

文章编号: 1000-7598 (2012) 08-2457-08

基于钻进能量理论的隧道凝灰岩地层界面识别及围岩分级方法

田 昊, 李术才, 薛翊国, 邱道宏, 苏茂鑫, 王 凯

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

摘 要: 钻机钻进过程中钻头旋转产生的扭矩以及作用于钻头的轴推进力是破碎岩石的能量来源, 当钻进条件确定时, 可用破碎单位体积岩石的实际能耗来反映岩石的物理力学性质。基于此原理在青岛胶州湾海底隧道 FK4+375.5 的上断面进行了超前地质探孔作业, 得到凝灰岩地层中的钻进参数及钻进能量随钻头位移的变化曲线, 并利用能量理论对钻进过程中监测的钻机参数进行分析, 研究发现: 在凝灰岩中, 数字钻机参数与围岩岩性响应程度较高, 围岩完整、坚硬、无裂隙水时, 整体钻进参数值较高; 围岩裂隙发育、含水或有断层、夹泥层时, 钻进速度、推进力、转速、扭矩、打击能等数据会突变, 其值变小。分析所得结果与钻孔取芯、TSP 超前预报等物探手段得到的结果基本一致。并采用能量法对围岩进行分析, 利用钻进比能划分相应的岩体区段, 判断出围岩等级。通过对能量曲线的分析发现, 在凝灰岩地层中, 当钻进能量小于 0.95 kJ 时会出现断层或较大的节理裂隙区。

关 键 词: 能量理论; 钻进能量; 凝灰岩地层; 界面识别; 围岩分级

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Identification of interface of tuff stratum and classification of surrounding rock of tunnel using drilling energy theory

TIAN Hao, LI Shu-cai, XUE Yi-guo, QIU Dao-hong, SU Mao-xin, WANG Kai

(Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: When a drill machine is working, energy of broking rock is produced from the action of torque and propulsion. The torque is resulted from the rotation of the bit, on which the propulsion is acting. When drilling conditions are certain, physical mechanical properties of rocks can be reflected from the energy consumed to break the rocks per unit volume. Based on this theory, advance geological drilling experiment has been performed on fault FK4+375.5 around the subsea tunnel across Qingdao Jiaozhou bay and the drilling parameters of tuff stratum and the variation of drilling energy with the displacement of bit are obtained. Parameters of a drill have been monitored in drilling process and analyzed using energy theory. The results show that, there is a good correlation between the drilling parameters of a digital drill machine and rock lithology. When surrounding rocks are integrated, hard and in the absence of fracture water, the drilling parameters are high. Conversely, when surrounding rocks are fractured, or in the presence of faults, fracture water and intercalated gouge, there are abrupt changes in the drilling rate, propulsion, rotational speed, torque and hit energy. The values of these parameters decrease markedly. The obtained results are consistent with core-drilling and advance geological prediction using tunnel seismic prediction (TSP). The above method is used in the classification of surrounding rock. According to the relation between energy curves and classification of surrounding rock, faults or fractured zones will appear in tuff stratum when the value of drilling energy is less than 0.95 kJ.

Key words: energy theory; drilling energy; tuff stratum; identification of geological interface; classification of surrounding rock

1 引 言

岩石分级中用到的最重要能量指标是凿碎比

能, 即破碎单位体积岩石需要做的功, 捣碎法和砸碎法是获得此能量指标的常用测定方法, 其大小与破碎比有关^[1]。凿碎比能的概念早在 20 世纪 60 年

收稿日期: 2011-04-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2007CB209400); 国家自然科学基金项目(No. 40902084, No. 50908134); 岩土力学与工程国家重点实验室开放基金(No. Z010905); 山东大学自主创新基金(No. 2009TS093)。

第一作者简介: 田昊, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事智能钻机设计方面的研究工作。E-mail: 1024212887@qq.com

