

# 敞开式TBM煤矿斜井支护关键技术及优化分析

康元锋

中铁十五局集团城市轨道交通工程有限公司

**摘要:** 陕西是我国产煤大省, 尤其陕北地区煤炭资源储量丰富。为缩短建设期斜井施工工期和提升投产期的煤炭产量, 各大型煤矿积极寻求各种快速施工新方法, 其中敞开式TBM施工工艺更贴近煤矿巷道建设现状, 是各大煤矿引进先进巷道掘进施工工艺的首选项。但长距离大埋深富水斜井巷道围岩存在变形、破碎、片帮等严重地质问题, 而合理的支护技术是稳定掘进施工的关键重点。研究表明: 锚网索喷支护手段可以有效控制斜井TBM掘进围岩扰动, 长短锚杆锚索联合支护优化方案亦可满足围岩变形控制要求。

**关键词:** 敞开式TBM; 斜井巷道; 支护优化; 离散元  
【DOI】 10. 12254/j. issn. 2096-6539. 2023. 12. 027

## 一、引言

传统煤矿建设追求经济、高效, 多以炮掘和综掘为主, 但存在巷道成形质量差、作业风险较大、工作环境恶劣、掘进效率低等问题<sup>[1]</sup>。为了缩短建井周期, 考虑安全、环保等要求, 随着铁路、市政、公路等施工的新技术和新设备的成熟, TBM施工逐渐进入各大型煤矿的视线<sup>[2, 3]</sup>。自20世纪80年代以来, 我国开始研究矿用全断面岩石掘进机, 到目前已经掌握TBM产品制造和核心技术, 煤矿斜井和巷道施工都能够使用TBM工法<sup>[4]</sup>。同时在大断层破碎带、软弱大变形围岩、涌水突泥洞段、超长隧洞等工程中, 采用TBM施工存在难度与挑战, 开挖导致巷道围岩变形大、持续时间长、破坏严重<sup>[5-7]</sup>。但相对于传统的矿山法施工, TBM工法的优势不言而喻, 根据不同的地质选用的支护形式多种多样, 符合当前煤矿施工的现状, 能大大缩短煤矿建设的周期, 而合理的支护手段可以有效控制围岩变形扰动, 保证TBM顺利掘进。

## 二、TBM斜井支护方案分析

目前在我国煤矿工程中采用TBM工法掘进巷道平硐、立井和斜井的部分工程<sup>[8]</sup>及支护方式。随着技术的进步, 我国实现了TBM机械由国外引进到自主设计的跨越。2003年开工的大同塔山煤矿采用罗宾斯I60系列全断面掘进机最初由1992年从美国引进, 并先应用于山西省引黄隧道工程。而2019年开工的新巨龙煤矿所使用的“新矿1号”, 是北方重工为解决矿区水平巷道埋深大、断面大、距离长等诸多施工难题而量身打造的盾构机, 具有完全的自主知识产权。

从TBM选型与支护方案来看, 神东集团新街台格庙矿区试验斜井与补连塔矿2号副井采用双模单护盾TBM与管片支护, 其余工程均为敞开式TBM锚网喷支护。

分析以上工程巷道破坏情况, 在开挖初期巷道变形速度快、变形量大, 随后变形逐渐稳定; 巷道破坏常发生在巷道顶板、帮部, 破坏类型分别为顶部冒落及左右片帮, 由于圆形TBM巷道掘进后快速施作仰拱, 底板的

变形可以得到有效控制。

## 三、工程背景

本文所依托可可盖煤矿副斜井项目, 是国内首次应用在富水长距离大坡度煤矿斜井的敞开式TBM施工项目, 井筒全长5206.5m, 6°下坡掘进, 施工工艺采用明槽开挖+敞开式TBM掘进。在松软的风积沙层采用放坡开挖270m, 使TBM进洞端处于稳定的基岩, TBM刀盘直径7.13m, 支护形式为“锚网喷+锚索”联合支护(如图1所示)。在实际工程中该支护方案能够做到有效控制围岩变形, 与公路铁路隧道初期支护相比, 改被动支护为主动支护, 支护形式随着围岩变形情况灵活优化, 及时遏制围岩变形造成的不良后果。

