

文章编号: 1001-8360(2022)03-0001-23

超长深埋高地应力 TBM 隧道修建关键技术

洪 开 荣^{1,2}

(1. 中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州 511458; 2. 盾构及掘进技术国家重点实验室, 河南 郑州 450001)

摘 要:我国西部地区基础设施建设相对滞后。随着新时代的发展,西部地区铁路、公路和水利等基础设施建设进入一个快速发展阶段,隧道工程是其重要的选项;但西部地区大多处于青藏高原,山高谷深,隧道工程将会具有明显的超长、深埋的特点;同时该区域地质构造活跃,其水平地应力相对其他区域均偏高,隧道工程具有高地应力的特点。通过对类似 TBM 工程的研究与实践,阐述了超长深埋高地应力 TBM 隧道的主要问题,从隧道解重构行为特征出发,分析了典型的四类不良地质对 TBM 施工的影响,提出了相应的 TBM 选型要求、TBM 针对性设计、掘进参数控制、支护技术方法等;以色季拉山隧道为例,深度分析了该隧道 TBM 选型的相关问题,以及该隧道 TBM 针对性设计要点;最后提出了开展超长深埋高地应力 TBM 隧道修建智能技术研究的建议。

关键词: TBM 隧道; 超长深埋; 高地应力; 解重构理论

中图分类号: U455.3 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2022.03.001

Key Technology for Construction of Ultra-long and Deep-buried TBM Tunnels with High Geostress

HONG Kairong^{1,2}

(1. China Railway Tunnel Group Co., Ltd, Guangzhou 511458, China;

2. State Key Laboratory of Shield Machine and Boring Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Western China relatively lags behind in infrastructure construction. However, with the development of the new era, the construction of such infrastructure as railways, highways, water conservancy facilities in this area will enter a stage of rapid development. Among them, tunnel engineering is an important option. Given most of the western regions in China being located on the Qinghai—Tibet Plateau, with high mountains and deep valleys, tunnels in these regions will be obviously super-long and deep-buried. In addition, as these regions are featured by an active geological structure and higher horizontal geostress than other regions, the tunnels will be featured by high geostress. This paper expounded the main issues of super-long deep-buried TBM tunnels with high geostress based on the study and practice of similar TBM projects. It analyzed the influence of four kinds of typical unfavorable geology on TBM construction from the characteristics of tunnel deconstruction and reconstruction, and put forward the requirements of type selection of TBM, targeted design of TBM, tunneling parameter control, support technology and methods. Then, a case study of Segrila Mountain Tunnel was given to analyze the relevant issues about the TBM type selection of this tunnel and the key points of the targeted design of TBM for this tunnel. Finally, the paper provided suggestions to study the intelligent technology for the construction of super-long deep-buried TBM tunnels with high geostress.

Key words: TBM tunnel; super-long and deep-buried; high geostress; deconstruction and reconstruction principles

我国西部大部分区域位于青藏高原,山高谷深,在

西部改善交通提升效能、跨域调水、保护生态等重大基础设施建设中,必将遇到大量超长(长度>15 km)、超深(埋深>500 m)、超高(水平地应力>20 MPa)的隧道工程。受板块碰撞和构造运动的影响,该区域地质极其复杂、地形地貌险峻、气候环境恶劣,因此,隧道工程建设技术难度大、建设环境差,辅助坑道设置也困难。

收稿日期: 2021-07-28; 修回日期: 2021-12-09

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1712100); 中国铁路总公司科技研究开发计划(2016G004-A); 河南省自然科学基金(Z02300410002)

作者简介: 洪开荣(1965—),男,湖南株洲人,正高级工程师,博士。

E-mail: ctg_kr@vip.163.com

国内外类似工程建设经验表明,深埋高地应力隧道采用隧道掘进机(TBM)施工是高效建设的主要途径,具有一定的优势,但在勘察、设计、施工和运营各阶段也面临巨大挑战^[1-2]。

TBM 工法已广泛应用于铁路隧道、公路隧道、水利隧洞等建设。20 世纪 50 年代,我国开始了 TBM 技术研究与应用,天生桥电站是我国最早引进国外 TBM 技术施工的隧洞工程,然后在甘肃引大入秦、山西引黄入晋、掌鸠河引水、辽宁大伙房引水、青海引大济湟、锦屏水电站、辽西北供水、甘肃引洮、辽宁引松、引汉济渭、新疆 ABH、兰州水源地、新疆 EH 等工程得到推广应用。20 世纪 90 年代末期,我国在建设西康铁路秦岭隧道时引进了 TBM 技术,然后在西安—南京铁路磨沟岭隧道与桃花铺 1 号隧道、吐库二线铁路中天山隧道、兰渝铁路西秦岭隧道、大瑞铁路高黎贡山隧道等特长隧道工程中得到了应用。21 世纪近 10 年内,公路建设方面在新疆、四川等地也采用了 TBM 技术,整体上我国取得了很多宝贵的 TBM 隧道建设经验。

长期以来,工程技术人员和业内专家对 TBM 隧道技术进行了大量的研究分析。文献[3-4]对国外 TBM 技术发展进行了全面系统分析;文献[5-8]对我国 TBM 技术发展,从“研发探索和试用、国外设计制造和国外施工、国外设计制造和自主施工、联合设计制造和自主施工、国产化 and 面向国内外施工”五个阶段进行了系统记述;文献[9-10]对我国近年来 TBM 技术创新与实践进行了分析。文献[11-12]结合 TBM 在引松供水工程总干线四标段工程施工情况,研究了 TBM 的各项技术特点与主要设计参数,分析了 TBM 掘进各种地层(特别是灰岩地层)的特点及工程适应性。文献[13-16]结合引汉济渭、新疆 ABH 和锦屏水电站等工程在复杂不良地层(特别是高地应力岩爆)中的超前地质预报和预防处理施工,分析了岩爆发生的时空特征规律、三维地震波法和微震监测在 TBM 隧道中的应用价值,提出了 TBM 高地应力岩爆的防控目标、准则、技术方案及“装备—掘进—支护”三者协同的“3-4-3-3”分级防控理论技术体系,总结了相关不良地层(特别是岩爆地层)的实际施工经验。文献[17-20]针对大瑞铁路高黎贡山隧道的地质特征(软弱破碎带卡机、高压突涌水等施工风险)、工程重难点和 TBM 应用情况,提出了高适应性 TBM 的针对性设计方案,研究了 TBM 超前地质预报、钢筋排和钢拱架联合喷射混凝土及时支护、复杂地质 TBM 掘进参数等系列技术。文献[21-24]在充分调研国内外众多 TBM 工程基础上,结合西部区域的地质特点,探讨了 TBM 隧道施工适应性及选型技术,提出了 TBM 选型和针对性措施等结论

与建议。

一系列的研究和应用,有力地促进了我国 TBM 技术的发展,但针对超长深埋高地应力隧道 TBM 建造技术,需要更为深入的研究。本文较为系统地分析了超长深埋高地应力下 TBM 隧道施工技术的主要问题,提出了超长深埋高地应力 TBM 隧道“防岩爆、控变形、防坍塌、治涌水”需要考虑的关键因素,给出了各种不良地质隧道的掘进控制、支护理念和应对措施,并对 TBM 智能掘进技术进行了分析与展望,以期对超长深埋高地应力隧道 TBM 施工提供一些借鉴和指导。

1 超长深埋高地应力 TBM 隧道的主要问题

TBM 类型可分为敞开式、单护盾、双护盾三种类型。敞开式 TBM 并不是没有护盾,只是它的护盾是分块式、非全圆、可径向伸缩的护盾,而单、双护盾 TBM 的护盾为全圆形刚性护盾。同时,敞开式 TBM 与双护盾 TBM 主要是依靠撑靴提供掘进推力,而单护盾 TBM 依靠管片结构提供掘进推力;当双护盾 TBM 采用单护盾形式掘进时,其掘进推力也只能靠管片结构提供掘进推力。随着装备技术的发展,在护盾式 TBM 的基础上,结合盾构具有主动稳定掘进面特点,目前已开发出了利用螺旋输送机和中心皮带出渣的“双模”TBM,既可实现单护盾 TBM 模式下的掘进,也可实现土压平衡方式的掘进。此外,结合喷锚支护的特点,开发出了敞开式“双结构”TBM,既可采用管片支护,也可采用锚喷支护。

隧道工程选择 TBM 工法,首先,要能够发挥 TBM 施工速度的优势,按隧道围岩分级,Ⅱ—Ⅳ级围岩 TBM 的施工速度可以达到钻爆法的 4 倍以上,但不良地质会经常导致 TBM“被卡”“被困”^[25-28],严重影响施工效率,一般认为若隧道的 V、Ⅵ级围岩占比超过 15%,就不宜采用 TBM 施工;其次,要结合隧道长度、设置辅助坑道条件、工期要求等综合分析选择 TBM 法的合理性。另外,隧道所处的环境对人员体能、设备效能的影响,也是选择 TBM 工法的重要因素。对于超长深埋高地应力隧道,不可避免会遇到各种各样的不良地质,如何解决不良地质中 TBM 施工的问题就成为关键。

对于超长深埋高地应力隧道,需要高度重视 TBM 本身属性对施工的影响:①稳定掘进面的缺陷性,与现代盾构技术不同,TBM 不具备主动稳定掘进面的能力;②支护施作的滞后性,无论是敞开式 TBM,还是护盾式 TBM,从刀盘前端到护盾尾部这一区域的围岩是处于无支护状态;③超前处置的局限性,由于护盾内及紧邻护盾尾部位布置了拱架安装机、锚杆装机、内置皮

带的主梁等,致使超前钻孔、超前管棚、超前注浆等都受到制约。

1.1 地质勘察问题

TBM工法的高效优势极其依赖地质条件,因此地质勘探和超前地质预报非常重要^[29-33],需要尽可能地在工程前期与施工中摸清前方各种不良地质的性态、位置、规模。超长深埋隧道一般都是穿越艰难险峻的高山地区,甚至是高原高寒地区,受客观条件的影响,其野外地勘难度极大;而高空物探,其准确性不足以支撑TBM工法选择。在TBM环境下干扰源多,影响地质超前预报的便捷性与准确性;同时,TBM掘进速度较快,日进度可达60 m以上。因此,及时性是评价TBM地质超前预报效用的关键性指标。

除上述原因导致隧道工程的地质不确定性外,岩土体还具有压硬性(变异性)、应变与应力路径关联性等特点。许多TBM隧道因地质不确定性与过程的多变性带来了不少问题,在国内,如锦屏电站隧洞工程因岩爆问题弃用TBM、掌坞河引水隧洞因变形问题最后改为钻爆法等;在国外,如莱索托引水工程遇到突涌问题,被迫重新改造TBM;圣哥达基线隧道TBM遇到的复杂地质,造成工期、造价极大地超出了预期。

1.2 岩爆问题

岩爆与其他岩体破坏形式不同,其显著特征是爆落的岩块具有明显的弹射性。岩爆的冲击能量对隧道施工人员与施工设备具有更大的伤害,且不确定性更明显;但岩爆发生后,围岩自身又具有很好的稳定性。隧道工程发生岩爆的原因复杂,与岩体的应力状态、强度、储能特性及岩体结构完整性相关,也与隧道的开挖方式相关^[34-39]。到目前为止,还没有一套完整的理论可以准确地解析岩爆机理;大量工程经验表明,发生岩爆至少应具备两个条件:①岩体具有较好的储能特征;②隧道围岩的强度应力比相对较低。

在超长深埋高地应力隧道中,对于具有较好储能特性的岩体,无论是硬质岩,还是软质岩,都有发生岩爆的可能。由于TBM设备庞大,且沿隧道轴向长度可达200 m以上,TBM法应对岩爆不可能像钻爆法一样撤离设备与人员躲避岩爆。岩爆不仅会严重降低TBM施工效率、造成支护结构破坏、增大工程造价,甚至可能会造成TBM设备毁坏、人员伤亡等重大事故。如引汉济渭秦岭隧洞,在长达十多公里隧洞段频繁发生岩爆(其中强烈岩爆段近5 km),尽管在技术上取得了突破,确保了人员与TBM设备的安全,但TBM的施工进度仍受到较大的影响,且工程费用大幅增加。

1.3 软弱围岩的变形问题

超长深埋高地应力隧道的软弱围岩,突出的问题

是隧道变形。高地应力软弱围岩的变形属于压剪破坏形式,表现出明显的塑性蠕变与流变特征,称之为挤压变形;超长深埋隧道还经常会遇到深层火成岩的蚀变,发生挤压性变形。挤压性变形的特点为在一定的支护下“隧道变而难塌,岩体碎而不散”。

高地应力软弱围岩隧道采用钻爆法时,由于支护方法不当或支护刚度不协调,会发生隧道断面侵限或支护结构破坏的现象,支护结构常需拆换,造成工程成本加大,并严重影响工期。采用TBM法除了上述问题外,还经常会出现刀盘“卡死”、护盾“抱死”的现象^[40-46]。如青海引大济湟隧洞工程,场区实测地应力达32 MPa,双护盾TBM的护盾经常被“抱死”、管片结构严重错台,不得不采用辅助工法进行TBM脱困。

1.4 地层坍塌问题

破碎地层主要有断层破碎带和节理密集带两类。在破碎地层中采用钻爆法时,为防止坍塌,一般都要施作超前小导管或管棚,必要时注浆改善围岩性态,为隧道开挖和支护创造条件。采用TBM施工时,破碎围岩表现出“间隙性坍塌,无支难稳”的特征。如掘进面破碎岩体塌落,致使刀具异常破坏,甚至刀盘“被卡”;如护盾顶部破碎岩体坍塌,导致护盾收缩或护盾“被困”^[47-49],造成支护不能安装到位。在大瑞铁路高黎贡山隧道,因连续遇到破碎岩体坍塌,致使多段的初支净空不满足设计要求。

1.5 富水构造带突涌水问题

富水构造带大致可以划分为4种类型:①富水断层带,对于正断层,破碎岩块间少有细颗粒充填,极易发生突水;对于逆断层,其上盘一般为强烈破碎岩体,极易产生突泥涌水。②富水褶皱,无论是背斜还是向斜,其岩体都相对破碎,挤压作用越严重,岩体越破碎;富水褶皱一般为向斜构造,隧道穿越核部时突水问题将会极其突出。③节理密集带,岩体节理发育、且相互切割,致使岩体破碎,一般情况下节理密集带是一个相对封闭的含水构造,其风险为突发坍塌伴随涌水,但其涌水量一般会较快的衰减直至枯竭。在以上三类富水构造带的明显特征是“突涌坍塌相伴,不加固就成灾”。④基岩的构造裂隙,基岩的构造裂隙对隧道的稳定性基本无影响,一旦发生突水,其流量与水压的衰减速度慢,其危害性不容忽视。

