

张自政,李树清,于宪阳,等.深井穿断层回采巷道围岩变形机理与稳定控制对策[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(1):10-16. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.01.002

Zhang Z Z, Li S Q, Yu X Y, et al. Deformation Mechanism and Stability Control of Surroundin Rock in Deep Roadway Through the Fault [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2020,35(1):10-16. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.01.002

深井穿断层回采巷道围岩变形机理与 稳定控制对策

张自政^{1*},李树清¹,于宪阳¹,李杨²,雷转霖³

(1.湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室,
煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201;

2.兰州煤矿设计院,甘肃 兰州 730030;3.窑街煤电集团有限公司海石湾煤矿,甘肃 兰州 730084)

摘要:以海石湾矿穿断层的回采巷道围岩控制为工程背景,综合运用理论计算、数值计算和现场监测的方法研究深井穿断层回采巷道围岩控制技术与对策.不同埋深条件下数值计算结果表明:深井穿断层回采巷道顶板下沉量明显大于底鼓量,近断层巷帮变形量明显大于远断层巷帮变形,巷道变形呈现明显的非对称性特点;巷道埋深增加,浅部围岩承载能力迅速减小,尤其是近断层侧;无论掘进时期还是回采时期,深井巷道围岩破碎区和塑性区范围较浅埋深巷道增大.针对性地提出了围岩稳定控制技术方案,即“工字钢架棚支护+围岩滞后注浆加固技术+锚杆二次支护”分步联合支护的围岩稳定控制技术.巷道支护效果分析表明:围岩整体稳定已基本得到控制.

关键词:深井巷道;穿断层巷道;滞后注浆;锚杆支护;稳定控制

中图分类号:TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2020)01-0010-07

Deformation Mechanism and Stability Control of Surrounding Rock in Deep Roadway Through the Fault

Zhang Zizheng¹, Li Shuqing¹, Yu Xianyang¹, Li Yang², Lei Zhuanlin³

(1. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Lanzhou Colliery Designing Institute, Lanzhou 730030, China;

3. Hai Shi-wan Colliery, Yaojie Coal Electricity Group Co., Ltd., Lanzhou 730084, China)

Abstract: Taking the roadway support along the fault fracture zone in Hai Shi-wan colliery as the engineering background, the methods of theoretical calculation, numerical simulation and field industrial test were applied to research surrounding rock control technology and countermeasures for the deep roadway through the fault. The numerical simulation results under different depth show that the deformation of the hanging wall rib is less than the deformation of the heading wall rib while the deformation of the floor heave is less than the roof subsidence, and the deformation of roadway surrounding rock has obvious asymmetric characteristics; the bearing capacity of

收稿日期:2017-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51804111; 51904102); 国家安监总局安全生产重特大事故防治关键技术科技项目资助(hunan-0001-2017AQ)

*通信作者, E-mail: 1010096@hnust.edu.cn

the shallow ground rock decrease rapidly with the increase of burial depth, especially around the faults; both heading period and mining period, the broken zone and plastic zone of surrounding rock for deep roadways are greater than for shallow roadways along the fault fracture zone. The specific stability control technique for surrounding rock along the fault fracture zone is proposed, which is step combined support technology, namely, "first I-steel shed support+ lag grouting+ secondary rock-bolt support". The analysis of roadway supporting effect indicated that the surrounding rock has been under control basically.

Keywords: deep roadway; roadway through the fault; lag grouting; rock-bolt support; stability control

煤矿工作面回采期间在穿越断层等地质构造异常地带,巷道围岩稳定控制成为制约矿井的安全高效生产的主要瓶颈.近年来,不同地质条件下穿断层巷道围岩稳定问题已成为诸多学者的研究热点,尤其是深部矿井和厚煤层工作面^[1-4].张农、许兴亮^[5]等以穿过 435 m 落差、140 m 宽度断层带的主运输大巷的安全开掘为工程背景,研究特大断层区巷道施工地质保障及围岩控制技术;刘恺德^[6]提出地质异常带巷道超长孔钻杆注浆与钻杆埋入钻孔相结合的新型超前支护技术与新型预应力组合锚注底脚治理技术;刘泉声^[7]对断层破碎带大断面巷道稳定性进行了分析;闫帅^[8]提出了综放工作面回采巷道过断层的“高阻让压支护+关键区域注浆加固”的围岩控制技术.国内其他专家学者对穿断层巷道围岩应力、塑性区分布规律以及围岩变形机理进行了研究^[9-13].然而,随着巷道理深的逐年增大,由于深井穿断层巷道变形破坏机理复杂,尚未有系统地研究其破坏机理并针对性地提出相应的控制对策.

