doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 020
宫云鹏, 黄富昌, 王伟苏, 等. 岩巷TBM超前地质探测及不良地质段预处理技术[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(6): 198-206.
Gong Yunpeng, Huang Fuchang, Wang Weisu, et al. Advanced geological detection and pretreatment technology for unfavorable geological sections in rock roadway TBM construction[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2026, 78(6): 198-206.

岩巷TBM超前地质探测及不良地质段预处理技术

宫云鹏, 黄富昌, 王伟苏, 刘文彬, 张金宝
(中煤隧道工程有限公司, 江苏 徐州, 221000)

摘　要: 针对全断面岩巷掘进机(TBM)在矿山巷道施工中遇到的断层破碎带、突涌水、围岩挤压大变形等易诱发卡机的地质难题, 本文系统开展TBM施工超前地质探测、设备针对性设计以及不良地质段预处理技术研究。以山西王家岭煤矿东翼副斜井TBM施工段为工程背景, 提出了“定向长探＋分支短探＋孔内瞬变电磁物探”相结合的综合探测方法, 阐述了该方法在保证探测精度的同时兼顾掘进效率的技术优势。为应对不良地质条件, 对TBM设备进行了针对性设计: 配置超前地质钻注一体机, 实现超前探孔与注浆加固; 在护盾结构中设置钢筋排仓支护系统, 提高断层破碎带支护安全与效率; 优化排水设备并采用三级排水方式; 刀盘与盾体直径采用阶梯递减设计, 并在边刀刀座加装垫块或加厚“C”型块实现扩挖, 降低卡机风险。在此基础上, 归纳了TBM穿越断层破碎带及突涌水地段的预处理原则, 提出超前小导管注浆、超前管棚支护及堵排水等具体技术措施。研究成果可有效降低不良地质条件对TBM施工的影响, 保障施工安全与效率, 可为类似矿山巷道TBM工程提供重要参考。

关键词: TBM; 不良地质段; 超前地质探测; 预处理技术; 针对性设计
中图分类号: TD803　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0198-09

Advanced geological detection and pretreatment technology for unfavorable geological sections in rock roadway TBM construction

Gong Yunpeng, Huang Fuchang, Wang Weisu, Liu Wenbin, Zhang Jinbao
(China Coal Tunnel Engineering Co., Ltd., Xuzhou 221000, Jiangsu, China)

Abstract: In view of the geological problems such as fault fracture zone, water inrush and large deformation of surrounding rock extrusion, which are easy to induce jamming in the construction of full face rock tunnel boring machine (TBM) in mine roadway, this paper systematically studies the advanced geological detection, targeted design of equipment and pretreatment technology of unfavorable geological section in TBM construction. Taking the TBM construction section of the auxiliary inclined shaft in the east wing of Wangjialing Coal Mine in Shanxi Province as the engineering background, a comprehensive detection method combining "directional long exploration, branch short exploration, and borehole transient electromagnetic geophysical prospecting" is proposed. The technical advantages of this method in ensuring the detection accuracy and taking into account the tunneling efficiency are expounded. In order to cope with the adverse geological conditions, the TBM equipment was designed in a targeted manner: the advanced geological drilling and grouting machine was configured to achieve advanced hole detection and grouting reinforcement; the steel bar support system is set up in the shield structure to improve the safety and efficiency of the fault fracture zone support. Optimize drainage equipment and adopt three-level drainage method; the diameter of the cutter head and shield body is designed by step decreasing, and the cushion block or thickened "C" block is added to the side cutter seat to realize the expansion excavation and reduce the risk of jamming. On this basis, the pretreatment principles of TBM passing through fault fracture zone and water inrush section are summarized, and specific technical measures such as advanced small pipe grouting, advanced pipe shed support, plugging

收稿日期: 2026-06-18
作者简介: 宫云鹏, 硕士, 高级工程师, 主要从事TBM、盾构领域的研究工作。

and drainage are put forward. The research results can effectively reduce the influence of poor geological conditions on TBM construction, ensure construction safety and efficiency, and provide important reference for TBM projects in similar mine roadways.

Key words: TBM; unfavorable geological sections; advanced geological detection; pretreatment technology; targeted design

长期以来，矿山巷道施工主要依赖传统钻爆法与综掘法。钻爆法施工扰动大、巷道成型精度差、作业工序繁琐、掘进效率低下，且爆破作业安全风险高；综掘法则在硬岩及复杂破碎地层中适应性较差，破岩效率偏低，施工易诱发显著的围岩扰动与岩体验伤。两类传统施工方式均难以满足现代化矿山建设和高效开采的工程需求[1-4]。全断面岩巷掘进机(TBM)是指采用刀盘一次性全断面破岩掘进、同步支护的专用机械设备，其凭借自动化程度高、掘进速度快、安全性高、巷道成型质量好、施工扰动小等显著优势，已广泛应用于矿山巷道施工中[5-9]。然而，随着矿山向深部开采，地质条件愈加复杂多变，存在断层、破碎带、岩溶、富水区等不良地质体[10]，若未能提前探明并有效预处理，极易发生TBM卡机、突涌水以及塌方等事故，造成严重经济损失与安全风险。

