

# 引江补汉工程超大直径TBM集群设备选型及配置关键技术

宋志忠<sup>1,2</sup>,李衡<sup>1,2</sup>,邵小康<sup>1,2</sup>,牛运华<sup>1,2</sup>,朱学贤<sup>1,2</sup>,李雅诗<sup>1,2</sup>

(1.长江勘测规划设计研究有限责任公司,430010,武汉;2.水资源工程与调度全国重点实验室,430010,武汉)

**摘要:**引江补汉工程是我国骨干水网建设的重要组成部分,拥有我国在建单洞最长、洞径最大、综合技术难度最高的有压输水隧洞,工程建设中首次应用超大直径TBM集群施工,突破了我国水工隧洞TBM选型与配置的技术局限。在引江补汉工程输水隧洞TBM集群选型研究中,应用了基于不利地质条件阈值和深部复合地层TBM适应性模糊数学综合评价等量化选型技术,通过地质与结构适应性、安全性、经济性、工期保障率等多要素综合评价,提出了4台敞开式、3台单护盾式、2台双护盾式和1台双模式共10台TBM集群选型方案,同时配置了敞开式TBM钢管片安装系统、法向预应力锚固钻机、双护盾式TBM锚网喷支护系统、超前地质预报系统、多功能超前钻机系统和TBM集群智能管控平台装备等创新性技术系统,探索形成我国复杂地层深埋长大隧洞工程超大直径TBM集群选型与针对性配置新模式。

**关键词:**引江补汉工程;深埋长大隧洞;水工隧洞;超大直径TBM;TBM集群;TBM选型与配置;适应性评价

**Key technologies for type-selection and configuration of super-large-diameter TBM clusters in the Water Diversion Project from the Yangtze River to the Hanjiang River//SONG Zhizhong, LI Heng, SHAO Xiaokang, NIU Yunhua, ZHU Xuexian, LI Yashi**

**Abstract:** The Water Diversion Project from the Yangtze River to the Hanjiang River is an important component of China's national water network construction. It includes the country's longest single tunnel with the largest diameter and the highest overall technical difficulty among pressurized water-conveyance tunnels under construction. For the first time, a cluster of super-large-diameter tunnel boring machines (TBMs) has been applied in the project, breaking through the technical limitations of TBM type-selection and configuration for hydraulic tunnels in China. In the TBM cluster type-selection study of the project's water-conveyance tunnel, quantitative selection methods were applied, including threshold analysis of adverse geological conditions and fuzzy comprehensive evaluation of TBM adaptability to deep composite strata. Based on a comprehensive evaluation of geological and structural adaptability, safety, economy and schedule reliability, a cluster scheme comprising 4 open-type, 3 single-shield, 2 double-shield and 1 dual-mode TBMs was proposed. Meanwhile, several innovative technical systems were configured, including the open-type TBM steel segment erection system, the normal prestressed anchoring drill rig, the double-shield TBM anchor-mesh-shotcrete support system, the advanced geological prediction system, the multifunctional forward-probing drill system, and the intelligent TBM cluster management and control platform. This approach establishes a new model for the type-

收稿日期:2025-09-22 修回日期:2025-10-23

作者简介:宋志忠,副总工程师,正高级工程师,主要研究方向为长距离引调水和高坝通航工程勘察设计。

基金项目:中国博士后科学基金(2025M773260)。

selection and targeted configuration of super-large-diameter TBM clusters in deep-buried, long-distance tunnels under complex geological conditions.

**Keywords:** Water Diversion Project from the Yangtze River to the Hanjiang River; deep-buried long-distance tunnel; hydraulic tunnel; super-large-diameter TBM; TBM cluster; TBM type-selection and configuration; adaptability evaluation

中图分类号: TV554 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2025)21-0065-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2025.21.010

## 一、引言

输水工程是长距离引调水工程的关键控制性项目,建设工期长,投资占比高,并且面临复杂的施工风险。目前,TBM(全断面岩石掘进机)因其比传统钻爆法更加高效、安全、环境友好,被广泛应用于深埋长大隧洞掘进。如何根据工程特点选择适宜的TBM类型和配置设计是深埋复杂地层隧洞工程中的关键技术难题,对工程投资和建设周期甚至隧洞能否顺利贯通都有重要影响。

