

DOI : 10.11779/CJGE201607008

牙轮钻工作参数与岩体强度对应关系的理论分析与实验研究

郭汝坤¹, 冯 春¹, 李战军², 乔继延¹, 李世海¹

(1. 中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190; 2. 广东宏大爆破股份有限公司, 广东 广州 510623)

摘 要: 以露天矿开采为背景, 基于牙轮钻单齿冲击压入破岩的机理, 借助理论分析及现场实验, 建立了牙轮钻的工作参数(进尺速度、钻杆轴压、转速)与岩体强度(黏聚力、内摩擦角)的对应关系。理论分析时, 基于布西内斯科问题弹性力学解和 Drucker-Prager 塑性准则, 给出了单齿压入破碎区域的几何形态, 建立了单齿破岩体积与钻杆轴压、黏聚力、内摩擦角间的函数关系; 并根据钻杆旋转一周单齿破岩体积的累积量和宏观破岩体积相等, 建立了进尺速度、转速与单齿破岩体积的对应关系。理论分析的结果表明, 单齿作用下, 破碎区域基本呈椭圆形, 并在压入点附近的表层出现薄层破碎; 进尺速度与转速呈线性关系, 进尺速度与钻杆轴压呈 $3/2$ 次方的关系, 进尺速度与黏聚力呈 $-3/2$ 次方的关系, 内摩擦角对进尺速度的影响可以忽略。在鞍千矿南采区进行了牙轮钻钻进规律的现场实验, 研究了进尺速度与钻杆轴压、转速、黏聚力间的对应关系, 得到了与理论分析一致的结果。研究成果可以为牙轮钻工作参数的优化设计及岩体强度的动态测试提供依据。

关键词: 牙轮钻; 单齿破岩体积; 轴压; 进尺速度; 岩体强度; D-P 塑性准则

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)07-1221-09

作者简介: 郭汝坤(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程数值模拟及监测等方面的研究工作。E-mail: guorukun@imech.ac.cn。

Theoretical and experimental studies on relationship between working parameters of cone drill and rock strengths

GUO Ru-kun¹, FENG Chun¹, LI Zhan-jun², QIAO Ji-yan¹, LI Shi-hai¹

(1. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Guangdong Hongda Blasting Co., Ltd., Guangzhou 510623, China)

Abstract: The relationship between operating parameters of cone drill (drilling speed, drill pipe axial force, rotational speed) and rock mass strengths (cohesion, internal friction angle) is established by means of theoretical analysis and field tests based on the single-tooth impact and pressure rock fragmentation mechanisms. The geometrical morphology of broken area by single-tooth is obtained, and the relationship among single-tooth rock fragmentation volume, drill pipe axial force, cohesion and internal friction angle is established based on the Boussinesq elasticity solution and D-P plastic criterion in theoretical analysis. The relationship among single-tooth rock fragmentation volume, drilling speed and rotational speed established by the relationship that the accumulation of single-tooth rock-breaking volume and the macro rock volume is equal when the drill pipe rotates a circle. The results of theoretical analysis show that the fractured area basically exhibits ellipsoid and a thin layer in the surface layer under the single-tooth pressure. The relationship between drilling speed and rotational speed is linear, that between drilling speed and drill pipe axial force is $3/2$ power, and that between drilling speed and cohesion is $-3/2$ power. The influence of internal friction angle on the penetration rate can be ignored. Field tests on the drilling law of conedril are conducted in the south mining area of Anqian Mine, and the relationship among drilling speed, drill pipe axial force, rotational speed and cohesion is obtained. The theoretical analysis and the actual measurements coincide fairly well. The research achievements may provide a basis for the optimization design of working parameter of conedril and dynamic tests on rock mass strengths.

Key words: cone drill; single-tooth rock fragmentation volume; axial force; drilling speed; rock mass strength; D-P plastic criterion

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB250903); 中国科学院战略性先导科技专项 B 类(XDB10030303); 国家自然科学基金青年基金项目(11302230, 11302229); 广东宏大爆破股份有限公司“基于数字模拟的露天爆破设计软件”研发项目(0980011081)
收稿日期: 2015-11-17

0 引言

牙轮钻是露天矿爆破开采的主要破岩工具,其工作性能直接影响到钻孔质量、钻进速度以及钻孔成本^[1]。牙轮钻的破岩过程十分复杂,影响因素较多,研究牙轮钻头的破岩机理,揭示钻进过程中各参量之间的内在联系,合理选择破岩参数进行高效破岩,一直是理论界和工程界的关注重点,具有较高的研究价值^[2]。

在牙轮钻的钻头上镶嵌有成排排列并凸出于圆锥面的破岩刀具(如图1),牙轮钻工作时,钻杆将压力和扭矩传递给牙轮钻头,钻头一方面向孔底挤压,另一方面进行自转及公转,从而引起牙轮表面的破岩刀具不断地冲击压入岩石,并最终导致岩石在压力和冲击力作用下的破碎解体。



图1 牙轮钻钻头照片

Fig. 1 Photo of cone drill bit

国内外的专家、学者对单齿破岩机理进行了大量的研究,并取得了丰硕的成果。Lawn^[3]、Lindqvist^[4]给出了基于 Boussinesq 应力场的裂纹产生机理; Hertz^[5]对脆性材料侵入过程中裂纹的产生机制进行了研究,采用球形压头进行侵入试验发现了赫兹裂纹,并解释了其产生机理; Ostojic 等^[6]对钝压头侵入时裂纹的形成过程进行了总结和描述; 赵伏军等^[7]研究了动静载荷耦合作用下压头侵入岩石的断裂性质,研究了钻进过程中裂纹长度和载荷、侵入速度之间的关系; 刘清友等^[8]建立了盘式单牙轮钻头破岩机理仿真模型,并与试验结果进行了对比; Liu 等^[9]基于 RPA 软件研究了岩屑坑的形成过程,建立了裂纹计算经验模型; 石祥超等^[10]应用 FLAC^{3D} 模拟了单齿加载速度对侵入破岩的影响; Su 等^[11]采用颗粒流 PFC^{3D} 对岩石的切削破坏进行了模拟,取得了和试验较为一致的结果; 祝效华等^[12]研究了钻井过程中钻柱、钻头、岩石相互作用下的牙轮钻头动力学特性; 马德坤^[13]对牙轮钻头的几何学、运动学以及钻头与岩石的相互作用做了系

