



Research
Tunnel Engineering—Article

超特长隧洞 TBM 集群施工风险管控技术

邓铭江

Xinjiang Association for Science and Technology, Urumqi 830011, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 May 2017

Revised 24 June 2017

Accepted 14 July 2017

Available online 23 February 2018

关键词

超特长隧洞

地质灾害

TBM 集群施工

质量安全

风险防控

摘要

北疆供水二期工程, 总长 540 km。其中, 隧洞总长 516 km, 加上 49 条各种缓斜井和竖井, 隧洞掘进总进尺 569 km。特别是喀一双隧洞单洞长 283 km, 是目前世界最长的输水隧洞。主洞划分了 18 台隧洞掘进机 (TBM) 掘进段和 34 个钻爆法施工段, 施工掌子面多达 91 个。该工程不仅对建设管理、风险防控、安全高效施工提出前所未有的挑战, 同时也对 TBM 及其配套设备的设计、制造、运维提出了更高的要求。有必要根据工程特点和不良地质条件, 分析工程建设面临的重大难题和关键技术, 系统查找风险源、合理划分风险等级、明确责任主体、建立分级管控机制。本文提出了应用超前地质预报技术、岩机信息感知和融合的智能掘进技术、监测预警及现代信息技术, 用以科学指导风险管控, 提高安全掘进效率的技术思路。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 工程概况及主要地质问题

1.1. 工程概况及主要特点

北疆供水二期工程全长 540 km, 由西二、喀一双、双一三等 3 段组成 (图 1 至图 3)。隧洞长度分别为 141 km、283 km、92 km, 合计 516 km, 占全长的 95.6%, 3 段隧洞 TBM 开挖洞径分别为 5.5 m、7.0 m、7.8 m。工程具有以下显著特点:

(1) 深埋隧洞。平均埋深 420 m, 最大埋深 774 m。洞线穿越中、低山区和低山丘陵区, 地形起伏不大, 海拔高程 600~1500 m, 相对高差 150~650 m, 埋深 $H \leq 450$ m, 总长 357.7 km; 埋深 $450 < H \leq 650$ m, 总长 96.8 km; 埋深 $H > 650$ m, 总长 61.5 km。

(2) 千里掘进。隧洞掘进总进尺 569 km。主洞掘进 516 km, 49 条各类支洞掘进 53 km; 缓斜井 24 条, 为了安装其他 TBM, 有 14 台 TBM 通过 9 条缓斜井进入主洞安装始发, 缓斜井纵坡 10.5%~12%, 长度 0.86~6.44 km; 各类竖井 25 条, 深度 46~714 m。

(3) 机群施工。用 20 台开敞式 TBM。主洞采用 18 台 TBM 掘进 393 km, 占隧洞总长的 80%; 钻爆法施工 123 km。较大或连续分布的断裂构造带和软岩地层采用钻爆法。两条最长的缓斜井支洞 (5.2 km、6.4 km) 采用 2 台 TBM 掘进。

(4) 世界之最。单洞长 283 km, 单机掘进 27 km。喀一双隧洞单洞长 283 km, 是目前世界最长输水隧道, 单机连续掘进长度 15.5~24.5 km, 单机累计掘进最长

* Corresponding author.

E-mail address: xjdmj@163.com

27 km。将突破单洞掘进、单机连续掘进、累计掘进最长的世界纪录[1-3]。

1.2. 地质构造和地层岩性

(1) 断裂构造。工程区地处褶皱系地质构造单元内，隧洞穿越8条区域性断裂构造带，构造带地表宽度100~200 m，最宽800 m。同时，还分布次一级断层破碎带129条。工程沿线断层和裂隙不发育，裂隙以中一陡倾角为主，裂隙面大多数被石英脉充填，以压扭性结构面为主，地震基本烈度为Ⅶ度。

(2) 地层岩性。以花岗岩、黑云母片麻岩、凝灰质砂岩、凝灰岩、钙质砂岩为主，喀一双和双一三隧洞尾部连续分布含有泥岩、砂岩的软弱地层，累计38 km。花岗岩、黑云母片岩石英含量为20%~30%，其他各类岩石的石英含量一般为5%~10%。硐室中Ⅱ、Ⅲ类围岩占82.7%，其中有78.5%的饱和抗压强度在30~120 MPa。

1.3. 主要工程地质问题评价

笔者围绕塌方、突涌水、岩爆、软岩变形、高地温、放射性、高地应力、活动性断层等主要工程地质问题，开展专题研究，主要结论如下：

(1) 围岩条件总体较好，适合TBM机械化施工。易发生塌方洞段共有19处，累计52 km，主要处于区域性

断裂带内和局部较大的次级断层带内。

(2) 工程区地表水贫乏，地下水主要为基岩裂隙水，岩体较完整，多呈微一弱透水性。易发生突（涌）水的洞段与易发生塌方的洞段位置大致相同。

(3) 西二隧洞埋深在500 m以上、长度为18 km的洞段，喀一双隧洞埋深在650 m以上、长度为47 km的洞段，岩石强度应力比为3~4，属中等岩爆区。

(4) 软岩隧洞总长38 km，易发生塑性大变形。

(5) 高地温、放射性、有害气体等问题未见显现。

(6) 活动性断裂对隧洞衬砌结构有一定的影响，设计中应考虑适宜变形的抗断措施。

2. 工程难点与风险评价

2.1. 工程主要难点问题

风险防控、安全高效、科学规范是建设这项超级隧洞工程的总体原则，工程建设管理中主要面临以下6大难点问题[4]。

(1) TBM与钻爆法可掘性评价与分段掘进问题。在复杂地质条件下，以工程风险管控为前提，科学合理地划分施工区段，充分发挥钻爆法和TBM法的各自优势，并制定对应的技术对策和管控方式，是深埋、超特长隧洞施工组织方案首先应解决的问题。根据岩体特性、断层构造分布、技术装备能力、环境条件、施工效率、工

