

锚固位置对深部巷道围岩变形控制影响

李炜华,王卫军*,刘飞飞,马谕杰,袁超,邓宗萍

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:以夏达煤矿1700运输巷为研究对象,基于FLAC^{3D}数值模拟软件,结合理论分析,研究不同锚固方式对巷道稳定性的影响,并针对性地提出控制巷道围岩变形的合理方案。研究表明:(1)巷道围岩的变形量与塑性区的大小呈正相关性,即巷道围岩的塑性区范围越大,巷道的形变量越大;(2)锚杆锚固端位于弹性区内比位于塑性区内更能有效控制巷道围岩塑性区的发展,也更能有效控制巷道的变形;(3)在大变形巷道中,巷道围岩的塑性区往往很大,锚杆长度难以满足要求,采用以“中空注浆锚索+锚杆”为主体,以“金属网+锚喷”为辅助的综合控制技术方案能有效控制巷道围岩的大变形。

关键词:深部围岩;塑性区;锚固段;数值模拟

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2023)04-0043-08

On Influence of Anchorage Position on Deformation Control of Deep Roadway Surrounding Rock

LI Weihua, WANG Weijun, LIU Feifei, MA Yujie, YUAN Chao, DENG Zongping

(School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: This paper takes the 1700 transport lane of Jiada Coal Mine as the research object, based on FLAC^{3D} numerical simulation software and theoretical analysis, and studies the influence of different support methods on the stability of the roadway. It proposes a reasonable plan to control the deformation of the roadway surrounding rock. Results show that first the deformation of roadway surrounding rock is positively correlated with the size of plastic zone, that is, the larger the plastic zone of roadway surrounding rock is, the larger the shape variable of roadway. Second, the anchorage end located in the elastic zone can more effectively control the development of the plastic zone of the roadway surrounding rock than in the plastic zone, and can also more effectively control the deformation of the roadway. Third, in the large deformation roadway, the plastic zone of the surrounding rock is often large, and the length of the anchor rod is difficult to meet the requirements if only the anchor rod is used. The comprehensive control technology scheme with “hollow grouting cable + anchor” as the main body and “metal mesh + anchoring and spraying” as the auxiliary can effectively control the large deformation of the surrounding rock of the roadway.

Keywords: deep surrounding rock; plastic zone; anchorage section; numerical simulation

随着对煤炭资源的需求与日俱增,我国开采条件相对较好的浅部煤炭资源已经渐渐开采完毕,向着深部开采煤炭资源必然是下一阶段的目标。然而随着开采深度的增加,巷道围岩的应力条件变得更加复杂、

收稿日期:2023-06-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52374088)

*通信作者, E-mail: wjwang@hnust.edu.cn

非线性大变形现象会更加突出,这就使得在开采深部煤层时,巷道的支护会变得愈加困难.目前大部分的深部巷道围岩都出现了大变形破坏特征^[1-5].有研究结果表明巷道围岩塑性区的形态与范围会影响其变形程度与围岩破坏的发展方向^[6-11].深部巷道往往都有着较大的双向不等压应力,在其影响下,深部巷道围岩的塑性区范围往往会更大,这就造成巷道围岩变形更加严重,支护变得更加困难,最终严重影响深部煤炭资源的开采.由此可见,研究深部巷道围岩大变形的机理和控制大变形发生是我们需要解决的难题.

目前,有大量专家学者对巷道围岩的大变形原理和支护方法做了深入研究.王卫军等^[12]采用理论分析、数值计算、现场试验等手段,研究支护阻力对深部高应力巷道围岩变形与塑性区的影响,提出支护结构应满足围岩大变形的协调支护原则;袁越等^[13]针对深部动压回采巷道的大变形失稳破坏及其控制难题,建立深部动压环境下圆形巷道力学模型,并推导出塑性区边界隐性方程式;李为腾等^[14]建立计算模型,研究夹煤层厚度、位置和分岔巷道岩柱宽度这3个因素对巷道关键点位移、塑性区、非对称变形的影响规律,提出"内修+外控"以注为主的非对称联合控制对策;康天慧等^[15]分析采动影响下邻近工作面回采巷道的围岩变形规律,揭示动压巷道围岩变形的破坏机理,提出巷道长锚索支护+短锚索补强+钢带联合差异化控制的分断面锚索加固技术;王猛等^[16]以大尺度三维相似材料模拟试验系统和自制的主方向应力传感器测量工具,采用"先加载后卸载"的开挖方式模拟主应力大小和方向演化影响下的有支护巷道的围岩产生剪切滑移的变形破坏特征,发现最小主应力的调整对剪切滑移裂缝的形成起到了重要作用;陈登红等^[17]为研究深部回采巷道围岩大变形破坏规律,在地质力学评估及矿压显现特征实测的基础上,采用真三轴相似模拟方法,模拟不同加载梯度下巷道围岩应变特征;王新丰等^[18]为解决开挖卸荷工程扰动条件下深部巷道围岩失稳变形加剧与受力破坏严重问题,建立围岩失稳破坏的综合评价体系,并得出围岩裂隙场、应力场与位移场的时空演化特征.

