

高应力极软破碎岩层巷道高强度耦合支护技术研究

王卫军 彭刚 黄俊

(湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室 能源与安全工程学院 湖南 湘潭 411201)

摘要: 从控制围岩集中应力转移和缩小围岩破碎区范围出发,分析了牛马司矿业公司水井头煤矿-300 m 东大巷的变形破坏特征,得出该巷道围岩失稳机制,指出原支护方式的主动让压、支护强度低是导致巷道剧烈变形的主要原因。通过现场测试和数值模拟,提出了采用高强度锚杆、强力锚索、注浆加固围岩的高阻让压和高强度支护技术,根据现场监测数据和耦合支护原理,确定了合理的各支护环节的支护时间:U型钢支护在锚杆支护32 h后进行;注浆支护在U型钢支护10 d后进行。

关键词: 高应力; 极软岩层; 高阻让压; 高强度支护

中图分类号: TD353 文献标志码: A

Research on high-strength coupling support technology of high stress extremely soft rock roadway

WANG Wei-jun, PENG Gang, HUANG Jun

(School of Mining and Safety Engineering, Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Starting from the control of concentrated stress in surrounding rocks transfer and reducing the area of rock crushing, analyzed the characteristics of deformation and failure in Shuijingtuo Coal Mine -300 m east roadway of Hunan Niumasi Mining Company, obtained the roadway failure mechanism, pointed out that the main reason of leading to severe deformation is initiative to pressure and low intensity support with the original support method. Through field testing and numerical simulation, advanced the support technology as "High resistance pressure allowing and high-strength" by using high-strength bolting, strong anchor, grouting surrounding rock, according to the field monitoring data and coupling support principle, determined a reasonable coupling support time which related to all links of the support: U-shaped steel support is 32 h after surrounding rocks bolting, grouting support is 10 d after U-shaped steel support.

Key words: high stress; extremely soft rock; high resistance pressure allowing; high-strength support

软岩巷道的围岩控制一直是煤矿开采过程中的难题,而且随着矿井开采深度的增加,这类巷道中的各种非线性力学现象越来越多,支护越来越困难^[1-2],巷道不仅变形速度大,而且持续变形。牛马司矿业公司水井头煤矿-300 m 东大巷总长1 500 m,从1988年开始掘进,到2006年只掘进了300 m,由于已掘巷道变形特别严重,一直处于反复的维修

中,已不能向前掘进。因此,矿井东翼多年来无法开采,严重影响了矿井的正常接替和生产。为解决这个困扰多年的难题,本文在已有研究成果的基础上^[3-7],采用现场工程地质调查、室内实验和数值计算等手段,对巷道围岩的变形机制进行了研究,并有针对性地提出了“高阻让压、高强度”支护方案,取得了较好的效果。

收稿日期: 2010-08-23 责任编辑: 常琛

基金项目: 国家自然科学基金项目(51074071); 湖南省科技计划重点项目(2009FJ2005); 湖南省高校科技创新团队支持计划资助

作者简介: 王卫军(1965-),男,湖南涟源人,教授, Tel: 0731-58290040, E-mail: wjwang@hust.edu.cn

http://www.cnki.net

1 工程条件分析

1.1 工程概况

-300 m 东大巷埋深 515 m,位于牛马司向斜轴部的构造应力区,布置在 II 煤底板岩层中,距 II 煤 35~40 m,揭穿的围岩主要为深灰色砂质泥岩和灰色薄层状粉砂岩,节理裂隙发育,巷道且沿走向断层密布,多以正断层为主。

通过取岩样进行 X 衍射图谱分析,得到巷道围岩的矿物组成:石英占 33.3%;蒙脱石占 10.3%;绿泥石占 20.5%;伊利石占 15.4%;钾长石占 20.5%。

该矿在 2001—2006 年期间针对 -300 m 东大巷支护中的问题一直进行着改革与试验,先后试用了砌碛支护、U 型钢支护、双层碛支护和锚喷网支护等一系列支护形式,均告失败。

2006 年以后,采用“二次掘进,先临时支护后永久支护”方式,即先采用小断面(2 m×2 m)掘进,木棚支护,待巷道产生大变形后(一般 20 d 左右,巷道断面收敛达 50% 以上),按设计断面进行扩巷,再采用锚喷支护。巷道围岩稳定时间一般也在 6 个月左右,6 个月后巷道即遭到破坏,如图 1 所示。

