

复合顶板浅埋大断面巷道围岩支护优化

Optimization of Surrounding Rock Support for Shallow-buried Large-section Roadways with Composite Roof

司金帅, 惠张宾, 王琪 (鄂托克前旗长城煤矿有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 016200)

摘要:为解决浅埋大断面复合顶板巷道围岩变形量大问题,以2301回风巷为研究对象,对回风巷原锚网索支护围岩控制效果较差原因进行分析,针对性给出以顶板注浆、锚网索为主的优化支护技术方案并进行工程应用。利用长锚杆、长锚索提高围岩支护强度,通过中空注浆锚杆注浆增强复合顶板完整性及抗变形能力,同时通过钢筋网、喷浆方式进一步提升护表强度。现场应用后,2301回风巷支护完成120 d后围岩变形量基本不再增加,顶底板、两帮变形量最大分别为191、117 mm,围岩控制效果较好。

关键词:浅埋煤层;复合顶板;大断面巷道;围岩支护

中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)04-0063-06

Abstract: In order to solve the problem of large deformation of surrounding rock in shallow buried large section composite roof roadway, the 2301 return air roadway is taken as the research object. The reasons for the poor control effect of the original anchor mesh cable support surrounding rock in the return air roadway are analyzed. Targeted optimization support technology schemes mainly based on roof grouting and anchor mesh cable are proposed and applied in engineering. Using long anchor rods and cables to improve the strength of surrounding rock support, enhancing the integrity and deformation resistance of composite roof through hollow grouting anchor rod grouting, and further improving the surface protection strength through steel mesh and grouting methods. After on-site application, the deformation of the surrounding rock did not increase significantly after 120 days of completion of the 2301 return airway support. The maximum deformation of the roof, floor, and two sides were 191 and 117 mm, respectively, indicating good control effect on the surrounding rock.

Key words: shallow buried coal seam; composite roof panel; large section roadway; surrounding rock support

1 前言

浅部煤层往往具备有瓦斯含量低、地应力显现不明显等特点,开采难度及成本相对较低^[1-2]。但是当浅部煤层顶板为松软的复合顶板时,采掘工作面面临顶板管理难度大、容易冒落等难题,确保顶板稳定是浅埋复合顶板煤层开采时需解决的现实问题^[3-5]。同时为满足机械设备、煤炭运输等需要,井下回采巷道断面不断增大,会进一步加剧复合顶板支护难度^[6-8]。为此,众多学者对浅埋大断面复合顶板巷道围岩变形机理及控制技术进行研究,其中王广勇^[9]以梧桐庄矿182705回风巷道掘进为工程背景,分析复合顶板条件下锚网索支护失效原因,主要是由于锚杆长度小、锚固端位于复合顶板软岩夹层中,锚杆无法有效控制岩层变形,同时锚索支护密

度过大、提供悬吊作用力偏低,从而导致回风巷道围岩出现较大变形,为此提出采用高预紧力锚索控制回风巷道围岩变形,顶板综合采用 $\phi 20\text{ mm} \times 3\ 500\text{ mm}$ 钢绞线短锚索 + $\phi 21.6\text{ mm} \times 7\ 000\text{ mm}$ 钢绞线长锚索 + 钢筋网、双抗塑料网方式控制围岩变形,利用锚索施加的高预紧力控制顶板岩层层层量及变形量,现场应用后182705回风巷道支护完成60 d内围岩变形趋于稳定,顶板最大下沉量为40 mm;张辉、贾后省等^[10]为提升弱黏结复合顶板巷道围岩支护针对性,融合巷道冒顶隐患分级判定方法,以冒顶控制的核心的锚杆(索)支护计算方法等,给出不同冒顶隐患巷道分级支护计算方法,并在李家壕2-2中煤11211运输巷围岩支护中进行工程应用,现场应用后不仅可实现弱粘结复合顶板巷道围岩变形有效控制,而且可降低支护成本、提升支护参数设计针对性;王君^[11]以斜沟煤矿浅埋煤层泥岩-黏土复合顶板巷道掘进为工程研究背景,综合采用试验分析、理论研究、数值模拟等技术方法分析复合顶板力学响应特征、受力变形表达式及围岩应力

[作者简介] 司金帅(1989—),男,汉,工程师、注册安全工程师,主要从事煤矿安全管理工作。

[引用格式] 司金帅,惠张宾,王琪. 复合顶板浅埋大断面巷道围岩支护优化[J]. 中国矿山工程,2025,54(4):63-68.

