

TBM 盘形滚刀破岩刃弧长研究分析

巩亚东, 赵晓旭, 程 军

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 根据全断面隧道掘进机(TBM)盘形滚刀破岩运动的规律,综合考虑滚刀和掌子面相互的关系,利用空间几何理论以及空间运动学的坐标变换矩阵法建立了盘形滚刀工作刃破岩的运动学模型.采用 Matlab 软件编程对模型求解,得到盘形滚刀对掌子面的理论压碎轨迹的仿真图形及其破岩刃各点一次破岩弧长分布规律.结合仿真结果对比研究了 TBM 刀盘上中心刀和正刀的破岩刃弧长分布的规律.随着盘形滚刀刀位半径的增加,滚刀破岩刃一次破岩弧长呈下降趋势,但累计破岩弧长线性增加.盘形滚刀破岩仿真方法有利于对刀具磨损、破岩机理、刀具优化设计及其在刀盘上布局优化的研究.

关 键 词: 全断面岩石掘进机;盘形滚刀;破岩机理;刀盘;模拟

中图分类号: TP 391.75

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)06-0838-05

Research and Analysis on the Arc Length of the Rock Breaking Point on TBM's Disc Cutter

GONG Ya-dong, ZHAO Xiao-xu, CHENG Jun

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: ZHAO Xiao-xu, E-mail: zxx_dn@sina.com.)

Abstract: Based on its rock breaking movement in the full-face tunnel boring machine (TBM), and the interaction between the disc cutter and the tunnel face being taken into account at the same time, a kinematics model of disc cutter was built by using coordinate transformation matrix method of space geometry and spatial kinematics. The three-dimensional figures of the theory crushed trajectory made by the disc cutter on the tunnel face and the arc length of the rock breaking point were obtained by using Matlab software. The simulation results show that the arc length on disc cutter decreases with the increasing of the cutter radius on cutter head, but the total arc length after cutter head rotating one circle increases linearly. The results are useful to research on tool wear and rock breaking mechanism, as well as to optimize the design and layout of disc cutters on the cutter head.

Key words: tunnel boring machine; disc cutter; rock-broken mechanism; cutter head; simulation

全断面岩石隧道掘进机(full face rock tunnel boring machine, TBM)是一种先进的大型专用设备,在水利水电、高铁、公路、城建等各种长大隧道施工中广泛应用.TBM 技术非常复杂,涉及机械、电子、材料、计算机等多学科知识,其设计制造在一定程度上反映了一个国家的综合科学技术和工业水平^[1-2].安装在刀盘上的盘形滚刀是全断面岩石掘进机破岩并实现隧道掘进的主要工具,是 TBM 的重要组成部分.盘形滚刀为易损耗件,一

些工程中刀具费用就会占工程施工费用的三分之一左右,其中 80% 是由各种滚刀磨损导致的^[3],表明滚刀破岩点的弧长与磨损关系密切,因此研究滚刀破岩刃弧长具有重要意义.

国内外学者通过试验和数值方法对盘形滚刀磨损的研究较多也较深入,这些成果为 TBM 工程中运用盘形滚刀提供了依据^[4-9].张照煌提出了破岩弧长的理论公式^[10].但是这些研究没有考虑盘形滚刀与掌子面相互作用关系对破岩刃弧长

的影响. 本文提出一种数值方法, 利用空间几何理论对盘形滚刀与掌子面相互的运动学关系进行研究, 计算滚刀宽度方向各点的破岩弧长, 结果对滚刀磨损分析具有一定的参考意义.

1 破岩弧长计算模型

刀盘位于 TBM 的最前端, 盘形滚刀按照一定规律布置在刀盘上. 在推力和扭矩的作用下, 刀盘旋转带动滚刀运动, 连续地进行破岩运动. 盘形滚刀破岩刃上各点与岩石从开始接触到侵入岩石最大深度结束, 为该点的一次侵深破岩, 其运动轨迹为一次破岩弧长. 盘形滚刀的破岩过程就是破岩刃上各点侵深破岩的集合. 滚刀上任一点 K 的破岩示意图如图 1 所示. 图中 $OXYZ$ 为固定坐标系, 坐标原点 O 位于刀盘中心, XY 平面位于掌子面上. 局部坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 位于刀盘中心且随滚刀一起运动. 盘形滚刀的刀位安装半径为 R , φ 为刀盘转角, P 为贯入度.

