

全断面隧道掘进机刀盘刮碴铲斗结构 对出碴性能的影响

耿麒¹, 谢立扬¹, 张泽宇¹, 叶敏¹, 姚永春²

(1. 长安大学公路养护装备国家工程实验室, 710064, 西安;

2. 山西路桥建设集团有限公司技术中心(总工办), 030006, 太原)

摘要: 针对现有全断面隧道掘进机(TBM)刀盘出碴模拟研究所存在的岩碴级配和形状参数考虑不全面、刮碴铲斗结构影响规律揭示不明晰的问题,采用颗粒离散元方法构建考虑了岩碴级配和形状的刀盘落碴、铲碴、溜碴过程的数值模型,并进行缩比出碴试验验证了数值模型的可靠性。进行数值模拟研究了刀盘有无滚刀、铲斗结构形式、铲斗高度、铲斗宽度等因素对以平均出碴速度和出碴率为评价指标的刀盘出碴性能的影响规律。仿真结果表明:滚刀群对出碴过程影响可以忽略不计;三角截面式是较为合理的铲斗结构形式;铲斗高度的建议取值为滚刀高度减去30~50 mm;铲斗宽度的建议取值为出碴口宽度的50%。该模型为TBM刀盘出碴性能研究提供了有效手段,为TBM刀盘出碴结构的设计提供了理论依据。

关键词: 全断面隧道掘进机;出碴;刮碴铲斗;颗粒离散元

中图分类号: TU94 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202011018 **文章编号:** 0253-987X(2020)11-0149-09



OSID 码

Influence of Tunnel Boring Machine Scraper Bucket Structure on the Mucking Performance

GENG Qi¹, XIE Liyang¹, ZHANG Zeyu¹, YE Min¹, YAO Yongchun²

(1. National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Equipment, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Technical Center (Chief Engineer Office), Shanxi Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

Abstract: In view of the problems existing in the TBM (tunnel boring machine) cutterhead muck transfer simulation research that the grading and shape parameters of rock chips are not considered comprehensively, and the influence of the scraper bucket structure is not clearly revealed, a numerical model of the mucking process including chip falling, shoveling and sliding was built considering the grading and shape of rock chips by using the clump strategy of a particle-based discrete element method, and the numerical model was verified by scaled mucking tests. Numerical simulations were carried out to study the influence of disc cutters, bucket structure, bucket height and bucket width on the cutterhead's mucking performance considering the average mucking speed and passing rate. The simulation results show that the influence of the disc cutters on the mucking process can be ignored. The triangle section type is a more reasonable

bucket structure. The recommended value of bucket height is approximately 30-50 mm smaller than the disc cutter height. The recommended value of bucket width is 50% of the width of the chip discharging chute. The numerical model built in this paper provides an effective approach for the study of mucking process of TBM cutterhead, and the conclusions can be used as theoretical basis for the design of scraper buckets.

Keywords: tunnel boring machine; muck transfer; scraper bucket; particle-based discrete element method

全断面隧道掘进机(TBM)是一种用于隧道全断面开挖的大型专用工程装备,被广泛应用于山岭和大型引水隧道等工程^[1]。刀盘是TBM的关键部件,具有掘进和出碴两大基本功能^[2]。国内外对刀盘系统破岩掘进开展了大量的研究^[3-10],但是对刀盘出碴的研究则相对匮乏。刀盘的出碴性能直接影响掘进速度、刀盘卡顿和刀具二次磨损,出碴口和刮碴铲斗的设计也与滚刀布局和刀盘刚度密切相关,这说明开展刀盘出碴研究,对于提高TBM掘进性能和优化刀盘结构具有重要意义。

翟国强等基于工程实践和数学理论分析了刮碴板长度、铲斗组数和溜槽长度的确定原则和计算方法^[11];李大平采用Abaqus软件二次开发了参数化刀盘溜碴仿真平台,研究了溜碴板角度和刀盘转速等参数对溜碴过程的影响^[12];毛本庆针对TB880E型TBM在中天山隧道掘进时的刮板及底座频繁受损问题,提出了相应的解决方案^[13];陈巍等基于颗粒离散元软件PFC^{3D},将岩碴简化为球形颗粒,模拟了刀盘出碴过程,研究了出碴槽开口面积和溜碴板结构对出碴效率和稳定性的影响规律^[14-16];夏毅敏等基于Edem离散元软件将岩碴简化为球形颗粒,模拟了刀盘出碴过程,研究了出碴槽结构对出碴效率的影响规律^[17]。上述研究主要针对出碴口及溜碴板的排布和结构进行,对TBM刀盘铲拾岩碴的关键零部件刮碴铲斗的研究不足;现有的数值模拟大多将岩碴简化为球形,忽略了岩碴形状对出碴过程的影响,可能造成模拟误差。

针对上述问题,本文基于颗粒离散元软件PFC^{3D},构建考虑级配和形状的岩碴数值模型,模拟岩碴生成与掉落、岩碴铲拾与入仓、岩碴转运与滑落等过程;分析出碴过程来揭示刮碴铲斗结构形式、长度和宽度等参数对刀盘出碴性能的影响规律。结果表明:三角形截面式铲斗可顺利铲碴;建议铲斗高度比滚刀高度低30~50 mm;建议铲斗宽度为出碴口宽度的50%。

1 TBM 出碴过程与刮碴铲斗结构

1.1 刀盘出碴过程

TBM刀盘出碴过程如下:岩石在刀具的滚压作用下以片状岩碴的形式从掌子面剥离,落至隧道底部形成碴堆;随着刀盘的回转和推进,岩碴被刮碴铲斗拾起并推挤进入刀盘仓;刀盘进一步回转,岩碴被抬升并沿溜碴板滑落至刀盘背面中心处的料斗中,随后落至皮带出碴机上,最后由二级皮带机连续转运至洞外。本文针对岩碴从生成至落入料斗的过程进行数值模拟。

