

DOI: 10.11779/CJGE201903008

基于岩碴粒径分布规律的 TBM 破岩效率分析

闫长斌¹, 姜晓迪¹, 刘章恒¹, 杨继华², 苗 栋²

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450003; 2. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 岩碴的形状、大小及其粒径分布规律是综合反映 TBM 破岩效率的重要指标, 也是 TBM 掘进参数与岩石性质的重要联系。根据盘形滚刀破岩机制, 对 TBM 掘进岩碴进行了现场量测和筛分试验, 获得了 TBM 岩碴尺寸特征和粒径分布规律。在此基础上, 对实测岩碴尺寸和粒径分布数据进行了统计分析和理论分布函数拟合。分析了粗糙度指数与岩石强度、岩石耐磨性的关系, 探讨了不同围岩等级下粗糙度指数随掘进推力的变化规律。研究结果表明: ①片状岩碴的长轴与短轴之比约为 1.5, 而长轴与厚度之比则差别较大, 其长轴、短轴和厚度均服从正态分布; ②不同岩性条件下岩碴粒径分布均符合 Rosin-Rammler 函数分布; ③岩碴粗糙度指数越大, TBM 破岩效率越高; 硬岩条件下岩碴粗糙度指数随单轴饱和抗压强度增大而减小, 而中硬—软岩条件下则相反; ④无论是软岩还是硬岩, 岩碴粗糙度指数随岩石耐磨性增大而减小, 岩石耐磨性越强, TBM 破岩效率越低; ⑤TBM 破岩效率与围岩等级密切相关, 可根据现场实测岩碴粒径分布规律, 确定 II 级和 III 级围岩条件下 TBM 破岩效率最佳时的掘进推力区间。

关键词: TBM 施工; 岩碴; 尺寸特征; 粒径分布; Rosin-Rammler 函数; 粗糙度指数; 破岩效率; 掘进推力

中图分类号: TV672.1; U455.43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)03-0466-09

作者简介: 闫长斌(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事隧道与地下工程等方面的教学和科研。E-mail: yanchangbin_2001@163.com。

Rock-breaking efficiency of TBM based on particle-size distribution of rock detritus

YAN Chang-bin¹, JIANG Xiao-di¹, LIU Zhang-heng¹, YANG Ji-hua², MIAO Dong²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450003, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The shape, particle size and its distribution of rock detritus are the key indexes to reflect the rock-breaking efficiency of TBM, and the important internal link between TBM tunneling parameters and rock properties as well. According to the rock-breaking mechanism of disk cutter, dimension measurements and sieving tests on the rock detritus cut by TBM are carried out, and the dimension characteristics and particle-size distribution of rock detritus are obtained. The statistic analysis and theoretical distribution function fitting are conducted based on the in-situ measured data of dimension and particle-size distribution of rock detritus. The relationships among coarseness index, strength and wear resistance index of rocks are analyzed. The variation laws of coarseness index with tunneling thrust under different surrounding rock classes are discussed. The research results show that the ratio of long axis to short axis of the rock chips is about 1.5, while that of long axis to thickness of the rock chips is quite different for diverse surrounding rocks. The probability distributions of rock chip dimension including long axis, short axis and thickness are subordinate to normal distribution. The particle-size distribution of rock detritus accords with that of Rosin-Rammler function under different rocks. The larger the coarseness index, the higher the rock-breaking efficiency of TBM. The coarseness index of rock detritus decreases with the increase of the uniaxial compressive strength of the rock under hard surrounding rocks, while the change law is contrary for the mid-hard and soft surrounding rocks. The coarseness index of rock detritus decreases with the increase of the wear resistance index of rocks whether the surrounding rocks are hard or soft. The stronger the wear resistance of rocks, the lower the rock-breaking efficiency of TBM. The rock-breaking efficiency of TBM is closely related to the classification of the surrounding rocks. According to the particle-size distribution law of in-situ measured rock detritus, the tunneling thrust intervals when the rock-breaking

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1504523); 河南省重点研发与推广专项项目(182102210014); 黄河勘测规划设计有限公司自主研发项目(2016-ky56 (2))

收稿日期: 2018-01-29

efficiency of TBM is optimal can be determined under the surrounding rock class II and III.

Key words: TBM construction; rock detritus; dimension characteristic; particle-size distribution; Rosin-Rammler function; coarseness index; rock-breaking efficiency; tunneling thrust

0 引言

岩石隧道掘进机 (tunnel boring machine, 简称 TBM), 具有独头施工距离长、施工速度快、成洞质量好、人员劳动强度低、作业环境好等诸多优点。对于长距离隧道(洞)施工而言, 由于受线路布置、工期、投资、环保等条件制约, 使得 TBM 成为最佳选择甚至唯一途径^[1-3]。尤其是在施工速度方面, TBM 施工具有得天独厚的优势, 往往是钻爆法施工的 5 倍以上。当地质条件较好时, TBM 施工最佳月进尺可达 1800 m 以上^[4-5]。相比传统钻爆法施工, TBM 施工的核心竞争力在于快速, 因此 TBM 施工的关键问题之一, 就是如何提高破岩效率, 实现安全高效掘进, 同时减少刀具磨损。