综合上面的研究成果来看,目前的研究着重于塑性区对巷道围岩变形的影响以及如何加强锚杆本身力学性能以增强对巷道围岩的控制,而很少从锚固位置角度进行分析.本文以云南湾田集团戛达煤矿1700运输巷为研究背景,探讨巷道围岩发生大变形的原因,提出合理的支护方案并在工程实践中验证方案的可行性.

1 工程概况

1.1 巷道地质情况

戛达煤矿1700运输巷位于云南省富源境内,巷道全长623 m,最大埋深约为411 m.1700巷道两帮为泥岩,平均厚度为1.1 m;泥岩上方为粉砂岩,平均厚度为17.3 m;泥岩下方为菱铁岩,平均厚度为18.1 m,详情见图1.巷道顶底板围岩力学参数见表1.

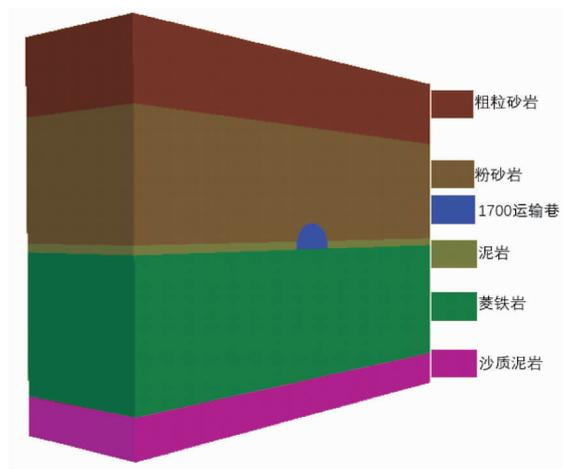


图1 1700运输巷围岩分布情况

表1 围岩力学参数

岩性	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	密度/(g/cm ³)
粗粒砂岩	3.2	0.29	2.7	28	2.1
粉砂岩	2.9	0.31	2.6	25	2.2
泥岩	2.3	0.36	1.9	26	2.0
菱铁岩	2.6	0.42	3.7	27	2.9
砂质泥岩	2.6	0.27	2.2	29	2.3

1.2 巷道破坏情况

云南湾田集团夏达煤矿 1700 运输巷为岩巷,巷道断面形状为直墙半圆拱形.巷道两帮及顶底板区域的围岩强度低、承载能力差,巷道所受围岩压力较大,巷道发生显著变形.

巷道具体变形特征如图 2 所示:巷道拱顶和底板出现了明显的下沉和鼓起,两帮围岩整体向巷道内收敛,锚杆开始发生变形破坏.

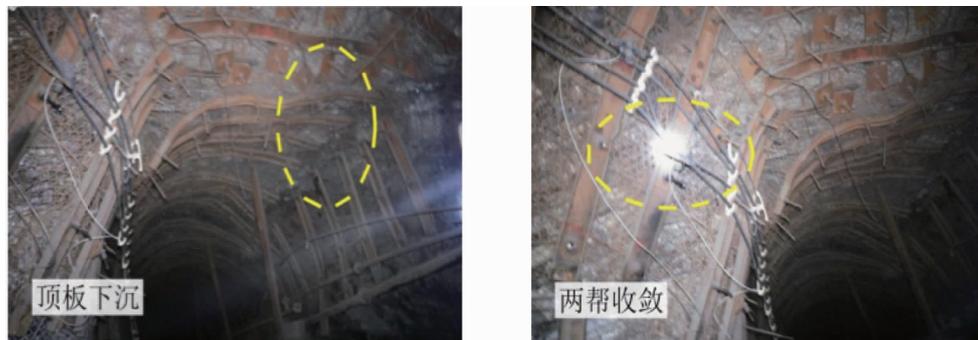


图2 巷道变形现场

为维持巷道正常运转,目前已经对巷道进行多次翻修,但都无法从根本上保证巷道围岩的稳定性,也无法改善巷道重复返修的被动局面.若不采取合理的支护技术,巷道围岩变形破坏将会更加严重.

