

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2651

全断面隧道掘进机护盾受力监测及卡机预警

刘泉声^{1,2,3}, 彭星新^{1,4,5}, 黄 兴¹, 雷广峰^{1,4}, 魏 莱^{1,4}, 刘 鹤^{1,4}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072;
3. 武汉大学 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072; 4. 中国科学院大学 北京 100049;
5. 中铁十一局集团第四工程有限公司 湖北 武汉 430073)

摘 要: 全断面隧道掘进机(简称 TBM)在穿越深部软弱地层时围岩收敛变形较大, 围岩容易挤压护盾, 导致 TBM 卡机, 影响 TBM 正常掘进。通过分析 TBM 卡机灾害孕育过程, 得到了预测 TBM 卡机的重要条件: 一是围岩变形量大于预留的空间, 二是额定推力不能克服摩擦阻力。为了监测实际工程 TBM 卡机状态, 提出了一种监测护盾变形的方案以及护盾受力的计算方法, 可通过监测得到的变形估算护盾的受力, 进而计算出护盾受到的摩擦阻力, 得到 TBM 卡机的状态。根据 TBM 受到的摩擦阻力、TBM 正常掘进时所需推力和 TBM 额定推力之间的关系, 将 TBM 卡机状态分为 4 个等级, 即无卡机、轻微卡机、卡机和严重卡机, 并提出了对应的处理措施。结合 TBM 卡机条件以及护盾受力监测方案, 提出了 TBM 卡机灾害预警流程。在兰州水源地铁水隧洞工程中应用了该监测方案和卡机灾害预警流程, 应用结果表明, 预测的卡机状态与 TBM 实际状态基本一致, 说明该方法具有一定的可靠性, 对指导 TBM 隧道施工具有重要意义。

关 键 词: 全断面岩石隧道掘进机; 护盾受力; 卡机预警

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 09-3406-09

Monitoring shield stress of tunnel boring machine and jamming warning

LIU Quan-sheng^{1,2,3}, PENG Xing-xin^{1,4,5}, HUANG Xing¹, LEI Guang-feng^{1,4}, WEI Lai^{1,4}, LIU He^{1,4}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Structural Safety Engineering of Hubei Province, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 4. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 5. China Railway 11th Bureau Group 4th Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430073, China)

Abstract: The deformation of surrounding rock tunnelling by tunnel boring machine (TBM) is normally large when the tunnel passes through the deep and weak layer. The TBM shield is squeezed easily by the surrounding rock, which further results in the TBM jamming and influences the operation of TBM. By analyzing the mechanism of TBM shield jamming problems, two important conditions for forecasting TBM jamming are concluded. One is that the deformation of the surrounding rock is greater than the reserved space, and the other is that the rated thrust force cannot overcome the frictional resistance. For monitoring the jamming state of the actual TBM engineering, this study is to propose a scheme of monitoring the deformation of the TBM shield and a method of calculating the pressure of the shield. The extrusion force between the surrounding rock and the shield can be estimated, then the frictional resistance of TBM is calculated, and the state of the TBM jamming can be achieved. According to the relation between TBM frictional resistance force for excavating and the TBM rated thrust, the state of the TBM jamming can be divided into four grades: no jamming, minor jamming, jamming and severe jamming, and the corresponding treatment measures are suggested. At last, the flowchart of warning of the TBM jamming is developed by combining the monitoring scheme with the conditions of TBM jamming. The flowchart and the scheme of monitoring the deformation are successfully applied to Lanzhou water conveyance tunnel engineering, and it is found that the predicted jamming state is nearly the same as the actual state, and thus this method has certain reliability and attaches great importance to TBM tunnelling construction.

Keywords: tunnel boring machine (TBM); shield stress; warning mechanism of the TBM jamming

收稿日期: 2016-11-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划) (No. 2015CB058102, No. 2014CB046904); 国家自然科学基金面上项目 (No. 51474205)。The work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China(973 Program)(2015CB058102, 2014CB046904) and the General Program of National Natural Science Foundation of China(51474205)。

第一作者简介: 刘泉声, 男, 1962 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩石工程方面的教学与研究工作。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn
通讯作者: 彭星新, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: pengxingxin_cumt@126.com

1 引言

目前,我国正处于大规模基础设施建设时期,其中包含很多地下隧道工程。TBM 相比于传统的钻爆法,具有建设速度快、造价低、安全等方面的优势,成为深埋深长大隧道的首选^[1-2]。然而,在地下隧道建设的过程中,当隧道处于深埋深、破碎、高地应力等复杂地质条件时,围岩变形较大,收敛速度慢,容易造成 TBM 卡机。据统计,围岩大变形导致的 TBM 卡机灾害占 TBM 重大事故的 37%^[3-4]。例如,国内有山西万家寨引黄工程^[5]、云南昆明掌鸠河引水供水工程上公山隧洞^[4],国外有伊朗 Ghomroud 隧道^[6]、委内瑞拉 Yacambu Quibor 隧道^[7],这些都发生了围岩挤压大变形,引起了严重的卡机事故,造成了巨大的经济损失。

