

基于岩碴流动性的 TBM 出碴槽口选优设计

霍军周, 陈巍, 欧阳湘宇, 张旭
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 研究了在一定开口面积下, TBM 刀盘的最优出碴槽布置方式. 采用离散元方法 (DEM) 建立刀盘排碴仿真模型, 以出碴槽结构尺寸、数量等参数为变量进行 TBM 岩碴流动性仿真实验. 在出碴槽开口面积相同的前提下, 提出了基于岩碴流动性的出碴槽设计规则: ①尽可能采用对称式布置; ②尽可能使用长、短出碴槽交替布置的方式; ③适当减小长出碴槽的开口宽度以提高出碴过程的稳定性. 以“引洮”工程为例进行了验证, 结果表明, 与原出碴槽结构相比, 采用改进方案的刀盘的出碴效率和出碴稳定性分别提高了 15.08% 和 11.97%.

关 键 词: TBM; 出碴槽; 离散元方法; PFC; 开口面积

中图分类号: TH 212; TH 213.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)05-0715-04

Optimum Design of TBM Mucking Slot Based on the Rock Ballasts Fluidity

HUO Jun-zhou, CHEN Wei, OUYANG Xiang-yu, ZHANG Xu

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China. Corresponding author: HUO Jun-zhou, E-mail: huojunzhou@dlut.edu.cn)

Abstract: The optimum design of TBM mucking slot under certain open area was studied. By introducing the discrete element method, we took design parameters of mucking slot and its quantities as variables, and made a series of TBM rock ballast liquidity simulation experiments. We proposed a design method of mucking slot providing the same opening area of the cutterhead. First, the design should use the symmetrical arrangement as possible. Second, it should be more rational as long as the arrangement of alternating between long and short mucking slot is used. Third, the width of long mucking slot should be decreased for the stability of discharging ballasts. Take the numerical simulation results of the Yintao project comparing with the original design as an example, the efficiency and stability of discharging ballasts has been increased by 15.08% and 11.97%, respectively.

Key words: TBM; mucking slot; DEM (discrete element method); PFC; open area

全断面岩石隧道掘进机 (TBM) 是一种用于开挖地下通道的复杂机电液一体化工程机械, 技术附加值高^[1]. 目前, 我国大型 TBM 的设计能力薄弱, 核心技术有较多空白.

很多学者在刀盘设计领域进行了大量的研究, 在滚刀刀间距设计方面, Teale^[2]早在 1965 年就提出了比能的概念. 1977 至 1979 年间, Ozdemir 等^[3]通过滚刀破岩实验发现刀间距与比能的关系. Snowdon 等^[4-5], Sanio^[6], Gertsch

等^[7]在此基础上定义了最优刀间距.

盘体结构设计包括盘体剖分形式设计、人孔布置、支撑筋布置、刀盘主结构参数设计以及出碴槽布置等方面内容^[4]. 刀盘布局是优化刀盘设计和掘进机性能的最重要的因素^[8].

出碴槽的作用是使刀盘能够及时有效地将破碎的碴土从掌子面和刀盘之间排出. 如果出碴槽设计不合理, 将导致岩碴堆积在刀盘盘面, 造成刀盘盘面的磨损, 甚至会导致滚刀非正常受力, 从而

收稿日期: 2013-11-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (51375001); 国家重点基础研究发展计划项目 (2013CB035400); 辽宁省科技攻关计划项目 (2011220031); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (DUT13LK14)

作者简介: 霍军周 (1979-), 男, 山西运城人, 大连理工大学副教授.

导致滚刀损坏. 鉴于刀盘空间有限, 出碴槽的设计一般应优先考虑^[9]. 现有的 TBM 刀盘一般采用有利于降低刀盘旋转过程中的不平衡力矩与振动的对称式出碴槽布置方法^[10].

目前鲜有关于 TBM 出碴槽布置设计方面的研究资料. 本文采用 PFC3D 离散元软件, 以出槽数量、开口长度、宽度为设计变量, 对不同出碴槽结构形式的刀盘进行出碴过程仿真分析, 试图得到最优的出碴槽布置方法, 总体研究思路如图 1 所示.