统的分析研究。

总体而言,现有的理论和分析对于单齿作用下裂纹的产生机理、空间形态及牙轮钻头的几何学、运动学有了较为深刻的认识,但关于钻头破岩效果与钻杆轴压、转速、牙齿形状、岩石力学性质等因素之间关系的研究却鲜见报道。

本文基于布西内斯科问题弹性力学解和 D-P 塑性准则研究了钻杆轴压、岩石黏聚力、内摩擦角对单齿破岩体积的影响规律; 并根据钻杆旋转一周单齿破岩体积的累积量和宏观破岩体积相等,建立了进尺速度与钻杆轴压、转速、岩石性质之间的定量表达式; 通过鞍千矿南采区的现场实验,证明了上述表达式的准确性。

1 牙轮钻破岩过程的理论分析

单齿冲击压入破岩是牙轮钻的主要破岩模式,牙轮钻的单齿破岩体积及旋转一周的单齿破岩次数是影响宏观进尺速度的主要因素。

牙轮钻钻进过程中,涉及的工作参数包括轴压、转速、进尺速度及扭矩等,其中轴压及转速为可控参数,进尺速度与扭矩为响应参数; 涉及的岩体强度参数包括黏聚力、内摩擦角及抗拉强度等。

考虑到钻孔底部的岩石主要受牙轮钻刀具的冲压作用,扭矩及岩体抗拉强度影响不大,因此本文将重点研究牙轮钻钻进过程中轴压、转速、进尺速度与岩体黏聚力、内摩擦角的对应关系。

首先研究轴压 N 、转速 n_T 、进尺速度 v 和单齿破岩体积 V_0 之间的关系,接着研究单齿破岩体积和单齿压力、岩体黏聚力、内摩擦角的对应关系,最后建立牙轮钻钻进过程中轴压、转速、进尺速度与岩体黏聚力、内摩擦角的对应关系。

1.1 工作参数 N , n_T , v 和单齿破岩体积的对应关系

若某瞬间钻杆轴压为 N , 3 个牙轮此时刻母线上有 k_1, k_2, k_3 个齿与岩石同时接触, 一个齿上所受到的力为 F ,

$$F = \frac{N}{k_1 + k_2 + k_3} \quad (1)$$

设 k 个齿破碎的岩石体积为 ΔV , 其表达式为

$$\Delta V = kV_0 \quad (2)$$

式中, V_0 为单齿破岩体积。

一个牙轮自转一周能破碎的体积 V_i 可表述为

$$V_i = \sum_{j=1}^{m_i} (\Delta V)_i = \sum_{j=1}^{m_i} (k_j V_0)_j \quad (3)$$

3 个牙轮自转一周所能破碎的岩石体积可表述为

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (4)$$

设牙轮自转一周的时间内, 各齿的破岩体积均相等 (为 V_0), 则式 (4) 可进一步表述为

$$V = \left(\sum_{j=1}^{m_1} (k_1)_j + \sum_{j=1}^{m_2} (k_2)_j + \sum_{j=1}^{m_3} (k_3)_j \right) V_0 \quad (5)$$

式中, m_1, m_2, m_3 分别为牙轮 1, 2, 3 上布齿的母线数, 令

$$K = \sum_{j=1}^{m_1} (k_1)_j + \sum_{j=1}^{m_2} (k_2)_j + \sum_{j=1}^{m_3} (k_3)_j \quad (6)$$

则式 (6) 可进一步表述为

$$V = KV_0 \quad (7)$$

当牙轮钻机及牙轮钻头型号确定时, K 为常数。

若牙轮钻头孔底角 $\alpha=0$, 牙轮主锥角为 $2\varphi_0$, 则牙轮转速 n_L 和钻头转速 n_T 之间的关系式为

$$\frac{n_T}{n_L} = \sin \varphi_0 \quad (8)$$

钻进过程中, 根据钻杆转动一周单齿破岩体积的累积值和通过进尺计算的破岩总体积相等的原则, 建立单齿破岩体积 V_0 和钻杆轴压 N 、进尺速度 v 、转速 n_T 之间的关系为

$$\frac{\pi R^2 v}{n_T} = V \frac{1}{\sin \varphi_0} = KV_0 \frac{1}{\sin \varphi_0} \quad (9)$$

上式可进一步表述为

$$v = \frac{Kn_T}{\pi R^2 \sin \varphi_0} V_0 \quad (10)$$

式中, R 为钻孔半径。

接下来建立单齿破岩体积 V_0 和岩体强度之间的关系。

1.2 单齿破岩体积和岩体强度的对应关系

(1) 单齿作用应力解及破碎区表述

单齿压入过程中岩体内部的应力状态分析可以简化为半无限空间受法向集中力作用的问题, 即布西内斯科 (Boussinesq) 问题 (图 2), 该问题在柱坐标系下的弹性力学解式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\rho &= \frac{F}{2\pi R^2} \left[(1-2\mu) \frac{R}{R+z} - \frac{3\rho^2 z}{R^3} \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{(1-2\mu)F}{2\pi R^2} \left[\frac{z}{R} - \frac{R}{R+z} \right] \\ \sigma_z &= -\frac{3Fz^3}{2\pi R^5} \\ \tau_{z\rho} &= -\frac{3F\rho z^2}{2\pi R^5} \\ \tau_{\theta\rho} &= 0 \\ \tau_{z\theta} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中, F 为单点的压力, R 为空间一点距作用点的距离, z, ρ 为柱坐标系坐标, μ 为泊松比, $\sigma_\rho, \sigma_\theta, \sigma_z,$

