

沙吉海煤矿 01 运输平巷砂砾层顶板控制对策

秦坚¹, 袁越^{2,3*}, 付金磊¹, 尚玺¹

- (1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;
2. 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201;
3. 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要:为了解决沙吉海煤矿施工时钻进较为困难,泥岩底板遇水泥化严重等问题,沙吉海煤矿对运输平巷砂砾层的顶板控制情况提出了一种无腿棚支护方案:无腿棚横梁采用矿用工字钢,工字钢两端与金属托架连接,巷道两帮采用锚网+钢筋梯支护.采用有限元分析软件 Midas-GTS 和有限差分软件 FLAC^{3D} 建立无腿棚支护三维实体模型并进行数值模拟,模拟取得了良好的控制效果.结果表明:巷道左帮支护强度较低,导致左帮变形量远大于右帮;巷道顶部工字钢梁所受的最大弯矩位于距右帮 1/4 梁的长度处,巷道两顶角处应力集中程度较高;巷道底板和两底角处破坏较为严重,尤其是底板的失稳及左底角的破坏严重影响了左帮的稳定,导致左帮变形量较大.现场实践证明,顶板下沉得到有效控制,该支护方案取得了预期的效果.

关键词:沙吉海煤矿;砂砾层;顶板控制;无腿棚支护;数值模拟

中图分类号:TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2020)03-0027-07

On Control Strategy of Sandy Gravel Roof in Shajihai Coal Mine 01 Haulageway

Qin Jian¹, Yuan Yue^{2,3*}, Fu Jinlei¹, Shang Xi¹

- (1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Xiangtan 411201, China;
3. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to solve the problems of drilling difficulty and serious cementation of mudstone floor in Shajihai Coal Mine, aiming at the roof control problem of the haulageway sandy gravel, a legless shed support scheme is proposed in Shajihai Coal Mine. Legless shed beam is made of mine I-beam, the I-beam is connected to the metal bracket at both ends, and the two sides of the roadway are supported by anchor net+steel ladder. Using finite element analysis software Midas-GTS and finite difference software FLAC^{3D}, a three-dimensional solid model of legless shed support is established and numerical simulation is carried out. The simulation has achieved a good control effect. Results show that the support strength of the roadway left working slope is lower, which results in the deformation of the left working slope much larger than that of the right working slope; the maximum bending moment of the I-steel beam at the top of the roadway is located at the length of the quarter beam from the right working slope. The stress concentration degree is high at the roadway two top corners; the destruction of roadway floor and two bottom corners is serious. Especially the instability of the floor and the destruction of the left bottom corner seriously affect the stability of the left working slope, resulting in large deformation of the left working slope. Field practice show that roof subsidence is effectively controlled, and the

收稿日期:2020-06-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51504091;51774130),湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ3166)

*通信作者,E-mail: yuanyuekafu@163.com

support scheme has achieved the expected effect.

Keywords: Shajihai Coal Mine; sandy gravel; roof control; legless shed support; numerical simulation