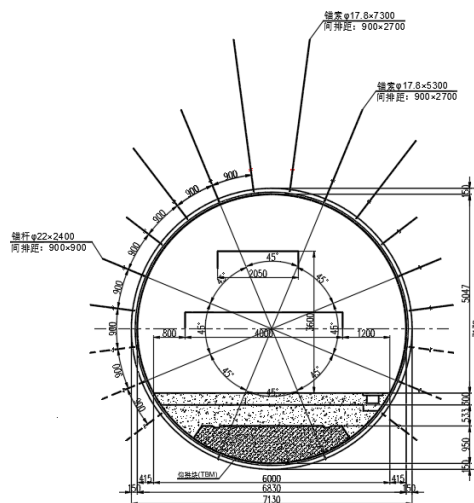


图1 可可盖副斜井支护断面

## 四、开挖及支护数值模拟

### (一) 原支护设计

井筒支护采用锚网喷+锚索施工, 锚杆杆体材料采用讴歌HRB400钢筋, 直径22mm, 长度2800mm, 外露50mm, 间排距900\*900mm, 托板采用150\*150\*10mm碟形钢板, 每根锚杆使用2卷MSZ23/50型树脂药卷, 锚固力不小于50kN; 锚索采用直径17.8mm的钢绞线, 长度7300mm, 沿井筒拱顶布置, 间排距1800mm\*2700mm, 锚索托盘采用Q235钢, 规格为300\*300\*20mm, 每根锚索使用4卷MSZ23/50型树脂药卷, 锚索预紧力不低于100kN; 金属网采用直径为6.5mm的HPB300钢筋焊接, 网格大小为100\*100mm。

### (二) 模型建立

基于UDEC离散元方法, 依据工程地质条件模拟TBM施工至埋深300m处(安定组)时的工况, 构建数值模型如图2所示。模型尺寸为80m×80m, 网格尺寸由大至小分别为2m、1m、0.5m、0.3m。岩体材料本构为Mohr-Coulomb, 块体间节理接触为Mohr-Coulomb slip。根据

现场地勘数据，确定最大和最小水平主应力和垂直应力分别为15.8MPa、10.5MPa和8.3MPa，根据地勘报告及岩石力学试验参数确定岩体及节理参数，见表2。

UDEC中内置实体单元可用来模拟支护结构作用，其中锚杆、锚索使用Cable单元，喷混支护使用Liner单元，支护结构的计算参数由实际支护材料力学参数确定。

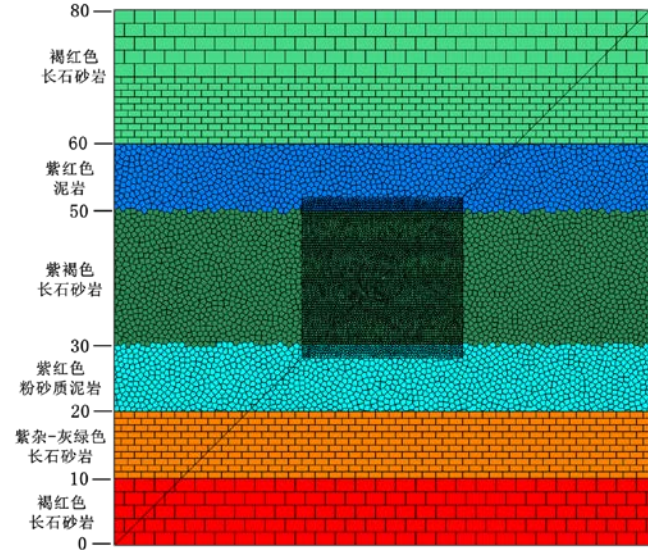


图2 离散元计算模型

UDEC中内置实体单元可用来模拟支护结构作用，其中锚杆、锚索使用Cable单元，喷混支护使用Liner单元，支护结构的计算参数由实际支护材料力学参数确定，见表1、表2。

表1 cable单元参数

密度 / (kg · m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	喷射厚度 /m	耦合弹簧	
			法向刚度 / (MN · m <sup>-3</sup> )	剪切刚度 / (MN · m <sup>-3</sup> )
2 500	2.8e4	0.2	1 000	1 000

