

构造带极不稳定围岩巷道 控制技术及其应用

闫帅奇¹, 朱永建^{1,2}, 王平^{1,2}, 陈鑫源¹, 朱二磊¹

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要:针对林东矿业集团泰来煤矿+1 150 m水平运输大巷受断层破碎带影响造成巷道围岩极不稳定的实际情况,采用现场调研、理论分析和数值模拟等方法相结合的方式对该类巷道围岩的变形破坏进行了调查和分析,并针对构造带围岩极其破碎的特点提出了锚网喷+注浆+顶板锚索的联合支护技术.该技术的支护原理为密集锚杆保持浅部围岩的整体性,注浆粘结强化破碎围岩,高刚度预应力顶板锚索控制围岩的失稳变形.通过数值模拟对巷道顶底板及两帮位移监测结果表明,该方案能够有效地控制围岩的变形破坏,使顶底板及两帮位移明显减小,能够满足矿井正常生产的要求.

关键词:构造带;极不稳定围岩;注浆加固;数值模拟

中图分类号:TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2016)01-0028-06

Control technology of extremely unstable surrounding rock in structural belt research and its application analysis

YAN Shuaiqi¹, ZHU Yongjian^{1,2}, WANG Ping^{1,2}, CHEN Xinyuan¹, ZHU Erlei¹

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

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

Abstract: Caused by the faults, the surrounding rock of +1 150m main haulage roadway in Tailai Coal Mine, which belongs to Lindong Mining Group is in the unstable state. According to the situation, by using the methods of field investigation, theoretical analysis and numerical simulation, the deformation and broken mechanism of this kind of surrounding rock have been analyzed and the support technology of anchor net spray + grouting + anchor cable are proposed. The supporting principle of this technology is that keeping the shallow rock by intensive bolt, grouting reinforcement to bond broken rock and high stiffness pre-stress anchor cable control the unstable surrounding rock deformation. Engineering application shows that the technology can effectively control the deformation of tectonic belt that is extremely unstable surrounding rock roadway, and meet the requirements of normal use.

Key words: structural belt; unstable surrounding rocks; grouting reinforcement; numerical simulation

受到构造带影响的巷道围岩具有吸水性强、遇水膨胀和泥化等特征,一般表现为自稳时间短、压力显现快、塑性变形大,持续变形等极不稳定的特点.基于这些原因,此类围岩极难得到有效控制^[1-3].然而,在实际工程地质中,在地质构造作用下断层、褶曲等这些较大的构造带是难以避免的.因此,研究构造带极不

收稿日期:2015-08-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51374106);湖南省煤矿安全开采重点实验室开放基金资助项目(201404)

通信作者:朱永建(1973-),男,安徽安庆人,博士,副教授,研究方向:矿山压力与岩层控制. E-mail: yjzhu@hnust.edu.cn

稳定围岩的变形机理及其控制技术对保证煤炭资源的安全生产具有很重要的现实意义. 针对此类巷道围岩的控制,武鹏飞^[4]以固庄煤矿15号煤层15704工作面顺槽为工程背景,对在向斜地质破碎构造带的巷道围岩进行了现场调查,结合理论分析和数值模拟,最终提出了锚注支护技术;檀远远^[5]基于大量的工程实测数据,对受复杂构造带影响的煤巷松动圈及其支护技术进行了研究,并针对江西新余花鼓山煤矿D5煤层巷道,采用FLAC^{2D}软件对其支护技术参数进行了优化分析. 总的来讲,构造带极不稳定围岩控制技术受现场条件的影响,其支护形式和支护参数差异性较大^[6]. 一般情况下,此类极破碎围岩均会采用注浆加固技术,然后结合其他支护结构进行优化^[7,8];刘泉声^[9]等人采用地表预注浆的方法对顾北煤矿穿越断层破碎带的巷道局部区域进行注浆加固,取得了显著的加固效果. 张伟杰^[10]对高承压水环境下的断层破碎带注浆加固岩体稳定性机理与渐进失稳规律进行了研究,并总结出了断层突水等灾害的防治措施. 因此,本文基于注浆加固技术对受断层构造带影响的林东矿业集团泰来煤矿+1 150 m水平运输大巷进行破碎带极不稳定围岩控制技术研究,以此为类似的破碎带极不稳定巷道围岩的支护设计提供参考.