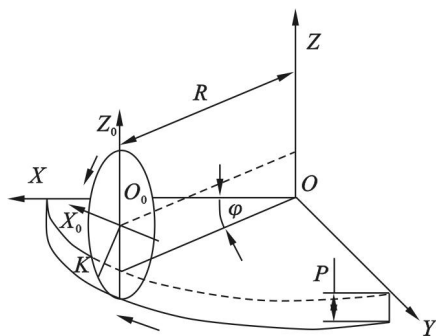


图 1 滚刀破岩运动示意图

Fig. 1 Illustration of the cutter rock breakage

1.1 理论模型

根据盘形滚刀破岩的空间运动关系, 得到破岩刃上一点破岩弧长 l 的计算公式:

$$l = \int v_k dt = \frac{2}{R} \{ r \sqrt{R^2 + r^2} + R^2 \ln [(r \sqrt{2r} + \sqrt{2rR^2 + 2r^3}) / (r \sqrt{2r - P} + \sqrt{2rR^2 + r^2(2r - P)})] - \frac{\sqrt{2r - P}}{2} \sqrt{2rR^2 + r^2(2r - P)} \}. \quad (1)$$

式中: v_k 为点 K 在时刻 t 的瞬时速度; r 为滚刀半径.

1.2 掌子面模型

在滚刀实际破岩运动过程中, 破岩刃没有全部参与破岩, 刀具安装半径较小时这种现象更加明显. 理论公式中没有考虑这种情况, 因此本文采

用一种新的方法计算破岩弧长. 首先如图 1 和图 2 所示, 建立 3 个直角坐标系, 分别为固定坐标系 $OXYZ$, 局部坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$, 临时坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$. 临时坐标系原点与局部坐标系原点相同, 坐标轴平行于固定坐标系.

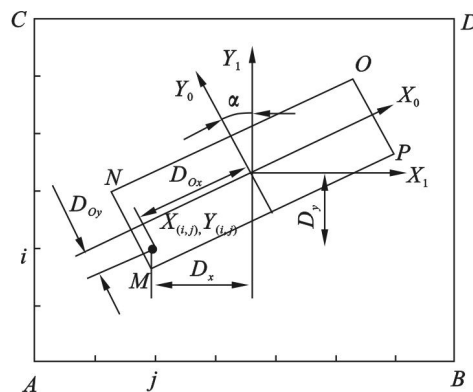


图 2 盘形滚刀运动数值模型图

Fig. 2 The numerical model of disc cutter's movement

掌子面采用四边形网格模拟, 网格上每一节点对应一个高度值. 如图 2 所示, 四边形 $ABCD$ 为掌子面上选取的局部区域, 盘形滚刀在该区域内的投影在矩形 $MNOP$ 内. 滚刀在掌子面上滚压时, 各节点高度相应变化, 模拟沟槽形成过程. 节点高度用 Z 轴坐标表示, 所有节点的 z 坐标存储在一个矩阵中, 供绘图函数调用.

1.3 理论压碎轨迹计算

在固定坐标系下, 矩形 $ABCD$ 内任意节点的坐标 $(X_{i,j}, Y_{i,j})$ 为

$$X_{i,j} = X_{\min} + dx \cdot i, \quad (2)$$

$$Y_{i,j} = Y_{\min} + dy \cdot j. \quad (3)$$

其中: X_{\min} 和 Y_{\min} 为点 A 的坐标分量; dx 和 dy 分别为掌子面四边形网格 X 方向和 Y 方向的间距; 点 A 对应的 (i, j) 设定为 $(0, 0)$. 在固定坐标系下, 各节点距离滚刀中心的距离分别为

$$D_x = X_{i,j} - x, \quad (4)$$

$$D_y = Y_{i,j} - y. \quad (5)$$

参数 (x, y) 为滚刀中心在固定坐标系的 XY 平面上投影坐标. 然后通过坐标变换, 得到沿着局部坐标系坐标轴方向上的距离 D_{0x} 和 D_{0y} 为

$$\begin{bmatrix} D_{0x} \\ D_{0y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix}. \quad (6)$$

α 为局部坐标系和临时坐标系间的夹角, 模拟过程中代表刀盘转动角度.

