

基于 CSM 模型硬岩滚筒载荷理论研究

宋 丹, 高立君, 王 锴, 江 帅
(中铁工程装备集团有限公司, 河南 郑州 450016)

[摘 要] 相比圆形刀盘, 在滚筒式刀盘上安装盘形滚刀更容易实现矩形断面的开挖, 该技术有望广泛应用于硬岩矩形隧道施工。以滚筒式刀盘在破岩过程中的力学参数研究为目标, 通过建立了滚筒刀盘的数学模型, 确立了盘形滚刀切削轨迹的参数方程, 得出滚筒刀盘的切削物理参数, 结合 CSM 模型, 推导出硬岩滚筒载荷的力学方程。该理论研究, 为滚筒式刀盘优化设计和力学预测提供了理论依据。

[关键词] CSM 模型; 滚筒; 盘形滚刀; 破岩力

[中图分类号] TD401 [文献标识码] A [文章编号] 1006-6225 (2018) 05-0010-05

Study of Loading Theory of Hard Rock Roller Based on CSM Model

SONG Dan, GAO Li-jun, WANG Kai, JIANG Shuai

(China Railway Engineering and Equipment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China)

Abstract: To round disc cutter, rectangular cross section could be easily excavated by installment disc cutter on roller cutter, the technology was hopeful to widely used in hard rock rectangular tunnel construction. And mechanics parameters during rock broken process with roller cutter were studying aim, and then mathematical model of roller cutter was built, so parameter formula of cutting trace of roller cutter was built, so some physical parameters were obtained, with CSM model, mechanics formula of hard rock roller loading was deduced, according the theoretical studying, it provided theoretical foundation for optimal design for roller cutter and mechanics forecast.

Key words: CSM model; roller; disc cutter; rock broken force

硬岩掘进机 (Tunnel Boring Machine, 缩写 TBM) 广泛应用于水利水电隧洞、铁路公路交通隧洞、煤矿巷道及城市地铁等地下工程隧道的施工。盘形滚刀与岩石相互作用是 TBM 的设计和应用方面的关键理论。自 1956 年发明盘形滚刀以来, 国内外许多人对这一理论作了大量的研究工作, 其中克罗地亚矿业学院 (CSM) J. Rostami 等人对广泛应用的盘形滚刀破岩进行了研究^[1-2], 给出了 CSM 改进模型, 在工程上得到了较多的应用。

根据需要改变尺寸, 滚筒刀盘可以方便地开挖平底的矩形断面。与传统的圆形断面隧道相比, 矩形隧道有效利用面积高^[3], 公路隧道、铁路隧道、地铁隧道、人行地道、地下共同沟的断面形式以矩形最为合适和经济, 所以, 近几年来矩形断面隧道的应用越来越广泛。国内外对矩形刀盘的受力状况做了大量的理论研究和试验^[4-11], 刘春生对装备截齿的滚筒刀盘进行了详细的受力分析^[12]; J. Rostami 等通过试验验证了装备盘形滚刀的滚筒刀盘破岩的可行性并获得了数据^[13-15]。本文将从装备盘形滚刀的滚筒刀盘切削出的轨迹着手, 基于

CSM 改进模型, 对滚筒刀盘载荷进行理论分析。

1 CSM 改进模型

1993 年, Jamal Rostami 等人在对 TBM 上广泛应用的恒截面 (CCS) 盘形滚刀进行了研究, 在原 CSM 模型 (V 形刀刃) 的基础上进行了改进, 改进后的公式在一定程度上可以预测盘形滚刀受力, 并广泛应用于 TBM 设计上。CSM 滚刀模型为现在常用的型式 (见图 1)。图中 R 为盘形滚刀半径, T 为刀刃宽度, S 为相邻滚刀的间距, p 为截割深度, φ 为接岩角度 (rad), 切入点为 O 点。

则有:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{R-p}{R}\right)$$

盘形滚刀切削硬岩时, 截割深度 p , 接岩角度为 φ , 所产生的切削总力 F_1 为:

$$F_1 = \frac{P'RT\varphi}{\psi + 1}$$

式中, P' 为破碎区基本应力; R 为滚刀刀刃半径; T 为盘形滚刀刀刃宽度; ψ 为刀刃应力分布系数,

[收稿日期] 2018-3-19

[作者简介] 宋 丹 (1980-), 男, 河南郑州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事盾构相关非标设备研究设计工作。

[引用格式] 宋 丹, 高立君, 王 锴, 等. 基于 CSM 模型硬岩滚筒载荷理论研究 [J]. 煤矿开采, 2018, 23 (5): 10-14.

[DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2018.05.003

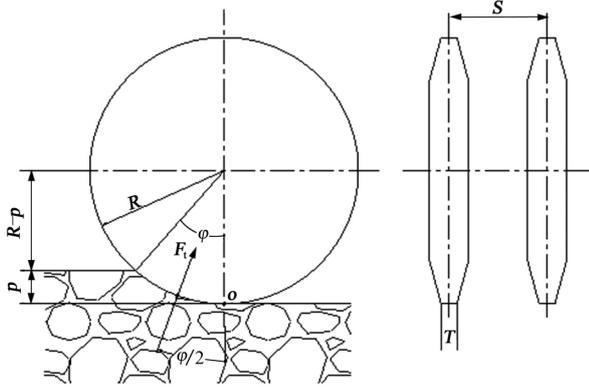


图1 CSM 盘形滚刀数学模型

取 $-0.2 \sim 0.2$, 一般取 0.1 。

$$P' = C^3 \sqrt{\frac{S}{\varphi \sqrt{RT}} \sigma_c^2 \sigma_t}$$

式中, C 为系数, 通常取 2.12 ; σ_c 为岩石单轴抗压强度; σ_t 为岩石抗拉强度; S 为相邻刀具间距。

F_1 方向如图 1, 本模型中忽略滚刀中心轴对刀具的摩擦力, 该力指向盘形滚刀的中心。

从 CSM 模型的推导过程可以看出, 该模型适用于比较平的切削面, 本文将此模型的应用范围进行了拓展, 应用于曲率半径较大的圆弧面。

2 装备盘形滚刀的滚筒刀盘切削面几何参数分析

装备有盘形滚刀的滚筒刀盘, 如图 2 所示, 刀盘整体向前推进速度 v , 同时, 滚筒绕其自身轴线滚动转速 n (rpm), 则滚刀中心运行的轨迹为长幅摆线。图中 R_0 为滚刀中心分布圆半径; θ 为滚刀中心转角。

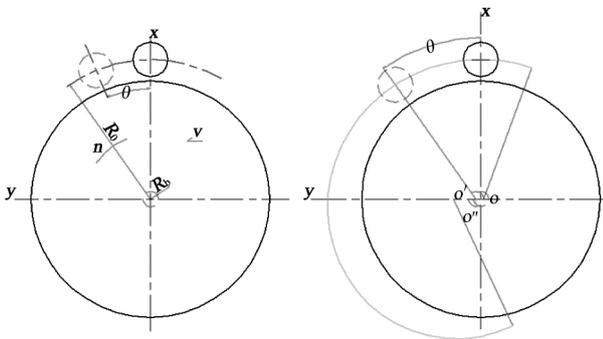


图2 滚筒参数及形成长幅摆线示意

该长幅摆线的基圆半径 R_b 为:

$$R_b = v/n \text{ (mm)}$$

2.1 滚刀中心轨迹曲线

以滚刀位于图示 x 轴位置时刀盘中心位置 O 为原点, 建立图示坐标系, 对于任何一个转角 θ , 滚刀中心坐标为 (x, y) , 滚筒中心移动到 $(x_0,$

$y_0)$:

$$\begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = R_b \theta \end{cases}$$

此时, 滚刀中心坐标 (x, y) , 滚刀中心轨迹为长幅摆线, 曲线参数方程为:

$$\begin{cases} x = R_0 \cos \theta \\ y = R_b \theta + R_0 \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