1 煤巷工程概况

林东矿业集团泰来煤矿位于云贵高原的东北部,地形多以丘陵和盆地为主,该矿区地表标高为+1 360 ~ +1 464 m,+1 150 m水平运输大巷井下标高+1 150 m,巷道走向长度280 m,从开口至120 m沿岩层掘进,在过F15断层时沿5号煤底板掘进,巷道直接顶平均厚度为4.4 m,由薄层粉砂岩、粉砂质泥岩及泥灰岩互层构成,直接底为钙质泥岩和泥质粉砂岩,平均厚度4.3 m,伪顶泥岩及泥质粉砂岩,厚度为0.2 ~ 0.5 m. 除F15断层外,巷道掘进区域还经过F10断层,因此,整条巷道掘进受断层破碎带的影响很严重,各岩层力学参数见表1.

表1 围岩岩层物理力学参数

围岩岩层	平均 厚度/m	密度 /(g/cm ³)	单轴抗压 强度/MPa	抗拉强 度/MPa	黏聚力 /MPa	内摩擦 角/(°)	弹性 模量/GPa	泊松比
砂质泥岩	—	2.25	12.00	0.060	0.20	27	1.30	0.35
粉砂岩	14.30	2.10	8.70	0.020	0.10	25	1.00	0.36
灰色中厚层状灰岩	2.00	2.30	15.00	0.100	0.25	32	2.00	0.30
灰岩、粉砂质泥岩	4.00	1.90	9.30	0.020	0.20	24	1.10	0.34
4号煤层	1.84	1.80	6.00	0.020	0.15	23	1.20	0.37
钙质泥岩(大巷)	5.00	2.00	7.20	0.030	0.10	25	1.40	0.34
钙质泥岩(直接底)	4.30	2.10	7.40	0.028	0.17	27	1.51	0.38
泥质粉砂岩(底板)	—	2.21	8.20	0.030	0.13	21	1.30	0.36

2 现场情况调查及原因分析

2.1 现场调查

+1 150 m水平运输大巷为矩形断面,净高2.8 m,净宽3.8 m. 水沟断面0.45 m(宽)×0.3 m(深). 巷道掘出后出现严重变形,虽已经过两次修复,巷道围岩仍然处于非稳定变形状态. 这些变形状态表现为3种主要的破坏形式:(1)经常冒顶. 受构造带影响,巷道围岩极其破碎,在顶板上表现为经常有小块碎石冒落、网兜等现象;(2)侧墙内挤破坏. 由于构造带影响,巷道围岩应力场中存在较大的工程偏应力,致使巷道两帮受力不均,且岩体破碎造成侧墙内挤;(3)巷道底鼓. 受构造带影响,巷道底板破碎松软,泥化严重,遇水膨胀,造成严重底鼓.

2.2 原因分析

由现场调研、测试、实验室试验并结合巷道围岩变形机理有关研究成果可知,对研究巷道围岩稳定性产生影响的主要因素包括如下几个方面:(1)矿井范围内地质构造复杂,构造应力集中引起了较大的工程偏应力,是造成巷道围岩变形量大的重要原因之一;(2)岩体较软弱,巷道围岩强度低且断层破碎带多,因此,巷道围岩稳定性差;(3)巷道原支理论依据不充分,部分支护形式及支护参数不合理;(4)采用锚杆

(索)支护时,施工质量不能得到保证,矿山提供的掘进作业规程中没有体现出对锚杆支护施工质量的要求,井下实地调查也发现由于施工质量而导致锚杆(索)支护失效的现象比较普遍;(5)缺乏有效的矿压监测手段,导致需补强支护的地段未能得到及时的补强支护。

