

DOI: 10.11779/CJGE201406026

# 高强度基岩爆破预处理泥水盾构掘进特征研究

阳军生<sup>1</sup>, 邹志林<sup>2</sup>, 梁奎生<sup>3</sup>, 游永峰<sup>3</sup>, 张学民<sup>1</sup>, 肖超<sup>1</sup>

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100034;  
3. 中铁隧道集团有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 泥水盾构在高强度基岩地层中掘进, 盾构自身刀具无法有效破岩, 采用基岩爆破预处理的控制钻爆法能严格控制破碎砾块体量, 提高刀具破岩能力, 但盾构施工过程中, 掘进参数与岩石之间关系非常复杂。以台山核电站取水隧道为背景, 对现场获得的工作数据进行挖掘, 分析基岩爆破前后地层中盾构刀盘推力、刀盘扭矩及掘进速度的参数的选用特点。在此基础上, 引入参数转换量FPI、TPI指数及比能进行研究, 研究表明, 未经处理基岩地层, 岩石强度过高, 刀盘推力先达到最大值, 但切深很浅, 扭矩很难发挥最大能力; 经爆破处理后, 基岩岩体受到不同程度破碎, 盾构机推力及扭矩能有效发挥其功能, 掘进效能提高。因此, 在盾构机的工作负荷范围内, 应依据基岩岩体破碎效果, 调整刀盘推力和扭矩, 使之更好地适应地层, 力争达到高效安全的掘进目的。

**关键词:** 高强度花岗岩; 控制爆破; 泥水盾构; 比能; 掘进效能

**中图分类号:** TU452; U455.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2014)06-1179-06

**作者简介:** 阳军生(1969-), 男, 湖南永兴人, 博士, 教授, 主要从事隧道与地下工程等领域的教学与科研工作。E-mail: jsyang@csu.edu.cn。

## Tunneling characteristics of high-strength bedrock stratum pretreated by blasting

YANG Jun-sheng<sup>1</sup>, ZOU Zhi-lin<sup>2</sup>, LIANG Kui-sheng<sup>3</sup>, YOU Yong-feng<sup>3</sup>, ZHANG Xue-min<sup>1</sup>, XIAO Chao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Limited, Beijing 100034, China; 3. China Railway Tunnel Stock Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** The shield cutter cannot effectively break the rock with the slurry shield tunneling in the high-strength granites, while pretreatment of the bedrock by controlled blasting can strictly control the broken block size to enhance stronger rock breaking capacity, but the relationship between tunneling parameters and rock is very complicated during shield construction. Based on the intake tunnel of Taishan Nuclear Power Station, the field parameters are studied to analyze selection features of thrust force and torque of cutter head and tunneling rate. On this basis, the parameter conversion indices FPI, TPI and specific energy are introduced for analysis. The results show that the rock is too hard in the high-strength granites, the thrust force is close to its peak value, however the penetration is lower, it is too difficult to give full play of the torque capacity of the cutter head. The bedrock is destroyed by blasting to a certain extent, thus the slurry shield can take full advantage of its torque force as well as the thrust. In this situation, the tunneling performance is improved. Therefore the thrust and torque are adjusted to better adapt to the strata within the workload scope of the shield machine according to the fragmentation effect of blasting so as to achieve efficient and safe excavation.

**Key words:** high-strength granite; controlled blasting; slurry shield; specific energy; tunneling performance

## 0 引言

中国东南部沿海城市的花岗岩地层中都不同程度地存在球状风化岩体和基岩局部侵入隧道开挖断面, 盾构在此地层中施工, 盾构刀具无法有效破除该高强度岩体; 且由于岩体上部或周围存在软弱地层, 人工破除操作困难, 盾构掘进风险极大, 严重的会导致盾构施工失败。针对该地层处理技术国内学者做了大量研究<sup>[1]</sup>, 并取得很好的借鉴经验。但盾构施工过程中,

