

DOI: 10.11779/CJGE201507021

基于钻进参数的岩土地层结构识别技术与方法

谭卓英, 李文, 岳鹏君, 王莉, 李季阳, 齐宽, 周栋

(北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 岩土地层结构是影响工程稳定与安全的重要因素, 是地质及岩土工程勘测的主要内容。研发了一种地层地质界面识别系统, 阐述了其基本组成和工作原理, 建立了钻进过程识别码及岩土地层结构实时识别方法; 通过花岗岩地基钻进试验研究, 确定了岩体风化等级以及土层/散体、碎裂岩体及整体岩体结构的比能值范围, 建立了金刚石钻进比能的地层结构分级标准, 比能值分别是土层及散体为 $0.0017\sim 0.6955\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{cm}^3$, 碎裂岩体为 $0.0258\sim 0.9798\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{cm}^3$, 整体岩体为 $0.0018\sim 2.4935\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{cm}^3$ 。研究表明, 该方法与岩土勘测结果一致, 可用于地层地质及岩土地层结构的实时识别, 为岩土工程智能勘测提供了新的途径。

关键词: 仪器钻进系统; 钻进过程; 钻进比能; 岩土地层; 结构识别

中图分类号: TU452; TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)07-1328-06

作者简介: 谭卓英(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程及采矿工程的教学与研究。E-mail: markzhy_tan@163.com。

Techniques and approaches for identification of geo-formation structure based on diamond drilling parameters

TAN Zhuo-ying, LI Wen, YUE Peng-jun, WANG Li, LI Ji-yang, QI Kuan, ZHOU Dong

(School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The geo-formation structure is an original impact factor for the stability and safety of geotechnical and geological engineering and also an important content of field survey. A geo-formation identification while drilling (GIWD) system is developed, and its operating principles as well as the basic units are illustrated. The drilling process is coded, and a real-time identification method for the geo-formation structure is established. Besides, the ranges of specific energy values in weathered rock and structural rock mass of soil layer/scattered, cracked and intact granite are determined. The classification standard of diamond drilling specific energy for geo-formation is formulated and verified by in-situ drilling tests. The specific energy values are $0.0017\sim 0.6955\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{cm}^3$ for the soil layer and scattered structure, $0.0258\sim 0.9798\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{cm}^3$ for the cracked rock and $0.0018\sim 2.4935\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{cm}^3$ for the intact rock, respectively. The results show that the above approach agrees with the traditional investigation and can further be applied for real-time recognition of strata and geotechnical structure, and it may provide a new approach for geotechnical engineering survey.

Key words: instrumented drilling system; drilling process; specific energy of penetration; geo-formation; identification of geo-formation structure

0 引 言

在地质和岩土工程中, 获取地层地质结构参数的常规方法主要是钻探及其相关的原位测试技术, 包括静力触探试验 (cone penetration test: CPT)、圆锥动力触探 (dynamic penetration test: DPT)、标准贯入试验 (standard penetration test: SPT)、岩石可钻性试验 (rock drillability test: RDT) 以及钻孔测井技术 (borehole geophysical survey techniques-BGST); 地球物理探测方法 (geophysical detecting techniques: GDT), 如电法、磁法、电磁法、地震波法、地震 CT、

重力法、声波及超声波法已广泛应用于地层层序学及地质勘探中地层层序界面的识别^[1]。就技术而言, 基于钻孔的触探试验和岩芯资料是岩土工程勘察和地质钻探中最可靠的方法。然而, 钻孔勘探中钻孔编录、取样及触探试验、室内物理力学参数测试等工作量巨大, 耗时长, 费用高。据统计, 在地基钻孔勘探中, 纯钻孔时间在整个钻孔勘探中的耗时比例不到 30%,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51174013); 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 项目 (2010CB731501)