1.2 刮碴铲斗结构

TBM刀盘及刮碴铲斗的结构如图1所示,出碴口在刀盘外侧周向均匀排布,刮碴铲斗组件安装在出碴口一侧。刮碴铲斗组件在A-A截面视图中成三角形,其前端高出刀盘体表面 H ,根据设计经验, H 过小,铲斗将无法顺利铲碴, H 过大,铲斗将直接接触掌子面而损坏;同时铲斗具有一定的宽度 D , D 过小,铲斗内面陡峭,不利于铲碴, D 过大,铲斗遮挡出碴口而影响岩碴通过。因此,需要合理选取铲斗高度 H 和宽度 D ,从而在确保铲斗不被损坏的前提下,具有最佳的铲碴和出碴性能。

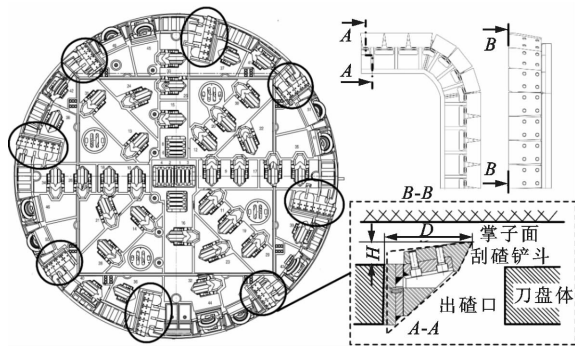


图1 TBM刀盘及刮碴的铲斗结构

2 出碴过程数值模型构建

2.1 颗粒离散元方法

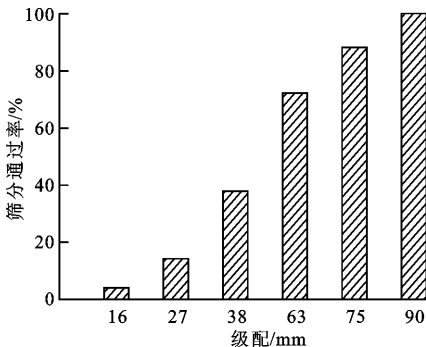
本文采用基于颗粒离散元方法的软件PFC^{3D}进

行数值模拟研究,该软件包括颗粒和墙体两种最基本的要素,通过其二次开发接口,既可研究颗粒块体的宏观运动,也可研究裂纹力链的细观演化。墙体可用于构建模型结构和边界;颗粒可直接或聚合后表征物料,也可用于构建模型结构。在每个分析步中,基于牛顿第二定律和胡克定律,考虑每个颗粒的直径、密度、摩擦系数、接触刚度、黏结键刚度与强度等属性和细观参数,对其速度、位移、接触力等物理量进行更新,从而表征材料的宏观力学特性。

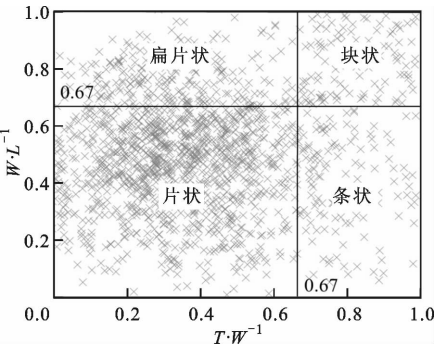
2.2 数值模型构建

采用 Pro/E 软件对刀盘体进行三维建模,以 STL 格式导入 PFC^{3D},生成刀盘的刚性墙体模型;采用颗粒块技术构建岩碴模型,设定岩碴为不可破碎。

对从 TBM 二级皮带机处采集的 200 kg 岩碴进行筛分试验,并逐块测量岩碴的长度 L 、宽度 W 、厚度 T ,TBM 岩碴级配和形状检验结果如图 2 所示。筛分结果表明,大部分岩碴位于 27~75 mm 的级配区间;参考 Bruland 的研究^[18],分别以岩碴厚度与宽度的比(T/W)和宽度与长度的比(W/L)作为横、纵坐标,以 0.67 为临界值,将岩碴形状分为片状、扁片状、块状和条状 4 种类型。



(a)岩碴筛分试验结果



(b)岩碴形状分析

图 2 TBM 岩碴级配和形状检验结果

基于上述结果,选取 21、32、50、69 和 83 mm 5 种级配构建岩碴模型,各级配岩碴的质量分数分别为 10.6%、24.8%、35.7%、16.4% 和 12.5%;对于每种级配的岩碴,设定了片状、扁片状、块状和条状 4 种形状,设定其形状坐标分别为(0.4,0.4)、(0.3,0.8)、(0.8,0.8)和(0.8,0.3),所占质量分数分别为 60%、30%、5% 和 5%。岩碴颗粒块模板构建如图 3 所示,需要构建 20 种岩碴模型,对于每种岩碴模型构建 2 个颗粒块模板,即总共需要构建 40 个颗粒块模板。用 3 位数字编码,例如 541 表示基于第 5 种级配 83 mm、第 4 种形状条状所生成的第 1 个模板。首先,根据某一岩碴的级配和形状数据,构建三维几何模型;然后,将该几何模型以 STL 形式导入 PFC^{3D}软件中,并用球形颗粒填充该几何模型,从而生成具有特定级配和形状的颗粒块模板。在所构建的 40 个颗粒块模板中,最小和最大的模板分别由 1 个和 716 个颗粒组成。

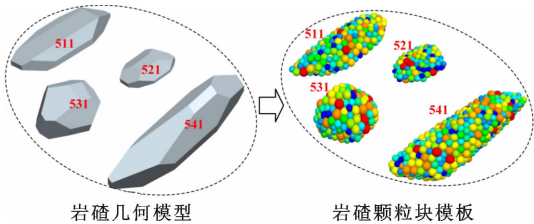


图 3 岩碴颗粒块模板构建

基于第 i 种颗粒块模板生成的岩碴的计算式如下

$$N_i = v_{GA} \omega_{gi} \omega_{si} / 60 \rho V_i = \pi R^2 P v_{RPM} \omega_{gi} \omega_{si} / 60 V_i$$