掘进参数与岩石之间关系非常复杂, 基岩经爆破处理后盾构机能否以更小的耗能和更快的掘进速度进行施工, 仍是值得研究的课题。因此, 有必要对现场获得的工作数据进行挖掘, 掌握掘进对象和参数之间的掘进特征。

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAK24B02); 国家自然科学基金项目(51008309)

收稿日期: 2013-11-01

不同岩石类型下的掘进效率差异是诸多地质因素对掘进机的掘进效率产生不同程度影响的综合反映。Delisio 等<sup>[2]</sup>利用钻掘指数 FPI, 通过多元回归方法分析掘进贯入度、掘进速度与岩石体积节理数、岩石单轴抗压强度间关系。Yamamoto 等<sup>[3]</sup>基于 TBM 掘进参数, 运用地质统计方法建立了开挖能量与岩体强度的关系, 有效地判别工作面前方岩体状况。宋克志等<sup>[4]</sup>依托重庆越江隧道盾构掘进试验, 分析和制定了不同地层条件下的主掘进参数匹配方案。张莹等<sup>[5]</sup>以天津地铁某标段隧道工程的地层条件为背景, 分析处理后的掘进参数与地质参数具有较好的对应关系。刘月明等<sup>[6]</sup>以秦岭隧道为背景, 研究不同岩石掘进状况下掘进参数间潜在规律。上述文献对研究土压平衡盾构及 TBM 隧道施工掘进参数与岩层条件关系提供相应的思路, 但对泥水盾构刀盘扭矩与推力的关系与地层条的关联性问及较少。本文依托台山核电站取水隧道穿越典型高强度基岩地层施工情况, 分析了基岩爆破前后地层中盾构刀盘推力、刀盘扭矩及掘进速度的参数的选用特点, 同时引入 FPI、TPI 指数和比能分析参数的关联性。

## 1 工程概况

台山核电站取水隧洞位于陆域腰吉咀至大襟岛之间的海域中, 隧洞全长 4330.6 m, 为双洞取水隧洞, 开挖洞径为 9.03 m, 采用泥水加压平衡盾构(如图 1)。盾构机刀盘结构形式为面板+辐条, 刀盘脱困扭矩为 12181.0 kN·m, 最大推力为 69200 kN, 刀盘上配备了 59 把齿刀、152 把切刀、16 把周边刮刀、47 把单刃滚刀及 4 把中心双刃刀, 刀盘开口率约 34%, 以保证盾构机在各种土层和岩层以及软硬交错的复杂地层中能有效掘进。

盾构穿越基岩及海域孤石地层位于<sup>#1</sup>隧洞 DK159—DK360 段和<sup>#2</sup>隧洞 DK204—DK360 段。岩土层自上而下为粉砂粉质黏土、粉质黏土及花岗岩, 其间共发现<sup>#1</sup>隧道范围 1 处基岩突起、2 处孤石群, 2 号隧道范围 2 处基岩突起、2 处孤石群(见图 2), 岩体强度为 110.5~222 MPa, RQD=85%~100%, 属燕山期侵入体, 部分岩体体量较大。若采用盾构直接掘进通过的方法, 刀具在高强基岩面作周期性碰撞, 及含有孤石地层中掘进, 孤石与周围岩体强度差异较大, 刀盘受到的冲击力很大, 严重损坏刀盘和刀具, 被迫频繁换刀, 遇到自稳能力差, 不具备带压进舱的条件时, 将面临极大的施工风险, 甚至导致整个工程的失败<sup>[7]</sup>。因此, 为保证盾构机的顺利掘进, 综合考虑采用基岩爆破预处理即控制钻爆法的施工方法<sup>[8]</sup>, 爆破后形成 30 cm 块径大小的碎块。由于基岩段从陆

