

金刚石钻进比功及风化花岗岩实时分级研究

谭卓英^{1,2}, 岳中琦³, 谭国焕³, 李焯芬³

(1. 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, 北京 100083; 3. 香港大学 土木工程系, 香港)

摘要: 基于钻进过程监测系统在不同花岗岩地基金刚石钻进中监测数据, 对钻进比功及其变化特性进行分析。结果表明, 金刚石钻进比功随岩石风化程度的减弱而增大, 具有明显的分区性。在软的全风化及强风化花岗岩中, 金刚石钻进比功值低于冲击凿碎比功值; 在中等硬度的风化花岗岩中, 金刚石钻进比功值与冲击凿碎比功值接近; 在硬度较大的微风化花岗岩中, 金刚石钻进比功大于冲击凿碎比功。由此可知, 在中等硬度的花岗岩中, 用冲击凿碎比功来估计金刚石钻进比功才是合适的。这与旋转钻进只适于中硬以下岩层的实际相吻合。最后, 提出采用比功变化曲线进行分区, 并结合比功均值指标与上界指标对岩体进行实时分级的方法。

关键词: 岩石力学; 金刚石钻进; 旋转钻进比功; 花岗岩; 岩体实时分级

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 2907 - 06

STUDY ON SPECIFIC ENERGY OF DIAMOND DRILLING AND REAL-TIME CLASSIFICATION OF WEATHERED GRANITE

TAN Zhuoying^{1,2}, YUE Z Q³, THAM L G³, LEE C F³

(1. *State Key Laboratory of High-efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, Beijing 100083, China;*

2. *School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;*

3. *Department of Civil Engineering, University of Hong Kong, Hong Kong, China*)

Abstract: Based on the acquisition data of drilling process monitoring(DPM) system for diamond drilling in different granite grounds, specific energy of drilling and the corresponding variation characteristics with depth have been analyzed. The results show that the specific energy of diamond drilling(SEDD) increases with the decrease of weathered degree of the rock and is markedly divisional. The value of SEDD is nearly equal to that of specific energy of percussive drilling(SEPD) in moderately weathered granite. However, the value of SEDD is far less than that of SEPD in very strongly weathered granite and greater than that in slightly weathered granite. Obviously, it is reasonable to estimate SEDD by SEPD in none but moderate hard granite, which agrees with the practice of rotary drilling adaptable to the rock formation with moderate hardness or soft rocks. Finally, based on divisional property of specific energy curve with depth, combining the corresponding average value and upper threshold value of SEDD, a real-time classification approach for rock formation has been provided.

Key words: rock mechanics; diamond drilling; specific energy of rotary drilling; granite; real-time classification of rock

收稿日期: 2006 - 11 - 27; **修回日期:** 2006 - 12 - 30

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

作者简介: 谭卓英(1965 -), 男, 博士, 1987年毕业于中南工业大学资源开发工程系采矿工程专业, 现任教授, 主要从事岩土工程及防灾减灾方面的教学与研究工作。E-mail: markzhy_tan@163.com

1 引言

凿碎比功作为岩石可钻性的能量指标,揭示了岩石抵抗冲击破碎的难易程度及破碎效果,已广泛用于岩石分级、钻具选择和生产定额的制定^[1, 2]。然而,由于冲击与旋转破岩的机制不同,破碎单位体积岩石所需的能耗也不一样,岩石的冲击凿碎比功与旋转钻进比功指标值存在较大的差异,如果采用冲击凿碎比功来指导旋转钻进作业,势必产生较大的偏差。而且,由于室内试验模拟难以重建现场复杂的地质条件及原始应力与温度等环境要素,因此,试验指标亦难以揭示实际钻进条件下的真实情况^[3]。由此可见,在实钻过程中进行原位测试非常重要。自20世纪80年代以来,在钻井及岩土工程中,ENPASO等^[4],PAPERO^[5],Kajima^[6],KYPC及HDK^[7]等仪器钻进系统的成功研发及后续的试验与理论研究为旋转钻进实时判层研究提供了重要途径^[8~11]。近年来,香港大学与其他机构合作,成功开发了数字式钻进过程自动化监测系统^[12~14],并应用于斜坡土钉加固与地基钻探,为岩土工程实时判层、信息化施钻及管理提供了非常丰富的信息。本文基于钻进过程监测系统的监测参数,对不同花岗岩地基金刚石钻进过程中的钻进比功进行了研究,建立了金刚石钻进比功与岩石风化程度及岩体分级之间的关系,为利用旋转钻进比功进行岩石分级及判层提供了理论依据。

