

DOI: 10.13606/j.cnki.37-1205/td.2025.01.001.

# 基于 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟的回风平巷变形破坏机理分析

杨 鹏

(山西华晋集团 吉宁煤业有限责任公司, 山西 临汾, 042108)

**摘要:**随着开采的逐步深入,山西华晋吉宁煤业逐步面临着高应力环境下回采巷道掘进难以及支护难等问题。以该矿 2208 回风平巷为研究对象,借助 FLAC<sup>3D</sup> 通过数值模拟的方式用控制变量法分别从地质条件、支护方式、施工工艺这 3 个方面分析对巷道围岩变形量(顶板下沉量、底板鼓起量,侧帮变形量)、破坏区深度、破坏体积的影响。研究发现断层地质构造对回采巷道及周围煤岩体稳定性影响显著,应当在回采巷道揭露断层地质构造时加强对回采巷道的支护工作。锚杆支护能够有效改善巷道围岩变形以及应当采用及时支护方式对回采巷道进行加固,并尽量减少顶板暴露面积,从而最大限度地维护巷道围岩稳定。

**关键词:**支护;控制变量法;巷道稳定性;高应力环境

**中图分类号:**TD323 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-0797(2025)01-0001-06

## Deformation and failure mechanism of return air roadway of 2208 working face of Jining Coal Industry

YANG Peng

(Jining Coal Industry Co. Ltd., Shanxi Huajin Mining Group, Linfen 042108, China)

**Abstract:** With the gradual deepening of mining, Shanxi Huajin Jining Coal Industry is gradually facing the problems of difficult tunneling and supporting of mining roadway under high stress environment. Taking the 2208 return air roadway of the mine as the research object, with the help of FLAC<sup>3D</sup>, the influence of the roadway on the deformation of the surrounding rock (roof subsidence, floor bulging, side deformation), the depth of the failure zone and the failure volume of the roadway was analyzed from three aspects: geological conditions, support methods and construction technology. It is found that the fault geological structure has a significant impact on the stability of the mining roadway and the surrounding coal and rock mass, and the support of the mining roadway should be strengthened when the fault geological structure is exposed in the mining roadway, the bolt support can effectively improve the deformation of the surrounding rock of the roadway, and the timely support method should be used to strengthen the mining roadway, and minimize the exposed area of the roof, so as to maintain the stability of the surrounding rock of the roadway to the greatest extent.

**Key words:** support; control variable method; roadway stability; High-stress environments

回采巷道围岩变形控制及支护技术已成为亟待解决的首要问题<sup>[1]</sup>。如何采用较低的支护成本达到较好的支护效果,保证矿井安全生产,是井下巷道支护的终极目标<sup>[2]</sup>。

张红卫<sup>[3]</sup>等以胡家河煤矿 402102 综放工作面泄水巷为工程背景,采用理论分析、数值模拟与现场实测相结合的方法,分析围岩变形破坏情况,揭示回采巷道超前支承应力峰值影响范围及超前支承应力影响范围。马杰明<sup>[4]</sup>等以 74104 工作面直角梯形巷道为工程背景,对深井采动影响下直角梯形巷道的变形破坏规律与控制技术进行研究。周桂杰<sup>[5]</sup>采用现场调研、室内试验、理论分析、数值模拟和现场监测等研究方法相结合分析了 2901 工作面回采巷道稳定性。周桂杰<sup>[6]</sup>用数值模拟软件 FLAC<sup>3D</sup> 通过改变巷道跨度,研究巷道跨度对巷道变形破坏的影响。马国军<sup>[7]</sup>等针对深部高应力回采巷道变形破坏