近年来，国内外学者针对TBM超前地质预报技术开展了大量研究。李术才等[11]系统总结了隧道施工超前地质预报方法；杨继华等[12]提出了适合双护盾TBM施工的综合超前地质预报方法及应用流程，并形成了基于综合超前地质预报结果的双护盾TBM施工技术；吴超凡等[13]采用地震波超前探测与瞬变电磁法相互验证的综合物探技术，实现巷道迎头前方断层构造的精准定位与富水判别；齐梦学等[14]结合TBM施工实践，总结了10种现有处置技术，用于应对破碎、软弱、富水、完整硬岩、岩爆等地质问题。但是，目前针对矿山巷道TBM施工场景，融合超前地质探测、设备针对性设计与不良地质段预处理的一体化成套技术，相关研究仍较为匮乏。

山西省煤矿安全监管严格执行“预测预报、探掘分离、有掘必探、先探后掘、先治后采”的探放水原则及“三专两探一撤”的规定，要求掘进前必须实施超前探测。然而，TBM施工的核心优势在于连续快速掘进，若采用传统钻探方式频繁停机，将严重削弱其效率优势。在严格遵守探放水安全规范的前提下，如何弱化探放水作业对TBM掘进施工的干扰与制约，是矿山TBM掘进工程面临的关键技术难题。为此，本文以山西省乡宁县王家岭煤矿东翼副斜井为工程背景，提出“定向长探＋分支短探＋孔内瞬变电磁物探”的综合探测方法，并开展TBM设备针对性设计及不良地质段预处理技术研究；其中，长距离定向长探技术单次探测量程可达数百米，显著降低了设备停机钻探频次，有效缓解探放水作业与高效掘进之间的工序冲突，为矿山巷道TBM施工构建了安全合规、高效适配的超前探测技术体系，可为同类工程施工提供借鉴与参考。

1　工程概况与地质条件分析

1.1　工程概况

王家岭东翼矿区位于山西省乡宁县西南约9 km处，东翼副斜井井筒全长3 506.73 m，井口标高＋1 010.5 m，井底标高＋689.76 m，主要用于人员运输、辅助运输任务，兼做进风井和安全出口。该井原采用炮掘工艺，施工速度慢，制约了矿区采掘接续。因此，自井深941 m处采用Φ6 930 mm TBM施工，TBM施工段全长2 565.73 m，方位角为212°，倾角－6°，掘进断面37.72 m^2，净断面27.5 m^2。支护方式为“锚网喷＋锚索”联合支护。采用Φ22 mm×2 800 mm左旋螺纹钢筋锚杆，间排距800 mm×800 mm，每排布置19根；锚索采用Φ21.6 mm×8 250 mm钢绞线，间排距2 400 mm×2 400 mm，每排布置3根；金属网采用Φ5 mm圆钢，网格80 mm×80 mm，尺寸1 100 mm×2 180 mm；喷射混凝土强度等级为C20，厚度为150 mm。

1.2　工程地质与水文地质

巷道穿越地层主要为二叠系上统上石盒子组中、下段，地层倾角平缓(4°～8°)，以泥岩、粉砂岩及中细粒砂岩为主。各检查孔施工中未遇明显断层等构造，仅勘探孔孔深308.8 m处泥岩中发现1 m层间错动，但不排除隐伏断层可能。

水文地质方面，主要水害威胁为二叠系上、下石盒子组裂隙承压水含水层，单位涌水量0.003 52～0.148 L/(s·m)，渗透系数0.09～1.06 m/d，总体属弱富水性，预计正常涌水量为5 m^3/h，无小窑老空区积水及其他构造水威胁。尽管如此，根据山西省煤矿“有掘必探”相关规定，仍需开展精细化超前探测。

2 TBM施工超前地质探测

TBM掘进过程中，复杂地质条件可能会引发各类突发事故，阻碍施工。超前地质探测能实现工作面前方不良地质体的准确预测，为施工提供相应建议，已成为当前隧道建设的关键技术之一。

2.1 探测方法选择

超前地质探测方法的选择需综合考虑工程地质条件、施工方法、探测对象特性、经济合理性以及对施工进度的影响等因素。常见方法包括工程地质调查法、地球物理探测法和超前地质钻探法，其中常用的物探方法有瞬变电磁法、地震波反射法、地质雷达法及激发极化法等，瞬变电磁法因对水异常敏感，已广泛应用于含水构造探测[15-17]。矿井基础勘察资料显示，本工程地质构造相对简单，未见溶洞等不规则地质体，主要潜在风险为断层破碎带及砂岩裂隙水水害，因此物探选用瞬变电磁法。此外，为降低钻探对TBM造成的停掘影响，充分发挥TBM高效掘进优势，优先采用定向长探；当不具备钻场施工条件时，则采用机载钻机短探。综合比选后，确定了“定向长探＋分支短探＋孔内瞬变电磁物探”的综合探测方案。

2.2 探测方案

TBM始发前，首先在始发硐室工作面完成941～1 562 m定向长探孔施工，后期计划利用躲避硐室作为钻场进行定向钻探水施工，每组施工3个探孔，探孔深度620 m，允许掘进长度570 m，预留50 m作为安全距离。实际施工中，由于钻场施工条件不具备，仅在里程2 476～3 029 m布设第二组定向长探孔；其余采用机载钻机短探，每组施工3个探孔，探孔深度100 m，允许掘进长度70 m，预留30 m作为安全距离(图1)。在每次定向长探孔及短探孔中，选1个钻孔进行孔内瞬变电磁探测。

