

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.05.013

TBM 掌子面力学模型与滚刀破岩力推力预测

钱向东,侯成昊

(河海大学力学与材料学院,江苏 南京 210098)

摘要:以掌子面岩体破坏前状态建立了滚刀推力作用的双集中力模型,采用弹性半空间理论的 Boussinesq 解答和叠加原理,给出了双滚刀协同作用下岩体应力分布的解析解。根据应力分布的特点和 TBM 破岩要求,提出了 TBM 破岩的必要条件;采用单轴强度理论和多轴强度理论,分别给出了滚刀破岩推力的预测公式。工程实例表明,采用本文提出的基于多轴强度理论的预测公式计算出的滚刀破岩推力与 TBM 工作时实际使用的推力非常吻合。

关键词:TBM;盘型滚刀;掌子面;力学模型;弹性半空间理论;多轴强度理论;破岩推力

中图分类号:U455.3

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2023)05-0097-07

Mechanical model of TBM working face and prediction of rock breaking thrust for disc cutters

QIAN Xiangdong, HOU Chenghao

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the state of rock before failure in the working face of TBM, the double concentrated-force model is established for the working face under the thrust action of TBM disc cutters. Analytical expression of the stress distribution of rock under the coordinated action of double disc cutters is given by using the Boussinesq solution for the elastic half-space problem and the superposition principle. Based on the characteristics of stress distribution and the requirements for TBM rock breaking, necessary conditions for TBM rock breaking have been proposed, and the prediction formulas for the rock breaking thrust of disc cutter are provided using the uniaxial strength theory and the multi-axial strength theory, respectively. The engineering example shows that the rock breaking thrust of disc cutter predicted based on the multi-axial strength criterion proposed in this paper agrees well with the actual thrust during the TBM operation.

Key words: TBM; disc cutter; tunnel working face; mechanical model; elastic half-space theory; multi-axial strength criterion; rock breaking thrust

全断面隧道掘进机(TBM)的主机(掘进系统)由装有刀具(滚刀)的刀盘、刀盘纵向推进装置和刀盘旋转驱动装置组成^[1]。工作时,分布在刀盘上的滚刀压紧待开挖面(掌子面)的岩体,在刀盘推力和扭矩的共同作用下,滚刀在掌子面上切出一系列的同心圆沟槽^[2]。当推力产生的岩体应力达到或超过岩体的强度时,滚刀刀尖下的岩体直接破碎,刀尖贯入岩体,形成周边的破碎和裂纹区。当滚刀间距小于一定数值时,相邻滚刀间的岩体破碎和裂纹区相互贯通,相邻沟槽间的岩体形成碎片而剥落。

刀盘推力通过滚刀作用在掌子面上,岩体在滚刀作用下产生应力,当岩体的应力状态达到强度极限时,就发生强度破坏。因此,掌子面力学模型和岩体强度准则是确定 TBM 刀盘推力的基础。在 TBM 刀盘推力预测和设计方法的发展初期,主要采用两类模型^[1-3]:①基于接触面均布应力和岩体单轴抗压强度的简化理论模型,导出的预测公式主要有伊万斯公式、秋三藤三郎公式、罗克斯巴勒公式和东北工学院公式等,这些公式的主要差别在于滚刀与掌子面的接触面积,都只考虑了岩体的挤压破碎,而没有考虑剪切破坏情况;②基于试验数据、滚刀形式和岩体特性的经验模型,导出的预测公式主要有科罗拉多矿业学院公式、Rostami 公

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B220204002)

作者简介:钱向东(1963—),男,教授,博士,主要从事工程力学、水工结构工程研究。E-mail: xdqian@ hhu. edu. cn

引用本文:钱向东,侯成昊. TBM 掌子面力学模型与滚刀破岩力推力预测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):97-103.

QIAN Xiangdong, HOU Chenghao. Mechanical model of TBM working face and prediction of rock breaking thrust for disc cutters[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(5): 97-103.

式、上海交通大学公式和华北水电学院公式等。这些极具代表性的预测公式都客观地反映了盘形滚刀滚压
破岩过程,但破岩力预测结果有时相差较大^[4-5]。为更好地预测隧道掘进的推力需求,人们根据滚刀破岩机
理,陆续提出了一系列改进的预测模型^[6-13]。但这些模型均以理想的岩体破坏状态(满足设计的贯入度)和
岩体单轴强度为前提,且将滚刀作为单一的研究对象,忽略了岩体本身的破坏过程。也有研究者采用岩体断
裂力学^[14]、数值仿真^[15-17]等研究破岩机理和掘进性能,但仅限于单把滚刀,也不便直接应用于掘进推力的设计。
随着工程建造的智能化以及大数据平台的建设,基于智能算法的 TBM 掘进参数预测越来越受到关
注^[18-20],但不属于基于破岩机理的预测方法。

本文以掌子面岩体破坏前的状态建立了滚刀推力作用的双集中力模型,采用弹性半空间理论的
Boussinesq 解答和叠加原理,给出了双滚刀协同作用下岩体应力分布的解析解。根据应力分布的特点和
TBM 破岩要求,提出了 TBM 破岩的必要条件。采用单轴强度理论和多轴强度理论,分别给出了滚刀破岩推
力的预测公式。