根据 D_{0x} 和 D_{0y} 判断该点是否在 $MNOP$ 区域内, 如果在内, 按照式 (7) 计算滚刀上该点在固定坐标系上的 z 坐标 $Z_{i,j}$:

$$Z_{ij} = -\sqrt{(\sqrt{r^2 - (D_{ox})^2 + R_1 - r_1})^2 - (D_{oy})^2} - P + R_1. \quad (7)$$

式中: R_1 为盘形滚刀半径; r_1 为滚刀刀尖圆弧半径. 将新得出的 z 坐标与原坐标值比较, 若小于原值, 说明该点参与破岩, 更新掌子面矩阵. 随着盘形滚刀的运动, 最后得到盘形滚刀在掌子面上的理论压碎沟槽轨迹.

1.4 一次破岩弧长算法

为计算各点的一次破岩弧长, 取盘形滚刀破岩刃上任意一点, 得到其局部坐标 (x_0, y_0, z_0) 后, 通过坐标变换转变为全局坐标 (X, Y, Z) :

$$\begin{aligned} X &= x_0 \cos(\alpha) - y_0 \sin(\alpha) + X_0, \\ Y &= x_0 \sin(\alpha) + y_0 \cos(\alpha) + Y_0, \\ Z &= z_0. \end{aligned} \quad (8)$$

当刀盘转动一小角度后, 计算该点新位置的坐标, 并判断这点是否参与破岩运动, 参与了破岩运动则计算新旧两位置间的距离. 随着刀盘的转动, 不断累计该距离, 直到该点不再参与破岩运动为止, 总距离即为该点一次破岩弧长.

为对模型进行求解, 利用 Matlab 软件编程, 可以得到各种不同滚刀截面等工程参数的结果. 图 3 为数值模型计算程序的流程图.

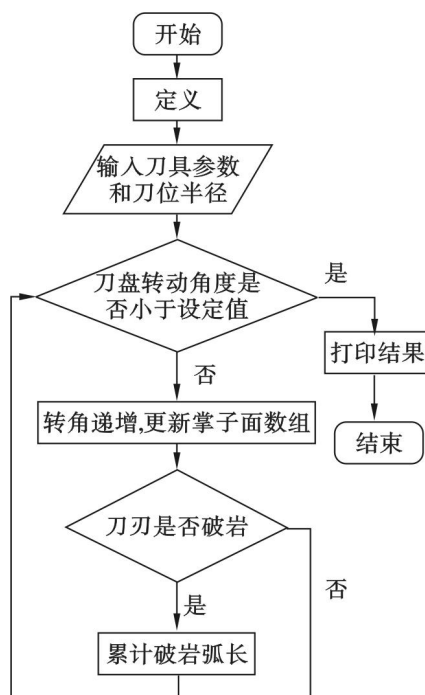


图 3 计算程序流程图

Fig. 3 The flow chart of program

1.5 模型验证

为验证模型的正确性, 将理论计算公式(1)与本模型计算结果进行了比较. 选择秦岭隧道使用的 TB880E 全断面隧道掘进机刀盘中刀位号为

40~46 的正刀, 计算刀尖中点的一次破岩弧长, 计算结果列于表 1. 结果在小数点后 2 位相同, 说明本文数值模型的计算是准确的.

表 1 一次破岩弧长数据结果

Table 1 Data of the arc length of the rock breakage point

刀位号	刀位半径 mm	计算破岩弧长 mm	仿真破岩弧长 mm
40	3 112	7.925 021	7.924 951
41	3 177	7.924 259	7.924 126
42	3 242	7.923 924	7.923 645
43	3 307	7.922 866	7.923 043
44	3 372	7.922 230	7.922 316
45	3 437	7.921 629	7.921 422
46	3 502	7.921 061	7.920 976

注: 滚刀半径为 216 mm, 贯入度为 7.87 mm.