深埋隧道的富水构造带水压高,在采用TBM施工时,富水构造带会造成TBM刀盘“压死”、TBM盾壳“抱死”、撑靴支撑力不足等问题,恶化隧道施工环境,严重影响TBM掘进,甚至造成人员伤亡、TBM被掩埋和损毁。在引大济湟、引红济石、引汉济渭秦岭隧洞和高黎贡山隧道都发生过不同程度灾害,给

TBM 施工带来极大困难。引汉济渭秦岭隧洞在较为完整花岗岩地段因基岩裂隙突水,险些发生 TBM 水淹事故。

2 隧道解重构理念与方法

古代人们修建隧道的方法是采用“火烧水浇”或“金属凿鑽”挖出岩土体,借助岩土体的自稳能力而建造。随着社会的发展,人类用“打眼放爆”的方式开挖岩土体,同时利用木材“支撑”修建隧道,见图 1,这就是传统意义上的“矿山法”。随着喷锚技术发展和发挥围岩承载能力理念的提出,“支护”替代“支撑”,“新奥法”由此而生,新奥法原理见图 2。图 2 中, P_a 为围岩径向压力, U_a 为围岩径向位移。从图 2 可以看出,“新奥法”本质上仍然是荷载-结构关系,只是“坍塌荷载”变为难以量化的“围岩压力”,体现了允许围岩发生一定径向位移的理念。



图 1 矿山法时代的隧道

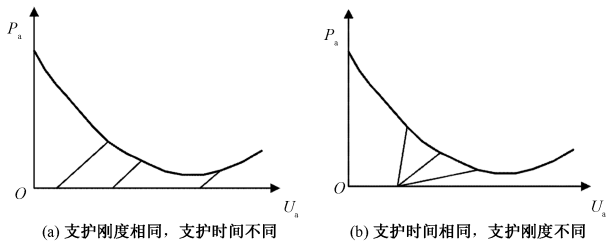


图 2 新奥法原理图

隧道开挖必然会使自然状态下的地层在隧道周边一定范围内岩土体(以下借用传统的概念,称为“围岩”)赋存环境发生改变,特别是围岩的应力与围岩的性态等,这一过程称为“解构”。隧道修建过程中需要采用打设锚杆、喷射混凝土、架设拱架等技术措施(以下借用传统的概念,称为“支护”),改善和控制围岩赋存环境的变化,这一过程称为“重构”。从广义上看隧道工程的修建,解构与重构不能完全割裂划分为两个阶段,因此将围岩赋存环境变化的区域统称为隧道场,把致使围岩赋存环境变化的过程统称为解重构。隧道场的概念示意图见图 3。

隧道力学理论重点关注隧道场的应力状态变

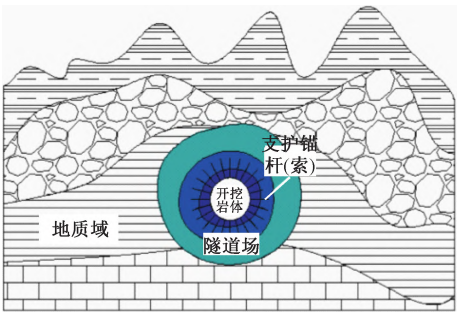


图 3 隧道场的概念示意

化^[50](图 4, A、B、C 为三个不同半径上的测点;曲线 1、2、3 分别为 A、B、C 点的径向切向应力),而隧道工程现场重点关注支护结构的形态变化(如周边收敛、拱顶下沉)。如何使理论与现场达到相互统一协调,是隧道场解重构理论方法的出发点与落脚点。

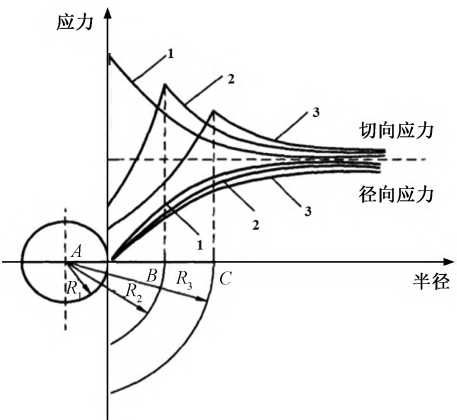


图 4 隧道场围岩应力变化规律

岩土体的性态与金属等晶格构造材料的性态具有显著差异^[51],岩土体基本服从摩尔-库伦准则,而金属材料基本服从屈瑞斯卡准则,见图 5。图 5 中, c 为黏聚力, ϕ 为摩擦角。由于岩土体是由颗粒堆积和胶结而成,具有明显的压硬性和拉脆性,即岩土体受压后的强度与刚度都会提高;而土体基本没有抗拉能力,岩体的抗拉强度一般为受压强度的 1/10 左右。此外,岩土体又具有双强度特征,具有黏聚力与摩擦力两重特征,在其受力过程中,通常是黏聚力发挥作用早于摩擦力,且黏聚力衰减较快、摩擦力衰减较慢,表现出岩土体的硬化与软化特性。因此,隧道场解重构理论方法,就是要研究如何利用岩土体的压硬性与双强度特征。

在大瑞铁路高黎贡山 TBM 隧道段现场,联合武汉大学进行了原位测试,测试断面和测点布置见图 6,得到重构过程中隧道场围岩应力、围岩波速度以及围岩位移的变化规律等^[52]。高黎贡山隧道全长 34.5 km,由正洞和贯通平导组成,正洞与平导的线间距为 30 m;进口段正洞采用直径 9.03 m 的敞开式 TBM 施工,平导采用直径 6.39 m 的敞开式 TBM 施工,该段隧道

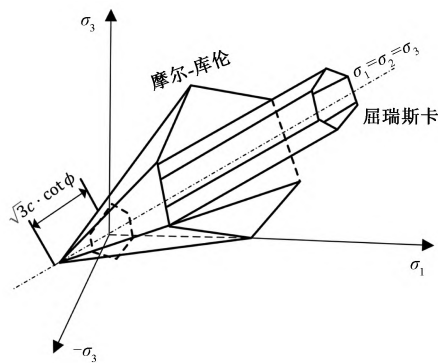


图 5 岩土体与金属材料屈服准则

围岩为燕山期花岗岩,隧道埋深 250 m,按 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》^[53]划分测试段围岩为Ⅲ级,隧道断面及支护设计见图 7。现场测得此处水平最大主应力 σ_1 为 11.68 MPa,水平最小主应力 σ_3 为 3.47 MPa,水平最大主应力方向与洞轴线交角 26.96° 。同时,进行了岩样单轴及常规三轴压缩试验,得到高黎贡山此隧道花岗岩的偏应力-应变曲线,见图 8。由图 8 可见,通过计算分析得到单轴抗压强度为 91.14 MPa,弹性模量为 41.42 GPa,泊松比 0.16,黏聚力为 19.68 MPa,内摩擦角为 52.4° 。

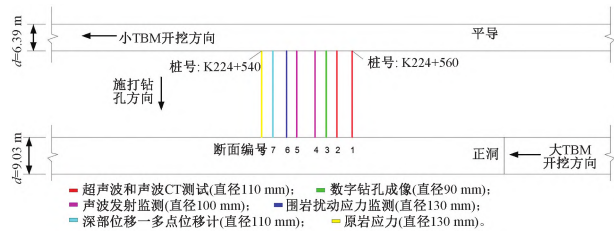


图 6 测试断面及测点布置

实测主应力变化值见表 1。在正洞解重构过程中,当 TBM 掘进面离测试面约 12 m 时(相当于 1.3 倍洞径),主应力发生变化明显;当掘进面超过测试面 15 m 后(相当于 1.6 倍洞径)主应力调整趋于稳定。

根据摩尔-库伦准则,假定围岩的 c 、 ϕ 值不变,结合现场实测数据,隧道场解重构过程中的围岩力学状态关系见图 9,以自然状态下为基点进行安全性评价, TBM 掘进面超过测试面 2.5 m 时,其安全性下降了 37%;TBM 掘进面超过测试面 15 m 时(测试面支护已完成),其安全性仅下降了 25%。

实际上隧道场解重构过程中,围岩的性态会发生

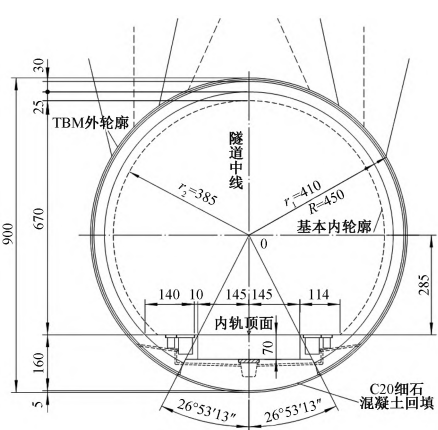


图 7 TBM 隧道断面与支护(单位:cm)

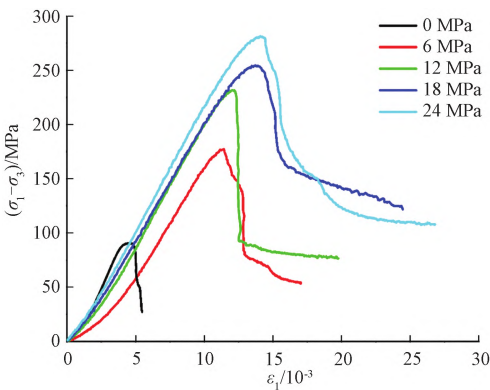


图 8 花岗岩偏应力-应变曲线

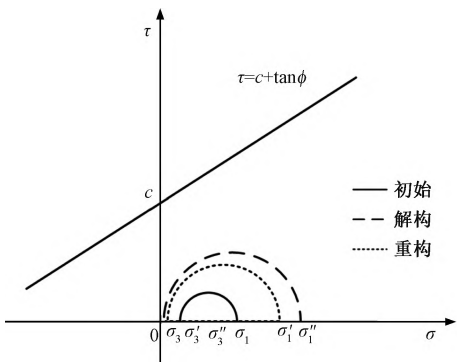


图 9 围岩应力变化的安全性分析

变化,特别是围岩的 c 、 ϕ 值会发生变化。围岩的波速度值是反映岩土体综合性能的重要指标,隧道场围岩波速度变化见图 10。图 10 中,红色曲线表示掘进面与测试断面的距离为 15 m;绿色曲线表示掘进面与测试断面的距离为 $-5 \sim 15$ m;蓝色曲线表示掘进面与测试断面的距离为 20 m。由图 10 可见,如掘进面距离

表 1 解重构过程中距离洞壁 2 m 的围岩最大/最小主应力变化值

主应力/MPa	TBM 掘进面与测试面的距离/m												
	30	20	15	12	5	2.5	0	-2.5	-5	-7.5	-10	-15	-20
σ_1	11.68	11.44	12.65	12.94	15.66	19.72	22.02	23.33	22.57	22.02	21.38	20.24	20.52
σ_3	3.47	3.44	3.24	3.21	2.62	1.92	0.76	0.37	0.59	0.71	0.71	0.99	0.95

测试面大于 15 m,围岩的波速度基本无变化,随着掘进面不断接近测试断面,围岩波速度显著下降,既是掘进面超过测试面 20 m,围岩波速度依然出现了较大下降,且影响深度(距离隧道壁)近 9 m。解重构过程围岩深部位移见图 11。由图 11 可见,围岩位移明显是 TBM 掘进面距测试面为-5~10 m 的范围,且深部稳定后,隧道浅部围岩还会发生位移。

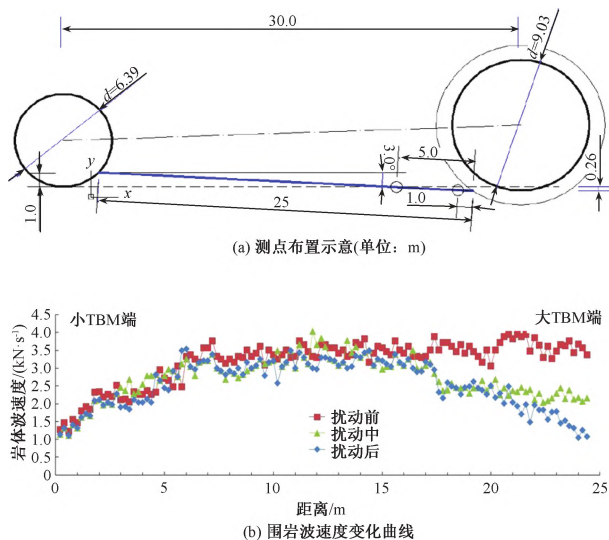


图 10 隧道场围岩波速度变化

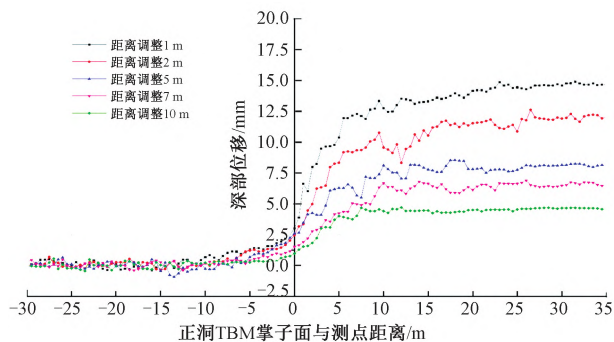


图 11 解重构过程围岩深部位移

由于围岩的黏聚力衰减较快,而摩擦力衰减较慢,假定围岩在发生可控变形内围岩的摩擦角不变,可把围岩波速度的变化率(v/v_0)当作黏聚力的变化率。根据摩尔-库伦准则,综合围岩的应力与性态,以围岩自然性状况的性态为基点,高黎贡山 TBM 隧道在解重构过程中,当 TBM 掘进面超过测试断面 2.5 m 时,其安全性减小了 68.3%;掘进面超过测试断面 15 m 时,其安全性减小了 68.8%,见图 12。

