近距离煤层下分层巷道变形破坏机理及控制技术

陈 义，史宏宝，张世锐，刘晓龙

（山西铺龙湾煤业有限公司，山西 大同 037104）

摘要：以铺龙湾煤业 81021 巷为工程背景，探究近距离煤层下分层巷道变形破坏机理及围岩控制机理，分析近距离煤层下分层巷道修护补强方案，并结合现场工业性试验优化相关支护技术参数。研究结果表明：81021 巷两帮表现为剪涨滑移扩容破坏和帮-顶底板界面剪切滑移破坏，两帮煤岩体破碎，帮与顶、底板岩层交界面处发生显著的整体性剪切滑移；两帮变形进一步导致巷道顶板下沉和强烈底臌，顶板及肩窝等处围岩破碎；81021 巷采用锚注一体化支护技术后，巷道围岩总体位移量不大，围岩较为稳定，围岩的承载性能得到显著强化和提升，支护安全性和可靠性大大提高。

关键词：近距离煤层；下分层巷道；强帮支护；围岩控制；工业性试验

中图分类号：TD353 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2024)17－0318－05

煤炭矿井巷道围岩的支护仍然面临许多问题，围岩大变形及其破坏机理是困扰煤炭开采的经典难题[1-2]。近距离煤层下分层巷道围岩稳定性控制问题是由于近距离煤层下分层巷道围岩发生了大变形破坏，导致掘进时巷道周围的应力重新分布产生应力集中，造成巷道围岩变形破坏的围岩控制技术问题[3]。

为了研究巷道围岩应力分布情况，国内外学者大多以损伤断裂理论为基础，对近距离煤层下分层巷道进行深入研究[4-9]。曹远威等[10]以张双楼煤矿 21916 工作面为工程背景，建立了煤层合并区域下分层回采巷道数值模型，研究了 21916 工作面巷道内错 7 煤采空区不同距离时应力和位移分布规律，确定了下分层巷道合理位置；韩正民[11]以磁窑沟 11102 运输巷为工程背景，分析了围岩的变形机理，制定了注浆加固、架棚支护＋锚索、抬棚补强支护方案，现场观测结果表明，补强后顶底板最大位移量 100 mm，两帮最大位移量 140 mm，断面收缩率仅为 5.6%，巷道围岩变形量得到有效控制；董超伟等[12]采用数值模拟的方法研究了分叉煤层下分层回采巷道的合理布置方式，分析了 5 种回采巷道布置的应力分布、围岩变形特征。在近距离煤层下分层巷道围岩破坏机理方面，针对围岩破碎化现象、损伤破坏过程开展了大量的研究，并取得了一系列成果。潘坤等[13]研究了大倾角近距离煤层开采下三种断面形状巷道围岩变形破坏机理，提出了基于巷道围岩塑性区分布的非均匀控制方法，并进行了现场应用，结果表明巷道围岩控制效果良好；张博等[14]针对隆德煤矿近距离煤层上下同采工作面巷道围岩稳定性控制问题，对多次采动影响下巷道支护体受力特征和煤柱应力演化特征进行了研究，并基于现场观测结果，对新掘巷道支护参数进行了优化，实测结果表明，支护参数优化后巷道表面位移量在工程允许范围内，巷道围岩裂隙发育程度较低；郭兴川和郑文贤[15]针对西山煤电西曲矿 14307 综采工作面近距离下伏煤层过上覆采空区遗留煤柱时发生动载矿压的安全问题，在高应力区巷道围岩中打设钻孔，利用水力压裂技术提前破坏遗留煤柱，减弱煤柱边界承压能力，并在现场采用顶板在线监测、巷道围岩观测、锚杆(索)测力计观测等多种手段进行指导和验证，有效解决了近距离煤层综采工作面过上覆采空区煤柱容易发生动压事故的问题。相关的研究还有很多，但大多研究都仅从支护设计和现场试验的角度出发，未从理论的角度对围岩的破坏机理进行深入分析[16-20]。

