

科技创新

大变形玻璃钢锚杆支护下巷道变形规律数值分析

陈国华

(乌审旗蒙大矿业有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 017307)

摘要: 为了发现大变形玻璃钢锚杆支护下巷道变形规律, 利用数值模拟软件, 建立三维计算模型, 对比分析常规玻璃钢锚杆和大变形玻璃钢锚杆支护效果。结果表明: 工作面采空区首次见方和二次见方时, 巷道呈现向内收缩的趋势; 塑性区主要集中在巷道四周; 回采侧帮水平位移和顶板沉降量均呈现先逐渐减小后趋于稳定的趋势; 采空区首次见方和二次见方时, 在监测范围内, 回采侧帮的最大水平位移均已经达到常规玻璃钢锚杆的破断位移, 但均未达到大变形玻璃钢锚杆的破断位移, 常规玻璃钢锚杆不满足支护要求, 大变形玻璃钢锚杆满足支护要求。

关键词: 巷道支护; 大变形玻璃钢锚杆; 巷道变形规律; FLAC3D; 锚杆支护; 数值模拟

中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)01-0001-08

锚杆支护是一种支护效率高、成本较低的主动支护形式, 已经成为井巷工程的主要支护形式, 在国内外普遍采用^[1-2]。玻璃钢锚杆具有质量轻、耐腐蚀、易切割、与采煤机摩擦不会产生火花等优点^[3-6], 这些特性有助于加快工作面推进速度, 提高回采效率, 因而被广泛用于回采巷道回采侧帮支护^[7-9]。国内外学者对玻璃钢锚杆进行了大量研究, 取得了大量研究成果。万浩和王文杰^[10]分析了高应力软岩巷道中玻璃钢锚杆和螺纹钢锚杆分别支护后的巷道围岩变形及锚杆受力特征。李英明等^[11]采用特制拉拔试验装置对玻璃钢锚杆进行拉伸试验。王岗风等^[12]选取玻璃钢锚杆的长度等参数, 分析了各参数对支护效果的影响。郭团结^[13]通过数值模拟对比分析管缝锚杆和玻璃钢锚杆支护下软弱层状顶板变形破坏特征。王文杰等^[14]依据爆炸球面波理论建立全长砂浆锚固玻璃钢锚杆动力响应模型。叶叶成等^[15]开展了玻璃钢锚杆支护的巷道收敛监测试验。吕情绪等^[16]在支护方案设计中选用玻璃钢锚杆进行支护。Ascione等^[17]评估在不同的负载倾角下, 锚杆直径对玻璃钢锚杆承载失效强度的影响。Ngo等^[18]试验了玻璃钢锚杆性能, 结果表明玻璃钢锚杆可以有效地替代螺纹钢锚杆。

近年实践证明, 采用吸能支护能有效控制巷道围岩变形, 能有效防治巷道冲击地压^[19-20], 但常规玻璃钢锚杆延伸率低且抗冲击性能差, 属于刚性支

护。针对此问题, Tang等^[21]设计研发了一种具有高延伸率的大变形玻璃钢锚杆, 但未对支护效果进行研究。本文利用FLAC3D软件, 以纳林河二号矿井31119综采工作面回采巷道回采侧帮支护为工程背景, 建立三维计算模型, 研究常规玻璃钢锚杆和大变形玻璃钢锚杆支护下的巷道变形规律。

1 工作面概况及巷道规格

31盘区为纳林河二号矿井的首采盘区, 31盘区南北长7.6 km, 东西宽5.4 km, 可采面积为36.0 km²。31119综采工作面为纳林河二号矿井一盘区北翼的第8个工作面, 南临中央二号辅助运输大巷, 北临纳林河保护煤柱, 西临31120采空区, 工作面长325 m, 走向长度2 532 m。工作面巷道沿底板掘进, 31119工作面回风巷沿6 m小煤柱掘进, 煤层厚度为3.0~6.7 m, 平均厚度4.85 m, 煤层倾角1°~3°, 煤层层位稳定, 结构简单。煤层中含有1~2层夹矸, 厚度0.1~0.2 m, 夹矸岩性为砂质泥岩, 深灰色及灰色, 含植物化石及云母碎屑。工作面煤层直接顶为4.34 m厚的砂质泥岩, 深灰色, 水平层理, 含大量煤屑及植物化石, 泥质含量较好, 平坦状断口; 上部老顶为10.94 m的粉砂岩, 浅灰色, 近水平层理, 含煤线及植物化石。煤层底板为砂质泥岩, 深灰色, 水平层理, 含大量煤屑及植物化石, 泥质含量较好。巷道规格为矩形, 掘宽5 800 mm, 掘高4 000 mm, 巷道掘进面积23.2 m²。31119工作面如图1所示。

收稿日期: 2024-07-14

基金项目: 辽宁工程技术大学鄂尔多斯研究院校地科技合作培育项目(YJY-XD-2023-001)

