

高强支护工艺在矿井采掘工艺中应用模拟研究

Simulation Study on the Application of High-strength Support Technology in Mining and Excavation Processes

曹 臣, 李向福, 陈 昌 (内蒙古黄陶勒盖煤炭有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017399)

摘要:西北地区某矿15210工作面运输巷道存在支护强度不足、围岩失稳的问题。针对巷道支护存在的问题,采用高强预应力锚固技术进行治理,数值模拟研究分析普通锚杆和高强预应力锚杆支护技术实施后围岩应变情况。研究表明高强预应力锚杆支护技术可将围岩应变控制在60 mm,支护效果良好。为确保巷道支护过构造依旧安全可靠,提出锚杆+锚索组合支护,U型钢增强支护,支护完成后对支护区域顶板和两帮位移量进行考察,考察结果知顶板120 d最大位移量126 mm,巷道整体稳定。

关键词:高强预应力锚杆;数值模拟;增强支护

中图分类号: TD355 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)05-0046-06

Abstract: There are problems with insufficient support strength and unstable surrounding rock in the transportation roadway of the 15210 working face in a mine in northwest China. To address the issues with roadway support, high-strength prestressed anchoring technology is adopted for treatment. Numerical simulation was used to study and analyze the strain of surrounding rock after the implementation of ordinary anchor rod and high-strength prestressed anchor rod support technology. The research results showed that the high-strength prestressed anchor rod support technology can control the strain of surrounding rock within 60 mm, and the support effect is good. To ensure the safety and reliability of the roadway support structure, a combination of anchor rod and anchor cable support and U-shaped steel reinforcement support are proposed. After the support is completed, the displacement of the roof and two sides in the support area is investigated. The investigation results show that the maximum displacement of the roof after 120 days is 126 mm, and the overall stability of the roadway.

Key words: high-strength prestressed anchor rod; numerical simulation; enhance support

1 前言

近年来,随着矿井开采深度不断延伸,地应力逐渐增大,对巷道支护产生重大影响。传统支护方式为普通锚杆+锚索组合支护,可以满足浅部支护基本要求,然而在复杂地质条件下或软岩巷道中依旧存在支护强度不足的现象。关于矿井巷道支护问题,专家学者进行了大量研究工作,缙剑英针对复合顶板巷道快速掘进问题展开研究,提出单体液压支架结合U型钢支护技术对复合顶板巷道进行增强支护,取得良好效果^[1]。管玉旗,魏鹏飞提出树脂锚固剂锚固高强锚索退锚技术,现场应用发现该技术在满足支护强度要求的同时具有极好经济效益^[2]。张玉涛,马洪涛针对千米深井软岩巷道支护工艺进行了优化,提出采用U型钢加强支护措施,

取得良好效果^[3]。麦晓文,武书礼,田亚军对锚喷支护技术进行了研究,提出锚喷支护技术结合U型钢支护技术控制围岩理论,该技术的实践应用取得良好效果^[4]。丁永红针对回采巷道过断层破碎带支护技术进行了研究,提出管棚支护技术结合锚杆支护技术过构造理论,取得良好效果^[5]。吴国栋针对破碎顶板巷道围岩支护技术进行了研究,提出高强预应力锚杆支护技术实践应用,取得良好效果^[6]。其他专家学者分别针对我国不同区域巷道支护问题展开研究,并取得丰硕成果^[7-13]。西北地区某矿巷道支护强度不足,存在围岩变形严重现象,针对该问题,提出高强支护工艺应用技术。

2 工程概况

西北地区某矿主要煤层位于石炭系上统太原组

[作者简介] 曹臣(1997—),男,汉,本科,助理工程师,从事煤矿采掘方面研究。

[引用格式] 曹臣,李向福,陈昌. 高强支护工艺在矿井采掘工艺中应用模拟研究[J]. 中国矿山工程,2024,53(5):46-51.

