doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 013
张新，朱景山，靳党鹏. 双组合TBM创新及山岭隧道复杂地质施工适应性研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(6): 136-144.
Zhang Xin, Zhu Jingshan, Jin Dangpeng. Innovation of dual-combined TBM and its adaptability for mountain tunnel construction in complex geology[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2026, 78(6): 136-144.

双组合TBM创新及山岭隧道复杂地质施工适应性研究

张　新，朱景山，靳党鹏
(中交天和机械设备制造有限公司，江苏 常熟 215557)

摘　要：针对常规敞开式TBM在山岭隧道岩爆、断层破碎带、软岩大变形等复杂不良地质条件下地质适应性弱、掘进效率受限、施工安全风险高等技术短板，本文在传统敞开式TBM结构基础上，集成创新研发了双组合TBM装备。该装备保留传统敞开式TBM全部功能，新增辅推掘进系统与组合式钢管片支护体系，可实现主推掘进、辅推掘进及组合协同掘进三种模式的动态切换；同时依托多种结构形式的钢管片组合方式构建分级支护体系，可精准适配不同类型、不同破碎程度的不良围岩条件。依托G219西天山深埋长大隧道工程，系统开展了双组合TBM结构设计、分级支护工艺及模式切换施工技术研究，验证了装备的工程适用性。工程应用结果表明：双组合TBM可有效解决不良地质段撑靴支护失效、围岩坍塌掉块、清渣作业量大、施工连续性差等工程难题。相较于常规敞开式TBM，该装备在不良地质段的掘进效率提升5～8倍，断层破碎带工况下单日最大掘进进尺达到30 m，且支护成本可控，兼具安全性、高效性与经济性。研究成果可为复杂地质山岭隧道的TBM装备优化设计、施工工艺升级提供技术参考，同时为深埋长大隧道不良地质段的安全、高效掘进提供新型工程解决方案。

关键词：双组合TBM；组合式钢管片；复杂地质；适应性
中图分类号：TD421　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1671-4172(2026)06-0136-09

Innovation of dual-combined TBM and its adaptability for mountain tunnel construction in complex geology

Zhang Xin, Zhu Jingshan, Jin Dangpeng
(CCCC Tianhe Mechanical Equipment Manufacturing Co., Ltd., Changshu 215557, Jiangsu, China)

Abstract: Conventional open-type TBMs suffer from weak geological adaptability, low tunneling efficiency and prominent construction safety hazards when applied to mountain tunnels with complex unfavorable geological conditions, such as rockbursts, fault fractured zones and large deformation of soft rock. To solve the above technical problems, an innovated dual-combination TBM is developed based on the structural improvement of traditional open-type TBMs. Retaining all original functions of conventional open-type TBMs, the proposed TBM is equipped with an auxiliary thrust system and a combined steel segment support system, enabling flexible dynamic switching among three tunneling modes: main thrust, auxiliary thrust, and combined collaborative thrust. A graded support system established through various structural of composite steel segments can accurately adapt to various unfavorable surrounding rock conditions. Based on the engineering practice of the deep-buried and long G219 West Tianshan Tunnel, the structural design, graded support technology and mode switching construction process of the double-combination TBM are systematically investigated, and its engineering applicability is verified. The field application results indicate that the double-combination TBM can effectively address common engineering challenges in unfavorable geological sections, including gripper support failure, surrounding rock collapse and spalling, excessive slag cleaning workload, and poor construction continuity. Compared with conventional open-type TBMs, the proposed TBM improves the tunneling efficiency by 5 to 8 times in complex unfavorable geology, with

收稿日期：2026-06-29
作者简介：张　新，硕士，正高级工程师，主要从事盾构机、TBM、竖向掘进机等地下工程装备的设计与研发。

a maximum daily tunneling advance of 30 m in fault fractured zones. Moreover, its support cost is well controlled, and the proposed method achieves excellent safety, high efficiency and economic performance. The research conclusions can provide technical references for the optimal design of TBM equipment and the upgrading of construction technologies for mountain tunnels under complex unfavorable geological conditions, and provide an innovative engineering solution for safe and efficient tunneling of deep-buried long tunnels.

Key words: dual-combination TBM; composite steel segment; complex and changeable geology; adaptability

我国山地面积占国土总面积的三分之二，山岭隧道作为交通、水利、能源领域的关键控制性工程，是打通山区交通瓶颈、优化国土空间格局、支撑区域协调发展的重要基础设施。当前，我国山岭隧道建设呈现长距离、大断面、工况复杂、地质多变的显著特性，特长隧道（长度＞10 km）数量持续增长[1-2]。

全断面硬岩隧道掘进机（TBM）凭借机械化程度高、掘进速度快、安全可控性强、围岩扰动小等优势，成为破解深埋长大山岭隧道施工难题的核心装备；其推广应用契合我国“交通强国”、“西部大开发”等国家重大战略部署，是提升地下工程建设水平、实现高端掘进装备国产化的重要支撑。历经多年技术迭代与工程实践，我国TBM已完成从技术引进、消化吸收到自主创新的跨越式发展，国产化TBM已全面覆盖敞开式、双护盾、单护盾、多模式等全系列机型。但在山岭隧道高地应力、岩爆、断层破碎带、富水软弱围岩等不良地质条件下，常规TBM地质适应性差，易发生卡机、塌方等施工风险，严重制约隧道施工效率与安全。