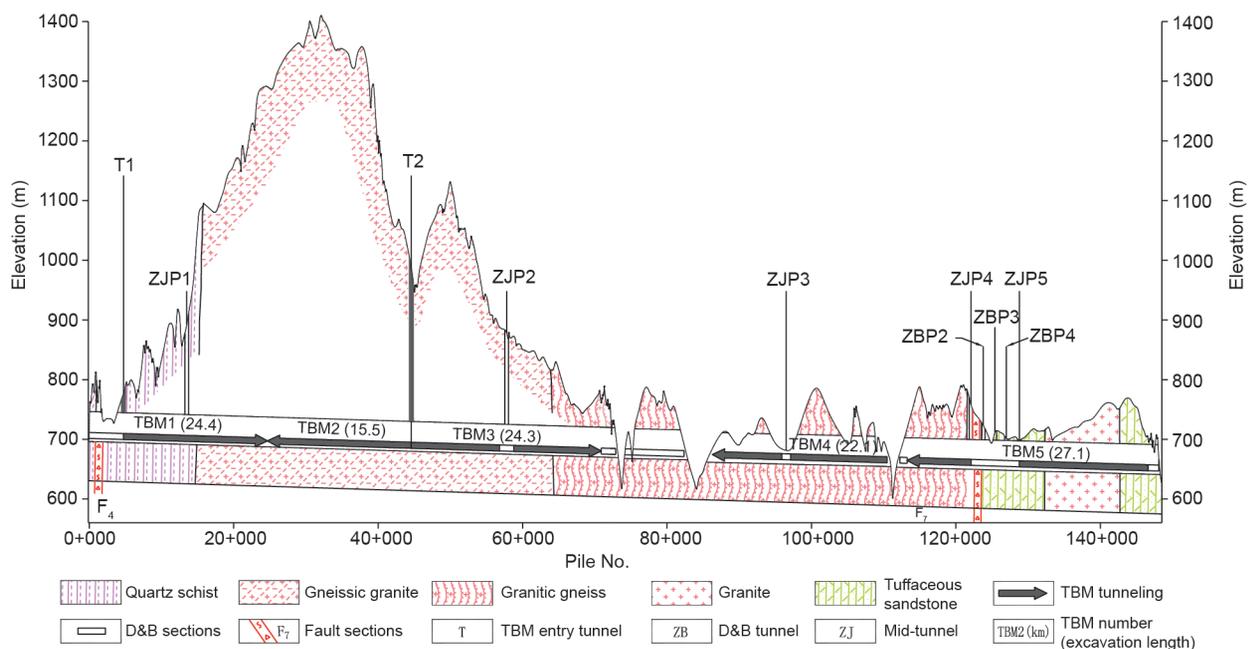


图1. 西二隧洞工程地质及施工组织设计示意图。

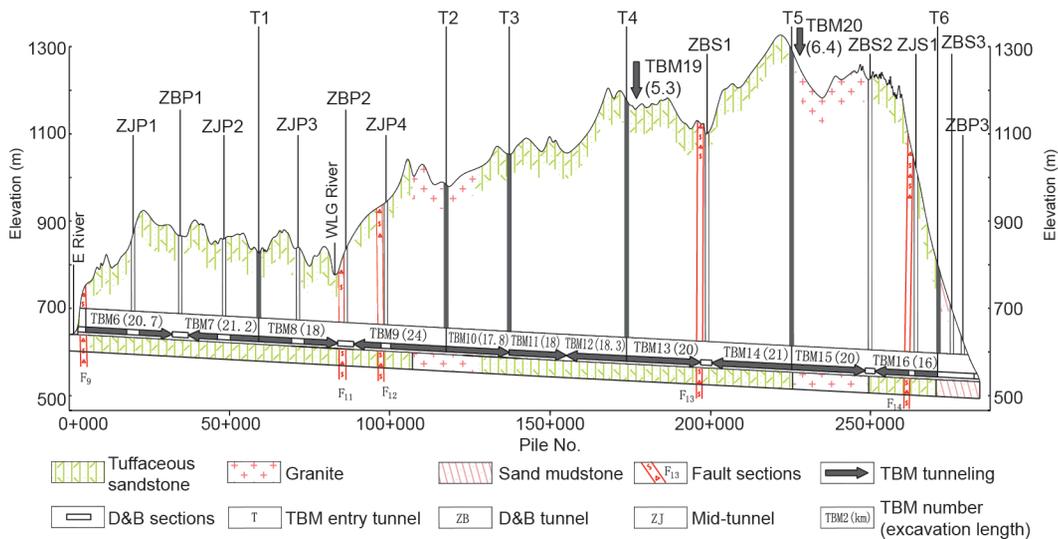


图2. 喀一双隧洞工程地质及施工组织设计示意图。

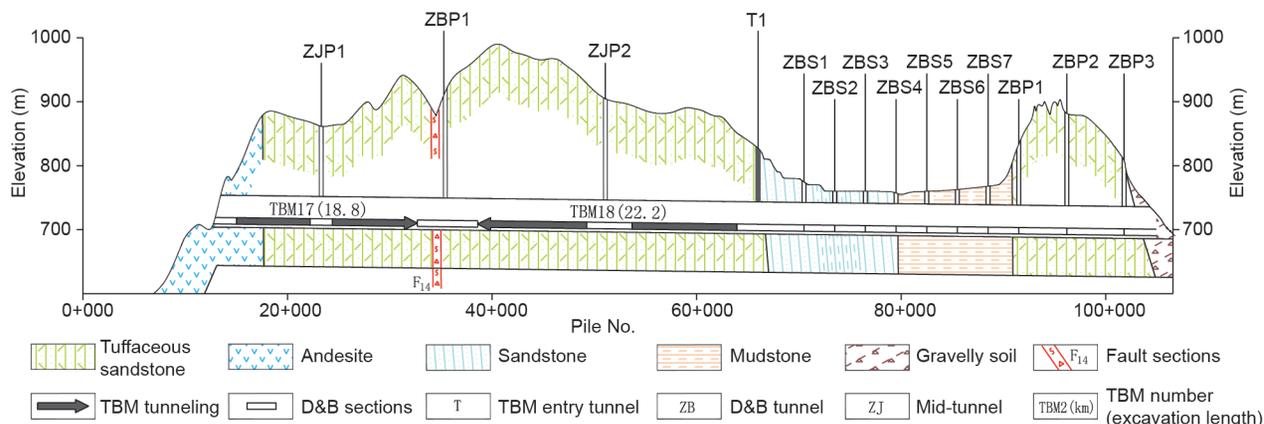


图3. 双一三隧洞工程地质及施工组织设计示意图。

程投资等综合影响因素，研究TBM对工程地质条件的适应性，提出技术可行、经济合理的分段施工方案。其中施工通道、中间支洞、竖井位置和数量的选择，是施工组织优化设计的关键。