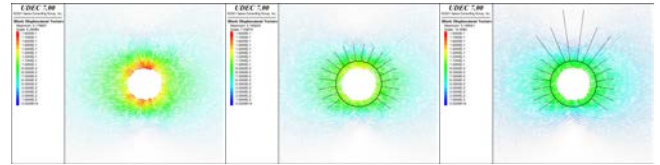
表2 liner单元参数

密度 / (kg · m <sup>-3</sup> )	弹性模量 / MPa	抗拉强度 /KN	锚固剂参数		
			黏聚力 / (KN · m <sup>-1</sup> )	黏结刚度 / (KN · m <sup>-2</sup> )	
锚索	7 500	2e5	350	3 000	2e6
锚杆	7 500	2e5	100	3 000	2e6

(三) 围岩位移分析

图3为不同支护方案下的位移矢量云图，其中图3(a)为无支护情况下TBM掘进围岩扰动，图3(b)、(c)分别为初始支护及优化支护情况下围岩扰动。初始支护方案为在圆形巷道周围布设18根2400mm长二级左旋螺纹钢锚杆，间排距为900m×900m，实际施工证明初始支护方案不能锚固深层塑性围岩，会造成顶板冒落施工问题。优化支护方案将顶部锚杆换为2根7300mm及4根5300mm锚索，排距为1800×2700mm。

无支护情况下围岩最大位移为17.9cm，位于围岩顶部正中位置，可知若在TBM掘进过后不及时支护，在巷道顶板会发生大面积冒落。初始支护方案也并不有效控制围岩变形发展，最终位移为14.9cm。由图3.(c)可知优化后支护方案将围岩位移控制在10.8cm，变形减小65.7%，围岩变形得到有效控制。



(a) 无支护 (b) 原始支护 (c) 优化支护

图3 不同支护方案下位移矢量图

(四) 顶板岩体应力分析

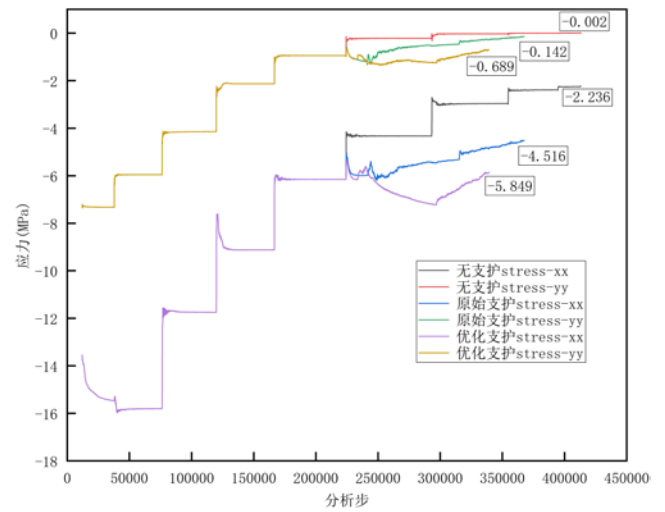


图4 不同支护方案下顶板应力变化曲线

图4为不同支护方案下顶板处围岩应力变化曲线，水平方向应力值大于竖向应力，侧面印证本计算工况主要受水平构造应力影响。由于在数值模拟中采用应力分级释放计算（按10%分十级逐渐释放），可以看到明显的围岩应力阶段性变化。支护结构于应力释放至60%时施加到围岩结构上，可以看到此时顶板处水平及竖向应力释放都得到不同程度抑制，是锚杆/索及喷混支护发挥作用，但原始支护下的支护结构抑制作用很快失效，说明支护结构已破坏失效，最终应力和无支护情况结果趋近。优化支护作用下各方向应力释放都受到强力抑制，最终应力数值基本和应力自然释放至60%时的结果一致，顶板冒落危险区域的应力变化得到有效控制。

五、支护施工总结及建议

本文依托可可盖煤矿斜井施工，对敞开式TBM工法的支护系统进行分析和优化，在长大井筒掘进过程中必须依据地质情况及时进行分析，合理优化支护参数，能保证施工安全顺利进行，防止冒顶和偏帮发生。该工程施工过程中多次遇到因地质变化而进行的支护调整，尤其是在层理裂隙比较发育且易泥化的泥岩和泥质胶结

