

滕县煤田下组煤地应力特征与 灰岩夹层顶板稳定性控制研究

刘杰¹, 陈志峰¹, 高红星¹, 张进鹏², 马明¹, 吴星辉³, 方庆河¹, 张琰², 吴继飞⁴

(1. 滕州郭庄矿业有限责任公司 锦丘煤矿, 山东 滕州 277500; 2. 山东科技大学 资源学院, 山东 泰安 271019;
3. 枣庄学院 城市与建筑工程学院, 山东 枣庄 277160; 4. 山东能源集团鲁西矿业 郭屯煤矿, 山东 菏泽 274704)

摘要:滕县煤田锦丘煤矿 16 煤顶板灰岩存在弱面夹层, 其厚度、破坏形态及下位坚硬岩层物理力学性质对巷道顶板整体的破裂形态产生影响, 且地应力场不明, 周边部分矿井存在支护设计中未考虑该因素引发的冒顶现象。本研究针对锦丘煤矿 16 煤 162-206 下轨道巷顶板破碎、两帮煤体大变形问题, 通过地应力测量、顶底板力学测试、顶板钻孔窥视等综合研究方法, 探究了滕县煤田 16 煤的地应力特征、灰岩顶板力学特征及弱面位置, 改进支护方案。通过数值模拟分析 3 种改进支护方案控制围岩的变形特征, 优选最佳支护方案。通过工程监测评价最优支护方案的有效性。结果表明: 16 煤顶板灰岩夹层位于 1~2 m 深度内, 特别是 1.1~1.3 m 和 1.8~2.0 m 范围; 16 煤最大主应力位于近水平方向, 顶板受影响较两帮大, 易发生较严重的剪切破坏, 且顶板位移较两帮大。最大主应力以南东向为主, 数值为 16~20 MPa; 综合控制效果、劳动强度和支护成本, 选择方案 2 作为下轨道巷最优支护方案; 工程中安装测点 16~20 天后, 巷道围岩变形逐渐趋于稳定, 顶底板和两帮的最大变形量为 38 和 67 mm, 验证了改进支护方案的有效性。

关键词:滕县煤田下组煤; 地应力特征; 灰岩夹层顶板; 围岩控制

中图分类号: TD311

文献标志码: A

Research on ground stress characteristics of lower formation coal in Tengxian coalfield and stability control of limestone interlayer roof

LIU Jie¹, CHEN Zhifeng¹, GAO Hongxing¹, ZHANG Jinpeng², MA Ming¹,
WU Xinghui³, FANG Qinghe¹, ZHANG Yandong², WU Jifei³

(1. Jinqiu Coal Mine, Guozhuang Mining Co. Ltd, Tengzhou 277500, China;

2. College of Resources, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China;

3. College of City and Architecture Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China;

4. Guotun Coal Mine, Shandong Energy Group Luxi Mining Company, Heze 274704, China)

Abstract: In Jinqiu coal mine of Tengxian coalfield, there is a weak interlayer in the limestone of the 16th coal seam roof. Its thickness, failure pattern, and the physical and mechanical properties of the underlying hard rock layer affect the overall fracture pattern of the roadway roof. Additionally, the in-situ stress field is unclear and some surrounding mines have experienced roof falls for lack of consideration of this factor in support design. This study aims to address the roof fragmentation and significant deformation of the coal bodies on both sides of the roadway at 162-206 lower track of the 16th coal seam in Jinqiu coal mine. Using in-situ stress measurements, mechanical

收稿日期: 2024-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52304145); 山东省自然科学基金项目(ZR2021QE233)

作者简介: 刘杰(1972—), 男, 安徽太和人, 高级工程师, 主要从事地测防治水工作。

张进鹏(1992—), 男, 山东济宁人, 副教授, 博士, 主要从事矿山岩石力学和注浆材料及工艺方面的研究, 本文通信作者。E-mail: zjpsdust@126.com

testing of the roof and floor, and roof borehole inspections, we explored the in-situ stress characteristics, limestone roof mechanics, and weak interlayer positions in the 16th coal seam of Tengxian coalfield to improve the support scheme. Numerical simulations were conducted to analyze the deformation characteristics of the surrounding rock under three improved support schemes, and the best support scheme was selected. The effectiveness of the optimal support scheme was evaluated through engineering monitoring. The results indicate that the limestone interlayer in the roof of the 16th coal seam is within a depth of 1~2 meters, particularly between 1.1~1.3 meters and 1.8~2.0 meters. The maximum principal stress in the 16th coal seam is nearly horizontal. The roof is more affected than the sides, leading to more severe shear failure and larger roof displacement. The maximum principal stresses are predominantly southeast oriented with values of 16 to 20 MPa. Considering the overall control effect, labor intensity, and support cost, Scheme 2 was chosen as the optimal support scheme for the lower track roadway. During engineering monitoring, the deformation of the surrounding rock in the roadway gradually stabilized 16 to 20 days after installing the measurement points. The maximum deformation of the roof and floor was 38 mm and the maximum deformation of the sides was 67 mm, thus verifying the effectiveness of the improved support scheme.

Key words: lower formation coal in Tengxian coalfield; ground stress characteristics; limestone interlayer roof; surrounding rock control

由于板块边界受压、地球内应力、地心引力、地球旋转、岩浆浸入和地壳非均匀扩容等因素的影响,地应力有覆岩重力及倾斜分量、构造应力、孔隙压力和热应力等表现形式^[1-3]。一般认为,垂直应力主要与覆岩厚度和容重有关,而水平应力与垂直应力呈现一定的线性或非线性关系,但相关系数的影响因素较多,如岩石泊松比、区域构造、区域孔隙压力等^[4-6]。因此,水平应力与垂直应力之间关系呈区域化特征,难以将其统一。

地应力作为地下围岩控制的重要依据参数,目前学者对地应力场特征进行了广泛研究^[7-9]。一般根据上覆岩层的容重和埋深计算得出垂直应力;水平应力分布特征的区域性差异较大,与地层挤压、断层构造等有关。一般在由挤压构造形成的山区,水平应力较明显^[10-11]。而现场实际测量时,也曾见在平原地区水平应力较大的情况。滕县煤田锦丘煤矿 16 煤作为下组煤,虽然直接顶为坚硬灰岩,但是顺槽顶板异常破碎,两帮煤体变形较大,已经对采煤工作面超前段进行了架棚补强支护,且钢棚受力较大。参考相邻王晁煤矿等矿井的地应力测试结果,预估该区域水平构造应力较大,加剧了围岩控制难度。根据相邻矿井钻孔窥视结果可知,16 煤顶板灰岩存在弱面夹层。夹层的位置对顶板稳定性有着重要影响,尽管软弱夹层在巷道顶板的分布数量上占岩体比例较少,但其却是岩体中最薄弱部位,因此有必要进行地应力测试,分析夹层对地应力的影响。根据夹层的位置,锚杆应能穿过夹层将其锚固在稳定岩层中^[12-13]。对于常规锚网支护而言,灰岩等硬岩顶板经常采用短小锚杆支护,甚至裸体巷道。锚杆受力监测数据未见异常,顶板变形也不大,但是存在顶板弱面夹层冒落的隐患,曾有多多个类似矿井发生此类冒顶事故^[14-17]。因此,亟待确定灰岩夹层的具体位置,为确定顶板支护参数(特别是锚杆长度)提供依据。

基于上述分析,针对锦丘煤矿 16 煤顺槽围岩破碎、变形较大的问题,通过顶底板岩石力学测试、滕县煤田下组煤 16 煤地应力测试及顶板钻孔窥视等研究探寻围岩破碎原因,评价巷道布置合理性,改进原有支护方案,采用数值模拟方法明确最佳支护方案,通过监测围岩变形评价新设计支护方案的有效性。