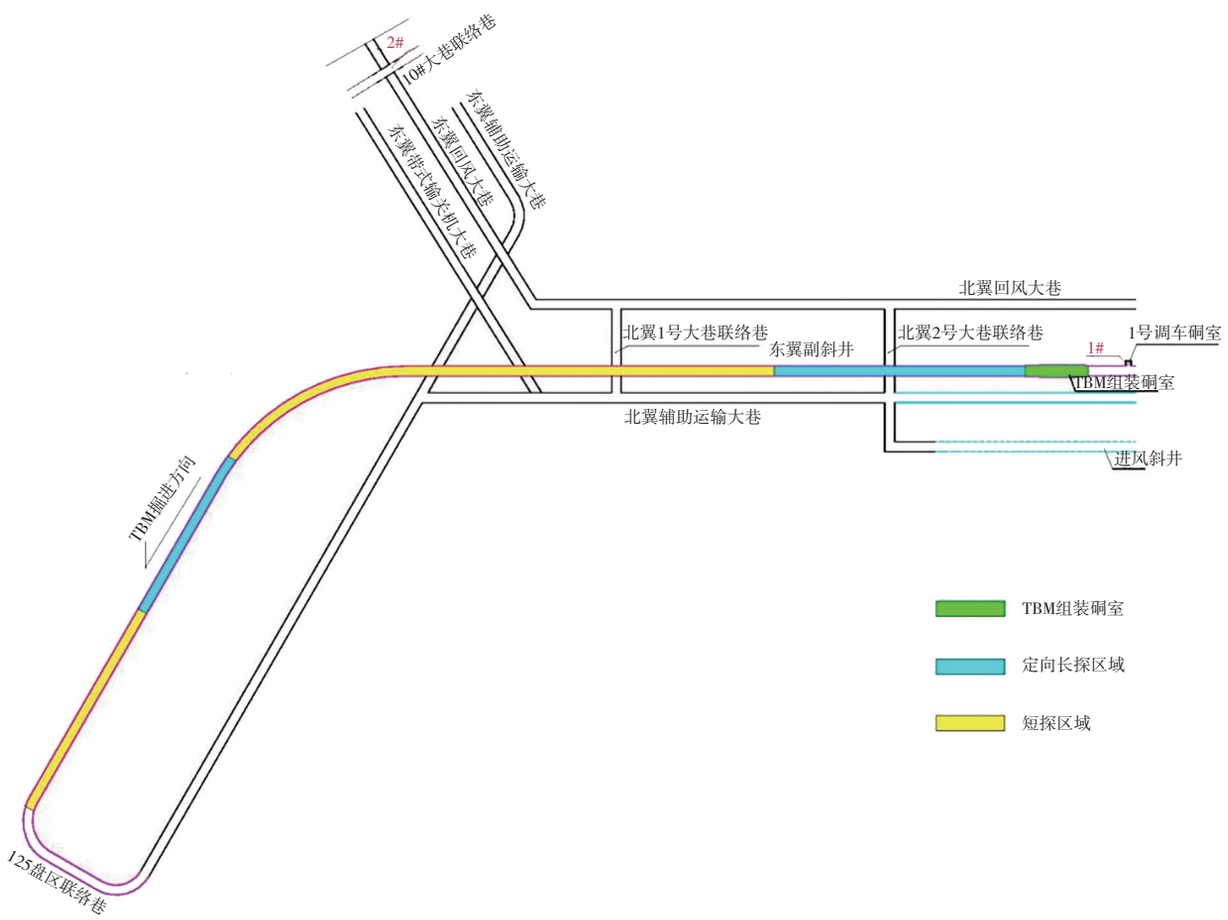


图1 探孔布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of borehole layout

2.2.1　定向长探

1）钻孔布置与设计参数

始发前定向长探布置：始发工作面布置 1 个探孔（1-1#孔），然后安装 TBM，安装过程中，在 TBM 安装硐室后方的 1 号调车硐室（斜井里程 828 m）内布置 2 个探孔（1-2#、1-3#孔），钻孔布置如图 2～3 所示。掘进过程中定向长探布置：2 476～3 029 m 布设第二组定向长探孔。定向长探钻孔设计参数见表 1。