TBM 滚刀破岩机理十分复杂, 是岩石受到拉伸破坏、挤压破碎、剪切破坏等综合作用的结果。破岩效率受岩石抗压强度、抗拉强度、节理发育、TBM 设备性能、刀间距、掘进参数等多种因素的共同影响。研究表明, 当刀间距和贯入度的比值在 10~12 时, TBM 的掘进效率最高^[6], 可以此为参考来确定滚刀数量和布置。根据岩石破碎理论^[7], TBM 掘进过程中滚刀切割掌子面岩石形成的岩碴, 其形状尺寸和粒径分布与机械能量利用率、滚刀破岩效率密切相关, 可以直接反应“岩-机”作用机制, 是机械性能、地质条件和掘进参数等多种信息的重要外在表现。目前, 岩碴信息已经成为 TBM 施工地质与围岩质量辨识的重要手段^[8-9]。因此, 岩碴形状、粒径大小及其分布特征可以直观地综合反馈 TBM 破岩效率, 而 TBM 破岩效率是评价 TBM 隧道施工经济效益最为重要的指标之一^[10]。

基于此, 研究人员利用室内线性切割试验和现场掘进试验, 对岩碴粒径分布与 TBM 破岩效率之间的关系开展了大量研究。Balci 等从切削破碎比能的角度评估研究了 TBM 滚刀破岩效率^[11-13]。Tuncdemir 等^[10]研究认为粗糙度指数^[14]是表征 TBM 破岩效率的有效参数, 并基于室内线性切割试验建立了粗糙度指数与比能之间的相关关系, 结果表明比能随粗糙度指数增大而减小, 该研究通过对两个工程实例分析, 认为当比能最小而粗糙度指数最高时, 可以得到 TBM 最优掘进参数。龚秋明等^[15]通过室内线性切割试验, 基于岩碴粗糙度指数探讨了滚刀间距及贯入度等对岩碴形态的影响。陈文莉等^[16]和宋克志等^[17]利用理论分布函数研究了岩碴的粒径分布曲线, 分别研究了岩碴粒径的

不同分布状态与破岩方式、掘进参数的关系, 但没有提出如何采用具体参数定量描述 TBM 破岩效率。文献[18, 19]采用现场掘进试验, 通过岩石碴片筛分和大尺寸岩片形状的分析, 评价了不同掘进参数下的 TBM 破岩效率。Aydin 等^[20]认为机械开挖产生的岩碴, 其粒径分布可用于确定岩石切割效率, 并指出粗糙度指数越大, 破岩效率越高。Farrokh 等^[21]研究了隧道收敛变形与岩碴粒径分布之间的关系, 认为岩碴尺寸与刀间距、贯入度有关, 随刀间距和贯入度的增加, 岩碴尺寸变大, 岩石切割效率提高。

实际上, 岩碴尺寸大小和粒径分布主要受贯入度和刀间距控制^[22], 而贯入度则主要取决于刀盘推力和岩体强度等。除刀间距外, 岩体完整性, 例如节理组数、层面和层理等, 也在很大程度上对岩碴粒径大小和形状有影响。因此, 岩碴的形状尺寸及其粒径分布规律是复杂围岩条件和机械掘进性能的间接反馈。基于现场岩碴尺寸量测和筛分试验, 分析岩碴粒径分布与围岩条件、TBM 掘进推力之间的联系, 基于粗糙度指数探讨岩碴粒径分布与 TBM 破岩效率的关系, 可以为不同围岩条件下 TBM 掘进参数优化和 TBM 掘进效能提高提供科学参考。

1 工程背景与现场试验

1.1 工程概况

兰州市水源地建设工程从刘家峡水库取水后通过输水隧洞、输水支线、水厂、市政管线向兰州市区供水。输水隧洞主洞是该项目的控制性工程, 全长 31.57 km, 采用以两台双护盾 TBM 为主和局部钻爆法为辅的联合施工形式。输水隧洞设计开挖洞径为 5.46 m, 衬砌后 4.60 m, 为压力隧洞。相向掘进的两台双护盾 TBM 中, TBM1 施工段长约 12.227 km, 其中滑行段 1496 m, 由#5 施工支洞进洞后沿主洞向下游掘进; TBM2 施工段长约 13.259 km, 其中滑行段约 930 m, 由输水主洞出口向上游掘进。输水隧洞主洞 TBM 掘进段均为上坡掘进, 设计纵坡 0.1%。

输水隧洞沿线穿越的地层岩性依次为: ①加里东中期石英闪长岩 (δo_3^2), 岩石坚硬, 抗风化能力较强, 节理发育较少, 岩体完整性好; ②前震旦系马衔山群 (AnZmx^4) 灰黑色、青灰色黑云石英片岩和角闪石英片岩, 岩石坚硬, 以片状构造为主, 片理较发育; ③加里东中期花岗岩 (γ_3^2), 岩石坚硬, 抗风化能力较