1 掌子面力学模型及其求解

假定掌子面的初始状态是一个平整的岩面,与 TBM 的推力方向相垂直,刀盘的总推力平均分配至每一
把滚刀。对于当前广泛采用的常截面滚刀,刚度较大,具有良好的
的稳定性和耐磨性,相对岩体而言,可将滚刀视为刚性压头
(图 1)。由于滚刀刀刃的宽度一般不超过 25.4 mm,比隧洞的直
径小 2 个数量级,可将滚刀的推力简化为作用于掌子面的集中
荷载,据此,可以建立掌子面的集中荷载模型。

1.1 单滚刀集中荷载模型和 Boussinesq 解答

由于掌子面是隧道岩体的一个临空面,因此单把滚刀对掌
子面的推力可以简化为半空间体边界面上作用一个法向集中荷
载,力学模型可采用柱坐标系表示,如图 2 所示。图 2 坐标原点
为滚刀与掌子面的接触点, z 轴垂直掌子面指向岩体,径向坐标
轴 r 指向隧洞围岩, P 为单把滚刀对掌子面作用推力。

假定岩体破坏前为均匀、连续的线性弹性体,则在滚刀推力
 P 作用下,可采用弹性半空间体的 Boussinesq 解答获得岩体的
各应力分量^[21]:

$$\left\{\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{P}{2\pi R^2} \left[\frac{(1-2\mu)R}{R+z} - \frac{3r^2z}{R^3} \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{(1-2\mu)P}{2\pi R^2} \left(\frac{z}{R} - \frac{R}{R+z} \right) \\ \sigma_z &= -\frac{3Pz^3}{2\pi R^5} \\ \tau_{rz} &= \tau_{zr} = -\frac{3Prz^2}{2\pi R^5} \\ \tau_{r\theta} &= \tau_{\theta r} = \tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} = 0\end{aligned}\right. \quad (1)$$

其中 $R = \sqrt{r^2 + z^2}$

式中: σ_r 、 σ_θ 、 σ_z 、 $\tau_{r\theta}$ 、 $\tau_{r\theta}$ 、 $\tau_{\theta z}$ 、 $\tau_{z\theta}$ 、 τ_{rz} 、 τ_{zr} 为柱坐标下的应力分量; μ 为岩体泊松比。

1.2 多滚刀协同作用模型

根据滚刀在刀盘平面上布置的平衡性、稳定性和有效性等要求^[1,22-24],一般采用等间距同心圆或接近同
心圆的阿基米德螺旋线布置。而滚刀沿周线的布置,应尽量使每把滚刀随刀盘公转时,碾压岩石的路程相
同,以便达到同步磨损的优良状态。忽略刀盘旋转的动态效应和扭矩产生的岩体应力,则全部滚刀对掌子面
的整体作用可以简化为沿掌子面径向线等间距分布的多滚刀协同作用。考虑到每把滚刀平均分配总推力的
假定,且只考虑相邻滚刀之间的相互作用,根据对称性,可以进一步将多滚刀协同作用的模型简化为半空间

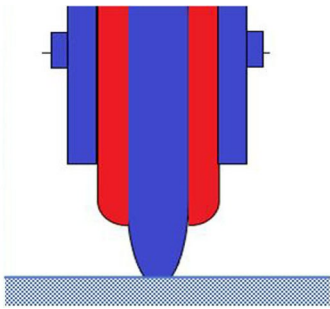


图 1 滚刀作用示意图

Fig. 1 Schematic diagram of disc-cutter action

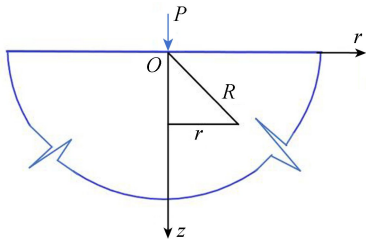


图 2 半空间体受法向集中力作用

Fig. 2 Half-space body subject to normal concentrated force

体边界面上作用 2 个法向集中荷载的力学模型,如图 3 所示(λ 为滚刀间距)。

根据均匀、连续和线弹性假定,在 2 个法向集中荷载 P 的作用下,可根据 Boussinesq 解和叠加原理,获得岩体的各应力分量:

$$\left\{\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{P}{2\pi R_1^2} \left[\frac{(1-2\mu)R_1}{R_1+z} - \frac{3r_1^2 z}{R_1^3} \right] + \frac{P}{2\pi R_2^2} \left[\frac{(1-2\mu)R_2}{R_2+z} - \frac{3r_2^2 z}{R_2^3} \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{(1-2\mu)P}{2\pi R_1^2} \left(\frac{z}{R_1} - \frac{R_1}{R_1+z} \right) + \frac{(1-2\mu)P}{2\pi R_2^2} \left(\frac{z}{R_2} - \frac{R_2}{R_2+z} \right) \\ \sigma_z &= -\frac{3Pz^3}{2\pi} \left(\frac{1}{R_1^5} + \frac{1}{R_2^5} \right) \\ \tau_{rz} &= \tau_{zr} = -\frac{3Pz^2}{2\pi} \left(\frac{r_1}{R_1^5} + \frac{r_2}{R_2^5} \right) \\ \tau_{r\theta} &= \tau_{\theta r} = \tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} = 0\end{aligned}\right. \quad (2)$$