$\tau_{z\rho}, \tau_{\theta\rho}, \tau_{z\theta}$ 分别为对应方向的正应力和剪应力。

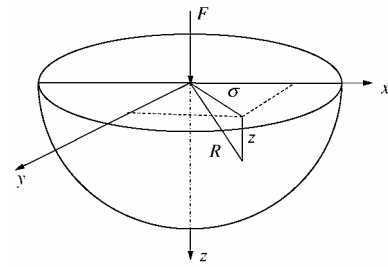


图 2 单齿破岩体积理论分析示意图

Fig. 2 Sketch map for theoretical analysis of single-tooth fragmentation volume

将上述柱坐标系下的应力解转换到笛卡尔坐标系下,

$$\sigma_d = \beta^T \sigma_c \beta \quad (12)$$

其中,

$$\beta = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

由于其对称性, 取 $\theta=0$, 并进行简化, 得应力张量为

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_\rho & 0 & \tau_{z\rho} \\ 0 & \sigma_\theta & 0 \\ \tau_{z\rho} & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据其应力状态, 引入 D-P (Drucker-Prager) 塑性准则计算判断塑性区域边界, 对塑性区域围绕 z 轴旋转一周进行积分可得到塑性体积, 即可认为单齿破岩体积。塑性准则可表述为

$$F = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 - K = 0 \quad (15)$$

其中, I_1, J_2 为主应力及八面体剪应力, 可表述为

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (16)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)] \quad (17)$$

α, K 为 Drucker-Prager 准则中的材料参数, 通过外角点外接 D-P 圆的方法, 建立 α, K 与 Mohr-Coulomb 准则中黏聚力、内摩擦角的函数关系为

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad (18)$$

$$K = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad (19)$$

单齿破岩体积 V_0 和单齿压力 F 、内摩擦角 φ 、黏聚力 c 之间的关系为

$$V_0 = V_0(F, \varphi, c) \quad (20)$$

根据上述基于塑性理论的概化模型研究压力 F 、

黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 对单齿破岩体积 V_0 的影响规律。

(2) 压力 F 对破岩体积 V_0 的影响规律

单齿破岩破碎区域基本呈椭球形，并在单齿压入点附近的表层出现薄层破碎。当岩石性质不发生改变时，即岩石的黏聚力 $c=20$ MPa，内摩擦角 $\phi=35^\circ$ 时，不同单齿压力下的破碎区形状如图 3 所示。可看出随着单齿压力的增大破碎区的范围逐渐增大。

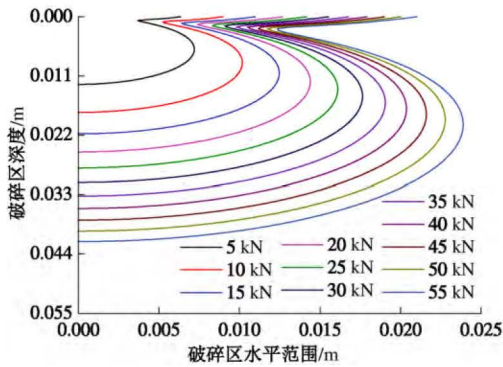


图 3 不同单齿压力 F 下的破碎区形状

Fig. 3 Shape of fractured zone under different forces

计算不同单齿压力下的破碎区体积如图 4 所示，表明单齿破岩体积与压力的 $3/2$ 次方成正比。

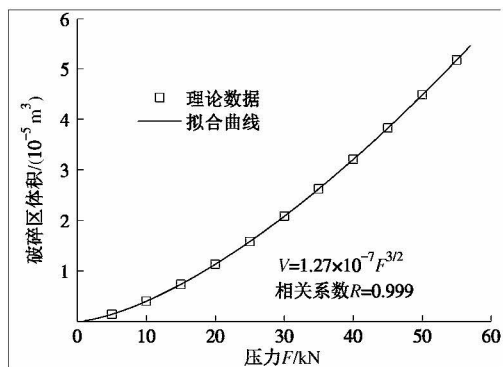


图 4 单齿破岩体积随单齿压力 F 的变化曲线

Fig. 4 Relationship between rock fragmentation volume of a single tooth and force

(3) 黏聚力 c 对破岩体积 V_0 的影响规律

为了研究黏聚力 c 对单齿破岩体积 V_0 的影响规律，取单齿压力 $F=5$ kN 和内摩擦角 $\phi=35^\circ$ ，且保持不变，仅改变 c 的取值，取值范围 3~30 MPa。不同黏聚力 c 下的破碎区形状如图 5 所示，不同黏聚力 c 下的破碎区形状具有很好的相似性，但破碎区的大小有较大的差异。

单齿破岩体积 V_0 随黏聚力 c 的变化曲线如图 6 所示。由图可得，当单齿压力 F 和内摩擦角 ϕ 不改变时，黏聚力 c 越小，破碎区范围越大；单齿破岩体积 V_0 和黏聚力 c 的 $-3/2$ 次方呈线性关系。

