

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.04.14

深部复杂地质条件下巷道支护方案优化

胡 晴,王新民,韩章程

(中南大学资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083)

摘要:随着矿石开采向纵深发展以及巷道服务年限的变长,巷道围岩应力逐渐增加,巷道支护频率与难度不断加大。以深部复杂地质条件下的贵州某非金属矿巷道为背景,利用深部吸能锚杆巷道支护原理,并结合 ANSYS 数值模拟方法,对巷道支护方案进行了分析和优化研究。利用 SWJ—IV 隧道收敛计监测支护优化前后巷道表面位移,工程实际表明优化后的支护方案大大降低了巷道围岩的变形量,提高了深部复杂地质条件下巷道支护的可靠性与安全性。

关键词:巷道支护;数值模拟;吸能锚杆;优化设计

中图分类号:TD353

文献标识码:A

文章编号:1003-8035(2016)04-0081-07

Optimization design of roadway support under complicated geological conditions

HU Qing, WANG Xinmin, HAN Zhangcheng

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: With the increase of mining depth and the length of the service life of the roadway, the stress of roadway surrounding rock is increasing gradually and the frequency and difficulty of roadway support is increasing. Based on the background of a nonmetal mine roadway in Guizhou with deep complex geological conditions, the support principle of the deep suction bolt support is used, and the support scheme is analyzed and optimized with the ANSYS numerical simulation method. Using the SWJ—IV tunnel convergence gauge monitoring support optimization before and after surface displacement of roadway. Engineering practice shows that the optimized support scheme greatly reduces the deformation of roadway surrounding rock, deep and complex geological conditions of roadway supporting reliability and safety is improved.

Keywords: roadway support; numerical simulation; energy absorbing anchor bolt; optimization design

0 引言

锚杆支护是矿山行业的一种传统支护方式,支护设计一般采用螺纹锚杆,用砂浆或者树脂锚固,这种锚杆由于其支护强度高而被广泛应用^[1-3]。但是,由于各个矿山的地质条件、巷道围岩应力分布、支护情况等都有差异^[4]。再加上采矿业开采深度逐渐增加,高地应力导致的围岩大变形,使得普通的螺纹锚杆在深部复杂地质条件下的支护效果面临着严重的挑战^[5]。

何忠国、张水平等结合有限元数值模拟计算,发现将传统螺纹钢锚杆的锚杆长度、杆体长度等进行适当调整后,锚杆底部及其与围岩接触位置的最大应力比普通支护的应力值大大减小,提出了一种新的巷道支护方式——吸能锚杆^[6-7]。吸能锚杆的弯曲段能提供大的延伸量,保证锚杆在极限承载能力范围内也不损坏。

与解析法和相似模拟等方法相比,数值模拟在特殊复杂的条件下更具有适应性、针对性^[8-11]。因此,

收稿日期:2016-04-05; 修订日期:2016-05-24

基金项目:十二五”国家科技支撑计划(2012BAC09B02)

第一作者:胡 晴(1991-),女,湖南株洲人,硕士研究生,主要从事矿山安全技术研究。E-mail:1187181749@qq.com

本文提出将吸能锚杆与 ANSYS 数值模拟方法相结合,来有效解决处于高地应力复杂地质条件下的矿井巷道支护优化问题。

1 工程概况

本文以贵州某非金属矿为例,随着开采纵深以及巷道服务年限不断增加,该矿大部分巷道出现了严重的变形和破坏,如片帮、冒落、坍塌、底鼓等。由于巷道围岩应力的逐渐增加,巷道变形越来越严重,支护频率与支护难度也越来越大,导致矿山企业成本明显增加、矿山巷道安全隐患也随之加剧。

本文以该矿埋深 700 m 的某运输大巷为例,运输大巷的长×高=160 m×80 m。该大巷的围岩主要是红页岩,底板以砂岩为主,其主要力学特性如下。砂岩: $\sigma_{\max}=34.49$ MPa, $R_c=128.56$ MPa, $K=R_c/\sigma_{\max}=128.56/34.49=3.7<7$,故此砂岩局部属高地应力水平。红页岩: $\sigma_{\max}=17.02$ MPa, $R_c=34.37$ MPa, $K=R_c/\sigma_{\max}=34.37/17.02=2.01<7$,故此红页岩局部属高地应力水平。

