

非均匀应力下软岩巷道围岩应力分布与控制技术

李晓^{1,2,3}, 吴海^{1,2,3*}, 褚文强^{1,2,3}, 刘飞飞⁴, 陈海荣⁴, 刘文毅⁴

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

3. 湖南科技大学 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;

4. 云南湾田集团 戛达煤业有限公司, 云南 富源 655502)

摘要: 针对戛达煤矿多条巷道受到起伏地形产生的非均匀应力导致巷道顶板下沉、底板上鼓等问题. 文章在地质调查和三维建模反演的基础上, 对戛达煤矿的埋藏条件进行建模分析, 对发生大变形的 1766 南运巷和 110904 风巷建立 FLAC^{3D} 地质模型, 进行数值模拟分析. 数值分析结果表明, 在受到起伏地表产生的非均匀应力和临近采空区侧向压力的双重影响下, 巷道围岩已经进入塑性状态. 基于巷道围岩的特性及破坏特征, 提出了以“中空注浆锚索”为主体, 以“注浆锚杆+金属网+喷射砼”为辅助的综合控制技术来确保巷道的长期稳定. 数值结果表明, 巷道围岩采用支护方案后, 顶底板下沉、两帮变形量仅为未支护时的 40%, 保障了巷道的安全稳定.

关键词: 非均匀应力; 软岩巷道; 采空区; 数值模拟

中图分类号: DT315

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2022)02-0009-08

Stress Distribution Control Technology Surrounding Rock Soft Rock Roadway Under Non-Uniform Stress

LI Xiao^{1,2,3}, WU Hai^{1,2,3*}, CHU Wenqiang^{1,2,3}, LIU Feifei⁴, CHEN Hairong⁴, LIU Wenyi⁴

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

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science and Technology,

Xiangtan 411201, China; 4. Yunnan Jiada Coal Industry Co., Ltd., Wantian Group, Fuyuan 655502, China)

Abstract: In response to the non-uniform stresses generated by the undulating terrain in a number of roadways in the Jada Coal Mine, the top plate of the roadway is sinking and the bottom plate is bulging. Based on the geological survey and 3D modeling inversion, the paper analyzes the burial conditions of Jada Coal Mine and establishes FLAC^{3D} geological models of 1766 South Runway and 110904 Windway, where large deformations occur, for numerical simulation analysis. The results of numerical analysis show that the tunnel surrounding rock has entered a plastic state under the influence of the non-uniform stresses generated by the undulating surface and the lateral pressure of the adjacent mining area. Based on the characteristics and damage features of the tunnel surrounding rock, the comprehensive control technology plan of “hollow grouting anchor cable” as the main body and “grouting anchor + metal mesh + spray concrete” as the auxiliary is proposed to ensure the long-term stability of the tunnel. The numerical results show that the top and bottom slab sinking and the deformation of both sides of the roadway are only 40% of the unsupported slope after the adoption of the support scheme.

Keywords: non-uniform stress; soft rock roadway; goaf; numerical simulation

我国煤矿赋存条件复杂,特别是西部地区煤矿赋存条件尤为复杂,一方面矿区地形地貌丰富多样,地表起伏较大,多为丘陵沟谷发育地带^[1];另一方面地面以下的埋藏条件复杂,普遍存在煤层底板起伏大和煤层厚度变化大等特点.我国西南方地表变化更为明显,很多煤矿在山体下开采,导致巷道部分工作面的推进方向与沟谷走向垂直^[2-3].起伏地形对在地下开采的巷道围岩应力的变化影响巨大,因此,煤矿开采时需考虑山体起伏对于井下应力场的影响.

