

范超军,张佳绩,罗明坤,等.基于离散-连续耦合方法的底抽巷围岩破坏规律[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(2):129-136.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250416
FAN Chaojun,ZHANG Jiaji,LUO Mingkun,et al.Bottom pumping roadway based on discrete-continuous coupling method[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2026,45(2):129-136.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250416

基于离散-连续耦合方法的底抽巷围岩破坏规律

范超军^{1,2},张佳绩^{1,2},罗明坤^{2,3},兰天伟¹,李胜²,蒋晓锋^{1,2},杨雷^{1,2}

(1. 辽宁工程技术大学鄂尔多斯研究院,内蒙古鄂尔多斯 017004;2. 辽宁工程技术大学矿业学院,辽宁阜新 123000;
3. 山西潞安环保能源开发股份有限公司能源事业部通风部,山西长治 046002)

摘要:为揭示底抽巷在上覆煤层回采过程中围岩破坏演化规律,以某煤矿2901工作面底抽巷为研究对象,采用连续-离散耦合的跨尺度数值模拟方法,结合现场钻孔窥视进行验证。研究结果表明:随回采工作面推进,围岩颗粒力链数量呈现“初始平稳-快速衰减-动态稳定”三阶段演化特征。裂纹演化遵循“点-线-面”的跨尺度规律,破坏主要集中于左帮与顶板,呈显著非对称性。基于钻孔窥视结果,将顶板划分为裂隙充分发育区、微裂隙萌生区、煤岩交界稳定区。研究结论为类似条件下的巷道围岩稳定性分析提供理论依据。

关键词:底抽巷;回采;围岩破坏;力链;裂纹

中图分类号:TD322

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2026)02-0129-08

Bottom pumping roadway based on discrete-continuous coupling method

FAN Chaojun^{1,2},ZHANG Jiaji^{1,2},LUO Mingkun^{2,3},LAN Tianwei¹,LI Sheng²,JIANG Xiaofeng^{1,2},YANG Lei^{1,2}

(1. Ordos Research Institute, Liaoning Technical University, Ordos 017004, China;2. College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;3. Ventilation Department of Energy Division, Shanxi Lu'an Environmental Protection Energy Development Company Limited, Changzhi 046002, China)

Abstract:To reveal the evolution patterns of surrounding rock failure in the bottom pumping roadway during coal seam mining, this study investigates the 2901 working face bottom drainage tunnel in a coal mine. A continuous-discrete coupled multiscale numerical simulation method was employed, supplemented by field borehole observations for validation. The results indicate that the number of rock particle force chains evolves through three distinct phases with mining advancement: initial stable stage, rapid decay stage, and dynamic stabilization stage. Fracture evolution follows a multi-scale “point-line-surface” pattern, with failure predominantly concentrated on the left rib and roof, exhibiting significant asymmetry. Based on the results of borehole peeping, the roof is divided into three zones: fully developed joint zone, micro-joint initiation zone, and stable coal-rock interface zone. The research conclusions provide a theoretical basis for the stability analysis of roadway surrounding rock under similar conditions.

Keywords: bottom pumping roadway; coal seam mining; surrounding rock damage; force chain; cracks

0 引言

底抽巷在降低煤层瓦斯压力、改善矿井通风条件方面发挥着关键作用^[1-4],但是随着煤炭资源开采深度不断增加,深部高地应力及强采动影响下的底抽巷围岩稳定性问题日益突出^[5]。因此,深入研究底抽巷在采动影响下的围岩破坏规律,对

控制底抽巷的围岩稳定、保障煤矿安全高效开采具有重要意义。

目前,底抽巷的布置方式主要包括外错、内错及联合布置,高瓦斯矿井普遍以“外错为主、内错为辅”实现“一巷多用”^[6]。在围岩破坏机理研究方面,WEI等^[7]针对近距开采条件,得出中部底抽巷围岩变形规律,发现采矿活动会诱导巷

收稿日期:2025-10-09 修回日期:2025-11-28 接受日期:2025-12-05 责任编辑:张雯

基金项目:辽宁省“兴辽英才”计划项目(XLYC2202022);鄂尔多斯市科技计划资助项目(YF20250261);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-2024-A-009)

作者简介:范超军(1990-),男,四川内江人,博士,教授,主要从事岩层控制、瓦斯灾害防治方面的研究。E-mail:chaojunfan@139.com

道中下部产生了非对称变形。林志斌等^[8]采用离散颗粒元软件PFC^{3D}以及物理模型试验,分析了巷道周边岩体的变形破裂时空演变规律与机理。MA等^[9]采用FLAC^{3D}软件模拟得到围岩的变形破坏规律,分析了影响围岩变形破坏的因素。贾后省等^[10]研究了巷道围岩应力环境演化特征及其作用下巷道围岩破坏规律,设计了有利于围岩塑性破坏分布收敛的非对称屋顶断面。

