

刀具破岩机制研究现状及发展趋势

梁正召^{1,2}, 王岩¹, 廖志毅¹, 杨岳峰¹

(1. 大连理工大学土木工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:在分析大量文献的基础上,从理论模型、物理试验和数值模拟三个方面,对近些年国内外刀具破岩规律研究进展情况进行归纳和总结,并对各种研究方法的适用性、优缺点进行了评述,侧重论述了数值模拟研究进展,探讨了当前研究热点问题,包括节理岩体中的破岩规律、开裂准则、动力破岩和三维数值模拟研究等。总体来看,有关刀具破岩机理的研究取得了长足进展,尤其是数值计算从不同层次上揭示了刀具破岩机制,包括滚刀作用下岩石裂纹扩展规律、滚刀与岩石的相互作用力学模型、材料力学参数、滚刀作用方式、围岩地应力以及刀具几何参数等因素对破岩效率的影响,数值计算方法极大地促进了刀具破岩规律的深入研究;最后总结了当前刀具破岩受力模型、动态加载与三维模拟等面临的挑战问题。

关键词:刀具破岩;岩石掘进机;动态破岩;数值计算方法;三维模型;综述

中图分类号:U455.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)02-0085-10

Current situation and developing trends of research on rock-breaking by cutters//LIANG Zhengzhao^{1,2}, WANG Yan¹, LIAO Zhiyi¹, YANG Yuefeng¹ (1. College of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on analysis of a large number of reference documents in China and abroad, research on rock-breaking by cutters has been summarized recently, including theoretical models, physical experiments and numerical simulation. The applicability, advantages and disadvantages of various research methods were reviewed, with emphasis on numerical simulation. Some hot issues in current research were discussed, including the fracture rule of jointed rock mass, rock fracture criterion, dynamic rock-breaking process and its three-dimensional numerical simulation. It is pointed out that great progress have been made on rock-breaking mechanism, in particular, numerical calculation has greatly promoted the research of rock-breaking mechanism, including the growth rule of rock crack by roller cutter, cutter-rock interaction mechanical model, material mechanical parameters, action mechanism of roller cutter, and the effects of surrounding rock stress and cutters geometry parameters on rock-breaking efficiency. Finally, problems needed to be solved in further study were presented, such as establishment of rock mechanical models, study on dynamic loading and three-dimensional numerical simulation.

Key words: rock-breaking by cutters; rock tunnel boring machine; dynamic rock-breaking process; numerical calculation method; three-dimensional model; review

最早出现的盾构施工法距今已有190多年的发展历史,它具有低噪音、低振动、施工安全等特点,同时对地上建筑物以及交通运输等影响均较小,凭借这些优越性,盾构施工法得到了广泛应用,成为隧道、地铁、水利水电等地下工程建设的一种主要施工方法^[1-4]。1952年美国罗宾斯公司研制出世界上第一台全断面岩石掘进机(TBM)^[5],开启了岩石地层全断面掘进施工的新纪元。

据20世纪末的不完全统计,国外著名生产厂家共生产600多台TMB,完成1000多项工程,掘进总

长度近5000 km^[2],典型工程有美国芝加哥蓄水隧洞、英吉利海峡隧道等工程。1966年上海水工机械厂研制出我国第一台TBM,随着我国20世纪90年代秦岭隧道、“引大入秦”、“引黄入晋”、大伙房引输水等工程采用TBM法施工的成功实践,TBM施工法已越来越受到重视,并把TBM法施工作为长大隧道工程及引输水隧洞工程施工的首选,如我国目前正在施工的大型水利水电项目锦屏引输水隧洞工程、南水北调中西线隧洞工程等。

TBM设计和使用的关键理论是其刀盘上的滚刀

与岩石的相互作用理论。滚刀与岩石的相互作用理论不仅是岩石掘进机研制的基础理论,也是对岩石掘进机施工工程掘进参数——贯入度等预测的基础理论^[6]。研究 TBM 滚刀的破岩规律,尤其是滚刀作用下岩石裂纹扩展机理、滚刀与岩石的相互作用力学模型,对于合理的刀具选择与刀盘布置,建立完善的掘进机性能预测模型,提高我国掘进机自主创新设计与制造能力,积极推进国家水利水电工程、地铁隧道工程等基础建设,都具有重要的科学价值与战略意义。

国内外学者对于刀具破岩规律进行了较深入研究^[7-17]。总体来看,可以把刀具破岩规律的研究归纳到刀具与岩石相互作用机理、刀具破岩力的计算、刀盘优化设计以及掘进性能预测等几个方面。本文基于这一思路,从物理试验、理论模型和数值计算方法上对近些年国内外刀具破岩规律研究进展情况进行总结,分析当前研究中所面临的具体问题和挑战及今后研究的发展方向。

1 理论与试验研究现状

刀具与岩石的相互作用可以归纳为 3 种模型:①经验模型,主要根据岩石性能参数和工程相关数据的积累及分析建立的经验公式等;②数学力学模型,即根据岩石性能参数建立的盘形滚刀破岩力学模型;③试验模型,即根据物理试验与数值试验建立的模型。从数学的角度,可以将这些模型分为经验模型、一维模型以及二维模型。为便于论述,对理论与试验研究现状,从经验模型、数学力学模型与试验模型角度分别总结分析。

1.1 经验模型

典型的经验模型是挪威科技大学的 NTNU 模型,该模型主要用于待施工隧道中 TBM 的刀盘推力、刀间距、工程工期和成本等参数的预测^[18]。另外比较具有代表性的是 1973 年提出的南非隧道工法的 RMR 系统,主要由南非 Bieniawski 根据 49 个隧道案例的调查结果建立,后来陆续增加地下工程案例 351 个^[19]。由于工程岩体力学参数的复杂性,这些基于经验建立的模型在具体工程中还需要根据实际情况进一步研究。

1.2 一维模型

一维模型主要研究作用在盘形滚刀上的垂直力与滚刀贯入岩石深度之间的关系。

1.2.1 理论研究

1966 年 Evans 等^[20]提出了盘形滚刀与岩石的相互作用理论。假定盘形滚刀破岩所需要的垂直推力 F_V 与盘形滚刀压入岩石后在岩石表面产生的面积 A_p 成正比,其比值为岩石单轴抗压强度 σ_c ,受力

公式为

$$F_V = \frac{4}{3} \sigma_c h \sqrt{R^2 - (R - h)^2} \tan \alpha \quad (1)$$

式中: R 为盘形滚刀半径; α 为盘形滚刀刃角; h 为盘形滚刀侵入岩石深度。

经过试验证明,式(1)计算出的垂直推力比实际破岩垂直推力要小^[6]。1970 年日本秋三藤三郎^[21]提出盘形滚刀垂直推力的计算可采用式(1),但滚刀侵入岩石后在岩石表面产生的岩石破碎面积应为两条双曲线所围成的面积。