作者简介: 陈国华(1985—), 男, 山西忻州人, 高级工程师, 研究方向为煤矿安全管理。

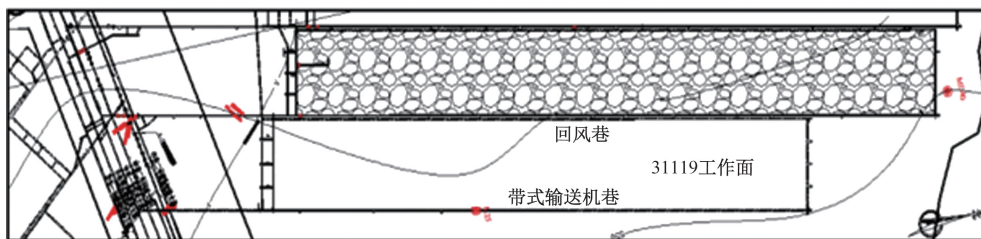


图 1 31119 工作面示意图

2 支护方案设计

2.1 工作面回风顺槽顶板支护参数确定

锚杆支护参数的确定包括锚杆长度、锚杆支护密度、锚杆材料等,如果支护参数选择不合理,就会造成两个极端,一是支护参数过于保守,浪费材料和工时,二是支护参数过于冒进,出现支护破坏造成片帮冒顶事故。

采用工程类比法,结合煤矿的其他巷道经验,设计支护方案如下。

顶锚杆选用 $\phi 22 \times 2\,400$ mm 螺纹钢锚杆,杆体为 22# 左旋无纵筋螺纹钢,杆体屈服强度不低于 500 MPa。顶锚杆间距 1.1 m,锚杆排距为 1.0 m。每排 6 根锚杆,端头第 1 根锚杆与巷帮间距为 150 mm。锚杆扭矩力不小于 400 N·m,锚杆拉拔力不小于 80 kN。

顶锚索选用 $\phi 21.8 \text{ mm} \times 6\,300$ mm 锚索,呈“3-2-3-2”布置,即第 1 排 3 根锚索,下一排 2 根锚索,交替布置,其排距为 2 000 mm,与顶部锚杆交替布置。每排 3 根时,间距为 1 500 mm \times 2 000 mm,端头第 1 根锚索距巷帮间距为 1 400 mm;每排 2 根

时,间距为 1 800 mm \times 2 000 mm,端头第 1 根锚索距巷帮间距为 2 000 mm。锚索拉拔力不小于 300 kN。

回采侧帮采用 $\phi 22 \times 2\,400$ mm 常规玻璃钢锚杆支护,杆体屈服强度不低于 500 MPa。每排 4 根锚杆,排距为 1.0 m,间距为 0.8 m。

煤柱帮锚杆选用 $\phi 22 \text{ mm} \times 2\,400$ mm 螺纹钢锚杆,杆体为 22# 左旋无纵筋螺纹钢,每排 5 根锚杆,排距为 1 000 mm,间距为 800 mm,帮部靠顶第 1 根锚杆距顶 400 mm,帮部靠底第 1 根锚杆距底 400 mm。锚杆扭矩不小于 300 N·m,锚杆拉拔力均不小于 80 kN。

帮锚索选用 $\phi 21.8 \times 3\,150$ mm 锚索,每排 2 根锚索,排距为 2 000 mm,间距为 1 200 mm,帮部靠顶第一根锚索距顶 1 300 mm,帮部靠底第 1 根锚索距底 1 500 mm。锚索拉拔力不小于 300 kN。