国内外很多学者对卡机的研究主要是围岩挤压大变形的理论研究,主要成果包括:Barla^[8]的完全剪切破坏、Aydan 等^[9]的屈服破坏和剪切滑移破坏、Malan^[10]的时效微破裂、Kolymbas 等^[11]的片理化岩石中的应力松弛;陈宗基^[12]将围岩变形机制概括为塑性楔体、流动变形、围岩膨胀、扩容、挠曲 5 方面;何满潮等^[13]将深部软岩按变形力学机制划分为 3 类:物化膨胀类、应力扩容型类和结构变形类,并详细的划分为 13 个亚类。在试验研究方面,Bridgman^[14]、许东俊^[15]、靖洪文^[16]等对岩石扩容膨胀力学机制进行了研究分析,但试验通常采用的是连续加载方式,而地下隧道工程围岩发生扩容-碎胀是处于卸围压应力状态。

在 TBM 卡机致灾机制方面,刘泉声^[17-18]和黄兴^[19-21]等从理论上对深埋隧道 TBM 卡机机制、深部挤压性地层 TBM 掘进卡机孕育行致灾机制以及 TBM 围岩挤压大变形特性进行了深入的研究。程建龙等^[22-24]使用数值模拟的方法分析了挤压性地层双护盾围岩变形及应力场特征,以及位移释放率对双护盾 TBM 护盾压力的影响规律,研究了不同地质条件下 TBM 掘进时围岩变形及护盾受力和摩擦阻力的影响。温森等^[25]研究了深埋软弱岩石的卡机机制以及控制措施,基于 Hoek-Brown 准则建立了停机和连续掘进两种工况下卡机状态模型。

综上所述,诸多学者的研究都是理论研究以及数值模拟,监测实际 TBM 工程卡机灾害的研究很少,缺乏实时监测 TBM 卡机方案以及实际工程卡机预警机制。因此,本文提出了一种监测 TBM 护盾变形方案,可以计算出护盾受力,了解卡机状态,实现 TBM 卡机预警,同时对卡机状态划分了等级,

针对不同状态提出了 TBM 脱困措施。本研究是对监测实际 TBM 工程卡机状态的一种尝试,研究成果可初步为 TBM 施工现场提供卡机预警,为 TBM 掘进和支护决策提供重要依据,对保障隧道安全施工具有重要意义。

2 TBM 卡机孕育致灾机制

笔者在文献[17-21]中对 TBM 卡机机制以及卡机孕育致灾机制进行了研究,分析了 TBM 卡机灾害孕育过程,即当护盾周围的围岩变形量大于开挖预留的空间时,围岩与护盾相互作用,产生挤压作用,进而在 TBM 推进时围岩对护盾产生滑动摩擦力;当 TBM 的额定推力无法克服总的摩擦阻力与正常掘进时所需推力之和时,TBM 护盾便被卡。由此得到了 TBM 被卡的条件,给出了判别 TBM 护盾卡机状态流程图,如图 1 所示。图中 ΔR 为护盾与围岩的预留间距; F_f 为护盾与围岩的摩擦阻力; F_b 为总推力; R 为护盾外半径; μ_k 为摩擦系数; W 为 TBM 自重; L 为护盾长度; p_s 为护盾上平均挤压力; F_1 为 TBM 的额定推力。

根据上述卡机条件,可通过测算围岩收敛变形量或者监测护盾受到的挤压力来预测卡机。笔者已进行了计算围岩收敛变形的理论研究^[17],本文主要介绍监测护盾挤压力的方法,估算护盾受到的挤压力,了解 TBM 卡机状态。

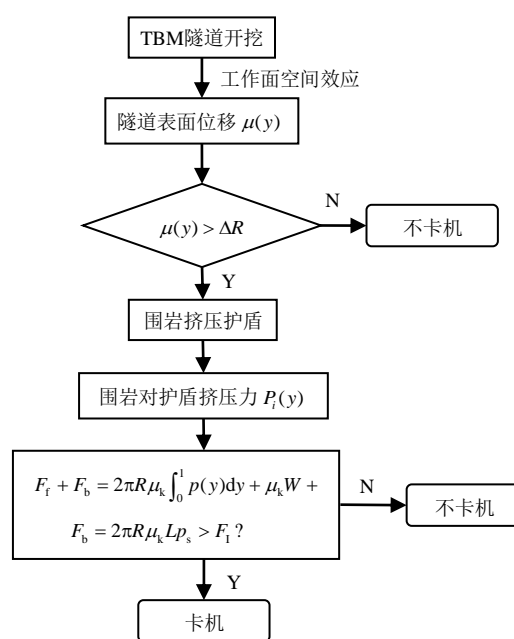


图1 TBM 卡机状态判断流程

Fig.1 Flowchart of TBM shield state judgement

3 TBM 护盾受力监测

3.1 选用的传感器

第 1 种是 JTM-V5000F 型振弦式表面应变计, 将应变计直接焊接在护盾的表面, 与护盾一起变形, 监测护盾的变形, 具体如图 2 所示。该应变计的标距为 100 mm, 测量范围为拉 1.2×10^{-3} , 压 1.8×10^{-3} , 其环境要求较低, 适应性强, 不宜被损坏。