2 巷道顶底板和两帮变形成因分析

根据巷道围岩应力条件和巷道岩性综合分析,并在现场实地进行地应力测试,可以得知巷道变形破坏主要有以下几点原因:

巷道围岩矿物成分:夏达煤矿 1700 运输巷围岩成分以砂质泥岩为主,其强度低、承载能力差,巷道围岩中也发现绿泥石、菱铁矿等成分含量较高,其容易发生遇水膨胀现象,严重破坏巷道围岩的稳定性、整体性.

巷道围岩地质条件:夏达煤矿 1700 运输巷的埋深较大、巷道构造应力条件复杂且富含地下水,巷道围岩容易遇水膨胀,发生变形破坏;巷道理深越深,其上覆岩层产生的重力越大,促使巷道顶板受到的挤压越强烈,巷道更容易产生变形;巷道构造应力条件越复杂,巷道围岩就越容易产生双向不等压应力,在应力作用下,巷道围岩的塑性区会更加容易扩展.

采用应力解除法对地应力进行测试,测得巷道受到较大的双向不等压地应力的作用,巷道围岩的塑性区大小和测压系数有关.在巷道受到较大双向不等压地应力的作用下,巷道围岩的塑性区会比较大,大范围的塑性区是巷道围岩变形破坏的主要因素^[19].

2.1 未支护条件下的数值模拟

为分析巷道围岩的变形情况,以及确立一个行之有效的支护方案,通过 FLAC^{3D} 有限差分软件构建数值分析模型,对巷道围岩变形的原因进行分析研究.为保证巷道的正常运转,应在修复前对巷道进行一次扩巷.为给巷道预留一定的变形空间,扩巷断面应在原设计要求的基础上结合预留变形的大小进行确定,扩修后的巷道断面形状仍为直墙半圆拱形,5.30 m(净宽)×3.75 m(净高),如图 3 所示.

2.1.1 建立模型

三维模型的尺寸为高 \times 长 \times 厚=50 m \times 50 m \times 10 m;根据现场地应力测试结果确定垂直应力为9.3 MPa,水平应力为21.2 MPa;模型除上部自由外,其他面位移固定为0;严格按照地应力测试结果对模型施加地应力;断面巷道取与工程现场相同的直墙半圆拱形,宽 \times 高=5.30 m \times 3.75 m,巷道两帮高1.1 m;计算模型采用Moh-Coulomb屈服准则.

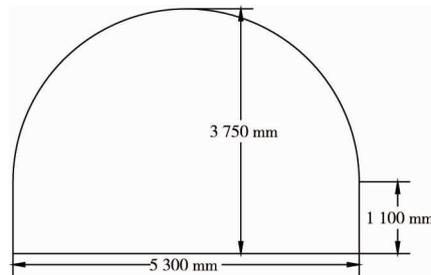


图3 巷道断面

2.1.2 未支护条件下数值模拟分析

通过数值模拟,得到未支护条件下的围岩塑性区形状图、巷道X方向位移云图和巷道Z方向位移云图,如图4所示.由图4a可知:巷道围岩的塑性区呈现蝶形分布,其上蝶叶半径为4.24 m,下半蝶叶半径为2.82 m,其成因是巷道受到较大的垂直构造应力和水平构造应力作用,垂直构造应力和水平构造应力对巷道两帮和顶底板形成挤压,岩石发生剪切破坏和拉伸破坏从而形成蝶形塑性区,并且由于巷道顶底板与两帮的围岩的岩性不同,巷道围岩的塑性区上下蝶叶半径也不相同.由图4b可知:巷道左侧最大变形量为487 mm,右侧最大变形量为489 mm.由图4c可知:巷道顶板最大下沉量为108 mm,最大底鼓量为385 mm.由于巷道周围产生较大范围的塑性区,处于塑性区内的巷道围岩很容易发生位移变形,在地质构造应力的作用下巷道就发生两帮收敛、冒顶、底鼓等围岩变形现象.

