

## 不同岩体条件下双护盾 TBM 施工性能分析

刘俊豪<sup>1</sup>, 胡甄巍<sup>2</sup>, 周小雄<sup>3</sup>, 龚秋明<sup>1</sup>, 刘东鑫<sup>1</sup>

(1.北京工业大学城市防灾与减灾教育部重点实验室, 北京 100024; 2.中国建筑基础设施有限公司, 北京 100037; 3.清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**[摘要]** 针对复杂地质条件下城市地铁隧道双护盾 TBM 的掘进性能评价, 依托青岛地铁 6 号线创石区间左、右线 TBM 施工段, 对全线施工数据进行收集与分析, 研究不同围岩类别下双护盾 TBM 掘进参数与施工性能参数的变化规律。不同围岩类别下 TBM 利用率分析表明, 双护盾 TBM 对岩体质量较差的围岩段具有良好适应性。分析了不同围岩类别下各掘进参数与工程破岩比能 SE 间关系, 贯入度与 SE 的相关性最好, 更适合作为评价 TBM 掘进过程中能量消耗的指标, 且在不同围岩类别下, 贯入度与工程破岩比能 SE 呈较好的负幂指数关系, 在 II, III, IV, V 类围岩类别下, 当贯入度分别  $>2, 5, 8, 10\text{mm/r}$  时, 其对应的工程破岩比能 SE 在较低水平。

**[关键词]** 隧道掘进机; 双护盾; 掘进性能; 掘进参数; 围岩等级; 施工技术

[中图分类号] U455.3; U455.4

[文献标识码] A

[文章编号]

## Analysis of Double-shield TBM Construction Performance Under Different Rock Mass Conditions

LIU Junhao<sup>1</sup>, HU Zhenwei<sup>2</sup>, ZHOU Xiaoxiong<sup>3</sup>, GONG Qiuming<sup>1</sup>, LIU Dongxin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. China Construction Infrastructure Co., Ltd., Beijing 100037, China; 3. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** For the evaluation of the boring performance of double-shield TBM in urban subway tunnels under complex geological conditions, this paper relies on the TBM construction section of the left and right lines of ChuangShi section of Qingdao Subway Line 6, and collects and analyzes the construction data of the whole line to study the changes in the boring parameters and construction performance parameters of double-shield TBM under different surrounding rock categories. The analysis of the TBM utilization rate under different rock mass conditions shows that double-shield TBM has good adaptability to the complex rock masses. The relationship between various excavation parameters and engineering specific energy SE is analyzed under different types of surrounding rock. The correlation between penetration and specific energy is the best, making it more suitable as an indicator for evaluating energy consumption during TBM excavation. Moreover, under different types of surrounding rock, penetration has a good negative power exponential relationship with engineering specific energy SE. In types II, III, IV, and V of surrounding rock, when the penetration exceeds  $2\text{mm/r}$ ,  $5\text{mm/r}$ ,  $8\text{mm/r}$ , and  $10\text{mm/r}$ , respectively, the corresponding engineering rock breaking specific energy SE is at a lower level.

**Keyword:** tunnel boring machine (TBM); double-shield; excavation performance;

excavation parameters; surrounding rock grade; construction

## 0 引言

隧道掘进机 (tunnel boring machine, TBM) 凭借施工环境好、施工速度快、经济效益好等优点, 已广泛应用于地铁、采矿、引水等隧道施工领域<sup>[1]</sup>。随着 TBM 在各类型隧道施工中的大量应用, 对 TBM 掘进性能方面的研究也得到快速发展。基于此, 国内外学者从工程破岩比能  $SE$  及掘进参数等角度对 TBM 掘进性能开展了大量研究。

其中, 林家骥<sup>[2]</sup>通过开展滚刀破岩切割试验, 验证了滚刀间距与工程破岩比能间的关系。Wang 等<sup>[3]</sup>基于工程破岩比能提出了滚刀磨损的预测模型。李刚等<sup>[4]</sup>将 CSM 模型与工程破岩比能公式相结合, 提出了一种新的刀盘比能预测模型。高攀等<sup>[5]</sup>等结合渤海海峡隧道项目提出用工程比能法可对 TBM 的可掘性进行预测。Snowdon 等<sup>[6]</sup>对滚刀破岩过程进行研究, 建立了工程破岩比能与掘进参数间的关系。TBM 的掘进参数也对 TBM 的施工性能有着重要影响, 其 TBM 施工的核心是掘进参数控制, 目标是在不同地质条件下施工人员匹配不同掘进参数, 从而确保 TBM 安全高效掘进, 对提高 TBM 掘进性能及降低 TBM 工程成本具有积极意义。基于此, 国内外许多学者在掘进参数优化方面对 TBM 掘进性能做了大量研究。其中, Farmer 等<sup>[7]</sup>在沉积岩地质条件下将岩石强度与刀盘总推力相结合, 提出了贯入度预测模型。关于掘进速度  $A_r$  的预测模型大部分是通过掘进速度  $P_r$  和利用率  $U$  的预测模型来间接得到<sup>[8-9]</sup>。针对  $P_r$  的预测, Yagiz<sup>[10]</sup>利用在 The Queens Tunnel 隧道项目中收集的掘进数据, 并通过室内试验和现场测量方法获取预测公式中的几个地质参数, 最终得出掘进参数和地质参数的多因素  $P_r$  预测公式。周振良等<sup>[11]</sup>依托北疆供水二期工程收集的掘进数据, 获得以地质参数和掘进参数为自变量的多因素掘进速度  $P_r$  预测模型。温森等<sup>[12]</sup>采用 BP 神经网络算法对 TBM 的净掘进速度进行预测, 并提出预测