(2) TBM进入通道与施工安全问题。大型设备通过竖井、斜井或缓斜井（小于 7° ）等支洞型式进入深埋地下的主洞，以及洞内组装、始发、步进、拆解等成套技术，是极具挑战性的难题。在综合确定TBM采用缓斜井进洞、主洞有轨运输、支洞无轨运输方案的基础上，系统开展长距离大坡度缓斜井及其硐室结构与出渣通风、物料运输、输电供水、人员交通等配套系统的匹配性设计，是保障施工安全和效率的关键。

(3) TBM设计制造与智能掘进问题。关键部件的适应性、耐久性和可靠性，是“打得快、用得久、走得长”的重要保证，综合平衡设备的技术先进性和经济实用性，针对具体工程地质条件开展个性化设计，是TBM

设计制造者需深入思考的问题。在掘进的过程中，提高TBM综合感知能力和信息化水平，实时获取围岩参数，适时更换刀具，适时调整掘进参数，基于大数据和云平台，建立“人-机-岩”互为感知的智能掘进控制系统，是现代隧洞施工技术的发展方向。

(4) TBM及配套设施安全保障问题。超特长隧洞机械化施工，设备众多，系统庞大，TBM机群及配套系统的检测诊断、保养维护、故障修复、施工质量、工程进度等信息化管理，是现代隧洞施工必须解决的重大问题。出渣、通风、供电、给排水、物料运输等配套设施的安全保障性，设备性能的可靠性，排险抢修的时效性等都是工程建设中的难点问题。

(5) 地质灾害预报与风险防控问题。断层破碎带、软弱破碎岩体、含水构造、涌水塌方、巨石塌落、围岩变形、岩爆等，是影响TBM安全高效施工的主要地质问题。由于隧洞深埋超特长，地质条件复杂，在施工过

程中, 必须加强超前预报、超前勘探, 重视灾害监测与预警, 提前做好超前加固及其他跟进施工措施, 做到科学、安全、高效掘进, 预防各种工程地质灾害造成姿态失调、卡机、埋机等事件的发生, 做好突发地质灾害的处置预案。

(6) 软岩变形与施工方案选择问题。软岩地层主要连续分布在喀一双隧洞尾端, 总长11.7 km; 双一三隧洞后段, 总长26.3 km。其中, 双一三隧洞软岩段80%为饱和抗压强度小于5 MPa的极软岩, 上覆岩体60~80 m, 地下水位高于洞底50~62 m, 极易发生塑性变形、围岩鼓胀和流变, 采用钻爆法施工需采取大量的辅助措施, 造价和工期难以控制, 即使采用土压平衡或泥水平衡盾构施工, 也存在极高的风险[5]。

