

高地应力软岩隧道 TBM 适应性分析及应对方法研究

黄金光¹, 李志军^{1,2}, 陈桥³, 郑小鹏⁴

(1. 中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州 511458; 2. 西南交通大学, 四川 成都 610003;
3. 盾构及掘进技术国家重点实验室, 河南 郑州 450001; 4. 天水市麦积区住建局, 甘肃 天水 741020)

摘要: TBM 在高地应力条件下的工程软岩隧道地层中掘进存在较大的卡机风险, 国内外采用量化指标判定 TBM 适应性的方法缺乏; 为提高 TBM 在高地应力软岩隧道适应性判定的准确性, 更有针对性的制定卡机风险应对方案; 通过引入护盾摩阻力等量化指标, 建立以护盾摩阻力与 TBM 极限推力间的关系为护盾受力判据, 对 TBM 掘进适应性进行分级, 以此判断 TBM 卡机风险大小, 提前采取预处理措施来减轻卡机风险。结果表明: 不同级别围岩变形对护盾产生的摩阻力大小对 TBM 正常掘进影响较大, 通过定量计算护盾摩阻力, 并与 TBM 推力进行对比, 能够提高 TBM 适应性判定准确性; 隧道工程软岩地段围岩地应力与岩石强度是影响 TBM 掘进的关键因素, 围岩对护盾产生的摩阻力与地应力大小成正比, 与岩石单轴抗压强度高低成反比。得到的结果为制定卡机风险应对方案提供了理论依据, 可为类似工程施工提供参考。

关键词: 高地应力软岩; 敞开式 TBM; 卡机; 护盾摩阻力; 适应性

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)01-0138-08

TBM Adaptability Analysis and Countermeasures of Soft Rock Tunnel in High Ground Stress Engineering

HUANG Jinguang¹, LI Zhijun^{1,2}, CHEN Qiao³, ZHENG Xiaopeng⁴

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

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610003, China;

3. State Key Laboratory of Shield Machine and Boring Technology, Zhengzhou, He'nan 450001, China;

4. Housing and Urban-Rural Development Bureau of Maji District, Tianshui, Gansu 741020, China)

Abstract: TBM tunneling in soft rock tunnel stratum under high ground stress has a greater risk of jamming, and there is a lack of quantitative indicators to determine the adaptability of TBM. In order to improve the accuracy of TBM adaptability judgment in high ground stress soft rock tunnels and propose countermeasures against jamming risk are formulated. Through the introduction of quantitative indicators such as shield friction, the relationship between shield friction and TBM limit thrust is established as the force criterion of shield, and the TBM tunneling adaptability is graded to judge the TBM jamming risk, and pretreatment measures are taken in advance to reduce the jamming risk. The results show that the friction force produced by different levels of surrounding rock deformation on the shield has great impacts on the normal TBM tunneling. The accuracy of TBM adaptability can be improved by quantitatively calculating the shield friction force and comparing it with the TBM thrust. The ground stress and rock strength of surrounding rock in soft rock section of tunnel engineering are the key factors affecting TBM tunneling. The friction force generated by surrounding rock on the shield is proportional to the ground stress and inversely proportional to the uniaxial compressive strength of rock. The results obtained could provide a theoretical basis for formulating the risk response plan for jamming, and can provide a reference for similar projects.

Keywords: high ground stress soft rock; open TBM; jamming machine; shield friction; adaptability

近年来,我国基础设施建设迅猛发展,铁路、公路、水利等重大工程项目陆续开工建设,对于大型交通水利等工程,需要穿山越岭,隧道工程呈现长距离、大埋设等特点,隧道占据线路总长度比例高,为缩短建设周期,提高施工效率和保障施工安全,采用 TBM 机械化施工的隧道越来越多^[1]。因隧道工程穿越山岭地质条件具有不确定性,施工中将不可避免遇到不良地质环境,对于大埋深隧道,容易遇到高地应力环境,在这类环境中开挖隧道,容易造成围岩出现大变形^[2]。目前,国内外相关学者对于钻爆法施工高地应力软弱围岩大变形隧道的研究较多,尤显明、李沿宗^[3-4]针对兰渝铁路木寨岭隧道高地应力施工,提出了“先放后抗,抗放结合,锚固加强”的变形控制理念,取得一定的效果;陶志刚等^[5]针对公路木寨岭隧道锚喷支护无法满足隧道支护要求问题,采用恒阻锚索来控制围岩大变形,对安全稳步施工起到了积极的作用。