本文以铺龙湾 81021 巷为工程背景，分析近距离煤层下分层巷道变形破坏机理及围岩控制机理，提出以“锚注一体化”为核心的近距离煤层下分层

收稿日期：2024-04-30

作者简介：陈义(1983—)，男，山西大同人，工程师，研究方向为煤矿生产技术；史宏宝(1986—)，男，山西大同人，工程师，研究方向为采掘技术；张世锐(1969—)，男，山西大同人，高级工程师，研究方向为采掘技术；刘晓龙(1986—)，男，河北张家口人，工程师，研究方向为采掘技术。

巷道修护补强方案,并结合现场工业性试验优化相关支护技术参数。

1　工程地质概况

铺龙湾煤业 81021 巷布置于 5# 煤层 5102 工作面与 5106 工作面之间区段煤柱(图 1)(煤柱宽度 20.1～47.5 m)的正下方,距 5# 煤层法向距离为 18.8～23.8 m,距本煤层(下分层)8106 工作面的区段煤柱宽度为 37.7～54.2 m。

受 5102、5106 及 8106 工作面回采引起的采动应力叠加作用以及 81021 巷掘进时一次支护强度偏低(未充分考虑到相邻工作面采动影响)等因素影响,目前 81021 巷自 L11 到 L16 段(总长度 360 m)已表现出两帮挤出、顶板下沉、底臌、锚杆锚索破断等异常剧烈矿压显现现象,巷道断面收缩量最大超过2 m以上,无法满足矿井 81021 工作面正常安全高效生产的需要,迫切需要对 81021 巷失修围岩进行综合治理。

2　近距离煤层下分层巷道变形破坏情况现场监测

为从宏观角度总体掌握铺龙湾煤业 81021 巷的变形破坏状态,通过现场观测巷道断面形状及尺寸,利用数字照相设备清晰地记录围岩变形与破坏信息,获取巷道表面围岩破碎情况、收敛变形、网兜、底臌、支护失效等典型特征,如图 2 所示,并精细查明 81021 巷的典型变形破坏形态,见表 1。

从表 1 中可以看到,铺龙湾煤业 81021 巷失修段总长为 360 m,两帮最大移近量达到 2 200 mm,两帮移近率达到 47.8%;顶底板最大移近量达到 1 000 mm,顶板底移近率达到 33.3%。81021 巷总体破坏模式为:两帮表现为剪涨滑移扩容破坏和帮-顶底板界面剪切滑移破坏,两帮煤岩体破碎,帮与顶、底板岩层交界面处发生显著的整体性剪切滑移;两帮变形进一步导致巷道顶板下沉和强烈底臌,顶板及肩窝等处围岩破碎。

3　近距离煤层下分层巷道综合修复治理技术方案设计及实施

造成铺龙湾煤业 81021 巷失修的主要原因在于两个方面:一方面是 81021 巷布置处于采动应力高度集中区域,导致围岩剧烈变形与破坏;另一方面是掘进时巷道支护以“强化顶板支护”为主,对巷道帮部支护重视不足。针对上述问题,提出 81021 巷围岩控制机理,并设计符合 81021 巷变形破裂特征巷道综合修复治理技术方案。