收稿日期: 2014-08-23

钻孔勘探费用一般占整个工程建设费用的 15%~28%。

在地质钻探中, 钻孔深度通常达数千米。目前, 金属矿山开采最大深度已达到 4500 m, 中国有 1/3 地下金属矿山开采深度超过 1000 m; 在煤矿中, 近 10 年来超 1000 m 深井的数量也大幅增长; 隧道埋深已经接近 3000 m, 如锦屏电站引水隧道最大埋深 2500 m; 地球科学钻探深度已超过 10000 m, 全球超过 4000 m 的深井达数十口, 如前苏联 SG-3 井达到了 12262 m。显然, 随着钻孔深度的增大, 地质条件的复杂性增强, 用于取样、提钻等非钻进处理时间大大增加。中国科学钻探工程取芯钻井 CCSD-1 深度达 5158 m, 项目共耗资 16618.9 万元, 历时近 4 a 完成, 共获取岩芯 4400 m, 取芯率 85.30%。而地球物理勘探方法一则受外界干扰因素多, 单一方法的解译精度不高, 且存在不确定性、多解性, 需要结合多种方法才能进行判层; 二则难以提供地质及岩土工程所需的全部基楚数据, 难以对地层地质及岩土体分级。

因此, 要获得岩土工程所需物理力学参数及地层分级的基础数据, 还必须依赖钻孔。充分利用钻孔, 发展仪器钻进技术 (instrumented drilling technique), 是 21 世纪岩土工程发展的重要前沿。ENPASOL^[2]、PAPERO^[3]、Kajima^[4]、KYPC 及 HDK^[5]、DPM^[6] 以及 GIWD^[7] 等仪器钻进系统在钻孔过程中实现了对钻机运行参数的实时监控, 运用钻进参数对地层进行粗略判层并获取有关岩土特性。随钻系统 (measurement while drilling; MWD) 致力于钻孔轨迹描述、工具方向、地层特性以及其它状态压力、扭矩、温度等孔内物理量的直接测量^[8], 但由于钻孔条件的复杂性, 测量元件受孔内温度、孔压、振动、电磁等环境干扰以及动态条件下元件难以与孔壁耦合接触等限制, MWD 在测量方法以及深孔钻进时动力输送、信号传输等方面还存在严重的技术瓶颈^[9], 间接测量尤显重要。本文基于地层地质界面仪器识别系统, 对不同花岗岩地层地质结构进行研究。

1 地层地质界面识别系统

1.1 系统的基本组成与工作原理

本系统由感应、数据采集及数据分析 3 个子系统组成, 如图 1 所示。其中, 感应系统由压力、流量、温度、振动、应力、转速及位移等传感器组成, 分别记录钻机的各种工作压力、冲洗液流量及燃料耗量、油温、钻具振动加速度、钻杆应力波、钻具转速及钻头位移。

数据采集系统由放大器、数字应变仪及数据集成盒组成, 将传感系统采集的数据进行放大和转换, 并

输入到集成盒, 然后由集成盒将数据上传到分析系统的各终端。

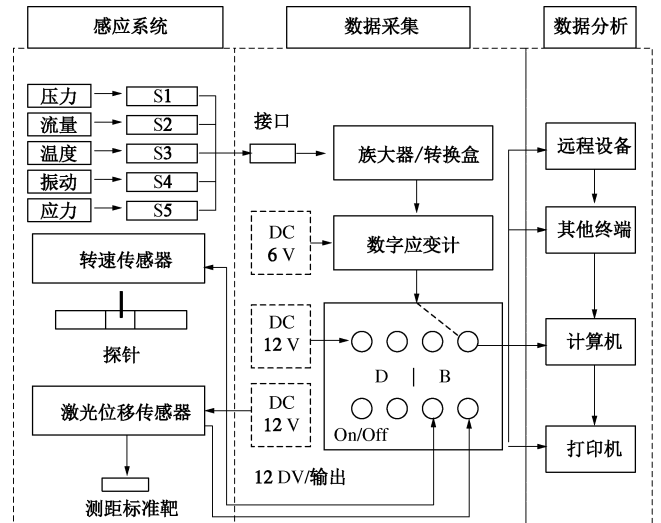


图 1 地层地质界面仪器识别系统基本构成

Fig. 1 Structure of geo-interface instrumented drilling system

1.2 系统的编码原则

在地质及岩土工程勘察钻孔中, 通常采用金刚石旋转钻进, 一个完整的钻进过程需要钻机的许多动作来实现。根据钻孔过程中动作发生的先后, 主要过程包括: ①加载钻杆; ②钻机水平向前运动; ③钻杆联接; ④钻进; ⑤提升加长杆; ⑥拆接钻杆; ⑦钻机水平向后运动; ⑧卸载钻杆; ⑨原位测试, 如标准触探试验; ⑩空闲。以上主过程又包括若干个次级子过程, 以纯钻进过程为例, 各参数状态阈值开关见表 1。

