

基于岩石破碎体积的滚刀效率评估模型

王述红, 王存根, 赵贺兴, 簪世明

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 结合岩石的不同破坏方式, 如剪切破坏、张拉破坏、挤压破坏及多种破坏方式混合作用等, 探讨了岩石破碎体积的计算方法. 根据在滚刀作用下岩石以剪切破坏和张拉破坏为主的特性, 提出以岩石破坏时裂纹长度、剪切面在岩石自由表面投影长度及滚刀刀刃宽度间的关系来识别岩石破坏方式, 计算岩石破碎体积. 利用 CSM 模型计算破岩比能, 评估滚刀破岩效率. 并通过实例对该方法进行了计算验证, 结果表明该方法能够为 TBM 的性能预测和优化提供一定参考.

关 键 词: 破岩比能; CSM 模型; 岩石破坏方式; 岩石破碎体积; 滚刀效率

中图分类号: U 455.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)04-0554-05

Cutter Efficiency Assessment Model Based on Broken Rock Volume

WANG Shu-hong, WANG Cun-gen, ZHAO He-xing, ZAN Shi-ming

(School of Resource & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Shu-hong, professor, E-mail: wangshuhong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The calculation method of the rock volume broken by TBM disc cutters was discussed by considering different rock fragmentation modes, such as shear failure, tensile failure, extrusion failure and multi-failure modes. Due to the fact that shear failure and tensile failure are the dominate fracture modes of rock under the load of disc cutters, the quantitative relations among the crack length, the projected length of the shear fracture and the width of the cutter edge were used to identify the rock failure mode and calculate the volume of fragmentized rock. The rock crushing work ratio was calculated based on the CSM model to evaluate rock breaking efficiency of the disc cutters. This method was verified through an engineering project and results showed that this method could provide a reference for the performance prediction and optimization of TBM.

Key words: rock crushing work ratio; CSM model; rock fragmentation mode; volume of fragmentized rock; cutter efficiency

目前全断面岩石隧道掘进机^[1] (tunnel boring machine, TBM) 已经广泛应用于硬质岩土中的隧道机械自动掘进施工. 滚刀破岩效率直接关系到 TBM 的施工成本, 对 TBM 掘进性能具有决定性影响^[2].

岩石在滚刀作用下的破坏方式目前并未产生明确共识. 如剪切破岩理论, 岩石属裂纹扩展拉伸破坏, 以剪切破坏为主同时辅以挤压和张拉破坏; 以张拉破坏为主的拉剪综合失效模式, 以剪切破

坏为主的拉剪综合失效模式等^[3]. 作者结合前人研究, 已对 TBM 施工时滚刀作用下岩石破碎的效率进行了一定的研究^[4], 提出在 TBM 滚刀作用下岩石以剪切破坏和张拉破坏为主, 并以岩石破坏时裂纹长度与剪切面在岩石自由表面投影长度及滚刀刀刃宽度间的关系识别岩石破坏方式并计算岩石破碎体积, 结合 CSM 模型计算破岩比能, 并通过工程实例计算验证了该方法的有效性, 为 TBM 的设计与施工提供一定参考.

收稿日期: 2015-02-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474050, 51179031, 51074042); 国家高端外国专家项目(GDT20142100008, GDW20142100050); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室课题(SKLG2012K009, SKLG2014K011); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LN2014006)

作者简介: 王述红(1969-), 男, 江苏泰州人, 东北大学教授, 博士生导师.

1 CSM 模型下的破岩效率评价方法

在盘型滚刀工作过程中,刀具所受作用力 F_t 的各向分力分别为垂向力、滚动力和侧向力^[5]. 由于侧向力 F_s 较小,因此通常可不考虑侧向力影响. 滚刀受力如图1所示.