支护断面参数如图 2 所示,支护平面参数如图 3 所示。

2.2 模型建立

以 31119 工作面的工程地质条件为工程背景,建立三维计算模型。模型沿煤层走向长度为 620.8 m,沿

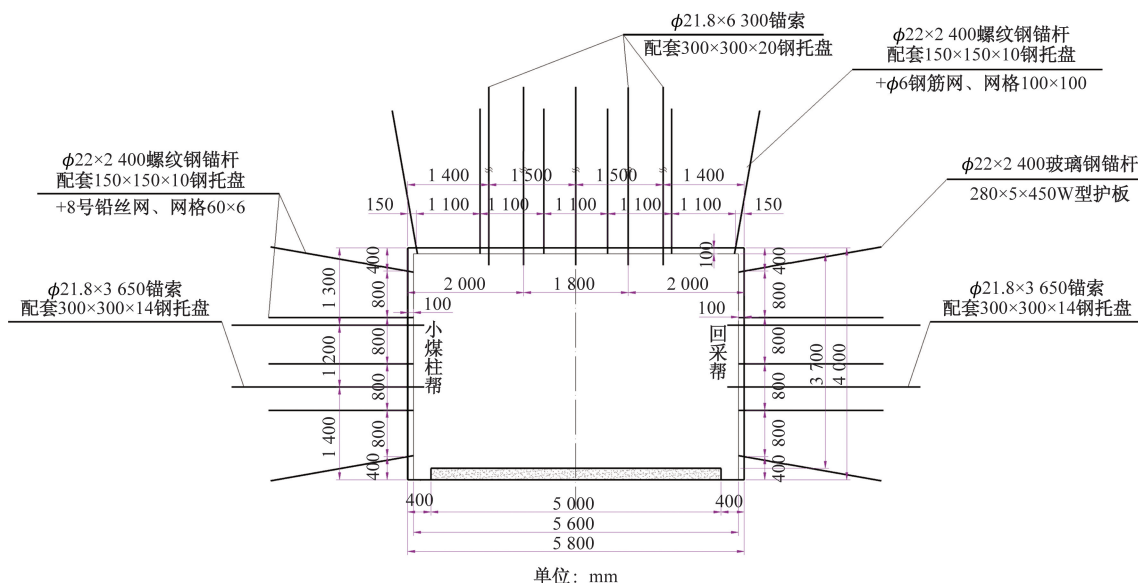


图 2 支护断面参数

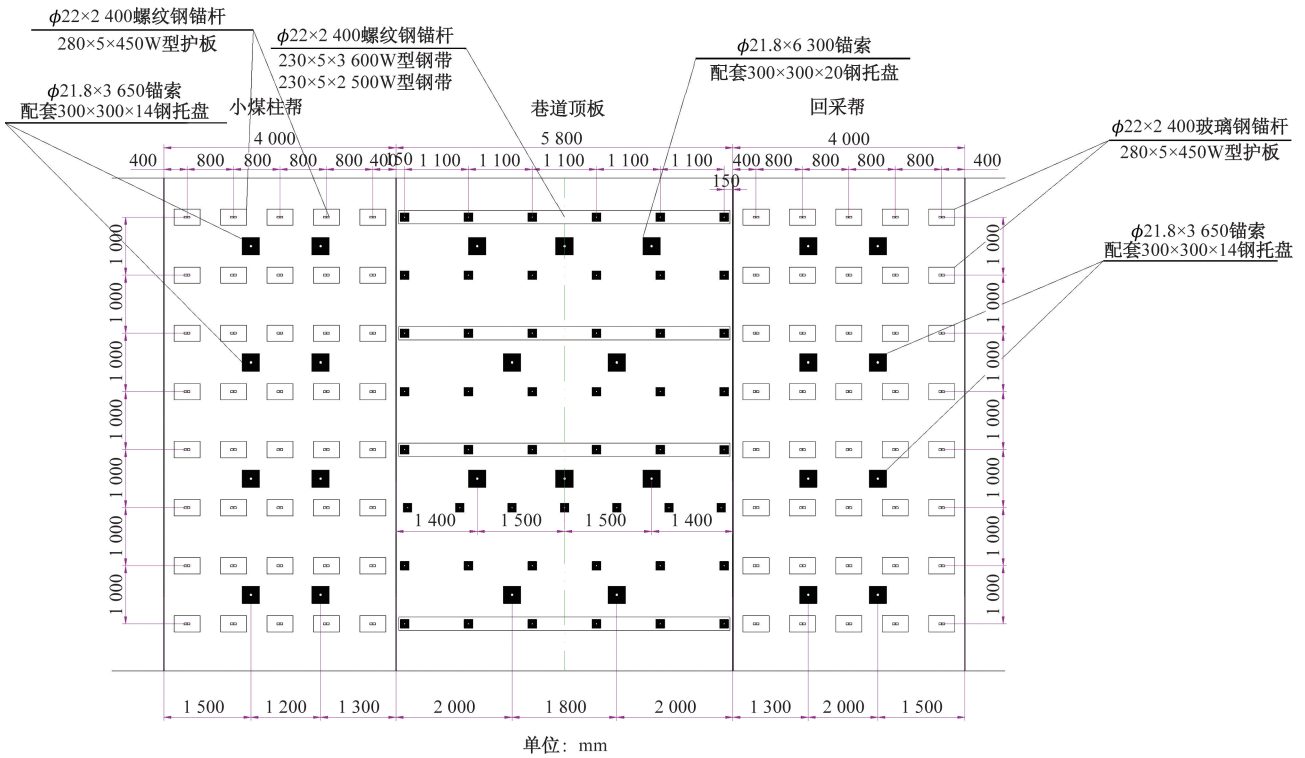


图3 支护平面参数

巷道轴向长度 800 m,高度为 21 m。巷道宽 5.8 m,高 4.0 m。三维模型共划分 1 036 800 个单元,网格单元为六面体单元,共有 1 104 628 个结点,三维模型如图 4 所示。

模型左右、前后边界限制水平移动,模型底面限制垂直移动,模型顶部施加 15 MPa 来模拟 600 m 采深的上覆岩层质量。参照 31119 工作面地质情况,模型中构建了煤层、直接顶砂质泥岩、基本顶粉砂岩、直接底砂质泥岩,模拟计算采用的岩体力学参数见表 1,依据四邻回采环境,构建了巷道、煤层与采空区垮落带。针对研究区域内的巷道锚杆(索)支护设计方案,在巷道掘进支护区域网格单元划分密集,其他区域网格单元划分相对稀疏。

大变形玻璃钢锚杆主要由玻璃钢杆体、托盘、吸能套筒和圆台螺母构成,整体截面如图 5 所示。锚杆通过吸能套筒塑性变形直接吸收围岩变形能,吸能套筒让位空间间接耗散围岩变形能。吸能套筒扩径变形阶段有效提高了锚杆的延伸率和抗冲击性能,从而提高“锚杆-巷道围岩”支护体系的稳定性。

在 FLAC3D 中,采用锚结构单元来实现锚杆(索)的支护。由几何参数、材料属性参数和锚固剂特性来定义锚结构单元。一个锚结构单元假设为两

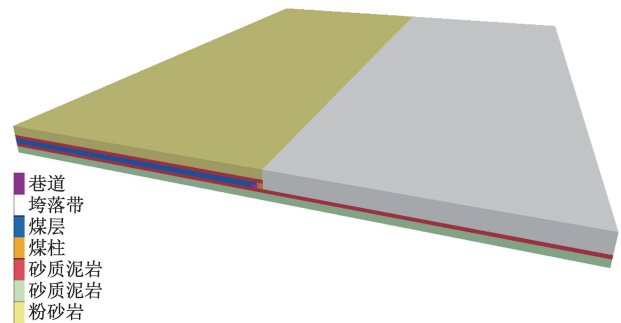


图4 三维模型

表1 岩土力学参数

岩性	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	内摩擦 角/ $^{\circ}$	黏聚力/ MPa	抗拉强 度/MPa
砂质泥岩	2 510	2.560	2.360	36	2.16	1.21
煤层	1 314	2.918	0.987	37	1.88	1.39
粉砂岩	2 600	5.000	3.800	38	6.00	2.50