变化规律等,并发现含水率、黏土层位可显著影响巷道顶板变形,提出采用锚杆+短锚索进行一次支护、长锚索进行滞后二次支护方法控制围岩变形,在斜沟煤矿18511材料巷进行工程应用后,巷道顶底板、两帮移近量分别控制在141、135 mm以内,工程应用效果显著。上述研究成果为复合顶板巷道围岩控制提供了宝贵借鉴经验,但是由于不同矿井间煤层赋存条件、顶板岩性等均有明显差异,上述支护方案均不具备普遍适用性,且多数支护方案均会不同程度增大支护成本、增加支护耗时(影响掘进效率)。为此,本文就以西北地区某煤矿2301回风巷为研究对象,针对性给出浅埋大断面巷道复合顶板围岩支护技术方案,现场应用后围岩控制效果较好,可满足2301采煤工作面安全高效回采需要。

2 工程概况

2.1 地质概况

西北地区某矿2301采煤工作面为3采区首个回采工作面,工作面北侧为采区回风及运输巷,其余三个方向均为实体煤,工作面走向长度为1 856 m、倾向长度为258 m。2301采煤工作面回采的2[#]煤层赋存稳定,煤层埋深均值为186 m,煤厚在2.9~4.3 m、均值为3.6 m,煤层倾角3°~16°。2[#]煤层顶板、底板岩层均较为松软,其中顶板由泥岩、炭质泥岩、砂质泥岩、细粒砂岩等组成,直接顶为厚度

2.65 m的泥岩、炭质泥岩互层,遇水容易膨胀变形,松软,普氏硬度(f)=0.7~1.2;直接顶为厚度3.5~5.7 m的砂质泥岩、细粒砂岩互层,层间裂隙发育,铺设硬度(f)=1.7~3.2;2[#]煤层顶板为典型的复合顶板,承载能力及稳定性较差。煤层底板为砂质泥岩、粉砂岩,其中直接底为厚度均值2.4 m的砂质泥岩,遇水容易膨胀变形,松软,普氏硬度(f)=1.0~1.9;基本底为厚度均值4.8 m的粉砂岩,质地坚硬,普氏硬度(f)=4.1~5.9。2[#]煤层采掘期间顶板会出现少量淋水,水源主要为顶板砂岩裂隙水,该含水层赋水性较差,淋水量一般在0.6~2.5 m³/h,淋水会给巷道顶板控制带来一定影响。

根据已有的钻探及物探等资料显示,2301采煤工作面回采区域内地质构造发育,工作面分布有多条落差在0.5~2.6 m的正断层,在断层影响内构造应力复杂、煤岩体破碎,对煤炭回采有一定影响。

2.2 巷道围岩支护情况

2301采煤工作面回风巷采用综掘方式掘进,配备的主要掘进及运输设备为:EBZ-200型综掘机、DZQ80/30/15型桥式皮带转载机、GD-1000型带式输送机,采用局部通风机+ ϕ 800 mm阻燃风筒供风,配风量为380 m³/min。2301回风巷沿着2[#]煤层顶板掘进,矩形断面,巷宽 \times 巷高=5 200 mm \times 3 600 mm,矩形断面,围岩采用锚网索喷联合支护方式,具体巷道支护设计如图1所示。