2.2. 工程建设及施工风险等级划分

从地质、设备、施工、环保、投资等主要风险源出发, 根据隐患发生的可能性和严重性, 将风险划分为4级12类(图4)。

一级风险: 涉及重大地质灾害、重大设备、集中作业通道和群体人员安全的风险源。

(1) 区域性断裂构造带。隧洞穿越8条区域性断裂构造带, 可能带来的突水、突泥、塌方及卡机、埋机和人员安全风险。

(2) 极软岩塑性大变形。双一三隧洞深埋、地下水位高、岩洞段极软, 易产生塑性大变形而带来的施工风险。

(3) 施工作业通道安全。超长隧洞、大坡度缓斜井和深埋竖井, 以及风、水、电、碴、物等运送系统密集布置, 对施工作业通道构成的安全风险。

二级风险: 涉及一般性地质灾害、主要配套设备和作业人员较多的安全风险源。

(4) 次一级断层破碎带。由断裂构造带产生的129条次一级断层破碎带, 以及可能带来的涌水、大变形、塌方和卡机风险。

(5) TBM制造运行维护。包括整体性能及关键部件的设计制造、性状诊断、故障修复, 以及安装、始发、步进、拆解等存在的运行操作风险。

(6) 配套设备运行管理。出碴、通风、供电、给排水、物料运输等配套设施应具备安全可靠、耐久稳定、节能高效等特点, 但仍存在风险隐患。

三级风险: 涉及生态保护、作业环境、工程投资、质量工期等方面的安全风险源。

(7) 水土保持与生态保护。工程穿越牧区天然草场和国家级有蹄类野生动物保护区, 水土保持和生态环境保护存在较大风险。

(8) 质量工期与投资控制。工程总投资512亿元人民币, 建设期84个月, 质量工期、投资控制、贷款风险均存在较大风险。

(9) 作业环境与劳动保障。隧洞掘进掌子面的通风换气质量、除尘降温措施、污物排放、噪声控制等作业环境存在风险隐患。

四级风险: 涉及一般性的施工管理安全风险源。

(10) 贯通测量与导线控制。隧洞被分解为18个TBM掘进洞段, 34个钻爆洞段, 地面控制网和洞内导线测量的精度和可靠性难以确保隧洞精准贯通。

(11) 备品备件管理。TBM及其配套设施众多, 系统庞杂, 存在备品备件安全储备、性能匹配、及时供

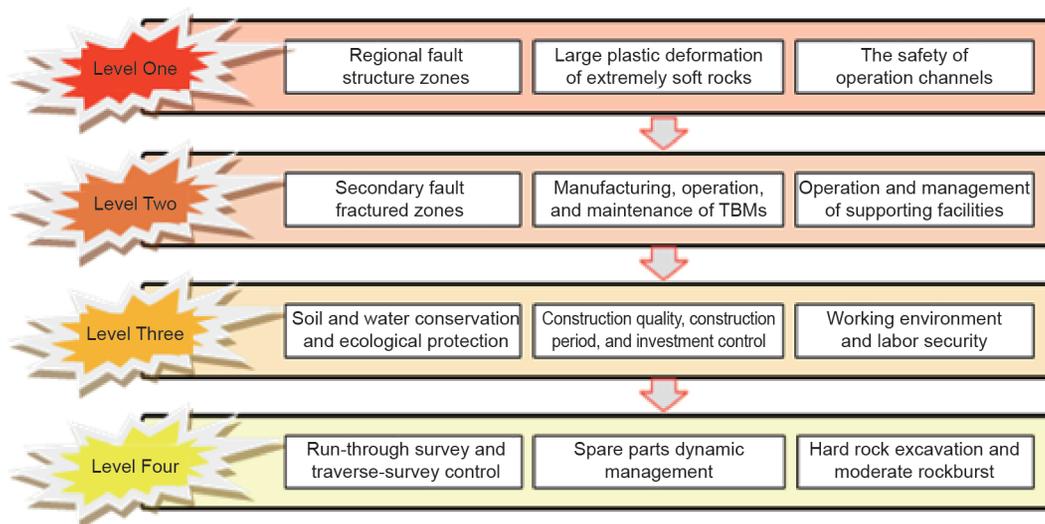


图4. 超特长隧洞TBM集群施工风险等级划分框图。

应的运行管理风险。

(12) 硬岩掘进与中等岩爆。花岗岩和黑云母片岩, 石英含量为20%~30%, 为抗压强度大于180 MPa的坚硬岩石, 存在刀具磨损和卡机风险, 深埋洞段发生中等岩爆的概率较高。

3. 风险管控与机制架构

3.1. 总体思路

对风险实施分责、分级、分类管控。

(1) 分责管控。根据设备制造、设备运维、工程承建、材料供应、施工监理、质量检测、勘察设计、项目管理等责任主体单位, 实施分责管控。

(2) 分级管控。一是组建一个风险防控中心、5个分中心, 按风险等级实施分级管控; 二是分解、化小风险隐患, 降低施工难度, 如“长洞短打、分段掘进”是超特长隧道洞施工的基本原则, 合理划分施工洞段, 优化施工组织, 既要充分发挥TBM高效掘进的优势, 也要因地制宜地应用好钻爆法。地质条件比较差的洞段, 优先考虑采用钻爆法施工, 规避TBM施工风险。

(3) 分类管控。按照地质灾害、设备运维、施工安全、质量保障、投资控制、环境保护等风险类别分类管控。

3.2. 管控原则

(1) 以超前地质预报为前导的“515”全覆盖监测原则。在勘测阶段平均每2 km一个地质钻孔的基础上, 结合施工地质, 每个掌子面采用地质分析法基本摸清前方500 m距离主要地质构造, 采用地质预报方法基本掌握前方100 m、准确掌握50 m距离地质构造和岩层含水情况, 建立“长一中一短, 短一中一长”循环预报和“前摄性”地质预警机制。

(2) 以施工作业班组为重点的“20+120”(表示20个TBM作业面+120个钻爆作业面) 定点管控原则。20台TBM及其后配套设备、49个支洞掌子面、91个主洞施工作业面, 是工程风险概率高发点。因此, 要以超前地质预报为导向, 组建培训好140个作业班组, 实施最严格的风险管控措施。用现代信息技术和先进的科学技术手段, 建立“岩机相适、人机相融、人机岩感知”的智能掘进系统, 降低风险发生概率和灾害程度。

(3) 以TBM及配套设备为重点的“5托1”预警监控原则。TBM是长隧洞施工的“主角”, 掘进过程中,

时常出现刀盘卡机、油缸温度过高、滚刀异常磨损、姿态失控、主轴承等核心构建异常损毁等突发事件, 如不及时处理将会导致重大设备事故。因此, 在对TBM实施全程预警监控的同时, 也要对出碴、通风、供电、给排水、物料运输等5大系统中的关键设备, 实行预警监控[6]。

3.3. 机制架构

图5为风险管控机制框图, 其主要特点为:

(1) 明确3个主体责任。由地质勘查和超前地质预报单位组成的地质灾害定位测试、“前摄性”预警联合体, 是地质分析、灾害评估的责任主体; 工程承建单位是钻爆段施工、TBM安全掘进、配套设备运维、风险预案制定和处置的责任主体; 工程管理单位是信息平台建设、风险综合决策管理的责任主体。

(2) 建立一个防控中心。基于TBM集群施工信息化、云计算、大数据分析互联网平台, 建立超前预报与灾害防控中心, 并依托项目管理部分设5个分中心, 组建专家决策咨询机构, 实现现场分析决策和云端化解决方案。

(3) 组建抢险维修队伍。在各种地质灾害处理、TBM故障修复、配套设备运维、人员逃生救援等方面, 都需要制定应急抢险预案、配备专业化的施工队伍和维修班组。防患于未然, 处置于萌发。抢险队伍由工程承建单位各自组建管理, 在应急状态中由灾害防控中心统一调配。

(4) 依靠先进技术手段。研发、应用先进的科学技术, 也是化解和降低风险的重要手段, 如高识别率、准确率的地质超前预报技术、“人-机-岩”感知的智能掘进技术、实时迅达的监测预警及现代信息技术、性能可靠的通风出碴与降尘技术、快速有效的堵水技术等。

4. 风险管控主要技术保障措施

4.1. 超前地质灾害预报

4.1.1. 建立综合超前地质预报体系

坚持以地质分析法为基础, 并选择快捷、可靠的物探方法, 科学建立施工地质预报体系, 是保证TBM安全高效掘进的重要措施。采取长短结合、地面与地下相结合、钻探与物探结合、探构造与探水相结合、搭载式与便携式探测方法相结合的综合预报方法, 实现超前地质预报自动化、快速化、全覆盖和信息共享交流、会商