窑街矿区海石湾矿 6223⁻²工作面进风平巷揭露断层 F4-1 和 F4.本文针对其穿越断层期间围岩控制困难的问题,对巷道变形破坏的主要影响因素进行分析,研究了深部开采条件下穿断层巷道变形破坏特征与机理,提出了相应的巷道稳定控制对策,结合 6223⁻²工作面进风平巷给出了工程实践.

1 工程地质条件

海石湾煤矿位于甘肃省兰州市窑街矿区,矿井内可采煤层有煤一层与煤二层,其中煤一层是平均厚度为 8.2 m 的油页岩,煤一层底板埋深 900 m,平均倾角为 10°;煤二层是平均厚度为 21 m 的油页岩.煤二层采用分层综放开采,分层厚度为 10.5 m,两分层间巷道采用重叠布置方式,目前所采为下分层,采高 2.8 m.上分层 6223⁻¹工作面开采结束 1 a 左右,下分层 6223⁻²工作面正在回采.6223⁻²工作面两平巷断面均为 4.5 m×3 m (宽×高),巷道掘进遇到众多落差不一的正逆断层,巷道正常段采用锚杆支护,穿断层段采用工字钢架棚支护.该工作面进风平巷从施工巷口往西存在约 280 m 的断层破碎带,巷道原采用工字钢架棚支护,巷道变形大.6223⁻²工作面采掘平面图如图 1 所示,煤二层顶底板岩性如表 1 所示.

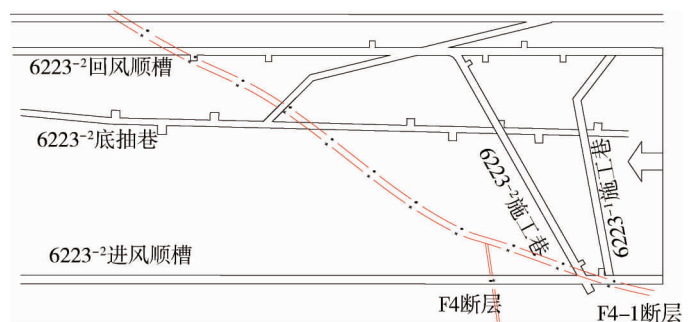


图 1 6223⁻²工作面采掘工程平面

表 1 煤二层顶底板岩性

位置	岩性	厚度/m	埋深/m	岩性描述
上覆岩层	煤一层	8.2	900.0	黑色油页岩,条痕棕色,呈页片状,属弱含水层
基本顶	粉砂岩	2.8	908.2	灰色,含丰富的植物化石,属弱含水层
直接顶	粉砂岩	9.7	911.0	灰黑色,属弱含水层
开采煤层	煤二层	21.0	920.7	黑色,以亮、镜煤为主
直接底	砾岩	8.2	941.7	灰白色
基本底	砾砂岩	3.4	949.9	灰白色
下覆岩层	石英片岩	10.0	959.9	浅灰-灰绿色片麻岩或石英片岩,普氏硬度系数 6~8
F4 逆断层				断层落差平均 2.4 m, N5°W/NE∠10°~85°
F4-1 正断层				断层落差平均 8 m, N55°W/NE∠38°~84°

2 深井穿断层巷道围岩变形破坏机制

2.1 深井穿断层巷道围岩现状

6223⁻²工作面断层附近进风平巷回采期间变形剧烈,局部地段出现顶煤漏冒,巷道变形较大,已严重影响工作面正常回采.在现场向巷道顶板和两帮钻打孔深5 m的钻孔,采用钻孔窥视仪观测6223⁻²工作面进风平巷顶板及两帮煤体破碎情况如图2所示.