1.2 巷道变形状况及原因分析

1.2.1 巷道变形特点

(1) 围岩自稳时间短。-300 m 东大巷围岩从暴露到产生冒落的时间非常短暂,掘进工作面经常在临时支护完成前发生小型冒顶事故,甚至支护尚未到位,巷道断面便已明显缩小。巷道围岩破坏首先从两帮开始,接着强烈底臃,然后顶板下沉。

(2) 围岩快速收敛,在巷道掘出 2 个月左右,巷道断面收敛达到 50%。

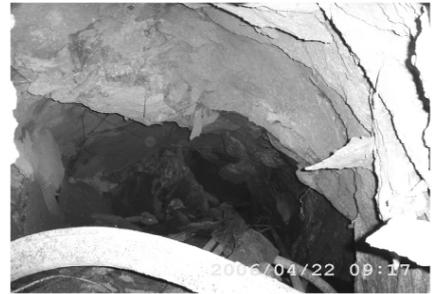
(3) 巷道变形持续时间长,部分区段开挖至今已 8 a 左右,经过多次翻修,采取了多种支护形式,目前仍在翻修中维持。

(4) 围岩松动范围大。为查明巷道围岩松动范围,在成巷 6 个月左右的区段采用钻孔摄影仪观测了围岩裂隙的分布状况。在巷道断面两帮和顶板各布置一个观测孔,观测孔深均为 8 m,从观测孔中看到,两帮、顶板、底板岩层裂隙分布密度大,破碎范围大,巷道两帮围岩深部 5.6 m 处有次生裂隙,顶板上方 4.3 m 处有次生裂隙,底板破碎岩层厚度约 2.5 m。

1.2.2 巷道变形破坏原因

根据 -300 m 东大巷破坏情况、支护和维修现状及地质条件调查分析,造成巷道变形破坏的主要原因有以下几个方面:

(1) 工程地质条件恶劣。巷道接近牛马司向斜



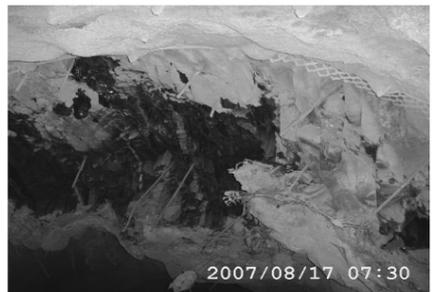
(a) U型钢支护巷道破坏状况



(b) 小断面木棚支护破坏状况



(c) 砌碛支护巷道破坏状况



(d) 锚喷支护巷道破坏状况

图 1 各类支护巷道破坏状况

Fig. 1 Failure condition of support roadways in different programs

的轴部,构造应力大,巷道所在区域分布大量的小断层,围岩被小断层切割,节理裂隙极为发育,如图 2 所示。

(2) 围岩中蒙脱石和伊利石含量达到 25.7%,遇水剧烈膨胀,在已往的支护过程中,对围岩未进行全封闭,对围岩内部的渗水未进行封堵,导致围岩膨胀。

(3) 围岩强度低(3~8 MPa),支护强度不足,尤其是初期支护强度低,不仅 1 个月内就出现锚杆被拉断、U 型钢支架严重变形现象,而且导致围岩破碎区



图2 围岩节理裂隙分布

Fig. 2 Distribution of surrounding rock joints and cracks

发育迅速, 6个月左右在两帮深部5.6 m处发现明显次生裂隙。

(4) 没有充分发挥围岩承载能力。软岩巷道支护的作用主要是维护和提高松动围岩的残余强度, 充分发挥围岩的承载能力^[3-5]。水井头煤矿现有支护系统很难发挥深部围岩的自承载能力, 所以其顶板离层, 两帮鼓出, 底臃十分严重, 难以控制。