该巷道原来支护情况为:拱部钢筋砂浆锚杆(长 1.5 m)、喷浆支护,支护材料主筋采用 6#钢筋,锚网尺寸为 2 m×2 m,锚杆长 1.5 m,网度为 15 mm×15 mm,锚杆排距 1 m,间距 800~1000 mm,喷射厚度 120 mm。大巷断面形状为三心拱形,巷道设计掘进宽度 4.74 m,设计掘进高度 4.02 m,采用树脂锚杆+金属网+喷射混凝土的支护方式,锚杆长度 2.0 m,巷道掘进后一般应先喷 40~60 mm 砼,然后再打锚杆和挂网,最后二次喷浆到设计厚度 120 mm,支护断面形状与支护方式见图 1。

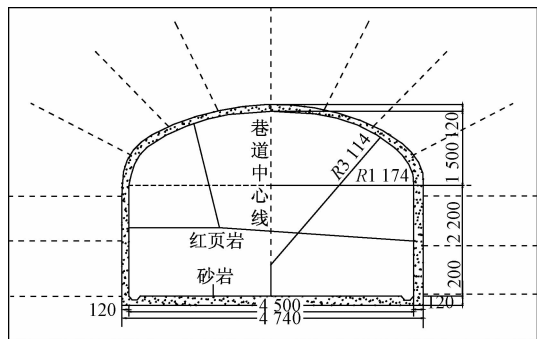


图 1 巷道现有支护方案

Fig.1 Existing support scheme of roadway

通过对现有支护方案进行分析,发现存在以下不足:

(1)未考虑红页岩倾斜层状节理的影响。受底盘岩层厚度的影响,其开拓巷道主要布置在有倾斜层理的红页岩中,此时洞室边缘应力分布必然要受倾斜层状节理的影响。锚杆顺层和穿层布置与否会很大程度影响支护效果。

(2)未考虑锚杆长度的适用性。对于现在 2.0 m 的锚杆长度,是否能达到最佳的支护效果可以做对比分析。

(3)未考虑巷道底板的承载能力的影响。巷道底板承载能力效果的好坏,对顶和帮的支护效果起到至关重要的作用。

2 支护优化的数值模拟研究

2.1 数值分析模型

经过对该矿石的采样分析,可知该矿主要包括四种岩石材料:白云岩、磷矿石、红页岩、砂岩,其岩石力学参数结果见表 1。

表 1 模拟中岩体力学参数一览表

Table 1 mechanical parameters of rock mass in simulation

类别	密度/(10 ³ kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	抗压强度/MPa	抗剪强度/MPa
顶板	红页岩	2.75	8.9	0.33	3.12	43	34.37
底板	砂岩	2.52	22	0.22	4.33	46	128.58

以该矿埋深 700 m 的某运输大巷为例,模型采用 Drucker-Prager 强度准则^[12-14],运用应力边界条件,上表面施加均匀的垂直压应力和水平应力(地应力获得),两侧施加随深度变化的水平压应力,下表面垂直位移固定。利用 ANSYS 软件分别分析该巷道在无支护、现有支护方案不同锚杆长度、增加底锚杆三种不同情况下的围岩应力分布与巷道支护的效果。各方案的计算模型如下:

(1)无支护条件下的计算模型(图 2)。

(2)现有支护方案下,锚杆长度分别为:1.75 m、2.0 m、2.25 m、2.5 m、2.75 m、3.0 m、3.5 m 的计算模型(图 3、图 4)。

(3)底角锚杆支护方案的计算模型,分为两种情况,一是不同锚杆长度支护方案:1.75 m、2.0 m、2.25 m、2.5 m、2.75 m、3.0 m、3.5 m 下的计算模型(图 5)。另一种是优化锚杆长度后,比较了不同角度底角锚杆:30°、40°、45°、50° 影响下的计算模型(图 6、图 7)。