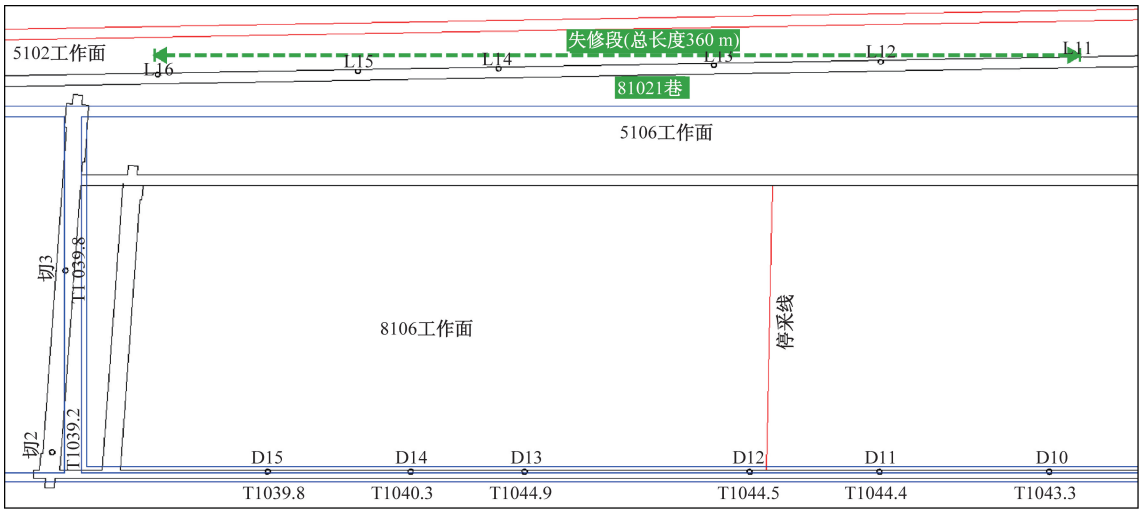


图 1　铺龙湾煤业 81021 巷布置平面图

(a) 底鼓变形　(b) 顶板网包　(c) 顶板下沉

图 2　铺龙湾煤业 81021 巷典型变形破坏现场

表 1　铺龙湾煤业 81021 巷变形破坏情况统计

序号	失修段位置及间距	宽度/mm	高度/mm	两帮移近量/mm	两帮移近率/%	顶底板移近量/mm	顶底板移近率/%	围岩变形破坏情况描述
1	0～28 m(L11 开始)	4 500	2 900	100	2.2	100	3.3	巷道变形开始段，围岩破碎，有锚索破断现象
2	28～38 m/10 m	4500	2 900	100	2.2	100	3.3	左手帮(未补锚索侧)顶板下沉，巷帮挤出
3	38～48 m/10 m	4 200	2 700	300	6.5	300	10.0	
4	48～68 m/20 m	3 600	2 800	1 000	21.7	200	6.7	
5	68～78 m/10 m	3 700	2 400	900	19.6	600	20.0	
6	78～98 m/20 m	3 800	2 600	800	17.4	400	13.3	
7	98～118 m/20 m	3 000	2 800	1 600	34.8	200	6.7	
8	118～128 m/10 m	3 000	2 000	1 600	34.8	1 000	33.3	巷帮挤出严重，底臌
9	128～148 m/20 m	2 700	2 500	1 300	28.3	500	16.7	
10	148～208 m/60 m	2 800	2 500	1 800	39.1	500	16.7	巷帮挤出严重
11	208～228 m/20 m	3 000	2 300	1 600	34.8	700	23.3	巷帮挤出严重，底臌
12	228～248 m/20 m	2 900	2 600	1 700	36.9	400	13.3	
13	248～268 m/20 m	2 400	2 300	2 200	47.8	700	23.3	顶板存在网包，巷帮挤出严重
14	268～288 m/20 m	3 000	2 500	1 600	34.8	500	16.7	
15	288～308 m/20 m	2 700	2 300	1 900	41.3	700	23.3	
16	308～318 m/10 m	2 600	2 500	2 000	43.5	500	16.7	巷帮鼓出严重，局部底臌
17	318～338 m/20 m	3 000	2 500	1 600	34.8	500	16.7	
18	338～358 m/20 m	3 200	2 600	1 400	30.4	400	13.3	
19	358～388 m(L16)/30 m	3 300	2 600	1 300	28.3	400	13.3	巷帮挤出严重

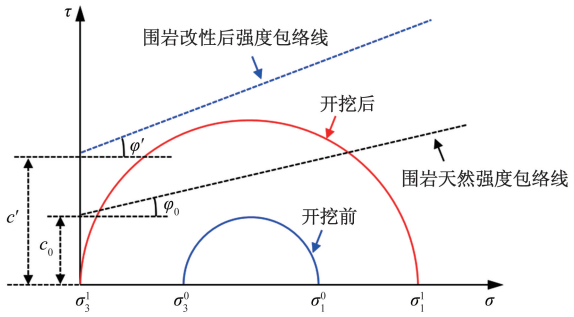
3.1　破碎围岩注浆改性机理

目前，改善软弱破碎围岩力学特性与提高锚固力的行之有效的方法是注浆锚固一体化。其基本原理就是利用注浆锚杆对破裂岩体进行注浆加固，将松散围岩胶结成一个整体，从根本上改变围岩结构及力学性能，最大限度地提高围岩的自承能力，实现主动支护，大大提高软岩巷道支护效果。