严重与难控制的问题,以任家庄煤矿 210504 工作面回风巷为工程背景,研究了其变形机理和稳定性控制技术。赵洪宝<sup>[8]</sup>等以回坡底煤矿 11 号煤层 1021 巷为工程背景,探究巷道在受到 10 号煤层 103 工作面回采与煤柱应力集中情况下产生非对称性破坏的机理与演化规律。田普<sup>[9]</sup>针对韩城矿区桑树坪二号井 3309 运输巷围岩变形严重问题,采用理论分析、数值模拟、现场实测相结合的方法,对 3308 工作面采动影响引起的 3309 运输巷围岩应力分布及塑性破坏范围进行综合研究并提出围岩控制方案进行了现场应用。乔康康<sup>[10]</sup>等根据围岩变形破坏特征及现场观测分析结果,结合巷道恒阻让压耦合支护机理,设计“锚索+恒阻大变形锚杆+钢带梁+底部注浆锚杆”的巷道返修支护方案。唐青豹<sup>[11]</sup>等对回采巷道不同采动影响时围岩主应力大小及其方向分布规律及围岩破坏特征进行了研究,优化了支护参数。张佳悦<sup>[12]</sup>总结了

大采高小煤柱回采巷道的围岩控制机理。

以吉宁煤业 2208 工作面回风平巷为研究对象, 该工作面连续推进长度为 822 m, 沿倾向方向的长度为 240 m, 煤层平均厚度 6.22 m, 可采储量为 80 万 t。回风平巷设计长度为 694 m, 设计掘进宽度为 5.2 m, 设计掘进高度为 4.2 m, 设计掘进断面为 21.84 m<sup>2</sup>。随着开采的进行, 逐步进入深部开采的阶段, 矿井的正常生产面临深部高应力开采环境下巷道难支护和难维护的问题, 因此分析工作面回风平巷的破坏机理, 提出针对性的支护方案对于矿井的安全生产具有重要意义。

### 1 断层对回风平巷的影响

根据吉宁煤业地质勘探报告, 可以看出 2208 工作面所开采的煤层厚度总体变化不大。通过分析工作面回风平巷所处的环境, 得知回风平巷掘进过程中受到影响的主要地质问题是断层。回风平巷在掘进过程中会揭露 10 条正断层, 包括 F95、F96、F97、F98、F100、F109、F111、F112、F113、F115 正断层。因此, 十分有必要研究回风平巷在掘进过程中断层对回采巷道围岩稳定性的影响。

当回采巷道掘进过程中遭遇断层构造时, 受其影响, 巷道周围岩体自身的力学性能会发生衰减, 导致回采巷道周围岩体的稳定性下降。在 FLAC<sup>3D</sup> 中通过弱化回采巷道所在的 2 号煤层自身力学性质及顶底板岩层力学性质, 以揭示遭遇地质构造时, 回采巷道的变形破坏特性。

当回采巷道掘进过程中遭遇断层构造后, 巷道周围岩体中的铅直应力和水平应力分布如图 1、图 2 所示。由图 1 可看出, 铅直应力最大值为 22.4 MPa, 集中在回采巷道左右两帮煤体中。同时, 在顶底板中出现了明显的拉应力, 最大拉应力为 0.1 MPa。

在拉应力作用下, 顶底板极有可能会发生拉破坏。由图 2 可知水平应力最大值为 11.4 MPa。同时在回采巷道左右两帮中出现了明显的拉应力且拉应力数值较小, 不足 0.1 MPa。

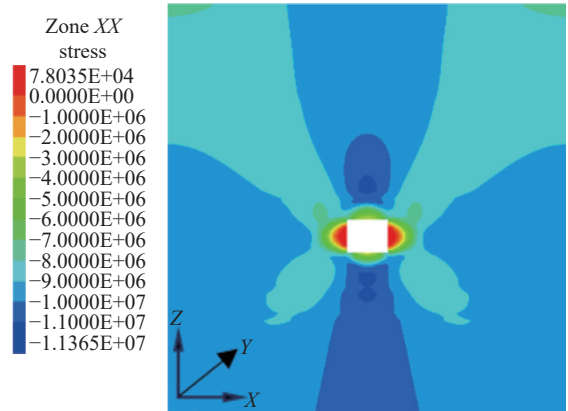


图 2 回采巷道遭遇断层构造后的水平应力分布

回采巷道开挖后, 周围煤岩体中的位移分布如图 3、图 4、图 5 所示。图 3 所示在遭遇断层构造后, 回采巷道周围岩体中的最大位移为 14.1 mm 且最大位移集中在巷道顶板岩层中; 图 4 所示顶板下沉量为 14.1 mm, 底板鼓起量为 8.6 mm。顶板下沉量为底板鼓起量的 1.6 倍。因此, 在遭遇地质构造后, 巷道围岩变形量最为明显的仍然是顶板下沉变形; 图 5 所示水平位移最大为 13.3 mm。与顶板下沉量相比, 水平位移量相对较小, 但仍然大于底板鼓起量。因此, 巷道围岩变形控制的重点仍然是巷道顶板, 其后是巷道两帮。