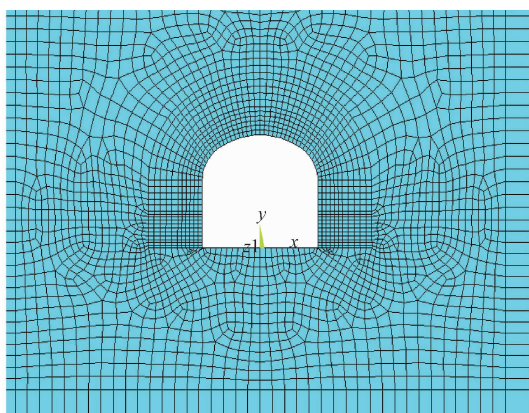


图2 无支护的计算模型

Fig.2 Calculation model without support

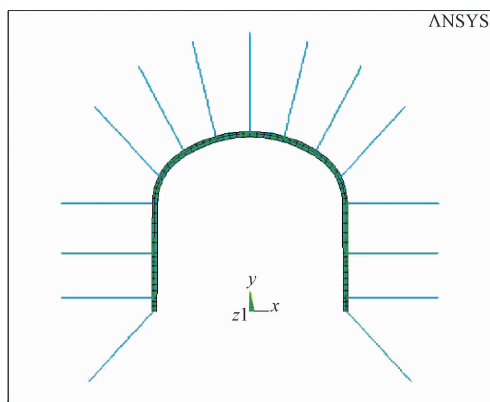


图5 3 m 底角锚杆支护方案

Fig.5 Scheme of corner bolt supporting 3M

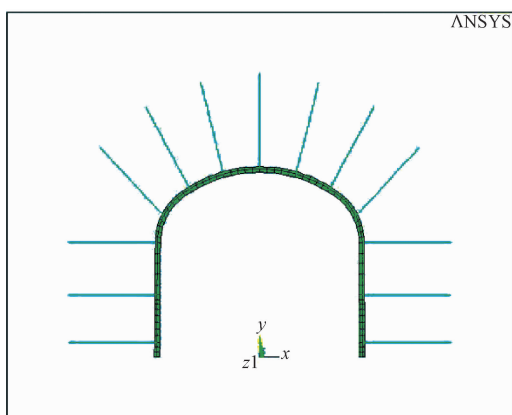


图3 2 m 锚杆支护方案

Fig.3 Support scheme with 2 m bolt

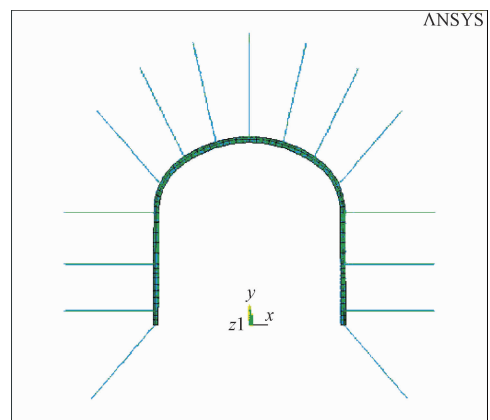


图6 45°底角锚杆支护方案

Fig.6 Supporting scheme with 45° corner bolt

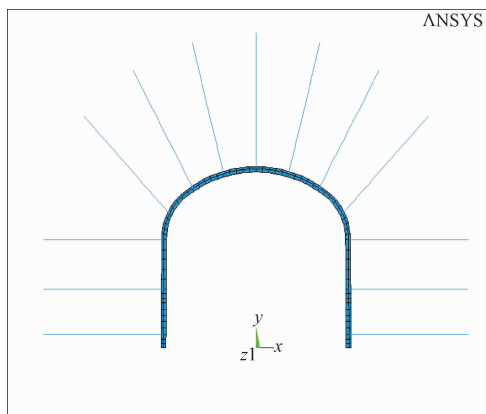


图4 3 m 锚杆支护方案

Fig.4 Support scheme with 3 m bolt

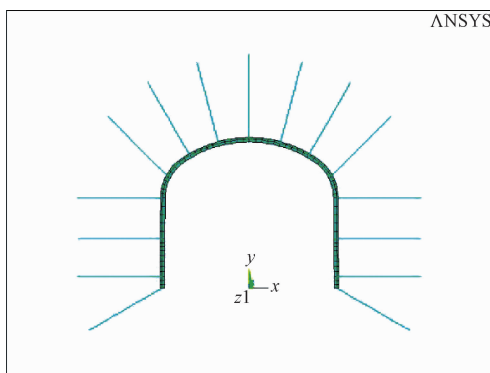


图7 30°底角锚杆支护方案

Fig.7 Supporting scheme with 30° corner bolt

2.2 数值模拟结果分析

2.2.1 无支护条件及各支护方案的计算结果:

