 但范围不断扩大; 通过机理分析, 巷道底板的变形破坏是在水和构造应力耦合作用下的恶性循环的结果, 底臃为流动膨胀复合型, 治理的关键是治水和加强支护. 以上述理论为指导, 对巷道支护方案进行了优化, 监测数据显示底板变形破坏得到了有效控制.

关键词:弱胶结软岩; 巷道底臃; 现场监测; 数值模拟; 变形破坏机理

中图分类号:TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2014)01-0001-07

Analysis of deformation and failure mechanism of roadway in the mud weakly consolidated soft rock strata

Li Tingchun¹, Zhang Shilin¹, Lu Zhen^{1,2}, Wang Chao¹, Liu Hongqiang^{1,3}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Qingdao Economic and Technological Development Zone Works Bureau, Qingdao 266500, China;
3. Coal Industry Jinan Design and Research Company Limited, Jinan 250031, China)

Abstract: Deformation and failure can easily happen in soft rock roadway of coal mine, and one of the most important features is large deformation of the floor. In order to study the deformation and failure mechanism of roadway in the mud weakly consolidated soft rock strata, the bypass roadway of auxiliary shaft in the new Shanghai No. 1 Coal Mine was taken as the engineering background. Through mechanics experiments to rock samples, special physical and mechanical property of surrounding rock were discovered, including low strength, poor cementation, muddying and swelling in the presence of water. Combining the results of situ monitoring and numerical simulation, deformation of floor of roadway was featured with fast speed, lasting long, large total volume and no convergence, and the deformation was large nonlinear deformation mainly composed of flowing and swelling. Tendencies of failure and deformation were the same, expanding speed of plastic zone was faster in early stage than later stage, but the zone kept expanding. Through analyzing their mechanism, deformation and failure of the floor in roadway was the result of vicious circle under coupling effect of water and tectonic stress. As the floor heave was of the type which was integrated with flowing and swelling, water controlling and support reinforcing were key measures which were taken to deal with floor heave. Based on the study above, the support scheme of the bypass roadway of auxiliary shaft was optimized and the monitoring data showed that deformation and failure of the roadway were effectively controlled.

Keywords: mud weakly consolidated soft rock; floor heave in roadway; field monitoring; numerical simulation; deformation and failure mechanism

收稿日期: 2014-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279096); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2012EEM030)

通信作者: 李廷春(1968-), 男, 山西朔州人, 博士, 教授, 主要从事裂隙岩体力学特性方面的研究. E-mail: tchli_sd@163.com

随着我国中东部地区煤炭产量的锐减,煤炭主产区正逐步向西部转移,然而西部煤矿的基岩层多为泥化弱胶结软岩,此类围岩强度低、胶结程度差、遇水易泥化软化膨胀.处于该类软岩地层中的巷道变形量大、变形持续时间长,特别是底臃现象严重,巷道需要不断地返修和维护,这不仅影响煤矿的正常生产,而且浪费了大量的资金,极大降低了煤矿的生产效率.

关于软岩巷道底臃问题,许多专家学者进行了研究,并取得了诸多成果.姜耀东等^[1-2]探讨了巷道底板破坏的基本特征,将巷道底板破坏分为挤压流动型、挠曲褶皱型、遇水膨胀型、剪切错动型4类,并分析了4种类型底板破坏的机理及其影响因素;刘泉声等^[3-5]对深井高应力软岩的底板变形破坏机理进行了研究,得出高地应力软岩巷道底板受动荷载和水影响较大,呈现挤压剪切流变特性;贾明魁等^[6-7]提出采用锚注支护方案能够解决软岩巷道底臃等变形、破坏问题.

以上成果极大推动了软岩巷道底臃机理研究的发展,但是泥化弱胶结软岩特性复杂,现场条件多变,针对该类软岩巷道底板变形机理的研究较少.在总结前人研究成果的基础上,本次研究借助现场监测、数值模拟、理论分析等方法,深入研究泥化弱胶结软岩巷道底板变形破坏过程和机理;并以此为指导,对巷道支护方案进行优化,期望对类似巷道底臃治理起到指导作用.