2 支护方案的确定

2.1 支护原理

对于一般的岩层巷道, 无论棚式支护或锚杆支护, 控制的对象是巷道周边松动破碎围岩, 这里隐含的基本假设是巷道外部围岩是稳定的。由于破碎软岩巷道围岩在高应力作用下短时间内便形成了较大的破碎区和塑性区, 相对而言, 其外部围岩是不稳定的, 加之岩体强度小, 集中应力峰值相对无限外移, 使得巷道围岩持续变形。因此, 高应力破碎软岩巷道的支护功能不仅要阻止破碎岩体垮落和蠕变变形, 而且还需限制围岩集中应力峰值的外移^[8-9]。

为此, 对高应力破碎软岩巷道的围岩控制, 引入“大、小承载结构”原理(简称大、小结构)^[8], 并适当拓展其内涵, 这里, “大承载结构”指巷道围岩应力峰值点附近, 以部分塑性硬化区和软化区煤岩体为主体组成的承载结构^[9]为主承载结构。“小承载结构”是指锚固体、注浆体等巷道支护结构。当巷道围岩应力较低时, 巷道掘出后, 围岩经过短暂的应力调整, 可形成稳定的大承载结构; 当巷道在高应力作用下, 巷道掘出后, 在应力调整过程中, 围岩破碎区、塑性区迅速扩大, 大结构迅速向岩体内移动; 在大结构移动的过程中, 若没有小结构来调整应力场并达到新的平衡, 则大结构将持续外移, 直至巷道破坏形成新的平衡应力场为止。因此, 小结构通过调整围岩应力场影响大结构的形成过程, 只有当小结构尽早形成并达到足够的强度和承载能力, 大结构就能较早形成, 巷道围岩才能稳定。

因此, 高应力极软岩巷道围岩控制的关键是通过

支护手段, 尽早形成有较高强度的小结构, 缩小巷道围岩破碎区, 促使围岩内部尽快形成稳定的大承载结构, 从而保持巷道围岩的稳定。

2.2 支护方案

根据巷道变形机理及支护原理, -300 m 东大巷支护主要应从3个方面考虑: ① 提高初期支护阻力, 阻止围岩破碎区的迅速扩大; ② 加固围岩, 提高破碎围岩的承载能力, 及早形成小承载结构, 阻止集中应力的无限外移; ③ 封闭围岩, 封堵围岩内部渗水, 阻止围岩膨胀。底板是高应力软岩巷道最薄弱的环节, 实践证明, 这类巷道的底臃控制如果只加固底板是难以奏效的, 而应把底板视为小结构的一部分, 通过提高包括底板在内的整个小结构的支护强度才能较好控制底臃^[10]。

根据上述思路确定以下支护方案, 如图3所示。

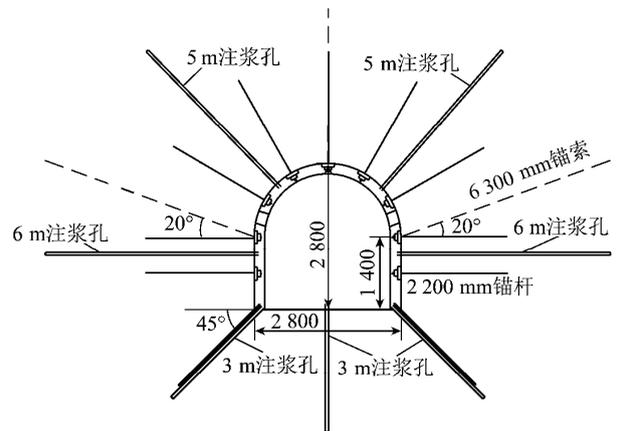


图3 强力支护方式断面(单位: mm)

Fig. 3 Sectional drawing of high-strength support method

(1) U型钢支架。采用29U型钢可缩性拱形支架, 棚距为700 mm。

(2) 锚杆支护。采用 $\phi 20$ mm \times 2 200 mm的高强度、高预应力左旋螺纹钢锚杆, 树脂药卷加长锚固, 锚固长度为1 200 mm, 预紧力为15 kN, 抗拉强度为750 MPa, 锚杆间排距均为700 mm, 为有效控制底臃, 底角锚杆倾角为45°, 排距350 mm。采用W型强力钢带连接锚杆, 托板为高强度拱形托板。