对回采巷道周围岩体中的破坏区分布进行展示, 如图 6 所示看出, 遭遇断层构造后, 巷道围岩中产生了明显的破坏区。对破坏区的体积进行测量, 可以得到沿着掘进方向, 每米的破坏区体积为 42.5 m<sup>3</sup>。对破坏区的深度进行测量, 可得到在回采巷道左右

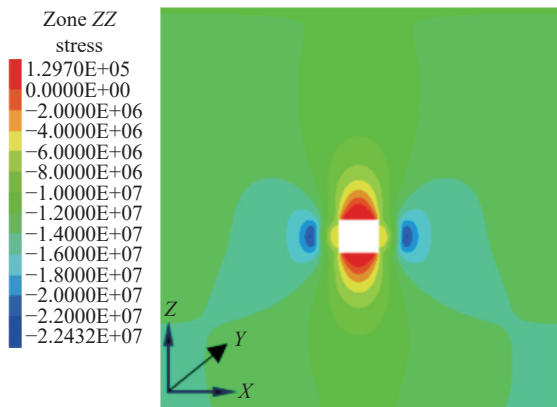


图 1 回采巷道遭遇断层构造后的铅直应力分布

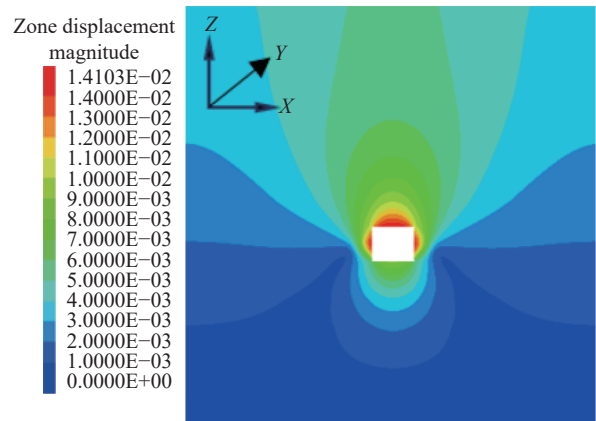


图 3 回采巷道遭遇断层构造后的总位移分布

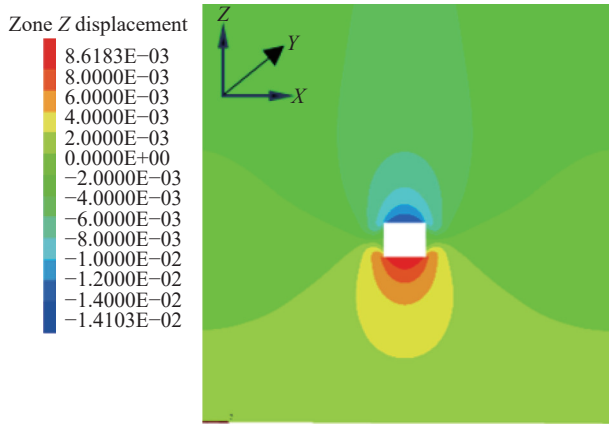


图 4 回采巷道遭遇断层构造后的铅直位移分布

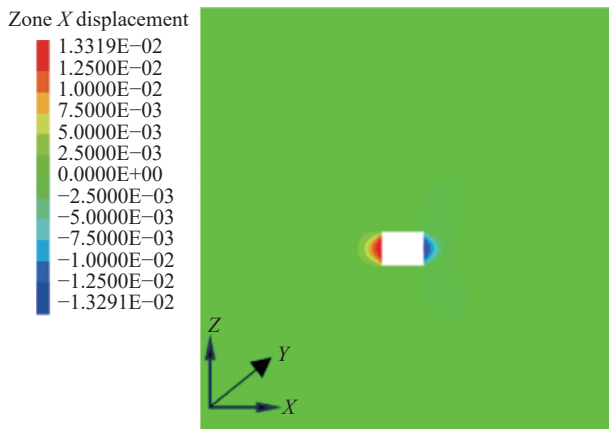


图 5 回采巷道遭遇断层构造后的水平位移分布

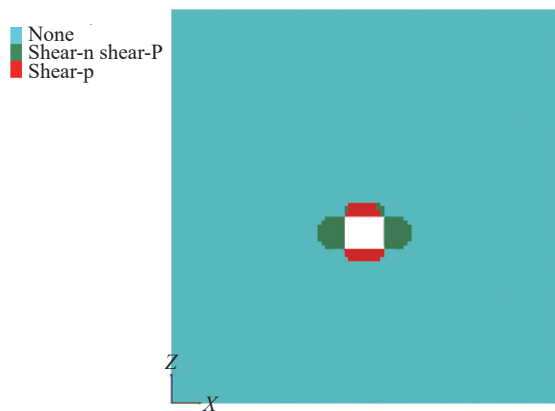


图 6 回采巷道遭遇断层构造后的破坏区分布

两帮中破坏区的深度为 3.47 m；在回采巷道顶底板中破坏区的深度为 1.78 m。

将计算结果与正常状态下巷道围岩变形破坏结果进行对比，见表 1。

可以看出，当遭遇断层地质构造时，巷道围岩变形情况会急剧变化。顶板下沉量增加 39.6%；侧帮变形量增加 75%；底板鼓起量增加 30.3%；单位

表 1 断层构造区域巷道围岩变形破坏对比

