

高应力破碎巷道仿根系固土支护与控制对策^{*}

苏华友¹, 蒋滨¹, 张康宁¹, 骆循^{1,2}

(1.西南科技大学 环境与资源学院,四川 绵阳 621010;2.澳大利亚联邦科学与工业组织,
澳大利亚 布里斯班 PO Box 883)

摘 要:针对深部高应力破碎巷道支护难度大、维护费用高的问题,以金川镍矿为工程背景,通过理论分析、室内实验和井下试验等手段,借鉴植物根系固土力学机制,深入探讨高应力破碎围岩巷道支护方法,得出如下结论:(1)仿根系固土力学原理设计巷道支护,视金属网的作用类似于植物浅根的作用,将锚杆视为植物的深根,而随机分布的注浆则相当于根系中密布的侧根与支根,因锚网注而增加了巷道围岩的抗剪强度,其增量部分主要取决于根粘聚力 c_R 。(2)预应力锚杆、TECCO网、注浆等与围岩有机结合,形成了能承受高应力的围岩复合体。(3)试验巷道支护20天后,围岩变形速率小于0.05 mm/d,表明该支护方法能有效控制巷道变形。(4)巷道支护后19个月里,巷道完好无损,无需任何返修,返修周期提高了近3倍。

关键词:采矿工程;巷道围岩;高应力;注浆;根系固土机制

中图分类号:TD353

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)05-1338-07

Support and Control Countermeasure of Imitation Root Soil in High Stress Broken Tunnel

Su Huayou¹, Jiang Bin¹, Zhang Kangning¹, Luo Xun^{1,2}

(1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621000, P.R. China;
2. Australian Commonwealth Scientific and Industrial Organization, PO Box 883, Australia)

Abstract: In order to solve the problems of deep high stress broken tunnel support and high maintenance cost, Jinchuan nickel mine is used as the engineering background. Through theoretical analysis, indoor experiment and underground test, the following conclusions were drawn: (1) imitation of the root of the principle of solid soil mechanics design tunnel support, depending on the role of the metal mesh is similar to the role of plant roots, the anchor as the deep roots of plants, and random. The distribution of grouting is equivalent to the roots in the root of the root and the root, due to anchor network to increase the tunnel rock shear strength, the incremental part of the main depends on the root cohesion c_R . (2) prestressed anchor, TECCO network, grouting and the combination of the surrounding rock, formed to withstand high stress complex. (3) after 20 days of test tunnel support, the deformation rate of surrounding rock is less than 0.05 mm/d, which indicates that the supporting method can effectively control the deformation of tunnel. (4) tunnel support within 19 months, the tunnel intact, without any repair, repair cycle increased by 3 times.

Keywords: mining engineering; tunnel surrounding rock; high stress; grouting; root solid soil mechanism

^{*} 收稿日期:2018-04-26(修改稿)

作者简介:苏华友(1963-),男,四川成都人,教授,硕士生导师,主要从事岩土工程及地下工程施工安全监测方面的研究。E-mail: 875961018@qq.com

基金项目:四川省国际合作项目(2016HH0091)

0 引言

金川矿区地势比较平坦,海拔高度为 1 500~1 800 m,属温带大陆气候。近年来,矿山的富矿资源日益减少,贫矿开采规模逐渐扩大,且矿山工程地质条件更为复杂,千米深井开采增多。如二矿区的部分井巷工程距地表的垂直深度已达到 1 200 m,已属于目前世界上并不多见的大型复杂难采多金属矿床^[1]。矿区可以分为 4 个区域:Ⅰ矿区、Ⅱ矿区、Ⅲ矿区、Ⅳ矿区。各矿区内岩性复杂,主要包含条痕混合岩、大理岩、片麻岩、混合花岗岩、超基性岩体等岩石。多次地质构造运动的影响,导致矿区成为以水平构造应力为主的高应力矿区。根据已知的地应力测量结果^[2]:当深度 H 为 1 000 m 时,水平最大主应力可达到 50 MPa,水平最小主应力可达到 20 MPa,自重应力可达到 25 MPa,水平应力为自重应力的 1.69~2.27 倍。如此高的地应力,使得矿区的工程地质条件复杂,岩体破碎软弱,新掘进巷道的变形破坏非常严重,巷道的支护与维护成本都居高不下。尤其是当前面临大量贫矿资源开采的情况下,为了确保贫矿资源的安全、高效和低成本开采,有必要开展深部高应力破碎围岩条件下巷道支护新方法与新机制的探索,使贫矿资源开采中的巷道支护成本与返修成本能大幅度下降。

