某铅锌矿脉外巷道支护参数设计优化研究*

覃美满[1,2,3],寇向宇[1,2,3],廖宁[1,2],董培林[1,2,3],魏星[1,2,3],张柏[1,2,3]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012;
3.湖南省智能矿山工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:针对某铅锌矿脉外巷道支护出现局部支护参数过大、支护耗材量过多导致较长的支护周期和较高的年支护成本等问题,以该矿2416分段12～15线区脉外巷道支护为工程背景,基于岩体质量评价和试验测定岩体相关力学参数等理论分析,运用数值模拟和现场试验相结合的方法对比支护效果和成本,得出最优支护方案。结果表明:采用"锚杆+钢塑格栅网+双筋条+喷砼"的联合支护方式能够满足该矿脉外巷道使用期限内的稳定性,其中锚杆选用长度为2.4 m、直径为18 mm的树脂锚杆,采用MSCKa树脂锚固剂,锚杆间排距为1.1 m,钢塑格栅网规格为4.5 m×2.5 m、孔网为6 cm、抗拉载荷为60 kN,双筋条直径为6 mm,喷射砼强度为20 MPa,平均节约支护成本599.46元/m。研究结果可为类似矿山的井下巷道支护设计提供借鉴与参考。

关键词:铅锌矿;巷道稳定;支护方案;数值模拟;参数优化

中图分类号:TD353 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)02-0042-07

Optimization Study on the Design of Support Parameters for the Roadway Outside the Vein of a Lead Zinc Mine

QIN Meiman[1,2,3], *KOU Xiangyu*[1,2,3], *LIAO Ning*[1,2], *DONG Peilin*[1,2,3], *WEI Xing*[1,2,3], *ZHANG Bai*[1,2,3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Safety Technology for Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Hunan Intelligent Mining Engineering Technology Research Center, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: In response to the problem of excessive local support parameters and excessive support material consumption leading to longer support cycles and higher annual support costs in the support of roadway outside the vein in a certain lead-zinc mine, the support of roadway outside the vein in the 12-15 line of 2416 section of this mine was taken as the engineering background. After conducting rock mass quality evaluation and measuring relevant mechanical parameters by test of the rock mass, the optimal support scheme was selected by comparing the support effect and cost through numerical simulation and on-site testing. The results show that the combined support method of anchor rod+steel plastic mesh+double reinforcement bar+shotcrete can meet the stability of the roadway outside the vein during its service life. Following parameters were selected, including the length of anchor rod with a length of 2.4 m and a diameter of 18 mm, as well as the MSCKa resin anchoring agent, with a spacing of 1.1 m, a steel plastic grid mesh specification of 4.5 m×2.5 m, a hole mesh of 6 cm, a tensile load of 60 kN, a double reinforcement bar diameter of 6 mm, and a sprayed concrete strength of 20 MPa.The support cost can be reduced by 599.46 RMB/m. The research results can provide a reference and guidance for the design of underground roadway support in similar mines.

Key words: Lead-zinc mine, Roadway stability, Support scheme, Numerical simulation, Parameter optimization

0 引言

随着社会经济的快速发展,资源需求量不断加大,矿山由露天开采转为地下开采、地表浅部开采转为深部开采已成为了必然趋势[1-2],同时也面临着更为复杂的地质条件(高地应力、破碎岩体等),极易发生冒顶、片帮和底鼓等动力灾害[3-5],严重威胁矿山作业安全。

* **收稿日期**:2024-03-18
基金项目:五矿集团科技专项项目(2022ZXB01)
作者简介:覃美满(2000—),男,湖北利川人,硕士研究生,主要从事数字矿山及计算机应用的研究。E-mail:2667126732@qq.com
通信作者:寇向宇(1985—),男,河南南阳人,正高级工程师,主要从事智能采矿等方面的研究工作。E-mail:78871102@qq.com

针对上述地压问题,诸多学者在巷道围岩支护方面展开了大量的研究。在理论方面,巷道锚杆(索)理论技术经过数十年的发展已逐渐趋于成熟,其中悬吊理论[6-7]、松动圈理论[8-9]、围岩强度强化理论[10]等为矿山现场支护提供了重要的依据。在工程应用方面,研发的新型支护材料不断应用于矿山,学者利用 FLAC3D 等数值模拟软件模拟分析和现场试验相结合的手段验证新型材料或新组合支护方式下各种支护方案的经济性和有效性,并确定最终的支护方案[11-12]。