当巷道掘进破坏原岩应力平衡状态，调整围岩应力时，巷道周围径向应力消失，切向应力增大，出现应力集中。当集中切向应力超过岩体强度极限时，巷道周围岩体首先受到破坏，产生裂隙。松散破碎带中的岩体是具有一定剩余强度的多裂隙岩体，是塑性带的组成部分。注浆加固是为了改善这一区域内的岩体，使其强度增加，从而使莫尔圆远离岩石强度包络线，如图 3 所示。显然，注浆改性后围岩体的黏聚力 c_0、内摩擦角 φ_0 值提高到加固后的 c'、φ'值，使得围岩体强度包络线上移，倾角增大，超出了开挖后围岩莫尔应力圆直径，因此注浆改性后围岩能够维持稳定。

3.2　近距离煤层下分层巷道围岩综合修复治理对策

基于 81021 巷现场围岩变形破坏情况和具体监测数据，将巷道以两帮和顶底板移近率为 10%分为轻微破坏区段和较重破坏区段，针对这 2 种类型不同破坏程度的巷道分区，提出不同区段围岩控制的具体对策与方案，具体方案如下。



σ_3^0为开挖前最大主应力；σ_3^0为开挖前最小主应力；
σ_1^1为开挖后最大主应力；σ_3^1为开挖后最小主应力

图 3　软弱破碎围岩改性强化控制原理

3.2.1　轻微破坏区段

(1)顶板锚索补强参数。选择规格为 ϕ21.8 mm×9 300 mm 的高强度低松弛预应力钢绞线锚索(1×19 股)，极限破断拉力不低于 607 kN，最大力总延伸率不低于 7%。；托盘选用 300 mm×300 mm×14 mm的高强度可调心托板及配套高强度锁具，材质为 Q235 钢；锚索按照“3-2-3”的方式布置，排距为 1 000 mm，每排布置 3 根锚索时，锚索间距为 1 500 mm；每排布置 2 根锚索时，锚索间距为 2 000 mm；锚索钻孔直径为 29 mm，每根锚索采用 1 卷 MSK2335 和 2 卷 MSZ2360 树脂药卷锚固；锚索预紧力 250 kN，损失后不低于 200 kN。

(2)两帮锚索补强参数。选择规格为 ϕ21.8 mm×6 300 mm 的 19 股高强度低松弛预应力钢绞线，极

限破断拉力不低于 607 kN,最大力总延伸率不低于 7%;托盘采用 300 mm×300 mm×14 mm的高强度可调心托板及配套高强度锁具;每帮每排布置 2 根锚索,锚索间距为 1 200 mm,排距为 1 000 mm;锚索采用 W 型钢带进行连接,钢带宽度 280 mm,厚度 4 mm。

3.2.2　较重破坏区段

(1)顶板锚带网索补强参数。采用顶锚杆+顶锚索+钢筋网+W 钢带联合支护方案。顶板锚杆选择规格为 ϕ22 mm×2 400 mm 左旋无纵筋螺纹钢锚杆,每根锚杆采用两卷树脂药卷加长锚固,1 卷 MSK2335 和 1 卷 MSZ2360;锚杆预紧扭矩要达到 300 N·m,锚杆间距 800 mm,每排布置 6 根锚杆,排距 1 000 mm,顶板护表控制采用钢筋网+W 钢带护表控制方案;锚索支护参数同轻微破坏区顶板锚索支护参数。