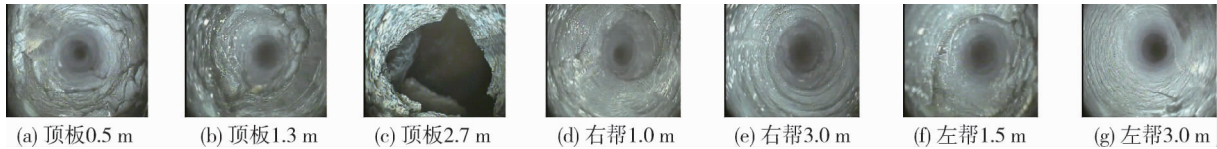


图2 钻孔窥视结果

6223⁻²工作面进风平巷钻孔窥视结果表明:巷道顶板裂隙发育,部分地段甚至出现空洞,顶煤结构极不稳定,顶板易发生冒落;近断层煤帮裂隙比远断层煤帮发育,破碎区范围更大.

2.2 深井穿断层巷道围岩变形影响因素分析

受F4-1正断层的影响,断层附近的进风平巷破碎区明显增大,根据芬纳公式^[14]可知,巷道周边塑性松动区半径为

$$R_p = r \left[\frac{P + C \cot \varphi (1 - \sin \varphi)}{C \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (1)$$

式中: P 为巷道处原岩应力,MPa; φ 为煤层内摩擦角($^{\circ}$); C 为煤层的内聚力,MPa; r 为巷道半径,m,矩形巷道可参考当量半径法计算.

根据式(1)和大量现场观测,该段巷道变形破坏的主要影响因素有:

1)工程应力.上分层工作面回采导致下煤层应力重新分布,上分层区段煤柱应力集中,重叠布置的下分层进风平巷近断层帮处于较高应力状态,巷道变形将呈现明显的非对称特征.

2)断层构造.穿越断层前后的进风平巷四周煤松软破碎,厚度变化不一,自稳能力差,且受断层构造影响煤体内聚力下降,受本工作面采动影响,巷道顶板下沉量大.

3)埋深.进风平巷埋深超过900 m,虽然上分层开采卸压,但深井巷道围岩已经呈现出工程软岩的部分特征.

4)支护体承载能力.巷道采用工字钢架棚支护,属于被动支护,支护强度低.顶煤的整体强度和抗弯刚度低,支护体系没有形成整体承载,支护体整体承载能力较低.

2.3 巷道围岩变形破坏数值计算

2.3.1 数值计算模型

根据6223⁻²工作面进风平巷地质条件,采用UDEC对进行数值模拟,建立数值计算模型,模型大小为120 m×72.3 m.该模型上表面施加22.5 MPa荷载模拟上覆岩层自重,侧压力系数为1.0,块体本构关系选为莫尔-库伦模型,节理的本构模型选为面接触的库伦-滑移模型,模型中块体力学参数见表2所示.

表2 岩石力学参数

岩层	弹性模量/GPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角/ $^{\circ}$	抗拉强度/MPa
油页岩	10	0.24	3.0	30	2.0
粉砂岩	15	0.20	4.4	38	2.8
粉砂岩	15	0.22	4.2	36	2.2
煤层	10	0.25	2.5	26	1.0
砾岩	15	0.25	3.6	34	2.0
砾砂岩	20	0.22	4.5	36	2.5
石英岩	30	0.20	6.4	40	3.2

2.3.2 深井穿断层巷道围岩变形破坏机制

1) 穿断层巷道围岩变形特征

图 3 为不同时期 400 m 埋深和 900 m 埋深下穿断层巷道围岩变形规律。

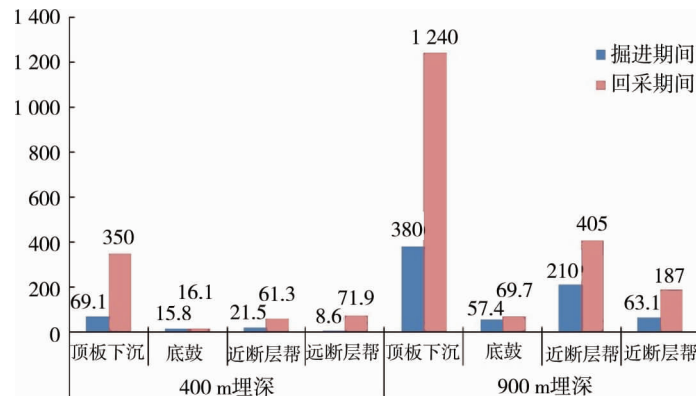


图 3 不同时期道围岩变形

由图 3 可知,无论掘进期间还是回采期间,巷道围岩变形均呈现明显的非对称性,顶板下沉量均为最大变形,近断层帮变形量明显大于远断层帮变形;受地应力影响,900 m 埋深下巷道围岩变形量明显大于 400 m 埋深下,巷道各项变形量明显增加,埋深增大,巷道非对称变形特征更加明显。