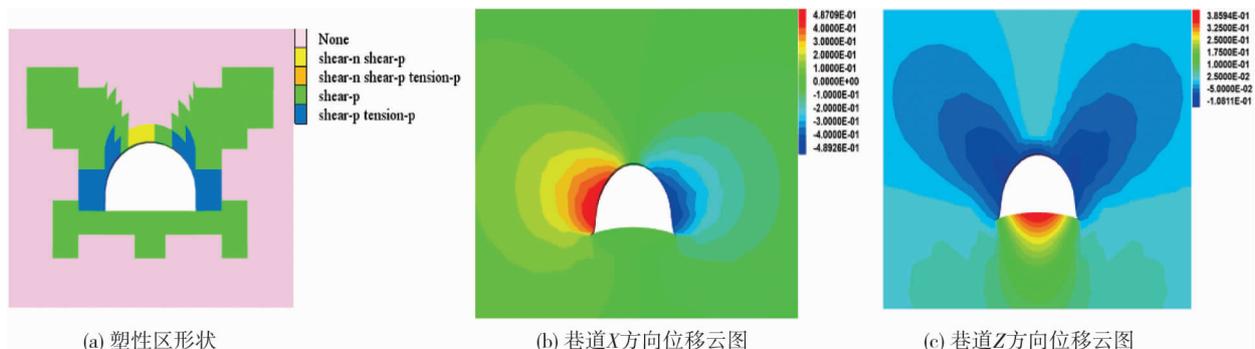


图4 未支护条件下数值模拟结果

由上述分析可知:为保护巷道,降低巷道围岩的变形量,需要设计新的支护方案,在原支护方案的基础上加入新的锚杆、锚索,并让锚杆和锚索的锚固段位于巷道围岩的弹性区内,这样锚杆和锚索就会与围岩的弹性区黏结在一起形成一个整体,减少巷道围岩的变形量.

2.2 原支护方案的数值模拟

原支护方案使用以“锚杆”为主体,“金属网+锚喷”为辅助的支护方式.锚杆使用11根 $\Phi 22$ mm \times 2 600 mm左旋无纵筋螺纹钢锚杆,锚固剂使用K2850树脂锚固剂,预施加锚固力不低于70 kN,锚杆间排距为800 mm,顶板中空注浆锚索应向上分别倾斜 30° , 45° , 60° 安装.金属网直径为6 mm,网格100 mm \times 100 mm,金属网接茬处必须有锚杆并紧贴岩面.锚喷厚度为150 mm,强度为C20.锚杆托盘直径150 mm,厚度为10~15 mm,采用钢板托盘.巷道断面设计图详情见图5,围岩注浆加固参数见表2,结构单元参数见表3.

数值模拟前,预先设置锚杆,在10 m长巷道范围内,每间隔1 m布置一组锚杆.

