

极破碎围岩巷道锚注技术研究*

南存全 姜聚宇** 于永江

(辽宁工程技术大学矿业学院, 阜新 123000)

摘要:以开滦范各庄极破碎围岩回风巷道修复为研究背景,充分调查该回风巷道的原有支护情况,针对普通的锚杆支护很难达到修复目的的情况,提出采用以“锚、喷、注”相结合的支护工艺。应用有限差分数值模拟软件 FLAC2D 对 2100 石门破碎巷道在锚喷支护、锚注支护两种方式下的垂直应力分布、屈服状态、位移量分布,分别进行数值模拟分析,并且对巷道位移和锚杆压力进行现场监测分析。经验证:锚注支护不仅可以有效控制巷道围岩变形,而且能保障矿井安全高产高效生产。

关键词:锚注支护;FLAC2D;围岩控制;支护优化;现场监测

中图分类号:TD35 **文献标识码:**A **doi:**10.16507/j.issn.1006-6055.2015.05.007

Researches on Bolt-grouting Technology for Seriously Broken Surrounding Rock Roadway *

NAN Cunquan JIANG Juyu** YU Yongjiang

(College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000)

Abstract: This paper is based on the repairing of seriously broken surrounding air return laneway rock roadway of Kailuan Fangzhuang coal mine. According to adequately investing the exiting support state, it is very difficult to achieve the purpose of repair to use ordinary bolt supporting, the support craft combined with anchor, gush and injecting are put forward. Using finite difference numerical simulation software FLAC2D to simulate and analyze the vertical stress, yielded state and the displacement distribution under the two supporting modes of bolt-shotcrete support and bolt-grouting support, and also the roadway displacement and bolt stress is monitored and analyzed on the spot. To conclude that bolt-grouting support can not only control the deformation of rock roadway efficiently but also can guarantee safe production of mine in high efficiency.

Key words: bolt-grouting support; FLAC2D; surrounding rock control; support optimization; field monitoring

1 引言

当前我国煤炭巷道年掘进量已经达到 6000 km 以上,而在软弱及破碎围岩中的巷道年掘进量大约为 600 km,其中每年需要返修、维护的软岩巷道大约有 100 km。对于易破碎软岩巷道的支护方式,我国进行了大量的理论研究与应用实践,传统的支护方式有木支护^[1]、混凝土砌碛支护^[2]和 U 型钢支护^[3]等,这些被动支护方式很难长期维持巷道的稳定性,支护效果不理想。近年来,有许多煤矿采用锚喷支护^[4]这种主动支护方式来控制破碎围岩的变形,但这种支护方式的局限性大、允许变形量小,易造成支护结构的破坏。因此,本文提出深部极破碎围岩巷道锚注耦合支护技术,这种主动支护方式对围岩变形的控制更有效,为煤矿安全高产高效开采提供了较为完备的技术方法。

2 工程概况

开滦集团范各庄矿二、三水平是主要生产水平,地面标高 +24 m ~ +29 m,二水平标高 -490 m,该水平埋深 520 m,划分为 5 个采区,采用走向长壁式采煤法、综采和综合放顶煤采煤工艺。巷道支护一般为金属拱形支架和锚网支护,煤层倾角为 8° ~ 15°,走向 NS。四石门以北主要为单斜构造,二水平主要断裂构造为 F0 断层。该断层为落差 25 m 正断层,沿走向贯穿整个二水平。二水平三石门以北巷道受采动和埋深影响,巷道变形较大,局部已经影响巷道正常使用,本次锚注试验的巷道为 2100 石门。

范各庄矿 2100 石门位于二水平南一采区,该石门为轨道石门,在南一采区回采时期主要为轨道运输和进风巷道。该巷道穿过 12、11、9、7 煤层,原巷道为砌碛和架棚支护,原设计断面为 3.5 m × 2.8 m、部分为 4.6 m × 2.6 m。该巷道埋深较大,两侧有 30 m 保护煤柱,其余均回采,受采动压力影响明显。由于受采动影响,巷道出现碛体和拱形棚变形严重,

