

文章编号:1671-6833(2020)02-0091-06

侧压系数及回填材料对双护盾 TBM 卡机控制的影响分析

温 森, 贾书耀, 高星璞

(河南大学 岩土与轨道交通工程研究所, 河南 开封 475004)

摘 要: 为研究深部挤压地层侧压系数 λ 、回填材料弹性模量 E 、软填充长度 L_r 对双护盾 TBM 卡机控制的影响, 采用 3DEC 建立了 TBM 与围岩相互作用模型。数值计算中采用了改进的 Burgers (CVISC) 黏弹塑性蠕变本构, 模拟了 TBM 动态分步开挖, 结果表明: (1) λ 越大, 对 TBM 卡机控制越不利; 当 $\lambda \leq 1$ 时, 其影响程度较小; 当 $1 < \lambda \leq 1.2$ 时, 其影响程度逐渐增大; 当 $\lambda \geq 1.2$ 时, TBM 的总阻力急剧上升, 对卡机控制极为不利; (2) 回填材料 E 越大, TBM 的总接触压力和总阻力越小, 对 TBM 卡机控制越有利; (3) L_r 越大 TBM 总阻力越大, TBM 的卡机概率也越大; TBM 掘进中, 为了降低卡机概率应尽量缩短软填充阶段

关键词: 双护盾 TBM; 卡机控制; 侧压系数; 回填材料弹性模量; 软填充长度

中图分类号: TU 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2019.03.013

0 引言

近年来全断面岩石掘进机 TBM 在深埋长大隧道及超千米深部巷道掘进施工中, 得到越来越广泛的应用。双护盾 TBM 在深部挤压性地层施工时极易因围岩挤压大变形而出现卡机事故^[1-2]。Ramoni 和 Anagnostou^[3] 对挤压地层中 3 种类型 TBM 掘进性能的控制性影响因素进行了探讨, 并提出了相应的对策。两位学者在 2011 年研究了均质挤压地层中护盾、围岩、支护之间的相互作用^[4]。Zhao 等^[5] 在考虑护盾与围岩不均匀间隙的基础上建立了三维数值模型, 研究了 TBM、衬砌与围岩之间的相互作用。刘泉声等^[1] 采用 FLAC3D 研究了挤压性地层卡机机理, 并提出 TBM 卡机判据。温森等^[6] 在考虑围岩流变效应的基础上, 建立了停机和连续掘进两种工况下的卡机状态判断模型, 并初步研究了卡机控制措施。Hasanpour 等^[7-8] 运用 FLAC3D 对双护盾 TBM 与围岩的相互作用机理进行了研究, 详细探讨了施工速度、扩挖间隙等对卡机控制的影响。程建龙等^[9] 运用 FLAC3D 研究了扩挖量、护盾锥度、护盾长度、侧压系数等对双护盾 TBM 与围岩相互作用的影响。黄兴等^[10] 针对引大济湟工程 TBM 掘进围岩挤压大变形和卡机事故进

行计算分析。

以上研究成果主要集中在双护盾 TBM 卡机机理及扩挖量、护盾长度等因素对卡机控制的影响等方面。研究表明^[11-13], 侧压系数(水平应力与自重应力的比值)是影响围岩变形、应力分布等重要因素; 同时, 衬砌与围岩之间的回填层参数对隧道整体稳定性的影响也不容忽略。目前开展侧压系数与回填层材料参数对双护盾 TBM 卡机控制影响的研究仍较少。基于此, 笔者采用 3DEC 探讨侧压系数与回填层材料参数对双护盾 TBM 卡机控制的影响。

1 模型的建立及卡机状态判断

1.1 参数的选取

选取里昂-都灵隧道作为研究背景。该隧道埋深 600 m, 自重应力 15.9 MPa, 岩体弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角、剪胀角分别为 942 MPa、0.25、0.61 MPa、28°、8°^[14]。