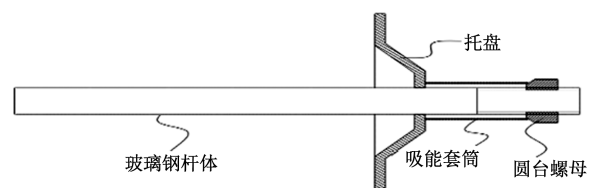


图5 大变形玻璃钢锚杆整体截面

节点之间具有相同的横截面及材料属性参数的直线段,锚结构单元是弹、塑性材料,在拉、压中破坏,但不能抵抗弯矩。锚固剂填满的锚杆(索)与岩石发生相对滑动时会产生抵抗力。在模拟中,锚杆(索)端头与岩层网格单元进行刚性连接,与岩层形成一体。根据锚杆(索)的长度、实体网格单元的划分对锚杆(索)进行合适数量分段,使得各段与不同的岩层实体网格单元进行接触,然后呈现出不同的特点,表现出不同的作用效果。

设置常规玻璃钢锚杆的弹性模量为 38 GPa,抗拉强度为 573 MPa,锚固段长 1 m。大变形玻璃钢锚杆与常规玻璃钢锚杆的主要差异体现在延伸率上,在 FLAC3D 数值模拟软件锚(索)结构单元设置中,这种差异本质上是通过弹性模量参数的设定来体现的。将大变形玻璃钢锚杆的弹性模量设置为 15 GPa,抗拉强度设定为 573 MPa,锚固段长 1 m。锚杆力学参数见表 2。

表 2 两锚杆力学参数

锚杆种类	延伸率/%	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	锚杆长度/m	锚固长度/m	破断位移/mm
常规玻璃钢锚杆	1.50	573	38	2.4	1	21.0
大变形玻璃钢锚杆	5.62	573	15	2.4	1	78.7

在模拟软件中巷道支护断面如图 6 所示。

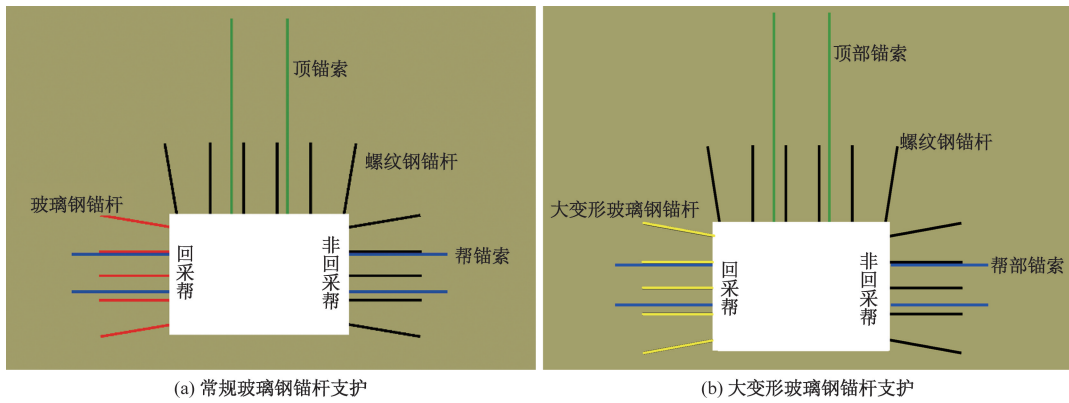
工作面回采期间采空区呈现首次见方和二次见方时,上覆岩层活动较为剧烈,工作面超前支承压力高度集中且影响范围较大,因此对首次见方和二次见方时的巷道变形情况进行监测。

3 支护分析

3.1 采空区首次见方支护分析

在工作面采空区呈现首次见方时,选取超前工作面 10、20、30、40、50、80、120、180 m 位置处进行监测。部分水平位移云图如图 7 所示,部分垂直位移云图如图 8 所示,部分塑性区分布如图 9 所示,最大水平位移、最大垂直位移与超前工作面距离关系曲线如图 10 所示。

由图 7~图 10 可知:采用常规玻璃钢锚杆支护后,首次见方时:①巷道呈现向内收缩的趋势。造成这种现象的原因可能是开采活动直接改变了采空区及其周边的应力场,特别是超前工作面区域,由于应力集中效应明显,这种应力传递和集中会导致临近巷道的围岩产生塑性变形或破坏,进而引起巷道周围岩石的移动和挤压,表现为巷道的收缩现象。②在超前工作面 10、20、30、40、50、80、120、180 m 位置处,左侧回采帮的最大水平位移分别为 4.03、



