

文章编号: 0253-9993(2013)01-0078-07

超千米深部全断面岩石掘进机卡机机理

刘泉声^{1,2} 黄 兴¹ 时 凯¹ 刘学伟¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 为了解决超千米深井巷道建设面临的严峻挑战, 拟将全断面岩石隧道掘进机(TBM) 在解决关键岩石力学问题和机械制造问题的基础上加以改进引入到超千米深井巷道建设。然而深部高应力挤压变形将导致 TBM 的护盾极易被卡塞。揭示了 TBM 的卡机机理: 当护盾周围围岩变形量超过开挖预留的变形量, 围岩开始与护盾接触并挤压护盾, 进而在 TBM 推进时围岩对护盾产生摩擦阻力, 当 TBM 推力无法克服围岩对护盾产生的摩擦阻力时, 便导致 TBM 护盾被卡。提出了相应的卡机状态判据。提出了判断护盾被卡状态的理论计算方法及过程: 考虑工作面空间效应, 基于 Hoek-Brown 准则研究了护盾周围围岩收敛变形沿巷道轴向的变化规律, 计算出作用在护盾上的围岩压力, 进而计算围岩对护盾的摩擦阻力, 最后根据卡机状态判据判断护盾是否被卡。

关键词: 超千米深部; TBM; 卡机; 机理

中图分类号: TD421.5 **文献标志码:** A

Jamming mechanism of full face tunnel boring machine in over thousand-meter depths

LIU Quan-sheng^{1,2}, HUANG Xing¹, SHI Kai¹, LIU Xue-wei¹

(1. State Key Laboratory of Geotechnical Engineering Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to overcome the challenge of deep roadway constructions of over a kilometer deep, through the analysis of the advantages and the working conditions of TBM, it is believed that TBM can be introduced to the deep roadway construction. Therefore, the intention is to introduce TBM to the roadway construction of over a kilometer deep after it is improved on the basis of solving the key rock mechanics and machinery manufacturing problems involved. Deep and high stress squeezing deformation can cause the TBM shield to be easily jammed. This paper determines the TBM jamming mechanism as: when the shield surrounding rock convergence exceeds the over-excavation amount, the surrounding rock begins to contact and squeeze the shield, which then produces friction when the TBM shield advanced. If the thrust force cannot overcome the frictional resistance, TBM will be jammed. This paper also puts forward the corresponding jamming state criterion and the theoretical calculation method and process: considering the working face effect, based on the Hoek-Brown failure criterion, the convergent deformation of surrounding rock along the axial variation around the shield should be investigated, the pressure of the surrounding rock on the shield and the frictional resistance of the surrounding rock to shield should be calculated, and finally, the shield jamming state can be assessed by the criterion.

Key words: over thousand-meter depths; TBM; shield jamming; mechanism

随着对煤炭需求量的增加和开采强度的加大, 国内外煤矿陆续进入深部开采阶段^[1-3]。当矿井开采

收稿日期: 2011-12-23 责任编辑: 王婉洁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41130742); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(kzcx2-yw-152)

作者简介: 刘泉声(1962—), 男, 江苏溧阳人, 研究员, 博士生导师。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn

深度达到 1 000 ~ 1 500 m 的深度或是更深,称之为超千米深部。可以预计,在未来相当长的一段时间里,超千米深井建设将是一种普遍现象。然而,千米深度范围内巷道建设形成的理论、设计方法和施工技术在进入超千米深部后将逐步失效,超千米深井建设将面临巨大困难。由于全断面岩石隧道掘进机(TBM)具有安全、优质、高效、经济、有利于围岩稳定等优点^[4-5],笔者拟在解决关键岩石力学问题及相关适应性设计制造的基础上将 TBM 引入煤矿超千米深部巷道建设,并在文献[6-7]中进行了详细的论证,TBM 开挖支护理论与技术将成为超千米深井岩石巷道建设的首选和重要发展方向。

然而,煤矿超千米深部岩石巷道的建设环境与中硬岩 TBM 交通隧道、水工隧洞存在巨大差异。煤矿巷道布置于沉积岩煤系地层,围岩主要为泥岩、砂质泥岩、粉砂岩等典型的挤压性软弱围岩,此外超千米深井埋深大、地应力高,高应力与低强度的矛盾突出,在挤压性软弱地层区段围岩将出现强烈的挤压性大变形,易超过开挖预留变形量,导致作用在护盾上的围岩压力过大,极易造成 TBM 机器的护盾被卡塞,甚至导致护盾遭损。