和二叠系下统山西组,为海陆交互型。自上而下煤层编号分别是6、7_上、7_下、8、9、11、12、13、14及15号,可采煤层为14、15号,其中14号煤层为局部可采,平均厚度3.2 m。15号煤层为全区可采,平均厚度3.59 m,煤层倾角5°,煤层顶板为砂质泥岩,平均厚度21 m,底板为泥岩,平均厚度30 m。15210工作面位于15号煤层,在掘进巷道为15210工作面运输顺槽,巷道宽度6 m,高度3 m,巷道支护采用普通锚杆+锚索组合支护措施,支护工艺如图1所示。支护完成后3个月,巷道变形严重。采用无损检测技术对顶板和两帮锚杆情况进行检测,对检测结果统计分析如图2所示。

锚杆数占比仅为23.3%,导致巷道整体变形严重的主要因素为锚杆承受载荷超过锚杆弹力极限,导致巷道整体垮落。所检测锚杆主要为顶板位置锚杆,由于支护措施主要承受的载荷为竖向应力载荷,因此顶板垮落最为严重。

3 高强预应力锚杆技术数值模拟研究

15210工作面运输巷道目前支护强度不足,随着时间推移巷道变形严重。近年来,高强度应力锚杆技术被广泛应用于巷道支护过程中,因此拟采用高强度应力锚杆技术进行支护。为确定高强预应力锚杆技术能否满足支护要求,采用数值模拟计算方法对应用该技术措施情况下围岩应变情况进行模拟研究。

采用软件COMSOL multiphysics进行高强预应力锚杆支护作用下数值模拟研究。COMSOL multiphysics是一款基于MATLAB中toolbox控件研发的多场耦合模拟软件,以有限元理论为基础,具备计算、模拟、仿真等功能。可以进行独立场源计算,也可进行多场耦合模拟计算;软件内部镶嵌有相应的数学模型,可以直接运用,且设置开放端口,可将个人建立的数值模拟模型导入其中进行计算。因此具备极好适用性。

假设锚杆长度为16 m,单个锚杆进行支护后产生的锚固力为30 MPa,根据巷道所在区域位置埋深数据计算得区域内地应力为27 MPa。假设15#煤层、顶板、底板为均匀介质,不考虑断层、褶皱、陷落柱等构造的影响,通过现场岩体取样送到实验室测定得到15#煤层及顶底板岩层基本力学参数见表1。模拟过程不考虑煤岩体内液相、气相渗流效应。通过数值模拟运算得到采用原支护措施时10 d、20 d、30 d、40 d时围岩位移量分布云图如图3所示,采用高强预应力支护措施时10 d、20 d、30 d、40 d时围岩位移量分布云图如图4所示。

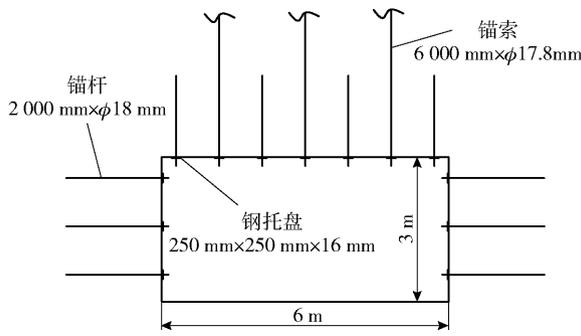


图1 15210工作面运输巷道支护工艺

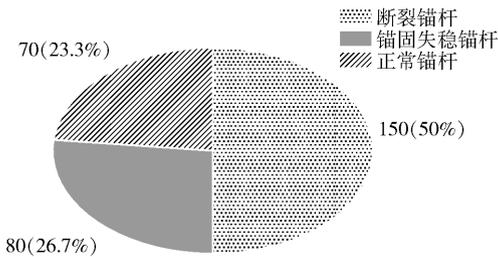


图2 锚杆无损检测结果

由图2分析可知,通过对支护区域300根锚杆进行无损检测,检测结果为现场锚杆断裂数占比达到50%,锚固失稳锚杆数量占比为26.7%,正常的

表1 围岩基本力学参数表

岩性	密度/kg·m ⁻³	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
泥岩	1901.66	23.76	11.66	1.95	3.06	26.66
砂质泥岩	1901.73	23.76	11.66	1.95	3.06	26.66
15煤层	1600.04	12.24	1.74	0.56	0.94	20.24

由图3分析可知,随着时间推移,普通锚杆周围围岩应变逐步增大,且巷道顶板和两帮位移量均出现较大位移,最大位移量达到600 mm。由图3(a)分析可知,当15210工作面运输巷道来压10 d时,