2015-03-13 收稿,2015-03-30 接受

* 国家自然科学基金(51174106)资助

** 通讯作者, E-mail: 343900349@qq.com; Tel: 15041859301

有片帮、漏顶现象,巷道断面已分别被压缩到 2.5 m×2.2 m。特别是 11 煤层底板凝灰质砂岩层,遇水膨胀风化变形较大,致使巷道底鼓严重,巷道修复前平均底鼓 600 mm。在三水平回采时,设计利用该巷道作为三水平的主要回风巷道,现有的断面不能满足回风需要,为此需对该巷道进行综合修复支护。

3 锚注支护的优点

与普通的锚喷支护相比,锚注支护的优点主要表现在:

1)对围岩进行注浆,加大了支护结构面尺寸,使得支护结构上的围岩荷载产生的弯距变小,因而使支护结构中产生的压应力和拉应力变小,支护结构的承载能力得到很大的提高,支护结构的适应性也變得更好。

2)对围岩进行注浆,使围岩的裂隙被浆液填充,起到隔绝空气和防止围岩风化的作用,且能防止水进入围岩,从而使围岩本身的强度变低。

3)对围岩进行注浆后,喷层壁填充紧密,可以使作用在喷层和支架上的荷载均匀分布,从而不会出现应力集中点,造成围岩破坏。

4)对巷道进行注浆后,巷道两帮承载了顶板的部分压力,对巷帮进行加固,使得压力传递到底板。组合拱厚度加大,应力集中现象得到缓解,底板的塑性变形也大大减小,解决了底鼓严重的难题。底板与巷道两帮的稳定有助于提高顶板的稳定性。

5)对巷道进行注浆后,松散破碎的围岩胶结成为一个整体,围岩体的内聚力、内摩擦角及弹性模量都得到提高,从而提高围岩强度,使围岩本身成为支护结构,达到真正意义上的主动支护。

4 数值计算模型和方案

4.1 FLAC2D 简介

FLAC2D 是一个用于工程力学计算的二维显示有限差分程序。开始用于开发采矿工程和岩土工程,现在得到了广泛的应用。主要模拟一些塑性材

料,例如土体和岩石等。塑性材料由网格区域和单元共同代替,为适应模拟模型的要求,网格区域可形成任意形状。预先设定的线性或非线性应力/应变关系可以确定单元的力学行为。为使得材料的塑性变形甚至流动破坏的模拟变得容易且精确,FLAC2D 采用显式拉格朗日差分法和混合离散技术。因为计算过程中不产生刚度矩阵,二维计算规模可变得庞大但对内存要求不高。本文应用有限差分计算方法^[5]对开滦范各庄 2100 石门巷道进行数值模拟,设计了合理的有限差分网格,根据实际测量设定合理的边界条件并赋予初始条件。采用摩尔库伦破坏准则对该巷道在锚喷和锚注支护两种情况下的垂直应力分布,屈服状态和位移量分布分别进行了模拟,确定了一种经济上合理、技术上可行的方案。最终由 FLAC2D 完成求解。

4.2 计算参数选取

模拟过程中,各步的开挖通过将开挖的部分定义为 Null 空单元来实现。为保证模拟的准确,选取变形较大的 11 煤附近 2 号钻孔的岩石和锚杆(注浆)的物理力学参数,见表 1。

4.3 巷道修复支护方案设计

1)锚喷初次支护

由外向里逐步按照设计断面为 4.2 m×2.8 m 的要求刷扩巷道,刷扩后巷道及时采用锚杆支护,然后喷射混凝土封闭裸露围岩。支护参数:锚杆:右旋无纵筋等强螺纹钢树脂锚杆,Φ20,长度 1800 mm,间排距 800 mm×700 mm;金属网:Φ6 钢筋金属网,网孔 150 mm×150 mm;喷射混凝土:强度 C20;配比水泥:自燃陶粒土=1:4,厚度 80 mm。