我国的国土面积十分广阔,煤炭资源丰富,分布地点复杂多样,导致煤矿开采受多方面因素影响,在开采过程中,巷道围岩会产生变形破坏,让矿井开采和工作人员的安全受到巨大的影响^[1-3].在影响煤矿开采的众多方面中,巷道围岩控制又是关键因素之一^[4,5],因此控制巷道围岩变形破坏是保证煤矿资源和工作人员安全的重中之重.当煤矿开采条件较恶劣时,如巷道底板为软弱岩层或加载高应力,巷道变形破坏将会更加显著^[6],这时巷道支护的设计和选择显得尤为关键.若巷道支护效果没有达到要求,巷道围岩的变形破坏反而更加剧烈,这不仅浪费支护材料和成本,造成二次支护的负担,甚至还严重威胁工作人员的安全^[7-9].砂砾层性质较为复杂、结构松散、透水性较强、整体性差,巷道在掘进过程中会有片帮、漏顶、支架压垮等大变形破坏现象.随着砂砾层巷道围岩环境愈加复杂,巷道顶板控制难度更大,严重影响施工进度,威胁施工人员及设备的安全.而我国对于中生代砂砾层巷道围岩的研究较为缺乏,本支护方案可为其他矿区建设和类似围岩条件下的巷道围岩稳定性提供一定的参考和借鉴.相关领域的专家和学者已经有多年的理论和实践经验,为巷道围岩控制提供重要指导和参考.袁越等^[10,11]对西部矿区砂砾层巷道围岩进行了相关研究,并给出相应的支护对策.李国峰等^[12,13]使用FLAC^{3D}软件模拟巷道开挖到支护破坏的过程,通过分析原支护方案的失利原因,提出“一体化”耦合支护技术.康红普等^[14,15]基于对锚杆支护原理的研究,提出强力支理论,开发了锚杆支护的成套技术.搞振等^[16]利用数值模拟的方法模拟回采巷道变形破坏过程,提出了相应的锚网索喷支护技术.王襄禹等^[17]分析近断层采动巷道的变形破坏机制,研究近断层采动巷道围岩控制技术,提出非对称耦合支护原理和让压锚杆工作原理,运用该原理支护取得了良好效果.李彦斌等^[18]研究高应力软岩巷道支护问题,采用数值模拟技术提出了合理的支护技术.本文根据沙吉海煤矿巷道围岩的实际受力情况,提出了一种无腿棚支护方案,该无腿棚支护方案充分利用巷道两帮煤层,尽量减少顶板涌水导入施工巷道,可以实现安全、快速、经济的施工目标.采用有限元分析软件Midas-GTS和有限差分软件FLAC^{3D}建立无腿棚支护三维实体模型并进行数值模拟,对模拟结果进行了分析,为该方案的现场应用提供了理论依据,具有指导意义.

1 工程概况

1.1 工作面条件

沙吉海煤矿首采工作面运输平巷,其设计走向长度为2 382 m,工作面设计倾向长度为200 m,煤层平均厚度为3.29 m,煤层整体倾角为9°~13°.01工作面设计可采储量为1.57 Mt,工作面采用走向长壁采煤方法,采煤工艺为综合机械化采煤.

煤层的顶板岩石以砂砾层、粗砂岩、泥岩、细砂岩、粉砂岩为主,其中砾岩顶板在一、二采区内分布较为广泛;煤层底板岩石以泥岩(含碳泥岩)、细砂岩、粉砂岩为主,岩石极软,仅个别层位以中砂、细砂、粉砂岩为底板时,属次软岩石.图1为运输平巷顶底板岩性分析.

1.2 巷道布置及原支护方式

01工作面两平巷采用沿煤层走向布置,巷道断面均采用梯形断面.运输平巷净宽为4.3 m,最低高度为3.0 m,净断面为14.5 m²;轨道平巷净宽为3.8 m,最低高度为3.0 m,净断面为13.1 m²;两平巷原设计采用架设金属支架和锚网索两种支护方式支护巷道.原支护方案中,由于顶板砂砾层硬度大,钻进较为困难,导致工作进度缓慢;巷道中涌水较多,底板泥岩泥化现象严重;巷道围岩支护强度较低,使顶底板变形较大.而在采用无腿棚支护方案后,顶板控制效果明显,具有以下突出优势:(1)减少

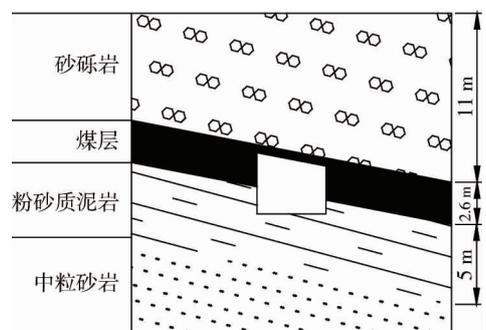


图1 运输平巷顶底板岩性分析

了顶板涌水导入巷道,避免了底板泥岩泥化、砂化,为巷道综掘工艺奠定了基础;(2)充分利用两帮煤壁进行锚网支护,将顶板载荷传递给巷道两帮;(3)实现了锚网主动支护和金属支架被动支护的组合支护体系,能加快工程施工。