1 采矿地质条件与工程背景

滕州郭庄矿业有限责任公司锦丘煤矿位于山东省滕州市,下组煤 16 煤可采区内厚度 1.01~1.28 m,平均为 1.23 m。16 煤直接顶为十_下灰岩,厚度 2.15~6.44 m,含泥岩伪顶,厚度 0.44~0.15 m;直接底以泥岩、砂质泥岩为主,厚度 0.65~8.33 m;细粒砂岩次之,厚度 0.80~7.60 m;偶见泥岩伪底。目前,16 煤主采 162-2 采区。162-206 下轨道巷位于 162-2 采区中部,巷道底板标高为 -483.0~-540.0 m,地表标高为 +37.7~+38.1 m。如图 1(a)所示,该巷道东为未施工的 162-206 面,西为 162-108 面。162-206 下轨道巷顶板采用 $\Phi 18 \text{ mm} \times 1\ 800 \text{ mm}$ 的等强全螺纹锚杆,如图 1(b)所示,间排距为 1 300 mm \times 1 200 mm;帮部采用 $\Phi 18 \text{ mm} \times 1\ 200 \text{ mm}$ 等强全螺纹锚杆,间排距为 900 mm \times 1 200 mm,网片为长 5 m、宽 1.8 m 的双抗

塑料网。

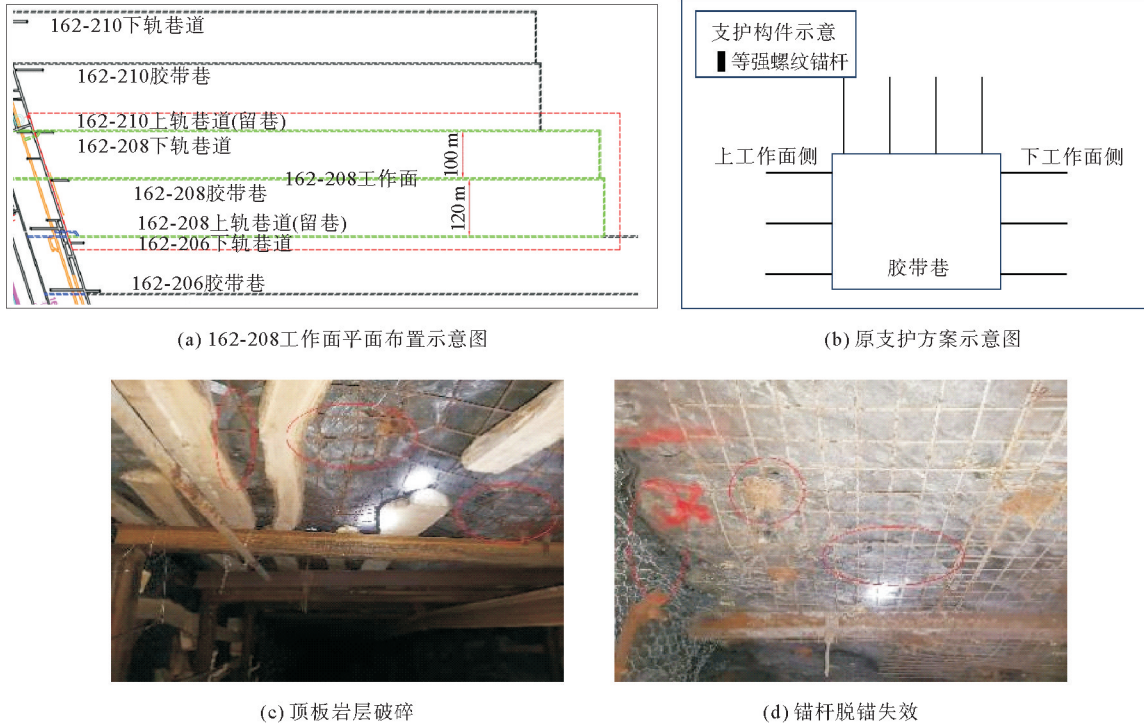


图 1 162-208 工作面平面布置、原支护方案、围岩变形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the 162-208 working face of plane layout, original support scheme and deformation of the surrounding rocks

如图 1(c)和图 1(d)所示,在原支护方案控制下,围岩控制效果不佳,顶板破碎严重,两帮出现网兜,部分锚杆脱锚,特别是回采工作面超前段巷道在采动应力的影响下,围岩极其破碎,需要架棚防止顶板冒落。另外,回采帮部螺纹钢锚杆严重影响采煤机割煤速度。基于此,对锦丘煤矿 16 煤顶底板岩石力学特征、地应力场和顶板岩层结构进行研究,以期改进原有支护材料和方案,提高围岩控制效果和采煤效率。

2 16 煤顶底板岩石力学参数测试

巷道围岩的基本力学参数是支护设计的关键依据,目前仅明晰了锦丘煤矿 16 煤灰岩顶板较硬,且存在夹层等特征,而顶底板的量化力学参数未知。因此,基于 GB/T 23561.8—2009《煤和岩石物理力学性质测定方法》,从锦丘煤矿 16 煤及顶底板选取大块煤、岩样,运至实验室通过取芯机加工成试样。采用电子万能压力试验机进行单轴压缩试验、巴西劈裂试验(抗拉试验)、抗剪试验,试样尺寸分别为 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 、 $\Phi 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 和 $\Phi 50\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 。为减少误差,每组选取 3 个自然状态试样进行测试,取平均值为最终结果。根据抗剪试验结果计算内聚力和内摩擦角。表 1 为煤体、顶板和底板的基本力学参数。

表 1 16 煤及顶底板岩样基本力学试验结果

Table 1 Basic mechanical experiment results of the 16th coal, roof and floor rock strata

名称	岩性	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	抗剪强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
16 煤	煤	5.44	0.34	1.80	1.80	32.70
16 煤顶板	十 _下 灰	153.00	5.07	6.83	6.83	38.83
16 煤底板	砂质泥岩	51.50	1.80	2.73	2.73	35.33

由表 1 可知,16 煤顶板为非常坚硬的十_下灰,底板为砂质泥岩,强度较高。顶板十_下灰岩中下部夹泥质条带或为泥灰岩,这一薄夹层是十_下灰冒落的自然分界面,其下部随采随垮,呈柔塑状态,上部自然弯曲下沉。说明十_下灰夹有低强度薄层。16 煤底板存在泥质胶结,强度较低,水稳性差,遇水碎裂,需要加强支护。

3 16 煤地应力测试与分析

3.1 测点布置与测试方法

锦丘煤矿 16 煤作为滕县煤田的典型下组煤,为探究该区域的地应力分布特征,并为 16 煤巷道灰岩夹层顶板支护参数提供基本依据,在 16 煤布置了 2 个测点,如表 2 所示,206-1[#]和 206-2[#]测点分别位于 162-206 胶带巷 F2 断层前 8 m 位置的左侧和右侧,埋深为 543 m。采用“实现完全双温度补偿并考虑岩体非线性的地应力解除测量技术”测试地应力。

表 2 地应力测点基本情况

Table 2 Basic information of geostress measurement points

测点编号	方位角/(°)	仰角/(°)	钻孔深度/m	埋藏深/m	岩性
206-1 [#]	110	6	5.40	543	十 _下 灰岩
206-2 [#]	128	5	5.38	543	砂质泥岩

3.2 现场应力解除

每一测点应力计探头中均有 12 支应变片测量 12 个方向的应变,分别为 A0、A135、A45、A90、B0、B135、B45、B90、C0、C135、C45、C90。其中 A、B、C 代表三组应变花,每组应变花由 4 支应变片组成,数字(0,135,45,90)表示该应变片与钻孔轴线方向的夹角,图 2 为 206-1[#]、206-2[#]两个测点的岩芯及应力解除曲线。