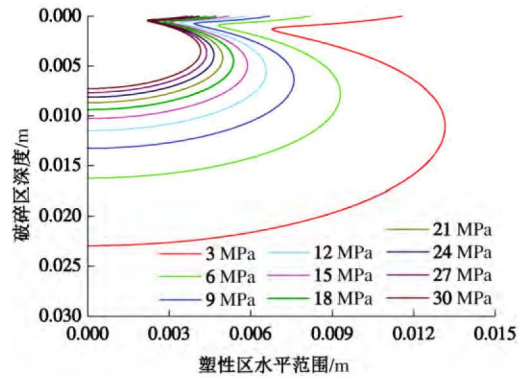


图 5 不同黏聚力 c 下的破碎区形状

Fig. 5 Shapes of fractured zone under different cohesions

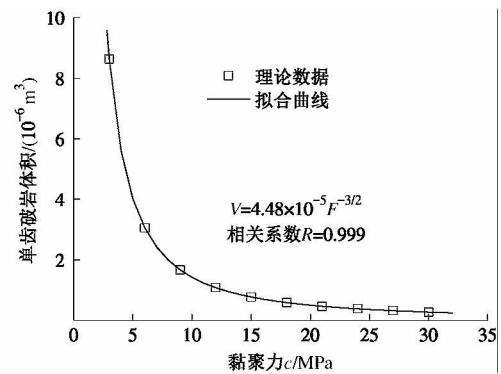


图 6 单齿破岩体积随黏聚力 c 的变化曲线

Fig. 6 Relationship between rock fragmentation volume of a single tooth and cohesion

(4) 内摩擦角 ϕ 对破岩体积 V_0 的影响规律

为了研究内摩擦角 ϕ 对单齿破岩体积 V_0 的影响规律，取单齿压力 $F=5$ kN，黏聚力 $c=10$ MPa，且保持不变，仅改变 ϕ 的取值，取值范围为 $5^\circ \sim 50^\circ$ 。

不同内摩擦角 ϕ 下的破碎区形状如图 7 所示。由图可得，不同内摩擦角 ϕ 下的破碎区形状亦有较好的相似性，内摩擦角 ϕ 变化时，破碎区的大小和形状均变化不大。

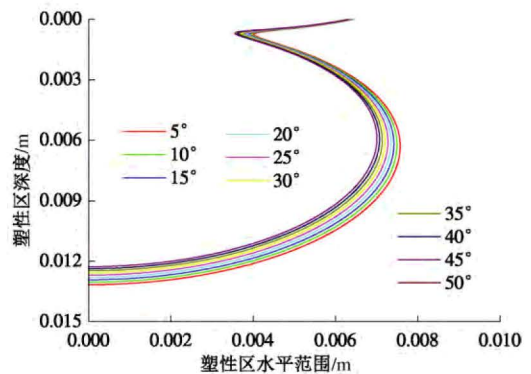


图 7 不同内摩擦角 ϕ 下的破碎区形状

Fig. 7 Shapes of fractured zone under different internal friction angles

单齿破岩体积 V_0 随内摩擦角 ϕ 的变化曲线如图 8 所示。由图可得, 当单齿压力 F 和黏聚力 c 不改变时, 内摩擦角 ϕ 越小破碎区的范围越大, 破碎区体积 V_0 随着内摩擦角 ϕ 的增加而线性减小, 即单齿破岩体积 V_0 和内摩擦角 ϕ 呈线性关系。但总体而言, 单齿破岩体积 V_0 随内摩擦角 ϕ 的变化并不大, 基本可以忽略。

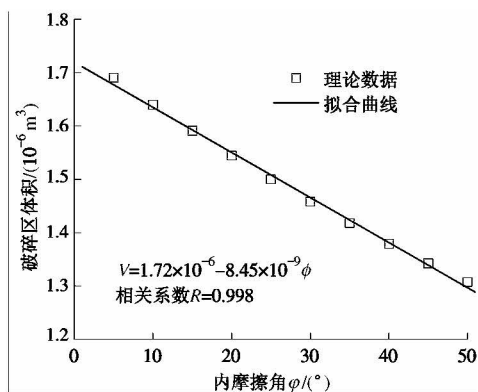


图 8 单齿破岩体积 V_0 随内摩擦角 ϕ 的变化曲线

Fig. 8 Relationship between rock fragmentation volume of a single tooth and internal friction angle

(5) c 和 ϕ 同时改变对破岩体积 V_0 的影响规律

不同黏聚力 c 下的单齿破岩体积 V_0 随内摩擦角 ϕ 的变化曲线如图 9 所示。由图可得, 单齿破岩体积 V_0 随着内摩擦角 ϕ 呈线性变化; 黏聚力 c 较小时, 单齿破岩体积 V_0 随内摩擦角 ϕ 变化斜率较大; 随着黏聚力 c 的增大, 斜率逐渐减小。

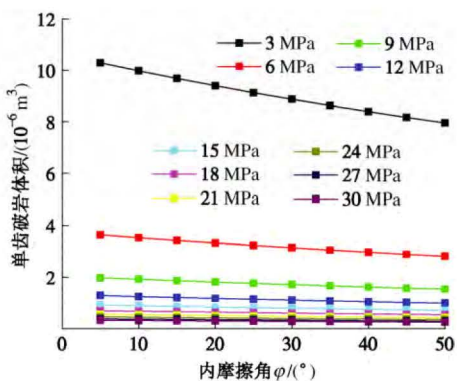


图 9 不同 c 下 V_0 随 ϕ 的变化曲线

Fig. 9 Relationship between the rock fragmentation volume of a single tooth and internal friction angle under different cohesion

不同内摩擦角 ϕ 下的单齿破岩体积 V_0 随黏聚力 c 的变化曲线如图 10 所示。由图可得, 当内摩擦角 ϕ 变化时, 单齿破岩体积 V_0 随着黏聚力 c 的增大而减小, 内摩擦角 ϕ 的改变对单齿破岩体积 V_0 影响不大。

单齿破岩体积 V_0 随着黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 的变化云图如图 11 所示。