类别	正常段	断层构造段	变化量
巷道围岩最大变形量(mm)	10.1	14.1	39.6%
顶板下沉量(mm)	10.1	14.1	39.6%
底板鼓起量(mm)	6.6	8.6	30.3%
侧帮变形量(mm)	7.6	13.3	75%
单位掘进长度时破坏区体积(m <sup>3</sup> )	27.6	42.5	54%
顶板破坏深度(mm)	1.31	1.78	35.9%
侧帮破坏深度(mm)	2.45	3.47	41.6%
底板破坏深度(mm)	1.03	1.78	72.8%

掘进长度范围内破坏区体积增加 54% 断层地质构造对回采巷道及周围煤岩体稳定性影响显著。因此，亟需在回采巷道揭露断层地质构造时加强对回采巷道的支护工作。

## 2 采用锚杆支护对回风平巷的影响

支护方式对巷道围岩变形破坏具有重要影响。围岩强度强化理论强调，在采用各种支护方式条件下，巷道周围岩体的内聚力、内摩擦角等参数可能得到明显改善。而改善后的巷道周围岩体在巷道开掘出来后可能表现出更好的承载性能。因此，本文采用锚杆支护的方式对回采巷道周围岩体进行支护，并揭示支护对回采巷道围岩控制作用的影响。

在达到应力平衡后，整个模型内部的铅直应力和水平应力分布如图 7、图 8 所示。由图 7 可看出，采用锚杆支护后，回采巷道周围岩体中的铅直应力最大为 20.8 MPa。由图 8 可看出，在回采巷道顶板中分布着明显的拉应力。水平应力最大值为 12.3 MPa，无拉应力出现。