其中
$$r_1 = r + \frac{\lambda}{2} \quad r_2 = r - \frac{\lambda}{2} \quad R_1 = \sqrt{r_1^2 + z^2} \quad R_2 = \sqrt{r_2^2 + z^2}$$

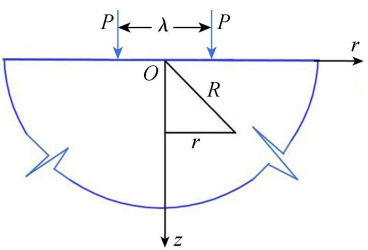


图 3 两滚刀协同作用力学模型
Fig.3 Mechanical model under the coordinated action of double disc cutters

2 滚刀破岩推力预测方法

2.1 TBM 破岩必要条件

在给定滚刀推力 P 和刀间距 λ 的情况下,可根据式(2)计算两滚刀间岩体的应力场。当岩体某点的应力状态满足强度准则时,岩体发生破坏。如果两滚刀间岩体的破坏区域能够贯通,则符合 TBM 的破岩要求,否则在两滚刀间会形成硬核岩脊,无法实现 TBM 的破岩目标。因此,破坏区域贯通的必要条件,即 TBM 破岩的必要条件为:两滚刀间对称轴($r=0$)上一定深度处的岩体达到破坏状态。

作为模型分析的样板,以 $P=250\text{ kN}$ 、 $\lambda=80\text{ mm}$ 、 $\mu=0.25$ 为例,由式(2)计算滚刀间岩体应力分布,如图 4 所示。从图 4(d)可以看出,岩体的第一主应力均为拉应力,且在岩体表面($z=0$)附近存在超过抗拉强度的贯通区域,但深度较小,不能达到 TBM 的贯入度(刀盘旋转一周的破岩深度)。因此,必须在更深处出现较大的主压应力或主切应力,以满足破坏区域贯通的必要条件。

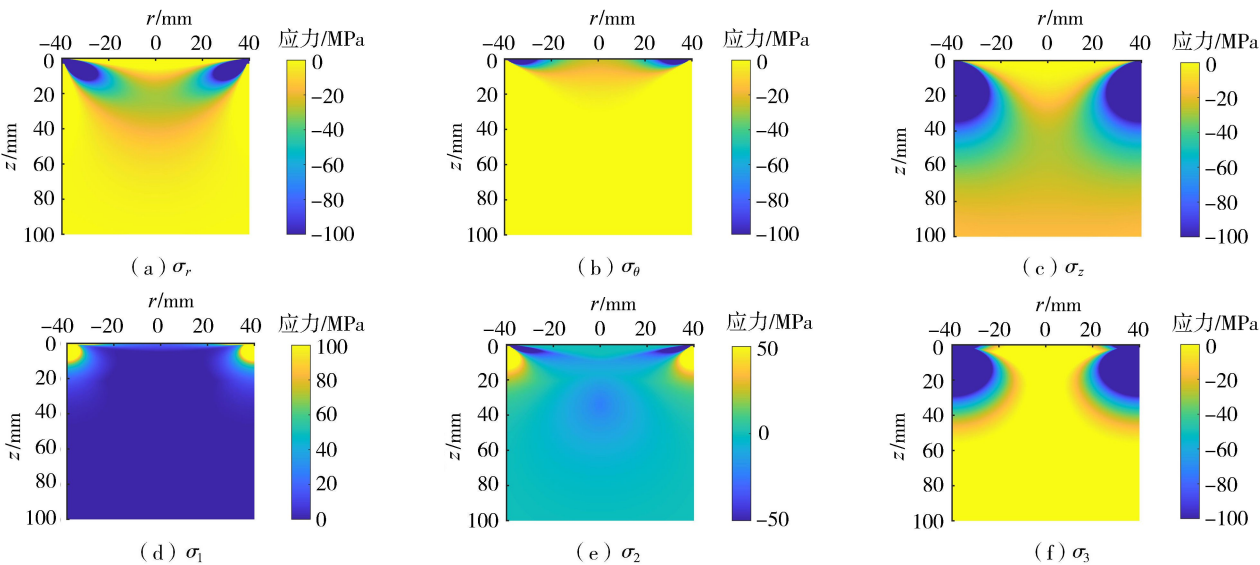


图 4 滚刀间岩体应力分布

Fig.4 Rock stress distribution between two disc-cutters

2.2 应力极值点

由式(2)可知,当 $r=0$ 时, $\tau_{rz}=\tau_{zr}=0$, 对称轴上的切应力均为 0, 则 σ_r 、 σ_θ 、 σ_z 代表 3 个主应力。因此,为