通讯作者: 薛翊国, 男, 1976 年生, 博士, 副教授, 主要从事环境地质与工程地质及地质灾害超前预报与防治等方面的教学与研究工作。

E-mail: xieagle@sdu.edu.cn

代就已经提出^[2],并应用于地质钻探、岩土工程勘探和石油钻井等领域,原理是根据凿碎比能对岩石可钻性进行分级,以此选择钻头及确定生产定额。但凿碎法是通过冲击破碎岩石的方式在实验室内测定的,许多方面与现场实际钻进存在差异:(1)凿碎法不适合以旋转方式为主的取芯钻进情况,它主要采用冲击破碎岩石的方法获得;(2)实验室环境下测定的凿碎比能数值可能与实际现场值有出入,因为实验室内脱离了原始的环境场,不存在应力、温度等约束条件,所以,测得的凿碎比能并不能很好地反映现场岩石的破碎难易程度;(3)凿碎比能难以计算确定。冲击钻进方式下难免会有摩擦、声、热等的能量消耗,并且在不同钻井液条件下的消散速度也不同,所以,这些无形的能量消耗无法定量地计算得出,用于破碎岩石的功难以确定。因此,运用钻进时获得的钻机工作参数对围岩进行分级具有重要应用价值。

利用仪器钻进系统可以得到丰富的钻进参数,进而得到有关地层的大量地质信息^[3-6],这些参数包括钻杆和钻头的位置、位移和转动,以及钻机对钻头施加的各种动力载荷等^[7],研究表明,某些岩石的物理性质与钻进物理参数存在一定的响应关系^[8-11],对模拟地层进行识别时误差低于 5%^[12],可以较准确地对地层进行界面识别和围岩判别。但由于地质环境的复杂性以及钻孔作业的随机性,钻机工作参数与地层特征参数之间的相关性并不高^[12-15];钻进过程中工作环境必须接近理想状态,然而由于钻进系统所获得的参数并不稳定,影响因素很多,如:与钻头形状、冲洗液、排渣状态、钻头直径等条件,以及钻机穿孔作业操作者的技术水平差异等。由于在实际钻进过程中,理想状态是不存在的,所以钻机取得的参数与岩石物理性质之间的响应程度并不高。

本文变换思路,根据能量守恒理论,从钻进能量的角度分析钻机工作参数变化特征,避免了上述不利因素的限制,通过利用钻进过程监测系统获得的钻进参数绘制出了钻进能量变化曲线以及钻进比能变化曲线,进而对凝灰岩地层进行了界面识别和围岩分级研究。

2 能量原理

2.1 钻进能量

在穿孔作业设备和技术水平固定的条件下,破碎单位体积岩石所需的能量与岩石物理力学性质之间有一定的相关性^[16]。利用这一特点,用监测的钻

机钻进参数来表示对应的能量参数,即可找到钻进参数与岩石物理力学性质之间的关系,从而用于界面识别与围岩分级。

2.1.1 钻进过程能量分析:

在钻机钻进过程中,破碎岩石的能量来自钻头旋转产生的扭矩和作用于钻头的轴向推力,这两部分的能量是破碎岩石、破碎发声、摩擦生热等消耗的能量。

将钻进系统看作质点,根据能量守恒原理,钻机的动力系统所做功有以下能量转换关系^[16]:

$$P_c = P_k + P_d t + P_f \quad (1)$$

式中: P_c 为钻进动力系统输出总能量,即图 1 中的钻进能量; P_k 为钻进时提供的钻具旋转能量; P_d 为支持钻具向上或向下移动时所消耗的能量; t 为钻进工作时间; P_f 为钻头破碎岩石所做的功,即钻机工作时发生摩擦、产生噪音以及振动的能量消耗。

