



移动扫码阅读

童仁剑,郑士田,吴燕军,等.地面定向孔超前预注浆掩护巷道穿断层破碎带关键技术[J].煤炭科学技术,2022,50(6):196-203.

TONG Renjian,ZHENG Shitian,WU Yanjun,*et al.* Key technology of advance pre-grouting of ground directional holes to shield roadway passing fault and broken zone[J].Coal Science and Technology,2022,50(6):196-203.

地面定向孔超前预注浆掩护巷道穿断层破碎带关键技术

童仁剑^{1,2},郑士田^{1,2},吴燕军^{1,2},史永理^{1,2}

(1.中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077;2.陕西省煤矿水害防治技术重点实验室,陕西 西安 710077)

摘要:深部巷道过断层破碎带往往应力集中、围岩变形大,是掘进、支护的重大安全隐患。为提高围岩的抗变形能力和强度,减轻巷道锚固支护压力,以淮北矿区巷道过大断层为例,分析了掘进支护过程中矿压大、围岩稳定性差、支护难度大的主要工程问题,采用地面定向孔超前预注浆改性巷道围岩后,顺利掘进通过了断层破碎带。总结提出了基于钻探施工关键技术和高压预注浆关键技术的定向孔掩护巷道过断层关键技术体系,应用四开成孔结构避免了非治理段注浆干扰以及四段注浆分段法实现了断层破碎带精准注浆,并从压水试验、岩性探查、注浆量、注浆扩散距离、物探验证以及掘进支护效果分析方面评价了注浆加固效果。工程实践表明:地面定向孔具有长距离探查巷道岩性、超前高压预注浆的显著优势,改善了软弱围岩力学性质,工程实践表明:地面定向孔具有长距离探查巷道岩性、超前高压预注浆的显著优势,改善了软弱围岩力学性质,有效控制了巷道围岩变形,巷道最大底鼓量降比超过 62.6%,为巷道支护提供了安全保障,具有重要的推广应用价值。实现了巷道安全快速掘进,为巷道支护提供了安全保障,具有重要的推广应用价值。

关键词:定向钻孔;断层破碎带;围岩控制;注浆加固;超前预注浆

中图分类号:TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2022)06-0196-08

Key technology of advance pre-grouting of ground directional holes to shield roadway passing fault and broken zone

TONG Renjian^{1,2},ZHENG Shitian^{1,2},WU Yanjun^{1,2},SHI Yongli^{1,2}

(1.Xi'an Research Institute,China Coal Technology and Engineering Group Corp.,Xi'an 710077,China;
2.Shaanxi Key Laboratory of Coal Mine Water Hazard Prevention and Control Technology, Xi'an 710077,China)

Abstract: Stress concentration and large deformation of the surrounding rock are often encountered in the deep roadway passing through the fault fracture zone, which is a major safety hazard for excavation and support. In order to improve the deformation resistance and strength of surrounding rock and reduce the anchoring support pressure of the roadway, taking the large fault of the roadway in the Huaibei mining area as an example, the main reasons for the large mining pressure, the poor surrounding rock stability and the difficulty of supporting in the process of excavation and support were analyzed. After using the ground directional holes to advance pre-grouting to modify the surrounding rock of the roadway, the roadway was successfully excavated and passed through the fault fracture zone. The key technical system of directional hole shielding roadway crossing faults based on the key technology of drilling construction and the key technology of high pressure pre-grouting was summarized and proposed. The fault fracture zone was grouted accurately, and the grouting reinforcement effect was evaluated from the aspects of water pressure test, lithology exploration, grouting amount, grouting diffusion distance, geophysical verification and tunneling support effect analysis. The application results show that surface directional drilling method has remarkable advantages on exploring rock lithology with long distance and pre-grouting with high pressure. The method improves the strength of the soft and weak surrounding rock and decreases rock deformation, The maximum floor heave of roadway decreased by more than 62.6%. It provides safety guarantee for roadway support. Thus, we believe that the method has generalizable value.

Key words: directional borehole; fault fracture zone; surrounding rock control; grouting reinforcement; advance pre-grouting

收稿日期:2021-10-02 **责任编辑:**常 琛 **DOI:**10.13199/j.cnki.cst.2020-0541

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804100)

作者简介:童仁剑(1992—),男,江西吉安人,助理研究员,硕士。E-mail:tongrenjian@cctegxian.com

0 引言

随着浅部煤炭资源逐渐枯竭,深部资源开采成为资源开发的新常态^[1]。深部“三高一扰动”的地质条件对巷道围岩稳定性威胁越来越显著^[2-3],确保巷道围岩稳定是煤矿安全高效生产的基础。深部巷道开拓不可避免穿越断层破碎带,断层破碎带往往构造应力集中,岩体自承载力能力差,具有易变形、易透水、强度低、抗水性差等特点,增加了巷道围岩控制难度^[4-7]。在采掘扰动影响下,易引起断层活化,诱发冒顶、冲击地压、矿震和突水等事故^[8-12]。巷道过断层综合保障工艺重点分为围岩支护强化和围岩注浆改性2类。巷道围岩支护形成了U型棚、锚网、锚索、锚杆和管棚等联合支护体系。围岩支护的加强能有效地控制围岩的稳定性,但也增加了施工难度,影响了掘进效率。围岩注浆改性则是通过注浆加固充分发挥围岩的自承载能力,提高软弱围岩抗变形能力和强度,改善支护结构的受力情况,降低巷道支护、维护难度,较好地解决巷道掘进过断层的施工安全和长期稳定问题^[13]。