2 试验条件

2.1 试验场址概况

本研究以香港风化花岗岩地基钻探工程为背景,为了充分反映花岗岩地层中金刚石旋转钻进比功的变化规律,分别在普通风化花岗岩、充填土-风化花岗岩及复杂风化花岗岩地层中进行试验。

钻孔揭露的地层情况表明,在普通花岗岩地层中,从地表(无表土层)至终孔深度范围,地层主要为全风化(V)~轻度风化(II)的花岗岩,风化程度由浅至深逐渐减弱,具有很强的序次性。充填土-风化花岗岩地层由上覆充填土、全风化~微风化花岗岩组成,风化等级为V~II级,各层厚度不一。此地层与普通风化花岗岩地层的区别是有层厚为7.10 m的充填土层,属混合土。而花岗岩风化程度的变化与普通风化花岗岩地层相似。在复杂风化花岗岩地层中,由上覆充填土、全风化~中等风化花

岗岩(III级)组成。该地层中花岗岩风化程度多变,岩石单元变化复杂。其中,上覆充填土的厚度为1.00 m,全风化花岗岩(V级)厚10.65 m,其下为强风化与中等风化花岗岩(VI/III~III级)交替地层,厚度为29.74 m,再其下的岩石变得更弱、更复杂。强风化、中等风化甚至全风化花岗岩均有出现,在-49.25~-52.32 m及-53.00~-53.83 m深度区间重又出现全风化花岗岩,不同风化程度的软弱夹层均有出现,地层中不同风化程度的花岗岩变化极其复杂。

2.2 试验钻机及监测系统

为便于比较,试验钻机仍采用R-20型回转式钻机,岩芯钻进采用直径为 $\phi 115$ mm的金刚石钻头 and T2-101双筒岩芯套管,岩芯直径为84 mm,钻杆质量为6.0 kg/m,这些参数与在简单风化花岗岩及充填土-风化花岗岩地层中的钻机一致。为了全面掌握场址的岩土工程特性,在3种不同地层中共布置100多个钻孔。采用钻进过程监测(drilling process monitoring, DPM)系统对钻孔过程中的压力、冲洗压力、转速和位移等参数进行实时监测。下面以各地层中的典型钻孔进行分析。

3 旋转钻进比功随地层深度的变化

DPM系统的监测参数有轴压、转速、钻头位移及穿孔速率等。为了便于标定,在监测过程中,由地质工程师进行人工录孔。

根据能量守恒及转化原理,对金刚石旋转钻进过程中的能量进行分析,并建立了有关能量的计算公式^[15]。旋转钻进比功可定义为:在一定的旋转钻进条件下,在单位钻进时间内钻头旋转破碎单位体积岩石所消耗的钻进能量,用公式可表示为