此时滚筒的速度瞬心位置 O'' 坐标为 $(-R_b,$

2.2 滚刀刀刃包络曲线函数

根据 2.1 所建立的滚筒数学模型, 当滚筒整体以速度 v 推进, 自身转动速度 n 时, 滚刀的外圆包络出一条曲线, 该曲线是长幅摆线的外等距曲线 (见图 3)。对于滚刀转角 θ , 由 2.1 可知, 滚刀中心点 A 的坐标为 $(R_0 \cos \theta, R_b \theta + R_0 \sin \theta)$, 滚筒刀具的速度瞬心 O'' 坐标为 $(-R_b, R_b \theta)$ (见图 3)。可以得出, 长幅摆线的法向量为 $\vec{O''A}$, 则单位法向量 \vec{n} 为:

$$\vec{n} = \frac{\vec{O''A}}{[\vec{O''A}]} = \frac{1}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \theta}} (R_0 \cos \theta + R_b, R_0 \sin \theta)$$

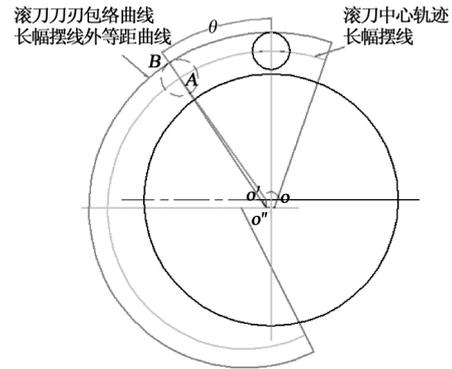


图3 长幅摆线的外等距曲线

沿长幅摆线的法线方向向外延伸盘形滚刀半径 R , 及达到外等距曲线上的点 B , 可以推出长幅摆线外等距曲线的参数函数。

$$\vec{OB} = \vec{OA} + \vec{AB}$$

$$\vec{AB} = R \cdot \vec{n} = \frac{R}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \theta}} (R_0 \cos \theta + R_b,$$

$R_0 \sin \theta)$

$$\vec{OB} = \begin{pmatrix} R_0 \cos \theta + \frac{R(R_0 \cos \theta + R_b)}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \theta}} \\ R_b \theta + R_0 \sin \theta + \frac{RR_0 \sin \theta}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \theta}} \end{pmatrix}$$

外等距曲线的参数方程为:

$$\begin{cases} x = R_0 \cos \theta + \frac{R(R_0 \cos \theta + R_b)}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \theta}} \\ y = R_b \theta + R_0 \sin \theta + \frac{RR_0 \sin \theta}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \theta}} \end{cases} \quad (2)$$

2.3 两条有相位差的等距曲线的交点

图 4 为两条等距曲线交点。

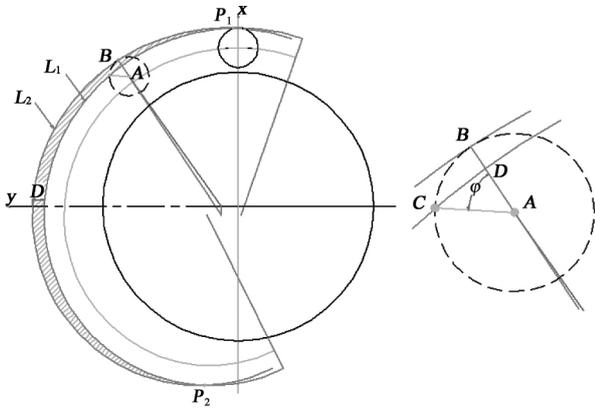


图 4 两条等距曲线交点

如图 4 所示, y 向距离为 D ($D \neq 0$), 图中 2 条等距曲线的参数方程为:

L_1 :

$$\begin{cases} x = R_0 \cos \theta + \frac{R(R_0 \cos \theta + R_b)}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \theta}} \\ y = R_b \theta + R_0 \sin \theta + \frac{RR_0 \sin \theta}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \theta}} \end{cases}$$