模型。付柯<sup>[13]</sup>提出掘进速度优化的数学模型, 并分析了掘进速度的主要影响因素及掘进速度与各参数间的定量关系。Sapigni 等<sup>[14]</sup>收集了意大利某硬岩隧道的 TBM 掘进数据进行分析, 发现 TBM 在岩体质量等级 (RMR) 为 40~60 的区段掘进时, 其掘进性能相对较好。相对于掘进速度  $P_r$  的研究, 利用率  $U$  也是影响 TBM 掘进性能的一个重要参数<sup>[15-16]</sup>。Barton 等<sup>[17]</sup>将原有的围岩分级 Q 系统进行改进, 进一步考虑岩机间的相互作用, 提出新的  $Q_{TBM}$  模型, 该模型可用于预测 TBM 的利用率、掘进进度、掘进速度等施工参数。Frough 等<sup>[18]</sup>在 Karaj-Tehran 输水隧洞工程中通过研究发现, 该项目施工过程中地质因素造成 TBM 的停机时间约占总停机时间的 20%, 且地质因素造成的停机时间与 RMR 值具有很好的相关性。Torabi 等<sup>[19]</sup>运用人工神经网络方法发现, 地质参数对 TBM 利用率的影响并不是最大, 其主要的影响因素是施工管理水平及 TBM 故障等。上述研究主要集中在掘进速度预测模型、TBM 利用率的分析等方面, 而针对不同围岩类别下对应的掘进性能的优化问题仍需进一步研究。

本研究依托青岛地铁 6 号线创石区间双护盾 TBM 施工段, 分别对不同围岩类别下各掘进参数与性能参数  $SE$  间进行相关性分析, 获得在不同围岩类别下各掘进参数的高效掘进范围, 为后期相似岩体条件下双护盾 TBM 施工掘进参数的选取提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

研究区段位于青岛地铁 6 号线创智谷站—石山路站, 左、右线起止点里程分别为 ZDK26+747.861—ZDK28+645.228 和 YDK26+747.861—YDK28+645.228, 左线全长 1 906.897m, 右线全长 1 897.367m, 左、右线间距 13~16m, 区间埋深 25~33m。

### 1.2 隧道区间工程地质条件

区间隧道沿线主要以白垩系燕山晚期 ( $\gamma 53$ ) 粗粒花岗岩为主, 部分地段揭露有砂土状和块状碎裂岩等构造岩。根据初勘及隧道掘进过程中对隧道沿线进行的地质素描结果, 将隧道围岩进行分类, 其创石区间地质剖面如图 1 所示。隧道沿线花岗岩的饱和单轴抗压强度在 23~87MPa。

[作者简介] 刘俊豪, 硕士研究生, E-mail: liujunhao0819@163.com

[通信作者] 龚秋明, 教授, 博士生导师, E-mail: gongqiuming@bjut.edu.cn

[收稿日期] 2023-05-19

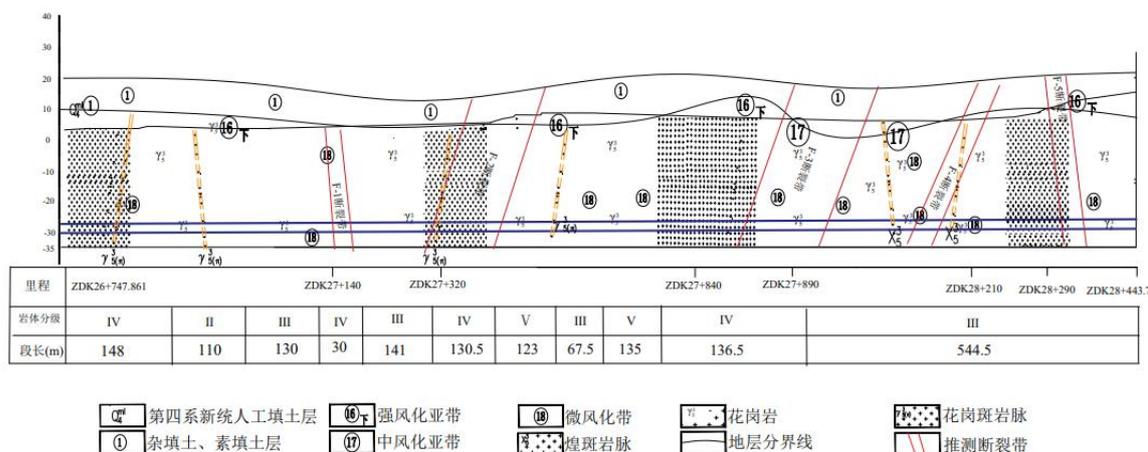


图 1 创石区间地质剖面

Fig. 1 Engineering geological section of Chuangzhi Valley Station-Shishan Road Station interval