以上研究表明,现代隧道工程理论,特别是计算方法不考虑围岩性态的变化,只关注围岩应力的变化是不够的,特别是深埋隧道。隧道场解重构理论方法的

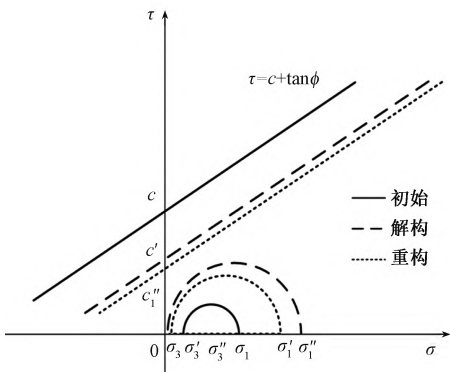


图 12 隧道解重构安全性分析

出发点就是要揭示隧道场解重构过程中围岩应力和性态的变化规律,建立综合考虑效率、经济的隧道工程技术体系,达到主动控制隧道场围岩性态的变化、诱导隧道场围岩应力的调整。

3 超长深埋高地应力 TBM 隧道岩爆对策

一般情况下,超长深埋高地应力隧道选择 TBM 工法时,隧道穿越的围岩大部分完整性较好且岩石强度较高,其岩爆问题将会较为突出。正如前述,岩爆发生与否主要与围岩的应力状态、围岩内部微裂纹和岩体的储能能力有关,岩爆具有明显的不确定性和弹射性,对 TBM 施工人员与设备的安全威胁极大。因此,TBM 隧道施工应从“监测预警-装备配套-掘进控制-支护防治”协同考虑岩爆的防控问题。

3.1 岩爆预测与预警

3.1.1 岩爆预测

超长深埋高地应力隧道的岩爆预测是 TBM 隧道可研与设计阶段的关键性问题,不仅关系到 TBM 的选型及其针对性设计,更涉及到隧道工期目标制定的可行性、工程投资概算的合理性。

目前世界上对隧道岩爆的预测基本上都是按照强度应力比确定,并根据式(1)计算值,将岩爆划分为轻微、中等、强烈与极强烈四个等级。我国勘察设计阶段基于岩石强度应力比的爆等级评价依据见表 2,也是我国现行 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》^[53]对岩爆等级的划分标准,并依此对不同等级的岩爆确定相应的支护参数。

$$S = \frac{R_c}{\sigma_m}$$

(1)

式中: S 为强度应力比; R_c 为岩石饱和单轴抗压强度,MPa; σ_m 为原态地层最大主应力,MPa。

表 2 基于岩石强度应力比的岩爆等级划分

判别阈值	岩爆等级
$4 < R_c/\sigma_m \leq 7$	轻微岩爆(Ⅰ)
$2 < R_c/\sigma_m \leq 4$	中等岩爆(Ⅱ)
$1 < R_c/\sigma_m \leq 2$	强烈岩爆(Ⅲ)
$R_c/\sigma_m \leq 1$	极强岩爆(Ⅳ)

岩体破坏且脱离母岩的岩块发生弹射,才属于岩爆的范畴,而表 2 仅给出了岩体的强度破坏原因,而不能表达其弹射能力。正因为如此,在大量的实际隧道工程中一般性的岩石强度破坏问题,也可能被描述为岩爆问题,如岩体结构面因剪切强度不足而破坏,尽管这一过程会产生微震或声发射现象,很显然这一破坏形式不具备岩爆的弹射性。

20 世纪 90 年代,一些学者与技术人员通过对太平驿电站引水隧洞的花岗岩室内试验^[54],获得了岩石的三轴应力-应变试验曲线,并结合岩石破坏时的声发射现象,提出了从能量的角度判别岩爆的准则,即用岩石破坏后释放的弹性能与破坏过程中非弹性变形所消耗的能量的比值 W (以下称为能耗比)为

$$W = \frac{W_e}{W_p}$$

(2)

式中: W_e 为岩石破坏后释放的弹性能; W_p 为岩石破坏过程中消耗的非弹性能。

不同围压下花岗岩的应力-应变曲线与声发射测试图见图 13。

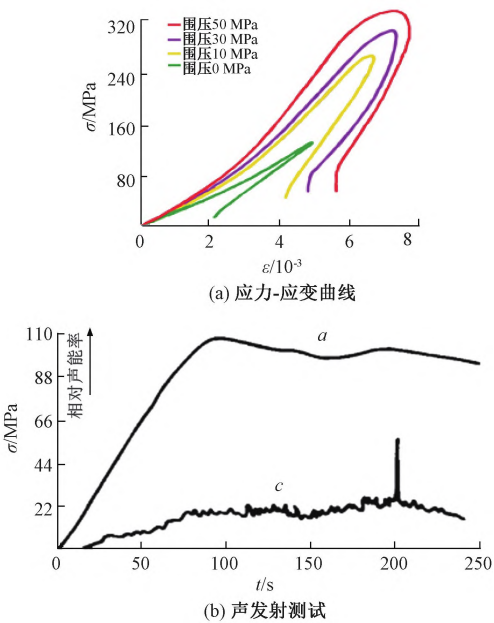


图 13 不同围压下花岗岩的应力-应变曲线与声发射测试图

显然当能耗比等于 1.0 时,岩体破坏后区释放与消耗的能量相等,没有足够的能量使岩块产生弹射,因而即使破坏也不会产生岩爆。考虑岩体裂纹的产生与

扩展导致破坏的过程中,还会因摩擦等原因消耗能量,故可将此值取为 1.5 作为是否发生岩爆的临界值。太平驿引水隧洞花岗岩在不同围压下的能耗比见表 3。由表 3 可见,鉴于太平驿隧洞的岩石性态,如果围压大于 5 MPa,则不会发生岩爆。从隧道工程角度分析,由于隧道场解构后围岩表面的径向应力为零,当前技术方法要提供 5 MPa 的围压几乎是不可能。因此,重构仍难以杜绝岩爆的发生,尤其是因 TBM 支护的滞后性更难杜绝岩爆的发生。

表 3 太平驿引水隧洞花岗岩在不同围压下的能耗比

围压/MPa	0	5	10	20	30	40	50
W	3.7	1.5	1.3	1.1	0.9	0.95	0.8

设计阶段的岩爆预测,除了目前普遍采用的原位地应力测试和室内岩石强度试验外,还应当通过三轴应力-应变试验得到岩体的储能特性,只有二者相结合才能做出更可靠的预判。

3.1.2 岩爆的预警

超长深埋高地应力隧道的岩爆预警是 TBM 隧道施工阶段的关键性问题。然而,施工过程中不可能在现场频繁地进行地应力、岩体强度与储能特征测试,岩体内部微裂纹也是难以获得的。因此,施工现场要精准预报岩爆是极其困难的。在隧道场解重构过程中,岩爆有一个孕育过程,在设计预测的基础上,通过监听对岩体破裂声进行岩爆预警是有可能的,这样有利于人员和设备在岩爆发生前进行规避。在太平驿引水隧洞施工中,主要是通过“听声音”进行岩爆预警,即通过“耳听”岩体内部裂纹扩展时声音的频度、清脆或沉闷进行判断,有效地规避了岩爆发生时人员伤亡与设备毁坏。随着现代技术的发展,冯夏庭、唐春安等做了大量研究,开发了微震监测技术,为岩爆的预警提供了更准确高效的技术与方法。

微震监测系统是通过监测岩体破裂时微震事件的各项指标,建立理论模型,经过工程现场的不断迭代逼近进行岩爆预警。一般通过微震事件的聚集位置判断岩爆位置,通过微震事件的能级和频度判断岩爆的强弱,引汉济渭秦岭隧洞微震监测团队基于 24 h 内微震事件提出的岩爆预警评判准则见表 4。

表 4 基于微震监测的岩爆预警评判

岩爆等级	微震参数				
	频次	矩震级	能量/kJ	超标事件分布范围/m	超标事件数量/个
轻微	<10	<1.0	<30	>30	0~3
中等	10~30	1.0~2.5	30~100	20~30	>3
强烈	30~60	2.5~3.5	100~800	10~20	>8
极强	>60	>3.5	>800	<10	>15

引汉济渭秦岭隧洞全长 89.3 km,隧洞最大埋深 2 050 m,近 35 km 的隧洞段采用直径 8.05 m 的敞开式 TBM 施工。隧洞穿越的岩性主要为石英岩、花岗岩与闪长岩,岩石平均单轴抗压强度 185 MPa,最高强度达 307.9 MPa,实测洞身最大水平地应力超过 60 MPa,与隧洞轴线的交角约 70°。为此,针对 TBM 隧道施工特点所研制的微震监测系统,克服了 TBM 设备各种条件的制约与信号源的干扰,尽管持续不断的中等与强烈级岩爆严重影响了施工进度,且工程造价剧增,但确保了岩爆段未发生人员伤亡与设备毁坏事故。

3.2 岩爆时空规律

TBM 隧道发生岩爆的时空规律,对如何防控岩爆具有重要地指导意义。对引汉济渭秦岭隧洞中相对完整的 788 组岩爆数据分析,得到了岩爆的发生时间(掘进后的时间)、发生位置(到掌子面的距离)和影响范围三个方面的 TBM 隧道岩爆特征规律^[55]。

不同等级岩爆发生时间统计见表 5。由表 5 可见,90% 以上岩爆发生在 TBM 掘进后 24 h 以内,且 22.3%~40% 岩爆发生在 TBM 掘进后 10 h 以内,而掘进后 10~24 h 时段内发生岩爆的频率最高,约 9% 的强烈岩爆发生在掘进后 24~48 h。因此,岩爆的重点防控时间应在 TBM 掘进后 24 h 以内。

表 5 不同等级岩爆发生时间统计 %

岩爆类型	不同时间下的岩爆占比				
	$T \leq 10\text{ h}$	$10\text{ h} < T \leq 24\text{ h}$	$24\text{ h} < T \leq 48\text{ h}$	$48\text{ h} < T \leq 72\text{ h}$	$T > 72\text{ h}$
强烈岩爆	22.8	67.6	9.0	0.6	
中等-强烈岩爆	40.0	53.8	2.5	2.5	1.2
中等岩爆	22.3	73.9	1.3	1.9	0.6
轻微-中等岩爆	31.3	63.9	2.4	2.4	
轻微岩爆	34.6	55.4	4.0	3.0	3.0

不同等级岩爆发生位置统计见表 6。由表 6 可见,近 90% 的岩爆发生在与掘进面相距 15 m 以内的范围,且超过 30% 的强烈级以上岩爆发生在距掘进面 5 m 以内,仅有约 10% 的中等以下岩爆发生在距掘进面 5 m 内。将发生在护盾后部的岩爆称为“滞后性岩爆”,轻微-中等级岩爆滞后性明显高于强烈-极强级岩爆。护盾式 TBM 比敞开式 TBM 的护盾长,且护盾式 TBM 的护盾为完整圆筒,刚度大,因此,仅从岩爆的安全防护考虑,护盾式 TBM 具有较大的优势。

表 6 不同等级岩爆发生位置统计 %

岩爆类型	不同位置下的岩爆占比			
	$S \leq 5\text{ m}$	$5\text{ m} < S \leq 15\text{ m}$	$15\text{ m} < S \leq 60\text{ m}$	$S > 60\text{ m}$
强烈岩爆	31.1	68.9		
中等-强烈岩爆	36.3	61.2	2.5	
中等岩爆	9.6	87.2	3.2	
轻微-中等岩爆	16.9	78.3	4.8	
轻微岩爆	9.6	70.1	19.3	1.0

不同等级岩爆发生位置与日进尺关系见表 7。由表 7 可见,TBM 掘进日进尺对岩爆发生时间基本没有影响,但对发生的相对位置影响很大。敞开式 TBM 护盾在轴向长度最短,一般也有 6 m 左右,控制日进尺时,发生在护盾部位的强烈岩爆概率可提高 47.2%。

表 7 不同等级岩爆发生位置与日进尺关系 %

岩爆类型	不同位置下的岩爆占比		
	$S \leq 5\text{ m}$	$5\text{ m} < S \leq 15\text{ m}$	$15\text{ m} < S \leq 60\text{ m}$
强烈岩爆 B	78.3	21.7	
强烈岩爆 A	31.1	68.9	
中等-强烈岩爆 B	92.3	7.7	
中等-强烈岩爆 A	25.4	71.6	3.0

注:A、B 分别为日进尺大于 3 m 与小于 3 m 时岩爆发生位置距离 TBM 掘进面的关系。

3.3 岩爆隧道 TBM 选型

岩爆隧道 TBM 选型主要考虑 TBM 装备对岩爆的防控能力、支护结构或管片结构对岩爆的防控能力、施工效率与经济性等因素。无论是采用哪种类型的 TBM,发生在掘进工作面的岩爆对刀盘、刀具的损伤都是一样的;岩爆地层掘进面不存在稳定性问题,因此,双模 TBM 不应作为岩爆隧道的选项。对于发生在护盾部位的岩爆,由于敞开式 TBM 护盾为浮动式,浮动油缸的压缩具有一定的吸能作用;而单护盾与双护盾 TBM 的护盾刚性相对大,其吸能效果更好。工程经验表明,对于中等及以下的岩爆,护盾具有足够的防控能力;对强烈或极强岩爆,TBM 护盾需要进行特殊设计。

根据 TBM 隧道岩爆的时空规律,正常掘进下,滞后性岩爆发生的概率达 60% 左右。尽管护盾具有较好的防护作用,但由于 TBM 支护滞后的属性,通常隧道在护盾范围内是没有支护的,难以采用技术措施来遏制岩爆的发生或降低岩爆等级。由于 TBM 超前处理的局限性,采用超前支护或超前钻孔释放应力等措施工效低、不经济,且护盾越长施工难度越大;另一方面,在护盾部位发生岩爆,爆落的岩块会聚集在护盾周

围,严重时会造成护盾“抱死”,护盾越长其严重程度越大。因此,岩爆地层一般不宜选择护盾式TBM。

岩爆地层围岩相对完整,岩爆发生后,隧道仍然能够自稳。因此,岩爆隧道的支护主要作用有2个:①防护作用,承受滞后岩爆的冲击力与爆落岩块形成的荷载,以防止弹射岩块落入隧道内对施工人员与施工设备造成伤害;可提高TBM施工效率,其主要形式为连续钢筋排与拱架。②防控作用,从隧道场解重构理论与岩爆机理方面,改善隧道场围岩应力状态,降低其能耗比,从而达到遏制岩爆或降低岩爆的等级,比较经济与效率较高的支护形式为预应力锚杆(索)。因此,岩爆隧道宜优先选择敞开式TBM。