3 破碎围岩支护原理和支护方案

3.1 支护原理分析

根据巷道围岩变形的实际情况分析可知,要确保巷道极破碎围岩的稳定,关键问题是如何提高巷道围岩自身的承载能力.该大巷原有的支护方式是锚网+顶板锚索喷浆支护,这种支护虽然短时间内能够控制围岩巷道的变形破坏,但对于巷道围岩极其松软、破碎,围岩力学性能差,加之所处环境的地质构造复杂,围岩的承载能力不能够承受较高的地应力,故难以控制巷道围岩的长期稳定,从而造成了巷道的多次返修.要想从根本上解决极破碎围岩的稳定性问题,需着重研究以下3个方面:一是合理确定锚杆密度和支护强度,配合金属网以保证破碎围岩的整体性^[11,12];二是通过注浆加固改善围岩的力学性能^[13];三是对围岩进行封闭,以防顶底板岩石出现软化、膨胀的状况,防止强度大量损失^[14].

3.2 支护方案

综合以上分析,得到支护方案设计的思路如下:巷道围岩地质力学评估→无支护及新支护方案的计算机模拟→现场监测→完善支护(补强支护).考虑到巷道围岩极其破碎,确定新的支护方案为:锚网喷+注浆+顶板锚索联合支护技术,而注浆加固是该支护技术的核心,注浆效果直接关系到支护的成败.根据泰来煤矿现有的工程条件,新的支护方案拟采用的支护参数如下:

1)锚网喷支护结构拟采用左旋无纵筋螺纹钢锚杆+金属网+喷射混凝土,锚杆直径为 $\Phi 20$ mm,长度均为2 200 mm.顶板锚杆间排距分别为760,800 mm,帮部锚杆间排距分别为600,800 mm.如图1所示.金属网采用 $\Phi 6$ mm,网格 0.1 mm \times 0.1 mm,规格为 1.0 mm \times 0.8 mm.金属网喷射混凝土的厚度为 0.2 m.

2)注浆加固支护结构.首先,是注浆材料的选择:采用ZKD高水速凝材料,其水灰比为 $1.6:1.0$.注浆孔的间排距为 $1\ 500$ mm \times $1\ 500$ mm,注浆深度约为 4 m.注浆起始压力控制在 $0.8\sim 1.0$ MPa,浅孔注浆压力 $1.0\sim 2.0$ MPa根据实际情况作适当调整.其次,是注浆工艺.由于+1 150 m水平运输大巷为修复巷道,其施工工艺:挑顶、刷帮→安装锚杆和金属网(打锚杆孔→锚金属网→安装锚杆→喷混凝土)→打注浆孔→安装注浆管→封孔→注浆,注浆孔的布置如图2所示.

3)顶板采用 $\Phi 17.8$ mm的钢绞线锚索加强锚固,锚索长度为 $8\ 000$ mm,间排距为 $1\ 500$ mm \times $1\ 500$ mm,顶板锚索的锚固长度为 $2\ 000$ mm,锚索孔与注浆孔间隔布置,锚索布置见图1.