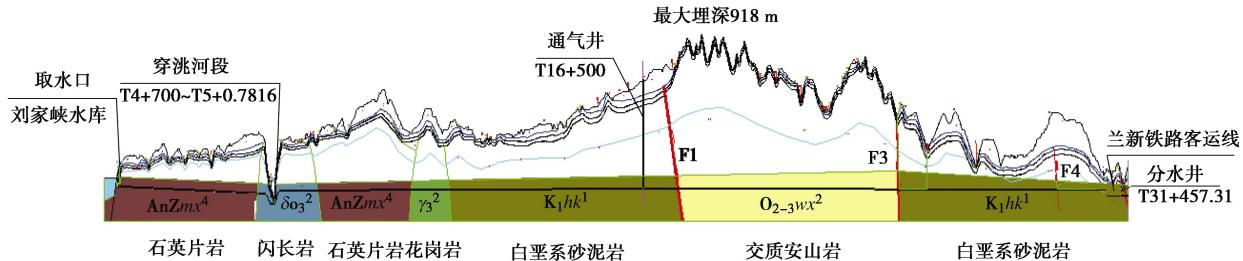


图 1 输水隧洞线路区工程地质剖面图

Fig. 1 Engineering geological section of route area of water conveyance tunnel

强, 多呈岩脉状侵入, 与围岩接合较好, 完整性较好; ④白垩系下统河口群 (K_1hk^1) 暗红、褐红、棕红夹浅灰绿色砂岩与泥岩互层、砂砾岩, 由于受构造影响, 局部产状变化较大, 节理较发育, 岩体完整性一般, 遇水易崩解。⑤奥陶系上中统雾宿山群 ($O_{2-3}wx^2$) 灰绿色、青灰色变质安山岩, 抗风化能力强, 岩体完整性较好。输水隧洞线路区工程地质剖面图, 见图 1 所示。

TBM 穿越地层, 按照《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487—2008)^[23] 附录 N 给出的围岩分级方法, 其中 II 级围岩洞段累计长度 14827.0 m, 占 47.4%; III 级累计长度 9953.7 m, 占 31.8%; IV 级围岩洞段累计长度 5587.1 m, 占 17.9%; V 级围岩洞段累计长度 899.0 m, 占 2.9%。其中, 石英闪长岩、石英片岩和花岗岩以 II~III 级为主, 变质安山岩以 III 级为主, 砂岩和粉砂岩以 III~IV 级为主。

考虑到施工周期的紧迫性, 同时兼顾地质条件的复杂性和施工安全, 选用适应性强、掘进效率高的双护盾 TBM 进行施工。两台双护盾 TBM 相向掘进, 与岩碴粒径分布有关的 TBM 主要设计参数见表 1 所示。II、III、IV 级围岩条件下贯入度平均值分别为 3~10, 10~15, 12~20 mm。

表 1 双护盾 TBM 主要设计参数

Table 1 Main design parameters of two-shield TBM

设计参数	TBM1	TBM2
开挖直径	5480 mm	5480 mm
滚刀数量	37 把	30 把
中心滚刀/直径	6/432 mm	4/432 mm
正滚刀/直径	21/483 mm	17/483 mm
边滚刀/直径	19/483 mm	9/483 mm
最大刀间距	86 mm	83 mm
刀盘转速	0~10.3 r/min	0~8.7 r/min
刀盘功率	1800 kW	2100 kW
最大刀盘推力	22160 kN	11900 kN
额定扭矩	3458 kN·m	4210 kN·m
脱困扭矩	5878 kN·m	6940 kN·m
最大掘进速度	120 mm/min	120 mm/min

1.2 TBM 岩碴现场量测与筛分试验

研究表明^[8-10], TBM 掘进碴料信息是研究隧洞围

岩条件和破岩效率等不可多得的间接因素。由于地质条件的不确定性、滚刀破岩的复杂性以及刀具布置和掘进参数的差异等, TBM 掘进过程中产生的岩碴碎屑形状和大小不同, 分布不等, 具有一定的随机性。在施工现场 TBM 皮带机出碴口处采取混合粒径岩碴试样, 详细描述岩碴形状, 并对尺寸较大的片状岩碴采用游标卡尺量测其尺寸(长轴、短轴和厚度), 分析片状岩碴尺寸分布规律; 采用 40, 31.5, 25 mm 和 16, 10, 5 mm 和 2.5 mm(共 7 级)孔径的标准方孔筛进行岩碴筛分试验, 分析不同岩性条件下岩碴粒径分布规律。图 2 为 TBM 岩碴现场量测与筛分情况。



(a) 花岗岩掘进段



(b) 砂质泥岩与粉砂岩互层掘进段

图 2 不同围岩掘进段 TBM 岩碴现场筛分试验

Fig. 2 In-situ sieving tests of TBM rock detritus for tunneling sections in different surrounding rocks

根据 TBM 施工进度, 共完成现场岩碴形状尺寸量测 63 块, 岩碴筛分试验 24 组。涉及输水隧洞线路穿越区的 4 种典型岩性, 即: 石英片岩、花岗岩、变质安山岩和砂质泥岩与粉砂岩互层。现场筛分试验选择的 4 种岩性中, 既有火成岩, 也有变质岩和沉积岩, 具有较好的代表性。

2 不同岩性的岩碴粒径分布规律

2.1 片状岩碴尺寸分析

TBM 掘进岩碴, 其形状既有片状的, 也有粒状粉状的。根据岩碴尺寸统计, 一般可分为 4 种形状^[15], 即: 长、平、既长又平和近似于立方体。片状岩碴一般尺寸较大, 近似于椭圆形, 而立方体岩碴尺寸相对较小。对于片状岩碴, 长轴尺寸可反映其最大粒径分布, 而短轴(宽度)尺寸则与筛分试验中筛孔大小有关, 可反映岩碴质量分布特征。厚度较小, 一般远远小于长轴。当片状岩碴的形状又长又平时, 其形状最好, 此时的破岩效率更高^[15]。