近年来,国内外学者围绕TBM选型理论、复杂地质条件下设备适应性等开展了大量研究,形成了丰富的理论成果与工程实践经验。自从敞开式TBM技术在西康铁路秦岭隧道和大伙房水库输水工程等项目成功示范应用,我国的TBM技术、经验得到了不断积累。早期开展的重大水工隧洞工程TBM选型几乎均采用敞开式TBM,并结合工程和施工组织特点开展配置探索和优化。例如,魏永庆、杜士斌分析了大伙房水库输水工程地质条件,选取敞开式TBM施工并首次配置了连续皮带机出渣系统、19英寸滚刀等以适应超长距离掘进。在大伙房水库输水工程TBM选型与施工经验辅助下,齐文彪和刘阳分析了吉林省中部城市引松供水工程主要地质情况,同样选取了敞开式TBM进行施工;吴世勇等分析了锦屏二级水电站敞开式TBM针对主要不良地质做出的针对性配置,如刀盘扩挖功能;张荣山和范贵隆分析了旁多水利枢纽工程TBM选型时考虑的地质条件、支护方式、施工成本、工期等因素,选取了敞开式TBM,并对后配套设备参数进行优化设计;党建涛等依托引汉济渭工程秦岭输水隧洞敞开式TBM进行刀盘刀具配置试验,为硬岩地层TBM刀具选型提供了经验。上述工程均选用敞开式TBM施工,一方面选型时采用了工程类比法,敞开式TBM凭借丰富的工程经验更容易得到

青睐;另一方面,受限于当时对地层适应性认识以及TBM配置技术水平,敞开式TBM可更加灵活地与钻爆法结合,以处理不良地质时更为方便。

在TBM与地质适应性选型研究方面,成果也较为丰富。司富安等针对水工隧洞TBM施工特点提出了围岩综合分类方法,为复杂地质条件下TBM选型提供依据;詹金武等提出了复杂地质条件TBM选型适应性评价方法,综合考虑了隧洞设计、主要地质条件、不良地质和环境因素对TBM选型的影响;冯欢欢等总结了国内典型TBM隧洞(道)工程面临的不良地质问题,提出了TBM针对性设计与改造技术;倪锦初等结合香炉山隧洞主要不良地质条件,从地质条件、工期、造价、施工环境等角度进行综合比选;洪开荣从色季拉山隧道地质适应性、风险可控性、工期、经济等方面进行TBM选型和针对性设计;袁蔚等分别从地质条件、不良地质处理、工期、安全、环保及投资等多角度对罗田水库-铁岗水库输水隧洞TBM进行选型;邓铭江和谭忠盛提出了复杂地质条件下敞开式TBM适应性量化评价方法。这些研究为单台TBM选型提供了较充足的理论与实践支撑,但多聚焦于大中型直径设备( $\leq 10\text{ m}$ )或单一机型,尚未形成针对12 m级超大直径TBM集群的系统选型理论和成功经验。

TBM选型的核心是实现地层与结构相适应、工期与经济相协调、安全与效率有保障。尽管国内外学者与工程师采用工程案例类比、定性和定量评价等方法,不断完善TBM选型理论框架,但结合引江补汉工程“超大直径、超长隧洞集群施工,复杂地质风险叠加”特点和难点,现有研究仍不足。本文综述超大直径TBM集群设备选型及配置方面的研究进展,围绕“集群选型、设备配置”两大核心问题展开系统研究,可填补超大直径TBM集群选型与配置领域的空白,促进我国深埋长大隧洞TBM技术向“集群化、超大直径化、智能化”发展。

## 二、引江补汉工程概况

引江补汉工程从长江三峡水库引水入汉江,输水隧洞长约194.3 km,过水平均洞径10.2 m,TBM开挖直径达12.2 m。综合输水隧洞沿线施工支洞布置条件、环境敏感区分布、地质条件等因素,计划采用10台TBM进行施工,TBM施工长度约124 km,占线路总长约64%。

### 1. 地质概况

引江补汉工程隧洞线路长且隧洞埋深大,穿越地带地质条件复杂,地层岩性复杂多样,可溶岩和软质岩分布较多,具有地质构造背景复杂、岩溶水文地质条件复杂、总体地应力水平高等地质特点。沿线实测水平主应力达35.2 MPa,最大水压超过5 MPa,最大岩石强度达354 MPa,穿越软质岩总长度达48.5 km,占比约25%,可能发生中等及以上软岩大变形的洞段长约26 km,工程面临的主要地质问题有突涌水(泥)、软岩大变形、硬岩岩爆、高外水压力、超硬岩等。