然而,在采用 TBM 施工的隧道中,由于 TBM 对软弱围岩的适应性较差,尤其是大变形围岩,极易造成 TBM 卡机,影响 TBM 正常掘进。国内采用 TBM 施工的铁路工程,如中天山隧道、高黎贡山隧道在岩性接触带、断层破碎带、高压富水软弱破碎蚀变构造带等不良地质中掘进,均造成过卡机事件^[6];采用 TBM 施工的水利工程,如青海引大济湟、云南掌鸠河引水工程、山西万家寨引黄工程隧道均因围岩变形过量导致 TBM 发生卡机^[7-9]。针对 TBM 穿越软弱围岩大变形地质问题,黄兴等^[10]对 TBM 掘进围岩挤压大变形进行了定义并提出了其变形定量评价指标,但对 TBM 开挖卸荷条件下围岩挤压大变形的内在机理尚未进一步研究。唐华辉^[2]针对高地应力中硬围岩环境下围岩出现大变形,研究了 TBM 出现卡护盾的成因并提出 TBM 卡机的预防和脱困对策。辛凤茂等^[11]、于茂等^[12]针对 TBM 过富水蚀变岩地层易产生塌方、拱架大变形等问题,提出了控制掉渣量的“钢板+钢拱架”联合钢结构支护结构系统,确保了敞开式 TBM 成功穿越中强蚀变岩区。某铁路隧道采用 TBM 法+钻爆法联合施工,隧道通过地层主要为喜山期花岗岩、闪长岩和片麻岩,大部分地层完整性较好,但隧道深埋地段存在高—极高地应力,隧道洞身多次通过岩性接触带、节理密集带、断层破碎带及蚀变带等工程软岩地段,存在软弱围岩变形地质问题。对于隧道 TBM 施工面临的挑战及对策研究,工程开工前,相关学者从设备选型、设备结构设计等方面提出了概念性措施,如杜闯东

等^[13]对于隧道 TBM 的选择原则、适应性问题,从岩体单轴饱和抗压强度、岩体 RQD 值、强度应力比等指标对 TBM 掘进适应性进行了分级,但未考虑护盾摩阻力因素;在应对各种不良地层风险方面,从概念上提出了需在 TBM 钢筋排、拱架(包括钢管片)安装机、双结构模式等方面开展技术研究和创新,未进一步深入研究如何实施。陈馈等^[14]针对建设过程中将面临的挑战,阐述了各类复杂工况下采用 TBM 施工所面临的挑战,对于软岩大变形隧道防控技术,仅提出宜首选双结构的敞开式 TBM 或进行其他结构方面的创新设计,未提出具体实施方法,还需进行深入研究。

存在高地应力的隧道采用敞开式 TBM 工法施工目前在国内外尚属首次,对敞开式 TBM 通过大变形围岩的适应性判定,大多根据围岩物理指标判定,采用定量化指标判定 TBM 适应性的研究较少;对于 TBM 在应对大变形工程软岩措施上,现有研究大多停留在概念性设计等方面,没有更深入的实施方案。本文结合某铁路隧道高地应力工程软岩实际地质,对敞开式 TBM 在高地应力条件下工程软岩中适应性分析,引入护盾摩阻力等定量化指标进行判定,重点研究地应力对 TBM 掘进的影响程度,提出高地应力软岩 TBM 掘进适应性分级建议。针对大变形软岩敞开式 TBM 施工中的卡机风险,主要从设备功能性改造、不良地质预处理、增加预留变形量等方面的具体实施方案进行研究,为后续 TBM 安全高效掘进提供具体的参考方案。

1 工程概况

某铁路隧道地层主要为喜山期花岗岩($\gamma 62$),构造岩类主要为断层破碎带断层角砾(Fbr)、压碎岩($T\gamma$)、蚀变岩(Sr)等地层。隧道洞身岩性多以花岗岩等侵入岩为主,钻探揭示局部岩体节理裂隙发育,在岩体节理裂隙发育带,由于岩浆热液接触且多期次侵入、构造作用和地下水等因素影响,岩体局部发生风化蚀变,呈碎块状,岩体强度变弱,工程性质较差,为 IV 级软石。隧址区构造应力为 NNE—NEE,钻孔资料显示:实测最大水平主应力方向为 $N54^{\circ}-86^{\circ}E$,实测最大水平主应力值为 $8.06\text{ MPa} \sim 45.52\text{ MPa}$,如图 1 所示。隧道最大埋深达 $1\,600\text{ m}$,最大水平主应力为 45.52 MPa ,强度应力比为 $2.07 \sim 5.37$,属高地应力—极高地应力范畴^[15]。高地应力极易引起节理密集度、断层破碎带内工程软岩产生大变形。TBM 施工中遇到的地质问题主要包括

高地应力岩爆、高地应力条件下节理密集带、蚀变岩等软岩变形等。

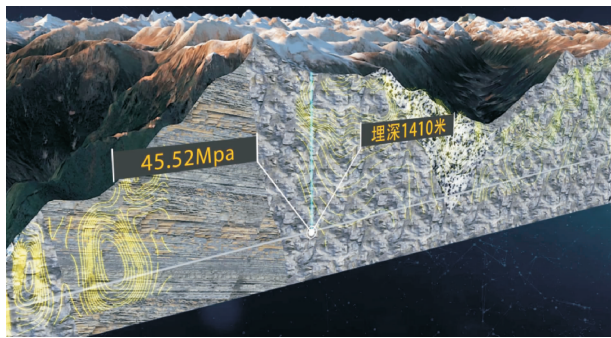


图 1 隧道地应力实测示意图

1.1 节理密集带

全隧洞身通过节理密集带总计宽度约 3 km。节理密集带平均宽度约 200 m,最大宽度约 400 m。节理密集带位于隧道Ⅳ级围岩段,其倾角较陡,岩体破碎(见图 2),呈碎裂结构、富水;自稳能力差。