$$E_s = \frac{P_{\text{r}}}{Q} = \frac{P_{\text{r}}}{SV} \quad (1)$$

式中: P_{r} 为与岩石破碎有关的能量^[15], Q 为钻头单位时间内破碎岩石的体积, S 为钻头破碎孔底岩石的面积, V 为穿孔速率。

根据式(1)可获得不同花岗岩场址地基钻探过程中旋转钻进比功随钻孔深度变化的试验曲线,如图1~3所示。

4 金刚石钻进比功在不同花岗岩地层中的分布

4.1 金刚石钻进比功在普通风化花岗岩中的分布

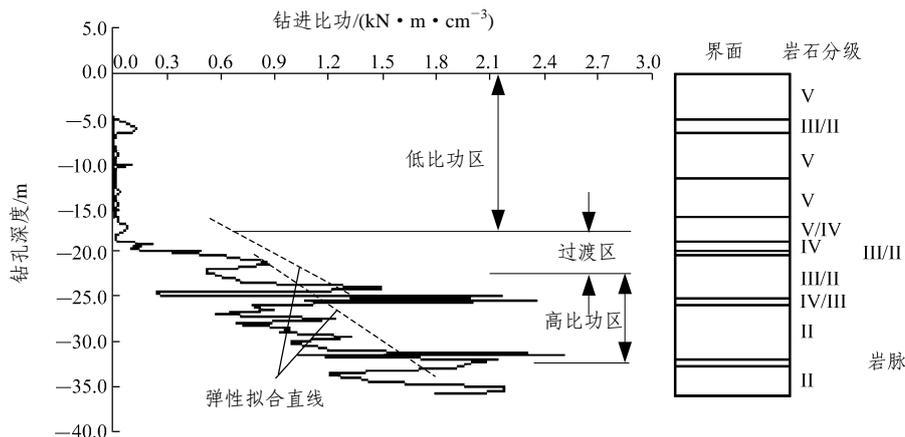


图 1 普通风化花岗岩地层中金刚石钻进比功随钻孔深度的变化曲线

Fig.1 Variation curves of specific energy of diamond drilling with depth of borehole in generally weathered granite formation

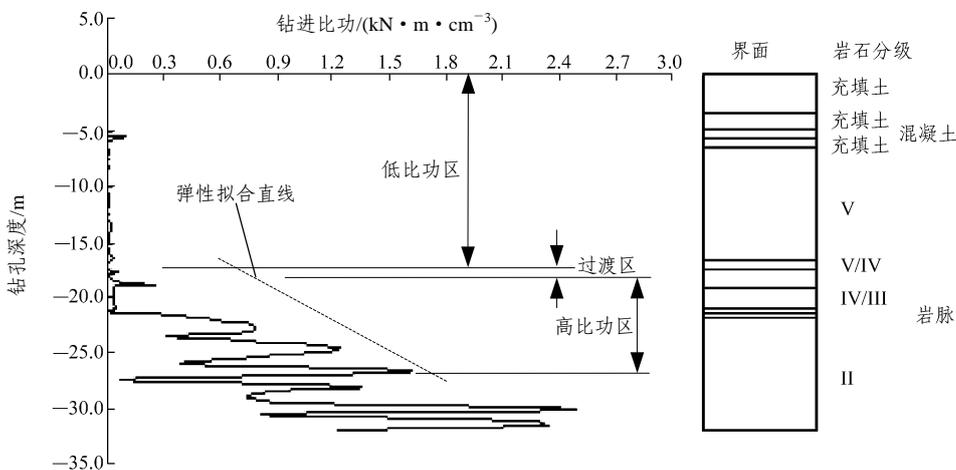


图 2 充填土 - 风化花岗岩地层中金刚石钻进比功随钻孔深度的变化曲线

Fig.2 Variation curves of specific energy of diamond drilling with depth of borehole in fill-weathered granite formation