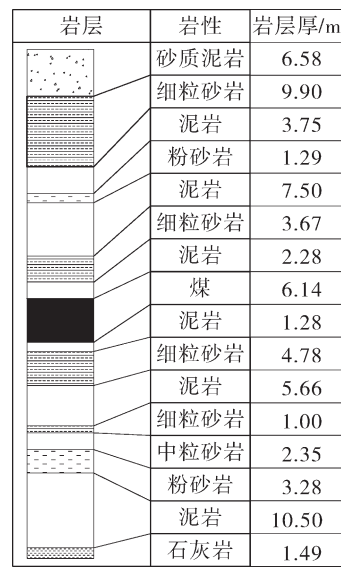
单一数值模拟方法在模拟围岩非连续破坏过程中存在明显不足,难以精确捕捉采动应力路径下围岩破坏的跨尺度演化机制^[11-12]。因此,部分学者引入连续-离散耦合方法开展相关研究。王昱博等^[13]采用离散元数值模拟结合室内物理实验的方法,证实连续-离散耦合分析方法可以准确模拟巷道和岩柱的破坏行为,并提供了实用性的分析结果。徐国文等^[14]基于离散元-有限差分耦合算法,模拟了隧道围岩破坏过程。李永兵等^[15]建立二维平面应变圆形巷道连续-离散耦合分析模型,从宏-细观角度深入研究不同围压条件下圆形巷道围岩变形破坏机制。目前,基于煤层回采情况下底抽巷的连续-离散耦合的跨尺度研究较少。传统有限元法虽然能够较好地模拟连续介质的应力应变行为,但在处理非连续破坏(如底抽巷围岩破坏过程中,裂纹的萌生、扩展和贯通)时难以准确捕捉围岩破坏的微观特征^[16]。离散元法能够很好地处理岩石的非连续破坏问题,但其计算成本高,且在模拟大范围连续介质时效率较低^[17]。连续-离散耦合方法可结合有限元法和离散元法的优点,有效模拟连续介质的应力应变行为,准确捕捉非连续破坏过程。

作者提出一种连续-离散耦合的跨尺度数值模拟方法,采用FLAC^{3D}和PFC^{3D}耦合建模,分析不同回采距离下底抽巷围岩颗粒力链数量与裂纹演化规律,并结合现场钻孔窥视数据进行验证,以期煤矿回采过程中底抽巷的稳定性控制提供理论依据与技术支持。

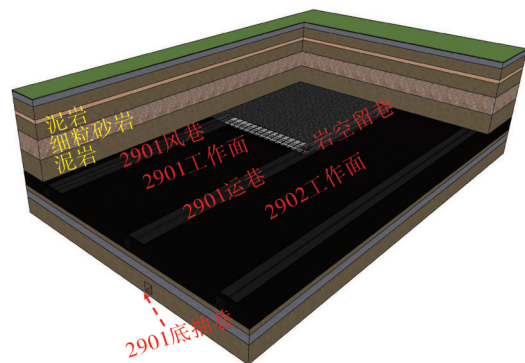
1 底抽巷围岩破坏跨尺度数值模拟

1.1 工程地质概况

某煤矿29采区首采2901工作面,开采属二叠系下统山西组下部的三号煤层,煤层赋存条件稳定,煤厚变异较小,煤层结构较简单;煤层厚度为5.67~6.75 m,平均厚度为6.14 m。2901综采工作面全长274 m,配套的2901底抽巷道断面为矩形,尺寸为4.8 m×3.5 m(宽×高),平均埋深为460 m。岩层柱状图与巷道布置见图1。



(a) 岩层柱状图



(b) 巷道布置示意

图1 29采区岩层柱状图及巷道布置

Fig.1 rock strata column and rock layout of mining area 29

1.2 模型构建

在重点研究区域(如巷道周围)使用离散元法,在其他区域使用有限元法。FLAC^{3D}-PFC^{3D}耦合采用wall-zone耦合方式,在连续网格与颗粒交接的地方生成与zone单元契合的wall单元,由FLAC^{3D}求解得到的速度通过耦合边界传递至PFC^{3D}模型。PFC^{3D}模型得到响应更新后,通过耦合边界反作用于FLAC^{3D}模型,从而更新其力学响应。FLAC^{3D}-PFC^{3D}数据交换过程见图2。

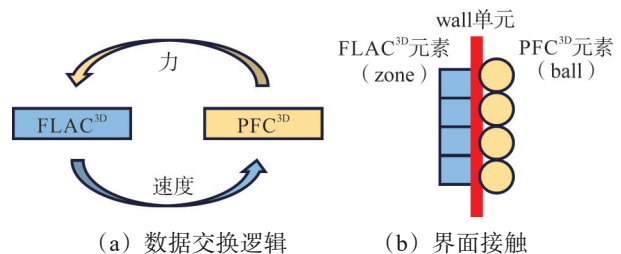


图2 FLAC^{3D}-PFC^{3D}数据交换过程

Fig.2 data exchange process of FLAC^{3D}-PFC^{3D} model

以某煤矿实际工程地质条件为基础建立数值模型, 模型尺寸为 608 m×200 m×71.45 m, 共 16 层, 包括 7 层顶板岩层、1 层主采煤层及 8 层底板岩层。FLAC^{3D}采用摩尔-库伦 (Mohr-Coulomb) 准则模拟各岩层本构模型, 模型有限元宏观参数见表 1。离散元部分尺寸为 15.5 m×200 m×14.5 m ($x \times y \times z$), 位于连续元 (350~365.5 m、0~200 m、

12.0~26.5 m) 区域内。采用 PFC^{3D}软件内置的三维平行黏结 (linear parallel bond) 接触模型, 该模型适合模拟岩性本构模型。模型左、右及下边界为固定边界, 顶部为自由边界。根据现场工作面地应力测试结果, 数值模型所受初始水平应力和垂直应力分别为 16.91 MPa、13.17 MPa。连续-离散耦合数值模型见图 3。