(3) 封闭围岩。全断面喷射水泥砂浆, 喷层厚度30~50 mm, 封闭围岩。

(4) 注浆支护。全断面布置7个注浆孔, 根据围岩裂隙分布深度, 确定注浆孔长度顶板5 m, 两帮6 m, 底板及底脚为3 m, 注浆材料为高水速凝材料, 水灰比1.2: 1。

(5) 锚索支护。锚索采用高强度低松弛的1 \times 19 钢绞线, 直径22 mm, 长度6.3 m。树脂药卷锚固, 锚固长度1.5 m, 排距为2.1 m。

2.3 数值模拟

为分析支护效果,采用 FLAC5.0 软件模拟了 3 种支护方案的支护效果,方案 1 是砌碛支护,方案 2 是锚杆加 U 型钢支护,方案 3 是 2.2 节所述支护方案。模拟结果如图 4、5 所示。

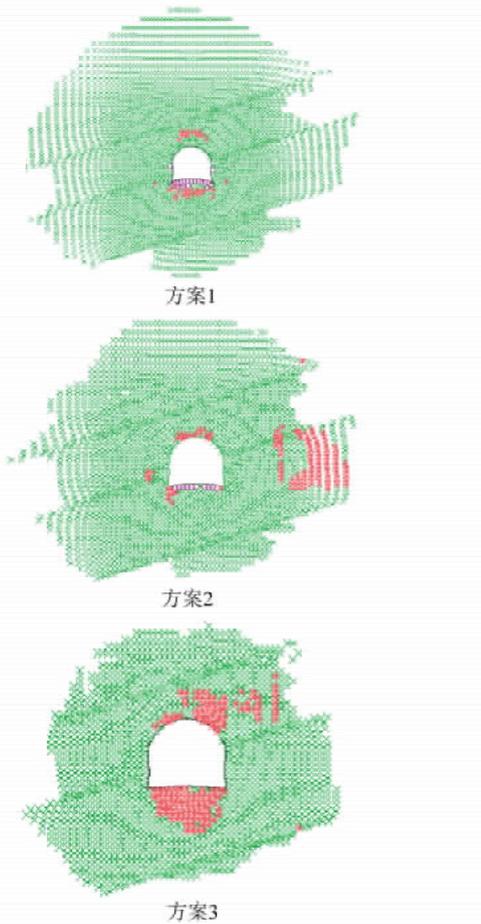


图 4 各方案围岩塑性区分布

Fig. 4 Distributions of surrounding rocks mass plastic zone in different programs

从图 4 中看到,随着支护阻力的增加和支护强度的加大,围岩塑性区范围逐渐变小。由于 -300 m 东大巷围岩为极软岩层,采用砌碛支护时,由于没有进行有效的壁后充填,初期支护阻力几乎为 0,在集中应力和构造应力的作用下,围岩塑性区自由发展,塑性区半径达到 10 m 以上(方案 1);方案 2 采用高强度锚杆和 U 型钢支架支护,提高了初期支护强度和刚度,也在一定程度上改善了围岩的力学性能,围岩塑性区半径减小到 7 m 左右;方案 3 在方案 2 的基础上,进行了围岩注浆和大强度锚索支护,充分调动了深部围岩的强度,提高了破碎围岩的承载能力,有效地减小了塑性区范围,塑性区半径减小到 4 m 左右。