在工程建设中，多条长大山岭隧道工程均出现典型的TBM掘进适配性难题。例如，天山胜利隧道导洞TBM穿越断层破碎带时曾出现刀盘卡滞、护盾变形问题，经刀盘清理、超前注浆加固、超前管棚等处置措施后顺利穿越该断层地段[3]；引汉济渭秦岭隧洞岭北TBM在K51＋597.6里程处穿越剪切破碎带与千枚岩糜棱岩化复合地层时，出现拱顶塌方、刀盘卡滞问题，累计停机6个月[4]；中部引黄工程TBM穿越挤压性软岩大变形地层时，护盾被围压收敛卡死，先后发生两次卡机事故，总历时78天[5]。

围绕TBM地质适应性提升问题，国内外学者已开展了大量理论研究与工程应用攻关。杜立杰[6]系统梳理中国TBM设计与施工发展历程，针对大断层破碎带、软弱大变形及强岩爆等不良地质，提出涵盖装备选型、刀盘优化及卡机防控的成套适配技术体系。Rasouli Maleki等[7]通过FLAC与UDEC数值模拟，研究挤压型破碎带中TBM掘进围岩变形破坏机制，提出护盾减阻与围岩预加固联合的适应性技术。程永亮等[8]从刀盘选型、结构设计、支撑体系及掘进参数多维度出发，建立复杂地质条件下TBM地质适应性设计方法，并成功应用于引汉济渭等重点工程。贾连辉等[9]针对西南山区复杂多变地质，研发集成敞开式与护盾式TBM优势的双结构TBM，对高地应力岩爆、破碎带、蚀变带等复杂地质条件具备强适应性，已在多项重大工程中得到验证，应用成效良好。李智等[10]针对深埋断层破碎带突水风险，通过数值模拟与现场监测揭示TBM掘进突水灾变演化规律，并提出超前注浆加固与动态掘进参数匹配的适应性控制技术。王利明[11]采用三维数值模拟分析TBM穿越大倾角断层时的围岩变形特征及刀盘扭矩变化，明确卡机诱因。

综上，许多学者从装备创新、工艺工法等方面对如何提升TBM地质适应性开展了针对性研究，但应对的不良地质较单一，尚未面向山岭隧道多类型、复合交替不良地质工况形成系统化解决方案，难以适配长大山岭隧道复杂多变的施工条件。为此，本文依托G219西天山隧道工程，聚焦装备创新、不良地质分级应对、施工工艺优化等方面，开展双组合TBM的研制与工程应用研究。研究成果可为复杂不良地质条件下TBM装备设计与施工优化提供参考，对提升TBM地质适应性、保障隧道施工安全、降低劳动强度具有重要的理论与工程实践价值。

1　山岭隧道不良地质条件下敞开式TBM施工风险

敞开式TBM凭借结构简洁、支护方式灵活、施工成本可控等优势，已在山岭隧道工程建设中得到广泛应用。但该机型的推进仅依赖撑靴压紧围岩以提供推力，在高地应力、断层破碎带及软岩大变形等复杂不良地质环境中，易诱发岩爆、卡机、塌方及设备姿态失稳等工程灾害，对隧道施工安全与掘进进度形成显著制约。

1.1　岩爆地层对敞开式TBM施工的影响

岩爆是一种突发式动力破坏现象，发生前一般无明显征兆，且存在延时特性，大多在隧道开挖后数小

时发生，也可延时数日、数月。在TBM施工中，岩爆不仅影响施工进度，而且对施工安全，特别是对施工人员和设备的安全构成严重威胁。敞开式TBM施工过程中的岩爆情况如图1所示。



图1 敞开式TBM施工过程中的岩爆情况

Fig. 1 Rockburst disasters during open-type TBM tunneling

引汉济渭工程秦岭隧洞岭南段采用敞开式TBM施工，最大埋深超过2 000 m，掘进期间强烈岩爆频发，岩爆诱发岩块崩落形成塌坑，塌坑深度达到3 m；崩落岩块多次砸损锚杆钻机，并造成初期支护体系破坏[12-13]。西天山隧道最大埋深2 365 m，岩爆地层占比83%，高地应力导致掌子面岩块频繁崩落，曾发生强烈岩爆冲击，造成掘进中断20 d。

1.2 断层破碎带对敞开式TBM施工的影响

断层破碎带多由构造挤压与岩体风化作用形成，岩体结构松散、围岩自稳能力弱，开挖后基本无自稳时间，易诱发片帮、掉块、坍塌等围岩失稳灾害。敞开式TBM掘进作业依赖两侧撑靴撑紧洞壁围岩获取掘进推力，以保障刀盘稳定切削岩体。而破碎带围岩松散破碎、承载力极低，撑靴施压过程中极易导致围岩挤压破碎、塌落，引起撑靴打滑、支撑失效，无法提供足够掘进推力，造成掘进困难、姿态偏移等问题。同时破碎带地层掉块、坍塌大大增加了清渣工作量，进一步影响掘进效率，使TBM无法快速通过不良地层，容易导致工期延误[14]。TBM经过破碎带地层时的掉渣情况如图2所示。

引江补汉工程TBM8标段在掘进至断层破碎带时，频繁出现掌子面塌落、大块岩渣堵塞刀盘进渣口的问题；而且破碎围岩致使TBM撑靴支撑不牢、频繁打滑，掘进推力不足，多次出现机身偏移故障。受破碎带地质影响，设备卡机、停机清渣、检修频次大幅增加，单次故障停机最长12 d，严重滞后区间施工进度[15]。新疆某引水隧洞在掘进至F6断层破碎带时，敞开式TBM护盾后侧围岩溜塌，撑靴反复失稳打滑，掘进效率大幅降低，单次溜塌造成停机检修7 d[16]。