1 工程概况

新上海一号煤矿副井绕道巷道位于+880 m水平,埋深500 m,形状为直墙半圆拱形,宽度4.6 m,拱高2.3 m,直墙高1.8 m.该巷道南面为井底水仓,北面为副井井底车场重车道,东面为副井井筒,西面为主井井底车场.

1.1 巷道围岩物理力学特征

副井绕道巷道主要沿泥岩掘进,顶板岩性为砂质泥岩和煤,底板主要为粗砂岩,巷道地质构造不复杂,但地下水丰富.

根据地应力实测结果,巷道原岩应力场第一主应力为水平应力,最大水平主应力为垂直应力的1.51倍,最小水平主应力的1.73倍.

从现场选取岩石试样,进行岩石物理力学性质实验,将实验所得数据分析总结得到岩石物理力学性质参数如表1所示.

表1 巷道岩石物理力学性质参数

岩性	$\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$	E/MPa	μ	C/MPa	$\varphi / (^\circ)$	σ_1/MPa	软化系数	R_c / MPa
泥岩	21.2	6 700	0.31	4.3	19	2.11	0.18	12.46
砂质泥岩	20.9	4 700	0.43	4.2	20	1.92	0.15	6.89
煤	16.0	3 700	0.45	0.5	29	1.03	0.28	4.52
粗砂岩	19.6	4 000	0.28	4.5	24	1.89	0.29	5.38

巷道围岩的单轴抗压强度 R_c 均小于25 MPa,属于典型软岩;巷道主要围岩软化系数为0.15~0.29,表明岩体遇水软化现象严重.

通过岩石矿物成分实验,测得巷道围岩中含有粘土矿物高岭石(平均18.8%)和伊利石(平均20.7%)以及蒙脱石(平均8.7%),由于所含矿物成分的特殊性,围岩在宏观上表现为胶结程度差、受力易破碎、遇水易泥化松散膨胀.

综上,巷道主要围岩具有强度低、胶结程度差、遇水泥化软化、吸水膨胀等特殊物理力学性质,属于典型的泥化弱胶结软岩.

1.2 巷道原始支护方案

副井绕道巷道原始支护方案为锚网喷+钢棚联合支护,底板不支护,主要支护参数如下:

1) 锚杆为 $\Phi 22 \text{ mm} \times 2\ 800 \text{ mm}$ 高强螺纹阻尼锚杆,间排距 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$,锚固力 $\geq 80 \text{ kN}$,托盘规

格为 150 mm × 150 mm × 12 mm;

2) 锚索为 $\Phi 22.6$ mm × 7 000 mm 中空注浆强力锚索, 间排距 2 000 mm × 2 400 mm, 每排 5 根, 拱部 3 根、两墙各 1 根, 端部锚固, 预应力 ≥ 120 kN, 托盘规格为 $\Phi 300$ mm × 20 mm;

3) 喷射混凝土强度等级 C20, 初喷 50 mm, 复喷 100 mm;

4) 钢棚由 U36 型钢制成, 棚间距 600 mm, 每架棚配 3 套固棚锚杆.

1.3 巷道围岩表面位移监测

巷道开挖支护后设置监测断面和监测点, 监测巷道围岩位移, 其中底板围岩位移量最大, 底板围岩位移-时间曲线如图 1 所示.

由图 1 可见: 巷道开挖支护后 20 d 内巷道底板围岩变形呈线性增长, 变形速度快, 变形量大; 约从 20 d 到 30 d, 围岩变形速度减缓; 30 d 以后, 围岩呈现出稳定变形的特点, 变形速度虽不大, 但变形量持续增加, 且不收敛.

底板围岩前 60 d 的变形与蠕变曲线中的初始蠕变和稳定蠕变较为吻合, 体现出了泥化弱胶结软岩的流变特性.

从围岩变形量看, 60 d 内巷道底板位移量约为 510 mm, 底臃严重.

从现场观测看, 由于巷道刚开挖时施工用水以及地下水较多, 但未形成排水系统, 底板围岩泥化膨胀严重, 如图 2 所示; 支护之后, 围岩泥化程度有所降低, 但底板破坏仍在持续进行, 严重影响巷道的正常使用.