从图 5 中看到,随着支护强度的不断加大,围岩主应力集中区越来越靠近巷道,且集中应力峰值越来越

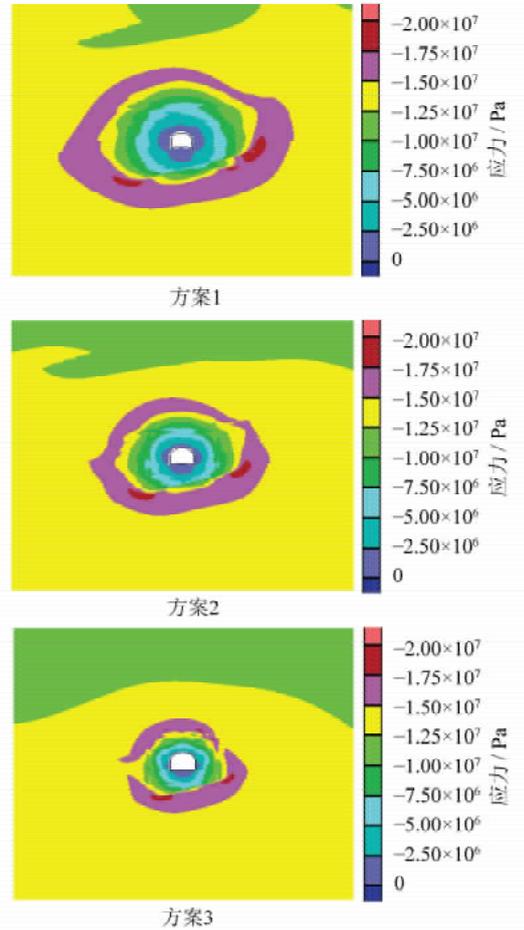


图 5 各方案围岩主应力分布云图

Fig. 5 Contours of surrounding rocks principal stresses in different programs

越低,说明随着支护强度的不断加大和破碎围岩力学性能的改善,围岩自身的承载能力得到加强,从而阻止了集中应力无限制地向围岩内部移动,在巷道周围较早形成了有效的承载结构^[8-9],避免了塑性区的过度发展,减小了围岩的变形,保持了巷道的稳定。

3 各环节支护时间的确定

联合支护的关键就是要能发挥每个支护环节和支护材料的作用,尤其对 -300 m 东大巷这样的极软岩层巷道这一点是至关重要的。因此,在制定施工方案时,合理确定每一环节的支护时间是十分必要的。

合理支护时间可以根据巷道围岩的位移-时间($U-t$)曲线进行判断,通过巷道表面位移的监测,可以判断巷道表面位移变化速度由快到趋于平缓的拐点附近作为二次支护的最佳时间。

本巷道支护有 3 个环节,要确定两个支护时间点:①锚杆支护后 U 型钢支架支护时间;②注浆、锚索的支护的时间。为确定两个支护时间点,在前 50 m 巷道的施工过程中,采取分段支护分段观测的