巷道顶板和两帮未出现大的变形,主要变形区域位于锚杆和锚杆之间,最大位移量为480 mm,最大位移量所在位置为两个锚杆之间;由图3(b)分析可知,当15210工作面运输巷道来压20 d时,最大位

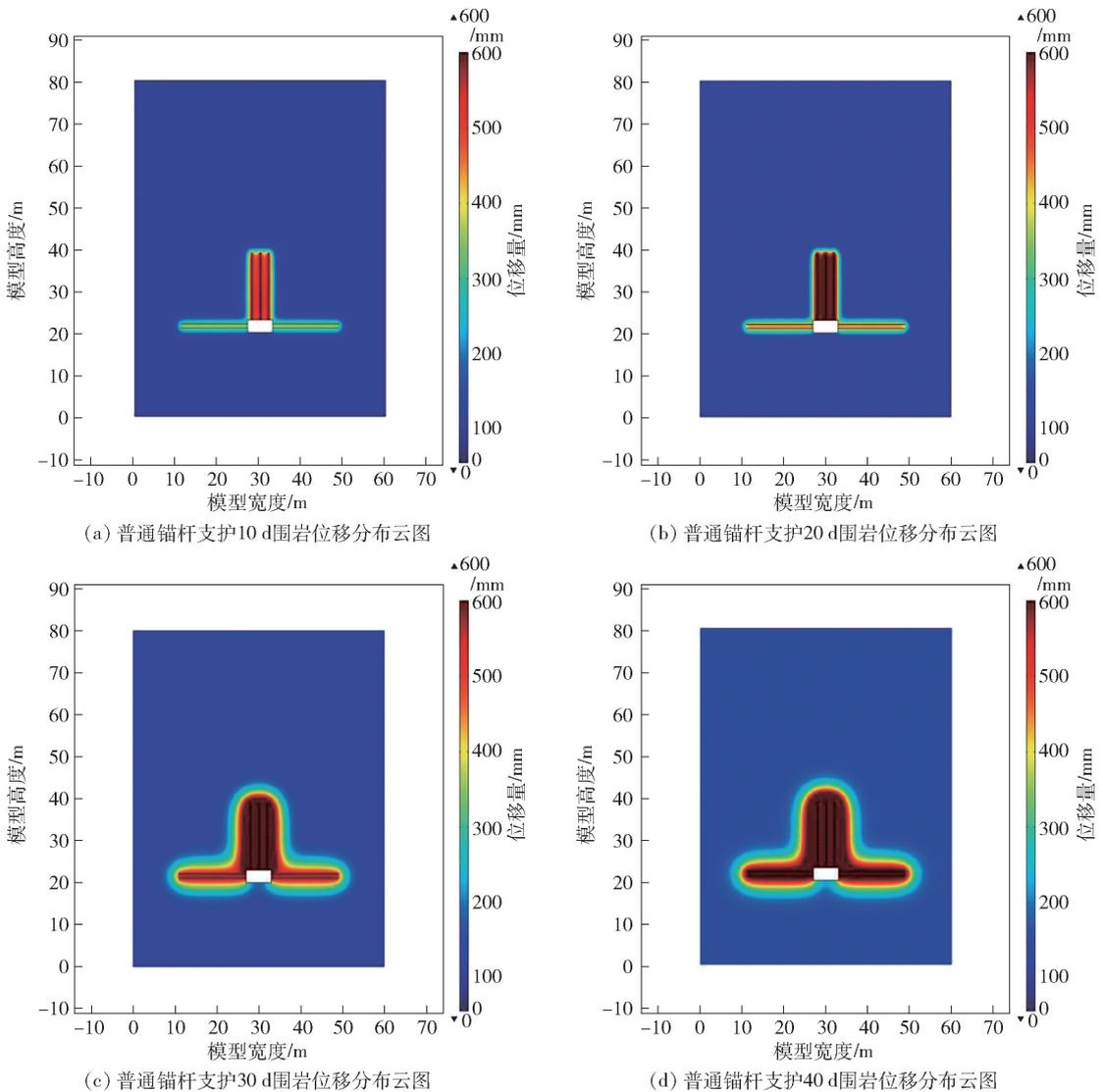


图3 普通锚杆支护技术实施后围岩应变演化图

移量为600 mm,最大位移量所在位置为顶板锚杆位置;3个锚杆之间出现整体位移量增大现象;由图3(c)分析可知,当15210工作面运输巷道来压30 d时,围岩最大位移量为600 mm,顶板锚杆和两帮锚杆最大位移量均达到60 mm,主要应变位置为地点顶板锚杆和两帮周围;由图3(d)分析可知,当15210工作面运输巷道来压40 d时,最大位移量为600 mm,顶板锚杆、两个帮锚杆之间均存在位移量增大现象,此时顶板和两帮锚杆锚固区域位移量均比较大,且片帮、定帮垮落区域向周围延伸,推测大部分锚杆已经断裂,出现失锚现象,整体变形严重。综合分析,采用普通锚杆支护,由于锚杆材料极限荷载应力比较小,因此出现大面积失锚现象,锚杆断裂引起的巷道围岩变形严重的现象。

由图4分析可知,随着时间推移,预应力锚杆周围围岩应变逐步增大,但巷道顶板和两帮整体应变增量比较小。由图4(a)分析可知,当15210工作面运输巷道来压10 d时,巷道顶板和两帮未出现大的变形,主要变形区域位于锚杆和锚索之间,最大位移量为50 mm,最大位移量所在位置为两个锚杆之间;由图4(b)分析可知,当15210工作面运输巷道来压20 d时,最大位移量为60 mm,最大位移量所在位置为顶板锚杆位置;3个锚杆之间出现整体位移量增大现象;由图4(c)分析可知,当15210工作面运输巷道来压30 d时,围岩最大位移量为60 mm,顶板锚杆和两帮锚杆最大位移量均达到60 mm,主要应变位置为锚杆周围;由图4(d)分析可知,当15210工作面运输巷道来压40 d时,最大位移量为60 mm,顶