压力、流量、温度、振动、应力、转速及位移等工作参数的状态将对应一个多位字符串, 按计算机二进制数制的处理模式, 根据状态数的多少, 可以是 8 的倍数位 8X 字符串。实际状态数不一定是 8X, 此时, 缺省的状态数以 0 填补。参见表 2。以 8 位字符串为例, 钻进过程的主要识别码为 1010 0101, 第一位数“1”表示进给压力为“开”状态, 即施加轴压力; 第二位数字“0”表示反馈压力为“关”状态, 即无调压力; 第三位数字“1”表示钻进过程中冲洗压力为“开”状态。这些字符串形成一个信号链, 对应一个过程, 根据此信号链即可对此过程进行辨识。值得指出的是, 有些过程可能存在互不相干的多个子过程或动作。例如, 在钻进过程中, 由于顺孔和排渣的需要, 在对钻具施加轴压的同时, 要上下提升钻杆。此时, 除存在进给压力即轴压外, 还同时存在调节的反馈压力。而且, 由于调节钻孔方向的需要, 水平油缸可能前后运动, 施加一定的弯矩来纠偏。此时, 存在多个信号链, 均属于同一过程。因此, 一个过程所对应的信号链具有多维性。如同样是钻进过程, 当钻进深度较大, 需

表 1 钻进过程及工作参数的状态

Table 1 States of operational parameters during penetrating process

子过程	进给压力	反馈压力 (调压力)	冲洗压力	向后运动	向前运动	钻具/电动葫芦旋转	位移
纯钻进	施加轴推力	1	0	1	0	0	1
	施加扭矩	1	1	1	1	1	0
	施加扭矩	1	0	1	0	0	1
	冲洗	1	0	1	0	0	1/0
	0	1	1	0	0	0	0
活塞推程	松开卡盘	0	0	1	0	0	0
	松开卡盘	0	0	1	0	0	0
	提升旋转头	0	1	1	0	0	0
	提升旋转头	0	1	1	0	0	0
	旋紧卡盘	0	1	1	0	0	0
旋紧卡盘	0	1	1	0	0	0	

表 2 钻进过程识别码

Table 2 Identification codes of drilling process

子过程	识别码	
纯钻进	施加轴推力	1X1X XX01
	施加扭矩	XX1X XX01
	冲洗	XX10 0X0X
活塞推程	松开卡盘	0010 0000
	提升旋转头	0110 0001
	提升旋转头	0110 0001
	旋紧卡盘	0110 0000

要施加调压力而非轴压时,其识别码为 0110 0101。通过增加监测参数,如振动及应力波的监测,可增加数据链的长度,降低信号链的维数,增强信号链的唯一性,提高过程识别的效率。

1.3 过程识别

GIWD 系统的过程识别包括如下步骤: ①读取传感器采集的数据; ②根据标定方程,将采集的原始数据转化为可读的物性参量; ③将物性参量与阈值比较,对子过程的状态进行判断,产生状态数“0”或“1”; ④由状态数生成子过程信息链,即子过程的识别码; ⑤读取子过程验证码,对子过程进行检验; ⑥按 56 位生成过程码; ⑦读取过程验证码,对主过程进行检验; ⑧生成过程曲线。图 2 是识别过程的逻辑框图。

2 试验及数据分析

2.1 工程背景

某地基钻探工程。这些场址均为典型花岗岩地层,岩土地层结构主要为上覆层状土层以及散体、碎裂及整体结构的花岗岩层。其中,普通风化花岗岩场址及充填土风化花岗岩场址主要为侏罗纪到白垩纪的中粒花岗岩;复杂风化花岗岩场址则主要为侏罗纪到白垩纪的细粒至中粒花岗岩。这些场址的工程地质资料非常有限。为了查清其工程地质条件,各布置了 30 余个垂直勘探钻孔,采用金刚石旋转钻进。其中,若有 1/3 技术钻孔用于 GIWD 系统的监测。本研究将