图2 TBM经过破碎带地层时的掉渣情况

Fig. 2 Rock debris falling during TBM excavation in fault fractured zones

1.3 软岩大变形地层对敞开式TBM施工的影响

软岩具有明显流变性，蠕变与应力松弛效应显著；开挖后岩体强度易衰减，变形随时间持续累积；加之其屈服强度偏低，隧道塑性区易扩展，岩体破坏后变形量随塑性区发展进一步增大，围岩自稳能力持续减弱[17]。软岩大变形地层是敞开式TBM深埋隧洞施工的典型疑难地质，会从根本上干扰敞开式TBM掘进姿态与设备运行稳定性，引发持续卡机故障。同时，敞开式TBM撑靴支撑于软弱围岩表面，极易发生围岩塑性压缩破坏，导致撑靴支撑刚度不足、滑移失效，掘进推力不断衰减，造成设备姿态倾斜、掘进轴线偏移[18]。

滇中引水工程香炉山深埋隧洞敞开式TBM施工段，洞段最大埋深1 465 m，广泛分布炭质板岩、泥质粉砂岩等软弱岩体，高地应力作用下软岩蠕变变形显著，属于典型的软岩大变形地层。施工期间围岩持续收敛挤压，钢拱架支护频繁出现扭曲、滑移、开裂等现象，多次发生围岩抱盾、TBM卡机停滞；单段不良地质最长停机整治时长超过22 d，整体掘进效率较常规硬岩段下降60%以上，严重制约隧洞施工进度[18-19]。甘肃引洮供水二期隧洞软岩大变形段岩体遇水易软化，流变蠕变效应显著；隧洞开挖后边墙持续向内挤压变形，诱发TBM掘进轴线偏移，施工中需定期停机开展姿态校正与支护补强作业，单月掘进进尺较常规隧洞段降幅达到40%以上[20]。

2　双组合TBM设计介绍

2.1　双组合TBM设备

为提升TBM在山岭隧道不良地质条件下的工程适应性，本文以“装备结构优化、分级支护体系构建、现场工程对比验证”为研究思路，在保留敞开式TBM全部功能的基础上，增设辅助推进系统与组合式钢管片支护功能，并将该机型命名为“双组合TBM”。该机型依托差异化推进模式与组合式钢管片的协同配套优势，可高效、经济地应对岩爆、断层破碎带、软岩大变形等典型的不良地质问题。双组合TBM整体结构及各部件结构如图3所示。

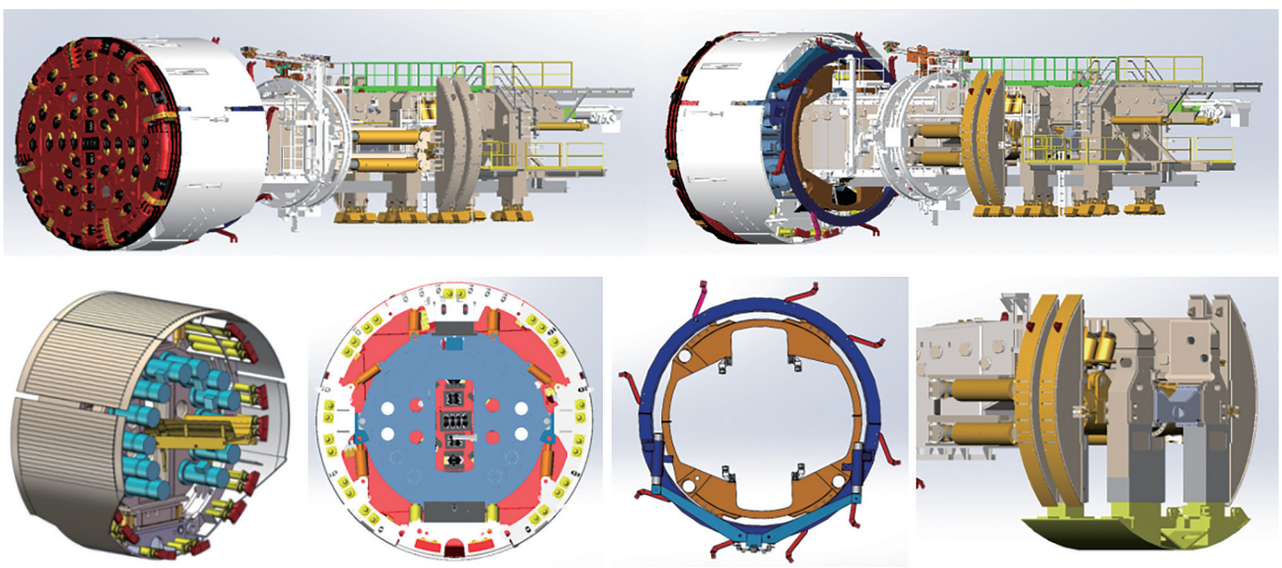


图3　双组合TBM结构示意图

Fig. 3　Structural schematics of the dual-combination TBM

双组合TBM具备多模式掘进体系，分别为主推油缸独立作业的敞开式掘进模式、辅推油缸独立作业的单护盾掘进模式、主推与辅推油缸协同作业的组合式掘进模式，共计三种掘进模式。其中，单护盾掘进模式下，换步支撑装置支承于底部钢管片上，为TBM提供可靠支撑力与抗扭力矩，并借助调向油缸实现TBM姿态的精准调控。