### 2. 主要技术难题与挑战

#### (1) 超大直径TBM集群选型

引江补汉工程输水隧洞建设面临着复杂地质条件,输水隧洞TBM开挖直径12.2 m,属超大直径。如何根据工程条件进行合理的TBM选型一直是隧洞工程实施中的关键难题。由于行业和工程类型不同,隧洞结构、功能和设计理念等方面存在差异,TBM选型尚未形成成熟体系,仅有一些原则性指导规定。现有TBM选型仍多采用工程类比法或定性对比评估法,定量分析法较为欠缺,针对复杂不良地质条件的实用性定量分析法研究和应用尤为不足。

#### (2) 超大直径TBM掘进

从目前施工经验来看,在同等地质条件下,直径4~8 m的TBM因其内部空间足够、人员操作方便,能充分发挥施工和设备效能,掘进效率较高。而超大直径TBM,支护工程量大,支护时间长,清渣工作量也大,掘进效率较低。大直径TBM施工时对围岩扰动大,开挖后隧洞跨度大,如采用敞开式TBM施工,初期支护工程量大且支护时间长,在围岩破碎洞段的自稳能力差。

#### (3) 超大直径TBM制造

相对于小直径TBM,超大直径TBM制造存在以下难点:①整机结构强度和刚度要求高。刀盘正常掘进时整机受力大,整体设计难度大。②部件分块设计,组装工作量大。出于运输需要,盾体等尺寸较大部件需根据运输尺寸限制进行分块设计,分块数量多导致

装配工作量大,同时对于加工精度要求也高。③整机尺寸较大,且各部件组装后重量较重,起吊较困难,运输转场难度加大。④设备制造周期长。

## 三、水工隧洞TBM应用现状分析

目前水利水电工程隧洞建设中采用的TBM机型主要有敞开式、单护盾式、双护盾式、双(多)模式等类型。分析TBM在我国隧洞(道)工程中的应用现状,给引江补汉工程TBM选型提供更多参考,本文统计分析了各行业领域(特别是水工隧洞)截至2022年的重大工程中TBM应用情况。结果显示,在水利、市政、公路、铁路以及煤炭开采等行业领域,TBM均应用广泛。依据相关文献资料进行统计分析,TBM在水利水电工程隧洞建设中应用早、占比最高(约50%),具有建设规模大、单洞长度长等特点。

### 1.TBM选型与直径分析

#### (1) TBM选型分析

我国TBM应用类型以敞开式为主,约占50%,其次是双护盾式TBM,占比约40%。单护盾式TBM应用较少。

#### (2) TBM直径分析

我国TBM隧洞开挖直径以3~10 m为主,其中6 m直径系列数量最多,主要集中于城市轨道交通隧道,7 m和8 m直径隧洞大部分为水利水电工程隧洞,大直径(8~12 m)和超大直径(12~16 m)TBM占比较少。TBM隧洞开挖直径超过8 m的工程大多属于水利水电和铁路行业,少数存在于公路行业。

对国内外部分开挖直径超过10 m的TBM工程案例进行统计分析,采用敞开式TBM施工的占比约为41.2%,高于单护盾式TBM和双护盾式TBM。其中,公路及铁路隧道多选择单护盾式或敞开式TBM,而水利水电工程隧洞多选择敞开式TBM,其次为双护盾式TBM,使用单护盾式TBM的情况较少。相较而言,国内尚无超大直径单护盾式TBM隧洞的施工案例。目前,国内水利水电行业最大直径TBM隧洞为锦屏二级水电站引水隧洞,直径为12.4 m,选用的TBM类型为敞开式。综合分析国内外隧洞TBM直径与选型情况,若采用工程类比法,大直径水工隧洞应优先选择敞开式TBM或双护盾式TBM施工。

### 2. 水工隧洞TBM应用情况分析

对国内50余项水利水电工程TBM类型进行统计,约有60%的水工隧洞选用敞开式TBM施工,其次是双

护盾式TBM, 单护盾式TBM的应用案例较少。其中, 隧洞开挖直径超过8 m的水利水电工程, 隧洞TBM类型均为敞开式TBM(见表1)。

#### 四、超大直径TBM适应性综合量化选型技术

##### 1.TBM适应性综合量化选型技术

###### (1) TBM施工适宜性初步分级及评价

根据《引调水线路工程地质勘察规范》(SL/T 629—2014)中的隧洞TBM施工适宜性判定标准, TBM施工适宜性分为适宜(A)、基本适宜(B)、适宜性差(C)三个级别, 考虑的主要因素为围岩类别和TBM掘进效率指标, 其中TBM掘进效率指标包含岩体完整性、岩石饱和单轴抗压强度以及围岩强度应力比。