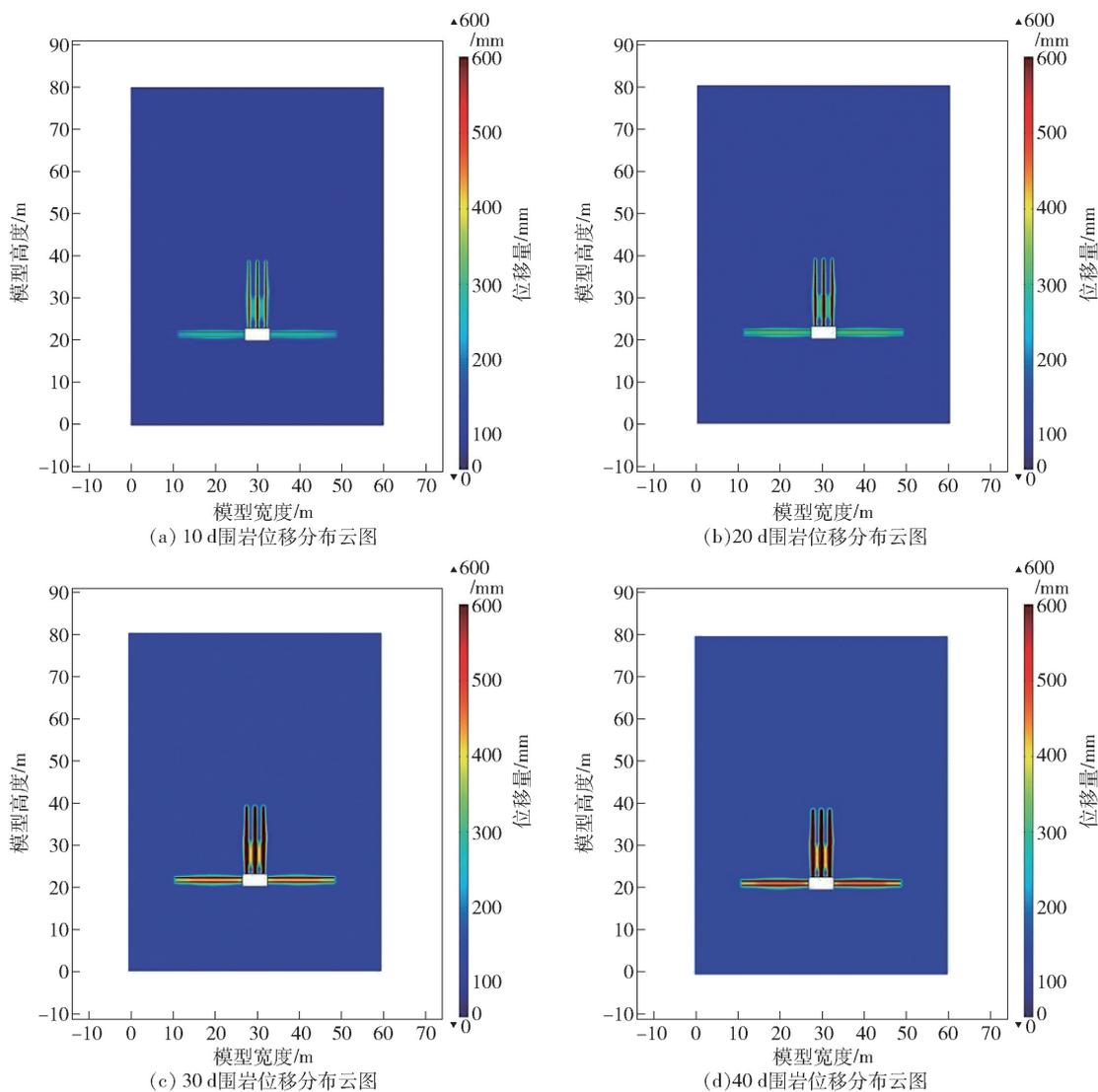


图4 高强预应力锚杆技术实施后围岩应变演化图

板锚杆、两个帮锚杆之间均存在位移量增大现象,但顶板和两帮整体位移量比较小,未出现整体变形严重的现象。综合分析,随着巷道围岩不断来压,应力主要集中在区域为锚杆周边,锚杆的承载力逐步显现,应力逐步增大到一定值时整体趋于稳定,因此推测稳定值不变后巷道支护应力达到极限,采用预应力锚杆支护技术有效控制了巷道围岩,确保巷道未进一步出现变形严重的现象。

4 支护工艺实施和效果考察

根据数值模拟研究表明,采用预应力锚杆支护技术可以控制15210运输巷道围岩变形严重的现象。由于数值模拟基于理想状态下,巷道围岩应力均匀,不存在地质构造形成的应力集中现象,因此实际进行支护过程中必须增大锚杆支护密度,且为了

解决巷道深部锚固范围不足的问题,采用增加锚索支护的方式提高整体锚固技术中存在的不足。预应力锚索装置如图5所示。为确定锚杆选型,对不同直径锚杆进行力学测试,测试结果如图6所示。预应力锚杆主要材料为高强度锚杆和底部托盘,锚杆底部采用特制的涨壳装置,当锚杆伸入底部后,涨壳装置产生反作用力将锚杆两端固定。底部托盘为特制外突托盘,以便形成预应力。当预应力锚杆支护完成后对锚杆内部进行注浆作业,确保锚杆和孔壁之间填充有能够快速凝固的水泥浆液,凝固的水泥浆液可以有效防止仅通过锚杆单向轴向应力的特征,凝固的水凝浆液将钻孔和锚杆形成一个整体,因此可以有效增加支护形成的轴向和法向承载力,增强支护效果。