双组合TBM通过增设辅推油缸实现多种掘进模式的灵活切换，可在软岩、破碎带等撑靴无法提供有效推力的不良地质条件下完成推力转换，依托底部辅推油缸顶推钢管片提供稳定推力。在卡机情况下可采用主推与辅推油缸协同作业的组合式掘进模式，提供更大推力，有效降低卡机风险的发生概率。同时，该机型配置组合式钢管片，具备分级支护功能，在有效控制施工成本的前提下，可显著提升不良地质条件下的支护安全性与施工效率。

2.2　组合式钢管片

双组合TBM采用的钢管片为六边形结构，主要包含钢板混凝土结构、钢板型钢结构与钢筋网型钢结构3种形式，如图4所示。各类钢管片的结构特征与适配性能如下：

1）钢板混凝土钢管片以钢板为外部结构，内部布设加劲肋板并充填混凝土。该结构强度高，能有效承受TBM所需推力。

2）钢板型钢简易钢管片的围岩侧采用钢板防护结构，内部依托型钢构件形成受力骨架体系。工程应用中可结合隧道洞径、围岩地质条件及结构受力情况，优选适配的钢板与型钢规格参数，实现结构参数的针对性优化匹配。

3）钢筋网型钢简易钢管片的围岩侧采用钢筋网片防护结构，内部搭配型钢骨架以承担荷载。该结构与钢板型钢简易钢管片相同，可根据围岩条件灵活调整钢筋网与型钢规格。

该六边形钢管片制作简单，可在施工现场钢结构车间加工制作，具有良好的结构组合适配性，可根据工程地质条件与结构受力特点进行多元化组合搭配，同时可针对性优化型钢、钢筋等构件规格，在满足隧道支护结构安全与承载能力要求的前提下，实现工程结构的经济性与合理性。

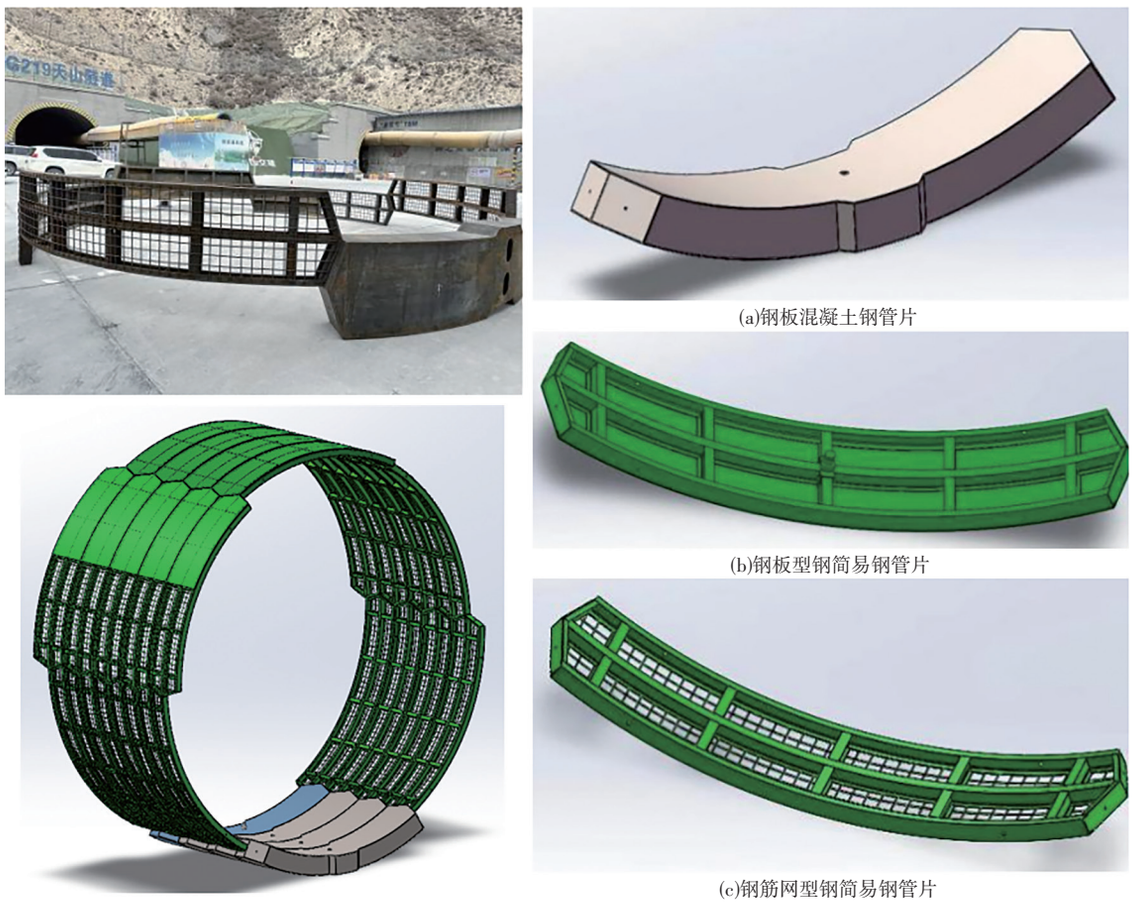


图4 组合式钢管片

Fig. 4 Combined steel segments

3 双组合TBM功能介绍

双组合TBM可根据地质条件对掘进模式与支护方式进行自适应切换。对于地质条件较好的地层段，双组合TBM采用敞开式模式掘进，并采用常规的锚网喷支护。而对于岩爆、断层破碎带及软岩大变形等不良地质条件，可实时切换为单护盾主导的施工模式，通过拼装组合式钢管片快速构建围岩初期支护体系。通过组合方式，可有效解决复杂地层下TBM掘进受限、支护滞后、清渣量大等难题，实现不良地质段的有效推进、高效支护，快速通过不良地质段，双组合TBM的具体功能如下。