L_2 :

$$\begin{cases} x = R_0 \cos \varphi + \frac{R(R_0 \cos \varphi + R_b)}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \varphi}} \\ y = R_b \varphi + R_0 \sin \varphi + \frac{RR_0 \sin \varphi}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \varphi}} + D \end{cases}$$

两条曲线相交, x 坐标相等, 则有:

$$R_0 \cos \theta + \frac{R(R_0 \cos \theta + R_b)}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \theta}} = R_0 \cos \varphi +$$

$$\frac{R(R_0 \cos \varphi + R_b)}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \varphi}}$$

可以得出:

$$\cos \theta = \cos \varphi$$

$$\varphi = 2k\pi \pm \theta$$

y 坐标相等, 有:

$$R_b \theta + R_0 \sin \theta + \frac{RR_0 \sin \theta}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \theta}} = R_b \varphi +$$

$$R_0 \sin \varphi + \frac{RR_0 \sin \varphi}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \varphi}} + D$$

显然, $\theta = -\varphi$ 或 $\theta = 2\pi - \varphi$, 代入上式, 有:

$$R_b \theta + R_0 \sin \theta + \frac{RR_0 \sin \theta}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \theta}} = D/2$$

或

$$R_b \theta + R_0 \sin \theta + \frac{RR_0 \sin \theta}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \theta}} = \pi R_b + D/2$$

即, 交点 P_1 的 y 坐标为 $D/2$, 交点 P_2 的 y 坐标为 $\pi R_b + D/2$, 所对应的滚刀转角分别为 θ_1 和 θ_2 。从图 4 可以清楚地看出, 对于安装盘形滚刀的滚筒形刀盘, 只有进入到点 P_1 和 P_2 对应的相位之间的位置才能切削到岩石, 如图示阴影部分。

对于 L_2 上任一点 B , (B 点相位于 P_1 和 P_2 之间), 切削盘形滚刀的中心位于 A 点, 可以很容易得出, \overrightarrow{AB} 为 L_2 在 B 点的法线方向向量。直线 AB 和 L_1 相交于点 D , 盘形滚刀的外圆在切削方向和曲线 L_1 相交于点 C , 可以得出, 此时盘形滚刀的截割深度 p 和接岩角度 φ 关系为:

$$p = |AB|, \quad \varphi = \angle CAB$$

在确定同一截线上相邻两滚刀的相位差后, 滚刀的截割深度 p 和接岩角度 φ 仅和盘形滚刀的相位相关。

3 装备盘形滚刀的滚筒刀盘的力学分析

3.1 不同截线上装备盘形滚刀滚筒刀盘力学分析

图 5 为装备盘形滚刀的滚筒刀盘的力学模型, 为简化起见, 滚筒上仅画出 2 条截线, 2 条截线距离 S 。如有多条截线, 分析方法相同, 并得出相同的结论。

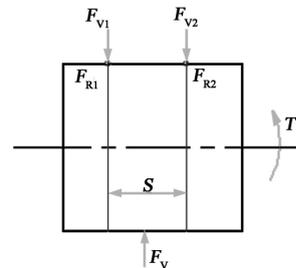


图 5 不同截线盘形滚刀受力分析

破岩时, 岩石对滚筒上不同截线上的盘形滚刀的径向力为 F_{v1} 和 F_{v2} , 切向力分别为 F_{R1} 和 F_{R2} , 为平衡岩石的作用力, 需要给滚筒推进油缸一推力 F_v 和驱动力矩 T 。

$$F_v = F_{v1} + F_{v2}$$

$$T = F_{R1}R + F_{R2}R$$

从以上推理可以看出, 滚筒的推力 F_v 和驱动力矩 T 跟滚刀在滚筒轴向的位置分布没有关系。所以, 在以下对滚筒的力学分析过程中, 把不同截线上的滚刀放在同一截线上分析, 不会影响滚筒的力学分析结果。