本文以某铅锌矿 2416 分段 12～15 线区脉外巷道的支护为工程背景,在对现有支护情况详细考察的基础上,通过现场调研取样、理论分析、数值模拟以及现场试验等方法,优化确定最终的支护方案及技术参数,以期对降低该矿巷道支护成本、缩短支护工时、改善支护安全可靠性和提高生产效率提供指导。

1 工程概况

某铅锌矿位于柴达木盆地北缘中段,开采矿段位于+2 702～+2 222 m 标高之间。矿区赋矿层位为上奥陶统滩间山群绿岩带,其中主要的含矿层为 O3tna-2 组,其次为 O3tnb 组,绿片岩带呈北西西—南东东狭长带状分布,出露宽度为 2～12 km,其中生成的穿脉、脉外巷、一步骤采场、矿体、充填体和围岩的 FLAC3D 网格模型如图 1 所示。矿区褶皱构造为一核部背斜和两翼向斜的复式向斜。2 702 m 中段以下共圈定 46 个铅锌矿体,具有规模的主矿体有 8 个,主要分布于大理岩内及大理岩与片岩接触带,表 1 列出了各主矿体的地质特征。东西区矿体及西区下盘片岩节理的平均间距均在 20～60 cm 之间,发育密集程度中等,岩体质量综合评价为中等稳固;东区下盘片岩节理的平均间距均在 6～20 cm 之间,发育程度密集,岩体质量综合评价结果为不稳固。

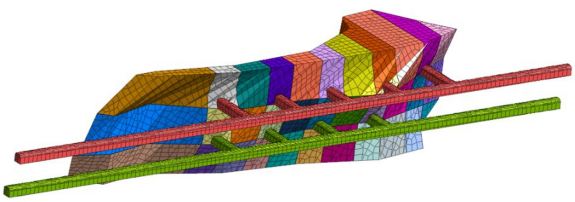


图 1 某铅锌矿采区矿体走向及巷道布置

Fig.1 The ore body direction and roadway layout in a certain lead-zinc mine

表 1 某铅锌矿主矿体地质特征

Table 1 Geological characteristics of the main ore body of a certain lead-zinc mine

序号	矿体编号	赋矿范围/线	赋矿标高/m	矿体形态	赋矿围岩	长度/m	延深/m	最大厚度/m	产状	
									倾向	倾角/(°)
1	Ⅱ256	05～11	2 518～2 798	似层状	大理岩	400	300	24.80	SW	29～69
2	Ⅱ271	7～21	2 282～2 633	似层状	大理岩	350	355	30.00	SW	22～85
3	Ⅱ10-3	07～27	2 965～2 455	似层状	大理岩+绿片岩	810	550	64.40	SW	55～83
4	Ⅱ36	24～34	2 486～2 808	似层状	大理岩	250	329	52.43	SW	60～83
5	Ⅱ30	24～36	2 530～2 943	似层状	大理岩+绿片岩	288	475	44.55	NE	55～85
6	Ⅲ1	3～15	2 507～2 681	透镜状	大理岩+绿片岩	300	180	14.78	SW-NE	40～70
7	Ⅲ5	7～15	2 550～2 420	透镜状	大理岩+绿片岩	200	130	12.78	SW-NE	40～70
8	Ⅳ1	1～015	2 600～2 368	透镜状	大理岩+绿片岩	300	230	108.00	SW-NE	20～70

目前该矿区 2416 分段 12～15 线区 3.64 m×3.57 m 马蹄形脉外巷道采用全断面“树脂锚杆+钢筋网+喷砼”的联合支护方式。其中树脂锚杆直径为 18 mm,长度为 2.4 m,间排距为 0.8 m,梅花型布置,借用 MSCKa 树脂锚固剂锚固;锚杆托盘规格为 150 mm×150 mm×12 mm,螺母紧固后锚杆外露长度为 30～50 mm;钢筋网规格为 2.0 m×1.0 m,孔网为 10 cm;喷射砼强度为 C20,厚度控制在 5～10 cm,喷射混凝土的塌落度为 8～12 cm,第一次喷射的厚度为 30～50 mm,后续复喷至设计厚度。根据现场调研发现,其支护主要存在以下问题:

(1) 矿山支护主要采用直径为 18 mm 锚杆,而钻孔直径为 30 mm,根据已有的研究成果,钻孔孔径与锚杆直径之差在 6～8 mm 时,锚固剂的黏结能力最强,孔径差过大或过小都会影响锚杆的锚固性能,因此当前的锚杆直径无法发挥锚固剂的最强黏结能力[13-14];