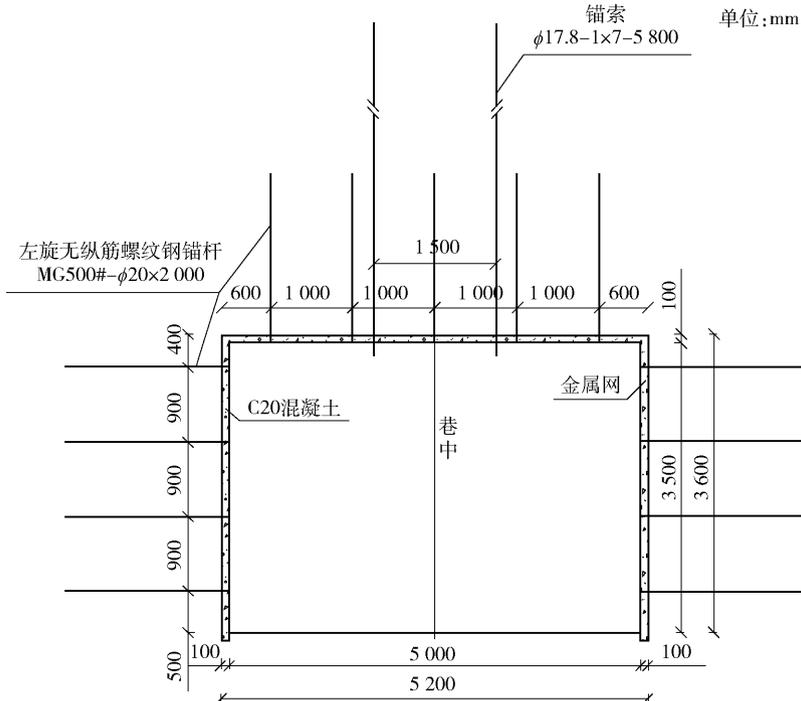


图1 回风巷支护示意图

2301 回风巷顶板采用锚杆 + 锚索 + W 钢带 + 钢筋网 + 喷浆支护方式、巷帮采用锚杆 + 钢筋网 + 喷浆支护方式,具体围岩支护用锚杆、锚索等布置参数见表 1。回风巷顶板一排布置 5 根锚杆,均垂直顶板布置;顶板及巷帮均铺设镀锌铁丝钢筋编制的金属网,网孔 50 mm × 50 mm,网片规格为 2 400 mm × 1 200 mm。

表 1 回风巷原支护参数

支护材料	支护参数	
	直径 × 长度/mm × mm	间排距/mm × mm
锚杆(高强螺纹钢)	φ20 × 2 000	1 000 × 800
锚索(预应力)	17.8 × 5 800	1 500 × 1 600
锚杆托盘	150 × 150 × 10	
锚索托板	300 × 300 × 14	

2301 回风巷在支护完成出现顶板、巷帮变形量大、喷浆层破坏以及顶板金属网网兜等问题,同时部分位置支护用锚杆失效、锚索钻孔出现淋水情况。现场监测顶板、两帮最大变形量分别为 590 mm、456 mm,围岩变形长期不能收敛。现场情况表明,在 2301 回风巷采用的支护方案无法控制围岩变形,因此需要优化巷道支护方案,提高支护强度及稳定性,确保可满足巷道掘进及工作面后续下回采需要。

3 回风巷围岩支护失效分析

3.1 顶板岩层破坏情况

在 2301 回风巷顶板布置钻孔,采用钻孔窥视仪掌握的顶板岩层破坏及裂隙扩展情况,以便分析回风巷原支护存在问题并为后续支护优化提供指导。具体回风巷顶板钻孔窥视结果如图 2 所示。

从图 2 看出:①回风巷顶板浅部岩层破碎、裂隙

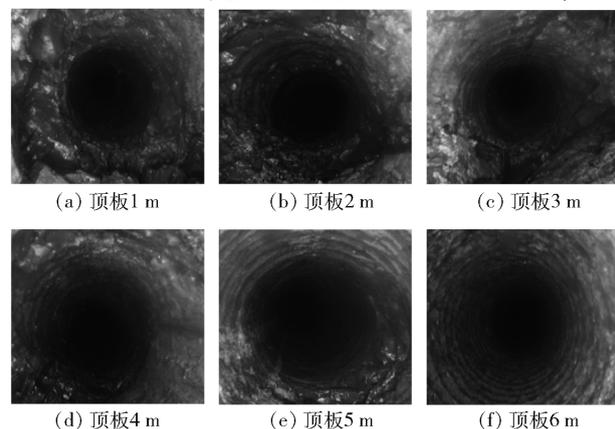


图 2 回风巷顶板窥视结果

扩展,深部岩层稳定性及完整性较好;②巷道顶板上覆 0 ~ 3 m 范围内岩体裂隙发育、较为破碎,稳定性及完整性均较差;③巷道顶板上覆 4 ~ 5 m 范围内岩体发育有裂隙,虽然岩性整体较为完整,但是承载能力偏低;④巷道顶板 7 m 以上范围内裂隙不发育、岩体完整,承载能力及稳定性均较强。从顶板钻孔窥视结果表明,回风巷浅部岩层破碎、承载能力及稳定性较差,岩层在掘进扰动及围岩应力重新分布等叠加影响下容易出现破碎、离层情况,从而导致顶板出现较大变形。