GIWD 仪器钻进系统安装在液压旋转钻机上,通过对钻进过程中钻机工作参数的实时监测,获取钻进过程中各种压力、位移、转速等数据,通过过程识别获得纯钻进子过程,运用位移、穿孔速率及钻进比能对岩土地层结构进行识别,结合钻孔编录、SPT 原位测试及综合地质分析,对地层结构的识别结果进行检验。

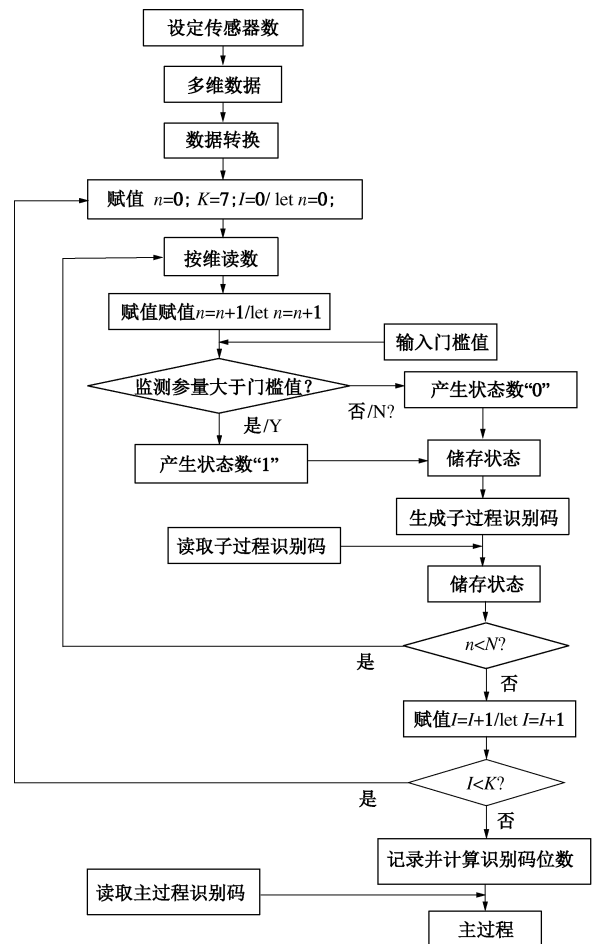


图 2 GIWDS 系统过程识别的逻辑框图

Fig. 2 Logic flowchart of procedure identification for GIWD

2.2 试验结果及分析

(1) 基于钻进位移的地层结构识别

对钻进过程进行识别, 可以获得钻进参数在各子过程中随时间的变化曲线; 提取纯钻进过程, 可获得钻孔作业时各参数随孔深的变化特征^[1]。

如图 3, 为典型钻孔 DH-1 中岩石地层随钻进位移的变化。从图 3 左图可知, 钻进位移随时间变化曲线的斜率(即穿孔速率)是变化的, 大体上分为 2 段, 在孔深 19.50 m 深度以上曲线较陡, 斜率梯度较大, 穿孔速率高, 平均速率为 19.67 cm/min; 在 19.50 m 深度以上区间, 曲线较平缓, 斜率梯度较小, 穿孔速率低, 平均为 4.79 cm/min。其中, 在开孔段上部地层厚度 1.31 m 的斜率梯度小, 与深部位移曲线的斜率相近。根据速率的高差与统计分析^[1], 该钻孔地层岩体结构可分为 2 个大类。

图 4 为另一地基典型钻孔 DH-2 中岩石地层随钻进位移的变化。从图 4 左图可知, 可分为 3 段, 在 5.42

m 孔深以上 1.49 m 厚度区间, 平均穿孔速率为 45.17 cm/min; 在孔深 17.87 m 深度以上曲线斜率梯度较大, 平均穿孔速率为 31.68 cm/min; 在 17.87 m 深度以下区间, 曲线斜率梯度较小, 穿孔速率为 4.93 cm/min。其中, 在开孔段上部地层厚度 0.77 m 的斜率梯度小, 与深部位移曲线的斜率相近, 平均穿孔速率为 4.97 cm/min。根据速率离差与统计分类, 该钻孔岩体结构可分为 3 类, 深部地层岩体结构与 DH-1 所揭露的岩层结构接近。