$$P_k = \frac{1}{2} \sum m V_1^2 = \frac{1}{2} \sum m (\pi D n)^2 \quad (2)$$

式中: $\sum m$ 为钻进系统各部分的质量总和,包括钻头、钻杆、取样器和加长杆的质量,其值随着钻进深度的增大和钻杆的增加而增加; V_1 为钻进系统质量中心的瞬时线速度; D 为钻进系统的回转直径; n 为钻进转速。

$$P_d = F_c S \sin \alpha = (F_t + \sum mg - F_a) V \sin \alpha \quad (3)$$

式中: F_c 为钻进时的轴向压力; S 为钻头单位时间的进尺; α 为钻进方向与水平方向之间的夹角 ($0^\circ \leq \alpha \leq 9^\circ$); V 为钻进速率; F_t 为钻头受到的向下轴压力; F_a 为钻头受到的向上轴向拉力,抵消钻头的重量。

钻进系统所做的功,一部分用于破碎岩石,生成新的表面并发声、发热;另一部分用于钻杆和钻井液之间的摩擦消耗以及液体运动。

钻头破碎岩石时的摩擦能耗包含两个部分:钻头孔底的摩擦和侧向摩擦,此部分能量用于摩擦破碎岩石,生成新表面并发声、发热。

单位时间内钻具侧向摩擦所消耗的能量用 $P_{f,s}$ 表示为

$$P_{f,s} = \pi D_b \mu_s K_s F_c n \quad (4)$$

式中: μ_s 为钻具与岩石之间的侧向摩擦系数; K_s 为轴向压力的侧压系数; D_b 为钻头外径。

单位时间内孔底摩擦所消耗的能量用 $P_{f,b}$ 表示为

$$P_{f,b} = \frac{1}{4} \int_0^\theta n \tau_f D_b d\theta = \frac{1}{4} n \mu_b \pi D_b F_c \quad (5)$$

式中： μ_b 为钻具与孔底岩石间的摩擦系数； τ_f 为钻具外直径；

钻具和孔壁及排渣液之间的摩擦，主要源于钻杆和钻孔液（排渣液）之间的黏滞阻力，分为沿着钻杆推进方向和沿着钻杆环向的摩擦。

$$P_c = \mu_c N_c \pi D_r n \quad (6)$$

式中： P_c 为单位时间内钻头环向摩擦所消耗的能量； μ_c 为钻头旋转时的摩擦系数； N_c 为钻杆与孔壁或冲洗液之间的黏滞力； D_r 为钻杆外直径。

$$P_a = \mu_a N_a \pi V \quad (7)$$

式中： P_a 为单位时间内钻头轴向摩擦所消耗的能量； μ_a 为钻头轴向运动时的轴向动摩擦系数； N_a 为钻杆与孔壁或冲洗液之间的黏滞力（ $N_a = N_c$ ）。

在钻头形式及钻进方式一定时，摩擦所消耗的能量由岩石性质所决定。因而，与破碎岩石有关的能量 P_{rf} 可以用 P_w 减去钻杆-钻液之间的黏滞阻力等参数表示：

$$P_{rf} = P_w - (P_c t + P_a) \quad (8)$$

式中： P_w 为 P_k 与 $P_d t$ 之和。

由以上分析可以看出，想要确定摩擦能耗和与岩石有关的能耗，必需知道有关摩擦系数、岩石泊松比和黏聚力等参数。然而，这些参数的测定非常复杂，通常只能依靠试验模拟来估计。因而，想精确计算钻进过程中用于岩石破碎的能量是不可能的。

但是，在实际钻进过程中，由于钻进速度很低，所以，轴向黏滞阻力很小，可以忽略不计。环向旋转产生的黏滞阻力会带动钻杆与孔壁间液体运动，并且由于钻杆与孔壁间的距离很小，所以，液体质点沿着径向的速度梯度将很小，孔间液体质点可视为等线速度运动。