无支护、无底锚支护及有底锚支护三种不同条件下的三心拱巷道围岩垂直应力分布云图见图8、图9、图10。

2.2.2 数据分析方法

对比分析围岩在无支护条件及各支护方案下底板的切向应力、围岩内部的支承应力(切向应力)、拱帮边缘的切向应力、拱帮边缘的剪应力的变化情况(图11~图13)。

2.2.3 无底锚支护方案数值模拟比较

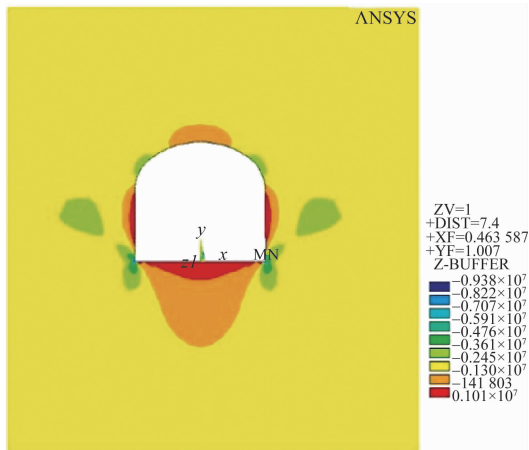


图 8 无支护围岩的垂直应力

Fig. 8 Vertical stress of surrounding rock without support

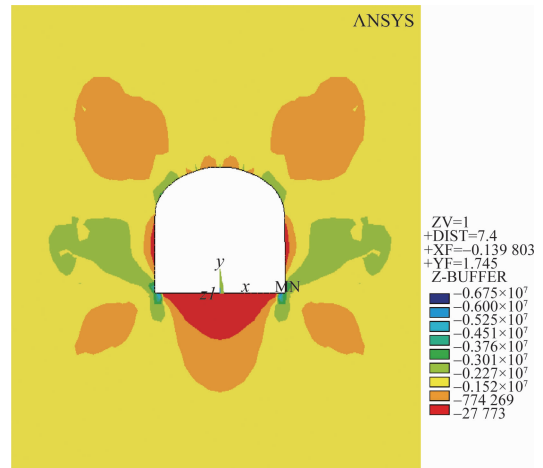


图 10 有底锚支护围岩的垂直应力

Fig. 10 Vertical stress of surrounding rock with corner bolt support

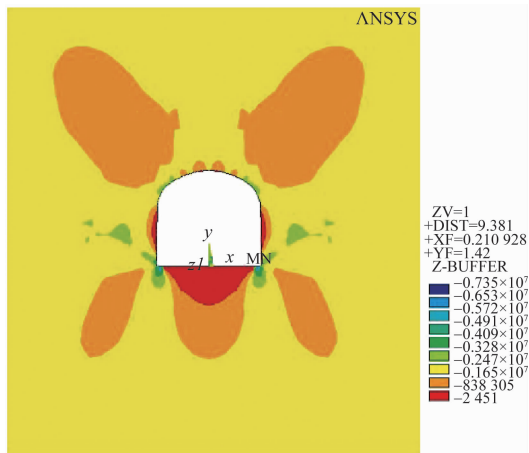


图 9 无底锚支护围岩的垂直应力

Fig. 9 Vertical stress of surrounding rock without corner bolt support

(1) 锚杆长度对砂岩巷道底板的切向应力的影响

图 14 为无锚与无底锚支护条件砂岩巷道底板切向应力曲线分布比较。通过该图可以看出,无锚与无底锚支护条件下的切向应力峰值都偏向底角,加锚以后,切向应力峰值向巷道中心线移动,但加锚杆以后,底板的切向应力普遍增大,表明围岩加锚后,底板将承受更大的应力。随着锚杆支护长度的略有增加,说明锚杆长度对底板切向应力影响不大。对不考虑层理产状的红页岩巷道的情况类似。

(2) 锚杆长度对红页岩巷道帮支撑应力的影响。

