

岩石钻掘过程钻头受力动力学解析模型

杨晓峰^{1 2 3} 康 勇^{1 2 3} 王晓川^{1 2 3}

(1. 武汉大学 水射流理论与新技术湖北省重点实验室 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 动力与机械学院 湖北 武汉 430072; 3. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室(重庆大学) 重庆 400030)

摘 要: 为深入研究钻头在岩石钻掘这一动力学过程中的受力变化规律,对钻头的钻掘过程进行了系统的动力学分析,建立了描述钻头在岩石钻掘过程中力与运动间关系的微分方程组,归纳了运动条件下影响钻头受力变化的各种影响因素。在对钻头钻掘岩石的运动过程进行解析的基础上,提出了运动条件下钻头压入力和切削力的解析计算方法,并分别给出了压入力和切削力的动力学解析方程。进行岩石钻进力学测试实验,结合相关实验结果对动力学计算模型和静力学计算模型进行了对比分析,研究表明:钻头在钻掘岩石过程中的受力与其运动状态密切相关;在其它条件一定情况下,钻头所受的压入力和切削力均随钻头推进速度 V 的增加而增加。计算结果显示动力学解析模型比传统静力学计算方法更接近实验测量值,而且更有利于直观方便地指导工程实践。

关键词: 岩石; 钻掘; 动力学; 解析模型

中图分类号: TD80 **文献标志码:** A

Analytical dynamic model of the drill bit in rock drilling

YANG Xiao-feng^{1 2 3}, KANG Yong^{1 2 3}, WANG Xiao-chuan^{1 2 3}

(1. Key Laboratory of Hubei Province for Water Jet Theory and New Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control (Chongqing University), Chongqing 400030, China)

Abstract: In order to study the force variation of the drill bit in the dynamic process of rock drilling deeply, systematical dynamics analysis was presented in the paper. Differential equations which described the force fluctuations in the process of rock drilling were established and various factors which affect the force fluctuations of the drill bit were also analyzed. Based on the analysis of the process of movement in rock drilling, analytical method for force computation of the drill bit in the dynamic process was given. Analytical calculation model of penetrating force and cutting force in the dynamic process was derived respectively. Studies show that the force of drill bit is closely related to its motion state; the average penetrating force and cutting force in the dynamic process increase with the increasing of penetration speed V in the case of the other conditions remain unchanged. Calculation results show that the analytical dynamic model is more precise than the traditional method of static calculation model compared with experimental measurements, and more conducive to be a intuitive and laconic guidance in engineering practice.

Key words: rock; drilling; dynamics; analytical model

在硬岩钻掘施工中,钻头损耗十分严重,而钻头的受力情况是影响钻头破损的重要因素之一^[1-2]。深入研究岩石钻掘过程钻头受力情况对进一步研究

钻头失效机理和提高岩石钻掘效率有很强的理论意义和实用价值。

由于岩石破碎过程的复杂性,至今尚无一套成熟

收稿日期: 2012-07-11 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51204122); 中国博士后科学基金资助项目(2012M511674); 重庆大学研究生科技创新基金资助项目(201005B1A0010341)

作者简介: 杨晓峰(1980—),男,满族,吉林辽源人,讲师,博士后,重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室访问学者。Tel: 027-68774906, E-mail: xfyang@whu.edu.cn

的力学理论准确描述岩石的破碎过程。尽管一些学者使用数值模拟的方法对岩石钻掘过程的受力情况进行了模拟,但是这种方法所需的条件参数过多并且对边界和载荷条件过于敏感,往往一个参数的微小改变就使计算结果大相径庭,而且计算量偏大,造成该方法在实际中的工程指导意义有限。不用数值计算而是用解析的方法求解岩石钻掘过程的钻头受力情况,用含有钻掘各要素的函数解析式来表示钻头受力,从而得知钻头受力变化的一般规律显得非常必要。解析解法不但更有利于人们对问题本质的了解,而且可以更为直观和方便地指导工程应用。