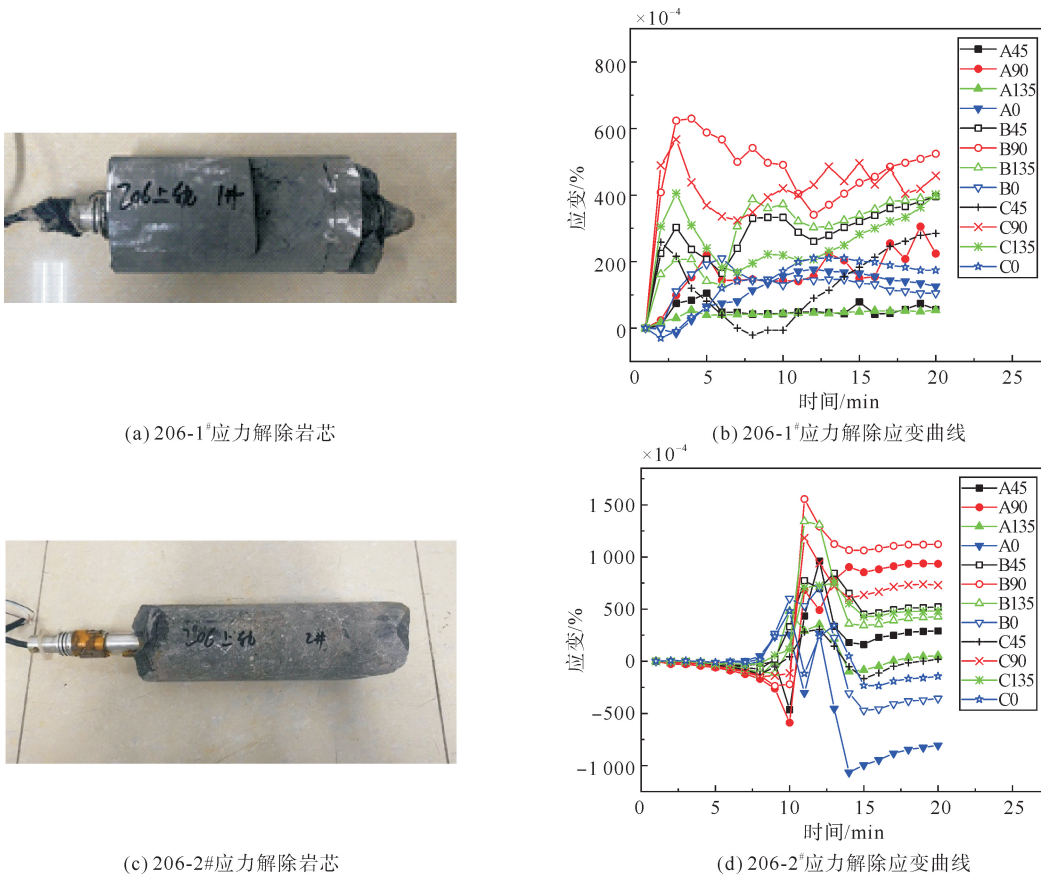


图 2 16 煤两个测点岩芯与应力解除曲线

Fig. 2 Rock core and stress relief curves of two measuring points in the 16th coal seam

3.3 围压率定试验

用油压泵对套孔岩芯加压然后卸压,依据该过程的卸压曲线计算弹性模量和泊松比。经过计算,测点 206-1[#] 的弹性模量为 28.5 GPa,泊松比为 0.18;测点 206-2[#] 的弹性模量为 27.6 GPa,泊松比为 0.19。

3.4 测量结果与分析

计算 2 个水平测点处的主应力值和应力方向,计算结果见表 3 所示。

表 3 各测点主应力计算结果

Table 3 Calculation results of principal stress at each measurement point

编号	最大水平主应力 σ_H			最小水平主应力 σ_h			垂直主应力 σ_v		
	数值/MPa	方向/(°)	倾角/(°)	数值/MPa	方向/(°)	倾角/(°)	数值/MPa	方向/(°)	倾角/(°)
206-1 [#]	16.14	145.79	9.00	9.89	229.34	-6.00	13.10	168.39	80.00
206-2 [#]	19.42	139.56	1.00	10.98	198.19	5.00	16.22	20.22	-84.00

根据表 3 可知,两个测点均存在两个主应力接近水平方向,其中一个主应力接近垂直方向。最大主应力均位于近水平方向,倾角约为 5°,方向以南东向为主,位于 119°~146°,数值为 16~20 MPa。两测点最大水平主应力与垂直主应力的比值分别为 1.23 和 1.20。因此,矿区地应力场以水平构造应力为主,原因是井田位于滕县背斜北翼中部,呈被断层切割的宽缓褶曲形态,跨度较大,幅度较小,伴有缓波状起伏,整体为挤压构造,如图 3 所示。

两测点最大水平主应力与最小水平主应力之比分别为 1.63 和 1.77,两者应力差值即为剪应力,其值明显大于垂直平面内剪应力,这是引起巷道围岩剪切变形破坏的主要原因。在埋深 543 m 处,应力分别为最大水平主应力 σ_H 、最小水平主应力 σ_h 和垂直主应力 σ_v ,主应力大小关系为: $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$,属于走滑型地应力分布,该地应力分布的围岩变形极易受水平主应力与巷道位置关系的影响。

3.5 最大主应力与巷道位置关系

最大主应力与测点巷道位置关系如表 4 所示。最大水平主应力的大小和方向是影响巷道围岩稳定性的关键。根据各测点主应力方向,得到最大水平主应力方向和主运巷道的位置关系,如图 4 所示。

由图 4 可知,206 上轨道巷两处测点的最大主应力方向和巷道走向夹角,分别为 66°和 72°。而最小主应力方向与巷道走向几乎一致,夹角分别为 18°和 13°。当巷道掘进方向与最大水平主应力平行时,受水平应力影响最小,对顶底板的稳定最有利;而巷道掘进方向与最大水平主应力垂直时则相反,与最大水平主应力

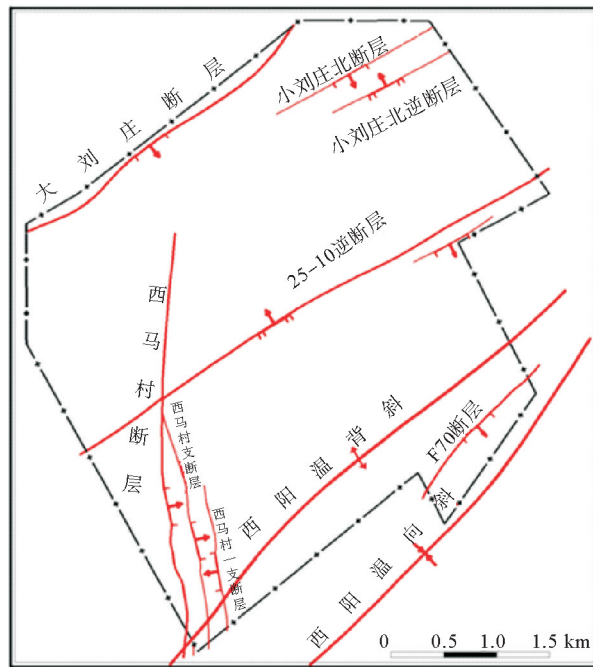


图 3 锦丘井田构造图

Fig. 3 Tectonic map of Jinqiu well field

表 4 最大水平主应力方向和测点巷道位置关系

Table 4 Positional relationship between the direction of the maximum horizontal principal stress and the measured point of the roadway

测点	σ_H /(°)	σ_h /(°)	巷道轴向/(°)
206-1 [#]	145.79	229.34	31
206-2 [#]	139.56	198.19	31