图 15 为不考虑红页岩层理产状情况下无底锚不同锚杆长度支护条件红页岩巷道帮支撑应力曲线分布比较。

由图 15 可以看出,随着锚杆长度的增加,巷道围岩的支撑应力向围岩内部转移,并出现两个应力

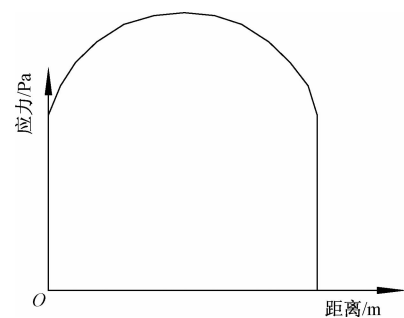


图 11 巷道底板切向应力位置

Fig. 11 Tangential stress position of roadway floor

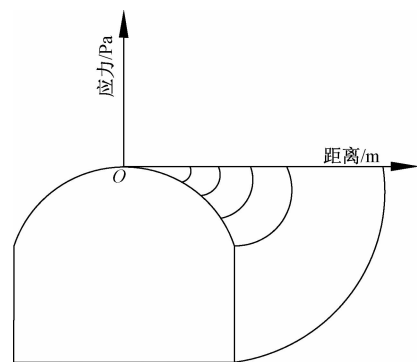


图 12 巷道拱帮边缘应力位置

Fig. 12 Edge stress position of roadway arch

峰值。靠近巷壁的峰值随锚杆长度逐渐增大,并最终成为主要的承载结构,锚杆长度增加对提高围岩的承载能力不大,应力略有增加。通过比较支撑应力曲线可以看出,当锚杆长度为 2.5 m 时最优,形成两个相同承载能力的支撑结构。这对降低岩爆的倾向性是有益的。

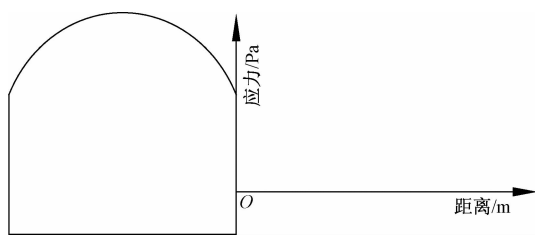


图 13 巷道围岩内部的支承应力位置

Fig. 13 Supporting stress position of surrounding rock in Roadway

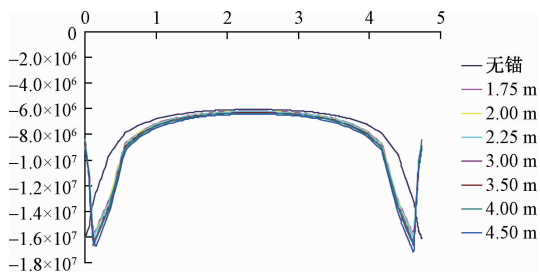


图 14 无锚与无底锚支护条件巷道底板切向应力比较

Fig. 14 Comparison of the tangential stress of the roadway floor in the condition of no anchor and anchor support