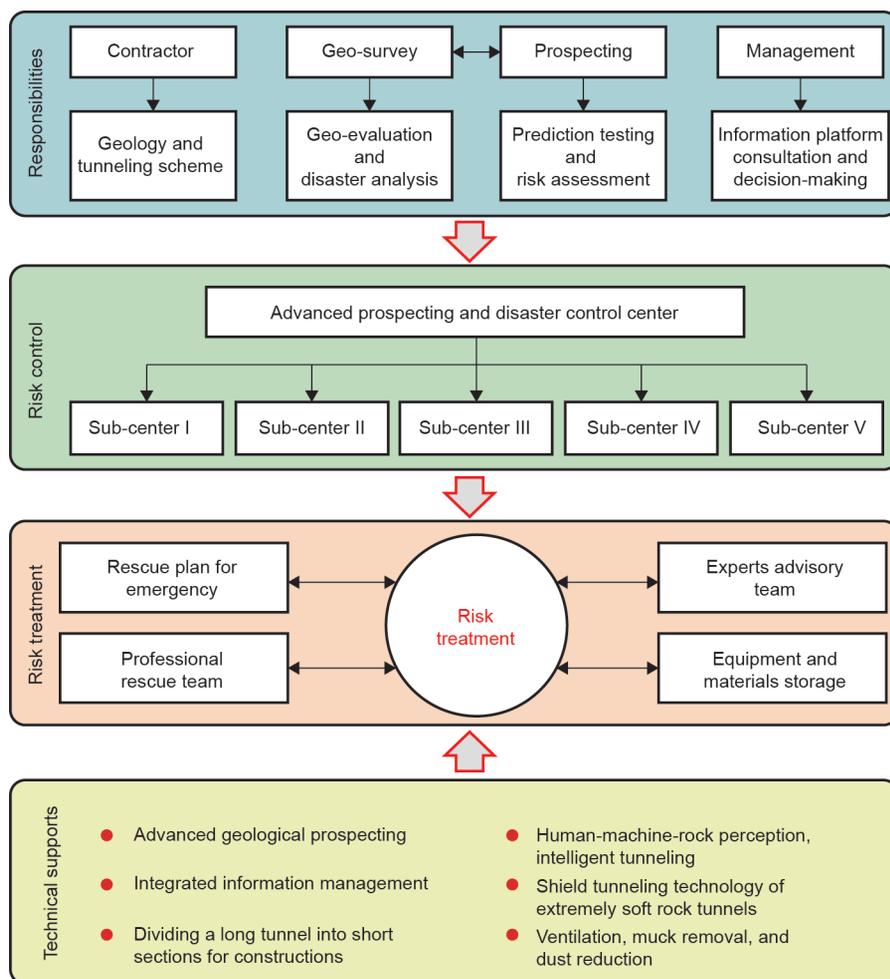


图5. 超特长隧洞施工风险管控机制框图。

决策、超前处理等3大功能。

(1) 共享交流。解决点多线长、各种预报方法和预报结果及其数据格式、图像形式众多的难题，建立大数据交流共享平台，成立地质预报会诊专家组，制定技术规程，进行技术指导、专业培训，实现超前地质预报成果交互化、规范化，提高地质预报判释效率和准确性。

(2) 会商决策。面对地质灾害和预报管理的风险考验，充分利用大数据系统和信息化管理平台，建立科学有效的沟通会商、咨询决策机制，重点对高风险的不良地质灾害，开展诊断识别、风险评价、会商决策，实现超前地质预报在线、实时决策处理。

(3) 超前处理。面对大量的地质灾害威胁，开发并搭载360°全向快速钻机，制定有效的处置预案，包括超前注浆加固、注浆堵水、超前管棚、小导管或锚杆、人工开挖旁支洞等措施，组建应急抢险队伍，实现TBM安全快速掘进。

4.1.2. TBM 搭载地质预报技术进展

适于钻爆法施工的常用隧道地质预报方法，如TSP/TGP、TST、TRT等，很难适应TBM高效安全的施工要求[7]。研究适合于TBM施工的地质预报新技术，并将其搭载于TBM系统，是目前理论研究和设备研发的新趋势。探测理论方法主要分为两大类：一类是利用介质弹性波阻抗差，探测前方断层破碎带、软弱夹层等地质构造的探测方法；另一类是利用介质温度场、介电差异、极化特性等，探测前方地下水情况的探测方法。

山东大学研发的三维(3D)地震SAP(seismic ahead prospecting)[8]和三维(3D)激发极化超前预报系统(tunnel induced-polarization prospecting)[9]，利用TBM停机工序进行自动化探测，能够对掌子面前方100 m范围内断层破碎带和前方30 m含水构造进行3D定位和水量估算。中铁西南科学研究院研发的水平声波剖面法预报技术HSP(horizontal seismic profiling)及产品设备，利用掘进机刀盘冲击岩石产生的震动信号，测试水平声

波反射变化, 预报前方地质构造, 能够在不停机状态下完成测试[10]; 温度场地下水探测RTP技术 (rock-mass temperature probing), 可通过温度场畸变的位置和范围来预测隧道开挖面前方地下水情况, 防止隧道突涌水地质灾害的发生[11]。北京同度工程物探技术有限公司研发的地震波层析成像预报方法BMST (boring machine seismic tomography), 在TST系统基础上, 实时3D成像, 可探测前方30 ~ 50 m内的地质构造[7]。华中科技大学研发的光纤电流屏蔽聚焦法隧道在线地质前探系统[12], 能够利用掘进机刀盘旋转的扫描模式, 预测掌子面前方地质构造状况。

以上这些预报方法各有特点, 也取得了不同程度的应用效果, 但整体上还有待进一步改进。如何更好地实现TBM一体化集成和自动化实时探测, 是超前地质预报技术研究发展的方向。相信在不久的将来, 适用于TBM施工环境的超前预报技术手段将会更加便捷成熟, 更加先进科学。

4.2. 岩机感知与智能掘进

4.2.1. 面临的问题

TBM施工过程中不仅受到不良地质的威胁, 还要时刻关注设备适应性、零部件健康状态、掘进参数等因素的影响。目前, TBM施工虽然已在众多工程中取得令人瞩目的成就, 但依然无法摆脱事故频发的窘境, 究其原因主要有:

(1) 缺感知。缺乏科学方法和有效手段, 快速感知围岩信息、设备自身运行状态和关键零部件健康程度以及岩机信息融合互馈。

(2) 缺决策。缺乏状态评价和智能决策的有效手段, 主要依靠人为经验而非科学依据, 轻则造成施工效率低下、设备资源浪费, 重则造成塌方、卡机、埋机等不良后果。

(3) 缺平台。缺乏信息融合、共享和分析平台, TBM海量掘进信息未被有效保存、挖掘和分析, 信息化、物联网、大数据以及智能算法等关键技术和业务支撑平台亟待创新突破。