(1)

式中: v_{GA} 为岩碴生成速度; R 为刀盘掘进半径; P 为刀盘掘进贯入度; v_{RPM} 为刀盘转速; ω_{gi} 为第 i 种岩碴的级配的质量分数; ω_{si} 为第 i 种岩碴的的形状的质量分数; V_i 为第 i 种岩碴的体积。

将出碴模拟过程划分为若干求解步,在每个求解步开始时,在刀盘正面、掌子面和隧道圆柱面所围成的圆柱形空间内随机生成岩碴;在每个求解步结束后,统计并删除落入料斗中的岩碴。岩碴的初始速度为 0,岩碴的重力加速度为 9.8 m/s²,岩碴细观接触模型及参数设定见表 1。

基于 PFC 代码可以将岩碴设置为不可破碎与可破碎两种形式,分别称为颗粒块和颗粒簇。将岩碴设置为可破碎的颗粒簇,能够模拟岩碴在搅动和排出过程中的二次破碎,与实际出碴过程更为相近。本文研究所依据的岩碴取自皮带机,已经被二次破

碎过,因此不需要模拟岩碴二次破碎过程。将岩碴设置为可破碎的颗粒簇,会在接触遍历、黏结键分析等步骤上耗费大量的时间,从而大大增加计算成本。综上,将岩碴设定为不可破碎形式。

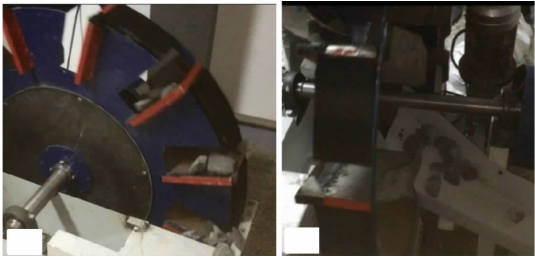
表 1 岩碴细观接触模型及参数设定

接触类型	接触模型	法向刚	切向刚	摩擦	阻尼比 d_p
		度 $k_n/$ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	度 $k_s/$ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	系数 f	
岩碴-岩碴	线性接触	1×10^5	1×10^5	0.40	0.3
岩碴-墙体	线性接触	1×10^7	1×10^7	0.25	0.3

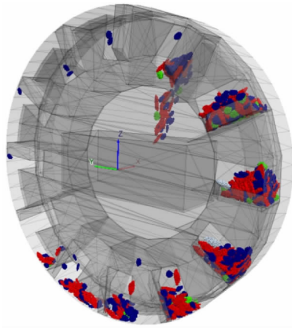
2.3 数值模型验证

为了验证所建数值模型,使用图 4a、4b 所示的小型刀盘出碴试验台开展验证试验。该试验刀盘直径为 1 m,具有 12 个出碴口和刮碴铲斗,刀盘转速为 7 r/min。由于刀盘和出碴口尺寸较小,为了避免堵塞,选取级配为 21 mm 的岩碴开展试验,岩碴生成速度设定为 1.2 kg/s。试验中,采用人工倾倒方式模拟岩碴生成过程,为了保证稳定,试验人员经过反复倾倒练习后进行多组出碴试验,对结果取平均值。每组试验时间为 30 s,称量排出岩碴总质量,从而计算得到平均出碴速度和出碴率。试验结果表明,平均出碴速度为 1.1 kg/s,比岩碴生成速度略小,这是因为试验台下仓体为半圆形结构,少部分岩碴从右侧中部位置逸出;出碴率为 92%,略小于彻底出碴时的出碴率 100%。

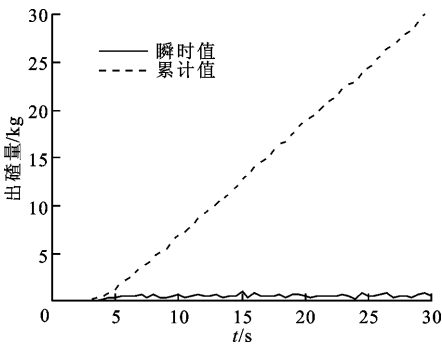
刀盘出碴数值模型如图 4c 所示,建立与试验中的刀盘结构、运转参数、岩碴生成参数完全一致的数值模拟模型。结果表明,30 s 时岩碴被刮碴铲斗铲起并进入出碴口内部,没有岩碴在隧道底部堆积,表明出碴顺畅彻底;记录每秒所排出的岩碴质量(瞬时值)和累计排出的岩碴质量(累计值),如图 4d 所示,两条曲线在 5 s 后基本达到稳定,即排出的岩碴量和新生成的岩碴量达到动态平衡;计算得到数值模拟的平均出碴速度和出碴率分别为 1.16 kg/s 和 97%,表明岩碴基本排出,因此不易出现岩碴堆积、刀盘卡顿或二次磨损等不良现象;模拟得到的平均出碴速度略小于岩碴生成速度,这是因为岩碴是在刀盘面和掌子面之间的圆柱形空间中随机生成的,如果初始生成的岩碴与刮碴铲斗发生干涉,则执行相应代码删除该岩碴,因此实际岩碴生成速度略小于其设定值 1.2 kg/s。数值模拟和试验的平均出碴速度误差为 5.5%,表明数值模拟与试验结果相近,数值模型可靠。