董守义^[14]针对巷道过高水压、高地应力、易泥化断裂带,提出双环布孔的管棚支护技术。聂建伟等^[4]则采用管棚加预注浆超前支护及掘后锚索强化、注浆补强、浇注混凝土等分步联合加固支护方法掩护巷道安全过松软破碎、大落差断层组。孟庆彬等^[5]针对巷道过富水断层带,采用了超前管棚预加固和初次型钢网喷、钢筋混凝土衬砌、二次注浆联合支护方案。闫帅等^[6]模拟研究了断层带围岩变形破坏机制,提出区域化超前注浆和分阶段支护对策。林远东等^[8]采用 Anderson 断层模型和 Mohr - Coulomb 强度准则研究了采动影响下断层稳定性的影响规律,得出超前预注浆能增大断层面黏聚力和内摩擦角,实现断层自锁。康红普等^[12]论述了巷道围岩注浆加固技术的现状和发展趋势,重点介绍了不同注浆材料的应用条件。

目前,众多学者研究的预注浆加固围岩工艺主要在井下实施,即通过井下注浆孔向巷道掘进工作面前方的断层破碎带进行多阶段注浆。然而,井下钻孔受孔深和耐压的影响,注浆段较短、注浆压力较低、注浆量小、浆液扩散距离有限,治理大断层或围岩严重破碎带难度较大,间接对支护工程提出了更高的要求。另有采用地面直孔群进行断层加固,大断层带注浆效果难以保证,且无效段长,不经济。

针对井下注浆和地面直孔注浆的不足,结合地面定向孔在灰岩水害治理中的成熟工艺^[15-16],笔者

将地面定向孔技术优势应用于断层治理方向,进行精准探查巷道岩性,地面超前可控高压注浆,保障围岩注浆加固效果,提高巷道掘进支护效率,同时实现了由掘时被动治理到掘前主动防治,由井下注浆到地面综合治理。根据笔者在两淮矿区灰岩水害治理、断层治理的工程经验^[17-20],总结了地面定向孔超前预注浆掩护巷道穿断层破碎带的关键技术,以期对深部巷道过断层时注浆加固围岩提供借鉴。

1 工程概况

1.1 地质概况

淮北煤田位于华北板块东南缘,在晚古生代海西运动时期,构造变形微弱,连续沉积了石炭系、二叠系含煤地层,而在中生代印支、燕山运动期间,强烈板块运动引起了多期构造运动叠加,近EW向和NNE向大断裂纵横交错,网状断块构造发育,形成了淮北煤田南北分异、东西分带的构造格局。

研究区位于淮北煤田临涣矿区西南部,矿井断层发育,数量多、断距大。采区开拓巷道包括副暗斜井、运输暗斜井和回风暗斜井,受断层构造发育影响,巷道掘进将穿过8条正断层,断距大于50 m断层3条。其中,WF4断层是影响开拓巷道的主要正断层,倾角 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$,平均断距170 m,倾角及断距变化较大,断层带宽且破碎,错断层位为二叠系-奥陶系中统,断层带单位涌水量 $0.000\ 104\ \text{L}/(\text{s} \cdot \text{m})$,富水性弱。工作面回风巷在掘进至该断层的伴生断层(断距28 m)时,出现围岩地应力大,巷道受压变形严重,支护困难,致使掘进机差点被埋,最后终止掘进,变更工作面设计。同样,邻近采区运输大巷在过深部大断层时,矿压大,巷道变形严重,双层U型棚很快被挤实。综上,针对WF4断层带潜在安全隐患,研究目标即为掩护3条开拓巷道安全穿过WF4断层破碎带,提高掘进效率,降低支护难度。

1.2 工程问题

采区开拓巷道掘进、支护面临主要工程问题为:

1) 巷道矿压大。采区地质构造发育,横向切割巷道的小断层较多,纵向上还受F高-7断层(断距110 m)影响,开拓巷道在WF4断层带前的下山掘进过程中,特别是过围岩破碎区域和岩体层理面时,围岩整体稳定性差,底鼓量极大,7处矿压观测点显示底鼓量超过500 mm,2处超过1 000 mm,左右帮变形较严重,顶板下沉明显。同样,WF4断层带岩体破碎,伴生断层多,斜交巷道呈阶梯式展布,掘进过程中将面临矿压大、局部压力集中,冲击地压风险高等工程问题。

2) 支护困难。3 条开拓巷道为 16°左右的斜井,井下预注浆压力低,扩散距离有限,大断层加固防渗效果难以保证,破碎带锚固支护难度大,复杂联合支护施工困难,工程量大,不确定因素多,安全风险高,影响掘进效率,严重则影响矿井生产接续。