4.2.2. 岩机信息感知与融合互馈

信息感知与融合是实现TBM智能化掘进的基石和先导。从TBM集群施工产生海量信息中, 挖掘岩机感知信息, 寻找感知规律, 建立感知模型, 开发智能系统, 开展围岩和设备状态辨识评价, 对于提升TBM施工安

全和掘进效能有着重要意义。

(1) 设备信息感知和状态评价。感知刀盘受力、刀具磨损、振动情况、异常报警、岩碴特征等状态信息以及推力、扭矩、转速、贯入度等主参数信息, 构建多指标、多参数的设备状态分级评价体系和地质适应性评价体系, 对TBM掘进状态和适应性进行动态评价。

(2) 围岩信息感知和状态评价。TBM掘进参数与岩体力学参数密切相关, 在地质勘查和超前地质预报的基础上, 研发数字随钻监测系统, 利用超前钻孔信息, 揭示钻进参数与岩体参数关系模型, 实现岩体力学参数的随钻实时感知; 以TBM为钻进整体, 利用岩机作用模型, 以设备参数反演获取岩体参数; 研发滚刀受力掌子面岩体反演、岩碴图像识别等智能信息系统, 实时感知和评价在掘岩体状态。

(3) 岩机信息融合互馈和大数据平台。建立TBM集群施工海量信息大数据储存和分析平台, 对岩机信息进行深度融合、深入挖掘、系统分析, 以知识发现和建模为核心, 揭示围岩信息、TBM运行状态以及岩机相互作用等内在规律[13], 根据“人-机-岩”信息感知和互馈规律, 为智能化施工提供理论依据 (图6)。

4.2.3. 智能掘进与优化决策

新一代信息技术的发展, 已使信息处理的容量、速度和质量取得长足进步, 人工智能方法获得更为广泛的应用。在TBM信息感知和融合互馈的基础上, 智能化掘进是实现安全高效掘进的重要方向。

(1) 智能掘进策略。在不良地层中, 智能掘进要结合超前地质预报, 快速感知、辨识当前掘进状态, 集成专家知识库和经验库, 实现灾害预警预判和方案决策, 保证设备安全通过; 在常规地层中, 智能掘进要根据岩体感知信息, 智能调控掘进参数, 优化掘进目标。

(2) 智能掘进目标。TBM施工受到多因素、多目标的影响, 智能掘进策略要充分考虑各目标之间的“不可公度性”, 应用多目标动态规划理论和方法, 依据精准的岩机作用模型, 实现TBM施工高效、经济、节能等多目标综合最优。

(3) 高效掘进目标。以TBM设计主参数、岩机作用模型、配套设备运行状态为限定条件, 以最大掘进速度 V_{\max} 为目标, 计算贯入度 P 和刀盘转速 R , 并以某一限定条件下的最小值作为掘进参数的理论最大值。

(4) 经济掘进目标。结合滚刀磨损监测数据, 研究某一地质状况滚刀磨损与掘进参数相关规律, 建立滚刀

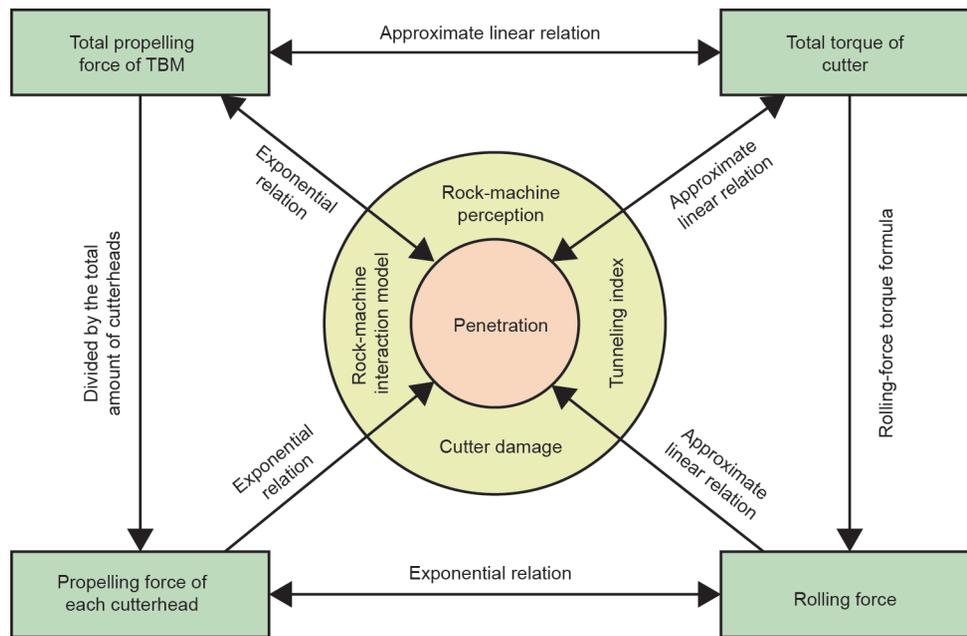


图6. TBM主要掘进参数关系图。

磨损预测模型，以“最小刀具磨损 χ_{\min} 、最少换刀时间 T_{\min} 、最大进尺量 L_{\max} ”为目标，选择最优掘进参数[14]。

(5) 节能掘进目标。依据室内滚刀切割试验和现场掘进数据，研究不同掘进参数时滚刀切削破岩能量消耗规律，搜索不同岩体破碎所需最小比能和所对应的最优掘进参数。

4.3. TBM 集群施工综合管理信息系统

充分发挥信息化和智能化在现代施工中的技术支撑作用，是提升超特长隧洞TBM集群施工质量、安全和进度管理水平的重要保障。

TBM集群施工综合管理信息云平台建设“分散采集、多级集成、按需共享、分层发布”的原则整合工程所有信息资源，运用云计算和大数据技术，使项目业主方、设计方、监理方、施工方、设备制造厂家、技术咨询机构等参建各方均能实时、系统、安全地获取项目施工信息，满足施工进度跟踪、设备运行维护、工程质量管理、安全风险管控等需求。