3.2 围岩支护失效因素

2301 回风巷顶板为复合顶板、岩层裂隙发育且承载能力较差,在原支护方案下运输巷围岩出现较大变形,分析巷道围岩支护失效的主要原因为:

(1) 围岩松软。回风巷顶板为泥岩、砂质泥岩、细粒砂岩等组成的复合顶板,层间裂隙发育且岩体松软、完整性较差,在巷道掘进扰动等影响下容易出现较大离层、变形。

(2) 巷道断面大。回风巷为矩形断面,巷宽 × 巷高 = 5 200 mm × 3 600 mm,巷道跨度较大,会加剧围岩破碎区、塑性区扩展,导致局部围岩应力集中,支护体系失效,严重时甚至出现顶板冒落事故。

(3) 地质构造分布复杂。2301 回风巷埋深较浅,但是巷道掘进区域地质构造发育,在地质构造影响区内构造应力发育、煤岩体破碎,会进一步增大回风巷围岩控制难度。

(4) 原支护设计不合理。2301 回风巷原支护参数不合理,具体表现为锚杆支护效果差(长度较短、锚固端不在稳定岩层中)、锚索无法有效控制顶板岩层离层,顶板原有的锚杆及锚索无法控制浅部围岩破碎区扩展,进而导致支护用锚杆失效,加剧回风巷围岩严重变形。

4 巷道围岩支护优化及工程应用效果分析

4.1 围岩支护优化方案

大量工程实践及研究成果表明^[12-15],复合顶板巷道顶板下沉变形主要包括下述 2 部分:①围岩应力重新分布引起的顶部岩层弹性及塑形变形;②顶板岩层力学性质差异引起的层间离层,此部分变形是复合顶板变形的组成部分。控制顶板离层有助于维护复合顶板巷道围岩稳定。

针对 2301 回风巷在围岩承载能力偏低、顶松软

复合顶板、围岩破碎及地质构造发育等多因素影响,导致巷道支护用锚杆失效,从而引起顶板较大离层、巷帮煤岩体出现较大变形问题。因此,提高围岩稳定性、减少顶板岩层离层量、充分发挥锚杆支护及锚索悬吊效果,是实现回风巷围岩变形控制的关键。

为此,提出采用中空注浆锚杆对围岩进行注浆,从而提升浅部围岩完整性及与锚杆耦合效果;适当增加锚索长度,使得锚索锚固端位于顶板深部稳定岩层中,充分发挥锚索悬吊效果,减少顶板岩层离层量及变形量。具体2301回风巷围岩支护优化设计如图3所示。

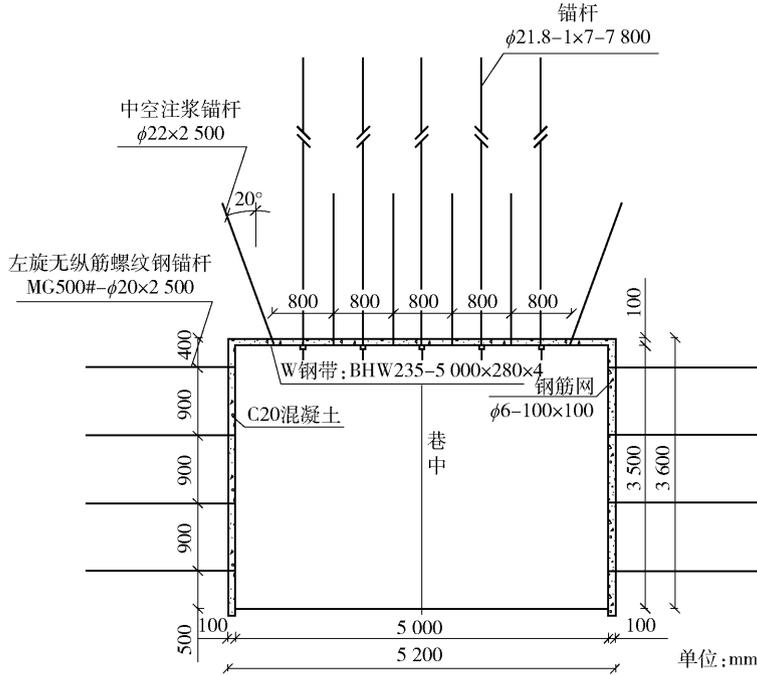


图3 回风巷围岩支护优化示意图

2301回风巷围岩采用中空注浆锚杆、高预紧力锚索、W钢带、钢筋网、喷浆等方式优化支护围岩,具体支护设计为:

(1)顶板采用 $\phi 22\text{ mm} \times 2\ 500\text{ mm}$ 中空注浆锚杆,一排布置6根,间排距为 $800\text{ mm} \times 900\text{ mm}$,中部4根锚杆均垂直顶板布置,靠近两帮锚杆有 20° 外插角,锚杆端头有1卷CK2335+1卷Z2360树脂锚固剂锚固,配套长 \times 宽 \times 厚= $170\text{ mm} \times 170\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 钢托盘;一排6根锚杆用长 \times 宽 \times 厚= $5\ 000\text{ mm} \times 280\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的W钢带连接;锚杆注浆用水灰比(质量比) $1:0.8$ 的水泥浆,注浆压力 $1\sim 3\text{ MPa}$ 。

(2)顶板一排布置5根 $\phi 21.8\text{ mm} \times 7\ 800\text{ mm}$ 钢绞线锚索,垂直顶板布置,间排距为 $800\text{ mm} \times 1\ 800\text{ mm}$,锚索端头用1卷CK2335+2卷Z2360树

脂锚固剂锚固,配套用长 \times 宽 \times 厚= $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 16\text{ mm}$ 钢托盘,锚索施加 180 kN 以上预紧力。

(3)巷帮一排布置4根 $\phi 20\text{ mm} \times 2\ 500\text{ mm}$ 高强螺纹钢锚杆,间排距为 $900\text{ mm} \times 900\text{ mm}$,端头用1卷CK2335+1卷Z2360树脂锚固剂锚固,配套长 \times 宽 \times 厚= $170\text{ mm} \times 170\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 钢托盘。

(4)在巷道顶板及巷帮均铺设 $\phi 6\text{ mm}$ 钢筋焊接加工的钢筋网,网孔为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,钢筋网用锚杆托盘压紧,确保钢筋网与顶板、巷帮紧密接触。

(5)在顶板及巷帮均喷射C20混凝土,厚度为 100 mm ,提高护表强度并及时密闭围岩。具体支护优化锚杆、锚索等材料规格见表2。

表2 优化支护材料规格

项目	规格/mm	类型	锚固剂	间排距/mm	材质
顶锚杆	$\phi 22 \times 2\ 500$	中空注浆锚杆	1卷CK2335+1卷Z2360	800×900	
帮锚杆	$\phi 21.8 \times 7800$	实心螺纹钢锚杆	1卷CK2335+1卷Z2360	$800 \times 1\ 800$	杆体为左旋螺纹钢锚杆
顶锚索	$\phi 20 \times 2\ 500$	钢绞线	1卷CK2335+2卷Z2360	900×900	1×7 钢绞线,极限抗拉强度为 $1\ 870\text{ MPa}$
钢筋网	网孔: 100×100	钢筋焊接加工	-	-	$\phi 6\text{ mm}$ 钢筋

4.2 围岩支护优化效果分析

1) 围岩变形监测结果

在2301回风巷围岩支护优化段按照200 m间距布置1[#]、2[#]测点,通过十字交叉法跟踪监测围岩变形情况,以便分析围岩支护优化效果。测点监测时间为180 d,具体监测结果如图4所示。