以一定角度斜交的巷道,一侧出现应力集中而另一侧应力释放,因而顶底板变形破坏会偏向巷道某一侧。

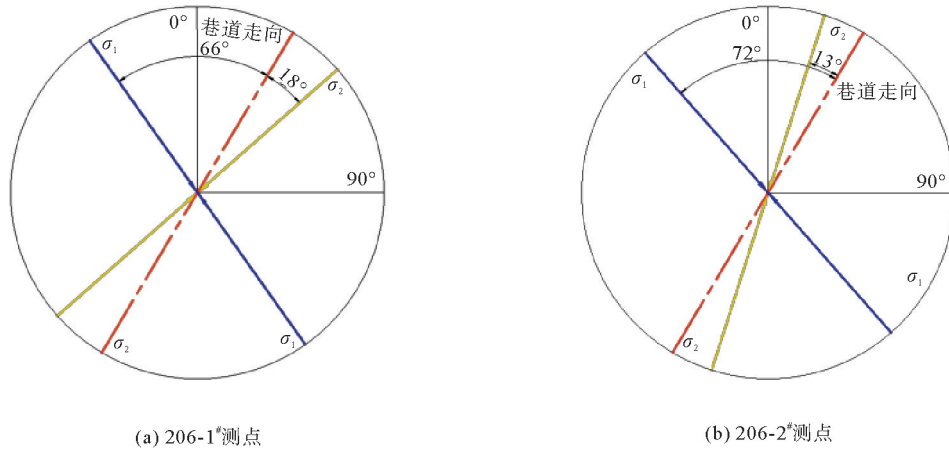


图 4 测点主应力与所处巷道走向平面关系(最大水平主应力为 σ_1 , 最小水平主应力为 σ_2)

Fig. 4 Planar relationship between the direction of principal stress at the measuring point and the direction of the roadway (maximum horizontal principal stress is σ_1 , minimum horizontal principal stress is σ_2)

4 16 煤顶板岩层夹层钻孔窥视与分析

根据周边矿井反馈及本矿井采掘经验可知,16 煤灰岩顶板存在夹层。一般认为以灰岩为主的硬岩顶板所需支护强度较弱,或者不需要支护,但是在实践过程中,区域内曾发生过多起灰岩顶板局部冒顶事故。为实现锦丘煤矿 16 煤顶板安全控制,亟需掌握详细的灰岩顶板夹层所在位置及区域内的空间变化特征,为围岩控制提供关键性依据。故在 162-206 胶带巷地应力测试位置开展 2 组现场钻孔窥视试验。图 5 及图 6 分别为 206-1# 和 206-2# 岩层全孔及局部分段钻孔图像。

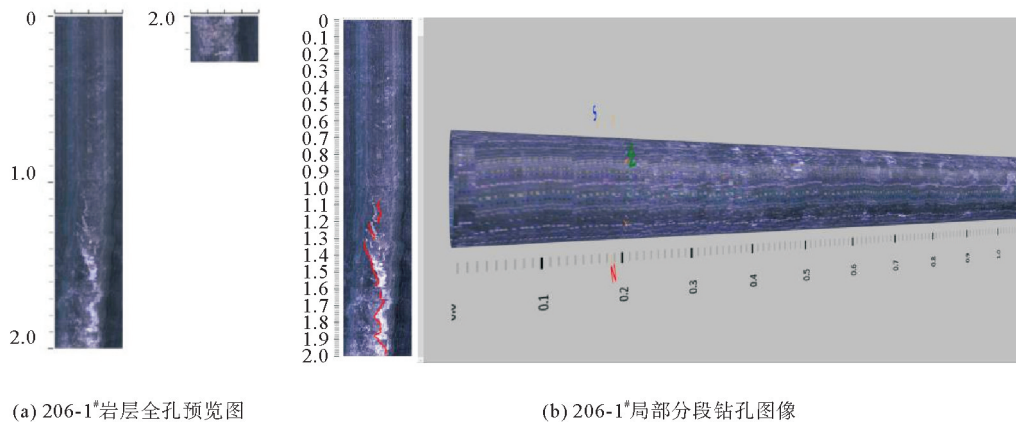


图 5 206-1# 岩层全孔及局部分段钻孔图像

Fig. 5 Images of drilling holes in the entire and partial sections of rock formation 206-1#

由图 5 可知,206-1# 钻孔深度 0~1.0 m 范围内,岩层结构相对完整;孔深 1.0~2.0 m 范围内,出现了大量纵向裂纹,裂隙发育明显。随着孔深增大,裂隙数量增多,存在明显的白色夹层分界面。由图 6 可知,206-2# 钻孔深度 1.0~2.0 m 范围内,岩层存在两处明显的发育裂隙,分别位于孔深 1.1~1.3 m 和 1.8~2.0 m。1.1~1.3 m 范围内裂隙发育更明显,属于贯通型裂隙。因此,需要注意煤层顶板 1.0 m 以上岩层的稳定性,虽然灰岩顶板强度较高,但是锚杆必须穿过裂隙发育夹层才能保证顶板稳定。

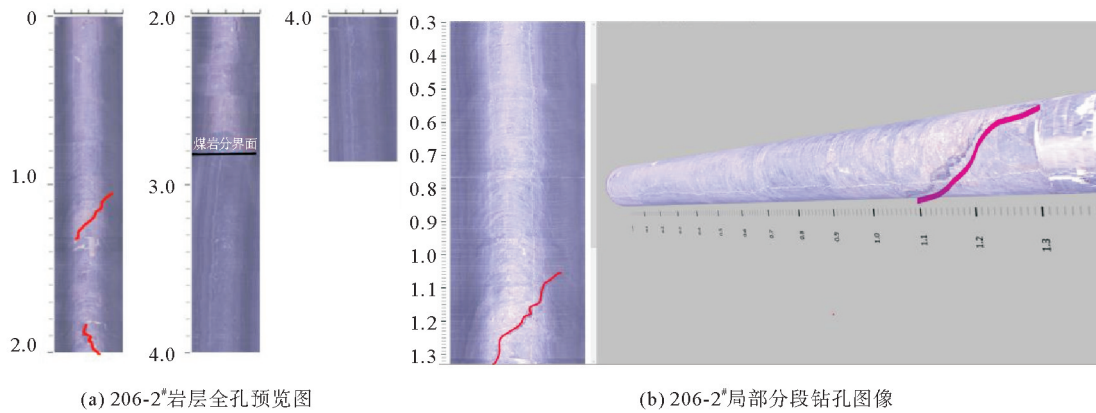


图 6 206-2# 岩层全孔及局部分段钻孔图像

Fig. 6 Images of drilling holes in the entire and partial sections of rock formation 206-2#

5 灰岩夹层顶板巷道支护设计与应用

5.1 支护方案改进思路

考虑 16 煤巷道原支护方案的控制效果,根据 16 煤顶底板岩石力学参数、地应力及钻孔窥视结果,对巷道围岩控制提出改进思路,设计 3 种支护方案,并通过数值模拟进行对比分析,以优选出最佳支护方案。基于原支护方案的改进思路如下:

1) 减小肩部锚杆尾端间距,将帮部最上方和最下方锚杆分别向上和向下倾斜 15°布置,保证帮部与顶底板围岩完整性联系。

2) 采用左旋高强无纵肋滚丝锚杆代替右旋全螺纹锚杆,以提高预紧力、锚固力和杆体强度,充分发挥主动支护作用。锚杆长度穿过灰岩顶板夹层,将其锚固在稳定岩层,防止顶板冒落。

3) 充分考虑“支-护”结构中护表的作用,仅依靠锚杆托盘发挥护表作用明显不足,增加金属网、钢带等护表构件,提高对破碎围岩的表面约束,将点锚有效连通为整体支护结构。

根据上述改进思路,对 162-208 工作面下轨道巷支护方案进行设计。通过改变顶板和帮部锚杆的间排距,设计 3 种不同的支护方案,具体如表 5 所示。

表 5 162-208 工作面下轨道巷 3 种支护方案

Table 5 Three support schemes for the lower track roadway of the 162-208 working face mm