3.4 岩爆地层TBM施工技术

防止岩爆的发生或降低岩爆等级,避免岩爆对施工人员、设备的伤害和支护结构的破坏是TBM隧道施工的关键,TBM隧道施工防控岩爆应从掘进控制、支护技术与避险措施等三方面进行。

3.4.1 掘进参数控制

在TBM掘进参数的控制方面,主要应结合岩爆发生的部位、时间以及岩爆造成的影响等多方面进行控制,主要措施有:

(1)对于掘进面正面发生岩爆的状况,岩爆会造成掘进面不平整,对刀具形成异常损坏,因此掘进时不宜采用高转速。掘进刀具受力波动大,其推力也应适当加以控制,一般情况下刀盘转速不宜高于3 rpm,掘进推力应控制在刀具承载力的70%以内,即采取“低转速、小推力”的模式掘进,尤其是强烈岩爆时更要控制到位。

(2)对于隧道洞壁发生岩爆的状况,结合支护结构防控岩爆的能力,在轻微及中等级别的岩爆段掘进,宜采用“高转速、大推力”模式快速掘进,以避免刀盘“被卡”、护盾“被困”。在强烈及以上级别岩爆段掘进,应控制施工进度,尽可能让岩爆发生在护盾部位,降低支护施工的安全风险和支护结构的破坏率,宜采用“大推力、低转速”模式掘进,有利于防止护盾“被困”。

(3)如采用护盾式TBM施工,由于采用了管片结构,其安全风险相对较低。因此,对于隧道洞壁发生岩爆的状况,应采用“高转速、大推力”模式快速掘进。如采用双护盾TBM施工,应采用单护盾模式掘进。

3.4.2 支护技术

防控岩爆是岩爆隧道的支护主要目的。护盾式TBM的支护就是管片衬砌,敞开式TBM的支护主要为锚杆、挂网、钢筋排、喷射混凝土与钢拱架等,但应结合微震监测结果进行分级支护。根据岩爆的形成机理

以及隧道场解重构理论方法,应优先考虑采用预应力锚杆(索)构建围岩三维应力状态。此外,强化岩爆孕育过程中围岩裂纹产生或扩张的能量消耗,降低能耗比。

轻微岩爆的岩块多为薄片状,块体较小,且弹射冲击能量小,基本上不会造成施工装备的伤害。因此,支护主要以防护为主,一般采用“短锚+网片+喷混”支护。围岩出露护盾后,应立即挂网,并施作锚杆,一般应采用胀壳式锚杆,长度一般不大于2.5 m。同时,要做到支护速度与TBM掘进速度同步,以防止岩块弹射伤及作业人员。由于敞开式TBM的特点,喷射混凝土工序一般在后部进行。轻微岩爆段TBM的施工进度,一般只有非岩爆段的80%左右。

中等岩爆的岩块大多为片状或薄块状,并具有一定体积,岩块弹射具有一定的冲击能量,极易对施工人员造成较大伤害,砸坏施工装备。因此,支护应以防控为主,一般采用“锚杆+钢筋排+钢拱架+喷混”支护。施工步骤为,先在护盾内置的储存仓预置钢筋排,钢筋排一端由钢拱架支撑,另一端由护盾支撑,钢筋排随TBM掘进连续滑出,当达到一个施工步距或半个施工步距时,立即架设钢拱架;然后,在钢拱架和钢筋排防护下施作预应力锚杆,锚杆应布置在两榀拱架之间,锚杆长度一般不大于4.5 m。同样,喷射混凝土工序将在后部进行,如拱架背后存在较多岩爆形成的岩块,喷射混凝土完成后,还应进行背后注浆固结岩块。中等岩爆段TBM的施工进度一般只有非岩爆段的60%左右。

钢拱架的间距和型号应根据等级内岩爆冲击能量的大小进行调整,岩爆频度与冲击能量越大,要求钢拱架的断面尺寸越大、间距越小。引汉济渭TBM隧洞段在中等岩爆下,钢拱架由原计划的H100调整为H150、钢拱架间距为0.9 m(局部间距为1.8 m)、锚杆为长3.5 m的胀壳式锚杆。

强烈岩爆的岩块大多为块体,其体积相对较大,岩块弹射冲击能量大,会对施工人员、施工设备与支护结构造成较大的伤害与破坏。因此,在强烈岩爆地段采用敞开式TBM施工,必须贯彻“控制进度、强化防控、主动支护”的原则。根据微震监测岩爆预警结果统计分析,强烈岩爆的预警准确率较高,首先,要主动控制TBM掘进的日进尺,充分发挥TBM护盾的岩爆防护能力;其次,要强化“锚杆+钢筋排+钢拱架”的防控能力。尤其要强化预应力锚杆(索)的作用,如NPR锚索等,锚固剂应采用锚固快、锚效高的环氧树脂,大预应力锚索可以对围岩施加较高的围压,并利用锚杆(索)的高耗能特性遏制岩爆或降低岩爆的等级。锚

杆(索)的长度一般不大于 6 m,支护施工工序与中等岩爆段基本相似,但在锚杆(索)施工完成后,应立即在钢拱架间喷射混凝土。强烈岩爆段支护工作量大,要控制日进尺,强烈岩爆段的施工进度为一般岩爆段的 30% 左右。

在引汉济渭 TBM 隧洞工程施工中,强烈岩爆地段采用了 H150 钢拱架、钢拱架间距为 0.45 m(局部间距为 0.9 m)、锚杆为长 3.5 m 的胀壳式锚杆。但因锚杆长度不够、预应力不足,多次发生强烈岩爆致使支护结构破坏。根据敞开式 TBM 的特点,如无滞后性强烈岩爆,即使在护盾范围内发生了强烈岩爆,其支护结构可能仅需承受爆落岩块形成的荷载。

极强岩爆的岩块多为大块体,其体积巨大,弹射出来的岩块冲击能量极大,无论是护盾,还是支护结构都不足以防控极强岩爆,极易造成施工人员与设备的伤害,甚至具有“毁灭性”。如在锦屏水电站隧洞工程施工中,遇到滞后性极强岩爆,导致 TBM 被毁和多人伤亡。因此,在极强岩爆段采用 TBM 施工,必须采用技术措施降低岩爆级别至强烈岩爆以下,按相应岩爆分级进行施工。

岩爆发生机理表明,降低岩爆级别的技术途径有:①主动调整隧道场围岩应力状态,如施作超前钻孔、钻爆法施工超前导洞等释放应力;②改善隧道场围岩性态,如施作超前预应力锚杆(索),降低围岩的能耗比。在 TBM 隧道中,采用钻爆法施工超前导洞,效率低、成本高,且风险大;施作超前钻孔相对容易,可在孔内进行爆破造成岩体局部破裂,则有可能降低岩爆等级,是比较安全的方法。

在引汉济渭 TBM 隧洞工程,采用水锤钻进行了 3 次超前钻孔释放应力试验。以第 2 次超前钻孔为例,本次钻孔段里程为 K40+768.5—K40+816.0,在隧洞隧道拱部 85° 范围打设了 5 个孔径 102 mm、孔深 46~47.5 m、倾角 5°~7° 的超前钻孔,总计耗时近 3.5 d。分析同段落钻孔前后微震监测的单日最大能量释放量与单日累计能量释放量见图 14。由图 14 可见,同一区段钻孔后,其单日微震事件单次最大释能量较钻孔前减少约 61.9%;单日微震事件的累计最大释能量较钻孔前降低了 85.2%;超前钻孔释放应力对降低岩爆等级有明显的效果。目前该工法只有一个工程的经验,需要在其他工程中进一步验证。

何满潮等^[56]的研究与发明,NPR 锚索不但可以提供恒阻力,而且具有较强的吸能潜力。在隧道解重构过程中,如施作超岩前预应力锚索,既可以较好地维持隧道场围岩处于三维应力状态,又可以在岩爆孕育过程中消耗应变能,降低围岩能耗比,从而达到遏制或

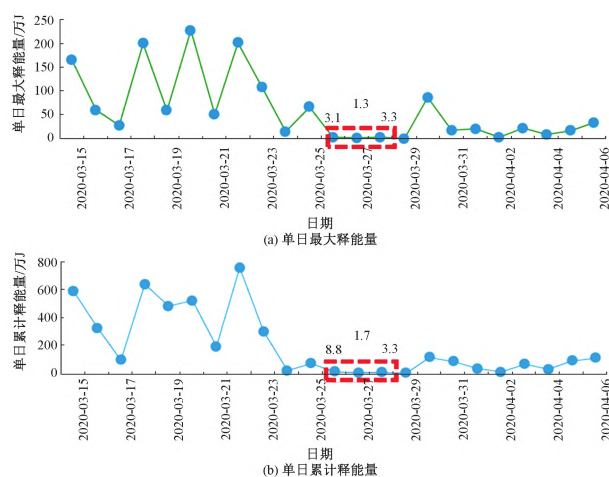


图 14 同地段超前钻孔前后单日最大、累计释能量对比

降低岩爆等级的目的。因此,超前 NPR 锚索可以作为另一种降低爆等级的技术措施。

3.4.3 施工避险措施

岩爆隧道采用 TBM 施工时,为规避滞后性强烈岩爆造成的设备损坏与人员伤亡,应采取如下避险与应急措施:

- (1) 岩爆地段作业人员应穿戴钢头盔、防弹衣、防砸手套、防砸鞋等防护用品,并对设备的重要部件进行防护。
- (2) 岩爆地段的支护以快速为主,并尽可能采用机械作业代替人工作业,减少作业人员数量、缩短支护施工时间。
- (3) 充分用好微震监测的预警,预警表明可能会发生强烈岩爆时,作业人员应撤离进入专设的防护区,待解除预警后再恢复施工。
- (4) 如出现大规模滞后性岩爆,应暂停施工,人员立即撤离至 TBM 安全保护区。同时,TBM 设备应储备必要的医疗用品、饮用水、干粮等应急物资。

3.5 岩爆隧道 TBM 针对性设计

TBM 法与钻爆法有明显的不同。钻爆法在岩爆预警后,设备人员可方便撤离,TBM 是大型施工装备,庞大且造价高,即使预知会发生岩爆,也不可能将 TBM 设备撤离,为保障施工人员与设备的安全,满足建设质量、工期、投资的要求,岩爆隧道 TBM 装备必须进行针对性设计。

- (1) TBM 刀盘除按常规强度刚度设计外,还应按抗冲击荷载进行设计。护盾要按防控强烈岩爆要求进行针对性设计。
- (2) 岩爆会挤压刀盘,爆落的岩块甚至会导致刀盘“被卡”,岩爆地层的 TBM 工作扭矩要求大于一般岩石地层,其驱动系统也应进行针对性设计。
- (3) 必须配置机载微震监测系统,TBM 控制室应

能全天候显示微震事件,以便 TBM 主司机及时形象地了解微震事件发生的频度、能级及部位,实时掌握岩爆预警信息。

(4)对于极强岩爆需要进行超解决前钻孔或施作超前锚杆(索),TBM 需要配备高效率的超前钻机。采用敞开式 TBM 时,对于强烈岩爆需及时喷射混凝土,TBM 需要配置前置式喷射混凝土系统。在此特别提出,目前的 TBM 设计,仍未解决其锚杆钻机打径向孔的问题,致使锚杆效能不能得到很好地发挥,有待相关专家学者进一步研究。

(5)岩爆地层的 TBM 设计与一般岩石地层不一样。敞开式 TBM 的护盾是浮动支撑的,发生在护盾部位的岩爆会导致护盾内缩;同时,随着 TBM 掘进,爆落的岩块脱离护盾后会挤压钢筋排,从而导致支护不能紧贴隧道开挖轮廓,致使隧道空间变小,支护结构“侵限”。因此,TBM 刀盘开挖直径需进行针对性设计。

4 超长深埋高地应力 TBM 隧道软岩变形对策

高地应力软岩隧道的变形控制是世界级难题。钻爆法施工时,变形控制不到位会导致隧道断面侵限、支护结构破坏等,严重影响隧道施工效率,增加工程造价,甚至造成安全风险,见图 15。当然软岩隧道大变形是一个相对概念,高地应力下软岩隧道是否发生大变形与隧道支护体系的强度刚度等密切相关。国内外学者的理论与实践表明^[57-58],在不考虑膨胀岩这一特殊原因外,软岩隧道的大变形主要是因为高地应力作用下的岩体剪切变形。TBM 隧道施工发生大变形时,除了像钻爆法一样产生侵限、支护破坏外,TBM 隧道开挖尺寸不像钻爆法一样可以根据需要随时调整,还会造成 TBM 护盾被“抱死”等问题,严重影响 TBM 的施工效率。尽管 TBM 隧道地质条件一般相对较好,但超长 TBM 隧道很难完全规避软岩变形问题。因此,必须正视 TBM 隧道高地应力软岩变形问题。在万家寨、引大济湟、引红济石等引水隧洞中,高地应力软岩变形问题都非常突出,TBM 施工受到了极大影响。

4.1 高地应力软岩变形的 TBM 应对理念与方法

软岩的定义一直是国内外争论的问题,大体上可分为描述性定义、指标化定义和工程定义。国际岩石力学学会将软岩定义为单轴抗压强度在 0.5~25 MPa 的岩石;在隧道工程领域,国际上也提出了“工程软岩”的概念,是指在工程力作用下产生显著塑性变形的岩体,强调了软岩的工程属性。按照新奥法原理,为



图 15 高地应力软岩隧道变形

抵抗软岩变形,需要支护提供抗力,如抗力不足,软岩变形会导致隧道结构变形超出允许值而产生侵限,甚至导致支护结构破坏(发生挤压性破坏)。根据隧道场解构理论方法与岩土体的压硬性,可以归结到软岩刚度不足且软岩刚度与支护刚度不协调,致使围岩与支护的变形协同而不协调。