2 定向孔掩护巷道过断层关键技术

2.1 注浆加固机理

断层是岩体在构造作用下形成的软弱结构面,其充填介质抗压能力低、塑性变形强,开采扰动下,极易剪切变形破坏。断层结构面抗剪强度可用库仑准则简化表述:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \tag{1}$$

式中: τ 为软弱结构面抗剪强度; σ 为作用在结构面上的法向应力; φ 、 c 为结构面的内摩擦角和黏聚力。

断层破碎带黏聚力和摩擦角要小于正常岩体,抗剪能力较差,是造成巷道过断层时围岩失稳的主要原因^[8],注浆加固主要目的是改性结构面力学性质,提高内摩擦角 φ 和黏聚力 c ,从而提高断层破碎带抗剪强度。主要作用机理为:①注浆充填破碎带孔隙、裂隙空间,黏接介质颗粒,与断层面胶结固化,形成浆液—介质复合结构体;②带压注浆挤压岩体、结构体,以浆液置换介质空间中的水分,提高弹性模量;③高压劈裂注浆形成纵横交贯的浆脉网格骨架结构,提高结构体整体性,有效传递分担载荷,提高自承载能力和围岩的残余强度;④注浆浆液封堵裂隙,隔绝水和空气,提高结构体抗渗性,避免风化降低围岩强度,保持长期稳定性。

2.2 总体治理思路

地面定向孔掩护巷道穿断层破碎带总体思路为:综合考虑地质条件与巷道空间关系,确定断层治理段范围,在地面合适位置布置定向钻孔,基于钻探施工关键技术和高压预注浆关键技术(图 1),沿巷道超前精准探查,实现断层破碎带的高压注浆加固,改善软弱围岩力学性质,重塑地应力分布,发挥围岩自承载能力;封堵裂隙通道,降低含水层渗透系数,防治断层突水;探查巷道岩性,预知关键层位置;减轻巷道支护、维修负担,达到安全高效生产目的。

2.3 钻探施工关键技术

2.3.1 钻孔设计关键技术

1) 孔口位置优选。定向孔孔口位置的选择决定了钻孔轨迹的形态和施工风险。一般来说,平面上直线(近直线)的钻孔轨迹施工风险最低。选择合适的孔口位置,尽可能使钻孔轨迹接近直线或是小于一定的弧度,有助于减小钻探摩阻和转矩,降低

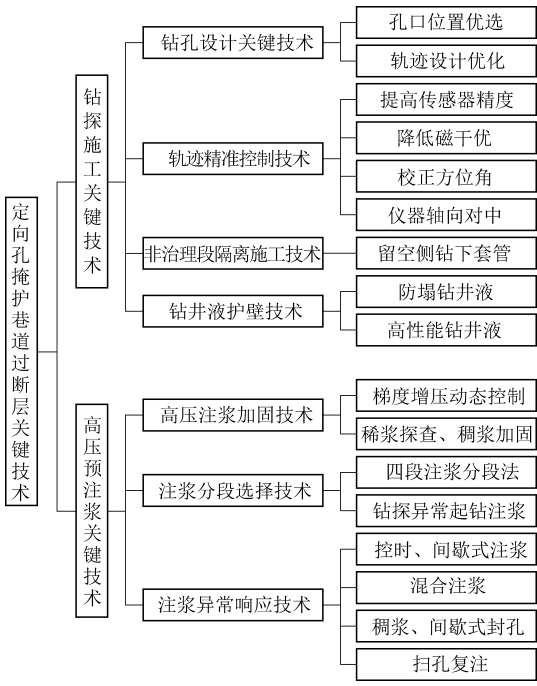


图 1 定向孔掩护巷道过断层关键技术体系

Fig.1 Key technical system of directional drilling supporting roadway excavation through fault

卡钻、塌孔和注浆短路风险,以及后期工程设计调整。

与此同时,孔口位置的选择应尽可能地使钻孔一开、二开轨迹避开采空区、巷道和不良地质体,保持 15 m 以上安全距离,避免钻探漏失或套管损坏造成无效注浆,以及跑浆至巷道、采空区,引起次生灾害。

2) 轨迹设计优化。目标治理层位的钻孔设计和巷道、断层、地层三者的空间关系以及围岩地质条件有关。根据三维地震解释结果,轨迹设计重点沿巷道中心线穿断层,保证注浆扩散效果,同时根据探查的地层的岩性、强度进行巷道顶底板或两帮补充性注浆。若断层导水、连通性好,与太(奥)灰、松散层或井巷系统存在水力联系,还需提前进行截流,切断水力联系,提高注浆加固效果,降低断层涌水。施工过程中,根据实际钻探、注浆信息不断优化钻孔设计,做好地质勘探三边工作:边勘察施工,边分析研究,边调整修改设计。

此外,单个支孔往往难以满足断层注浆加固效果,尤其在采区多条大巷穿同一断层时,大巷之间距离较近,标高差别不大,针对此类巷道群常布置多个支孔,除中心线设计外,还可以交叉设计、条带设计,实现断层破碎带区域超前治理。