通常浅埋中硬岩隧道 TBM 很少发生卡机事故,国内外关于卡机机理的研究相当少,有关卡机的研究大多都只是侧重于围岩变形控制和卡机治理措施^[6]。因此,为了保障 TBM 引入超千米深部巷道建设的安全高效施工,需要研究 TBM 卡机孕育致灾机理。

1 TBM 卡机机理

TBM 开挖时,护盾紧挨着刀盘,超挖滚刀对巷道轮廓有一定的超挖量,为巷道围岩卸荷变形预留一定的空间和时间。

TBM 的护盾为何会被卡呢?经分析,可将 TBM 卡机孕育致灾机理概括为:当护盾周围围岩变形量超过开挖预留变形量,围岩开始与护盾接触并挤压护盾,进而在 TBM 推进时围岩对护盾产生摩擦阻力,当 TBM 推力无法克服围岩对护盾产生的摩擦阻力时,TBM 的护盾便被卡塞。

根据上述机理,可知 TBM 护盾被卡必须要满足 2 个条件:①护盾周围围岩变形量超过开挖预留变形量;② TBM 推力不能克服围岩对护盾产生的摩擦阻力。据此,可按照图 1 流程判断 TBM 护盾的卡机状态。

本文考虑 TBM 连续掘进工况,将采用解析方法计算巷道开挖后围岩收敛变形沿巷道轴向的变化规

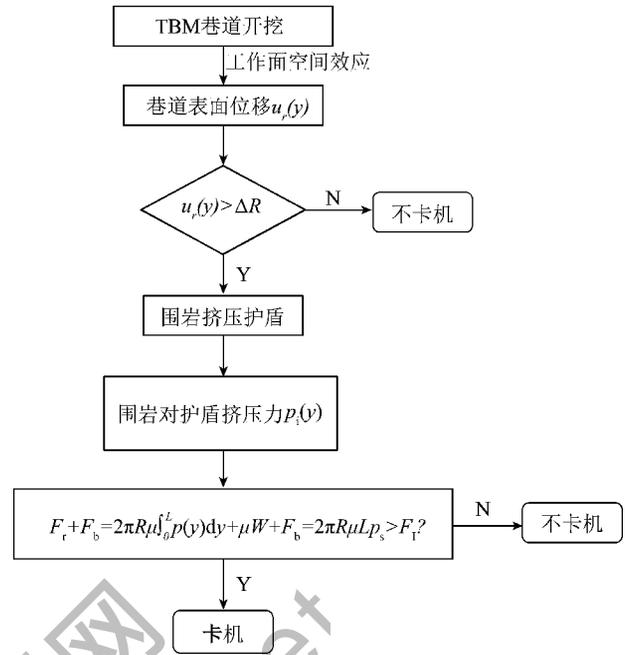


图 1 TBM 卡机状态判断流程

Fig. 1 Flow chart of TBM shield state judgment

律和相应的围岩压力,进而计算护盾前移时所受到的摩擦阻力,最后判断护盾是否被卡。

1.1 TBM 开挖后围岩最终收敛位移

在深部地下工程中,采用非线性的强度准则较合理。因此本文将基于 Hoek-Brown 准则分析 TBM 巷道开挖围岩位移沿巷道轴向的变化规律,进而计算护盾前移时所受的摩擦阻力 R_f 。

Hoek-Brown 强度准则^[8]的表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (1)$$

其中 σ_1, σ_3 为破坏时的最大、最小主应力; σ_c 为完整岩块的单轴抗压强度; m, s 为 Hoek-Brown 强度准则参数。

TBM 开挖前后岩体应力分布状况如图 2 所示。开挖前,巷道围岩处于原岩应力场中,岩体处于三向应力平衡状态。开挖后,围岩应力重新分布,巷道表面径向应力降为 0,环向应力增加。

(1) 基本假设。

巷道断面为圆形,无限长,围岩连续、均质、各向同性,原岩应力为静水压力状态,将支护体等效为径向支护反力 p_i (围岩与接触护盾前,将 p_i 视为 0)。巷道开挖后,围岩将产生径向位移,形成塑性区,当围岩应力达到初始屈服应力后,围岩强度急剧降低,表现出峰后应变软化特性,如图 3 所示。