1.2.2 试验研究

典型的试验研究为压痕试验研究,即将盘形滚刀刃上的一段作为压头侵入试件一定深度。代表性成果有美国科罗拉多矿业学院和华北电力大学试验成果^[6]。美国科罗拉多矿业学院 Ozdemir 等^[22]对 3 种不同岩石试样进行了压痕试验,得出试验过程中加载力与切深的变化关系:

$$F_V = \frac{F_{cl}}{2} + \frac{h(AK - F_{cl}h_f)}{h_f^2} \quad (2)$$

式中: F_{cl} 为第一次产生岩石破碎时的载荷; A 为 F_V - h 曲线下的面积; h_f 为实际最终切深; K 为量测系统坐标记录仪标定值; h 为压头任一点切深。

茅承觉等^[23]通过大量现场观测及压痕试验,提出了盘形滚刀的垂直推力 F_V 与其侵入岩石的深度 h 的关系(式(3)),并且得出掘进机滚刀破岩是挤压、张拉以及剪切等综合作用的结果。

$$F_V = \frac{KA}{h_f^2} h \quad (3)$$

总体来看,压痕试验具有一定的局限性,但因其简便、快捷,并且在一定范围内有效,目前很多研究机构仍致力于对此模型的应用研究。如果将岩体中的结构特征参数引入进来,对压痕试验结果进行修正,将更有实际意义。

1.3 二维模型

二维模型是将盘形滚刀的破岩运动作为平面运动进行研究。

1.3.1 理论研究

1975 年澳大利亚 Frank 等^[24]提出了垂直推力 F_V 和滚动力 F_R 的计算公式(式(4)和式(5)),垂直推力采用式(1)。滚动力的确定依据是假定盘形滚刀与岩石接触弧长上的压应力为常数且指向盘形滚刀中心,则其合力作用点必位于接触弧长的中点且指向盘形滚刀的滚动中心,其计算公式为

$$F_V = 4\sigma_c h \tan \alpha \sqrt{2Rh - h^2} \quad (4)$$

$$F_R = 4\sigma_c h^2 \tan \alpha \quad (5)$$

日本秋三藤三郎^[21]以挤压理论为依据,在式(1)的

基础上提出盘形滚刀侧向力 F_s 的计算公式:

$$F_s = \frac{\sigma_c}{2} R^2 (\varphi - \sin \varphi \cos \varphi) \quad (6)$$

式中: φ 为盘形滚刀接触角。

以剪切破碎理论为依据时,滚刀切削侧向力为将相邻两滚刀间岩石剪掉所受到的反作用力,其计算公式为

$$F_s = R \varphi S \tau \quad (7)$$

式中: S 为相邻滚刀刀间距; τ 为岩石无侧限抗剪强度。

在该模型中没有指出实际滚刀破岩过程中内侧力与外侧力不平衡的问题,我国学者张照煌等^[25]对这一问题进行了研究,应用空间运动学原理,建立了滚刀破岩模型,提出了侧向不平衡力 f 预测公式,并从实验上得以验证:

$$f \approx \frac{\tau}{2} (R \varphi)^2 \sin \frac{R \varphi}{2r} \quad (8)$$

式中: R 为盘形滚刀半径; r 为盘形滚刀在到盘上的安装半径; φ 为盘形滚刀接岩圆心角。

张照煌^[26]以赫兹理论为基础,将盘形滚刀与岩石相互作用视为刀刃与岩面两圆柱体的相互挤压,其结果为线接触,推导出响应的理论模型:

$$F_v = k \gamma_0 \frac{E_1 + E_2}{E_1 E_2} \sqrt{D h} \sigma_c^2 \quad (9)$$

$$F_R = F_v \left(\sqrt{\frac{h}{D}} + \mu \frac{d}{D} \right) \quad (10)$$

式中: γ_0 为滚刀刀刃圆角半径; D 为滚刀刀圈直径; d 为滚刀刀轴直径; h 为刀盘转进时滚刀沿轴向的切深; E_1 为滚刀刀刃材料弹性模量; E_2 为岩石材料弹性模量; σ_c 为岩石单轴抗压强度; k 为试验数据统计确定的计算系数; μ 为当量摩擦因数,一般取 0.02。

徐小荷等^[16]提出的预测模型在计算方法上与式(1)相同,但概念不同,认为滚刀破岩所需垂直推力 F_v 与破碎漏斗坑在自由面上所形成的破碎面积 A 成正比,比例系数为 $K = k_d \sigma_c$,其模型公式为

$$F_v = \frac{4}{3} k_d \sigma_c h \sqrt{R^2 - (R - h)^2} \tan \frac{\psi}{2} \quad (11)$$

$$F_s = \varepsilon k_d \sigma_c A = \varepsilon k_d \sigma_c h^2 \tan \frac{\psi}{2} \quad (12)$$

式中: ε 为换算系数,与被切削岩石自由面有关; ψ 为岩石破碎角; k_d 为滚压换算系数,不同岩石由试验确定,一般为 0.4 ~ 0.7,软岩取小值,硬岩取大值。

1.3.2 试验研究

美国科罗拉多矿业学院 Ozdemir 等^[22]对楔形刃滚刀破岩进行了研究。对两种岩石试样进行了线性切割试验,测出了滚刀的受力数据,其受力公式为

$$F_v = \sigma_c r^2 \theta (1 - \cos \theta) \tan \alpha +$$

$$2r\tau\theta(S - 2h\tan\alpha)\tan\alpha \quad (13)$$

$$F_R = F_v C \quad (14)$$

$$C = \frac{(1 - \cos \theta)^2}{\theta - \sin \theta \cos \theta} \quad (15)$$

式中: θ 为接岩角; C 为切割系数。

1993 年 Jamal 等^[27]对 TBM 上使用的 CCS (constant cross section) 盘形滚刀破岩进行了改进研究,提出了新的受力预测公式。张照煌^[26]等都对盘形滚刀破岩的二维模型进行了相应的理论分析和试验研究。

目前绝大多数研究都集中于二维模型,从破岩理论方面可以将这些模型归纳为 3 类:挤压破岩理论(式(1)、式(6)、式(9)(10)、式(11)(12))、挤压与剪切破岩理论(式(13)(14))、挤压、张拉及剪切综合理论(式(3))。

