

基于 ABAQUS 的滚刀破岩参数对滚动力及比能的影响

张珂¹, 李亮¹, 王贺¹, 孙健¹, 高惠凤², 赵凯军³

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学计划财务处, 辽宁 沈阳 110168; 3. 北方重工集团有限公司, 辽宁 沈阳 110025)

摘要 目的 研究滚刀破岩过程中, 贯入度与滚刀所受平均滚动力之间的相应关系, 分析刀间距、贯入度以及线速度三因素对比能的影响. 方法 利用 ABAQUS 有限元仿真软件, 建立双滚刀直线切割大理岩的运动模型, 模拟 5 种不同贯入度的滚刀破岩过程, 得出不同贯入度条件下滚刀所受平均滚动力的值; 基于正交试验法, 选出具有代表性的三因素三水平的参数组合进行仿真, 通过极差分析找出不同因素变化对比能的影响规律. 结果 贯入度由 4 mm 增加到 8 mm, 滚刀所受平均滚动力近似线性增长, 变化平缓; 贯入度由 8 mm 增加到 12 mm, 滚刀所受平均滚动力增长幅度大, 变化明显. 正交试验中, 刀间距对比能的均值极差为 0.96 MJ/m³; 贯入度对比能的均值极差为 0.41 MJ/m³; 线速度对比能的均值极差为 0.26 MJ/m³. 结论 在刀间距和线速度保持不变的条件下, 滚刀所受平均滚动力与贯入度呈正比, 而与 s/p 比值呈反比. 通过分析刀间距、贯入度以及线速度变化对比能影响的主次性, 得出刀间距影响最大, 其次是贯入度, 线速度影响最小. 研究结果为提高滚刀破岩效率提供了参考.

关键词 刀间距; 贯入度; 线速度; 平均滚动力; 比能

中图分类号 TU94⁺9; TG501.1

文献标志码 A

Research on the Impact of the Disc Cutter Broken Rock Parameters on Rolling Force and Specific Energy Based on ABAQUS

ZHANG Ke¹, LI Liang¹, WANG He¹, SUN Jian¹, GAO Huifeng², ZHAO Kaijun³

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Financial Department, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Northern Heavy Industries Group CO. Ltd., Shenyang, China, 110025)

收稿日期: 2017-03-12

基金项目: 国家十二五科技支撑计划项目(2011BAJ02B07); 教育部创新团队支持计划项目(IRT-15R45); 住房和城乡建设部项目(2015-K3-006); 沈阳市科技局项目(F16-205-1-15); 辽宁省科技厅项目(2015020149); 辽宁省教育厅项目(LJZ2016020)

作者简介: 张珂(1969—), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要从事精密加工技术、机电一体化技术研究.

Abstract: The relation between penetration depth and average rolling force of disc cutters in the process of rock broken was studied. The influence of cutter space, penetration depth and cutting speed on the specific energy was analyzed. The model of linearly cutting marble with double cutter was built by the software ABAQUS. The process of rock broken with five different penetration depths was simulated and the average rolling force of disc cutter was obtained. Based on orthogonal test, the process of rock broken was simulated using representative parameter combinations. There are three factors and three levels in it. The influence of different factors on the specific energy was obtained through range analysis. When the penetration depth increased from 4mm to 8mm, there was approximately linear increase in the average rolling force of disc cutter, changing smoothly. When the penetration depth increased from 8 mm to 12 mm, there was a great increasing range in the average rolling force of disc cutter, changing obviously. In orthogonal test, it was founded that the mean range of specific energy from cutter space was 0.96 MJ/m^3 , the mean range of specific energy from the penetration depth was 0.41 MJ/m^3 and the mean range of specific energy from the cutting speed was 0.26 MJ/m^3 . If the cutter space and cutting speed keep constant in the simulation, there was a proportional relation between the average rolling force and penetration depth, while it has an inversely proportional relation to s/p . The influences order of cutter space, penetration depth and cutting speed on specific energy were analyzed. It was concluded that the greatest influence for the specific energy was cutter space, the second was penetration depth and the minimal was cutting speeding. The results have an important reference for improving the rock broken efficiency.