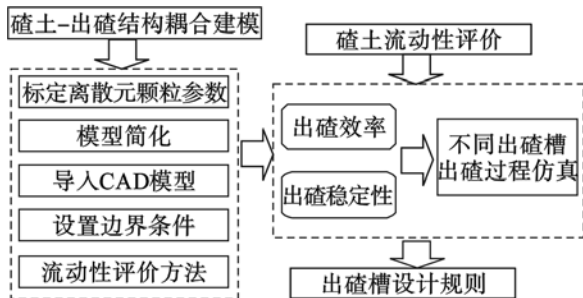


图 1 总体研究思路

Fig. 1 The general research ideas

1 碴土流动性评价

碴土的流动性主要从出碴效率和出碴的稳定性两方面来进行评价. 仿真过程中, 以刀盘与掌子面之间的颗粒 N_1 代表刀盘破碎岩碴的体积, 以刀盘内部的颗粒数量 N_2 代表经由出碴槽进入刀盘内部的岩碴体积 (出碴稳定性), 以从出碴口排出的颗粒数量 N_3 代表通过出碴口排出的岩碴体积 (出碴效率).

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}, \quad (1)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (2)$$

其中: $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, n)$ 表示第 i 个数据点;

$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 为 n 个数据点的平均值; k 为排出颗粒数量曲线的斜率; S^2 为刀盘内部颗粒数量的方差.

2 不同出碴槽出碴过程仿真与分析

本节研究不同出碴槽结构对 TBM 掘进过程中岩碴流动性的影响. 本文用于仿真的 TBM 刀盘直径为 5 550 mm, 出碴槽总开口面积为 3 m². 根据表 1 中所述设计参数建立相应的三维模型如

图 2 所示.

表 1 不同出碴槽设计方案参数

Table 1 Parameters of different mucking slot design

方案	数量/个	长度/mm	开口宽度/mm
方案 1	6	1 000	500
方案 2	6	1 250	400
方案 3	8	750	500
方案 4	8	938	400

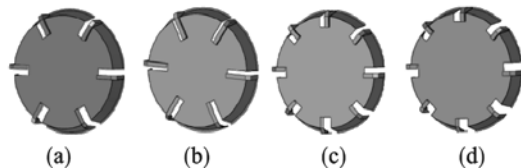


图 2 4 种出碴槽设计方案

Fig. 2 Four kinds of mucking slot design

(a) — 方案 1; (b) — 方案 2; (c) — 方案 3; (d) — 方案 4.

经过仿真计算, 得到不同方案排出颗粒数量变化曲线如图 3 所示. 通过直线拟合图 3 中 4 条曲线, 得出 4 种方案的斜率为: 方案 1 ($k_1 = 16.164$), 方案 2 ($k_2 = 15.132$), 方案 3 ($k_3 = 16.017$), 方案 4 ($k_4 = 14.253$). 由以上结果可知: 方案 1, 3 的出碴效率明显高于方案 2, 4, 因此, 出碴槽的宽度应根据掘进岩体的特性选取以保证岩碴顺利排出, 而出碴槽的长度越长则越有利于出碴. 但是在出碴槽总面积一定的条件下, 出碴槽数量越多反而会减小每个出碴槽的面积、降低出碴效率.

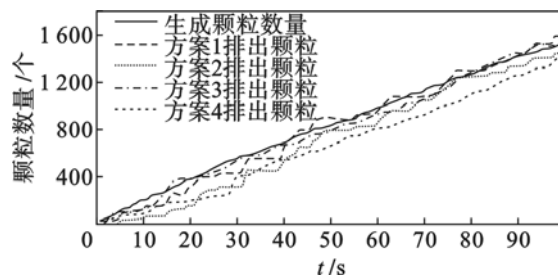


图 3 4 种方案仿真计算结果

Fig. 3 Simulation results of the four plans

基于以上结论, 考虑采用长、短出碴槽结合的方式来布置. 提出的两种改进方案如表 2 所示, 改进方案的三维模型见图 4.

表 2 改进方案 A, B 的参数

Table 2 Parameters of the improved plan A and B

方案	短出碴槽长度/mm	长出碴槽长度/mm
方案 A	500 × 2	1 250 × 4
方案 B	650 × 4	1 700 × 2

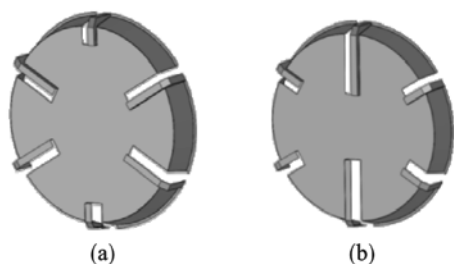


图4 两种改进方案
Fig. 4 Two improved plans
(a)—方案A; (b)—方案B.

以同样的方式进行仿真计算, 所得结果如图5所示.