2) 深井穿断层巷道围岩应力分布特征

图 4 和图 5 分别为 900 m 埋深、400 m 埋深下不同时期巷道围岩主应力分布图。

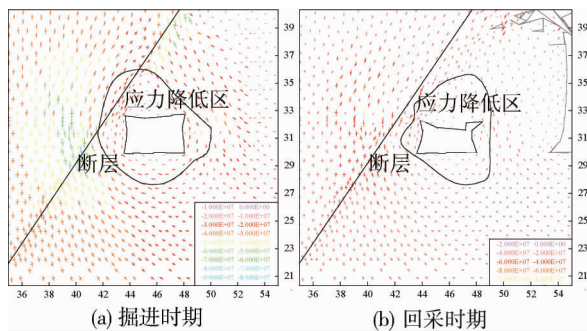


图 4 900 m 埋深下不同时期巷道围岩主应力分布

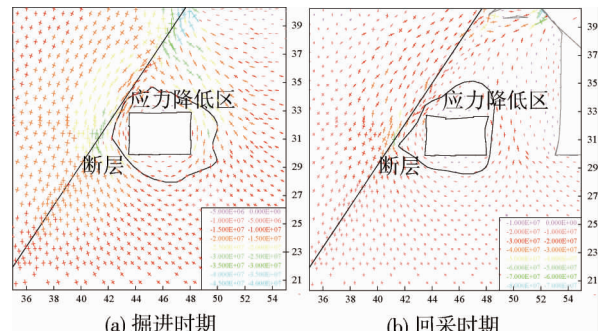


图 5 400 m 埋深下不同时期巷道围岩主应力分布

由图 4 和图 5 可知,无论是 400 m 埋深,还是 900 m 埋深,巷道掘进稳定后,巷道浅部围岩发生应力转移出现应力降低区,受断层影响,近断层一侧应力降低区较大;回采期间,受回采工作面超前支承载力和较大原岩应力叠加作用,远断层一侧应力降低区较大。

3) 深井穿断层巷道围岩塑性区演化规律

图 6 和图 7 分别为 900 m 埋深、400 m 埋深下不同时期巷道围岩塑性区分布。

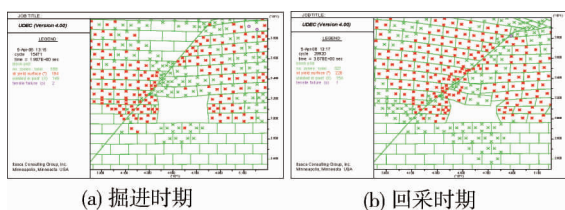


图 6 900 m 埋深下不同时期巷道围岩塑性区分布

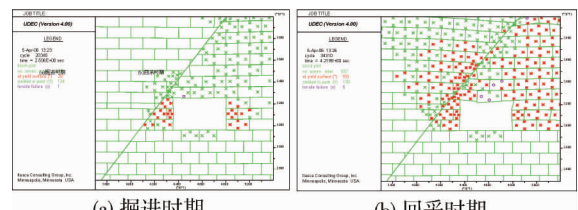


图 7 400 m 埋深下不同时期巷道围岩塑性区分布

由图 6 可知,掘进时期,900 m 埋深下远断层巷帮塑性区范围大于近断层巷帮的塑性区范围;进入回采时期,巷道围岩塑性区范围迅速沿着断层扩展,塑性区呈现“倒梯形”分布,巷道围岩受拉剪混合破坏。