Key words: cutter space; penetration depth; cutting speed; average rolling force; specific energy

全断面掘进机 (Tunnel Boring Machine, TBM) 是一种专门用于开挖隧道的大型工程装备. 在隧道施工时, TBM 可以不受天气变化的影响, 具有掘进速度快、机械自动化程度高、一次成型等特点, 大大改善了早期恶劣的施工环境, 在节约人力、保护环境的同时, 保证施工安全经济的进行^[1-2]. 近些年, 随着我国逐步加大对地下空间的开发利用, TBM 的需求量与日俱增, 破岩效率的高低直接影响工期进度和工程成本, 而这不仅与 TBM 结构形式、施工的岩土条件、刀盘中的刀具种类等有关, 还与刀具在刀盘上的布置情况、贯入度、线速度等因素密切相关.

目前, 关于 TBM 破岩过程研究主要包括 3 方面: TBM 现场试验数据采集、滚刀实验机试验和有限元仿真软件数值模拟^[3-4]. TBM 进行现场开挖时, 因为地质状况的复杂性和多变性, 所以很难定量的获得滚刀破岩试验数据; 滚刀破岩实验机由于造价高, 实验前期准备时间长, 想要获得一组准确的试验

数据往往受到了很多条件的限制; 随着计算机领域发展迅速, 有限元仿真软件功能日益强大, 通过仿真既可以针对某一特定地质状况进行破岩过程分析, 又可以模拟不同地质状况进行破岩过程比较, 在获得合理仿真数据的同时大大节约了时间和成本, 使用范围也愈渐广泛.

国内外专家通过数值模拟等方法为研究滚刀破岩过程提供了新的方法和途径. 谭青等^[5]利用 ANSYS - LS/DYNA 软件, 成功模拟了常截面滚刀滚压破碎混凝土过程; 霍军周等^[6]利用 RFPA - 2D 仿真平台对多滚刀顺次垂直压入岩石进行仿真, 得出刀盘不同位置滚刀最优刀间距和最优顺次角度; 刘建琴等^[7]利用 ABAQUS 软件建立滚刀组合回转破岩模型, 为刀具在刀盘中合理布置提供了依据; M. C. Jaime^[8]等利用 LS - DYNA 软件模拟刀具破碎岩石过程, 并对切削力模型进行分析, 指出了理论模型的可用性和局限性; Jung - Woo Cho^[9-10]等利用 AUTO-

DYN-3D 软件模拟三维动态模型,获得滚动力大小与岩片质量,通过计算比能,以此确定最优刀间距;Ma Hongsu^[11] 等通过数值模拟的方法,模拟不同围压条件下,滚刀破岩过程,研究发现围压变化对岩石所受到的切割力、裂纹角度、裂纹长度具有很大的影响,其中切割力和裂纹角度随围压增加而增大. 基于此,笔者利用 ABAQUS 有限元仿真软件建立双滚刀直线切割大理岩运动模型,研究不

同贯入度对滚刀所受平均滚动力的影响;基于正交试验方法,分析了不同因素对比能影响的主次关系,为提高破岩效率提供了参考.

1 滚刀破岩过程有限元模型

1.1 滚刀及岩石有限元模型建立

滚刀模型采用如图 1 所示的 17 英寸常截面盘形滚刀,刀圈结构参数如表 1^[12] 所示.

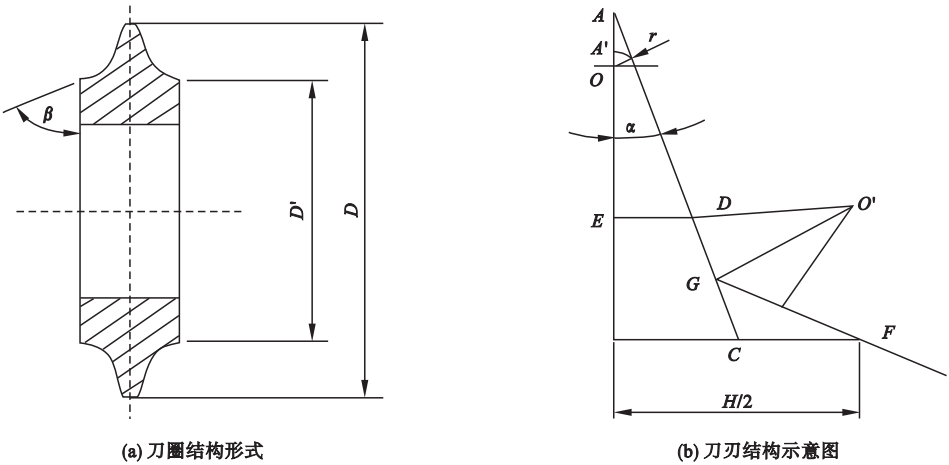


图 1 盘形滚刀结构示意图

Fig. 1 Structure schematic diagram of the disc cutter

表 1 刀圈结构参数

Table 1 Structure parameters of the cutter ring					
D/mm	D'/mm	r/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	H/mm	$\beta/(\text{^\circ})$
432	302	8	10	80	60

与岩石直接接触的部件,未予体现,盘形滚刀有限元模型如图 2(a)所示. 岩石形状为长方体,长宽高为 1 490 mm×790 mm×395 mm,图 2(b)为双滚刀破岩模型.