表 1 模型有限元宏观参数
Tab.1 model finite element macro parameters

岩层	厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
砂质泥岩	6.58	2 550	4.50	4.00	3.50	31.00	1.20
细粒砂岩	9.90	2 684	5.50	5.20	4.66	34.31	1.84
泥岩	3.75	2 450	2.86	2.17	2.90	30.00	1.70
粉砂岩	1.29	2 780	7.00	6.50	6.00	35.00	2.50
泥岩	7.50	2 450	2.86	2.17	2.90	30.00	1.70
细粒砂岩	3.67	2 684	5.50	5.20	4.66	34.31	1.84
泥岩	2.28	2 450	2.86	2.17	2.90	30.00	1.70
煤	6.14	1 400	3.10	2.40	1.98	34.31	0.41
泥岩	1.28	2 450	2.86	2.17	2.90	30.00	1.70
细粒砂岩	4.78	2 684	5.50	5.20	4.66	34.31	1.84
泥岩	5.66	2 450	2.86	2.17	2.90	30.00	1.70
细粒砂岩	1.00	2 684	5.50	5.20	4.66	34.31	1.84
中粒砂岩	2.35	2 765	12.00	11.00	12.00	38.00	4.00
粉砂岩	3.28	2 780	7.00	6.50	6.00	35.00	2.50
泥岩	10.50	2 450	2.86	2.17	2.90	30.00	1.70
石灰岩	1.49	2 700	25.00	18.00	15.00	38.00	6.00

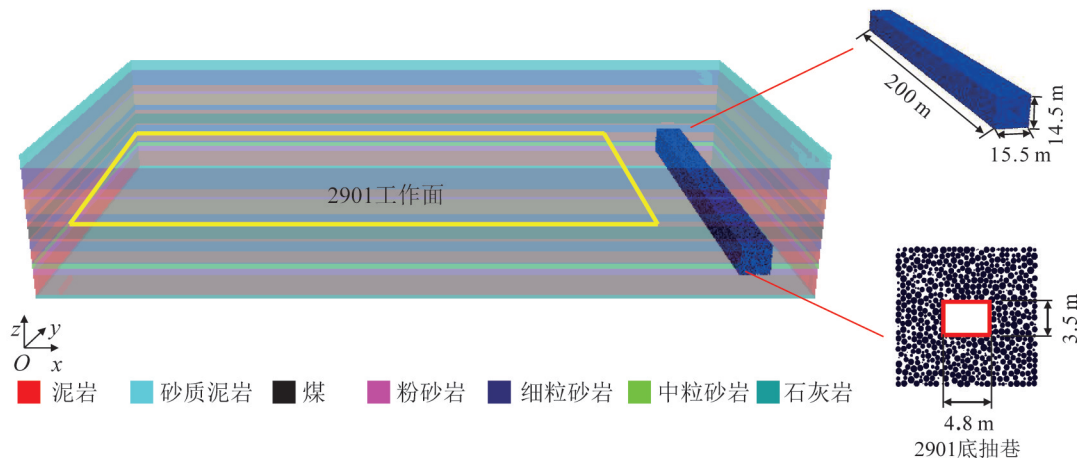


图 3 数值模拟计算模型示意

Fig.3 schematic of numerical simulation computational model

鉴于底抽巷主要位于泥岩层中, 为简化计算, 以泥岩的宏观力学参数为基准, 运用试错法获取细观参数。依据各力学参数对模型结果的影响程

度进行反复微调与优化, 直至模型输出结果与实际工况相契合, 最终确定的模型离散元微观参数见表 2。

表 2 泥岩层离散元模型微观参数
Tab.2 microparameters of discrete element model of mudstone layer

接触模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	接触刚度比	摩擦系数	平行黏结有效模量/GPa	平行黏结刚度比	摩擦角/(°)
7.2	2 500	1.5	0.7	10.08	1.0	30

为验证离散元微观参数选取的可靠性,并消除耦合边界的干扰,选取耦合区域中间位置的离散元范围作为监测区域。在工作面回采 180 m 时,截取模型在 $y=150$ m 处的截面,监测区域离散元断