很多学者给出了静载条件下刀具破碎过程的力学解析模型。常见的有 Sikarshie 提出的压头静力压入岩石过程中的力学解析计算方法^[3], Nishimatsu 提出的切削破碎岩石过程中按摩尔库仑准则解析计算刀具切削力的方法^[4], Stavropoulou 给出了基于断裂力学的岩石切削力解析计算表达式^[5], Ramoni 则给出了适用于岩石掘进机推力的计算公式^[6]。但是,这些分析和计算都是在静力加载破坏的前提下进行的,而岩石钻掘过程是一个复杂的动力过程,以往关于岩石破碎刀具的力学模型中都未包含速度的影响。目前鲜有文献对岩石钻掘过程的钻头受力的动力学解析模型进行报道。

本文在对岩石钻掘时钻头运动过程进行解析的基础上,对岩石钻掘中的压入和切削过程分别进行动力学分析,分别给出钻头所受压入力和切削力的动力学解析计算模型并进行了实验验证,为深入研究钻头破损机理和提高钻掘施工效率提供参考。

1 钻掘过程的动力学分析

岩石钻掘过程是一个动力学过程,钻头的受力与其机械运动存在密切关系^[7]。在直角坐标系中钻头上任意一点的力与运动关系可以表示为

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 X}{dt^2} &= F_x \\ m \frac{d^2 Y}{dt^2} &= F_y \\ m \frac{d^2 Z}{dt^2} &= F_z \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 F_x, F_y, F_z 为作用在钻头上各力在 x, y, z 轴上投影的代数和; X, Y, Z 为钻头在 x, y, z 方向的位移; t 为时间变量。

该微分方程组系统反映出了钻头受力与其运动之间的关系。尽管理论上可以利用该方程组可以对某点受力进行预测,但是由于求解过程中所需的位移

和时间难以实时测量,想得知力随钻掘要素的变化趋势是不方便的,其在实际中的工程指导意义有限。

对钻头钻掘岩石时每个刀齿的运动过程进行分析不难发现,其工作过程大体上先是由前端面在推力作用下压入岩石一定深度,尔后侧端面在扭矩作用下旋转,切削周围岩石,实现对岩石材料的去除。所以该过程主要由压入和切削这两种主运动合成,如图1所示。

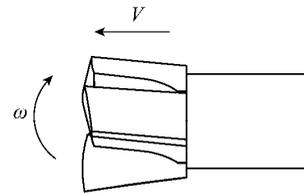


图1 钻头钻掘过程主要运动示意

Fig.1 Schematic diagram of major movements of the drill bit in the process of rock drilling

如果以钻头整体为研究对象,描述钻头压入和旋转切削运动的动力学方程为

$$\left. \begin{aligned} M \frac{dV}{dt} &= \Sigma P_i \\ \frac{d}{dt}(J\omega) &= \Sigma F_i d_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 M 为钻头质量; ΣP_i 为钻头轴向受力代数和; J 为钻头绕轴线的转动惯量; ω 为钻头旋转角速度; $\Sigma F_i d_i$ 为切向方向全部外力对该轴力矩的代数和。

由于钻掘过程的复杂,钻头受到来自钻杆和岩石两方面力的作用,而且力的大小和分布还受到钻头形状和岩石性质等因素的影响, ΣP_i 和 $\Sigma F_i d_i$ 的测量和求解都非常复杂,所以直接利用式(2)分析计算钻头工作面受力情况仍不方便。

不用数值计算而是用解析的方法求解上述微分方程,而且能用含有切削各要素的函数解析式来表示钻头受力,就可以知道钻头受力随各主要钻掘要素是怎样变化的,从而得知钻掘力变化的一般规律。解析解法不但更有利于对问题本质的了解,而且可以更为直观和方便地指导工程应用。