4.1.1 软岩变形控制理念与方法

软岩在自然状况下受到约束处于稳定状态,但随着隧道场解构,其赋存环境发生了变化,致使发生挤出变形。要控制其变化:①采用强大的支护结构进行“强支硬顶”限制变形、抵抗变形;②采用可收缩或压缩的“让压支护”,被动地让围岩发生部分变形,通过支护结构变形消耗部分挤压形变能,最终达到抗变;③采用主动支护,主动提高软岩刚度,改变软岩的应力状态,使软岩刚度与拱架喷射混凝土支护刚度相匹配,最终达到控变。当然,对于采用 TBM 施工的隧道,还需考虑“挤压变形”是否会造成护盾被“抱死”的问题。

兰渝铁路木寨岭隧道与渭武高速公路木寨岭隧道,采用两种不同理念进行施工。兰渝铁路木寨岭隧道全长 19.2 km,为双洞单线隧道,隧道洞身最大埋深约 700 m;岩性主要为板岩及炭质板岩,最大水平主应力为 27.16 MPa,与隧道轴线的夹角为 14°~19°,强度应力比为 0.2。渭武高速公路木寨岭隧道全长 15.2 km,最大埋深 629 m,设计速度 80 km/h,双向双洞 4 车道,主要岩性同样为板岩及炭质板岩。

铁路木寨岭隧道最困难的岭脊段采用的施工方法,先行施工贯通导洞应力释放,采用“三台阶+仰拱”的开挖方法,采用传统的“锚喷网+拱架”被动支护方式,支护为三层,施作二次衬砌,见图 16。为了达到隧道断面不侵限、隧道整体结构稳定的要求,在隧洞断面修改为圆形的情况下,单线铁路隧道开挖直径达 15.78 m。首层支护收敛量达 724 mm,第二层支护收敛量达 227 mm,第三层支护收敛变形量仍然达到 140.5 mm。尽管该施工方法解决了“锚喷网+拱架”支护频繁拆换的难题,并取得了明显的效果,但其施工进

度每月仅 18 m。

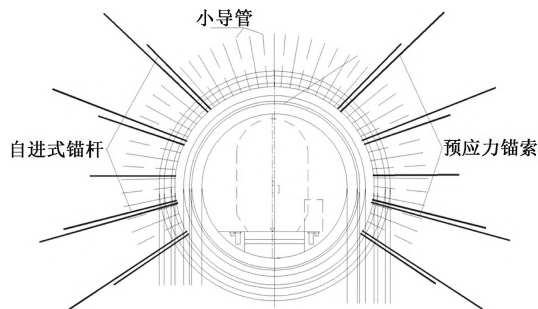


图 16 兰渝铁路木寨岭铁路隧道结构断面与岭脊段围岩

高速公路木寨岭隧道开展了“主动支护为主+被动支护协同”的控制围岩大变形试验研究^[59], 总体思

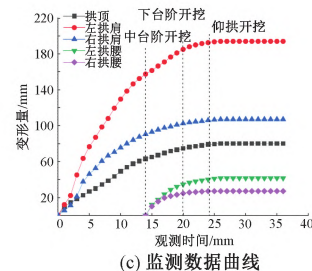
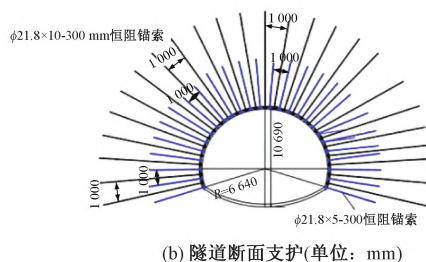
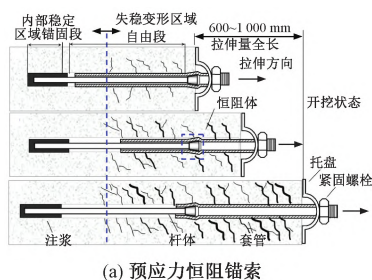


图 17 渭武高速木寨岭隧道恒阻锚索控制变形

4.1.2 软岩大变形的预测

预测大变形的目的是为了确定该类隧道解重构的开挖方法与支护参数。目前,国内外关于隧道软岩大变形的预测,基本上都是建立在利用软岩强度应力综合比 S 值(考虑了岩体完整系数影响)的基础上,并以此对隧道大变形进行定性分级。

$$S = \frac{R_c K_v}{\sigma_m} \tag{3}$$

式中: K_v 为岩体完整系数。

我国铁路隧道对于软岩大变形分级也是依据围岩强度应力比进行划分的。TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》^[53] 和 Q/CR 9512—2019《铁路挤压性围岩隧道技术规范》^[60] 中将大变形分为三级,等级越高变形越大,但分级标准有所差异,具体分级标准详见表 8。

表 8 隧道大变形分级对比

规范	大变形等级	围岩强度应力比
铁路隧道设计规范 ^[53]	I 级	0.25~0.50
	II 级	0.15~0.25
	III 级	<0.15
铁路挤压性围岩隧道技术规范 ^[60]	一级	0.3≥ S >0.2
	二级	0.2≥ S >0.15
	三级	S ≤0.15

路是采用“三台阶+仰拱一体化”开挖法。主动支护采用 40 T 预应力恒阻锚索 (NPR 锚索), 长度分别为 5.3、10.3 m, 纵向按 0.6 m 间距长短间隔布置, 环向间距为 1.0 m; 被动支护为“钢拱架+网喷混凝土”, 拱架为 H175 型钢, 喷混凝土厚度 250 mm, 见图 17。锚索的施工时间安排在隧道开挖后、被动支护施工前, 第一时间对围岩施加预应力, 及时构建三维应力状态, 主动改善围岩性态, 提高了围岩的刚度(改变了围岩的 c 、 ϕ 值)。监控量测数据表明, 隧道的最大收敛量小于 300 mm(单侧), 隧道场围岩刚度与钢架网喷支护刚度相匹配, 从而隧道场的变形整体相协调, 且被动支护结构未见破坏状况, 月施工进度可达 50 m。

对于 TBM 隧道, 除了要对围岩变形进行分级外, 还必须要对围岩变形是否会造成护盾被“抱死”进行判断, 为 TBM 是否采用扩挖技术提供依据。通过对高地应力软岩变形卡机事故的分析, 并结合监控量测的数据, 提出了挤压性围岩卡机判识准则, 见图 18。

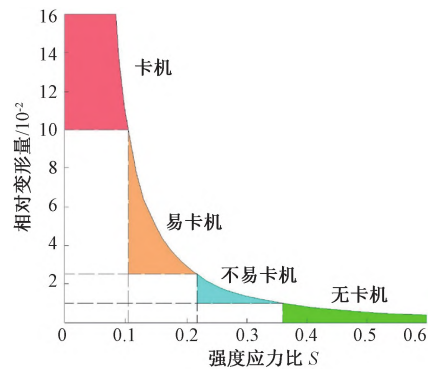


图 18 挤压性围岩卡机判识准则

4.1.3 TBM 隧道软岩变形控制的总体思路

由于 TBM 支护的滞后性, 无论是敞开式 TBM, 还是护盾式 TBM, 在护盾范围内施作支护难度大、效率低, 因此, 高地应力软岩 TBM 隧道变形的控制原则为“空间换时间、快掘早支护、主动控变形、监控调刚度”。以刀盘刀具的扩挖拓展变形空间, 防止围岩变形致使护盾“抱死”; 快速掘进以减少护盾内无支护段

的暴露时间,尽早提供施工支护条件;尽快施工预应力锚索(杆),达到主动控制变形的目的;通过监控量测分析隧道被动支护的变形趋势,以被动支护允许变形量的60%作为控制条件,必要时增加预应力锚索(杆)提升围岩刚度,使围岩刚度与被动支护的刚度相协调。

4.2 高地应力软岩隧道TBM选型

超长深埋高地应力软岩隧道选择何种类型TBM应主要考虑如下因素:①软岩变形的量级是否会造成护盾很容易“抱死”;②采用何种支护方式能够控制隧道的变形,保障支护结构不发生破坏;③从施工效率与经济性进行评估。

双护盾TBM的撑靴是直接作用在无支护的围岩上,高地应力软岩隧道不应选择双护盾模式。单护盾TBM采用的管片结构,其掘进推力依靠管片支护提供,因此,从这一点分析选择单护盾TBM是有利的。对软岩大变形隧道,护盾式TBM的护盾相对于敞开式TBM较长,未支护的围岩裸露时间也长,护盾更容易被“抱死”。结合引大济湟工程的经验,大变形等级达到Ⅲ级时,不宜选择护盾式TBM。

要充分考虑“锚喷支护”的控变能力与管片结构“强支硬顶”的抗变能力。对比欧洲圣哥达基线隧道与布伦纳基线隧道,早期施工的57 km的圣哥达基线隧道采用了敞开式TBM施工,由于岩爆和大变形问题,施工效果没有达到预期。正在建设的64 km的布伦纳基线隧道,为解决同样的岩爆与大变形问题,正线隧道在奥地利端采用了两台单护盾TBM,支护结构为“400 mm厚管片结构+470 mm厚二次衬砌”,致使TBM开挖直径达10.34 m(隧道内净空直径仅为8.1 m);在意大利端采用了两台双护盾TBM,支护结构为“450 mm厚管片结构+580 mm厚二次衬砌”,TBM开挖直径达10.65 m,其效果有待进一步验证,但从经济上分析,国内是难以接受的。

综上所述,根据隧道场解重构理论方法,从变形控制技术、施工可控性以及工程经济性综合分析,高地应力软岩TBM隧道宜选择敞开式TBM。

4.3 高地应力软岩隧道TBM针对性设计

高地应力软岩隧道的早期变形速率大,极易发生TBM护盾“被困”现象。若TBM装备施作支护能力不够,还会造成隧道断面净空不足、支护结构破坏等。因此,应用于高地应力软岩隧道施工的敞开式TBM需要进行针对性设计。

为了避免TBM护盾“被困”,TBM开挖直径需要针对性地考虑护盾段无支护的变形量,或者将刀盘弧形区的滚刀刀座进行专门的设计(图19),使之能增大TBM开挖直径,达到“以空间换时间”的目的。

主动支护是控制变形量的关键,应重点考虑TBM装备施作主动支护能力与快捷性问题:①要具有施作长锚索(杆)的能力;②应满足围岩出露护盾后能及时施作主动支护,真正实现从发挥围岩的承载能力到挖掘围岩的承载能力。此外,还需要配备前置式混凝土喷射系统。

对Ⅲ级大变形的隧道,TBM应设计主驱动与刀盘抬升装置。特殊设计可以抬升150~250 mm,结合刀具扩挖技术,TBM开挖轮廓可以扩大300 mm以上。

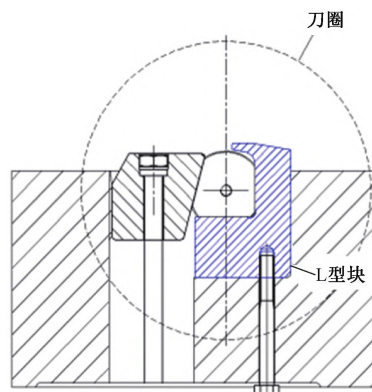


图19 边刀扩挖示意

4.4 高地应力软岩隧道TBM施工技术

高地应力软岩隧道TBM施工应紧紧围绕防止护盾“被困”与变形侵限两大难题建立技术体系,同时建立TBM“被困”后的脱困技术。

4.4.1 TBM掘进技术

超长深埋高地应力软岩隧道TBM施工时,应充分利用其“变而难塌,碎而不散”的特征,防止TBM的护盾“被困”。

采用“大推力、高转速”模式掘进,刀盘转速宜采用5~6 r/min,贯入度应在10 mm以上,实现快速掘进,以减少护盾部位未支护岩体的暴露时间,降低护盾“被困”可能性。

敞开式TBM掘进时,应利用浮动油缸顶升护盾至顶部,尽量使其紧贴开挖轮廓,减小变形速率。

在进入“大变形”地段前,应及时调整刀具使其具有一定的扩挖能力;对于较长段落的大变形地层,必要时要启用主驱动与刀盘提升装置。这两项技术措施主要是降低护盾“抱死”的可能性。

4.4.2 TBM支护施工技术

采用敞开式TBM施工时,围岩出露护盾一定距离后,应立即采用环氧树脂锚固剂施作径向预应力锚杆(索),提高围岩刚度和构建围岩三维应力状态。围岩出露护盾的距离满足设计的钢拱架间距时,及时安装钢拱架支撑钢筋排,完成一个施工步距后立即喷射混凝土。

及时进行监控量测,分析“拱架+喷混凝土”支护的变形趋势,判识其变形是否会超出允许值。若超过允许值应加强预应力锚杆(索),进一步提高围岩刚度,确保围岩刚度与“拱架+喷混凝土”支护刚度匹配,达到整体变形的协调。

采用护盾式 TBM 施工时,应及时回填豆粒石,并根据管片结构的变形状况,确定是否要及时注浆充填。

4.4.3 TBM 脱困技术

高地应力软岩隧道,可能会造成 TBM 护盾“被困”致使 TBM 无法向前掘进,此时需要采用辅助方法进行 TBM 的脱困。首先通过隧道顶部开孔开挖小导洞,然后利用小导洞进行两侧同步扩展,解除围岩对护盾的挤压,扩挖过程中应边扩挖边支护,确保扩挖过程的安全。扩挖完成后,TBM 慢速向前掘进,并同步安装拱架和钢筋网。TBM 脱困后,应回填上部空腔。

5 超长深埋高地应力 TBM 隧道破碎地层对策

超长深埋高地应力隧道采用 TBM 施工时,如何安全穿断层破碎带及节理密集带等不良地层是关键^[61]。与高应力软岩隧道地层变形不同,破碎地层最明显的特征是“坍塌交替,无支不稳”。

5.1 破碎地层对 TBM 施工的影响

在破碎地层采用 TBM 施工,由于 TBM 本身的属性,主要有以下几方面的影响。

(1)刀盘“被卡”。在断层破碎带或节理裂隙密集带,由于局部坍塌会在刀盘周边及前方形成块状堆积体,不规则交错岩体卡在滚刀与掌子面、刮渣口与周边岩体之间,致使刀盘无法转动而影响掘进。此外,岩块和松散砾状渣料压紧运输皮带,致使刀盘无法转动。

(2)护盾“被困”。由于破碎地层在护盾区域持续坍塌,导致大量松散岩块与渣体堆积在护盾周边,使护盾“被困”,TBM 无法向前掘进。

(3)锚喷支护施作不到位。采用敞开式 TBM 施工,松散堆积体挤压护盾不影响掘进,但会影响后部支护的施作,导致支护侵限,严重时可能导致支护破坏和堆积体坠入隧道内。同时由于支护背后大量的松散堆积体和可能存在空洞,需要及时固结和回填。