2.3.2 轨迹精准控制技术

钻孔轨迹精准控制是提高定向孔中靶率的关键。

在轨迹测量过程中,因仪器传感器精度、方位角归化、磁干扰和仪器轴向问题等误差的影响(表 1),计算得到的井眼轨迹和实钻轨迹存在一定偏差。轨迹越长,测量数据的误差叠加,导致轨迹的不确定越大。

表 1 定向孔轨迹测量误差分类及解决措施

Table 1 Wellbore trajectory survey error classification of directional drilling and solution

误差类别	主要因素	解决措施
传感器精度	方位误差、井斜误差、工具面误差	定期检查、校验、更新、定制
方位角归化	磁偏角、子午线收敛角误差	校正方位角
磁干扰	地层磁性矿物质、地磁场不确定性、相邻井套管串、套管鞋、钻具磁化	降低磁干扰,调整无磁钻铤长度、测斜仪器位置、无磁测定
仪器轴向	测斜仪器轴向与井眼轴线偏差	进行仪器轴向对中

由于断层治理孔为顺巷钻进,对穿巷精度要求较高,为保证轨迹的可靠性,轨迹精准控制技术包括仪器定期质量检查、实验室校验、系统更新,方位角校正,防范磁干扰,以及进行仪器轴向对中检查等技术措施,由此降低定向井轨迹测量的误差。施工过程中,还可定期采用全姿态随钻陀螺测斜仪、磁导向孔和地质探孔进行轨迹纠偏参考。

2.3.3 非治理段隔离施工技术

断层治理孔轨迹按其工程目的可分为浅部套管段、造斜非治理段和顺巷治理段 3 部分。受孔口位置、巷道分布和轨迹设计的影响,造斜非治理段有时较长,存在地层漏失、断层破碎带发育、多层煤层、砂岩裂隙发育、铝土质泥岩和井下巷道等不良地质条件,容易造成钻探塌孔、无效注浆或注浆短路,直接影响钻探施工安全以及治理段注浆效果。

非治理段隔离施工工艺即通过施工三开技术套管,将套管尽可能延伸下至目标治理段,减少注浆干扰,实现断层带高压、精准注浆。为此,须调整钻具组合,采用留空侧钻下套管技术,形成四开成孔结构,逐个实现多分支孔隔离注浆施工目标。

2.3.4 钻井液护壁技术

断层带岩体破碎杂乱,易掉块,套管口附近岩体多次侧钻扰动,煤层强度低,以及泥岩遇注浆析水后强度弱化等常威胁钻探孔内安全,造成成孔困难、塌孔、卡钻发生,卡钻严重情况下发生埋钻,威胁掘进安全。

钻探施工过程中,应结合断层治理孔的地质条件灵活调整钻井液参数,选择合适防塌钻井液技术方案,常添加氯化钾、聚合醇、有机盐、胺基抑制剂或重晶石粉等材料。在松散破碎地层适当提高钻井液的密度、黏度,控制钻井液失水;在深部地层则加入一些润滑剂、乳化剂等提高润滑性,降低摩阻和扭矩。通过采用抑制性强、流变性好、润滑性高、携岩粉能力突出的高性能、防塌钻井液,可有效减少井壁坍塌、托压卡钻、钻头泥包、携砂循环等孔内复杂问题,保障钻孔成孔。

2.4 高压预注浆关键技术

2.4.1 高压注浆加固技术

定向孔高压注浆加固技术即采用地面搅拌系统进行多种浆液材料配比和不同密度稳定制浆,通过高压注浆系统下行式、大流量、连续或间歇式“梯度增压动态控制”灌注技术,实现充填封堵裂隙通道,加固改性断层带围岩。梯度增压动态控制技术分为低压充填、中压压实、高压劈裂 3 个阶段。注浆终压为静水压力的 1.5~3 倍。

为保证注浆效果,注浆前期采用稀浆扩散探查,中后期采用稠浆压实加固,提高结石率,降低析水率。同时根据裂隙动态发育程度,低压选择大流量注浆,充填扩散;高压进行小流量注浆,压实劈裂。

2.4.2 注浆分段选择技术

针对定向钻探查后断层破碎带空间位置的相对确定性,合理进行注浆分段是实现精准、高效注浆的关键。注浆分段选择技术措施采用四段注浆分段法进行断层破碎带高压注浆,即将裸孔注浆段分为非巷道注浆段、断层带前段、断层破碎带和断层带后段共四段。该分段方法保证了断层破碎带之前的地层耐压效果,消除注浆干扰,实现了断层破碎带的充分注浆加固及效果验证。

钻探过程中若出现钻井液漏失、返水、钻孔间串浆等异常情况,则立即停止循环,起钻注浆,保证钻探施工安全,注浆充填封堵潜在裂隙通道。

2.4.3 注浆异常响应技术

注浆异常是注浆过程中的常见问题。正常情况下,注浆压力表现为快速升压、逐级突破、稳定上升的变化过程。注浆异常则表现为注浆压力难以达到注浆结束标准,扩散过远造成无效注浆,甚至引起其他次生灾害。