2)锚注加固支护

巷道刷扩完成后,为防止围岩再次受采动影响破坏,采用注浆工艺加固巷道,使巷道破碎围岩形成整体承载能力。锚注支护参数确定如下:注浆材料:水泥单液浆,为防止浆液从注浆锚杆中向外倒流,封孔时加入不少于水泥重量 5% 的水玻璃进行封孔;水泥:42.5#普通硅酸盐水泥,水灰比 1:0.8;注浆锚

表 1 模拟岩体力学参数

岩层	容重/kg		弹性模量/MPa		内聚力/MPa		内摩擦角/°		抗拉强度/MPa	
	注浆前	注浆后	注浆前	注浆后	注浆前	注浆后	注浆前	注浆后	注浆前	注浆后
细砂岩	2550	2805	2956	3547	0.61	0.92	25.34	30.41	0.60	0.90
粉砂岩	2480	2728	2120	2544	0.46	0.69	23.51	28.21	0.45	0.68
11 煤	1420	1562	1053	1263	0.20	0.31	20.45	24.54	0.20	0.30
粉砂岩	2460	2706	1976	2371	0.41	0.61	22.90	27.48	0.40	0.60
中砂岩	2550	2805	4629	5555	0.77	1.15	27.18	32.62	0.75	1.13

杆:自钻式中空注浆锚杆 $\Phi 22 \times 2000$ mm,位于原有锚杆中间,间排距 $1500\text{ mm} \times 1500\text{ mm}$,地脚锚杆向下扎 $30^\circ \sim 40^\circ$ 。2100 石门布置示意图如 1 所示;注浆泵:注浆泵是用 QZB-50/60 气动注浆泵两台,一台注水玻璃,一台注水泥浆。该泵工作压力高,体积小,移动方便;搅拌罐:自制风动搅拌罐;注浆压力:为避免注浆压力过大造成混凝土喷层鼓裂,设计注浆压力为 2.5 MPa 。

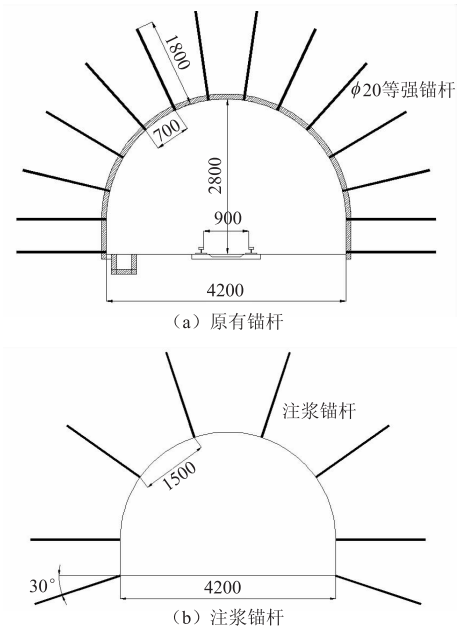


图 1 2100 石门锚杆布置

5 模拟结果分析

本项目模拟锚喷支护和锚注支护两种情况,通过数值模拟结果分析两种情况的支护效果。

1)垂直应力分布

图 2a 是锚喷^[6]巷道的垂直应力分布图。由图可见,对巷道进行锚喷支护,由于围岩重力的作用,巷道围岩大多处于压应力范围内,在巷道两帮较远处出现应力集中,巷道两帮围岩应力分布不均匀,压应力较小,最大应力值为 $1.75 \times 10^7\text{ Pa}$ 。对巷道进行锚注支护后的垂直应力分布如图 2b 所示。用注浆锚杆对巷道进行压力注浆且对巷道打锚杆支护,顶板岩的拉应力区域大大减少,缓解底板围岩的应力集中情况。巷道两帮的应力达到最大,表明锚注支护后,提高了岩石的整体性,共同承担上覆岩层所产生的载荷^[7],应力最大值为 $2.5 \times 10^7\text{ Pa}$ 。对比两幅图发现,进行锚注支护后,巷道围岩应力集中的现象得到了明显的改善,从应力的角度出发,巷道的顶板下沉和底鼓得到了有效的控制。