(2) 应力场分析。

对于 TBM 开挖的圆形巷道,有 $\sigma_1 = \sigma_\theta, \sigma_3 = \sigma_r$, 则式(1)可以写成

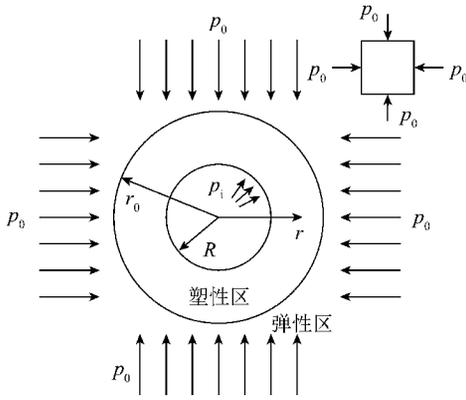


图2 TBM开挖轴对称圆形巷道

Fig. 2 TBM excavates an axisymmetric circular roadway

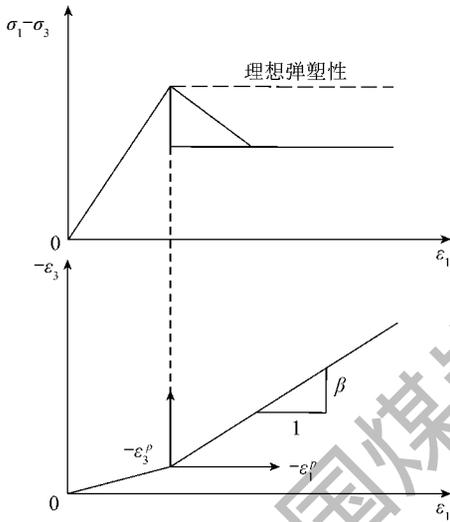


图3 围岩力学模型

Fig. 3 Rock mechanics model

$$\sigma_{\theta} = \sigma_r + \sqrt{m\sigma_c\sigma_r + s\sigma_c^2} \quad (2)$$

对于塑性区 $R \leq r \leq r_0$ 处(图2), 设岩体材料参数为 m, s , 式(2)可写成

$$\sigma_{\theta} = \sigma_r + \sqrt{m_r\sigma_c\sigma_r + s_r\sigma_c^2} \quad (3)$$

平衡微分方程为

$$\frac{\partial\sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial\tau_{r\theta}}{\partial\theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} = 0 \quad (4)$$

因为在轴对称问题中 $\tau_{r\theta} = 0$, 所以平衡微分方程可以简化为

$$\frac{\partial\sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} = 0 \quad (5)$$

运用应力边界条件:

$$\sigma_r|_{r=R} = p_i \quad (6)$$

当围岩未挤压护盾时 $\sigma_r|_{r=r_0} = 0$ 。

联立式(4)~(6)解得

$$\sigma_r = \frac{m_r\sigma_c}{4} \ln^2\left(\frac{r}{R}\right) + \ln\left(\frac{r}{R}\right) \sqrt{m_r\sigma_c p_i + s_r\sigma_c^2} + p_i \quad (7)$$

$$\sigma_{\theta} = \sqrt{m_r\sigma_c p_i + s_r\sigma_c^2} + \frac{m_r\sigma_c}{4} \ln^2\left(\frac{r}{R}\right) \times \left(\sqrt{m_r\sigma_c p_i + s_r\sigma_c^2} + \frac{m_r\sigma_c}{2}\right) \ln\left(\frac{r}{R}\right) + p_i \quad (8)$$

(3) 塑性区范围。

设在弹、塑性交界面上的径向应力为 $\sigma_r^{r_0}$ 、切应力为 $\sigma_{\theta}^{r_0}$ 则 $\sigma_r^{r_0}$ 和 $\sigma_{\theta}^{r_0}$ 应满足式(2), 代入整理得

$$\sigma_{\theta}^{r_0} - \sigma_r^{r_0} = \sigma_c \sqrt{m \frac{\sigma_r^{r_0}}{\sigma_c} + s} \quad (9)$$

在塑性区, 当 $r=r_0$ 时 $\sigma_r = \sigma_r^{r_0}$, 将 $r=r_0, \sigma_r = \sigma_r^{r_0}$ 代入式(7)~(8)解得

$$r_0 = R \exp \left[\left(-2\sqrt{m_r p_i + s_r \sigma_c} + \sqrt{8s_r \sigma_r + m_r \sigma_c m + 8m_r p_0 - A m_r} \right) / (m_r \sqrt{2\sigma_c}) \right] \quad (10)$$