3.1 推力转换功能

针对不良地质条件下撑靴难以有效提供掘进推力的难题，可通过配套辅推油缸实现掘进模式的动态切换。掘进过程中，在掌子面发现不良地质且判断撑靴无法有效撑紧洞壁时，拼装底部钢板混凝土钢管片，待撑靴到达不良地质区段时，底部钢管片与后方仰拱块形成完整协同受力体系，从而可通过主机底部辅推油缸顶推底部钢管片构建掘进推力传递载体，提供稳定掘进推力，如图5所示。当设备出现卡机故障时，可切换至主推油缸与底部辅推油缸协同作业的组合推进模式，通过双推进系统联合输出更大掘进推力，有效提升TBM的脱困性能与复杂地质适应性。

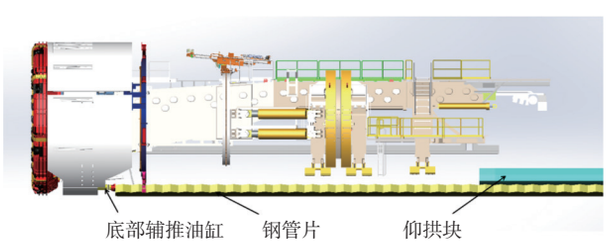


图5 钢管片与仰拱块协同受力体系

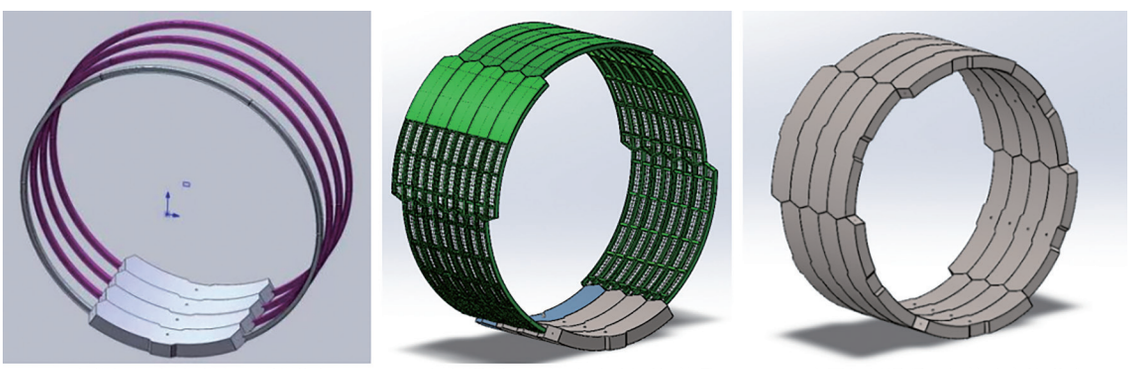
Fig. 5 Coordinated load-bearing system of steel segments and invert blocks

3.2 分级支护功能

双组合TBM具有经济、高效、灵活的支护适配能力，可依据隧道围岩情况差异化配置支护结构。对于地质条件较好的围岩，可采用常规的锚网喷支护工艺；针对高地应力岩爆、软岩大变形、断层破碎带

等不良地质区段，则采用组合式钢管片支护体系。通过对不同的不良地质进行针对性分级支护的适配切换，在提升围岩防护安全性与支护稳定性的同时，有效控制工程支护成本。

在不良地质条件下，常规钢筋排、加密钢拱架等支护形式存在整体强度不足、支护滞后、无法有效阻挡掉渣等缺点。组合式钢管片支护体系可有效提升支护强度与支护效率，同时能够阻隔岩爆诱发的岩块弹射及围岩碎石坠落至隧道作业面，显著减少洞内清渣工作量，改善作业人员安全条件，并大幅提升 TBM 掘进效率。结合围岩完整性、破碎程度及施工条件差异，双组合 TBM 可采用分级支护与掘进推进协同作业模式。组合式钢管片支护结构形式如图 6 所示，具体分级支护适配方案如下：



(a)“底部钢管片+钢拱架”支护形式　(b)“钢板混凝土钢管片+钢板型钢简易钢管片+钢筋网型钢简易钢管片”支护形式　(c)全圆钢板混凝土钢管片支护形式

图 6　组合式钢管片支护形式

Fig. 6　Support forms of combined steel segments

1) 在围岩稳定性较好的软岩地层，当撑靴无法有效提供掘进推力时，可采用“底部钢管片 + 钢拱架”支护形式，由底部辅推油缸提供推力，或采用底部辅推油缸与主推油缸协同组合推进模式，提供更大推力，防止卡机情况发生。