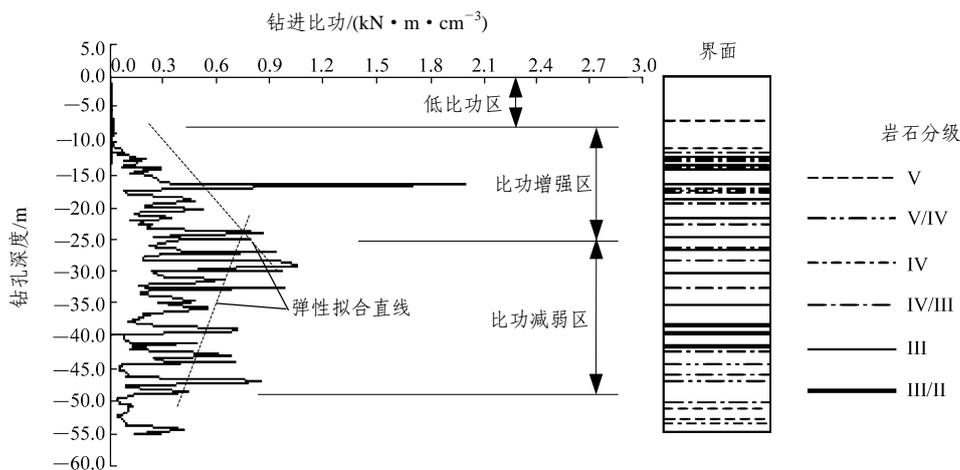


图 3 复杂风化花岗岩地层中金刚石钻进比功随钻孔深度的变化曲线

Fig.3 Variation curves of diamond drilling specific energy with depth of borehole in intricate weathered granite formation

从图 1 可知, 在此地层中, 钻进比功随岩石风化程度的减弱而增大, 其钻进比功值的变化如表 1

所示。从表 1 可知, 随着风化程度的减弱, 平均钻进比功增大, 反映了岩体随风化程度的减弱, 抵抗

表1 金刚石钻进比功在普通风化花岗岩地层中的分布
Table 1 Distribution of diamond drilling specific energy in generally weathered granite formation

风化程度分级	钻进比功/(kN·m·cm ⁻³)	
	均值	变化区间
V	0.019 6	0.004 5~0.111 3
V/IV	0.039 0	0.010 5~0.074 4
IV	0.284 0	0.107 5~0.497 8
IV/III	0.470 2	0.064 0~1.497 1
III/II	0.602 1	0.247 0~0.943 9
II	1.443 4	0.568 2~2.353 4

破坏能力增强的渐变性质。尽管钻进比功在不同风化程度的地层中具有明显的分区性，但变化范围较大，不同风化程度岩体的钻进比功值，其下界指标低于次级风化程度岩体的上界指标，即不同风化程度岩体的钻进比功变化区间呈现相互交叉的特征。这进一步揭示了岩体非连续及非均质的本质。由于不同风化程度的岩体中必然包含各种节理、裂隙甚至软弱夹层等结构面，因此钻进比功值会出现比较低的下界值。然而，采用试验指标进行岩石分级时，岩石中结构面的含有率将大大降低，从而增大了钻进比功指标的下门槛值，缩短了变化范围，在应用上对于完整性好的岩体才是合适的。

事实上，对于工程岩体的划分，要求可操作性强，不可能也无必要划分得太细。根据图 1，可将钻进比功值划分为 3 个区间，即低比功区、过渡区和高比功区。其深度范围、钻进比功平均值及变化区间如表 2 所示。

表2 根据金刚石钻进比功进行的普通风化花岗岩分类
Table 2 Classification of generally weathered granite formation by specific energy of diamond drilling

钻进比功区间	岩石类型	深度/m	钻进比功/(kN·m·cm ⁻³)	
			均值	变化区间
低比功区	软岩	-4.00~-18.58	0.042 1	0.004 5~0.232 4
过渡区	中硬岩	-18.58~-24.00	0.662 0	0.246 6~1.497 1
高比功区	硬岩	-24.00~-35.67	1.378 0	0.247 0~2.466 5

显然，根据钻进比功均值的变化，可将相应区段的岩体划分为软岩、中硬岩及硬岩。从图 1 可知，软岩层主要包括全风化及强风化花岗岩，其中含少量中等风化~微风化的岩石夹层，这类岩石也构成了此地基中的过渡层即中硬岩，而硬岩层则主要由

微风化花岗岩组成，局部含花岗岩岩脉。

4.2 金刚石钻进比功在充填土 - 风化花岗岩中的分布

在充填土 - 风化花岗岩地层中，钻进比功的分布见表 3。在此地层中，钻进比功的均值指标大多低于普通风化花岗岩地层中的指标值。由此可见，此地层岩体抵抗金刚石钻头旋转破坏的能力相对普通风化花岗岩地层较弱。从其埋藏特点分析，此地基原属坡地，后因建筑而充填平整成当前地基，其岩基应属出露岩体，说明其风化作用相对较普通风化花岗岩地基强烈。