盘形滚刀建模过程中,刀轴、卡环等没有

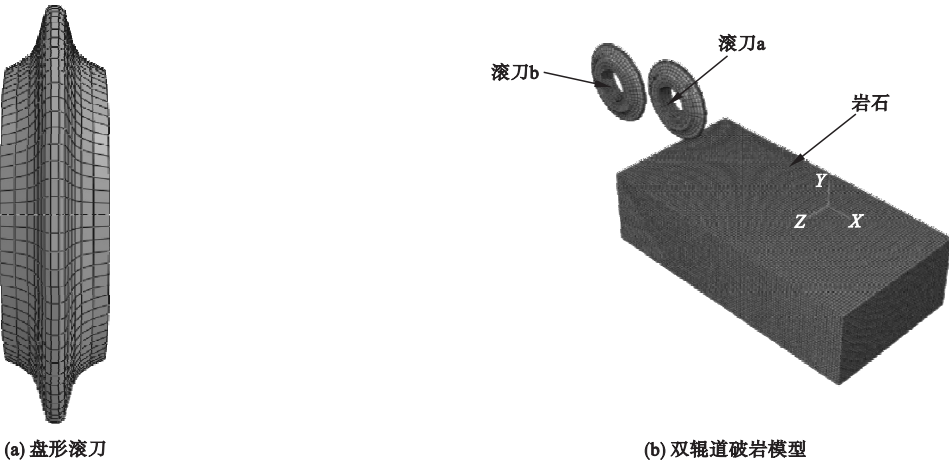


图 2 滚刀及岩石有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the disc cutter and rock

1.2 材料模型的建立

滚刀材料采用硬质合金钢,该材料密度 ρ 为 $7\,830\text{ kg/m}^3$,弹性模量 E 为 205 GPa ,泊松比 ν 为 $0.3^{[13]}$. 岩石材料采用大理岩,其基本参数如表 2 所示. 根据岩石弹塑性本构关系及滚刀切割岩石的破碎准则,岩石本构模型采用线性 Drucker – Prager 模型,并假定岩石材料性质为各向均匀、同性,且具有连续、小变形特性^[14].

表 2 岩石材料参数

Table 2 Material parameters of the rock					
材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	ν	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
岩石	2 700	9.6	0.25	120	8

线性 Drucker – Prager 模型的屈服函数^[15]为

$$F = t - p \tan \beta - d = 0, \tag{1}$$

$$t = \frac{1}{2}q \left[1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{K} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right], \tag{2}$$

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3). \tag{3}$$

式中: t 为偏应力; p 为等效应力; β 为屈服面在 $p - t$ 应力空间上的倾角,与摩擦角有关; K 为三轴拉伸强度/三轴压缩强度,其大小反映了屈服面与主应力之间的关系如图 3 所示 ($0.778 \leq K \leq 1$)^[16-17].

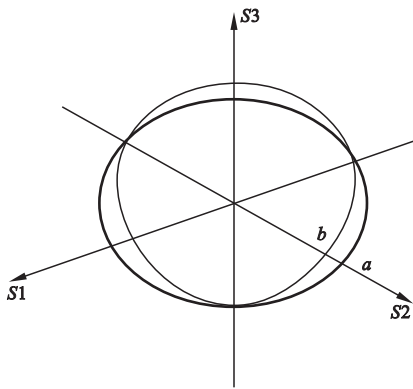


图 3 子午线为线性 D - P 模型在 π 平面的示意图

Fig. 3 The diagram of meridian model for the linear D-P shape in the π plane

当 $K = 1$ 时屈服面与主应力之间的关系曲线为 a , 当 $K = 0.8$ 时, 屈服面与主应力之间的关系曲线为 b ; r 为第三偏应力不变量; d 为屈服面在应力空间 t 轴上截距, 则

$$d = \left(1 - \frac{1}{3} \tan \beta \right) \sigma_c \text{ (单轴抗压强度 } \sigma_c \text{ 已知)}$$

$$d = \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{3} \tan \beta \right) \sigma_t \text{ (单轴抗拉强度 } \sigma_t \text{ 已知)}$$

$$d = \frac{\sqrt{3}}{2} \tau \left(1 + \frac{1}{K} \right) \text{ (剪切强度 } \tau \text{ 已知)}$$