1.2 模型建立与模拟步骤

根据完整模型的轴对称特点, 计算模型选取完整模型的一半, 尺寸为 75 m×100 m×150 m, 如图 1 所示。根据 Hasanpour 等^[7] 的研究结果, 为避免模型边界效应造成的误差, 软弱围岩的开挖

深度应大于 4 倍隧道断面直径,故本文模型中隧道沿轴线方向开挖深度为 50 m。

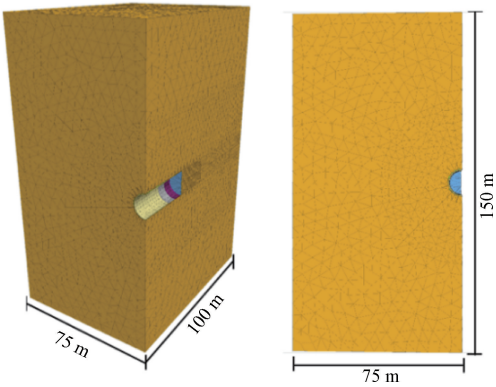


图 1 模型的几何尺寸

Figure 1 Geometric dimensions of models

图 2 为双护盾 TBM 纵向剖面图,图中反映出 TBM 的几何构造、各部件尺寸以及护盾的锥度(即阶梯状减小的护盾直径)。双护盾 TBM 主要组成的几何尺寸如表 1 所示。图中软填充阶段是指回填层靠近 TBM 后盾尾部附近的新浇筑阶段,其硬化时间较短因而强度也较低;而硬填充阶段则指回填层硬化时间较长,强度也较高的阶段。

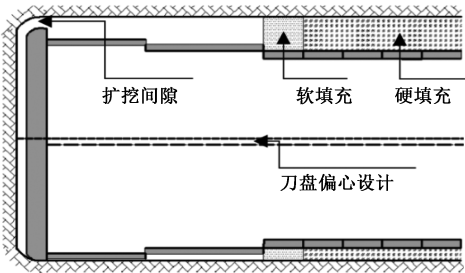


图 2 双护盾 TBM 纵向剖面图

Figure 2 The longitudinal profile of the DS-TBM

表 1 双护盾 TBM 的主要构件几何尺寸

Table 1 Geometric dimensions for main DS-TBM components

DS-TBM 组件	数值	DS-TBM 组件	数值
刀盘直径/m	12.2	前盾长度/m	5
前盾直径/m	12.13	后盾长度/m	6
后盾直径/m	12.07	护盾厚度/m	0.03
管片直径/m	11.17	管片宽度/m	2
刀盘长度/m	0.75	管片厚度/m	0.45

选取 3DEC 内置改进的 burgers 蠕变模型(CVISC)模拟岩体的黏弹塑性特性。模型中蠕变参数^[14]详见表 2。

建模时考虑到 TBM 自重,将其除以模型中各部件的体积换算出各部件的等效密度^[9]。TBM 刀盘及前后盾的材料为钢,预制衬砌管片为混凝土材料,回填材料为豆砾石灌浆。材料的物理力

表 2 岩体蠕变本构参数

Table 2 Creep constitutive parameters of rock mass

参数	数值
Maxwell 剪切模量 G^M /MPa	0.566
Maxwell 黏度系数 η^M /(MPa·a)	27.98
Kelvin 剪切模量 G^K /MPa	498.1
Kelvin 黏度系数 η^K /(MPa·a)	4.26
抗拉强度 σ_t /MPa	0.008 5

学参数详见表 3^[7]。

表 3 主要部件及衬砌物物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical properties of main components and lining

部件名称	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	密度/ (kg·m ⁻³)
刀盘	167	76.9	7 600
前、后盾	167	76.9	7 600
管片	20	15	3 000
软填充	0.417	0.192	2 400
硬填充	0.833	0.385	2 400