域段延伸至水域区, 水下爆破需通过钻爆船定位控制, 钻孔定位及成孔控制进行施工; 同时, 爆破施工时, 爆破振动和密集的钻孔造成了原始地层的频繁扰动, 对于泥水盾构来说, 地层漏气漏浆对掌子面稳定非常不利, 因此, 爆破后还需对爆破区域的地层进行注浆填充加固。岩层经成功爆破预处理后, 盾构机成功通过<sup>#1</sup>、<sup>#2</sup>隧洞基岩及海域孤石段, 彻底摆脱了海底特硬地层的束缚, 缓解掘进工期压力, 保证了节点工期的顺利完成, 同时规避带压进仓风险, 最终实现了<sup>#1</sup>、<sup>#2</sup>隧洞成功贯通, 实现了大襟岛与陆域侧的互联互通。

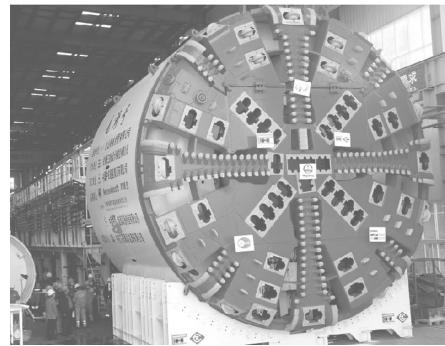


图 1 泥水加压平衡盾构机

Fig. 1 Slurry shield machine

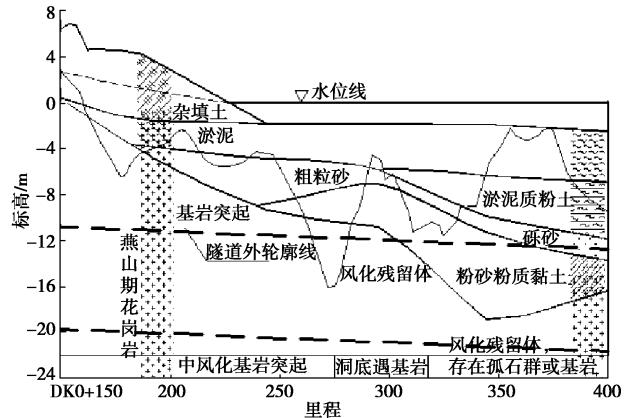


图 2 <sup>#1</sup>隧洞基岩、孤石的分布情况

Fig. 2 Distribution of boulder and bedrock of No.1 tunnel

## 2 基岩预爆破处理后岩体质量评价

### 2.1 基岩爆破区岩体抽芯检测

泥水盾构机破碎机和出渣系统要求爆破后岩体粒径低于 30.0 cm, 从有利于盾构顺利掘进, 因此, 岩体粒径的大小可评估爆破效果, 对基岩爆破区岩体进行抽芯检测, 经对该钻孔各回次岩芯样本的统计分析, 未爆破前岩样(图 3)显示, 岩体极完整且结构面不发育, 节理裂隙少。爆破处理后岩芯(图 4)岩面新鲜且不规则, 碎块单边大小长度在 10.0 cm 左右居多, 占取芯样本的 80%, 最大长度小于 25 cm, 钻孔周围岩体结构比较破碎。



图 3 基岩未处理前取芯岩样图

Fig. 3 Rock samples before blasting



图 4 基岩爆破后取芯岩样

Fig. 4 Rock samples after blasting

## 2.2 取芯岩体质量评价方法

爆破处理后的基岩岩体中产生新的各种不连续面，这些不连续面的存在很大程度上影响了岩体质量。而岩石质量指标和岩体块度指数具有能够快速准确评价区域岩体质量等特点，因此，依据这2个参数对钻孔周围岩体质量进行评价。

### (1) 钻孔周围 ROD 评价

钻孔回次进尺长度为 3 m, 将整个钻孔 3 m 左右长度内所包含基岩地层中各回次内的 RQD 值进行计算<sup>[9]</sup>, 得出基岩段地层经爆破处理后岩石质量指标 RQD 比例值 (图 5)。根据岩石 RQD 值岩体完整程度分级, 爆破后岩体主要呈较破碎和破碎状态, 岩石质量达到中等级别, 利于盾构机掘进。