图 5 为另一地基典型钻孔 DH-3 中岩石地层随钻进位移的变化。从图 5 左图可知, 可分为 3 段, 在孔深 11.65 m 深度以上曲线斜率梯度大, 平均穿孔速率为 22.45 cm/min; 在 11.65~30.10 m 深度区间, 曲线较平缓, 斜率梯度较小, 平均穿孔速率为 5.30 cm/min,

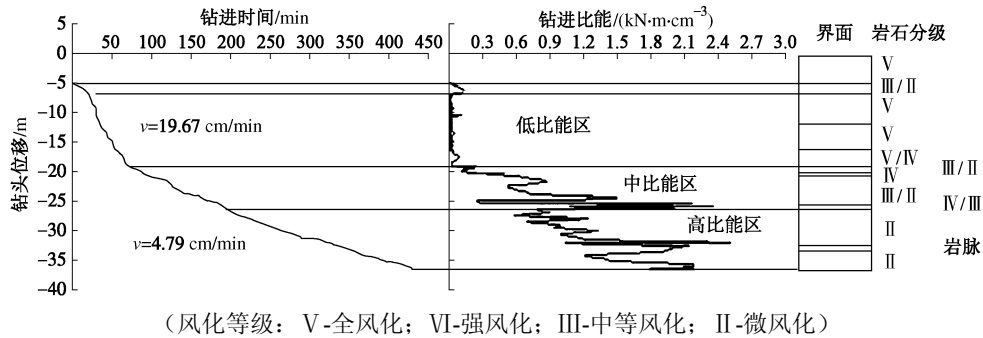


图 3 典型钻孔 DH-1 中地层结构随钻进位移的变化

Fig. 3 Change of geo-formation structure with drilling displacement in borehole No. DH-1

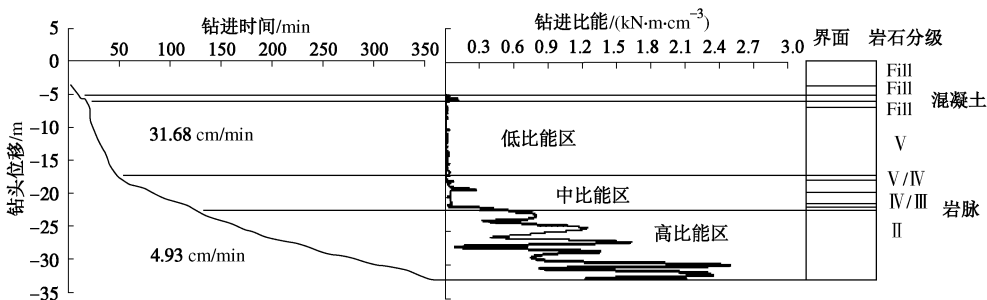


图 4 典型钻孔 DH-2 中地层结构随钻进位移的变化

Fig. 4 Change of geo-formation structure with drilling displacement in borehole No. DH-2

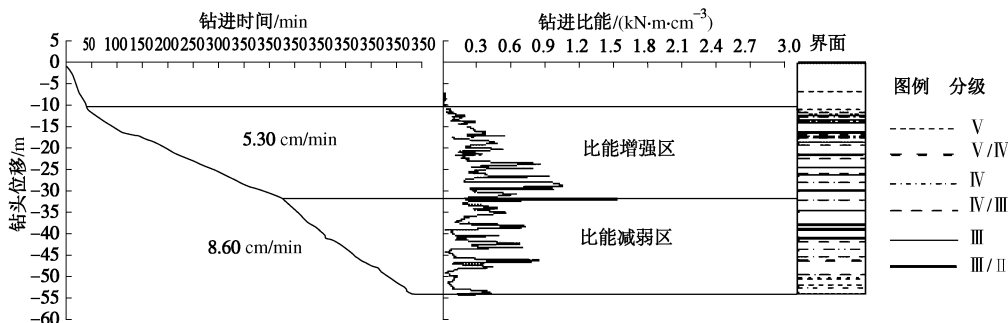


图 5 典型钻孔 DH-3 中地层结构随钻进位移的变化

Fig. 5 Change of geo-formation structure with drilling displacement in borehole No. DH-3

