

深部大断面圆形巷道盾构机掘进 支护技术研究

Research on Excavation and Support Technology for Deep Large-Section
Circular Tunnel Boring Machines

崔朋辉¹, 芦盛亮¹, 李胜波², 徐宁¹, 杨阳¹

(1. 山西潞安集团余吾煤业公司, 山西 长治 046101; 2. 天地科技股份有限公司, 北京 10013)

摘要:为了研究大断面圆形巷道盾构机掘进巷道支护后的围岩稳定性,以余吾煤业南六采区 1[#]回风下山大巷为工程背景,通过理论分析为支护参数选取提供依据。基于 Hoek-Brown 强度准则,求解直径为 6.3 m 巷道围岩松动区半径为 8.12 m,塑性区半径为 4.20 m,因此巷道支护采用锚杆+锚索交替支护方式。借助巷道监测,深入评估巷道支护效果,对顶板离层量、表面位移及锚杆(索)受力展开分析,结果显示巷道主要以底鼓变形为主,顶板离轻微离层,锚杆受力位于 200~225 kN,锚索受力位于 230~260 kN 区间,表明盾构机所掘圆形巷道稳定性佳,支护强度契合巷道使用需求。

关键词:圆形大断面巷道;盾构机;锚杆支护

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2025)02-0026-05

Abstract: In order to study the stability of surrounding rock after tunnel support in a large-section circular tunnel excavated by a shield tunneling machine, the No. 1 return air shaft of the South Six mining district in Yuwu Coal Mine is used as the engineering background. The theoretical analysis provides a basis for selecting the support parameters. Based on the Hoek-Brown strength criterion, the radius of the loosened zone of the surrounding rock in the 6.3-meter diameter tunnel is calculated to be 8.12 meters, and the radius of the plastic zone is 4.20 meters. Therefore, the tunnel support adopts an alternating rock bolt and tendon support system. Through tunnel monitoring, the support effectiveness is evaluated in depth by analyzing the roof separation, surface displacement, and the forces on the rock bolts (tendons). The results show that the tunnel mainly undergoes bottom-up deformation, with slight separation at the roof. The forces on the rock bolts range from 200 to 225 kN, while the forces on the tendons range from 230 to 260 kN, indicating that the stability of the shield-excavated circular tunnel is good and the support strength meets the requirements for tunnel usage.

Key words: large-section circular tunnel; shield tunnel boring machine; rock bolt support

1 前言

我国新掘进的巷道年均达 12 000 公里,随着煤矿开采的深度与强度不断增加,煤层的赋存条件愈加复杂化,导致开采过程面临诸多挑战^[1-2]。为了满足迅速发展的煤炭开采需求,对设备的性能和效率提出了更高的要求^[3]。盾构机作为一种先进的隧道施工设备,在煤矿巷道开拓过程中展现了显著的优势,其高效的掘进速度和卓越的工作效率,使其成为解决煤矿开采难题的有效工具。此外,盾构机的应用不仅提高了采掘作业的安全性,还显著降低

了劳动强度,提升了作业环境的舒适度。因此,推动盾构机技术的进一步发展与推广,已经成为煤矿行业实现可持续高效开采的重要方向。

巷道掘进的方式主要为钻爆法掘进和掘进机掘进,掘进机掘进又包括机械化掘进和一体化掘进,盾构机掘进作为煤矿新型快速掘进的方法,王磊^[5]对新元煤矿 9110 工作面高斯高抽巷为研究对象,分析盾构机刀片破岩过程,采用 Phase2D 建立煤矿巷道掘进全过程受力模型,对巷道破坏区域进行定量评价;柴文军^[6]系统分析了盾构机在大断面岩巷掘进过程中的各类问题,掘进速度提高了 5 倍;温瑞恒等^[7]对矿山一体化智能管控系统的建设方案进行研究,研究了矿山各生产系统构架方法,为矿山一体化建设提供可靠方案;张旭宏^[8]采用工程类比和数值模拟手段对不同围岩条件下巷道支护方式进行对

[作者简介] 崔朋辉(1983—),男,本科,工程师,主要从事煤矿井下快速掘进。

[引用格式] 崔朋辉,芦盛亮,李胜波,等.深部大断面圆形巷道盾构机掘进支护技术研究[J].中国矿山工程,2025,54(2):26-30.