2 顶板支护难点及控制对策

2.1 支护难点

由于在沙吉海煤矿首采工作面平巷施工时,顶板砂砾层硬度较大,钻孔极为困难,钻头磨损严重,较难进行传统的锚网索支护,并且顶板涌水极易顺钻孔导入巷道,造成底板泥岩泥化,在掘进过程中松软煤层顶板容易破碎,伴有大量顶煤冒落且围岩破坏严重。

2.2 控制对策

为解决顶板支护难题,提出一种无腿支护方案:

1)沙吉海煤矿01运输平巷拟采用无腿棚支护方案,沿顶煤支护模式.无腿棚横梁采用11#矿用工字钢,棚距800mm,支撑横梁的金属托架采用20mm厚的金属钢板,工字钢两端与金属托架采用U型卡连接,分别采用3根 $\Phi 22\text{ mm} \times 2\ 200\text{ mm}$ 的普通锚杆固定两端的金属托架,并全长锚固.横梁中部布置2根横梁恒阻大变形锚杆。

2)巷道两帮采用锚网+钢筋梯支护.平巷上帮煤壁采用 $\Phi 22\text{ mm} \times 2\ 200\text{ mm}$ 的玻璃钢锚杆,平巷下帮及锁梁锚杆采用 $\Phi 22\text{ mm} \times 2\ 700\text{ mm}$ 的恒阻大变形锚杆.钢筋梯采用 $\Phi 14\text{ mm}$ 圆钢加工.图2为无腿棚支护方案。

无腿棚支护方案以11#矿用工字钢为横梁,以金属托架为支撑点,金属横梁安装在金属托架上,金属托架使用 $\Phi 20\text{ mm} \times 2\ 200\text{ mm}$ 的左旋螺纹钢锚杆进行端锚固定,锚固剂选用CK2860型树脂锚固剂,采用全长锚固;巷道两帮采用锚网+钢筋梯支护,巷道下帮选用金属锚杆,锚杆规格为 $\Phi 22\text{ mm} \times 2\ 200\text{ mm}$,锚固剂选用CK2860型树脂锚固剂2块;巷道上帮为便于采煤选用玻璃钢锚杆,锚杆规格为 $\Phi 22\text{ mm} \times 2\ 200\text{ mm}$,锚固剂选用CK2860型树脂锚固剂2块;金属网采用菱形编制,采用 $\Phi 12\text{ mm}$ 钢筋制作钢筋梯,采用横向与纵向布置;横梁中部采用2根 $\Phi 22\text{ mm} \times 2\ 700\text{ mm}$ 恒阻大变形锚杆进行锁梁,以增加横梁中部稳定性。