因而，根据能量守恒和传递原理，黏滞阻力所做的功将转化为液体的动能 P_{lk} 。

$$P_{lk} = \frac{1}{2} m_1 V_1^2 = \frac{1}{8} \rho \pi n^2 D_c^2 (D_h^2 - D_r^2) V t \quad (9)$$

式中： m_1 为钻杆与孔壁间排出渣液的质量； ρ 为排渣液的密度； D_c 为排渣液环形柱的等效直径； D_h 为钻孔直径。

所以，式（8）可由式（10）确定：

$$P_f = P_w - p_{lk} \quad (10)$$

式（1）可写为

$$P_c = 2 P_k + 2 P_d t - P_{lk} \quad (11)$$

通过转换后，不易测得的参数变成了容易获得的可测参数。最后，根据监测数据，利用上述分析所得公式对钻进过程中的能量进行计算分析。

2.1.2 钻进总能量曲线特征分析

由图1可知，钻进能量变化曲线大体可划分为低能耗区、中能耗区、高能耗区和过渡区。与物探结果对照表明，在低能耗区主要是VI~V级凝灰岩（含有夹泥层）；中能耗区主要是III~VI级凝灰岩；高能耗区主要是II~III级凝灰岩；过渡区主要是VI级凝灰岩。很明显，岩石越坚硬，钻凿岩石消耗的能量就越大，钻进总能量的消耗也相应增大。在各个能量消耗区可以看到有些能量脉冲，这表明钻进能量对岩石坚硬程度非常敏感，曲线变化的平滑或者脉冲大小表明地层可能存在节理、裂隙或者夹泥层等，充分揭示了地层环境的复杂性。

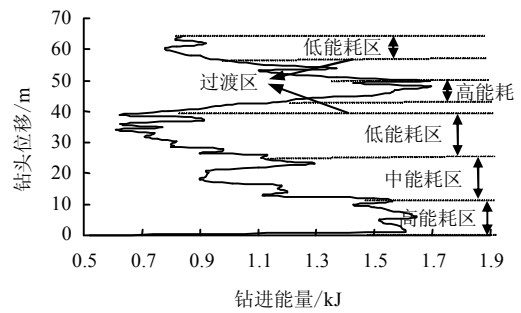


图1 凝灰岩中钻进能量随钻头位移变化曲线
Fig.1 Change curve of drilling energy with displacement of bit in tuff stratum

2.2 钻进比能

2.2.1 钻进比能概念

旋转钻机在钻孔时，给钻头一定的轴向压力，通过钻头旋转产生的扭转力破碎前方岩石，并给予及时、合理的冲洗液，排出破碎岩石的粉末，起到排渣和降低钻头温度的作用。钻进的难易程度除了与岩石的物理性质有关以外，也受到钻头直径大小、钻头形状、钻进方式和排渣系统的影响。假定钻头直径、钻头形状、钻进方式和排渣系统一定，这时钻进的难易程度可以反映出岩石的可钻性程度，进而反映了岩石抵抗破坏的难易程度。

基于以上的分析，引入了钻进比能的概念^[17]，即钻进过程中，在一定的钻头直径、钻头形状、钻进方式和排渣系统条件下，钻头破碎单位体积岩石所消耗的总的钻进能量。可用公式表示为

$$E(h)=\frac{4P_f}{\pi(D_b^2-D_i^2)V}\tag{12}$$

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，由式（10）确定； D_i 为钻头内直径，当为破坏式钻进时， $D_i=0$ 。

从式（12）可以看出，比能反映了钻进能量与破碎面积及穿孔速率的关系，从而，表明了在一定轴压下岩石抵抗钻头钻入及破碎的难易程度。

2.2.2 钻进比能曲线特征分析

钻进比能变化曲线与钻进能量变化曲线具有相似性，大体可划分为低能耗区、中能耗区、高能耗区。亦可得在低能耗区主要是VI~V级凝灰岩；中能耗区主要是III~VI级凝灰岩；高能耗区主要是II~III级凝灰岩。