肖国刚等^[4]研究了处于沟谷地形下的浅埋煤层,当工作面进入浅埋深区域时,通过矿压动态监测,发现影响工作支架阻力的主要因素为冲沟切割系数;刘志辉等^[5]研究了沟谷地区浅埋煤层开采时煤层上覆岩体应力分布特征及沟谷两侧坡体的应力及位移变化规律;朱泽奇等^[6]研究了山体地形和地质结构对于大型地下硐室稳定性的影响;任艳芳^[7]研究了地表山体载荷对于工作面开采矿压的影响,认为山体对于浅埋工作面的影响范围远大于山体垂直范围,在进入和离开山体时需要特别注意工作面的矿压变化;许家林等^[8-9]认为沟谷地形对于工作面矿压影响取决于工作面上方关键层;王宏志等^[10]认为沟谷地形的矿压显现与沟谷垂深、坡体角度、冲沟切割系数密切相关,其中冲沟切割系数是影响矿压显现的主要因素;刘长友等^[11-12]认为沟谷区域浅埋岩层的原岩应力分布主要受沟谷地形的影响;王旭峰等^[13]分析了冲沟坡体下浅埋煤层的矿压显现与坡角有关;车晓阳等^[14]研究了浅埋煤层掘进经过沟谷地带时煤层上覆岩层的破坏规律;吴海等^[15]研究了不同条件的巷道围岩变形情况.然而对于山体影响下的巷道围岩变形缺乏系统的研究.王中明^[16]对处于非均匀应力场下的圆形隧道的支护结构对塑性区的影响进行了研究;杜华溢^[17]针对在掘进过程中受到非均匀应力影响产生破坏的巷道,提出了深浅耦合的支护技术.

这些研究为起伏山体下采矿的矿压显现规律提供了一定的参考,但对于处在起伏地表下软岩巷道围岩应力的分布规律还缺少相应的研究,特别是当软岩巷道处于山体下且临近采空区时的围岩应力分布规律的研究甚少,由于对这种类型的巷道围岩变形研究的不充分,导致巷道支护时缺乏系统的规划,巷道围岩控制达不到预期效果,因此研究起伏山体下且临近采空区的软岩巷道的围岩应力分布规律,对巷道的稳定控制有极大的现实意义.

1 夏达煤矿基本情况

夏达煤矿位于云南省富源县境内,煤矿生产能力约为30万t.煤矿开采范围内,地表绵延起伏,存在多座山峰,部分山峰的山顶与山沟垂直距离高达140m左右,井口位于半山腰.夏达煤矿矿区应力条件错综复杂.

矿区综合柱状图如图1所示,巷道围岩主要为砂质泥岩,抗压强度1.0~19.5MPa,该类岩石多属软弱岩石,稳定性差.在巷道掘进过程当中,巷道出现片帮向内挤压、顶板严重下沉、底鼓和两帮开裂等现象,严重影响煤矿的日常开采.

层序号	累深 /m	层厚 /m	柱状	岩性描述
1	1.45	1.45		8#煤: 半亮型, 粉状或片状, 结构简单
2	22.24	20.79		砂质泥岩: 灰色薄层状, 厚度为5cm左右
3	25.42	3.18		9#煤: 半亮型, 粉状或鳞片状, 靠底有1~2层夹矸
4	32.98	7.56		砂质泥岩: 灰色, 含菱铁质结核
5	33.68	0.70		煤: 半亮型, 块状、粉状
6	69.19	34.51		砂质泥岩和粉砂质泥岩: 团块状菱铁质结核
7	69.51	1.32		煤: 半亮型, 块状, 含少量星散状黄铁矿细粒
8	73.63	4.12		砂质泥岩: 灰色
9	74.77	1.14		煤: 半亮型, 块状, 结构简单, 具0~3层夹矸