红色线条为常规玻璃钢锚杆;黄色线条为大变形玻璃钢锚杆;黑色线条为螺纹钢锚杆;蓝色线条为帮部锚索;绿色线条为顶部锚索。

图 6 巷道支护断面

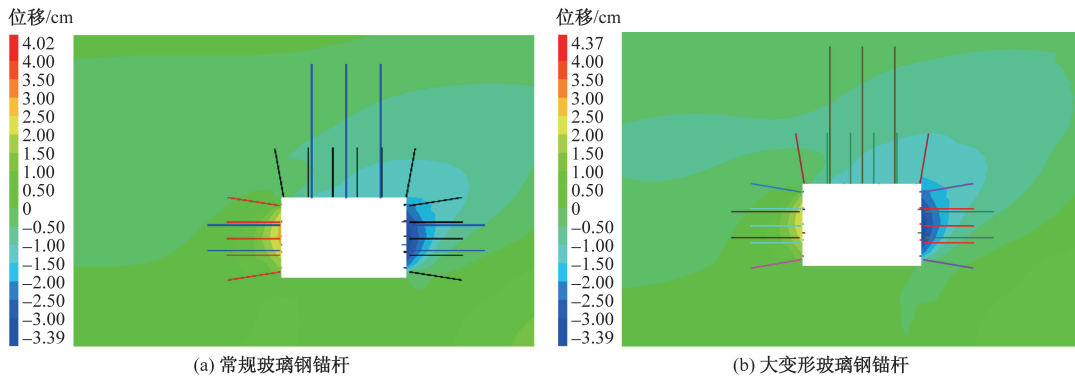


图 7 超前工作面 10 m 水平位移云图

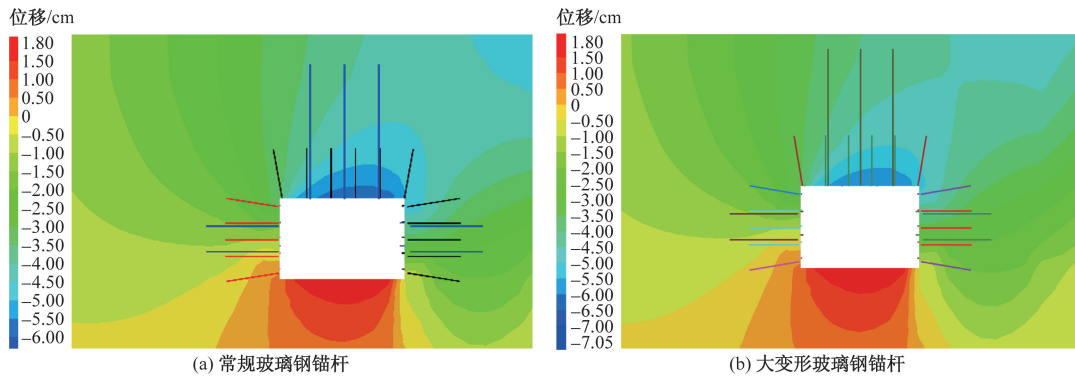
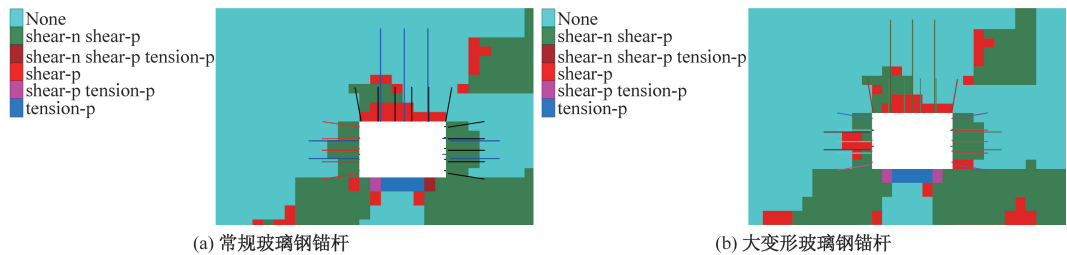


图 8 超前工作面 10 m 垂直位移云图



None 为无塑性区;shear-n 为当前剪切破坏;shear-p 为过去剪切破坏;tension-n 为当前拉伸破坏;tension-p 为过去拉伸破坏

图 9 超前工作面 10 m 塑性区分布

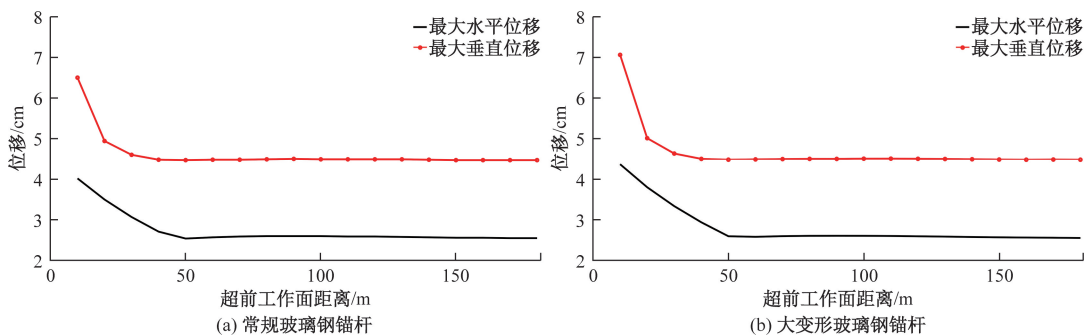


图 10 位移和超前工作面距离曲线

3.51、3.08、2.72、2.55、2.61、2.60、2.56 cm;顶板的最大沉降量分别为 6.51、4.95、4.61、4.49、4.48、4.50、4.50、4.48 cm。随着远离工作面,左侧回采帮的最大水平位移和顶板的最大沉降量均呈现逐渐减小后趋于稳定的趋势。③首次见方时,塑性区主要集中在巷道的四周,特别是右侧非回采帮。右侧非回采帮受相邻工作面采空区的侧向支承压力作用下,巷道右侧非回采帮塑性区较为发育。随着距离工作面的长度增加塑性区范围逐渐减小。④常规玻璃钢锚杆的破断位移为 21 mm,在监测范围内,回采侧帮的最大水平位移已经达到常规玻璃钢锚杆的破断位移,不满足支护要求。