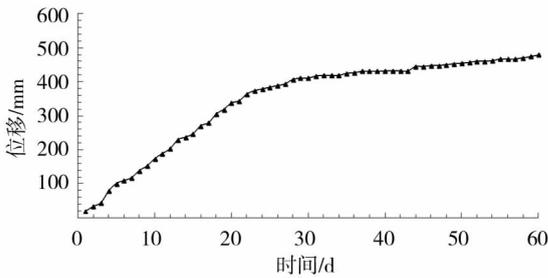


图 1 巷道底板围岩位移-时间曲线

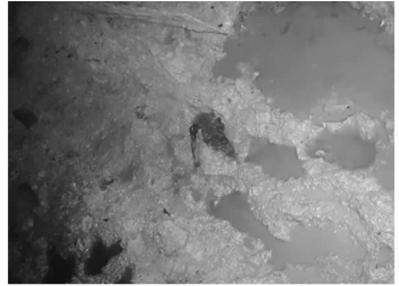


图 2 巷道底板围岩

2 巷道底板变形破坏的数值模拟

2.1 计算模型的确定

采用 Flac^{3D}[8] 进行数值模拟, 选取 cvisc 模型, 即 Burger's 模型的粘塑性行为模型, 这种模型的优点是在包含岩体 Burger's 蠕变效应的同时, 岩体塑性破坏采用 Mohr - Coulomb 准则, 更加符合泥化弱胶结软岩变形破坏的特点. cvisc 模型的求解时间和时间步代表着真实的时间, 计算时最大蠕变时间步长与粘性常数和剪切模量的关系可表示为

$$\Delta t_{\max}^{cr} = \min\left(\frac{\eta^K}{G^K}, \frac{\eta^M}{G^M}\right)/10^3. \quad (1)$$

式中: Δt_{\max}^{cr} 为最大蠕变时间步长, s; η^K 为开尔文粘度系数, $\text{GPa} \cdot \text{s}$; G^K 为开尔文剪切模量, GPa ; η^M 为马克斯韦尔粘度系数, $\text{GPa} \cdot \text{s}$; G^M 为马克斯韦尔剪切模量, GPa .

2.2 数值模型介绍

巷道计算模型如图 3 所示, 为消除边界效应, 其尺寸取为 50 m × 50 m × 7.2 m, 模型左右两侧限制水平位移, 底部限制垂直移动,

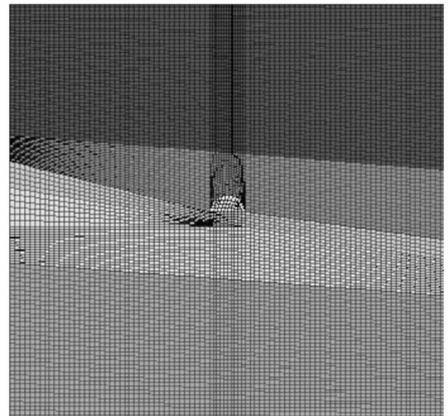


图 3 FLAC^{3D} 计算模型

上面取应力边界;巷道周围各岩层的倾角、厚度、地应力根据实测资料设定;岩石流变参数通过岩石蠕变试验获得.由于计算的对象是宏观的岩体,其受地下水、裂隙、断层、现场施工等多个方面的影响,岩体强度必然低于岩石强度,借助 Flac^{3D} 对表 1 中的岩石基本弹塑性参数在计算机上进行反算、折减,反复试算直至模拟结果与监测结果吻合为止,折减后的基本弹塑性参数及粘弹塑性流变力学参数如表 2 所示.由于只含有少量的煤,因此模拟中顶板岩层表示为均一的砂质泥岩.

表 2 巷道围岩弹塑性基本参数及粘弹塑性流变力学参数

岩层	E/MPa	μ	C/MPa	$\varphi/(\text{°})$	σ_t/MPa	G_K/GPa	G_M/GPa	$\eta_K/\text{GPa}\cdot\text{s}$	$\eta_M/(\text{GPa}\cdot\text{s})$
泥岩	4 800	0.29	2.4	20	1.0	42.3	1.12	1.26e5	2.18e8
砂质泥岩	3 800	0.30	2.0	22	0.7	41.8	1.10	1.19e5	2.07e8
粗砂岩	3 100	0.27	3.0	24	0.6	40.5	1.08	1.07e5	1.99e8

2.3 数值计算结果分析

1) 底板围岩变形

将底板位置的模拟数据提取出来,绘制出位移-时间曲线如图 4 所示,巷道底板变形模拟值与现场监测结果对比如表 3 所示.