比分析;王俊伟^[9]主要介绍了盾构机的工作原理,讨论了盾构机在煤矿巷道应用存在的一些问题,并提出解决的办法;陈彬等^[10]对盾构机过断层时进行系统分析,及时加强围岩支护和调整盾构机参数,确保了盾构机过断层时的掘进效率;谢宝亮^[11]利用3D GIS + BIM 技术对盾构机掘进的巷道进行模拟,该系统可以较好的完成盾构机掘进过程中的巷道矿压监测。

为了进一步确定深部矿井巷道支护参数,尤其是采用盾构机掘进大断面圆形巷道支护参数的合理性,本论文主要从理论计算确定支护参数,进而进行现场验证支护效果,保证了支护参数的合理性。

2 工程背景

盾构机在巷道掘进过程中,主要适用于硬岩和部分中硬岩等岩性,在软岩等岩性中,制约盾构机快速掘进。为了使盾构机切削、推进与支护同步的优势能凸显出来,同时确保可高效稳定巷道掘进,加固巷道壁,预防围岩变形坍塌,盾构机掘进巷道层位选取尤为关键。

潞安余吾煤矿主体矿井位于山西省长治市屯留区境内,其主体矿井核定生产能力为750万t/年,井田面积达131.8327km²,矿井累计查明储量108113.4万t,保有储量98235.63万t,剩余可采储量22465万t,主采3#煤层。

根据盾构机适应岩性特点,同时考虑南六采区煤层开拓布置情况,需要选取岩层坚硬层位,根据南六采区综合柱状图可知,K6层位为1.15m的石灰岩,K6下方两层分别是0.40m厚的5#煤和4.85m厚的泥岩,K7层位为4.65m的中粒砂岩,上方两层分别是2m厚的粉砂岩和4.80m厚的泥岩,K6与K7之间夹杂2.95m的泥岩,该层泥岩灰黑色,中厚

层状,夹薄层粉砂岩。考虑盾构机掘巷特点,最终确定巷道所在层位为K6、K7稳定岩层,顶底板综合柱状图如图1所示。

层序号	柱状 (1:200)	煤层标志层编号	累深/ m	层厚/ m	岩石名称
178	— — — — — — — — — — — — — — — —		536.32	4.80	泥岩
179	· ·		538.32	2.00	粉砂岩
181	· · · · · · · · · · · · · · · ·	K ₇	544.02	4.65	中粒砂岩
182	— — — — — — — — — — — — — — — —		546.97	2.95	泥岩
183	□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □	K ₆	548.12	1.15	石灰岩
184	■ ■ ■ ■	5#	548.52	0.40	煤
185	— — — — — — — — — — — — — — — —		553.37	4.85	泥岩
186	· ·		553.97	0.60	细粒砂岩

图1 巷道岩层柱状图

余吾煤业南六采区1#回风下山布置在煤层底板约20m的稳定岩层中,与其他下山之间的间距为30m。该巷道分穿层巷道、组装硐室、步进硐室、始发硐室、盾构机正常掘进巷道等五部分组成,从南六1#回风下山2#贯破底以10°13'52"下山掘进。巷道布置如图2所示。