其中 $A = \sigma_c \sqrt{m^2 + 16m p_0 / \sigma_c + 16s}$ 。

(4) 弹性区应力、位移。

将 $r=r_0$ 代入式(7), 得弹性区、塑性区交界面上 ($r=r_0$) 的径向应力 $\sigma_r^{r_0}$:

$$\sigma_r^{r_0} = \ln\left(\frac{r_0}{R}\right) \sqrt{m_r\sigma_c p_i + s_r\sigma_c^2} + \frac{m_r\sigma_c}{4} \ln^2\left(\frac{r_0}{R}\right) + p_i \quad (11)$$

根据弹性力学中的厚壁圆筒理论, 解得弹性区的径向、周向应力和径向位移:

$$\sigma_r(r > r_0) = -\frac{r_0^2(p_0 - \sigma_r^{r_0})}{r^2} + p_0 \quad (12)$$

$$\sigma_{\theta}(r > r_0) = \frac{r_0^2(p_0 - \sigma_r^{r_0})}{r^2} + p_0 \quad (13)$$

$$u_r(r > r_0) = -\frac{r_0^2(p_0 - \sigma_r^{r_0})}{2Gr} \quad (14)$$

式中 μ_r 的负号表示位移指向巷道中心。

(5) 塑性区应变、位移。

塑性区径向应变 ε_r 、周向应变 ε_{θ} 可写成

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r^e + \varepsilon_r^p \quad (15)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\theta}^e + \varepsilon_{\theta}^p \quad (16)$$

其中, 上标 e 表示弹性部分, p 表示塑性部分, 则有:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{u_r}{r} \quad (18)$$

假设弹性变形相对塑性变形较小, 并遵循非关联流动法则, 则径向应变和周向应变的塑性部分有以下关系:

$$\varepsilon_r^e + \beta \varepsilon_{\theta}^e = 0 \quad (19)$$

其中参数 β 是剪胀角 ψ 的函数:

$$\beta = (1 + \sin \psi) / (1 - \sin \psi) \quad (20)$$

其中 φ 为内摩擦角, 剪胀角 ψ 可按式(21) 计算:

$$\psi = \begin{cases} 1^\circ & \varphi \leq 20^\circ \\ \varphi - 20^\circ & \varphi > 20^\circ \end{cases} \quad (21)$$

据式(15) ~ (19) 有以下微分方程:

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \beta \frac{u_r}{r} = F(r) \quad (22)$$

其中, 屈服函数 $F(r)$ 为

$$F(r) = -\varepsilon_r^e - \beta \varepsilon_\theta^e \quad (23)$$

式(22) 可以通过边界条件求解出弹性区和塑性区边界处的径向位移 $u_r^{r_0}$:

$$u_r^{r_0} = -\frac{r_0(p_0 - \sigma_r^{r_0})}{2G} \quad (24)$$

解得塑性区的径向位移表达式为

$$u_r (R < r < r_0) = \frac{r^{-\beta}}{2G} [B(1 - 2\nu)(r_0^{\beta+1} - r^{\beta+1}) - C(r_0^{\beta-1} - r^{\beta-1})] + u_r^{r_0} \left(\frac{r_0}{r}\right) \quad (25)$$

当护盾周围围岩位移量 $u_r(y)$ 未闭合预留变形量 ΔR 时 $p_i=0$ 则解得开挖轮廓 $r=R$ 处巷道表面最终收敛量为

$$u_r^M = \frac{R^{-\beta}}{2G} [B(1 - 2\nu)(r_0^{\beta+1} - R^{\beta+1}) - C(r_0^{\beta-1} - R^{\beta-1})] + u_r^{r_0} \left(\frac{r_0}{R}\right)^\beta \quad (26)$$

其中:

$$B' = \frac{r_0^2 \sigma_r^{r_0}}{r_0^2 - R^2} - p_0 \quad (27)$$

$$C' = -\frac{r_0^2 R^2 \sigma_r^{r_0}}{r_0^2 - R^2} \quad (28)$$

1.2 围岩收敛变形沿 TBM 轴向变化规律

根据收敛约束法 (Convergence - Confinement Method) [9-10] 可知地下工程开挖存在工作面空间效应, 即工作面对周围岩体有虚拟支撑效应和纵向的承载拱效应。在工作面前方未开挖处围岩已开始有一小部分位移, 工作面处围岩位移并未达到最终稳定值, 约为最终位移的 1/3, 在工作面后方, 随着距离工作面距离的增加, 变形量愈大, 在工作面后方一定距离处围岩变形才趋于稳定值。