2) 在岩爆地层或围岩完整性较差、局部破碎段可采用“钢板混凝土钢管片 + 钢板型钢简易钢管片 + 钢筋网型钢简易钢管片”多元组合支护体系；支护型钢规格可根据现场围岩应力、破碎程度及支护承载力需求动态优化调整。其中，底部钢板混凝土钢管片作为主要受力构件，为辅推油缸掘进作业提供稳定推力；顶部钢板型钢钢管片可有效阻挡上部破碎围岩掉块及岩爆诱发的岩块弹射；两侧布设钢筋网型钢简易钢管片可约束侧壁松散围岩，降低侧壁岩块脱落风险。该支护模式下，组合式钢管片拼装作业全程在设备护盾内部完成，可有效保障作业人员施工安全，同时大幅降低洞内清渣工作量，显著提升 TBM 穿越不良地质段的施工效率。相较于常规敞开式 TBM，其破碎带掘进效率可提升 5～8 倍。

3) 针对围岩极破碎、强岩爆等高风险地层，可采用全圆钢板混凝土钢管片整体支护形式，构建高强度封闭式围岩支护体系，并依托全部辅推油缸实施掘进作业，从根本上规避撑靴支护失效、围岩失稳坍塌等风险。

3.3　转换方式

双组合 TBM 支护模式的切换具备极强的灵活性与即时性，施工过程中无需复杂前置准备，仅需配备所需的组合式钢管片即可实现支护方式的动态调整。施工时根据掌子面围岩情况，选取合适的组合式钢管片结构形式。在底部钢管片尚未与后方仰拱结构形成整体受力体系前，设备可依托主推油缸继续掘进，待钢管片与仰拱块衔接成型后，可即时切换为辅推油缸掘进模式。当地质条件由劣转优时，设备亦可快速恢复常规敞开式掘进模式。

4　双组合 TBM 在工程中的应用

4.1　工程概况

G219 西天山隧道为昭苏至温宿公路控制性超长深埋隧道工程，由两个单向双车道的主隧道与一个侧导洞组成，隧道最大埋深 2 365 m，洞身 73% 区段埋深超过 1 000 m，为当前世界埋深最大的高速公路隧道。其中，侧导洞采用两台双组合 TBM 施工，开挖直径 8.83 m，施工里程 15.704 km，其中，进口段(ZW-1 标)长 6 826 m，出口段(ZW-2 标)长 8 878 m。围岩以石英片岩、大理岩、流纹斑岩为主，地质断面如图 7 所示。

西天山隧道地质条件复杂，TBM 施工主要面临高地应力引发的强岩爆、活动断裂带围岩破碎失稳、蚀变带软岩大变形、突涌水、极硬岩等问题，如图 8 所示。

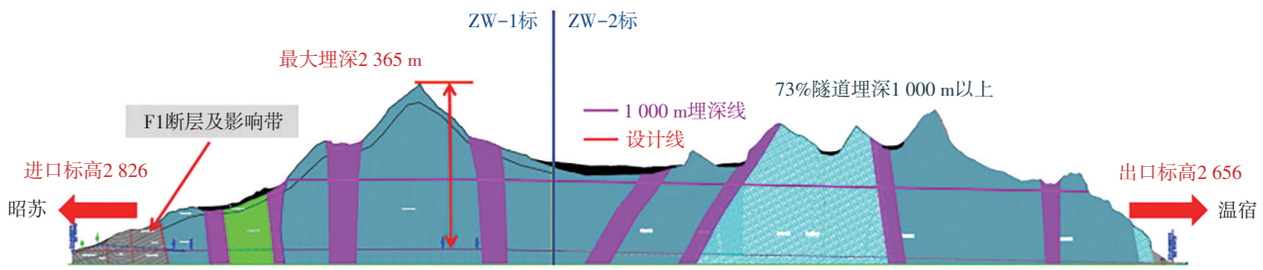


图7 G219西天山隧道断面图

Fig. 7 Geological section of the G219 West Tianshan Tunnel



(a)破碎带 (b)节理发育带 (c)岩爆 (d)蚀变带 (e)极硬岩

图8 G219西天山隧道不良地质情况

Fig. 8 Unfavorable geological conditions of the G219 West Tianshan Tunnel

4.2 双组合TBM施工情况

G219西天山隧道TBM施工段穿越那拉提F1活动断层，断层总长约370 m；该断层与线路近垂直相交，洞身段围岩以石英片岩(R_c=20～80 MPa)和大理岩(R_c=30～100 MPa)为主。

该不良地质段前期采用常规敞开式工法掘进时，需采用钢筋网、加密钢拱架、应急混喷等支护措施，同时洞内清渣工作量大，单日掘进进尺仅为3～5 m，施工进度偏慢；此外，不良地质段掘进迟缓易诱发卡机等次生灾害风险。后续及时调整施工方案，切换为单护盾掘进模式，采用“钢板混凝土钢管片＋钢板型钢简易钢管片＋钢筋网型钢简易钢管片”支护形式，如图9所示。