2 钻头受力的动力学解析模型

下面根据第1节的动力学分析结合原有静力学理论,尝试建立动力条件下的钻头受力解析计算方法,进而推导出简洁实用的钻头受力的动力学解析计算模型。

对于不同的运动类型的破岩方式,刀具的受力机制是不一样的,所以需要分别对压入和切削运动分别进行分析。

2.1 压入过程的动力学解析模型

在静力加载下,岩石压入过程中的静压力 P_c (最小压入力) 可以按下式估算:

$$P_c = \sigma_b S \quad (3)$$

式中 σ_b 为岩石抗压强度; S 为压头与岩石接触面积。

但是试验表明,在动载条件下,压头所受压入力与静载条件下所受力并不一致,而且受到压入速度 V 的影响。式(3)的计算结果只与岩石性能和力的作用面积有关,并未考虑速度因素,所以利用该式计算钻头在钻掘运动过程中端面所受压力存在一定局限性。

在动载条件下,根据波动力学^[8],岩石所受的动应力为

$$\sigma = -\frac{E}{c} V_r \quad (4)$$

式中 E 为岩石弹性模量; c 为岩石波速; V_r 为岩石变形速度。

当钻头推进速度 V 增大时,前方岩石的变形速度 V_r 也增大,岩石所受动应力增大,进而引起压入力 P 的增加。可见压入力 P 随着推进速度 V 的增大而增大,需要借助相关参数把速度 V 引入式(3)对其加以修正。

岩石的压入黏度系数表示岩石对压入速度阻抗的大小,仅取决于岩石波速,是岩石的固有力学属性^[9-12]。现将压入黏度系数结合速度参数用最简单的一次函数关系引入到式(3)中,则动载条件下的压入力 P 表示为

$$P = P_c + \eta V \quad (5)$$

式中 η 为压入黏度系数 ($N \cdot s$) / m。

钻头压入力受推进速度影响,随着推进速度的增大而增大,并且与其成一次函数关系。函数截距的物理意义是静力加载条件下的钻头压入力;函数的斜率表示推进速度的变化对压入力影响的快慢程度,受岩石的压入黏度系数的影响,数值为 η 。

2.2 切削过程的动力学解析模型

岩石钻掘的切削过程与自由切削存在一定差异。切削过程中切屑并不立刻离开刀具表面,而是停留在切削面前方并随之运动 $1/3$ 圆周时间直至下一次压入,切削面对切屑存在动能和动量传递。目前经典切削理论针对自由切削并没有包含速度因素,也需要加以修正以适应岩石钻掘这一动力过程。同样,切削过程中切削面对岩石的作用力也可以划分为与速度有关的惯性力阻力和与速度无关的静阻力两部分组成。

(1) 静载切削力计算。

根据日本学者西松给出的传统切削力计算方法^[4,13],单位面积刀具上的切削力应力 σ_i 为

$$\sigma_i = \frac{2}{f+1} \tau_J \frac{\cos \varphi}{1 - \sin(\varphi - 0.75\theta + 22.5)} \quad (6)$$

式中 τ_J 为岩石的抗剪强度; φ 为剪切角; θ 为切削前角; f 为应力分布系数,与前角有关 $f = 11.3 - 0.18\theta$ 。

则钻头切削面上的切削力 F_s 为

$$F_s = \sigma_i S' \quad (7)$$

式中 S' 为切削面积。

(2) 动载切削力计算。

半径为 R 的钻头,钻掘后在岩体上形成半径为 R ,深度为 H 的圆柱孔。每个刀齿切除相当于 $1/3$ 圆柱体积的岩石,该体积的截面积为顶角为 120° 半径为 R 的扇形,重心位置距顶点的距离为 $\frac{\sqrt{3}}{\pi} R$,将切削