采用大变形玻璃钢锚杆支护后,首次见方时:

①在首次见方时,巷道呈现向内收缩的趋势。②在超前工作面 10、20、30、40、50、80、120、180 m 位置处,左侧回采帮的最大水平位移分别为 4.37、3.81、3.34、2.95、2.60、2.61、2.60、2.56 cm;顶板的最大沉降量分别为 7.05、5.01、4.63、4.50、4.48、4.50、4.50、4.48 cm。随着远离工作面,左侧回采帮的最大水平位移和顶板的最大沉降量均呈现逐渐减小后趋于稳定的趋势。③大变形玻璃钢锚杆的破断位移为 78.7 mm,在超前工作面监测范围内,回采帮的最大水平位移未达到大变形玻璃钢锚杆的破断位移,满足支护要求。

3.2 采空区二次见方支护分析

在工作面采空区呈现二次见方时,选取超前工

作面 10、20、30、40、50、80、120、180 m 位置处进行监测。部分水平位移云图如图 11 所示,部分垂直位移云图如图 12 所示,部分塑性区分布如图 13 所示,

最大水平位移、最大垂直位移与超前工作面距离关系曲线如图 14 所示。

由图 11~图 14 可知:采用常规玻璃钢锚杆支护

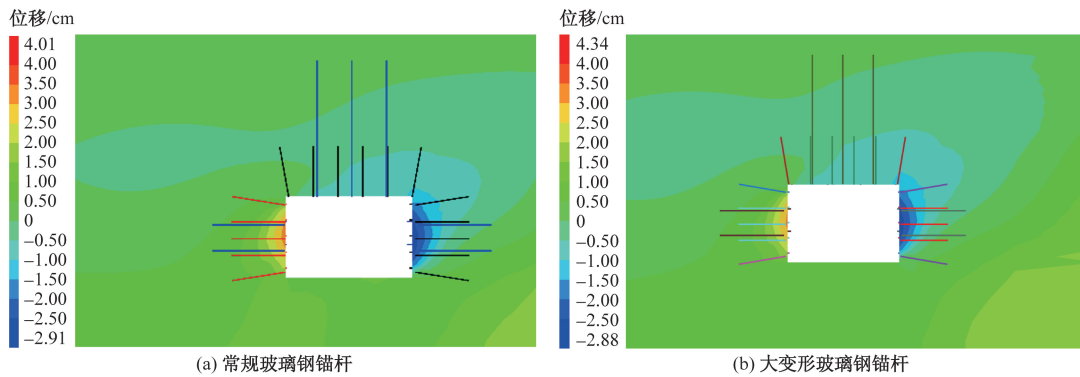


图 11 超前工作面 10 m 水平位移云图

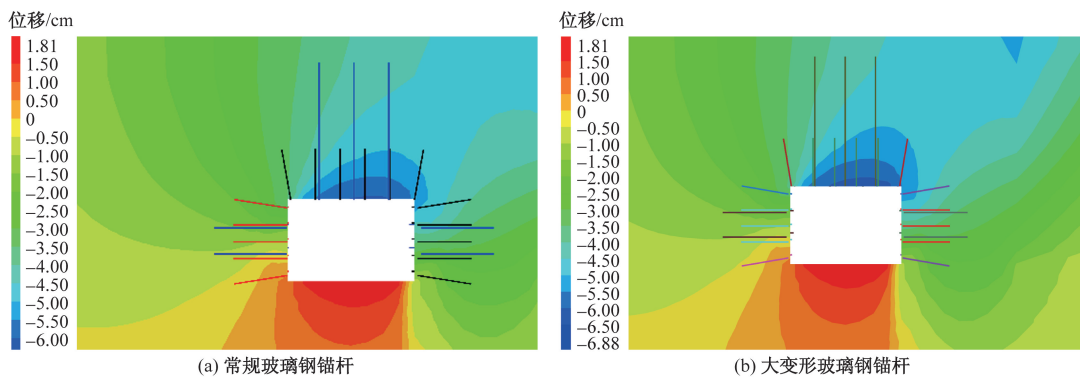
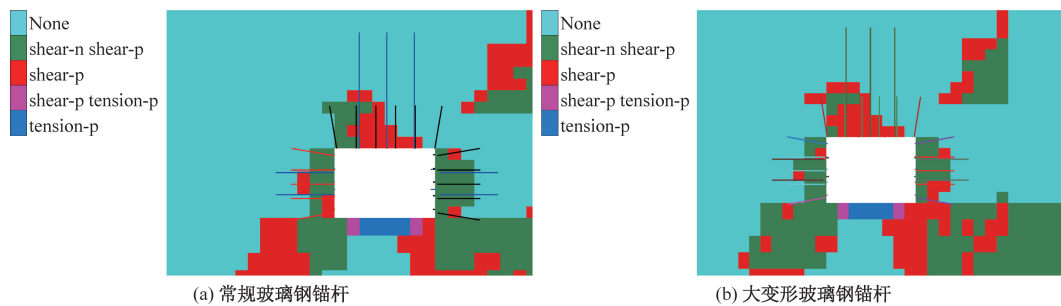