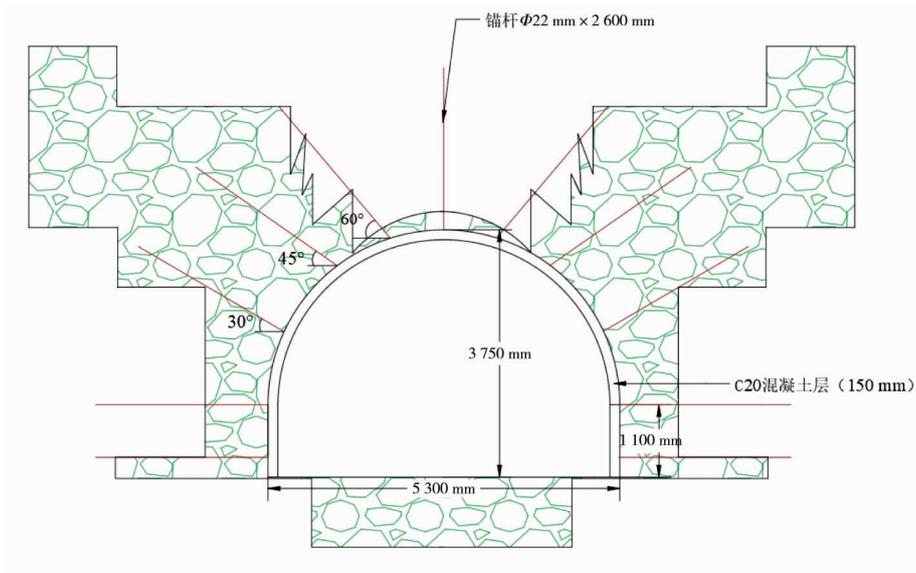


图 5 原支护方案断面

表 2 围岩注浆加固参数

加固的围岩	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	密度/(g/cm ³)
粉砂岩(注浆加固)	3.1	0.32	2.8	27	2.2
泥岩(注浆加固)	2.5	0.37	2.1	28	2.0

表 3 结构单元参数

单元类型	弹性模量/GPa	横截面积/10 ⁻⁴ m ²	水泥浆外圈周长/m	水泥浆黏聚力/(10 ⁵ N · m ⁻¹)	抗拉载荷/kN
锚杆	200	3.8	0.088	4.3	144.5

通过数值模拟,得到原支护方案条件下的围岩塑性区形状图、巷道 X 方向位移云图和巷道 Z 方向位移云图,如图 6 所示.从图 6a 中可知:原支护方案下,巷道围岩塑性区仍然呈大范围的蝶形分布;由图 6b 可知:巷道围岩左右两侧最大变形量为 261 mm;由图 6c 可知:巷道围岩顶板最大下沉量为 83 mm,最大底鼓量为 179 mm.在原支护方案下,巷道围岩有较大的变形,且相较于无支护条件下的巷道围岩塑性区,巷道围岩的蝶形塑性区范围没有较大变化,这说明原支护方案锚杆锚固段位于上蝶叶塑性区内时,锚杆不能对塑性区的扩展起到明显的效果.



图 6 原支护方案数值模拟结果

考虑到原支护方案的锚杆难以满足实际的支护需求,在支护的过程中部分锚杆锚固段处于塑性区内,降低了其支护效果,其抵抗围岩变形的能力大幅度降低,最终导致巷道围岩的变形加剧.

3 围岩变形支护控制技术

新的运输巷支护方案应能表现出增强巷道围岩强度和围岩的承载能力、有效抑制塑性区扩展的能力.

基于地应力测试及巷道围岩矿物成分测定结果,从最大效能发挥锚杆支护能力、抑制塑性区扩展的角度出发,应对运输巷采用以"中空注浆锚索+注浆锚杆"为主体,以"金属网+锚喷"为辅助的新的综合控制技术方

3.1 新方案设计

锚杆采用10根 $\Phi 22\text{ mm} \times 2\ 600\text{ mm}$ 左旋无纵筋螺纹钢锚杆,锚固剂采用K2850树脂锚固剂,预施加锚固力不低于70 kN,锚杆间排距为800 mm.金属网为 $\Phi 6\text{ mm}$,网格 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$.金属网接茬处必须有锚杆并紧贴岩面.锚喷厚度为150 mm,强度为C20.锚杆托盘直径150 mm,厚为10~15 mm,使用钢板托盘.底板锚杆应向下分别倾斜 $35^\circ, 60^\circ$ 安装.中空注浆锚索每组由6根 $\Phi 22\text{ mm} \times 7\ 000\text{ mm}$ 的钢绞线组合而成,注浆锚索间排距为800 mm.中空注浆锚索盘采用20 mm槽钢与16 mm钢板焊接加工而成.顶板中空注浆锚索应向上分别倾斜 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 安装.新支护方案断面设计图如图7所示,围岩注浆加固参数见表4,结构单元参数见表5.