(a)刀盘正面 (b)刀盘背面



(c)刀盘出碴数值模型



(d)出碴量的模拟结果

图 4 刀盘出碴试验及数值模拟的对比

3 出碴过程数值模拟及分析

基于所提出的数值模拟方法,选取某 TBM 刀盘进行出碴过程数值模拟研究,主要参数设置如下:刀盘直径为 3.8 m、滚刀直径为 432 mm、中心刀 8 把、正滚刀 9 把、边滚刀 8 把、刀盘面与掌子面的距离为 160 mm,周向均布出碴口为 4 个、出碴口长度为 585 mm、出碴口宽度为 550 mm、刀盘转速为 7 r/min、贯入度为 10 mm/r、模拟时长为 30 s、求解步为 60 个、每步时长为 0.5 s、岩碴实际生成速度为 34.4 kg/s、时间步长约为 10^{-6} s。采用 CPU Intel-Core-i9-7900X、内存 64GB 的计算机配置进行数值模拟,计算单个考虑岩碴级配和形状の出碴模型至少需要 70 h。

3.1 滚刀系统对出碴效果的影响

滚刀群安装于刀盘最前端,直接与掌子面岩石接触。岩碴的下落会受到滚刀的阻挡,从而延长其下落时间、减缓岩碴在隧道底部的堆积,进而可能影响出碴速度和出碴稳定性。针对于此分别建立了装配滚刀和不装配滚刀的刀盘出碴模型,研究滚刀系统对出碴效果的影响,两个刀盘的刮碴铲斗宽度 D 和高度 H 分别为 250 和 130 mm。如 2.3 节所述,初始生成岩碴与铲斗和滚刀干涉会造成岩碴实际生成速度小于设定值,对模型进行统计分析发现,对于有无滚刀的模型,分别约 7.3% 和 2.4% 的岩碴因干涉而删除,因此分别设定两个模型的岩碴生成速度为 37.1 和 35.2 kg/s。

有无滚刀对出碴的影响如图 5 所示,两个模型的模拟结果非常相似:隧道底部岩碴堆积量相近、单个铲斗铲起的岩碴量相近;出碴量统计结果表明,两个模型的出碴速度和出碴率相等,出碴率均为 100%。以上结果表明,有无滚刀对出碴过程的影响可以忽略不计。有滚刀模型的总计算时间约为无滚刀模型的 3.5 倍,这是因为滚刀群的引入增加了墙体表面数,增大了接触检索和分析的工作量,从而增大了计算成本。因此,在本文后续的模拟中均采用不装配滚刀的模型开展数值模拟研究。

3.2 铲斗形式对出碴效果的影响

上文的数值模拟表明,刀盘出碴包括铲碴和溜碴两个关键阶段,前者是刮碴铲斗将岩碴铲起,并收入刀盘内仓的过程;后者是进入刀盘内仓的岩碴经过溜碴板滑落至料斗的过程。如果刀盘直径或转速过大,会造成铲起的岩碴离心力过大而难以溜入料斗,这些岩碴在刀盘仓内反复循环、不断堆积,最终会严重影响刀盘运转;因此一般通过控制刀盘的运转参数,并合理设计出碴口和溜碴板的结构和布局,从而确保进入刀盘内仓的岩碴顺利排出。刀盘掘进所产生的岩碴能否顺利进入刀盘内仓,则直接受到出碴口和刮碴铲斗的影响,尤其受到铲斗结构形式的影响。

图 6 给出了铲斗有内倾斜度(截面为图 1 所示三角形, $D=250\text{ mm}$, $H=130\text{ mm}$)和无内倾斜度(平板铲斗)的两种刀盘的出碴过程。对于平板铲斗刀盘,其平均出碴速度为 26.4 kg/s,出碴率仅为 77%;由于铲斗表面平直,一部分岩碴不能顺利进入刀盘仓内,随铲斗提升至顶部后,重新落回隧道底部,循环往复,导致岩碴堆积、出碴不彻底等问题。对于铲斗截面为三角形的刀盘,其平均出碴速度为 34.4 kg/s,出碴率为 100%;铲斗溢碴量少,隧道底部岩碴堆积少,出碴彻底。