由于刀盘直径为 12.2 m,4 倍隧道断面直径接近 50 m,计算中每个开挖步的步长设置为 1 m,选取 50 个开挖步。详细模拟步骤如图 3 所示。

1.3 卡机状态判断

若 TBM 总阻力大于额定推力 F_1 ,TBM 则被卡住,卡机状态可用式(1)判断。

$$R_p(t) + R_w + F_r > F_1, \tag{1}$$

式中: $R_p(t)$ 为 TBM 上围岩压力产生的阻力; R_w 为 TBM 自重产生的阻力; F_r 为 TBM 保持正常连续掘进所需的推力。

$R_p(t)$ 可以通过式(2)计算得到。

$$R_p(t) = R_s(t) \cdot \mu \cdot \beta, \tag{2}$$

式中: $R_s(t)$ 为 TBM 上的围岩压力; μ 为 TBM 与围岩间的摩擦系数; β 为有效折减系数。

$R_s(t)$ 可通过编写 FISH 语言从数值模拟的 TBM 刀盘、前后盾与围岩的接触单元中提取。 μ 的取值范围为 0.15~0.30^[8],本文取 $\mu = 0.30$ 。 β 为刀盘半径或前盾半径或后盾半径 r 与隧道半径 R 的比值^[7],分别为 0.988、0.983 与 0.978。

R_w 可以通过式(3)计算得到。

$$R_w = \mu W, \tag{3}$$

式中: W 为 TBM 自重。

2 侧压系数及回填材料的影响分析

2.1 侧压系数对 TBM 卡机控制的影响

大量的地质调查结果和地应力实测统计资料表明, λ 大多数处于 0.8~1.5。为了探讨不同 λ

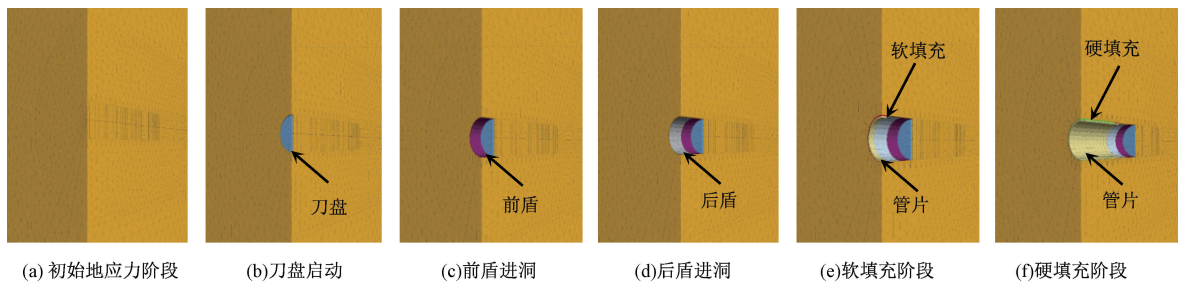


图3 双护盾TBM掘进模拟步骤

Figure 3 The modelling steps of DS-TBM Tunneling

对双护盾TBM施工的影响,分别计算 $\lambda=0.6$ 、 0.8 、 1.0 、 1.2 、 1.4 和 1.6 时的情况,探讨不同 λ 对TBM接触压力和总阻力的变化规律。参考已有研究,模拟中设定施工速度分别为 $AR=12$ 、 24 m/d ,扩挖间隙 Δr 依次为 10 、 18 cm 。

图4是TBM接触压力和 λ 的关系图。图4显示,随着 λ 的增大,TBM接触压力不断增大。且随着 λ 的增加接触压力递增趋势逐渐变大,即 λ 越大对TBM掘进越不利。