如图 2 所示，3 个能量消耗区较明显，可以容易划分，各个区域所占的钻进比能数值分布较为集中，可以定量分区；钻进比能曲线图中能量脉冲较多，没有明显的过渡区，各个能量区间内曲线变化较大，表示地层内的节理、裂隙、夹泥或裂隙水较多。

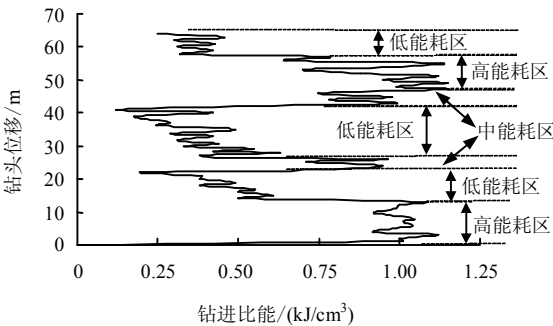


图 2 凝灰岩中钻进比能随钻头位移变化曲线
Fig.2 Change curve of penetrating specific energy with displacement of bit in tuff stratum

2.2.3 钻进比能在凝灰岩中的分布

从钻进比能来分析，比能随钻头位移变化曲线的各个能量消耗区之间没有明显地过渡，根据监测的比能数据可以整理出表 1，表中揭示了在不同硬度凝灰岩中钻进比能的平均数值，从而为凝灰岩的定量分级提供了依据。在不同的钻进深度（即钻头位移）中，岩石的风化程度不同，强度及硬度不同，其抵抗钻头钻进的能力不同，因而破碎岩石的比能也不同。通过不同风化程度凝灰岩地层中能耗的记录分析，得到钻进比能的分布如表 2 所示。

表 1 钻进比能在凝灰岩中随钻头位移的变化
Table 1 Variation of penetrating specific energy with displacement of bit in tuff stratum

钻头位移 /m	风化程度分级	围岩岩性	钻进比能平均值/(kJ/cm³)
0~6	II	微风化凝灰岩	1.012
6~12	II~III	微风化凝灰岩/中等风化凝灰岩	0.902
12~18	IV	强风化凝灰岩	0.640
18~24	IV~V	强风化凝灰岩/全风化凝灰岩(夹泥层)	0.438
24~30	III~IV	中等风化凝灰岩/强风化凝灰岩	0.762
30~36	IV	强风化凝灰岩	0.651
36~42	V	全风化凝灰岩(夹泥层)	0.373
42~48	III	中等风化凝灰岩	0.937
48~54	II	微风化凝灰岩	1.124
54~60	III~IV	中等风化凝灰岩/强风化凝灰岩	0.745
60~66	IV~V	强风化凝灰岩/全风化凝灰岩(夹泥层)	0.467

表 2 钻进比能在凝灰岩中的分布
Table 2 Distribution of penetrating specific energy in tuff stratum

风化程度分级	钻进比能均值/(kJ/cm³)
II	1.062
II~III	0.902
III	0.937
III~IV	0.764
IV	0.651
IV~V	0.467
V	0.373

3 数字钻机

3.1 试验采用钻机

RPD-150C 是矿研的主力机型，采用柴油发动机作为动力单元；钻机通过 5 个液压缸实现大范围作业；150 m 钻探、取芯，最大口径为 225 mm。

数字钻机系统包括感应系统（SS）、数据转换系统（DC）和数据分析系统（DA），其工作图如图 3 所示。

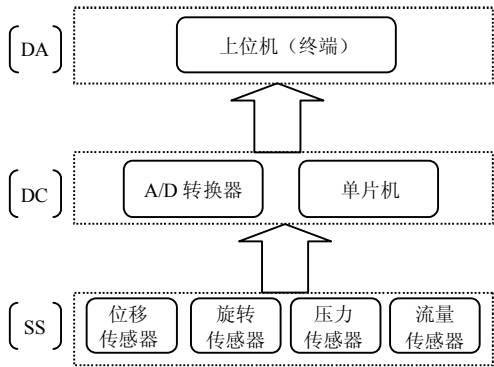


图 3 数字钻机系统工作图
Fig.3 Work system of digital drill machine

3.2 感应系统 (SS)