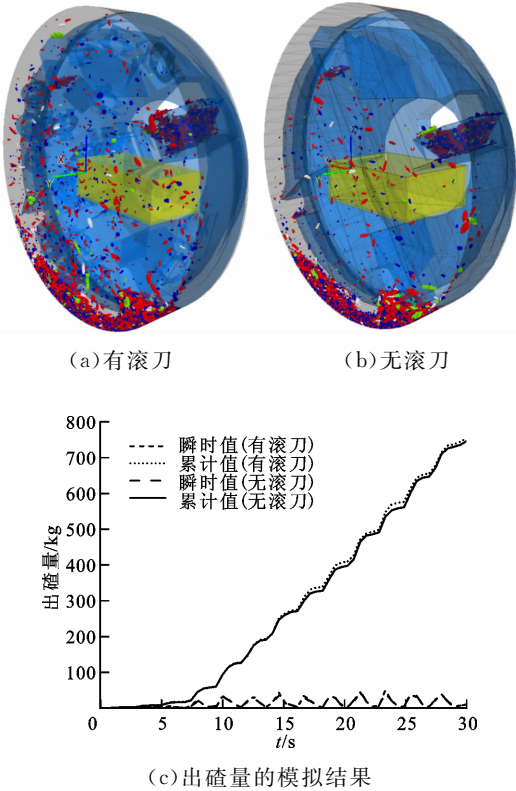


图 5 有无滚刀对出碴的影响

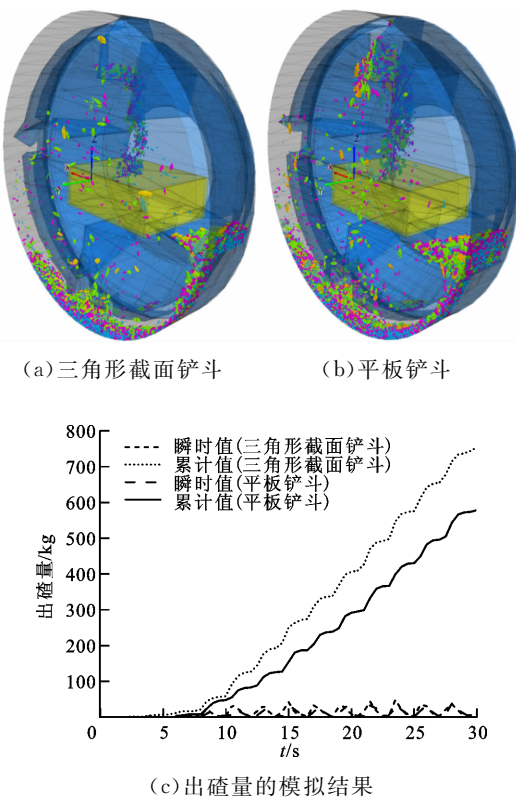


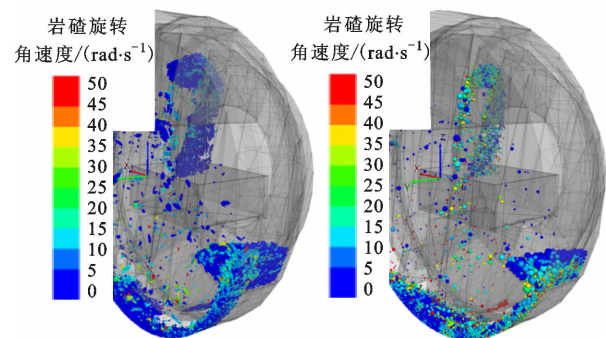
图 6 铲斗形式对出碴的影响

上述分析说明,截面为图1所示的三角形的刮碴铲斗,具有较好的刮碴能力。

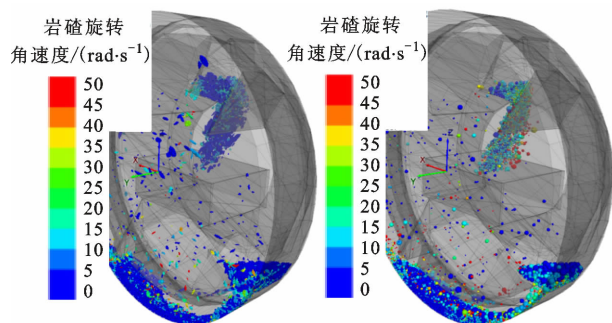
3.3 岩碴形状对出碴效果的影响

将岩碴简化为球可能会造成模拟误差。为了证明这个假设,基于3.2节所述的三角形截面式和平板式铲斗的刀盘,分别模拟了岩碴形式为片块状级配和球形级配的出碴过程,图7给出了模拟结果的对比。岩碴实际生成速度均为34.4 kg/s,基于回转速度对岩碴着色。

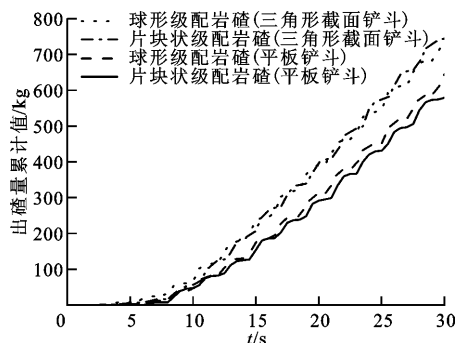
对于平板式铲斗刀盘,如图7a、7b所示,岩碴为片块状和球形的模型的出碴率分别为77%和86%,表明将岩碴简化为球形,会高估刀盘的出碴能力。



(a) 片块状岩碴平板铲斗 (b) 球形岩碴平板铲斗



(c) 片块状岩碴三角形截面铲斗 (d) 球形岩碴三角形截面铲斗



(e) 出碴量的模拟结果

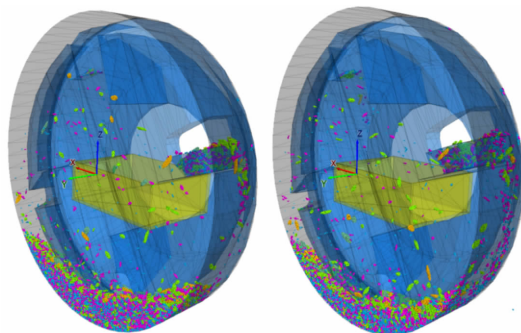
图7 片块状和球形级配岩碴的模拟结果对比

球形岩碴的回转速度明显大于片块状岩碴,球形岩碴更容易被铲入刀盘仓内,聚积在顶部出碴口处的球形岩碴更容易滚滑进入料斗;片块状岩碴堆积体不如球形岩碴堆积体密实,使得出碴口处片块状岩碴堆积体更大。因此,对于出碴结构设计不合理的刀盘,片块状岩碴受到回转困难和堆积松散两方面影响,可能在出碴口处堵塞,而球形岩碴受到的影响则较小。对于三角形截面式铲斗刀盘,如图7c、7d所示,两种形式岩碴模型的出碴率均为100%,表明对于出碴结构设计合理的刀盘,岩碴形状对出碴效果的影响不明显。