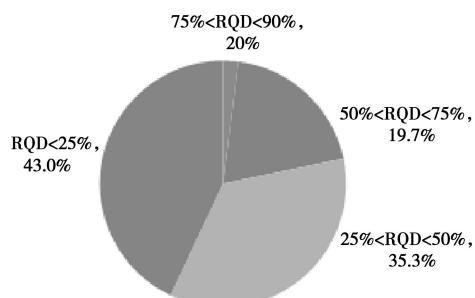


图 5 经爆破处理基岩地层 ROD 值分布

Fig. 5 RQD distribution after blasting

## (2) RBI 评价

岩体块度指数是表征岩体块度大小及其结构类型的一个综合指标。它反映组成岩体的块度（尺寸）大

小及其相互结合的关系，其定义为<sup>[10-11]</sup>

$$RBI = 3C_{r^3} + 10C_{r^{10}} + 30C_{r^{30}} + 50C_{r^{50}} + 100C_{r^{100}}, \quad (1)$$

式中,  $C_{r3}$  为岩芯长度 3~10 cm 的岩芯获得率,  $C_{r10}$  为岩芯长度 10~30 cm 的岩芯获得率,  $C_{r30}$  为岩芯长度 30~50 cm 的岩芯获得率,  $C_{r50}$  为岩芯长度 50~100 cm 的岩芯获得率,  $C_{r100}$  为大于 100 cm 的岩芯获得率。

对所采取的岩芯按照长度 3~9, 10~29, 30~49, 50~99 cm 和大于 100 cm 的范围进行统计计算。表 1, 2 列出了该钻孔岩芯分段统计 RBI 值以及由此得出的岩石质量分级结果。

表 1 原始基岩段<sup>#1</sup> 钻孔岩芯 RBI 值测量结果

Table 1 RBI of core before blasting of No. 1 tunnel

孔段	进尺 /m	深度范围 /m	RBI 值	岩体质量描述
1	2.65	0~3	8.65	岩体较破碎
2	3.00	3~5.97	48.15	岩体完整
3	2.80	5.97~9.01	27.12	岩体较完整
4	2.95	9.01~12.01	24.15	岩体较完整
5	2.98	12.01~14.95	23.87	岩体较完整
6	2.97	14.95~17.94	9.78	岩体较破碎
7	3.02	17.94~20.96	28.95	岩体较完整
8	2.78	20.96~23.99	50.12	岩体极完整, 结构面不发育

表 2 经爆破处理基岩段#1 钻孔岩芯 RBI 值测量结果

Table 2 RBI of core after blasting of No. 1 tunnel

孔段	进尺 /m	深度范围 /m	RBI 值	岩体质量描述
1	1.95	0~3	5.67	岩体较破碎, 镶嵌结构
2	1.75	3~5.97	2.35	岩体破碎, 碎裂结构
3	2.10	5.97~9.01	1.98	岩体破碎, 碎裂结构
4	1.86	9.01~12.01	1.62	岩体破碎, 碎裂结构
5	1.57	12.01~14.95	1.75	岩体破碎, 碎裂结构
6	2.35	14.95~17.94	3.10	岩体较破碎, 镶嵌结构
7	1.54	17.94~20.96	2.54	岩体破碎, 碎裂结构
8	1.35	20.96~23.99	2.30	岩体破碎, 碎裂结构

由表 1, 2 可以看出：原始基岩岩体均为较完整，其中部分孔段岩体极完整且结构面不发育，岩石质量达到完整级别。爆破后基岩岩体呈碎裂结构，使得岩心采取率很低，致使钻孔周围岩体 RBI 值大部分都在 5 以下，评价结果为岩体破碎。

## 2.3 盾构刀具磨损分析及掌子面开仓检查

由于岩石的硬度越高，岩石的耐磨性越大，盾构在高强度基岩掘进过程中，刀具承受了很大的径向力与侧向力，使得刀圈刀尖剧烈摩擦和冲击急剧磨损而降低使用寿命<sup>[12]</sup>，因此，始发段盾构掘进时刀具磨损相当严重。