(2) 在巷道围岩较稳固的背景下表现出了支护参数过大的情形,造成了现场一定支护资源的浪费,支护方案及技术参数缺乏系统性的论证分析。

2 巷道支护参数理论分析

2.1 岩石力学参数测定

将取自该矿的大理岩、矿体、片岩加工制作而成

的岩石试件用于室内试验确定其力学参数,岩石力学参数试验结果见表2。

表2 某铅锌矿岩石力学参数

Table 2 Mechanical parameters of a certain lead-zinc mine

岩性	容重 γ/(g/cm³)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	岩体弹性模量/MPa	泊松比
东区矿体	3.97	1.56	28.00	6.50	0.37	5 412.68	0.28
东区下盘片岩	3.35	1.48	27.60	5.40	0.42	1 987.53	0.21
西区矿体	3.97	1.59	28.20	6.70	0.35	5 580.89	0.29
西区下盘片岩	3.35	1.51	27.50	5.90	0.40	5 114.41	0.23
平均值	3.66	1.54	27.83	6.13	0.39	4 523.88	0.25

2.2 巷道围岩松动圈分析

采用弹塑性理论方法分析该铅锌矿2416分段12～15线区3.64 m×3.57 m巷道断面的松动圈厚度,拟以松动圈厚度作为设计优化锚杆支护参数的依据。

基于统一强度理论[15]计算巷道开挖后的破碎带厚度:

$$R=r_0\left[\frac{(P+c\cot\varphi)(1-\sin\varphi)}{(P_i+c\cot\varphi)(1+\sin\varphi)}\right]^{\frac{1-\sin\varphi}{2\sin\varphi}}-r_0 \quad (1)$$

式中:r_0为巷道等效圆掘进半径,m;P为初始应力,MPa;φ为岩体内摩擦角,取27.5°;c为岩石黏聚力,取1.51 MPa;P_i为初始支护应力,取0.5 MPa。

巷道拱顶初始应力采用自重应力[16]:

$$P=\gamma H \quad (2)$$

式中:γ为岩体容重,取3.35 g/cm³;H为隧洞拱顶的埋置深度,取600 m。

因研究工程巷道断面为马蹄形,计算时需依据几何等代法[17]将该非圆形断面等效代换成圆形断面后才能代入式(1)计算,巷道等代圆的半径为:

$$r_0=(h+b)/4 \quad (3)$$

式中:h为巷道开挖高度,取3.3 m或3.64 m;b为巷道开挖跨度,取3.3 m或3.57 m。

由式(1)、式(2)、式(3)计算可知,该铅锌矿地下巷道松动圈厚度在1.1～1.3 m以内。

2.3 锚杆支护参数确定

根据前期计算可知,围岩松动范围为1.1～1.3 m,按悬吊理论[18]确定锚杆的长度L:

$$L=L_1+L_2+L_3+L_4 \quad (4)$$

式中:L_1为锚杆有效长度,一般不小于松动圈值,这里取最大值1.3 m;L_2为锚杆锚固长度,根据现场锚杆锚固剂的条数计算锚固长度,在0.8～1.0 m之间,这里取平均值0.9 m;L_3为锚杆外露长度,井下巷道主要使用树脂锚杆非全长锚固,考虑到混凝土厚度,此处外露长度取0.1 m;L_4为安装角度引起的施工误差,这里取值0.05 m。计算后锚杆长度为2.35 m。因锚杆长度一般为1.4 m、1.6 m、1.8 m、2.0 m、2.2 m、2.4 m等,这里锚杆长度取2.4 m。

参考相关技术规范[19],据经验公式确定锚杆的直径d:

$$d=\frac{L}{110} \quad (5)$$

将L=2 400 mm代入式(5),计算后锚杆直径为21.81 mm。钻孔孔径与锚杆直径之差在6～8 mm时,锚固剂的黏结力最强,因此可考虑将直径为18 mm锚杆换成直径为22 mm锚杆。