图 2 振弦式表面应变计

Fig.2 Surface strain gauge of vibrating string

第 2 种是光纤光栅传感器, 如图 3 所示, 应变量程为 $-1.5 \times 10^{-3} \sim +1.5 \times 10^{-3}$, 温度范围为 $-20 \sim 50$ °C; 测量精度不大于 0.5%; 分辨率为 1×10^{-6} ; 反射率不小于 80%, 测量用的光纤光栅解调器, 分辨率为 1 pm, 工作温度为 $-10 \sim 50$ °C。



图 3 光纤光栅传感器

Fig.3 Optical fiber grating sensor

第 3 种是微型压力盒, 如图 4 所示, 厚为 11.5 mm, 直径为 27.0 mm, 额定荷载为 10 kN, 综合精度为 0.5%, 工作温度为 $-20 \sim 65$ °C。



图 4 微型压力盒及其保护壳

Fig.4 Micro pressure box and its protection shell

当护盾与围岩相互摩擦时会产生热量, 护盾温度可能超过传感器正常工作的温度, 此时可在护盾内壁喷水, 降低护盾温度, 保证传感器正常工作。

3.2 传感器布置方案

在护盾轴线方向上, 每隔一定距离布置一环传感器, 在环向方向上布置 8 个监测点, 如图 5 所示, 每个监测点上布置一个传感器, 沿环向方向放置, 另外, 安装两种不同类型及量程的传感器, 两种传感器交替安装 (如图 5 所示)。此外, 在护盾外表面焊接微型压力传感器, 焊接位置为应变传感器安装位置的护盾外表面, 具体如图 6 所示。

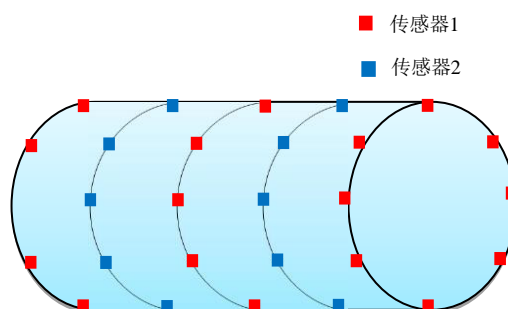


图 5 传感器布置方案示意图

Fig.5 Sketch of sensor layout

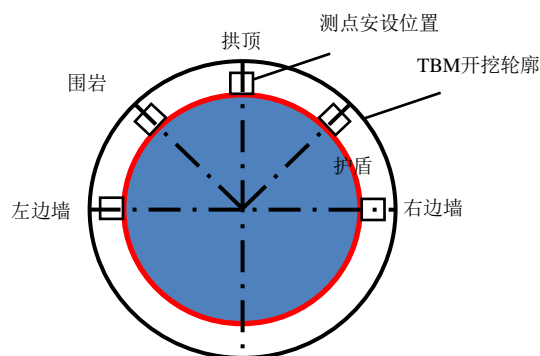


图 6 微型压力盒安装示意图

Fig.6 Schematic diagram of micro pressure box installation

3.3 TBM 护盾受力计算

由于 TBM 护盾被围岩卡住时的受力比较复杂, 有些部位可能受到的是集中力, 有些部位可能受到的是面荷载, 加上护盾与围岩的空间较小, 不能直接测量护盾受到的挤压力, 只能通过间接的方法测量挤压力。

当护盾与围岩之间的间距较大时, TBM 护盾外的压力盒可直接测得传感器与围岩的接触压力, 一旦护盾外表面焊接的压力盒受到压力, 表明护盾与围岩之间的孔隙很小, 有卡机的风险。此时, TBM 在掘进过程中压力盒和围岩之间会产生剪切力, 随着剪切力的增大, 压力盒会被挂掉, 失去了监测护

盾与围岩挤压力的作用,同时减小因压力盒作用对护盾产生其他不利影响。

当护盾外表面的压力盒被挂掉后,可连续测量贴在护盾内表面表面应变计的读数,通过测得的应变估算护盾受到的挤压力。

基本假设:在埋深较深的情况下,TBM护盾在受到围岩的挤压时,护盾各处的受力大小近似相等,即可把TBM护盾看成一个圆筒埋在无限大弹性体中,TBM护盾受到均布荷载 q ,如图7所示,则求解可得以下公式。