### 1.3 TBM 设计参数

创石区间左、右线各采用 1 台由双护盾硬岩隧道掘进机, 其详细设计参数如表 1 所示。刀盘滚刀采用螺旋线布置, 共 43 把滚刀, 其中 8 把中心刀为 17in(1in=2.54cm)双刃滚刀, 23 把面板刀和 12 把边刀均为 19in 单刃滚刀。

表 1 TBM 主要设计参数

Table. 1 Main design parameters of TBM

技术参数	设计值
刀盘直径/mm	6 300
刀盘功率/kW	0~2 100
额定扭矩/(kN·m)	4 680
刀盘转速/(r·min <sup>-1</sup> )	0~7.8
最大推力/kN	28 515
最大推进速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	120
1)	
滚刀类型/mm	48.26~457
滚刀数量/把	43
平均刀间距/mm	78
铲斗数量/台	6

## 2 TBM 施工参数统计分析

### 2.1 不同围岩类别下 TBM 利用率统计

TBM 的利用率定义为一段里程内纯掘进时间与当班总时间的比值。TBM 的利用率受多种因素影响, 如施工人员管理水平、滚刀更换、设备故

障、岩体条件等。本研究根据收集的施工数据, 分别统计了在不同围岩类别下 TBM 的利用率, 统计结果如图 2 所示。

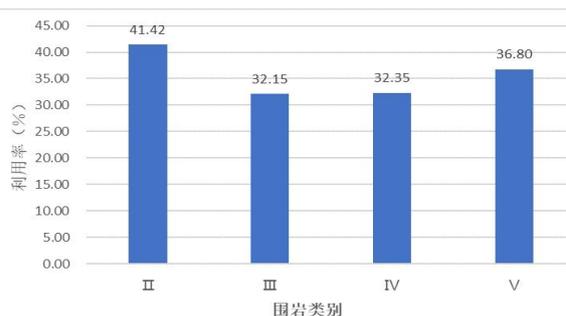


图 2 不同围岩类别下 TBM 的利用率

Fig.2 Utilisation of TBM in different rock types

由图 2 可看出, 创石区间在 II 类围岩类别下 TBM 的利用率最高, 为 41.42%, 在 III, IV, V 类围岩类别下, 随着围岩类别降低, TBM 的利用率总体呈现上升趋势。这说明 TBM 在 II 类围岩条件下, 掌子面及洞壁较稳定, 利用率相对较高。在 III, IV, V 类围岩类别条件下, 随着围岩类别的降低, 双护盾 TBM 的利用率略有提高, 与敞开式 TBM 利用率的规律相反, 在一定程度上说明双护盾 TBM 对岩体条件较差的隧道围岩段具有相对较好的施工效果。

### 2.2 不同围岩类别下各施工参数变化

在不同围岩类别下, 由于岩石的饱和单轴抗压强度、岩体的完整性系数等参数不同, 导致 TBM 在不同围岩类别下所采用的贯入度转速、推力、扭矩等掘进参数也会发生变化。不同围岩类