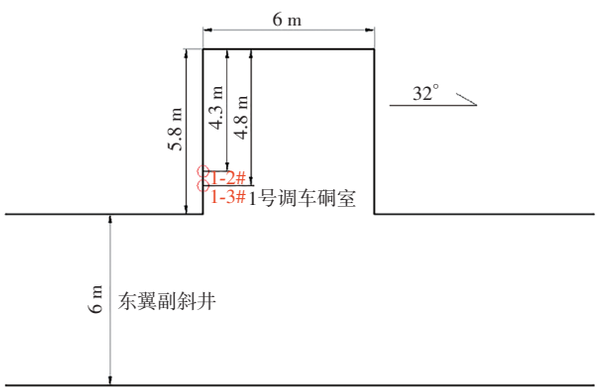


图 2　钻孔平面布置图

Fig. 2　Plan layout of boreholes

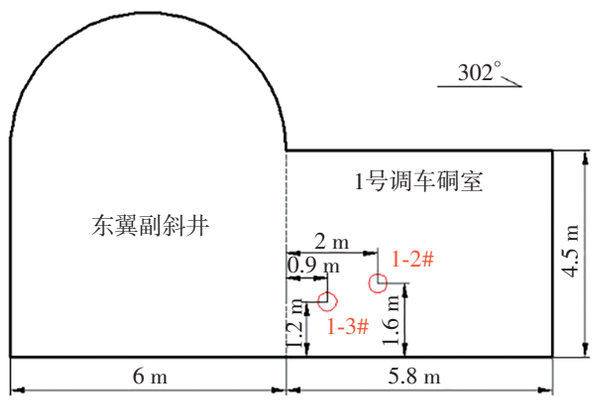


图 3　钻孔断面布置图

Fig. 3　Cross-section layout of boreholes

表 1　定向长探钻孔设计参数

Table 1　Design parameters of long-directional boreholes

探孔位置	探孔长度/m	孔号	倾角/(°)	方位/(°)	孔深/m	开孔标高/m	终孔孔径/mm
始发前	941～1 562	1-1#	−4	212	621	934.573	94
	941～1 562	1-2#	1～3	222	744	934.573	94
	941～1 562	1-3#	−4～−6	205	744	934.573	94
掘进中	2 476～3 029	2-1#	20	120	1 200	621	94
	2 476～3 029	2-2#	20	120	882	621	94
	2 476～3 029	2-3#	20	120	921	621	94

2）定向钻孔工艺

采用 Φ89 mm 螺杆马达作为定向钻进的动力钻具，主要由螺杆马达（定子、转子）总成、万向轴总成、传动轴总成三大部分组成。采用螺杆马达钻进时，不需要钻杆旋转，泥浆泵输出的冲洗液经通缆钻杆进入螺杆马达，在马达的进出口形成一定压差，推动马达的转子旋转，通过万向轴和传动轴将转速和扭矩传递给钻头，达到碎岩目的。该工艺减少了钻杆与孔壁的摩擦阻力，在较小动力损失下即可获得较大的钻进能力。定向钻孔施工工艺流程如图 4 所示。

3）定向钻孔施工方法

采用二级钻孔结构，第一级采用 Φ120 mm PDC 钻头开孔至 11 m，再更换 Φ153 mm PDC 钻头扩孔至 11 m；清理孔口杂物，下入 Φ127 mm 钢制套管 10.5 m，并利用注浆泵对套管环隙注浆。套管安装完成后开展耐压试验，试验压力 1.5 MPa，稳压 30 min，检验合格后，换用 Φ94 mm 复合片钻头定向钻进至设计孔深。

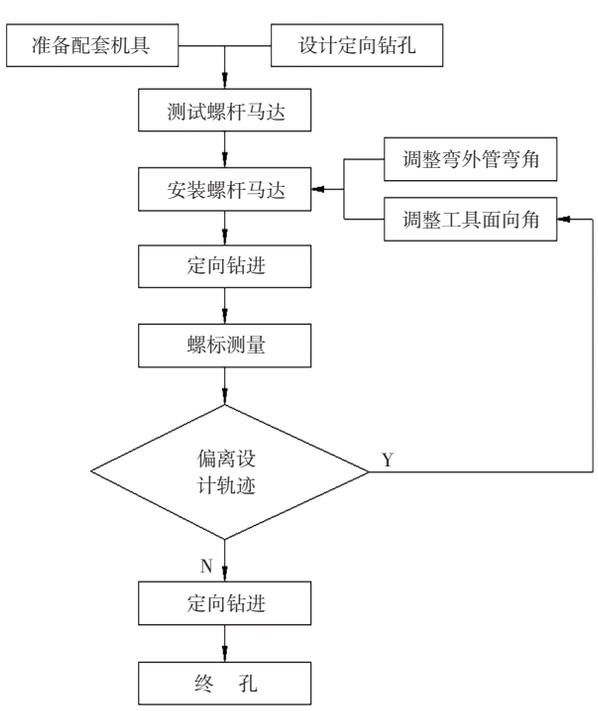


图 4　定向钻进工艺流程示意图

Fig. 4　Schematic diagram of directional drilling process flow

2.2.2　分支短探

采用TBM设备自带的超前地质钻机,钻机固定在鞍架上,由液压马达驱动其在钻机旋转环上旋转,定位并实现超前钻探功能。钻机额定扭矩4 000 N·m,旋转角度−90°~90°,俯仰角0°~15°,钻孔直径Φ75 mm,最大钻孔深度100 m。施工中由于钻机受TBM设备及工况限制,探孔数量和角度受限,探孔实际范围为拱顶88°范围内(带仰角10°)。自护盾外侧施工超前探孔,单次布设3个探孔,超前钻探深度100 m,允许掘进长度70 m,预留30 m作为安全距离。探孔布置如图5所示。

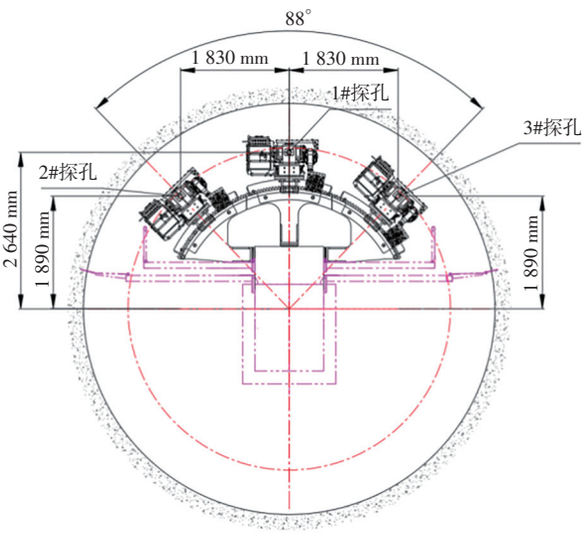


图5　短探探孔布置图

Fig. 5　Layout of short advanced boreholes

2.2.3　孔内瞬变电磁物探

1)原理与技术参数

瞬变电磁法通过不接地回线向地下发射一次脉冲电磁场,利用接收线圈观测地下涡流在脉冲电磁场激励下产生的二次磁场的空间与时间分布特征[18-19]。本工程采用YCSZ-DFS-009矿用钻孔瞬变电磁仪,外径73 mm,有效推送距离大于500 m,适用于Φ89 mm以上钻孔。通过钻机推送发射线圈与接收探头一同进入钻孔中,逐点采集三分量二次场数据,形成以钻孔为中心的圆柱形探测区域,可有效识别钻孔径向30 m范围内的低阻异常体。

