

金刚石钻进能量在风化花岗岩地层中的变化特征

谭卓英

(1. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京科技大学土木与环境工程学院土木工程系, 北京 100083)

摘要: 利用钻进过程监测系统在风化花岗岩地层中的试验数据对钻进系统的动能、轴力功、黏滞能耗及钻进总能量进行了分析。研究表明, 钻具系统的动能在钻进能量中占主导地位, 轴力功与黏滞能耗所占的比重很低, 钻具系统的动能以及钻进总能量与岩石的风化程度呈负相关, 轴力功与岩石的风化程度呈正相关, 说明钻进能量与岩石风化程度具有很好的响应关系。最后, 从破碎单位体积能耗的观点出发, 分析了钻进比功与岩石风化程度之间的关系。研究表明, 在全风化及强风化花岗岩地层中, 金刚石旋转钻进比功值明显低于冲击凿碎比功; 在微风化的坚硬与极坚硬岩石中, 金刚石旋转钻进比功则明显高于冲击凿碎比功。这为金刚石旋转钻进中岩石的实时分级与实时判层提供了新的方法。

关键词: 钻进能量; 动能; 钻进比功; 风化花岗岩; 实时判层

中图分类号: TU410.30

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)09-1303-04

作者简介: 谭卓英(1965-), 博士, 教授, 主要研究方向为岩土工程及防灾减灾。E-mail: markzhy_tan@163.com。

Variation characteristics of penetrating energy for diamond drilling in weathered granite formation

TAN Zhuo-ying

(1. State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines (Beijing University of Science and Technology), Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. Department of Civil Engineering, School of Civil Engineering and Environmental Engineering, Beijing University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the test data from a drilling process monitoring system (DPM) instrumented with a hydraulic rotary drill rig in weathered granite formation, kinetic energy, energy from effective thrust force (ETF), energy for viscous frictional resistance (VFR) and total penetrating energy were analyzed for the diamond drilling system. It was shown that the kinetic energy of the drill string system was dominant and energy from ETF as well as VFR was very low in proportion of drilling energy. Besides, a negative correlation between the kinetic energy, the total penetrating energy and the weathered extent of granite existed and a positive correlation between the energy from ETF and the weathered extent was presented, indicating that there was a good response between the drilling energy and the weathered extent of rock. Finally, in a view of specific energy, the relationship between the specific energy of penetrating (SEP) and the weathered extent of rock was analyzed. It was shown that the SEP in diamond rotary drilling was apparently lower than the specific energy of fracture (SEF) in percussive drilling in very strongly weathered and strongly weathered granite formation. However, the SEP in diamond rotary drilling was higher than the SEF in percussive drilling in lightly weathered hard as well as in extremely hard rock. Then a theoretical foundation for classification of rock in the diamond rotary drilling and some new approaches for real-time-rock-classification and real-time-strata-decision were provided.

Key words: penetrating energy; kinetic energy; specific energy of penetrating; weathered granite; real-time strata decision

0 前言

根据岩石可钻性指标进行岩石分级已在油气钻井、地质勘探与岩土工程钻探等工程中得到广泛应用。岩石可钻性指标通常的确定方法是在室内进行凿碎试验^[1-2]或通过微钻模拟^[3]来确定。但实验及模拟方法在工具形式、作业参数以及环境场要素等方面与实际钻

进存在很大差异;而且,由于地质条件的复杂性以及取样的有限性,实验方法所获可钻性指标难以反映所钻凿地层的实际情况,用于地质判层的代表性并不强。

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(50490271);香港特别行政区政府研究基金和香港赛马会慈善基金资助(HKU7005/01E)