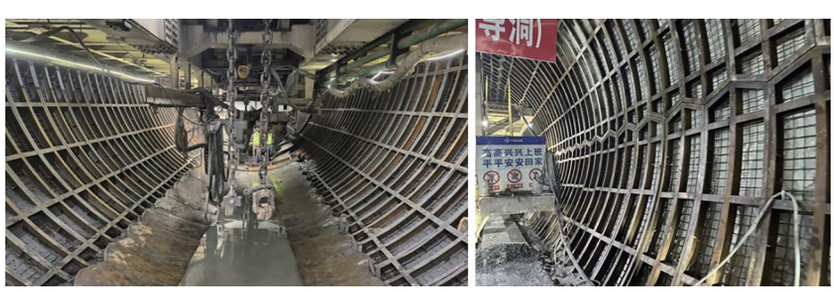


图9 调整施工方案后的现场支护情况

Fig. 9 Site support conditions after construction plan adjustment

项目采用的两台双组合TBM“温宿号”与“昭苏号”分别于2024年7月、8月顺利始发，且依次在2026年3月、6月完成全部掘进施工任务，“温宿号”TBM始发掘进及施工完成情况如图10所示。TBM共计施工长度15.7 km，采用组合式钢管片工法共计施工1 926 m(2 140环)，占总里程的12.3%。不同掘进工况下，该设备掘进性能表现优异：敞开式掘进模式下单月最高进尺为862.4 m，组合式钢管片支护掘进模式下单月最高进尺为609 m；常规钢拱架支护工况、无钢拱架支护工况、组合式钢管片拼装支护工况对应的单日最大进尺分别为50.5、60.6、30 m。上述指标刷新了全球同规格、同类型TBM在相应施工工况下的掘进纪录，验证了双组合TBM优异的掘进性能与广泛的施工适配能力。



图 10　“温宿号”TBM 始发掘进及施工完成情况

Fig. 10　Launching excavation and construction completion conditions of "Wensu" TBM

5　结论

针对常规敞开式 TBM 在长大山岭隧道岩爆、断层破碎带、软岩大变形等复杂地质条件下适应性差、撑靴支撑失效、掘进效率低、安全风险高等问题，本文依托 G219 西天山超深埋隧道工程，开展双组合 TBM 装备研制及应用，验证了该新型装备在不良地质条件下的施工优势，主要结论如下：

1）双组合 TBM 在保留常规敞开式 TBM 功能的基础上，增设辅推掘进系统与组合式钢管片支护体系，可实现主推、辅推及组合协同三种掘进模式的动态切换，突破了常规 TBM 仅依靠撑靴提供掘进推力的技术局限。通过多类型钢管片组合匹配不同围岩条件，构建分级支护体系，有效解决了不良地质段 TBM 支撑失稳、掘进受阻的难题，显著提升了设备的地质适应性。

2）六边形组合式钢管片可在护盾内完成拼装，实现围岩封闭式支护，可有效抵御岩爆弹射、围岩掉块等风险，大幅提升不良地质段的施工安全性。该支护方式简化了施工工序，减少了洞内清渣工作量，保障了掘进连续性。工程应用表明，相较于常规敞开式 TBM 支护工艺，该装备可使不良地质段掘进效率提升 5～8 倍，断层破碎带工况下单日最大进尺达到 30 m，可满足复杂地质条件下的快速掘进要求。

3）组合式钢管片可依据应力条件及围岩破碎程度灵活调整结构组合形式与型钢规格，实现支护强度按需适配，克服传统单一支护模式下支护不足或支护冗余的缺陷。在典型不良地质区段，该支护体系的综合支护成本与传统钢拱架联合支护基本相当，在保障施工安全与掘进效率的同时，具备优良的工程经济性。

本文提出的“多模式掘进＋分级支护”技术，有效弥补了常规 TBM 地质适应性差的短板，形成了一套适配长大山岭隧道复杂地层的安全高效掘进工艺体系。该技术在西天山隧道的成功应用，可为国内外同类工程提供参考，对提升复杂地质条件下 TBM 装备创新能力与隧道施工技术水平具有积极意义。

参　考　文　献

[1] 钱七虎，李朝甫，傅德明. 隧道掘进机在中国地下工程中应用现状及前景展望[J]. 地下空间，2002(1)：1-11，93.
Qian Qihu，Li Chaofu，Fu Deming. The present and prospect of application of tunneler in China′s underground engineering[J]. Underground Space，2002(1)：1-11，93.

[2] 孙振川，杨延栋，李凤远，等. 基于隧道工程实例的 TBM 破岩特征参数研究[J]. 隧道建设(中英文)，2020，40(增刊 1)：25-30.
Sun Zhenchuan，Yang Yandong，Li Fengyuan，et al. Research on TBM rock breaking characteristic parameters based on tunnel projects[J]. Tunnel Construction，2020，40(S1)：25-30.

[3] 唐维，贾文达. 敞开式 TBM 在破碎硬岩地层的卡机处理与脱困技术研究[J]. 工程建设，2025，57(4)：44-49，62.
Tang Wei，Jia Wenda. Research on jamming treatment and relief technology of open TBM in crushed hard rock formation[J]. Engineering Construction，2025，57(4)：44-49，62.

[4] 赵力，王博，魏军政. 引汉济渭秦岭隧洞 TBM 卡机脱困分析[J]. 水利建设与管理，2022，42(12)：1-6.
Zhao Li，Wang Bo，Wei Junzheng. Analysis on TBM jamming release of the Qingling tunnel for Hanjiang-to-Weihe river valley water diversion project[J]. Water Conservancy Construction and Management，2022，42(12)：1-6.

[5] 温森，杨圣奇，董正方，等. 深埋隧道 TBM 卡机机理及控制措施研究[J]. 岩土工程学报，2015，37(7)：1271-1277.
Wen Sen，Yang Shengqi，Dong Zhengfang，et al. TBM jamming mechanism and control measures in deep buried tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2015，37(7)：1271-1277.

[6] 杜立杰. 中国 TBM 施工技术进展、挑战及对策[J]. 隧道建设，2017(9)：1063-1075.
Du Lijie. Progresses，challenges and countermeasures for TBM construction technology in China[J]. Tunnel Construction，2017(9)：1063-1075.