1 植物根系固土力学机制

对植物根系固土力学效应研究得比较系统的是 Wu 氏,其首先形成了根系固土的理论基础,即根系加筋土理论与根系锚固理论的 Wu 氏模型。该模型以摩尔—库伦强度理论 (Coulomb-Mohr) 为基础,其表达式为^[3-5]:

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

式中: τ 为岩土剪切破坏强度; c 为岩土的粘聚力; σ 为岩土的压应力; φ 为岩土的摩擦角; C_R 为根粘聚力。

由式(1)可知,抗剪强度的增量主要取决于根粘聚力 C_R 。它是由植物根系的加筋土理论与锚固理论衍生而来的,因为根系可看作天然的加筋材料,根土复合体可以看作加筋土。对于仿植物根系固土力学机制的矿山巷道支护来说,可以将锚网注

的联合支护及巷道围岩视为一种复合体,由此可得到根粘聚力 C_R 的计算公式:

$$C_R = k_1 C_b + k_2 C_m + k_3 C_g \tag{2}$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 分别为锚杆、金属网、注浆体等在巷道围岩复合体中所占的权重系数; C_b 为锚杆的抗剪切强度; C_m 为金属网的抗剪切强度; C_g 为注浆体的抗剪切强度。

2 矿山原巷道支护所面临的难点分析

目前金川矿区在深部开采过程中所面临的工程地质与巷道支护方面的技术难点主要体现在以下 3 个方面:

(1)在早期成矿过程中,由于岩浆活动频繁,造成矿区内地质构造极为复杂,断层纵横交错,节理裂隙十分发育。矿岩主要发育 3 组优势节理,节理下平均间距为 0.2 m,裂隙结构面有低强度的矿物质,主要有钙质、绿泥质、泥质与铁质等^[6]。巷道围岩主要是大理岩、混合岩、片麻岩等,由于多次受到地质构造运动作用,这些岩石比较破碎,整体性差,遇水易膨胀。表 1 为矿岩体的主要力学参数。

表 1 矿岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of mineral and rock

岩石名称	容重 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	泊松比	内摩擦角 ($^{\circ}$)	粘聚力 (MPa)
矿岩	30.0	33.1	1.0	3.57	0.24	31	0.8
混合岩	27.4	26.9	0.9	2.41	0.25	30	0.7
大理岩	30.9	36.8	2.1	3.84	0.26	34	1.1
砂岩	24.0	12.0	0.1	2.43	0.30	25	0.4
断层带	23.0	9.6	0.02	0.48	0.29	21	0.05

(2)原始地应力高,构造应力明显,最大主应力的方向和大小无规律可循。无论是数值模拟还是支护方案设计,巷道所处位置岩体中的地应力大小与方向都难以确定。

(3)巷道围岩位移变形大。目前金川矿深部

巷道的支护方式,主要为双层喷锚网支护或双层喷锚网+U型钢拱架的联合支护。其流程为:喷射混凝土+锚杆+金属网,初喷混凝土的厚度为50 mm,最后喷混凝土150 mm,混凝土强度等级为C20;锚杆采用 $\phi 18\text{ mm}\times 2250\text{ mm}$ 的二级螺纹钢筋制作,水泥药卷全长锚固,锚杆排间距为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$;锚垫板为 $\delta 10$ 钢板制作,规格为 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$;金属网采用 $\phi 6.5$ 的钢筋点焊而成,规格为 $1\ 250\text{ mm}\times 2\ 150\text{ mm}$,网度为 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 。在一次支护基础上再进行加密的第二次支护,即双层喷锚网支护,两次支护所用的材料与技术参数基本相同。对于围岩条件特别差的地段(比如断层附近的巷道),则再增加U型钢拱架进行加强支护。如此的巷道支护方式,在国内很多矿山都能很好地控制围岩的变形与破坏,但是在金川深部开采的巷道中,仍然出现围岩变形十分严重的情况。根据现场观察,一些巷道收敛变形量均很大,一般为数厘米至数十厘米,最大可达一米以上,严重者可封堵整个巷道。据统计,金川矿区巷道返修周期短则3~6个月,长则6~12个月,有些巷道要经过多次返修,每年矿山的巷道维护费用都高达几亿元。