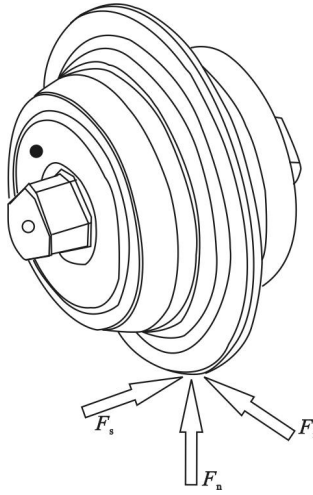


图1 滚刀所受各向分力^[5]
Fig. 1 Individual forces on cutter

本文采用刀具破岩比能值作为破岩效率评价参数. 比能 (specific energy, SE) 是研究刀具破岩效率的重要指标,采用能量法,将其定义为刀具切削破坏单位体积岩石所消耗的能量^[6]:

$$SE = \frac{W}{V} = \frac{W_n + W_r}{V} = \frac{\sum F_n \cdot p + \sum F_r \cdot l}{V} \quad (1)$$

式中:SE 为比能; F_n 为滚刀所受垂向力; F_r 为滚刀所受滚动力; p 为滚刀贯入度; l 为滚刀滚动切削行程; V 为岩石破碎体积; $\sum F_n$ 为刀盘所受总垂向力; $\sum F_n \cdot l$ 为刀盘所受总扭矩.

对于 F_t ,本文采取应用最为广泛的由科罗拉多矿业学院 (Colorado School of Mines, CSM) 提出的 CSM 预测模型^[7]进行估算. 此模型在数学分析的基础上经大量试验验证,已经在众多工程中得到了成功应用,比其他模型具有更高准确性,该模型不考虑滚刀所受侧向力.

盘形滚刀所受作用力

$$F_t = \int_0^\varphi TRp' d\gamma = \int_0^\varphi TRp^0 \left(\frac{\gamma}{\varphi} \right)^\psi d\gamma = \frac{TRp^0 \varphi}{\psi + 1} \quad (2)$$

$$\cos \varphi = \frac{R - p}{R} \quad (3)$$

$$p' = p^0 \left(\frac{\gamma}{\varphi} \right)^\psi \quad (4)$$

$$p^0 = C \cdot \left(\frac{S\sigma_c^2 \sigma_t}{\varphi \sqrt{RT}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

式中: φ 为滚刀接岩角; γ 为接触区内一点与刀刃初始接触岩石表面点间的夹角,为 $0 \sim \varphi$; α 为 F_t 与岩石表面法线间的夹角,为 0.5φ ; T 为滚刀刀尖宽度; R 为滚刀半径; p' 为破碎区任意一点的压力; p^0 为滚刀正下方破碎区基本压力; ψ 为刀尖压力分布系数,为 $-0.2 \sim 0.2$,当滚刀刀尖宽度较大时 $\psi = -0.2$,当滚刀为 V 形且锋利时 $\psi = 0.2$,一般情况下 $\psi = 0.1$; C 为无量纲系数,为 2.12.

联立式(2)~式(5),计算 F_n 和 F_r :

$$F_n = F_t \cos \left(\frac{\varphi}{2} \right) = \frac{CTR\varphi}{\psi + 1} \left(\frac{S\sigma_c^2 \sigma_t}{\varphi \sqrt{RT}} \right)^{\frac{1}{3}} \cos \left(\frac{\varphi}{2} \right) \quad (6)$$

$$F_r = F_t \sin \left(\frac{\varphi}{2} \right) = \frac{CTR\varphi}{\psi + 1} \left(\frac{S\sigma_c^2 \sigma_t}{\varphi \sqrt{RT}} \right)^{\frac{1}{3}} \sin \left(\frac{\varphi}{2} \right) \quad (7)$$

将式(6)和式(7)代入到式(1)中,即可求出刀具破岩比能值.

2 岩石破碎体积计算方法

2.1 岩石破坏方式

TBM 并非要将掌子面处岩石碾压成岩屑,其目的主要为利用滚刀滚压岩石使掌子面表面岩石碎块掉落^[8]. 岩石破碎体积与其破坏方式联系紧密,结合文献[5],对其破坏简化考虑,岩石受滚刀作用形成的受压粉核区较小,滚刀破岩过程主要以岩石剪切破坏和张拉破坏为主,并通过岩石破坏时裂纹长度和剪切面在岩石自由表面投影长度以及滚刀刀刃宽度间的关系来识别其破坏方式.