方法,进行了较长时间的围岩变形监测,得到图 6、7 所示的围岩变形曲线。

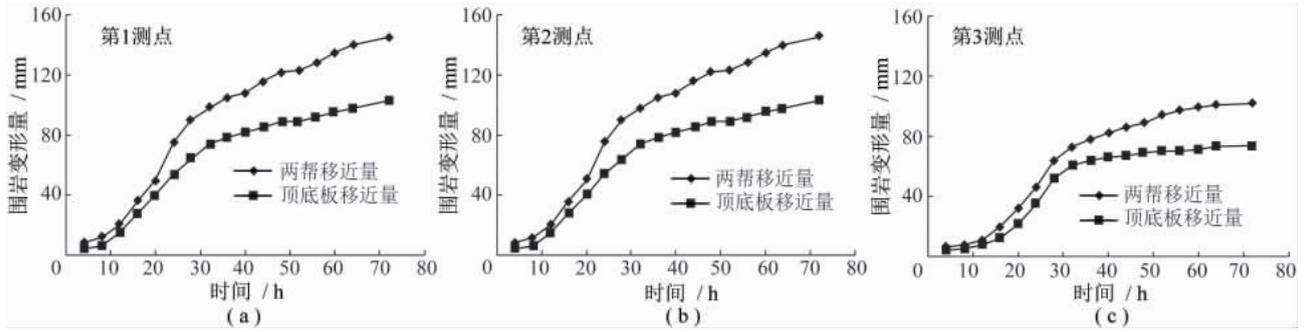


图 6 锚杆支护围岩变形曲线

Fig. 6 Deformation curves of surrounding rocks bolting

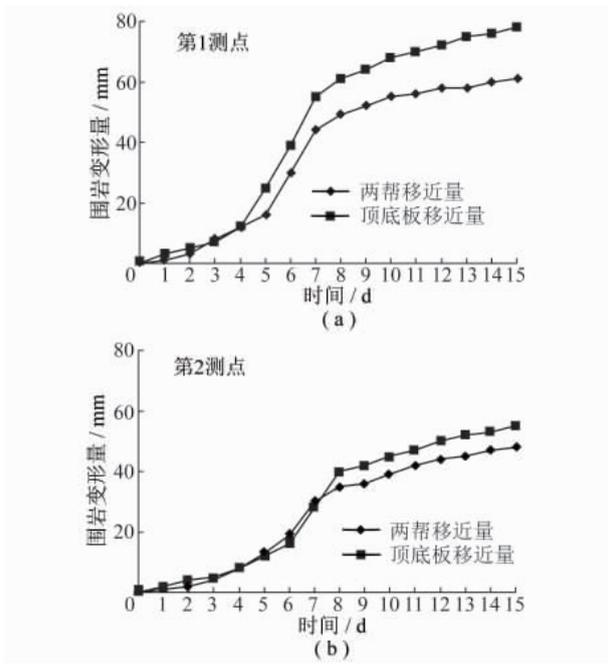


图 7 架设 U 型钢支架后围岩变形曲线

Fig. 7 Deformation curves of surrounding rocks after erect U-shaped steel

从图 6 可知,安装锚杆后第 1 测点围岩变形曲线的拐点出现在 28 ~ 32 h 之间,第 2 测点出现在 32 ~ 36 h 之间,第 3 测点 32 ~ 36 h 之间,因此,确定 U 型钢支护在锚杆支护 32 h,即 4 个小班后进行。

从图 7 看到,U 型钢支护后围岩变形速度显著下降,说明 U 型钢支架的刚度发挥了较大的作用,同时从两个测点的变形曲线可知,U 型钢支架支护后第 1 测点围岩变形曲线拐点出现在 7 ~ 9 d 之间,第 2 测点出现在 8 ~ 10 d 之间,因此,确定注浆支护时间在 U 型钢支护 10 d 后进行。

4 支护效果

-300 m 东大巷从 2006 年 8 月开始施工,到 2008 年 2 月掘进 350 m,巷道设计宽 3.0 m,高 2.8

m,由于该巷道为极软岩层,遇水膨胀,而且支护过程持续时间较长,因此,为保证巷道有效断面,巷道掘进宽为 3.4 m,高 3.2 m。从图 8 看到,在巷道施工过程中,两帮或底板均发生了较大的变形,第 1 测站两帮移近量为 268 mm,顶底板移近量为 205 mm(主要是底臃,下同),第 2 测站两帮移近量为 226 mm,顶底板移近量为 175 mm,但巷道最终趋于稳定,保证了设计断面。

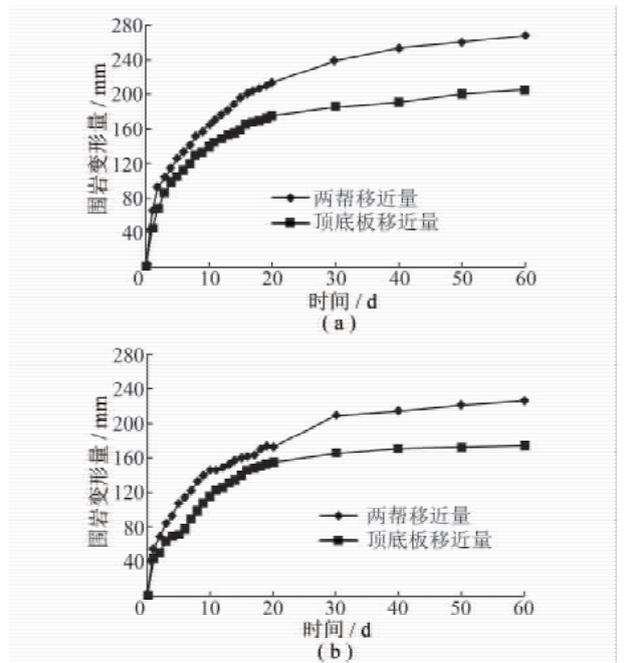


图 8 巷道围岩变形曲线

Fig. 8 Deformation curves of roadway surrounding rocks

从图 8 看到,两帮移近量或顶底板移近量曲线均有两个拐点,第 1 个拐点是在巷道开挖第 3 d 左右,也就是工字钢支架架设 2 d 以后,第 2 个拐点是在第 15 d 左右,也就是注浆和锚索支护 3 d 后,说明各种支护方式的支护时间确定是合理的。巷道变形由以前的 2 个月内巷道断面缩小 1/2,变成了掘进两个月后巷道变形逐渐减小并趋于稳定。到 2009 年 6 月,