受工作面空间效应启发, 可知 TBM 开挖后工作面后方护盾周围的围岩变形量是随距离工作面距离变化的。TBM 开挖有超挖量 ΔR , 即预留的变形量 ΔR 。靠近工作面处围岩变形较小并未超过预留变形量 ΔR , 随着距离工作面距离增大, 围岩变形量增大,

当围岩表面位移超过开挖预留变形量时, 围岩与护盾接触, 并挤压护盾。因此, 要计算围岩对护盾的挤压力, 必须先得出护盾周围岩体变形沿巷道轴向的变化规律。

M. Panet 等 [9-11] 对隧洞围岩变形规律进行了相关研究(图 4)。

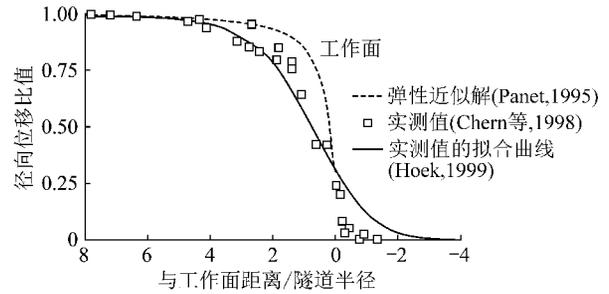


图 4 围岩变形特征曲线(LDP)

Fig. 4 Fitting curves of the longitudinal convergence of surrounding rock

M. Panet [12] 对多条隧道位移监测数据总结后, 使用弹性模型提出地下工程开挖后变形 $u_r(y)$ 随与工作面距离 y 的经验关系式:

$$\frac{u_r(y)}{u_r^M} = 0.25 + 0.75 \left[1 - \left(\frac{0.75}{0.75 + y/R} \right)^2 \right] \quad (29)$$

Hoek 基于岩体变形协调原理及位移监测分析, 综合考虑开挖扰动对工作面前后围岩变形的影响, 提出围岩变形变化规律关系式:

$$\frac{u_r(y)}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(\frac{-y/R}{1.1}\right) \right]^{-1.7} \quad (30)$$

图 4 还包含 Chern(1998) [13] 在 Mingtam 工程中获得的工作面附近收敛实测值。

Panet(1995) 关系式是基于弹性模型上提出的, 而且只适用于 y 为正数(工作面后方)的情况下。从图 4 可以看出, Hoek 关系式与实测数据拟合良好, 计算简单, 而且适用于工作面前方、后方。因此在使用 TBM 巷道开挖中, 选用 Hoek 关系式较合理, 由式(26) (30) 得护盾周围围岩收敛变形沿巷道轴向方向(沿 y 方向)变化规律为

$$u_r(y) = \left[1 + \exp\left(\frac{-y}{1.1R}\right) \right]^{-1.7} \left\{ \frac{R^{-\beta}}{2G} [B(1 - 2\nu)(r_0^{\beta+1} - R^{\beta+1}) - C(r_0^{\beta-1} - R^{\beta-1})] + u_r^{r_0} \left(\frac{r_0}{R}\right) \right\} \quad (31)$$

1.3 护盾所受围岩压力计算

如图 5 所示, 当工作面后方围岩新产生的变形 $u_r(y) - u_r(0) > \Delta R$ 时, 因超挖产生的围岩与护盾之间

的间隙 ΔR 开始闭合, 间隙闭合后, 围岩与护盾开始接触 (K 点), 围岩开始对护盾施加荷载 (支护力 $p_i(y)$) 挤压护盾。此时护盾可以看做对围岩的临时支护^[14] 围岩与护盾同步变形 (KD 段, 协调变形) 设护盾位移为 $u_s(y)$ 则围岩总位移 $u_r(y) = u_r(0) + \Delta R + u_s(y)$ (D 点)。最后围岩和护盾变形趋于平衡 (D 点)。设 $p_i(y)$ 为作用在护盾上的围岩压力; $u_r(y)$ 为距离工作面 y 处巷道径向位移; L 为护盾长度。