表3 金刚石钻进比功在充填土 - 风化花岗岩地层中的分布
Table 3 Distribution of specific energy of diamond drilling in fill-weathered granite formation

分类	钻进比功/(kN·m·cm ⁻³)	
	均值	变化区间
充填土	0.021 5	0.000 0~0.114 5
V 级岩体	0.013 1	0.001 7~0.078 0
V/IV 级岩体	0.103 5	0.148 0~0.217 5
IV 级岩体	0.112 7	0.025 8~0.261 3
IV/III 级岩体	0.265 1	0.006 2~0.271 5
II 级岩体	1.223 0	0.076 6~2.493 5

与普通风化花岗岩地层的分析相同，亦可将图 2 中的钻进比功变化曲线划分为 3 部分。软岩主要为全风化~强风化花岗岩，中硬岩为中等风化花岗岩及部分岩脉，硬岩为微风化花岗岩。此地层中的过渡区相对较小，仅 1.50 m，充填土中夹杂有 0.49 m 厚的古老混凝土块。

根据金刚石钻进比功进行的充填土 - 风化花岗岩分类如表 4 所示。从表中可知，各区段的钻进比功值比普通风化花岗岩的相对要低，在软岩、中硬岩及硬岩中分别降低了 35.87%，26.22% 和 18.37%。显然，随着地层深度的增大，风化影响减弱。

表4 根据金刚石钻进比功进行的充填土 - 风化花岗岩分类
Table 4 Classification of fill-weathered granite formation by specific energy of diamond drilling

钻进比功区间	岩土类型	深度/m	钻进比功/(kN·m·cm ⁻³)	
			均值	变化区间
低比功区	充填土	-3.500~-7.100	0.019 1	0.000 0~0.114 5
	软岩	-7.100~-21.500	0.027 0	0.001 7~0.271 5
过渡区	中硬岩	-21.50~-23.000	0.488 4	0.261 3~0.783 3
高比功区	硬岩	-23.00~-31.868	1.124 9	0.076 6~2.493 5

4.3 金刚石钻进比功在复杂风化花岗岩中的分布

在此复杂地层中, 钻进比功的分布如表 5 所示。从表中可知, 钻进比功多数介于普通风化花岗岩与充填土 - 风化花岗岩之间, 其变化范围的特点与上述 2 种岩层相同。

表 5 金刚石钻进比功在复杂风化花岗岩地层中的分布
Table 5 Distribution of specific energy of diamond drilling in intricate weathered granite formation

风化程度分级	钻进比功/(kN·m·cm ⁻³)	
	均值	变化区间
V	0.032 8	0.000 0~0.119 7
V/IV	0.126 3	0.046 6~0.695 5
IV	0.266 9	0.039 0~0.385 1
IV/III	0.295 6	0.001 8~2.005 0
III	0.349 7	0.151 9~0.979 8
III/II	0.364 7	0.001 8~1.050 3

从图 3 可知, 由于此地层的复杂性, 钻进比功随地层深度变化曲线表现为低→高→低的变化态势。根据这一特点, 可将其划分为低比功区、比功增强区及比功减弱区, 结果见表 6。从钻进比功的变化特点分析, 比功增强区及减弱区的指标值均低于上述 2 种风化花岗岩地层中的相应指标值。从图 3 可知, 增强曲线与减弱曲线基本对称, 其与深度坐标轴所包络的面积相近, 表明在增强和减弱区的钻进过程中, 能耗基本相同, 抵抗旋转钻进破坏的能力相近。因此, 均属于中硬岩石类型。

表 6 根据金刚石钻进比功进行的复杂风化花岗岩分类
Table 6 Classification of intricate weathered granite formation by diamond drilling specific energy

比功区间	岩石类型	深度/m	钻进比功/(kN·m·cm ⁻³)	
			均值	变化区间
低比功区	软岩	-1.00~-11.65	0.011 8	0.000 0~0.088 8
比功增强区	中硬岩	-11.65~-29.00	0.328 0	0.047 6~2.005 0
比功减弱区	中硬岩	-29.00~-53.83	0.255 1	0.033 9~0.979 8