###### (2) 特殊地质洞段适应性评价

《全断面岩石掘进机法水工隧洞工程技术规范》(SL/T 839—2025)对超硬岩(A)、岩爆(B)、围岩大变形(C)、构造破碎带(D)、突涌水(泥)(E)等不利地质条件给出了相应划分标准。

在TBM对主要地质条件适宜性评价基础上, 考虑超硬岩地层、高地应力岩爆地层、断层破碎带、大变形围岩、突涌水(泥)等五类不利地质条件对TBM选型的影响, 通过地质条件划分可得到区段内各类不利地质条件的等级与占比。

###### (3) 不利地质条件对TBM选型影响定量评价方法

TBM施工顺利与否常由占比超5%的最不利地质洞段决定, 超硬岩(A<sub>4</sub>)、岩爆(B<sub>4</sub>)、围岩大变形(C<sub>4</sub>)、构造破碎带(D<sub>4</sub>)等最高等级的不利地质中, A<sub>4</sub>对机型影响较小, 阈值提至15%, 其余仍为5%。按占比将适宜性分为好(90分)、中(60分)、差(30分): A<sub>4</sub>占比小于10%时适宜性等级为差, 10%~15%为中, 超过15%为好,B<sub>4</sub>、C<sub>4</sub>、D<sub>4</sub>则以0~3%、3%~5%、>5%对应好、中、差。TBM对4类不利地质条件适应性评分按表2权重加权求和得总分。

根据评分结果确定设备选型, 若总分大于70分宜采用敞开式TBM; 总分在60~70分时, 既适用于敞开式TBM, 又适用于护盾式TBM; 总分小于60分, 则适用于护盾式TBM。选用护盾式TBM时, 若隧洞的围岩大变形C<sub>4</sub>等级洞段长度占比在3%以下, 宜采用双护盾式TBM, 否则宜采用单护盾式TBM。

###### (4) 深部复合地层TBM选型适应性模糊数学综合评价法

①评价方法。基于资料调研与施工经验, 从

TBM设计、施工、隧洞地质、不良地质、施工组织五方面, 筛选高区分度、代表性评价指标, 构建含目标层、准则层、指标层的TBM选型评价体系。采用模糊综合评价法, 结合工程经验与专家建议确定模糊隶属函数, 实现指标公度性; 依适应性关联原则, 用数理统计等划分指标层次与重要性; 用层次分析法确定单层次及总层次指标权重。提取隧洞地质勘查等资料参数, 结合隶属函数结果与权重, 确定三种类型TBM适应度并进行决策。多数工程可在设计阶段用参数代表值(如加权平均值)进行适应度评价, 而对于引江补汉工程等复杂长隧洞, 地质差异大时可分段评价, 即将隧洞分段, 分别计算适应度, 再依据段长加权平均得综合适应度。

②评价标准。为了量化评判复杂地质条件下TBM的选型适应性, 需要给出适应性评价的标准。为此, 将TBM选型适应性评价标准分为5个等级, 其中第Ⅱ级又细分为两个亚级, 不同评价等级与适应度的关系及适应性评价见表3。

###### (5) TBM选型经济性分析

从经济性角度, TBM选型需综合围岩条件、衬砌工程量、设备成本及工期等核心因素统筹考量。当隧洞围岩条件较好, 仅需初期支护或小规模二次衬砌即可保障稳定时, 敞开式TBM通常为优选方案, 因其市

表1 国内重大水利水电工程隧洞8 m以上直径TBM应用情况

| 隧洞名称         | 工程地点    | 设备类型 | 设备数量 | 直径(m) |
|--------------|---------|------|------|-------|
| 锦屏二级水电站引水隧洞  | 四川西昌    | 敞开式  | 2    | 12.43 |
| 天生桥水电站引水隧洞   | 贵州兴义    | 敞开式  | 1    | 10.77 |
| 滇中引水工程香炉山隧洞  | 云南丽江/大理 | 敞开式  | 2    | 9.8   |
| 辽西北供水工程输水隧洞  | 辽宁抚顺    | 敞开式  | 4    | 8.53  |
| 引汉济渭工程秦岭输水隧洞 | 陕西安康    | 敞开式  | 2    | 8.05  |
| 大伙房输水工程引水隧洞  | 辽宁抚顺    | 敞开式  | 3    | 8.03  |

表2 不良地质围岩分类评分权重

| 不利地质类型                 | 权重   |
|------------------------|------|
| 超硬岩(A <sub>4</sub> )   | 0.1  |
| 岩爆(B <sub>4</sub> )    | 0.35 |
| 断层破碎带(C <sub>4</sub> ) | 0.2  |
| 大变形围岩(D <sub>4</sub> ) | 0.35 |