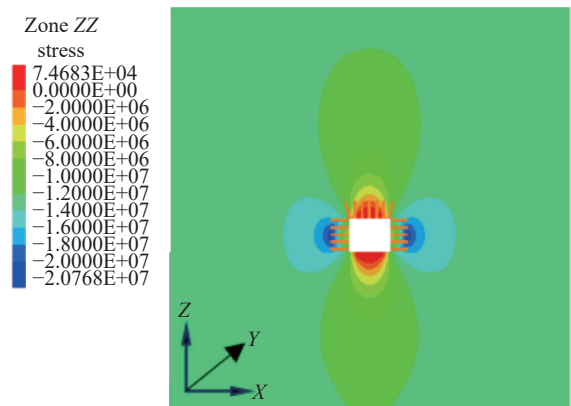


图 7 采用锚杆支护后围岩的铅直应力分布

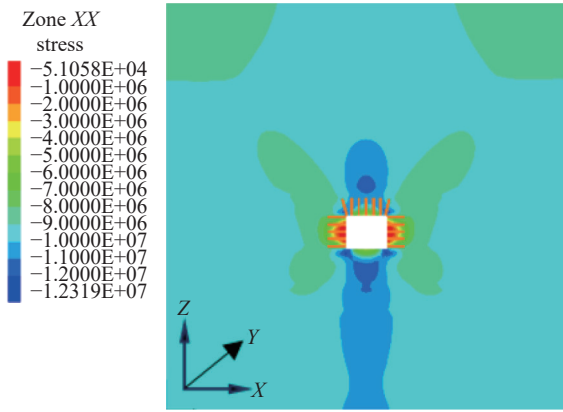


图 8 采用锚杆支护后围岩的水平应力分布

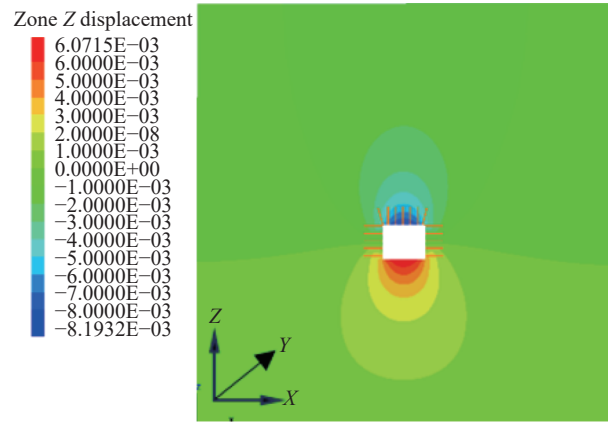


图 10 采用锚杆支护后围岩的铅直位移分布

对回采巷道周围岩体中的位移场分布进行显示,如图 9、图 10、图 11 所示。由图 9 可看出回采巷道周围岩体中的最大位移为 8.2 mm,而且主要集中在巷道顶板岩层中。由图 10 可看出沿铅直方向,回采巷道周围岩体中的最大铅直位移为 8.2 mm,主要集中在巷道顶板岩层中,即顶板下沉量。在回采巷道底板中,底板鼓起量相对较小,为 6.1 mm。由图 11 可看出回采巷道掘出后,水平位移最大为 5.8 mm。由此得出,水平位移量相对于顶板下沉量、底板鼓起量均较小。这说明,对回采巷道左右两帮采用锚杆进行支护后,侧帮变形量得到了明显的控制。

对回采巷道周围岩体中的破坏区分布进行显示,如图 12 所示。可以看出,沿着回采巷道掘进方向,每米的破坏区体积为 20.1 m<sup>3</sup>。对破坏区的范围进行测量,发现沿着水平方向,在回采巷道侧帮中的破坏深度为 1.97 m。在回采巷道顶板中的破坏深度为 0.88 m,在回采巷道顶板中的破坏深度为 0.49 m。