常见注浆异常情形可归纳为 6 类(表 2),包括注浆长期无压、长期压力稳定不起压、长期压力波动难升压、注浆跑浆至井巷、注浆串浆至周边钻孔和注浆升压过快。针对不同异常情形,分析影响原因,采用间歇式注浆、加粉煤灰、水玻璃等混合注浆、重新

表 2 注浆异常情形及响应技术措施

Table 2 Abnormal situation of grouting and response technical measures

注浆异常情形	异常可能原因	技术措施
注浆长期无压	断层孔隙、裂隙发育、空间大、连通性好、扩散距离远	控时间歇式注浆;加粉煤灰、水玻璃等混合注浆;稠浆间歇式封孔、重新扫孔复注
长期压力稳定、不起压	断层、砂岩层裂隙较为发育,可注性好	
长期压力波动、无法达到高压	断层间阻水性能较差、带压下逐级突破扩散	
注浆跑浆至井巷(含采空区)	断层裂隙发育,高压下与井巷系统或采空区连通	稠浆间歇式封孔、重新扫孔复注
注浆串浆至周边钻孔	断层裂隙发育,高压下与周边钻探施工钻孔连通	
注浆升压过快	孔内塌孔短路	调配防塌钻井液、重新扫孔复注

扫孔复注等技术措施,确保后续注浆工程顺利实施。

3 工程应用

3.1 方案设计

研究区开拓巷道从 WF4 断层下盘向上盘掘进,因断层落差大,伴生断层多,确定巷道治理段为断层上盘 150 m、下盘 120 m,平面上治理加固段为270 m,3 条巷道共计治理长度 810 m。受井下巷道掘进、采空区、断层、巷道高差与间距、地面条件等多个因素制约,孔口位置调整在轨道巷道北侧,距离约 160 m。

工程原设计三开成孔结构,因非治理段 K₃ 砂岩裂隙、断层裂隙发育且相互连通,可注性强,注浆量大,长时间、大流量非治理段注浆严重影响工程进度,造成浆液浪费,同时影响巷道掘进。为保证治理段注浆效果,采用非治理段隔离施工技术,留空侧钻下置三开技术套管,实现多分支孔隔离注浆施工目的。因而变更设计为四开成孔结构(表 3),包括一开近直孔套管段、二开定向导斜套管段、三开技术套管段、四开顺巷裸孔段。为验证注浆效果,检查加固孔采用交叉设计施工。

表 3 钻孔成孔结构

Table 3 Drilling structure composition

结构	孔径/mm	套管规格	技术指标	工程目的
一开近直孔套管段	311	244.5 mm×8.94 mm	进入基岩	隔离松散层
二开定向导斜套管段	215.9	177.8 mm×8.05 mm	尽可能下深	定向造斜
三开技术套管段	152	139.7 mm×7.72 mm	尽可能近巷道	隔离非治理段
四开顺巷裸孔段	118	裸孔,无套管	沿巷钻进	注浆加固

注浆工程采用分段下行式、孔口封闭静压注浆法,注浆材料为 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥。应用高压预注浆加固技术,设计终压 10~15 MPa。

利施工了 3 个分支孔(S1-1,S1-2 和 S1-3),1 个检查加固孔(S1-4),完成钻探进尺 2 717.37 m,注水泥 7 841 t。各分支孔终孔注浆终压 12.0~14.5 MPa,单位透水性率小于 0.001 L/(min·m²)。工程施工成果如图 2 所示。