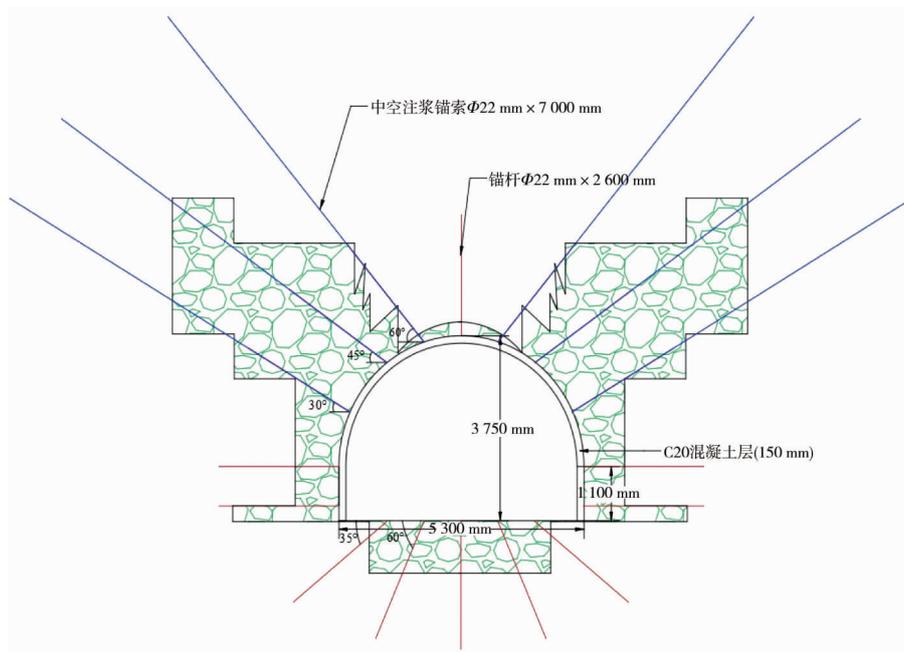


图7 新支护方案断面

表4 围岩注浆加固参数

加固的围岩	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/($^\circ$)	密度/(g/cm^3)
粉砂岩(注浆加固)	3.1	0.32	2.8	27	2.2
泥岩(注浆加固)	2.5	0.37	2.1	28	2.0

表5 结构单元参数

单元类型	弹性模量/GPa	横截面积/ 10^{-4} m^2	水泥浆外圈周长/m	水泥浆黏聚力/($10^5\text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$)	抗拉载荷/kN
锚杆	200	3.8	0.088	4.3	144.5
锚索	195	2.5	0.088	1.7	353.0

数值模拟前,预先设置锚杆、锚索在10 m长巷道范围内,每间隔1 m布置一组锚杆、锚索.

新方案的模拟是通过在掘进巷道上使用新支护方法,模拟掘进巷道的围岩变形情况来推测修复巷道围岩的变形情况.

3.2 新方案数值模拟分析

通过数值模拟,得到新方案下的围岩塑性区形状图、巷道X方向位移云图,巷道Z方向位移云图如图8所示.由图8a可知:新方案相较于原方案对巷道围岩塑性区的扩展有着明显的遏制作用,其上蝶叶半径仅为2.72 m,下半蝶叶几乎消失.

通过新旧方案对比可知:原方案塑性区上半蝶叶半径较大是因为原方案的上半蝶叶区内使用的是锚杆,且其长度不够,这就使得原方案的围岩塑性区扩展到一定程度后,其塑性区的范围超过锚杆的锚固段,对塑性区的后续扩展不能发挥有效的遏制效果,从而导致塑性区范围越来越大;新方案中使用锚杆锚索联合支护,在巷道围岩塑性区蝶叶半径最大的部分使用中空注浆锚索,这样就使锚索穿过巷道围岩塑性区最大蝶叶,提前与远离塑性区的弹性区岩体连接在一起,使巷道围岩最大程度上保持一个完整岩体,在塑性区的后续扩展上,新方案能一直保持对塑性区扩展的遏制作用,大大加强了对塑性区后续不断的恶性扩展的遏制效果,不会因为围岩塑性区范围超过锚杆锚索的锚固端而使塑性区的恶性扩展加剧。

由图 8b 可知:巷道围岩左侧最大变形量为 56 mm,右侧最大变形量为 55 mm.由图 8c 可知:巷道围岩顶板最大下沉量为 21 mm,最大底鼓量为 35 mm.新方案下巷道的左侧围岩变形量相比原方案减少了 205 mm,右侧围岩变形量相比原方案减少了 206 mm,最大顶板下沉量减少了 62 mm,最大底鼓量减少了 162 mm.