安装在钻机或钻架上, 用于获得钻机的钻进参数, 包括: (1) 位置传感器; (2) 旋转传感器; (3) 压力传感器; (4) 流量传感器。

3.3 数据转换系统 (DC)

此系统用于进行数据的传输与转化, 包括: (1) A/D 转换器, 将传感器采集的模拟数据转换成数字信号。

(2) 单片机, 执行编好的功能程序, 处理得到的数字信号, 最终传向数据终端。

3.4 数据分析系统 (DA)

上位机可以安放在测试现场、实验室或者较远处的办公室, 可以是计算机或者外部显示终端。

3.5 数字钻机测量参数

数字钻机测量参数包括: (1) 轴压力参数; (2) 钻具转速参数; (3) 冲洗水压力参数; (4) 钻进速度-推进力参数。

4 现场试验及数据分析

4.1 工程概况

青岛胶州湾海底隧道是中国大陆第 2 条大断面海底隧道, 是连接青岛市主城与辅城的重要通道, 南接薛家岛, 北连团岛, 下穿胶州湾湾口海域, 该海域平均水深为 7 m 左右, 最大水深为 65 m, 其中湾口最大水深为 42 m。该隧道是一条以城市道路功能为主兼有公路功能的隧道, 设双向 6 车道, 设计车速为 80 km/h。设 2 条 3 车道主隧道和一条服务隧道 (长度约 5 950 m), 主隧道中轴线间距为 55 m。隧道全程采用新奥法施工。

4.2 钻孔取芯和 TSP 超前地质预报

为了探究利用能量原理对凝灰岩地层进行界面识别和围岩分级的效果, 在数字钻机钻进的同时, 也采用钻孔取芯、编录、力学试验和 TSP(Tunneling Seismic Prediction)超前地质预报等物探方法对该段地质进行了分析 (见表 3)。

水平钻孔取芯工作从现掌子面 FK4+375.5 处开始进行。该段岩体整体较破碎, 岩性多变, 并发育有多处断层破碎带及断层破碎影响带, 主要为火山角砾凝灰岩、花岗岩等, 取出的岩芯如图 4 所示, 部分段岩体破碎, 无法取出完整的圆柱形岩芯, 用白色柱状塑料管代替。经过对服务隧道取出岩芯的分析可得出以下认识: (1) FK4+375.5~363 处为一断层影响带, 本处断层影响带规模较大, 核心地带 FK4+342.5~343.5 处长 1 m, 岩体极为破碎, 并夹杂断层泥, 取芯率很低, 岩性交界处风化较严重。(2) FK4+363.5~356 段节理裂隙发育, 围岩破碎,

并伴有强风化软弱破碎充填, 局部极为破碎, 节理面弱风化, 局部强风化, 取芯率较低且所取出的岩芯较为细碎。(3) FK4+345~341 处发育有较明显裂隙, 并含有破碎软弱充填, 岩性由凝灰岩变为凝灰质火山角砾岩, 又过渡到凝灰岩, 尤其是在 FK4+344~342 处, 岩芯经过 2 次操作仍难以取出, 并且在本段钻进过程中有红色黏稠浆液沿孔口管流出, 初步判断为夹泥层被钻头研磨破坏产生。

表 3 TSP 超前地质预报详细解释表
Table 3 Detailed explanation of TSP advance geologic prediction