面位移见图 4。监测结果表明,离散元与相邻连续元区域的位移变化一致,证明了参数选取有效,两者力学性质匹配良好。

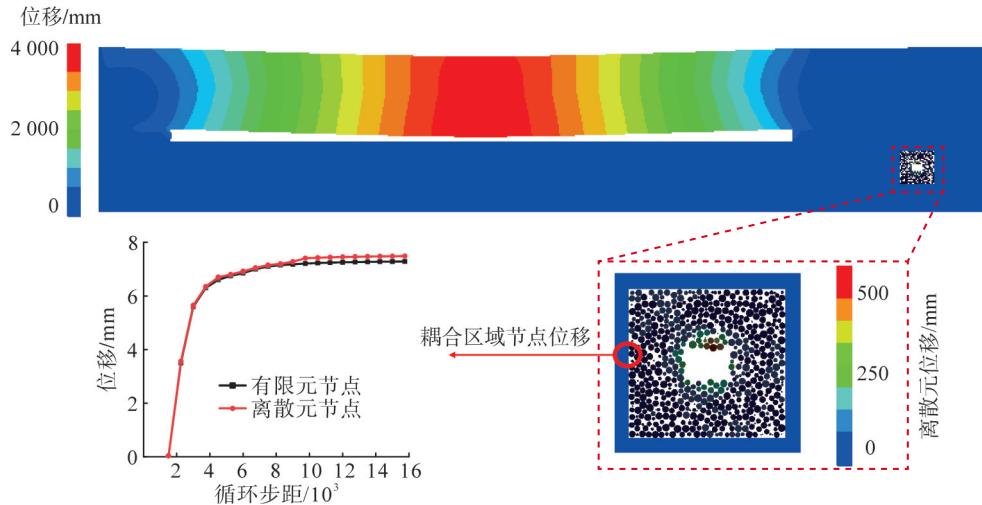


图 4 工作面回采 180 m 时模型位移

Fig.4 model displacement at 180 m mining advancement of working face

2 底抽巷围岩颗粒力链数演化规律

2.1 底抽巷颗粒力链断裂数变化规律

煤层回采过程中,底抽巷受采动影响引起围岩应力变化,进而引发围岩的变形破坏。力链作为微观颗粒和宏观体系的桥梁,可直观反映颗粒间的力传递过程,从而指示回采对底抽巷围岩的破坏机制。模拟 2901 工作面 0~200 m 的回采过程,获取每回采 20 m 时微观颗粒力链数量变化和分布状态,见图 5。力链数变化可分为初始平稳阶段、快速衰减阶段、动态稳定阶段。初始平稳阶段(0~60 m)各监测面力链数较为稳定,表明围岩结构处于弹性平衡状态,尚未受到显著的采动影响。因不同截面颗粒数量存在细微差别,初始力链数分别为 1 271、1 269 和 1 310。在快速衰减阶段(60~140 m),随着工作面推进,60 m 处观测面力链数率先下降,100 m 与 140 m 处观测面响应滞后,但呈现同步下降趋势。回采至 140 m 时,60 m、100 m 和 140 m 处观测面力链数分别为 920、1 124、1 129,表明采动影响自近场向远场传播。在动态稳定阶段(140~200 m),在工作面推进至 200 m 过程中,各监测面力链数下降趋势减缓,回采结束时 60 m、100 m 和 140 m 处观测面力链数分别降至 868、970 和 986,较初始值分别下降 31.71%、23.56% 和 24.73%,平均下降 26.67%。表明采动结束后,覆岩系统逐步进入新的平衡状态,但近采空

区岩体结构损伤更为严重,力链数基准更低。

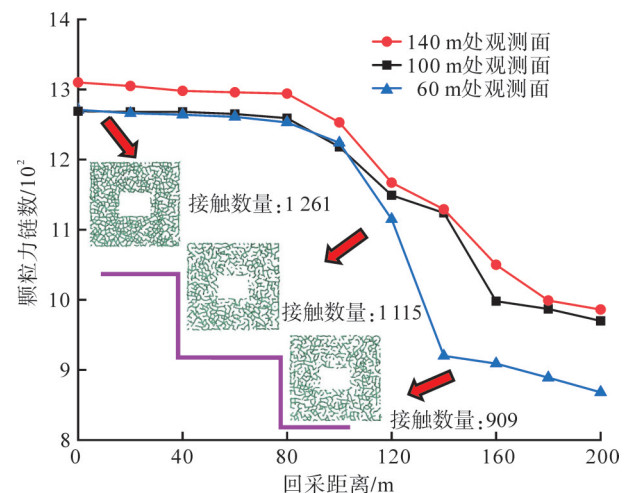


图 5 底抽巷颗粒力链断裂数时空分布

Fig.5 temporal and spatial distribution of particle force chain breakage in bottom pumping roadway

上覆煤层回采条件下底抽巷道围岩力链数演化呈现明显的阶段性、空间性和时序性特征。距采空区越近,力链数变化越剧烈,稳定后基准值越低;随着采动推进,力链数响应自近场向远场传播,断裂高峰出现时间依次滞后,最终各监测面均趋于新的稳定平衡。

2.2 不同回采阶段底抽巷力链演化规律

上覆煤层回采过程中,底抽巷受采动影响岩体损伤累积颗粒间力链随之发生断裂。力链的断

裂意味着该处的岩体达到了其强度极限,发生微破裂。单个力链断裂是一个微事件,但大量力链的断

裂和聚集则标志着宏观裂隙的产生和扩展。底抽巷中心截面($y=100\text{ m}$)处离散元颗粒间力链见图6。

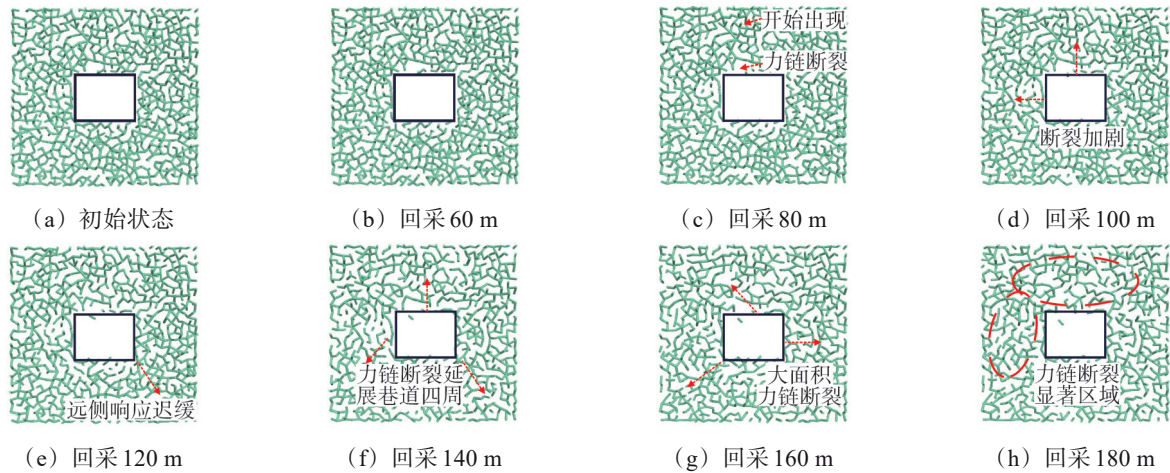


图6 不同回采阶段底抽巷力链演化云图

Fig.6 cloud map of force chain evolution in bottom pumping roadway at different mining stages