3 控制对策与技术分析

3.1 原巷道围岩变形破坏机制分析

综合文献资料与现场调研分析,金川矿区巷道变形破坏原因主要有以下几个方面^[7-10]:

(1)锚杆:金川矿区巷道支护中存在锚杆被拉断、拉弯甚至锚杆整体失效等现象。其主要原因是:矿区现有支护通常采用 $\phi 18\text{ mm}\times 2\ 250\text{ mm}$ 的普通砂浆锚杆。这种锚杆强度和锚固力较低,长度偏短。在高地应力作用下,围岩破碎程度增加,巷道开挖后,围岩松动圈的厚度接近甚至超过锚杆长度,其松动圈的测试结果为:两帮松动圈 $2.1\sim 2.4\text{ m}$ 、拱顶松动圈 $1.9\sim 2.1\text{ m}$ 、底板松动圈 $1.0\sim 1.5\text{ m}$,锚杆现有刚度难以抵抗众多裂隙面的剪力荷载。同时,锚垫板形式单一,且厚度偏小。通过计算,金川矿区现有的托锚能力仅为 30.3 kN ,难以满足实际工程需要。

(2)金属网:金川矿区现行的金属网为 $\phi 6.5\text{ mm}$ 的钢筋焊接而成,焊接部位成为网的薄弱环节,其强度不足以承受巨大的围岩压力;其次是两张金属

网进行搭接时,仅仅依靠细金属丝将其搭接部分捆绑在一起或者是简单的钩接,如图1(a)所示,网与网之间难以形成一个坚固的整体;最后是在巷道超欠挖处,金属网无法紧贴巷道壁面,不能均匀承受围岩压力,如图1(b)所示。



(a) 金属网的简单搭接



(b) 金属网在超挖处无法紧贴巷道壁面

图1 金属网之间简单的搭接与无法紧贴巷道壁面

Fig. 1 The simple connection between metal mesh and the wall of tunnel that can't be closed to

(3)锚固剂:矿山一般选择水泥药卷作为锚固剂,需要人工将其塞进钻孔。在实际操作过程中,工人将水泥药卷放入水中浸泡时间过长或过短,都将不能发挥其应有的作用。另外,由于锚杆钻孔偏小,有时还存在孔内塌孔、堵塞等问题,所以很难将锚杆眼填满,致使这种低强度的锚固剂将锚杆与围岩断断续续地粘结在一起。此外,锚固剂终凝时间过长,难以达到及时锚固的效果。

综上所述,原支护方式下巷道围岩破裂机制可表述为:在以水平构造应力为主的高地应力破碎围岩巷道,一旦锚杆的锚固力不足,金属网连接也不牢固,围岩的破裂首先就会从这些薄弱处开始,并逐步由点到面、由表到里发展,最终造成巷道壁面的局部开裂、坍塌或冒落等。

3.2 控制对策

由上述巷道支护存在的问题可知,要实现深部开采时巷道稳定与降低支护成本,需要提高围

岩自身的强度与刚度,实现围岩自稳能力的增强。据此,提出基于植物根系固土力学机制的喷锚网注浆联合支护体系,以提高巷道围岩的自稳能力、减少巷道变形过大的控制对策^[11-13]:
①采用胀壳式中空注浆锚杆,并增大这种锚杆的强度与长度,就像植物根系中的深根一样深深地扎入到深层稳定的基岩之中;②通过应用高强度、轻质量、柔性好的 TECCO 网,并改进网与网之间的连接方式,提高网与巷道壁面的密贴程度,将 TECCO 网视为植物根系中发达的浅根,牢牢地包裹住巷道壁面较为破碎的岩体;③以锚杆的杆体为注浆管,灌注改性后的水泥浆液,使其迅速扩散到围岩裂隙之中,凝固的浆体似植物发达密布的侧根与支根,将松散破碎围岩紧紧粘结成一个整体性好的复合体,从而提高了破碎围岩的内在综合强度。

深根在植物根系固土中起着关键的作用。同样,锚杆在巷道支护体系中也是关键所在,对于胀壳式中空注浆锚杆支护的主要参数设计如下:

3.2.1 锚杆长度

如图 2 所示,锚杆长度通常按式(3)计算:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \tag{3}$$

式中: L_1 为锚杆外露长度,其值主要取决于锚杆类型及锚固方式,一般取 $L_1 = 0.15\text{ m}$; L_2 为锚杆有效长度; L_3 为锚杆胀壳段长度,一般有 $L_3 = 0.15 \sim 0.3\text{ m}$,这里取 $L_3 = 0.2\text{ m}$ 。

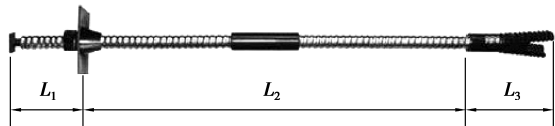


图 2 锚杆长度组成

Fig. 2 The composition of the anchor length

显然, L_1 与 L_3 易于确定,关键是如何确定锚杆的有效长度 L_2 。对于有效长度 L_2 ,可以采用解析法进行估计:

$$L_2 = \frac{(100 - RMR)B}{100} \tag{4}$$

式中: RMR 为岩体质量指标(Rock Mass Rating),其取值如表 2; B 为巷道宽度,这里为 5.4 m 。

由式(4)计算得出锚杆有效长度 L_2 为 $2.81 \sim 3.26\text{ m}$ 。

表 2 矿区各岩组的围岩分类指标

Table 2 The classification index of surrounding rocks of ore formation

岩组	指标与类别		
	Q 值	RMR 值	类别
混合岩	0.327	43.23	Ⅲ
薄层状大理岩	0.323	39.56	Ⅳ
超基性岩	0.395	40.27	Ⅳ
细粒花岗岩	2.63	47.78	Ⅲ
粗粒片麻岩	0.323	39.56	Ⅳ
断层破碎带	<0.1	<10	V

3.2.2 锚杆间距与排距

国内外矿山所使用的锚杆间距一般为 $0.5 \sim 2\text{ m}$ 。结合金川矿区深部开采中的高地应力与破碎围岩实际条件,取锚杆间距与排距均为 0.8 m 。

3.3 关键控制技术与参数

根据上述控制对策,结合矿山实际工程条件,提出了“喷射混凝土+胀壳式中空注浆锚杆+柔性 TECCO 网+注浆”的巷道联合支护体系,采用工程类比、数值模拟、理论分析等方法进行参数设计,支护原理与主要技术参数如下:

(1)胀壳式中空注浆锚杆:矿山下属的三矿区 1110 西分段道掘进时水平构造应力较大,围岩完整性差,节理裂隙发育,采用原来的砂浆锚杆双层网支护达不到应有的效果,因此改用胀壳式中空注浆锚杆,如图 3 所示。其主要技术参数为:选用 $\phi 28\text{ mm} \times$

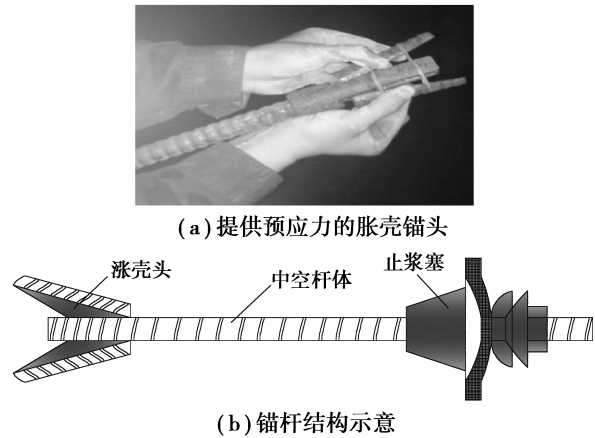
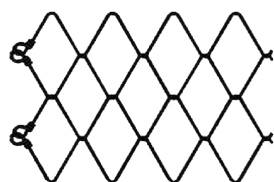


图 3 预应力注浆锚杆结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the prestressed grouting bolt

2 600 mm 精轧螺纹钢中空注浆锚杆,壁厚 5.5 mm,间排距 800 mm×800 mm,锚杆端部采用 $\phi 38$ mm×200 mm 的机械式胀壳进行锚固。旋转杆体使胀壳张开压在锚杆眼壁上,实现端部锚固,通过张拉设备对锚杆提供的预拉力不低于 80 kN,从而提高了围岩承受最大主应力的能力,更好地控制了巷道围岩的初期变形。