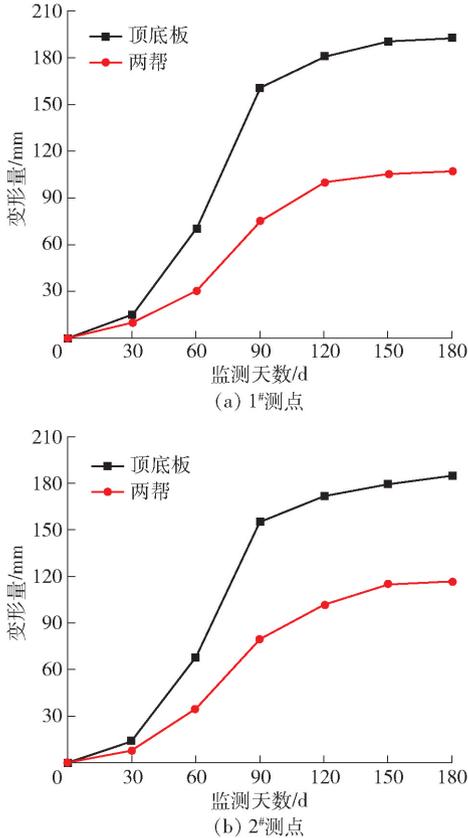


图4 优化后回风巷围岩变形监测曲线

从图4可以看出:①2301回风巷在支护完成90 d内围岩变形量增加速度较快,支护完成120 d后围岩变形量逐渐趋于稳定;②在整个监测期间,1[#]及2[#]测点围岩变形监测曲线变化趋势相近,其中1[#]测点顶底板、两帮变形量最大分别为191 mm、108 mm,2[#]测点顶底板、两帮变形量最大分别为184 mm、117 mm,两个测点围岩变形量整体均较小;③回风巷围岩整体保持稳定,顶板未出现喷浆层破裂、淋水情况,支护用锚杆及锚索未出现失效情况。

现场实践表明,2301回风巷采用的围岩支护优化方案效果显著,可实现大断面复合顶板巷道围岩变形有效控制,为巷道掘进及后续煤炭回采创造良好条件。

2) 锚杆(索)拉力分析

在2301回风巷内1[#]、2[#]测站监测顶板锚杆、锚

索拉力,具体锚杆拉力监测结果如图5所示,锚索拉力监测结果如图6所示。

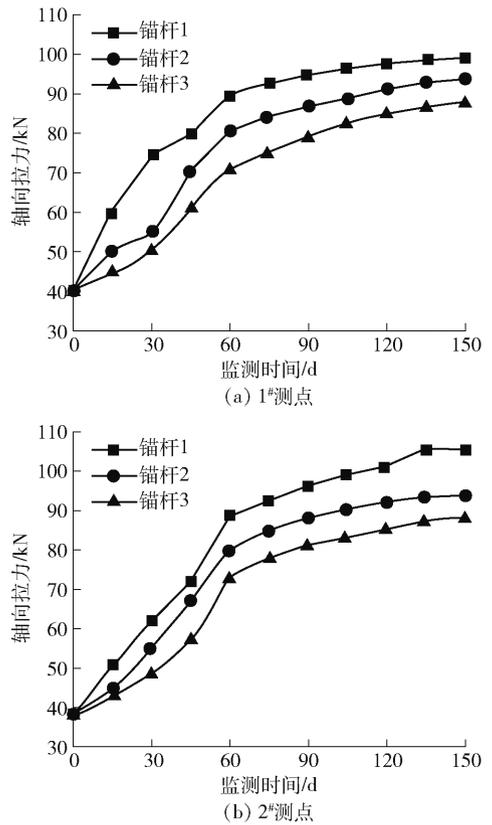


图5 锚杆拉力监测结果

从图5可以看出:①顶板锚杆拉力在支护完成初期快速增加,特别是在支护完成30~60 d内锚杆拉力增加速度较快;②随着支护时间不短增大,锚杆拉力呈现逐渐稳定,稳定在89~106 kN;③锚杆拉力小于锚杆端头锚固力及杆体破断力,表明锚杆可充分发挥支护作用,抑制顶板岩层持续变形。

从图6可以看出:①锚索拉力整体呈现初期快速增大,随后增大速度逐渐放缓,最后拉力趋于平稳;②在回风巷支护初期,锚索拉力快速增大,特别是支护完成30~60 d内拉力增大特别显著;③支护完成60 d后锚索拉力逐渐趋于稳定,最终锚索拉力值稳定在262~350 kN;④锚索拉力值分布稳定,表明锚索悬吊效果显著,可充分抑制顶板岩层离层,维护复合顶板结构稳定。

锚杆及锚索受力监测结果表明,通过融合采用中空注浆锚杆、高预紧力锚索,可有效提升顶板复合岩层稳定性、提升支护体系与顶板岩层耦合效果;锚杆及锚索均可有效发挥支护作用。