依自然平衡拱理论[20]确定锚杆的间排距α:

$$\alpha\leqslant\sqrt{\frac{Q}{K\gamma L_1}} \quad (6)$$

式中:Q为锚杆的设计锚固力,Φ22 mm锚杆取100 kN(一般对左旋无纵筋螺纹钢式树脂锚杆而言,Φ18 mm锚杆试验抗拔力不小于60 kN,Φ20 mm锚杆试验抗拔力不小于80 kN,Φ22 mm锚杆试验抗拔力不小于100 kN);K为安全系数,一般取1.8。当锚杆直径为22 mm时,计算后可得$\alpha\leqslant$1.13 m,故设计间排距可取0.9～1.1 m。当锚杆直径为18 mm时,计算后可得$\alpha\leqslant$1.00 m,故设计间排距可取0.8～1.0 m。

3 巷道支护参数优化方案及数值模拟

3.1 巷道支护参数优化方案

本次模拟以研究区域脉外巷道实际地质条件为依据,运用表2中的参数平均值建立数值计算模型。依上述理论分析结果在确定相关支护参数后制定了2个优化支护方案,见表3。

表 3 某铅锌矿 2416 分段 12～15 线区脉外巷道断面支护方案

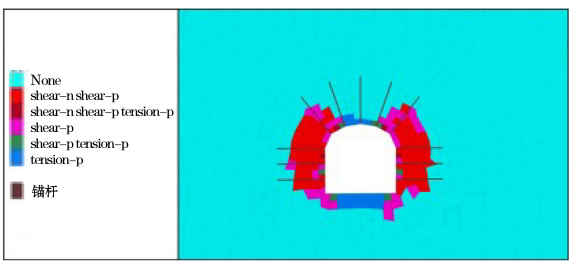
Table 3 Support schemes for the section of the roadway outside the vein in section 12 -15 of 2416 a certain lead-zinc mine

支护方案	支护形式	锚杆			格栅			砼强度/MPa
		长度/m	直径/mm	间排距/m	长度/m	宽度/m	孔网/cm	
支护方案Ⅰ	锚杆＋钢筋格栅网＋喷砼	2.4	22	1.1	2.0	1.0	10	20
支护方案Ⅱ	锚杆＋钢塑格栅网＋双筋条＋喷砼	2.4	22	1.1	4.5	2.5	6	20

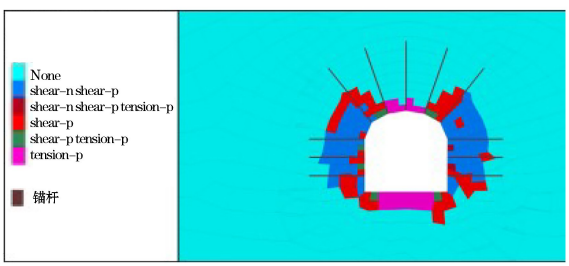
3.2 数值模拟

3.2.1 巷道围岩塑性区分析

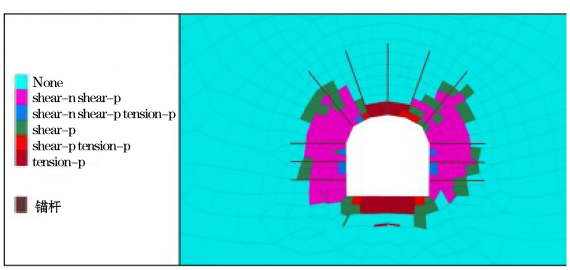
不同方案下 2416 分段 12～15 线区脉外巷道的塑性区分布如图 2 所示。



(a) 原支护方案



(b) 方案Ⅰ



(c) 方案Ⅱ

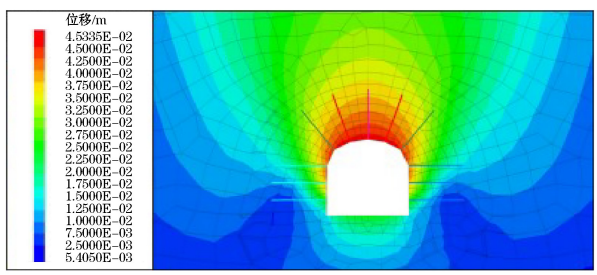
图 2 某铅锌矿 3.64 m×3.57 m 脉外巷道塑性区云图

Fig.2 Cloud maps of plastic zones of 3.64 m×3.57 m roadway outside the vein of a certain lead-zinc mine