3.2 工程成果

基于定向孔掩护巷道过断层关键技术,工程顺

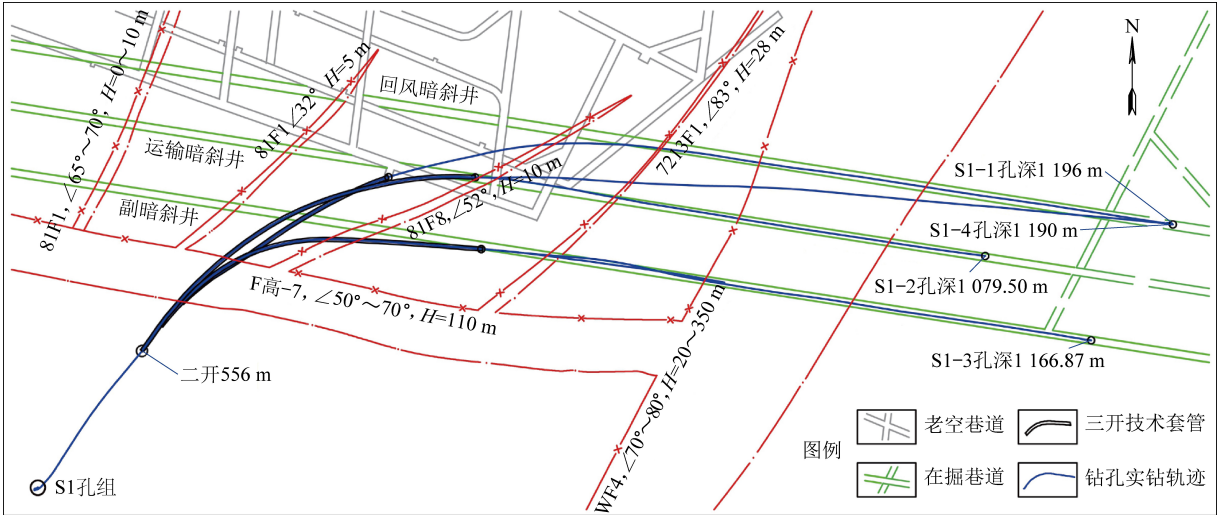


图 2 工程施工成果

Fig.2 Results figure of Engineering construction

4 治理效果评价

4.1 探查治理效果评价

1)压水试验分析。压水试验反映了地层的可注性,可判断裂隙发育程度,以此作为注浆结束标准依据。工程共进行了 28 次压水试验,顺巷治理段内注浆前平均单位透水率为 0.00 369 L/(min · m²),注浆结束后为 0.00 022 L/(min · m²),注浆后单位透水率为注浆前的 5.96%,注浆加固效果良好。

2)地层岩性探查分析。地层岩性对巷道掘进

尤为重要,预知掘进前方岩性,如断层破碎带、煤层、铝土质泥岩或软岩段等,有利于提前调整掘进、支护设计方案。基于岩屑录井技术,地面定向钻能够超前、远距离、高精度探查地层岩性,并对不良地质体进行超前高压注浆,充填破碎带裂隙,压密岩层,起到胶结固结、骨架支撑作用,具有地面直孔和井下超前钻不可比拟的优势。

根据岩性探查结果,绘制了适合地面定向孔结构的巷道岩性剖面图(图 3),可用于分析治理段地质条件复杂程度,有效指导井下掘进、钻探和支护工程施工,保障掘进安全。

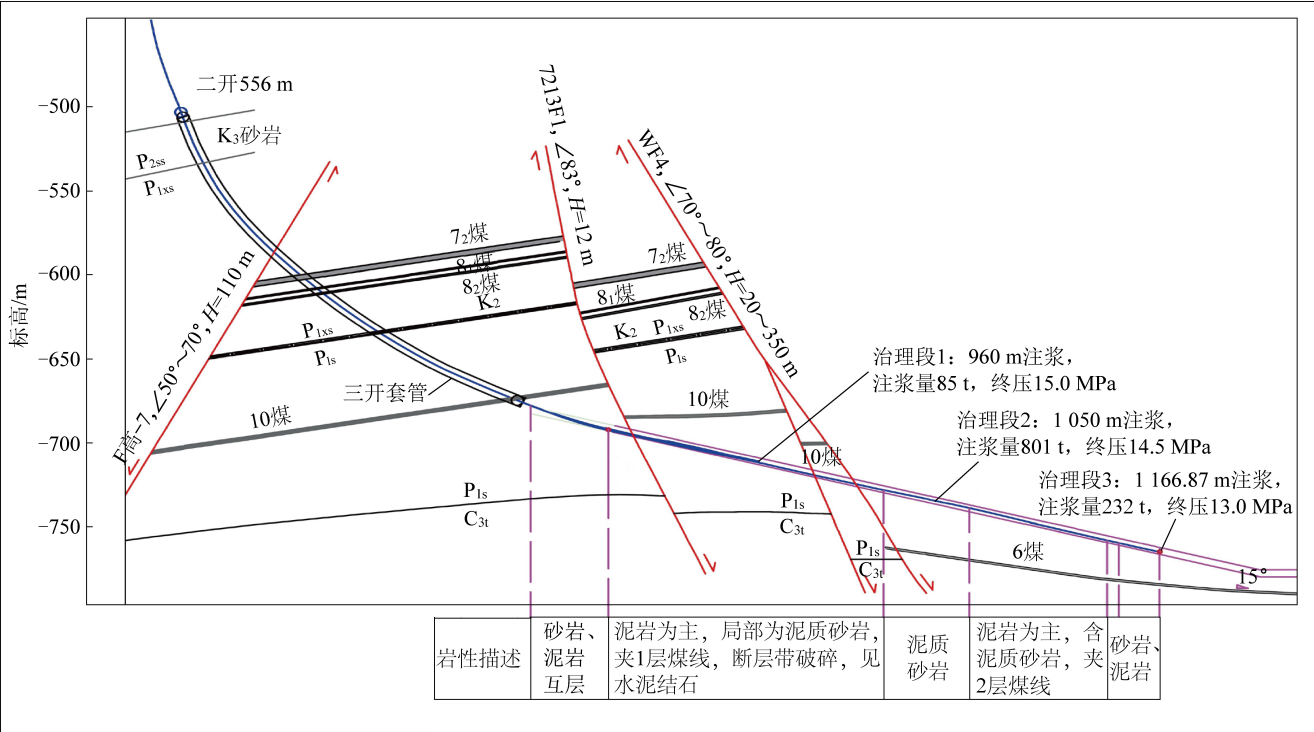


图 3 巷道岩性剖面示意
Fig.3 Lithologic profile of roadway

3)注浆量分析。工程分段注浆 15 次,累计注浆用水泥量 7 841 t。在顺巷前期,非巷道治理段注浆量 3 061 t。非巷道治理段套管隔离后,顺巷治理段注浆量为 4 445 t,检查加固孔注浆量为 335 t。顺巷治理段单位注浆量为 5.49 t/m,其中 WF4 断层破碎带单位注浆量为 7.62 t/m。注浆量表明,研究区非治理段注浆量大,与其地质条件复杂、裂隙发育有关;经应用非治理段隔离施工技术和注浆分段选择技术后,保证了断层带得到充分注浆加固。