支护构件	支护参数	方案 1	方案 2	方案 3	其他
顶部锚杆	规格(直径×长度)	18×2 000	18×2 000	18×2 000	无纵肋滚纹钢锚杆
	间排距(面积)	1 200×1 100	1 200×1 200	1 200×1 300	
顶部网片	规格(长度×宽度)	2 000×1 000	2 000×1 000	2 000×1 000	金属焊接网
工作面侧巷帮	规格(直径×长度)	18×1 600	18×1 600	18×1 600	等强螺纹钢锚杆 玻璃钢锚杆
	间排距(面积)	700×1 100	700×1 200	700×1 300	
煤柱侧巷帮	规格(直径×长度)	18×1 600	18×1 600	18×1 600	等强螺纹钢锚杆
	间排距(面积)	1 000×1 100	1 000×1 200	1 000×1 300	
帮部网片	规格(长度×宽度)	5 000×2 400	5 000×2 400	5 000×2 400	钢塑复合网 (压茬≥100)

5.2 数值模型

建立尺寸为 300 m×150 m×60 m 的数值模型,如图 7 所示。选取上述两测点垂直应力和最大水平主

应力的平均值,分别为 14.66 和 17.78 MPa。模型顶部和两侧均为自由边界,底部采用位移约束,水平、垂直速度为 0。材料屈服破坏准则采用莫尔-库伦准则,煤体及顶底板力学参数依据表 1 实测数据,其他岩层力学参数根据常规选取,如表 6 所示。

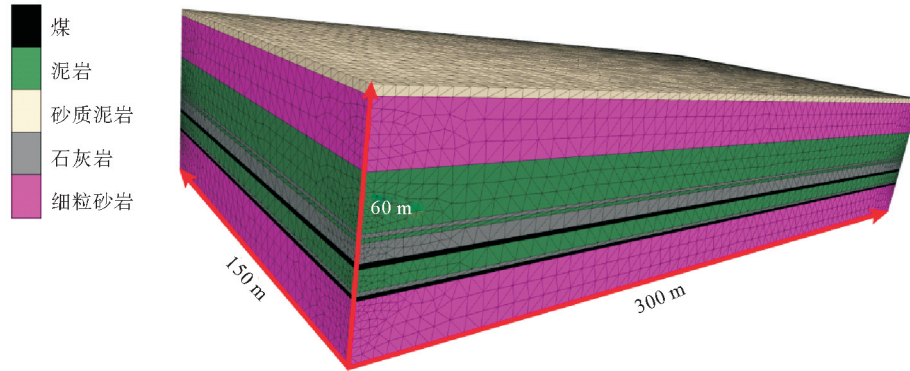


图 7 数值模拟模型

Fig. 7 Numerical simulation model

表 6 16 煤顶底板岩层力学参数

Table 6 Mechanical parameters of the roof and floor rock strata

岩石	容重 $d / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E / GPa	体积模量 K / GPa	剪切模量 G / GPa	泊松比 ν	内聚力 $/ \text{MPa}$	摩擦角 $/ (^{\circ})$	抗拉强度 $/ \text{MPa}$
泥岩	2 461	8.75	6.08	3.47	0.260	1.20	30	0.605
砂质泥岩	2 530	10.85	5.12	4.73	0.147	2.45	40	2.010
石灰岩	2 800	10.69	5.57	4.53	0.180	11.40	38	6.700
细粒砂岩	2 873	33.40	21.01	13.52	0.235	3.20	42	1.290

5.3 模拟结果与分析

5.3.1 162-208 下轨道巷掘进期间围岩变形

掘巷期间不同支护方案下 162-208 工作面下轨道巷模拟结果如图 8~10 所示,表 7 为下轨道巷掘进期间模拟结果。

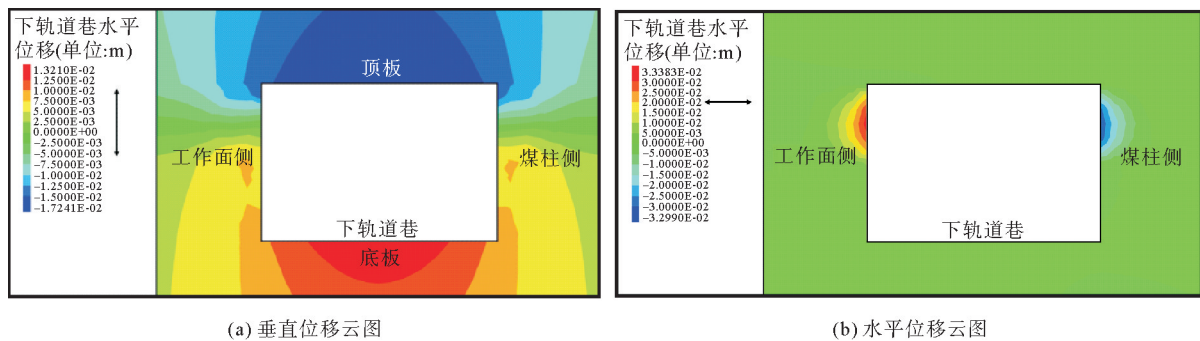


图 8 掘进期间围岩变形云图(方案 1)

Fig. 8 Cloud map of surrounding rock deformation during excavation (Scheme 1)

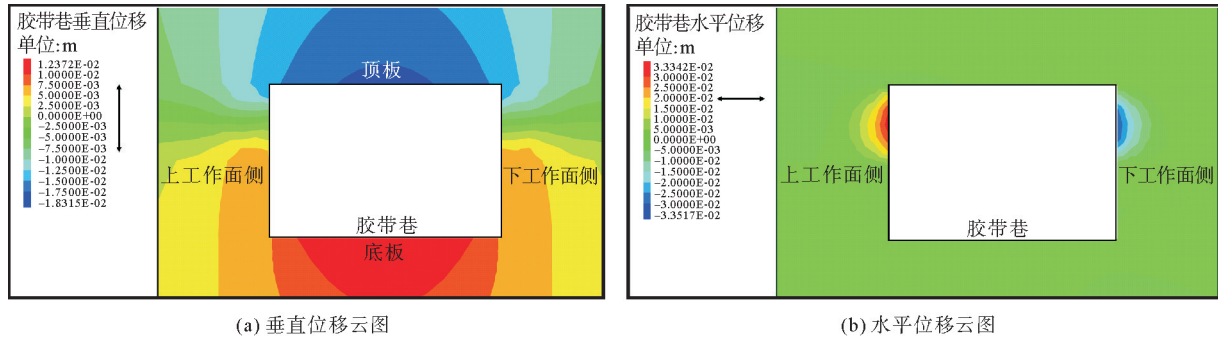


图9 掘进期间围岩变形云图(方案2)

Fig. 9 Cloud map of surrounding rock deformation during excavation (Scheme 2)

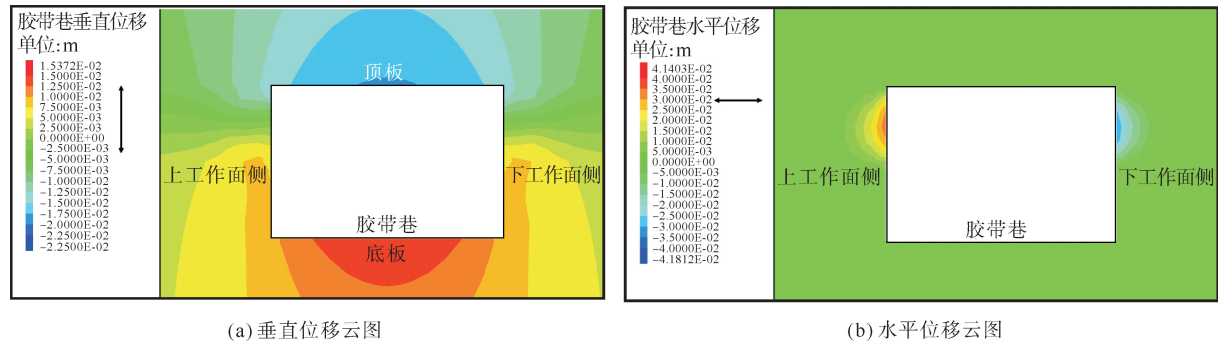


图10 掘进期间围岩变形云图(方案3)