总体来看,在理论模型方面,都要假设破岩理论,根据简单的运动轨迹建立基本的物理力学模型,对荷载和侵入深度进行预测判断;在试验研究方面,主要根据试验结果来建立预测模型,显然受到试验条件的限制,并不具有普适性。这些理论与试验模型,都是出现在早期的研究中,为刀具破岩机制的研究奠定了基础。

2 数值模拟研究现状

早期的理论与试验模型难以考虑岩石的各类力学参数的影响,也无法考虑刀具作用下岩石的渐进破坏问题。数值计算方法的出现,为刀具破岩机制的研究提供了广阔的前景。

数值模拟不仅可以考虑岩体的不同力学参数、本构关系,还可以考虑复杂的地质特征和复杂的边界条件,如不连续、不均匀、各向异性、地应力等,很容易计算出整个模型的受力情况。随着计算机计算能力的提高,应用数值计算方法来解决岩石力学行为和岩体工程问题越来越多,成为继理论分析、物理试验之外的第 3 种重要的研究方法。岩土工程中常用的数值方法有^[28-30]:连续介质方法(有限差分法、有限单元法和边界元法)、非连续介质方法(离散单元法、离散裂隙网格法、非连续变形分析法、流行元法和颗粒离散元方法)和混合连续与非连续介质方法(混合 FEM/BEM、混合 DEM/BEM、其他混合方法)。

2.1 连续介质方法

Cook 等^[31]进行了刀具侵入脆岩和硬岩的数值仿真与试验。Pang 等^[32]从试验与数值仿真两个方面研究了围压对 TBM 刀具的推力以及岩石裂纹演化模式的影响。Liu 等^[33]基于岩石破裂过程分析系统 RFPA^{2D}通过引入一段基于岩石失效过程分析的数值代码,成功模拟了裂纹的实际模式。梁正召

等^[34]基于细观力学研究方法,利用 RFPA^{2D}模拟了单刀头、多刀头作用下岩石的破碎过程,提出岩体破碎分为4个阶段,以张拉裂纹为主,挤压、剪切裂纹为辅,围压的存在更有利于侧向裂纹的扩展。

由于有限单元法擅长于模拟连续介质力学问题,刀具作用下岩石开裂问题往往是不连续问题。RFPA^{2D}通过刚度弱化的办法模拟物理上的不连续问题,通过精细化的有限元计算和弹性损伤模型来解决断裂力学问题。由此可见,传统的有限单元法必须进行改进才能满足非连续力学问题的模拟分析。

2.2 非连续介质方法

新加坡南洋理工大学 Gong 等^[35]建立了双把 TBM 刀具侵入花岗岩的离散单元模型。苏利军等^[36]和谭青等^[37]分别采用二维颗粒流模型 PFC2D 模拟了齿刀、滚刀作用下的岩石开裂问题。谭季秋等^[38]基于二维离散元法,建立了3把 TBM 刀具顺次切割岩石模型,获得岩石破碎全过程,对比了不同加载次序下的应力分布。谭青等^[39]基于二维离散单元法,研究了岩石在 TBM 刀具同时与顺次作用下破碎全过程,利用回转试验台对顺次加载岩石的破碎模式进行验证,对比分析了两种作用方式下的刀具破岩效率。张魁等^[40-41]采用离散单元法模拟了不同围压及刀头切削顺序对破岩规律的影响,得出不同围压下岩石的破碎模式,同时对比了加载次序对滚刀破岩效率的影响。孙金山等^[42]采用颗粒流方法建立岩石与滚刀数值模型,研究了单刃滚刀交替作用下岩石的张拉裂纹形成和双刃滚刀作用下岩石的应力分布,深入探讨了滚刀作用于软岩与硬岩时刀具刃数对裂纹形成及岩块大小的影响。莫震泽等^[43]运用 UDEC 方法建立了滚刀贯切岩石数值模型,提出刀具破岩是拉破坏和剪破坏的综合反映,并研究了刃宽和刃角对破岩效果的影响。

UDEC 和 PFC 同属于非连续介质力学范畴的离散单元法,比较适合模拟刀具破岩问题。PFC 模型受计算量的限制,假设为球体的情况下,球体太少模拟破岩机制问题精度受到限制。UDEC 可以模拟节理的分布问题,但岩体的开裂破坏模拟还有待完善。相比较而言,从模拟的精度来看,PFC 模拟的结果更接近实际。在计算单元比较少的情况下,PFC 真实模拟岩体中的节理还有一定难度。

2.3 混合方法

混合连续与非连续介质方法在滚刀破岩中的应用非常少见,目前笔者课题组正致力于将非连续变形分析方法 DDA 与真实破裂过程分析方法 RFPA 相结合的研究工作,在不久的将来将会应用于岩石力学领域。

以上这些计算方法从不同层次上揭示了刀具破岩规律,尤其是滚刀作用下岩石裂纹扩展机理、滚刀与岩石的相互作用力学模型,深入探讨了材料力学参数、滚刀作用方式、围岩地应力以及刀具几何参数等因素对滚刀破岩过程的影响,这些研究成果极大地改变了人们对 TBM 刀具破岩的认识。

总结以上几种数值计算方法,有限元、离散元应用较多。有限元还是最为成熟的模拟计算软件,但作为连续介质力学方法,在模拟开裂问题、节理岩体等方面,需要进行特殊考虑。随着离散单元法的发展与成熟,在刀具破岩方面将会得到更广泛的应用。

3 当前热点问题与研究进展

3.1 节理岩体中的破碎问题

自然界中的岩体大多数被各种尺度和形态的结构面切割成为结构体,其中节理就是分布最广泛的结构面,因此研究 TBM 滚刀在节理岩体中的破岩规律成为热点问题之一。

3.1.1 物理试验

美国科罗拉多矿业学院 Rostami^[44]通过巴西抗拉强度试验,获得不同角度层理试样的抗拉强度,以此来分析层理角度对 TBM 掘进性能的影响。Wanner 等^[45]通过对片岩的实验得出,TBM 的掘进效率随着节理面与加载方向的夹角增大而增大。马洪素等^[46]采用混凝土试块模拟岩石,探讨了节理及其参数对滚刀破岩模式、裂纹起裂扩展方向以及滚刀破岩速率的影响,得出节理岩体的3种破碎模式,节理的存在使裂纹的起始及扩展方向发生了改变,并且破岩角随着节理倾角的改变而变化,同时对比了节理对不同强度岩体的影响程度。邹飞等^[47-48]采用高强石膏试样模拟岩石进行材料的变形和破坏试验,采集整个加载过程中压头的侵入深度和载荷数据,获得了试件表面的发展过程及最终破坏形态;并在改进的试验装置上进行楔形刀具贯入实验,获得了试件表面位移场分布特征,并且采用声发射测试系统对实践破坏过程中微破裂源进行平面定位,研究了含水平节理试件在楔形刀具作用下微震裂纹的形成机制(图1)。