在 30.10 m 深度以下区间, 曲线趋陡, 斜率梯度增高, 平均穿孔速率为 8.60 cm/min。这说明该钻孔地层岩体结构经历 3 次转变, 根据离差与统计分类, 岩体结构可分为 3 类。其中, 11.65~30.10 m 区间穿孔速率与 DH-1 及 DH-2 深部的穿孔速率接近, 相对于平均速率的离差为 6.0%, DH-1 及 DH-2 孔深部岩体相对平均速率的离差分别为 4.2% 和 1.0%。因此, DH-3 孔 11.65~30.10 m 区间岩体结构与 DH-1 及 DH-2 深部所揭露的岩体结构接近。

(2) 基于钻进能量的岩体结构识别

由于穿孔速率指标与钻头磨损状态、布齿形式、轴压及转速等有关, 而且受钻机的工作方式影响。为了消除不确定性因素, 提高识别结果的广适性, 采用钻进比能指标对岩体结构进行判别分类。通过对钻进能量进行分析^[10-11], 建立钻进比能公式如下:

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

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, 由文献^[1]确定; D_o 为钻头外直径, 当为金刚石钻头钻进时, 为内、外直径之均值, 当为破坏式钻进时则为钻头外径之半; D_i 为钻头内直径, 当为破坏钻进时, $D_i=0$; V 为穿孔速率。

钻进过程中, 钻进比能的变化曲线分别见图 3~5。在 DH-1 及 DH-2 中, 钻进比能可分为低、中、高 3 个比能区。如在 DH-1 中, 19.50 m 以上区域为低能

耗区, 19.50~31.92 m 区间为比能增强区, 其中 19.50~24.87 m 区间为中比能区, 此为比能过渡区。随着钻孔深度或钻进位移的增大, 钻进比能逐渐增高, 说明地层抵抗钻进破坏的能力随深度增大而增强, 岩体结构的强度逐渐增高; 在 DH-3 中, 钻进比能的变化分 3 个区间, 11.65 m 以上区间为低比能区, 11.65~30.10 m 区间为比能增强区, 30.10~53.83 m 为减弱区。说明该地层抵抗钻进破坏的能力为弱, 后由弱到强, 再由强到弱, 该地层岩体强度变化大, 结构复杂。

为了对地层岩体结构进行精细识别, 采用已建立的斜率搜索法及聚类判别法^[12]对钻进过程比能曲线进行分析。地层岩体结构识别包括辨识判别和分类两个过程, 在统计分类中属于未知类及分类判别的范畴。通过设置合理的类间间距, 可以保证理论分类与实际的地层地质岩体结构一致。

2.3 地层结构的识别标准及检验分析

通过仪器钻进, 获得钻孔地层中钻进比能的分布及花岗岩分类见表 3。

为了建立地层结构的识别标准, 在进行以上仪器钻进的同时, 在钻孔过程中采用取样、录孔、标准触探及测井试验等原位测试方法, 并结合综合地质试验和分析, 获得钻孔柱状结构图(参见图 3~5 中的右图)。在此基础上, 根据钻进比能的分布及岩石风化等级对岩体地层结构进行分类和检验。花岗岩地层结构分类结果见表 4。

表 3 根据金刚石钻进比能进行的花岗岩分类

Table 3 Classification of granite formation by diamond penetrating specific energy

钻孔编号	比能区间 岩石类型	低比能区		过渡区 中硬岩	高比能区 硬岩
		土层	软岩		
DH-1	深度范围/m	—	-4.00~-18.58	-18.58~-24.00	-24.00~-35.67
	比能均值/(kN·m·cm ⁻³)	—	0.0421	0.6620	1.3780
	比能变化区间	—	0.0045~0.2324	0.2466~1.4971	0.2470~2.4665
DH-2	深度范围/m	-3.50~-7.10	-7.10~-21.50	-21.50~-23.00	-23.00~-31.87
	比能均值/(kN·m·cm ⁻³)	0.0191	0.0270	0.4884	1.1249
	比能变化区间	0.0000~0.1145	0.0017~0.2715	0.2613~0.7833	0.0766~2.4935
DH-3	深度范围/m	—	-1.00~-11.65	-11.65~-53.83	—
	比能均值/(kN·m·cm ⁻³)	—	0.0118	0.29156	—
	比能变化区间	—	0.0000~0.0888	0.0339~2.0050	—