场采购价格低于护盾式TBM，能直接降低设备投入成本，且因施工特性无需管片衬砌，可大幅度减少材料采购、运输及安装等一系列衬砌相关费用。

若隧洞围岩条件较差，选型决策则更复杂。采用敞开式TBM时，为确保施工安全与隧洞稳定，初期支护工程量会大幅增加，材料、人工等成本显著上升；而护盾式TBM虽设备成本较高，但其自带的护盾可抵御不良地质风险，管片衬砌也能快速形成稳定结构，此时需细致测算两种机型的设备购置成本、施工效率、支护成本等，通过对比确定更经济的方案。

对于适用多种TBM且必须二次衬砌的隧洞，经济性比较需以满足工期要求为前提。即不仅要对比不同TBM的采购、租赁及维护成本，还需精确核算各机型对应的衬砌工程量、施工工艺及工期长短，通过建立详细成本模型，最终选出兼顾工程质量、进度与经济效益的TBM类型。

#### (6) 案例分析

采用深部复合地层TBM选型适应性模糊数学综合评价法和模型，对引江补汉隧洞工程TBM8施工洞段主洞的TBM适应性进行计算分析，以确定该洞段最优的TBM选型。

TBM8洞段主洞全长11 125 m，分为L1~L9共9个分段，将各分段的评价指标输入TBM选型适应性评价模型中，计算不同类型TBM选型适应度。如表4所示，敞开式、单护盾式和双护盾式TBM的综合适应度分别为0.885、0.885和0.788，均具有较高适应性。进

表3 复杂地质条件下TBM选型适应性评价分级标准

| 等级  |      | 适应度       | 适应性评价  |
|-----|------|-----------|--------|
| I   |      | ≥ 0.9     | 完全适应   |
| II  | II a | 0.8 ~ 0.9 | 适应(高度) |
|     | II b | 0.7 ~ 0.8 | 适应(中度) |
| III |      | 0.6 ~ 0.7 | 适应(低度) |
| IV  |      | 0.4 ~ 0.6 | 弱适应    |
| V   |      | < 0.4     | 不适应    |

表4 引江补汉工程TBM8施工洞段TBM选型适应度计算评价

| TBM类型 | 隧洞分段适应度 |       |       |       |       |       |       |       |       | 综合适应度 |
|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | L1      | L2    | L3    | L4    | L5    | L6    | L7    | L8    | L9    |       |
| 敞开式   | 1       | 0.507 | 0.991 | 0.700 | 0.780 | 0.680 | 0.948 | 0.678 | 0.779 | 0.885 |
| 单护盾式  | 0.700   | 0.806 | 0.700 | 0.894 | 1     | 0.881 | 0.828 | 0.882 | 1     | 0.885 |
| 双护盾式  | 0.786   | 0.626 | 0.786 | 0.781 | 0.954 | 0.767 | 0.828 | 0.768 | 0.954 | 0.788 |

一步从施工安全、工期保障率等方面综合考虑：TBM8施工段地质条件复杂，采用敞开式TBM初期支护工程量较大，施工效率较低，安全性差，而采用护盾式TBM开挖后，直接拼装管片，可确保施工安全，减少施工程序，加快施工进度；采用单护盾式TBM相对双护盾式TBM卡机风险小。据此，TBM8洞段主洞选择单护盾式TBM。

#### 2. 引江补汉工程超大直径TBM集群选型

引江补汉工程TBM选型从TBM对主要地质条件的适应性、对特殊地质洞段的适应性，以及不良地质条件的阈值分析、深部复合地层TBM适应性评价、隧洞结构适应性分析、经济性分析、工期分析等方面进行研究，最后进行TBM适应性综合比选，选定能适应主要地质条件和不良地质条件，并且经济合理、技术可行、工期满足要求的TBM型式。各TBM施工段TBM选型如表5所示。

#### 五、超大直径TBM针对性配置

随着我国隧洞工程走向地层深部，越来越复杂、严苛的施工条件对TBM的设计、选型与智能化配置提出更高要求。新技术的不断研发和应用，使得TBM主机型式区别的影响逐渐小于配置的影响。例如，引江补汉工程中敞开式TBM上配备了钢管片支护系统，单护盾式TBM具备同步拼推功能，双护盾式TBM配备锚网喷支护系统，主机型式与功能性配置界限的关联性正在减弱。引江补汉工程在TBM“主机配置、辅助支护、超前探测、智能管控”等方面的针对性配置，探索形成一系列创新成果。