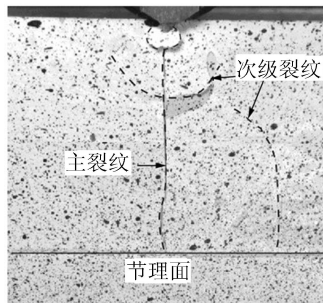


图1 试件表面裂纹扩展

纵观以上研究成果可以发现,物理试验中要想获取天然节理岩体比较困难,大多采用混凝土或是高强度石膏代替岩体试样,因此并不能真实反映出岩体试样的不连续、不均匀等特性。同时,节理面的力学参数对试验过程产生重要影响,节理岩体的变形特性还有待于进一步研究。

3.1.2 数值计算

Bruland^[49]提出 NTNU 模型,研究了节理倾向对 TBM 破岩效率的影响,但没有对其量化。Barton^[50]于 2000 年提出了 Q_{TBM} 模型,将节理倾向作为一个重要因素并入模型计算中。GONG 等^[51-52]利用离散元软件 UDEC 对 TBM 滚刀破岩进行了数值模拟,得出不同的节理倾向、间距会产生不同的裂纹扩展模式。吴继敏等^[53]采用 3DEC 程序构建了 TBM 滚刀破岩模型,获得了掘进速率与节理走向存在规律性的变化,其研究中将岩体假定为线弹性材料,这与实际不符。孙金山等^[42]采用颗粒流方法,提出结构面对裂纹扩展具有控制作用,并且阻隔损伤向结构面下的岩石中渗透,结构面与滚刀侵入方向夹角较小时,裂纹向岩石深部扩展,夹角较大时,裂纹横向扩展。综上所述,节理岩体损伤破坏多采用离散元模型,能够很好地模拟节理的开裂。

王岩^[54]通过采用多种破坏准则,实现了对刀具破岩过程中的拉伸开裂、剪切破坏和接触挤压作用模拟,建立了节理岩体中滚刀破岩的数值试验模型,模拟了刀头作用下节理岩体的破碎过程,探讨了节理特征对破坏模式、破岩角、刀头作用载荷以及裂纹扩展能力的影响规律,研究结果可为地下工程岩体破碎理论以及施工预测提供依据。图 2 所示为节理倾角 75° 时岩体破碎最小主应力图。数值计算能够更好地模拟岩体中节理的力学特性和产状分布特征,但研究大多局限与二维平面模拟。

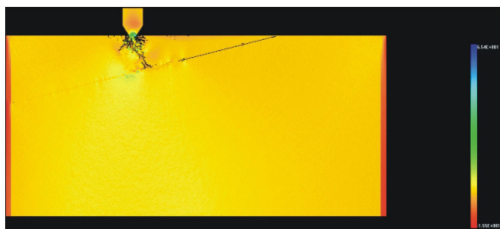


图 2 节理倾角 75° 时节理岩体破碎模式

3.2 破岩准则

在 TBM 刀具作用下岩体的破坏形式与准则问题是一个热点问题,目前有剪破坏、挤压破坏和拉破坏,以及多种机理混合作用等几种不同的理论。岩石抗拉强度、抗压强度和剪切强度等对刀具破岩过程都有影响,但没有任何一个强度参数可被看作处于支配地位,用于破岩过程分析和性能预测。美国

科罗拉多矿业学院提出剪切破岩理论并推导出了相应的滚刀受力预测公式^[22],然而以剪切的观点解释破岩过程,有些现象难以解释。东北工学院(现东北大学)岩石破碎实验室^[16]做了不同类型的单刀具压入试验,提出拉伸破坏的观点,认为其破碎机理是裂纹扩展拉伸破坏。随着进一步研究,一些学者认为是剪切破坏和拉伸破坏的复杂过程,1990 年林家骥^[55]通过单刀具和双刀具的压痕试验,提出刀具破岩机理的实质并不能简单地用剪切的观点解释。张照煌^[17]提出盘形滚刀的破岩是以剪切为主,其次为挤压和张拉。到目前为止,刀具破岩形式与准则问题仍没有一个满意的共识。

梁正召等^[34]采用真实破裂过程分析方法 RFPA 研究滚刀破岩过程,数值计算中引入 3 种准则:模拟单元剪切破坏的强度准则,模拟单元拉伸破坏的拉伸破坏准则,模拟裂纹形成的应变相变准则。只有在单元发生破坏之后,才去判断开裂是否形成,因此第 3 个应变相变准则在前两个准则之后。数值模拟结果表明,该准则可以较好地模拟岩石的破坏、开裂与接触问题。

总体来看,采用复合的强度准则可能更加符合实际情况。从微观、细观尺度来看,脆性材料的破坏问题一般都是拉伸破坏。岩石的抗拉强度远低于抗剪强度,宏观上的剪切破坏有可能是微观、细观上的拉伸破坏。在数值模拟中单元尺度不能满足微观要求时,在一定条件下采用剪切破坏准则也是合理的。

3.3 滚刀动态破岩研究

在掘进机实际施工过程中,随着刀盘的旋转,盘形滚刀绕刀盘中心轴公转,同时绕自身轴线自转,因此研究滚刀动态破岩过程成为当今国内外学者热衷的一个研究方向。

Wang 等^[56]模拟了双刀头动态荷载作用下,岩体破坏的阶段过程,阐述了不同均质度和刀间距下裂纹扩展模式的区别。谭青等^[57]从岩土细观角度出发,采用颗粒离散元法建立滚刀侵入岩体的数值模型,研究双滚刀作用下岩体的动态响应机制,找出岩体裂纹、贯入度以及切削力三者之间的关系。杨岳峰等^[58]基于损伤演化原理和有限元数值模拟方法,对冲击荷载作用下的滚刀破岩机理进行了模拟分析,研究了不同均质度以及粒状岩石的响应规律,结果显示:均质度较高时,岩石主要发生受拉破坏,先产生赫兹裂纹,然后出现径向裂纹;均质度较低时,岩石的破坏形式多元化,剪切破坏所占比重大。对于粒状岩,破坏模式以绕粒环形和穿粒破坏为主,如图 3 所示。廖志毅等^[59]基于细观损伤力学与动力有限元方法,研究了节理岩体在刀具动态荷载作