2)屈服状态

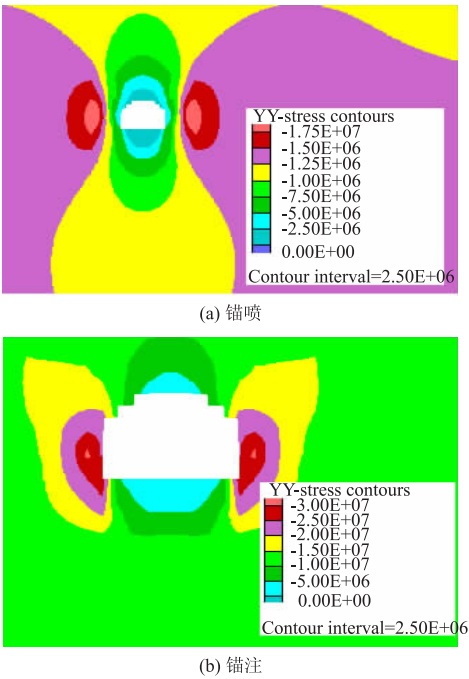


图 2 锚喷与锚注支护垂直应力分布

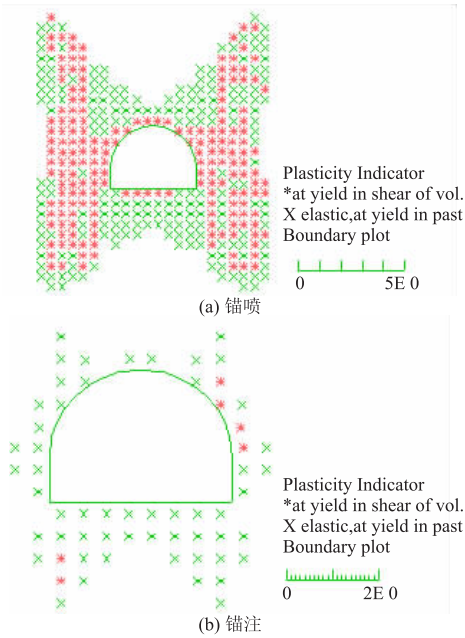


图 3 锚喷与锚注支护屈服状态

图 3a、b 分别是巷道锚喷支护和锚注支护的屈服状态分布图。因为受到构造应力作用和相邻巷道的影 响,该巷道受剪切破坏作用,使原巷道围岩破碎。在巷道锚喷支护后,又对该巷道产生了二次破坏,打破了原有的应力平衡状态^[8],巷道围岩周围出现不同程度的塑性破坏。该巷道两帮的顶部出现拉应力和剪切破坏,底板出现拉应力破坏。

对巷道实施压力注浆锚注支护后,增强了围岩的自身承载能力以及刚度和强度,巷道围岩的抗剪强度得到了极大的加强,从图 3b 可以发现,实施注浆后,巷道围岩的剪切破坏情况得到了明显的改善。巷道锚注支护后,原有的塑性破坏区重新变为坚固的弹性区^[9]。由此得出锚注支护对巷道加固起到了非常好的作用,它使得围岩的整体性提到了提高,并且解决了巷道松散破碎岩块向巷道内掉落的难题。

3) 位移量

图 4a、b 分别是进行了锚喷支护和锚注支护后的巷道围岩总位移分布图。因为 2100 石门巷道围岩松散破碎,进行锚喷支护后,在水平应力和重力的共同作用下,巷道周边围岩向巷道方向发生移动,在巷道围岩浅部形成了一个封闭的塑性变形圈,变形最大地方的位移为 273 mm,巷道两帮的变形最为严重。对巷道进行锚注加固后,由图 4b 的位移量能够得出,锚注支护缩小了围岩变形范围,围岩的塑性变形圈位移减小到 10 mm,大大地缓解了缩帮和底鼓现象。从位移值可以得出,巷道围岩位移最大值减少近 95%。巷道围岩的刚度和强度明显增强^[10],巷道位移明显减小,巷道锚注起到了很好的加固支护作用。