由图 7 可知,400 m 埋深下巷道掘进后浅部围岩受拉剪混合破坏,深部围岩受剪切破坏,塑性区也呈

现明显非对称特征,但近断层巷帮塑性区范围大于远断层巷帮的塑性区范围,这与上分层工作面开采的底板破坏深度相关;回采期间,围岩塑性区范围迅速增加但仍小于900 m埋深下围岩塑性区范围。

综合以上,可知深井穿断层回采巷道围岩变形破坏机理:深井穿断层回采巷道近断层巷帮变形量明显小于远断层巷帮变形量,顶板下沉量明显大于底鼓量,巷道围岩变形呈现明显的非对称性特征;巷道埋深增加,浅部围岩承载能力迅速减小,尤其是近断层侧;无论掘进时期还是回采时期,深井巷道围岩破碎区较浅埋深巷道增大,塑性区范围大。

3 深井穿断层巷道围岩稳定控制技术

3.1 巷道围岩注浆加固技术

由于深井穿断层巷道掘进与回采期间通过断层破碎带时,围岩强度弱化,容易出现冒顶、两帮鼓出。因而针对深井穿断层巷道围岩破坏和强度弱化的问题采用高水材料注浆加固技术^[15-16]:(1)随巷道断面扩刷修复及时封闭围岩并补偿径向支护阻力,即采用工字钢棚支护,喷射C20混凝土封闭巷道围岩,待围岩注浆后锚杆支护补偿径向阻力;(2)巷道围岩剧烈变形,浅部围岩形成松动圈,围岩内部产生大量宏观裂隙,尤其是巷道帮角等剪切破坏区发育,巷道围岩整体承载能力极大弱化。采用围岩滞后注浆加固技术通过削弱宏观裂隙的不利影响和改善穿断层巷道围岩的完整性,进而提高围岩整体承载性能和稳定性。

3.2 高预应力锚网支护技术

坚持采用高预应力锚网支护是深井穿巷道保持围岩稳定的基础,锚网支护通过对围岩表明施加高预应力减小甚至消除巷道浅部顶板的拉破坏,提高巷道两侧帮角的抗剪切破坏能力,减小穿断层巷道围岩的剪切滑移破坏程度。现场采用屈服强度超过335 MPa的螺纹钢锚杆,抗破断能力大,断层上下盘支护密度不同实现非对称支护与两帮均匀承载;选用钢筋网作为护表材料可以解决断层破碎带煤岩体的网兜现象,同时采用钢筋梯子梁提高支护结构的整体稳定性。

表3为回采期间巷道采用不同加固方案后围岩变形统计结果。统计结果表明:注浆加固与锚杆支护联合支护后巷道围岩变形量迅速减小,巷道顶板下沉量为569 mm,远断层巷帮移近量为225 mm,近断层巷帮移近量为59.3 mm。

表3 回采期间巷道注浆加固后围岩变形

方案	顶板下沉/mm	底鼓/mm	远断层巷帮移近/mm	近断层巷帮移近/mm
锚杆支护+注浆	569	59.9	225	59.3
锚杆支护	872	66.4	321	135.0
注浆	669	58.1	252	102.0

图8为回采期间注浆加固后巷道补强锚杆载荷分布示意图。结果表明:巷道顶板锚杆所受轴向载荷最大达到293.2 kN,位于远断层一侧的巷帮(右帮),这主要是受工作面超前采动影响所致;巷道顶板锚杆所受剪切载荷最大达到199.6 kN,位于近断层一侧的巷帮(左帮),这主要是断层构造影响导致。

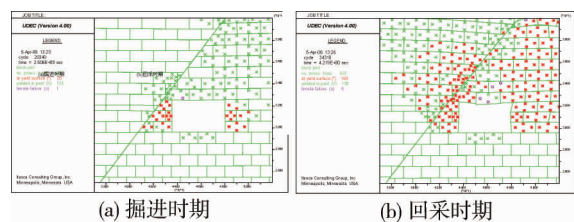


图8 回采期间巷道补强锚杆载荷分布(单位:N)

4 工程实践

4.1 稳定控制对策及分析

4.1.1 基本支护思路及工艺流程

针对深井穿断层巷道围岩状况,根据围岩稳定控制技术和分步联合支护思想,巷道扩刷后,先进行工字钢支护+喷层初次支护;再进行注浆补强加,最后进行高强度高预应力锚杆滞后支护。通过初次支护及时改善围岩的应力状态,增强围岩抗变形能力,控制巷道顶板的早期离层,实现巷道初步稳定和安全施工的保障;通过滞后注浆加固,提高断层破碎带围岩强度;二次支护采用高强度高预应力锚杆支护,提高巷道顶

板层间结合力,消除巷道顶板浅部的拉破坏,同时扩大巷道承载结构,进一步改善围岩应力状态,实现巷道稳定的根本控制.结合扩刷修复过程的分步联合支护技术,其施工工艺流程见图 9.