用下的损伤破裂过程,探讨了节理参数对裂纹扩展模式的影响,结果表明,节理面反射的拉伸应力波加剧了节理与刀具间岩体的破碎,同时弱节理面能够吸收应力波能量,减弱其下部岩体的破坏程度,节理能够改变应力波的传播模式,如图4所示。

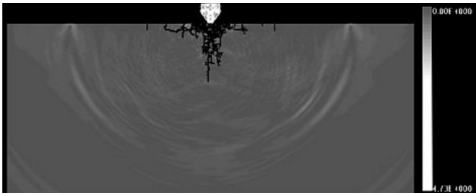


图3 冲击荷载作用下滚刀破岩模拟结果

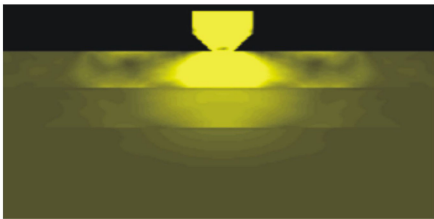


图4 节理对应力波削减作用的应力场分析

众所周知,岩石掘进机掘进或破岩机粉碎矿石时,不可避免振动与冲击作用,动力作用下的破岩规律和静力下的情况有很大区别。在以前的研究中,动力荷载效应却往往被忽略了。

3.4 三维模型

掘进机滚刀破岩实际为三维空间运动,破岩过程中滚刀对岩石施加3个方向的作用力,如图5所示,法向推力 F_V ,由刀盘的推力提供;切向滚动力 F_R ,由刀盘扭矩提供;侧向力 F_S ,由滚刀对岩石的挤压力和刀盘旋转的离心力所产生。

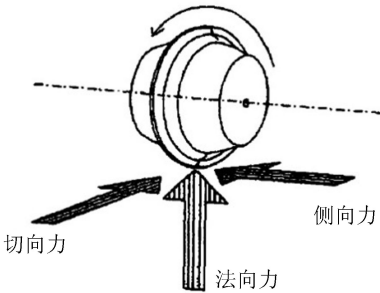
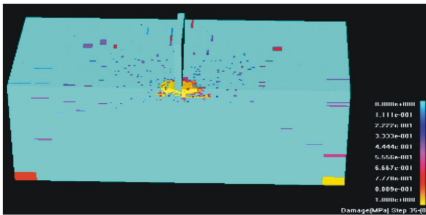


图5 滚刀破岩受力示意图

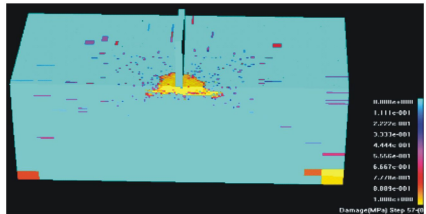
Zhang等^[60]利用试验使用的TBM进行了掘进作业的现场研究工作。尽管部分学者做了一些盘形滚刀滚压岩石的圆槽试验,但多以观察岩石剥落现象为主,至今尚未建立起实用模型。

数值计算方面,谭青等^[61]利用ANSYS-LS/DYNA建立刀具三维破岩仿真模型,模拟了滚刀滚压破碎混凝土的施工过程,得出并分析了滚刀的三向力、应力场以及刀具侧滑等信息,但岩石破坏模型过于粗略,对于超过单轴抗压强度之后的单元进行

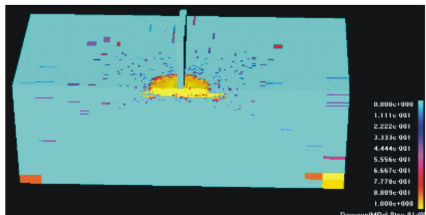
失效删除处理的方法并不合理。夏毅敏等^[62]选择在OttoSen四参数破坏准则基础上引入损伤因子的非线性弹塑性本构模型作为软岩的材料模型,建立三维有限元模型分析了切削力在整个切削过程中的变化。吴继敏等^[53]利用离散元程序3DEC建立TBM滚刀破岩三维模型,研究了不同节理走向的TBM掘进速率的变化规律。张照煌等^[63]考虑岩石各向异性以及岩石形变和剥落的特点,建立了岩石在滚刀作用下的力学模型,给出了岩石在滚刀作用下的几何方程、物理方程和平衡方程,并且通过试验观察,提出了滚刀破岩的垂直力、滚动力和侧向力的计算方法。大连理工大学岩石破裂与失稳研究所利用RFPA^{3D}^[54],考虑到了岩石细观上的非均匀性,建立了刀具破岩的三维数值模型。图6显示了采用并行计算模拟刀头作用下岩石破坏区逐渐增大的过程,结果说明通过二维来模拟会带来一定误差。三维数值模拟更接近工程实际,但面临的一个最大问题就是计算单元有限,计算速度受到限制,真正模拟刀具破岩的三维受力破坏过程还需借助于并行计算方法。



(a) 第35加载步



(b) 第49加载步



(c) 第57加载步

图6 刀具破岩的三维数值模拟

3.5 盘刀布置规律研究

TBM的掘进性能不仅与掘进机自身结构特点和工程地质等有关,还与刀盘上的盘刀布置状况有关。相邻盘形滚刀刀刃刀口相对刀盘中心的距离之差称为刀间距^[64]。如果刀间距布置过大,那么两刀间的岩石就会出现岩脊,需要多次滚刀才能破岩,会延长施工工期,因此合理选择刀间距有助于提高掘

进效率,降低施工成本。

Rad 等^[65]于 1965 年提出比能的概念,即切削单位体积岩石所需能量,从能量角度出发研究刀间距优化问题成为一个基本方向。1976 年 Rad^[66]提出最佳间距的概念,揭示了在比能、破碎量及切削系数等指标评价下的最佳和临界间距的一致性。Roxborough 等^[12]采用刀头之间的距离 S 与侵入深度 P 的比值 S/P 来分析拉槽间距对滚刀破岩的影响。张照煌等^[67]从理论上探讨了滚刀间距的确定原则,指出要使相邻布置的滚刀在刀盘每转一周的切深相等,且破岩量又相同,则应使刀盘转动多周而不存在未被连通的岩脊。Gong 等^[68]利用二维离散元 UDEC 软件研究了滚刀间距对破岩效率的影响,随刀间距增加,碎片厚度和面积先达到最优值,随后降低,其仿真结果与实验结果相吻合。孙金山等^[42]采用颗粒流方法研究滚刀破岩的最优刀间距,并且该间距随着岩石强度的增大而减小。张魁等^[41]基于二维离散单元法,研究了最优刀间距随围压的变化关系,得出随着围压的增大,最优刀间距呈现出先增大后减小的趋势。梁正召等^[34]基于统计力学与细观损伤数值模型,运用 RFPA^{2D} 建立多滚刀破岩模型,从能量的角度研究了最优刀间距的存在,并进行了多滚刀最优刀间距的对比分析,认为三刀头最优刀间距略小于双刀头,并且多滚刀能够产生协同破岩效应。