体看成整体,其转动惯量 J 为

$$J = \frac{1}{6} (\pi R^2 H \rho) R^2 \quad (8)$$

式中 ρ 为岩石密度。

动量矩 L 为

$$L = J\omega = J2\pi n \quad (9)$$

式中 ω 为角速度; n 为转速。

对单次切削过程的首末段应用动量矩定理:

$$\frac{1}{6} (\pi R^2 \rho) V t R^2 2\pi n - 0 = F_M d_M t \quad (10)$$

式中 F_M 为动载合力; t 为切削时间; d_M 为合力距 $d_M = \frac{1}{\sqrt{3}} R$ 。

则 F_M 为

$$F_M = \frac{\pi^3}{\sqrt{3}} n V \rho R^3 \quad (11)$$

结合式(7) (11) 推出动力学过程中切削面的平均受力为

$$F = F_s + F_M = \frac{2}{f+1} \tau_J \times \frac{\cos \varphi}{1 - \sin(\varphi - 0.75\theta + 22.5)} S' + \frac{\pi^3}{\sqrt{3}} n V \rho R^3 \quad (12)$$

由上式可见,切削力也受推进速度影响,在转速一定条件下在随着推进速度的增大而增大,在钻速 n 一定的条件下,并且与其成一次函数关系。函数截距的物理意义是静力加载条件下的钻头切削力;函数的斜率表示推进速度的变化对切削力影响的快慢程度,受岩石的转速、钻头直径、岩石密度等参数影响,数值上为 $\frac{\pi^3}{\sqrt{3}} n \rho R^3$ 。

3 岩石钻进力学测试实验

由于工作条件十分恶劣,加之受到测试手段的限制,岩石钻掘过程中钻头受力的实时测量仍然是个难以解决的问题,少数国外学者进行过实验研究^[14-15],相关报道不多,可靠的数据较少。为了验证上面给出的动力学计算模型的可靠性,开发了岩石钻进力学测试装置。分别采用静力学理论计算和动力学理论计算压入力和切削力并与该条件下的实验测量值进行了对比。

3.1 试验装置及参数

钻头受力测试的困难在于旋转过程测试信号的采集。根据矿用钻机实际应用情况,设计了岩石钻掘过程力学测试系统。该系统安置在钻头和钻杆之间,外壳坚固,可以承重及传递动力。系统内部加装测试连接模块,含有推力、扭矩测试传感器(图2),测试信号通过数据采集卡进入计算机内进行分析处理,计算机内安装的组态软件可以实时显示测试过程的测量参数。测试系统的推力量程为0~50 kN,扭矩量程0~1 000 N·m。实验材料为灰岩(抗压强度150 MPa),利用ZY-750型矿用钻机进行钻进。在固定转速和推进速度的情况下分别进行了钻进力学测试实验。



图2 岩石钻进力学测试系统

Fig. 2 Mechanics test system of rock drilling

3.2 静力压入模型及动力压入模型与实验结果的比较

在固定转速的情况下($n=4$ r/s),对不同推进速度条件下的推力进行了测量。利用两种理论分别对钻头端部的推力进行了计算。计算结果显示静力理论算出的结果与动力模型算出的结果相比偏低,动力压入计算模型比传统计算方法更接近实验值,具体见表1。

静力学理论计算出的推力与推进速度无关,但实际测量结果显示推力受推进速度影响。正是由于本文给出的动力学计算模型比静力计算模型多了一个带有速度参数的修正项,使计算结果更接近实验测量值。

表1 两种理论计算的压入力与实验值对比

Table 1 Measured temperature after drilling and calculated working temperature

推进速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	静力学理论 计算值/N	动力学理论 计算值/N	实验测 量值/N
0.001	225.5	230.5	267.0
0.005	225.5	250.5	281.3
0.010	225.5	280.4	289.7

3.3 静力切削模型及动力切削模型与实验结果的比较

在固定推进速度的情况下($v=0.001$ m/s),对不同转速条件下的扭矩进行了测量。计算机内部的软件可将扭矩换算为平均切削力。利用两种理论分别对钻头刀片的切削力进行了计算。计算结果显示静力理论算出的结果也比与动力模型算出的结果低一些,虽然两者都较测量值低,但是动力压入计算模型比静载计算方法更接近实验测量值,具体见表2。