Fig. 10 Cloud map of surrounding rock deformation during excavation (Scheme 3)

表7 下轨道巷掘进期间模拟结果

Table 7 Simulation results during lower track roadway excavation

mm

方案	顶板位移	底板位移	采煤帮位移	煤柱帮位移
方案1	17.1	11.8	32.3	32.9
方案2	17.8	13.1	35.1	35.8
方案3	22.4	16.1	41.8	42.1

由图8~10不同方案掘进期间围岩变形云图可以看出,方案1巷道顶板深蓝色范围明显大于方案2和方案3,表明方案1中顶板位移量低于方案2和方案3。由表7可知,方案1、方案2、方案3掘进期间巷道的顶板位移量分别为17.1、17.8、22.4 mm,底板位移量分别为11.8、13.1、16.1 mm,采煤帮位移量分别为32.3、35.1、41.8 mm,煤柱帮位移量分别为32.9、35.8、42.1 mm。对比可知,方案1的顶板和底板位移量略小于方案2和方案3;方案1的采煤帮和煤柱帮位移量虽明显小于方案2,但是方案1与方案2的帮部位移差值明显小于方案2与方案3的帮部位移差值。总体而言,方案1与方案2对围岩控制效果的差距不大,方案2与方案3对围岩控制效果的差距更大。

5.3.2 162-208下轨道巷回采期间围岩变形

回采期间不同支护方案下162-208下轨道巷模拟结果如图11~13所示。表8为下轨道巷回采期间模拟结果。

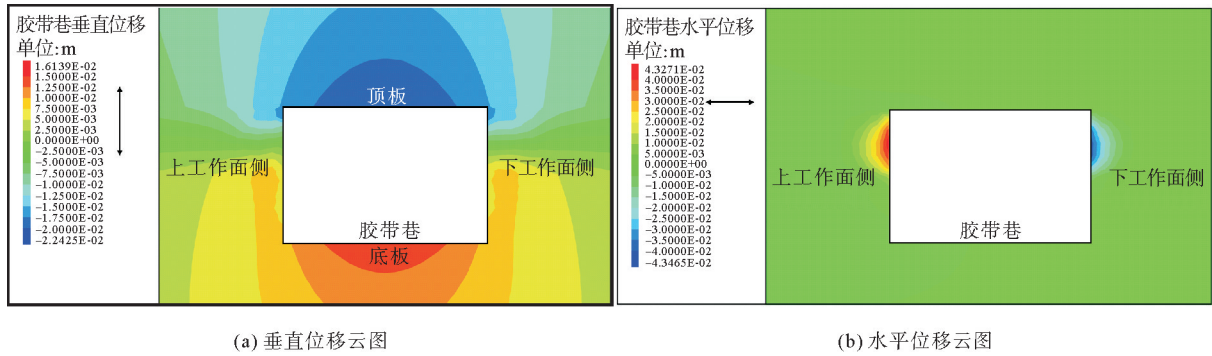


图 11 回采期间支护效果模拟结果(方案 1)

Fig. 11 Simulation results of the support effectiveness during retreat mining (Scheme 1)

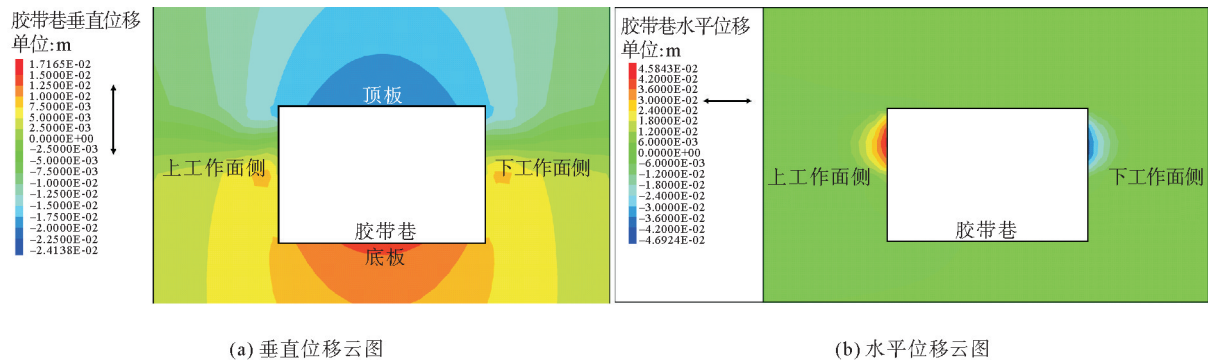


图 12 回采期间支护效果模拟结果(方案 2)

Fig. 12 Simulation results of the support effectiveness during retreat mining (Scheme 2)

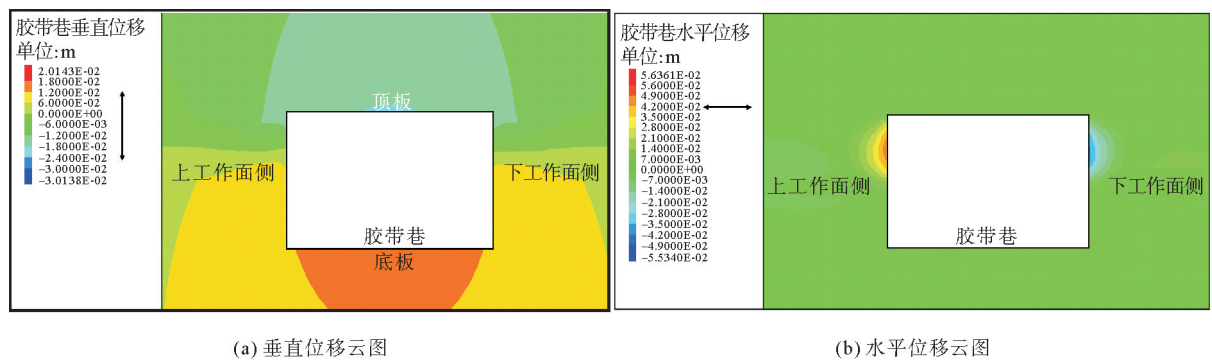


图 13 回采期间支护效果模拟结果(方案 3)

Fig. 13 Simulation results of the support effectiveness during retreat mining (Scheme 3)

表 8 下轨道巷回采期间模拟结果

Table 8 Simulation results of the lower track roadway during retreat mining mm

方案	顶板位移	底板位移	采煤帮位移	煤柱帮位移
方案 1	20.4	13.9	43.0	32.6
方案 2	21.5	14.6	46.7	38.2
方案 3	26.3	16.3	57.3	42.3

由图 11~13 不同方案掘进期间围岩变形云图可以看出,方案 1 巷道顶板深蓝色范围明显大于方案 2 和方案 3,表明回采期间方案 1 的顶板位移量低于方案 2 和方案 3。由表 8 可知,方案 1、方案 2、方案 3 在回采期间的巷道顶板位移量分别为 20.4、21.5、26.3 mm,底板位移量分别为 13.9、14.6、16.3 mm,采煤帮位移量分别为 43.0、46.7、57.3 mm,煤柱帮位移量分别为 32.6、38.2、42.3 mm。对比可知,回采期间,方案 1 控制的顶板和底板位移量略小于方案 2,与其非常接近;方案 1 的采煤帮和煤柱帮位移量虽明显小于方案 2,但与方案 2 的帮部位移差值明显小于方案 1 与方案 3 的帮部位移差值。总体而言,方案 1 与方案 2 对围岩控制效果的差距不大,方案 2 与方案 3 对围岩控制效果的差距较明显。