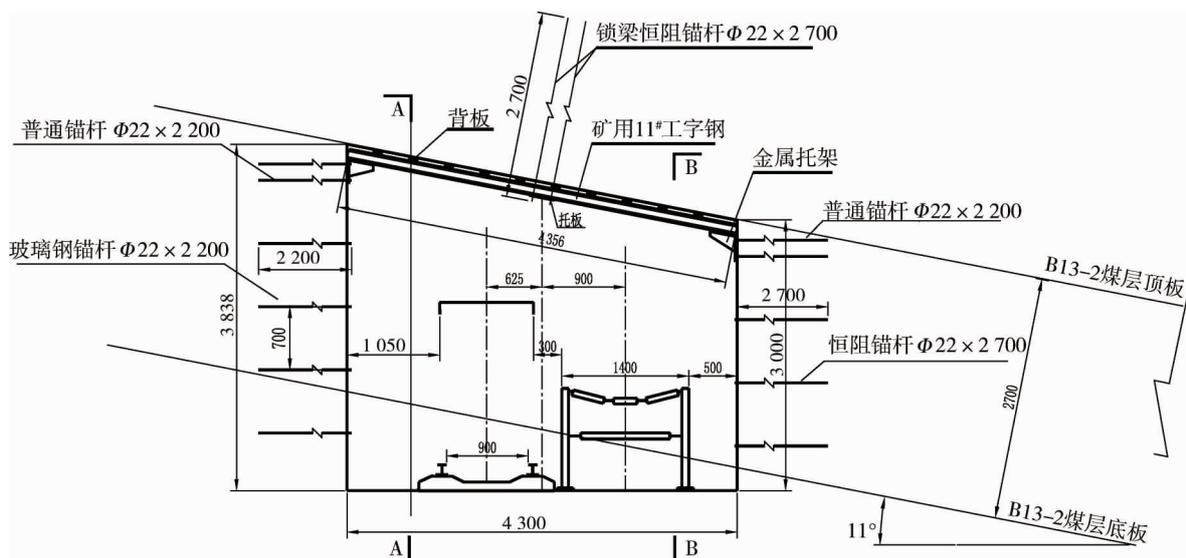


图2 无腿棚支护方案(单位:mm)

3 控制效果的数值分析

3.1 模型的建立

3.1.1 工程地质模型

本部分主要是利用有限元分析软件 Midas-GTS 建立了三维实体模型,将模型转化到有限差分软件

FLAC^{3D}进行计算,计算模型由六面体单元构成,计算范围长×宽×高=30 m×30 m×20 m,共划分 12 600 个单元,14 520 个节点.模型边界中在 x 方向上的表面位移设置为 0, y 方向上的表面位移设置为 0,底部设置为固定,模型顶部为应力边界.模型的垂直应力设置为 8 MPa,巷道轴向方向应力设置为 3.9 MPa,垂直于巷道轴向方向的侧向应力设置为 3.2 MPa.图 3 为工程地质模型.

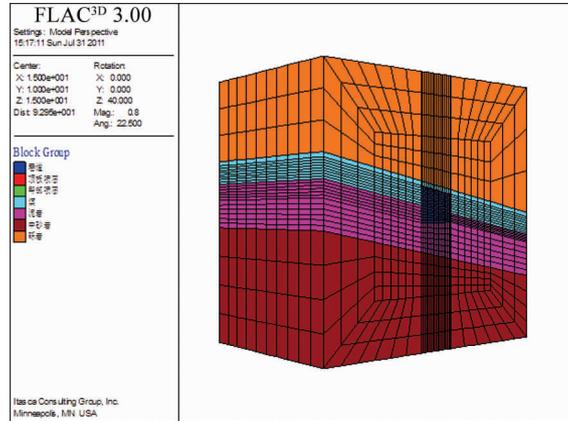


图 3 工程地质模型

3.1.2 支护力学模型

在本次数值模拟中采用 FLAC^{3D}中的实体单元模拟喷层,工字钢梁采用 beam 单元模拟,采用 cable 单元模拟螺纹钢锚杆、玻璃钢锚杆和恒阻大变形锚杆,并采用 fish 语言编辑程序模拟锚杆及工字钢梁的受力特性.材料破坏符合 Mohr-Coulomb 强度准则.支护力学模型如图 4,图 5 为梁单元,图 6 为锚杆单元.

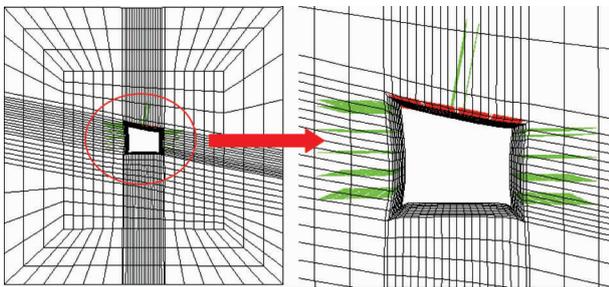


图 4 支护力学模型

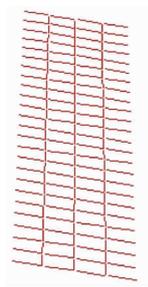


图 5 梁单元



图 6 锚杆单元

3.2 结果分析

3.2.1 位移分析

图 7 为巷道顶底板和左右两帮位移监测曲线.由位移场图和巷道表面位移监测曲线可知,在开挖过程中,初始阶段底顶板和两帮位移增长速度都较快,并处于一定的线性增加,后期阶段逐渐趋于稳定,并且底顶板和两帮位移稳定的时间都在 10^4 step 附近.