序号	里程	长度 /m	推断结果
1	FK4+375.5~FK4+363.5	12	该段与目前掌子面围岩基本一致, 强度低, 节理裂隙发育, 围岩等级为 III 级 FK4+363.5~356 段节理裂隙发育, 围岩破碎, 并伴有强风化软弱破碎充填, 围岩含水, 特别是 FK4+353 左右发育贯穿性节理, 该节理可能含水, 围岩等级为 IV 级
2	FK4+363.5~FK4+347.5	16	该段已进入断层破碎带, 纵向裂隙发育较多, 围岩破碎, 特别是 FK4+344~FK4+342 段有条断裂带, 强度低, 并可能有断层泥, 该段以 IV 级围岩为主, 局部为 V 级
3	FK4+347.5~FK4+334.5	13	该段围岩略完整较上一段变好, 强度有所升高, 完整性略好, 属断层破碎影响带, 围岩等级为 III 级
4	FK4+334.5~FK4+320.5	14	该段仍属于断层破碎带, 围岩破碎, 强度低, 整体性差, 特别是 FK4+341 处、FK4+345 处发育有较明显裂隙, 并含有破碎软弱充填, 围岩等级为 IV 级
5	FK4+320.5~FK4+312.5	8	

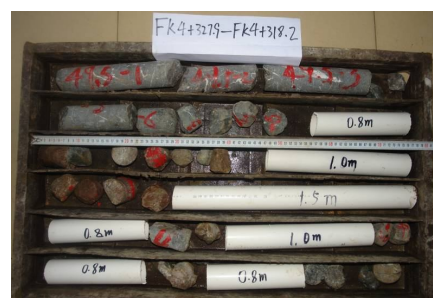


图 4 岩芯图
Fig.4 Image of cores

4.3 现场数字钻机监测及数据曲线分析

4.3.1 数字钻机监测数据

为了得到钻进能量的大小,在青岛胶州湾海底隧道右线主隧道基本扩挖成型,正式开始向海域段施工之前,使用数字钻机在掌子面 FK4+375.5 上断面进行了一次超前地质探孔作业。根据主隧道走向和坡度以及钻机工作条件,将开孔位置选在掌子面中部稍偏左,钻孔上偏 2°。孔径为 65 mm,历时 5 h,

钻进冲洗液为洁净的天然水,钻进工作参数由系统自动控制和调节,共钻进 64 m。数字钻机监测的参数包括扭矩、转速、推进力、打击能、打击数、送水流量、送水压力、排水流量和排水压力等,在凝灰岩地层中的钻进参数如表 4 所示。

4.3.2 测量数据曲线分析

根据地质情况,选取不同岩性的里程段进行量测,并得到参数曲线图(见图 5)。

表 4 凝灰岩地层中的钻进参数
Table 4 Drilling parameters of tuff stratum

深度 /m	速度 /(m/h)	扭矩 /kN	转速 /(r/min)	推进力 /kN	打击能 /J	打击次数 /N	送水流量 /L	送水压力 /MPa	排水流量 /L	排水压力 /MPa
0	0	0.94	41	7.05	370	1 611	93	0.1	90	0.1
6	31	1.56	50	8.11	491	1 659	80	0.1	79	0.1
12	46	1.44	53	7.68	485	1 666	93	0.1	91	0.1
18	26	0.96	38	4.42	397	1 652	95	0.1	92	0.1
24	24	0.85	40	4.69	397	1 652	93	0.1	90	0.1
36	59	0.67	40	2.31	335	1 652	96	0.1	92	0.1
42	49	0.77	39	3.35	387	1 652	89	0.1	85	0.1
48	53	1.52	40	8.05	393	1 652	96	0.1	93	0.1
54	65	1.47	40	8.10	494	1 679	83	0.1	80	0.1
60	57	0.88	39	4.31	392	1 652	91	0.1	87	0.1
63	33	0.84	32	4.10	387	1 652	89	0.1	84	0.1