##### 1.TBM主机特色配置

以单护盾式TBM推拼同步系统为例：推拼同步就是在单护盾式TBM向前掘进的时段内完成前一环管片拼装，实现单护盾式TBM连续掘进，从而避免掘进与拼装的交替循环，以提高功效、降低成本。推拼同步技术一改传统单护盾式TBM推进—停止—拼装的施工工序，基于推力矢量控制技术把管片拼装融于

掘进作业中,在保证单护盾式TBM掘进姿态稳定的情况下,将掘进与拼装从“串联”走向“并联”,相比于常规的推进系统,推拼同步系统可提高效率达26%(见图1)。

## 2.TBM辅助支护特色配置

### (1)敞开式TBM钢管片安装系统

引江补汉工程敞开式TBM上配备了钢管片安装系统(见图2)。对于敞开式TBM,在其护盾内部设计一组多支护推进系统,推力由拼装的钢管片提供,使其具备单护盾掘进模式。掘进时,在护盾内部拼装钢管片,通过钢管片提供推进反力。每组辅助推进油缸区域增加导向座,连接护盾与变速箱,用于传递推进反力。鞍架下部增加可伸缩式支腿和小撑靴,可实现上下左右调向和纠滚。

### (2)法向预应力锚固钻机

敞开式TBM一般在L1区或L2区(即TBM后方的初期支护工作区)配备两台主梁式锚杆钻机,作业范围可达到拱部270°。然而,传统的TBM主梁式锚杆钻

机存在两个主要不足:①锚杆钻机无法垂直洞壁打设钻杆,导致锚杆无法垂直洞壁施作,极大地削弱了锚杆的锚固效果;②锚杆钻机无法自动地拾取、续接、拆卸钻杆,增加了现场施工人员的劳动强度和施工风险,降低了施工作业效率。

为了克服传统TBM主梁式锚杆钻机存在的诸多不足,本工程研发了法向预应力锚固钻机(见图3)。相比于传统TBM锚杆钻机,法向预应力锚固钻机增加了锚固钻机的运动自由度,可实现锚固钻机全周向垂直洞壁打设钻杆,提升锚杆的锚固效果。

### (3)双护盾式TBM锚网喷支护系统

引江补汉工程双护盾式TBM隧洞段存在岩爆、断层破碎带及稳定围岩等多类型地质工况,不同工况隧洞存在不同支护需求。双护盾式TBM在常规预制混凝土管片拼装设备的基础上,增加配置锚网喷支护设备,具体包括锚杆钻机、钢筋网安装器、混凝土喷射系统等。施工过程中可根据地质情况合理选择支护措施,以应对各类复杂地质条件稳定高效掘进,同时降低施

表5 引江补汉工程各TBM施工段TBM选型

| TBM施工段编号 | 掘进长度(km)                   | TBM选型考虑重点          | TBM型式             |
|----------|----------------------------|--------------------|-------------------|
| TBM1     | 主洞18.35                    | 经济性                | 敞开式               |
| TBM2     | 主洞11.55                    | 工期,防中等岩爆安全性        | 双护盾式              |
| TBM3     | 主洞13.35+支洞3.31=16.66       |                    |                   |
| TBM4     | 主洞13.46+支洞2.75=16.21       | 便于超硬岩、断层和地下水处理,经济性 | 敞开式               |
| TBM5     | 主洞9.32                     | 便于断层和地下水处理,经济性     |                   |
| TBM6     | 主洞11.51+支洞2.65=14.16       |                    |                   |
| TBM7     | 主洞(4.60+4.69)+支洞2.65=11.94 | 施工安全,工期保障率         | 单护盾式              |
| TBM8     | 主洞(4.65+6.48)+支洞1.04=12.17 |                    |                   |
| TBM9     | 主洞6.05+7.57=13.62          | 便于断层和地下水处理,经济性     | 敞开式               |
| TBM10    | 主洞11.63                    | 地质适应性,长距离掘进        | 土压平衡盾构/单护盾式TBM双模式 |