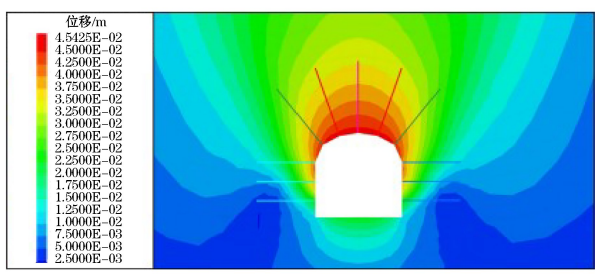
原支护方案的塑性区为 21.1 m^2,支护方案Ⅰ的塑性区为 18.9 m^2,支护方案Ⅱ的塑性区为 19.5 m^2。通过对比原支护方案与支护方案Ⅰ的塑性区云图可知,当支护方案Ⅰ将锚杆直径变为 22 mm、间排距变为 1.1 m 后,塑性区的面积有所减小,说明支护方案Ⅰ相比原方案的锚固能力表现更为稳定。通过对比原方案、支护方案Ⅰ与支护方案Ⅱ的塑性区云图可知,当钢筋网换成钢塑网后锚杆仍然穿透了塑性区,锚固段固定在围岩体弹性区,根据《混凝土结构设计规范》[21]锚固段锚入深部岩层的有效锚固长度应该大于 0.3～0.5 m,可确定支护方案Ⅱ采用的"锚杆＋钢塑格栅网＋双筋条＋喷砼"的支护方式可满足支护要求。

3.2.2 巷道围岩位移场分析

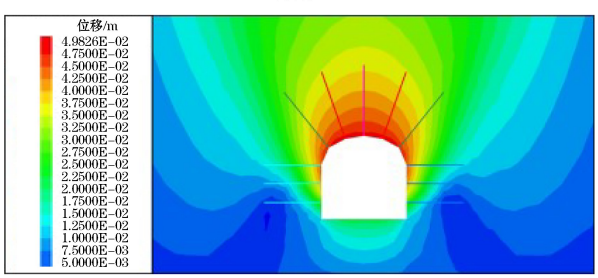
图 3 所示为不同支护方案下 2416 分段 12～15 线区脉外巷道在开挖后应力场达到二次平衡后的位移云图。



(a) 原支护方案



(b) 方案Ⅰ



(c) 方案Ⅱ

图 3 某铅锌矿 3.64 m×3.57 m 脉外巷道位移云图

Fig.3 Displacement cloud maps of 3.64 m×3.57 m roadway outside the vein of a certain lead-zinc mine

从图 3 中可知,脉外巷道的位移变化趋势基本相同,最大位移主要位于巷道拱顶部位,其中原支护方案围岩的最大位移为 4.53 cm,支护方案Ⅰ的最大位移

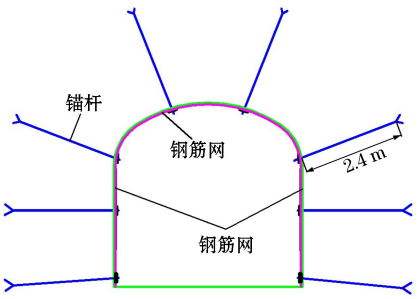
为 4.54 cm,支护方案Ⅱ的最大位移为 4.98 cm,从不同支护方案工况下的垂直位移值可知,巷道的位移均介于 2～5 cm 之间,根据容许极限位移理论可知,脉外巷道在 3 种支护方案下皆可保持基本稳定。

4　现场支护试验

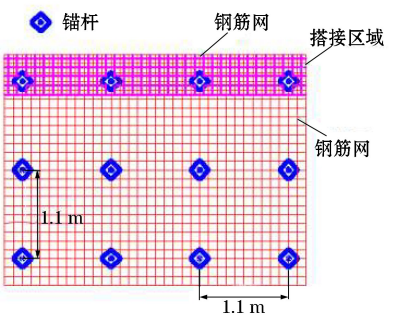
4.1　支护方案试验

为验证上述方案的数值模拟结果,特对该铅锌矿 2416 分段 12～15 线区 3.64 m×3.57 m 脉外巷道进行了如优化方案所述的实地支护试验。

(1) 支护方案Ⅰ:锚杆＋钢筋格栅网＋喷砼联合支护。如图 4 所示,在原始支护方案的基础上仅改变锚杆直径和间排距,锚杆直径为 22 mm,间排距为 1.1 m,抗拉力为 70 kN。支护实景效果如图 5 所示。