了方便,以主压应力为考察对象。 σ_r 、 σ_z 在图 5 所示深度范围内存在唯一的极值点,即最大主压应力。

根据极值原理,当 $z=z_1=\frac{\sqrt{5+2\mu}-\sqrt{21+30\mu}}{2\sqrt{1-2\mu}}\lambda$ 时, σ_r 取极大值:

$$\sigma_r^* = \frac{4P}{\pi(\lambda^2 + 4z_1^2)} \left[\frac{(1 - 2\mu)(\lambda^2 + 4z_1^2)^{\frac{1}{2}}}{(\lambda^2 + 4z_1^2)^{\frac{1}{2}} + 2z_1} - \frac{6\lambda^2 z_1}{(\lambda^2 + 4z_1^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \tag{3}$$

式中 z_1 为 σ_r 取极大值 σ_r^* 时的深度。

当 $z=z_2=\frac{\sqrt{6}}{4}\lambda$ 时, σ_z 取极大值:

$$\sigma_z^* = -\frac{3Pz_2^3}{\pi} \left(\frac{\lambda^2}{4} + z_2^2 \right)^{-\frac{5}{2}} \tag{4}$$

式中 z_2 为 σ_z 取极大值 σ_z^* 时的深度。

2.3 基于单轴强度准则的滚刀破岩推力预测

若岩体破坏符合第一强度理论,则在给定 λ 和 σ_c (以压为正) 的情况下,可以采用单轴强度准则和对称轴上 σ_r 和 σ_z 的极大值 σ_r^* 和 σ_z^* 计算滚刀的破岩推力。

由 $-\sigma_r^* = \sigma_c$, 得到

$$P_1^* = \frac{\pi\sigma_c(\lambda^2 + 4z_1^2)}{4} \left[\frac{6\lambda^2 z_1}{(\lambda^2 + 4z_1^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{(1 - 2\mu)(\lambda^2 + 4z_1^2)^{\frac{1}{2}}}{(\lambda^2 + 4z_1^2)^{\frac{1}{2}} + 2z_1} \right]^{-1} \tag{5}$$

由 $-\sigma_z^* = \sigma_c$, 得到

$$P_2^* = \frac{\pi\sigma_c}{3z_2^3} \left(\frac{\lambda^2}{4} + z_2^2 \right)^{\frac{5}{2}} \tag{6}$$

根据破岩必要条件,可得滚刀的破岩推力为

$$P^* = \min(P_1^*, P_2^*) \tag{7}$$

2.4 基于多轴强度准则的滚刀破岩推力预测

大量三轴试验表明,岩体具有显著的多轴强度特征^[25],有必要采用多轴强度准则预测滚刀的破岩推力。一般情况下,多轴强度准则可以表示为主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 的函数:

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0 \tag{8}$$

当给定滚刀间距 λ 和岩体多轴强度参数后,强度函数 $F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 是滚刀推力 P 和坐标 z 的函数,记为 $f(P, z)$ 。因为满足 $f(P, z) = 0$ 的 P 、 z 有无穷多组,因此不能唯一地确定滚刀破岩推力 P^* 。从 TBM 掘进要求分析,可以选取 3 个深度(z 坐标),即应力极值点坐标 z_1 、 z_2 和设计贯入度 h (记为 z_3),确定滚刀破岩推力 P^* 。

将 $r=0, z=z_1, z_2, z_3$ 代入式(2),计算得到 3 组应力(主应力): $\{\sigma_r(P, z_1), \sigma_\theta(P, z_1), \sigma_z(P, z_1)\}$, $\{\sigma_r(P, z_2), \sigma_\theta(P, z_2), \sigma_z(P, z_2)\}$ 和 $\{\sigma_r(P, z_3), \sigma_\theta(P, z_3), \sigma_z(P, z_3)\}$, 分别代入式(8),可以得到相应的破岩推力 P_1^*, P_2^*, P_3^* , 取最小值为基于多轴强度准则的滚刀破岩推力:

$$P^* = \min(P_1^*, P_2^*, P_3^*) \tag{9}$$

3 岩体多轴强度准则

在岩体强度和稳定性分析中,最广泛采用的是经典的 Mohr-Coulomb 准则,用主应力表示为

$$F = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi - c \cos \varphi = 0 \tag{10}$$

式中: c 为黏聚力; φ 为内摩擦角。

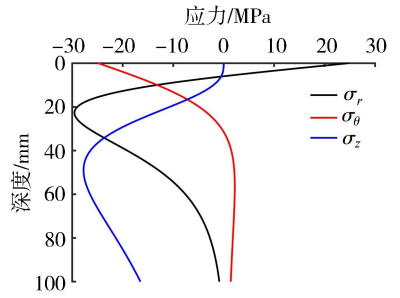


图 5 滚刀间对称轴上岩体应力沿深度分布
Fig.5 Rock stress distribution along depth on symmetry axis between two disc cutters