上述分析表明,球形岩碴和片块状岩碴模型的出碴效果存在一定差别,将岩碴简化为球形会高估刀盘的出碴能力,从而影响出碴结构设计。

3.4 铲斗高度对出碴效果的影响

刀盘及其运转参数、岩碴生成参数等如上文所述,选取铲斗为三角形截面式,取铲斗宽度 D 为250 mm,铲斗高度 H 分别为30、50、70、90、110和130 mm,进行6组数值模拟,图8给出了铲斗高度对出碴效果的影响。当铲斗高度较小时,单个铲斗铲起的岩碴量明显偏少,导致大量岩碴在隧道底部堆积,同时一部分岩碴从出碴口外侧溢出,流入刀盘和隧道面之间的圆筒形缝隙中,可能对边滚刀造成二次磨损,并对刀盘运转产生不良影响。随着铲斗高度的增大,铲斗铲起的岩碴量明显增大,隧道底部岩碴堆积量明显减小,出碴口溢料现象明显减轻。如图8e~图8g,当铲斗高度大于110 mm后,刀盘出碴效果不再发生明显变化,累计排出岩碴质量总体保持不变。统计6组模拟结果,计算得到各组平均出碴速度分别为12.4、21.1、28.4、33.5、34.2和34.4 kg/s,各组出碴率分别为36%、61.3%、82.6%、97.4%、99.4%和100%。上述结果表明:当铲斗高度为110 mm(比滚刀高度小50 mm),岩碴可以充分排出;当铲斗高度为130 mm时(比滚刀高度小



(a) $H=30$ mm

(b) $H=50$ mm

回隧道底部,这些原因导致隧道底部岩碴堆积严重,刀盘出碴效率低;对于铲斗宽度分别为 1、50 和 100 mm 的刀盘,其平均出碴速度分别为 26.4、28.5 和 31.8 kg/s,出碴率分别为 76.7%、82.8% 和