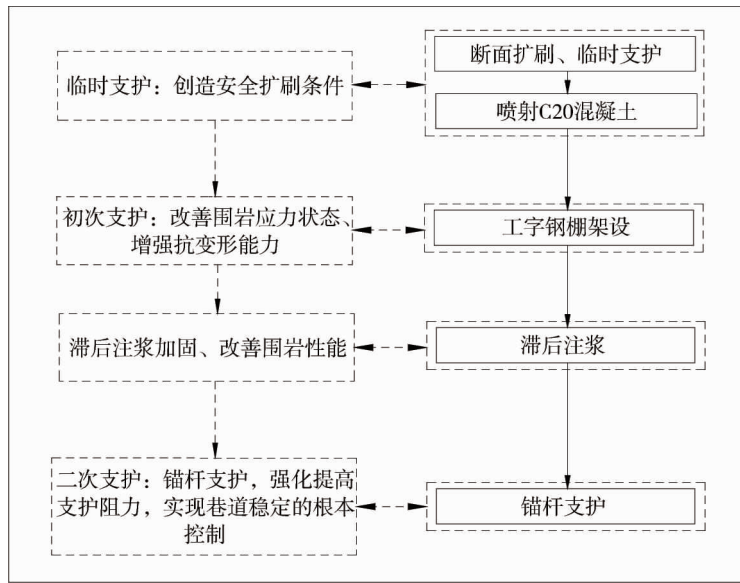


图 9 分步联合支护技术及工艺流程

4.1.2 施工方案

扩刷一个循环进尺后,先敲帮问顶,然后对巷道断面进行喷射 30~50 mm 厚标号 C20 的混凝土,再架设工字钢棚支护.然后进行巷内滞后注浆,最后二次支护采用锚杆支护.锚杆支护参数采用巷道正常段支护参数.

滞后注浆材料采用高水材料,注浆灰水比为 1.5 : 1,注浆设计压力为 3~4 MPa.注浆加固最佳时机应该超前回采工作面 30 m 以外,保证不影响工作面正常回采.设计注浆孔深 3.0 m,排距 1.6 m;采用间隔注浆方式.注浆孔布置设计见图 10 所示.采用 4 分钢管制作,注浆管长 2 m,内径 10 mm,壁厚 2.5 mm,端头加工 30 mm 外螺纹,注浆管结构设计如图 10 所示.

二次支护锚杆采用规格为 $\Phi 20 \text{ mm} \times L 2.4 \text{ m}$ 的高强左旋螺纹钢锚杆,锚杆间排距为 0.8 m \times 0.8 m,近断层巷帮布置 4 根,远断层巷帮布置 4 根,顶板均匀布置 6 根,锚杆预紧扭矩 300 N \cdot m.

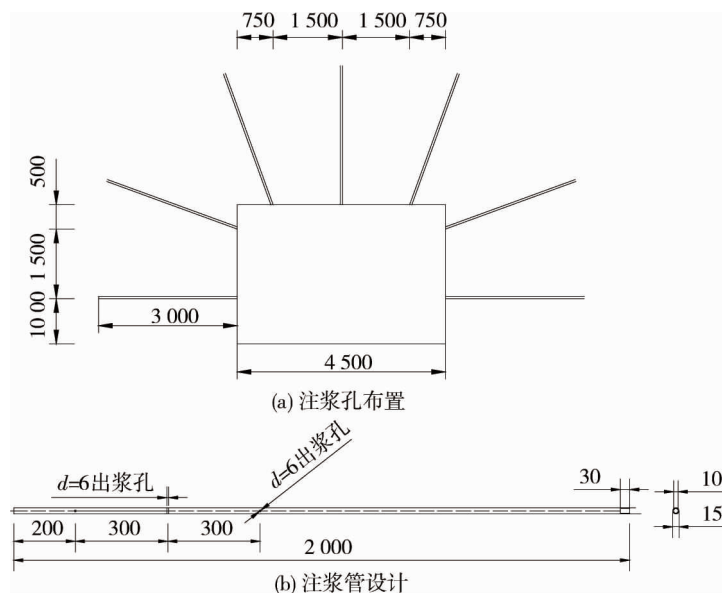


图 10 注浆加固设计(单位:mm)