根据文献[5,9],岩石在刀具作用下形成压碎破坏区之后产生的侧向裂纹扩展长度 L 经数值模拟方法拟合得到的计算公式为

$$L = \left[\left(\frac{F_n}{\sigma_c d^2} - 2.45434 \right) \times \frac{F_n}{27.86853} \right]^{\frac{2}{3}} \times \left(\frac{1 - \mu^2}{EG_{IC}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

$$G_{IC} = \frac{(1 - \mu^2) K_{IC}^2}{E} \quad (9)$$

$$K_{IC} = 0.145 \sigma_t \quad (10)$$

式中: F_n 为单刀法向推力; d 为滚刀刀型尺寸; μ 为泊松比; E 为弹性模量; K_{IC} 为断裂韧性; G_{IC} 为

临界能释放率.

岩石存在破碎角 β , 当剪切破坏面在岩石自由表面投影长度 (x) 大于 L 与一半的刀刃宽度 (T) 之和, 即 $x = p \tan \frac{\beta}{2} > L + \frac{T}{2}$ 时认为岩石以剪切破坏为主; 反之则认为岩石以裂纹张拉扩展破坏为主.

2.2 不同破坏方式下岩石破碎体积

本文认为 TBM 上每把刀的受力情况与破碎岩石情况均相同, 岩石破碎体积的计算式为

$$V = \sum l \cdot S'. \quad (11)$$

式中: S' 为岩石截面破碎面积. 当规定第 i 把滚刀的半径为 r_i , 滚刀刀盘的旋转转数为 m , 滚刀

总个数为 n 时, 刀盘上各把滚刀的总体滚动切削

行程可按 $\sum l = 2\pi m \sum_{i=1}^n r_i$ 计算.

通过对 5 种不同滚刀间距情况进行简化处理 (对岩石破坏简化为仅考虑剪切破坏区与裂纹张拉区), 得出在每种情况下的岩石破碎体积计算公式, 简化结果如图 2 所示. 图中 T 为滚刀刀刃宽度, L 为侧向裂纹长度, p 为滚刀贯入度, 认为其近似取剪切面最大深度, β 为岩石破碎角, S 为滚刀刀刃中心间距, c 为相邻滚刀间剪切面交叉区投影长度. 经此简化, 则可得剪切面在岩石自由表面投影长度为 $x = p \tan \frac{\beta}{2}$.

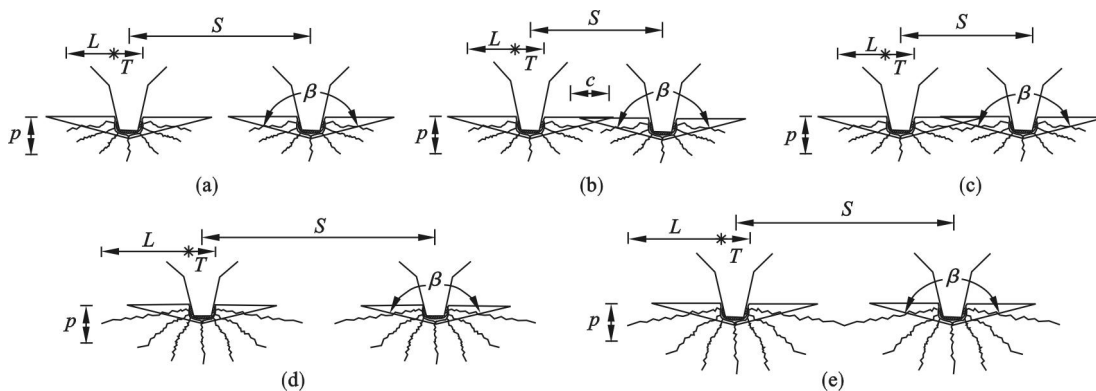


图 2 岩石破碎截面

Fig. 2 Section of broken rock

(a) $-2L + T < 2x < S$; (b) $-2L + T < S < 2x$; (c) $-S < 2L + T < 2x$; (d) $-2x < 2L + T < S$; (e) $-2x < 2L + T, S < 2L + T$.