收稿日期: 2006-08-11

因此, 根据实际钻进过程参数对钻凿地层进行实时判层的研究一直以来是钻井钻探领域的重要课题之一。

钻进过程监测仪器的成功研发为钻进参数的实时采集提供了基础条件。已有研究表明, 实时钻进参数与地层特性之间具有一定的响应关系^[4-8], 与在风化花岗岩地层中的研究结果相一致^[9]。然而, 由于钻进参数与孔径大小有关, 因此, 对于不同孔径的钻进而言, 基于钻进参数对地层进行定量识别还存在一定局限。由此可见, 寻求一种综合指标非常重要。能量方法为此奠定了基础。钻凿比功作为可钻性的能量方法已被广泛采用^[10-11]。然而, 钻凿比功亦是依赖于实验方法, 其局限显而易见。因此, 根据实时钻进能量来研究地层特征具有重要的理论与应用价值。

1 试验方法与结果

1.1 试验方法

本研究以某风化花岗岩地层地基钻探工程为背景。该地基为普通风化花岗岩地层, 采用 R-20 液压旋转式钻机, 金刚石钻头钻进, 钻进液为洁净的天然水, 钻进工作参数由系统自动控制和调节, 钻孔进入完整基岩 10 m, 钻孔深度一般为 35 m 左右。钻头内、外径分别为 $\phi 84$ mm 及 $\phi 100$ mm, 钻杆直径均为 $\phi 100$ mm, 钻杆质量为 $6.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 。钻孔揭露的地层情况表明, 从地表至终孔深度范围, 地层主要为全风化至轻度风化的花岗岩。在地层表面有 0~2 m 不等的充填土盖层, 属混合土。

钻机上安装了钻进过程监测系统 (drilling process monitoring system, DPM), 所监测的参数包括钻头位移、转数、轴压力、调节压力等, 除钻头位移和转数为实际物理量外, 其他压力参数为电参量。在试验前所有监测参数均在实验室进行标定。在采用 DPM 监测的同时, 还进行传统的人工录孔, 并取芯试验, 以便与 DPM 系统监测结果的分析比较。

1.2 试验结果

(1) 钻进系统能量随钻头位移的变化曲线

根据能量守恒与转换原理, 对钻进过程中钻具系统的动能、有效轴力功以及钻杆-排渣液间黏滞阻力的能耗进行分析计算^[12], 获得钻进系统各能量随孔深 (钻头位移) 的关系曲线。钻进系统动能随孔深的变化如图 1, 有效轴力功随钻头位移的变化如图 2, 黏滞能耗随钻头位移的变化如图 3。

(2) 钻进总能量随钻头位移的变化

根据钻进系统的能量分析可知^[12], 系统的钻进总能量是钻进系统输入能量 (动能与轴力功) 与黏滞能耗的差值。由于轴力功和黏滞能耗相对小, 系统钻进总能量的变化与系统动能的变化基本一致 (如图 4)。

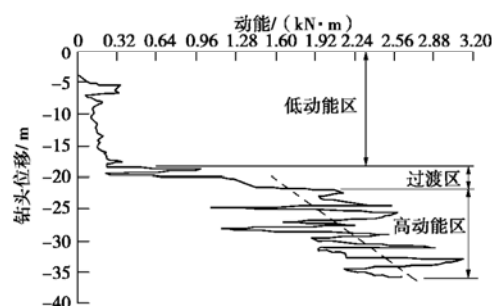


图 1 普通风化花岗岩地层中系统动能随钻头位移的变化曲线

Fig. 1 Variation of kinetic energy with displacement of bits in ordinary weathered granite formation

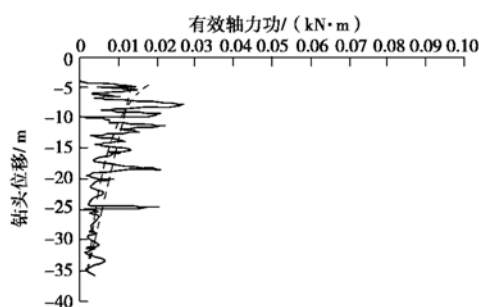


图 2 普通风化花岗岩地层中有效轴力功随钻头位移的变化曲线

Fig. 2 Variation of energy from effective thrust force with displacement of bits in ordinary weathered granite formation