别下 TBM 总推力分布如图 3 所示，随着围岩类别降低，TBM 刀盘总推力的平均值逐级降低。在 IV, V 类围岩类别下，刀盘总推力变化不是特别明显。

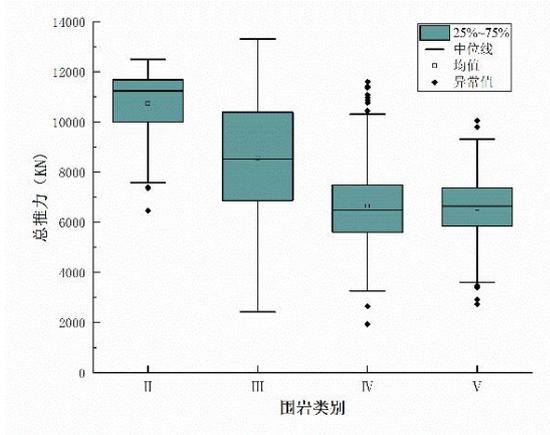


图 3 总推力分布

Fig. 3 Distribution of gross thrust

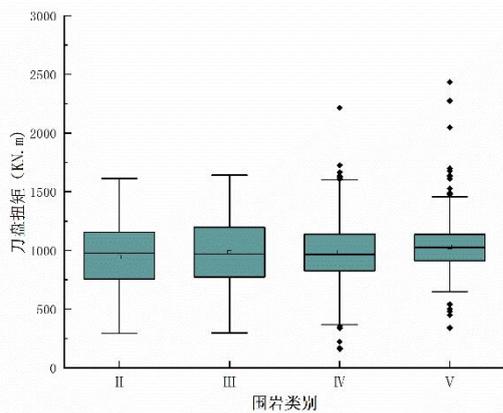


图 4 扭矩分布

Fig. 4 Distribution of torque

不同围岩类别下 TBM 刀盘扭矩的分布如图 4 所示，在不同围岩类别下刀盘扭矩的分布变化不大，主要分布在 750~1 250kN·m。

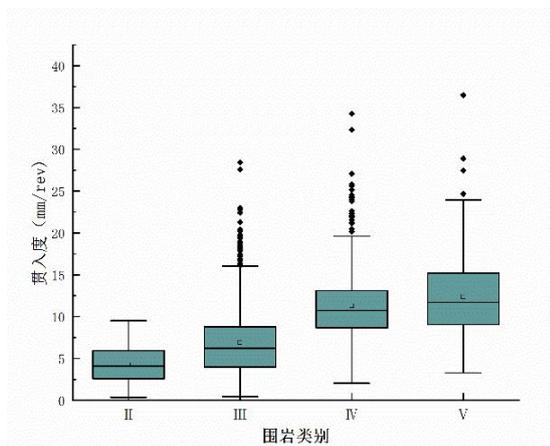


图 5 贯入度分布

Fig.5 Distribution of penetration

不同围岩类别下贯入度分布如图 5 所示，随着围岩类别降低，在各类围岩类别下贯入度的平均值逐渐升高。在 II 类围岩类别下贯入度主要分布在 2.5~6mm/r，III 类围岩类别下贯入度主要分布在 5~9mm/r，IV 类围岩类别下贯入度主要分布在 9~13mm/r，V 类围岩类别下贯入度主要分布在 10~15mm/r。

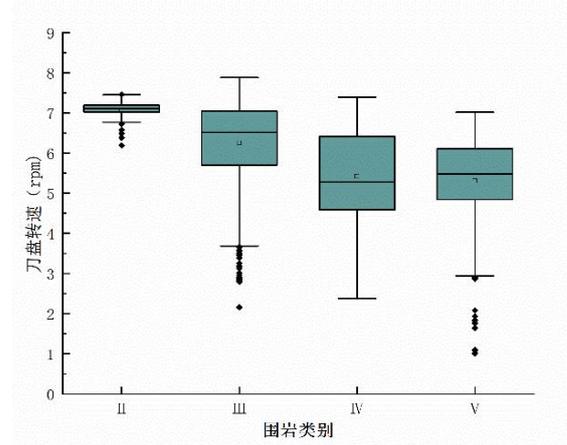


图 6 刀盘转速分布

Fig.6 Distribution of cutter speed

不同围岩类别下刀盘转速分布如图 6 所示，由图可看出，随着围岩类别降低，TBM 刀盘转速也逐渐降低。在 II 类围岩类别下刀盘转速主要集中在 7.2r/min 附近，III 类围岩类别下刀盘转速主要分布在 5.7~7.2r/min，IV 类围岩类别下刀盘转速主要分布在 4.5~6.5r/min，V 类围岩类别下刀盘转速主要分布在 5~6.2r/min。

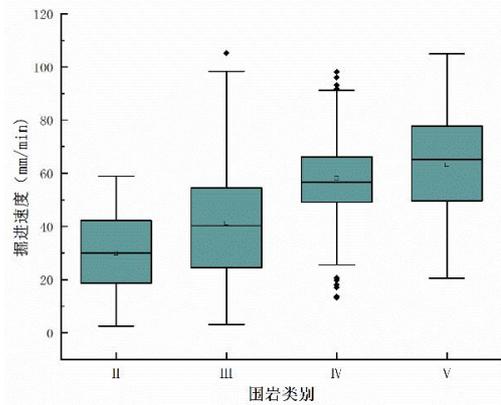


图 7 掘进速度分布

Fig.7 Distribution of tunneling speeds

不同围岩类别下掘进速度分布如图 7 所示，随着围岩类别降低，在各类围岩类别下掘进速度平均值逐渐升高，在 IV 类围岩类别下掘进速度分

布较集中。在II类围岩类别下掘进速度主要分布在19~42mm/min, 在III类围岩类别下掘进速度主要分布在25~55mm/min, 在IV类围岩类别下掘进速度主要分布在50~63mm/min, 在V类围岩类别下掘进速度主要分布在50~80mm/min。

### 2.3 不同围岩类别下工程破岩比能分析

根据收集的掘进参数, 分别计算并统计不同围岩类别下工程破岩比能SE分布, 如图8所示。工程破岩比能SE定义为破碎单位体积岩体所消耗的能量。其具体计算公式如下:

$$SE = \frac{E}{V} = \frac{Fp+2\pi T}{\pi R^2 p} \quad (1)$$

式中: SE为工程破岩比能(MJ/m<sup>3</sup>); F为净推力(kN); T为掘进扭矩(kN·m); R为刀盘半径(m); p为贯入度(mm/r)。

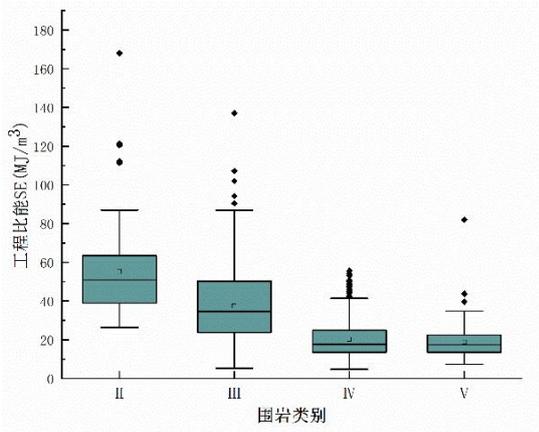


图8 工程比能SE分布

Fig.8 Distribution of engineering specific energy

### SE

由图8可看出, 随着围岩类别降低, 工程破岩比能SE呈逐渐降低趋势, 在IV, V类围岩类别下, 工程破岩比能SE的分布较集中。在II类围岩类别下工程破岩比能SE主要分布在40~65MJ/m<sup>3</sup>, 在III类围岩类别下工程破岩比能SE主要分布在22~50MJ/m<sup>3</sup>, 在IV类围岩类别下工程破岩比能SE主要分布在15~25MJ/m<sup>3</sup>, 在V类围岩类别下工程破岩比能SE主要分布在18~22MJ/m<sup>3</sup>。