(4)撑靴不能有效工作。利用撑靴提供掘进推力的 TBM,撑靴处围岩破碎、整体强度低,或者因坍塌无法支撑撑靴,致使撑靴不能提供掘进所需的推力。同时若两侧围岩强度差异大,导致撑靴两侧的反力差异大,则 TBM 掘进方向难以控制。

总之,在破碎地层中采用 TBM 施工,无论发生哪

一种情况,都会直接影响 TBM 的施工效率,甚至会存在较大的安全隐患。

5.2 破碎地层 TBM 针对性设计

破碎地层 TBM 应主要考虑如何提升其“防卡、去抱”能力的针对性设计,如超前处理能力、刀盘扭矩、撑靴部位处理等。

超前钻注设备设计,传统 TBM 装备在主机区不能常态化配置钻注系统,目前已开发出利用主机大梁空间布置跟管式钻机。正常状况下将钻机隐藏在大梁内,不影响其他施工工序,一旦需要使用,钻机就能很快伸出,并固定在可升降拼接式环形导轨上,且钻孔时就位快、定位准,可用于超前钻注或打设管棚,解决传统设计超前处理效率低、干扰大的问题。

破碎地层 TBM 的快速支护极其重要,需要对钢筋排布设、拱架、喷射混凝土、锚杆等施工装置进行针对性设计,对主驱动的扭矩也应进行针对性设计。

为确保撑靴能及时提供有效的掘进推力,在撑靴支撑部位,当破碎围岩坍塌规模较小时,TBM 应具备喷射混凝土回填功能。当破碎围岩坍塌较大时,应采取模筑混凝土回填。因此,在覆盖撑靴工作区域,需设置支模、拆模装置。

刀盘开挖直径的设计,与岩爆地层类似,破碎地层的局部坍塌会致使敞开式 TBM 的护盾收缩与钢筋排下沉,导致支护难以安装到位;而采用刀具扩挖方式不能解决这一问题,因此需要进行针对性设计。而对于护盾式 TBM,由于护盾是刚性的,且管片是在护盾内安装,因此不存在安装的侵限问题。

5.3 破碎地层 TBM 施工技术

超长深埋高地应力隧道在破碎地层段采用 TBM 施工时,首先应判断是否会发生刀盘“被卡”、护盾“被困”,即确定是否需要进行超前加固。通过工程案例的总结分析,建立以围岩完整性和超前地质钻孔渗水量为判断依据的“卡机”围岩判识准则,见图 20。

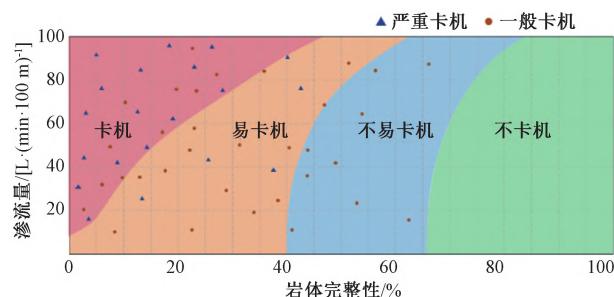


图 20 破碎围岩“卡机”判识准则

5.3.1 破碎地层 TBM 施工的超前处理

对于会造成刀盘“被卡”、护盾“被困”的破碎围岩,必须进行超前预处理加固围岩。根据破碎围岩坍

塌可能造成的后果,处理方式可采用刀盘内或护盾尾超前加固。

(1)刀盘内超前加固。对于会造成刀盘“被卡”的破碎围岩,需要在刀盘内对破碎岩体进行快速、低强度的固结。刀盘内超前加固,一是通过盘形滚刀的刀孔,打设长度3~5 m 径向玻璃纤维锚管,二是通过刀盘与护盾间的切口打设长度2~3 m 斜向玻璃纤维锚管;通过玻璃纤维锚管进行超前化学注浆,注浆材料一般采用聚氨酯类化学浆液,确保刀盘不被“卡死”。

(2)护盾尾超前加固。对于会造成护盾“被困”的破碎围岩,需要进行护盾尾的超前加固。超前加固的主要方法,通过护盾尾拱部斜向前方打设超前管棚,并通过管棚进行注浆加固。注浆材料一般为快凝的硫铝酸盐水泥浆,受设备的制约,其倾角相对较大(一般为 $5^{\circ}\sim 9^{\circ}$),管棚的长度宜控制在15~20 m,打设范围为拱部不小于 90° 。当不能成孔时,可采用钻杆代替管棚并进行注浆,必要时还需进行刀盘内注浆。

5.3.2 破碎地层TBM掘进及支护技术

TBM掘进通过破碎地层是建立在破碎状况不恶劣或已进行超前预加固的基础上,掘进过程应遵循“短进尺、强支护、连续均衡掘进”的方针,要防止长时间停机致使地质条件进一步恶化,加大不良地质处治难度。施工过程要重点加强掘进参数和及时支护的管控。

掘进参数的控制,根据破碎地层的特点,TBM施工应尽可能地提高掘进速度,并减小对围岩的扰动,应采用“低转速、大推力”的方式掘进,一般刀盘转速不宜超过3 r/min。

支护连续紧跟,对于破碎地层,围岩露出护盾后,应及时施作“连续钢筋排+拱架”支护,随掘随支防止破碎体坠入隧道内,必要时要紧跟喷射混凝土。

在破碎围岩坍塌导致撑靴不能有效工作时,应进行特殊处理。如撑靴部位处围岩局部坍塌时,采用喷射混凝土或喷射高强快凝砂浆快速封闭围岩,并填充塌腔;如坍塌范围较大时,则应在施作“拱架+钢筋排”支护后,安设模板进行模筑混凝土充填塌腔。

5.3.3 破碎地层TBM掘进通过后的处理

TBM掘进通过破碎地层后,必须处理支护背后存在松散的塌落岩块,以保证支护结构的稳定性。

径向固结注浆,在破碎地层采用TBM施工,无论是敞开式TBM,还是护盾式TBM,其支护背后一般存在松散的塌落岩块。因此,要进行径向固结注浆,浆液选择一般为普通水泥浆,径向注浆深度根据松散岩块的堆积厚度确定,以保证初支背后密实。

初期支护的排水,一般情况下,隧道设计中很少考

虑初期支护承受地下水压力,TBM掘进破碎地层时,需要进行径向固结注浆,可能会造成初期支护承受额外的水压。因此,应打设泄水孔排水,防止初期支护承受地下水压而破坏。

6 超长深埋高地应力TBM隧道富水构造带对策

超长深埋高地应力隧道在富水构造带采用TBM直接掘进,其最大威胁是高压地下水突涌。在富水基岩裂隙中,由于水压的突然释放,尽管围岩完整不至发生坍塌问题,但也会发生淹机事故。富水构造破碎带,在水动力的作用下,破碎岩体会类似于泥石流一样发生突涌现象,对TBM施工会产生极大的危害,影响TBM施工效率,甚至会导致机毁人亡等重大事故。

6.1 富水断层破碎带与节理裂隙密集带预处理

在富水的断层破碎带或节理裂隙密集带采用TBM直接掘进时,必须先进行超前加固,一般采用护盾尾部帷幕注浆或护盾顶部洞室帷幕注浆。

护盾尾部帷幕注浆的基本方法与破碎地层的护盾尾超前注浆相类似。注浆材料应为快凝材料,如水泥-水玻璃双液浆、硫铝酸盐水泥浆或化学浆,为防止注浆造成护盾“被困”,护盾部位注浆要采用高压低流量的方式进行。

护盾顶部洞室帷幕注浆。要先在护盾顶部施工洞室,基本方法与挤压性围岩脱困相似;洞室施工完成后,沿洞室周边打设超前长管棚,并行帷幕注浆,以保证TBM掘进不发生坍塌与突涌现象。

由于受TBM隧道空间的制约,超前处理工效相对较低,若遇大规模、长距离的富水构造破碎带,可采用钻爆法施作迂回坑道,通过迂回坑道对TBM前方富水构造破碎带进行超前处理。

6.2 富水基岩裂隙处理

正如前述,一般情况下基岩裂隙水突出不会影响隧道的稳定性,且基岩裂隙几何尺寸相对小、隐蔽性强,一般难以超前探测准确。因此,对于富水基岩裂隙,通常是在TBM掘进通过后,视情形进行处理。

在TBM上坡(顺坡)施工发生基岩裂隙突水时,由于隧道可顺坡排水,一般不会影响TBM的掘进,不需要立即进行堵水。通常情况下,根据地下水流失对环境及后续施工工序的影响程度,在掘进完成后进行必要的注浆堵水处理。处理时根据裂隙的产状与涌水点分布,遵循“先外围后核心,快凝固堵裂隙”的原则。

TBM下坡(反坡)施工发生基岩裂隙突水时,在排水能力能满足不发生水害的情形下,一般不需要进行及时处理,其后续处理与上坡施工相同。如排水能力

不足,应利用超前钻注系统及时处理,通常是在护盾尾部打设超前注浆孔进行迎水强制注浆,注浆材料应为快凝材料或化学注浆材料,并尽可能降低涌水量,为后续施工创造条件。

6.3 富水构造带 TBM 针对性设计

对于富水构造带,TBM 的针对性设计应围绕排水设备与超前钻注设备两项内容进行。排水设施总抽排能力宜按照隧道设计预测的分段最大涌水量考虑,并预留富余能力,TBM 超前处理能力应按其处理效率与经济性综合考虑。

TBM 装备应配置用于全断面超前处理的钻机和注浆系统,受 TBM 属性的影响,其超前注浆加固与堵水施工干扰大、实施周期长,超前钻孔与注浆系统设备的超前能力不宜短,一般其超前钻孔深度不应少于 40 m。同时,注浆设备应当具备双液注浆功能。

TBM 后配套随机自带的应急泵站,应采用高压电机、大流量、大扬程水泵,尽可能减少应急时的中途泵站数量,必要时可配合施工布局采用分级抽排。TBM 的排水管宜按照涌水量计算配置大小管径,通常采用小管径排水,出现较大突涌水时启用大管径。

6.4 富水构造带 TBM 掘进与支护技术

TBM 在富水基岩裂隙处的掘进与支护,一般按照完整基岩方式进行掘进与支护。TBM 在富水破碎带的掘进与支护,应按照“先堵水加固、后排水降压、再快掘强支”的原则进行。

在超前注浆堵水与加固围岩后,需在隧道的顶部或 TBM 两侧打设超前排水孔,尽可能降低水压对 TBM 掘进的影响。每一注浆循环的掘进必须预留一定厚度的注浆体作为下一注浆循环的止浆墙。

TBM 掘进与一般破碎带加固后的方式一样,应采用“低转速、中等推力”的方式匀速掘进,控制对加固体的扰动,并尽快对注浆加固体进行支护,防止形成新的渗水通道。

对于富水破碎带,在超前注浆堵水与加固后,一般采用“型钢拱架+钢筋排+喷射混凝土”的方式进行支护,但必须利用前置喷射混凝土系统进行及时封闭。

7 色季拉山铁路隧道 TBM 工法选择与选型

山岭隧道的施工方法基本上有钻爆法和 TBM 法两类。TBM 工法在一般地质条件下具有施工速度快、安全性相对高的优势,且如前所述,对于局部不良地质 TBM 施工也有相应技术。总体来讲,超长深埋高地应力隧道选择 TBM 工法施工是国际趋势;但是遇到重大不良地质条件时,其整体施工速度会明显下降。因此,对可能严重影响 TBM 效率发挥的富水破碎带、大变形地层等,如增设辅助坑道对这类不良地质采用钻爆法

处理,在经济、工期等方面具有明显优势时,则应选择采用“钻爆法+TBM 法”组合模式。由于 TBM 价格昂贵,且一般应在一个隧道工程中基本摊销,TBM 隧道的造价一般均会高于钻爆法。总之,超长深埋高地应力隧道的工法选择,应从具体隧道工程的地质与环境条件入手,综合考虑工程安全、建设工期、环境保护、劳动保护及工程经济等因素进行比选。

7.1 案例分析

大瑞铁路高黎贡山隧道位于云南省保山市,全长 34.5 km,最大埋深 1 155 m,为单线铁路隧道。隧道地处印度洋板块与亚欧板块碰撞挤压带,地质极为复杂,具有“三高四活跃”的特点。隧道进口端约 21.2 km 主要采用钻爆法施工,设贯通平导、斜井 1 座、竖井 2 座等辅助坑道。隧道出口端主要采用 TBM 施工,结合出口端车站隧道设置与 TBM 始发掘进的需要,正洞出口约 741 m 采用钻爆法施工,其余 12 546 m 采用直径 9.03 m 敞开式 TBM 施工;贯通平导 10 623 m 采用直径 6.39 m 敞开式 TBM 施工。出口端地层岩性以燕山期花岗岩、白云岩、白云岩夹石英砂岩为主,但 TBM 隧道段需穿越 4 条总长约 200 m 的大断层和两段总长 347 m 的蚀变岩带,还需穿越长度达 840 m 的物探异常带,其纵断面见图 21。

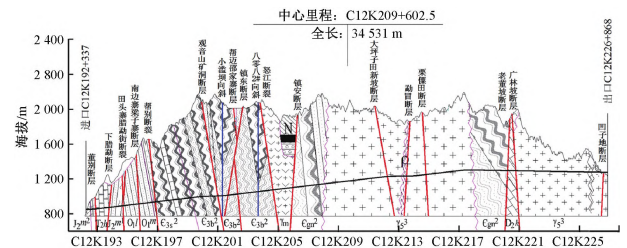


图 21 高黎贡山隧道纵断面

截至 2021 年 6 月 30 日,出口端正洞隧道已施工 7 429 m,正洞 TBM 自 2018 年 2 月 1 日始发共掘进 6 688 m,期间在富水断层破碎带、富水节理裂隙密集破碎带、全风化岩层、蚀变岩段共发生 14 次 TBM“被卡”“被困”事件,处理耗时达 432 d;TBM 掘进的各级围岩长度见表 9,实际揭示 IV、级 V 围岩占比达 74.4%,TBM 综合掘进进度为 170 m/月。若不考虑脱困时间,TBM 实际掘进进度为 265 m/月,高黎贡山隧道正洞 TBM 掘进段围岩与进度统计见表 9。