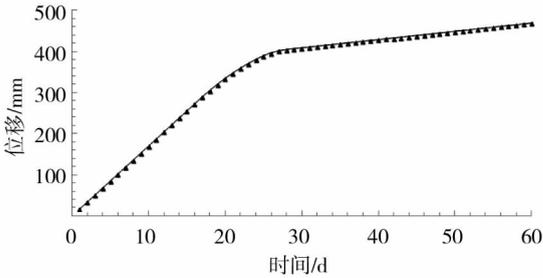


图 4 巷道底板围岩位移-时间曲线

表 3 巷道底板变形现场监测与数值模拟结果对比

时间	监测数据	模拟结果
	底板变形/mm	底板变形/mm
10	175	170
20	339	332
30	415	413
60	511	503

对比图 1 和图 4,从巷道围岩变形趋势看,监测结果与数值模拟的结果均显示出巷道底板围岩初期变形快、变形量大、变形持续时间长、破坏范围大、变形不收敛的特点.

由表 3,从围岩变形量看,巷道开挖后底板围岩变形监测值均略大于数值模拟结果,但差值不大.

综上 2 个方面,结合巷道围岩特殊的物理力学性质,得出泥化弱胶结软岩巷道底板变形是以流变和膨胀变形为主的非线性大变形.

2) 塑性区分布

巷道开挖支护 10 d, 20 d, 30 d, 60 d 后的围岩塑性区分布如图 5 所示.

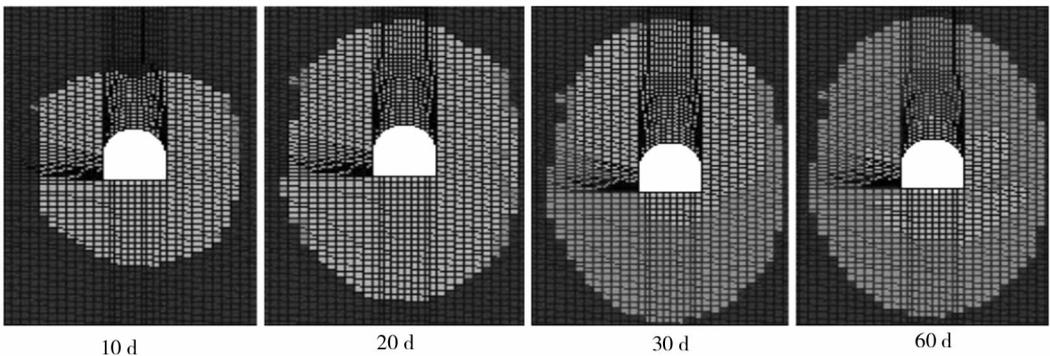


图 5 围岩塑性区分布变化

由图 5 可见,巷道围岩的塑性区在巷道四周呈椭圆形发展,按照时间先后顺序底板进入塑性区的范围

分别为 6.0 m, 8.5 m, 9.0 m, 9.2 m. 巷道开挖支护初期塑性区扩展速度快, 范围大, 30 d 之后底板塑性区扩展速度逐渐降低, 但范围仍不断扩大. 底板围岩塑性区扩展的趋势与变形量增加的趋势是一致的, 体现了底板围岩的流变特性.

3) 围岩应力分布

巷道开挖支护 60 d 后围岩最大、最小主应力分布如图 6 所示.

由图 6(a) 可见, 巷道底板中央出现了受拉区, 底角处有应力集中现象, 这对底板稳定极为不利; 由图 6(b) 可见, 在构造应力和膨胀应力作用下, 底板 7.5 m 深度内形成了半圆形压应力集中区, 该区内最小主应力达到了 22.5 MPa, 底板围岩承受了较大的挤压荷载.