根据上述对不同围岩类别下各掘进参数的统计结果, 可初步得出创石区间双护盾TBM在掘进过程中, 随着围岩质量变差, 总推力、刀盘转速、工程破岩比能SE会逐渐降低, 贯入度和掘进速度会逐渐升高, 而刀盘扭矩在不同围岩类别下的变化并不大。上述不同围岩类别下的各掘进参数、掘进性能参数的分布有一定重合, 说明施工人员难以根据围岩类别调整高效的掘进参数范围, 有必要对不同围岩类别下各掘进参数做进一步优化, 以期提高双护盾TBM的掘进效率。

## 3 掘进参数的优化范围分析

### 3.1 掘进参数对掘进性能参数的影响

为了研究TBM掘进参数与性能参数SE间的关系, 根据收集的施工数据分别统计不同围岩类别下各掘进参数与性能参数SE间的关系, 以期对掘进参数做进一步优化, 统计结果如图9~12所示。

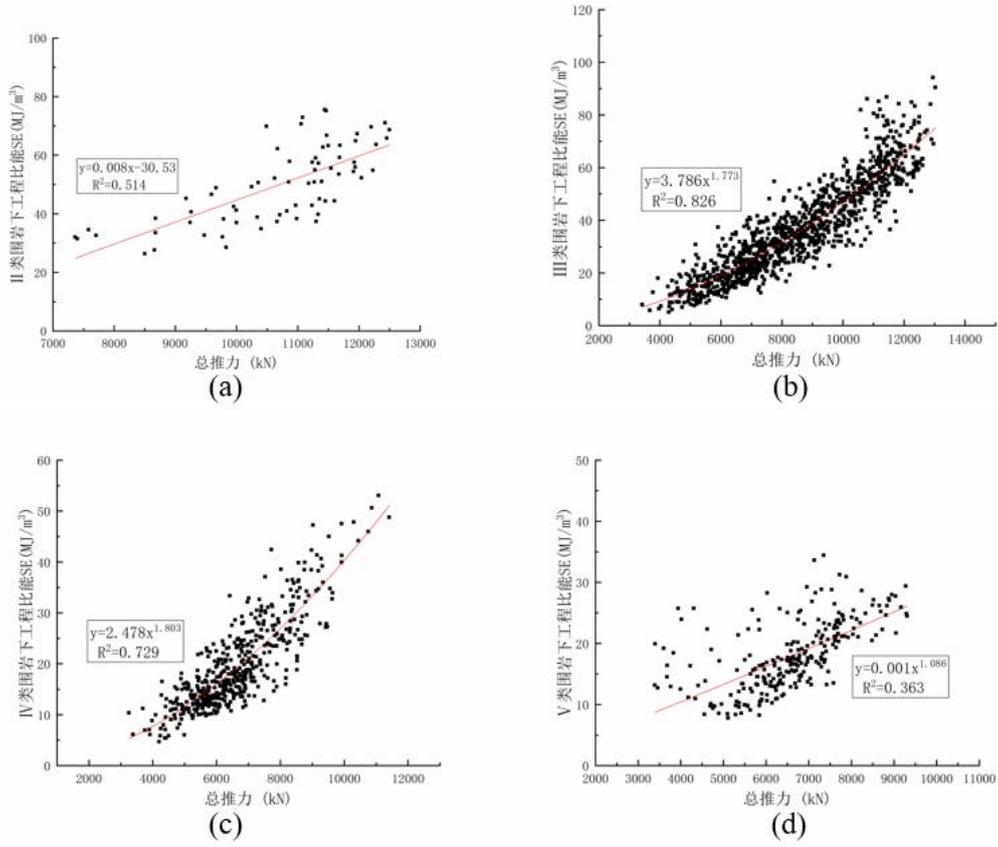


图 9 不同围岩类别下 SE-总推力  
Fig.9 SE-gross thrust for different rock types

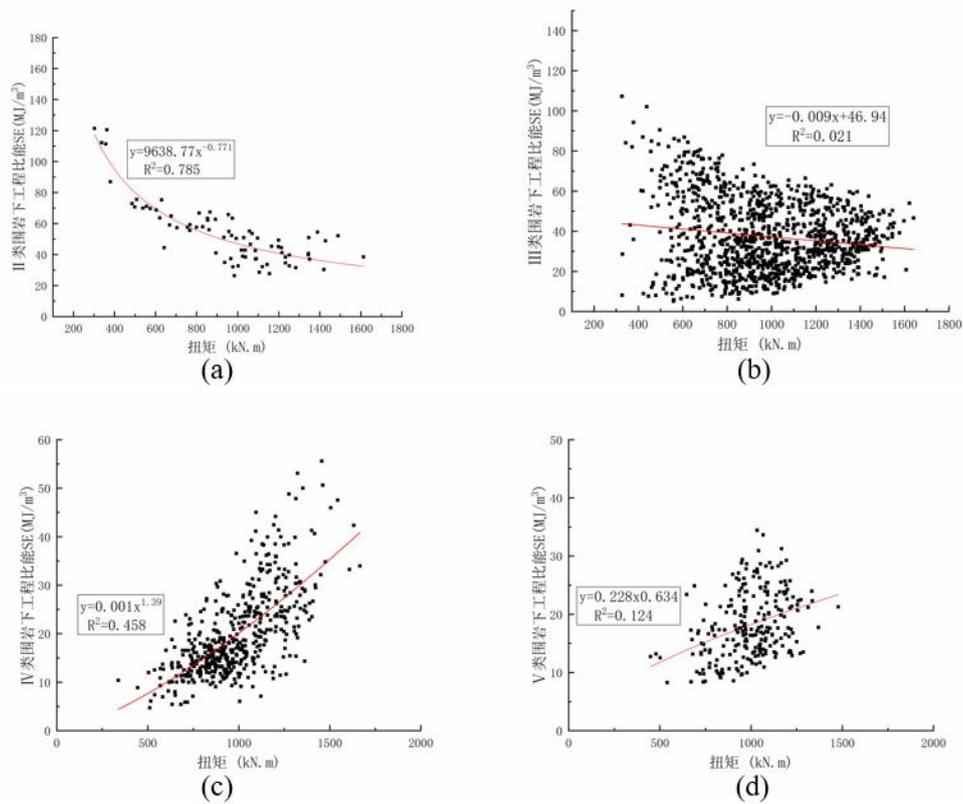


图 10 不同围岩类别下 SE-扭矩  
Fig.10 SE- torque for different rock types

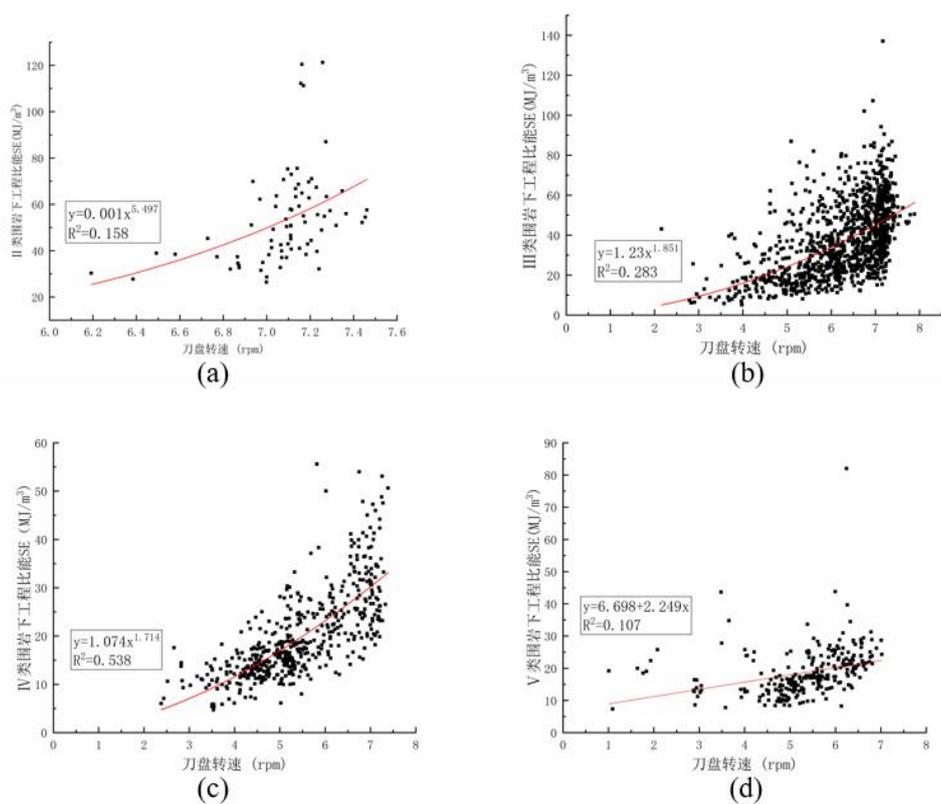


图 11 不同围岩类别下 SE-刀盘转速

Fig.11 SE- cutter head speed for different rock types

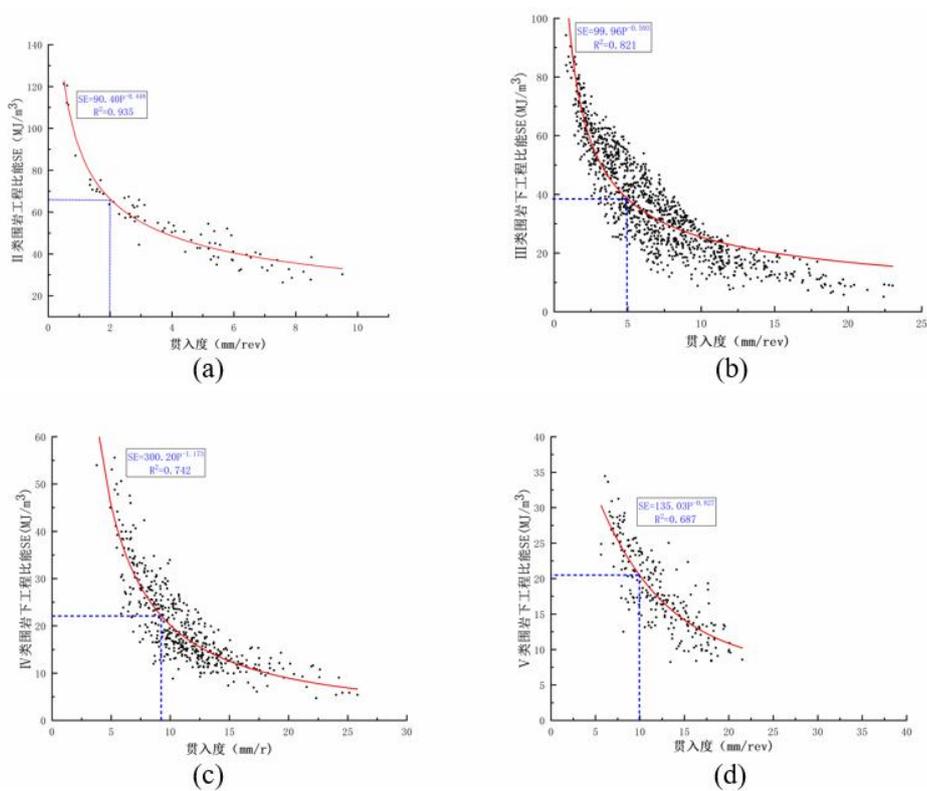


图 12 不同围岩类别下 SE-贯入度