表 9 高黎贡山隧道正洞 TBM 掘进段围岩与进度统计

设计与实际	围岩级别/m				实际掘进 进度/ (m·月 ⁻¹)	综合掘进 进度/ (m·月 ⁻¹)
	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	V		
设计围岩	310	3 830	2 138	410	265	170
实际揭示围岩	150	1 556	2 361	2 621		

注:TBM 遭遇 14 次卡机,脱困用时 432 d。其中,仅方案研究与决策用时达 45 d。

假如隧道出口段不采用 TBM 法施工,而是采用钻爆法施工,参照该隧道钻爆法工区各级围岩的实际进度,同样的时间,钻爆法进度只有 3 698 m,相差2 990 m;若要达到目前采用 TBM 施工进度,则应增加一个钻爆法工作面进行正洞施工,也就是需要增设 1 个辅助坑道。根据高黎贡山隧道所处的地形地貌条件,辅助坑道长约 4 500 m,按同期开工建设,辅助坑道显然还未进入正洞施工。目前正洞 TBM 施工段还剩余5 858 m,按综合掘进指标 170 m/月分析,TBM 可能还需掘进时间 34.5 月;若全部 12 456 m 隧道采用钻爆法,按 TBM 施工周期完成施工,则需设置增设 2 个辅助坑道,共计 5 个作业面组织施工,而辅助坑道的长度均不小于 4 500 m。无论从经济方面,还是工期都处于劣势,且施工组织难度更大,不利于弃渣与环境保护。因此,高黎贡山隧道出口端选择 TBM 工法是合理的。

根据对 TBM 的认知,在 V 级围岩占比达 39.2% 的情况下仍采用 TBM 工法施工是不可能的。因此,在超长深埋隧道进行工法选择时,既要考虑其地质的适应性,也要考虑隧道本身所处工程环境特征,特别是超长深埋高地应力隧道的辅助坑道设置条件。

为进一步比较分析,以高黎贡山隧道出口端仅有的一次迂回导坑解困 TBM 为例。平导 TBM 在“10.22”遇到富水蚀变岩,造成坍塌及 TBM 部分被掩埋,打设超前探孔时“顶出钻杆”后挤出的蚀变岩泥柱见图 22。为解决 TBM 被困问题,在平导 TBM 后部打设迂回导坑,迂回导坑平行正洞(净距 60 m),开挖面积 18.6 m²,长 594 m。同区段导坑钻爆法与正洞 TBM 法的施工进度对比表见表 10。



图 22 高压地层挤出的蚀变岩泥柱

表 10 同区段导坑钻爆法与正洞 TBM 法进度对比

工法	(长度/掘进速度)/[m·(m·d ⁻¹) ⁻¹]			综合进度/ (m·月) ⁻¹
	Ⅲ	Ⅳ	V	
正洞 TBM 隧道	34/11.3	160/9.4	394/4.9	104.3
迂回导坑钻爆法	98/4.1	268/2.6	228/2.7	84.9

注:①统计区段,TBM 遇到了两次蚀变岩透镜体造成卡机,脱困用时达 70 d;而钻爆法没有遇到该类地层;②在钻爆法Ⅳ围岩段,因施工组织需要,修建了断面面积 33 m²、长 48 m 的扩大段,其进度仅为 1.4 m/d。

从表 10 可以看出,尽管迂回导坑开挖面积仅为正洞开挖面积(64 m²)的 29.2%,但同类围岩下 TBM 法的日进度也是钻爆法的 2~3 倍。即使考虑 TBM 两次遇到的蚀变岩卡机脱困用时,其综合进度仍高出钻爆法 22.8%。此外,从揭示的地质情况看,即使正洞与迂回导坑只相距 60 m,其地质条件差异也很明显,迂回导坑没有遇到蚀变岩地层,且正洞 V 级围岩的长度是导坑的 1.73 倍,也说明了该隧道地质的复杂性。

该案例进一步说明,超长深埋高地应力隧道应综合分析各种不良地质造成 TBM “被卡”“被困”的可能性及严重程度等,并结合辅助坑道设置条件、环境保护要求等,理性地认知 TBM 工法的地质适应性,只有这样才能正确评价 TBM 工法的合理性。

7.2 色季拉山隧道工法选择与 TBM 选型

色季拉山铁路隧道全长 37 956 m,最大埋深 1 696 m,轨面最大高程 3 356 m。隧道主要穿越喜山期花岗岩、闪长岩,局部为片麻岩,岩石平均强度在 80~90 MPa,最高强度达 196 MPa;隧道穿越 3 条大断层及 16 条节理密集带,可能存在软弱围岩与花岗岩蚀变带,见图 23。色季拉山隧道围岩统计见表 11。由表 11 可见,色季拉山隧道Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级围岩占比达 95.8%,V、Ⅵ围岩占比仅为 4.2%。

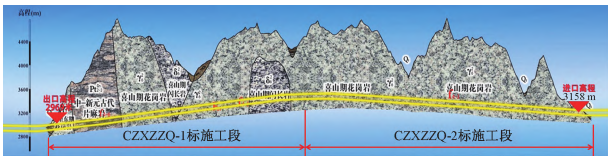


图 23 色季拉山隧道纵断面图

表 11 色季拉山隧道围岩统计

围岩级别	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	V	Ⅵ
长度/m	3 080	2 449	8 785	1 530	75
占比/%	8.1	64.5	23.2	4.0	0.2

从各种级围岩沿隧道长度的分布来看,Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级围岩集中在三段,有利于采用 TBM 施工;而 V、Ⅵ围岩主要集中在洞口段和中部的两个大断层,两个中部大断层具有相对较好的辅助坑道设置条件,因此隧道进出口段与两个大断层采用钻爆法施工也是有利的。根据地形地貌条件,若设置其他斜井或竖井等辅助坑道,不但坑道长度均接近 5 km,且洞口海拔高、新修施工道路长,从工期、经济、施工组织等方面上分析,均不利于采用钻爆法施工。综上所述,该隧道采用“钻爆法+TBM 法”施工,见图 24。

地质钻探实测资料显示,在隧道埋深 1 450.5 m 处的最大水平主应力达 45.52 MPa,与隧道轴线的交

7.2.4 结构设计

色季拉山隧道进口端TBM,针对性地进行了防控岩爆的护盾刚度与强度设计。为了有效地解决滞后性岩爆对施工安全及支护结构破坏问题,尽可能降低工程造价,色季拉山隧道进口段TBM预留了双支护结构安装设备接口。该装备主要用做“拆卸式可调刚度支护+NPR锚注”的施工。总体思路是,强烈岩爆段先在护盾内预拼装可调刚度的钢管片,随着TBM向前掘进钢管片滑出护盾。一方面防止护盾范围内爆落的岩块坠落到隧道内;另一方面防止滞后性岩爆伤害施工人员与设备,待钢管片全部滑出护盾后,立即撑紧钢管片使之安装到位并固定,利用其预留的孔洞打设预应力锚杆(索),如NPR锚索。在TBM撑靴到达钢管片位置前,进行注浆固结钢管片背后的岩块,并拆除钢管片循环利用。

8 结论

超长深埋高地应力TBM隧道修建技术是我国高质量发展阶段面向国家重大需求的新挑战。解决高地应力硬岩岩爆、深埋软弱地层、破碎地层、富水构造带等不良地质地段严重影响TBM施工安全、效率与工程造价的问题,是超长深埋高地应力TBM隧道成功修建的关键技术。同时,要客观地认识TBM在不良地质地段的施工效率,从而达到科学评价TBM工法。本文通过对超长深埋高地应力TBM隧道工程的研究与实践,可得出以下结论:

(1)超长深埋高地应力TBM隧道修建方法应摆脱传统隧道的“荷载-结构”思维模式,全面认知隧道解重构过程中围岩与应力的变化规律,采取主动支护方法,从而构建围岩刚度与支护刚度相协调的隧道场。

(2)超长深埋高地应力隧道采用TBM施工时,对于高地应力硬岩岩爆,应借助微震监测掌握岩爆的时空规律,采取“极强岩爆降等级、强烈岩爆护盾防控、中等岩爆支护防护”主动应对的施工技术。对于深埋软弱地层,采取“TBM扩径开挖以空间换时间、大推力低转速快掘进、主动支护控变形”的技术方法。对于破碎地层,采取“跟踪迭代及时预报、适度超前固结、快速掘进通过、连续支护紧跟”的技术方针。对于富水构造带,采取“物探预报钻探验证、强化超前处理与排水降压、低转速中等推力匀速掘进、支护紧跟及时封闭”的技术。

(3)隧道工程具有地质不确定性、过程的多变性,要求决策必须迅速。随着5G、AI、大数据等技术的发展,建议尽快开展TBM隧道智能技术的研究,进一步完善“地质性态、装备状态、结构形态”的感知技术,提

升TBM支护装备自动化能力。在已有TBM工程大数据基础上,通过智能互联形成大数据平台,着力研究智能算法,逐步推进TBM隧道智能建造技术发展。

参考文献:

- [1] 卢春房,蔡超勋.川藏铁路工程建设安全面临的挑战与对策[J].工程(英文),2019,5(5):49-61.
LU Chunfang, CAI Chaoxun. Challenges and Countermeasures for Construction Safety during the Sichuan—Tibet Railway Project [J]. Engineering, 2019, 5(5): 49-61.
- [2] 朱颖.川藏铁路建设的挑战与对策[C]//2016 学术交流会论文集.北京:人民交通出版社,2017.
ZHU Yin. Challenges and Countermeasures of Sichuan—Tibet Railway Construction [C]//2016 Academic Exchange Conference Proceedings. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [3] 威利斯 D,程方权.TBM 的发展历程[J].水利水电快报, 2013,34(11):24-26.
WILLIS D, CHENG Fangquan. Development of TBM [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2013, 34(11): 24-26.
- [4] BICKEL J O, KUESEL T R, KING E H. Tunnel Engineering Handbook [M]. Boston, MA: Springer, 1996.
- [5] 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.
DU Lijie. Progresses, Challenges and Countermeasures for TBM Construction Technology in China [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(9): 1063-1075.
- [6] 关宝树,关向群.国外隧道工程技术新进展编译集[M].北京:人民交通出版社,2020.
GUAN Baoshu, GUAN Xiangqun. Compilation of New Progress in Foreign Tunnel Engineering Technology [M]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [7] 张照煌,李振,高青凤.全断面岩石掘进机在国内隧道工程中的应用与发展[J].矿山机械,2018,46(7):1-6.
ZHANG Zhaohuang, LI Zhen, GAO Qingfeng. Application and Development of Full-face Rock TBM in Domestic Tunnel Engineering [J]. Mining & Processing Equipment, 2018, 46(7): 1-6.
- [8] 荆留杰,张娜,杨晨.TBM 及其施工技术在中国的发展与趋势[J].隧道建设,2016,36(3):331-337.
JING Liujie, ZHANG Na, YANG Chen. Development of TBM and Its Construction Technologies in China [J]. Tunnel Construction, 2016, 36(3): 331-337.
- [9] 洪开荣.近2年我国隧道及地下工程发展与思考(2017—2018年)[J].隧道建设(中英文),2019,39(5):710-723.
HONG Kairong. Development and Thinking of Tunnels and Underground Engineering in China in Recent 2 Years (From 2017 to 2018) [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(5): 710-723.
- [10] 洪开荣,王杜娟,郭如军.我国硬岩掘进机的创新与实践[J].隧道建设(中英文),2018,38(4):519-532.

- HONG Kairong, WANG Dujuan, GUO Rujun. Innovation and Practice of Hard Rock TBM in China [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(4): 519-532.
- [11] 贺飞, 曾祥盛, 齐志冲. 大直径硬岩掘进机(TBM)在吉林中部城市引松供水工程四标 TBM3 的应用 [J]. 隧道建设, 2016, 36(8): 1016-1022.
- HE Fei, ZENG Xiangsheng, QI Zhichong. Application of Large-diameter Hard Rock Tunnel Boring Machine(TBM) to TBM-3 Section of No.4 Bid of Songhua River Water Conveyance Project in Middle Jilin Province [J]. Tunnel Construction, 2016, 36(8): 1016-1022.
- [12] 赵海雷, 陈馈, 周建军, 等. 引松供水 4 标 TBM 连续穿越灰岩的施工技术研究 [J]. 隧道建设, 2017, 37(3): 354-362.
- ZHAO Hailei, CHEN Kui, ZHOU Jianjun, et al. Research on Construction Technologies for TBM Continuous Boring through Limestone Section of Bid Section No. 4 of Songhua River Water Conveyance Project [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(3): 354-362.
- [13] 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.
- DU Lijie, WANG Jiaxing, HONG Kairong, et al. Accuracy and Applicability of Microseismic Monitoring of Rock Burst in TBM Construction [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 278-285.
- [14] 李玉波. 三维地震波法超前地质预报在引汉济渭工程 TBM 施工中的应用 [J]. 水利水电技术, 2017, 48(8): 131-136.
- LI Yubo. Application of 3D Seismic Wave Advanced Geological Forecast to TBM Construction of Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(8): 131-136.
- [15] 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.
- [16] 严健, 何川, 汪波, 等. 高地温高应力隧道岩爆特征及机制研究 [J]. 铁道学报, 2020, 42(12): 186-194.
- YAN Jian, HE Chuan, WANG Bo, et al. Research on Characteristics and Mechanism of Rockburst Occurring in High Geo-Temperature and High Geo-stress Tunnel [J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(12): 186-194.
- [17] 洪开荣, 冯欢欢. 高黎贡山隧道 TBM 法施工重难点及关键技术分析 [J]. 现代隧道技术, 2018, 55(4): 1-8.
- HONG Kairong, FENG Huanhuan. Construction Difficulties and Key Techniques for the Gaoligong Mountain TBM Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(4): 1-8.
- [18] 陈馈, 杨延栋. 高黎贡山隧道高适应性 TBM 设计探讨 [J]. 隧道建设, 2016, 36(12): 1523-1530.
- CHEN Kui, YANG Yandong. Discussion on Design of TBM with High Adaptability to Gaoligongshan Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2016, 36(12): 1523-1530.
- [19] 杨延栋, 陈馈, 张啸. 复杂地质条件 TBM 研制关键技术及应用 [J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(6): 1052-1058.
- YANG Yandong, CHEN Kui, ZHANG Xiao. Development and Application of Key Technologies for TBM Used in Complex Geological Conditions [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(6): 1052-1058.
- [20] 宋法亮, 赵海雷. 高黎贡山隧道复杂地质条件下敞开式 TBM 施工关键技术研究 [J]. 隧道建设, 2017, 37(S1): 128-133.
- SONG Faliang, ZHAO Hailei. Study of Key Construction Technologies of Open TBM in Complex Geological Conditions: Case Study of Gaoligongshan Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(S1): 128-133.
- [21] 陈叔, 王春明. 川藏铁路 TBM 施工适应性探讨及选型 [J]. 建设机械技术与管理, 2020, 33(4): 38-47.
- CHEN Shu, WANG Chunming. The Adaptability Research and Selection of Sichuan—Tibet Railway TBM Construction [J]. Construction Machinery Technology & Management, 2020, 33(4): 38-47.
- [22] 周路军, 汤印, 卓彬, 等. 川藏铁路隧道 TBM 选型及改进研究 [J]. 铁道标准设计, 2021, 65(4): 117-121.
- ZHOU Lujun, TANG Yin, ZHUO Bin, et al. Research on TBM Type Selection and Improvement of Sichuan—Tibet Railway Tunnel Project [J]. Railway Standard Design, 2021, 65(4): 117-121.
- [23] 王彦杰, 李苍松, 史永跃, 等. 川藏铁路隧道主要不良地质 TBM 适应性分析及施工关键技术 [J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(S1): 470-477.
- WANG Yanjie, LI Cangsong, SHI Yongyue, et al. Adaptability Analysis of TBM in Main Unfavorable Geological of Sichuan—Tibet Railway Tunnel and Its Key Construction Technologies [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S1): 470-477.
- [24] 周路军, 蒋立, 陈军, 等. 川藏铁路隧道 TBM 适应性及钻爆法机械化配套研究 [J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1): 52-56.
- ZHOU Lujun, JIANG Li, CHEN Jun, et al. Research on TBM Adaptability and D & B Construction Machine Matching Technology for the Sichuan—Tibet Railway Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 52-56.
- [25] 温森, 徐卫亚. 深埋隧洞 TBM 卡机事故风险分析 [J]. 长江科学院院报, 2008, 25(5): 135-138.
- WEN Sen, XU Weiya. Risk Analysis on TBM Jamming in Deep Buried Tunnel [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(5): 135-138.
- [26] 赵鹏涛. 深埋长输水隧洞 TBM 卡机事故分析及处理措施