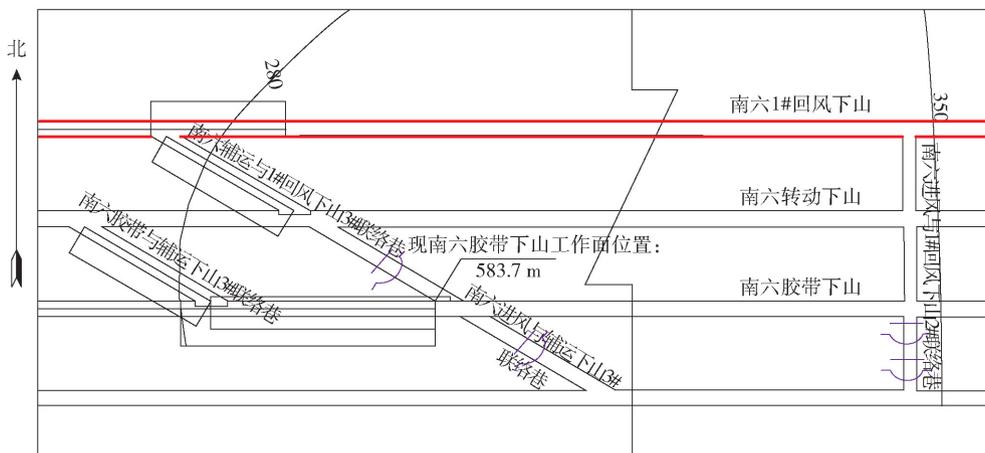


图2 余吾煤业南六采区1#回风下山布置图

地应力是引起采场围岩和支护结构变形、破坏、及产生动力现象的根本作用力,地应力分布特征资料支护设计与巷道开拓布置不可或缺的基础数据。为此,在巷道开口处采用水压致裂法进行地应力测量,得出最大水平主应力、最小水平主应力、垂直主应力。最大水平主应力方向为 N21.5°E,测试区域地应力场在量值上属于低应力区,应力场类型为 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ 型自重应力场。

3 圆形巷道围岩松动圈分析

鉴于盾构机掘进的巷道为圆形大断面,余吾煤业南六采区 1#回风下山巷道平均埋深 560 m,巷道断面半径为 3.15 m。为了准确求解圆形巷道松动圈及塑性区,将支护体范围作用在塑性圈或弹性区,确保大断面圆形巷道支护结构稳定,根据 Hoek-Brown 强度准则求解巷道围岩松动区及塑性区,将求得的结果为大断面圆形巷道支护参数提供参考。

在巷道深埋大于 20 倍巷道半径条件下,假设巷道围岩初始应力场均匀分布在圆形断面周围,巷道半径为 R_0 ,围岩初始应力为 P_0 ,支护压力位 P_i ,建立的力学模型如图 3 所示。

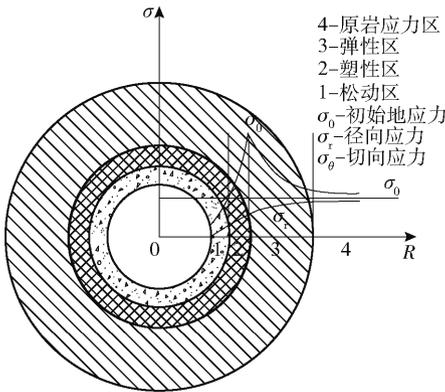


图 3 力学模型示意图

Hoek-Brown 准则是在弹塑性理论基础上进行求解巷道松动圈,根据上述力学模型可得到^[12]:

$$\sigma_\theta = \sigma_r + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_r}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (1)$$

式中, σ_r 和 σ_θ 分别为径向应力和切向应力; σ_c 为岩石单轴抗压强度; m_b 、 s 为 H-B 准则经验参数; a 为岩体特性决定的系数。

鉴于开挖巷道为圆形,存在支护力为 P_i ,根据 H-B 准则可得到巷道径向应力和切向应力如下:

$$\begin{aligned} \sigma_r^p &= \frac{\sigma_c}{m_b} \left[\left(m_b \frac{P_i}{\sigma_c} + s \right)^{1-a} + m_b (1-a) \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) \right]^{\frac{1}{1-a}} - \frac{s}{m_b} \sigma_c \\ \sigma_\theta^p &= \frac{\sigma_c}{m_b} \left[\left(m_b \frac{P_i}{\sigma_c} + s \right)^{1-a} + m_b (1-a) \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) \right]^{\frac{1}{1-a}} - \frac{s}{m_b} \sigma_c + \sigma_c \left[\left(m_b \frac{P_i}{\sigma_c} + s \right)^{1-a} + m_b (1-a) \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) \right]^{\frac{a}{1-a}} \end{aligned} \quad (2)$$