4.2 支护效果监测与分析

从6223⁻²工作面进风平巷280 m断层破碎带段每隔70 m设置一个巷道表面位移测站,共布置4处,测量巷道的顶底板移近量和两帮移近量.根据对4个巷道表面位移测站巷道表面位移监测,表面位移具有以下规律:随着到工作面距离减小,表面位移监测曲线快速上升,工作面超前影响距离大约为25 m;巷道达到稳定状态后,两帮移近量为191 mm,顶底板移近量为220 mm,巷道断面基本满足使用要求.

5 结论

1)采用数值计算的方法研究深井穿断层回采巷道的围岩变形破坏机理:巷道掘进后,巷道围岩迅速沿着断层发生破坏;近断层巷帮变形量明显大于远断层巷帮变形量,顶板下沉量明显大于底鼓量,巷道变形呈现明显的非对称性特征.

2)提出“工字钢架棚支护+围岩滞后注浆加固技术+锚杆二次支护”分步联合支护的围岩稳定控制技术,控制围岩大变形的技术方案.采用工字钢架棚支护,结合断层破碎带滞后注浆加固和高强预应力锚杆支护,工作面顺利穿越了断层.

3)巷道修复效果监测分析表明:“工字钢架棚支护+围岩滞后注浆加固技术+锚杆二次支护”分步联合支护技术对断层破碎带巷道治理效果显著,巷道围岩整体稳定性基本得到控制.

参考文献:

- [1] Wang L, Miao X. Numerical simulation of coal floor fault activation influenced by mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, 16(4): 385-388.
- [2] 耿萍,吴川,唐金良,等. 穿越断层破碎带隧道动力响应特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1406-1413.
- [3] 王新兴. 巷道过断层破碎带支护技术[J]. 煤矿安全, 2012, 43(10): 83-85.
- [4] 邹光华,张凤岩,宋彦波. 巷道过含水断层破碎带的注浆加固技术[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(6): 50-53.
- [5] 张农,许兴亮,程真富,等. 穿435 m落差断层大巷的地质保障及施工控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(s1): 3292-3297.
- [6] 刘恺德,刘泉声,刘滨,等. 地质异常带巷道稳定控制对策及效果研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2486-2497.
- [7] 刘泉声,张伟,卢兴利,等. 断层破碎带大断面巷道的安全监控与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1954-1962.
- [8] Yan S, Bai J, Li W, et al. Deformation mechanism and stability control of roadway along a fault subjected to mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(4): 559-565.
- [9] 付存仓,温森. 断层对巷道附近塑性区的影响[J]. 采矿技术, 2006, 6(2): 31-32.
- [10] 肖同强,柏建彪,李金鹏,等. 断层附近煤巷锚杆支护破碎围岩稳定机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 482-486.
- [11] 王玉珏,王元明. 断层破碎带的围岩应力对巷道的影响与控制[J]. 煤炭科技, 1999(2): 35-37.
- [12] 赵德昌. 断层破碎带围岩压力[J]. 矿山压力与顶板管理, 1996(4): 64-65.
- [13] 宋卫东,赵增山,王浩. 断层破碎带与采准巷道围岩作用机理模拟研究[J]. 金属矿山, 2004(2): 11-13.
- [14] 符华兴. 略述应用于塑性岩(软岩)中的卡斯特纳与芬纳两公式之异同[J]. 铁道工程学报, 2005(3): 72-74.
- [15] 曹胜根,刘长友. 高档工作面断层破碎带顶板注浆加固技术[J]. 煤炭学报, 2004, 29(5): 545-549.
- [16] 柏建彪,王襄禹,贾明魁,等. 深部软岩巷道支护原理及应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 632-635.