对前后处理地层的盾构施工过程中刀具磨损进行统计分析，见图 6。

盾构机于始发段 K0+159 挖进至 K0+179.5 时，共完成 15 环掘进，7 次常压进仓，进行了刀具磨损情况

检查及更换刀具, 共更换了 58 把滚刀。平均每天掘进 1.5 环, 掘进一环需换 3.9 把刀。经爆破处理施工措施后, 平均每天掘进 2.01 环, 掘进一环需换 2.0 把刀, 带压进仓的次数减小, 刀具磨损程度明显降低。同时, 根据现场换刀情况统计, 基岩及孤石地层, 刀具磨损主要表现在滚刀磨损和滚刀刀圈崩裂如图 7, 8。

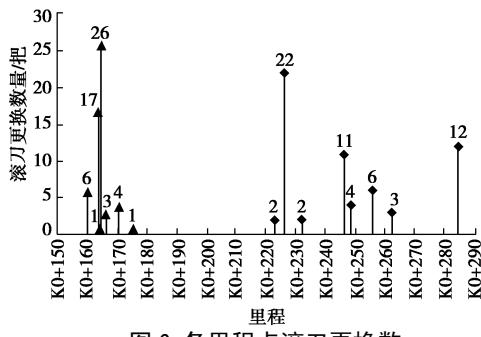


图 6 各里程点滚刀更换数  
Fig. 6 State for driving face before blasting



图 7 滚刀磨损

Fig. 7 Abrasion of disc cutters



图 8 滚刀刀圈崩裂

Fig. 8 State for driving face after blasting

盾构带压进仓换刀过程中, 基岩原始岩层结构面不发育, 节理裂隙几乎没有, 有刀具磨损后留下的凹槽。爆破后岩体较破碎, 大部分呈碎裂状结构, 形成大量随机节理, 极大地改变了岩体的力学性质, 岩体整体强度呈现出差异性(见图 9, 10)。

### 3 泥水盾构的掘进特征分析

盾构施工对地层条件具有很强的依赖性, 高强度

基岩爆破处理后, 通过取芯结果及岩体质量评价表明, 岩体均达到有效破碎, 利用采集的掘进试验参数, 对掘进速度、刀盘推力扭矩和它们的参数转换量 FPI、TPI 指数及比能等关系进行研究。



图 9 基岩原始岩层掌子面情况

Fig. 9 State for driving face before blasting

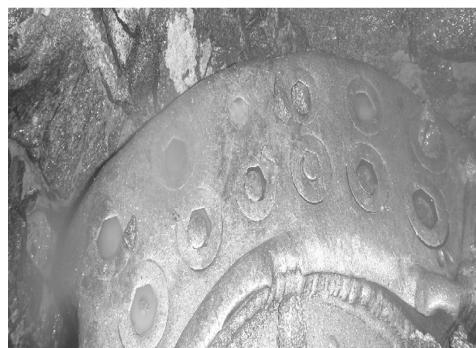


图 10 基岩爆破后掌子面变化情况

Fig. 10 State for driving face after blasting

#### 3.1 掘进速度、刀盘推力及扭矩关系

基岩地层经爆破处理前后盾构掘进速度发生明显的变化, 如图 11 所示。显示盾构机在强度较高、较完整的基岩中掘进, 掘进速度较低, 经爆破处理后基岩完整性受到破坏, 盾构刀具切割能力增强, 平均掘进速度由 8.5 mm/min 提升到 14.35 mm/min。

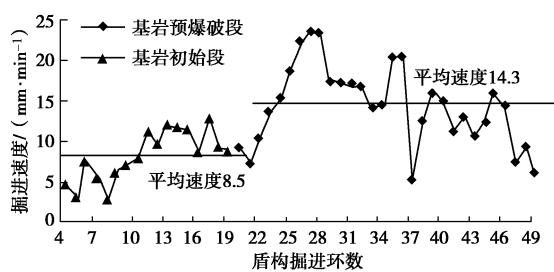


图 11 基岩爆破处理前后掘进速率动态曲线

Fig. 11 Dynamic curves of tunneling rate before and after blasting

分析图 11, 12 可知, 盾构在高强度基岩复合地层中掘进, 三者的变化都具有瞬间性和不确定性, 三者参数之间并没有表现出明显的相关性。且爆破前后地层中施工, 相同的掘进速度所需求的推力和扭矩值, 在基岩原始地层中相对较大, 推力达到最大值, 但切深很浅。