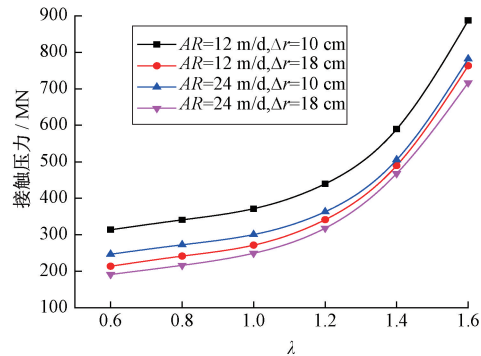


图4 λ 对TBM接触压力的影响

Figure 4 The impact of λ on the contact force

根据由式(1)~(3)计算不同 λ 的TBM总阻力,绘制图5。图5显示,随着 λ 的增大,TBM的总阻力不断增大。表4给出了5个不同范围 λ (每个范围 λ 变化均为 0.2)下的TBM总阻力的增长比例。

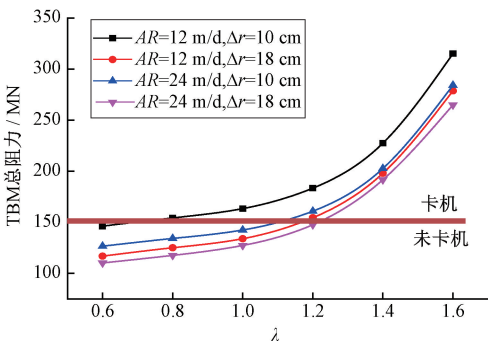


图5 λ 对TBM总阻力的影响

Figure 5 The impact of λ on the total resistance

由图5与表4可得,当 $\lambda\leq 1$ 时,总阻力的曲线趋势较为平缓,其增长比例也相对较小;当 $1<\lambda\leq 1.2$ 时,TBM总阻力增长比例约为 $\lambda\leq 1$ 时的2倍;当 $\lambda>1.2$ 时,TBM总阻力急剧增长,其增长比例约为 $\lambda\leq 1$ 的3~4倍,此时 λ 的增大对TBM总阻力影响较大。

由此说明, λ 的增大对TBM的卡机控制产生了不利的影响。图5中给出了卡机状态分界线,不同的掘进速度和扩挖间隙卡机临界状态时的侧压系数并不相同。但是不管掘进速度和扩挖间隙多大, λ 的增加对TBM施工越来越不利。

表4 不同范围 λ 下的TBM总阻力增长比例

Table 4 The extended rate of the total resistance among different internals of λ

AR/ (m·d ⁻¹)	Δr / cm	总阻力增加比例/%				
		$\lambda=0.6$ ~0.8	$\lambda=0.8$ ~1.0	$\lambda=1.0$ ~1.2	$\lambda=1.2$ ~1.4	$\lambda=1.4$ ~1.6
12	10	5.2	5.5	10.9	19.4	27.8
	18	6.5	6.6	13.3	22	28.9
24	10	5.7	5.8	11.4	20.6	28.7
	18	6.3	7.6	13.7	23	27.7

2.2 回填材料变形参数对TBM卡机控制的影响

假定管片衬砌支护体系处于弹性工作状态,以下针对回填材料的弹性模量 E 和泊松比 μ 对TBM掘进的影响进行探讨。假设回填材料的 E 大小处于围岩与预制管片之间;根据一般回填层材料性质确定其 μ 、 ρ 值,如表5所示。

表5 围岩、回填层与预制管片的物理力学参数

Table 5 The physical and mechanical parameters of surrounding rock, backfill layer and segment

项目	E/GPa	μ	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
围岩	0.942	0.25	2 650
回填层	[1, 36]	0.2, 0.25, 0.3	2 400
预制管片	36	0.2	3 000

图6和图7是在 $AR=12\text{ m/d}$, $\Delta r=10\text{ cm}$ 的掘进条件下,回填层 $E=1$ 、 12 、 24 GPa 时TBM总接