图1 巷道围岩柱状图

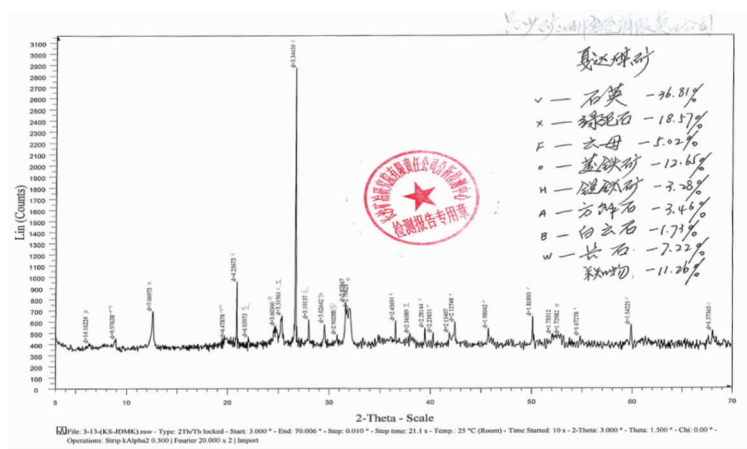
2 巷道围岩破坏原因分析

2.1 巷道围岩物理力学性质分析

夏达煤矿巷道围岩以砂质泥岩为主,力学强度低,抗变形能力差,现场采用 X 射线衍射仪对煤矿巷道围岩所采取的岩样进行了分析,具体结果见表 1 和图 2.巷道围岩的矿物成分主要为石英、绿泥石、菱铁矿及云母等.绿泥石是一种特殊的软岩,在自然状态下强度较普通软岩高,但在遇水情况下强度骤然降低,表现出软岩的典型特征.这些矿物遇水、暴露空气中后极易软化、崩解,改变原有的性质,在很大程度上降低围岩的强度,显著影响巷道围岩的变形、整体性及稳定性.

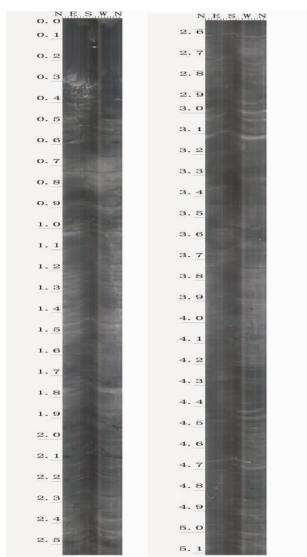
表 1 矿物成分含量

矿物名称	石英	绿泥石	菱铁矿	云母	锐钛矿	长石
含量/%	36.81	18.57	12.65	5.02	3.28	7.22



2.2 巷道围岩内部结构探测分析

在现场共布置了 3 个钻孔,但由于有个钻孔在孔口位置发生塌垮,因而,只进行了 2 个钻孔的窥视.由图 3 可知,巷道肩部围岩中,裂隙最为发育位置在 2.5 m 以内,该段岩体较为破碎;另外,在 3.9~4.2 m 的位置,可见明显的裂隙,而且较为松散.对于帮部围岩,裂隙最为发育的岩体段位于 2.0 m 以内,其他完整较好,只是在 3.5~4.6 m 处存在少量裂隙,结果如图 4 所示.因此,该巷道破碎程度最为严重的应该在 2.0~2.5 m,而在 4.0 m 左右的范围出现少量裂隙.



2.3 临近采空区侧向压力的影响

在110904风巷右侧20 m,高20 m处有几个相互贯通的采空区.在巷道挖掘之前,右侧上覆采空区已经形成,并经过了1 a的稳定期,在110904风巷开掘至成巷过程中,一直受到上覆采空区侧向压力的影响.当工作面附近存在多个采空区时,工作面沿空侧相当于一个大的悬臂结构,容易引起采空区上部的围岩应力向工作面转移,当悬臂结构的承载力达到极限不足以承受上部围岩传递过来的应力时,悬臂结构发生断裂,此时应力迅速向巷道上部发生转移,巷道围岩应力重分布,影响围岩的稳定性.

2.4 起伏地表产生的非均匀应力的影响

夏达煤矿矿井开采的煤层资源大部分处于山体浅部,但由于地表起伏程度较大,部分煤层埋藏深度不一致,巷道围岩受到地表起伏自重产生的应力程度不一,致使巷道围岩内出现大范围的应力集中,如果围岩应力超过岩体自身承载能力,巷道围岩会发生破坏产生塑性变形,给煤矿的安全开采带来风险.

3 数值模拟分析

3.1 模型建立

将获得的地表等高线图导入到Sketch UP软件中,建立地表地形图,详见图5,然后再将地表地形图导入到FLAC^{3D}中,建立数值模型.