1.3 仿真条件设置

盘形滚刀模型定义为刚体性约束, 纯滚动. 岩石模型选择 Drucker – Prager 塑性模型, 岩石四周无围岩压力且约束岩石四周及底部全部自由度. 网格划分时, 为提高计算精度、缩短计算时间, 岩石模型采用 C3D8R 六面体八结点单元网格, 共 100 392 个. 滚刀和岩石接触设置选择通用接触中的 “Selected surface pairs”. 滚刀破岩分析步中选择动力显式进行分析.

2 仿真结果及分析

滚刀破岩过程中, 岩石由于受到滚刀挤压、剪切及张拉等相互作用, 岩石内部生成裂纹, 随着滚刀贯入度增加, 内部裂纹逐渐扩展, 滚刀与岩石接触位置会形成一个破碎区域, 岩碴随滚刀滚压飞出. 为模拟盘形滚刀破岩过程, 建立如图 2(b) 所示的双滚刀破岩模型, 两把滚刀分别用滚刀 a、滚刀 b 表示.

2.1 不同贯入度对平均滚动力的影响

双滚刀在刀间距 $s = 60\text{ mm}$ 、贯入度 $p = 4\text{ mm}$ 、线速度 $v = 2\text{ m/s}$ 破岩时, 滚刀 a、b 所受滚动力随时间变化的关系曲线如图 4 所示.

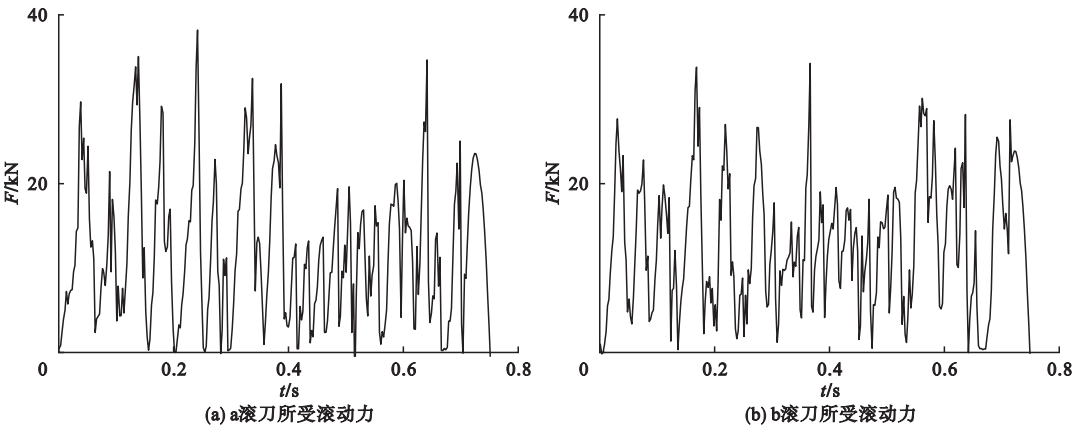


图4 双滚刀所受滚动力

Fig. 4 The rolling force of double disc cutters

由图4可知,a滚刀所受最大滚动力约38.2 kN,所受平均滚动力通过图中各点求和取算术平均值,计算值约12.1 kN;b滚刀所受最大滚动力约33.9 kN,平均滚动力约12.8 kN.两把滚刀同时直线切割大理岩,但每把滚刀所受平均滚动力却不同.

为研究贯入度对滚刀所受平均滚动力的影响,取刀间距 $s=60\text{ mm}$ 、线速度 $v=2\text{ m/s}$,仅仅改变贯入度参数,分别按照贯入度4 mm、6 mm、8 mm、10 mm、12 mm进行5组仿真.表3为5组不同贯入度条件下,滚刀所受平均滚动力.

表3 不同贯入度,双滚刀受到的平均滚动力
Table 3 The average rolling force of double disc cutters with different penetration

贯入度/mm	a 滚刀受到平均滚动力/kN	b 滚刀受到平均滚动力/kN	平均滚动力/kN
4	12.1	12.8	24.9
6	16.8	15.6	32.4
8	19.5	19.5	39.0
10	26.5	26.1	52.6
12	36.9	35.4	72.3

由表3可知,双滚刀破岩,若刀间距和线速度保持不变,则滚刀a、b所受平均滚动力随贯入度加深而增大;贯入度在4~8 mm,滚刀所受平均滚动力近似线性增大,当贯入度大于8 mm,滚刀所受平均滚动力增大幅度

明显.