在该支护方式下,受上覆岩层压力的影响,平巷顶中最大下沉量为 129 mm(顶板岩层与背板间预留 100 mm 的变形量),下沉不明显;最大底臃量为 187 mm,左帮最大移近量为 197 mm,右帮最大移近量 50 mm,左右两帮呈现出明显的不对称变形.

通过对比分析可知,图 7a 巷道顶板的最大下沉量为 129 mm;图 7b 巷道底板的最大底臃量为 187 mm;图 7c 巷道左帮的最大位移量是 4 条监测曲线的最大值,移近量为 197 mm;图 7d 巷道右帮的最大位移量是 4 条监测曲线的最小值,移近量为 50 mm;各位移曲线在监测后期阶段都趋于稳定,但左右两帮出现较明显的不对称变形,需加强支护.比较而言,巷道表面位移量较小,变形不明显,达到了预期的控制效果,模拟能保证巷道的稳定性.

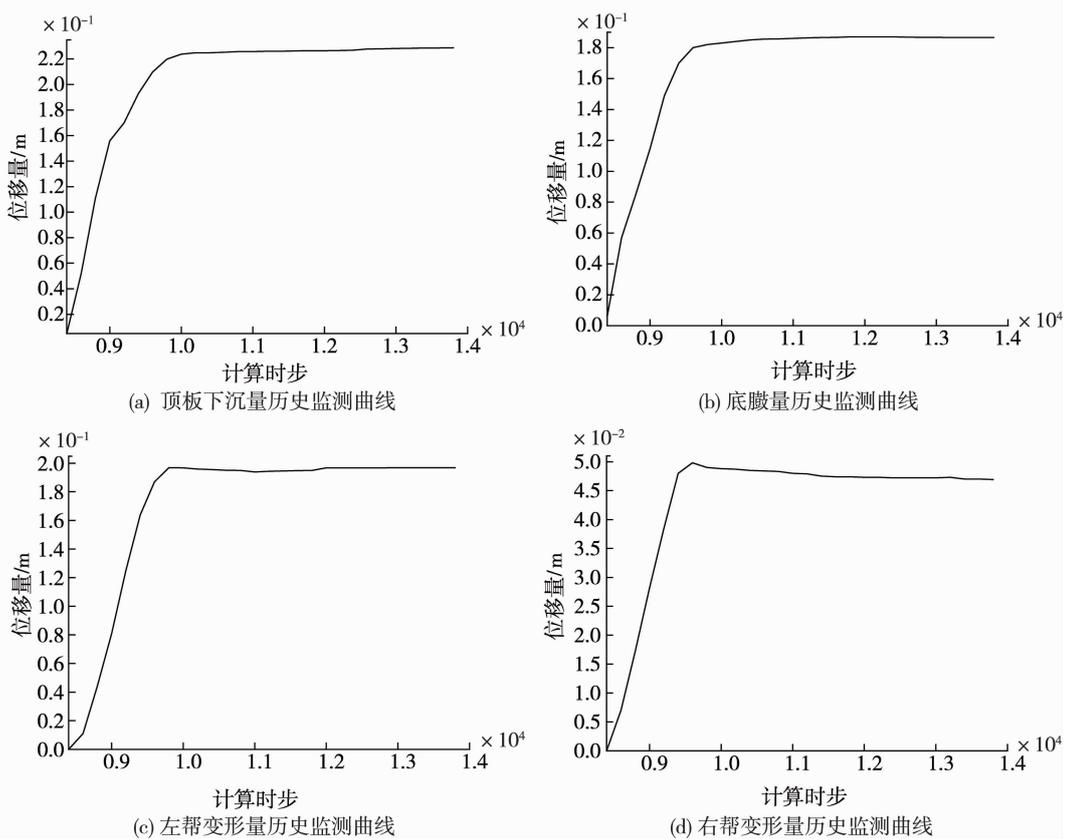


图 7 巷道顶底板和两帮历史监测曲线

3.2.2 应力场分析

图 8 是巷道位于不同方向的应力分布.通过分析应力分布图发现,平巷开挖后,随着时间的增加,巷道周边的垂直应力值也逐渐增大,但在顶板施加工字钢梁+恒阻大变形锚杆支护下顶板应力集中部位离巷道较远,顶板较为稳定.由于顶部两角部位未设锚杆,导致两顶角应力较高,顶部两角可能存在应力集中,最大剪应力达到 2.8 MPa,稳定性较差.