3.2 同一截线不同相位滚刀切削几何特性分析

在滚筒的同一截线的不同相位上布置滚刀, 如图 6 所示, 盘形滚刀中心轨迹是长幅摆线 (见 2.1 所述), 基圆半径 R_b 。根据式 (2), 滚刀 1 切削轨迹为:

$$\begin{cases} x = R_0 \cos \theta + \frac{R(R_0 \cos \theta + R_b)}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \theta}} \\ y = R_b \theta + R_0 \sin \theta + \frac{RR_0 \sin \theta}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \theta}} \end{cases}$$

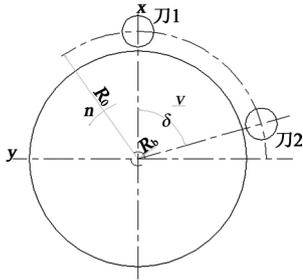


图 6 同一截线滚刀力学分析

当滚刀 2 到达图示滚刀 1 的位置时, 滚筒刀盘整体向前移动的位移 D 为:

$$D = R_b \delta$$

滚刀 2 在滚刀 1 切削轨迹的基础上, 切削出新的轨迹:

$$\begin{cases} x = R_0 \cos \varphi + \frac{R(R_0 \cos \varphi + R_b)}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \varphi}} \\ y = R_b \theta + R_0 \sin \varphi + \frac{RR_0 \sin \varphi}{\sqrt{R_0^2 + R_b^2 + 2R_0R_b \cos \varphi}} + R_b \delta \end{cases}$$

根据 2.3 所述, 两滚刀切削轨迹有 2 个交点, y 坐标分别为 $R_b \delta / 2$ 和 $R_b (\frac{\delta}{2} + \pi)$, 滚刀 2 在任一点的切削深度 p 和接岩角度 φ 见 2.3。

3.3 基于 CSM 模型的滚筒刀盘力学分析

根据 3.1 所述, 装备盘形滚刀的滚筒刀盘破岩需要的推力和驱动转矩和盘形滚刀所处截线的位置没有关系。为简化起见, 把所有盘形滚刀集中于一截面上, 建立刀盘的数学模型 (图 7)。

图 7 中, 刀盘整体推进速度 v , 绕自身轴线旋转转速 n (rpm)。在设计中, 为使得刀盘运转过程

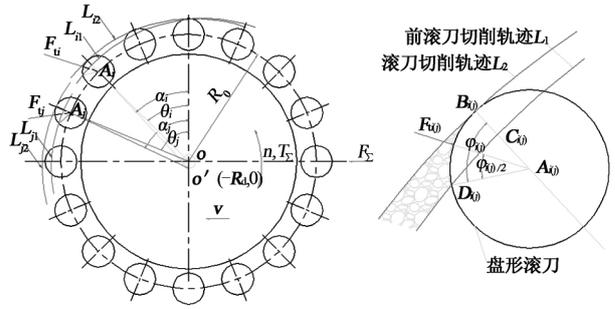


图 7 滚筒刀盘数学模型

中均匀转动, 不受滚刀离心力的影响, 滚刀均匀布置, 相邻两截线的刀间距为 S , 刀刃宽度 T , 滚刀半径 R 。图中所示滚刀可以代表几个滚刀的叠加。一般情况下, 滚筒刀盘有 2 个自由度: y 向 (可以前后整体运动) 和绕轴向旋转。破岩过程中, 为平衡岩石对滚筒的反力, 需要对滚筒沿 y 向的推力 F_y 和沿转动方向的驱动转矩 T_y 。

滚筒的中心为 $O(0, 0)$, 此时, 滚筒的速度瞬心 $O'(-R_d, 0)$, 对于任意一把滚刀 i , 它的中心为 A_i , 转角为 θ_i , 都会包围一条外等距曲线 L_{i2} , 它是同一截线上一个相位的刀具切削轨迹 L_{i1} 的基础上切削。联接 $O'A_i$, $O'A_i$ 为外等距曲线的法线, 和 x 轴夹角 α_i , 延长, 交于滚刀外圆于 B_i , 法线角曲线 L_{i1} 于 C_i 滚刀外圆沿滚切方向和曲线 L_{i1} 交于 D_i , 则滚刀在此处的截割深度 p_i 和接岩角度 φ_i 分别为:

$$p_i = |C_i B_i|, \varphi_i = \angle B_i A_i D_i$$

这 2 个参数仅和滚刀转角 θ_i 相关。

据第 1 节所述, 滚刀 i 受到岩石的总反力 F_{ui} 和方向角 δ_i 为:

$$F_{ui} = \frac{2.12}{1.1} \sqrt[3]{\frac{S}{\varphi_i} \frac{\sigma_c^2 \sigma_1 RT \varphi_i}{\sqrt{RT}}} = 1.927 \sqrt[3]{\frac{S}{\sqrt{RT}} \sigma_c^2 \sigma_1 RT \sqrt[3]{\varphi_i^2}}$$

$$\delta_i = \alpha_i + \frac{\varphi_i}{2} + \pi$$

$$\vec{F}_{ui} = -F_{ui} \left(\vec{i} \cos \left(\alpha_i + \frac{\varphi_i}{2} \right) + \vec{j} \sin \left(\alpha_i + \frac{\varphi_i}{2} \right) \right)$$

式中, \vec{i} 和 \vec{j} 为 x 和 y 方向的单位矢量。

可以看出, 滚刀 i 受到岩石的反作用力沿推进方向 y 的分量 \vec{F}_{uiy} 为:

$$\vec{F}_{uiy} = -1.927 \sqrt[3]{\frac{S}{\sqrt{RT}} \sigma_c^2 \sigma_1 RT \sqrt[3]{\varphi_i^2}} \sin \left(\alpha_i + \frac{\varphi_i}{2} \right) \vec{j}$$

岩石对滚刀 i 的作用力对滚筒中心的转矩 T_i 为:

$$\vec{T}_i = \vec{OA}_i \times \vec{F}_{ui} = R_0 (\vec{i} \cos \theta_i + \vec{j} \sin \theta_i) \times \vec{F}_{ui} =$$

$$- 1.927 \sqrt{\frac{S}{\sqrt{RT}}} \sigma_c^2 \sigma_1 R_0 RT \sqrt{\varphi_i^2} \sin\left(\theta_i - \alpha_i - \frac{\varphi_i}{2}\right) \vec{k}$$

式中， \vec{k} 为 $\vec{i} \times \vec{j}$

可以推出，滚刀任一位置，滚筒破岩时，需要提供的推力 \vec{F}_Σ 和驱动转矩 \vec{T}_Σ 为：

$$\vec{F}_\Sigma = - \sum_{\theta_i} \vec{F}_{iy} = 1.927 \sqrt{\frac{S}{\sqrt{RT}}} \sigma_c^2 \sigma_1 R_0 RT \sum_{\theta_i} \sqrt{\varphi_i^2} \sin\left(\alpha_i + \frac{\varphi_i}{2}\right) \vec{j} \quad (3)$$

$$\vec{T}_\Sigma = - \sum_{\theta_i} \vec{T}_i = 1.927 \sqrt{\frac{S}{\sqrt{RT}}} \sigma_c^2 \sigma_1 R_0 RT \sum_{\theta_i} \sqrt{\varphi_i^2} \sin\left(\alpha_i + \frac{\varphi_i}{2}\right) \vec{k} \quad (4)$$

式中， $\theta_i \in [\theta_1, \theta_2]$ ， θ_1 和 θ_2 的定义见 2.3 节所述。

4 结 论

(1) 本文建立了装备盘形滚刀滚筒刀盘的数学模型，通过对该数学模型的分析，得出了滚刀盘形滚刀切削的轨迹为长幅摆线的外等距曲线，并推出了该曲线的参数方程。

(2) 通过对外等距曲线的几何分析，结合实际应用，给出了滚刀在任意角度的重要切削参数截割深度和接岩角度的数学解释。

(3) 基于 CSM 模型，推出了滚筒刀盘破岩时的推力和驱动转矩公式，为计算机程序解题提供了数学依据，可为滚筒刀盘的设计及实际施工力学预测提供科学指导。

本文对滚筒刀盘进行了深入的数学分析，仅加入了切削过程中所需要的正滚刀，实际应用中还有边滚刀等其他刀具，在本文中未涉及；另外，本文中所用到的 CSM 力学模型，用到了线性压力分布。文中所推出的力学公式，还有待进一步的试验验证。

【参考文献】

[1] Jamal Rostami, Levent Ozdemir, A new model for performance

prediction of hard rock TBMs. [J]. Rect proceedings, 1993, chapter 50.