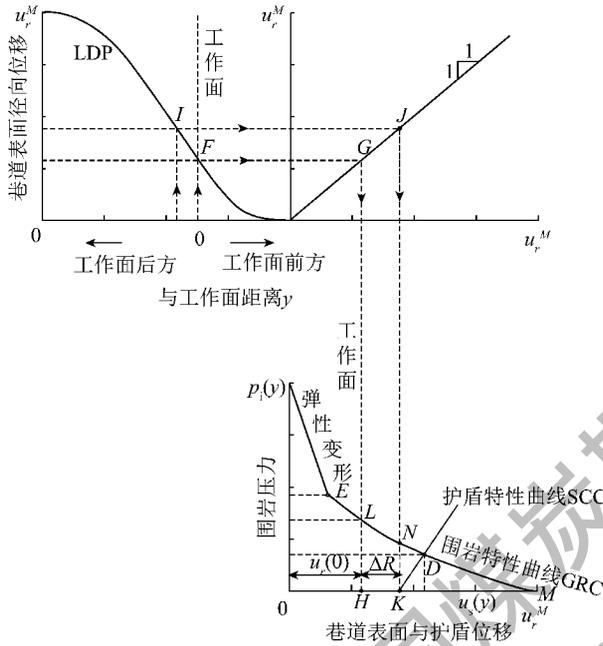


图 5 收敛约束法用于分析 TBM 开挖围岩与护盾相互作用
Fig. 5 Application of convergence confinement analysis to the study of interaction between the shield and surrounding rock

设护盾未达到屈服强度, 在线弹性范围内 (图 5 的 SCC 曲线、图 6) 则对于护盾有:

$$p_i(y) = K_s u_s(y) \quad (32)$$

其中 护盾刚度

$$K_s = E_s d_s / R^2 \quad (33)$$

式中 K_s 为护盾刚度; E_s 为护盾弹性模量; d_s 为护盾厚度; R 为护盾半径。

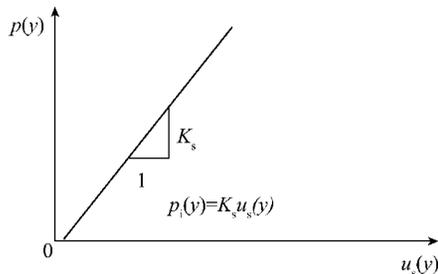


图 6 护盾特征曲线

Fig. 6 Shield characteristics curve

围岩与护盾接触处的变形协调条件为

$$u_r(y) - u_r(0) = \Delta R + u_s(y) \quad (34)$$

又由式 (30) 得,

$$u_r(y) = \left[1 + \exp\left(\frac{-y}{1.1R}\right) \right]^{-1.7} \left\{ \frac{R^{-\beta}}{2G} [B'(1-2\nu) \times (r_0^{\beta+1} - R^{\beta+1}) - C'(r_0^{\beta-1} - R^{\beta-1})] + u_r^0\left(\frac{r_0}{R}\right) \right\} \quad (35)$$

将式 (35) 的 p_i 用 $p_i(y)$ 替换, 可解得护盾上每一点所受的围岩压力 $p_i(y)$ 为

$$p_i(y) = K_s [u_r(y) - u_r(0) - \Delta R] \quad (36)$$

其中 $0 \leq y \leq L$ 。

因此式 (36) 可表示为

$$p_i(y) = f_s(u_r(y)) = \begin{cases} 0 & 0 \leq y \leq L, \\ & \text{且 } u_r(y) - u_r(0) \leq \Delta R \\ K_s [u_r(y) - u_r(0) - \Delta R] & \rho \leq \\ & y \leq L, \text{ 且 } u_r(y) - u_r(0) > \Delta R \end{cases} \quad (37)$$

此时作用在护盾和管片上的围岩压力可分别视为对巷道的临时和永久支护力 p_i 。

1.4 TBM 卡机状态判断

当护盾周围围岩变形量超过预留变形量, 此时, 围岩与护盾接触, 并挤压护盾, TBM 连续开挖护盾前移时, 护盾将要受到围岩的摩擦阻力, 将此摩擦阻力记为 R_f 。

护盾所受到的摩擦阻力 R_f 等于围岩压力 $p_i(y)$ 对护盾表面的积分加上护盾重量造成的摩擦阻力。

$$R_f = 2\pi R \mu \int_0^L p_i(y) dy + \mu W \quad (38)$$

其中 μ 为护盾与围岩之间的摩擦因数, 并根据围岩的地质条件及 TBM 所处的工作条件之不同, 又分为静摩擦因数和动摩擦因数两种, 表 1 为多种岩石的静摩擦因数和动摩擦因数的参考值。