巷道开挖过程中,两帮由于有锚杆支护,靠近两帮部位的应力偏低,远离两帮部位的围岩深处应力偏高;在水平应力场中,由于巷道底部深色区域较多,说明巷道底部应力较高,底板及两底角处存在应力集中程度较高的情况;剪应力场图可看出最大剪应力达到 3.1 MPa,应加强两底角的支护.

通过对比分析可知,图 8a 水平应力场中,由于顶板施加了新的支护方法,使顶板应力集中区域离巷道较远;在图 8b 竖直应力场中,两帮有锚杆支护,应力集中部位向围岩深处发展;在剪应力场图 8c 中,顶角和底角也出现了应力集中现象,最大剪应力达到了 3.1 MPa,需要加强支护.总的来看,该模拟取得了较好的效果,能保证巷道的稳定性.

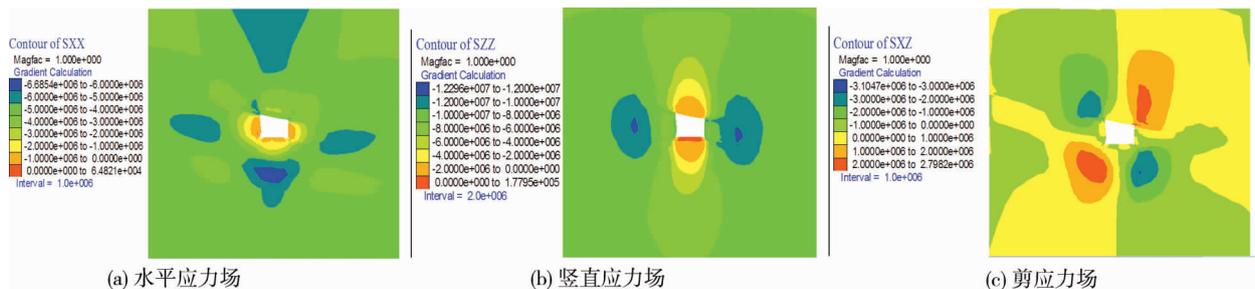


图 8 巷道位于不同方向的应力场

3.2.3 破坏场分析

图 9 为塑性区分布图.由图 9 可知,巷道开挖后,在该支护方式下,由于无腿棚工字钢梁的承载作用,

顶板变形较小,平巷顶板塑性区的分布范围明显比底部塑性区少,说明顶板支护的控制效果较明显.

巷道刚开挖后两帮塑性区面积偏小,但是由于巷道底板的逐渐失稳导致两帮塑性区处于动态发展状态,塑性破坏面积不断增大,且左帮和左底角较为显著,呈现出明显的非对称性.相对而言,巷道周围的塑性区较少,巷道处于较稳定的状态,达到了预期的效果.