沿半径方向上的应力为

$$\sigma_r = -\frac{1 - \frac{r^2}{R^2}}{1 - \frac{r^2}{R^2}} q \quad (1)$$

式中: q 为护盾受到的均布荷载; r 为护盾内半径; R 为护盾外半径。

环向应力为

$$\sigma_\theta = -\frac{1 + \frac{r^2}{R^2}}{1 - \frac{r^2}{R^2}} q \quad (2)$$

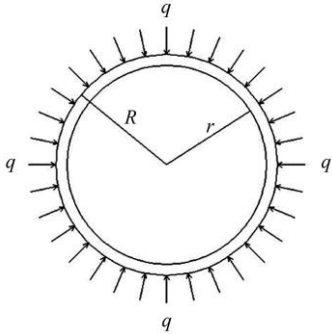


图7 TBM护盾受力示意图
Fig.7 Force diagram of TBM Shield

在监测点处 $\rho = r$,则有沿半径方向上的应力 $\sigma_r = 0$ 。监测点的受力状态如图8所示。

环向方向的应变为

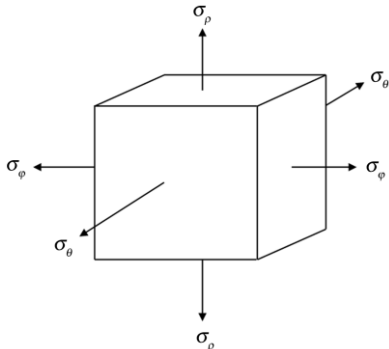


图8 监测测点应力状态
Fig.8 Stress state of monitoring point

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \mu(\sigma_r + \sigma_\phi)] \quad (3)$$

式中: μ 为泊松比; E 为弹性模量; σ_θ 为监测点沿着护盾轴线方向的应力。

轴线方向的应变为

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_\theta + \sigma_\phi)] \quad (4)$$

又 $\sigma_r = 0$,则轴向应力为

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1 - \mu^2} [\varepsilon_\theta + \mu\varepsilon_\phi] \quad (5)$$

式中: ε_ϕ 为环向方向的应变。

环向应力为

$$\sigma_\phi = \frac{E}{1 - \mu^2} [\varepsilon_\phi + \mu\varepsilon_\theta] \quad (6)$$

由式(2)、(6)可得

$$q = \frac{E}{2(1 - \mu^2)} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) (\varepsilon_\phi + \mu\varepsilon_\theta) \quad (7)$$

在护盾表面 $\rho = R$,则由式(1)可得

$$\sigma_r = q \quad (8)$$

由式(7)、(8)可得

$$\sigma_r = \frac{E}{2(1 - \mu^2)} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) (\varepsilon_\phi + \mu\varepsilon_\theta) \quad (9)$$

由式(9)可知,通过护盾上一点的环向及轴向应变计算出该点受到的护盾挤压力。但TBM护盾的实际受力还受到围岩破碎以及围岩膨胀变形的影响。在围岩破碎的情况下,围岩面上的破碎岩块可能因为失去原有的支撑而导致位置发生变化,围岩局部向隧洞内变形,局部挤压护盾,使护盾发生变形;在膨胀围岩的条件下,围岩因遇水或者温度变化产生变形,产生的变形也可能挤压护盾。由于护盾受力的复杂性以及位置的随机性,很难准确地计算出各种因素造成的围岩变形和围岩对护盾产生的挤压力,为了能较为准确地计算护盾受到的挤压力,采用如图9所示的监测方案,将护盾分为几环,每一环分成8个部分,例如 S_{11} , $S_{12} \cdots S_{18}$,每部分变形量为相邻两个传感器测得变形量的平均值,则每部分受到的压力为式(9)得到的应力乘以该部分的面积,故护盾受到的总挤压力估算公式可写为

$$F = R \int_0^L p_i(y) dy \int_0^{2\pi} 1 d\theta \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^8 \sigma_{\rho ij} \frac{\pi R}{4} \Delta L = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^8 \frac{\sigma_{\rho(i+1)j} + \sigma_{\rho ij}}{2} \frac{\pi R}{4} \Delta L + \sum_{j=1}^8 \sigma_{\rho nj} \frac{\pi R}{4} \Delta L \quad (10)$$