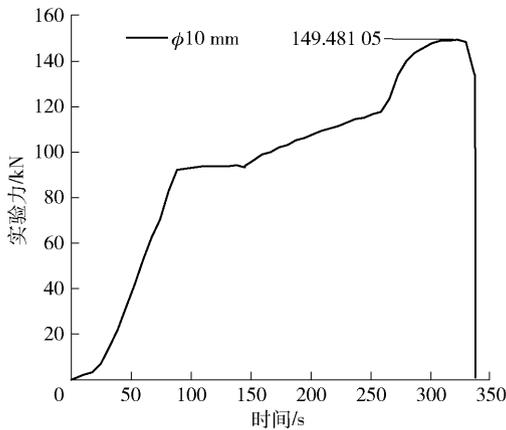
现场选用的锚杆类型为左旋高强无纵肋预应力



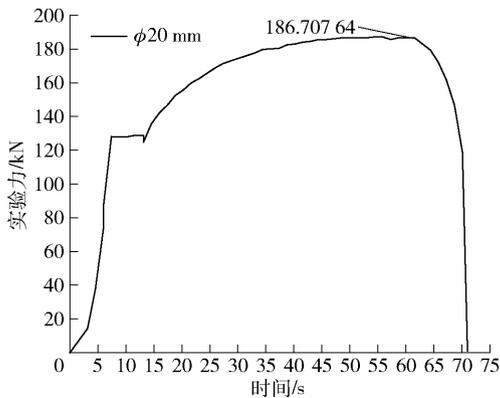
图5 预应力锚杆

由图6分析可知, $\phi 10$ mm 预应力锚杆极限应力为 149.281 05 kN, $\phi 20$ mm 预应力锚杆极限应力为 186.707 64 kN, 但直径越大的锚杆承受应力断裂的时间更短, 而地应力比较大时, 影响锚固效果更多的是锚杆极限承载应力, 因此选用直径 20 mm 预应力锚杆更佳。

为了确保 15210 运输巷道支护效果, 支护措施选用锚杆 + 锚索组合支护, 支护措施如图 7 所示。其中顶板和两帮的锚杆全部选用预应力锚杆, 顶板设计预应力锚杆 4 根, 两帮各设置 3 根, 同时顶板设计 3 根锚索, 锚索规格为 $\phi 20$ mm \times 16 000 mm, 当出现局部构造时, 为了防止局部应力集中引起的支护强度不足, 该区域采用工字钢增强支护措施, 工字钢选用 U25 型, 工字钢支护间距 1.5 m, 可提高整体支护强度。支护完成后对支护区域安装顶板离层仪进行观测, 对其中 6 个观测站数据进行统计分析, 统计结果如图 8 所示。



(a) 直径10 mm锚杆力学测试



(b) 直径20 mm锚杆力学测试

图6 不同直径锚杆力学测试

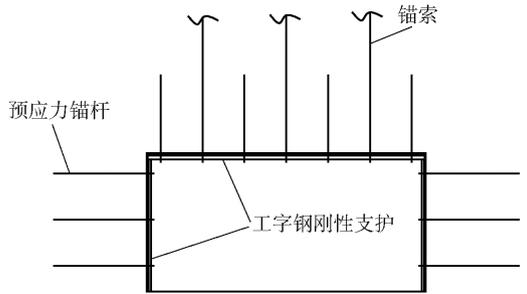


图7 优化后支护工艺

由图 8 分析可知, 观测周期 120 d, 顶板最大位移量为 126 mm, 为 5# 锚杆。其他锚杆整体应变量均比较小。平均日增长量为 1 mm, 整体变化量比较小。现场观测过程中, 未发现顶板出现下沉现象。

5 结论

西北地区某矿深部开采过程中, 进行巷道掘进时出现支护区域锚杆断裂严重, 巷道变形严重的现象, 为控制巷道围岩变形严重现象。拟采用高强度预应力锚杆技术进行深部巷道围岩变形控制。采用数值模拟研究确定该技术可靠性, 详述该技术工艺, 进行现场应用及效果考察, 得到以下结论:

(1) 数值模拟研究结果表明: 采用普通锚杆进行支护时, 巷道围岩 40 d 最大位移量为 600 mm, 推测第 40 d 时巷道整体出现锚杆整体断裂失锚现象; 采用高强度预应力锚杆进行支护时, 40 d 最大位移量 60 mm, 整体变形比较小。

锚杆, 该锚杆支护措施主要由球墨铸铁螺母、左旋转滚丝锚杆杆体、塑料减阻垫圈、承载钢垫圈、球形托盘组成, 该技术具有锚杆预应力大、固力高、杆体的有效断面大和强度高的特征, 由于杆体采用尾部螺纹滚丝, 且配备球墨铸铁螺母、塑料减阻垫圈, 从而减少了螺母和杆体之间的摩擦阻力, 使得扭矩和预紧力转化率有效提高。同时, 杆体搅拌树脂过程中, 螺纹和搅拌树脂方向相反, 可以使得树脂形成轴向挤压力, 提高底端树脂安装密度, 提高锚固力。选用的左旋高强无纵肋预应力锚杆均采用高强度钢材, 因此支护强度更大。综合分析, 左旋高强无纵肋预应力锚杆支护效果更佳。