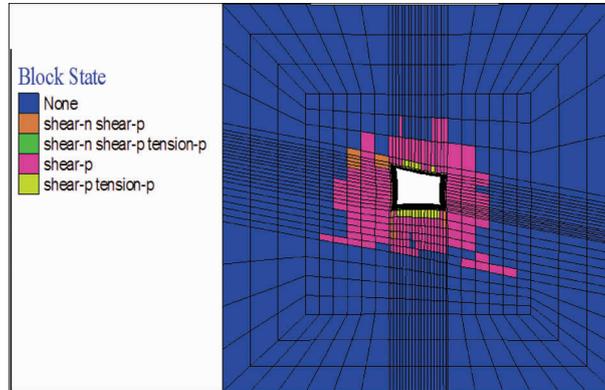


图 9 塑性区分布

3.2.4 支护体受力

图 10 是工字钢梁在不同方向的受力和弯矩分布.由工字钢受力图可知,随着巷道的开挖,工字钢梁所受水平挤压力和垂直方向力随着时间增长而增大,由图 10a 和图 10b 可知,梁两端颜色明显较深,说明应力主要集中在靠近梁的两端与岩壁连接处,且垂直方向的力远大于水平方向的力.在图 10c 和图 10d 中,工字钢梁垂直方向的弯矩明显大于水平方向的弯矩,其中钢梁所受最大弯矩集中在距离大约巷道右帮的 1/4 处.综上所述,支护体受力程度在可控弹性范围内,能保证巷道的稳定性.

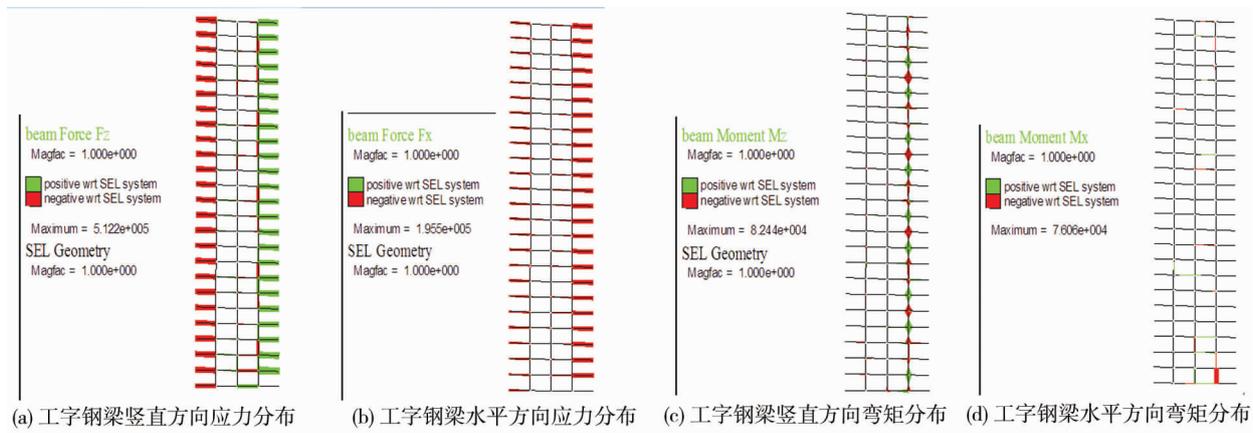


图 10 工字钢梁位于不同方向的应力分布和弯矩分布

4 现场监测

对沙吉海煤矿 01 工作面运输平巷顶板及两帮围岩进行装置的布置,使用锚杆固定金属托架,金属横梁安装在金属托架上,煤壁采用锚网支护,金属托架下使用钢筋梯加固煤壁,支护后的巷道顶板如图 11 所示.为了验证该支护方案对平巷顶板的控制效果,巷道表面布置了多个监测点,对变形量进行观测,以监测运输平巷顶板的稳定性.将所测数据进行整合计算,得到监测区内巷道顶板下沉量与时间的关系曲线(如图 12 所示).

由图 12 可知,监测点顶板下沉量在工程开挖前期呈现出较快的增长,这一时期基本为线性增长,到达工程开挖中期阶段顶板下沉量开始放缓,工程开挖后期阶段顶板下沉量趋于稳定,顶板不再下沉.

比较两测站的顶沉曲线,都呈现出先快后慢的趋势,且最终下沉量相差不大,下沉量稳定在

45~55 mm,顶板下沉得到有效控制.现场实践结果表明,设计的无腿棚支护方案取得了较好的支护效果,能够保证工作面的安全生产.