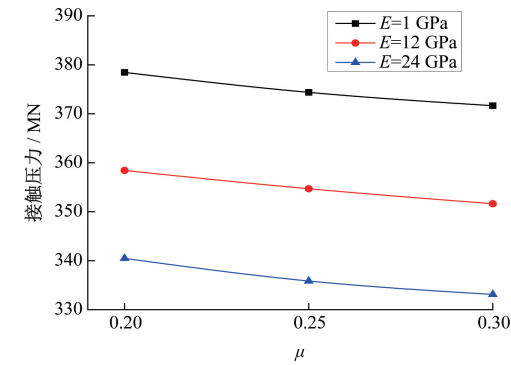


图 6 TBM 总接触压力、与 μ 关系图
Figure 6 The relationship of contact force and μ

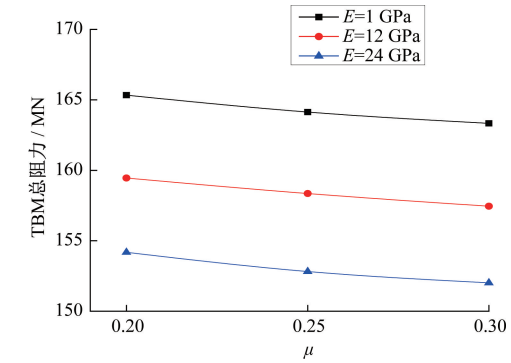
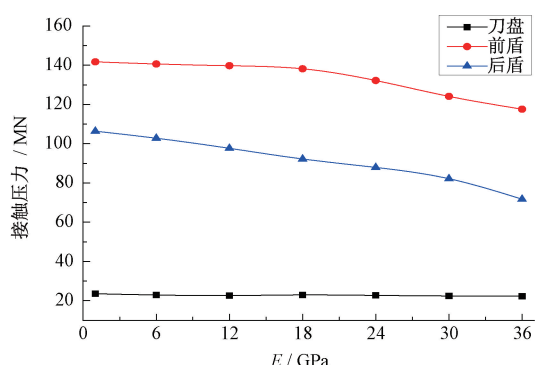


图 7 TBM 总阻力与 μ 关系图
Figure 7 The relationship of the total resistance and μ

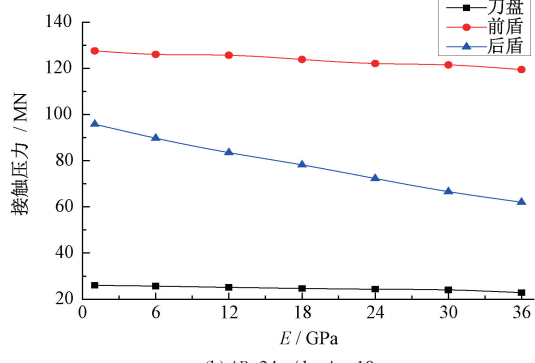
触压力、总阻力与 μ 的关系曲线。图中显示,TBM 总接触压力与 TBM 总阻力均随回填材料 μ 的增大而减小,但其降低比例很小,例如, μ 从 0.2 增加至 0.3 时,TBM 总接触压力最大降低了 3.1%,TBM 总阻力最大降低了 1.2%。由此可见 μ 的改变对 TBM 总阻力影响很小。因此,后续研究假定 μ 为定值 0.3,只考虑 E 值变化对 TBM 掘进的影响。

讨论回填材料 E 的影响时,设定 $AR=12$ m/d、 24 m/d 和扩挖间隙分别为 $\Delta r=10$ cm、 18 cm。计算中 E 取值为: $E=1、6、12、18、24、30$ 和 36 GPa。