Fig.12 SE-penetration for different rock types

由图 9 可看出,在 III, IV 类围岩类别下,工程破岩比能 SE 与总推力呈较好的正相关拟合关系,相关性系数在约 0.80,说明在岩体条件较好的围岩类别下,工程破岩比能 SE 随着总推力增大呈现逐渐增大趋势。由图 10 可看出,在不同围岩类别下,工程破岩比能 SE 与扭矩的相关性系数都较低,几乎不存在相关性。由图 11 可看出,在不同围岩类别下,工程破岩比能 SE 与刀盘转速的相关性系数最大的在 IV 类围岩类别下,为约 0.5,也不具有很好的相关性。由图 12 可看出,在不同围岩类别下,随着贯入度增大,工程破岩比能 SE 在前一段迅速降低,当贯入度增大至某一值后,工程破岩比能 SE 呈缓慢下降趋势,当 TBM 超过此贯入度后,其破碎单位体积岩体所消耗的能量相对较低,TBM 的破岩效率相对较高。综上所述,由不同围岩类别下的各掘进参数与性能参数 SE 间的相关性可知,贯入度更适合作为 TBM 掘进过程中能量消耗的评价指标。

### 3.2 掘进参数优化

由图 12 可看出,在 II 类围岩类别下,随着贯入度增大,工程破岩比能 SE 呈幂函数降低,当贯入度  $> 2\text{mm/r}$  后,随着贯入度继续增大,工程破岩比能 SE 缓慢降低,此时 TBM 的掘进效率相对较高,故在 II 类围岩类别下,在掘进机推力允许范围内,当刀盘转速在  $6\sim 7\text{r/min}$  时(见图 11a),尽量使贯入度  $> 2\text{mm/r}$ ,以达到破岩效率较高水平。