4)注浆扩散距离分析。注浆扩散距离受注浆压力、裂隙发育程度、裂隙连通性等综合影响。由于地层裂隙具有非均质各向异性的特点,注浆扩散形态并不是以“圆柱体状、球体状”扩散,而是不断优

先向相对大的裂隙空间通道挤压扩散,扩散体积极不规则。分析钻探水泥揭露、井下掘进水泥揭露、井下巷道跑浆等信息可知,此次注浆扩散距离最远达到 370 m。扩散距离远主要因为断层带裂隙发育,连通性极好,同时高压注浆也有利于浆液进一步扩散。经分段注浆、隔离注浆和重复注浆治理,合理控制注浆扩散范围,确保了破碎带的围岩加固效果。

5)物探验证效果分析。为探查断层带岩层结构状态和富水性,验证注浆加固效果,在巷道掘进工作面位置采用瞬变电磁法进行了探测,距离 WF4 断层带约 32 m,探测结果如图 4 所示。

经注浆充填后,WF4 断层带及巷道掘进工作面前方 120 m 范围顺层方向未见低阻异常,区域内整

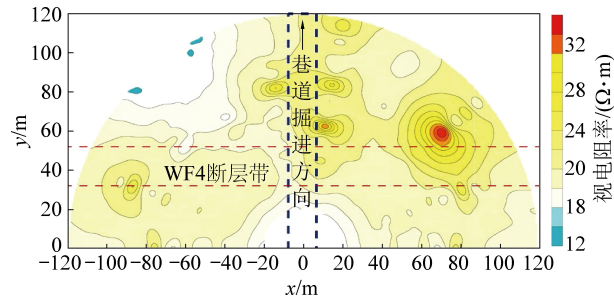


图4 巷道顺层方向瞬变电磁探测成果
Fig.4 Transient electromagnetic detection results
on bedding direction of roadway

体相对高阻。巷道穿断层带未出水,仅在断层上盘出现少量顶板砂岩淋水。物探和掘进相互验证表明,浆液扩散不规则,高压注浆能有效封堵断层裂隙通道,降低含水层的渗透系数。

4.2 巷道掘进支护效果评价

定向孔施工结束后,开拓巷道安全、快速掘进通过了WF4断层破碎带及治理区域。掘进揭露表明,破碎带岩体呈碎块角砾状,泥岩受挤压、揉皱呈糜棱状,泥化现象明显,裂隙中明显可见水泥结石充填,巷道见注浆水泥柱,断层带至少含2组大断层。其中,回风暗斜井过断层时围岩稳定,采用锚喷支护,变形量小,掘进支护效率高;副暗斜井过断层时,掘进效率正常,但来压快,变形较大,最近矿压观测点观测55d后,顶板下沉量109mm,最大底鼓量373mm,左帮变形量84mm,右帮变形量108mm,最近矿压观测点观测55d后,顶板下沉量109mm,最大底鼓量373mm,左帮变形量84mm,右帮变形量108mm,其中底鼓量较之前巷道下降超过62.6%,采用锚网索喷联合支护。采用锚网索喷联合支护。

总体来看,高压注浆加固后,围岩整体稳定性较好,对巷道掘进影响较小,支护后变形量均得到控制,后期可实施二次支护及井下注浆加固,施工难度小,进一步保障巷道的长期稳定。

5 结 论

1) 基于地面定向孔掩护巷道穿断层破碎带工艺,改变了传统井下钻孔或地面直孔注浆加固模式,具有超前探查、高压预注浆的优势,从掘时被动治理到掘前主动防治,实现了长距离精准探查巷道岩性、地面超前可控高压预注浆加固断层破碎带的工程目的。

2) 提出了定向孔掩护巷道过断层关键技术体系,包括钻孔设计关键技术、轨迹精准控制技术、非治理段隔离施工技术、钻井液护壁技术、高压注浆加

固技术、注浆分段选择技术和注浆异常响应技术,有效保障了断层注浆加固效果。

3) 围岩注浆加固后,巷道安全、快速掘进通过了断层破碎带,降低了支护难度。工程的成功实施,丰富了解决矿山工程地质、水文地质问题的技术手段,具有重要的示范意义,可进一步推广应用。

参考文献(References):

[1] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报, 2019,44(5):1283-1305.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.

[2] 彭瑞东,薛东杰,孙华飞,等.深部开采中的强扰动特性探讨[J].煤炭学报,2019,44(5):1359-1368.
PENG Ruidong, XUE Dongjie, SUN Huafei, et al. Characteristics of strong disturbance to rock mass in deep mining[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(5):1359-1368.

[3] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(16):2803-2813.