由上述可知,新方案下巷道围岩两帮的位移减少量是原支护条件下的 78.7%,巷道围岩的顶底板位移减少量是原支护条件下的 85.4%.相较于原方案,新方案能更加有效地控制巷道围岩的变形,而且也能更有效控制巷道围岩塑性区的恶性发展,巷道围岩的变形量与巷道围岩的塑性区大小呈正相关。

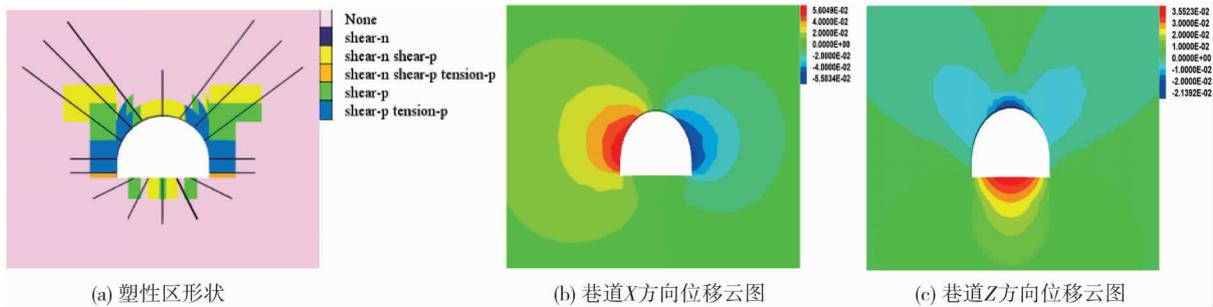


图 8 新方案下值模拟结果

综上所述,锚固段处于弹性区内的锚杆锚索比锚固段处于塑性区的锚杆能更有效控制塑性区的恶性扩展.新方案的锚杆锚索联合支护能最大限度地使锚杆锚索的锚固段处于弹性区内,并留有一定的预留长度,这样在塑性区后续的恶性扩展中能令塑性区没有那么容易扩展到锚杆锚索的锚固段,这样就能通过有效遏制塑性区扩展来控制巷道的围岩变形,对巷道两帮的变形量以及巷道的顶板下沉和底鼓都能起到非常有效的遏制作用,极大降低巷道的安全隐患,有力地保障了人员的安全。

4 工程应用效果分析

使用新方案对巷道进行修复后,通过 TrimbleTX8 三维断面扫描仪对 1700 运输巷段两帮、顶板以及底板围岩变形量进行为期 30 d 的监测,测点位置和累计变形量如图 9 所示。

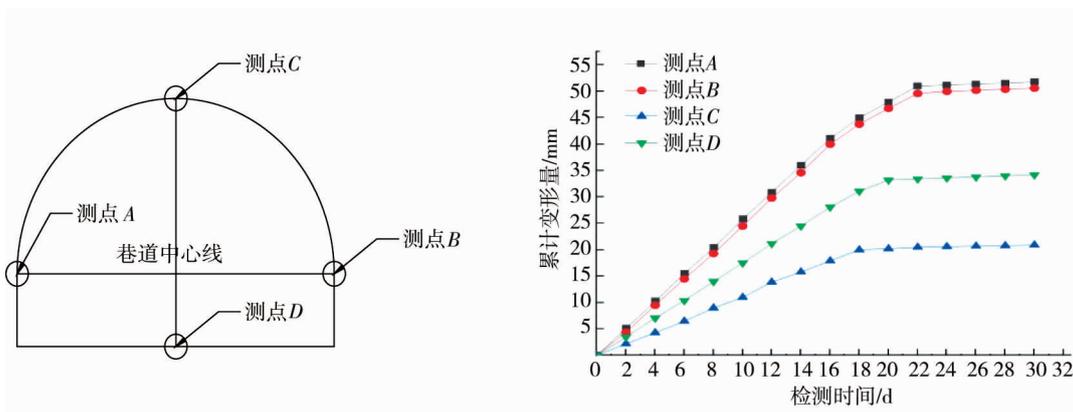


图 9 巷道检测点布置和围岩变形曲线

由图9可知:巷道两帮(检测点A和B)的累计变形量相对较大,30 d内最大累计变形量左帮为51.8 mm,右帮为51.6 mm,并且在第22天左右累计变形量的增量显著降低并趋于稳定;巷道顶板(检测点C)30 d内最大累计变形量为20.9 mm,并且在第18天左右累计变形量的增量显著降低并趋于稳定;巷道底板(检测点D)30 d内最大累计变形量为34.2 mm,并且在第20天左右累计变形量的增量显著降低并趋于稳定。