然而,许多试验证明,Mohr-Coulomb 准则并不符合完整岩体的破坏情况。Hoek-Brown 在总结大量岩石等围压三轴试验资料的基础上,提出了实用的岩体强度经验准则^[26]。但是 Hoek-Brown 准则没有考虑中间主应力的影响,并不适用中间主应力效应非常显著的隧道和地下工程中的岩体。为此,咎月稳等^[27]综合了统一强度理论和 Hoek-Brown 准则的优点,提出了非线性统一强度准则:

$$F = \begin{cases} F_1 = \left[\sigma_1 - \frac{1}{1+b}(b\sigma_2 + \sigma_3) \right]^2 - \frac{m\sigma_c}{1+b}(b\sigma_2 + \sigma_3) - s\sigma_c^2 = 0 & F_1 \geq F_2 \\ F_2 = \left[\frac{1}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \sigma_3 \right]^2 - m\sigma_c\sigma_3 - s\sigma_c^2 = 0 & F_1 < F_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中: σ_c 为岩石的单轴抗压强度,以压为正,拉为负; b 为反映中间主应力对岩石强度影响的参数,一般砂岩 $b=0.3 \sim 0.5$ 、灰岩 $b=0.5$ 、花岗岩 $b=1$,当 $b=0$ 或 $\sigma_2=\sigma_3$ 时非线性统一强度准则退化为 Hoek-Brown 准则; m 、 s 为岩石的 Hoek-Brown 参数, m 由岩石的拉、压强度比 $\alpha(\alpha=(\sqrt{m^2+4}-m)/2)$ 确定, s 反映岩石的完整性($0<s\leq 1$),完整岩石 $s=1$ 。

4 实例验证

4.1 工程概况与参数取值

某城市轨道交通六号线隧道一期工程全长 12.122 km,主要穿越泥质砂岩、砂岩 2 种岩性,岩体完整、岩质较硬,泥质砂岩和砂岩抗压强度在 15~40 MPa 之间,在国内城市轨道交通隧道施工中首次采用 TBM 施工^[1]。TBM 刀盘直径为 6.25 m,盘形滚刀直径为 432 mm、数量为 44、 $\lambda=80$ mm,设计盘形滚刀每转切入岩石深度(贯入度) $h=12$ mm。TBM 设计总推力为 38 773 kN,工作时实际使用总推力 10~12 MN^[28]。根据岩性和刀盘参数,取岩石的泊松比 $\mu=0.25$, $\sigma_c=40$ MPa, $c=8.35$ MPa, $\varphi=35^\circ$,非线性统一强度准则中的 $m=15$ 、 $s=1$ 、 $b=0.32$, $\lambda=80$ mm, $h=12$ mm。

4.2 滚刀破岩推力预测

分别采用基于单轴强度准则的预测公式(式(7))和基于多轴强度准则的预测公式(式(9)),计算滚刀的破岩推力,其中多轴强度准则分别采用 Mohr-Coulomb 准则和非线性统一强度准则,计算结果见表 1。为了进行比较,表 1 中还列出了文献[28]的理论计算值和经验公式预测值。

4.3 结果分析

TBM 总推力主要由滚刀破岩推力和克服掘进过程中的各种阻力组成。虽然阻力的大小由隧道的具体情况决定,具体数值难以准确确定,但无疑是 TBM 动力设计中不可忽略的因素。假定克服阻力所需的推力占总推力的 10%~15%,则本工程段用于掌子面破岩的实际推力为总推力 10~12 MN 的 85%~90%,即 8.5~10.8 MN。因此,实际破岩过程中,每把滚刀的推力在 193.2~245.5 kN 之间。

由表 1 可知,采用本文提出的基于多轴强度准则预测的破岩推力明显小于用其他方法预测的数值,在 193.2~245.5 kN 范围内,与实际情况非常吻合;文献[28]的经验公式预测的破岩推力明显偏大,与实际情况相差太大;基于本文单轴强度的预测值也偏大,不符合实际情况;文献[28]理论公式的预测值相对较小,但大于滚刀推力的实际工作值。

从破岩深度看,本文方法预测的破岩力对应的破岩深度均大于设计值 12 mm,完全满足 TBM 的功效设计。对于采用的 432 mm 直径的盘形滚刀,其额定的最大承载力为 210~310 kN^[29]。显然,基于多轴强度准则预测的破岩推力也能满足滚刀的最大承载力要求。

图 6 为不同滚刀推力作用下岩体的破坏情况(图中红色为岩体破坏区)。由于表面附近(深度 10 mm 以内) σ_r 的拉应力数值较大,因此普遍出现表层破坏区,但深度小于设计的贯入度 12 mm。随着滚刀推力的减小,贯通的破坏区逐渐缩小,破坏深度也逐渐减小。当 $P\leq 280$ kN 时,基于单轴强度准则的破坏区在表层区域外不再贯通,破岩力在 280~340 kN 之间;当 $P\leq 220$ kN 时,基于 Mohr-Coulomb 强度准则的破坏区在表层

表 1 滚刀破岩推力预测值

Table 1 Predicted rock breaking thrust of each disc-cutter

方法	破岩推力/kN	破岩深度/mm
式(7)	339.7	22.73
式(9) Mohr-Coulomb 准则	226.8	48.99
式(9)非线性统一强度准则	216.5	48.99
文献[28]理论公式	281.4	
文献[28]经验公式	696.9	