对现场量测得到的片状岩碴尺寸数据进行统计分析, 如表 2 所示。由表 2 可见: ①片状岩碴的长轴平均值约 10 mm, 短轴平均值约 7 mm, 厚度平均值约 2.5 mm; ②片状岩碴的长轴尺寸与短轴尺寸之比约为 1.5, 花岗岩和变质安山岩非常接近; 而片状岩碴的长轴与厚度之比则差别较大, 变质安山岩约为花岗岩的 1.5 倍左右。说明变质安山岩的片状岩碴又长又平, 其形状较好, TBM 破岩效率相对较高。

表 2 片状岩碴尺寸统计

Table 2 Dimension statistics of TBM rock chips

岩性	尺寸类型	平均值 /mm	长轴与短轴之比	长轴与厚度之比
	长轴	9.81		
花岗岩	短轴	6.92	1.42	3.66
	厚度	2.68		
变质安山岩	长轴	11.70		
	短轴	7.81	1.50	5.27
	厚度	2.22		

对现场量测得到的片状岩碴尺寸进行概率分布分析, 如图 3 所示。由图 3 可见: 无论是片状岩碴的长轴、短轴还是厚度, 均基本服从正态分布。这与文献[17]中的结论是一致的。

2.2 岩碴粒径分布函数拟合分析

对岩碴粒径分布进行理论分析, 通常可采用两种方法: 一是累计概率分析法, 与土的颗粒分析方法类似, 可以得到级配曲线, 从整体上描述岩碴粒径分布规律; 二是将实测岩碴筛分数据进行理论分布函数拟合分析, 评价是否满足理论分布函数或模型。岩石碎

屑粒度分析函数中, 应用最广泛的有 Rosin-Rammler 分布函数、Gandin-Schuhmann 分布函数及对数正态分布^[7]。研究表明, 无论是爆破开挖, 还是 TBM 掘进, Rosin-Rammler 分布函数均可以更好地描述岩碴粒径分布^[16-17]。

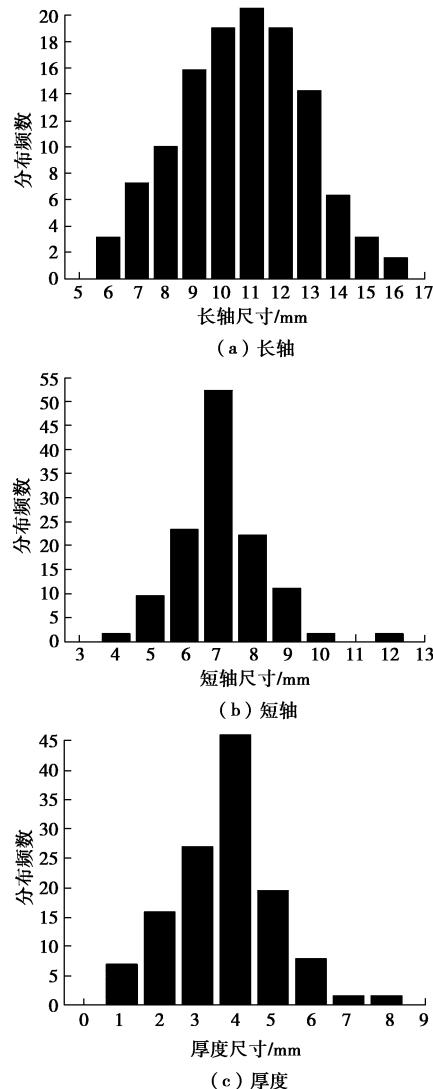


图 3 片状岩碴尺寸概率分布

Fig. 3 Probability distribution of rock chip dimension

Rosin-Rammler 分布函数的数学表达式如下:

$$R(D_p) = 1 - \exp[-b(D_p)^a] \quad (1)$$

式中 $R(D_p)$ 为筛下的残余质量百分比 (%); D 为粒径, 即筛孔的尺寸 (mm); 参数 a 是均匀分布常数, 表征岩碴颗粒分布均匀程度。一般情况下, 参数 a 越小, 岩碴粒径分布范围越广, 粒径分布越均匀; 反之, 则越不均匀。参数 b 是拟合常数。