当 $x = p \tan \frac{\beta}{2} > L + \frac{T}{2}$, 且 $\frac{1}{2}S \geq x = p \tan \frac{\beta}{2}$ 时, 如图 2a 所示, 此时认为滚刀之间属独立破坏岩石, 岩石以剪切破坏为主, 则

$$\left. \begin{aligned} S' &= 2 \times \frac{1}{2} \times p \times p \times \tan \frac{\beta}{2} = p^2 \tan \frac{\beta}{2}, \\ V &= \sum l \cdot S' = 2\pi m \sum_{i=1}^{i=n} r_i \cdot p^2 \tan \frac{\beta}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

当 $x = p \tan \frac{\beta}{2} > L + \frac{T}{2}$, $L + \frac{T}{2} < \frac{1}{2}S < x = p \tan \frac{\beta}{2}$ 时, 如图 2b 所示, 经计算可得 $\frac{1}{2}c = p \tan \frac{\beta}{2} - \frac{1}{2}S$. 根据文献[10], 由于施工扰动的影响, 岩石中的非贯通裂纹可能会发生张开、闭合或扩展, 岩桥可能会失稳造成破坏, 因此此处引入控制参数 (破坏扩大系数) ξ , $\xi > 1$. 该情况下, 认为滚刀之间属协同破坏岩石, 岩石以剪切破坏为主, 则

$$\left. \begin{aligned} S' &= \xi \left[\frac{S}{2} \left(p + \frac{c}{2 \tan \frac{\beta}{2}} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot 2 \right] = \xi \left(Sp - \frac{S^2}{4 \tan \frac{\beta}{2}} \right), \\ V &= \sum l \cdot S' = 2\pi m \sum_{i=1}^{i=n} r_i \cdot \xi \left(Sp - \frac{S^2}{4 \tan \frac{\beta}{2}} \right). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

当 $x = p \tan \frac{\beta}{2} > L + \frac{T}{2}$, 且 $\frac{1}{2}S \leq L + \frac{T}{2}$ 时, 如图 2c 所示, 此时滚刀间剪切面有所交叉, 且同时侧向裂纹发生交汇贯通. 引入控制参数破坏厚度系数 λ , 当裂纹向岩石深部扩展交汇贯通时 $\lambda > 1$; 当裂纹平行于岩石自由表面扩展交汇贯通时 $\lambda = 1$; 当裂纹向岩石自由表面扩展交汇贯通时 $\lambda < 1$. 该情况下, 认为滚刀之间属协同破坏岩石, 岩石属于剪切-张拉破坏, 以剪切破坏为主, 则

$$\left. \begin{aligned} S' &= \lambda Sp, \\ V &= \sum l \cdot S' = 2\pi m \sum_{i=1}^{i=n} r_i \cdot \lambda Sp. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

当 $x = p \tan \frac{\beta}{2} > L + \frac{T}{2}$, 且 $\frac{1}{2}S \leq L + \frac{T}{2}$ 时, 仍

采取前述简化方式,如图 2d 所示,此时刀刃间剪切面与扩展裂纹均无交汇,只有剪切破坏区形成的碎片,岩石内部张拉裂纹由于并未贯通而形成岩脊,其岩石截面破碎面积可视同独立单滚刀破岩情况. 该情况下,认为滚刀之间属独立破坏岩石,岩石属于剪切-张拉破坏,且以裂纹张拉扩展破坏为主,则

$$\left. \begin{aligned} S' &= 2 \times \frac{1}{2} \times p \times p \times \tan \frac{\beta}{2} = p^2 \tan \frac{\beta}{2}, \\ V &= \sum l \cdot S' = 2\pi m \sum_{i=1}^{i=n} r_i \cdot p^2 \tan \frac{\beta}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

当 $x = p \tan \frac{\beta}{2} > L + \frac{T}{2}$, 且 $\frac{1}{2}S \leq L + \frac{T}{2}$ 时,如图 2e 所示,此时刀刃间侧向扩展裂纹发生交汇贯通,从而使滚刀之间的岩石剥落破坏. 该情况下,可认为滚刀之间属于协同破坏岩石,岩石属于剪切-张拉破坏,且以裂纹张拉扩展破坏为主,则

$$\left. \begin{aligned} S' &= \lambda Sp, \\ V &= \sum l \cdot S' = 2\pi m \sum_{i=1}^{i=n} r_i \cdot \lambda Sp. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

3 工程实例

以秦岭隧道工程^[11]为例,采用本文提出的计算方法,分别计算了该工程所使用的 TBM 在刀盘旋转一周时所受的总垂向力、总扭矩和总岩石破碎体积. 秦岭隧道的岩石以混合花岗岩和混合片麻岩为主,抗压强度平均在 150 MPa 左右,抗拉强度在 6 MPa 左右.