表 1 护盾与围岩间摩擦因数

Table 1 Friction coefficient between shield and ground

岩石类型	静摩擦因数	动摩擦因数
泥岩、砂岩	0.25 ~ 0.45	0.15 ~ 0.30
沙、粉沙	0.45 ~ 0.50	0.35 ~ 0.40

根据力的平衡条件, 则用于克服护盾所受摩擦阻力所需要的推力 F_r 为

$$F_r = R_f = 2\pi R \mu \int_0^L p_i(y) dy + \mu W \quad (39)$$

根据卡机机理, 提出卡机状态判据为

$$\begin{cases} F_r + F_b > F_t \longrightarrow \text{卡机} \\ F_r + F_b < F_t \longrightarrow \text{不卡机} \end{cases} \quad (40)$$

其中 F_b 为 TBM 机器正常连续掘进的开挖推力; F_1 为 TBM 额定推力。

根据卡机状态判据式(40)、卡机判断流程(图 2)及所计算的 R_f, F_r 可判断 TBM 卡机状态。

2 工程算例

以淮南矿业集团朱集煤矿-906 m 轨道大巷为例,围岩为花斑泥岩,局部埋深 1 200 m,巷道开挖直径为 6 m,地应力为 31.2 MPa,巷道长达 4 km。假设在该巷道围岩条件下使用 TBM 施工,根据第 1 节中的卡机机理及判断护盾被卡状态的计算方法计算判断护盾是否被卡。

(1) 计算参数。

计算参数有 3 类: ① 开挖参数(开挖半径 R 、径向超挖量 ΔR 、护盾长度 L 等); ② 机器参数(护盾表面摩擦系数 μ 、护盾刚度 K_s 和管片刚度 K_l 等); ③ 围岩材料参数(弹模 E 、泊松比 ν 、单轴抗压强度 σ_c 、内

摩擦角 c 、剪胀角 ψ)。

TBM 开挖参数见表 2、机器参数见表 3,围岩材料参数见表 4。

表 2 TBM 开挖参数

开挖直径 D/m	护盾长 L/m	超挖量 $\Delta R/cm$	护盾重 W/MN	埋深 m	地应力 MPa
6	8	12	14	1 200	30

表 3 TBM 机器参数

名称	模型	弹性模量/GPa	泊松比	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	厚度/cm
护盾	线弹性	212	0.30	175	80.8	10
超挖量	线弹性	7.168×10^{-6}	0.28	5.47×10^{-6}	2.8×10^{-6}	12
管片	线弹性	34.5	0.20	19.17	14.375	30

表 4 围岩材料参数

Table 4 Surrounding rock material parameters

容重/ ($kg \cdot m^{-3}$)	弹性模 量/Pa	泊松比	单轴抗拉强 度 σ_a/MPa	体积模 量/Pa	剪切模 量/Pa	黏结 力/Pa	内摩擦 角/ $(^\circ)$	m	S_r	m_r	S	$\psi/(^\circ)$	β
2 500	3.6×10^9	0.3	30	3×10^9	1.38×10^9	1.0×10^6	30	1.7	0	1.0	3.9×10^{-3}	5	1.191

(2) 计算结果。

根据式(40)得 TBM 开挖后未考虑护盾时巷道收敛围岩沿巷道轴向的变化规律,如图 7 所示(位于工作面后方 y 为正;位移负值表示围岩向巷道中心收缩)。

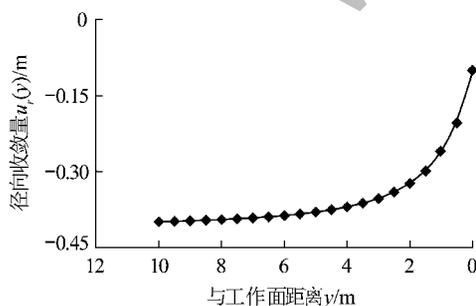


图 7 护盾周围围岩收敛变形曲线(LDP)

Fig. 7 LDP curve of the surrounding rock around shield

据 Gehring(1996),护盾与围岩间表面滑动摩擦的摩擦因数取 $\mu=0.15 \sim 0.30$,本算例取 $\mu=0.25$ 。

计算得护盾所受摩擦阻力 $R_f=176.412$ MN,即护盾前移所需推力 $F_r=176.412$ MN。

(3) 卡机状态判断。

若 TBM 机器掘进推力 $F_b=50$ MN,额定推力

$F_1=150$ MN,则根据卡机状态判据有 $F_r+F_b > F_1$,此工况下 TBM 将发生卡机事故。

表 5 计算结果

Table 5 Calculate results

计算项	计算结果
塑性区范围 r_0/m	9.930 6
弹塑性交界面处应力 σ_r^0/MPa	14.328
弹塑性区交界面处位移 u_r^0/m	-0.056 4
巷道表面最终位移 u_r^M/m	-0.409 6
护盾所受摩擦阻力 R_f/MN	192.75
护盾前移所需推力 F_r/MN	192.75