为研究 s/p 比值与滚刀所受平均滚动力之间的关系,保持刀间距和线速度不变,分别在 s/p 为5、7.5、10、12.5、15比值处取点作图,不同 s/p 比值对应的滚刀平均滚动力如图5所示.

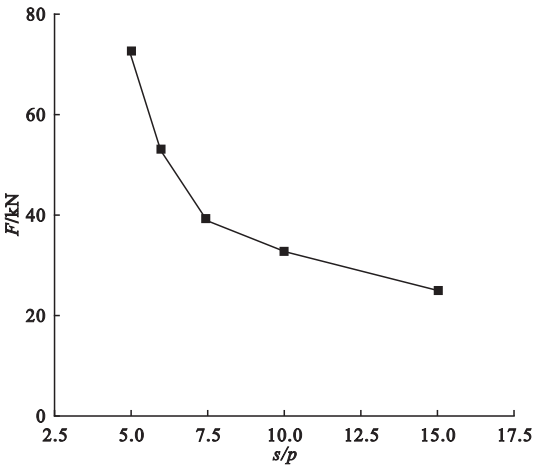


图5 不同 s/p 比值,滚刀所受平均滚动力

Fig. 5 The average rolling force of disc cutters with different ratio of s/p

由图5可知,若刀间距和线速度保持不变,滚刀所受平均滚动力随 s/p 比值增大而减小.

2.2 不同参数组合对比能的影响

比能是反应破岩效率的一个重要指标^[18],其具体含义是指切削单位体积岩石所消耗的能量,比能越小,则切削单位体积岩石

所消耗的能量越少,破岩效率也就越高.比能的计算公式为

$$S_E = \frac{F_r \cdot L}{V}.$$

(4)

式中: S_E 为比能, MJ/m^3 ; F_r 为滚刀所受滚动力, kN ; L 为滚刀切割距离, mm ; V 为破岩过程中岩石破碎总体积,一般通过破碎岩石的总质量除以岩石密度求出.在 ABAQUS 有限元仿真软件中,可以通过激活单元功能,查询损伤单元总数,进而计算求得破碎岩石体积.

刀间距、贯入度、线速度是影响破岩效率的 3 个主要因素^[19],为研究这 3 个因素在双滚刀破岩过程中对比能影响的主次关系.分别选取不同试验参数,建立 3 因素 3 水平参数表,如表 4 所示;并设计 $L_9(3^3)$ 正交试验表^[20],如表 5 所示.

根据表 4 和表 5 的正交试验安排,进行 9 组仿真.为更直观显示不同参数组合下双滚刀破岩效果的差异性,选取了第 1、5、8 号正交试验的破岩效果图进行分析,如图 6 所示.

表 4 因素水平参数表

Table 4 Factors levels parameter table

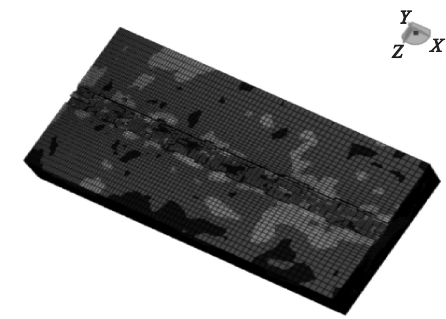
水平	试验因素		
	A	B	C
1	60	4	1
2	80	6	1.5
3	100	8	2

注: A 为刀间距, mm ; B 为贯入度, mm ; C 为线速度, m/s .