在煤层未采动时,底抽巷附近力链分布均匀,岩层完整性较好,围岩处于弹性平衡状态。回采60 m时,与未开挖时相比无明显变化,仅有个别力链断裂。回采80 m时,巷道顶板首先发生力链断裂。回采100 m时,应力集中导致巷道顶板及左帮力链断裂明显加剧。回采120 m时,受底抽巷外错布置影响,断裂表现出空间差异性,远煤柱侧响应相对滞后。回采140 m时,持续的采动扰动使围岩损伤进一步累积,裂隙网络快速扩展,力链断裂向巷道四周延展。颗粒断裂数量显著增加。回采至160 m时,巷道四周可见较多的力链断裂。回采至180 m时,尽管回采工作面逐渐远离观测断

面,但力链断裂仍在缓慢扩展,不过断裂幅度降低,表明围岩结构重组后达到新的力学平衡。此时回采即将结束,力链断裂最严重区域为巷道左帮及顶板。

3 底抽巷围岩裂纹及位移拓展规律

3.1 底抽巷围岩裂纹数量规律

受上覆煤层回采扰动,底抽巷围岩应力场重分布,引发巷道变形破坏,在PFC^{3D}离散元模型中,这一过程的实质是颗粒间黏结键的断裂。在底抽巷中心截面($y=100\text{ m}$)处,离散元颗粒裂纹数随回采推进的演化过程见图7。

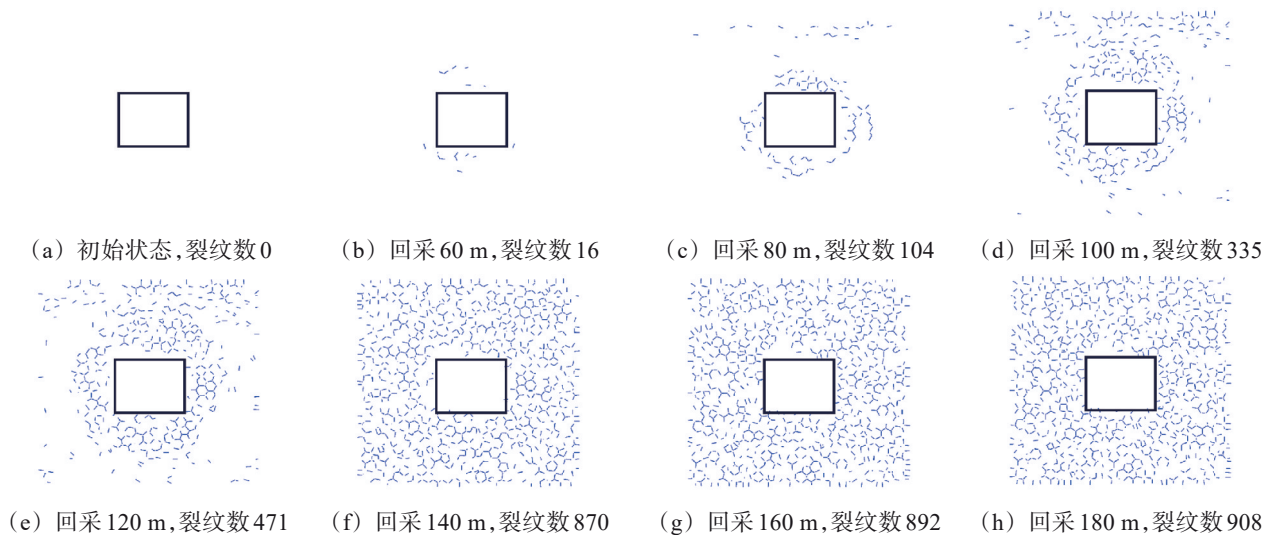


图7 底抽巷围岩裂纹数变化

Fig.7 variation in crack count of surrounding rock in bottom pumping roadway

回采初期,围岩结构相对完整,未见明显裂纹。当回采距离推进至 60 m,裂纹数增至 16,主要集中于顶板与侧帮等应力集中区域,呈孤立的“点”状分布。当回采距离增至 80 m 和 100 m 时,裂纹数分别增至 104 和 335,裂纹由点状逐渐扩展并相互连接,形成沿应力释放方向延伸的“线”型破裂路径,其中巷道顶部和左侧帮区域扩展尤为显著。当回采距离为 120~180 m,裂纹扩展进一步加剧。随着裂纹密度和连通性不断提升,局部区域开始形成“面”状损伤区,顶板与左帮出现大范围贯通性破裂带,破坏性显著增强,裂纹网络进一步向底板与右帮扩展,围岩结构完整性受到严重破坏。该阶段裂纹演化最剧烈,呈现了采动影响下巷道围岩由微观黏结键断裂至宏观结构破坏的动态演化过程。