表 4 金刚石钻进比能与花岗岩地层结构划分

Table 4 Diamond penetrating specific energy and classification of granite formation structure

岩体风化等级	V	V/IV	IV	IV/III	III	III/II	II
比能均值/(kN·m·cm ⁻³)	0.0218	0.0896	0.2212	0.3436	0.3497	0.4834	1.3332
岩体类型	土层	软岩		中硬岩		硬岩	
岩体结构类型	土层及散体			碎裂岩体		整体岩体	
比能范围/(kN·m·cm ⁻³)	0.0017~0.6955			0.0258~0.9798		0.0018~2.4935	

从表4可以看出,对于风化等级V及V/IV的土层及软岩,其结构类型可以归入土层及散体,其比能范围为 $0.0017\sim 0.6955\text{ kNm/cm}^3$;对于风化等级IV—III的中硬岩,结构类型为碎裂或层状碎裂岩体,比能范围为 $0.0258\sim 0.9798\text{ kNm/cm}^3$;对于风化等级III/II—II的硬岩,包括新鲜岩,岩体结构可划归整体岩体,其比能范围为 $0.0018\sim 2.4935\text{ kNm/cm}^3$ 。

3 结 论

(1)建立了地层地质界面仪器识别系统(GIWD)钻进过程的识别方法,可实时监测钻机工作参数并对钻进子过程进行实时识别,运用纯钻进子过程位移曲线及穿孔速率指标可实现地层岩体结构的识别。

(2)基于花岗岩地层金刚石钻进,确定了钻进比能指标,建立了地层结构的分类判别标准,可在钻进过程中通过GIWD仪器钻进系统实现地层结构的实时识别。

参考文献:

- [1] 谭卓英. 岩土工程界面识别理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (TAN Zhuo-ying. Identification theory and method of geotechnical engineering interfaces[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))
- [2] HAMELINJ P, HASS G, BURGESS N. Instrumented borehole drilling using ENPASOL system, Field Measurements in Geomechanics[C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics-FMGM 99. Singapore, 1999: 577 - 581.
- [3] 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 first International Conference on Site Characterization-ISC'98. Atlanta, 1998: 359 - 364.
- [4] 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.
- [5] 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 Tai-ning, TANG Feng-lin. Development and present status of optimum drilling technology in Russia and China[J]. West-China Exploration Engineering, 1999, 11(2): 70 - 72. (in Chinese))
- [6] TAN Zhuo-ying, CAI Mei-feng, YUE Zhong-qi, 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.
- [7] 谭卓英, 刘文静. 一种地层地质界面仪器钻探感应识别系统: 中国, ZL201010116385.X[P]. 2013. (TAN Zhuo-ying, LIU Wen-jing. An instrumented drilling sensing identification system for geological interfaces: China, NO. ZL201010116385.X[P]. 2013.(in Chinese))
- [8] ZHANG Y, WANG S, FANG J. Measurement while drilling instrument based on predigested inertia measurement unit[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(12): 3295 - 3302.
- [9] 谭卓英, 夏开文. 岩土工程智能钻进关键技术研究[J]. 金属矿山, 2011(4): 1 - 4. (TAN Zhuo-ying, XIA Kai-wen. Key techniques for intelligent drilling in geotechnical engineering[J]. Metal Mine, 2011(4): 1 - 4.(in Chinese))
- [10] 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 Zhuo-ying, YUE Zhong-qi, CAI Mei-feng. 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))
- [11] 谭卓英. 金刚石钻进能量在风化花岗岩地层中的变化特征[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1303 - 1306. (TAN Zhuo-ying. Variation characteristics of penetrating energy for diamond drilling in weathered granite formation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1303 - 1306. (in Chinese))
- [12] 谭卓英, 王思敬, 蔡美峰. 岩土工程界面识别中的地层判别分类方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 316 - 322. (TAN Zhuo-ying, WANG Si-jing, CAI Mei-feng. Study on discriminant classification method for ground formation in identification of geotechnical engineering interfaces[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 316 - 322. (in Chinese))