4.4 基于金刚石钻进比功的花岗岩岩体分级

根据以上试验结果分析, 可获得不同风化程度花岗岩地层中金刚石钻进比功的分布及其均值, 如表 7 所示。其中, 变化范围为同级岩体中钻进比功值的下界值与上界值。从表中可知, 钻进比功的均

表 7 金刚石钻进比功与花岗岩风化程度分级
Table 7 Specific energy diamond drilling of and classification of granite formation by weathered grade

分级	钻进比功/(kN·m·cm ⁻³)	
	均值	变化区间
V	0.021 8	0.001 7~0.119 7
V/IV	0.089 6	0.010 5~0.695 5
IV	0.221 2	0.025 8~0.497 8
IV/III	0.343 6	0.001 8~2.005 0
III	0.349 7	0.151 9~0.979 8
III/II	0.483 4	0.001 8~1.050 3
II	1.333 2	0.076 6~2.493 5

值指标随风化程度的降低而增大, 但过渡级指标偏小。如 V/IV 级的指标值均偏向于 V 级风化岩体的指标值, IV/III 级的指标值均偏向于 IV 级风化岩体的指标值, 而 III/II 级的指标值均偏向于 III 级风化岩体的指标值, 这说明过渡级岩体的风化程度以前一级为主。此外, 不同风化程度的岩体中, 钻进比功的变化范围较大, 这是由岩体的非连续及非均质等性质决定的。即使在硬度较大的硬岩层中, 也可能出现比较低的下门槛值。正因为如此, 岩体分类必须先根据钻进比功曲线进行分段, 然后才能分级。

此外, 根据钻进比功变化曲线分区及指标进行统计分析, 可获得花岗岩地层的分类, 如表 8 所示。根据冲击凿碎比功对岩石进行分级的结果^[2], 在极软的页岩及凝灰岩等岩石中, 冲击凿碎比功值为 0.000~0.186 (kN·m)/cm³, 在石灰岩、砂页岩等软岩中为 0.196~0.284 (kN·m)/cm³, 在花岗岩、硅质灰岩等中硬岩中为 0.294~0.480 (kN·m)/cm³, 在石英岩、细粒花岗岩等硬岩中为 0.490~0.676(kN·m)/cm³。将金刚石钻进比功均值与之对比可知, 在软岩

表 8 根据钻进比功变化曲线分区及指标进行的花岗岩地层分类

Table 8 Classification of granite formation by subsection of variation curves and indexes of drilling specific energy

岩石类型	钻进比功/(kN·m·cm ⁻³)	
	均值	变化区间
充填土	0.019 1	0.000 0~0.114 5
软岩	0.027 0	0.001 7~0.271 5
中硬岩	0.433 4	0.033 9~2.005 0
硬岩	1.251 5	0.076 6~2.493 5

中金刚石钻进比功显著低于冲击凿碎比功；在中硬岩中，金刚石钻进比功与冲击凿碎比功接近；在硬岩中，金刚石钻进比功显著高于冲击凿碎比功。因此，只有在中等硬度的岩层中，采用冲击凿碎比功对岩体进行分级才是合适的。

5 结 论

(1) 金刚石钻进比功曲线随岩石风化程度的减弱而增大，具有明显的分区性。根据钻进比功可实现岩石可钻性实时分级与地层的实时判层。

(2) 在风化程度分级及岩体强度分级中，由于岩体的复杂性，钻进比功指标的变化区间较大，具有相互交叉的现象，宜结合钻进比功变化曲线进行分区，并采用钻进比功均值指标与上界指标对岩体进行分级。

(3) 在软的全风化及强风化花岗岩中，金刚石钻进比功值低于冲击凿碎比功值；在中等硬度的风化花岗岩中，金刚石钻进比功值与冲击凿碎比功值接近；在硬度较大的微风化花岗岩中，金刚石钻进比功大于冲击凿碎比功。由此可见，只有在中等硬度的花岗岩中，用冲击凿碎比功来估计金刚石钻进比功才是合适的。在实验室进行的岩石分级一般只适用于完整性好的岩体。