的粉细砂岩石时，通过增加钢筋排、W钢带和钢梯等措施，加强加固围岩，同时进行超前喷浆、注浆和加密监测频次，达到稳定围岩的效果。但敞开式TBM工法的选择须谨慎，围岩的完整性、地应力、强度、破碎程度、涌水量都是主要的参考因素。

本项目TBM属于软岩地质掘进，强度最高35Mpa，整体性好，经过专家论证，在明槽端头修建敞开的弧形始发硐室如图5所示，为TBM始发提供撑靴反力，进硐20m范围内加强支护，增加钢拱架支护、W钢带，加密支护锚索，及时喷浆封闭和注浆。



图5 TBM始发硐

洛河组期间主要破碎部位为顶部，冒顶深度最高达2.0m，采取的措施是钢筋排+W钢带，锚索取代锚杆，增加7.3m锚索施工密度，待通过该段后，将顶部破碎围岩清空，重新张拉锚索，紧贴稳定岩面。



图6 帮部破碎处理

施工期间还遇到多次帮部破碎情况，而帮部破碎对施工的影响最大，后果有二：一是对设备的损坏，帮部破碎引起撑靴支撑硐壁时，撑靴上（下）部深入围岩，和油缸的角度过大，形成剪切破坏，项目在掘进至

2800m时因此而造成撑靴位置的连接螺栓全部断裂，撑靴掉落，停工处理达半月。二是帮部软弱破碎造成撑靴撑不紧硐壁如图6，不能提供掘进反力，极大的影响施工进度，需要对撑靴部位软弱破碎围岩进行喷浆填充，形成稳固弧面，使撑靴能撑紧硐壁提供掘进反力，但是，被动的处理既影响施工进度，也不利于安全控制，需要采取有效的超前措施，即在破碎围岩拖出护盾后立即进行长锚索超前支护，将破碎围岩进行防护，防止围岩脱落，待撑靴通过后进行二次支护，补打锚索，及时喷浆封闭，再注浆加固，形成稳固围岩。

## 六、结论

(1) 基于安全、质量、环保和效率等考虑，煤矿工程采用TBM工法将是未来发展的趋势，可大大缩短煤矿的建设周期，合理的支护手段是安全和顺利掘进的关键前提，本项目TBM的顺利落底成功推广了TBM在煤矿上的应用。

(2) 基于离散元软件UDEC，得出原始支护手段不能有效控制围岩变形，在TBM开挖后应力释放过程中支护锚杆会逐渐失效，最终顶部发展为大范围冒顶，采取不同深度的锚索，扩大锚固圈范围能大大增加支护安全系数。

(3) 基于数值模拟结果与工程实际情况，可知可盖煤矿副斜井“锚网喷+锚索”支护手段合理有效，工程应用也为煤矿实现安全高效生产目标提供了一定的借鉴与参考。

## 参考文献

- [1] 齐梦学. 我国TBM法隧道工程技术的发展、现状及展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1964-1979.
- [2] 杨生华, 芮丰, 蒋卫良, 张世洪. 煤矿全断面岩巷掘进机开发应用与发展[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(06): 1-10.
- [3] 黄炳香, 张农, 靖洪文, 等. 深井采动巷围岩流变和结构失稳大变形理论[J]. 煤炭学报, 2020, 45(03): 911-926.
- [4] 张洪伟, 胡兆锋, 程敬义, 朱传奇, 赵毅鑫, 郑兴博, 吕长刚, 高翔, 周俊. 深部高温矿井大断面岩巷TBM智能掘进技术——以“新矿1号”TBM为例[J]. 煤炭学报, 2021, 46(07): 2174-2185.
- [5] 程凯, 王海凤. TBM型盾构机在新景公司保安分区8~#煤回风巷的应用[J]. 山东煤炭科技, 2020(05): 123-125.
- [6] 田克先. TBM全断面掘进机在煤矿井下巷道的施工应用研究[J]. 当代化工研究, 2019(07): 141-142.
- [7] 李安云, 康元锋, 晁林. 敞开式TBM大坡度掘进施工特征研究[J]. 铁道建筑技术, 2022(04): 133-136.
- [8] 杨馨茹, 段灿, 薛子斌, 等. 不同坡度TBM隧道施工对开挖面稳定性的影响[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2022, 36(1): 33-40.