为探究起伏地表下软岩巷道围岩应力分布,选取夏达煤矿1766南运巷和110904风巷为研究背景,1766南运巷在矿区的北往南50 m处,在距离1766南运巷20 m处有1条110904风巷与之平行,两巷道均主采9[#]煤.在110904风巷右侧20 m,高20 m处8[#]煤底板有几个相互贯通的采空区.根据地表等高线图,用FLAC^{3D}数值模拟软件采用1:1的比例建立数值模型.模型采用直角坐标系,Z轴为山体垂直方向,并规定竖直向上为正,生成的网格共划分为256 473个单元,200 765个节点.模型的上边界为地表,视其为自由边界,其余边界条件均固定,位移为零.模型计算采用摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服准则.图6所示为模型示意图.

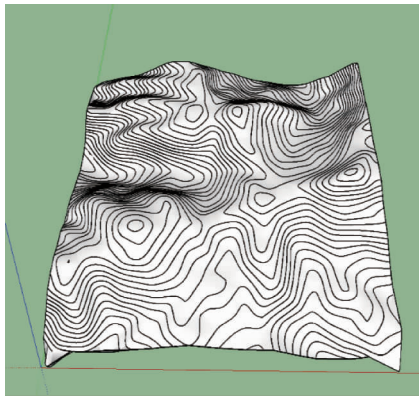


图5 地表等高线

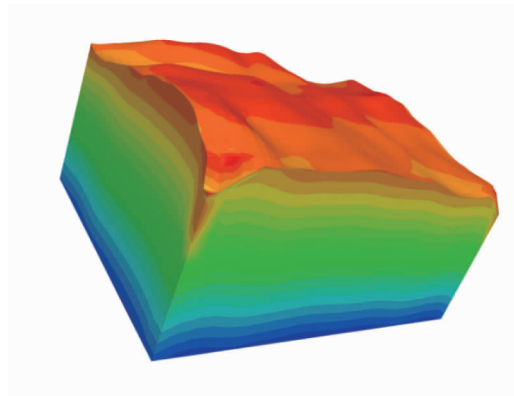


图6 模型

3.2 起伏地表应力分布特征

根据巷道围岩综合柱状图可知巷道岩性主要为砂质泥岩,模拟采用的力学参数如表2所示.起伏地表下山体某一垂直剖面的应力分布特征如图7所示.由图7可知,自然状态下,地表起伏产生的垂直应力受地表走向的影响较为明显,应力线分布形态与地表走向基本一致,在地表起伏垂深大的区域,其应力线落差也相对明显.由巷道底板垂直应力分布图(图8)可知,处于同一平面的1766南运巷和110904风巷底板处的垂直应力并非均匀分布,在同一平面上,距离山地表面的垂直距离越高,受到的应力越大,垂直距离越小则受到的应力越小.当巷道穿过山峰底部时,由于垂直距离的突然增加会产生较大的应力,造成应力集中,导致巷道变形,围岩失稳难以控制,支护困难等情况.山体的水平应力受山体起伏的影响相对较小,只有在距离山地表面的较近部位,水平应力才会受到地表形态影响.随着距离的增加,起伏地形对水平应力

的影响逐渐减弱,山体某一剖面的水平应力如图 9 所示.

表 2 围岩物理力学参数

岩性名称	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	体积模 K / GPa	剪切模量 G / GPa	抗拉强 T / MPa	黏聚力 c / MPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
砂质泥岩	2 500	4.0	2.5	0.500	2.00	30