[4] 康红普.煤矿巷道支护与加固材料的发展及展望[J].煤炭科学技术,2021,49(4):1-11.
KANG Hongpu. Development and prospects of support and reinforcement materials for coal mine roadways[J]. Coal Science and Technology, 2021,49(4):1-11.

[5] 孟庆彬,韩立军,齐彪,等.复杂地质条件下巷道过断层关键技术研究及应用[J].采矿与安全工程学报,2017,34(2):199-207.
MENG Qingbin, HAN Lijun, QI Biao, et al. Study and application of key technology for roadway crossing faults under complex geological conditions[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017,34(2):199-207.

[6] 闫帅,柏建彪,张自政,等.含水层上巷道过断层围岩破坏机制及控制[J].采矿与安全工程学报,2016,33(6):979-984,991.
YAN Shuai, BAI Jianbiao, ZHANG Zizheng, et al. Failure mechanism and ground control of a main entry above aquifers crossing fault zone[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(6):979-984,991.

[7] 孟祥军.基于基本顶断裂位置的综放沿空掘巷煤帮支护技术[J].煤炭科学技术,2020,48(1):61-68.
MENG Xiangjun. Solid coal rib support technology of fully-mechanized mining along gob-side entry driving based on main roof fracture location[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 61-68.

[8] 任政,张科学,姜耀东.采动下逆断层活化过程中工作面应力场响应研究[J].煤炭科学技术,2021,49(9):61-68.
REN Zheng, ZHANG Kexue, JIANG Yaodong. Research on

response of stress field in working face during the thrust fault activation process under mining disturbance[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 61–68.

[9] 宋振骥,郝建,汤建泉,等.断层突水预测控制理论研究[J].煤炭学报, 2013, 38(9): 1511–1515.
SONG Zhenqi, HAO Jian, TANG Jianquan, *et al.* Study on water inrush from fault's prevention and control theory[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(9): 1511–1515.

[10] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报, 2014, 39(2): 205–213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, *et al.* State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205–213.

[11] 董书宁.对中国煤矿水害频发的几个关键科学问题的探讨[J].煤炭学报, 2010, 35(1): 66–71.
DONG Shuning. Some key scientific problems on water hazards frequently happened in China's coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 66–71.

[12] 康红普,冯志强.煤矿巷道围岩注浆加固技术的现状与发展趋势[J].煤矿开采, 2013, 18(3): 1–7.
KANG Hongpu, FENG Zhiqiang. Status and development tendency of roadway grouting reinforcement technology in Coal Mine[J]. Coal mining Technology, 2013, 18(3): 1–7.

[13] 刘泉声,卢超波,刘滨,等.深部巷道注浆加固浆液扩散机理与应用研究[J].采矿与安全工程学报, 2014, 31(3): 333–339.
LIU Quansheng, LU Chaobo, LIU Bin, *et al.* Research on the grouting diffusion mechanism and its application of grouting reinforcement in deep roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(3): 333–339.

[14] 董守义.巷道过复杂断裂带管棚支护技术[J].煤炭科学技术, 2013, 41(8): 27–29, 34.
DONG Shouyi. Pipe Shield Support technology of mine roadway passing through complicated fractured zone[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(8): 27–29, 34.

[15] 郑士田.两淮煤田煤层底板灰岩水害区域超前探查治理技术[J].煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 142–146.
ZHENG Shitian. Advanced exploration and control technology of limestone water hazard in coal seam floor in Huainan and Huaibei coalfields[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 142–146.

[16] 郑士田.地面顺层孔探注成套技术在底板高压岩溶水害治理中的应用[J].中国煤炭地质, 2018, 30(8): 53–57.
ZHENG Shitian. Application of complete set of surface bedding borehole exploration and grouting technology on floor high pressure karst water hazard governance[J]. Coal Geology of China, 2018, 30(8): 53–57.

[17] 童仁剑.地面顺层孔超前探查预加固断层破碎带应用研究[J].煤炭技术, 2020, 39(8): 20–23.
TONG Renjian. Research on application of advanced exploration and pre-grouting reinforcement of fault fracture zone by surface bedding borehole[J]. Coal Technology, 2020, 39(8): 20–23.

[18] 郑士田.地面定向钻进技术在煤矿陷落柱突水防治中的应用[J].煤炭科学技术, 2018, 46(7): 229–233.
ZHENG Shitian. Application of ground directional borehole technology to control prevention karst collapsed column water inrush in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 229–233.

[19] 郑士田,马荷雯,姬亚东.煤层底板水害区域超前治理技术优化及其应用[J].煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 167–173.
ZHENG Shitian, MA Hewen, JI Yadong. Optimization of regional advanced coal floor water hazard prevention and control technology and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 167–173.

[20] 李智,郑士田,石志远,等.极软中厚煤层越界开采区老空水害防治技术[J].煤田地质与勘探, 2021, 49(6): 167–174.
LI Zhi, ZHENG Shitian, SHI Zhiyuan, *et al.* Prevention and control technology of goaf water hazard in unauthorized mining areas of extremely soft and medium-thick coal seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(6): 167–174.