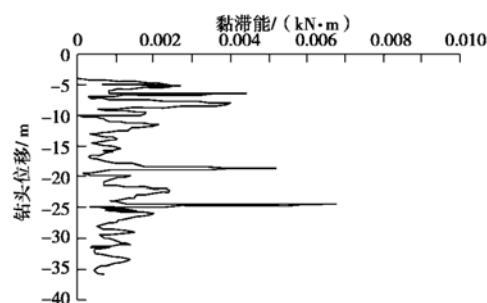


图 3 普通风化花岗岩地层中黏滞能随钻头位移的变化曲线

Fig. 3 Variation of viscous energy with displacement of bits in ordinary weathered granite formation

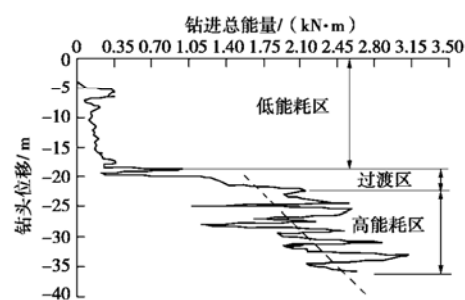


图 4 普通风化花岗岩地层中钻进总能量随钻头位移的变化曲线

Fig. 4 Variation of total penetrating energy with displacement of bits in ordinary weathered granite formation

(3) 钻进比功随钻头位移的变化

旋转钻进过程包括钻具对岩石的压入、压碎和剪切磨削, 可用岩石侵入硬度及破碎单位面积的能耗来表征。然而, 这两个指标在实时钻进中难以测定。为此, 采用钻进比功来反映钻进过程中岩石破碎的综合特征。钻进比功可定义为在一定的钻头形式、钻进方式和排碴条件下, 钻进过程中用于钻头破碎单位体积岩石所消耗的钻进总能量。可用公式表示为

$$E(h) = \frac{4P_f}{\pi(D_b^2 - D_i^2) \cdot V} \quad (1)$$

式中 P_f 为钻进过程中单位时间内钻头破碎岩石所做的功, 是孔深(或地层深度) h 的函数; D_b 为钻头外直径; D_i 为钻头内直径, 当为破坏钻进时, $D_i=0$; V 为穿孔速率。

从式(1)可以看出, 钻进比功反映了钻进能量与有效破碎面积及穿孔速率的关系, 因而, 表明了在一定轴压下岩石抵抗钻头压入及破碎的难易程度。而且, 公式中的参数容易测定或计算。在此地层中, 钻进比功随钻头位移的变化如图5。

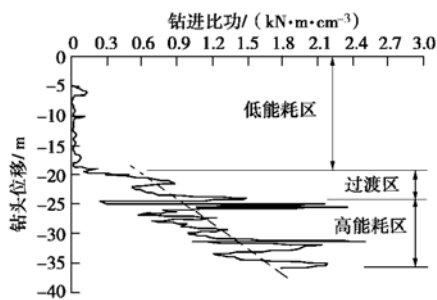


图5 普通风化花岗岩地层中钻进比功随钻头位移的变化曲线
Fig. 5 Variation of penetrating specific energy with displacement of bits in ordinary weathered granite formation

2 试验结果分析

从图1可知, 动能变化曲线大体上可划分为低动能区、过渡区和高动能区三个区间。录孔数据表明, 在低动能区, 主要为全风化(V级)至强风化(IV级)花岗岩, 过渡区主要为强风化至中等风化(III级)花岗岩, 高动能区则为中等风化至轻微风化(II级)花岗岩。显然, 随着风化程度的降低, 钻凿岩石所消耗的动能增大, 动能的消耗与岩石的风化程度呈负相关。图中虚线为高动能区的线性拟合曲线。在低动能区, 动能的变化亦表现为渐增趋势, 但并不明显。在此区间, 可见明显的脉冲区。从录孔数据可知, 在深度-5.36~-6.67 m区间, 存在厚度为1.31 m的中等至轻微风化的花岗岩层(III/II)夹层。在此夹层中钻进能量明显增高, 反映所需要的能耗增大, 也说明动能对