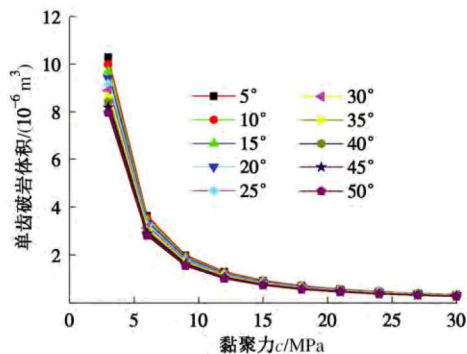


图 10 不同 ϕ 下 V_0 随 c 变化曲线

Fig. 10 Relationship between rock fragmentation volume of a single tooth and cohesion under different internal friction angles

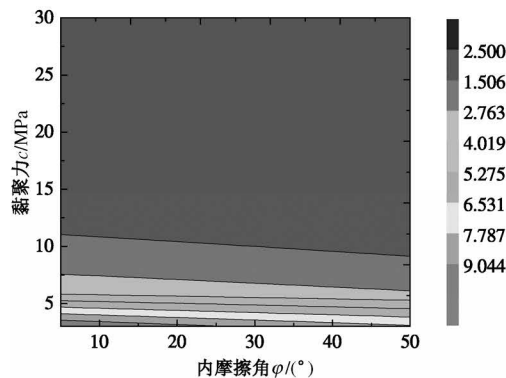


图 11 V_0 随 c 和 ϕ 变化云图

Fig. 11 Variation of rock fragmentation volume of a single tooth with different cohesions and internal friction angles

由图可得, 随着黏聚力 c 的增大, 单齿破岩体积 V_0 逐渐减小; 随着内摩擦角 ϕ 的增大, 单齿破岩体积 V_0 略有减小; 单齿破岩体积 V_0 对黏聚力 c 的敏感性远大于内摩擦角 ϕ , 内摩擦角 ϕ 的影响可以忽略。

由于单齿破岩体积 V_0 对内摩擦角 ϕ 的敏感性较低, 忽略内摩擦角 ϕ 的影响, 单齿破岩体积 V_0 的表达式可简化为

$$V_0 = V_0(F, c) \quad (21)$$

又根据上述对单齿压力 F 、黏聚力 c 对单齿破岩体积 V_0 的影响规律, 式 (21) 可定量表述为

$$V_0 = 0.13 \left(\frac{F}{c} \right)^{3/2} \quad (22)$$

通过式 (22) 就建立了单齿破岩体积 V_0 和岩体力学性质之间的定量关系。

1.3 工作参数与岩体强度的对应关系

将单齿破岩体积 V_0 和岩石力学性质 (黏聚力 c) 的定量关系式 (22) 代入式 (10) 可得岩石黏聚力 c 和工作参数 (钻杆轴压 N 、进尺速度 v 、转速 n_T) 之间的定量表达式为

$$v = \frac{0.13K}{(k_1 + k_2 + k_3)^{3/2} \pi R^2 \sin \phi_0} n_T \left(\frac{N}{c} \right)^{3/2}, \quad (23)$$

令 A 表述前面的系数, 即

$$A = \frac{0.13K}{(k_1+k_2+k_3)^{3/2} \pi R^2 \sin \phi_0} \quad (24)$$

则式 (24) 可进一步表述为

$$v = An_T \left(\frac{N}{c} \right)^{3/2} \quad (25)$$

当牙轮钻机及牙轮钻头型号确定时, 系数 A 为常数。

从上述公式可以看出, 进尺速度 v 和转速 n_T 之间为线性关系, 进尺速度 v 和钻杆轴压 N 的 $3/2$ 次方呈线性关系, 进尺速度 v 和黏聚力 c 的 $-3/2$ 次方呈线性关系。

2 现场试验与验证

2.1 试验设备及试验方案

在鞍钢集团辽宁鞍山市鞍千矿南采场区选取 48 平台作为试验点, 场地可粗略地分为灰岩和赤铁矿等两类, 钻机型号为中钢集团衡阳重型机械有限公司出产的 YZ-35C 型牙轮钻机。

在牙轮钻钻进过程中对相关数据进行监测。其中, 转速 n_T 直接从钻机控制台的转速表上读取, 并通过在钻杆上粘贴参考片进行校核。钻杆轴压 N 通过控制台的油压表进行控制, 并通过在钻杆上粘贴应变片建立油压表读数与钻杆轴压 N 之间的函数关系。进尺随时间的变化主要依靠固定于回转小车上的激光测距仪获得, 并通过求导获得进尺速度 v 。此外, 为了验证进尺速度与岩体强度的关系 (式 (26)), 需在钻孔区域取样并进行室内实验, 获得灰岩和赤铁矿的岩石力学强度 (主要为黏聚力及内摩擦角)。

现场试验分 3 组进行, 具体试验方案如下:

(1) 在同一孔内恒定转速 n_T , 改变钻杆轴压 N , 监测进尺速度 v , 即验证进尺速度 v 随钻杆轴压 N 的变化关系。

(2) 在同一孔内恒定钻杆轴压 N , 改变转速 n_T , 监测进尺速度 v , 即验证进尺速度 v 随钻杆转速 n_T 的变化关系。

(3) 在不同岩性孔内采用同一个钻杆轴压 N 和转速 n_T , 监测进尺速度 v , 即验证进尺速度 v 随岩石黏聚力 c 的变化关系。

2.2 试验结果分析

(1) 单孔内岩性变化研究

为了研究单孔内岩体性质的变化情况, 恒定转速为 90 r/min, 恒定钻杆压力为 155.0 kN, 测试单孔内的进尺深度曲线如图 12 所示。

进尺曲线的斜率即为进尺速度 v , 从图 12 可以看

出, 在地表以下 0~6 m 范围内, 刚开始有较高的钻进速度, 随着时间的推移, 钻进速度不断减小, 其线性度较差。在地表以下 6~15 m, 进尺有较高的线性度, 即进尺速度恒定, 表明该区段岩性相对均一。