[7] Rasouli Maleki M，Narimani Dehnavi R. Influence of

discontinuities on the squeezing intensity in high in situ stresses: a tunnelling case study, actual evidences and TBM release techniques[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(9): 2911-2933.

[8] 程永亮, 钟掘, 暨智勇, 等. TBM刀盘地质适应性设计方法及其应用[J]. 机械工程学报, 2018, 54(1): 1-9.
Cheng Yongliang, Zhong Jue, Ji Zhiyong, et al. Geological adaptive design method and application of TBM cutterhead[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(1): 1-9.

[9] 贾连辉, 鲁义强, 贺飞, 等. 适应复杂多变地质隧道双结构TBM研制与应用[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(2): 14-25.
Jia Lianhui, Lu Yiqiang, He Fei, et al. Development and application of dual-structure TBM for complex and changeable geological tunnels[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(2): 14-25.

[10] 李智, 董书宁, 石志远, 等. TBM穿越深埋断层破碎带突水灾变规律[J]. 煤田地质与勘探, 2026, 54(2): 161-171.
Li Zhi, Dong Shuning, Shi Zhiyuan, et al. Mechanisms behind water inrush disasters induced by TBM tunneling passing through deeply buried fault fracture zones[J]. Coal Geology & Exploration, 2026, 54(2): 161-171.

[11] 王利明. 大倾角断层不良地质下TBM隧道稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2024, 49(增刊1): 121-128.
Wang Liming. Stability analysis of TBM tunnel under unfavorable geological conditions of large dip faults[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S1): 121-128.

[12] 薛景沛. 敞开式TBM安全快速通过隧洞强岩爆地层施工技术: 以引汉济渭工程秦岭隧洞岭南TBM施工段为例[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(6): 989-997.
Xue Jingpei. Construction technology of open TBM safely and rapidly pass through strong rockburst formation of Lingnan section on Qinling tunnel of Hanjiang river-Weihe river water conveyance project[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(6): 989-997.

[13] 鲁义强, 贺飞, 王明耀, 等. 深埋隧道敞开式TBM岩爆地层防控方法与护盾抗冲击研究[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(1): 204-216.
Lu Yiqiang, He Fei, Wang Mingyao, et al. Prevention and control method of rock burst strata and shock resistance of shield with TBM in deep buried high stress tunnels[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(1): 204-216.

[14] 中国中铁股份有限公司. "粤海环北3号"TBM成功穿越云开大山隧洞F311断层破碎带[EB/OL]. (2026-04-22)[2026-06-25]. https://www.crecg.com/web/xwzx61/zfgsdt39/202604221458339135 0/index.html.
China Railway Group Limited. "Yuehai Huanbei No. 3" TBM successfully crossed the F311 Fault fracture zone of the Yunkai Dashan tunnel [EB/OL]. (2026-04-22)[2026-06-25]. https://www.crecg.com/web/xwzx61/zfgsdt39/2026042214583391350/index.html.

[15] 中国南水北调集团江汉水网建设开发有限公司. 聚力破困阻 攻坚越断层--南水北调引江补汉工程TBM"江汉开拓号"穿越黄化断层纪实[EB/OL]. (2026-06-01)[2026-06-25]. https://www.nsbdjhsw.com.cn/show-6674.html.
China South-to-North Water Diversion Group Jianghan Water Network Construction and Development Co., Ltd. Breaking through obstacles, forging across the fault: an account of the TBM "Jianghan Kaituohao" crossing the Huanghua fault on the South-to-North Water diversion project's Yangtze-to-Han River Water diversion scheme [EB/OL]. (2026-06-01)[2026-06-25]. https://www.nsbdjhsw.com.cn/show-6674.html.

[16] 徐虎城. 断层破碎带敞开式TBM卡机处理与脱困技术探析[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(增刊1): 156-160.
Xu Hucheng. Analysis of jam treatment and releasing technologies for open TBM in fault fracture zone[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(S1): 156-160.

[17] 卿朝晖, 邹凤维. 软岩大变形隧道TBM施工关键技术[J]. 价值工程, 2026, 45(13): 114-116.
Qing Chaohui, Zou Fengwei. Key technologies for TBM construction in large deformation soft rock tunnels[J]. Value Engineering, 2026, 45(13): 114-116.

[18] 王斌, 杨延栋, 周建军, 等. 高地应力软岩地层敞开式TBM法隧洞围岩变形控制技术:以香炉山隧洞为例[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(2): 341-348.
Wang Bin, Yang Yandong, Zhou Jianjun, et al. Surrounding rock deformation control technology for tunnels constructed using open tunnel boring machines in soft rock strata with high geostress: a case study of Xianglushan tunnel[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(2): 341-348.

[19] 刘登学, 孔勇斌, 寇甲兵, 等. 敞开式TBM开挖隧洞围岩变形安全评价方法及应用[J]. 人民长江, 2024, 55(6): 182-187.
Liu Dengxue, Kong Yongbin, Kou Jiabing, et al. Research on safety evaluation method for surrounding rock deformation of open TBM excavation tunnel and application[J]. Yangtze River, 2024, 55(6): 182-187.

[20] 刘小伟, 谌文武, 刘高, 等. 引洮工程红层软岩隧洞TBM施工预留变形量分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(6): 1207-1214.
Liu Xiaowei, Chen Wenwu, Liu Gao, et al. Analysis of reserved deformation during the construction of rock-bed soft rock tunnel by TBM in Yintao Project[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(6): 1207-1214.