(a) 锚杆+钢筋格栅网+喷砼支护



(b) 钢筋格栅网和锚杆布置形式

图 4　方案Ⅰ支护示意

Fig.4　Support diagrams of scheme Ⅰ

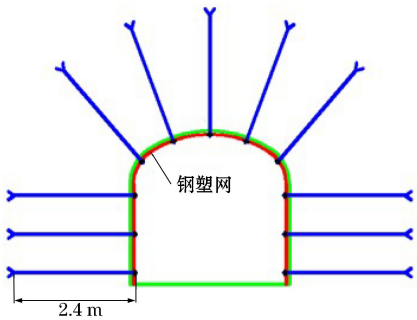


(a) 混喷前　　(b) 混喷后

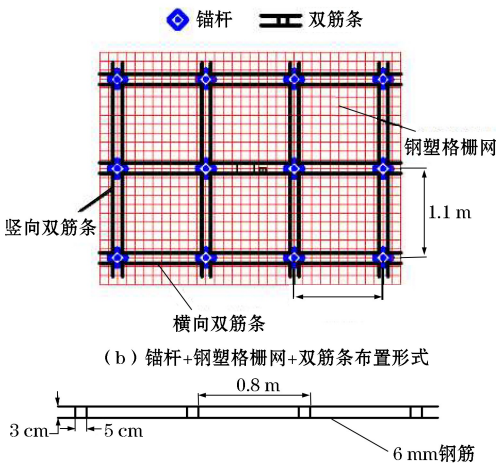
图 5　方案Ⅰ支护效果

Fig.5　Support effect of Scheme Ⅰ

(2)支护方案Ⅱ:锚杆＋钢塑格栅网＋双筋条＋喷砼联合支护。如图 6 所示,在原始支护方案的基础上不仅改变了锚杆直径和间排距,而且将钢筋格栅网更换为钢塑格栅网、双筋条。钢塑格栅网长度为 4.5 m、宽度为 2.5 m,网孔 6 cm、抗拉强度为 60 kN;双筋条采用两根 6 mm 钢筋焊接而成;喷射砼强度为 20 MPa。支护实景效果如图 7 所示。



(a) 锚杆+钢塑格栅网+双筋条+喷砼支护



(b) 锚杆+钢塑格栅网+双筋条布置形式

(c) 双筋条焊接

图 6　方案Ⅱ支护示意

Fig.6　Support diagrams of scheme Ⅱ



(a) 混喷前　　(b) 混喷后

图 7　方案Ⅱ支护效果

Fig.7　Support effect of scheme Ⅱ

施工后对试验巷道的支护效果进行了为期半年的观察,对比两种方案的支护试验的过程及效果可得出:

(1) 钢塑网作为一种柔性网,相较于钢筋金属网具有网片质量轻、可弯折、呈捆运输方便等优势,降低了施工过程中的挂网劳动强度;

(2) 由于钢塑网特殊的配方和生产工艺,其挠性好,抗疲劳、顺变形能力强,增大了局部凹凸不平的巷道岩面的围岩接触面积,充分发挥了其主动承压的作用;

(3) 钢塑格栅网喷混后回弹率低,水泥用量少,节省了喷混材料与时间;

(4) 支护方案Ⅰ与支护方案Ⅱ两种支护方式下巷道均能维持基本稳定,无网片破坏、掉块等情况。

4.2 方案经济对比

拟对 2416 分段 12～15 线区 3.64 m×3.57 m 脉外巷道进行支护方案的成本对比,研究不同支护方案在满足支护需求情况下的支护成本差异。以巷道百米支护成本进行核算,其支护方案成本对比结果见表 4。从表 4 可以看出,支护方案Ⅰ与支护方案Ⅱ在原方案基础上替换为 Φ22 mm 锚杆后间排距增加至 1.1 m,锚杆数量减少了 477 根,可节约锚杆材料和施工成本 23 591 元;支护方案Ⅱ在支护方案Ⅰ的基础上将规格为 2.0 m×1.0 m、孔网参数为 10 cm 的钢筋网替换为规格为 4.5 m×2.5 m、孔网为 6 cm 的钢塑网后可节约支护网材料和施工总成本 36 355 元。因此 3 种支护方案中支护方案Ⅱ最具经济性,即在"锚杆＋钢塑格栅网＋双筋条＋喷砼"联合支护方式下支护成本可从 1 862.65 元/m 降低至 1 263.19 元/m,平均节约支护成本 599.46 元/m。