2 模型计算实例及分析

2.1 压碎轨迹分析

压碎轨迹是滚刀破岩运动过程中与掌子面相互作用形成的空间运动轨迹, 对于分析滚刀破岩运动具有重要意义. 计算参数采用 TB880E 全断面隧道掘进机数据. 中心刀 C3 刀位安装半径为 210 mm, 正刀 40 刀位安装半径为 3 112 mm. 盘形滚刀采用工程中应用广泛的常截面 17 英寸盘形滚刀, 刀尖圆弧半径为 8 mm, 贯入度为 7.87 mm. 图 4 和图 5 分别为中心刀 C3 和正刀 40 在掌子面上滚压形成的压碎沟槽的仿真结果图形, 图中深色区域代表当前滚刀与掌子面的接触区. 从图中可以看出, 中心刀 C3 因为刀位安装半径小, 滚刀与掌子面的接触区也向刀盘中心偏转. 滚刀内侧与掌子面全面接触, 滚刀外侧有一部分并没有与掌子面接触. 而正刀 40 的接触区基本与沟槽中心对称. C3 的接触面积为 620 mm², 正刀 40 的接触面积为 750 mm².

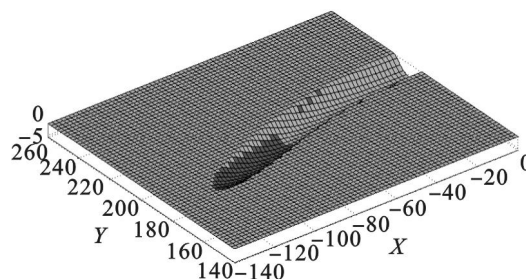


图 4 中心刀 C3 理论轨迹仿真图形

Fig. 4 Theoretical trajectory made by center cutter C3

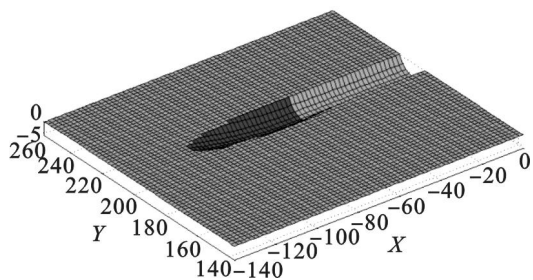


图5 正刀理论压碎轨迹仿真图形

Fig. 5 Theory crushed trajectory made by face cutter

在 TBM 施工过程中, 盘形滚刀压碎轨迹所在区域的岩石基本呈粉末状岩屑, 而块状岩屑只在两个相邻的滚刀中间出现. 因此非常有必要研究滚刀压碎轨迹沟槽的宽度分布情况. 图 6 为滚刀压碎轨迹宽度沿刀位半径的分布规律图形, 同时给出了当刀间距为 70 mm 时, 滚刀压碎区与滚刀未接触区的比例关系. 压碎轨迹的宽度随着刀位半径的增加明显减小, 说明中心滚刀的破岩效率要低于正刀.