图 2 岩体较破碎-破碎

1.2 蚀变岩

隧道蚀变岩主要分布于隧道洞身,呈碎裂结构。蚀变岩局部粘土矿物含量较高,可能存在膨胀性,以

V 级围岩为主。蚀变岩具有低强度、吸水膨胀、遇水松裂崩解、差异风化严重等特征,隧道开挖容易引起坍塌冒顶、涌水涌泥、挤出变形,易造成 TBM 卡机。

1.3 工程软岩对 TBM 施工的影响

TBM 穿越节理密集带以及蚀变岩、断层破碎带等软岩地层时,容易出现坍塌冒顶、涌水涌泥、挤出变形等灾害,存在较高的卡机风险;同时不良地层施工时,易出现拱架安装不到位,钢筋排、钢拱架变形侵限等问题,对施工人员的人身安全、TBM 装备安全和隧道施工质量等均会造成不利影响。

2 高地应力软岩 TBM 掘进卡机机理分析

TBM 掘进过程中,通过刀盘上的边刀切削围岩形成隧道断面轮廓,TBM 护盾通过切削出的围岩后,进行初期支护。TBM 刀盘和护盾为围岩未支护前,与 TBM 设备与围岩接触的关键部件,刀盘或者护盾被卡,TBM 都将无法掘进。敞开式 TBM 掘进主机构造断面见图 3。

(1) 卡护盾。刀盘掘进切削围岩后,一般通过刀盘扩挖形成一定距离的预留变形量来保证设备通过空间,而围岩切削后都会产生变形,当收敛变形量小余预留变形量,不侵占护盾自由伸缩空间,护盾可自由移动,则 TBM 正常掘进,不会产生卡机风险;当围岩变形量大于预留变形量,或者围岩发生坍塌、产生明显膨胀变形,侵占护盾自由伸缩空间,护盾将与围岩接触产生摩擦力,当 TBM 油缸极限推力值达不到二者接触静摩擦力时,护盾将被围岩挤压抱死,导致 TBM 卡机。TBM 掘进时围岩与护盾空间关系断面如图 4 所示。

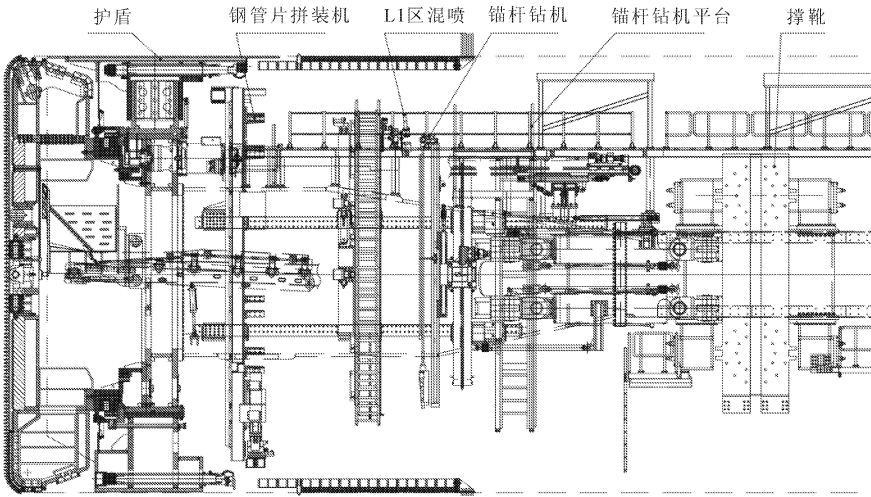


图 3 敞开式 TBM 主机部分结构断面图

(2) 卡刀盘。掌子面处围岩破碎或具有膨胀性时,TBM掘进时对围岩扰动,将导致破碎岩石坍塌、剥落产生大量松散岩体将刀盘埋入,或围岩膨胀对刀盘的作用力矩大于刀盘旋转的最大扭矩,均可能卡住刀盘使其无法转动,导致TBM被卡而无法正常工作掘进。TBM刀盘、护盾空间位置关系纵断面如图4所示。

在实际施工中,护盾被卡出现的频率较高,对工程施工产生的影响也最大,针对护盾被卡现象,要对大变形围岩、破碎围岩TBM施工适应性进行准确判断,既需要考虑围岩变形量,又需要考虑TBM护盾受力,采取针对性措施,尽量避免护盾与围岩接触产生相互挤压被卡。