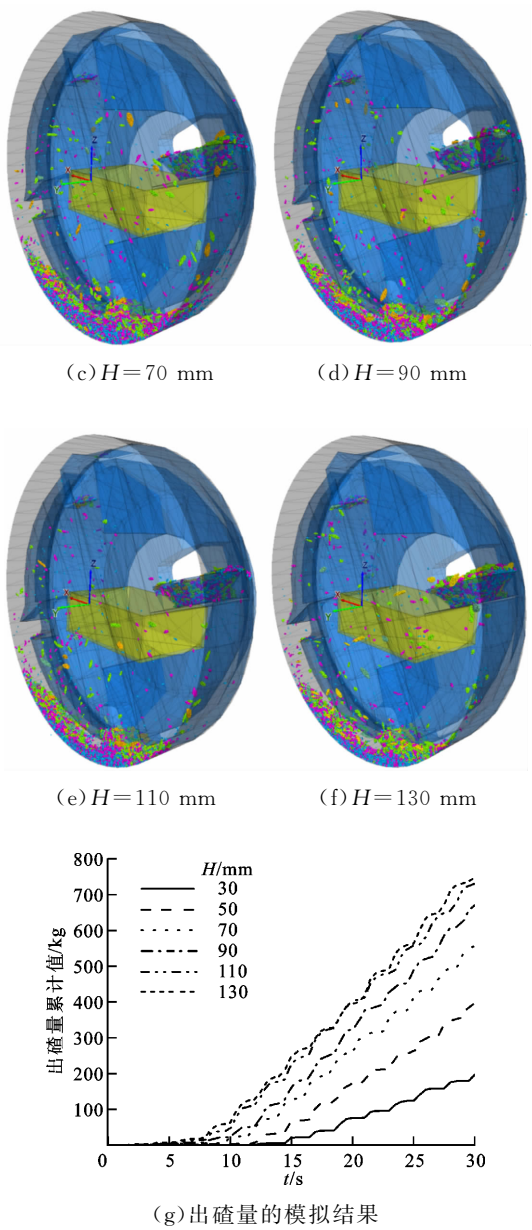


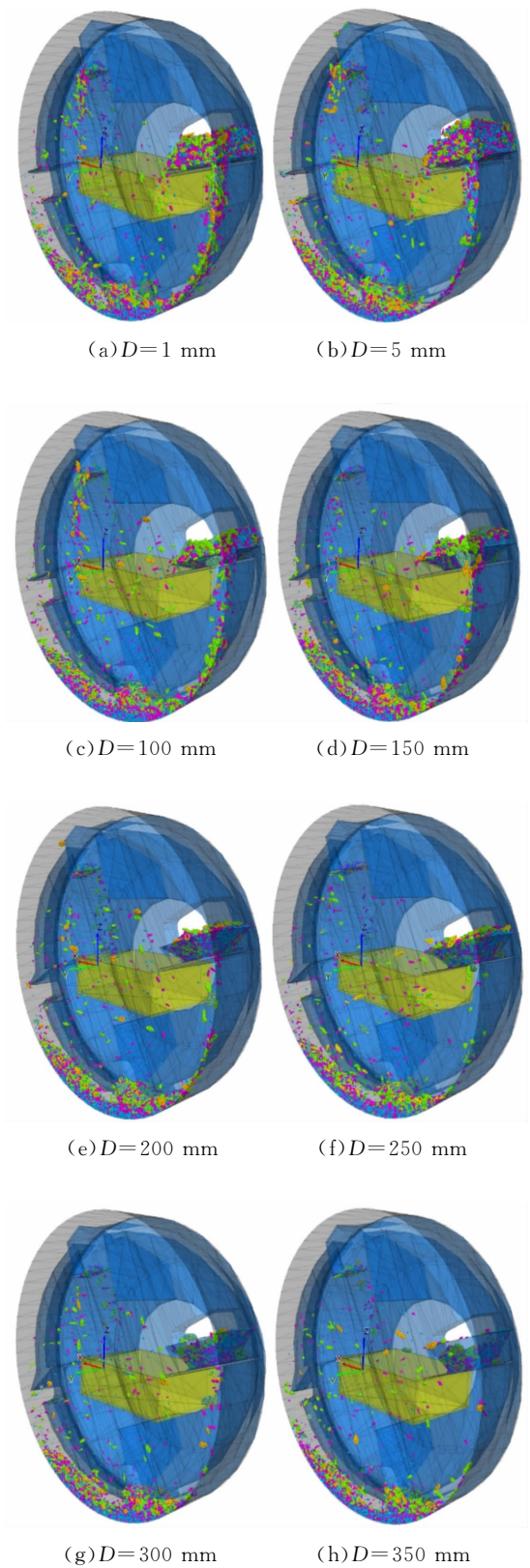
图 8 铲斗高度对出碴效果的影响

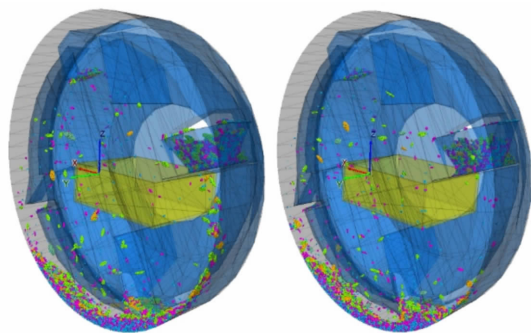
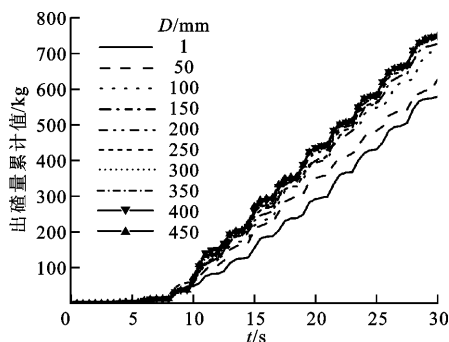
30 mm),刀盘出碴率达到 100%。上述结果与铲斗比滚刀高度低 30~50 mm 的出碴结构设计原则相符合。实际设计中,为了提高出碴率,可选取略大的铲斗高度;在保证出碴性能的前提下,为了减小铲斗刮蹭岩面而损坏的风险,可适当减小铲斗高度。

3.5 铲斗宽度对出碴效果的影响

刀盘及其运转参数、岩碴生成参数等如上文所述,选取铲斗为三角形截面式,取铲斗高度 H 为 130 mm,取铲斗宽度 D 分别为 1、50、100、150、200、250、300、350、400 和 450 mm,进行 10 组数值模拟,图 9 给出了铲斗宽度对出碴效果的影响。

当铲斗宽度小于 100 mm 时,出碴口溢料明显、一部分岩碴转过最高点后无法进入刀盘内而重新落



(i) $D=400$ mm(j) $D=450$ mm

(k) 出碴量的模拟结果

图9 铲斗宽度对出碴效果的影响

92.4%，出碴速度偏慢、出碴率偏低，说明刀盘出碴能力不足。随着铲斗宽度的增大，可以看到出碴口溢料、岩碴回落和堆积等现象明显减轻；对于铲斗宽度为150 mm的刀盘，平均出碴速度分别为33.8 kg/s，出碴率为98.3%，对于铲斗宽度大于150 mm的刀盘，平均出碴速度均为34.4 kg/s，与岩碴生成速度达到一致，出碴率均达到100%。

上述结果表明：刀盘出碴能力随着铲斗宽度的增大而增大，当铲斗宽度达到200 mm以上时，刀盘出碴能力达到最大且基本保持稳定，此时铲斗宽度为出碴口宽度的36%以上；当铲斗宽度继续增大时，过大的铲斗会遮挡出碴口的正面开口，此时虽然可以保证刀盘正常掘进时的出碴能力，但可能会使尺寸较大的岩碴卡在出碴口处；为了确保岩碴充分排出，建议取铲斗宽度为出碴口宽度的50%左右（本文为250 mm），这与实际TBM刀盘的铲斗设计相符合。

4 结 论

本文针对TBM刀盘出碴机理研究不足的现状、以及现有研究较为简单的不足，构建了基于颗粒块离散元方法且考虑岩碴级配和形状的TBM刀盘（直径3.8 m）出碴过程的数值模型，重点研究了刮

碴铲斗结构对刀盘出碴性能的影响，得到以下结论，可为刮碴铲斗结构设计提供理论依据：

(1) 本文所构建的数值模型可以较为准确地模拟TBM刀盘出碴过程，为TBM刀盘出碴机理研究和出碴结构设计提供了有效的手段；

(2) 数值模拟表明，滚刀系统对刀盘出碴性能的影响很小，为了提高计算速度，可以将滚刀系统从数值模型中略去；

(3) 三角形截面式是较为合理的铲斗结构形式，可以确保岩碴被顺利地铲入刀盘仓内而排出；

(4) 以刀盘平均出碴速度和出碴率为评价指标的刀盘出碴性能随着铲斗高度的增大而提高，建议铲斗高度比滚刀高度低30~50 mm；

(5) 刀盘出碴性能随铲斗宽度的增大而增大，在铲斗宽度达到出碴口宽度的36%以上后保持稳定，建议铲斗宽度取值为出碴口宽度的50%左右。

参考文献：

- [1] 耿麒. 全断面隧道掘进机破岩机理和两级刀盘新结构研究[D]. 西安：西安交通大学，2017：1-15.
- [2] 陈馈，孙振川，李涛. TBM设计与施工[M]. 北京：人民交通出版社，2018：1-15.
- [3] ROSTAMI J. Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure[D]. Golden: Colorado School of Mines, 1997: 1-98.
- [4] CHO J W, JEON S, YU S H, et al. Optimum spacing of TBM disc cutters; a numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(3): 230-244.
- [5] BALCI C, TUMAC D. Investigation into the effects of different rocks on rock cutability by a V-type disc cutter[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 30(7): 183-193.
- [6] ENTACHER M, WINTER G, BUMBERGER T, et al. Cutter force measurement on tunnel boring machines-system design[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 31(9): 97-106.
- [7] MACIAS F J, JAKOBSEN P D, SEO Y, et al. Influence of rock mass fracturing on the net penetration rates of hard rock TBMs[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 44(9): 108-120.
- [8] XIA Yimin, GUO Ben, TAN Qing, et al. Comparisons between experimental and semi-theoretical cutting