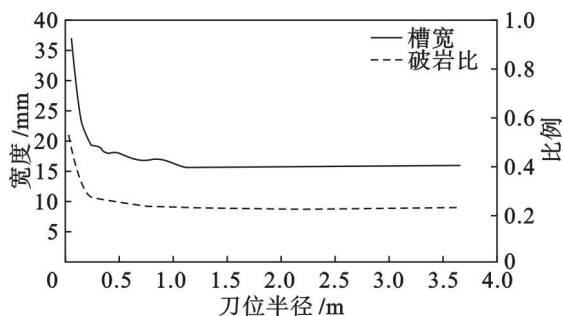


图6 滚刀压碎轨迹宽度沿刀位半径分布

Fig. 6 Width distribution of crushed trajectory along cutter radius

2.2 破岩刃上各点的一次破岩弧长分布

由于盘形滚刀作空间运动, 破岩刃上各点的一次破岩弧长各不相同. 图 7 给出了 3 个典型刀位的盘形滚刀圆弧刃一次破岩弧长沿滚刀宽度方向的分布仿真结果图形. 刀位半径 210 mm 的 C3 滚刀破岩刃中心最大一次性破岩弧长为 11.32 mm, 正刀 40 的弧长为 7.92 mm, 小于中心刀的弧长, 因此刀位半径小的滚刀侧向滑移距离比较大. 与正刀 40 相比, 中心刀 C3 的弧长分布并不是沿滚刀中心对称, 有一边破岩刃的破岩弧长为 0, 由于空间运动的关系这一部分圆弧刃并没有与掌子面接触, 也就没有直接参与破岩运动. 在秦岭隧道施工中, 中心刀经常出现偏磨, 因为滚刀刀尖仅有一部分破岩刃参与了破岩运动, 长期的单面磨损造成了盘形滚刀偏磨的现象. 而正刀刀刃都参与了破岩运动, 刀尖虽然为圆弧状, 但由于滚刀中心的破岩弧长最大, 随着破岩运动的进行,

刀尖会逐渐磨平, 就形成了正刀的刀尖磨损特点.

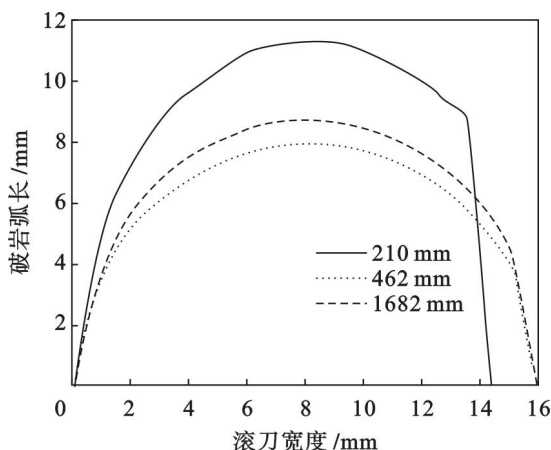


图7 不同刀位的滚刀一次破岩弧长分布

Fig. 7 Distribution of arc length in cutter section

2.3 TBM 刀盘上滚刀一次破岩弧长分布规律

随着刀位安装半径增加, 盘形滚刀破岩刃的一次破岩弧长逐渐变小, 如图 8 所示, 最小值逐渐接近贯入度, 这与理论公式得出的结论也是一致的. 滚刀贯入度减小, 破岩刃的一次破岩弧长也相应减小. 刀盘旋转一周, 盘形滚刀破岩刃各点的累计破岩弧长随着刀盘半径的增加, 呈线性变化, 如图 9 所示. 因为滚刀在工作中磨损情况与破岩弧长相关, 刀位安装半径大的滚刀累计破岩弧长也大, 其磨损就越严重. 为解决这种问题, 常常在安装半径大的刀盘位置安装 2 把滚刀, 甚至更多, 使刀盘上的滚刀磨损情况能够尽量平均分布, 减少滚刀更换频率, 提高 TBM 的掘进效率.