表 4 巷道百米支护方案成本对比

Table 4 Cost comparison of support schemes for every 100 meters of roadway

支护方案	锚杆		钢筋网		钢塑网		喷砼		总计/元
	数量/根	成本(含人工)/元	数量/张	成本(含人工)/元	面积/m^2	成本(含人工)/元	用量/m^3	成本/元	
原方案	1 386	97 020	625	53 125	—	—	60.2	36 120	186 265
方案Ⅰ	909	73 429	625	53 125	—	—	60.2	36 120	162 674
方案Ⅱ	909	73 429	—	—	860	16 770	60.2	36 120	126 319

5 结论

通过对某铅锌矿井下脉外巷道支护存在的支护过大、成本高和周期长等问题进行研究,从支护参数优化和支护材料选择两个角度提出了优化支护方案,经过理论分析、数值模拟以及现场试验后得出以下研究结果:

(1) 该铅锌矿 2416 分段脉外巷道在锚杆支护参数合理的情况下,配合使用的钢筋网或钢塑格栅网其支护强度都能够满足矿山巷道使用期限内的稳定性,确保不会发生大变形破坏,因此在中等稳固或中等稳固以上无需永久支护的巷道中有条件皆可采用;

(2) 综合考虑支护效果和经济成本,支护方案Ⅱ确定为该铅锌矿井下脉外巷道最优支护方案,即在原支护方案的基础上改进锚杆参数(锚杆长度 2.4 m,直径 22 mm,间排距 1.1 m),将钢筋网替换为钢塑网(钢塑网规格 4 m×2.5 m,网孔 6 cm、抗拉力 60 kN)并辅以双筋条(直径 6 mm)搭接固定,既可满足保持巷道基本稳定的支护需求,又可将支护成本从 1862.65 元/m 降至 1 263.19 元/m;

(3) 由于支护方案Ⅱ"锚杆＋钢塑格栅网＋双筋条＋喷砼"联合支护方式工序较多,施工时需将锚杆锚入围岩后拧下托盘,根据支护巷道的尺寸裁剪钢塑格栅,在相应支护区域(拱顶和边帮)配合双筋条贴壁铺设,先顶后帮,随后用托盘将钢塑网及双筋条进行压紧固定,最后进行喷砼。

参考文献(References):

[1] 李夕兵,姚金蕊,宫凤强.硬岩金属矿山深部开采中的动力学问题[J].中国有色金属学报,2011,21(10):2551-2563.
LI Xibing, YAO Jinrui, GONG Fengqiang. Dynamics problems in deep exploitation of hard rock metal mines[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2551-2563.

[2] 李光,马凤山,刘港,等.金川矿区深部巷道支护效果评价及参数优化研究[J].黄金科学技术,2018,26(5):605-614.
LI Guang, MA Fengshan, LIU Gang, et al. Study on supporting parametric optimizing design and evaluate supporting effect of deep roadway in Jinchuan Mine[J]. Gold Science and Technology,2018,26(5):605-614.

[3] ZHOU J, LI X B, MITRI H S. Classification of rockburst in underground projects: comparison of ten supervised learning methods[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2016,30(5):1-19.

[4] ZHOU J, LI X B, MITRI H S. Comparative performance of six supervised learning methods for the development of models of hard rock pillar stability prediction[J]. Natural Hazards,2015(79):291-316.

[5] 尹胜,周宗红,张晶,等.地下掘进巷道富水破碎围岩锚杆支护参数优化[J].有色金属工程,2024,14(2):119-127.
YIN Sheng, ZHOU Zonghong, ZHANG Jing, et al. Optimization of supporting parameters of rock bolt in water-rich and crushing surrounding rock of underground heading roadway [J]. Nonferrous Metals Engineering,2024,14(2):119-127.

[6] 袁利军.特厚煤层孤岛工作面全煤巷道锚索支护技术研究与应用[J].矿业装备,2022(2):70-71.
YUAN Lijun. Research and application of anchor cable support technology for full coal tunnel in extra thick coal seam island working face[J]. Mining Equipment,2022(2):70-71.

[7] 靖洪文,孟庆彬,朱俊福,等.深部巷道围岩松动圈稳定控制理论与技术进展[J].采矿与安全工程学报,2020,37(3):429-442.
JING Hongwen, MENG Qingbin, ZHU Junfu, et al. Theoretical and technical progress of stability control of broken rock zone of deep roadway surrounding rock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2020,37(3):429-442.