在力学模型的塑性区可得:

$$\sigma_r^p + \sigma_\theta^p = 2P_0 \quad (3)$$

由于煤矿巷道开挖后,巷道表面的支护力为 0,则,令 $a = 0$,令 $x = \left[\left(m_b \frac{P_i}{\sigma_c} + s \right)^{1-a} + m_b (1-a) \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) \right]$, $K_1 = \frac{\sigma_c}{m_b}$, $K_2 = \sigma_c$, $K_3 = \frac{s}{m_b} + \sigma_c + P_0$,上式整合可得:

$$2k_1 x^2 + k_2 x - 2k_3 = 0 \quad (4)$$

由此求解可得到:

$$x_1 = \frac{-\sigma_c + \sqrt{(\sigma_c)^2 + \frac{16\sigma_c}{m_b} \left(P_0 + \frac{\sigma_c s}{m_b} \right)}}{\frac{4\sigma_c}{m_b}} \quad (5)$$

由 $x = \left[\left(m_b + \frac{P_i}{\sigma_c} + s \right)^{1-a} + m_b (1-a) \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) \right]$,令 $m_1 = m_b (1-a)$, $m_2 = \left(m_b \frac{P_i}{\sigma_c} + s \right)^{1-a}$ 可得 $m_1 \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) + m_2 = x_1$,则可得到巷道塑性区半径 R_p 为

$$R_p = R_0 e^{\frac{-\sigma_c + \sqrt{(\sigma_c)^2 + \frac{16\sigma_c}{m_b} \left(P_0 + \frac{\sigma_c s}{m_b} \right)}}{\frac{2\sigma_c}{m_b}} - \left(\frac{m_b P_i}{\sigma_c} + s \right)^{0.5}} = 8.12 \quad (6)$$

根据力学模型分析可知,根据松动圈半径的定义,力学模型的边界条件切向应力与原岩应力相等,按照塑性区半径的求解方法可得到松动圈半径 R_s 为

$$R_s = R_0 e^{\frac{-\sigma_c + \sqrt{(\sigma_c)^2 + \frac{4\sigma_c}{m_b} \left(P_0 + \frac{\sigma_c s}{m_b} \right)}}{\frac{2\sigma_c}{m_b}} - \left(\frac{m_b P_i}{\sigma_c} + s \right)^{0.5}} = 4.2 \quad (7)$$

由上可知,余吾煤业南六采区1#回风下山直径6.3 m 巷道塑性区半径为 8.12 m, 松动圈半径为 4.20 m, 可以支护参数选取提供参考。

4 余吾煤业南六采区 1#回风下山现场应用

通过理论分析确定巷道支护材料参数, 选取锚杆 + 锚索交替支护方式, 考虑锚杆支护预应力扩散区域, 确定了锚索区域位于塑性区与弹性区交界处, 即锚索锚固区位于塑性区与松动圈。

为了确保巷道围岩的稳定性, 锚杆支护采用加长锚固方式, 选用型号为 MSGLW-500/22 × 2400 的金属锚杆, 锚杆布置为每排布置 17 根锚杆, 间排距为 800 × 1 000 mm, 利用扭矩倍增器拧紧锚杆螺母, 预紧力矩应达到 400 N·m, 但禁止超过 500 N·m。为了保证巷道稳定性, 锚杆需要搭配钢筋托梁及钢筋网, 单筋托梁采用两根直径 16 mm 的 Q235 圆钢焊接而成, 宽度 100 mm, 长度 5 200 mm, 钢筋托梁必须保证焊接质量。网片采用焊接钢筋网护顶, 网片由 6.5 mm 钢筋焊接加工而成, 网孔规格 100 × 100 mm, 网片规格 5 000 × 1 100 mm。前后排网片搭接 100 mm, 采用 16# 铁丝双丝双扣绑扎, 孔孔相连。锚索采用 1 860 MPa、22 mm、1 19 股索体, 每排“7-6-7”式布置, 间排距为 1 600 × 1 000 mm, 上部半圆锚索长度 7 300 mm, 腰线两帮各布置一根 5 300 mm 锚索。主要的支护形式如图 4 所示。