- forces of CCS disc cutters [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(5): 1583-1597.
- [9] PAN Yucong, LIU Quansheng, LIU Jianping, et al. Full-scale linear cutting tests in Chongqing sandstone to study the influence of confining stress on rock cutting forces by TBM disc cutter [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(6): 1697-1713.
- [10] HAN Meidong, CAI Zongxi, QU Chuanyong, et al. Dynamic numerical simulation of cutterhead loads in TBM tunneling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 70(11): 286-298.
- [11] 翟国强, 张玉峰. 浅谈 TBM 刀盘的进出渣设计 [J]. 建筑机械化, 2013(2): 76-78.
ZHAI Guoqiang, ZHANG Yufeng. Analysis of slag design in TBM cutterhead [J]. Construction Mechanizations, 2013(2): 76-78.
- [12] 李大平. 基于 ABAQUS 的 TBM 刀盘溜碴过程仿真 [J]. 建设机械技术与管理, 2013(6): 101-106.
LI Daping. Process simulation of the TBM knife disc slip to be based on ABAQUS [J]. Construction Machinery Technology and Management, 2013(6): 101-106.
- [13] 毛本庆. 异常地质段岩石掘进机刀具和刮板系统的改进 [J]. 建筑机械, 2013(6): 99-102.
MAO Benqing. Improvement of the tool and scraper system for TBM under abnormal geological conditions [J]. Construction Machinery, 2013(6): 99-102.
- [14] 陈巍. TBM 出碴过程离散元仿真及新型出碴结构设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 1-95.
- [15] 陈巍, 孙伟, 霍军周. TBM 刀盘开口面积的确定 [J]. 机械设计与制造, 2015(5): 29-31.
CHEN Wei, SUN Wei, HUO Junzhou. The open area determination of TBM cutterhead [J]. Machinery Design and Manufacture, 2015(5): 29-31.
- [16] 霍军周, 陈巍, 欧阳湘宇, 等. 基于岩碴流动性的 TBM 出碴槽口选优设计 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 715-718.
HUO Junzhou, CHEN Wei, OUYANG Xiangyu, et al. Optimum design of TBM mucking slot based on the rock ballasts fluidity [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(5): 715-718.
- [17] 夏毅敏, 杨妹, 吴遁, 等. TBM 刀盘出碴槽结构对出碴效率的影响规律 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(9): 1561-1567.
XIA Yimin, YANG Mei, WU Dun, et al. Influence of the TBM mucking slots atructure on the discharge characteristics of ballasts [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(9): 1561-1567.
- [18] BRULAND A. Hard rock tunnel boring [D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2000: 10-13.

[本刊相关文献链接]

- 刘振, 孔德同, 赵明, 等. 裂纹损伤行星轮系的编码器信号响应特性. 2020, 54(2): 43-50. [doi:10.7652/xjtuxb202002006]
- 关亚彬, 杨小辉, 方宗德, 等. 大型船用鼓形齿联轴器位移圆半径设计. 2019, 53(10): 57-64. [doi:10.7652/xjtuxb201910008]
- 史尧臣, 陈国平, 李占国, 等. 三轮一带传动系统噪声仿真与试验验证. 2019, 53(8): 76-81. [doi:10.7652/xjtuxb201908010]
- 王凯, 付敏, 王珏翎. 滚子包络端面啮合蜗杆传动的啮合性能分析. 2019, 53(3): 135-142. [doi:10.7652/xjtuxb201903019]
- 邹创, 陶涛, 姜歌东, 等. 考虑力学特性的谐波齿轮啮合参数优化方法. 2019, 53(2): 16-23. [doi:10.7652/xjtuxb201902003]
- 陈晓霞, 杨朋朋, 邢静忠, 等. 谐波齿轮负载侧隙和啮合力分布规律研究. 2018, 52(7): 9-17. [doi:10.7652/xjtuxb201807002]
- 白恩军, 谢里阳, 胡杰鑫, 等. 考虑啮合齿对失效相关性的齿轮系统可靠性评估. 2018, 52(5): 38-43. [doi:10.7652/xjtuxb201805005]
- 王增丽, 申迎峰, 王宗明, 等. 圆盘密封单螺杆泵啮合特性研究. 2018, 52(5): 69-74. [doi:10.7652/xjtuxb201805005]
- 朱丽莎, 向磊, 邹常青, 等. 齿间动态载荷分配下的齿轮磨损分析. 2018, 52(5): 75-84. [doi:10.7652/xjtuxb201805011]
- 李金宽, 柳在鑫, 李世蓉, 等. 倾斜式双滚柱包络环面蜗杆传动弹流润滑分析. 2018, 52(3): 83-90. [doi:10.7652/xjtuxb201803012]
- 申建广, 陶涛, 梅雪松, 等. 一种数控滚齿机工作台动态特性建模方法及实验分析. 2017, 51(12): 1-7. [doi:10.7652/xjtuxb201712001]
- 韩炬, 李威, 王志军. 采用分形理论与微分几何的摆线针轮形貌模型. 2017, 51(11): 97-105. [doi:10.7652/xjtuxb201711014]
- 王爽, 郭永存, 王鹏或, 等. 复合式磁力耦合器的设计与试验研究. 2017, 51(7): 115-123. [doi:10.7652/xjtuxb201707017]
- 刘星, 梅雪松, 陶涛, 等. 一种零耦合滚齿全误差模型及其预测方法. 2016, 50(10): 42-48. [doi:10.7652/xjtuxb201610007]
- 耿麒, 魏正英, 孟昊, 等. TBM 的平面刀盘与两级刀盘的力学性能对比分析. 2015, 49(3): 121-128. [doi:10.7652/xjtuxb201503019]
- 耿麒, 魏正英, 杜军. 全断面岩石掘进机滚刀布置的优化方法. 2013, 47(9): 100-105. [doi:10.7652/xjtuxb201309017]

(编辑 武红江)