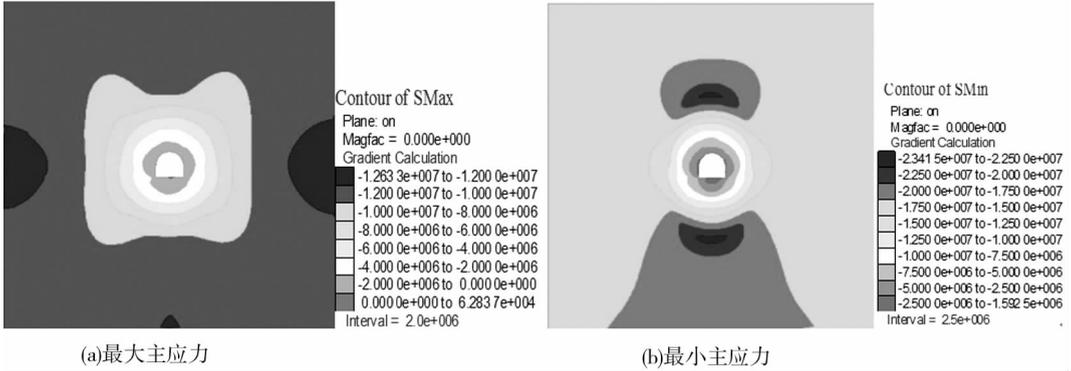


图 6 围岩最大主应力和最小主应力

3 底板变形破坏机理分析

泥化弱胶结软岩巷道底板变形破坏是一个复杂的过程, 与该类软岩本身特性密切相关, 结合现场监测和数值模拟的结果, 可得泥化弱胶结软岩巷道底板在水和构造应力共同作用下的变形破坏机理.

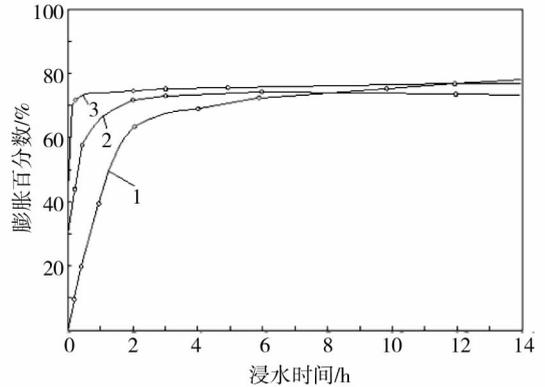
1) 水的作用

泥化弱胶结软岩巷道底板围岩中的伊利石、蒙脱石等粘土矿物浸水后会发​​生泥化膨胀, 图 7^[9] 为国内 3 个矿区的膨胀软岩浸水后的膨胀时间曲线, 膨胀率达到了 70% 左右^[9]. 泥化弱胶结软岩巷道开挖以后, 底板围岩迅速形成一个不断扩展的塑性区, 在应力重新分布时产生破裂和扩容.

2) 膨胀应力和构造应力的耦合作用

在施工过程中, 巷道积水难以避免, 水与围岩表面接触, 并通过裂隙渗透进入岩体内部, 加之软岩受载屈服之后渗透性增强^[10], 水与底板围岩充分接触且接触范围不断增大. 底板岩体遇水后泥化膨胀, 产生了膨胀应力.

该矿地应力以水平构造应力为主, 在水平构造应力和膨胀应力的耦合作用下, 形成了十分不利于底板稳定的围岩应力状态, 在数值模拟结果中已充分体现



1. 龙口含泥页岩; 2. 唐山泥化砂岩; 3. 潘集 3# 井泥岩.

图 7 软岩浸水后的膨胀时间曲线

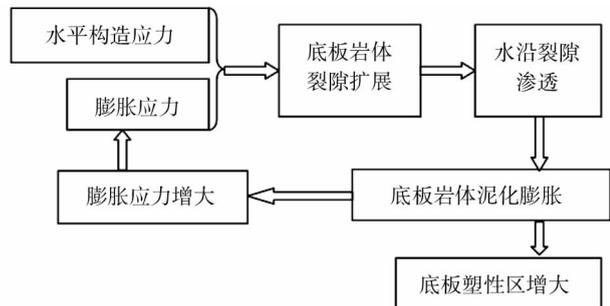


图 8 底板破坏机理

出这种现象, 如图 6 所示. 在上述不利荷载的作用下, 底板岩体裂隙发生扩展, 围岩的渗透性大大增加, 水的影响范围变的更大, 底板岩体不断膨胀, 应力不断增加. 如此恶性循环如图 8 所示, 底板的塑性区范围不

断扩大,底臃无法抑制.