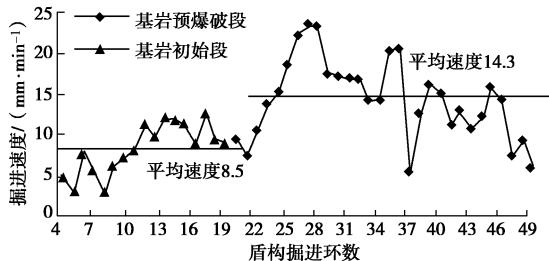


图 12 基岩爆破处理前后掘进速率动态曲线

Fig. 12 Dynamic curves of tunneling rate before and after blasting

### 3.2 岩石钻掘指数 FPI 与 TPI 指数的关系

盾构机切割效率度量应考虑垂直推进力和由此产生的切割深度, 隧道掘进过程中最有效的能量即为施加于掌子面的垂直推进力, 岩石钻掘指数 FPI 反映盾构掘进中对推力的需求, 其定义为<sup>[13]</sup>

$$FPI = F_n / P \quad (2)$$

TPI 指数表示单位切深的扭矩大小, 反映了盾构掘进中对扭矩的需求, 其定义为<sup>[2]</sup>

$$TPI = T / P \quad (3)$$

式中,  $F_n$  为刀盘总推力 (kN),  $P$  为每转切深 (mm),  $T$  为刀盘扭矩 (kN·m)。

利用#1, #2 隧道基岩段采集的掘进参数, 计算出 FPI 与 TPI 的关系 (图 13), 分析可知: 相同 TPI 数值条件下, 基岩初始段 FPI 值明显高于爆破处理后基岩地层的掘进数值, 说明盾构在初始地层中掘进, 推力先到达其最大能力, 而刀盘扭矩却未能发挥其最大能力, 掘进速率低, 盾构处于高能耗低效率的工作状态, 岩石难于掘进。基岩经爆破处理后, 岩石仍表现较高的强度, 岩石钻掘指数 FPI 值比较大, 在发挥推力能力的前提下, 扭矩也发挥其功能。TPI 数值在 2 种不同状态下基岩岩层中变化频繁, 处于持续波动状态, 且其间出现奇异点, 该奇异点主要产生在岩层硬度高, 且刀盘磨损严重的情况下, 提高扭矩对掘进速率效果不明显。

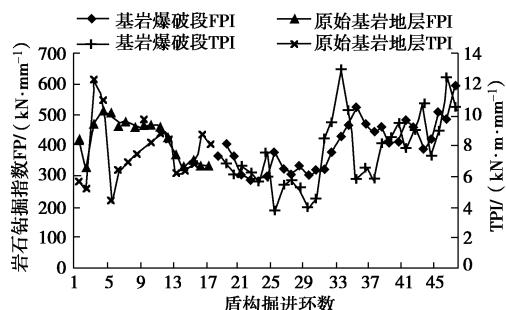


图 13 基岩地层爆破前后的 FPI 与 TPI 关系

Fig. 13 Relationship between FPI and TPI before and after blasting

### 3.3 掘进比能与岩石钻掘指数 FPI 的关系

Teale<sup>[14]</sup>针对盾构掘进参数推力和扭矩, 提出了比能的概念, 表示切削单位岩石体积所需的能量:

$$SE = \frac{E}{V} = \frac{Th}{R_i^2} \left( \frac{1}{\pi} + 2 \frac{T_{or}}{T_h} \right) \quad (4)$$