滚刀破岩是介于机械工程与岩土工程两个学科之间的一个科学问题。在岩石力学方面,需要从破岩比能的角度出发优化刀间距,为盘刀布置提供依据。在机械工程方面,需要从滚刀磨损、提高刀具使用寿命的角度考虑,研究盘刀布置规律。因此,要将两个领域相结合来研究滚刀破岩,提出最优的盘刀布置方案。

张照煌^[69]通过对盘形滚刀结构和作业特点,建立了滚刀寿命预测公式,同时根据多滚刀的布置规律,提出了滚刀更换的数学模型及其解,并从运动学出发,研究了滚刀结构参数对切削过程的影响,结合工程实际中刀具磨损现象提出了一种内外侧刀角不对称的滚刀设计方法。欧阳涛^[70]利用 ANSYS/LS-DYNA 建立了先行刀与刮刀组合切削模型,通过对切削效能及切削力的分析,得到了先行刀与刮刀的最优高差组合。

3.6 关于数值模拟与理论模型的讨论

理论模型给出了滚刀破岩过程中刀具的受力预测公式,而数值模拟作为一种重要的研究方法,可以作为物理试验不可或缺的补充。一方面,由于自然环境、人为因素的影响,使得采集原状试样困难重重;另一方面,滚刀破岩物理试验大多以观测岩体剥

落为主,不能观测岩体内部的应力场分布以及破坏裂纹演化扩展的过程。数值模拟能够对刀具破岩的内在规律及机理加以补充研究。

在掘进机实际施工过程中,随着刀盘的旋转,盘形滚刀绕刀盘中心轴公转,同时绕自身轴线自转,是一个三维空间运动过程,破岩过程中滚刀对岩石施加 3 个方向的作用力:法向力、切向力、侧向力。理论研究中给出了三向力的受力公式,为更加深入的研究滚刀破岩机理、寿命预测以及安装提供理论指导和依据。目前,数值模拟大多集中于二维模拟,没有考虑切向力的作用。切向力与法向力和刀具与掌子面之间的附着系数 k 有关,通常与法向力相比,切向力的量级相对较小。因此,在滚刀法向压力较大的情况下可以忽略切向力的影响,将三维滚压简化为二维侵入问题。

4 存在问题及研究展望

综上所述,以上关于滚刀破岩规律的研究,取得了大量有益的成果,对 TBM 设计与掘进施工提供了强有力的理论支持和实践指导作用。由于岩体地质条件的复杂性和多变性,导致滚刀与岩石相互作用关系还不是十分明确,许多问题还有待进一步研究:

a. 盘刀破岩机理直接影响盘刀受力分析,目前有剪破坏、挤压破坏和拉破坏,以及几种机理混合作用等几种不同的理论。岩石抗拉强度、抗压强度、剪切强度与应变准则等对刀具破岩过程都有影响,但没有任何一个强度参数可被看作处于支配地位,可以用于破岩过程分析和性能的准确预测。在理论分析中,仅仅依靠简单的参数判断显然不合理。在岩石强度理论中,已经建立了更复杂更符合实际的强度准则,在数值计算中已经得到了广泛的应用。结合物理实验和数值模拟,针对具体的工程实际,讨论不同的破坏准则的适用性,建立复合破坏准则,或许更有意义。

b. 滚刀破岩是利用掘进机轴向静压载荷和刀盘滚动产生冲击载荷进行的组合破岩。目前关于滚刀动静载组合破岩的研究甚少,虽然一部分学者进行了冲击与静压的组合加载破岩试验,研究了部分参数对破岩效果的影响,但如何更有效率地利用动静组合加载中的冲击动载和静压还有待进一步探讨。

c. TBM 刀具破岩问题实际为三维空间力学问题,一是与刀具作用的岩体处于地下复杂的三维应力状态,难以在二维模型中充分考虑,二维模型也难以考虑到岩体内部复杂节理裂隙的空间分布情况;二是由于刀具本身在破岩运动中多向空间受力的复杂性,极大地限制了二维模型的建立及其研究的深入;三是刀具作用下的岩石裂纹扩展本身是三维空

间分布问题。有关三维刀具破岩的数值模拟尚未见文献报道,需要进一步开展三维模型的研究工作。

d. 目前大多数理论模型或物理试验研究都是针对单刀头或有限几个刀头展开分析,迫切需要对整个刀盘进行一体化分析计算,才能获得最佳的刀盘布置方案。在物理试验方面,更需要接近实际的大尺度试验平台,来真实分析盘刀破岩过程。

参考文献:

[1] 张凤祥,朱合华,傅德明. 盾构隧道[M]. 北京:人民交通出版社,2004: 1-12.

[2] 地盘工学会(日). 盾构法的调查、设计、施工[M]. 牛清山,陈凤英,徐华,译. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

[3] ACAROGLU O, OZDEMIR L, ASBURY B. A fuzzy logic model to predict specific energy requirement for TBM performance prediction[J]. Tunneling Underground Space Technology, 2008, 23(5): 600-608.

[4] FRIANT E J, OZDEMIR L. Tunnel boring technology: present and future [C]//Proceedings Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC): 1993 RETC Proceedings. Boston: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1993: 869-888.

[5] 王梦恕,李典璜,张镜剑. 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.

[6] 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): 16-21 (ZHANG Zhaohuang. Present situation and analysis of interacting theory between disc hob and rock [J]. Construction Machinery and Equipment, 2009, 40(40): 16-21. (in Chinese)).

[7] GERTSCH R E. Rock toughness and disc cutting[D]. Rolla: Missouri University of Missouri Rolla, 2000.

[8] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1965, 2(1): 57-73.

[9] BENJUMEA R, SIKARSKIE D L. A note on the penetration of a rigid wedge into a nonisotropic brittle material[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1969, 6(4): 343-352.

[10] OZDEMIR L, MILLER R. Cutter performance study for deep based missile egress excavation [R]. Golden, Colorado, USA: Colorado School of Mines, 1986: 105-132.

[11] SNOWDON R A, RYLEY M D. Single and multiple pass disc cutting in shape granite[J]. Tunnel & Tunneling, 1983, 36(11): 15-19.

[12] ROXBOROUGH F F, PHILLIPS H R. Rock excavation by disc cutter[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1975, 12(12): 361-366.