将未支护的回采巷道与锚杆支护的回采巷道进行对比,对比结果见表 2。可以看出,锚杆支护能够有效改善巷道围岩变形。当采用锚杆支护对回采

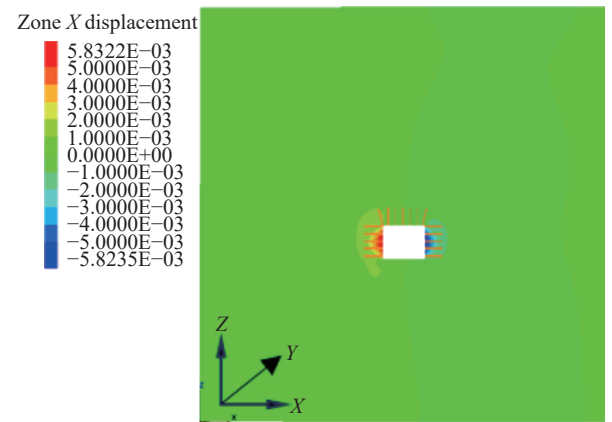


图 11 采用锚杆支护后围岩的水平位移分布

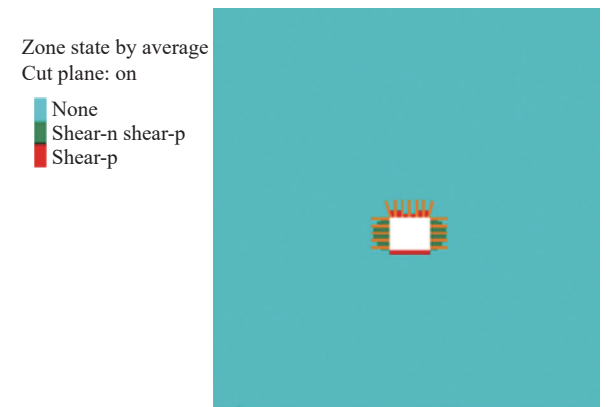


图 12 采用锚杆支护后围岩的破坏区分布

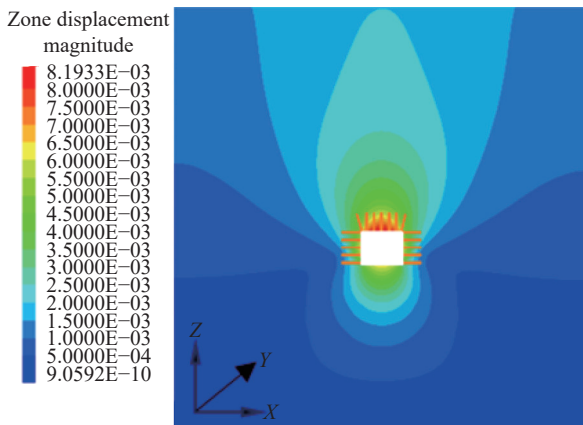


图 9 采用锚杆支护后围岩的总位移分布

巷道进行围岩加固后,回采巷道围岩最大变形量、顶板下沉量、底板鼓起量、帮变形量均有明显程度的下降。此外,回采巷道周围岩体中破坏区的体积也显著下降。例如,顶板破坏深度下降 32.8%,底板破坏深度下降 52.4%,侧帮破坏深度下降 19.6%。

### 3 施工工艺影响

在 2 号煤层中开掘出回采巷道后,根据对回采

表 2 巷道支护后围岩变形破坏对比

类别	未支护	锚杆支护	变化量
巷道围岩最大变形量(mm)	10.1	8.2	-18.8%
顶板下沉量(mm)	10.1	8.2	-18.8%
底板鼓起量(mm)	6.6	6.1	-7.6%
侧帮变形量(mm)	7.6	5.8	-23.7%
单位掘进长度时破坏区体积(m <sup>3</sup> )	27.6	20.1	-27.2%
顶板破坏深度(mm)	1.31	0.88	-32.8%
侧帮破坏深度(mm)	2.45	1.97	-19.6%
底板破坏深度(mm)	1.03	0.49	-52.4%

巷道的支护情况进行分类，分为及时支护和滞后支护，在上述研究过程中均对回采巷道进行了及时支护。为了研究施工工艺对回采巷道稳定性的影响，在本节中对比滞后支护和及时支护这 2 种不同施工工艺条件下巷道围岩变形破坏特性。

在 FLAC<sup>3D</sup> 中模拟滞后支护，并分析滞后支护条件下回采巷道围岩位移（总位移、铅直位移、水平位移）变形情况，如图 13、图 14、图 15 所示。