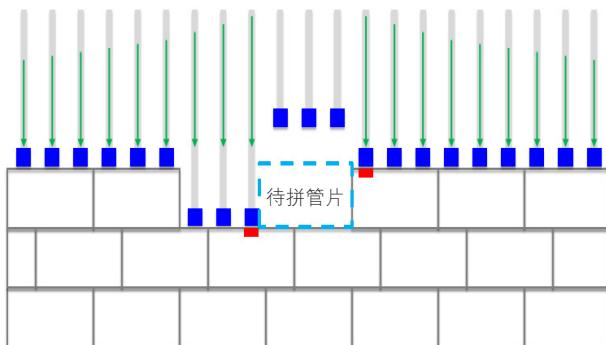


图1 推拼同步过程中管片拼装示意

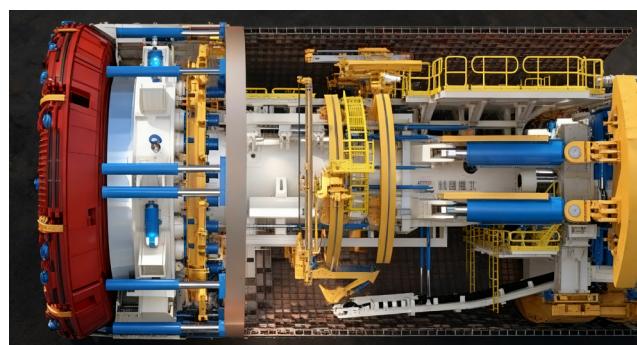


图2 敞开式TBM多支护辅助推进系统示意

工成本,提高掘进效率。

### 3.TBM超前探测配置

#### (1)超前地质预报系统

引江补汉工程TBM配置搭载式电法超前地质预报系统,同时预留地震波法、微震监测接口。配置有两套超前钻机(超前钻注一体数字化钻机+气动超前管棚钻机)。利用长短结合、“物探+钻探”结合方式进行超前地质探测,为TBM施工提供判断和决策依据。电法超前地质探测系统搭载在刀盘上,通过开孔(80 mm)安装14个测量电极,通过液压驱动实现电极伸缩,TBM设备提供液压动力并将其引至主梁内,可对掌子面前方约30 m含水构造进行探测与三维成像。

#### (2)多功能超前钻机系统

引江补汉工程TBM配置两套超前钻机系统:多功能超前钻注一体机(数字钻机)+超前管棚钻机。超前钻机布置于托梁上,实现对隧道360°的范围管棚、超前锚杆、超前小导管等支护及刀盘前方超前探测及超前取芯施工(见图4)。

### 4.TBM集群智能管控平台

引江补汉工程TBM集群管理系统运用物联网、大数据、人工智能、BIM等技术,以施工现场的多维度数据为基础,定制化打造TBM集群智能管控平台,包含数字现场、风险智能预警、施工过程管控、进度效益管控等功能,实现TBM集群施工全方位数字化动态管理。通过对海量动态数据高效梳理、科学管理和智能分析,推进TBM掘进智能化和施工风险管理科学化,提高隧洞建设信息化、智能化水平。

## 六、展望

引江补汉工程属首次大规模应用超大直径TBM集群进行隧洞施工的工程,在TBM集群适应性量化选型与配置方面做出了一系列重大突破——突破了我国以往直径超8 m的水工隧洞TBM均为敞开式的单一选型局限,形成包括敞开式、单护盾式、双护盾式和双模式等多种机型的TBM集群施工方案,并且在TBM功能配置和智能化施工与管控方面开展了技术创新。在引江补汉工程超大直径TBM集群设备选型及配置的研究成果和实践经验基础上,未来进一步探索TBM功能配置标准化、模块化以及无人化自动掘进技术,必将助力我国重大引调水工程建设水平迈向新高度。