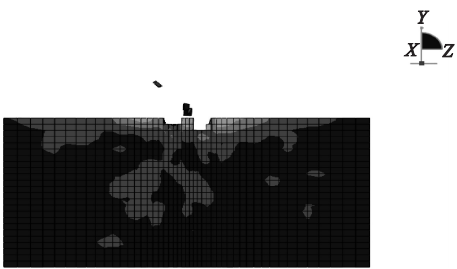
表 5 正交试验表

Table 5 Orthogonal test

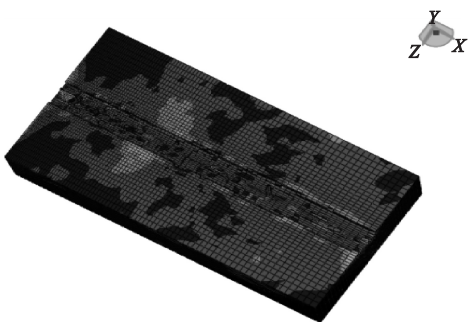
试验编号	A(列 1)	B(列 2)	C(列 3)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	3
5	2	2	2
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2



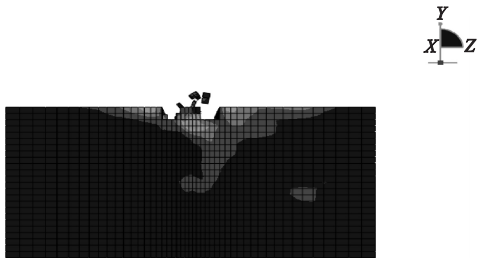
(a) 岩石上表面(试验1)



(b) 岩石端面(试验1)



(c) 岩石上表面(试验5)



(d) 岩石端面(试验5)

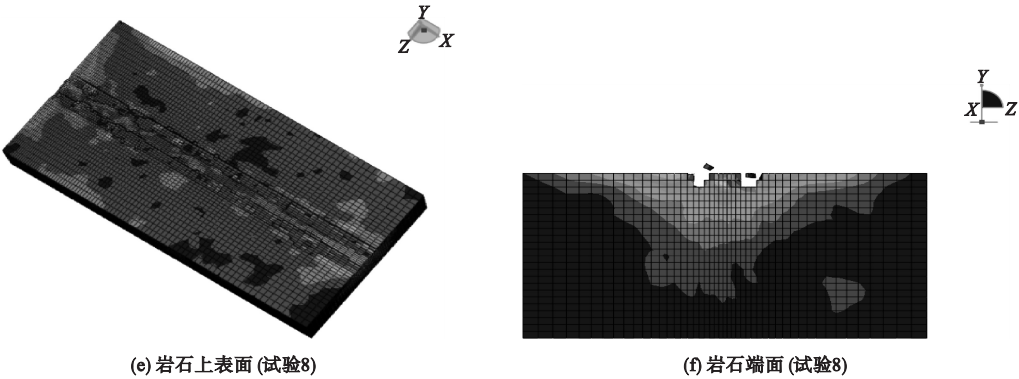


图6 不同参数组合的双滚刀破岩应力图

Fig. 6 Double disc cutter broken rock stress diagram with different parameter combination

由图6可知,当 $s=60\text{ mm}$ 、 $p=4\text{ mm}$ 、 $v=1\text{ m/s}$ 时,滚刀切割岩石的初始部分留有部分岩脊,当滚刀稳定向前切割时,则无岩脊形成,滚刀切割伴有少量岩碴飞出;当 $s=80\text{ mm}$ 、 $p=6\text{ mm}$ 、 $v=1.5\text{ m/s}$ 时,双滚刀与岩石接触的破碎区域生成少量岩脊,滚刀切割伴有块状岩碴飞出;当 $s=100\text{ mm}$ 、 $p=6\text{ mm}$ 、 $v=1\text{ m/s}$ 时,双滚刀与岩石接触的破碎区域有大量岩脊,岩石破碎不完整。

通过仿真,分析9组正交试验的破碎岩石体积和滚刀所受的平均滚动力,并利用比能计算式(4),求得每组正交试验的比能,正交试验结果见表6。

表6 正交试验结果
Table 6 Orthogonal test result

试验 编号	破碎岩石 体积/ m^3	滚刀平均 滚动力/ kN	比能/ ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$)
1	0.012	25.4	3.15
2	0.015	32.4	3.22
3	0.017	39	3.42
4	0.013	25.6	2.93
5	0.015	32.5	3.23
6	0.016	35	3.26
7	0.012	31.7	3.94
8	0.013	33.2	3.81
9	0.014	42.8	4.56

由表6可知,当刀间距为 60 mm ,第1、2、3号试验岩石破碎体积和值最大,当刀间

距 100 mm 时,第7、8、9号试验岩石破碎体积和值最小;结合图6(a)、(c)破岩效果可知,当滚刀间距过大时,破岩易形成岩脊,岩脊形成会减少岩石的破碎体积,从而降低破岩效率。