在 III 类围岩类别下,当贯入度超过  $5\text{mm/rev}$  后,随着贯入度的增大,工程破岩比能 SE 缓慢降低,此时 TBM 的掘进效率相对较高,在 III 类围岩类别下,刀盘转速主要集中在  $5\sim 7\text{r/min}$ (见图 11b),此时推力未达到额定值,应尽量增大推力使贯入度  $> 5\text{mm/r}$ ,以达到破岩效率较高水平。在 IV 类围岩类别下,当贯入度  $> 8\text{mm/r}$  后,随着贯入度继续增大,工程破岩比能 SE 缓慢降低,此时 TBM 的掘进效率相对较高,当贯入度  $> 8\text{mm/r}$  后,所对应的推力在  $7\ 000\sim 7\ 500\text{kN}$ (见图 9c),刀盘转速在  $5.5\sim 6\text{r/min}$ (见图 11c),刀盘扭矩在  $900\sim 1\ 000\text{kN}\cdot\text{m}$ (见图 10c),此时仍存在进一步优化空间。在 V 类围岩类别下,由于工程破岩比能 SE 总体数值不高,当贯入度  $> 10\text{mm/r}$  后,工程破岩比能 SE 相对更低,此时无须过于关注工程破岩比能 SE 的变化,主要考虑掘进安全性。

## 4 结语

本文通过研究青岛地铁 6 号线创石区间双护

盾 TBM 的施工性能,分析不同围岩类别下各掘进参数的分布范围及各围岩类别下贯入度与掘进性能参数 SE 间的关系,并针对不同围岩类别对贯入度进行优化,得出如下结论。

1)创石区间双护盾 TBM 在 II, III, IV, V 类围岩类别下利用率分别为 41.42%, 32.15%, 32.35%, 36.8%, 表明双护盾 TBM 对岩体条件较差隧道段的适应性相对良好。