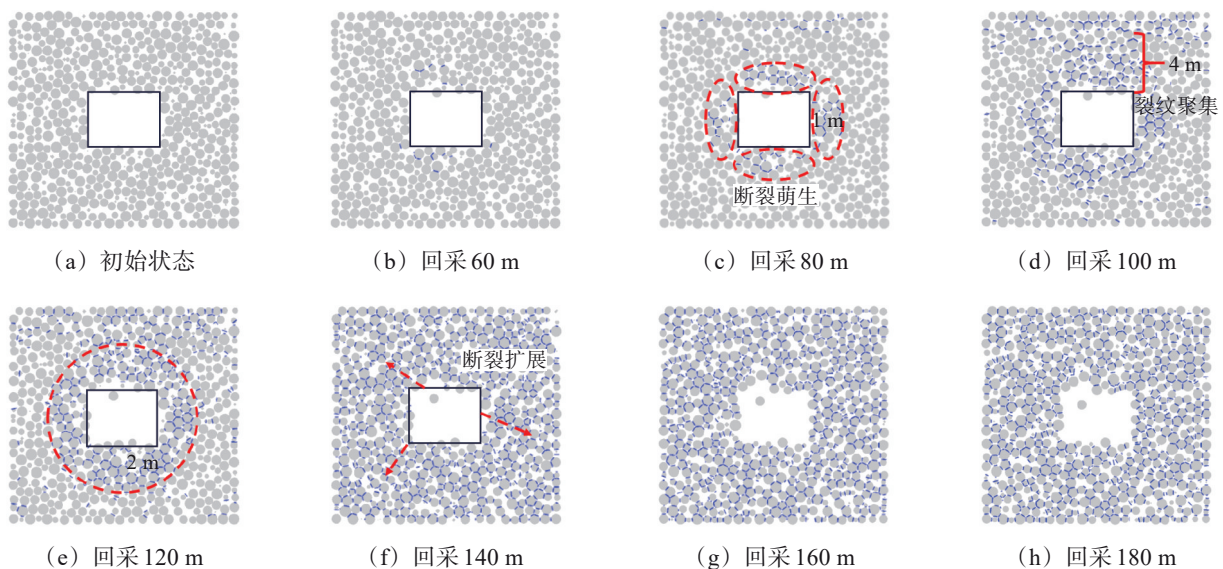


图8 底抽巷围岩裂纹演化

Fig.8 crack evolution of surrounding rock in bottom pumping roadway

3.3 底抽巷围岩位移规律

在 PFC^{3D} 离散元模型中,通过设置三维平行黏结接触模型 (LPB) 来模拟底抽巷围岩的力学行为。三维平行黏结接触模型是一种微观力学模型,能够有效模拟颗粒之间的黏结和断裂行为。随着回采推进,围岩应力重新分布,颗粒间黏结键受力增大。当应力超过黏结键强度时,键断裂,颗粒开始位移。通过分析颗粒位移的演化,可以深入了解围岩在采动影响下的变形和破坏机制。在底抽巷中心截面 ($y=100$ m) 处,不同回采距离下

3.2 底抽巷围岩裂纹拓展规律

底抽巷中心截面 ($y=100$ m) 处离散元颗粒在不同回采阶段的裂纹演化过程见图 8。在回采 60 m 时,裂纹主要出现在巷道顶板及底板 1 m 范围内,表明该阶段顶、底部为应力集中与裂纹萌生的优先区域。随着回采推进至 80 m,裂纹进一步扩展至巷道两帮,整体分布于巷道周围 1 m 范围内,反映采动影响已向侧帮传递。回采至 100 m 时,裂纹在顶板 4 m 内显著聚集,表明围岩内部损伤加剧。回采至 120 m 时,巷道四周 2 m 内裂纹呈均匀分布,标志着裂纹已由微观损伤发展为宏观破坏。回采 140 m 后,裂纹持续向四周扩展,完成从微观断裂到宏观失稳的跨尺度演化过程。该演化规律揭示了采动作用下围岩裂纹的渐进性破坏机制。

离散元颗粒的位移见图 9。回采 40 m 时,底抽巷周围位移为 0.16 m。当回采 80 m 时,底抽巷顶板、左帮的小部分区域的位移达到 0.30 m。当回采推进 120 m 时,随着巷道围岩破坏的加剧,巷道顶板 1 m 范围内的位移量逐渐增加至 0.35~0.40 m。当回采 160 m 时,顶板浅部位移量达到 0.50 m,巷道左帮及右帮最大位移量分别达到 0.37 m、0.26 m。表明底抽巷出现了顶板变形、片帮等现象,且巷道顶板及左帮的位移量明显大于其他位置,这一结果与现场的观测结果吻合。