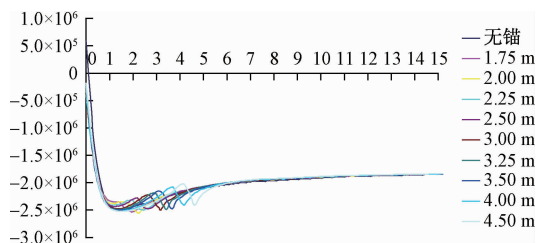


图 15 无底锚不同锚杆长度巷道两帮支承应力比较

Fig. 15 Comparison of two support stress in tunnel with different anchor length of anchor without bottom anchor

2.2.4 底锚支护方案数值模拟比较

图 16 为不考虑红页岩层理产状情况下不同底锚角度锚杆长度 2.5 m 支护条件红页岩巷道底板切向应力曲线分布比较。

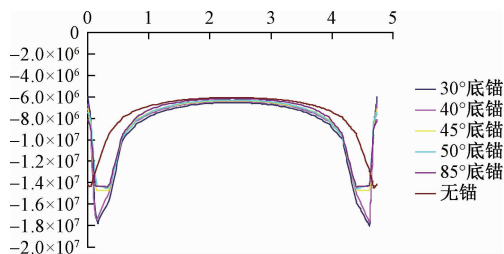


图 16 不同底锚角度巷道底板切向应力比较

Fig. 16 Comparison of tangential stress of roadway floor in different bottom anchor angle

由图 16 可以看出,红页岩加锚后,无底锚或不合适的底锚角度会使底板切向应力增加较大,随着底锚

角度的增大,底板切向应力变小,当底锚角度大于 45° 后,底角底板切向应力的值变化不大,故从底锚安装的角度来说,45°底锚角度最优。

3 锚杆支护参数的优化设计

(1) 砂岩巷道抗岩爆锚杆支护方案

根据该矿三心拱巷道受地应力作用表现出的切向应力集中的位置主要在顶、肩、底角和底板(图 17)。故在这些重要位置同时又是受力相对最大的位置采用新型吸能锚杆。

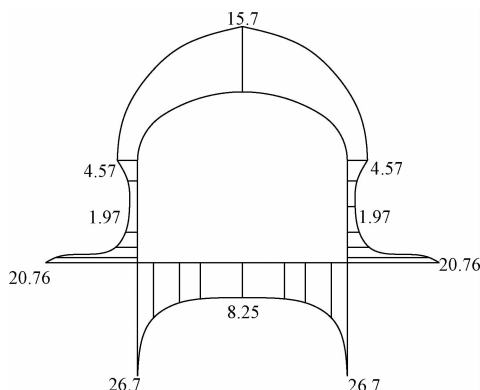


图 17 砂岩巷道切向应力 (MPa)

Fig. 17 Shear stress of sandstone roadway (MPa)

考虑到该矿现有的施工习惯,砂岩巷道与采用的传统巷道支护方案相比较,新方案的特点主要有两个方面:第一,增加两根 45°的底角吸能锚杆;第二,在顶、肩位置采用新型吸能锚杆;吸能锚杆的锚长为 2.5 m。其它的支护参数与现有支护方案一样。

(2) 红页岩巷道抗岩爆锚杆支护方案

红页岩在倾斜层理影响下,切向应力为不对称分布,峰值区在右帮底角,图 18 为考虑倾斜层理情况下三心拱洞室边缘的切向应力分布与传统巷道支护方案相比较,新方案的特点主要有三个方面:第一,增加两根底角锚杆,与垂直方向的角度分别为和两根垂直底板锚杆;第二,在顶、肩、底角和底板这些重要位置采用新型吸能锚杆;第三,与岩层层理平行方向的部分锚杆进行角度调整;吸能锚杆的锚长为 2.5 m。其它的支护参数与现有支护方案一样。

在应用新设计方案支护的巷道,布置一个观测站,利用 SWJ—IV 隧道收敛计观测巷道表面位移,巷道表面位移监测从锚杆支护后开始,主要监测顶底板移近量、两帮移近量和底鼓量。通过将图 19 与 20 比较发现,优化后的支护方案两帮移动量、顶板下沉量明显减小,大大降低了巷道围岩变形量。