2)随着围岩条件变差,总推力、刀盘转速、工程破岩比能 SE 逐渐降低,贯入度、掘进速度逐渐升高,而刀盘扭矩在不同围岩类别下的变化并不大。

3)由不同围岩类别下的各掘进参数与性能参数 SE 间的相关性可知,贯入度更适合作为 TBM 掘进过程中能量消耗的评价指标。根据贯入度与 SE 间的拟合关系,分别确定了创石区间双护盾 TBM 在 II, III, IV, V 类围岩类别下,当掘进效率相对较高时所要达到的贯入度分别为 2, 5, 8,  $10\text{mm/r}$ ,可为后期相似岩体条件下贯入度的选择提供参考。

### 参考文献:

- [1] 张羽.隧道掘进机(TBM)在工程施工中的应用[J].科技情报开发与经济,2005, 15(3):290-291.  
ZHANG Y. Application of tunnel boring machine (TBM) in engineering construction [J]. Journal of library and information science, 2005, 15(3): 290-291.
- [2] 林家骥.研究盘形滚刀破岩机理与提高刀具使用寿命[J].福州大学学报(自然科学版),1990,18(1):108-113.  
LIN J Q. Research on the rock breaking mechanism of disc rolling cutters and improving their service life [J]. Journal of Fuzhou University(natural science edition), 1990, 18(1):108-113.
- [3] WANG L, KANG Y, CAI Z, et al. The energy method to predict disc cutter wear extent for hard rock TBMs[J]. Tunnelling and underground space technology, 2012, 28: 183-191.
- [4] 李刚,朱立达,杨建宇,等.基于CSM模型的硬岩TBM滚刀磨损预测方法[J].中国机械工程,2014,25(1):32-35.  
LI G, ZHU L D, YANG J Y, et al. The method for predicting hard rock TBM hob wear based on CSM model [J]. China mechanical engineering, 2014, 25(1): 32-35.

- [5] 高攀,邹翀.比能法在渤海海峡隧道TBM施工中的应用分析[J].中国工程科学,2013,15(12):73-79.  
GAO P, ZOU C. Analysis of the application of specific energy method in TBM construction of Bohai Strait Tunnel [J].Strategic study of CAE, 2013, 15(12): 73-79.
- [6] SNOWDON R A, RYLEY M D, TEMPORAL J. A study of disc cutting in selected British rocks[C]//International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,Pergamon, 1982.
- [7] FARMER I W, GLOSSOP N H. Mechanics of disc cutter penetration[J]. Tunnels tunnelling(United Kingdom), 1980, 12(6): 22-25.
- [8] 吕根根,张晓平,刘泉声,等.TBM掘进速度预测模型研究[J].河南科学,2019,37(8):1289-1295.  
LÜ G G, ZHANG X P, LIU Q S, et al.Research on TBM excavation speed prediction model [J].Henan science, 2019, 37(8): 1289-1295.
- [9] 何於琏.TBM施工进度的科学预测方法[J].铁道工程学报,1999(2):94-98.  
HE Y L. Scientific prediction method for TBM construction progress [J].Journal of railway engineering society, 1999(2): 94-98.
- [10] YAGIZ S. Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition[J].Tunnelling and underground space technology, 2008, 23(3): 326-339.
- [11] 周振梁,谭忠盛,李宗林,等.一种基于数据挖掘的掘进速度预测模型[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(5):1201-1219.  
ZHOU Z L, TAN Z S, LI Z L, et al. A data mining based excavation speed prediction model[J]. Journal of basic science and engineering, 2021, 29(5): 1201-1219.
- [12] 温森,赵延喜,杨圣奇.基于Monte Carlo-BP神经网络TBM掘进速度预测[J].岩土力学,2009,30(10):3127-3132.  
WEN S, ZHAO Y X, YANG S Q. Prediction of TBM excavation speed based on Monte Carlo BP neural network [J].Rock and soil mechanics, 2009, 30(10): 3127-3132.
- [13] 付柯. TBM掘进参数相关性分析及掘进速度预测[D].石家庄: 石家庄铁道大学,2018.  
FU K. Correlation analysis of TBM excavation parameters and prediction of excavation speed [D].Shijiazhuang:Shijiazhuang Tiedao University, 2018.
- [14] SAPIGNI M, BERTI M, BETHAZ E, et al. TBM performance estimation using rock mass classifications[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2002, 39(6): 771-788.
- [15] 龚秋明,卢建炜,魏军政,等.基于岩体分级系统(RMR)评估预测TBM利用率研究[J].施工技术,2018,47(5):92-98,127.  
GONG Q M, LU J W, WEI J Z, et al. Research on evaluating and predicting TBM utilization based on rock mass classification system (RMR) [J].Construction technology, 2018, 47(5): 92-98,127.
- [16] 曲连辉,吴宪. 提高TBM设备利用率的主要影响因素[J]. 中国科技纵横, 2014 (16): 95-95.  
QU L H, WU X. The main influencing factors for improving the utilization rate of TBM equipment [J] China science and technology forum, 2014 (16): 95-95.
- [17] BARTON N. TBM performance estimation in rock using QTBM[J].T & T international, 1999, 31(9): 30-34.
- [18] Frough O , Torabi S R , Yagiz S ,et al.Effect of Rockmass Conditions on TBM Utilization Factor in Karaj-Tehran Water conveyance tunnel[J].2012.
- [19] TORABI S R, SHIRAZI H, HAJALI H, et al. Study of the influence of geotechnical parameters on the TBM performance in Tehran -Shomal Highway project using ANN and SPSS[J]. Arabian journal of geosciences, 2013(6): 1215-1227.