区域外不再贯通,破岩力在 220 ~ 250 kN 之间;当 $P \leq 210$ kN 时,基于非线性统一强度准则的破坏区在表层区域外不再贯通,破岩力在 210 ~ 220 kN 之间。

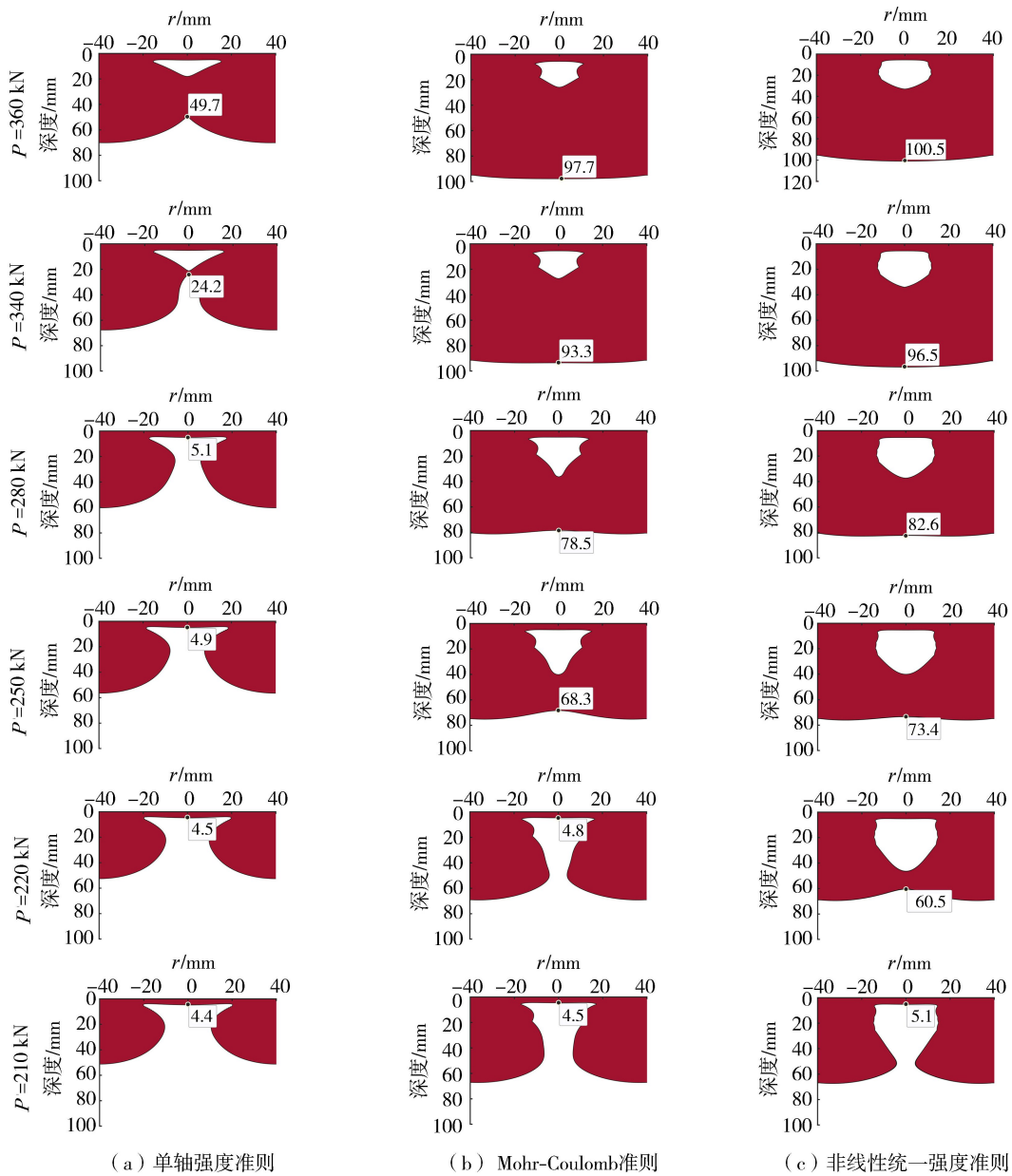


图 6 不同滚刀推力作用下岩体破坏区

Fig. 6 Failure zone of rock under different disc cutter thrust

不管采用何种强度准则,表层破坏区与下层贯通的破坏区之间均存在不破坏的岩核(表层下的白色区域),不同的强度准则对应的岩核形状不同。随着 P 的减小,岩核区最先在两滚刀间的中心轴($r=0$)上突破,阻断破坏区的贯通,验证了第 2.1 节中所提 TBM 破岩必要条件的正确性。

5 结 语

以掌子面岩体破坏前的状态建立了滚刀推力作用的双集中力模型,采用弹性半空间理论的 Boussinesq 解答和叠加原理,给出了双滚刀协同作用下岩体应力分布的解析解。根据应力分布的特点和 TBM 破岩要求,提出了两滚刀间对称轴($r=0$)上一定深度处岩体达到破坏状态是 TBM 破岩的必要条件。采用单轴强度理论和多轴强度理论,分别给出了滚刀破岩推力的预测公式。

工程实例表明,采用本文提出的基于多轴强度准则预测的滚刀破岩推力与 TBM 工作时实际使用的推力非常吻合。滚刀推力作用下岩体破坏区随推力大小的变化,验证了滚刀间确实有岩核的存在,同时也说明了

本文提出的 TBM 破岩必要条件的正确性。

参考文献：

[1] CHEN Kui, JIAO Shengjun, WANG Jiangka. TBM design and construction [M]. Beijing: Springer Singapore, China Communications Press Co. ,Ltd. ,2023.