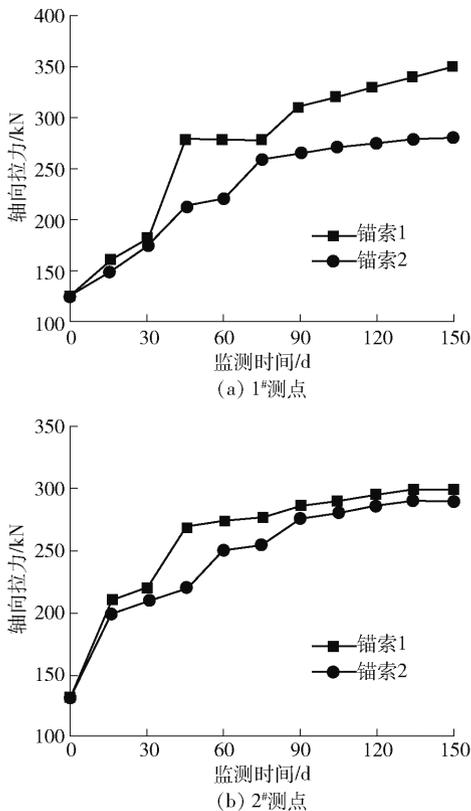


图6 锚索拉力监测结果

5 结论

2301回风巷顶板岩层以由泥岩、砂质泥岩、细粒砂岩等组成,顶板为典型的复合顶板,承载能力及稳定性较差,巷道原采用锚网索喷联合支护方式,现场应用期间表明出围岩变形量大、长期不能收敛问题。本文就分析2301回风巷原支护存在问题、巷道围岩变形特征并针对性给出围岩支护优化技术方案,具体要求研究取得如下成果:

(1)2301回风巷为浅埋大断面复合顶板巷道,原采用的锚网索喷方式无法有效控制巷道围岩变形,给巷道掘进及后续工作面煤炭回采带来制约。结合现场情况分析围岩松软、巷道断面大、地质构造分布复杂、原支护设计不合理等是导致回风巷出现较大变形的主控因素。

(2)结合2301回风巷现场情况及围岩变形因素分析结果,提出采用中空注浆锚杆加固顶板浅部破碎岩体、提高顶板稳定性,适当增大顶板锚索长度及支护密度,减少顶板离层量及围岩变形量;巷帮采用长锚杆提高支护效果;利用钢筋网及喷浆提高

护表效果。

(3)现场应用后,2301回风巷支护优化段围岩控制效果显著,顶板及巷帮变形量均较小。在2301回风巷采用的支护方案围岩控制效果较好,支护效率较高,可为其他类似巷道围岩优化支护提供经验借鉴。

【参考文献】

- [1] 郭雨泽. 浅埋煤层复合顶板无煤柱回采巷道支护技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2019.
- [2] 叶敏杰,李英明,黄晨瑞,等. 基于 UDEC 的复合顶板端面冒顶影响因素研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(3): 90-97.
- [3] 张晓昆. 浅埋煤层回采巷道变形破坏特征与围岩控制研究[J]. 山西化工, 2022, 42(9): 107-108.
- [4] 邓亮. 近距离煤层采空区下伏复合顶板沿空巷道锚索破断机理及控制技术[D]. 徐州:中国矿业大学, 2021.
- [5] 潘坤. 南山矿复合顶板采动巷道围岩破坏形态与控制技术[D]. 焦作:河南理工大学, 2021.
- [6] 王巍. 薄基岩浅埋深复合顶板综采面过沟期间的回采技术[J]. 陕西煤炭, 2019, 38(S1): 98-101+106.
- [7] 张旭光. 巷道软弱顶板强力支护-喷浆封闭联合控制技术研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(9): 9-11.
- [8] 王军. 浅埋近距离煤层回采巷道围岩结构力学模型及控制技术研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2018.
- [9] 王广勇. 复合顶板高预应力全锚索围岩控制技术研究[J]. 现代矿业, 2023, 39(4): 179-182.
- [10] 张辉,贾后省,冯井龙,等. 弱粘结复合顶板煤巷锚杆(索)支护设计方法研究[J]. 中国煤炭, 2015, 41(7): 50-54.
- [11] 王君. 浅埋泥岩-黏土复合顶板煤巷围岩失稳机理及控制研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2022.
- [12] 高小峰,裴越. 含泥岩夹层复合顶板巷道变形机理及支护优化研究[J]. 能源技术与管理, 2024, 49(6): 97-100.
- [13] 常聚才,郭钊君,吴博文,等. 深部沿空掘巷含软弱夹层顶板离层破坏特征及控制研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 88-102.
- [14] 陆凌峰. 深部复合顶板巷道围岩变形破坏特征及锚索支护力学机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2024.
- [15] 李臣,鱼琪伟,连小勇,等. 基于蝶形理论的工作面超前钻孔解危机理与应用[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(5): 61-66+74.