利用 Matlab 通过线性回归分析来完成。4 种不同岩性对应的岩碴粒径 Rosin-Rammler 分布函数拟合关系曲线见图 4, 具体拟合参数见表 3。

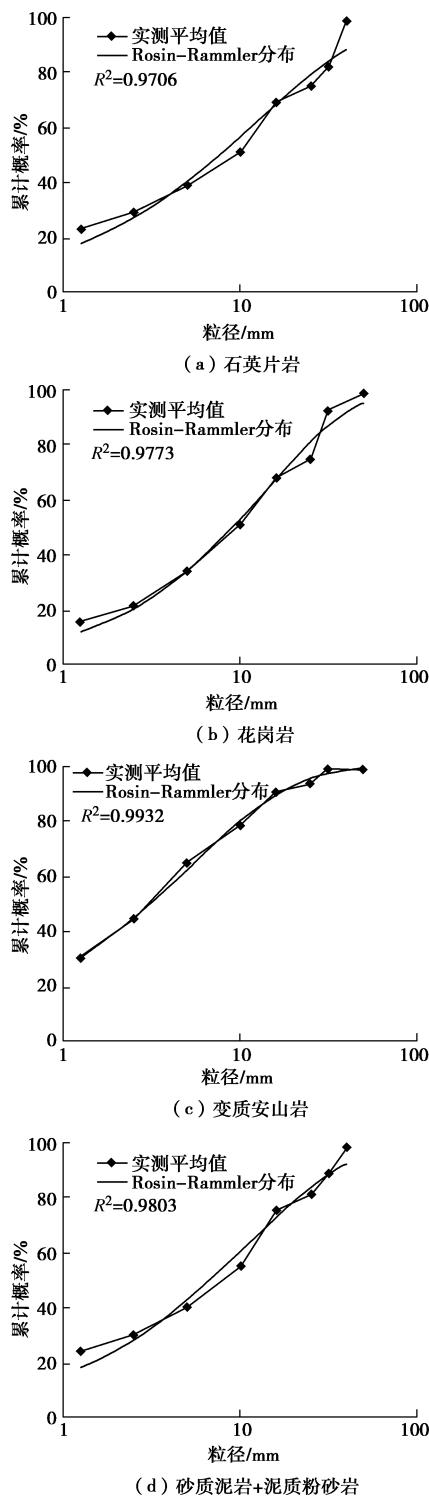


图 4 不同围岩段 TBM 岩碴粒径分布规律拟合

Fig. 4 Fitting of particle-size distribution of TBM rock detritus in different surrounding rocks

由图 4 可见, 4 种岩性对应的拟合相关系数均大于 0.97, 因此不同岩性条件下岩碴粒径分布均符合 Rosin-Rammler 函数, 可采用 Rosin-Rammler 函数进行岩碴粒径分布参数计算。因此, 对于地质条件和 TBM 性能参数相似的工程, 可根据积分原理利用拟合得到的 Rosin-Rammler 函数估算岩碴粗糙度指数等参

数, 初步评价 TBM 破岩效率。

表 3 Rosin-Rammler 分布函数计算参数

Table 3 Parameters of Rosin-Rammler distribution function

岩性	平均推力/kN	a	b
花岗岩	8000	0.8666	0.1022
角闪石英片岩	8800	0.7430	0.1688
砂质泥岩+泥质粉砂岩	2500	0.7340	0.1711
安山岩	3400	0.7133	0.3115
	6000	2.0650	0.0029
文献[17]砂岩	5000	1.3480	0.0103
	4000	0.7685	0.0983
	6000	0.7217	0.1197
文献[17]泥岩	5000	1.1170	0.0270
	4000	0.7682	0.0975

由表 3 可见, TBM 滚刀破岩形成的岩碴, 均匀分布常数 a 小于 1.0 的占 70%, 这与物料研磨形成的碎屑粒径分布规律类似^[16]。而文献[17]中泥岩和砂岩在刀盘推力 5000~6000 kN 时岩碴均匀分布常数 a 大于 1.0, 岩碴粒径分布呈两极化趋势^[17]。这与两个工程中 TBM 滚刀直径、滚刀数量、刀间距等参数存在的差异有关系。

3 岩碴粒径分布与 TBM 破岩效率

3.1 岩碴粗糙度指数与 TBM 破岩效率的关系

文献[14]提出了岩碴粗糙度指数的概念, 文献[15]基于线性切割试验计算了岩碴粗糙度指数, 根据筛分试验数据对岩碴粒径分布进行分析, 得到各个筛网的累计筛余率, 再将各个筛网的累计筛余率相加得到岩碴粗糙度指数, 具体计算表达式为

$$X_i = \frac{W_i}{W_t} \times 100\% \quad , \quad (2)$$

$$CI = \sum X_i \quad . \quad (3)$$

式中, W_i 是现场筛分试验得到的大于某一粒径尺寸的岩碴总质量 (g); W_t 是现场采取的 TBM 岩碴筛分的总质量 (g); X_i 是大于某一粒径尺寸的累计筛余率 (%); CI 为岩碴粗糙度指数 (%).

研究表明, 当 TBM 破岩效率高时, 滚刀切割岩石产生的片状岩碴较多, 岩粉较少, 此时粗糙度指数会较大。相反, 当 TBM 破岩效率低时, 产生的片状岩碴较少, 而岩粉会较多, 此时的粗糙度指数会较小^[15]。实际上, 从能量耗散与转换角度出发, TBM 破岩是复杂的机械能消耗过程, 破岩效率即能量转化率, 既与围岩地质特性 (岩石强度、岩石耐磨性和岩体完整程度等) 有关, 又与掘进参数、刀盘设计、刀具类型等因素有关。

表 4 不同围岩条件下 TBM 岩碴粗糙度指数
Table 4 Coarseness indexes of rock detritus under different surrounding rocks