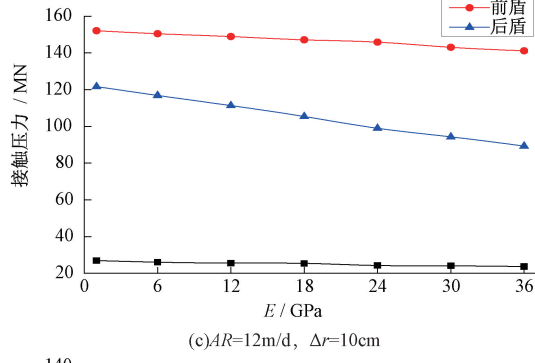
图 8 为不同掘进条件下,回填材料 E 与 TBM 刀盘、护盾的接触压力关系曲线。从图中可见,4 种不同的 TBM 掘进条件下, E 的改变均对 TBM 各部件产生了不同程度上的影响。其中刀盘上的接触压力受到的影响最小,这是因为刀盘距掌子面较近,受掌子面效应的影响最大,且刀盘距离回填衬砌段又相对较远;对于前盾和后盾而言,随着 E 的增加前后盾上的接触压力均呈减小趋势。同时受到前盾、后盾与围岩间隙阶梯型降低的影响,在各个掘进条件下均呈现出前盾接触压力大于后盾的规律。由于回填部位紧邻后盾尾部,随着 E 的增大,后盾的接触压力降低趋势最为明显。



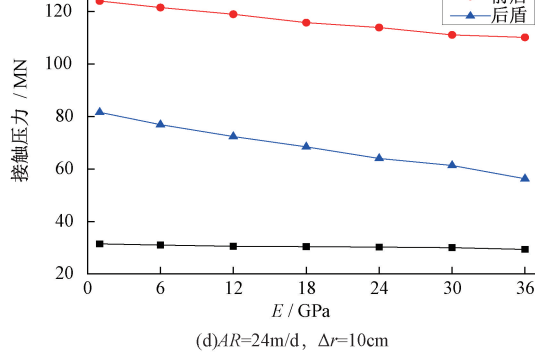
(a) $AR=12$ m/d, $\Delta r=18$ cm



(b) $AR=24$ m/d, $\Delta r=18$ cm



(c) $AR=12$ m/d, $\Delta r=10$ cm



(d) $AR=24$ m/d, $\Delta r=10$ cm

图 8 不同回填材料 E 与 TBM 的接触压力关系图
Figure 8 The relationship of E and the contact pressure

图 9 为各掘进条件下的不同回填材料 E 与 TBM 总阻力的关系图,为清晰反映各掘进条件下的 TBM 总阻力降低情况,计算不同回填材料 E 下的 TBM 总阻力增长比例,如表 6 所示。图 9 和表 6 均显示出在 4 种不同的掘进条件下,随着

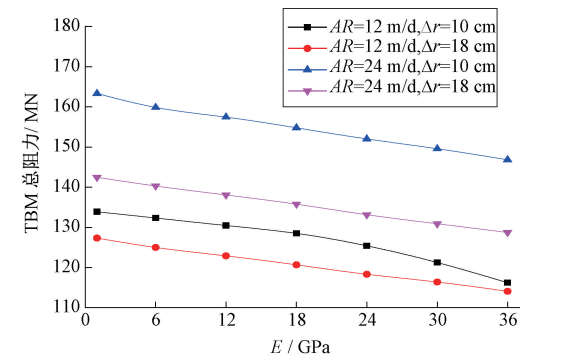


图 9 不同回填材料 E 与 TBM 总阻力关系图
Figure 9 The relationship of E and the total resistance

表 6 不同 E 下的 TBM 总阻力降低比例
Table 6 The extended rate of the total resistance by increasing E

AR/ (m·d ⁻¹)	Δr/ cm	总阻力降低比例/%		
		$E=1\sim12$ GPa	$E=12\sim24$ GPa	$E=24\sim36$ GPa
24	10	3.1	3.6	3.3
	18	3.5	3.7	3.6
12	10	3.6	3.5	3.4
	18	2.6	3.9	7.3