该工程所采用的 TB880E 型隧道掘进机刀盘直径为 8 800 mm,共布置了 71 把 17 寸盘型滚刀. 分别求出中心滚刀区 $\sum_{i=1}^{i=6} r_i = 1.512$ m,该区刀间距 S_1 平均为 84 mm;正面滚刀 1 区 $\sum_{i=7}^{i=16} r_i = 8.470$ m,该区刀间距 S_2 平均为 70 mm;正面滚刀 2 区 $\sum_{i=17}^{i=57} r_i = 103.607$ m,该区刀间距 S_3 平均为 65 mm;边缘滚刀区 $\sum_{i=58}^{i=71} r_i = 58.303$ m,该区刀间距 S_4 平均为 45 mm;刀盘总平均刀间距 S 为 65 mm.

本文根据实际地质条件和掘进机刀具布置,计算参数取值如下^[10]:

$$\begin{aligned} n &= 71, p = 9 \text{ mm}, R = 216 \text{ mm}, m = 1, T = 20 \text{ mm}, \psi = 0.1, c = 2.12, \sigma_c = 150 \text{ MPa}, \sigma_t = 6 \text{ MPa}, \xi = 1.3, \lambda = 1.0, S = 65 \text{ mm}, \\ \sum_{i=1}^{i=6} r_i &= 1.512 \text{ m}, \sum_{i=7}^{i=16} r_i = 8.470 \text{ m}, \sum_{i=17}^{i=57} r_i = \end{aligned}$$

$$103.607 \text{ m}, \sum_{i=58}^{i=71} r_i = 58.303 \text{ m}, \sum_{i=1}^{i=71} r_i = 171.892 \text{ m}.$$

将上述参数代入式(2)~式(5),可以得出单把滚刀所受作用力 $F_t = 186.238$ kN,小于滚刀承载能力 250 kN,较为合理. 通过式(6)、式(7),可以求出单把滚刀所受垂向力 $F_n = 184.288$ kN,单把滚刀所受切削力 $F_r = 26.881$ kN. 由此可得总垂向力 $\sum F_n = n \cdot F_n = 13\,084.448$ kN;总扭矩 $\sum F_r \cdot l = F_r \cdot \sum_{i=1}^{i=71} r_i = 4\,620.629$ kN·m.

通过式(8)~式(10),可计算出 $L = 7$ mm,则 $x = p \tan \frac{\beta}{2} = 51 \text{ mm} > L + \frac{T}{2} = 17 \text{ mm}$,且 $0.5S_1 = 42 \text{ mm}, 0.5S_2 = 35 \text{ mm}, 0.5S_3 = 32.5 \text{ mm}, 0.5S_4 = 22.5 \text{ mm}$,则在刀盘上 4 个滚刀布置区均符合情况 $L + \frac{T}{2} < \frac{1}{2}S < x = p \tan \frac{\beta}{2}$,利用式(13)计算得到 $V_1 = 0.006 \text{ m}^3, V_2 = 0.029 \text{ m}^3, V_3 = 0.337 \text{ m}^3, V_4 = 0.150 \text{ m}^3$,从而总的岩石破碎体积为 $V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 0.522 \text{ m}^3$.

由文献[11]分析本文计算结果如表 1 所示.

表 1 实际值与计算值对比
Table 1 Comparison of actual values and calculated values

变量	实际值 ^[11]	计算值	误差
刀盘总推力/kN	12 000	13 084.448	9.03%
刀盘总扭矩/(kN·m)	4 350	4 620.629	6.22%
岩石破碎体积/m ³	0.547	0.522	4.57%

由表 1 可知,误差值均小于 10%,且计算所得岩石破碎体积较为准确. 由此数据结合式(1),即可得到 TBM 滚刀刀具破岩比能值,从而可以对 TBM 施工进行预测分析.

4 结 论

1) 以岩石破坏时裂纹长度与剪切面在岩石自由表面投影长度及滚刀刀刃宽度间的关系识别岩石破坏方式并计算岩石破碎体积的方法有效.

2) 结合 CSM 模型及本文提出的岩石破碎体积计算方法可以得出破岩比能值,并据此评估滚刀破岩效率.

3) 破岩比能值反映滚刀破岩效率的大小,破岩比能值越小,滚刀破岩效率越高.

(下转第 562 页)