5.3.3 控制效果对比分析

由图 8~13、表 7 和表 8 可以看出,在下轨道巷掘进和工作面回采期间,方案 1 的顶板、底板、采煤帮及煤柱帮变形量略小于方案 2,方案 2 的顶板、底板、采煤帮及煤柱帮变形量明显小于方案 3,方案 3 对围岩的控制效果最差,方案 1 与方案 2 较接近。综合而言,方案 1、2 围岩控制效果相差不大,方案 1 支护成本及施工劳动强度明显大于方案 2,支护效果提升甚微,且支护参数符合理论计算要求。因此,综合控制效果、劳动强度和支护成本,选择方案 2 作为 162-208 工作面下轨道巷最优支护方案。

6 工程应用与评价

根据模拟研究结果,明确了支护方案 2 的优势,在 162-208 工作面下轨道巷进行工业性应用,具体的支护方案如图 14 所示。

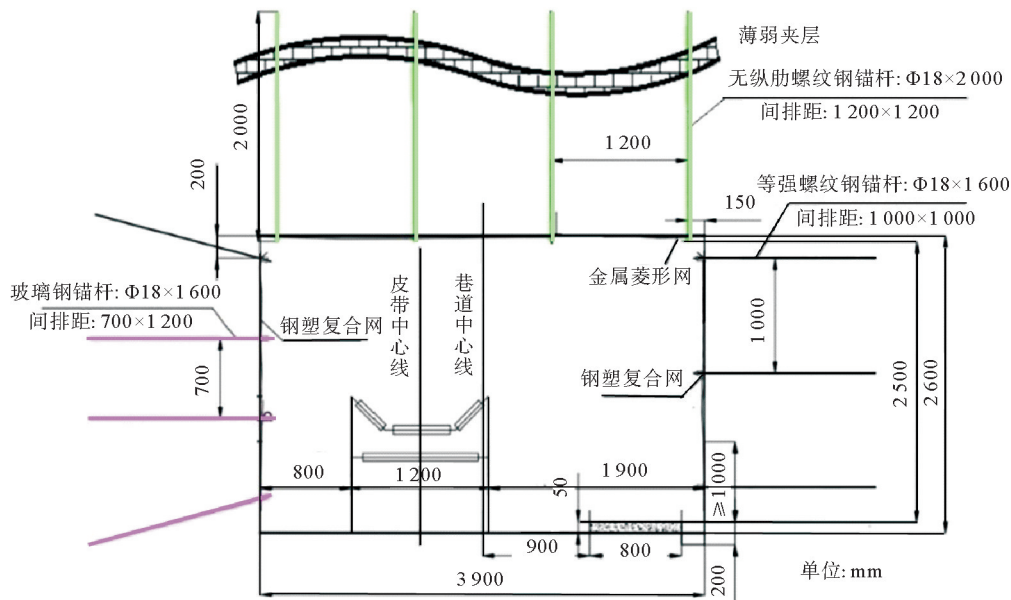


图 14 支护方案断面图

Fig. 14 Cross-sections of the support scheme

顶板采用 4 根规格为 $\Phi 18 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$ 的无纵肋螺纹钢锚杆,间排距 $1200 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$;网片采用规格 $2000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 的金属焊接网。采煤帮顶部采用 1 根规格为 $\Phi 18 \text{ mm} \times 1600 \text{ mm}$ 的等强螺纹钢锚杆、向下采用 3 根玻璃钢锚杆,间排距 $700 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ 。煤柱帮采用 3 根规格为 $\Phi 18 \text{ mm} \times 1600 \text{ mm}$ 的等强螺纹钢锚杆,间排距为 $1000 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ 。帮部网片采用 $5000 \text{ mm} \times 2400 \text{ mm}$ 的钢塑复合网。每根锚杆匹配 1 根 MSCKb2350 和 1 根 Z2350 树脂锚固剂。无纵肋螺纹钢锚杆和等强螺纹钢锚杆的预紧力均不低于 $250 \text{ N} \cdot \text{m}$,玻璃钢锚杆预紧力不低于 $150 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

在 162-208 工作面下轨道巷掘进后即布置 5 个位移监测点,编号为 1[#]~5[#],选取有代表性的 2[#] 和 4[#]

观测点进行分析。2[#]和4[#]观测点围岩变形曲线如图15所示,围岩变形稳定后状态如图16所示。

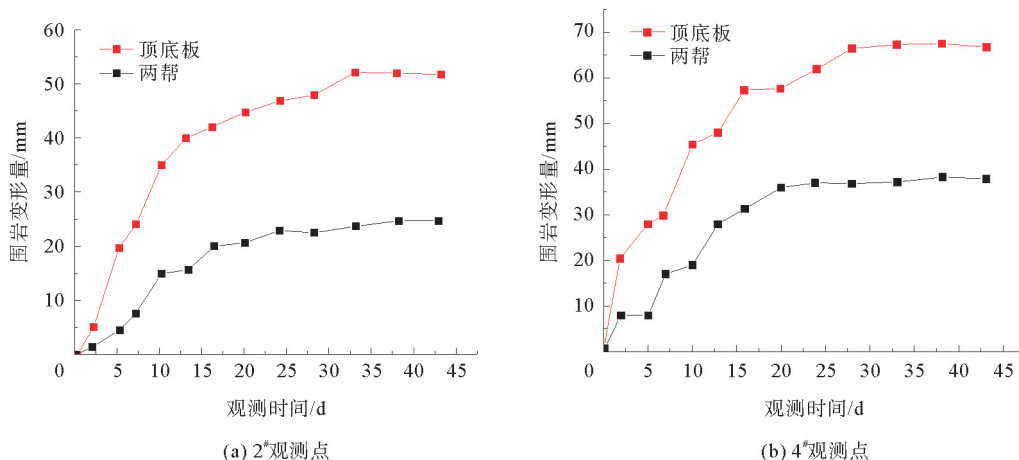


图 15 162-208 下轨道巷围岩变形观测

Fig. 15 Observation of the surrounding rock deformation in the 162-208 lower track roadway

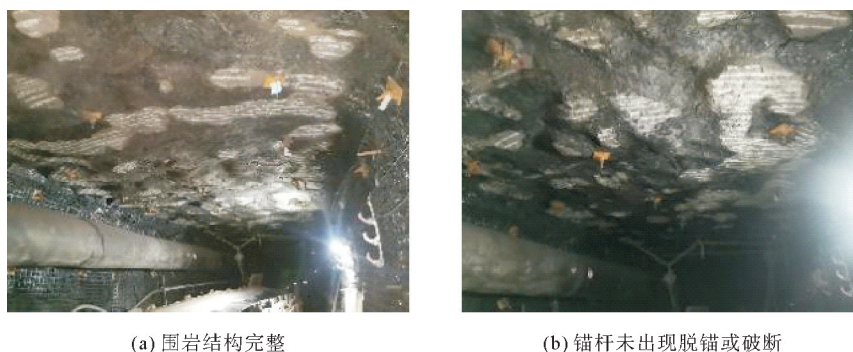


图 16 162-208 下轨道巷围岩变形稳定后状态

Fig. 16 State of the 162-208 lower track roadway after deformation stabilisation of surrounding rock