平台由一个监控指挥中心、5个分中心和9大功能系统构成（图7）。不仅具备在线实时监控跟踪、调度资源、发布指令、会商决策以及遇到突发事件组织应急抢险等功能，同时系统接入TBM制造商大数据中心，实现信息共享、故障诊断、在线会商等功能。5个分中心负责采集汇总所辖项目各类监控信息，应用岩机信息感知与融合技术，指导现场科学、高效安全施工。

工程各参建方根据用户授权，借助于电脑和手机等终端，对数据中心云端信息进行远程访问。搭建管理决策信息系统平台的目的是，就是要建立数据共享的机制，打破信息壁垒，实现数据共享，方便大数据挖掘，促进TBM行业发展及技术进步。同时，鉴于工程的保密性，应做好网络分级、隔离管控，解决系统安全、数据保密的问题。

4.4. 建立风险管控综合技术保障系统

围绕超特长隧洞安全高效、智能掘进的总目标，通过严格的管理机制和科学的技术手段，构建施工技术保障体系。一方面，针对工程难点和主要风险源，建立严格的分类、分级、分责风险管理机制，化解降低施工风险；另一方面，充分利用先进的地质灾害预报技术、软岩大变形控制支护技术、TBM智能感知掘进技术和BIM云平台技术，建立完善的技术支撑，科学规避风险。将管理机制与技术手段相结合，耦合形成“超特长隧洞TBM集群施工的风险管控‘六化’综合技术保障体系”（图8）。即严控制度化、风险分解化、决策科学化、变形可控化、控制智能化、感知信息化。

5. 结语

(1) 超特长输水隧洞施工风险涉及地质灾害、设备运维、施工安全、质量保障、投资控制、环境保护等诸

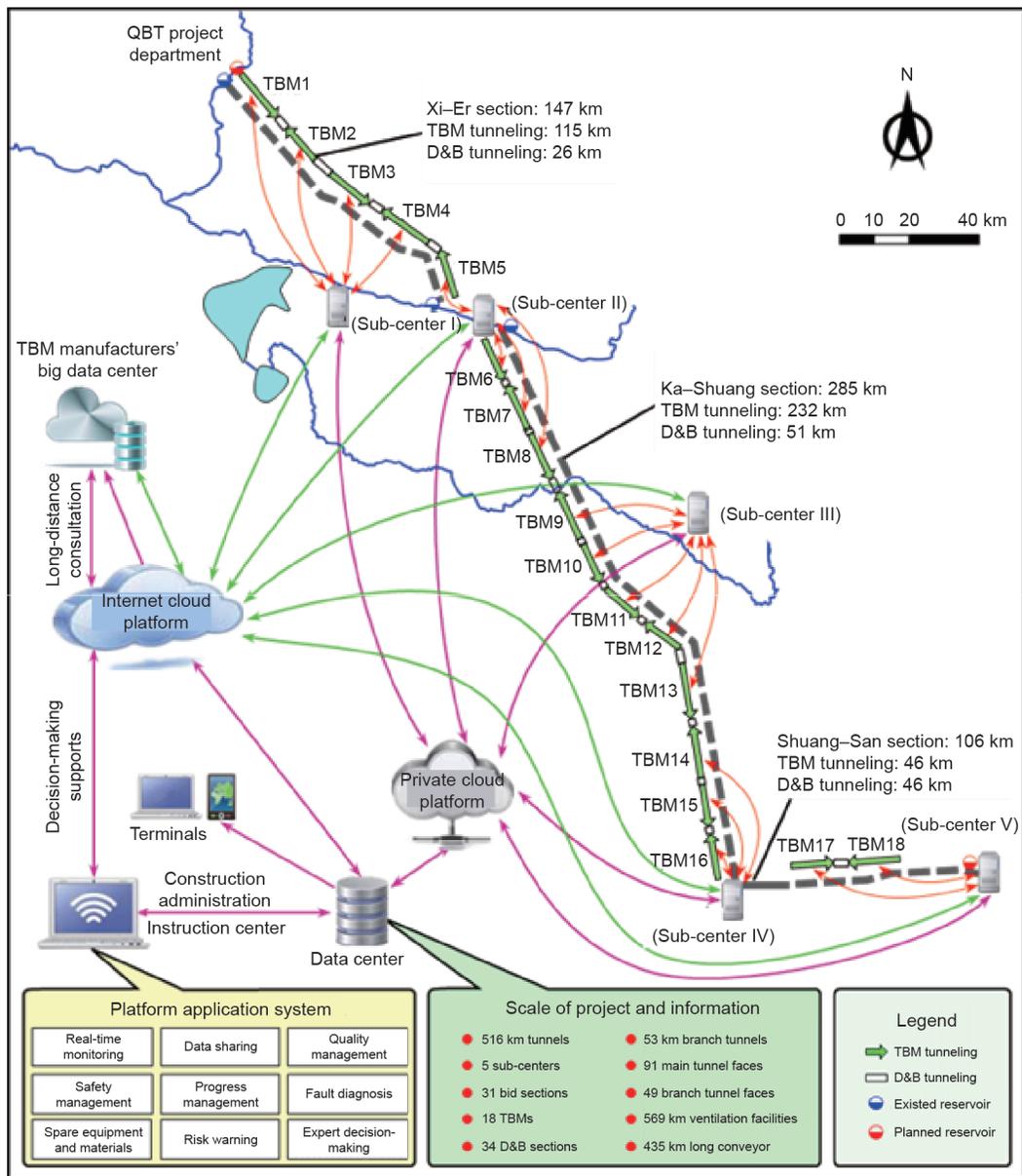


图7. 超特长隧洞TBM集群施工综合管理决策信息系统。

多方面，基于分责、分级、分类管控的总体原则，建立科学有效的风险管控机制，是统筹管控风险、合理组织施工的关键一环。

(2) 我国在超前地质预报技术研发与应用方面取得了显著进步，为风险防控提供了良好的技术手段，但针对超特长隧洞施工仍需结合地质勘查、超前预报和岩体信息感知等手段，建立适合TBM施工的综合地质预报系统，为TBM安全高效施工保驾护航。对于重大地质灾害洞段，建立TBM地质预报搭载系统，实现实时、跟踪探测，必要时配合采用超前地质钻探进行验证，并做好相应的灾害处置应急预案。