图 12 超前工作面 10 m 垂直位移云图



None 为无塑性区;shear-n 为当前剪切破坏;shear-p 为过去剪切破坏;tension-n 为当前拉伸破坏;tension-p 为过去拉伸破坏

图 13 超前工作面 10 m 塑性区分布

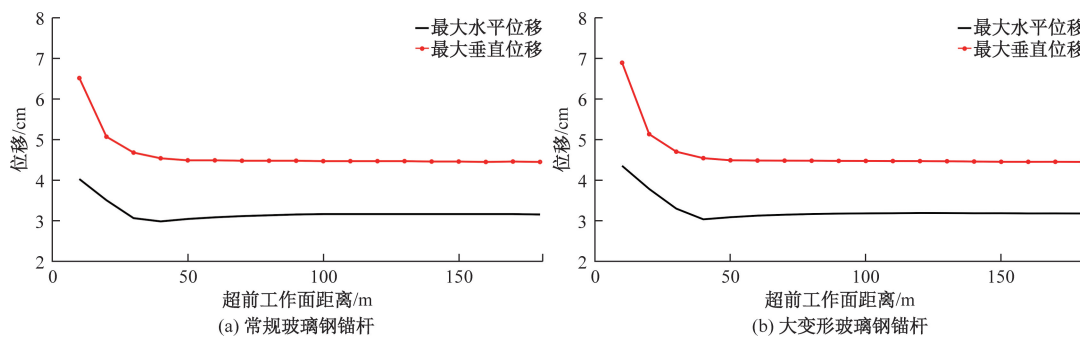


图 14 位移和超前工作面距离曲线

后,二次见方时:①巷道四周同样是呈向内收缩的趋势。②在超前工作面 10、20、30、40、50、80、120、180 m 位置处,左侧回采帮的最大水平位移分别为 4.02、3.50、3.06、2.98、3.04、3.13、3.16、3.15 cm;顶板的最大沉降量分别为 6.50、5.06、4.67、4.53、4.48、4.47、4.46、4.44 cm。随着远离工作面,左侧回采帮的最大水平位移和顶板的最大沉降量同样呈现逐渐减小后趋于稳定的趋势。③左侧回采帮最大水平位移稳定后的数值大于首次见方时的数值;顶板最大沉降量稳定后的数值与首次见方时相差不大。④在超前工作面监测范围内,回采帮的最大水平位移已经达到常规玻璃钢锚杆的破断位移,不满足支护要求。

采用大变形玻璃钢锚杆支护后,二次见方时:①在超前工作面 10、20、30、40、50、80、120、180 m 位置处,左侧回采帮的最大水平位移分别为 4.34、3.78、3.29、3.03、3.08、3.17、3.19、3.18 cm;顶板的最大沉降量分别为 6.88、5.12、4.69、4.53、4.48、4.47、4.46、4.44 cm。回采帮的最大水平位移和顶板的最大沉降量同样呈现逐渐减小后趋于稳定的趋势。②左侧回采帮最大水平位移稳定后的数值大于首次见方时的数值;顶板最大沉降量稳定后的数值与首次见方时相差不大。③在超前工作面监测范围内,回采帮的最大水平位移未达到大变形玻璃钢锚杆的破断位移,满足支护要求。

3.3 支护结果对比

为对比分析常规玻璃钢锚杆和大变形玻璃钢锚杆的支护效果,分别对比首次见方和二次见方时,回采帮的最大水平位移和顶板的最大垂直位移。最大水平位移对比如图 15 所示,最大垂直位移对比如图 16 所示。

由图 15、图 16 可得:①在常规玻璃钢锚杆支护下,无论首次见方还是二次见方时,在超前工作面监测范围内,回采帮的最大水平位移已经达到常规玻璃钢锚杆的破断位移,不满足支护要求;②在大变形玻璃钢锚杆支护下,回采帮的最大水平位移比常规玻璃钢锚杆支护要更大,但未达到破断位移,满足支护要求。

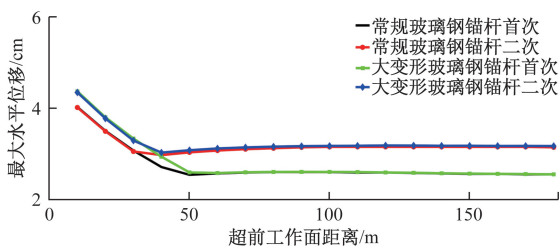


图 15 最大水平位移对比

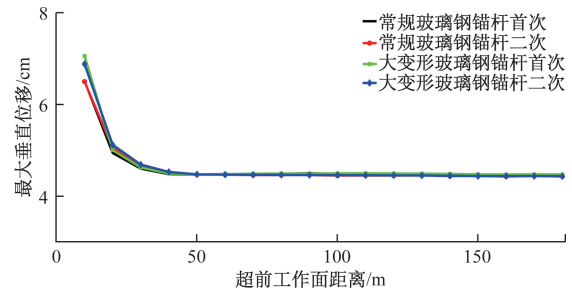


图 16 最大垂直位移对比

4 结论

(1)回采侧帮采用常规玻璃钢锚杆支护或大变形玻璃钢锚杆支护后,随着远离工作面,回采侧帮的最大水平位移以及顶板的最大沉降量均呈现出一种先逐渐减小后趋于稳定的趋势。

(2)回采侧帮采用常规玻璃钢锚杆支护或大变形玻璃钢锚杆支护后,二次见方时,回采侧帮的最大水平位移较首次见方时均呈现出增大的特点。

(3)采空区首次见方和二次见方时,在监测范围内,回采侧帮的最大水平位移均已经达到常规玻璃钢锚杆的破断位移,但均未达到大变形玻璃钢锚杆的破断位移。所以常规玻璃钢锚杆不满足支护要求,大变形玻璃钢锚杆满足支护要求。