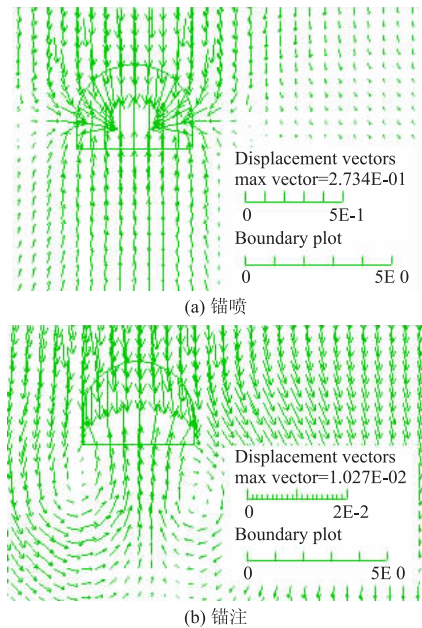


图 4 锚喷与锚注支护位移量

6 巷道位移与锚杆压力监测分析

6.1 巷道围岩表面位移变形规律

通过巷道表面位移的测量判断锚杆的支护效果

和围岩的稳定状况。本次巷道表面变形测点按“十字交叉法”布置两条测线,用钢卷尺测量,测量内容包括:两帮的距离、顶底板距离和顶板下沉量。2100 石门每 30 m 布置一个测站,共布置 5 个测站,下面以 2100 石门 2[#]和 5[#]测站为例分析巷道表面变形规律。2[#]测站位于 11 煤底板岩石中,5[#]测站位于 9 煤顶板岩石中,具有典型的意义。

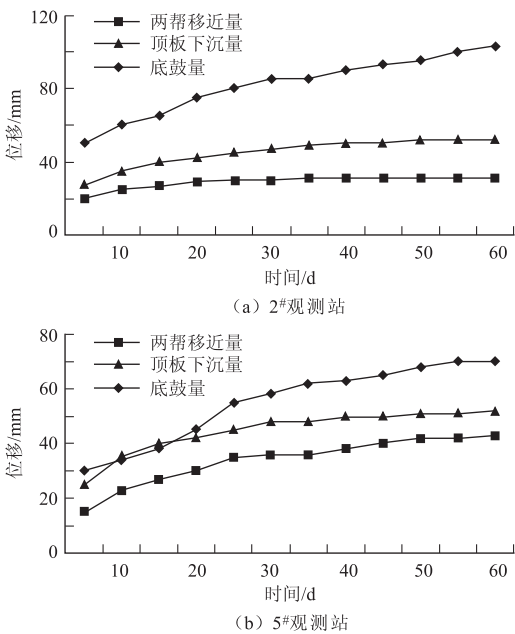


图 5 2[#]和 5[#]观测站围岩表面位移

由图 5 可知:1)巷道锚喷支护后约 10 天内围岩变形的位移较大,采用锚注耦合支护 1 个月后两帮和底板基本趋于稳定。与采用原支护方式两帮最大移近量 318 mm,底鼓最大 650 mm 相比,采用锚注耦合支护两帮最大移近量仅 42 mm^[11],底鼓量最大 105 mm。两帮移近量最大值减少了 84%,底鼓量下降了 83%。2)巷道围岩变形以顶底板移近量为主,顶底板移近量为两帮移近量的 2 倍。