(2) 高强金属网:采用柔性 TECCO 网替代矿山原来所用的钢筋网片。TECCO 网结构为菱形,孔网为 140×80 mm,钢丝 $\phi 3$ mm,抗拉强度为 1 770 MPa,如图 4 所示。这种网最显著的优点是强度高、韧性强,网与网之间用专用锁扣连接,能够密贴巷道壁面,便于和围岩形成一个整体,在超欠挖较大的巷道也能够利用其柔性特性而密贴巷道壁面。



(a) TECCO 网结构示意图



(b) 连接网所用的锁扣

图 4 TECCO 网结构示意与连接用的锁扣

Fig. 4 TECCO mesh and the lock that used to connect

(3) 改性水泥注浆材料:仿植物根系中发达密布的侧根与支根的作用原理,通过锚杆的中空杆体向钻孔周围岩体内注入高压改性水泥浆,采用水灰比参考值为 0.38~0.45,注浆压力为 2~4 MPa。将钻孔外一定范围内的破碎岩体浇筑成一体,使其强度得到提高,围岩整体性进一步强化,大大提高了围岩的自稳能力与承载能力。另外,传统的水泥注浆材料因其粘度大、流动性差,不容易注入围岩的裂隙之中,试验中采用改性水泥浆,即加入 5% 的外加剂,以改变水泥浆的粘稠度,增大其流动性。试验证明,在同样注浆压力作用下,注浆扩散半径远大于普通水泥浆,使注浆后的围岩更加完整牢固。

实施了预应力锚杆、挂 TECCO 网及注浆之后,再喷以 C20 混凝土,喷层厚度一般为 100~150 mm。最后进行巷道表面收敛监测,完成整个巷道的支护。如图 5 所示为试验巷道锚网布置示意图。

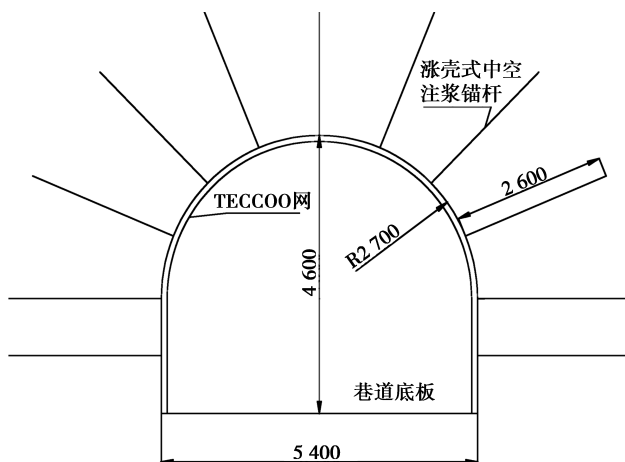


图 5 试验段的锚网布置示意图

Fig. 5 The anchor arrangement schematic diagram of test tunnel section

4 试验效果分析

在三矿区 1110 西分段道进行了 30 m 试验。该段巷道为新掘的水平分段运输巷道,在试验前已经按原来的砂浆锚杆双层网支护了几百米,这也是为了更好地进行新旧两种支护方式的对比。试验段采用胀壳式锚杆、TECCO 网、注浆等关键技术,发挥了联合支护的综合优势,取得了如下支护效果:

(1) 在注浆之前通过提前施加 80~100 kN 的预应力,有效减缓了巷道围岩初期的变形速率。

(2) 注浆压力达到 4 MPa,采用水灰比 0.48,再掺入比例 5% 的外加剂,增大了注浆扩散范围,将破碎围岩粘结成一个整体,增强了其抗剪、抗压与抗变形的能力。

(3) 采用高强柔性 TECCO 网,形成整体网状结构,在喷混凝土后形成一个较为完整牢固的外壳,增强了支护的整体效果。与原网片相比,TECCO 网的施工更简捷,效率也更高。此外,每支护一米巷道,仅仅金属网的钢材用量就节约了 58.8 kg,其综合经济效益十分可观。

(4) 提高了巷道返修周期。从现场的调查知

道,一般情况下,原来的双层喷锚网支护后约 6 个月就要进行一次返修,而 2015 年矿山每米巷道的返修成本约为 5 210 元。三矿区 1110 西分段道支护试验自 2015 年 10 月完成,截至 2017 年 5 月底,一年多时间里巷道未出现明显变形破坏,也没有进行过任何形式的维护维修,返修周期提高了近 3 倍。