该巷道只进行了一次卧底 200 mm 左右的维修,巷道宽度仍有 2.87 m,高度 2.68 m,大大减小巷道的翻修工作量,也说明该巷道的支护取得成功。

5 结 论

(1) 水井头煤矿 -300 m 东大巷围岩属于特软岩层,不仅富含遇水膨胀的岩石,而且巷道处于构造应力区,围岩松散破碎,常规支护方式下围岩强烈变形的根本原因是支护不能阻止围岩塑性区、破碎区的快速发展,在巷道周围形成大范围的破碎区,因而难以维护巷道的稳定。

(2) 通过现场调研与测试,确定了“高阻让压、高强度支护”方式,取得了良好的支护效果。

(3) 对于此类特软岩层巷道,由于围岩膨胀应力和构造应力巨大,让压是必不可少的,但不能采用主动让压方式,而必须采用高阻让压,这样既部分释放了围岩的变形能,又阻止了围岩破碎区的快速发展。

参考文献:

- [1] 何满朝,景海河,孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
He Manchao, Jing Haihe, Sun Xiaoming. Soft rock engineering mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [2] 孙晓明,何满朝. 深部开采软岩巷道耦合支护数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报 2005, 34(2): 166-169.
Sun Xiaoming, He Manchao. Numerical simulation research on coupling support theory of roadway with in soft rock at depth[J]. Journal of China University of Mining and Technology 2005, 34(2): 166-169.
- [3] 姜耀东,王宏伟,赵毅鑫,等. 极软岩回采巷道互补控制支护技术研究[J]. 岩石力学与工程学报 2009, 28(12): 2383-2390.
Jiang Yaodong, Wang Hongwei, Zhao Yixin, et al. Study of complementary supporting technology of extremely soft rock mining roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2009, 28(12): 2383-2390.
- [4] 康红普,王金华,林健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用[J]. 煤炭学报 2007, 23(12): 1233-1238.
Kang Hongpu, Wang Jinhua, Lin Jian. High pretensioned stress and intensive bolting system and its application in deep road-ways[J]. Journal of China Coal Society 2007, 23(12): 1233-1238.
- [5] 李海燕,李术才. 膨胀性软岩巷道支护技术研究及应用[J]. 煤炭学报 2009, 34(3): 325-328.
Li Haiyan, Li Shucai. Study and application of support technology on swelling soft rock roadway[J]. Journal of China Coal Society 2009, 34(3): 325-328.
- [6] 王襄禹,柏建彪,陈勇,等. 深井巷道围岩应力松弛效应与控制技术[J]. 煤炭学报 2010, 35(7): 1072-1077.
Wang Xiangyu, Bai Jianbiao, Chen Yong, et al. Stress relaxation effect and control technology in surrounding rock in deep entry[J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(7): 1072-1077.
- [7] 许兴亮,张农,曹胜根. 动压巷道围岩渗流场的空间分布特征[J]. 煤炭学报 2009, 34(2): 163-168.
Xu Xingliang, Zhang Nong, Cao Shenggen. Seepage space features of roadway surrounding rock affected by dynamical pressure[J]. Journal of China Coal Society 2009, 34(2): 163-168.
- [8] 侯朝炯,李学华. 综放沿空掘巷围岩大、小结构的稳定性原理[J]. 煤炭学报 2001, 26(1): 1-6.
Hou Chaojiong, Li Xuehua. Stability principle of big and small structures of rock surrounding roadway driven along goaf in fully mechanized top coal caving face[J]. Journal of China Coal Society 2001, 26(1): 1-6.
- [9] 王卫军,李树清,欧阳广斌. 深井煤层巷道围岩控制技术及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 2006, 25(10): 2102-2107.
Wang Weijun, Li Shuqing, Ouyang Guangbin. Study on technique and test of surrounding rock control of deep shaft coal roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2102-2107.
- [10] 王卫军,冯涛. 加固两帮控制深井巷道底臃的机理研究[J]. 岩石力学与工程学报 2005, 24(5): 808-811.
Wang Weijun, Feng Tao. Study on mechanism of reinforcing sides to control floor heave of extraction opening[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2005, 24(5): 808-811.