值得注意的是，以上研究是针对风化花岗岩这一特定岩石及地层所得出的结论，其普遍性还有待于更广泛的试验与统计分析来确定。

参考文献(References):

- [1] WHITE C G. 岩石可钻性指数[M]. 边蔚奇 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1980.(WHITE C G. A rock drillability index[M]. Translated by BIAN Weiqi. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1980.(in Chinese))
- [2] 徐小荷, 余 静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 52 - 56, 340 - 341.(XU Xiaohe, YU Jing. Theory of rock fragmentation[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984: 52 - 56, 340 - 341.(in Chinese))
- [3] 谭卓英, 蔡美峰, 岳中琦, 等. 基于岩石可钻性指标的地层界面识别的理论与方法[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(9): 803 - 807.(TAN Zhuoying, CAI Meifeng, YUE Z Q, et al. Theory and approach of identification of ground interfaces based on rock drillability index[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(9): 803 - 807.(in Chinese))
- [4] GUI M W, BOLTON M D, SOGA K, et al. Instrumented borehole drilling using ENPASOL system[C]// Proceedings of the 5th Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics. [S.l.]: A. A. Balkema, 1999: 577 - 581.
- [5] FORTUNATI F, PELLEGRINO G. The use of electronics in the management of site investigation and soil improvement works: principles and applications[C]// Geotechnical Site Characterization, Proceedings of the 1st International Conference on Site Characterization—ISC'98. Atlanta, USA: [s.n.], 1998: 359 - 364.
- [6] SUZUKI Y, SASAO H, NISHI K, et al. Ground exploration system using seismic cone and rotary percussion drill[J]. Journal of Technology and Design, Architectural Institute of Japan, 1995, 1: 180 - 184.
- [7] 鄢泰宁, 汤凤林. 钻探最优化技术在俄罗斯和中国的发展与现状[J]. 西部探矿工程, 1999, 11(2): 70 - 72.(YAN Taining, TANG Fenglin. Development and actuality of drilling optimization techniques in Russia and China[J]. West-China Exploration Engineering, 1999, 11(2): 70 - 72.(in Chinese))
- [8] PFISTER P. Recording drilling parameters in ground engineering[J]. J. Ground Eng., 1985, 18(3): 16 - 21.
- [9] PAULO C. On the use of drilling parameters in rock foundations[C]// Geotechnical Site Characterization, Proceedings of the 1st International Conference on Site Characterization—ISC'98. Atlanta, USA: [s.n.], 1998: 347 - 352.
- [10] ZACAS M, KAVADAS M, MIHALIS I. The use of recording drilling parameters in rock mass classification[C]// Proceedings of the 8th ISRM Congress. [S.l.]: [s.n.], 1995: 1 121 - 1 124.
- [11] GUI M W, SOGA K, BOLTON M D, et al. Instrumented borehole drilling for subsurface investigation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(4): 283 - 291.
- [12] 岳中琦, 李焯芬, 罗锦添, 等. 香港大学钻孔过程数字监测仪在土钉加固斜坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1 685 - 1 690.(YUE Z Q, LEE C F, LAW K T, et al. Use of HKU drilling process monitor in slope stabilization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11): 1 685 - 1 690.(in Chinese))
- [13] YUE Z Q, LEE C F, LAW K T, et al. Automatic monitoring of rotary-percussive drilling for ground characterization—illustrated by a case example in Hong Kong[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(4): 573 - 612.
- [14] TAN Z Y, CAI M F, YUE Z Q, et al. Application and reliability analysis of DPM system in site investigation of HK weathered granite[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 12(6): 481 - 488.
- [15] 谭卓英, 岳中琦, 蔡美峰. 风化花岗岩地层旋转钻进中的能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 478 - 483.(TAN Zhuoying, YUE Z Q, CAI Meifeng. Analysis of energy for rotary drilling in weathered granite formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 478 - 483.(in Chinese))