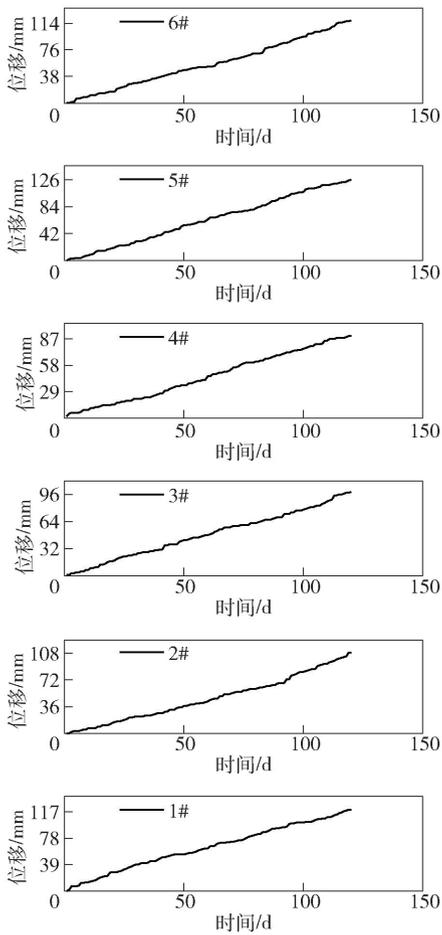


图8 顶板位移量观测图

(2) 采用左旋高强无纵肋预应力锚杆进行支护, 结合锚索支护和 U 型钢支护技术进行增强支护, 有效提高深部支护强度。

(3) 支护完成后对支护区域顶板和两帮进行 120 d 的位移量观测, 观测得到顶板最大位移量为 126 mm, 整体变形比较小。

综合分析, 高强度预应力锚固技术结合 U 型钢增强支护措施有效控制了深部掘进巷道 15210 运输

顺槽围岩变形严重的问题, 研究成果和研究方法对于其他矿井安全生产具有一定指导意义。

[参考文献]

- [1] 侯剑英. 复合顶板巷道快速掘进技术实践分析 [J]. 矿业装备, 2020(5): 26-27.
- [2] 管玉旗, 魏鹏飞. 树脂锚固剂锚固高强锚索退锚工艺应用 [J]. 山东煤炭科技, 2014(9): 58-59.
- [3] 张玉涛, 马洪涛. 千米深井软岩巷道支护工艺改进与应用 [J]. 山东煤炭科技, 2012(1): 233+235.
- [4] 麦晓文, 武书礼, 田亚军. 锚喷支护存在的问题及对策 [J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2000(5): 344-345.
- [5] 丁永红. 回采巷道过断层破碎带联合支护技术研究 [J]. 能源技术与管理, 2024, 49(3): 1-4.
- [6] 吴国栋. 破碎顶板巷道围岩支护技术研究 [J]. 能源技术与管理, 2024, 49(3): 94-96.
- [7] 李季. 基于 3DEC 的大采回采巷道围岩变形特征研究 [J]. 中国矿山工程, 2023, 52(1): 67-71.
- [8] 赵浩亮, 王嵩, 张智强, 等. 特厚煤层下分层双柔模墙留巷围岩运移及支护优化 [J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(5): 053524.
- [9] 贾毅超, 刘萍, 韩森, 等. 倾斜煤岩层条件回采巷道支护控制技术 [J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(3): 033029.
- [10] 潘子恒. 主动支护技术在综放工作面回采巷道超前支护中应用 [J]. 中国矿山工程, 2023, 52(2): 64-69.
- [11] 李磊. 近断层巷道围岩破坏规律与稳定性研究 [J]. 煤, 2024, 33(7): 57-61+67.
- [12] 郭常勇. 深部大倾角煤层回采巷道围岩控制技术研究 [J]. 煤, 2024, 33(7): 65-67.
- [13] 刘光饶, 齐振敏, 杨位良, 等. 强采动巷道断顶卸压稳定性控制机理及应用 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24(17): 7090-7098.