表2 两种理论计算的切削力与实验值对比

Table 2 Measured temperature after drilling and calculated working temperature

转速/ ($r \cdot s^{-1}$)	静力学理 论计算值/N	动力学理论 计算值/N	实验测 量值/N
4	69.5	73.3	87.5
10	69.5	79.2	89.7
15	69.5	84.1	91.3

根据传统的西松切削力计算方法得出的切削力比实验值低,而本文给出的动力学计算模型多了一项 $\frac{\pi^3}{\sqrt{3}}nV\rho R^3$,更接近实验值。只有当在推进速度 V 和转速 n 很低、钻孔半径很小时,才可以近似按静力学模型计算。

通过上述比较可以看出,岩石钻进过程钻头受力与钻头的推进速度和旋转速度密切相关,根据本文给出的动力学解析模型计算出的钻头受力比传统静力学方法的计算结果更接近实验值,尽管还存在一定偏差,但作为初步的理论探索,本文的思路和方法是可行的。下一步的研究重点是开发先进的测试方法对钻头不同位置受力情况进行精确测量,并根据实验数据对该模型进行进一步修正,以使该方法更为准确地预测钻头受力更好地指导工程应用。

4 结 论

(1) 针对当前基于静载条件钻头受力计算模型

的局限,通过对岩石钻掘过程的动力学分析,分别建立了钻头的压入力和切削力的动力学解析模型。

(2) 实验结果表明:在其它条件一定的情况下,钻头的压入力和切削力受钻头推进速度和转速的影响,随着钻头推进速度和转速波动的增大而增大。

(3) 将本文给出的动力学计算模型与传统静力学计算模型与实验测量值分别进行了对比,计算结果显示该计算模型比传统模型更接近实际测量值。

(4) 该动力学模型可以更为准确直观地指导工程施工:应根据现场实际情况将推进速度等参数控制在合理范围内,避免由于钻头受力过大造成钻头的过早失效。

参考文献:

- [1] Beste U, Hartzell T, Engqvist H, et al. Surface damage on cemented carbide rock-drill buttons[J]. *Wear* 2001 249: 324 - 329.
- [2] Ee K C, Balaji A K, Li P X, et al. Force decomposition model for tool-wear in turning with grooved cutting tools[J]. *Wear* 2002 249: 985 - 994.
- [3] Sikarshie D L, Altiero N J. The formation of chips in the Penetration of Elastic-brittle Materials (Rock) [J]. *Journal of Applied Mechanics* 1973(9): 25 - 31.
- [4] Nishimatsu Y. The mechanics of rock cutting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts* 1972 9(2): 261 - 270.
- [5] Stavropoulou M. Modeling of small-diameter rotary drilling tests on marbles[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 2006 43: 1034 - 1051.
- [6] Ramoni M, Anagnostou G. Thrust force requirements for TBMs in squeezing ground[J]. *Tunneling and Underground Space Technology* 2010 25: 433 - 455.
- [7] 马连生, 杨静宁, 宋 曦. 理论力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] 马晓青. 冲击动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992.
- [9] 速水博秀, 高岗三郎, 三 尺茂夫. 打击せ入孔にずける岩石のかたさ粘さの測定に関する研究[J]. *日本矿业会志* 1973 89: 639 - 644.
- [10] Zhang Miaokang. On dynamic failure of rock in percussive drilling [R]. Sweden: University of Lulea 1983.
- [11] 赵统武. 冲击钻进动力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [12] 陈 颢, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [13] 徐小荷, 余 静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [14] Hamade R F, Manthri S P, Pusavec F, et al. Compact core drilling in basalt rock using PCD tool inserts: wear characteristics and cutting forces [J]. *Journal of Materials Processing Technology* 2010, 210: 1326 - 1339.
- [15] Emmanuel D, Thomas R, Mike S. Drilling response of drag bits: theory and experiment [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 2008 45: 1347 - 1360.