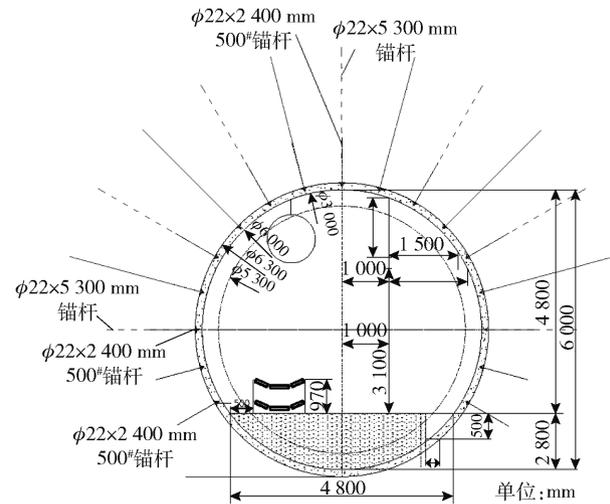
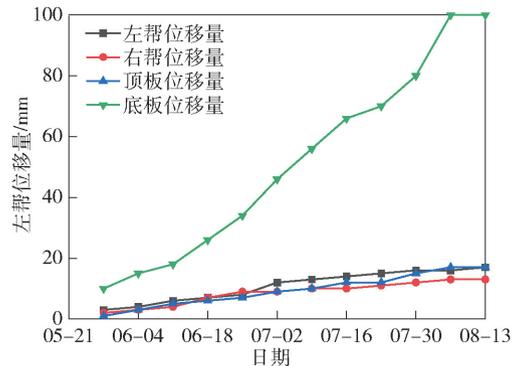


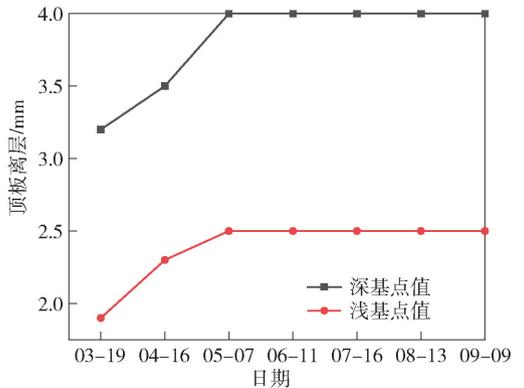
图 4 巷道支护设计

余吾煤业南六采区 1#回风下山采用圆形掘巷后, 在巷道围岩趋于稳定时, 巷道监测主要分为顶板离层监测、表面位移监测及锚杆(索)测力计三种手

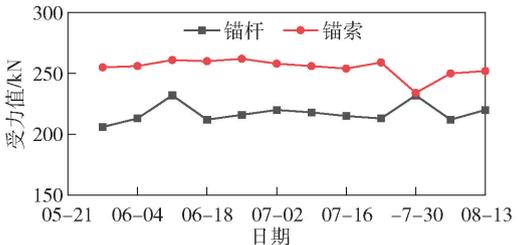
段。选取其中一组数据进行分析, 具体如图 5 所示。



(a) 巷道变形量



(b) 顶板离层仪



(c) 锚杆(索)测力计

图 5 巷道变形监测

由图 5 可知, 巷道四周围岩变形量主要以底鼓为主, 最大底板变形量为 100 mm, 顶板、两帮变形量均小于 20 mm, 属于巷道允许变形范围。顶板离层仪采用双基点, 分别测量顶板深-浅两个基点, 由图可知, 在巷道开挖的一段时间, 顶板产生微小的离层, 变形量最大为 4 mm, 主要是深部离层明显大于浅部。浅部离层较小主要原因为: 浅部基点测量区域为锚杆支护加强区域, 加强支护区域由于锚杆预应力扩散作用, 支护区域一致性较好, 稳定性较好, 故浅基点离层较小。此外, 通过对锚杆(索)监测发现, 锚杆(索)受力整体稳定性较好, 锚杆受力位于 200 ~ 225 kN, 锚索受力位于 230 ~ 260 kN。总体来说, 盾构机掘进出的圆形巷道稳定性较好, 支护强度满足巷道使用要求。

5 结论

(1)分析了余吾煤业南六采区1#回风下山圆形大断面受力特征,采用 Hoek-Brown 准则求解了直径 6.3 m 巷道围岩松动区及塑性区分别为 8.12 m 和 4.20 m,为巷道支护参数选取提供参考依据。