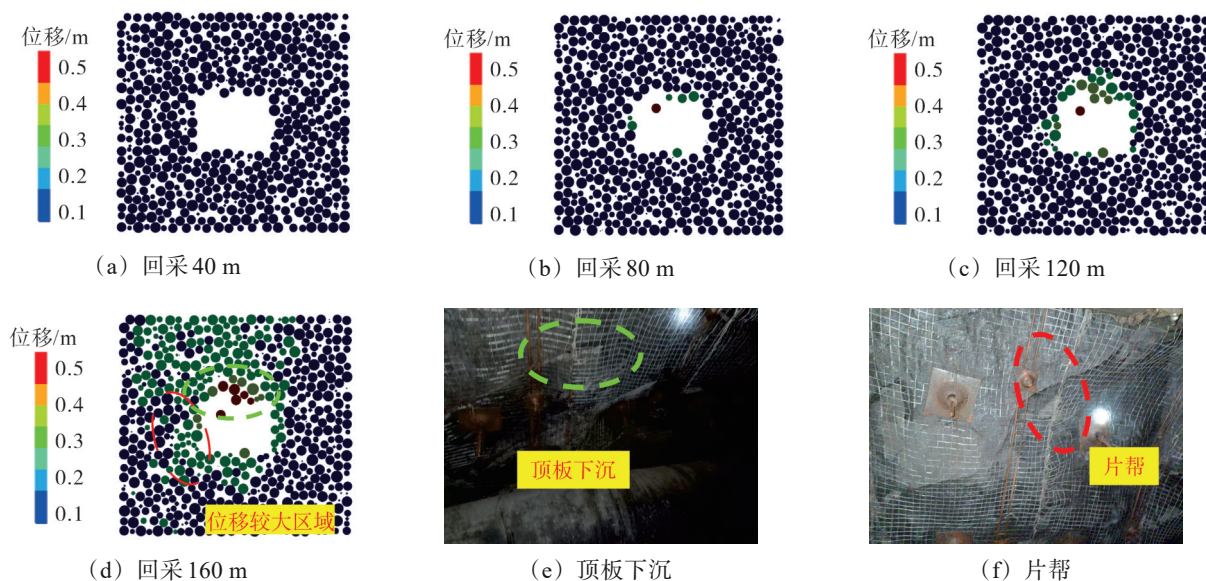


图9 底抽巷围岩离散元颗粒位移云图及实测图

Fig.9 discrete element particle displacement contour map and measured diagram of surrounding rock in the bottom pumping roadway

3.4 底抽巷围岩裂隙分布现场验证

采用钻孔窥视方法对底抽巷顶板围岩破坏严重区域的裂隙发育深度及形态特征进行探测。在距开切眼150 m处的顶板中心位置垂直钻孔,孔深10 m,结果见图10。根据窥视图像可将裂隙发育情况划分为3个典型区域:裂隙发育区域主要集中于顶板浅部约5 m范围内,可见大量贯通性纵向裂隙与环向裂隙相互交错,围岩破碎明显,该区域受上覆煤层回采扰动影响最为剧烈;细微裂隙萌生区域位于顶板5~9 m内,孔壁整体较为完整,可见清晰的双螺旋钻进轨迹,岩性相对稳定,局部有零散分布的微裂隙;煤岩交界区域靠近煤层底板,煤质较为松软但仍保持较好完整性,可清晰辨识钻进轨迹轮廓及煤岩分界位置,孔壁整体处于稳定状态。数值模拟和现场观测均显示裂纹演化具有阶段性和空间分布特征,裂纹从顶板和底板萌生,逐渐扩展至两帮,最终导致巷道的宏观破坏。说明在实际回采过程中,围岩的破坏并非单一的突发过程,而是一个渐进的、有规律可循的动态演化过程。裂纹的跨尺度演化规律对于理解和预测巷道围岩的破坏行为至关重要,为巷道支护设计和灾害预防提供了重要的理论依据。现场观测结果与数值模拟结果基本一致,验证了数值模拟方法的有效性,同时证明了现场观测方法的准确性。

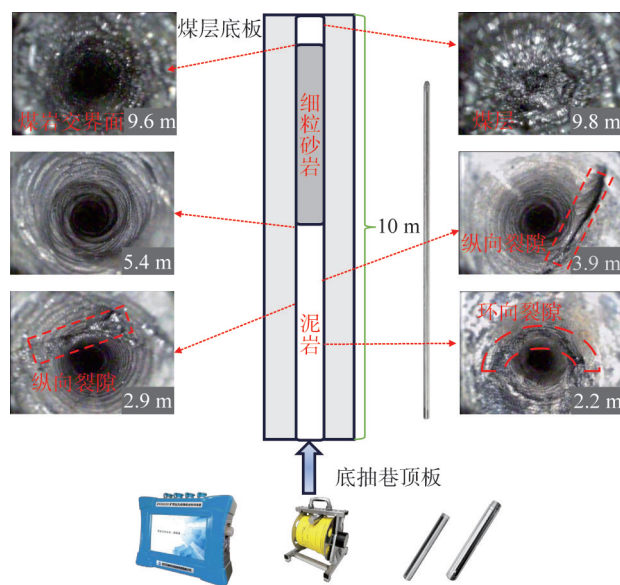


图10 底抽巷顶板钻孔窥视结果

Fig.10 results of borehole inspection in roof of bottom pumping roadway

4 结论

(1) 采用FLAC^{3D}-PFC^{3D}耦合方法研究上覆煤层回采时底抽巷围岩破坏规律,发现颗粒接触力链数量演化呈三阶段特征:初始平稳阶段(0~60 m)围岩结构稳定;快速衰减阶段(60~140 m)采动影响向远场扩展;动态稳定阶段(140~200 m)力链数量趋于稳定,反映围岩损伤累积后达到新的平衡。

(2) 底抽巷围岩裂纹演化呈“点-线-面”的跨

尺度规律:初始阶段以“点”状裂纹萌生为主,集中于顶板与左帮;随采动推进,裂纹发展为“线”型破裂带,最终贯通形成“面”型破碎区。受外错布置影响,破坏呈明显非对称性,裂纹主要分布于左帮与顶板,右帮与底板破坏相对较轻。