2)施工方法与流程

数据采集流程分为钻杆推送与数据测量两个阶段。钻杆推送至测点深度后开展逐点测量,每推送一节钻杆完成一次测量,单次测量数据时长20 s。数据采集过程中禁止推送钻杆;单个测点采集完成后,继续推送钻杆至下一测点,循环作业直至完成全孔数据采集。

3)探测结果分析

采用孔内瞬变电磁探测技术分别在长探孔、短探孔内进行施工,对钻孔径向30 m范围内的水文地质情况进行探测。以长探孔1-1#钻孔为例,该钻孔孔深621 m;孔内瞬变电磁探测自孔深11 m(套管段以下)开始,探测至孔深619 m。探测结果显示,孔内瞬变电磁探测范围内均未识别到低阻异常区(图6~7),表明该TBM掘进巷道内无明显异常区。

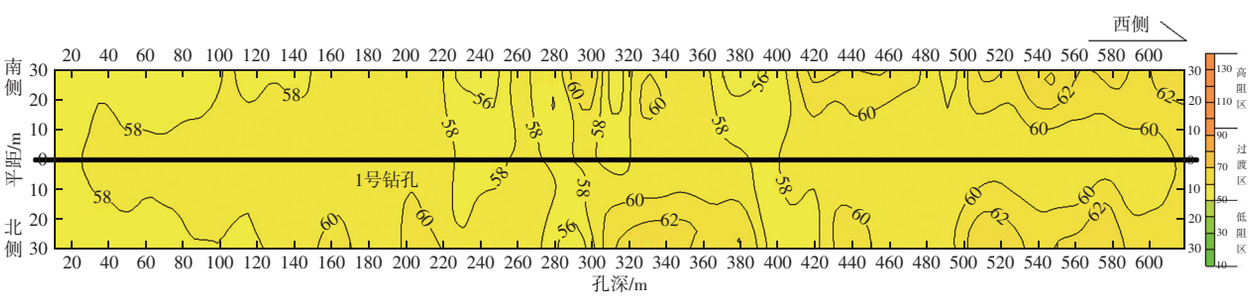


图6　视电阻率等值线横剖面图(顺层方向)

Fig. 6　Apparent resistivity contour cross-section (along bedding direction)

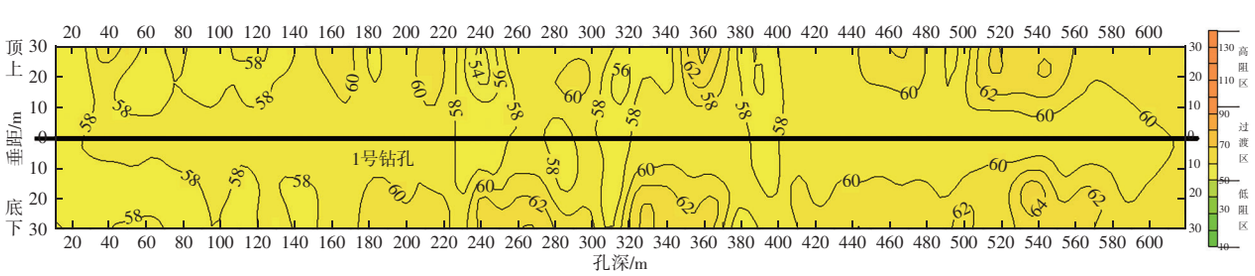


图7　视电阻率等值线纵剖面图(顶、底板方向)

Fig. 7　Apparent resistivity contour longitudinal section (roof and floor direction)

2.3　探测效果验证分析

本工程TBM掘进巷道实现全覆盖探测，累计开展定向长探2次，短探19次，孔内瞬变电磁物探21次。钻探揭露岩性以泥岩、粉砂岩为主，未见断层及涌水现象；每次定向长探及短探，均选取1个钻孔开展孔内瞬变电磁物探，钻孔径向30 m探测范围内均未发现明显异常区。现场TBM掘进揭露地层情况表明，巷道掘进范围内未出现涌水、断层、陷落柱等不良地质构造，探测成果与实际掘进揭露情况高度吻合。此外，本次采用的YCSZ-DFS-009矿用钻孔瞬变电磁仪曾在王家岭矿东翼进风斜井开展探测时识别出低阻异常区；后续掘进揭露证实，在巷道里程214 m、630 m处发现顶板滴水、淋水现象，实测情况与预报成果吻合，表明该物探方法对不良地质体具有良好的识别能力。

实践表明，“定向长探＋分支短探＋孔内瞬变电磁物探”综合探测方法探测结果准确可靠；采用该方法可以大幅减少TBM停机探测频次，实现单日最高进尺24.1 m，单月最高进尺450 m，综合月进尺300 m，充分彰显该方法在兼顾探测精度与掘进效率方面的突出优势。