式中: $\sigma_{\rho ij}$ 为第 i 环中第 j 块上的应力; n 为护盾被分成的环数; ΔL 表示每环的长度。

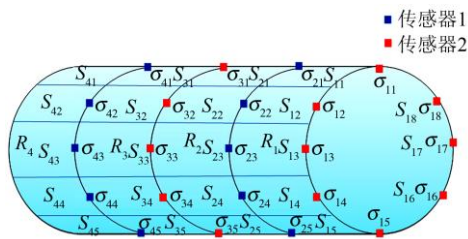


图9 护盾区域划分图
Fig.9 Zoning map of shield

式(10)的护盾受力计算方法,初步考虑了 TBM 实际受力不均的情况,将各种因素导致的护盾变形都计算在内,计算结果可初步反映 TBM 护盾受到总挤压力情况。

4 卡机状态分级及卡机预警流程

4.1 卡机状态分级

护盾所受的摩擦阻力为

$$F_f = \mu(F + W) \quad (11)$$

TBM 正常掘进时受到的力有摩擦阻力 F_f 、TBM 正常掘进所需推力 F_b 以及 TBM 额定推力 F_l , 根据 TBM 所受 3 个力的关系,可将 TBM 卡机状态分为 4 级。第 1 级为无卡机,围岩与护盾无接触,挤压力为 0,卡机风险较小;第 2 级为轻微卡机,围岩与护盾接触,摩擦阻力 F_f 与 TBM 正常掘进所需推力 F_b 之和小于 TBM 额定推力 F_l ,此状态可以通过加大推力,快速掘进,避免发生严重卡机;第 3 级为卡机,摩擦阻力 F_f 与 TBM 正常掘进所需推力 F_b 之和小于 TBM 额定推力 F_l ,且摩擦阻力 F_f 与 TBM 额定推力 F_l 之比小于 1,此状态下护盾与围岩的挤压较大,护盾出现较大变形,TBM 已经无法通过加大推力或者扭矩脱困;第 4 级为严重卡机,摩擦阻力 F_f 与 TBM 额定推力 F_l 之比大于 1,此状态护盾与围岩的挤压非常大,护盾出现严重变形,TBM 需采取其他措施脱困。具体各状态下 TBM 受力关系式如表 1 所示。

表 1 TBM 卡机状态分级
Table 1 Grading of TBM jamming state

TBM 卡机状态等级	F 、 F_f 、 F_b 、 F_l 之间的关系
无卡机	$F = 0$
轻微卡机	$F > 0, 0 < (F_f + F_b) / F_l < 1$
卡机	$F > 0, 1 \leq (F_f + F_b) / F_l < 1$
严重卡机	$F > 0, 1 \leq F_f + F_l$

根据上述卡机分级状态以及现有卡机脱困的研究^[26-27],对每一级卡机状态提出相应的卡机处理措施。在轻微卡机状态下,可采用超高压换步,提高推力,还可在护盾与围岩之间注入润滑材料,降低护盾与围岩之间的摩擦系数,间接降低摩擦阻力。在卡机状态下,可先注入润滑材料,如果不行,可进行人工扩挖,增加护盾与围岩之间的空间,释放护盾上的挤压力。在严重卡机状态下,可采用人工扩挖的方法,若遇到破碎层,可先进行化学灌浆加固,然后结合人工扩挖的方法脱困。

为了保障 TBM 高效安全的掘进,避免卡机事故,还应做好预防卡机事故。主要措施有:①改变 TBM 的护盾结构,可将护盾设计成阶梯型,前盾预留空间小,后盾预留空间大;②改装刀盘边刀的结构,使边刀能够被垫高,扩大刀盘的开挖直径;③在进入软弱破碎区时,改用单护盾掘进模式,降低撑靴对围岩的扰动;④采取措施提高超前地质预报的准确性,尽可能了解刀盘前方的地质情况。

通过本文定义的 TBM 卡机状态等级,以及提出的卡机脱困措施,可准确地了解 TBM 所处的状态,并结合脱困措施指导 TBM 施工。

4.2 卡机预警流程

在文献[19]中分析了 TBM 开挖时围岩发生较大变形量的影响因素,主要有:高地应力、围岩强度低、围岩变形速率高、收敛速度慢、时空效应显著等等。因此,本监测预警系统选取的应力监测、岩石基本力学参数测试作为基本预警指标,通过这些指标使用理论计算公式^[17],计算围岩的最终变形量(各参数定义见文献[17]):

$$u_r(y) = \left[1 + \exp\left(\frac{-y}{1.1R}\right) \right]^{-1.7} \{ [B'(1-2\nu) \times (r_0^{\beta+1} - R^{\beta+1}) - C'(r_0^{\beta-1} - R^{\beta-1})] + u_r^0 \left(\frac{r_0}{R} \right) \} \quad (12)$$

围岩破碎和围岩膨胀性两个因素也会导致围岩变形,故当理论的围岩收敛变形量较大时以及围岩比较破碎、围岩膨胀性较明显时应连续监测护盾外面表压力盒所受的压力。当压力盒有读数且读数较大时,则启用护盾内表面变形量的监测。根据监测得到的护盾变形量结果,估算护盾受到的挤压力。根据估算受力结果,结合 TBM 所处地质条件下正常掘进所需推力,判断 TBM 卡机状态,及时上报项目部,以便施工单位采取卡机预防措施。具体的卡机预警流程图如图 10 所示。