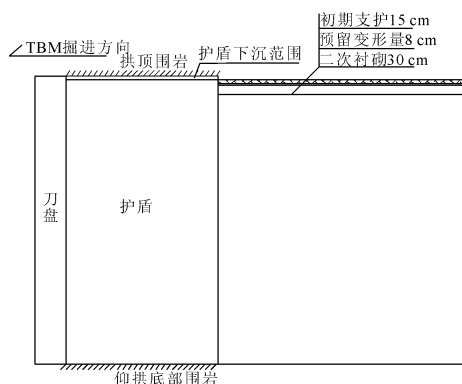


图4 TBM刀盘、护盾空间位置关系纵断面图

3 高地应力软岩TBM掘进适应性分析评价

3.1 高地应力软岩TBM掘进适应性分析

隧道开挖后,围岩在地应力作用下会产生一定的变形,为防止围岩变形挤占隧道内衬净空,设计时一般会考虑一定的预留变形量,作为围岩变形的空间,防止围岩变形侵限;该预留变形量考虑经济性,按照不同围岩等级一般设定为一个平均定值(3 cm~15 cm不等);预留变形量较大时,围岩变形可能在预留变形空间大部分释放,接触护盾后,变形减小,围岩对护盾产生摩阻力小;预留变形量较小时,围岩变形超过预留变形量,接触护盾后继续发展,对护盾产生摩阻力增加。在实际施工中,围岩地质条件存在不确定性,尤其是在高地应力软岩地质中,围岩变形量随地应力的增高,变形将增大。

TBM开挖掘进后尚未支护前(围岩未出露护盾前),如果TBM遇到软弱围岩掘进速度较慢,或者在软岩掘进时设备临时停机,而此时围岩变形速率较

快,在护盾还处于该段时,隧道壁发生的变形位移超过预留变形量,那么在掘进过程中围岩将与护盾接触,TBM护盾将受到围岩挤压产生摩阻力影响前进。

因此,在研究TBM掘进大变形工程软岩适应性时,需要对围岩与护盾接触后,TBM是否能够克服围岩与护盾间的摩阻力进行定量计算,以此来判断TBM是否适应该类地质,所以TBM护盾受力是判断是否卡机的关键因素。

我国铁路建设最早采用TBM掘进的为西康铁路秦岭隧道,相关学者根据秦岭隧道施工对TBM掘进机工作条件适应性分类进行了相关研究,主要从岩石单轴饱和抗压强度、岩石磨蚀性系数、岩体完整性等围岩地质参数进行分类,其适应性由好到差分成A、B、C三个等级;针对大变形围岩,TBM适应性判断更复杂,为有效研究TBM在大变形、破碎围岩中适应性,重点需对TBM护盾受力进行定量计算,从而判断TBM极限推力能否克服阻力,实现TBM不被卡机而顺利掘进。

对围岩质量的评价方法,Hoek等^[16]创立了岩体分类体系,地质强度指标(GSI)是Hoek-Brown破坏准则的一个重要参数,通过对岩体的观测和其力学性质的研究,估算出岩体的强度,对于一种岩体的GSI判断取决于岩体的裂隙、节理面质量和岩体结构发育程度;《水利水电工程地质勘察规范》^[17](GB 50487—2008)对围岩从岩石抗压强度、完整性系数、结构面状态、地下水、主要结构面产状影响、围岩强度应力比6个方面进行评分,最终以围岩总评分(T)作为围岩类别划分标准。

TBM护盾受力是判断是否卡机的关键因素,目前计算护盾受力主要是依靠数值模拟方法,Hasanpour R^[18]通过大量的多参数数值模拟拟合得到的单护盾TBM护盾摩阻力的计算方法,王玉杰等^[7]进一步将单护盾受力计算方法拓展至双护盾及开敞式TBM,在Ramon M等^[19]研究得到的诺莫图基础上,引入TBM选型系数 α ,并综合考虑地质强度指标GSI表达工程岩体质量和采用岩石抗压强度、完整性系数、围岩强度应力比等对围岩进行总评分(T)的两种岩体分级方法取值特点,并对引额供水、引汉济渭、引松工程等采用TBM施工的隧道围岩进行对比,表明GSI和T具有很好的相关性,二者取值关系基本可表示为 $GSI = T - 5$,通过从围岩地质参数、TBM设备参数、隧道设计参数等方面进行分析,提出了通用的TBM护盾摩阻力计算公式(1)。

$$F_p = 228000\alpha\mu \times \left(\frac{RLP_0}{6.35R_b + 12.65(T - 5) + 7.55m_i + 32.85E_i + 0.95\Delta R} \right)^{1.3}$$

(1)

式中: F_p 为护盾摩阻力,kN; α 为 TBM 选型系数,敞开式 TBM 取 1.2,单护盾取 1.0,双护盾取 0.6; μ 为静摩擦系数,护盾无润滑剂时取 0.45,有润换剂时取 0.25; R 为隧道半径,m; L 为护盾长度,m; P_0 为原岩应力,MPa; R_b 为岩石单轴抗压强度力,MPa; T 为围岩分级总评分; m_i 为 Hoek-Brown 常数; E_i 为岩石弹性模量,GPa; ΔR 为围岩预留变形量,mm。

结合工程区域不良地质及高地应力大变形围岩情况,提出某铁路隧道 TBM 掘进工程软岩的适应性分类,宜主要以护盾摩阻力 F_p 与 TBM 极限推力 F_T 的相对关系为护盾受力判据,以此来对确定 TBM 适