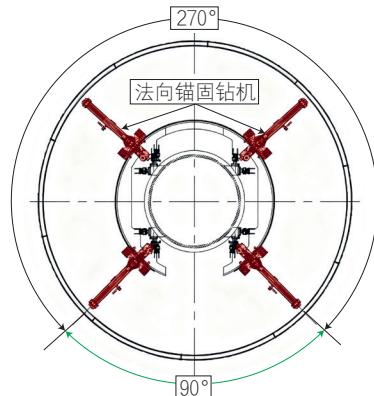


图3 法向预应力锚固钻机横剖面图



图4 超前钻注一体机和多功能超前管棚钻机

## 参考文献:

- [1] 钮新强,万蕙,刘琪.引江补汉工程关键技术挑战[J].中国水利,2022,948(18):15-17+11.
- [2] 杜立杰.中国TBM施工技术进展、挑战及对策[J].隧道建设,2017,37(9):1063-1075.
- [3] 魏永庆,杜士斌.大断面超长输水隧洞的施工特点[J].水利水电技术,2006(3):8-11.
- [4] 杜士斌.敞开式TBM在大伙房输水隧洞工程中的应用[J].水利水电技术,2010,41(1):48-53.
- [5] 齐文彪,刘阳.吉林中部供水工程关键技术问题综述[J].长春科学院院报,2012,29(8):1-6.
- [6] 吴世勇,王鸽,徐劲松,等.锦屏二级水电站TBM选型及施工关键技术研究[J].岩石力学与工程学报,2008,203(10):2000-2009.
- [7] 吴世勇,周济芳.锦屏二级水电站长引水隧洞高地应力下敞开式硬岩隧道掘进机安全快速掘进技术研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(8):1657-1665.
- [8] 张荣山,范贵隆.高海拔地区隧洞开挖掘进机选型

- 及设备性能改进 [J]. 水利水电技术, 2016, 47(S1): 121-123+127.
- [9] 党建涛, 刘福生, 王红霞, 等. 引汉济渭工程秦岭隧洞 TBM 的刀具选型试验 [J]. 水利水电技术, 2017, 48(12): 63-69+94.
- [10] 司富安, 李坤, 段世委. TBM 施工深埋水工长隧洞围岩综合分类研究 [J]. 长江科学院院报, 2020, 37(8): 150-154.
- [11] 詹金武, 李涛, 黄建华, 等. 基于案例推理的 TBM 选型适应性评价系统开发及应用 [J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(6): 1562-1570.
- [12] 冯欢欢, 洪开荣, 杨延栋, 等. 极端复杂地质条件下 TBM 隧道施工关键技术研究及应用 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59(1): 42-54.
- [13] 倪锦初, 朱学贤, 凌旋, 等. 香炉山深埋长隧洞 TBM 选型研究 [J]. 人民长江, 2022, 53(1): 154-159.
- [14] 洪开荣. 超长深埋高地应力 TBM 隧道修建关键技术 [J]. 铁道学报, 2022, 44(3): 1-23.
- [15] 袁蔚, 熊新宇. 罗田水库-铁岗水库输水隧洞 TBM 分段选型研究 [J]. 人民长江, 2023, 54(S2): 185-189.
- [16] 邓铭江, 谭忠盛. 敞开式 TBM 地质适应性评价方法研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2025, 45(6): 1043-1060.
- [17] 邓铭江, 周小兵, 崔东, 等. 喀—双深埋超特长输水隧洞建设关键技术 [J]. 隧道建设 (中英文), 2016, 36(6): 666-675.
- [18] 邓铭江. 深埋超特长输水隧洞 TBM 集群施工关键技术探析 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 577-587.
- [19] 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.
- [20] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 全断面隧道掘进机 单护盾-土压平衡双模式掘进机: GB/T 35020—2018[S]. 2018.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 全断面隧道掘进机 术语 和商业规格: GB/T 34354—2017[S]. 2017.
- [22] 杨旭辉. 引江补汉工程关键技术 TBM 装备及掘进 [J]. 中国水利, 2022, 948(18): 67-69.
- [23] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述 · 2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.
- [24] 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.
- [25] 洪开荣, 杜彦良, 陈馈, 等. 中国全断面隧道掘进机发展历程、成就及展望 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42(5): 739-756.
- [26] 杜立杰, 王佳兴, 洪开荣, 等. TBM 施工岩爆微震监测的准确率及适用性研究 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 278-285.
- [27] 《锦屏二级水电站工程总结》编委会. 锦屏二级水电站工程总结 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2024.
- [28] 付敬, 董志宏, 丁秀丽, 等. 高地应力下深埋隧洞软岩段围岩时效特征研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 444-448.
- [29] 巩江峰, 唐国荣, 王伟, 等. 截至 2021 年底中国铁路隧道情况统计及高黎贡山隧道设计施工概况 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42(3): 508-517.
- [30] 中华人民共和国水利部. 引调水线路工程地质勘察规范: SL 629—2014[S]. 2014.
- [31] 中华人民共和国水利部. 全断面岩石掘进机法水利工程隧洞工程技术规范: SL/T 839—2025[S]. 2025.
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水利水电工程地质勘察规范 (2022 年版): GB 50487—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2022.
- [33] 詹金武. 基于人工智能的 TBM 选型及掘进适应性评价方法与决策支持系统 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [34] 张贺强. 深埋隧道双护盾 TBM 掘进条件下喷锚支护技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [35] 黄正海, 邢阿龙, 汪华东. 双护盾 TBM 采用锚喷支护试验研究 [J]. 四川水利, 2020, 41(6): 78-81.

责任编辑 吕彩霞