[13] ROSTAMI J. Design optimization, performance prediction and economic analysis of tunnel boring machines for the construction of the proposed yucca mountain nuclear waste repository[R]. Golden, Colorado, USA: Colorado School of Mines, 1992: 131.

[14] SAMUEL A E, SEOW L P. Disc force measurements on a full-face tunneling machine [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1984, 21(2): 83-96.

[15] ROBBINS R J. Large diameter hard rock boring machines: state-of-the-art and development in view of alpine base tunnels[J]. Felsbau, 1992, 10(2): 56-62.

[16] 徐小荷,余静. 岩石破碎学[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1984.

[17] 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.

[18] BLINDHEIM O T. Experiences with full face tunnel boring in greenstone [C]//Tunnel Boring in Norwegian: Rock Blasting Conference. Oslo: Norwegian Tunneling Society, 1972: 89-93.

[19] PARK C W, PARK C, SYNN J H. TBM penetration rate with rock mass properties in hard rock [C]//Proceedings of the AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress. Milano, Italy: AITES, 2001: 412-419.

[20] EVANS I, POMERY C D. The strength fracture and workability of coal [M]. London: Pergamum Press, 1966.

[21] 秋三藤三郎. 盘形滚刀破岩理论[J]. 小松技报, 1970, 16(3): 43-51.

[22] OZDEMIR L, MILLER R, WANG F D. Mechanical tunnel boring prediction and machine design [R]. Golden, Colorado, USA: Colorado School of Mines, 1977.

[23] 茅承觉,刘友元. 隧洞掘进机盘形滚刀滚压岩石的试验[J]. 工程机械, 1985(3): 21-26. (MAO Chengjue, LIU Youyuan. Experiment of tunnel mechanical boring machine disk cutter rollrock [J]. Construction Machinery and Equipment, 1985(3): 21-26. (in Chinese)).

[24] FRANK F R, HUW R P. Rock excavation by disc cutter [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1975, 12(12): 361-366.

[25] 张照煌,叶定海. 盘形滚刀破岩模型及其侧向力的计算[J]. 应用基础与工程科学学报, 2004, 12(3): 293-298. (ZHANG Zhaohuang, YE Dinghai. The model of the disc cutter's broken-rock and the calculation of its side-force [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2004, 12(3): 293-298. (in Chinese)).

[26] 张照煌. 全断面岩石掘进机盘形滚刀寿命管理理论及技术研究[D]. 北京:华北电力大学, 2008.

[27] JAMAL R, LEVENT O. A new model for performance prediction of hard rock TBMs [C]//Proceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conference. Boston: AIME, 1993: 793-809.

- [28] JING L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40: 283-353.
- [29] 张楚汉. 论岩石、混凝土离散-接触-断裂分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 217-235. (ZHANG Chuhan. Discrete-contact-fracture analysis of rock and concrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 217-235. (in Chinese))
- [30] 周维垣, 杨强. 岩石力学数值计算方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [31] COOK N G W, HOOD M, TSAI F. Observation of crack growth in hard rock loaded by an indenter[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1984, 21(2): 97-107.
- [32] PANG S S, GOLDSMITH W. Investigation of crack formation during loading of brittle rock [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1990, 23(1): 53-63.
- [33] LIU H Y, KOU S Q, LINDQVIST P A, et al. Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(4): 491-505.
- [34] 梁正召, 于跃, 唐世斌, 等. 刀具破岩机理的细观数值模拟及刀间距优化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(1): 84-89. (LIANG Zhengzhao, YU Yue, TANG Shibin, et al. Numerical modeling of rock fracture mechanism under disc cutters and associated cutter spacing optimization [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(1): 84-89. (in Chinese))
- [35] GONG Q M, ZHAO J, HEFNY A M. Numerical simulation of rock fragmentation process induced by two TBM cutters and cutter spacing optimization [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21(3/4): 263.
- [36] 苏利军, 孙金山, 卢文波. 基于颗粒流模型的TBM滚刀破岩过程数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2823-2830. (SU Lijun, SUN Jinshan, LU Wenbo. Research on numerical simulation of rock fragmentation by TBM cutters using particle flow method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2823-2830. (in Chinese))
- [37] 谭青, 张魁, 周子龙, 等. 球齿滚刀作用下岩石裂纹的数值模拟与试验观测[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 163-170. (TAN Qing, ZHANG Kui, ZHOU Zilong, et al. Numerical simulation and experimental observation of rock cracks under action of spherical tooth hob cutter[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 163-170. (in Chinese))
- [38] 谭季秋, 谭青, 夏毅敏, 等. TBM多刀不同切削顺序破岩过程的数值研究[J]. 湖南工程学院学报, 2011, 21(3): 18-21. (TAN Jiqiu, TAN Qing, XIA Yimin, et al. Numerical study on process of breaking rock by TBM cutter in different cutting orders[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering, 2011, 21(3): 18-21. (in Chinese))
- [39] 谭青, 徐孜军, 夏毅敏, 等. 2种切削顺序下TBM刀具破岩机理的数值研究[J]. 中南大学学报, 2012, 43(3): 940-946. (TAN Qing, XU Zijun, XIA Yimin, et al. Numerical study on mode of breaking rock by TBM cutter in two cutting orders [J]. Journal of Central South University, 2012, 43(3): 940-946. (in Chinese))
- [40] 张魁, 夏毅敏, 徐孜军. 不同围压及切削顺序对TBM刀具破岩机理的影响[J]. 土木工程学报, 2011, 44(9): 101-105. (ZHANG Kui, XIA Yimin, XU Zijun. Effects of confining pressure and cutting sequence on the rock-breaking mechanism by TBM cutter [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(9): 101-105. (in Chinese))
- [41] 张魁, 夏毅敏, 谭青. 不同围压条件下TBM刀具破岩模式的数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1780-1787. (ZHANG Kui, XIA Yimin, TAN Qing, et al. Numerical study on modes of breaking rock by TBM cutter under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1780-1787. (in Chinese))
- [42] 孙金山, 陈明, 陈宝国, 等. TBM滚刀破岩过程影响因素数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1891-1897. (SUN Jinshan, CHEN Ming, CHEN Baoguo, et al. Numerical simulation of influence factors for rock fragmentation by TBM cutters [J]. Rock and Soil Mechanics, 32(6): 1891-1897. (in Chinese))
- [43] 莫振泽, 李海波, 周青春, 等. 基于UDEC的隧道掘进机滚刀破岩数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1196-1203. (MO Zhenze, LI Haibo, ZHOU Qingchun, et al. Research on numerical simulation of rock breaking using TBM disc cutters based on UDEC method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1196-1203. (in Chinese))
- [44] 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, USA: Colorado School of Mines, 1997.
- [45] WANNER H, AEBERLI U. Tunneling machine performance in jointed rock [C]//Proceedings of the 4th Congress of the International Society for Rock Mechanics. Montex: [s. n.], 1979: 573-580.
- [46] 马洪素, 纪洪广. 节理倾向对TBM滚刀破岩模式及掘进速率影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 155-163. (MA Hongsu, JI Hongguang. Experimental study of the effect of joint orientation on fragmentation modes and penetration rate [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 155-163. (in Chinese))
- [47] 邹飞, 李海波, 周青春, 等. 岩石节理倾角和间距对隧道掘进机破岩特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1640-1646. (ZOU Fei, LI Haibo, ZHOU Qingchun, et al. Experimental study of influence of joint space and joint angle on rock fragmentation by TBM disc cutter[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1640-