(5)收敛变形情况。如图 6 所示为 1110 西分段道试验地点的平面布置示意图。试验段共设置了 3 个监测断面:1 号监测断面顶板及两帮相对变形最终位移量分别为 23.56 mm、63.39 mm;2 号监测断面顶板及两帮相对变形最终位移量分别为 34.55 mm、26.95 mm;3 号监测断面顶板及两帮相对变形最终位移量分别为 37.64 mm、40.26 mm。从监测数据分析后得知,支护 20 d 后巷道收敛变形总体呈现稳定趋势,其最终变形速率为 0.05 mm/d。由此可以看出,胀壳式中空注浆锚杆+TECCO 网+注浆的联合支护方式能够有效控制巷道变形,增强围岩的稳定性。

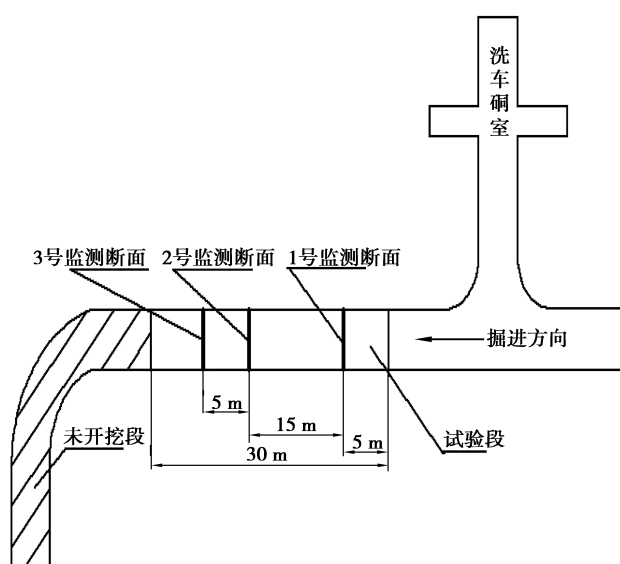


图 6 试验巷道地段工程平面简图

Fig. 6 Schematic diagram of engineering plane of test tunnel location

总体而言,采用“胀壳式中空注浆锚杆+TECCO 网+注浆”联合支护体系后,试验巷道整体状况较好,其最终支护效果良好,如图 7 所示。



(a) 挂网效果图



(b) 整体支护效果图

图 7 试验巷道支护效果图

Fig. 7 The control effect of surrounding rock of test tunnel

5 结论

(1)用仿植物根系固土力学原理来设计深部高应力破碎围岩巷道支护是可行的。锚网注联合支护方式能够增加巷道围岩的抗剪强度,其增量部分主要取决于根粘聚力 $C_R = k_1 C_g + k_2 C_b + k_3 C_m$ 。

(2)胀壳式中空注浆锚杆、TECCO 网、注浆等三者与巷道围岩能有机结合,形成一个能承受高地应力的围岩复合体;在承受高地应力方面,围岩承受的地压为主要部分,支护结构承受的是次要部分;在控制围岩变形方面,柔性 TECCO 网控制了局部松脱位移,锚杆与注浆控制了围岩整体位移。

(3)在试验巷道支护 20 d 后,巷道围岩变形速度基本在 0.05 mm/d,巷道收敛变形总体呈现稳定状态。根据 3 个监测断面的结果分析知,巷道顶板的平均下沉量为 32 mm,两帮相对位移量平均值为 44 mm。

(4)三矿区 1110 西分段道试验段支护后近两年内,巷道基本完好无损,无需进行任何返修,其返修周期提高了近 3 倍,每米巷道节约返修费为 15 630 元,综合经济效益明显。

参考文献 (References)