图11 支护后的巷道顶板

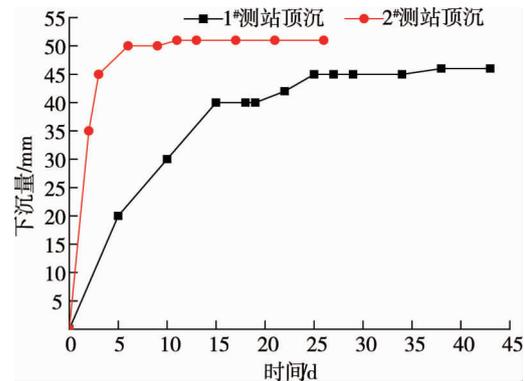


图12 监测曲线

5 结论

1) 根据模拟结果,巷道底板和两底角处破坏较为严重,尤其是底板的失稳及左底角的破坏严重影响了左帮的稳定,导致左帮变形量较大,应考虑加强两底角支护,采用底角注浆锚管进行支护,有效控制底臃,从而确保两帮的稳定.

2) 为防止因巷道左帮煤壁变形量大而造成无腿棚的失稳,应保证固定金属托架的锚杆具有足够的锚固力和锚杆孔的成孔质量.

3) 在运输平巷的现场监测中,无腿棚支护方案与原支护方案相比,顶板控制效果更加明显,保证了围岩的稳定性,能有效解决顶板砾层硬度较大等问题,充分说明了无腿棚支护方案的可靠性及支护的合理性.

参考文献:

- [1] 毋肖飞.近距离煤层采动影响下采区大巷围岩控制技术研究[J].煤矿现代化,2020(1):39-41.
- [2] 刘燕祥,盆伟伟,黄汉锋.软岩巷道沿空留巷联合支护技术研究[J].中国煤炭,2018,44(1):71-74.
- [3] 王先军.受采动影响大断面巷道支护技术[J].矿业工程研究,2016,31(2):11-14.
- [4] 朱登辉,刘小康,涂智凌.3111工作面动压巷道围岩控制技术研究[J].煤炭技术,2018,37(9):59-61.
- [5] 郑州,张付强.大倾角松软破碎顶板巷道支护研究[J].山东煤炭科技,2017(3):34-35.
- [6] 张帅义.深部软岩巷道支护技术研究[J].煤,2019,28(1):51-53.
- [7] 郭立.平舒煤业回采巷道支护技术设计[J].采矿技术,2019,19(2):75-76.
- [8] 李柱,谢锋.综放大断面煤巷顶板支护结构失效分析与控制研究[J].煤炭工程,2018,50(2):91-94.
- [9] 王岩.冲击载荷作用下巷道支护方案优化研究[J].煤矿安全,2018,49(2):182-184.
- [10] 袁越,付金磊,秦坚,等.高渗压下砂砾层巷道变形稳定性分析[J].矿业工程研究,2018,33(4):22-30.
- [11] 袁越.沙吉海矿区中生代砂砾层特性及其支护对策[D].北京:中国矿业大学(北京),2013.
- [12] 李国峰,陶志刚,王炯.兴安矿深部软岩巷道大变形控制对策[J].煤炭科学技术,2009,37(5):27-30.
- [13] 石建军,郭均中,郭志飏,等.软岩巷道支护优化设计与模拟分析[J].华北科技学院学报,2017,14(2):15-18.
- [14] 康红普,吴拥政,何杰,等.深部冲击地压巷道锚杆支护作用研究与实践[J].煤炭学报,2015,40(10):2225-2233.
- [15] 李建波.复合顶板动压巷道围岩应力演化和支护技术研究[J].中国矿业,2019,28(12):110-115.
- [16] 镐振,朱影,任攀华.缓斜厚煤层回采巷道围岩控制技术研究[J].煤炭工程,2017,49(4):36-38.
- [17] 王襄禹,柏建彪,李磊,等.近断层采动巷道变形破坏机制与控制技术研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(5):674-680.
- [18] 李彦斌,任杰,林启祥.深部高应力软岩巷道刚柔耦合支护技术研究[J].煤炭技术,2019,38(10):1-4.