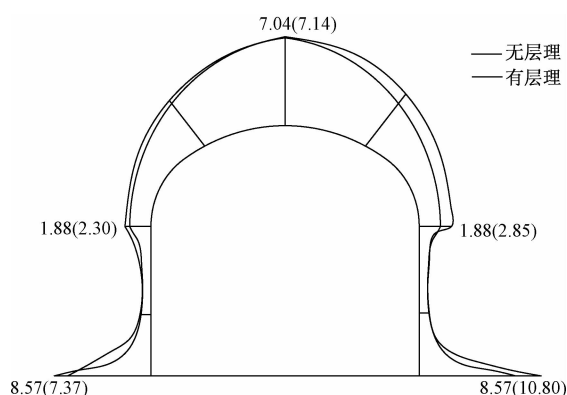


图 18 考虑倾斜层理的切向应力分布 (MPa)

Fig. 18 Considering the inclined bedding tangential stress distribution (MPa)

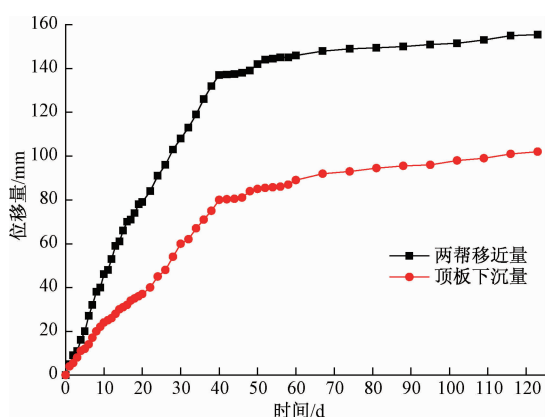


图 19 优化前围岩变形与时间关系

Fig. 19 Relationship between deformation and time of surrounding rock before optimization

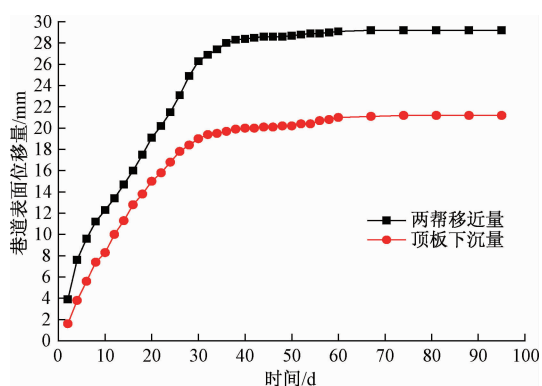


图 20 优化后围岩变形与时间关系

Fig. 20 Relationship between deformation and time of surrounding rock after optimization

4 结论

(1) 通过对巷道围岩变形原因的分析, 针对现有支护方案存在的缺陷, 结合有限元数值模拟对其进行

了优化设计。通过增加底角锚杆、重要位置采用新型吸能锚杆以及调整与岩层层理平行方向的部分锚杆进行角度, 使得优化后方案更加合理。

(2) 在应用优化支护方案的巷道, 利用 SWJ—IV 隧道收敛计观测巷道表面位移。通过与原支护方案对比发现, 优化后的支护方案底板移近量、两帮移近量和底鼓量明显减小, 大大降低了巷道围岩变形量。

参考文献:

- [1] 王永岩, 卢灿东, 曾春雷, 等. 锚杆分类及其特性分析与比较[J]. 煤矿安全, 2007(8): 63-66.
WANG Yongyan, LU Candong, ZENG Chunlei, et al. Analysis and comparison of anchor characteristic and anchor classification[J]. Safety in Coal Mines, 2007(8): 63-66.
- [2] 王果. 回采巷道围岩稳定性分类及锚杆支护设计决策系统研制与应用[D]. 太原理工大学, 2006.
WANG Guo. The development and application of the system to classify the stability of gateway surrounding rocks and decide the design of bolt support[D]. Taiyuan University of Technology, 2006.
- [3] 王锐锋, 刘文斌, 郑挪成. 巷道围岩稳定性分类及锚杆支护设计软件[J]. 煤矿设计, 2000(2): 7-10.
WANG Ruifeng, LIU Wenbing, ZHENG Nuocheng. Software for classification of the stability of roadway surrounding rock and for design of rock bolting[J]. Coalmine Design, 2000(2): 7-10.
- [4] Kai Zhang, Guimin Zhang, Rongbin Hou, et al. Stress evolution in roadway rock bolts during mining in a fully mechanized longwall face, and an evaluation of rock bolt support design[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(48): 1-12.
- [5] 李振项, 谢中强. 深部高应力软岩巷道维修支护技术[J]. 煤矿开采, 2011, 16(4): 63-65, 39.
LI Zhenxiang, XIE Zhongqiang. Technology of supporting and maintaining roadway in deep soft rock with high stress[J]. Coal Mining Technology, 2011, 16(4): 63-65, 39.
- [6] 孙晓明, 何满潮, 冯增强, 等. 深部松软破碎煤层巷道锚网索支护技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(3): 47-50.
SUN Xiaoming, HE Manchao, FENG Zengqiang, et al. Research on bolt/mesh/anchor combined support technology for deep soft and broken seam gateway[J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(3): 47-50.

- [7] 郭志彪,胡永光,任爱武,等. 深部膨胀性软岩巷道修复技术研究[J]. 采矿与安全工程学报,2006,23(3):316-319.
- GUO Zhibiao, HU Yongguang, REN Aiwu, et al. Roadway repair technology in swell soft rock with high depth and high stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2006,23(3):316-319.
- [8] 乔成. 深部巷道锚网喷支护结构的数值模拟与优化设计研究[D]. 安徽理工大学,2009.
- QIAO Cheng. A study on numerical simulation and optimization of rockbolt mesh shotcrete support in deep roadway [D]. Anhui University of Science & Technology,2009.
- [9] Hao Zhou, Ming Xiao, Juntao Chen. Analysis of a numerical simulation method of fully grouted and anti-seismic support bolts in underground geotechnical engineering[J]. Computers and Geotechnics,2016,76:61-74.
- [10] 吴鑫,伯志革,杨凯,等. 3DEC 数值模拟方法在巷道支护优化设计中的应用[J]. 矿业安全与环保,2013(2):73-76.
- WU Xing,BO Zhige,YANG Kai,et al. Application of 3DEC numerical simulation method in roadway support optimization design [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2013(2):73-76.
- [11] 张军. 深部巷道围岩破坏机理及支护对策研究[D]. 中国矿业大学(北京),2010.
- ZHANG Jun. Research on failure mechanism and supporting countermeasure of deep roadway surrounding rock[D]. China University of Mining & Technology Beijing,2010.
- [12] 贺建清,李和志,赵永清,等. 底鼓隧道的底板支护锚杆长度确定方法[J]. 自然灾害学报,2012(6):214-220.
- HE Jianqing, LI Hezhi, ZHAO Yongqing, et al. Determination of length of floor supporting rockbolt in tunnel with Floor-bulge [J]. Journal of Natural Disasters,2012(6):214-220.
- [13] 田永军. 基于 ANSYS 优化的巷道断面设计研究[D]. 天津大学,2007.
- TIAN Yongjun. Study on tunnel section design based on the ANSYS optimization [D]. Tianjin University,2007.
- [14] 李斌. 高围压条件下岩石破坏特征及强度准则研究[D]. 武汉科技大学,2015.
- LI Bin. Study on rock failure characteristics and rock strength criteria under high confining pressure [D]. Wuhan University of Science and Technology,2015.

敬告作者和读者

为适应我国科技信息化建设的需要,扩大作者、读者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》及《中文科技期刊数据库》。今后,本刊将作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给。如果作者不同意将文章编入上述数据库,请在投稿时声明,本刊将作适当处理。谢谢!

《中国地质灾害与防治学报》编辑部