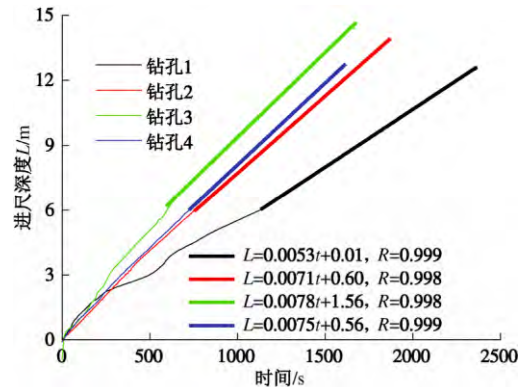


图 12 不同孔恒定钻杆轴压恒定转速下进尺曲线

Fig. 12 Drilling speeds of different drills under constant axial force and rotational speed

从图 12 可以看出, 地表以下 6~15 m, 在同一个钻孔内的岩石性质变化不大。因此, 在地表以下 6~15 m 同一钻孔内假设岩石黏聚力 c 恒定来研究压力、转速与进尺速度间关系的试验方案是可行的。

(2) 钻杆轴压 N 对进尺速度 v 的影响规律

典型的激光测距仪得到的恒定转速为 60, 75, 90 r/min 时不同压力进尺曲线如图 13~15 所示, 从进尺曲线线性拟合结果可以看出, 进尺曲线的线性度很好, 相关系数都接近于 1, 曲线拟合的斜率即为进尺速度。

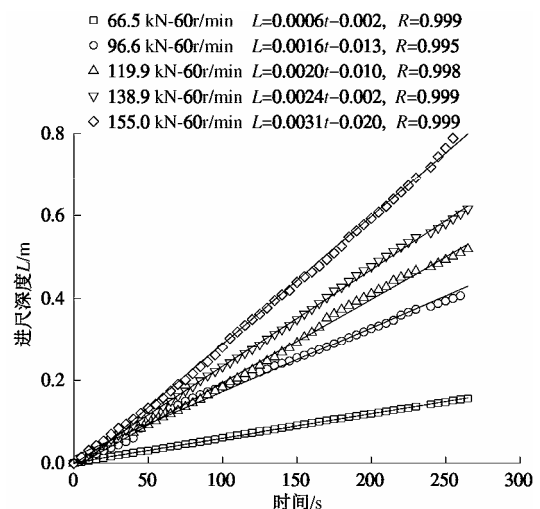


图 13 恒定转速为 60 r/min 不同钻杆轴压进尺曲线

Fig. 13 Relationship between drilling speed and axial force under constant rotational speed of 60 r/min

依据此组牙轮钻在铁矿石地层钻进时的进尺曲线, 拟合得到铁矿石地层钻进速度 v 随钻杆轴压 N 的变化曲线如图 16 所示, 此时 A, n_T, c 均为恒定的值。

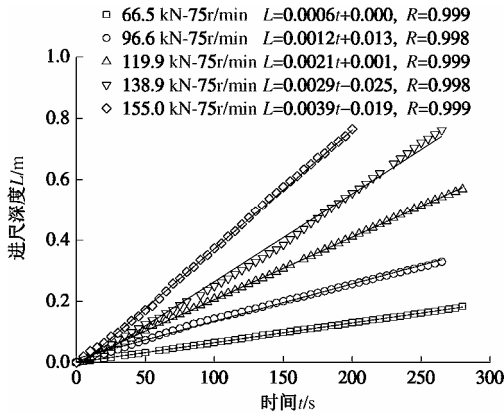


图 14 恒定转速为 75 r/min 不同钻杆轴压进尺曲线

Fig. 14 Relationship between drilling speed and axial force under constant rotational speed of 75 r/min

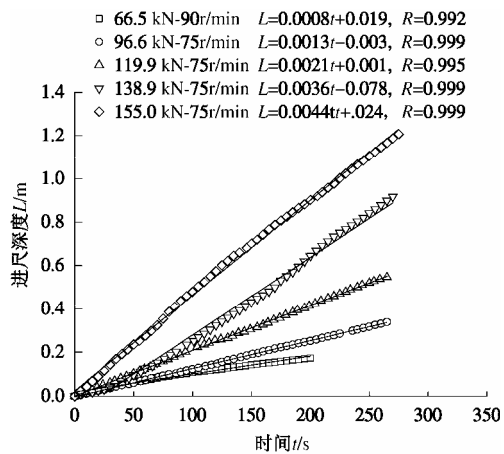


图 15 恒定转速为 90 r/min 不同钻杆轴压进尺曲线

Fig. 15 Relationship between drilling speed and axial force under constant rotational speed of 90 r/min

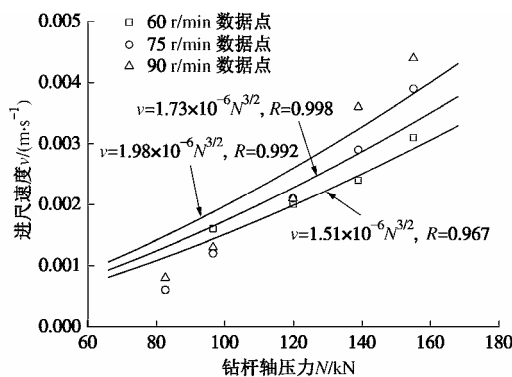


图 16 铁矿层进尺速度随钻杆轴压变化曲线

Fig. 16 Relationship between drilling speed and axial force of iron ore

根据式(25)进行拟合, 相关系数 R 分别为 0.992, 0.998, 0.967, 由此可得在铁矿石地层中进尺速度 v 随钻杆轴压 N 的变化规律和理论推导的基本一致。

由多组试验数据统计得灰岩地层钻进速度 v 随钻杆轴压 N 的变化曲线如图 17 所示, 此时 A, n_T, c 均

为恒定的值。

根据式(25)进行拟合, 相关系数分别 R 为 0.957, 0.991, 0.950, 由此可得在灰岩地层中进尺速度 v 随钻杆轴压 N 的变化规律和理论推导基本一致。