底板塑性区可分为饱和区和非饱和区,饱和区内的岩石几乎完全破坏,非饱和区的岩石虽然仍有一定的承载力,但强度严重下降,这个范围不断向深部扩展,如图5所示.随着水的持续渗透,底板岩体呈现出流变性.在构造应力和膨胀应力的耦合作用下,泥化膨胀的底板围岩被挤进巷道,形成流动膨胀复合型底臃.

4 底板变形控制技术

一般而言,巷道开挖支护后,由于底板遇水膨胀产生的底板位移量与支护阻力的关系^[11]为

$$\mu = \alpha\beta K_s B(1 - \log P_a / \log P_0). \quad (2)$$

式中: μ 为底板膨胀变形量,m; α 为施工修正系数,与施工因素有关; β 为构造应力修正系数,与构造应力有关; K_s 为自由膨胀率; P_0 为完全阻止膨胀型底板破坏所需支护阻力,N; P_a 为实际支护阻力,N.

膨胀底板变形和支护阻力关系的特征曲线如图9^[11]所示.由图9及式(2)可得,支护阻力越大,巷道底板围岩膨胀变形量越小,相反,如果底板开放,很容易造成底板膨胀破坏.

因此,泥化弱胶结软岩巷道底板治理的关键是治水和加强底板支护.以上述研究为基础,对新上海一号煤矿副井绕道巷道原支护方案进行了优化.

4.1 优化后的支护方案

在原支护方案的基础上增加了锚拉反底拱支护,并采取防水措施,如图10所示,具体内容为

1) 巷道开挖后,设置临时水沟,尽量隔离水与底板围岩的紧密接触.

2) 反底拱延伸至巷道直墙,横筋和纵筋均为 $\Phi 20$ mm 二级螺纹钢,采用14#铅丝绑扎搭接,搭接长度为700 mm,间排距为250 mm \times 250 mm,两层钢筋间距200 mm,混凝土强度等级为C30,支护厚度为400 mm,开挖后尽快施工,及时封闭底板围岩.

3) 2根底角锚索为 $\Phi 15.7$ mm \times 7 000 mm的钢绞线,端部锚固,预紧力 ≥ 120 kN,反底拱左右两侧各一根,排距2 400 mm,俯角30°,随反底拱施工.

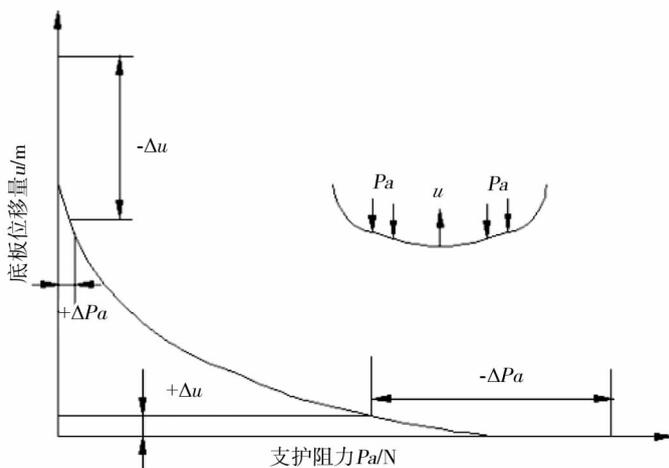


图9 膨胀底板变形和支护阻力关系的特征曲线

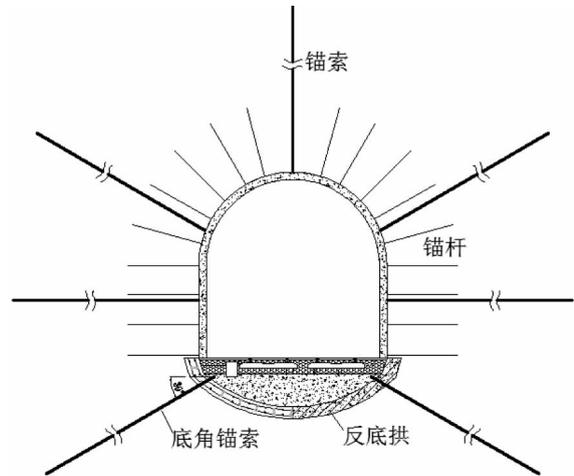


图10 优化支护方案后巷道断面图

4.2 支护方案优化后现场监测及分析

优化支护方案实施后,对巷道底板变形进行了跟踪监测,监测结果如图11所示,图12为现场应用实际效果图.