式中  $E$  为整个刀盘转动所需要的能量;  $V$  为盾构切削岩石的体积;  $T_{or}$  为刀盘扭矩 (kN·m);  $T_h$  为刀盘总推力 (kN);  $N$  为刀具总数量;  $P$  为每转切深 (mm/r);  $R_i$  为开挖隧道半径 (m);

由#1, #2 隧洞掘进试验获取的掘进参数计算得到基岩两种状态下盾构掘进比能动态变化 (图 14)。分析可知: 原始基岩地层中, 盾构推力比能和扭矩比能均以较高的水平同步数值变化, 说明地层为较硬的均匀岩层, 与地质勘探结果基本一致, 经爆破处理后, 受岩体性质变化影响, 扭矩比能明显减小, 在 29~35 环间, 扭矩和推力比能变化比例异常, 表明盾构遇到岩石较为破碎地段或遇到障碍物。个别点扭矩和推力比能突增, 则刀盘可能被卡住或刀具磨损严重, 应立即停机检查。通过扭矩和推力比能动态变化趋势, 能间接地描述该段的地质变化情况。

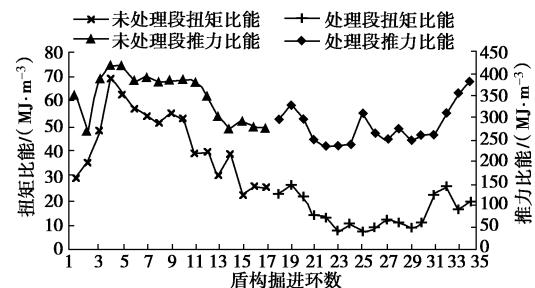


图 14 基岩爆破处理前后扭矩与推力比能动态变化

Fig. 14 Dynamic curves between specific torque and specific thrust before and after blasting

对比能和岩石钻掘指数 FPI 关系的散点图和回归分析曲线, 如图 15 所示。由回归方程知, 盾构在花岗岩地层中掘进, 比能与岩石钻掘指数 FPI 均呈幂函数关系。在未处理前的地层中掘进, 比能与钻掘指数 FPI 的比例关系数据离散程度较大, 其拟合方程为  $y = 2.4956x^{0.5615}$ , 回归值  $R^2 = 0.736$ , 盾构机能耗高; 处理后基岩地层中, 其拟合方程为  $y = 0.7116x^{0.7651}$ , 回归值  $R^2 = 0.8085$ , 盾构机耗能减小。由比能及 FPI 定义可知, 盾构在施工过程中, 应合理的调整刀盘推

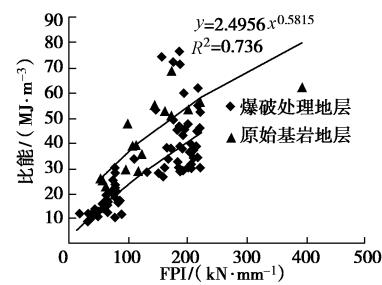


图 15 比能与岩石钻掘指数 FPI 的关系

Fig. 15 Relationship between FPI and specific energy

力和扭矩，使钻掘指数控制在回归曲线  $y = 0.7116x^{0.7651}$  以下，才能较好地适应地层，取得良好的掘进效能。

## 4 结 论

(1) 泥水盾构直接在高强度基岩地层中掘进，盘推力先达到最大值，但切深很浅，扭矩很难发挥最大能力，掘进效能低，且盾构刀盘及刀具磨损严重；爆破预处理后，岩体产生新的不连续面，盾构刀具切割能力增强，平均掘进速度由 8.5 mm/min 提升到 14.35 mm/min。

(2) 泥水盾构在爆破前后的基岩该地层中掘进，掘进速度、刀盘扭矩及推力没有明显的相关性，而比能与岩石钻掘指数 FPI 均呈幂函数关系。推力比能一直很高，即对推力的需求大，但处理后地层，在发挥推力能力的前提下，扭矩能很好发挥其功能，扭矩比能明显减小，切割效率提高。