采用滞后支护后，回采巷道周围岩体中的破坏

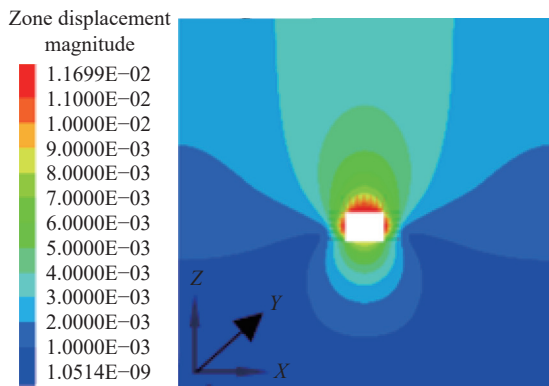


图 13 采用滞后支护后围岩的总位移分布

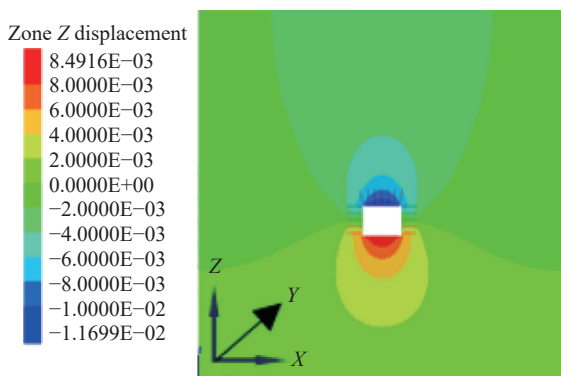


图 14 采用滞后支护后的铅直位移分布

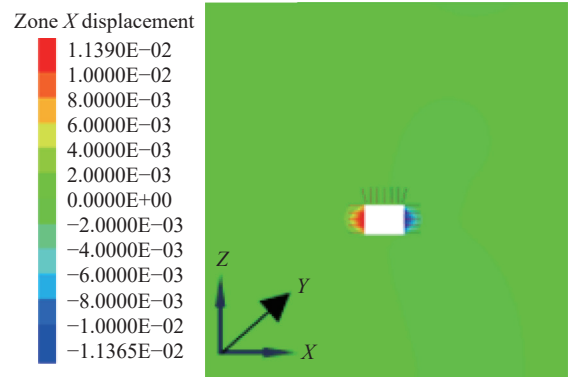


图 15 采用滞后支护后的水平位移分布

区分布、回采巷道变形破坏情况见图 16 和表 3 所示。可以看出，采用滞后支护后，巷道围岩变形破坏显著。巷道围岩最大变形量增加了 42.7%。巷道围岩破坏区体积增加 101%，顶板破坏深度增加 103.4%，底板破坏深度增加 212.2%，侧帮破坏深度增加 51.8%。

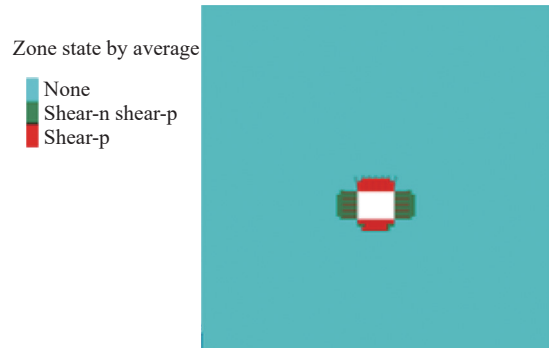


图 16 采用滞后支护后围岩的破坏区分布

表 3 采用滞后支护后围岩的变形破坏情况

类别	及时支护	滞后支护	变化量
巷道围岩最大变形量(mm)	8.2	11.7	42.7%
顶板下沉量(mm)	8.2	11.7	42.7%
底板鼓起量(mm)	6.1	8.5	39.3%
侧帮变形量(mm)	5.8	11.4	96.6%
单位掘进长度时破坏区体积(m <sup>3</sup> )	20.1	40.4	101.0%
顶板破坏深度(mm)	0.88	1.79	103.4%
侧帮破坏深度(mm)	1.97	2.99	51.8%
底板破坏深度(mm)	0.49	1.53	212.2%