- [1] 王永前,杨志强,姚维信,等.金川镍钴铂族金属资料开发与可持续发展研究[A]//第二十一金川科技

- 攻关大会论文集(上册)[C]. 2015: 20-27. (Wang Yongqian, Yang Zhiqiang, Yao Weixin, et al. Study on exploitation and utilization of nickel and cobalt metal resources and sustainable development in jinchuan mine [A] // Twenty-first Jinchuan science and Technology Conference (Volume 1) [C]. 2015: 20-27. (in Chinese))
- [2] 曹平, 曹日红, 穆玉生, 等. 金川深部流变岩体巷道-柔支护机理与应用研究[A] // 第二十一次金川科技攻关大会论文集(上册), 2015: 114-132. (Cao Pin, Cao Rihong, Mu Yusheng, et al. Study on roadway soft support mechanism and application of deep rheological rock mass in Jinchua [A] // Twenty-first Jinchuan Science and Technology Conference (Volume 1) [C]. 2015: 114-132. (in Chinese))
- [3] 周云艳, 陈建平, 王晓梅. 植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1171-1177. (Zhou Yunyan, Chen Jianping, Wang Xiaomei. Progress of study on soil reinforcement mechanisms by root and its expectation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(6): 1171-1177. (in Chinese))
- [4] 吴鹏, 谢朋成, 宋文龙, 等. 基于根系形成的植物根系力学与固土护坡作用机理[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(5): 139-142. (Wu Peng, Xie Pengcheng, Song Wenlong. Morphology-based plant root mechanics and function mechanism for slope stabilization [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(5): 139-142. (in Chinese))
- [5] 张超波, 蒋静, 陈丽华. 植物根系固土力学机制模型[J]. 中国农学通报, 2012, 28(31): 1-6. (Zhang Chaobo, Jiang Jing, Chen Lihua. Review on the models of mechanical mechanism of soil reinforcement by plant roots[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(31): 1-6. (in Chinese))
- [6] 杨胜利, 王进学, 张鹏, 等. 基于围岩松动圈理论的锚杆支护技术研究[J]. 金属矿山, 2010(6): 44-46. (Yang shengli, Wang jinxue, Zhang peng, et al. Research on bolt support technology based on the theory of surrounding rock loose circle[J]. Metal Mines, 2010(6): 44-46. (in Chinese))
- [7] 吴大伟, 吴爱军, 苏华友. 大断面巷道中空预应力注浆锚杆的支护效果研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015(8): 90-95 (Wu Dawei, Wu Aijun, Su Huayou. Study on the supporting effecting of the large-scale roadway with the hollow pre-stress grouting anchor under the strong tectonic stress [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015(8): 90-95 (in Chinese))
- [8] 刘增辉, 高谦, 姚维信, 等. 金川Ⅲ矿区破碎站硐室施工变形监测与优化控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 9(1): 60-66. (Liu Zenghui, Gao Qian, Yao Weixin, et al. Deformation monitoring and optimal control during chamber construction in Broken Station of Jinchuan No.3 Mine [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 9(1): 60-66. (in Chinese))
- [9] 曹平, 王飞, 邱冠豪, 等. 软岩大变形巷道支护技术及应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(8): 69-74. (Cao Ping, Wang Fei, Qiu Guanhao, et al. Support technology and its application for large deformation of soft rock roadway [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(8): 69-74. (in Chinese))
- [10] 高启波. 中空高强度锚注锚索在金川矿区中的研究与应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2015, 67(2): 75-78. (Gao Qibo. Study and application of high strength hollow grouting anchor cable in Jinchuan Mine [J]. Nonferrous Metal (Mine Part), 2015, 67(2): 75-78. (in Chinese))
- [11] 杨志强, 高谦, 王正辉. 预应力锚索的支护参数优化研究及在金川二矿区的应用[J]. 岩土力学, 2015, 29(5): 1361-1367. (Yang Zhiqiang, Gao Qian, Wang Zhenghui. Research on prestressed cable parameters optimization designs and its application to Jinchuan Mine No.2 [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 29(5): 1361-1367. (in Chinese))
- [12] 张广超, 何富连. 大断面强采动综放煤巷顶板非对称破坏机制与控制对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 806-818. (Zhang Guangchao, He Fulian. Asymmetric failure and control measures of large cross-section entry roof with strong mining disturbance and fully-mechanized caving mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 806-818. (in Chinese))
- [13] 赵小平, 白本祥, 高创州, 等. 金川矿区深部巷道喷锚网支护参数研究[J]. 金属矿山, 2014(4): 35-38. (Zhao Xiaoping, Bai Benxiang, Gao Chuangzhou. Study on the spurting-bolt-mesh support parameter of deep roadway in jinchuan mine area [J]. Metal Mine, 2014(4): 35-38. (in Chinese))