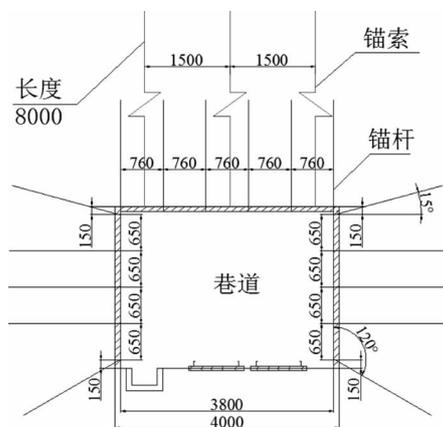


图1 锚杆和锚索支护结构

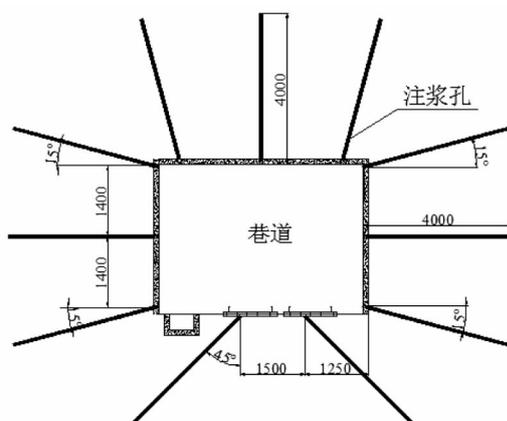


图2 注浆孔的布置

4 支护前后数值模拟对比分析

4.1 支护前模拟

根据林东矿业集团泰来煤矿提供的+1 150 m水平运输大巷的工程实际建立数值模型.根据表1中煤

岩体的物理力学参数对模型中各岩层进行赋值. 模型计算采用莫尔-库伦塑性判别准则判别单元体是否进入塑性状态. 模型底面边界垂直方向位移固定,前、后边界在对应的水平方向位移固定,顶部和左、右侧面均为相应方向压应力加载边界,垂直应力大小根据上覆岩层的平均容重与巷道埋深来近似取值进行加载,经测算取为 5.47 MPa. 侧压系数根据现有资料近似取值为 1. 在计算过程中对模型中的最大不平衡力进行监测,当最大不平衡力趋于稳定时,表明模型中各节点的速度趋于稳定. 因此,以最大不平衡力基本稳定作为模型计算的停止点. 在无支护时,当模型加载到 5 000 步时,模型的最大不平衡力趋于稳定,见图 3 所示. 图 4 为模型中的最大不平衡力趋于稳定时的计算结果.