为了研究刀间距、贯入度、线速度对比能影响的主次关系,对表6中的比能进行极差分析^[21-23],分析结果如表7所示。

表7 正交试验极差表
Table 7 Orthogonal test range

因素	A(列1)	B(列2)	C(列3)
k_{1j}	3.26	3.34	3.41
k_{2j}	3.14	3.42	3.67
k_{3j}	4.10	3.75	3.43
R_j	0.96	0.41	0.26

注: k_{ij} 为第 j 列因素、水平 i 所对应比能之和的平均值
($j=1,2,3$), $R_j=\max(k_{ij})-\min(k_{ij})$ 。

均值极差 R_j 反映了第 j 列因素的水平变动时,比能的变动幅度, R_j 越大,说明该因素对比能的影响越大。由表7可知,均值极差 $R_1>R_2>R_3$,即刀间距变化对比能的影响最大,其次是贯入度,线速度影响最小。其中 k_{21} 、 k_{12} 、 k_{13} 为所在因素列中的最小值,所以本次正交试验的优组合为刀间距 80 mm 、贯入度 4 mm 、线速度 1 m/s 。

3 结 论

(1)滚刀所受平均滚动力随贯入度加深

而增大,在贯入度 4~8 mm,平均滚动力近似线性增大,当贯入度超过 8 mm,平均滚动力增大幅度明显;当刀间距、线速度一定时,滚刀所受平均滚动力随 s/p 增大而减小。

(2) 刀间距对滚刀破岩效果影响不同,当刀间距为 60 mm 时,滚刀与岩石接触的破碎区域无岩脊形成;当刀间距为 80 mm 时,滚刀与岩石接触的破碎区域有少量岩脊形成;当刀间距为 100 mm 时,滚刀与岩石接触的破碎区域有大量岩脊形成。刀间距过大时,破岩易形成岩脊,会减少岩石的破碎体积,从而导致破岩效率的降低。

(3) 在刀间距、贯入度、线速度变化对比能的影响中,刀间距影响最大、其次是贯入度、线速度影响最小,本次仿真所得破岩优组合为刀间距为 80 mm、贯入度为 4 mm、线速度为 1 m/s。

参考文献

- [1] 张照煌,纪昌明.全断面岩石掘进机盘形滚刀破岩点弧长的解析解及应用研究[J].应用基础与工程科学学报,2009,17(2):265-273.
(ZHANG Zhaohuang,JI Changming. Analytic solution and it's usage of arc length of rock breakage point of disc edge on full face rock tunnel boring machine[J]. Journal of basic science and engineering, 2009, 17(2): 265-273.)
- [2] 孙金山,陈明,陈保国,等. TBM 滚刀破岩过程影响因素数值模拟研究[J]. 岩土力学,2011,32(6):1891-1897.
(SUN Jinshan,CHEN Ming,CHEN Baoguo, et al. Numerical simulation of influence factors for rock fragmentation by TBM cutters[J]. Rock and soil mechanics,2011,32(6):1891-1897.)
- [3] 龚秋明,何冠文,赵晓豹,等. 不同贯入度对掘进机滚刀破岩效率的影响[J]. 现代隧道技术,2016(1):62-68.
(GONG Qiuming,HE Guanwen,ZHAO Xiaobao, et al. Influence of penetration on the rock-breaking efficiency of a TBM cutter[J]. Modern tunneling technology, 2016(1): 62-68.)
- [4] 满林涛,李守巨. 盘形滚刀破岩过程有限元数值模拟[J]. 工程建设,2011(4):1-5.
(MAN Lintao,LI Shouju. Numerical simulation of rock breaking process by disc cutter using finite element method[J]. Engineering construction,2011(4):1-5.)
- [5] 谭青,张魁,夏毅敏,等. TBM 刀具三维破岩仿真[J]. 山东大学学报(工学版),2009,39(6):72-77.
(TAN Qing,ZHANG Kui,XIA Yimin, et al. Three-dimensional simulation of rock breaking by TBM cutter[J]. Journal of Shandong university (engineering science), 2009, 39(6): 72-77.)
- [6] 霍军周,孙伟,郭莉,等. 多滚刀顺次作用下岩石破碎模拟及刀间距分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2012,33(1):96-99.
(HUO Junzhou,SUN Wei,GUO Li, et al. Numerical simulation of the rock fracture process induced by multi-disc-cutters and cutter spacing design[J]. Journal of Harbin engineering university,2012,33(1):96-99.)
- [7] 刘建琴,刘蒙蒙,郭伟. 硬岩掘进机盘型滚刀回转破岩仿真研究[J]. 机械工程学报,2015,51(9):199-205.
(LIU Jianqin,LIU Mengmeng,GUO Wei. Research on the simulation of cutting rock rotary by hard rock tunnel boring machine disc cutter[J]. Journal of mechanical engineering,2015,51(9):199-205.)
- [8] JAIME M C. Numerical modeling of rock cutting and its associated fragmentation process using the finite element method[D]. Pennsylvania:University of Pittsburgh,2011.
- [9] JUNG-WOO C, SEOKWON J, SANG-HWA Y, et al. Optimum spacing of TBM disc cutters:a numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method[J]. Tunneling and underground space technology, 2010,25(3):230-244.
- [10] JUNG-WOO C, SEOKWON J, HO-YOUNG J, 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]. Tunneling and underground space technology, 2013,35(4):37-54.
- [11] MA Hongsu, YIN Lijun, JI Hongguang. Numerical study of the effect of confining stress on rock fragmentation by TBM cutters[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2011,48(6):1021-1033.
- [12] 孙伟,郭莉,周建军,等. TBM 双滚刀破岩过