[8] 侯朝炯,王襄禹,柏建彪,等.深部巷道围岩稳定性控制的基本理论与技术研究[J].中国矿业大学学报,2021,50(1):1-12.
HOU Chaojiong, WANG Xiangyu, BAI Jianbiao, et al. Basic theory and technology study of stability control for surrounding rock in deep roadway[J]. Journal of China University of Mining and Technology,2021,50(1):1-12.

[9] 程利兴,康红普,姜鹏飞,等.深井沿空掘巷围岩变形破坏特征及控制技术研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(2):227-236.
CHENG Lixing, KANG Hongpu, JIANG Pengfei, et al. Deformation and failure characteristics and control technology of surrounding rocks in deeply gob-side entry driving[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2021,38(2):227-236.

[10] 康红普,林健,吴拥政.全断面高预应力强力锚索支护技术及其在动压巷道中的应用[J].煤炭学报,2009,34(9):1153-1159.
KANG Hongpu, LIN Jian, WU Yongzheng. High pretensioned stress and intensive cable bolting technology set in full section and application in entry affected by dynamic pressure[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(9):1153-1159.

[11] 何壮志,黄金坤,严旺.新型聚丙烯纤维支护材料网力学性能试验研究[J].煤炭技术,2017,36(7):82-83.
HE Zhuangzhi, HUANG Jinkun, YAN Wang. Research on mechanical performance test of new type polypropylene fiber support material net[J]. Coal Technology,2017,36(7):82-83.

[12] 夏辉,侯克鹏,孙华芬,等.某矿大断面运输巷道支护技术[J].科学技术与工程,2022,22(5):1835-1841.
XIA Hui, HOU Kepeng, SUN Huafen, et al. Support technology of large section transportation roadway in a mine [J]. Science and Technology and Engineering,2022,22(5):1835-1841.

[13] 康红普,崔千里,胡滨,等.树脂锚杆锚固性能及影响因素分析[J].煤炭学报,2014,39(1):1-10.
KANG Hongpu, CUI Qianli, HU Bin, et al. Analysis on anchorage performances and affecting factors of resin bolts [J]. Journal of China Coal Society,2014,39(1):1-10.

[14] 乔保全.不同直径树脂锚杆锚固性能的试验分析[J].机械管理开发,2023,38(5):44-45+48.
QIAO Baoquan. Experimental analysis of anchoring performance of resin anchor bolts with different diameters [J]. Mechanical Management Development,2023,38(5):44-45+48.

[15] 曾开华,杨维汉,张常光,等.基于统一强度理论和稳定蠕变准则的软岩巷道最优支护[J].工程科学与技术,2018,50(1):62-70.
ZENG Kaihua, YANG Weihan, ZHANG Changguang, et al. Optimal support in soft rock tunnel based on the unified strength theory and steady creep guideline[J]. Advanced Engineering Sciences,2018,50(1):62-70.

[16] 蒙理明.土力学的新概念与纤维土的有效自重应力[J].建材世界,2023,44(4):119-124.
MENG Liming. New concepts of soil mechanics and effective dead stresses of fibrous soils[J]. The World of Building Materials,2023,44(4):119-124.

[17] 纪维伟,楼晓明,陈鹏辉.非圆形断面围岩应力计算的几何等代法[J].现代矿业,2013,29(11):25-33+50.
JI Weiwei, LOU Xiaoming, CHEN Penghui. Geometricequivalent method of the noncircular cross section surrounding rock stress calculation[J]. Modern Mining,2013,29(11):25-33+50.

[18] 李建林,王乐华.卸荷岩体力学原理与应用[M].北京:科学出版社,2016.
LI Jianlin, WANG Lehua. Theories of unloading rock mass mechanics and its application engineering[M]. Beijing: Science Press,2016.

[19] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.煤矿巷道锚杆支护技术规范:GB/T 35056—2018[S].北京:煤炭工业出版社,2018.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Technical specifications for rock bolting in coal mine roadways: GB/T 35056—2018[S]. Beijing: Coal Industry Press,2018.

[20] 王志东.基于松动圈支护理论的缝管式锚网喷支护技术在马坑铁矿的应用[J].矿业工程,2024,22(2):5-7.
WANG Zhidong. Application of slit wedge tubing bolt-shotcrete support technology based on rock loosing zone support theory in Makeng Iron Mine [J]. Mining Engineering,2024,22(2):5-7.

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构加固设计规范:GB 50367—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structure reinforcement:GB 50367—2013[S]. Beijing:China Construction Industry Press,2013.