3 结 论

(1) 当护盾周围围岩变形量超过开挖预留的变形量,围岩开始与护盾接触并挤压护盾,进而在 TBM 推进时围岩对护盾产生摩擦阻力,当 TBM 推力无法克服围岩对护盾产生的摩擦阻力时,TBM 的护盾便被卡。并据此提出了卡机状态判据。

(2) 提出了判断护盾被卡状态的理论计算方法及过程:考虑工作面空间效应,基于 Hoek-Brown 准则研究了护盾周围围岩收敛变形沿巷道轴向的变化

规律,计算出作用在护盾上的围岩压力,进而计算护盾前移所受的摩擦阻力,最后根据卡机状态判据判断护盾是否被卡。

参考文献:

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2812.
He Manchao, Xie Heping, Peng Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2812.
- [2] 何满潮.深部开采工程岩石力学的现状及其展望[A].西部大开发中的岩石力学与工程问题,第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集[C].北京:科学出版社,2004:88-94.
He Manchao. Present situation and forecast of rock mechanics in exploitation engineering at depth [A]. Rock Mechanics and Engineering Problems in Large-scale Development of West China, Proceeding of the 8th Symposium on Rock Mechanics and Engineering in China [C]. Beijing: Science Press, 2004: 88-94.
- [3] 刘泉声,高玮,袁亮.煤矿深部岩巷稳定控制理论与支护技术及应用[M].北京:科学出版社,2010.
Liu Quansheng, Gao Wei, Yuan Liang. Stabilization control theory, supporting technique and application of deep rock laneway in coal mine [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [4] 岩石隧道掘进机(TBM)施工及工程实例[M].北京:中国铁道出版社,2004:337.
Full Face rock tunnel boring machine (TBM) construction and engineering example [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004: 337.
- [5] 张镜剑.TBM的应用及其有关问题和展望[J].岩石力学与工程学报,1999,18(3):363-367.
Zhang Jingjian. The application and some problems of TBM and its prospects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(3): 363-367.
- [6] 黄兴.超千米深井岩石巷道全断面掘进机(RBM)卡机机理及预测防治[D].中国科学院武汉岩土力学研究所,2011.
Huang Xing. Study on full face roadway boring machine (RBM) jamming mechanism and prevention in super kilometers deep well [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics of the Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [7] 刘泉声,黄兴,时凯,等.煤矿超千米深部全断面岩石巷道掘进机(RBM)的提出及关键岩石力学问题[J].煤炭学报,2012,37(12):2006-2013.
Liu Quansheng, Huang Xing, Shi Kai, et al. Utilization of full face roadway boring machine (TBM) in coal mines deeper than 1 000 km and the key rock mechanics problems [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 2006-2013.
- [8] Evert Hoek, Carlos Carranza-Torres, Brent Corkum. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition [A]. Proceedings of the North American Rock Mechanics Society Meeting [C]. Toronto, 2002: 1-6.
- [9] Carranza-Torres C, Fairhurst C. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, 15(2): 187-213.
- [10] Ebrahim Farrokhi, Ali Mortazavi, Gholamreza Shamsi. Evaluation of ground convergence and squeezing potential in the TBM driven Ghomroud tunnel project [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006(21): 504-510.
- [11] 唐雄俊.隧道收敛约束法的理论与运用[D].武汉:华中科技大学,2009.
Tang Xiongjun. Study on the convergence-confinement method and its application in tunnel construction [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009.
- [12] Kitagawa T, Kumeta T, Ichizyo T, et al. Application of convergence confinement analysis to the study of preceeding displacement of a squeezing rock tunnel [J]. 1991, 24(1): 31-52.
- [13] Chern J C, Shiao F Y, Yu C W. An empirical safety criterion for tunnel construction [A]. Proceedings of Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering [C]. Taipei, 1998: 222-227.
- [14] Ramoni M, Anagnostou G. The interaction between shield, ground and tunnel support in TBM tunnelling through squeezing ground [J]. Rock Mech. Rock Eng. 2011, 44: 37-61.