应性分级。某铁路隧道高地应力软岩 TBM 掘进适应性分级建议见表 1。

表 1 某铁路隧道高地应力软岩 TBM 掘进适应性分级建议表

TBM 掘进适应性等级	围岩变形量 u	护盾与围岩接触情况	护盾摩阻力	岩体单轴饱和抗压强度/MPa	适应性
S1	< 预留变形量	无接触	无	30 ~ 100	较好
S2	> 预留变形量	接触	< TBM 极限推力	20 ~ 80	一般
S3	> 预留变形量	接触	> TBM 极限推力	< 20	极差

3.2 高地应力软岩 TBM 掘进适应性评价

综合隧道地质勘察和设计资料、TBM 设备相关技术参数,本文以钻孔实测最大主应力值为 45.52 MPa 情况下,对 TBM 适应性评价相关计算参数统计见表 2。

表 2 隧道高地应力软岩 TBM 掘进适应性评价计算参数表

掘进机设备参数			隧道设计参数			围岩地质参数				
TBM 选型系数 α	护盾长度 L/m	护盾静摩擦系数 μ	TBM 极限推力 /MN	隧道半径 R/m	围岩预留变形量 $\Delta R/mm$	原岩应力 P_0/MPa	岩石单轴抗压强度力 R_b/MPa	围岩分级总评分 T	Hoek-Brown 常数 m_i	岩石弹性模量 E_i/GPa
1.2	5.43	0.45	34.482	5.1	120	45.52	68	40	25	27.3

在 高 地 应 力 作 用 下,TBM 开 挖 出 的 围 岩 未 出 露 护 盾 前,如 果 TBM 掘 进 速 度 小 于 围 岩 变 形 速 率,在 围 岩 变 形 量 超 过 预 留 变 形 量,TBM 护 盾 还 未 通 过 该 地 段,护 盾 与 围 岩 完 全 接 触,此 时 根 据 公 式 (1) 对 TBM 护 盾 摩 阻 力 进 行 计 算,可 得 出 TBM 护 盾 摩 阻 力 $F_p=58.819$ MN,而 TBM 设 备 极 限 推 力 为 34.482 MN,从 表 2 可 知,TBM 适 应 性 等 级 为 S2,由 此 可 判 断 TBM 克 服 护 盾 摩 阻 力 往 前 推 进 难 度 较 大,TBM 护 盾 被 卡 风 险 较 高,需 提 前 采 取 措 施 进 行 预 防。

隧 道 TBM 施 工 尚 处 于 埋 深 不 大 断 落,还 未 进 入 高 地 应 力 地 段,上 述 适 应 性 分 析 参 数 仅 根 据 勘 察 阶 段 地 质 钻 孔 相 关 地 质 资 料 得 出,为 进 一 步 掌 握 不 同 地 应 力 环 境 下、不 同 强 度 围 岩 TBM 掘 进 的 适 应 性,对 岩 石 单 轴 抗 压 强 度 20 MPa ~ 100 MPa 范 围 内 的 工 程 软 岩,在 15 MPa ~ 45 MPa 不 同 地 应 力 作 用 下,按 照 公 式 (1),对 护 盾 受 力 状 态 进 行 计 算 分 析,相 关 结 果 如 图 5 所 示。

软 岩 变 形 段 TBM 停 机 或 者 围 岩 露 出 护 盾 前,该 段 围 岩 变 形 速 率 大 于 TBM 通 过 该 段 掘 进 速 率,围 岩 变 形 超 过 预 留 变 形 量,一 旦 与 护 盾 接 触,将 对 护 盾 产 生 摩 阻 力。经 过 计 算 分 析,随 着 地 应 力 的 增 加,围 岩 对 护 盾 产 生 的 摩 阻 力 均 将 增 加,二 者 成 正 比;在 地 应 力 不 变 的 情 况 下,围 岩 对 护 盾 产 生 的 摩 阻 力 与 岩 石

单 轴 抗 压 强 度 成 反 比,岩 石 强 度 低,对 护 盾 产 生 的 摩 阻 力 越 大。根 据 图 5 可 知,地 应 力 超 过 30 MPa 后,不 同 强 度 围 岩 对 护 盾 产 生 的 摩 阻 力 均 接 近 或 超 过 TBM 极 限 推 力,因 此,在 隧 道 TBM 实 际 掘 进 过 程 中,必 须 加 强 围 岩 地 应 力 测 试,尤 其 是 TBM 在 节 理 密 集 带、蚀 变 岩、断 层 破 碎 带 等 工 程 软 岩 段 掘 进 时,根 据 地 应 力 情 况,需 要 提 前 采 取 预 处 理 措 施 来 提 高 TBM 的 通 过 性,减 轻 TBM 卡 机 风 险。