3　TBM设备针对性设计

3.1　过断层破碎带的设备设计

TBM主梁配置6台液压锚杆钻机和风动钻机平台。1#、2#钻机布置在护盾后方，对巷道顶板实施支护作业；3#、4#钻机布置在撑靴后方，对巷道两帮实施支护作业；5#、6#钻机布置在1号车架前方，负责收尾及锚杆补强支护。在1#、2#钻机后方布置1台超前地质钻注一体机，实现超前探孔及注浆功能。车架上布置1台喷浆机，对巷道顶板进行混凝土喷射支护；车架后靠近巷帮一侧布置1台喷浆机，对巷道帮部进行混凝土喷射支护。当围岩破碎时，通过打设超前锚杆进行临时支护，并及时初喷封闭围岩，随后在车架后复喷。TBM结构形式如图8所示。

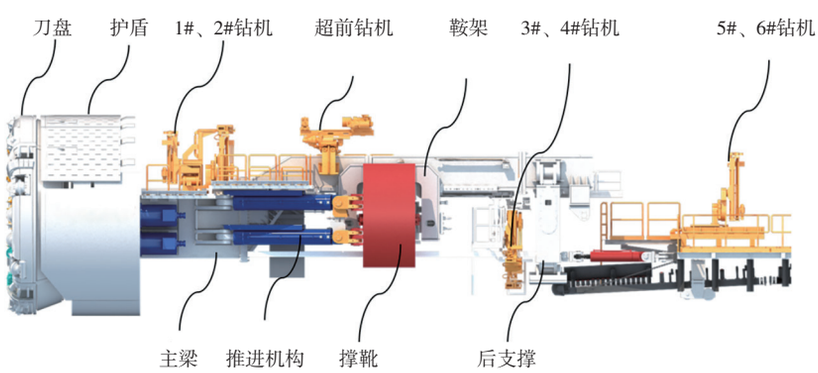


图8　TBM结构图

Fig. 8　Structure diagram of TBM

在护盾上设置钢筋排仓，钢筋排安装如图9所示。过破碎带时，将钢筋排一端与钢架连接牢固；随着TBM掘进，钢筋排逐步抽出，并快速兜住脱落块石，使围岩在露出护盾后及时得到支护。采用机载喷浆机及时喷射混凝土封闭围岩，破碎围岩与混凝土支护层之间的间隙采用注浆填充。

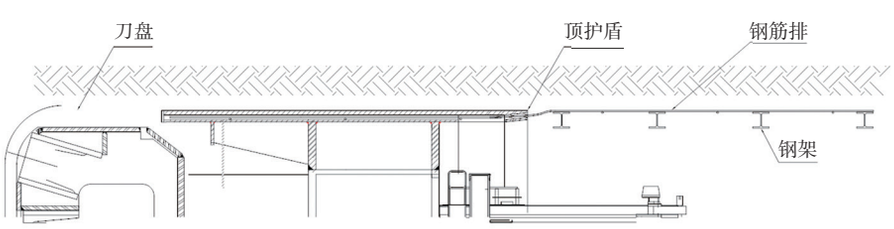


图9　钢筋排安装示意图

Fig. 9　Schematic diagram of reinforcement row installation

3.2 排水系统优化配置

最大排水量按大于最大涌水量与TBM设备用水量之和设计。主机下方配置2台30 m^3/h的隔膜泵，后配套车架配置2台80 m^3/h的隔膜泵及2个容量6 m^3的水箱。施工采用三级排水方式：工作面涌水通过隔膜泵排至车架水箱，然后通过水箱潜水泵排至临时水窝(水窝容量48 m^3)，最后通过临时水窝内水泵排至地面污水处理池。水仓配置2台BQS30-150隔爆型潜水排沙电泵，一备一用，额定流量30 m^3/h，额定扬程150 m。

3.3 围岩变形防卡机设计

为降低围岩变形诱发TBM卡机风险，可通过减小刀盘圆周区域暴露在盾体外的面积，降低刀盘旋转对围岩的扰动，进而降低掌子面发生失稳、坍塌的发生概率。刀盘、盾体直径采用阶梯递减设计：边刀开挖直径、刀盘直径、盾体直径由前往后逐渐减小，护盾预留合适的回缩行程，降低卡盾风险。扩挖设计：在相应边刀的刀座上安装垫块或加厚“C”型块，通过刀具机械式外移扩大边刀开挖直径，实现扩挖功能。为保证刀盘底部与盾体之间间隙恒定，避免底部超挖引起主机栽头，在刀具垫高的基础上采用TBM昂头掘进模式，使拱顶区域的开挖间隙达到正常扩挖量的2倍，有效降低围岩挤压导致的卡机风险。

4 不良地质段预处理施工技术

4.1 断层破碎带预处理

4.1.1 预处理原则

开展断层破碎带预处理时，应结合地质勘察与超前地质预报成果，查明破碎带规模、范围及断层性质，制定分级预处理预案[20]。当围岩为自稳时间短的砂层、断层破碎带浅部，或宽度小于5 m且无水的断层破碎带时，可采用超前小导管注浆加固；当围岩为宽度大于5 m的断层破碎带，或围岩富水、地质条件复杂时，可采用超前管棚支护；当围岩地质条件极端复杂时，可采用“管棚＋小导管”组合支护形式。