(3) 国产化TBM装备制造技术虽已取得重大突破，但因本工程特点，其设备制造和运行维护的风险仍然较高，必须开展持续性的研究创新，特别注意成套设备的研发与工程应用服务，提升关键部件的适应性、耐久性、可靠性，为超特长隧洞“打得快、用得久、走得长”提供重要保证。

(4) 基于信息化、物联网、大数据等新一代高技术手段，提高TBM设备岩机信息感知和融合能力，建立运行状态和掘进适应性评价体系，开发智能控制软件，为TBM信息化、智能化施工装上“中国脑”，是超特长隧洞施工风险管控迈上新台阶的重要措施。

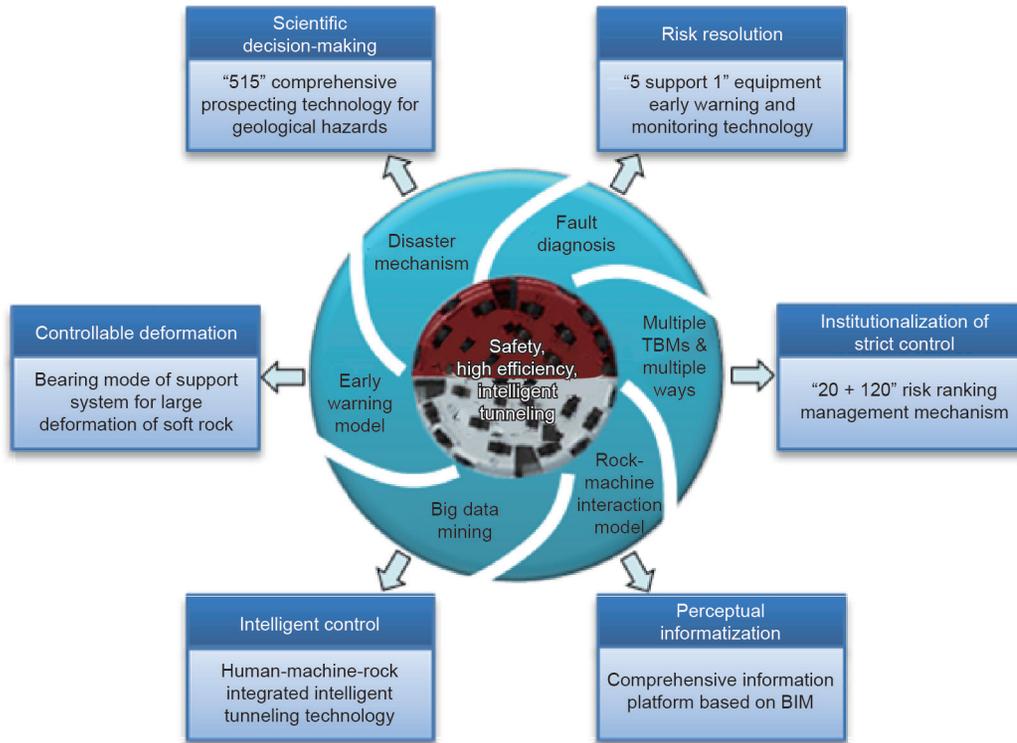


图8. 超特长隧洞“六化”施工技术保障体系。

References

- [1] Zheng YL, Zhang QB, Zhao J. Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining. *Tunn Undergr Space Technol* 2016;57:287–99.
- [2] Liu Q, Huang X, Gong Q, Du L, Pan Y, Liu J. Application and development of hard rock TBM and its prospect in China. *Tunn Undergr Space Technol* 2016;57:33–46.
- [3] Zhang J. Application of TBM in water diverting project from Yellow River at Wanjiazhai, Shanxi. *Construct Mach* 2003;2:32–3. Chinese.
- [4] Deng M. Key techniques for group construction of deep-buried and super-long water transfer tunnel by TBM. *Chin J Geotech Eng* 2016;38(4):577–87. Chinese.
- [5] Wang MS, Wang ZS. Construction technology of TBM driving across fracture zone. *Tunn Construct* 2001;21(3):1–4. Chinese.
- [6] Du Y, Xu X, Zhi X. Full-face rock tunnel boring machine: TBM maintenance and monitoring. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press; 2013. Chinese.
- [7] Zhao Y, Jiang H. Present situation analysis and new development of tunnel advance forecast technology. *Highway Tunn* 2010;1:1–7. Chinese.
- [8] Jie S. The three-dimensional seismic ahead prospecting method and its application for adverse geology in tunnel construction [dissertation]. Jinan: Shandong University; 2016. Chinese.
- [9] Li SC, Nie LC, Liu B, Tian MZ, Wang CW, Song J, et al. Advanced detection and physical model test based on multi-electrode sources array resistivity method in tunnel. *Chin J Geophys* 2015;58(4):1434–46. Chinese.
- [10] Li C, Gu T, Liao Y, Ding J. Discussion on TBM construction through faults, karst, groundwater and other poor geological sections. *J Eng Geology* 2011;19 (Suppl):396–401. Chinese.
- [11] He F, Guo R, Li S, Lin Y, Ran M, Shan Z. Prediction of water gushing in front of pile surface by rock mass temperature tunnel. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press; 2009. Chinese.
- [12] Zhu G, Qian G, Zhang C. Simulation of DC focusing electric field in tunnel based on APDL. *J Huazhong Univ Sci Technol* 2015;43(12):52–5. Chinese.
- [13] Liu Q, Liu J, Pan Y, Kong X, Cui X, Huang S, et al. Research advances of tunnel boring machine performance prediction models for hard rock. *Chin J Rock Mech Eng* 2016;35(S1):2766–86. Chinese.
- [14] Tan Q, Sun X, Xia Y, Cai X, Zhu Z, Zhang J, et al. A wear prediction model of disc cutter for TBM. *J Cent South Univ* 2017;48(1):54–60. Chinese.