1646. (in Chinese))
- [48] 邹飞,李海波,周青春,等. 楔刀作用下含水平节理岩体的位移场特征及损伤演化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 982-990. (ZOU Fei, LI Haibo, ZHOU Qingchun, et al. Variation of displacement field and damage evolution of rock with horizontal joint under wedge indenter [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 982-990. (in Chinese))
- [49] BRULAND A. Hard rock tunnel boring[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 1998.
- [50] BARTON N. TBM tunnelling in jointed and faulted rock [M]. Abingdon: Taylor & Francis, 2000.
- [51] GONG Q M, ZHAO J, JIAO Y Y. Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(2): 183-191.
- [52] GONG Q M, ZHAO J, JIAO Y Y. Numerical modeling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(1): 46-55.
- [53] 吴继敏, 卢瑾. 节理走向对 TBM 掘进速率的影响分析 [J]. 水电能源科学, 2010, 28(8): 103-105. (WU Jimin, LU Jin. Influence analysis of joint strike on TBM penetrating rate [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(8): 103-105. (in Chinese))
- [54] 王岩. 刀具与岩石相互作用模型及其破岩机理研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [55] 林家骥. 研究盘形滚刀破岩机理与提高刀具使用寿命 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 1990, 18(1): 108-113. (LIN Jiaji. Research on the mechanism of rock failure and the increment of service life of disc roller cutter [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 1990, 18(1): 108-113. (in Chinese))
- [56] WANG S Y, SLOAN S W, LIU H Y, et al. Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by two drill bits subjects to static and dynamic loading [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 44(3): 317-332.
- [57] 谭青, 易念恩, 夏毅敏, 等. TBM 滚刀破岩动态特性与最优刀间距研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2453-2464. (TAN Qing, YI Nianen, XIA Yimin, et al. Research on rock dynamic fragmentation characteristics by TBM cutters and cutter spacing optimization [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2453-2464. (in Chinese))
- [58] 杨岳峰, 唐春安, 梁正召, 等. 冲击作用下的压头破岩机理研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1775-1785. (YANG Yuefeng, TANG Chun' an, LIANG Zhengzhao. Rock fragmentation mechanism induced by a drill bit subjected to dynamic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1775-1785. (in Chinese))
- [59] 廖志毅, 梁正召, 杨岳峰. 刀具动态作用下节理岩体破坏过程的数值模拟 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1147-1155. (LIAO Zhiyi, LIANG Zhengzhao, YANG Yuefeng, et al. Numerical simulation of jointed rock fragmentation process induced by a drill bit under the dynamic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1147-1155. (in Chinese))
- [60] ZHANG Z X, KOU S Q, TAN X X, et al. Laboratory calibration and n-situ measurements [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2003, 36(1): 39-61.
- [61] 谭青, 张魁, 夏毅敏, 等. TBM 刀具三维破岩仿真 [J]. 山东大学学报, 2009, 39(6): 72-77. (TAN Qing, ZHANG Kui, XIA Yimin, et al. Three-dimensional simulation of rock breaking by TBM cutter [J]. Journal of Shandong University, 2009, 39(6): 72-77. (in Chinese))
- [62] 夏毅敏, 薛静, 周喜温. 盾构刀具破岩过程及其切削特性 [J]. 中南大学学报, 2011, 42(4): 954-959. (XIA Yimin, XUE Jing, ZHOU Xiwen. Rock fragmentation process and cutting characteristics on shield cutter [J]. Journal of Central South University, 2011, 42(4): 954-959. (in Chinese))
- [63] 张照煌, 叶定海, 袁昕. 岩石在盘形滚刀作用下的性能研究 [J]. 水利学报, 2011, 42(10): 1247-1251. (ZHANG Zhaohuang, YE Dinghai, YUAN Xin. Study on rock mechanical properties under the effect of disc cutter head [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(10): 1247-1251. (in Chinese))
- [64] 纪昌明, 张照煌, 叶定海. 盘形滚刀刀间距对岩石跃进破碎参数的影响 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(2): 256-263. (JI Changming, ZHANG Zhaohuang, YE Dinghai. The influence of the disk cutter space on rock's jump break coefficients [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2008, 16(2): 256-263. (in Chinese))
- [65] RAD P F, SCHMIDT R L. 隧道掘进机的研究 [C]//中国科学技术情报研究所. 岩石掘进机译文集. 北京: 科学技术文献出版社, 1976: 25-33.
- [66] RAD R F. 切槽间距在隧道掘进机运用中的重要性 [C]//中国科学技术情报研究所. 岩石掘进机译文集. 北京: 科学技术文献出版社, 1976: 45-50.
- [67] 张照煌, 叶定海, 赵庆玉. 岩石掘进机刀具间距的确定及分析 [J]. 工程机械, 2002, 33(11): 11-12. (ZHANG Zhaohuang, YE Dinghai, ZHAO Qingyu. Determination and analysis of cutter pitch on rock tunneller [J]. Construction Machinery and Equipment, 2002, 33(11): 11-12. (in Chinese))
- [68] GONG Q M, ZHAO J, JIAO Y Y. Numerical modelling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(2): 183-191.
- [69] 张照煌. 球面刀盘上盘形滚刀破岩曲线的确定应用研究 [J]. 工程机械, 2004, 35(4): 22-24. (ZHANG Zhaohuang. Decision and application of rock-breaking trajectory of disc cutter on spheric holder [J]. Construction Machinery and Equipment, 2004, 35(4): 22-24. (in Chinese)).
- [70] 欧阳涛. 盾构典型刀具组合破岩受力特性研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2011.

(收稿日期: 2013-03-18 编辑: 熊水斌)