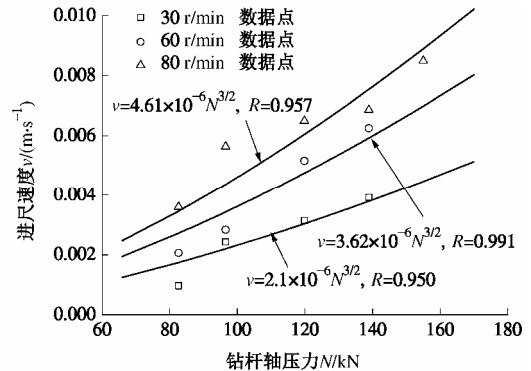


图 17 灰岩中进尺速度随钻杆轴压变化曲线

Fig. 17 Relationship between drilling speed and axial force of rock

(3) 转速对进尺速度的影响规律

由多组试验数据统计得灰岩地层在钻杆轴压保持 138.9 kN 时, 钻进速度 v 随钻杆转速 n_T 的变化曲线如图 18 所示, 此时 A, N, c 均为恒定的值, 根据式(26)进行拟合, 相关系数 R 为 0.954, 由此可得在灰岩地层中进尺速度 v 随转速 n_T 的变化规律和理论推导基本一致。

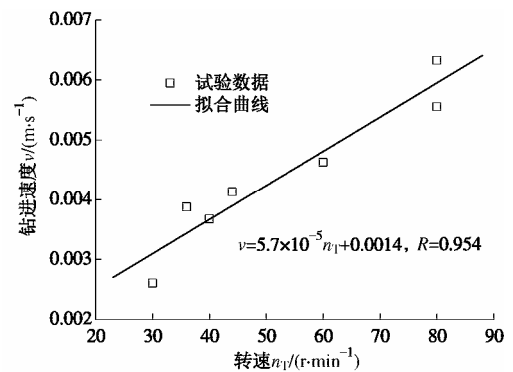


图 18 恒定轴压下的转速对进尺速度的影响

Fig. 18 Relationship between drilling speed and rotational speed under constant axial force of 138.9 kN

(4) 岩石性质对进尺速度的影响规律

为了验证岩石的黏聚力 c 和钻进速度 v 之间的关系, 在不同地层中进行钻孔试验。

钻进的岩体可大致分为灰岩 A、灰岩 B 和赤铁矿三类, 保持转速 n_T 为 60 r/min, 针对每一个孔改变钻杆轴压 N 进行测试, 岩石进尺速度 v 随钻杆轴压 N 的变化曲线如图 19 所示。

对上述钻孔附近位置的岩石进行取样并做室内强度试验。测得灰岩 A、灰岩 B 和赤铁矿的黏聚力 c 分别为 28.27, 34.36, 68.04 MPa。

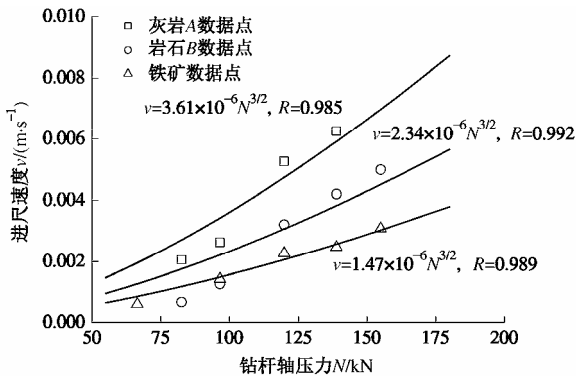


图 19 定轴压定转速下进尺速度随岩性的变化曲线

Fig. 19 Relationship between drilling speed and rock property under constant axial force and rotational speed

考虑钻杆轴压 N 和黏聚力 c 的联合作用, 采用式 (25) 进行拟合, 结果如图 20 所示。由图 20 的拟合曲线可得, 式 (25) 中的常数 $A=16.17$, 相关系数为 0.915。

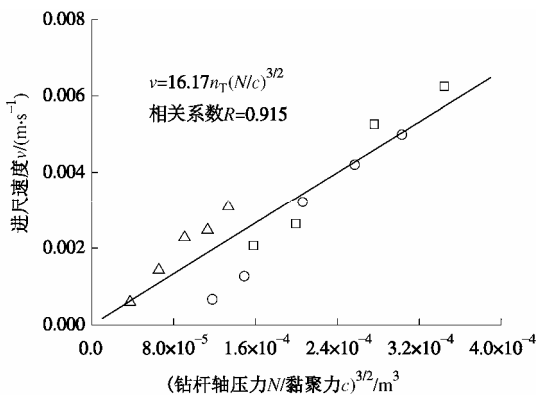


图 20 进尺速度 v 随 $(N/c)^{3/2}$ 变化曲线

Fig. 20 Relationship between v and $(N/c)^{3/2}$

由此, 对于鞍干矿生产所用的 YZ-35C 型牙轮钻机, 其工作参数 (进尺速度 v , 转速 n_T , 钻杆轴压 N) 和岩石性质 (黏聚力) 之间的定量表达式为

$$v = 16.17 n_T \left(\frac{N}{c} \right)^{3/2} \quad (26)$$

针对鞍干矿生产所用的钻头, 根据式 (25) 对 A 值进行粗略的估算。取 $k_1=k_2=k_3=3$, $R=0.25$ m, $m_1=m_2=m_3=18$, $\varphi_0=22.5^\circ$, 估算出 A 值为 10.37, 试验拟合的结果与之较为接近。由于钻进过程中上一母线上的齿会对下一母线上齿的作用位置产生损伤破坏, 故理论推导得到的 A 值比试验结果偏小, 具有一定的合理性。