6.2 巷道锚杆压力监测分析

从图 6 可以看出:1)在前半个月锚杆所受的压力增加较大。造成顶板锚杆与帮锚杆初期受力较大是由于巷道初期的变形较大所致。在以后的时间内锚杆的受力情况变化不大。2)2[#]观测点的顶板锚杆的受力远大于 5[#]观测点顶板锚杆的压力,这是因为二号观测点的顶板为粉砂岩,是典型的软岩巷道,遇水膨胀,顶板塑性流动造成该处锚杆的受力变大。3)锚杆的初锚力对于锚杆的支护起着至关重要的作用,锚杆的初锚力越大支护效果越好。锚杆的初锚力较大时,能够很好的增加煤岩体的整体性,使得煤岩体成为一个主动承载体,共同支撑上覆岩层,达

到主动支护^[12]的目的。

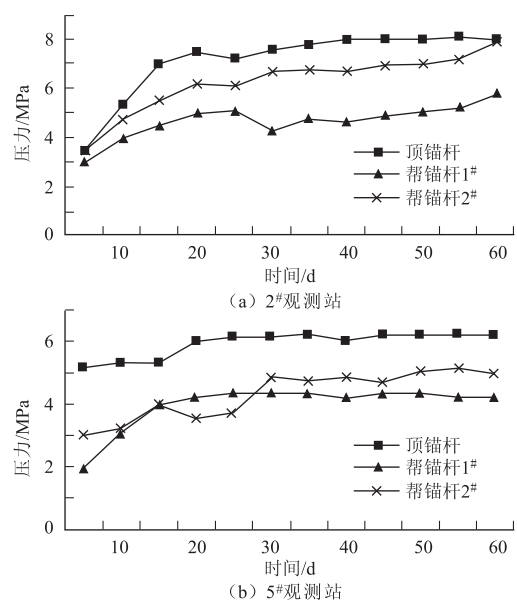


图6 2#和5#观测站锚杆压力

7 结论

- 1) 锚注支护使围岩裂隙充填密实,提高了破碎后围岩的整体强度,锚杆、锚索、浆液以及巷道围岩形成了一个主动承载体,共同承担上覆围岩所形成的载荷。
- 2) 对原有破碎的巷道进行修复加固时,锚注支护作为一种主动支护方式,与简单的锚喷支护方式相比,对围岩变形的控制更有效,对提高巷道的服务年限更有利。
- 3) 锚注支护使得巷道的位移量大大减小,提高

了支护结构的整体承载能力,有利于支护结构保持长期稳定和巷道的围岩应力均匀分布,可以很好地解决极破碎围岩巷道的支护难题,保证矿井的安全高产高效生产。

参考文献

[1] J. 沃纽克. 世界最深的木支护竖井[J]. 加拿大矿业杂志,1986, 107(6):9-10.

[2] 刘志新,逢吉余,刘润田. 砌碛支护在软岩巷道中的应用[J]. 山东煤炭科技,1999,(3):27-28.

[3] 程章允,王维德. U型钢支护技术在应力集中区巷道维修中的应用[J]. 水力采煤与管道运输,2007,(2):32-33.

[4] 李金奎,李学彬,刘东生,等. 三软煤层巷道锚网喷联合支护的数值模拟[J]. 西安科技大学学报,2009,29(3):270-273.

[5] PARVIZ M, KRISHNAN M. Direct Numerical Simulation: A Tool in Turbulence Research[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1988,30:539-578.

[6] 郑颖人. 地下工程锚喷支护设计指南[M]. 北京:中国铁道出版社,1988.

[7] 钱鸣高,石平五,许家林,等. 矿山压力与岩石控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003.

[8] 于学馥,郑颖人,刘怀恒,等. 地下工程围岩稳定性分析[M]. 北京:煤炭工业出版社,1983.

[9] 靖洪文,傅国彬,郭志宏,等. 深井巷道围岩松动圈影响因素分析及控制技术[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(1):70-74.

[10] 栢建彪,候朝炯. 深部巷道围岩控制原理与应用研究[J]. 中国矿业大学学报,2006,35(2):145-148.

[11] 孙晓明,何满潮. 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(3):166-169.

[12] 郑雨天. 关于软岩巷道地压与支护的基本观点[C]. 软岩巷道掘进与支护文集. 沈阳:东北大学出版社,1985,(5):3-35.