岩石风化程度非常敏感。可见, 曲线变化的平滑或脉冲大小揭示了地层风化程度变化的复杂性。

对于有效轴力推动钻头位移所做的功(如图2所示)而言, 能量曲线随深度增大而逐渐减少, 说明轴力所做的功随岩石风化程度降低而减少。原因是岩石风化程度越低, 岩石的侵入硬度越大, 抵抗钻头破碎的能力越强, 钻头在轴力作用下的产生的位移越小, 轴力功也就越少。图中虚线分别为轴力功的线性及非线性拟合曲线, 从拟合曲线可知, 轴力功随风化程度的降低, 近似线性递减或渐近线递减, 规律性很强, 但分区性不明显。

黏滞能是克服钻具与钻进液之间黏滞阻力所消耗的能量, 从图3可知, 黏滞能耗随孔深及岩石的风化程度没有明显的规律性。因为黏滞能耗主要与液体的黏度、质量及液体的旋转半径有关。通常, 在土层及强风化的岩石中, 岩石破碎的颗粒比较大, 在风化程度低及无风化的新鲜岩中, 岩石破碎的颗粒比较小。而黏度不仅与岩粉颗粒大小有关, 还与其物质组成有关。对于黏土矿物含量高的岩石而言, 黏度相应增大。但因黏滞能耗比较低, 因此在较小的深度范围内很难表现出规律性。

由于轴力功与黏滞能耗比较小, 钻进总能量曲线与动能曲线具有很大的相似性, 同样可以划分为3个区。从图4可知, 钻进能量亦随孔深的增大而增大, 具有明显的区间性或阶段性。钻进总能量随风化程度的降低而增大, 岩石风化程度的越弱, 钻凿岩石所消耗的能量愈多。图中虚线为高能耗段的线性拟合曲线, 它反映了在此区间破碎岩石能耗的梯度在递减。

钻进比功曲线与钻进总能量的变化曲线具有相似性, 亦可将变化曲线划分为低能耗、中能耗(过渡)及高能耗3个区, 动能、钻进总能量及钻进比功的3个区间分别对应岩石风化程度的3个区间, 即重度风化区、中度风化区及轻度风化区。从能量曲线来看, 钻进比功曲线与动能及总能量变化曲线相比, 钻进比功的中能耗区更趋于平缓。录孔数据表明, 在中能耗区主要为IV~III风化花岗岩, 属渐进过渡层, 平缓的过渡曲线比动能及钻进总能量曲线更能反映岩石风化程度的演变。从图5可知, 随着岩石风化程度的减弱, 钻进比功呈明显的递增趋势, 从虚线所表示的线性拟合曲线分析, 钻进比功随孔深增大, 而且大于动能及钻进总能量的梯度变化。钻进比功在各地层中分布的平均值如表1。

从表1可以看出, 在全风化与强风化花岗岩地层中, 钻进比功低于0.0500 ($\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{cm}^{-3}$), 在微风化花岗岩地层中很高, 达到1.4434 ($\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{cm}^{-3}$)。按照凿岩比功的分级^[1], 极软类松散岩石如页岩、煤

及凝灰岩中的凿碎比功的上限为 0.1862 (kN·m·cm⁻³)；在极坚硬的岩浆岩及石英岩中为 0.9800 (kN·m·cm⁻³)。这表明旋转钻进时在松散层中钻进比功值低于凿碎比功值，而在坚硬岩石中，则高于凿碎比功。钻进比功值在不同风化程度的花岗岩岩层中具有显著的差异。显然，冲击凿碎比功在旋转钻进中不再适用，采用凿碎比功对岩石进行分级也是欠合理的。