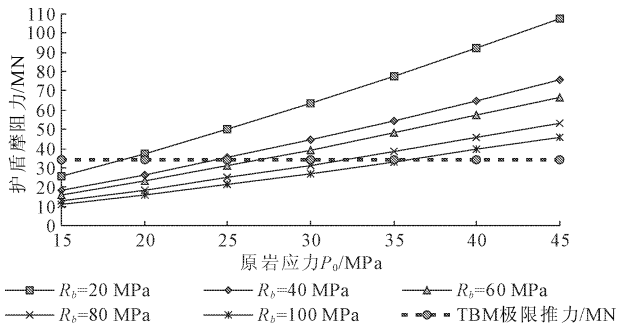


图 5 不同应力条件下不同强度围岩对护盾摩阻力数值图

4 高地应力工程软岩 TBM 掘进防卡机对策

在 高 地 应 力 作 用 下,TBM 开 挖 后 的 围 岩 未 出 露 护 盾 前,围 岩 变 形 量 若 超 过 预 留 变 形 量,TBM 护 盾

可能会被卡,根据隧道高地应力软岩 TBM 掘进适应性分级分析,围岩变形量不超过预留变形量时,TBM 适应性较好,因隧道设计围岩变形量值已确定,针对隧道 TBM 护盾卡机风险,主要从预防围岩变形过大挤压护盾、围岩变形过大挤压护盾后 TBM 脱困等方面提出应对措施,实现 TBM 在工程软岩中掘进中减少卡机风险发生;同时强化围岩出露护盾后的支护措施,减少停机时间,为护盾尽早通过变形围岩创造条件。

4.1 预防围岩变形对护盾产生摩阻力对策

4.1.1 超前地质预处理

隧道围岩地质变化频繁,同一掘进断面不同部位同时存在节理发育、不发育等产状。在 高地应力条件下,地质预报探测掌子面围岩整体性较差,且极有可能存在坍塌,会导致 TBM 掘进无法直接通过时,利用 TBM 配置的多功能钻机施做超前支护(超前管棚、超前小导管、超前锚杆等,加固范围为拱顶 $120^{\circ}\sim 150^{\circ}$),对破碎岩体进行超前注浆预加固;其中针对断层破碎带、裂隙水发育等情况,应考虑采用预注化学浆加固地层,TBM 掘进时缓慢通过;对于节理不发育、较密实的岩层,待围岩出露护盾后,采取被动支护等措施进行变形控制。超前预加固及支护见图 6 所示。

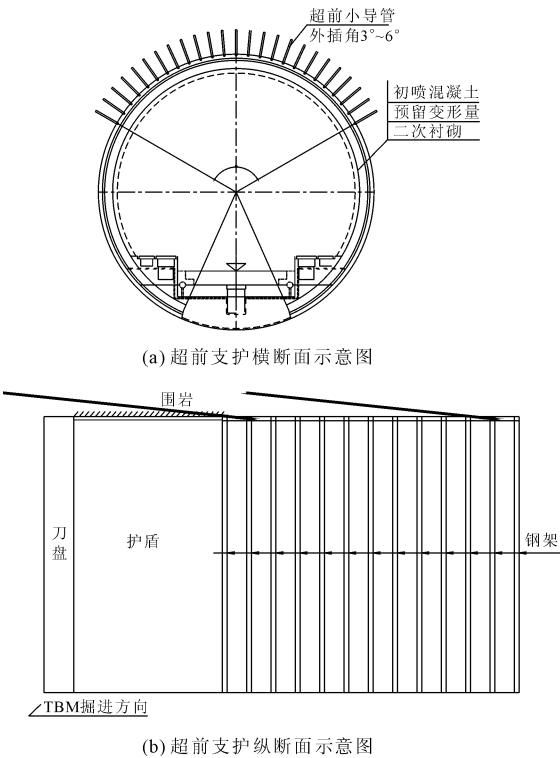


图 6 TBM 掘进段超前支护示意图

4.1.2 TBM 刀盘配置扩挖功能

TBM 在不良地层中掘进,围岩变形收敛造成隧道净空减小,为降低 TBM 卡机风险,设置刀盘扩挖功能,在刀盘半径方向上进行扩挖,使开挖断面扩大,确保围岩收敛变形不对护盾造成挤压。

实施方案:敞开式 TBM 通常可选用边滚刀外移、预留扩挖刀箱实现扩挖功能^[20-21],针对该隧道实际,采取边滚刀外移设计,使滚刀相对于原位置有一定向外的伸出量。将多把连续的边滚刀进行外移调整,实现刀盘扩挖,半径方向最大可扩挖 50 mm。扩挖示意图见图 7。

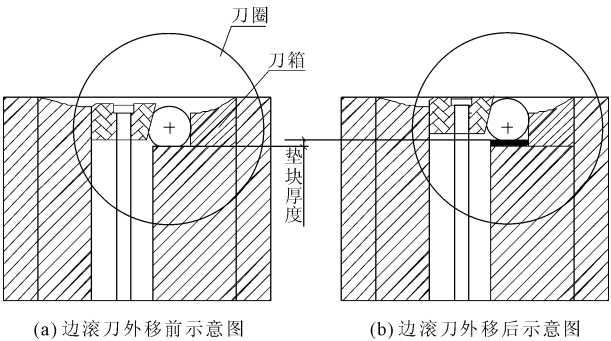


图 7 边滚刀扩挖示意图

4.1.3 增加 TBM 开挖直径

隧道不良地质段 TBM 护盾预计下沉 14 cm,为保证隧道净空尺寸,确保 TBM 掘进正常推进,TBM 掘进时,需增加预留变形量,扩大隧道开挖断面尺寸,经计算,TBM 开挖直径 D 增大 13 cm,可确保隧道净空断面符合设计要求,并满足节理密集带护盾下沉、蚀变岩大变形段围岩收敛空间要求,防止 TBM 卡机发生。TBM 开挖直径增加纵断面见图 8。