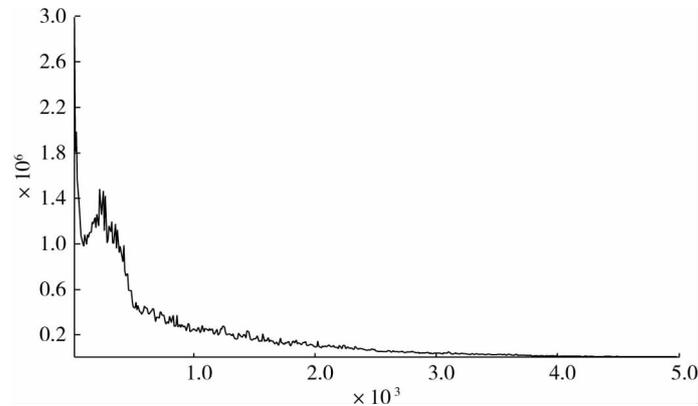


图 3 最大不平衡力变化趋势

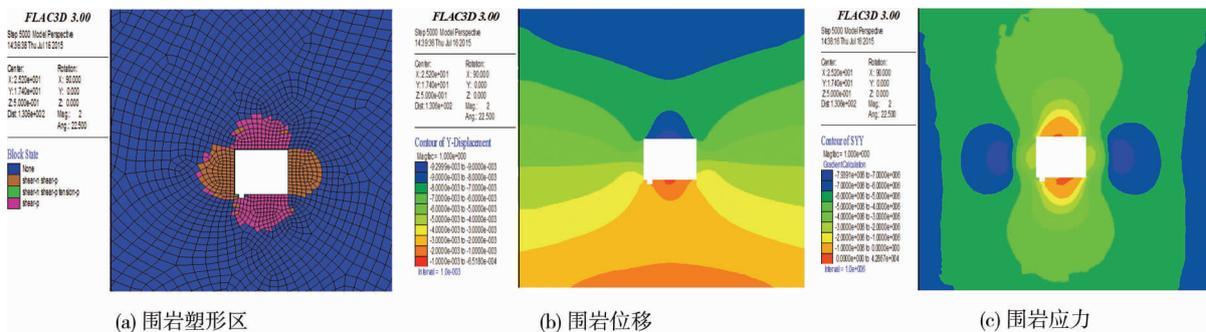


图 4 无支护时巷道围岩情况

通过数值计算结果图 4(a)可以看出在加载到 5 000 步时,围岩塑性区范围较大,巷道两帮和顶、底板的塑性区半径均达到了 1 600 mm 左右;如图 4(b)所示,巷道的顶底板移两帮移近量均达到了一个较大的值,并且巷道围岩的变形一直处于持续增长状态. 巷道围岩应力峰值向深部转移,图 4(c)(尤其是在两帮,其应力峰值距巷道表面约 1 500 mm 左右)导致塑性区向深部呈恶性扩展,塑性区的扩展又进一步引起巷道的变形量的增大,直至导致巷道围岩最终失稳. 因此,想要控制巷道围岩的稳定必须控制巷道围岩的大变形,控制巷道围岩的大变形就必须限制塑性区的恶性扩展,要限制塑性区的恶性扩展就必须控制巷道围岩的应力峰值不会向深部无限扩展. 对于受构造带影响的极破碎围岩,想要控制巷道围岩应力峰值的转移,就必须提高破碎围岩的强度,进行注浆加固,同时配合其他支护形式进行联合支护.

4.2 支护后模拟

根据前文设计锚网喷+注浆+顶板锚索联合支护技术方案采用顶板锚索单元来模拟锚杆和顶板锚索的锚固作用,初衬单元模拟金属网和喷射混凝土,锚杆、锚索的物理力学参数如表 2 所示.

根据 +1 150 m 水平运输大巷的服务年限,保证巷道能够正常使用,采用整体注浆的方案,为了保证安全并根据巷道断面大小,注浆孔分别布置在巷道的肩角、底角等关键部位,巷道破碎围岩进行注浆加固后,注浆区域内围岩与注浆体共同胶结成为注浆加固体,强度接近注浆体的强度,经实验室试验得知注浆体的力学参数如表 3 所示. 图 5 为新方案支护后巷道围岩情况.

表 2 锚杆和锚索的物理力学参数

参数	锚杆	锚索
横截面积/m ²	0.000 314 2	0.000 248 7
弹性模量/GPa	4.5E10	4.5E10
单位粘结力/(N/m)	20E8	20E8
锚固剂外圈周长/m	0.100 48	0.100 48
锚固剂刚度/(N/m ²)	17.5E10	17.5E10
抗拉强度/N	26.5E4	26.5E5

表 3 注浆体计算参数

加固结构	密度 /(g/cm ³)	单轴抗压 强度/MPa	抗拉强度 /MPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	弹性模量 /GPa	泊松比
喷射混凝土	2.65	30	10	2.5	57	36	0.15
注浆体	2.50	26	4	1.2	47	28	0.21