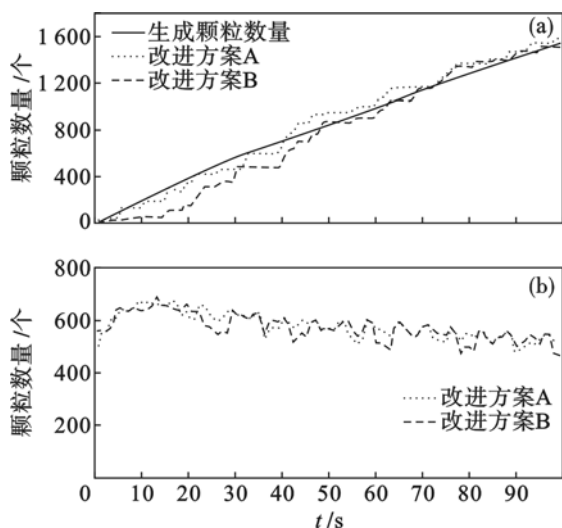


图5 改进方案的仿真结果
Fig. 5 Simulation results of the improved plans
(a)—排出颗粒数量; (b)—盘内颗粒数量.

可以看出, 改进的方案A、B的出碴效率均高于方案1, 方案B ($k_B = 16.407$) 出碴效率稍高于方案A ($k_A = 16.197$), 但是, 方案A的 N_3 波动较小 (方案A中 $S_A^2 = 2329$, 方案B中的 N_3 平方差 $S_B^2 = 2477$), 方案A的出碴过程更加稳定.

根据已有的仿真数据, 可以发现, 采用长、短出碴槽交替布置的出碴槽设计方式有利于提高刀盘的出碴效率, 但应该避免由相邻的出碴槽的开口面积差异过大而引起的刀盘的出碴不稳定. 因此, 适度减小方案B的长出碴口的开口宽度, 增大短出碴口的开口宽度, 以平衡长、短出碴口的刮碴能力. 由此制定的改进方案C的参数为: 长出碴槽 $\times 2$, 长度 1 700 mm, 宽度 423 mm; 短出碴槽 $\times 4$, 长度 650 mm, 宽度 600 mm. 模型如图6所示.

由图7中的结果可以发现: 方案C ($k_C =$

16.284) 出碴效率比方案B ($k_B = 16.407$) 仅低 0.007%, 但出碴过程稳定性提高 16.67% (方案C中 $S_C^2 = 2064$), 有利于TBM出碴系统稳定高效地排出岩碴.

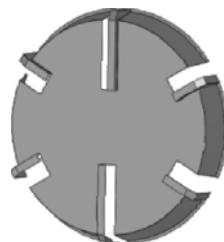


图6 改进方案C
Fig. 6 Improved plan C

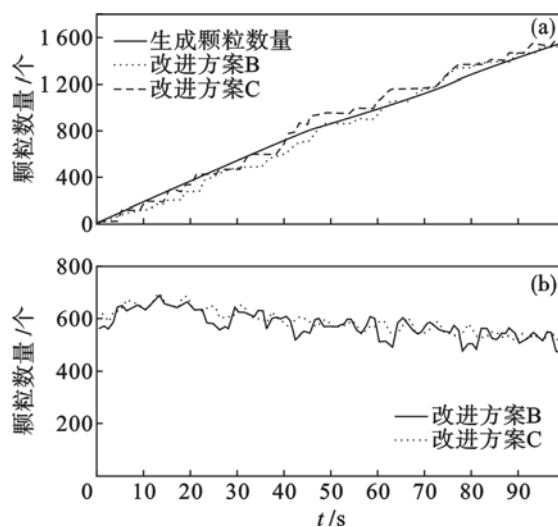


图7 改进方案B、C的结果
Fig. 7 Simulation results of the improved plans B and C
(a)—排出颗粒数量; (b)—刀盘内颗粒数量.

综合上述分析, 提出了以下出碴槽设计规则:

- 1) 在出碴槽开口面积相同的前提下, 尽可能采用对称式布置;
- 2) 在出碴槽开口面积相同的前提下, 尽可能使用长、短出碴槽交替布置的方式;
- 3) 在出碴槽开口面积相同的前提下, 适当减小长出碴槽的开口宽度以提高出碴过程的稳定性.

3 工程实例验证

按照本文提出的出碴槽的设计规则, 优化后的结构尺寸如表3所示. 图8为优化前后刀盘的出碴槽布置方法, 所得结果如图9所示.

在图9a中, 通过线性拟合得到排出颗粒曲线, 原始方案和改进方案的斜率分别为 $k = 22.46$ 和 $k' = 25.848$, 改进方案出碴效率提高 15.08%. 此外, 在前 50 s 内, 原始方案的生成颗粒数量大于其排出颗粒数量, 出碴过程不稳定; 而改进方案

仅在开始的 10 s 内排出颗粒的数量略小于生成的颗粒数量,而后很快排出的颗粒数量便超过了生成的颗粒数量,说明改进方案出碴效果更好.而由图 9b 可知,原始方案的方差为 3 175 而优化方案的方差则为 2 795,出碴稳定性提高了 11.97%.以上结果证明了本文提出的出碴槽优化规则是合理的.