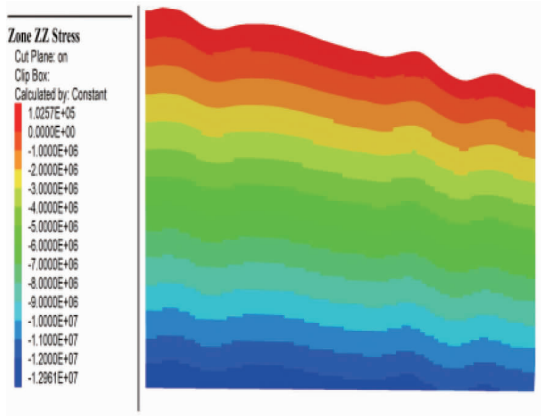


图 7 山体垂直应力分布

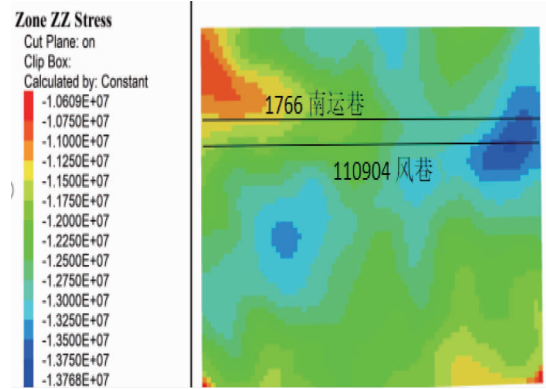


图 8 巷道底板垂直应力分布

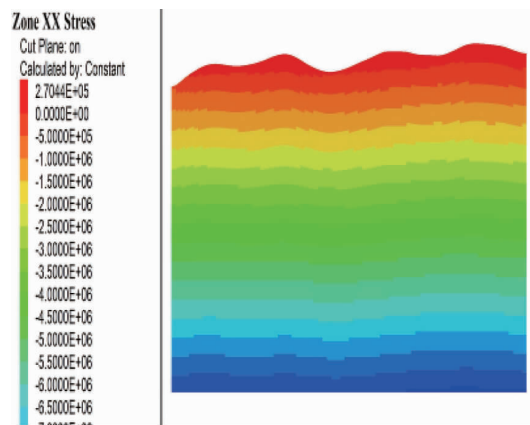


图 9 山体水平应力分布

3.3 无采空区时巷道围岩应力分布规律及塑性区的范围

在起伏地表的影响下,巷道围岩的垂直应力分布规律如图 10 所示(图 10 中左侧为 1766 南运巷,右侧为 110904 风巷).由图 10 可知,由于地表起伏产生非均匀应力使得应力在巷道围岩两侧聚集,且在巷道顶底板处也存在不同程度的应力集中.基于巷道围岩应力的分布规律,可知巷道围岩的塑性区主要沿巷道四围分布,因两帮应力集中系数较大,塑性区出现的范围比顶底板略广,详见图 11 所示.对 110904 风巷顶板进行位移监测,其顶板下沉量在 0.45 m 左右,底板也存在不同程度的底鼓,最大底鼓量也高达 0.4 m,两帮同时向巷道内挤压 0.51 m,给巷道围岩造成了较大破坏.