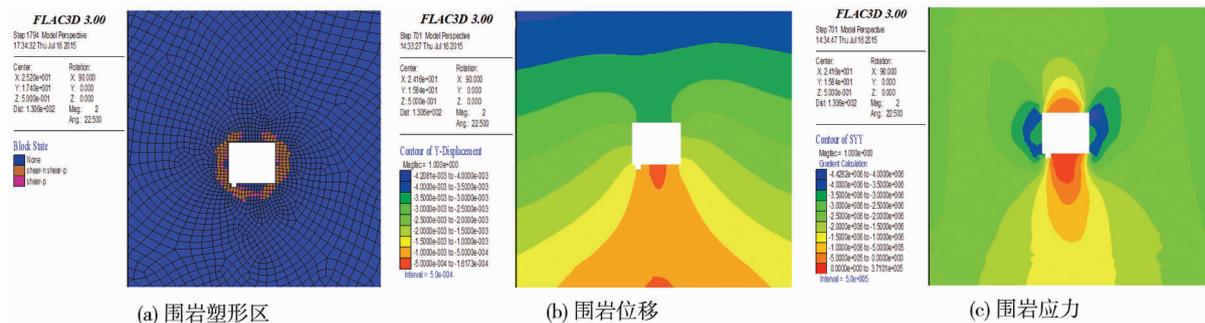


图 5 新方案支护时巷道围岩情况

在计算过程中对无支护和新支护方案的围岩位移进行监测,监测结果见图 6 所示。

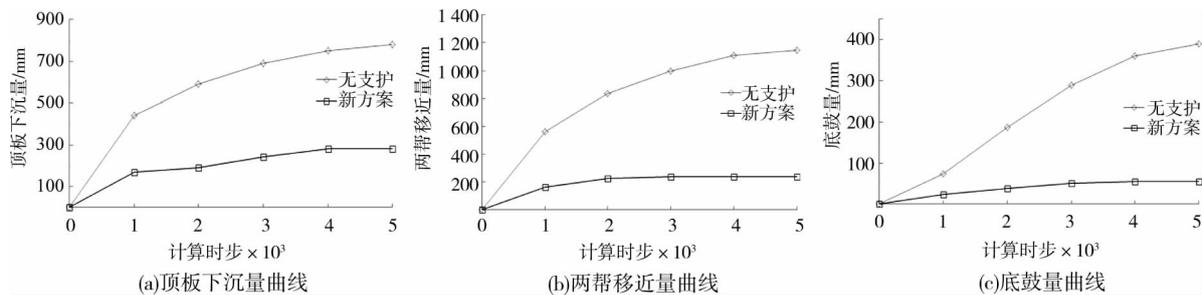


图 6 支护前后巷道表面位移监测结果

根据注浆体的计算参数,通过数值模拟可以看出围岩塑性区、巷道顶底板移近量和两帮移近量较支护前都表现为明显的减小。+1 150 m 水平运输大巷围岩在无支护情况下,在加载到 5 000 步时,巷道围岩顶底板下沉量、底鼓量以及两帮位移移近量分别为 780,390,1 150 mm 且表现出逐渐增大的变形趋势。根据设计的支护方案支护后,巷道围岩塑性区半径在 1 000 mm 左右,巷道的底板下沉量、底鼓量以及两帮位移移近量明显减小,在加载到 3 500 步到加载到 5 000 步过程中没有明显的增加,分别保持在 280,238,55 mm,围岩应力峰值约在 1 200 mm 附近。在新的支护方案条件下,结合对现场的多次监测,围岩巷道变形明显减小,围岩的力学性能明显增加,使巷道基本能够满足安全生产的需求。

5 结论

1) 对泰来煤矿 +1 150 m 水平运输大巷经常冒顶、侧墙内挤破坏、巷道底鼓等,应采取注浆、增强锚杆

支护强度、围岩进行及时封闭等措施。

2)通过巷道围岩地质力学评估→无支护及新支护方案的计算机模拟→现场监测→完善支护(补强支护)的设计思路以及根据工程地质条件选用合适的支护参数。

3)巷道围岩顶底板及两帮变形量分别从780,390,1 150 mm减小到280,238,55 mm。巷道围岩变形得到了有效的控制。

参考文献:

- [1] 朱永建,余伟建. 构造带极不稳定围岩注浆加固效果数值分析[J]. 煤炭科学技术,2011,39(3):14-17.
- [2] 余伟建,高谦. 高应力构造带巷道围岩控制机理及工程实践[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2012.
- [3] 于海勇,贾恩立,穆荣昌,等. 放顶煤开采基础理论[M]. 北京:煤炭工业出版社,1995.
- [4] 武鹏飞. 构造破碎带中煤层巷道支护技术研究[D]. 太原:太原理工大学,2010.
- [5] 檀远远. 复杂构造带回采巷道松动圈确定与支护对策研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2010.
- [6] 谭习文. 提高综放工作面顶煤回采率的途径及实践[J]. 煤矿安全,2006,37(1):31-33.
- [7] 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.
- [8] 魏军. 注浆加固技术在掘进过断层带中的应用[J]. 工程技术,2014(6):279.
- [9] 刘泉声,卢超波,卢海峰,等. 断层破碎带深部区域地表预注浆加固应用与分析[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(7):3688-3695.
- [10] 张伟杰. 隧道工程富水断层破碎带注浆加固机理及应用研究[D]. 济南:山东大学,2014.
- [11] 朱永建,朱二磊,王平,等. 深井高地应力巷道围岩弱化规律及控制技术[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2014,30(1):15-21.
- [12] 利启明,刘春林. 软岩巷道地压控制研究[J]. 西部探矿工程,2011(1):187-190.
- [13] 谢波,邵金鹏,高波,等. 新型速凝材料注浆加固富水破碎带机制分析[J]. 隧道建设,2015,35(4):303-310.
- [14] 王平,朱永建,余伟健,等. 深部软岩巷道等应力承载拱强度理论研究[J]. 矿业工程研究,2012,27(4):17-22.