4.1.2 超前小导管注浆

1)浆液选择及配比

浆液应根据岩巷工程地质、水文地质条件及注浆施工工艺选取。一般情况下，中强风化及断层破碎带富水或动水条件下采用普通水泥-水玻璃双液浆或化学浆液；砂层采用超细水泥-水玻璃双液浆；靠近TBM结构件的区域采用聚氨酯化学浆液等。

2)注浆孔布置

超前小导管注浆的布置需根据围岩破碎程度、地下水状况、岩巷断面尺寸及TBM护盾结构等综合确定。纵向沿岩巷轴线方向布设，自TBM护盾尾部以5°～10°外插角斜向掌子面前方钻孔，前端锚入未开挖地层，后端固定于钢拱架，每排导管纵向搭接长度不少于1 m。径向沿岩巷横断面呈伞形辐射状单排或双排布设，环向覆盖顶拱120°以上范围，钻孔环向间距一般不大于45 cm，破碎地层加密至2倍导管直径，确保加固拱壳均匀覆盖松散围岩。钢管直径通常为32～60 mm，常用42 mm，钻孔深度应根据钻机能力、刀盘及护盾长度、围岩处置段长度及掘进计划综合确定，单次注浆后允许掘进长度一般为注浆段的70%～80%，预留20%～30%作为下段注浆的止浆盘。

4.1.3 超前管棚支护

超前管棚沿岩巷轮廓线按1°～3°外插角布设，采用分节钢管逐段打入地层，并通过丝扣连接形成连续支护结构。管棚采用无缝钢管加工制作，常用管径89 mm、108 mm、159 mm，壁厚6～10 mm；钢管间距一般为管径的2～3倍(如管径为108 mm时，钢管间距约为0.3～0.4 m)，纵向搭接长度不小于3 m。管棚打设完成后，通过钢管上的注浆孔进行注浆。注浆应按照从下往上、从外向内的顺序进行，确保浆液能够充分填充管棚与围岩之间的空隙。

4.2 突涌水预处理

4.2.1 预处理原则

突涌水防治以超前地质预报为核心，采用物探与钻探相结合的探测方式，探明涌水段位置、涌水量及水压情况，精准划分突涌水风险等级。针对不同风险等级制定预处理方案，低风险区以排水降压为主，中高风险区采用注浆封堵为主，辅以排水系统。

4.2.2 预处理措施

根据涌水规模与风险等级制定预处理方案，主要有疏导和封堵两种处理措施。当涌水量较小时，利用TBM机载钻机打排水孔排水，并做好排水系统，继续掘进；当涌水量较大时，停止掘进，利用超前钻机或其他专业造孔设备从护盾尾部向掌子面前方钻孔，注入水泥或化学浆液固结前方破碎岩体，达到加固围岩和堵水的效果，待注浆体达到设计强度并经检查确认安全后，方可恢复掘进。

5　结论

1）在王家岭煤矿东翼副斜井 TBM 施工中采用“定向长探＋分支短探＋孔内瞬变电磁物探”的综合超前探测方法，不仅探测结果准确可靠，而且显著减少 TBM 停机钻探频次，兼顾了探水安全管控与 TBM 高效掘进。

2）提出了 TBM 过不良地质段的针对性设计：钻注一体机实现了超前探孔与注浆加固；钢筋排仓快速支护系统不仅提升了断层破碎带的支护效率，而且增强了围岩支护安全性；三级排水系统能够有效应对涌水风险；刀盘-盾体阶梯式递减直径设计以及边刀扩挖预留设计，可以有效降低围岩变形导致的卡机风险。

3）总结了断层破碎带与突涌水的分级预处理原则与关键技术措施，形成“超前探测-设备针对性设计-预处理施工”一体化技术体系，可为类似矿山巷道工程提供参考。

参　考　文　献

[1] 郭孝先. 煤矿钻爆法岩巷掘进机械化作业线的形成与发展[J]. 凿岩机械气动工具，2018，44(2)：26-32.
Guo Xiaoxian. Formation and development of mechanized rock drift excavation operation line using drilling-blasting method in coal mine[J]. Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools，2018，44(2)：26-32.

[2] 毛君，董钰峰，卢进南，等. 巷道掘进截割钻进先进技术研究现状及展望[J]. 煤炭学报，2021，46(7)：2084-2099.
Mao Jun，Dong Yufeng，Lu Jinnan，et al. Research status and prospect of advanced technology of roadway excavation cutting and drilling equipment[J]. Journal of China Coal Society，2021，46(7)：2084-2099.

[3] 程桦，唐彬，唐永志，等. 深井巷道全断面硬岩掘进机及其快速施工关键技术[J]. 煤炭学报，2020，45(9)：3314-3324.
Cheng Hua，Tang Bin，Tang Yongzhi，et al. Full face tunnel boring machine for deep-buried roadways and its key rapid excavation technologies[J]. Journal of China Coal Society，2020，45(9)：3314-3324.

[4] 刘泉声，潘玉丛，余宏淦，等. 深部金属矿山巷道 TBM 掘进技术应用现状及研究进展[J]. 有色金属(矿山部分)，2024，76(6)：25-41.
Liu Quansheng，Pan Yucong，Yu Honggan，et al. Application status and research progress of TBM tunnelling technology in deep metal mine roadways[J]. Nonferrous Metals (Mining Section)，2024，76(6)：25-41.