由图15可以看出,2[#]和4[#]观测点围岩变形初始速率较快,然后逐渐减慢,后趋于稳定。2[#]观测点和4[#]观测点分别在16天和20天之前,顶底板和两帮变形速率较大,后逐渐减慢,4[#]围岩稳定时间晚于2[#]观测点。2[#]观测点顶底板和两帮最终变形量分别为25和52 mm,4[#]观测点顶底板和两帮最终变形量分别为38和67 mm。巷道两帮变形量明显大于顶底板变形量,这是由于两帮为煤体,顶板为坚硬灰岩,在控制灰岩夹层稳定不离层的情况下,顶板结构非常稳定;另外,本区域地应力以水平构造应力为主导,加之巷道方向与最大主应力方向近乎垂直。两帮顶部螺纹钢锚杆与顶板的连接作用,将帮部和顶板连为一体,限制了两帮的变形。因此,本支护方案控制的围岩变形在允许范围之内,能够满足使用要求。

7 结论

1) 锦丘煤矿16煤顶板为坚硬灰岩,中下部包含泥质条带或泥灰岩的薄夹层。夹层强度较低,顶板在此处容易出现离层,顶板锚杆支护参数应充分考虑其位置。钻孔窥视显示,夹层位置位于顶板1~2 m范围内,特别是1.1~1.3 m和1.8~2.0 m范围。

2) 锦丘煤矿16煤最大主应力位于近水平方向,倾角约为5°,方向以南东向为主,位于119°~146°,数值为16~20 MPa。最大水平主应力与垂直主应力的比值为1.23和1.20。

3) 206上轨道巷两处测点的最大主应力方向和巷道走向的夹角分别为66°和72°。当巷道掘进方向与最大水平主应力成一定夹角时,巷道一侧出现应力集中而另一侧应力释放,顶底板变形破坏偏向巷道一侧。

4) 通过数值模拟对设计的3种改进支护方案进行了研究,方案2的实施显著减少了围岩变形,从而提高了矿井的安全性。综合控制效果、劳动强度和支护成本,选择方案2作为162-208工作面下轨道巷最优支护方案。

5) 最优支护方案应用观测结果表明,在16~20天后,2个观测点围岩变形逐渐趋于稳定。顶底板和两帮的最大变形量分别为38和67 mm。由于两帮煤体相对较软、水平应力较大、两帮支护强度相对较低等原因,两帮变形量大于顶底板变形量。但本支护方案控制的围岩变形总体不大,能够满足使用要求。

参考文献:

- [1] 王锦山,彭华.渤海海峡跨海通道工程区海域三维地应力测试[J].岩土力学,2024,45(1):245-256.
WANG Jinshan,PENG Hua. Measurement of 3D in-situ stress in the sea area of trans-Bohai strait passage engineering region[J]. Rock and Soil Mechanics,2024,45(1):245-256.
- [2] 郭德勇,揣筱升,张铁岗,等.首山一矿深部地应力分布规律及影响因素[J].煤炭学报,2024,49(5):1-14.
GUO Deyong,CHUAI Xiaosheng,ZHANG Tiegang,et al. Distribution pattern and influencing factors of in-situ stress for deep levels in Shoushan No. 1 Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society,2024,49(5):1-14.
- [3] 李飞,周家兴,王金安.深部多场耦合作用的非线性地应力构建方法[J].煤炭学报,2021,46(增1):116-129.
LI Fei,ZHOU Jiaying,WANG Jin'an,et al. Method of nonlinear in-situ stress construction with deep multi-field coupling [J]. Journal of China Coal Society,2021,46(S1):116-129.
- [4] 黄锋,朱涛,刘星辰,等.侧压系数对高应力破碎区隧道结构受力影响的试验研究[J].铁道学报,2023,45(12):174-181.
HANG Feng,ZHU Tao,LIU Xingchen,et al. Experimental study on influence of lateral pressure coefficient on stress of tunnel structure in high stress fracture area[J]. Journal of the China Railway Society,2023,45(12):174-181.
- [5] 贾文超,张明杰,梁锡明,等.地应力与孔隙压力对定向水力压裂效果影响研究[J].煤炭科学技术,2018,46(12):151-157.
JIA Wenchao,ZHANG Mingjie,LIANG Ximing,et al. Study on geostress and pore pressure affected to directional hydraulic fracturing effect[J]. Coal Science and Technology,2018,46(12):151-157.
- [6] 索朗,徐正宣,冯涛,等.鲜水河构造带某隧道地应力反演与分析[J].西南交通大学学报,2022,57(2):331-338.
SUO Lang,XU Zhengxuan,FENG Tao,et al. Back-calculation of in-situ stress of railway tunnel in xianshuihe fault belt[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2022,57(2):331-338.
- [7] 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.
MENG Lubo,HUANG Yilin,LI Tianbin,et al. An improved classification method of asymmetrical squeezing large deformation of layered soft rock tunnels under high geo-stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(1):147-156.
- [8] 金解放,杨益,廖占象,等.动荷载与地应力对岩石响应特性的影响试验研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(10):1990-2002.
JIN Jiefang,YANG Yi,LIAO Zhanxiang,et al. Effect of dynamic loads and geo-stresses on response characteristics of rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(10):1990-2002.
- [9] 郑可跃,施成华,雷明锋,等.考虑松动效应的高地应力构造破碎带隧道稳定性分析及大变形支护设计优化[J].岩石力学与工程学报,2021,40(8):1603-1613.
ZHENG Keyue,SHI Chenghua,LEI Mingfeng,et al. Stability analysis and support design optimization of large-deformation tunnels in structural fracture zones with high in-situ stresses considering loose effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(8):1603-1613.
- [10] MASOUDI R,SHARIFZADEH M. Reinforcement selection for deep and high-stress tunnels at preliminary design stages using ground demand and support capacity approach[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2018,28(4):573-582.
- [11] YANG R S,LI Y L,GUO D M,et al. Failure mechanism and control technology of water-immersed roadway in high-stress and soft rock in a deep mine[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2017,27(2):245-252.
- [12] VALLEJOS J A,MARAMBIO E,BURGOS L,et al. Dynamic test response of ground support systems for underground

- excavations at the Walenstadt testing facility[J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2023, 57(1):1-40.
- [13] 赖锦,白天宇,肖露,等.地应力测井评价方法及其地质与工程意义[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(4):1033-1043.
LAI Jin, BAI Tianyu, XIAO Lu, et al. Well-logging evaluation of in-situ stress fields and its geological and engineering significances[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(4):1033-1043.
- [14] 李国锋,王九红,刘建荣,等.巷道围岩锚固结构面剪切特性与破坏特征研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(4):47-55.
LI Guofeng, WANG Jiuhong, LIU Jianrong, et al. Study on shear properties and failure characteristics of bolted joint of roadway surrounding rock[J]. *Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2022, 41(4):47-55.
- [15] 王超,王益腾,韩增强,等.垂直孔应力解除法地应力测试技术及工程应用[J]. *岩土力学*, 2022, 43(5):1412-1421.
WANG Chao, WANG Yiteng, HAN Zengqiang, et al. In-situ stress measurement technology for vertical hole based on stress relief method and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(5):1412-1421.
- [16] 皇新宇,纪强,张宪堂,等.地应力作用下四孔掏槽爆破破岩机理数值模拟研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(2):60-69.
HUANG Xinyu, JI Qiang, ZHANG Xiantang, et al. Numerical simulation research on rock breaking mechanism of four-hole cut blasting underground stress[J]. *Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2022, 41(2):60-69.
- [17] 侯奎奎,吴钦正,张凤鹏,等.不同地应力测试方法在三山岛金矿2 005 m 竖井建井区域的应用及其地应力分布规律研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(4):1093-1102.
HOU Kuikui, WU Qinzheng, ZHANG Fengpeng, et al. Application of different in-situ stress test methods in the area of 2 005 m shaft construction of Sanshandao gold mine and distribution law of in-situ stress[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(4):1093-1102.

(责任编辑:吕海亮)