综上所述,新支护方案能有效控制巷道围岩的变形。

5 结论

1) 巷道围岩的变形量与塑性区的大小呈正相关性,即巷道围岩的塑性区范围越大,巷道的形变量越大。

2) 锚杆锚固端位于弹性区内比位于塑性区内更能有效控制巷道围岩塑性区的发展,也更能有效控制巷道的变形。

3) 在大变形巷道中,巷道围岩的塑性区往往很大,锚杆长度难以满足要求,采用以“中空注浆锚索+锚杆”为主体,以“金属网+锚喷”为辅助的综合控制技术方案能实现锚固端位于弹性区内,使锚杆锚索与塑性区形成一个整体,有效控制巷道围岩的大变形。

参考文献:

- [1] 康永水,耿志,刘泉声,等.我国软岩大变形灾害控制技术与方法研究进展[J].岩土力学,2022,43(8):2035-2059.
- [2] 黄炳香,张农,靖洪文,等.深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J].煤炭学报,2020,45(3):911-926.
- [3] CHANG J C, XIE G X. Investigation on deformation and failure characteristics and stability control of soft rock roadway surrounding rock in deep coal mine[J]. Advanced Materials Research, 2011, 255-260: 3711-3716.
- [4] 孟陆波,黄意霖,李天斌,等.高地应力层状软岩隧道非对称挤压大变形分级修正方法研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(1):147-156.
- [5] XUE G, GU C, FANG X, et al. A Case Study on Large Deformation Failure Mechanism and Control Techniques for Soft Rock Roadways in Tectonic Stress Areas[J]. Sustainability, 2019, 11: 3510.
- [6] 马念杰,赵希栋,赵志强,等.深部采动巷道顶板稳定性分析与控制[J].煤炭学报,2015,40(10):2287-2295.
- [7] 李军,马念杰,王卫军,等.蝶形破坏理论及其应用研究进展[J].中国矿业大学学报,2023,52(2):209-228.
- [8] 王卫军,范磊,马谕杰,等.基于蝶形破坏理论的深部巷道围岩控制技术研究[J].煤炭科学技术,2023,51(1):157-167.
- [9] 王卫军,韩森,董恩远.考虑支护作用的巷道围岩塑性区边界方程及应用[J].采矿与安全工程学报,2021,38(4):749-755.
- [10] 马念杰,李季,赵志强.圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):206-213.
- [11] 陈昊祥,王明洋,燕发源,等.深部巷道围岩塑性区演化的理论模型与实测对比研究[J].岩土工程学报,2022,44(10):1855-1863.
- [12] 王卫军,袁超,余伟健,等.深部高应力巷道围岩预留变形控制技术[J].煤炭学报,2016,41(9):2156-2164.
- [13] 袁越,王卫军,袁超,等.深部矿井动压回采巷道围岩大变形破坏机理[J].煤炭学报,2016,41(12):2940-2950.
- [14] 李为腾,王琦,李术才,等.深部顶板夹煤层巷道围岩变形破坏机制及控制[J].煤炭学报,2014,39(1):47-56.
- [15] 康天慧,韩进东,孙传保,等.深部动压巷道围岩变形破坏机理与控制技术研究[J].煤炭技术,2023,42(3):96-100.
- [16] 王猛,牛誉贺,于永江,等.主应力演化影响下的深部巷道围岩变形破坏特征试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(2):237-244.
- [17] 陈登红,华心祝,段亚伟,等.深部大变形回采巷道围岩拉压分区变形破坏的模拟研究[J].岩土力学,2016,37(9):2654-2662.
- [18] 王新丰,何毅,陆明远,等.开挖卸荷扰动深部巷道围岩变形破坏特征研究[J].中国安全科学学报,2021,31(8):83-90.
- [19] 王卫军,董恩远,袁超.非等压圆形巷道围岩塑性区边界方程及应用[J].煤炭学报,2019,44(1):105-114.
- [20] 李晓,吴海,褚文强,等.非均匀应力下软岩巷道围岩应力分布与控制技术[J].矿业工程研究,2022,37(2):9-16.