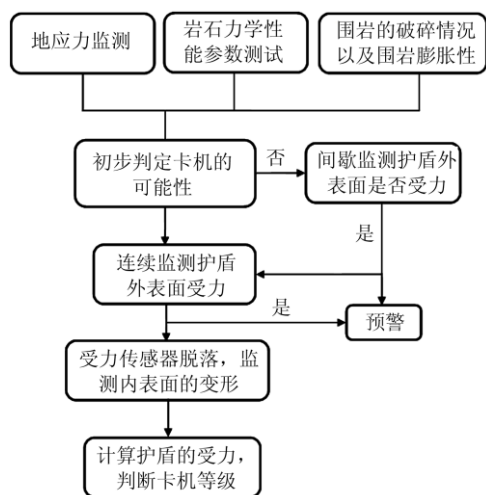


图10 TBM卡机灾害预警流程图

Fig.10 Flowchart of warning of TBM jamming

5 工程应用

为了检验第4节阐述的TBM护盾受力监测方案、护盾受力计算公式的准确性,以及TBM卡机灾害预警流程的实用性,在兰州水源地建设工程输水隧道工程中进行了应用。

兰州水源地建设工程输水隧洞主洞全长31.29 km,隧洞施工以双护盾TBM为主,辅以钻爆法,TBM开挖区域采用管片衬砌,开挖洞径为5.46 m,隧洞内径为4.60 m。该输水隧洞属于深埋长隧洞,线路长,沿线地形地质条件复杂,同时输水隧洞的TBM施工也是工期控制关键线路,是影响工程工期和工程投资的关键因素之一。

依据前期的地质勘探,IV类围岩洞段累计长度为5 848.7 m,V类围岩洞段累计长度为959.0 m,在IV类和V类围岩洞段,部分区域埋深大,地应力高,围岩强度低,有发生卡机的可能性,为了防止卡机事故的发生,按照上述的监测方案安装了传感器,如图11所示。具体安装方案为护盾内表面每



(a)安装的振弦式表面应变计

(b)安装的光纤光栅传感器

图11 传感器安装图

Fig.11 Photos of sensors installation

间隔1.5~2.5 m安装一环表面应变计或者光纤光栅传感器,在护盾外表面较为方便的地方安装了3个微型压力盒。

根据勘察资料了解TBM穿越区域地质情况以及围岩的基本力学参数,用理论计算公式^[17](式(12))计算围岩的变形量,得出变形量较大的区域,在TBM穿越这些区域时进行不间断的护盾变形监测,选取其中一个埋深较大的区段为例,围岩状况为暗红、褐红、棕红夹浅灰绿色的白垩系下统河口群(K₁hk¹)砂岩与黏土岩互层及砂砾岩,强度低、易碎,属于IV~V类围岩,地应力为23.6~28.2 MPa,埋深为380~420 m。其他的计算参数包括开挖参数、机器参数、围岩材料参数,具体参数如表2~4所示。

根据理论计算公式^[17](式(12))计算围岩的变形量,计算结果发现在离掌子面后方5 m范围内,理论的收敛变形量在9~14 cm之间,而预留的空间为12 cm,加上该区域围岩破碎,卡机的可能性较大。

表2 TBM开挖参数

Table 2 TBM excavation parameters

开挖直径 D/m	护盾长/m	超挖量 ΔR /cm	护盾重 W/MN	埋深 /m	地应力/MPa
5.46	10.3	12	8.15	390	25

表3 TBM机器参数

Table 3 TBM machine parameters

名称	模型	弹性模量 /GPa	泊松比	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	厚度 /cm
护盾	线弹性	210	0.3	172	78.6	10

当TBM掘进到该区域时,对护盾外表面微型压力盒进行了连续监测,每隔10 min记录一次数据,压力盒的受力曲线如图12所示,前34次计数时压力逐渐升高,第35次计数时,压力盒受力到达3.6 kN左右,压力盒被挂掉,此时表明围岩与护盾的间隙在10 mm左右,围岩很有可能会挤压护盾,于是启动护盾内表面的应变监测,其中一次监测的结果如表5所示。

由于此TBM护盾采用阶梯型设计,后盾比前盾预留的空间大,在上述状态下后盾与围岩还没有接触,护盾无变形,故第3环与第4环的应变为0。根据表5的测量结果,结合式(9)和式(10)可得,护盾与围岩的挤压力估算值为19 140 kN,再由式(11)可得,护盾受到的摩擦阻力为 $F_f = 6\,322.5$ kN,

表 4 围岩材料参数
Table 4 Surrounding rock material parameters

重度/ (kg/m ³)	弹性模量 /GPa	泊松比	单轴抗拉强度 /MPa	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	黏结力 /MPa	内摩擦角 /(°)	m	S_r	m_r	S	ψ /(°)	β
2 485	3.42	0.29	21	2.8	1.34	1.1	36	1.5	0	1.0	3.8×10^{-3}	6	1.185