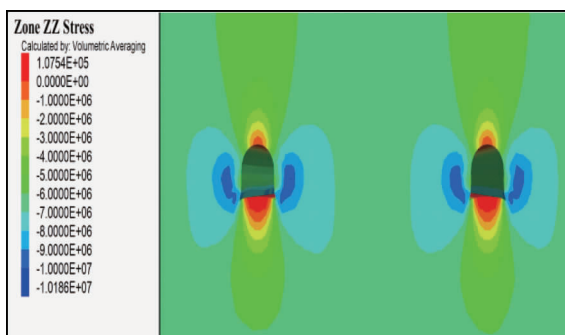


图 10 无采空区时围岩垂直应力分布

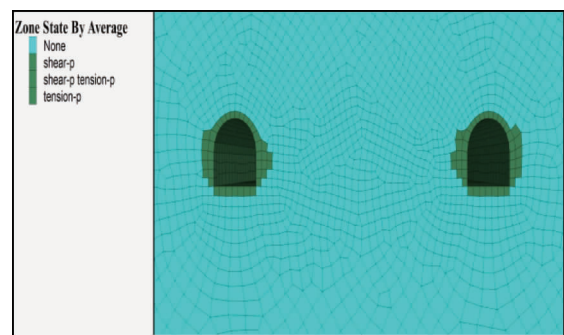


图 11 无采空区时巷道塑性区

3.4 有采空区时巷道围岩应力分布规律及塑性区的范围

受起伏地表产生的非均匀应力和 110904 风巷右侧上覆采空区的影响,110904 风巷被上覆采空区产生的高应力所围绕,从采空区延伸至 110904 风巷周围都处于较高的应力场中,而左侧 1766 南运巷只在巷道两帮处存在应力集中,具体情况如图 12 所示.根据巷道围岩的应力分布情况,巷道围岩表面产生的塑性区如图 13 所示,110904 风巷的塑性区急剧增大,且巷道右侧肩角的塑性区与右上方采空区的塑性区相互贯通,左侧塑性区呈蝶叶形迅速扩展,巷道两侧呈现出明显的非均匀、不协调等大变形特征,左侧的 1766 南运巷两侧塑性区也成倍扩大.110904 风巷右侧肩角塑性区范围较广,其余塑性区的影响范围在 4 m 内,与现场监测的巷道围岩内部结构破坏程度较为接近.监测到 110904 顶板位移下沉 0.86 m,底鼓 0.82 m,两帮每侧向内挤压约 0.94 m,随着两帮的挤压,围岩塑性区的扩展,巷道出现片帮、开裂等现象造成巷道围岩严重失稳.在现场对巷道围岩的顶底板、两帮进行 30 d 的位移监测,结果如图 14 所示.数值模拟位移监测模拟结果与现场实际情况大致相同,其围岩破碎情况与巷道围岩内部结构探测数据基本吻合.

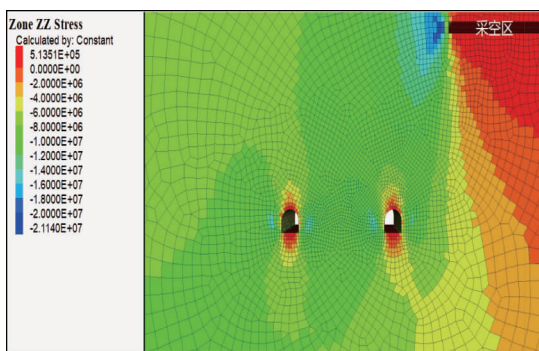


图 12 有采空区时巷道垂直应力分布

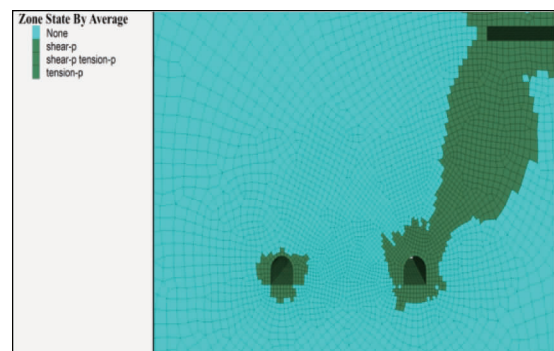


图 13 有采空区时巷道塑性区分布情况

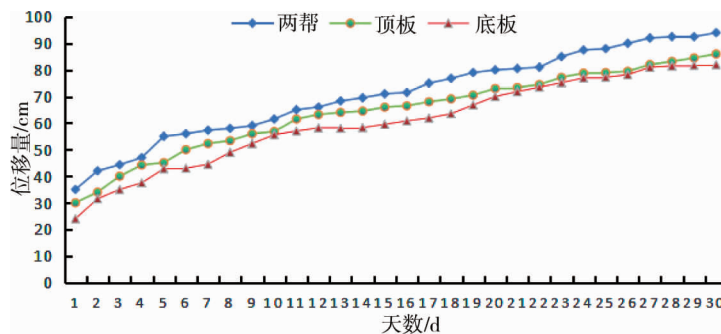


图 14 巷道表面位移

4 支护方案及支护效果

图 12 中数值模拟结果表明,在起伏地表产生的非均匀应力和侧向采空区的双重影响下,巷道围岩周围会形成大面积的应力集中,顶板和底板的应力集中系数大,顶板下沉明显,且巷道两帮处于高应力场中,两帮受到力的作用向巷道内挤压.从巷道围岩的应力分布规律与巷道围岩的塑性区的扩展范围来看,一般锚杆长度只能让锚杆锚固基础位于较为松散的塑性区围岩中,难以发挥锚杆应有的支护作用.