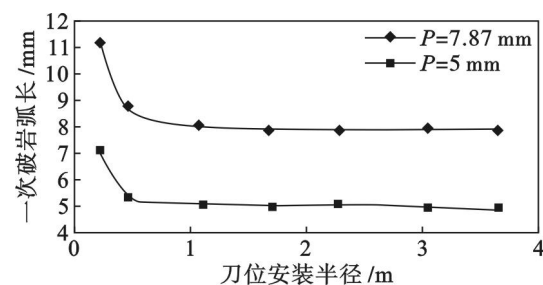


图8 一次破岩弧长随刀位半径分布图

Fig. 8 Distribution of the arc length along cutter radius

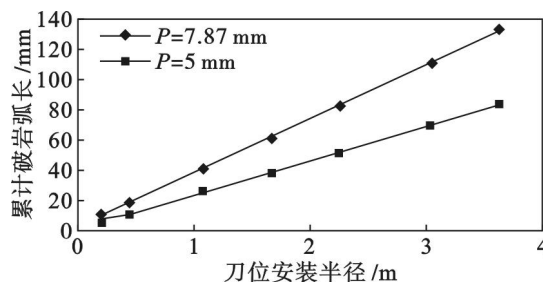


图9 刀盘旋转一周累计破岩弧长

Fig. 9 Total arc length along cutter radius per revolution

2.4 弧长磨损系数计算分析

根据文献[9]的数据,利用模型计算出来的破岩弧长计算出滚刀弧长磨损系数,见表 2. 其中磨损系数 1 为按照滚刀破岩刃上各点弧长的平均值计算所得,而磨损系数 2 为按照破岩刃上最大弧长计算所得. 结果表明,按最大弧长计算的磨损系数标准差小,数据可靠性高,应在指导工程施工时采用.

表 2 弧长磨损系数计算
Table 2 The calculation results of arc wear coefficient

刀位半径 mm	磨损量 mm	磨损系数 1 $\times 10^{-5}$	磨损系数 2 $\times 10^{-5}$
462	220	2.22	1.65
1 092	284	1.32	0.98
1 682	473	1.44	1.07
2 267	566	1.29	0.95
3 047	928	1.57	1.16
3 632	1 484	2.11	1.56
平均值		1.66	1.23
标准差		0.4	0.3

3 结 论

1) 利用数学方法对全断面岩石掘进机盘形滚刀的破岩过程进行了运动学仿真分析;仿真结果能够得到盘形滚刀在掌子面上滚动形成的理论轨迹图形,并可以计算出盘型滚刀破岩刃上任一点一次破岩弧长.

2) 分析结果表明盘形滚刀破岩刃上各点的破岩弧长各不相同,滚刀直径最大处破岩弧长最大,向边缘逐渐减小;在刀盘上不同刀位安装半径的滚刀刀刃上各点破岩弧长分布也不同.

3) TBM 刀盘上正刀的破岩刃全部参与破岩运动,而中心刀只有部分参与破岩运动,这就是中心滚刀偏磨的原因之一. 建立刀具的破岩弧长仿真模型有利于进一步研究刀具的破岩机理,为刀具的优化设计和磨损机理研究提供参考.

参考文献:

[1] Hood M, Alehossein H. A development in rock cutting technology[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,2000,37(1):297-305.

[2] 程军,巩亚东,陈涛,等. 基于 ADAMS 的全断面掘进机刀盘优化设计[J]. 东北大学学报:自然科学版,2010,31(6):882-885.
(Cheng Jun,Gong Ya-dong,Chen Tao,et al. ADAMS-based optimal design of tunnel boring machine's cutter head[J]. *Journal of Northeastern University:Natural Science*,2010,31(6):882-885.)

[3] Ozdemir L,Wang F D. Mechanical tunnel boring prediction and machine design[R]. Golden:Colorado School of Mines,1977.

[4] 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.

[5] Rostami J. Study of pressure distribution within the crushed zone in the contact area between rock and disc cutters[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,2013,57(1):172-186.

[6] 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.

[7] 杨金强,叶定海. 盘形滚刀受力分析及切割岩石数值模拟研究[D]. 北京:华北电力大学,2007.
(Yang Jin-qiang,Ye Ding-hai. The force analysis and numerical simulation study on disk cutter cutting rock[D]. Beijing:North China Electric Power University,2007.)

[8] Su O,Ali Akcin N. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,2011,48(3):434-442.

[9] Rojek J,Oñate E,Labra C,et al. Discrete element simulation of rock cutting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,2011,48(6):996-1010.

[10] 张照煌. 全断面岩石掘进机平面刀盘上盘形滚刀磨损研究[J]. 现代隧道技术,2007,44(6):32-36.
(Zhang Zhao-huang. Study on the abrasion of disc cutters on full face rock tunnel boring machine[J]. *Modern Tunnelling Technology*,2007,44(6):32-36.)