(2)两帮锚索补强参数。同轻微破坏区巷道两帮支护参数。

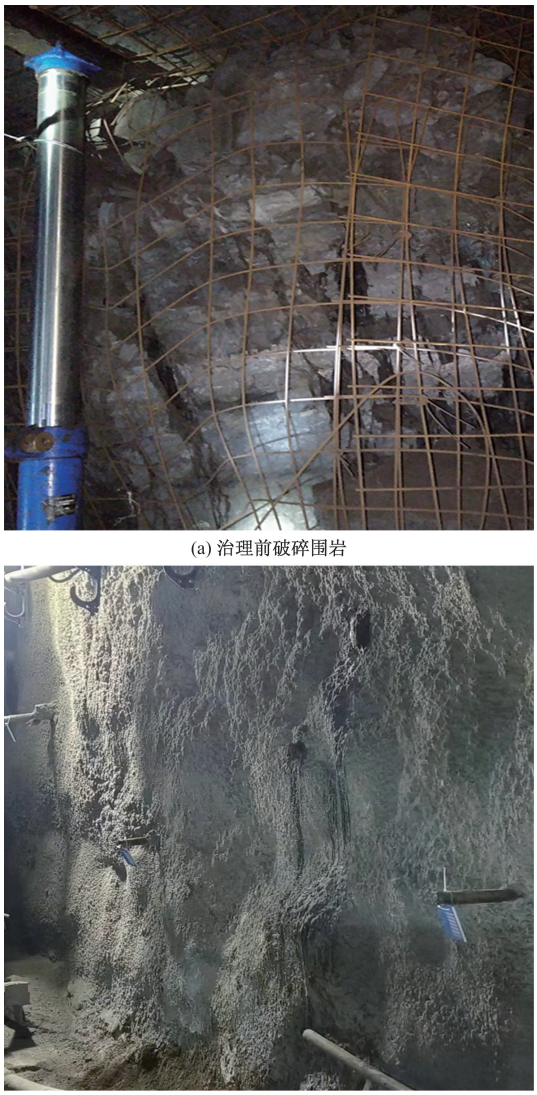
(3)顶/帮喷浆参数。巷道表面喷浆厚度 50 mm,强度为 C20。

(4)顶/帮注浆参数。采用“深浅孔注浆”方式进行加固。两帮选择规格为 ϕ25 mm×2 200 mm 注浆锚杆,顶板选择规格为 ϕ25 mm×2 200 mm 注浆锚杆。

4　近距离煤层下分层巷道修护方案效果分析

为了检验近距离煤层下分层巷道的修护补强效果,采用了巷道注浆智能数字化在线监测系统,实时监测采集全过程注浆信息参数,并将数据无线传输至地面服务器中,利用地面分析软件智能分析与评价注浆效果。

图 4 为 81021 巷采用“超高强一体化锚注”技术后,围岩的修复效果图。可以看出围岩的承载性能得到显著强化和提升,支护安全性和可靠性大大提高,有效控制了巷道形量,为工作面安全高效生产提供了有效的保障。总体而言,81021 巷在“超高强一体化锚注”修护补强技术的有效约束下,巷道围岩总体位移量不大,围岩较为稳定,验证了近距离煤层下分层巷道修护补强方案的有效性。



(a) 治理前破碎围岩

(b) 治理后效果

图 4　铺龙湾煤业 81021 巷围岩修复效果图

5　结论

以铺龙湾煤业 81021 巷为工程背景,探究了近距离煤层下分层巷道围岩破坏机理,分析了围岩控制机理,提出了“锚注一体化”修护补强技术,结合现场工业性试验优化相关支护技术参数,得到了如下结论。

(1) 81021 巷总体破坏模式为:两帮表现为剪涨滑移扩容破坏和帮-顶底板界面剪切滑移破坏,两帮煤岩体破碎,帮与顶、底板岩层交界面处发生显著的整体性剪切滑移;两帮变形进一步导致巷道顶板下沉和强烈底臌,顶板及肩窝等处围岩破碎。

(2) 提出了“锚注一体化”为核心的近距离煤层下分层巷道修护补强技术,并开展了现场工业性试验。现场监测结果表明,81021 巷采用“锚注一体化”技术后,巷道围岩总体位移量不大,围岩较为稳定,围岩的承载性能得到显著强化和提升,支护安全性和可靠性大大提高,有效控制了巷道形量,为工作面安全高效生产提供了有效的保障。

参考文献

[1] 侯公羽，梁金平，李小瑞. 常规条件下巷道支护设计的原理与方法研究[J]. 岩石力学与工程学报，2022，41(4)：691-711.

[2] 单仁亮，彭杨皓，孔祥松，等. 国内外煤巷支护技术研究进展[J]. 岩石力学与工程学报，2019，38(12)：2377-2403.