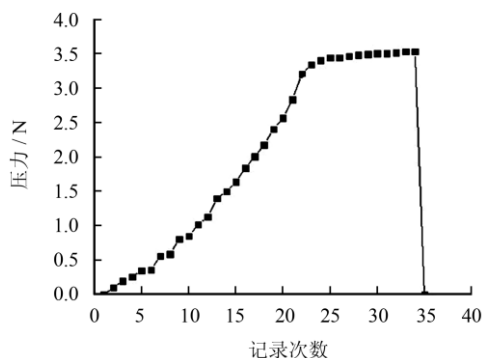


图 12 压力盒压力曲线
Fig.12 Curve of pressure box's pressure

在此地层 TBM 正常掘进时的推力为 5 400 kN 左右, 而 TBM 的额定推力为 23 760 kN, 此状态下, $F_f + F_b < F_1$, TBM 还能继续正常工作, 但为了保险起见, 施工单位要求 TBM 司机快速掘进, 延长了 TBM 掘进时间, 最后顺利通过该区域, 避免了卡机事故的发生。

为了验证估算结果的准确性, 对比了 TBM 前盾与围岩接触前后的推力数据, 发现前盾与围岩接触之后, 推力明显增大, 推力最大增幅为 6 000 kN 左右, 与估算得到的摩擦阻力相差不大, 说明估算结果比较准确, 估算公式具有较高的可靠度。

表 5 传感器应变测量结果
Table 5 Measured results of sensors

传感器序号	第 1 环		第 2 环		第 3 环		第 4 环	
	轴向应变 / 10^{-6}	环向应变 / 10^{-6}	轴向应变 / 10^{-6}	环向应变 / 10^{-6}	轴向应变 / 10^{-6}	环向应变 / 10^{-6}	轴向应变 / 10^{-6}	环向应变 / 10^{-6}
1	95	114	134	142	0	0	0	0
2	102	108	141	137	0	0	0	0
3	120	119	138	150	0	0	0	0
4	108	104	135	147	0	0	0	0
5	91	106	143	135	0	0	0	0
6	95	111	151	142	0	0	0	0
7	89	124	129	143	0	0	0	0
8	78	116	134	147	0	0	0	0

6 结 论

(1) 本文提出的护盾变形监测方案适用于埋深较大的单护盾或者双护盾 TBM 工程, 在实际的 TBM 工程中很难判断 TBM 的卡机状态, 通过上述的护盾变形监测方案可以较为准确地测量护盾的变形, 一旦出现护盾变形, 说明围岩挤压了护盾, 有卡机的风险。

(2) 本文的监测方法与理论计算公式相结合, 可以比较准确地估算 TBM 受到的挤压力, 进而可以计算出 TBM 受到的总摩擦阻力, 得到 TBM 卡机受力情况。根据 TBM 受到的摩擦阻力、TBM 正常掘进时所需推力和 TBM 额定推力之间的关系, 将 TBM 卡机状态分为 4 个等级, 即无卡机、轻微卡机、卡机和严重卡机, 并针对不同的卡机状态提出了相应的处理措施。

(3) 本文针对护盾受力状态提出的假设与护盾实际的受力状态有一定的差距, 对护盾挤压力的计算方法进行了简化, 但最终计算结果可以初步判断 TBM 的状态, 具有一定的实用性。为了更加准确计算护盾的受力情况以及判断 TBM 卡机状态, 今后还需进一步研究, 主要方向为寻找更加准确的计算受力模型, 开发更好的压力传感器并嵌入到护盾外表面, 优化传感器的布局方案, 开发软件集成各方面的数据并实现数据的自动采集与处理。

参 考 文 献

- [1] 黄兴. 超千米生井岩石巷道全断面掘进机(RBM)卡机机理及预测防治[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2011.
- HUANG Xing. Jamming mechanism of full tunnel boring