表 1 钻进比功在花岗岩地层中的分布

Table 1 Distribution of specific energy of drilling in granite formation

风化程度分级	V	V/IV	IV	IV/III	III/II	II
钻进比功 (kN·m·cm ⁻³)	0.0196	0.0390	0.2840	0.4702	0.6021	1.4434

注：V-全风化；IV-强风化；III-中等风化；II-轻度风化。

3 结 论

通过以上研究，得出以下几点结论：

(1) 在旋转钻进中，钻进能量主要来自钻具系统的动能，轴力功相对较小，系统动能用于金刚石钻头钻进黏滞摩阻的能耗也是比较低的。系统的钻进能量可以用动能进行估计。

(2) 动能、轴力功、钻进总能量及钻进比功与岩石的风化程度具有很好的响应特征。动能、钻进总能量及钻进比能随岩石风化程度的增高而减少，轴力功则随岩石风化程度的增高而增大。

(3) 基于冲击破碎的凿碎比功不再适用于旋转钻进中的岩石分级。在旋转钻进中，钻进比功随岩石风化程度的增高而显著降低。

此外，通过 DPM 系统监测数据进行能量与钻进比功分析，可期实现岩石可钻性实时分级与地层的实时判层。

参考文献：

[1] 徐小荷, 余 静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 52 - 56, 59 - 98, 340 - 341. (XU Xiao-he, YU Jing. Theory of rock fragmentation[M]. Beijing: Coal industry Press, 1984: 52 - 56, 340 - 341. (in Chinese))

[2] 沈世雄. 对回转破碎比功岩石可钻性分级的初步研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 1988(5): 1 - 5. (SHEN Shi-xiong Study of classification of rock drillability by rotational fragment specific energy[J]. Exploration Engineering (Drilling & Tunneling), 1988(5): 1 - 5. (in Chinese))

[3] 史晓亮, 段隆军, 王 蕾, 等. 微钻法进行岩石可钻性分级

[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2002, 3(129): 32 - 34. (SHI Xiao-liang, DUAN Long-jun, WANG Lei, et al. Classification of the drillability of stone by means of micro-drilling[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2002, 3(129): 32 - 34. (in Chinese))

[4] TAN Z Y, CAI M F, YUE Q Z, et al. Application and reliability analysis of DPM system in site investigation of HK weathered granite[J]. J Unvi Sci Technol Beijing, 2005, 12(6): 481 - 488.

[5] PAULO C. On the use of drilling parameters in rock foundations. Geotechnical site characterization[C]// Proceedings of the First International Conference on Site Characterization-ISC'98, Atlanta, Georgia, USA, 1998: 347 - 358.

[6] LIU H, YIN K K. Analysis and interpretation of monitored rotary blasthole drill data[J]. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 2001, 15(3): 177 - 203.

[7] GUI M W, SOGA K, BOLTON M D, et al. Instrumented borehole drilling for subsurface investigation[J]. J Geotech Geoenvir Eng ASCE, 2002, 128(4): 283 - 291.

[8] ZACAS M, KAVADAS M, MIHALIS I. The use of recording drilling parameters in rock mass classification[C]// Proceedings of the 8th ISRM Congress, 1995(3): 1121 - 1124.

[9] 谭卓英, 蔡美峰, 岳中琦, 等. 钻进参数用于香港复杂风化花岗岩地层的界面识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2839 - 2845. (TAN Zhuo-ying, CAI Mei-feng, YUE Zhong-qi, et al. Interface identification of intricate weathered granite ground investigation in Hong Kong using drilling parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 2939 - 2945. (in Chinese))

[10] DE P B, VIOLA G, TOMIOLO A. The use of drilling energy for soil classification[C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Field Measurement in Geomechanics, Kobe, 1988.

[11] ERSOY A. Automatic drilling control based on minimum drilling specific energy using PDC and WC bits[J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology, 2003, 112(2): A86.

[12] TAN Z Y. Report on field tests at Lamtin and Homantin sites, DPM system for hydraulic drilling[R]. Hong Kong: University of Hong Kong, 2002.