[3] 鲍久圣，李玥锋，周恒，等. 深部煤炭流态化开采装备自主行走机构多缸推进同步控制[J]. 煤炭科学技术，2024，52(2)：264-278.

[4] 田泽黎. 基于煤炭智能化开采关键技术的研究[J]. 内蒙古煤炭经济，2024(1)：28-30.

[5] 凌红兵. 浅谈下分层巷道掘进顶板控制[J]. 机械管理开发，2016，31(5)：109-110，174.

[6] 陈顺惠. 耦合支护机理在旗山煤矿下分层巷道应用[J]. 煤炭科技，2016(1)：81-83.

[7] 任兆星. 近距离煤层下分层回采巷道支护技术探讨[J]. 当代化工研究，2019(10)：67-68.

[8] 王富忠. 近直立特厚煤层不同段高巷道合理布置分析[J]. 内蒙古煤炭经济，2021(14)：1-5.

[9] 王辉. 近距离煤层下分层巷道安全掘进技术[J]. 煤炭工程，2018，50(S1)：47-49.

[10] 曹远威，贺虎，刘汉磊，等. 深部近距离煤层群下分层巷道分区支护技术[J]. 煤炭技术，2024，43(3)：1-5.

[11] 韩正民. 近距离下分层临近采空区巷道支护技术研究[J]. 煤炭与化工，2022，45(12)：8-11.

[12] 董超伟，张卫清，黄鹏，等. 大倾角分叉煤层下分层回采巷道合理布置方式研究[J]. 矿业研究与开发，2020，40(7)：4-11.

[13] 潘坤，鞠文君，王俊超，等. 大倾角近距离煤层综采运输巷断面形状与支护参数优化[J/OL]. 煤炭科学技术，1-11[2024-06-18]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20240509.1326.002.html.

[14] 张博，冯宇，刘芳，等. 近距离煤层多次采动影响巷道围岩破坏特征与控制[J]. 陕西煤炭，2024，43(5)：29-34.

[15] 郭兴川，郑文贤. 近距离煤层综采工作面过上覆采空区煤柱技术研究[J]. 山东煤炭科技，2024，42(3)：16-19.

[16] 刘森. 浅埋厚煤层软岩巷道支护参数设计及应用[J]. 煤矿现代化，2024，33(2)：121-124.

[17] 张学亮. 浅埋厚煤层下分层综放面巷道布置研究[J]. 中国煤炭，2016，42(12)：50-54，44.

[18] 师伟. 关于煤矿开采技术与掘进支护技术探讨[J]. 西部探矿工程，2024，36(2)：95-97.

[19] 张涛，吴阳阳，张恒. 采空区下下分层巷道锚杆支护技术研究[J]. 内蒙古煤炭经济，2023(4)：55-57.

[20] 王杰. 大埋深厚硬顶板下分层工作面回采巷道布置优化研究[J]. 山西冶金，2022，45(1)：104-107.

Deformation and Failure Mechanism and Control Technology of Slicing Roadway under Close Coal Seam

CHEN Yi, SHI Hongbao, ZHANG Shirui, LIU Xiaolong

(Shanxi PU Longwan Coal Industry Co.,Ltd., Datong 037104, Shanxi, China)

Abstract: 81021 roadway in Pulongwan coal industry is taken as the engineering background, the deformation and failure mechanism of sub-level roadway and the surrounding rock control mechanism of strong wall support under close-range coal seam are studied, and the repair and strengthening scheme of sub-level roadway under close-range coal seam is analyzed,. The results show that the two sides of 81021 roadway are characterized by dilatancy-dilatancy failure, shear-slip failure of the wall-roof-floor interface, and fracture of coal and rock mass, the deformation of both sides leads to the subsidence of roof and strong floor heave, and the surrounding rock is broken at roof and shoulder socket 81021 roadway adopted super-high strength integrated bolting and grouting technology, the total displacement of roadway wall rock is small, wall rock is relatively stable, wall rock bearing capacity has been significantly strengthened and improved, the safety and reliability of support are greatly improved.

Keywords: close coal seam; lower slicing roadway; strong slope support; surrounding rock control; industrial test