编号	岩性	平均刀盘推力 /kN	岩石耐磨性 CAI 值	岩石单轴饱和抗压强度/MPa	岩碴粗糙度指数	围岩等级	围岩 TBM 工作条件等级
1-1	石英片岩	9000	4.17	160.1	314.1	II	II _B
1-2		8600	3.83	135.2	387.24	II	II _B
1-3		8500	3.75	130.7	402.32	II	II _B
1-4		8800	3.92	145.9	340.34	II	II _B
1-5		8700	3.85	136.2	379.03	II	II _B
1-6		8900	4.06	157.8	328.74	II	II _B
2-1	花岗岩	8100	3.23	106.1	589.07	II	II _A
2-2		8200	3.25	108.5	582.3	II	II _A
2-3		7900	3.26	107.4	583.45	II	II _A
2-4		8300	3.38	110.3	569.08	II	II _A
2-5		7700	3.32	115.6	575.89	II	II _A
2-6		8000	3.21	105.4	590.46	II	II _A
3-1	变质安山岩	3500	2.64	93.2	627.9	III	III _A
3-2		3400	2.66	97.8	621.04	III	III _A
3-3		3500	2.59	86.3	630.45	III	III _A
3-4		3200	2.78	103.8	601.25	III	III _A
3-5		3300	2.96	108.2	615.71	III	III _A
3-6		3600	2.53	82.5	640.27	III	III _A
4-1	砂质泥岩+泥质粉砂岩	2800	0.56	34.2	485.6	III	III _B
4-2		2500	0.64	30.9	458.23	III	III _B
4-3		2200	0.94	13.2	397.71	III	III _B
4-4		2300	0.85	15.1	402.92	III	III _B
4-5		2400	0.79	17.4	420.13	III	III _B
4-6		2600	0.62	22.7	473.46	III	III _B
5-1	文献[17]砂岩	4000		42.5	627.6	III	III _A
5-2		5000		57.8	600.1	III	III _A
5-3		6000		26.3	550	III	III _A
5-4		4000		21.9	454.5	III	III _B
5-5		5000		18.6	431.4	III	III _B
5-6		6000		15.3	401.2	III	III _B

围岩等级是评价工程地质条件和隧洞稳定性的简便有效方法, 是岩石坚硬程度、岩体完整程度和地下水发育等诸多因素的综合反映。不同围岩等级条件下, TBM 破岩效率不同。然而, 现有围岩分级方法是基于钻爆法提出的, 主要面向围岩稳定性评价, 无法准确评价 TBM 施工效率^[9]。为此, 在《水利水电工程地质勘察规范》^[23]围岩分级方法的基础上, 引入岩石耐磨性指标 CAI, 并参考《铁路隧道全断面岩石掘进机技术指南》^[24]得到围岩 TBM 工作条件等级, 用于评价 TBM 施工适宜性和破岩效率。不同围岩条件下岩碴粗糙度指数计算结果, 见表 4。

文献[17]中给出了重庆长江隧道 TBM 施工砂岩和泥岩的岩碴量测与筛分实测数据, 可用于 TBM 破岩效率分析(表 4)。由表 4 可见, 围岩 TBM 工作条件等级为 II_A 和 III_A 时岩碴粗糙度指数较高, 约为 550~650; II_B 和 III_B 时粗糙度指数较低, 约为 350~450。

3.2 岩碴粗糙度指数与岩石强度之间的关系

岩石坚硬程度不同, 滚刀破岩效果亦不同。根据《水利水电工程地质勘察规范》^[23], 单轴饱和抗压强度 $\geq 60 \text{ MPa}$ 的围岩为硬岩, 否则为中硬-软岩。利用表 4 中的有关数据, 可分析岩碴粗糙度指数与岩石单

轴饱和抗压强度之间的关系,从而探讨岩石坚硬程度对 TBM 破岩效率的影响。对岩碴粗糙度指数与岩石单轴饱和抗压强度进行相关性分析,见图 5 所示。

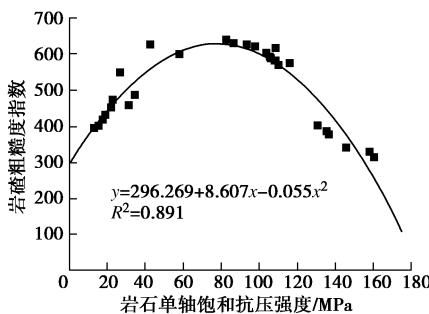


图 5 岩碴粗糙度指数与岩石单轴饱和抗压强度的关系

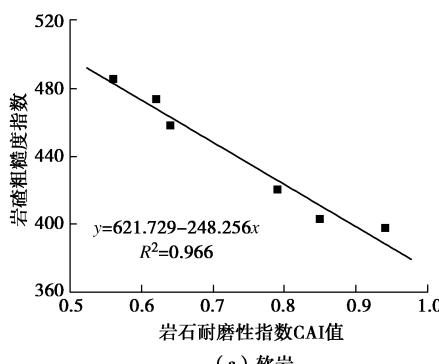
Fig. 5 Relationship between coarseness index of rock detritus and uniaxial compressive strength of rocks

由图 5 可见,岩碴粗糙度指数与岩石单轴饱和抗压强度之间存在较好的二次函数关系。硬岩的岩碴粗糙度指数随单轴饱和抗压强度增大而减小,而中硬-软岩则相反。可见:①岩石越坚硬,岩碴粗糙度指数越小,TBM 滚刀破岩所需能量消耗也就越大,在不考虑其他影响因素情况下,TBM 破岩效率越低。②软岩强度较低,TBM 掘进时,由于岩碴之间的二次磨损和运输磨损等原因,造成小粒径岩碴和岩粉含量增加,导致粗糙度指数降低。且岩石越软,粗糙度指数降低越明显。

3.3 岩碴粗糙度指数与岩石耐磨性之间的关系

利用表 4 中的数据,可分析岩碴粗糙度指数与岩石耐磨性指标 CAI 之间的相关关系,从而探讨岩石耐磨性对 TBM 破岩效率的影响。对岩碴粗糙度指数与 CAI 值进行相关性分析,见图 6 所示。