(3) 底抽巷顶板及左帮的位移显著大于其他位置。位移演化与裂纹扩展规律一致,均表现出渐进性特征,反映出围岩损伤逐步累积、裂纹渐次贯通的破坏过程,表明在采动影响下围岩变形与破坏之间存在紧密的联动发展关系。

(4) 通过对现场底抽巷顶板围岩裂隙的发育情况进行钻孔窥视,将顶板裂隙发育区域划分为浅部0~5 m的裂隙发育区、5~9 m的细微裂隙萌生区以及9 m外的煤岩交界稳定区。数值模拟与现场观测结果的一致性,验证了模型的可靠性。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,任世华,谢亚辰,等.碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J].煤炭学报,2021,46(7):2197-2211.
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7):2197-2211.
- [2] 康红普,李全生,张玉军,等.我国煤矿绿色开采与生态修复技术发展现状及展望[J].绿色矿山,2023,1(1):1-24.
KANG Hongpu, LI Quansheng, ZHANG Yujun, et al. Development status and prospect of greenmining and ecological restoration technology of coal mines in China[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1):1-24.
- [3] MITTELSTÄDT P, POLLMANN N, KARIMZADEH L, et al. Wastes in underground coal mines and their behavior during mine water level rebound: a review[J]. Minerals, 2023, 13(12): 1496.
- [4] LIU X S, ZHANG Y, FAN D Y, et al. Energy driven mechanism of surrounding rock deformation and failure of mining roadway and classified control technology[J]. Scientific Reports, 2025, 15:15173.
- [5] 贾策,范超军,李胜,等.基于AHP-熵权组合赋权的开拓巷道过陷落柱围岩支护参数优化[J].煤炭科学技术,2025,53(8):187-201.
JIA Ce, FAN Chaojun, LI Sheng, et al. Optimization of support parameters of development roadway passing through collapse column based on AHP-entropy weight combination[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 187-201.
- [6] BAI L B, WU F F, YANG P J, et al. Characteristics of perimeter rock damage in a bottom-pumping roadway under the influence of mining activities and rational location studies: a case study[J]. Applied Sciences, 2024, 14(7): 2727.
- [7] WEI Y H, QIN Z G, JI Z X, et al. Study on the deformation law of surrounding rock of middle bottom pumping roadway under the influence of close distance mining[J]. Academic Journal of Architecture and Geotechnical Engineering, 2024, 6(4): 137-144.
- [8] 林志斌,李元海,高文艺,等.基于PFC^{3D}的深埋圆形巷道变形破裂时效特征分析[J].现代隧道技术,2017,54(2):73-80.
LIN Zhibin, LI Yuanhai, GAO Wenyi, et al. PFC^{3D}-based analysis of the time-dependent characteristics of rock deformation and fracturing around a deeply-buried round tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(2): 73-80.
- [9] MA Q, BAI S Y, ZHANG R X, et al. Research on the deformation and failure law and control technology of surrounding rock in the dense roadway area in footwall of normal fault[J]. Frontiers in Earth Science, 2025, 13: 1517598.
- [10] 贾后省,张志明,刘少伟,等.大倾角极近距离煤层群重复采动巷道围岩破坏规律与控制方法[J].煤炭科学技术,2025,53(2):68-80.
JIA Housheng, ZHANG Zhiming, LIU Shaowei, et al. Research on dissimilation characteristics and control method of failure of surrounding rock in the roadway with repeated mining of steep and ultra-close multiple coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(2): 68-80.
- [11] LIANG N, JIN T, SU D L. Quantitative characterization of damage and the cross-scale evolution mechanism of soft rock under dry-wet cycles[J]. Frontiers in Earth Science, 2024, 12: 1466304.
- [12] 胡高建,杨天鸿,张飞,等.复杂空区群回采围岩破坏模式及区域并行研究[J].采矿与安全工程学报,2017,34(3):565-572.
HU Gaojian, YANG Tianhong, ZHANG Fei, et al. Parallel computing technologies for the failure mode and area of surrounding rock in complex goafs[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(3): 565-572.
- [13] 王昱博.深埋小间距巷道连续-离散耦合分析方法与岩柱破坏特性研究[D].合肥:合肥工业大学,2021:21-25.
- [14] 徐国文,何川,汪耀,等.层状软岩隧道围岩破坏的连续-离散耦合分析[J].西南交通大学学报,2018,53(5):966-973.
XU Guowen, HE Chuan, WANG Yao, et al. Failure analysis on surrounding rock of soft-layered rock tunnel using coupled continuum-discrete model[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(5): 966-973.
- [15] 李永兵,周喻,吴顺川,等.圆形巷道围岩变形破坏的连续-离散耦合分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(9):1849-1858.
LI Yongbing, ZHOU Yu, WU Shunchuan, et al. Deformation and failure of surrounding rock of circular tunnel using coupled continuous-discrete method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1849-1858.
- [16] AYMAN G, FADOUA E K, BOURAIDA E Y, et al. Analysis of seismic dynamic thrust for cantilever retaining walls as affected by sloped backfill and surcharge: from finite element modeling to simplified sliding surface geometry[J]. Journal of Engineering and Applied Science, 2025, 72(1): 160.
- [17] 陈有轩,张志军.基于离散元法的颗粒-气泡间相互作用行为模拟研究[J].煤炭学报,2023,48(3):1403-1412.
CHEN Youxuan, ZHANG Zhijun. Simulation of particle-bubble interaction behavior based on Discrete Element Method[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(3): 1403-1412.