- [J].人民长江,2011,42(17):72-75.
- ZHAO Pengtao. Analysis on Blockage Accident of TBM of Deep-buried and Long Conveyance Tunnel and Countermeasures [J]. Yangtze River, 2011, 42(17): 72-75.
- [27] 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.
- [28] 侯少康,刘耀儒.双护盾 TBM 掘进数值仿真及护盾卡机控制因素影响分析 [J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(8):809-817.
- HOU Shaokang, LIU Yaoru. Numerical Simulations of Double-Shield TBM Tunneling for Analyzing Shield Jamming Control Factors [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(8): 809-817.
- [29] 刘绍宝,张应恩,周如成.超前地质预报在 TBM 施工中的应用 [J].现代隧道技术,2007,44(3):35-41,49.
- LIU Shaobao, ZHANG Yingen, ZHOU Rucheng. Application of Advanced Geology Forecast in TBM Tunneling [J]. Modern Tunnelling Technology, 2007, 44(3): 35-41, 49.
- [30] 彭道富.不良地质条件下 TBM 施工技术对策 [J].世界隧道,1998,35(6):26-28.
- PENG Daofu. Countermeasure against TBM Construction under Poor Geological Conditions [J]. World Tunnelling, 1998, 35(6): 26-28.
- [31] 荣世光.长大深埋型水工隧洞不良地质条件 TBM 施工技术研究 [J].中国水能及电气化,2019(1):18-22.
- RONG Shiguang. Study on TBM Construction Technology of Long Large and Deeply Buried Hydraulic Tunnel under Poor Geological Conditions [J]. China Water Power & Electrification, 2019(1): 18-22.
- [32] 尹俊涛,尚彦军,傅冰骏,等.TBM 掘进技术发展及有关工程地质问题分析和对策 [J].工程地质学报,2005,13(3):389-397.
- YIN Juntao, SHANG Yanjun, FU Bingjun, et al. Development of TBM-excavation Technology and Analyses & Countermeasures of Related Engineering Geological Problems [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(3): 389-397.
- [33] 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.
- [34] 罗志虎,杨鹏飞.锦屏二级水电站 TBM 施工中的岩爆问题分析及对策 [J].岩土工程技术,2009,23(1):52-55.
- LUO Zhihu, YANG Pengfei. Rock-burst and Its Countermeasure of TBM Construction in Drainage Tunnel of a Hydropower Station [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2009, 23(1): 52-55.
- [35] 汤志立,刘晓丽,李超毅,等.深埋 TBM 隧道施工微震监测规律 [J].清华大学学报(自然科学版),2018,58(5):461-468.
- TANG Zhili, LIU Xiaoli, LI Chaoyi, et al. Microseismic Characteristic Analysis in Deep TBM Construction Tunnels [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58(5): 461-468.
- [36] 赵周能,冯夏庭,陈炳瑞.深埋隧洞 TBM 掘进微震与岩爆活动规律研究 [J].岩土工程学报,2017,39(7):1206-1215.
- ZHAO Zhouneng, FENG Xiating, CHEN Bingrui. Activity Laws of Microseisms and Rockbursts in Deep Tunnels by TBM Tunneling [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1206-1215.
- [37] 邓思文,陈恩瑜,马池帅,等.基于地应力实测与能量判据的深埋隧道岩爆预测 [J].人民长江,2016,47(21):62-66.
- DENG Siwen, CHEN Enyu, MA Chishuai, et al. Study on Rock-burst Prediction for Deep TBM Tunnel Excavation Based on Geostress Measurement and Energy Criterion [J]. Yangtze River, 2016, 47(21): 62-66.
- [38] 陈炳瑞,冯夏庭,曾雄辉,等.深埋隧洞 TBM 掘进微震实时监测与特征分析 [J].岩石力学与工程学报,2011,30(2):275-283.
- CHEN Bingrui, FENG Xiating, ZENG Xionghui, et al. real-Time Microseismic Monitoring and Its Characteristic Analysis during TBM Tunneling in Deep-buried Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 275-283.
- [39] 陈炳瑞,冯夏庭,肖亚勋,等.深埋隧洞 TBM 施工过程围岩损伤演化声发射试验 [J].岩石力学与工程学报,2010,29(8):1562-1569.
- CHEN Bingrui, FENG Xiating, XIAO Yaxun, et al. Acoustic Emission Test on Damage Evolution of Surrounding Rock in Deep-buried Tunnel during TBM Excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1562-1569.
- [40] 陈卫忠,肖正龙,田洪铭.深埋高地应力 TBM 隧道挤压大变形及其控制技术研究 [J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2215-2226.
- CHEN Weizhong, XIAO Zhenglong, TIAN Hongming. Research on Squeezing Large Displacement and Its Disposing Method of Weak Rock Tunnel under High in-situ Stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2215-2226.
- [41] 李元海,刘德柱,杨硕,等.深部复合地层 TBM 隧道围岩应力与变形规律模型试验研究 [J].岩土力学,2021,42(7):1783-1793.
- LI Yuanhai, LIU Dezhu, YANG Shuo, et al. Experimental Investigation on Surrounding Rock Stress and Deformation Rule

- of TBM Tunneling in Deep Mixed Strata [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(7): 1783-1793.
- [42] 柳同祥, 白现军, 王太兴, 等. 软岩隧洞 TBM 施工中围岩变形预测研究 [J]. 人民长江, 2016, 47(3): 93-97.
- LIU Tongxiang, BAI Xianjun, WANG Taixing, et al. Prediction of Soft Rock Tunnel Deformation in TBM Construction [J]. Yangtze River, 2016, 47(3): 93-97.
- [43] 黄兴, 刘泉声, 彭星新, 等. 引大济湟工程 TBM 挤压大变形卡机计算分析与综合防控 [J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2962-2972.
- HUANG Xing, LIU Quansheng, PENG Xingxin, et al. Analysis and Comprehensive Prevention-control for TBM Jamming Induced by Squeezing Deformation of Surrounding Rock around Water Diversion Tunnel from Datong River into Huangshui River [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 2962-2972.
- [44] 张许平. 深埋水电隧道 TBM 施工中的软岩变形分析 [J]. 电力学报, 2005, 20(1): 50-52, 55.
- ZHANG Xuping. Analysis of Soft Rock Deformation during the Construction of Deep Hydropower Tunnel by TBM [J]. Journal of Electric Power, 2005, 20(1): 50-52, 55.
- [45] 温森, 徐卫亚. 洞室变形引起的双护盾 TBM 施工事故风险分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 3060-3065.
- WEN Sen, XU Weiya. Risk Analysis of Double Shield Tbm Construction Accident Induced by Tunnel Deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 3060-3065.
- [46] 程建龙, 杨圣奇, 潘玉丛, 等. 挤压地层双护盾 TBM 围岩变形及应力场特征研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 371-380.
- CHENG Jianlong, YANG Shengqi, PAN Yucong, et al. Study of Features of Surrounding Rock Deformation and Stress Field in Squeezing Ground Excavation by Double Shield TBM [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 371-380.
- [47] 高强, 游胜, 马科. 深埋隧洞开敞式 TBM 通过软岩破碎带施工方法研究 [J]. 中国勘察设计, 2018(11): 94-97.
- GAO Qiang, YOU Sheng, MA Ke. China Investigation & Design [J]. China Engineering & Consulting, 2018(11): 94-97.
- [48] 刘宁, 张春生, 褚卫江, 等. 深埋破碎岩体 TBM 掘进风险评估与应对 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3348-3355.
- LIU Ning, ZHANG Chunsheng, CHU Weijiang, et al. Risk Assessment and Response of Tbm Excavation in Deep Buried Fractured Rock Mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3348-3355.
- [49] 龚秋明, 余祺锐, 王敏敏, 等. 不同层厚层状岩体对 TBM 开挖的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1442-1449.
- GONG Qiuming, SHE Qirui, WANG Jimin, et al. Influence of Different Thicknesses of Marble Layers on TBM Excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1442-1449.
- [50] 关宝树. 隧道力学概论 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.
- GUAN Baoshu. General Theory of Tunnel Mechanics [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1993.
- [51] 郑颖人, 孔亮, 阿比尔的. 强度理论与数值极限分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- ZHENG Yingren, KONG Liang, ABI Erdi. Strength Theory and Numerical Limit Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [52] 武汉大学, 中铁隧道局集团有限公司. 大瑞铁路高黎贡山隧道 TBM 掘进现场测试报告 [R]. 武汉: 中铁隧道局集团有限公司, 2018.
- Wuhan University, China Railway Tunnel Group Co., Ltd.. Site Test Report on TBM Tunnel Excavation of Gaoligongshan Tunnel of Dali—Ruili Railway [R]. Wuhan: China Railway Tunnel Group Co., Ltd., 2018.
- [53] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for Design of Railway Tunnel: TB 10003—2016 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [54] 洪开荣, 周德培. 太平驿隧洞岩爆特征及施工措施 [C]// 第四届全国岩石动力学学术会议论文选集. 成都: 湖北科学技术出版社, 1994.
- HONG Kairong, ZHOU Depei. Rockburst Features of Taipingyi Tunnel and the Prevention Methods [C]// Proceedings of the Fourth National Academic Conference on Rock Dynamics. Chengdu: Hubei Science and Technology Press, 1994.
- [55] 杜立杰, 洪开荣, 王佳兴, 等. 深埋隧道 TBM 施工岩爆特征规律与防控技术 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41(1): 1-15.
- DU Lijie, HONG Kairong, WANG Jiaxing, et al. Rockburst Characteristics and Prevention and Control Technologies for Tunnel Boring Machine Construction of Deep-buried Tunnels [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(1): 1-15.
- [56] 何满潮, 王炯, 孙晓明, 等. 负泊松比效应锚索的力学特性及其在冲击地压防治中的应用研究 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 214-221.
- HE Manchao, WANG Jiong, SUN Xiaoming, et al. Mechanics Characteristics and Applications of Prevention and Control Rock Bursts of the Negative Poisson's Ratio Effect Anchor [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 214-221.
- [57] 李磊, 谭忠盛. 挤压性破碎软岩隧道大变形特征及机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3593-3603.
- LI Lei, TAN Zhongsheng. Characteristic and Mechanism Research for Large Deformation Problem in Squeezing-shattered Soft Rock Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3593-3603.
- [58] 雷升祥, 赵伟. 软岩隧道大变形环向让压支护机制研究

- [J].岩土力学,2020,41(3):1039-1047.
- LEI Shengxiang,ZHAO Wei.Study on Mechanism of Circumferential Yielding Support for Soft Rock Tunnel with Large Deformation [J].Rock and Soil Mechanics,2020,41(3):1039-1047.
- [59] 甘肃长达路业有限责任公司.木寨岭隧道2#斜井大变形机理分析及 NPR 控制对策评价总报告[R].兰州:甘肃长达路业有限责任公司,2020.
- Gansu Changda Road Industry Ltd.. Analysis of Large Deformation Mechanism of No. 2 Inclined Shaft in Muzhailing Tunnel and General Report on Evaluation of NPR Control Countermeasures [R]. Lanzhou: Gansu Changda Road Industry Ltd.,2020.
- [60] 中国铁路总公司.铁路挤压性围岩隧道技术规范:Q/CR 9512—2019 [S].北京:中国铁道出版社,2017.
- China Railway Corporation. Code for Tunnelling in Squeezing Rocks: Q/CR 9512—2019 [S]. Beijing: China Railway Publishing House,2017.
- [61] 龚秋明,王瑜,卢建伟,等.基于对 TBM 隧道施工影响的断层带初步分级[J].铁道学报,2021,43(9):153-159.
- GONG Qiuming,WANG Yu,LU Jianwei,et al.Preliminary Classification of Fault Zone Based on Fault Zone Influence on TBM Tunnel Construction [J].Journal of the China Railway Society,2021,43(9):153-159.

(责任编辑 刘 霞)