基于以上研究结果，在对 2 号煤层进行开掘时，应当采用及时支护方式对回采巷道进行加固，并尽量减少顶板暴露面积，从而最大限度地维护巷道围岩稳定。

## 4 结论

本文采用FLAC<sup>3D</sup>研究了吉宁煤业有限责任公司2号煤层中的2208工作面回风平巷开掘之后的变形破坏情况,构建了三维仿真数值计算模型,分析了该回风平巷开掘之后周围岩体的变形破坏情况。研究表明,矩形回采巷道开掘之后,顶板下沉量显著大于底板鼓起量、侧帮变形量。因此,在矩形回采巷道开掘之后,应当首先加强对巷道顶板的支护和加固。此外,矩形回采巷道开掘之后,在巷道周围岩体中出现了明显的破坏区。左右两帮中的破坏区深度显著大于顶板破坏深度、底板破坏深度。这是由于2号煤层中的回采巷道在煤层中开掘且煤体的强度低于顶底板岩层强度。

基于控制变量法分析了地质条件、支护方式、施工工艺等因素对2号煤层中回采巷道稳定性的影响。研究表明,巷道所处地质条件对巷道围岩稳定性产生重要影响。当回采巷道在掘进过程中遭遇断层地质构造时,巷道周围岩体中的基本力学性质参数会显著下降,导致巷道围岩发生急剧变形和破坏。巷道顶板下沉量可以增加39.6%;巷道底板破坏深度可以增加72.8%。因此,当回采巷道揭露断层等地质构造时,需要加强对回采巷道的支护。

对回采巷道采用锚杆支护后,能够有效改善巷道围岩变形并控制破坏区发育深度。在使用锚杆支护后,巷道侧帮变形量可以下降23.7%,底板破坏深度可以下降52.4%。因此,在对2号煤层回采巷道进行支护时,应当加强使用锚杆支护控制巷道围岩变形。

施工工艺对控制回采巷道围岩变形具有重要影响。若对回采巷道采用滞后支护方式,回采巷道周围岩体中的变形量和破坏区深度会继续增加。因此,为了保证回采巷道的安全使用,在2号煤层中开掘出回采巷道后,应当及时支护回采巷道并尽量减少巷道围岩暴露面积。

## 参考文献:

- [1] 田华.回采巷道支护设计[J].机械管理开发,2022,37(6): 39-42.
- [2] 高建.红柳煤矿大断面软岩回采巷道支护技术研究[D], 2022.
- [3] 张红卫,余智秘,李小菲,等.胡家河矿回采巷道变形及超前应力分布规律[J].西安科技大学学报,2023,43(3): 486-494.
- [4] 马杰阳,张雷,屠世浩,等.深井直角梯形回采巷道变形破坏规律与控制技术[J].采矿与安全工程学报,2023, 40(1): 82-90.
- [5] 周桂杰.陈四楼煤矿深部工作面回采巷道主动支护技术研究[D],2022.
- [6] 周桂杰.某矿回采巷道不同跨度数值模拟分析[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2022,32(1): 43-46, 87.
- [7] 马国军,胡文涛,王军,等.深部高应力回采巷道变形破坏机理与控制技术[J].能源与环保,2021,43(11): 315-321, 334.
- [8] 赵洪宝,程辉,吉东亮,等.近距离煤层回采巷道非对称性破坏机理与演化规律研究[J].中国矿业大学学报,2021, 50( ): 1029-40, 50.
- [9] 田普.二次采动影响巷道围岩破坏特征及控制技术研究[D],2021.
- [10] 乔康康,王光烈,段洋洋.回采巷道变形破坏机理分析及支护技术探讨[J].江西煤炭科技,2021(1): 84-86.
- [11] 唐青豹,杨刚,张琪,等.补连塔矿回采巷道破坏特征与支护参数优化[J].煤矿安全,2019,50(4): 223-227, 232.
- [12] 张佳悦.大采高小煤柱回采巷道围岩破坏特点及控制技术[J].山西焦煤科技,2019,43(2): 50-53, 56.

## 作者简介:

杨鹏(1988-),辽宁葫芦岛人,本科,总工程师,从事矿井安全生产和技术管理工作。E-mail: [kangle789@126.com](mailto:kangle789@126.com)

(收稿日期:2024-3-12)