1766 南运巷与 110904 风巷皆含有遇水易膨胀的绿泥石,属于典型的软岩巷道,围岩结构松散、塑性区范围大,抗变形能力差,侧向采空区与起伏地表产生的非均匀应力叠加形成复杂的力学环境,巷道围岩极易产生大变形.基于巷道塑性区范围广、破坏程度大,同时根据软岩巷道支护原理,从以抑制塑性区恶性扩展为控制视角出发,采纳以“中空注浆锚索”为主体,以“注浆锚杆+金属网+喷射砼”为辅助的综合控制技术,注浆锚杆选用 $\Phi 22 \text{ mm} \times 2 \text{ 600 mm}$ 螺纹钢锚杆.每根锚杆使用 1 卷 K2850 树脂锚固剂,锚固力不低于 70 kN,锚杆间排距为 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$,每个断面 13 根,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,网间搭接长度不少于 100 mm.喷射砼厚度为 150 mm,强度为 C20.注浆锚杆托盘采用钢板托盘,直径 150 mm,圆形,厚为 10~15 mm.中空注浆锚索每个断面 12 根,规格 $\Phi 22 \text{ mm} \times 6300 \text{ mm}$ (见图 15),注浆锚索间排距按 $1200 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 分布,锚杆锚索间隔布置(见图 16).中空注浆锚索允许外露长度不超过 0.5 m,中空注浆锚索盘采用 20 mm 槽钢与 16 mm 钢板焊接加工而成,20 mm 槽钢长度 0.5 m,16 mm 钢板长度 0.4 mm,支护设计如图 17 所示.

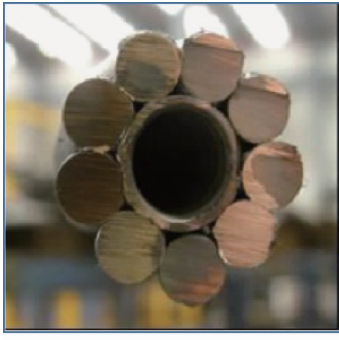


图 15 中空注浆锚索

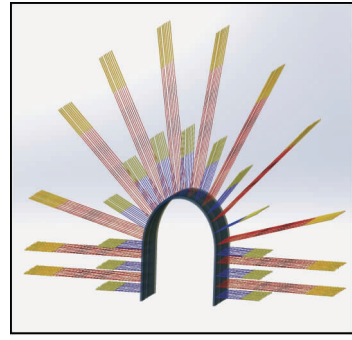


图 16 锚杆锚索支护布置

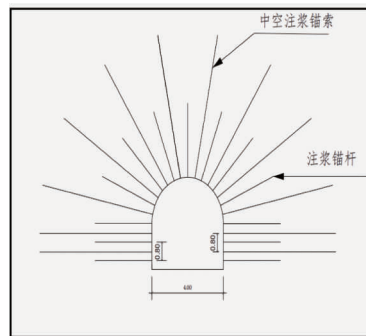


图 17 支护设计

根据数值模拟图 8 的显示结果,选取 110904 风巷由东往西应力集中最大处进行模拟支护,模拟结果表明,采用支护方案后的巷道围岩塑性区范围大幅度缩小,巷道围岩应力集中程度降低,位移云图也明显得到改善,如图 18 所示.从监测结果发现,提前支护下的巷道顶板下沉量和底板底鼓量与未支护产生的位移量相比,其变形量大大减少.为了确认支护方案的准确性,我们根据数值模拟结果在现场选取将会发生塑性破坏的区域采用支护方案提前进行支护,发现两帮位移量比未支护区域大幅度减小,两帮最终位移量与数值模拟显示的结果不相上下.说明该支护方案增强了围岩的承载作用,减小了巷道围岩应力集中程度,确保了巷道周边围岩处于均匀应力状态,巷道围岩逐渐趋于稳定,验证了此方案对控制巷道围岩变形有显著效果.