- 程模拟及刀圈结构设计[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1297-1302.
(SUN Wei, GUO Li, ZHOU Jianjun, et al. Rock fragmentation simulation under dual TBM disc cutter and design of cutter ring[J]. Journal of China coal society, 2015, 40(6): 1297-1302.)
- [13] 赵晓旭, 巩亚东. TBM 盘形滚刀破岩接触区受力分布[J]. 中国工程机械学报, 2015, 13(2): 168-172.
(ZHAO Xiaoxu, GONG Yadong. Loading distribution in rock-fragmentation contact zone of TBM disc hobbing cutters[J]. Chinese journal of construction machinery, 2015, 13(2): 168-172.)
- [14] OKAN S, AKCIN N A. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method[J]. International journal of rock mechanics and mining science, 2011, 48(3): 434-442.
- [15] 吴玉厚, 田军兴, 孙健, 等. 基于 ABAQUS 的岩石节理特征对滚刀破岩影响研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(3): 534-542.
(WU Yuhou, TIAN Junxing, SUN Jian, et al. Research the impact of the joint characteristics of the disc cutter broken rock based on ABAQUS[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(3): 534-542.)
- [16] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 70-71.
(FEI Kang, ZHANG Jianwei. ABAQUS application in geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010: 70-71.)
- [17] 吴玉厚, 张建男, 王贺, 等. 基于 ABAQUS 的岩石滚刀实验机最优到间距分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(5): 927-931.
(WU Yuhou, ZHANG Jiannan, WANG He, et al. Optimal analysis for cutter space of linear cutter machine based on ABAQUS[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(5): 927-931.)
- [18] MARTIN E, STEFAN L, ROBERT G. Tunnel boring machine performance prediction with scaled rock cutting tests[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2014, 70(9): 450-459.
- [19] MOON T, OH J. A study of optimal rock-cutting conditions for hard rock TBM using the discrete element method[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2012, 45(5): 837-849.
- [20] 魏效玲, 薛冰军, 赵强. 基于正交试验设计的多指标优化方法研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2010, 27(3): 95-99.
(WEI Xiaoling, XUE Bingjun, ZHAO Qiang. Optimization design of the stability for the plunger assembly of oil pumps based on multi-target orthogonal test design[J]. Journal of Hebei university of engineering (natural science edition), 2010, 27(3): 95-99.)
- [21] 王召迁, 王吉业, 张志敏, 等. 盘形滚刀破岩力影响因素试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(7): 1015-1018.
(WANG Zhaoqian, WANG Jiye, ZHANG Zhimin, et al. Experimental study on the influencing factors of disc cutter performance[J]. Journal of northeastern university (natural science), 2014, 35(7): 1015-1018.)
- [22] 夏毅敏, 欧阳涛, 陈雷, 等. 盘形滚刀破岩力影响因素研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(3): 500-507.
(XIA Yimin, OUYANG Tao, CHEN Lei, et al. Study on the influencing factors of disc cutter performance[J]. Journal of basic science and engineering, 2012, 20(3): 500-507.)
- [23] 张珂, 王腾跃, 孙红, 等. 全断面岩石掘进机盘形滚刀破岩模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(6): 1210-1213.
(ZHANG Ke, WANG Tengyue, SUN Hong, et al. Simulation study on disc cutter of full-face rock tunnel boring machine[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(6): 1210-1213.)