表 3 原始方案与优化方案出碴槽设计参数

Table 3 Parameters of the original and improved plans

出碴槽	原方案长、宽/mm	改进方案长、宽/mm
1	2 483/650	2 400/500
2	545/650	900/722
3	2 026/650	900/722
4	2 023/650	2 400/500
5	910/650	900/722
6	1 510/650	900/722

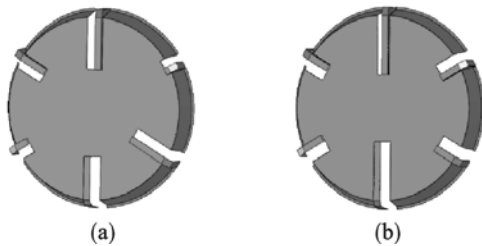


图 8 出碴槽优化前后

Fig. 8 Mucking slot model before and after optimization

(a)—优化前;(b)—优化后.

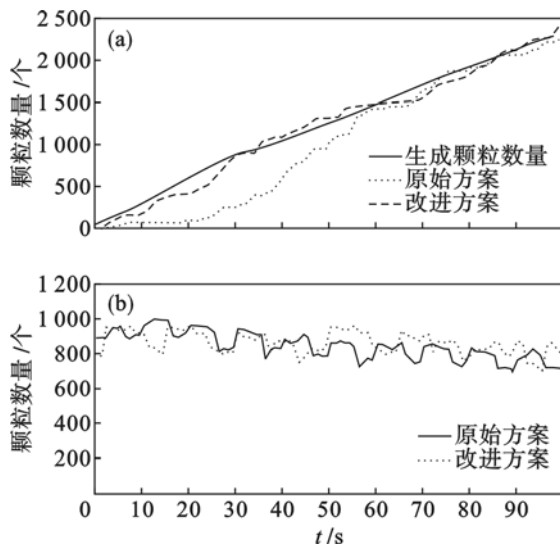


图 9 原始方案与优化方案结果比较

Fig. 9 Comparison of the simulation results between the original and improved plan

(a)—排出颗粒数量;(b)—刀盘内部颗粒数量.

4 结 论

1) 出碴槽总面积一定的条件下,不同出碴槽结构对 TBM 刀盘出碴效率和出碴稳定性影响较大:出碴槽的宽度应能够保证碴土的顺利排出,出碴槽长度越长越利于排碴;长短结合の出碴槽设计能有效提高出碴效率,但是如果面积差过大则会导致稳定性下降.

2) 在开口面积一定的情况下,为满足刀盘的出碴效率和出碴稳定性,在保证对称式布置的基础上尽可能采用长、短交替的出碴槽布置方法,并且适当减小长出碴槽的开口宽度.

3) 以“引洮”工程为例验证了本文提出的刀盘出碴槽结构设计方法的合理性和有效性:出碴效率和出碴稳定性分别提高了 15% 和 12% 左右.

参考文献:

- [1] 钱七虎,李朝甫,傅德明.隧道掘进机在中国地下工程中应用现状及前景展望[J].地下空间,2002,22(1):1-11. (Qian Qi-hu, Li Chao-fu, Fu De-ming. The present and prospect of application of tunneler in China's underground engineering[J]. *Underground Space*, 2002, 22(1): 1-11.)
- [2] Teale R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1965, 2(1): 57-73.
- [3] Ozdemir L, Wang F. Mechanical tunnel boring prediction and machine design (final report) [M]. Colorado: Colorado School of Mines, 1979.
- [4] 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 Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1982, 19(3): 107-121.
- [5] Snowdon R A, Ryley M D. The effect of hydraulic stiffness on TBM performance [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1982, 19(5): 203-214.
- [6] Sanio H P. Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1985, 22(3): 153-161.
- [7] Gertsch R, Ozdemir L. Performance prediction of mechanical excavators in Yucca Mountain Ruffs from linear cutting tests [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, SAND91-7038. 1991: 223-231.
- [8] Maidl B, Schmid L, Ritz W, et al. Hardrock tunnel boring machines[M]. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2008: 1-100.
- [9] 虞诗强. TBM 刀群与盘体支撑结构耦合布置设计方法[D].大连:大连理工大学, 2013. (Yu Shi-qiang. The coupling design method of cutters group layout and mucking & supporting structure of full face rock TBM [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.)
- [10] Rostami J. Hard rock TBM cutterhead modeling for design and performance prediction [J]. *Geomechanics and Tunneling*, 2008, 1(1): 18-28.