[2] 周鹏,田军兴,郭菁菁. 全断面硬岩掘进机刀具系统与破岩机理[M]. 北京:知识产权出版社,2019.

[3] 张照煌. 全断面岩石掘进机及其刀具破岩理论[M]. 北京:中国铁道出版社,2003.

[4] 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. (JIANG Xingyu,GAO Chao,GAO Weixian,et al. Study of the disc cutter performance forecasting model based on Coulomb-Mohr criterion[J]. Journal of Mechanical Engineering,2016,52(20): 126-136. (in Chinese))

[5] 曹建锋,张娜,梁国辉,等. TBM 刀盘推力与扭矩预测方法分析[J]. 建筑机械化,2018,39(5): 51-54. (CAO Jianfeng, ZHANG Na,LIANG Guohui,et al. Analysis of thrust and torque prediction method for TBM cutter head[J]. Construction Mechanization,2018,39(5): 51-54. (in Chinese))

[6] ZHANG Z H,SUN F. The three-dimension model for the rock-breaking mechanism of disc cutter and analysis of rock-breaking forces[J]. Acta Mechanica Sinica,2012,28: 675-682.

[7] 刘泉声,时凯,朱元广,等. TBM 盘形滚刀破岩力计算模型研究[J]. 煤炭学报,2013,38(7): 1136-1142 (LIU Quangsheng, SHI Kai,ZHU Yuanguang,et al. Calculation model for rock disc cutting forces of TBM[J]. Journal of China Coal Society,2013, 38(7): 1136-1142. (in Chinese))

[8] 张桂菊,谭青,劳同炳. TBM 盘形滚刀切削力学模型分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(10): 2792-2799. (ZHANG Guiju,TAN Qing,LAO Tongbing. Analysis of rock breaking mechanics model for TBM disc cutter[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2020,51(10): 2792-2799. (in Chinese))

[9] 王超,乔世范,刘红中. TBM 破岩过程的滚刀受力计算模型研究[J]. 工程力学,2021,38(10): 54-63. (WANG Chao,QIAO Shifan,LIU Hongzhong. Research on force calculation model of hob in TBM rock breaking process[J]. Engineering Mechanics, 2021,38(10): 54-63. (in Chinese))

[10] SHE L,ZHANG S R,WANG C,et al. A cutting mechanics model of constant cross-section type disc cutter and its application based on dense core theory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2022,150: 105025.

[11] 曹久磊,俞缙,张竹清,等. 考虑破岩模式的 TBM 滚刀破岩力计算模型[J]. 煤炭学报,2023,48(8): 3300-3311. (CAO Jiulei,YU Jin,ZHANG Zhuqing,et al. Force calculation model of TBM disc cutter based on rock breaking mode[J]. Journal of China Coal Society,2023,48(8): 3300-3311. (in Chinese))

[12] ENTACHER M,SCHULLER E,GALLER R. Rock failure and crack propagation beneath disc cutters[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2015,48: 1559-1572.

[13] ZHOU X,GONG G,ZHANG Y,et al. Performance evaluation of TBM using an improved load prediction model[J]. Machines, 2023,11(2): 141.

[14] EXADAKTYLOS G,XIROUDAKIS G,STAVROPOULOU M. Rolling disc model for rock cutting based on fracture mechanics[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2018,107: 191-200.

[15] QI G,ZHENG Ying W,HAO M. et al. Numerical and experimental research on the rock-breaking process of tunnel boring machine normal disc cutters[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2016,30: 1733-1745.

[16] LI Xiaojing,ZHANG Yaoyao,SUN Xueming. Numerical analysis for rock cutting force prediction in the tunnel boring process[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2021,144: 104696.

[17] 赵高峰,姜宝元,芮福鑫,等. 基于数值仿真的复杂岩体 TBM 掘进性能评估模型[J]. 中南大学学报(自然科学版),2023, 54(3): 984-997. (ZHAO Gaofeng,JIANG Baoyuan,RUI Fuxin,et al. TBM tunneling performance evaluation model in complex rock masses based on numerical simulation[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2023,54(3): 984-997. (in Chinese))

[18] UGUR A,NUH B,HANIFI C. Estimating torque,thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to tbms used in turkish tunneling projects[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2014,40: 46-63.