注:1~12 表示 E 从 1 GPa 增加至 12 GPa。
 E 的不断增大,TBM 的总阻力呈现降低趋势。
由图 8 和图 9 可知,回填材料的 E 越大其力学传递性能越好,对围岩的稳定性也越好,对 TBM 卡机控制产生有利影响。因此在 TBM 施工中可据此规律选择弹性模量较大的回填材料,更好的发挥回填层对围岩的稳定作用,同时降低 TBM 卡机概率。

2.3 软填充长度对 TBM 卡机控制的影响

图 10 为回填层软、硬填充阶段的局部示意图。众多研究中^[5-8, 14]常将软填充阶段的长度假定为 2 m,其弹性模量为硬填充阶段的一半,但工程中软填充长度取决于 TBM 施工速度和回填浆液的硬化速度。目前未见对回填层软填充长度 L_r 讨论的文献。

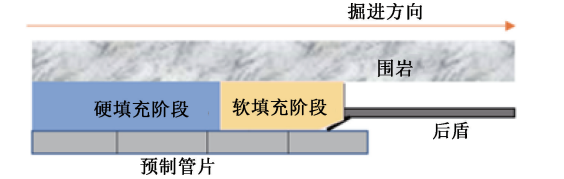


图 10 回填层软、硬填充阶段的局部示意图
Figure 10 The local schematic diagram of soft and hard filling stage

研究中,分别计算 L_r 为 2、5、8、10、12 m 的情况。回填材料的 E 分别取 6、12、18GPa,施工速度和扩挖间隙分别取 12 m/d 和 10 cm。

图 11 为不同 E 时, L_r 与 TBM 总阻力关系图。图中显示,不论 E 多大, L_r 的增加均造成 TBM 总阻力不断增大。 E 分别为 6、12、18 GPa 时,当 L_r 从 2 m 增加至 12 m,TBM 总阻力分别增长了 13.3%、13.7%、14.1%。由此可见, L_r 的增加,显著增加了 TBM 卡机的概率。

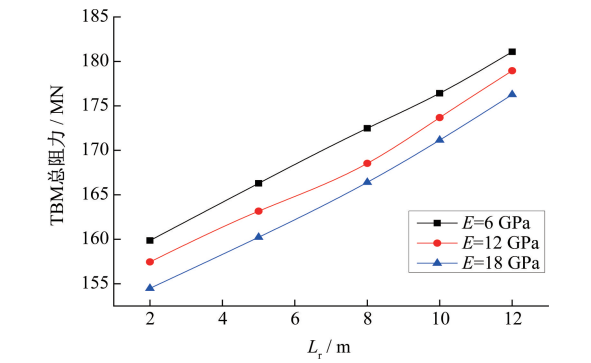


图 11 L_r 与 TBM 总阻力关系图
Figure 11 The relationship of L_r and the total resistance

在同一施工速度和扩挖间隙下,较长的 L_r 代表着回填灌浆物的硬化时间长、早期强度低,对 TBM 掘进不利。为了对 TBM 施工更有利,合理控制回填浆液的硬化速度很有必要。此外,TBM 施工中回填需要大量的输送设备,而 TBM 内部的操作空间又相对比较狭小,常会出现因施工工序不协调,施工组织管理不完善而造成回填灌浆严重滞后的现象。由上可知,滞后的回填层施工将对卡机控制带来不利影响。为了避免或降低 TBM 掘进过程中卡机概率,因此,回填施工过程中,可选择合理的添加剂,达到回填浆液早强和快硬的目的;也可通过制定合理的施工组织方案等措施,避免回填层施工严重滞后于 TBM 掘进。

3 结论

- (1) λ 越大,对 TBM 卡机控制越不利。当 $\lambda < 1$ 时,其对 TBM 接触压力和总阻力的影响较小;当 $\lambda \geq 1$ 时,增加 λ 对 TBM 接触压力和总阻力的影响较为明显,而当 $\lambda \geq 1.2$ 时,TBM 接触压力和总阻力随 λ 的增加而急剧增大,对 TBM 卡机控制极为不利。
- (2)回填材料 E 越大 TBM 的总接触压力和总阻力越小。选择弹性模量较大的回填材料更有利于 TBM 的卡机控制。
- (3)其他条件一定时, L_r 越大 TBM 掘进总阻力越大。

参考文献:

[1] 刘泉声,黄兴,时凯,等. 超千米深部全断面岩石掘进机卡机机理[J].煤炭学报,2013,38(1):78-84.