(3) 由上述掘进特征分析知，在掘进时，应结合基岩岩体破碎效果，在盾构机的工作负荷范围内调整刀盘推力和扭矩，尽量使钻掘指数控制在回归曲线  $y = 0.7116x^{0.7651}$  以下，使之盾构较好的适应地层，力争达到高效安全的掘进目的。

## 参 考 文 献:

- [1] 竹维彬, 黄威然. 盾构工程孤石及基岩侵入体爆破技术研究[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(5): 12 - 17. (ZHU Wei-bin, HUANG Wei-ran. Study on pre-treatment of boulders and granite intrusions by blasting in shield tunneling[J]. Modern Tunneling Technology, 2011, 48(5): 13 - 17. (in Chinese))
- [2] DELISIO A, ZHAO J, EINSTEIN H H. Analysis and prediction of TBM performance in blocky rock conditions at the Lötschberg Base Tunnel[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2013, 33: 131 - 142.
- [3] YAMAMOTO T, SHIRASAGI S, YAMAMOTO S, et al. Evaluations of the geological condition ahead of the tunnel face by geostatistical techniques using TBM driving data[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18(2): 213 - 221.
- [4] 宋克志, 王梦恕. 复杂岩石地层隧道掘进机操作特性分[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 175 - 181. (SONG Ke-zhi, WANG Meng-shu. Analysis of the operation characteristics of tunnel boring machine in complex rocks[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5): 175 - 181. (in Chinese))
- [5] 张莹, 蔡宗熙, 冷永刚, 等. 盾构机掘进参数的关联分析与地特征识别[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(4): 476 - 480. (ZHANG Ying, CAI Zong-xi, LENG Yong-gang, et al. Correlative analysis of shield tunneling data and recognition of geologic features[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(4): 476 - 480. (in Chinese))
- [6] 刘明月, 杜彦良, 麻士琦. 地质因素对 TBM 掘进效率的影响[J]. 石家庄铁道学院学报, 2002, 15(4): 40 - 43. (LIU Ming-yue, DU Yan-liang, MA Shi-qi. Analysis of relationship between geologic condition and the efficiency of TBM boring[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2002, 15(4): 40 - 43. (in Chinese))
- [7] LIANG K S, YOU Y F, GUO W S. The risk control of an undersea shield tunnel passing through hard granites and core stones: A case history[C]// Proceedings of the ITA-AITES 2012 World Tunnel Congress. Bangkok: Engineering Institute Of Thailand, 2012: 325 - 327.
- [8] 路耀邦, 刘洪震, 游永峰. 海底盾构隧道孤石爆破预处理关键技术[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(5): 117 - 122. (LU Yao-bang, LIU Hong-zhen, YOU Yong-feng. Key techniques for the pretreatment of boulder blasting in an under-sea shield-driven tunnel[J]. Modern Tunneling Technology, 2012, 49(5): 117 - 122. (in Chinese))
- [9] PALMSTROM A. Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD)[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2005, 20(4): 362 - 377.
- [10] 黄润秋, 霍俊杰. 锦屏 I 级水电站坝基岩体块度指数量化取值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 449 - 453. (HUANG Run-qiu, HOU Jun-jie. Quantitative analysis of rock mass block index for dam foundation of Jinping I hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 449 - 453. (in Chinese))
- [11] 胡卸文, 钟沛林, 任志刚. 岩体块度指数及其工程意义[J]. 水利学报, 2002, 33(3): 80 - 83. (HU Xie-wen, ZHONG Pei-lin, REN Zhi-gang. Rock-mass block index and its engineering practice significance[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(3): 80 - 83. (in Chinese))
- [12] 解立功. 砂卵石层盾构刀具损坏原因分析及国产化技术[D]. 天津: 天津大学, 2006. (XIE Li-gong. Cause analysis of shield tool failure and domestic technology in sand and gravel[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese))
- [13] 尼克·巴顿. 节理断层破碎岩体的隧道掘进机开挖[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (BARTON Nick. TBM tunneling in jointed and faulted rock[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))
- [14] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1965, 2(1): 57 - 73.