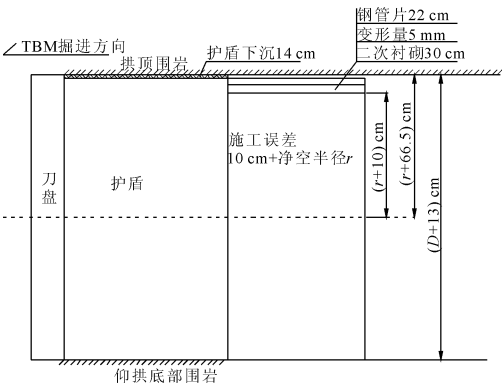


图 8 TBM 开挖直径增加纵断面图

4.2 围岩变形对护盾产生摩阻力后对策

4.2.1 加大护盾自由伸缩空间

通过护盾伸缩提供脱困处理的临界面,将顶护

盾伸缩范围增加至 200 mm(+70 mm, -130 mm), 侧护盾增加至 170 mm(+70 mm, -100 mm)。

实施方案:正常掘进时,顶护盾顶紧洞壁,若遇挤压收敛地层,顶护盾可回缩。掘进时,密切关注顶护盾行程,一旦发现顶护盾有回收迹象,在护盾伸缩行程范围内,TBM 设备快速通过该区域,减少不必要停机,防止盾体被围岩卡死。同时在 TBM 极限扭矩、最大总推力未达到最大值,适当提高顶护盾油缸控制阀组减压阀的设定值,增加 TBM 掘进时克服的阻力,一定程度上来抵抗围岩收敛,最大允许设定值最高可达 200 bar。

4.2.2 加大主驱动功率、增强刀盘扭矩

增强刀盘驱动扭矩,配置充裕的脱困扭矩及破岩脱困能力,刀盘驱动功率增加至 5 600 kW,极限扭矩为 28 006 kN·m。同时强化主推力与撑紧力、辅助推进系统,在盾体周边配置辅助推进油缸,TBM 推进系统最大总推力达到 34 482 kN。

4.3 围岩出露护盾后施工对策

高地应力段围岩变形大,为确保出露护盾后围岩变形及时控制,减少 TBM 停机处理后方围岩掉块等,为 TBM 开挖后使护盾尽快通过围岩段变形段创造条件,需对围岩后期变形尽早采取控制措施。

4.3.1 及时支护

(1) TBM 掘进通过,围岩出露护盾后,及时架立钢拱架/钢管片,挂钢筋网,打设锚杆等进行初期支护。

(2) 在 TBM 护盾后部的 L1 区域锚杆钻机作业平台上设计机械式喷头,布设左右两套混凝土喷射机构,如图 9 所示,当出露围岩十分破碎,极不稳定时,利用护盾后应急混凝土喷射机械手进行初喷作业,及时封闭初期支护,尽早形成支护体系。



图9 L1 区喷浆机械手作业

置在洞外,需要潮喷时,利用平板车将潮喷机及喷料运至设备桥下方,人工上料,可在一定范围内进行人工喷浆作业。

4.3.2 强化清渣系统功能

针对软弱围岩掉块、落渣量大等问题,配置皮带机+挖斗型的底部清渣装置。

实施方案:在主梁尾部设置辅助挖机,侧边安装清渣皮带机,主要通过仰拱块铺设区域的清渣机械臂将渣土转运到设备桥侧部的清渣皮带机上,清渣皮带机将渣土运输至设备桥上部平台,并通过设备桥中部开口,将物料卸至后配套皮带机上转运至洞外。实现快速清理底部渣土。

4.3.3 撑靴模筑装置

针对软弱围岩受力不均匀,撑靴不能有效受力,设置撑靴部位围岩加固模筑装置,实现围岩快速加固。

5 结 论

(1) TBM 在高地应力条件下工程软岩隧道中适应性判定,除参考岩体单轴饱和抗压强度、岩石质量指标(RQD 值)等物理指标外,宜考虑不同级别围岩变形对护盾产生的摩阻力大小值,通过定量计算护盾摩阻力,并与 TBM 推力进行对比,来确定 TBM 适应性分级标准。

(2) 对于存在软弱围岩的隧道,围岩地应力与岩石强度是影响 TBM 掘进的关键因素,围岩在地应力作用下产生变形与护盾接触后,围岩对护盾产生的摩阻力与地应力大小成正比;在地应力不变的情况下,围岩对护盾产生的摩阻力与岩石单轴抗压强度高低成反比。

(3) 某铁路隧道高地应力条件下工程软岩地段 TBM 适应性等级为 S2 级,适应性一般,TBM 卡机风险较高,需提前采取措施进行预防,其余地段围岩以硬岩为主,围岩变形小,适应性等级为 S1 级,总体适应性较好。

参考文献:

- [1] 黄金光. 基于 AHP 和模糊理论的水工隧道 TBM 施工风险评估[J]. 广东土木与建筑,2021,28(1):38-42.
- [2] 唐华辉. 高地应力中硬围岩环境下 TBM 卡机机理与对策研究[D]. 成都:成都理工大学,2018.
- [3] 尤显明,李沿宗. 极高地应力软岩隧道超前导洞应力释放及多层支护变形控制技术[J]. 隧道建设,2017,37(7):832-837.
- [4] 李沿宗,尤显明,赵 爽. 极高地应力软岩隧道贯通段变形控制方案研究——以兰渝铁路木寨岭隧道为例

(3) 现场独立配置应急潮喷机,该设备平时放

- [J]. 隧道建设,2017,37(9):1146-1152.
- [5] 陶志刚,任树林,王丰年,等.高地应力软岩隧道围岩大变形 NPR 锚索控制方法研究[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(S2):82-92.
- [6] 王亚锋,高 黎.贡山隧道 TBM 不良地质条件下卡机脱困施工关键技术[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(3):441-448.
- [7] 王玉杰,沈 强,曹瑞琅,等.大变形围岩 TBM 施工适应性分类标准研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2020,2(4):37-43.
- [8] 张伟峰,王海平,赵 鑫.调水总干渠引水隧洞复杂地质条件下 TBM 卡机分析及脱困技术研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):160-164.
- [9] 田志斌.不同围岩条件对 TBM 掘进的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(5):159-162.
- [10] 黄 兴,刘泉声,刘 滨,等.TBM 围岩挤压大变形特性分析与等级划分[J]. 采矿与安全工程学报,2015,32(2):260-266.
- [11] 辛凤茂,于 茂,解 红.富水蚀变岩隧洞 TBM 掘进支护措施与稳定性研究[J]. 水利规划与设计,2019(11):142-144.
- [12] 于 茂,章跃林,隋世军,等.敞开式 TBM 穿越深埋中强蚀变岩区钢结构承载性能研究[J]. 水利水电工程设计,2019,38(4):1-3,26,56.
- [13] 杜闯东,周路军,朵生君,等.高原铁路隧道 TBM 适应性选型分析及不良地质对策与思考[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(6):897-912.
- [14] 陈 馈,冯欢欢,贺 飞.高原铁路 TBM 隧道建设挑战及装备创新设计探讨[J]. 隧道建设,2021,41(2):165-174.
- [15] 铁路隧道设计规范:TB10003—2016[S]. 北京:中国铁道出版社.2016.
- [16] Hoek E, Marinos P. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses[J]. Tunnels and Tunnelling International, 2000,32(11):45-51.
- [17] 水利水电工程地质勘察规范:GB 50487—2008[S]. 北京:中国计划出版社,2008.
- [18] Hasanpour R, Rostami J, Thewes M, et al. Parametric study of the impacts of various geological and machine parameters on thrust force requirements for operating a single shield TBM in squeezing ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018,73:252-260.
- [19] Ramoni M, Anagnostou G. Thrust force requirements for TBMs in squeezing ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010,25(4):433-455.
- [20] 吕建乐. TBM 扩挖方式及其对比分析[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(6):1058-1064
- [21] 田彦朝,贺 飞,张 啸,等.长距离掘进软弱围岩的 TBM 刀盘扩挖技术[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(5):884-889.
- ~~~~~

(上接第 39 页)

- [7] Li Sheng, Liu Zhaohui, Li Yuzhi, et al. Study on critical load position and cracking in asphalt layer of continuously reinforced concrete composite asphalt pavement [C]// Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2012,164:26-29.
- [8] 李 盛,张 豪,程小亮.非均布三向应力作用下 CRC + AC 复合式路面动力响应分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(3):971-982.
- [9] Yang Bin, Yang Taiqin, Peng Gaodian. Analysis on the loading stress, thermal stress and coupling stress in PCC-AC composite pavement [C]// Advanced Materials Research Trans Tech Publications Ltd, 2012, 383-390; 2700-2704.
- [10] 郑木莲,刘富强,王 涛,等.荷载作用下短路基处 AC + CPC 复合式路面结构应力响应分析[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(4):926-933.
- [11] 杨 群,郭忠印,陈立平.考虑水平荷载的公路隧道复合式路面表面拉应力分析[J]. 公路交通科技,2006,23(1):16-19.
- [12] 石春香,杨 群,郭忠印.公路隧道复合式沥青路面结构设计方法[J]. 上海交通大学学报,2009,43(2):222-225.
- [13] 杨士真.寒区隧道复合式路面结构动力响应与寿命分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [14] 陈剑锋.广西靖那高速坡荷隧道路面结构方案研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2015.
- [15] 谢建新.隧道连续配筋混凝土与沥青混凝土复合式路面结构研究[D]. 长沙:湖南大学,2009.
- [16] 李 瑞.隧道复合式沥青路面材料与结构特性研究[D]. 西安:长安大学,2011.
- [17] 黄 兴,胡小弟,李小青.实测轮载下隧道复合式路面结构力学响应分析[J]. 土木工程与管理学报,2013,30(3):24-28.
- [18] 宁 兵.基于足尺试验的隧道路面结构响应研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2020.