Geological Science and Technology,2022,41(6):211-222. (in Chinese))

[17] 刘杰,黎照,杨渝南,等. 冻融循环作用下砂岩无损测试力学特性研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(4):201-209. (LIU Jie,LI Zhao,YANG Yu'nan,et al. Study on the mechanical properties of sandstone nondestructive testing under the freeze-thaw cycle[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2019,30(4):201-209. (in Chinese))

[18] 蔡正银,朱洵,黄英豪,等. 冻融过程对膨胀土裂隙演化特征的影响[J]. 岩土力学,2019,40(12):4555-4563. (CAI Zhengyin,ZHU Xun,HUANG Yinghao,et al. Influences of freeze-thaw process on evolution characteristics of fissures in expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(12):4555-4563. (in Chinese))

[19] 王晓燕,姚志华,党发宁,等. 裂隙膨胀土细观结构演化试验[J]. 农业工程学报,2016,32(3):92-100. (WANG Xiaoyan,YAO Zhihua,DANG Faning,et al. Meso-structure evolution of cracked expansive soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(3):92-100. (in Chinese))

[20] MENG Qingshan,WU Kai,ZHOU Haoran,et al. Mesoscopic damage evolution of coral reef limestone based on real-time CT scanning[J]. Engineering Geology,2022,307:106781.

[21] 谭皓,宋勇军,郭玺玺,等. 冻融裂隙砂岩细观损伤与应变局部化研究[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(12):2485-2496. (TAN Hao,SONG Yongjun,GUO Xixi,et al. Research on meso-damage and strain localization of fractured sandstone after freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(12):2485-2496. (in Chinese))

[22] 魏俊,廖华林,王华健,等. 真三轴条件下砾岩力学特性试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2022,46(5):81-89. (WEI Jun,LIAO Hualin,WANG Huajian,et al. Experiment on mechanical properties of conglomerate rocks under true triaxial loading[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2022,46(5):81-89. (in Chinese))

[23] 杨俊,童磊,张国栋,等. 干湿循环机制下风化砂改良膨胀土的收缩特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(2):150-155. (YANG Jun,TONG Lei,ZHANG Guodong,et al. Shrinkage characteristics of expansive soil improved with weathered sand through wet-dry cycles[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2015,43(2):150-155. (in Chinese))

(收稿日期:2023-04-07 编辑:刘晓艳)

(上接第 103 页)

[19] 张哲铭,李晓瑜,姬建. 基于 LS-SVM 的 TBM 掘进参数预测模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):373-379. (ZHANG Zheming,LI Xiaoyu,JI Jian,et al. TBM excavation parameter prediction model based on LS-SVM method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4):373-379. (in Chinese))

[20] ZHANG Q,ZHU Y,MA R,et al. Prediction method of TBM tunneling parameters based on PSO-Bi-LSTM model[J]. Frontiers In Earth Science,2022,10:854807.

[21] 徐芝纶. 弹性力学(第五版)[M]. 北京:高等教育出版社,2016.

[22] 赵雷刚,陈云节,刘发展. 盾构滚刀布置方法分析与研究[J]. 铁道标准设计,2012,609(11):84-88. (ZHAO Leigang,CHEN Yunjie,LIU Fazhan. Analysis and research on the arrangement of disk cutter of shield machine[J]. Railway Standard Design,2012,609(11):84-88. (in Chinese))

[23] 刘文波,杨学锋,万壮,等. 盾构机刀具的分类与布置[J]. 重型机械,2019(2):6-11. (LIU Wenbo,YANG Xuefeng,WAN Zhuang,et al. Classification and arrangement of shield machine cutters[J]. Heavy Machinery,2019(2):6-11. (in Chinese))

[24] 朱伟,钱勇进,王璐,等. 长距离盾构隧道掘进的主要问题及发展趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):138-149. (ZHU Wei,QIAN Yongjin,WANG Lu,et al. Main problems and development trends of long-distance shield tunneling[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(1):138-149. (in Chinese))

[25] 张金铸,林天键. 三轴试验中岩石的应力状态和破坏性质[J]. 力学学报,1979,11(2):99-105. (ZHANG Jinzhu,LIN Tianjian. Stress conditions and the variation of rupture characteristics of a rock as shown by triaxial tests[J]. Acta Mechanica Sinica,1979,11(2):99-105. (in Chinese))

[26] HOEK E,BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses [J]. ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division,1980,106(GT9):1013-1035.

[27] 胥月稳,俞茂宏,王思敬. 岩石的非线性统一强度准则[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1435-1441. (ZAN Yuewen,YU Maohong,WANG Sijing. Nonlinear unified strength criterion of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21(10):1435-1441. (in Chinese))

[28] 毛红梅,陈馈,冯欢欢. 不同刀具配置下隧道掘进机高效破岩机理与推力预估[J]. 岩土工程学报,2013,35(9):1627-1633. (MAO Hongmei,CHEN Kui,FENG Huanhuan. Rock-breaking mechanism of TBM with different types of cutter tools and estimation of thrust force[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(9):1627-1633. (in Chinese))

[29] 吴波,阳军生. 岩石隧道全断面掘进机施工技术[M]. 安徽:安徽科学技术出版社,2008.

(收稿日期:2023-06-02 编辑:刘晓艳)