3 结论与展望

(1) 基于布西内斯科(Boussinesq)问题弹性力学解和 D-P(Drucker-Prager)塑性准则研究了压力 F 、岩

石黏聚力 c 、内摩擦角 φ 对单齿破岩体积 V_0 的影响规律, 发现内摩擦角 φ 对单齿破岩体积 V_0 的影响较小, 可以忽略, 从而建立了 F, c 和 V_0 的定量关系 $V_0=0.13(F/c)^{3/2}$ 。

(2) 根据钻杆旋转一周单齿破岩体积的累积值和宏观破岩体积相等, 建立了单齿破岩体积 V_0 和钻进宏观参量 (进尺速度 v 、转速 n_T 、钻杆轴压 N) 之间的定量关系, 进一步建立了岩石强度和宏观参量的定量表述形式 $v=An_T(N/c)^{3/2}$ 。

(3) 通过鞍干矿现场试验和室内试验结果验证了岩石黏聚力 c 、进尺速度 v 、转速 n_T 、钻杆轴压 N 定量表述形式的合理性与正确性, 得到其工作参数和岩体强度的定量表达式为 $v=16.17n_T(N/c)^{3/2}$ 。

(4) 对于牙轮钻头形状、磨损程度等不同时, 牙轮钻工作参数和岩体强度之间的对应关系仍需进一步的研究。

参考文献:

- [1] 王清峰, 朱才朝, 宋朝省, 等. 牙轮钻头单牙轮的破岩仿真研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 108 – 112. (WANG Qing-feng, ZHU Cai-chao, SONG Chao-sheng, et al. Non-linear dynamic analysis of a roller cone bit-well rock system with rock-cone bit interaction[J]. Journal of Vibrat Ion and Shock, 2010, 29(10): 108 – 112. (in Chinese))
- [2] 杨岳峰, 梁正召, 唐春安. 冲击作用下的压头破岩机制研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1775 – 1786. (YANG Yue-feng, LIANG Zheng-zhao, TANG Chun-an. Rock fragmentation mechanism induced by a drill bit subjected to dynamic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1775 – 1786. (in Chinese))
- [3] LAWN B R. Microfracture beneath point indentations in brittle solids[J]. Journal of Materials Science, 1975, 10(1): 113 – 122.
- [4] LINDQVIST P A. Stress fields and subsurface crack propagation of single and multiple rock indentation and disc cutting[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 1984, 17(2): 97 – 112.
- [5] HERTZ H. On the contact of elastic solids[J]. Journal Für Die Reine Und Angewandte Mathematik, 1888, 92: 156 – 228.
- [6] OSTOJIC P, MCPHERSON R. A review of indentation fracture theory: its development, principles and limitations[J]. International Journal of Fracture, 1987, 33(4): 297 – 312.
- [7] 赵伏军, 李夕兵, 冯涛, 等. 动静载荷耦合作用下岩石破碎理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1315 – 1320. (ZHAO Fu-jun, LI Xi-bing, FENG Tao,

- et al. Theoretical analysis and experiments of rock fragmentation under coupling dynamic and static loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(8): 1315 – 1320. (in Chinese))
- [8] 刘清友, 王国荣, 牛再举. 盘式单牙轮钻头破岩机理仿真研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2003, **35**(5): 12 – 15. (LIU Qing-you, WANG Guo-rong, NIU Zai-ju. Simulation study the rock-breaking mechanism on disc one-cone bit[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2003, **35**(5): 12 – 15. (in Chinese))
- [9] LIU H Y, KOU S Q, LINDQVIST P, et al. Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, **39**(4): 491 – 505.
- [10] 石祥超, 孟英峰, 李 皋, 等. 加载速度对单齿压入破岩过程的影响[J]. 石油钻探技术, 2010, **38**(4): 19 – 21. (SHI Xiang-chao, MENG Ying-feng, LI Gao, et al. The effect of loading rate on single-tooth feeding and breaking rock[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, **38**(4): 19 – 21. (in Chinese))
- [11] SU O, AKCIN N A. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, **48**(3): 434 – 442.
- [12] 祝效华, 刘清友, 童 华. 牙轮钻头动力学特性仿真研究[J]. 石油学报, 2004, **25**(4): 96 – 100. (ZHU Xiao-hua, LIU Qing-you, DONG Hua. Emulation research on dynamics of roller cone bit[J]. Acta Petro Lei Sinica, 2004, **25**(4): 96 – 100. (in Chinese))
- [13] 马德坤. 牙轮钻头工作力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009. (MA De-kun. Bit working mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009. (in Chinese))

第十二届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会 (第2号通知)

“第十二届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会”将于2016年8月12日~18日在甘肃兰州召开。本次会议主题为“一带一路战略下的岩土力学挑战与创新”。围绕一带一路战略下岩土力学面临新的机遇和挑战进行探讨,旨在推动中国岩土力学界学者学术交流与合作,共同探讨岩土力学新发展和新趋势。欢迎全国相关学科的专家、学者、科技工作者与工程技术人员踊跃注册会议、参加会议。

主办单位:中国力学学会岩土力学专业委员会。

承办单位:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室;中国地震局兰州地震研究所黄土地震工程重点实验室;兰州大学中铁西北科学研究院有限公司;青海省

交通科学研究院。

协办单位:兰州交通大学;兰州理工大学;西北民族大学;哈尔滨工业大学;中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室;长安大学 中铁第一勘察设计院集团有限公司;《岩土力学》;《冰川冻土》;《地震工程学报》;《防灾减灾工程学报》;甘肃省岩石力学与工程学会;甘肃省力学学会;中国地理学会冰川冻土分会;等。

会议议题: 岩土本构模型与参数研究; 岩土工程重大工程实例; 岩土试验与测试技术; 环境岩土工程; 土动力学与土工抗震; 特殊土的力学特性与工程问题; 寒旱区重大工程问题。

(大会组委会 供稿)