- machine and its prediction and control over thousand-meter depths[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2011
- [2] 刘泉声, 黄兴, 时凯, 等. 煤矿超千米深部全断面岩石巷道掘进机的提出及关键岩石力学问题[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 2006—2013.
- LIU Quan-sheng, HUANG Xing, SHI Kai, et al. Utilization of full face roadway boring machine in coal mines deeper than 1 000 m and the key rock mechanics problems[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(12): 2006—2013.
- [3] 尚彦军, 杨志法, 曾庆利, 等. TBM 施工遇险工程地质问题分析和失误的反思[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2405—2411.
- SHANG Yan-jun, YANG Zhi-fa, ZENG Qing-li, et al. Retrospective analysis of TBM accidents from its poor flexibility to complicated geological conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(12): 2405—2411.
- [4] 尚彦军, 史永跃, 曾庆利, 等. 昆明上公山隧道复杂地质条件下 TBM 卡机及护盾变形问题分析和对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3858—3863.
- SHANG Yan-jun, SHI Yong-yue, ZENG Qing-li, et al. TBM jamming and deformation in complication geological conditions and engineering measures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(21): 3858—3863.
- [5] 刘波. 全断面双护盾掘进机在引黄工程断层破碎带的卡机及处理[J]. 山西水利科技, 2007(2): 13—15.
- LIU Bo. Treatment of seizing machine of double shield TBM in cracked faulted zone of tunnel of YRDP[J]. **Shanxi Hydro-technics**, 2007, (2): 13—15.
- [6] FARROKH E, MORTAZAVI A, SHAMSI G. Evaluation of ground convergence and squeezing potential in the TBM driven Ghomroud tunnel project[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2006, 21(5): 504—510.
- [7] HOEK E, BROWN E T. Practical estimate of rock mass strength[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(8): 1165—1186.
- [8] BARLA G. Squeezing rocks in tunnels[J]. **ISRM News Journal**, 1995, 2(3/4): 44—49.
- [9] AYDAN O, AKAGI T, KAWAMOTO T. The squeezing potential of rocks around tunnels: theory and prediction with examples taken from Japan[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1996, 29(3): 125—143.
- [10] MALAN D F. Simulating the time-dependent behavior of excavations in hard rock[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2002, 35(4): 225—254.
- [11] KOLYMBAS D, FELLIN W, KIRSCH A. Squeezing due to stress relaxation in foliated rock[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2006, 30(13): 1357—1367.
- [12] 陈宗基. 地下巷道长期稳定的力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 1—20.
- CHEN Zong-ji. Mechanics problems of longterm stability of underground tunnels[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1982, 1(1): 1—20.
- [13] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- HE Man-chao, JING Hai-he, SUN Xiao-ming. Engineering mechanics of soft rocks[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [14] BRIDGMAN P W. Volume changes in the plastic stages of simple compression[J]. **Journal of Applied Physics**, 1949, 20(12): 1241—1251.
- [15] 许东俊, 李小春, 蔡忠理, 等. 应力状态与岩石扩容特性[J]. 岩土力学, 1992, 13(2/3): 37—44.
- XU Dong-jun, LI Xiao-chun, CAI Zhong-li, et al. Stress state and dilatancy property of rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1992, 13(2/3): 37—44.
- [16] 靖洪文, 李世平, 牟宾善. 零围压下岩石剪胀性能的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(1): 19—22.
- JING Hong-wen, LI Shi-ping, MU Bin-shan. Experimental study on the dilatancy nature of rocks under zero confining pressure[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 1998, 27(1): 19—22.
- [17] 刘泉声, 黄兴, 时凯, 等. 超千米深埋隧道全断面岩石掘进机卡机机理[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 78—84.
- LIU Quan-sheng, HUANG Xing, SHI Kai, et al. Jamming mechanism of full face tunnel boring machine in over

- thousand meter depths[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(1): 78—84.
- [18] 刘泉声, 黄兴, 时凯, 等. 深部挤压性地层 TBM 掘进卡机孕育致灾机理[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 75—82.
- LIU Quan-sheng, HUANG Xing, SHI Kai, et al. The mechanism of TBM shield jamming disaster tunneling through deep squeezing ground[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(1): 75—82.
- [19] 黄兴, 潘玉丛, 刘建平, 等. TBM 掘进围岩挤压大变形机理与本构模型[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1245—1256.
- HUANG Xing, PANG Yu-cong, LIU Jian-ping, et al. Mechanism and constitutive model of large squeezing deformation[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(6): 1245—1256.
- [20] 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.
- HUANG Xing, LIU Quan-sheng, LIU Bin, et al. Study on the properties of TBM surrounding rock large squeezing deformation and its grading[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2015, 32(2): 260—266.
- [21] 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—2973.
- HUANG Xing, LIU Quan-sheng, PENG Xing-xin, 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—2973.
- [22] 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分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(Supp.1): 371—380.
- CHENG Jian-long, YANG Sheng-qi, PAN Yu-cong, 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(Supp.1): 371—380.
- [23] 程建龙, 杨圣奇, 李学华, 等. 位移释放率对双护盾 TBM 护盾压力的影响研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1399—1407.
- CHENG Jian-long, YANG Sheng-qi, LI Xue-hua, et al. Impact of longitudinal displacement profile relaxation on contract force acted on double shield TBM in squeezing ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(5): 1399—1407.
- [24] 程建龙, 杨圣奇, 杜立坤, 等. 复合地层中双护盾 TBM 与围岩相互作用机制三维数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 511—523.
- CHENG Jian-long, YANG Sheng-qi, DU Li-kun, et al. Three-dimensional numerical simulation on interaction between double-shield TBM and surrounding rock mass in composite ground[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(3): 511—523.
- [25] 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 Sheng-qi, DONG Zheng-fang, et al. TBM jamming mechanism and control measures in deep buried tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(7): 1271—1277.
- [26] 张新伟, 陈馈. 双护盾掘进机脱困技术[J]. 盾构工程, 2010, (6): 64—67.
- ZHANG Xin-wei, CHEN Kui. Jamming releasing technology of TBM double-shield TBM[J]. **Shield Equipment and Project**, 2010, (6): 64—67.
- [27] 王江. 引水隧洞双护盾 TBM 卡机分析及脱困技术[J]. 隧道建设, 2011, 31(3): 364—368.
- WANG Jiang. Analysis on jamming of double-shield TBM in construction of water diversion tunnel and jamming releasing technology[J]. **Tunnel Construction**, 2011, 31(3): 364—368.