由图 6 可见:无论是软岩还是硬岩,岩碴粗糙度指数均随岩石耐磨性增大而减小,二者之间存在线性递减关系,相关系数 R^2 大于 0.80。说明岩石耐磨性越强,岩碴粗糙度指数越小,TBM 滚刀破岩所需能量消耗也就越大,在不考虑其他影响因素的情况下,TBM 破岩效率越低。



(a) 软岩

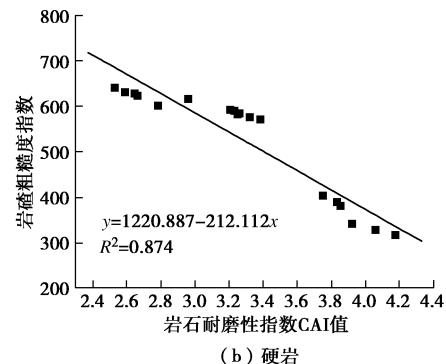


图 6 岩碴粗糙度指数与岩石耐磨性指标 CAI 的关系

Fig. 6 Relationship between coarseness index of rock detritus and wear resistance index CAI of rocks

3.4 岩碴粗糙度指数与掘进推力的关系

利用表 4 中的数据,可分析岩碴粗糙度指数与掘进推力之间的关系,探讨掘进参数对 TBM 破岩效率的影响。由前述可知,TBM 破岩效率既与岩石强度有关,也与岩体完整性有关,二者均可通过围岩等级反映出来。围岩等级也是 TBM 施工中最常用的工程地质评价方法和隧洞衬砌支护参考依据。为此,考虑 TBM 施工地质工作方法,根据表 4 中给出的围岩等级,分别分析 II 级和 III 级围岩条件下岩石粗糙度指数与 TBM 平均掘进推力的关系,见图 7,8 所示。

由图 7,8 可见:①在 II 级围岩条件下,当平均掘进推力为 7700~8200 kN 时,岩碴粗糙度指数较大,此时 TBM 破岩效率较高;可见 TBM 破岩效率并非完全随掘进推力的增大而单调递增;说明除掘进推力外,TBM 破岩效率还与岩石强度、岩石耐磨性等因素有关。②在 III 级围岩条件下,当平均掘进推力为 3400~3800 kN 时,岩碴粗糙度指数较大,此时 TBM 破岩效率较高;当平均掘进推力低于 3200 kN 时,岩碴粗糙度指数迅速降低,说明此时 TBM 破岩效率较低,应及时调整 TBM 掘进参数,适当加大刀盘总推力。③当岩碴粗糙度指数较高时,II 级和 III 级围岩对应的平均掘进推力相差较大,主要是岩石强度、岩石耐磨性和岩体完整性不同造成的。

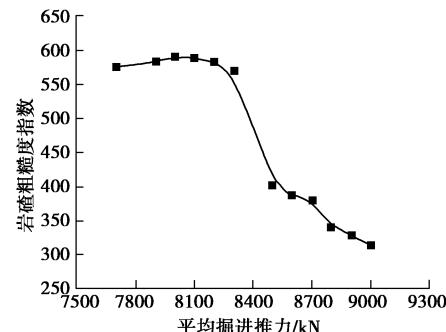


图 7 II 级围岩条件下岩碴粗糙度指数与掘进推力的关系

Fig. 7 Relationship between coarseness index of rock detritus and thrust force for surrounding rock class II

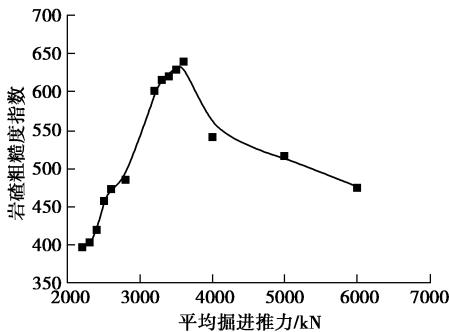


图8 III级围岩条件下岩碴粗糙度指数与掘进推力的关系

Fig. 8 Relationship between coarseness index of rock detritus and thrust force for surrounding rock class III

4 结 论

(1) 岩碴形状尺寸特征与岩性有关, 不同岩性条件下片状岩碴的长轴与短轴之比约为1.5, 而长轴与厚度之比则差别较大。片状岩碴的长轴、短轴和厚度尺寸, 均基本服从正态分布。

(2) 不同岩性条件下TBM岩碴粒径分布规律均符合Rosin-Rammler函数分布, 与物料研磨形成的碎屑粒径分布规律类似。

(3) TBM破岩效率受岩石强度和岩石耐磨性影响。在硬岩条件下, 岩石越坚硬, 岩碴粗糙度指数越小, 破岩效率越低, 而中硬-软岩则相反。无论硬岩还是软岩, 岩石耐磨性越强, 破岩效率越低。

(4) TBM破岩效率与围岩等级密切相关, 可根据现场实测岩碴粗糙度指数统计分析, 确定II级和III级围岩条件下最佳TBM破岩效率对应的最优掘进推力区间, 从而为掘进参数优化提供参考。

参 考 文 献:

- [1] BRULAND A. Hard rock tunnel boring[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 1998.
- [2] 龚秋明. 掘进机隧道掘进概论[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (GONG Qiu-ming. Introduction to tunnel boring machine[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [3] SNOWDON R A, RYLEY M D, TEMPORAL J. A study of disc cutting in selected british rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1982, **19**(3): 107 – 121.
- [4] 张镜剑. TBM的应用及其有关问题和展望[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, **18**(3): 363 – 367. (ZHANG Jing-jian. The application and some problems of TBM and its prospects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, **18**(3): 363 – 367. (in Chinese))
- [5] 荆留杰, 张 娜, 杨 晨. TBM及其施工技术在中国的发展与趋势[J]. 隧道建设, 2016, **36**(3): 331 – 337. (JING Liu-jie, ZHANG Na, YANG Chen. Development of TBM and its construction technologies in China[J]. Tunnel Construction, 2016, **36**(3): 331 – 337. (in Chinese))
- [6] CHANG S H, CHOI S W, BAE G J, et al. Performance prediction of TBM disc cutting on granitic rock by the linear cutting test[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, **21**(3): 237 – 249.
- [7] 徐小荷, 余 静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984. (XU Xiao-he, YU Jing. Rock fragment[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984. (in Chinese))
- [8] 孙金山, 卢文波, 苏利军, 等. 基于TBM掘进参数和渣料特征的岩体质量指标辨识[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(12): 1847 – 1854. (SUN Jin-shan, LU Wen-bo, SU Li-jun, et al. Rock mass rating identification based on TBM performance parameters and muck characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(12): 1847 – 1854. (in Chinese))
- [9] 李苍松, 谷 婷, 丁建芳, 等. TBM施工隧洞围岩级别划分探讨[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(5): 730 – 735. (LI Cang-song, GU Ting, DING Jian-fang, et al. Discussion on rock classification in TBM construction tunnel[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(5): 730 – 735. (in Chinese))
- [10] TUNCDEMIR H, BILGIN N, COPUR H, et al. Control of rock cutting efficiency by muck size[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, **45**(2): 278 – 288.
- [11] BALCI C, TUMAC D. Investigation into the effects of different rocks on rock cuttability by a V-type disc cutter[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, **30**(4): 183 – 193.
- [12] CHO J W, JEON S, JEONG H Y, et al. Evaluation of cutting efficiency during TBM disc cutter excavation within a Korean granitic rock using linear cutting machine testing and photogrammetric measurement[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, **35**(4): 37 – 54.
- [13] 王述红, 王存根, 赵贺兴, 等. 基于岩石破碎体积的滚刀效率评估模型[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, **37**(4): 554 – 557. (WANG Shu-hong, WANG Cun-gen, ZHAO He-xing, et al. Cutter efficiency assessment model based on broken rock volume[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, **37**(4): 554 – 557. (in Chinese))
- [14] ROXBOROUGH F F, RISPIN A. The mechanical cutting

- characteristics of the lower chalk[J]. *Tunnels*, 1973(5): 45 - 67.
- [15] 龚秋明, 周小雄, 殷丽君, 等. 基于线性切割试验碴片分析的滚刀破岩效率研究[J]. *隧道建设*, 2017, 37(3): 363 - 368. (GONG Qiu-ming, ZHOU Xiao-xiong, YIN Li-jun, et al. Study of rock breaking efficiency of TBM disc cutter based on chips analysis of linear cutting test[J]. *Tunnel Construction*, 2017, 37(3): 363 - 368. (in Chinese))
- [16] 陈文莉, 福井胜则, 大久保诚介. 关于掘进机械破碎岩片的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(6): 1037 - 1043. (CHEN Wen-li, FUKUI Katsunori, OKUBO Seisuke. Study on the detritus from different excavation machines and methods[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(6): 1037 - 1043. (in Chinese))
- [17] 宋克志, 季立光, 袁大军, 等. 盘形滚刀切割岩碴粒径分布规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(增刊 1): 3016 - 3022. (SONG Ke-zhi, JI Li-guang, YUAN Da-jun, et al. Research on distribution regularities of grain size of rock detritus from discoid cutters[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(S1): 3016 - 3022. (in Chinese))
- [18] GONG Q M, ZHAO J, JIANG Y S. In situ TBM penetration test and rock mass boreability analysis in hard rock tunnels[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2007, 22(3): 303 - 316.
- [19] 龚秋明, 余祺锐, 侯哲生, 等. 高地应力作用下大理岩岩体的 TBM 掘进试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(12): 2522 - 2532. (GONG Qiu-ming, SHE Qi-rui, HOU Zhe-sheng, et al. Experimental study of TBM penetration in marble rock mass under high geo-stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(12): 2522 - 2532. (in Chinese))
- [20] AYDIN S M, NUH B. Some contributions on the estimation of performance and operational parameters of raise borers – A case study in Kure Copper Mine, Turkey[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 54(4): 37 - 48.
- [21] FARROKH E, ROSTAMI J. Correlation of tunnel convergence with TBM operational parameters and chip size in the Ghomroud tunnel, Iran[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23(6): 700 - 710.
- [22] GERTSCH L, FJELD A, NILSEN B, et al. Use of TBM muck as construction material[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2000, 15(4): 379 - 402.
- [23] GB50487—2008 水利水电工程地质勘察规范[S]. 2009. (GB50487—2008 Code for geologic investigation of water resources and hydropower engineering[S]. 2009. (in Chinese))
- [24] 引调水线路工程地质勘察规范[S]. 2014. (Code for engineering geological investigation of water diversion route[S]. 2014. (in Chinese))