(2)巷道采取锚杆+锚索交替支护方式,分析了监测巷道顶板离层量、表面位移及锚杆(索)受力,巷道主要以底鼓变形为主,顶板离层量较小,锚杆受力位于 200~225 kN,锚索受力位于 230~260 kN,说明盾构机掘进出的圆形巷道稳定性较好,支护强度满足巷道使用要求。

[参考文献]

- [1] 李永生,张宝金,翟建波,等.非煤矿山智能决策支持系统架构设计与关键技术[J].中国矿山工程,2022,51(6):17-23.
- [2] 周学斌.松散煤体预应力锚索全长锚固技术研究及应用[J].中国矿山工程,2023,52(6):34-39.
- [3] 姬长通,李文,刘玉鑫.煤矿掘进技术的发展与应用研究[J].当代化工研究,2024(14):108-110.

(上接第25页)

- [5] 李向福,曹臣,廉万,等.软岩巷道破坏机理与支护技术研究[J].中国矿山工程,2024,53(3):44-48.
- [6] 武东雷.特厚顶煤单双夹矸层巷道开挖围岩变形破坏特征研究[J].山西焦煤科技,2024,48(2):24-28.
- [7] 任丁.断层影响下软岩巷道蠕变变形规律与破坏特征[J].山西焦煤科技,2023,47(11):22-25.
- [8] 刘新喜,李盛南,周炎明,等.高应力泥质粉砂岩蠕变特性及长期强度研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(1):138-146.
- [9] 杨秀荣,姜谔男,江宗斌.含水状态下软岩蠕变试验及损伤模型研究[J].岩土力学,2018,39(S1):167-174.
- [10] 吕国强.深部软岩巷道底臃蠕变控制数值模拟研究[J].山西焦煤科技,2012,36(1):11-15.

- [4] 袁亮,张平松.TBM施工岩巷掘探一体化技术研究进展与思考[J].煤田地质与勘探,2023,51(1):21-32.
- [5] 王磊.TBM盾构机岩巷掘进巷道稳定性分析与支护方案研究[J].煤,2023,32(9):51-54+71.
- [6] 柴文军.TBM盾构机在阳煤集团大断面岩巷中的研究与应用[J].煤矿现代化,2019(3):47-50.
- [7] 温瑞恒,梁新民,李少辉,等.矿山一体化智能管控系统建设方案研究[J].中国矿山工程,2022,51(6):12-16.
- [8] 张旭宏.华阳一矿151408高抽巷TBM掘进分段支护技术研究[J].煤,2024,33(10):84-86.
- [9] 王俊伟.煤矿巷道的全断面盾构掘进分析[J].能源与节能,2022(9):222-224.
- [10] 陈彬,咎志华.煤矿用盾构机(TBM)过断层的应对方法[J].煤矿现代化,2021,30(4):103-106.
- [11] 谢宝亮.煤矿岩巷盾构施工状态监测与预警系统的应用[J].煤矿现代化,2021,30(3):151-153+156.
- [12] 李伟利,王磊,常聚才.基于Hoek-Brown准则的围岩松动圈计算及现场测试[J].煤炭工程,2011(2):97-99.
- [11] 高瑞,吴志国,宁掌玄,等.深部埋深巷道变形特征数值模拟研究[J].山西焦煤科技,2023,47(1):16-19.
- [12] 蒲成志,曹平,张春阳,等.考虑时效损伤劣化的变参数非线性蠕变损伤模型[J].工程力学,2017,34(6):17-27.
- [13] 王旭锋,陈旭阳,王纪尧,等.平顶山矿区深部软岩巷道围岩蠕变破坏机制及控制研究[J].采矿与安全工程学报,2022.
- [14] 王高昂,朱斯陶,姜福兴,等.高应力厚煤层大巷孤立煤体蠕变失稳冲击机理及防治研究[J].岩土工程学报,2022:1-11.
- [15] 张建智,俞缙,蔡燕燕,等.渗水膨胀岩隧洞黏弹塑性蠕变解及变形特性分析[J].岩土工程学报,2014,36(12):2195-2202.