由图11可见,巷道开挖后20 d底板变形速度较快,但变形量较小,20 d后,变形逐渐收敛,新的支护结构发挥出了较好的作用.巷道底板变形量最终不超过105 mm;由图12可见,使用新支护方案后底板支

护效果良好,底板变形破坏得到了有效控制.

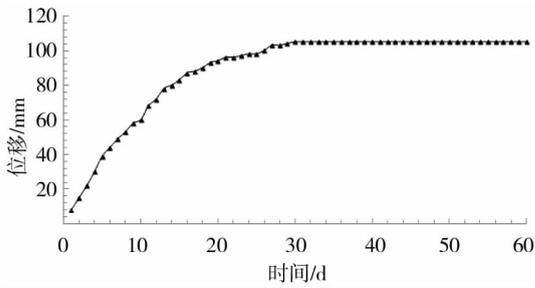


图 11 巷道底板围岩位移 - 时间曲线图



图 12 现场应用实际效果图

5 结论

本文借助现场勘察、室内试验、现场监测、数值模拟、理论分析相结合的方法,对泥化弱胶结软岩巷道底板变形破坏机理进行了研究,得出以下结论:

1) 泥化弱胶结软岩巷道围岩具有强度低、胶结程度差、遇水泥化软化、吸水膨胀等特殊的物理力学性质.

2) 泥化弱胶结软岩巷道底板变形的特点为变形速度快、持续时间长、总变形量大且不收敛,是以流变和膨胀变形为主的非线性大变形. 底板破坏与变形增加的趋势一致,塑性区发展速度前期快,后期慢,但范围不断扩大.

3) 泥化弱胶结软岩巷道底板变形破坏机理:水与巷道底板围岩表面接触,并通过裂隙渗透进入岩体内部,岩体遇水泥化膨胀,产生膨胀应力;在水平构造应力和膨胀应力的耦合作用下,底板围岩的裂隙不断扩展,水的影响范围扩大,围岩变形量持续增加,如此恶性循环,形成了流动膨胀复合型底臃.

4) 泥化弱胶结软岩巷道复合型底臃治理的关键是治水和加强底板支护. 副立井绕道巷道通过应用锚拉反底拱、设置临时水沟等技术,有效控制了底板围岩的变形破坏,对类似软岩巷道的底臃治理有重要的借鉴意义.

参考文献:

- [1] 姜耀东, 陈毅鑫, 赵文岗, 等. 深部开采中巷道底臃问题的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2396 - 2401.
- [2] 姜耀东, 陆士良. 巷道底鼓机理分析[J]. 煤炭学报, 1994, 19(4): 343 - 351.
- [3] 刘泉声, 刘学伟, 黄兴, 等. 深井软岩破碎巷道底臃原因及处置技术研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 566 - 571.
- [4] 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.
- [5] 吴和平, 陈建宏, 张涛, 等. 高应力软岩巷道变形破坏机理与控制对策研究[J]. 金属矿山, 2007, 375(9): 50 - 54.
- [6] 贾明魁, 赵兴东, 贾安立. 极软岩巷道底臃锚注支护控制技术[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(3): 360 - 362.
- [7] 刘黎明, 杨磊. 松散破碎软岩巷道底臃控制的试验研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2007, 22(2): 13 - 16.
- [8] Itasca Consulting Group Inc. FLAC^{3D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) User's Manual [R]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group Inc, 2005.
- [9] 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: 147 - 149.
- [10] 张农, 许兴亮, 李桂臣. 巷道围岩裂隙演化规律及渗流灾害控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 330 - 335.
- [11] 薛顺勋, 聂光国, 姜光杰. 软岩巷道支护技术指南[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002: 19 - 23.