[2] 张银霞,江志强,段留洋,等. TBM 盘形滚刀破岩过程的数值研究[J].郑州大学学报(工学版),2016,37(1):75-78.

[3] RAMONI M, ANAGNOSTOU G. Tunnel boring machines under squeezing conditions [J]. Tunneling and underground space technology, 2010, 25 (2): 139-157.

[4] RAMONI M, ANAGNOSTOU G. The interaction between shield, ground and tunnel support in TBM tunneling through squeezing ground[J]. Rock mechanics & rock engineering, 2011, 44(1): 37-61.

[5] ZHAO K, JANUTOLO M, BARLA G. A completely 3D model for the simulation of mechanized tunnel excavation [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2012, 45(4): 475-497.

[6] 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.

[7] HASANPOUR R, ROSTAMI J, BARLA G. Impact of advance rate on entrapment risk of a double-shielded TBM in squeezing ground [J]. Rock mechanics and

rock engineering, 2015, 48(3): 1115-1130.

[8] HASANPOUR R, ROSTAMI J, ÖZÇELİK Y. Impact of overcut on interaction between shield and ground in the tunneling with a double-shield TBM [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2016, 49 (5): 2015-2022.

[9] 程建龙,杨圣奇,李学华,等. 挤压地层双护盾 TBM 与围岩相互作用影响因素分析[J].采矿与安全工程学报,2016,33(4): 713-720.

[10] 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.

[11] BROWN E T, HOEK E. Trends in relationships between measured in-situ stress and depth [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 1978, 15(4): 211-215.

[12] 景锋,边智华,陈昊,等. 不同岩性侧压系数分布规律的统计分析[J].长江科学院院报,2008, 25(4): 48-52.

[13] 钱舟. 不同围岩级别下隧道回填材料合理工程参数分析[D].重庆:重庆交通大学,2016.

[14] BARLA G, BONINI M, DEBERNARDI D. Time dependent deformations in squeezing tunnels[J]. International journal of geoenineering case histories, 2010, 2(1): 40-65.

Impact of Lateral Pressure Coefficient and Backfilling Material on Double Shield TBM Jamming Control

WEN Sen, JIA Shuyao, GAO Xingpu

(Institute of Geotechnical and Rail Transport Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: In order to study the impact of lateral pressure coefficient (λ), elastic modulus of backfilling material (E) and length of soft backfilling (L_r) on TBM jamming control in deep squeezing ground, models were established by 3DEC to explore the interaction between DS-TBM and surrounding rock mass. The Modified Burgers (CVISC) model was adopted to simulate different excavation stages of TBM in the numerical calculation and the main conclusions were drawn as follows: (1) the greater the λ was, the more disadvantageous to TBM jamming control; when $\lambda \leq 1$, its influence on jamming control was small; when $1 < \lambda \leq 1.2$, its influence was increasing gradually; when $\lambda \geq 1.2$, the total resistance of TBM increased sharply and it's very adverse for TBM jamming control; (2) The greater the E was, the less the total contact force and total resistance of TBM were and the more favorable to TBM jamming control; (3) the longer the L_r was, the greater the total resistance and probability of TBM jamming were; In TBM driving, the length of L_r should be shortened as far as possible in order to reduce the probability of TBM jamming.

Key words: DS-TBM; TBM jamming control; lateral pressure coefficient; elastic modulus of backfilling material; length of soft backfilling