参考文献

- [1] 康红普,林健,吴拥政.全断面高预应力强力锚索支护技术及其在动压巷道中的应用[J].煤炭学报,2009,34(9):1153-1159.
- [2] 王世博,王堃,贾稳宏,等.基于多因素分析法的巷道支护分级与支护参数优化[J].科学技术与工程,2024,24(8):3171-3179.
- [3] 赵象卓,张宏伟,CAO C,等.大直径玻璃钢锚杆工作面帮支护性能试验研究[J].中国安全科学学报,2019,29(2):118-124.
- [4] 马念杰,吴联君,刘洪艳,等.煤巷锚杆支护关键技术及发展趋势探讨[J].煤炭科学技术,2006(5):77-79.
- [5] 范世平,丁全录.玻璃钢锚杆的应用研究[J].煤炭科学技术,1996(9):5-8,57.
- [6] 王福海,杨永刚,杨张杰,等.新型高强玻璃钢锚杆研究及应用[J].煤炭技术,2022,41(11):78-81.
- [7] 康红普.煤矿巷道支护与加固材料的发展及展望[J].煤炭科学技术,2021,49(4):1-11.
- [8] 孟祥瑞,张若飞,李英明,等.全长锚固玻璃钢锚杆应力分布规律及影响因素研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(4):678-684.
- [9] 韩洪亮.玻璃钢锚杆杆体主要性能的试验分析[J].煤炭科学技术,2005(4):67-69.
- [10] 万浩,王文杰.高应力软岩巷道玻璃钢锚杆与螺纹钢锚

- 杆支护受力特征对比分析[J]. 化工矿物与加工, 2018, 47(7): 57-60.
- [11] 李英明, 马念杰, 杨科. 基于煤帮变形的玻璃钢锚杆失效机理分析[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(10): 18-20.
- [12] 王岗凤, 邹龙, 赵崇武, 等. 金川二矿大体积充填体下玻璃钢锚杆合理支护参数研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(1): 100-105.
- [13] 郭团结. 软弱层状顶板巷道玻璃钢-管缝锚杆的组合支护研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(8): 201-204.
- [14] 王文杰, 王照刚, 郑际镜, 等. 爆破动载下全长锚固玻璃钢锚杆动力响应特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(5): 898-907.
- [15] 叶义成, 陈虎, 王其虎, 等. 软弱层直接顶板巷道玻璃钢锚杆支护效果研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(3): 913-919.
- [16] 吕情绪, 董俊亮, 柴敬. 分层开采采空区下大断面切眼支护[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8395-8402.
- [17] ASCIONE F, FEO L, MACERI F. On the pin-bearing failure load of GFRP bolted laminates; an experimental analysis on the influence of bolt diameter[J]. Composites Part B: Engineering, 2010, 41(6): 482-490.
- [18] NGO T T, PHAM T M, HAO H, et al. Performance of monolithic and dry joints with GFRP bolts reinforced with different fibres and GFRP bars under impact loading[J]. Engineering Structures, 2021, 240: 112341.
- [19] 潘一山, 齐庆新, 王爱文, 等. 煤矿冲击地压巷道三级支护理论与技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1585-1594.
- [20] 齐庆新, 李一哲, 赵善坤, 等. 我国煤矿冲击地压发展 70 年: 理论与技术体系的建立与思考[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 1-40.
- [21] TANG Z, CHANG D Z, CAI X Q, et al. Design of pressure energy-absorbing FRP Anchors and numerical analysis of mechanical properties [J]. Sustainability, 2023, 15(8): 6726.

Numerical Analysis of Roadway Deformation Law under Large Deformation FRP Bolt Support

CHEN Guohua

(Wushenqi Mengda Mining Co., Ltd., Ordos 017307, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to find out the deformation law of roadway under the support of large deformation fiberglass bolt, a three-dimensional calculation model was established by using numerical simulation software, and the support effect of conventional fiberglass bolt and large deformation fiberglass bolt was compared and analyzed. The results show that when the goaf of the working face is squared for the first time and squared for the second time, the roadway shows a trend of inward contraction, and the plastic zone is mainly concentrated around the roadway. The horizontal displacement of the mining side and the settlement of the roof show a trend of gradually decreasing and then tending to be stable. When the goaf is first and second square, within the monitoring range, the maximum horizontal displacement of the mining side has reached the breaking displacement of the conventional FRP anchor rod, but it has not reached the breaking displacement of the large deformation FRP anchor rod. The conventional FRP anchor rod does not meet the support requirements, and the large deformation FRP anchor rod meets the support requirements.

Keywords: roadway support; large deformation FRP bolt; deformation law of roadway; FLAC3D; bolt support; numerical simulation