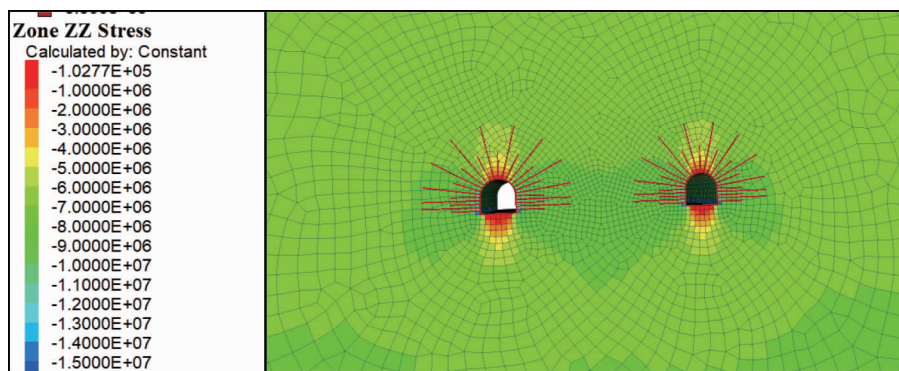


图 18 支护后巷道围岩应力云图

5 结论

1) 110904 风巷内岩石为极强膨胀性软岩,其自稳性能差、膨胀性强、流变性大,导致巷道围岩稳定性差。

2) 110904 风巷和 1766 南运巷受到起伏地表和采空区产生的非均匀应力,使得整条巷道处于塑性区范围内。

3) 采用“中空注浆锚索”为主体,以“注浆锚杆+金属网+喷射砼”为辅助的综合控制技术方案后,巷道围岩的顶底板和两帮变形量仅为未支护前的 40%。

参考文献:

- [1] 黄庆享.浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[J].岩石力学与工程学报,2002,21(8):1174-1177.
- [2] WU H, WANG X, WANG W, et al. Deformation characteristics and mechanism of deep subsurface coal pillar of the tilted stratum[J]. Energy Science & Engineering, 2020, 8(2): 544-561.
- [3] 李伟豪.沟谷产状对浅埋煤层工作面关键层破断影响规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2016.
- [4] 肖国刚,姚文博.麻地梁煤矿沟谷地形浅埋煤层矿压显现规律[J].采矿与岩层控制工程学报,2021,3(4):96-103.
- [5] 刘志辉,吕义清.黄土沟谷区浅埋煤层开采斜坡变形破坏机理[J].煤炭工程,2020,52(10):104-108.
- [6] 朱泽奇,盛谦,陈子婧,等.山体地形与地质结构面对地下洞室地震响应的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(s1):3509-3515.
- [7] 任艳芳.地表山体载荷对浅埋深工作面开采矿压的影响[J].矿业安全与环保,2020,47(4):77-81.
- [8] 许家林,朱卫兵,王晓振,等.沟谷地形对浅埋煤层开采矿压显现的影响机理[J].煤炭学报,2012,37(2):179-185.
- [9] 许家林,朱卫兵,王晓振,等.浅埋煤层覆岩关键层结构分类[J].煤炭学报,2009,34(7):865-870.
- [10] 王宏志,刘洪林,宋帅帅,等.沟谷地形下近浅埋煤层工作面矿压显现规律研究[J].中国矿业,2020,29(9):116-120.
- [11] 赵杰,刘长友,李建伟.沟谷区域浅埋煤层工作面覆岩破断及矿压显现特征[J].煤炭科学技术,2017,45(1):34-40.
- [12] 李建伟,刘长友,赵杰,等.沟谷区域浅埋煤层采动矿压发生机理及控制研究[J].煤炭科学技术,2018,46(9):104-110.
- [13] 王旭锋,张东升,卢鑫,等.浅埋煤层沙土质冲沟坡体下开采矿压显现特征[J].煤炭科学技术,2010,38(6):18-22.
- [14] 车晓阳,侯恩科,孙学阳,等.沟谷区浅埋煤层覆岩破坏特征及地面裂缝发育规律[J].西安科技大学,2021,41(1):104-111.
- [15] 刘迅,王卫军,吴海,等.矩形巷道围岩塑性区扩展规律分析[J].矿业工程研究,2017,32(1):14-18.
- [16] 王中明,朱月健,李楷兵.非均匀应力场下圆形隧道围岩塑性区研究[J].水利水电技术,2020,51(11):197-204.
- [17] 杜华溢,司艳龙,李春元,等.非均匀应力影响下巷道顶板破坏特征研究[J].煤炭科学技术,2019,47(5):101-106.