[2] 张照煌. 盘形滚刀与岩石相互作用理论研究现状及分析 [J]. 工程机械, 2009, 40 (9): 18-22.

[3] 傅德明, 张冠军. 我国矩形掘进机隧道施工技术发展与应 [J]. 上海建设科技, 2008 (2): 4-5.

[4] 夏毅敏, 吴元, 郭金成, 等. TBM 边缘滚刀破岩机理的数值研究 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (1): 172-178.

[5] 彭琦. 围压对 TBM 滚刀破岩影响机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (S1): 2743-2749.

[6] 李辉, 王树林, 汪加科. TBM 盘形滚刀受力分析 [J]. 现代隧道技术, 2012, 49 (3): 193-197.

[7] 姜兴宇, 高超, 高伟贤, 等. 基于库仑-莫尔准则的盘形滚刀破岩力预测研究 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (20): 126-136.

[8] 冯欢欢, 陈馈, 周建军, 等. 掘进机滚刀最优破岩刀间距的分析与计算 [J]. 现代隧道技术, 2014, 51 (3): 124-130.

[9] 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.

[10] 郭伟, 宋立玮, 朱殿华, 等. 基于等量原理的 TBM 刀盘掘进参数与刀间距匹配特性分析 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版) 2017, 50 (2): 128-134.

[11] 宋克志, 袁大军, 王梦恕, 等. 盘形滚刀与岩石相互作用研究综述 [J]. 铁道工程学报, 2005, 22 (6): 66-69.

[12] 刘春生. 滚筒式采煤机理论设计基础 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.

[13] Jamal Rostami. Development of a Force Estimation Model for Rock Fragmentation with Disc Cutters Through Theoretical Modeling and Physical Measurement of Crushed Zone Pressure [D]. Ph. D. Thesis, Colorado school of Mines, Golden, Colorado, USA: 249.

[14] M. Z. Naghadehi, A. Ramezanzadeh, Models for estimation of TBM Performance in granitic and mica gneiss hard rocks in a hydropower tunnel [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76 (4): 1627.

[15] J. Hassarpour, J. Rostami, J. Zhao, A New Hard Rock TBM performance prediction model for project planning [J]. Tunneling and underground space Technology, 2011: 595-603.

【责任编辑：李青】

(上接 90 页)

[2] 潘俊锋, 毛德兵. 冲击地压启动理论与成套技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2016.

[3] 蓝航, 齐庆新, 潘俊锋, 等. 我国煤矿冲击地压特点及防治技术分析 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (1): 11-15, 36.

[4] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (2): 205-213.

[5] 姜耀东, 赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状: 机制、预警与控制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (11): 2188-2204.

[6] 康红普, 颜立新, 郭相平, 等. 回采工作面多巷布置留巷围岩变形特征与支护技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31

(10): 2022-2036.

[7] 王书文, 鞠文君, 潘俊锋. 临空留巷底板冲击地压启动区判定与分步防治技术 [J]. 煤炭学报, 2017, 42 (11): 2799-2807.

[8] 翁明月, 王书文. 内蒙古呼吉尔特矿区新建矿井冲击地压治理模式探索 [J]. 煤矿开采, 2018, 23 (1): 60-64.

[9] 潘俊锋, 王书文, 刘少虹. 双巷布置工作面外围巷道冲击地压启动机理 [J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35 (1): 291-298.

[10] 潘俊锋, 宁宇, 毛德兵, 等. 煤矿开采冲击地压启动理论 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (3): 586-596.

【责任编辑：潘俊锋】