[5] 王杜娟，贺飞，王勇，等. 煤矿岩巷全断面掘进机(TBM)及智能化关键技术[J]. 煤炭学报，2020，45(6)：2031-2044.
Wang Dujuan，He Fei，Wang Yong，et al. Tunnel boring machine (TBM) in coal mine and its intelligent key technology[J]. Journal of China Coal Society，2020，45(6)：2031-2044.

[6] 刘泉声，黄兴，潘玉丛，等. TBM 在煤矿巷道掘进中的技术应用和研究进展[J]. 煤炭科学技术，2023，51(1)：242-259.
Liu Quansheng，Huang Xing，Pan Yucong，et al. Application and research progress of TBM tunneling in coal mine roadway[J]. Coal Science and Technology，2023，51(1)：242-259.

[7] 贺飞，鲁义强，代恩虎，等. 煤矿岩巷 TBM 适应性与新技术发展[J]. 煤炭科学技术，2023，51(增刊1)：351-361.
He Fei，Lu Yiqiang，Dai Enhu，et al. Application of TBM in coal mine adaptability type selection analysis and new technology development[J]. Coal Science and Technology，2023，51(S1)：351-361.

[8] 刘泉声，时凯，黄兴. TBM 应用于深部煤矿建设的可行性及关键科学问题[J]. 采矿与安全工程学报，2013，30(5)：633-641.
Liu Quansheng，Shi Kai，Huang Xing. Feasibility of application of TBM in construction of deep coal mine and its key scientific problems[J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2013，30(5)：633-641.

[9] 何川. 盾构/TBM 施工煤矿长距离斜井的技术挑战与展望[J]. 隧道建设，2014，34(4)：287-297.
He Chuan. Challenges and prospectives of construction of long-distance inclined shafts of coal mines by shield/TBM[J]. Tunnel Construction，2014，34(4)：287-297.

[10] 齐梦学. 硬岩掘进机(TBM)在我国隧道施工市场的推广应用[J]. 隧道建设，2014，34(11)：1019-1023.
Qi Mengxue. Promoting TBM in tunnel construction in China[J]. Tunnel Construction，2014，34(11)：1019-1023.

[11] 李术才，刘斌，孙怀凤，等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报，2014，33(6)：1090-1113.
Li Shucai，Liu Bin，Sun Huaifeng，et al. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2014，33(6)：1090-1113.

[12] 杨继华，杨风威，房敬年，等. 基于多源信息的双护盾 TBM 施工隧洞综合超前地质预报方法及应用[J]. 应用基础与工程科学学报，2023，31(6)：1571-1589.
Yang Jihua，Yang Fengwei，Fang Jingnian，et al. Comprehensive advanced geological prediction method based on multi-source information for double shield TBM construction tunnel and its application[J]. Journal of Basic Science and Engineering，2023，31(6)：1571-1589.

[13] 吴超凡，邱占林，路拓，等. 综合物探技术在大弯煤矿巷道超前地质预报中的应用[J]. 煤炭工程，2020，52(4)：43-47.
Wu Chaofan，Qiu Zhanlin，Lu Tuo，et al. Application of comprehensive geophysical prospecting in advance roadway geological forecast in Dawan Coal Mine[J]. Coal Engineering，2020，52(4)：43-47.

[14] 齐梦学，杨国清，曾绍毅. 全断面岩石隧道掘进机(TBM)施工

超前处置技术综述与思考[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(9): 1555-1564.
Qi Mengxue, Yang Guoqing, Zeng Shaoyi. Review and analysis of advanced treatment techniques for full-face tunnel boring machine construction[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(9): 1555-1564.

[15] 孙文斌, 李长江, 王宇, 等. 基于瞬变电磁法的煤矿隐蔽致灾水害分析研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(10): 167-169.
Sun Wenbin, Li Changjiang, Wang Yu, et al. Analysis and research of hidden disaster water damage in coal mine based on transient electromagnetic method[J]. Coal Technology, 2023, 42(10): 167-169.

[16] 李云波, 李好. 矿井瞬变电磁法富水体超前探测原理及应用研究[J]. 矿业安全与环保, 2013, 40(2): 69-72.
Li Yunbo, Li Hao. Principle of advance detection of water-enriched body with mine transient electromagnetic method and its application[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2013, 40(2): 69-72.

[17] 牟义, 李江华, 徐慧, 等. 矿井瞬变电磁法参数优化试验及超前探测应用[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(6): 184-190.
Mu Yi, Li Jianghua, Xu Hui, et al. Parameters optimization test of mine transient electromagnetic method and application of advanced detection[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6): 184-190.

[18] 李建超, 王进城, 王志豪. 瞬变电磁法和地震反射波法在不良地质洞段超前地质预报中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(5): 793-801.
Li Jianchao, Wang Jincheng, Wang Zhihao. Application of transient electromagnetic method and seismic reflection wave method in advance geological prediction of hole section with poor geological conditions[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2024, 21(5): 793-801.

[19] 胡斌. 瞬变电磁法在煤矿超前地质勘查中的应用[J]. 能源与环保, 2024, 46(6): 70-75.
Hu Bin. Application of transient electromagnetic method in advanced geological exploration of coal mines[J]. China Energy and Environmental Protection, 2024, 46(6): 70-75.

[20] 王远超, 杜雷功, 王迎春, 等. 深埋隧洞TBM超前地质预报及预处理关键技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(8): 1350-1356.
Wang Yuanchao, Du Leigong, Wang Yingchun, et al. Key technology of advance geological prediction and pretreatment of TBM construction in deep-buried tunnel[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(8): 1350-1356.