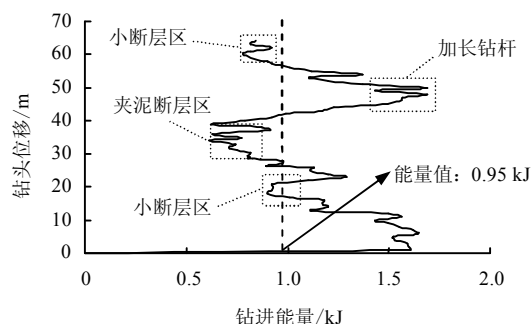


图 5 凝灰岩中钻进能量随钻头位移变化曲线

Fig.5 Change curve of drilling energy with displacement of bit in tuff stratum

FK4+375.5 掌子面以凝灰岩为主,夹流纹岩。岩体微风化,较完整,以块状结构为主,局部为块碎状镶嵌结构。岩质较硬,透水性较弱,为Ⅲ级围岩。本次超前探孔采用不取芯钻探,主要目的为探明前方是否存在断层和破碎带。通过对钻机自行记录的钻进速度、推进力、转速、扭矩、打击能等数据,以及现场技术人员对钻进全程监控资料的综合分析,对该段围岩钻进情况分述如下:

(1) 掌子面前方 0~12 m 范围内,即 FK4+375.5~FK4+363.5 段,开孔时钻速波动不大,最大为 46 m/min;另外几次较大钻速波动均发生在加长

钻杆继续钻进前后,打击能和推进力也随之大幅波动;其余钻速、推进力、打击能均比较稳定。本段钻孔回水颜色无明显变化,无渗水。钻进总能量变化不大,由此推断本段围岩和掌子面基本一致。

(2) 掌子面前方 12~28 m 范围内,即 FK4+363.5~FK4+347.5 段,钻进能量曲线显示,钻进能量下降较明显,有几次较大钻速波动,其余扭矩、钻速、推进力、打击能均随之波动。本段钻孔回水颜色也轻微变化,回水量变大。由此推断本段围岩和掌子面比较,强度较差,裂隙较发育,含有裂隙水。

(3) 掌子面前方 28~41 m 范围内,即 FK4+347.5~FK4+334.5 段,钻进参数有明显波动,与掌子面钻进参数相差较大,曲线图显示钻进能量在本段波动大,钻孔回水颜色较深。由此判断本段围岩与掌子面比较,强度差,可能存在断层,断层处存在夹泥,节理裂隙较发育,特别是在 31 m 处,钻进能量达到最低。

(4) 掌子面前方 41~55 m 范围内,即 FK4+334.5~FK4+320.5 段,能量曲线波动大,扭矩、钻速、推进力、打击能同时也较大回升,各参数值大体与 FK4+375.5~FK4+363.5 段持平,钻孔回水颜色明显清澈。由此判断本段围岩与现掌子面围岩很

接近, 坚硬且不渗水, 未发现不良地质体, 通过比对岩粉可知, 前方岩体仍为凝灰岩, 与设计相符。

(5) 掌子面前方 55~63 m 范围内, 即 FK4+320.5~FK4+312.5 段, 有几次较大钻速波动, 其余扭矩、钻速、推进力、打击能均随之波动。钻进能量下降至一定值就维持小幅波动, 钻孔回水较浑浊, 水量明显加大。由此判断本段围岩较破碎, 可能还有裂隙水。

4.4 围岩分级

研究发现, 钻进比能与岩石的某些物理性质之间存在很好的响应关系^[17], 当钻进条件确定时, 可以利用钻进比能来对围岩进行分级。

图 2、6 是海底隧道凝灰岩中钻进比能随钻头位移的变化曲线, 在此试验段中, 钻进比能随围岩级别的降低而增大, 其比能值变化如表 5 所示。由表可知, 随着围岩级别的降低, 平均比能值增大, 说明了岩石随着围岩级别的降低, 抵抗破坏能力增强的性质。虽然钻进比能在不同坚硬程度的岩体中具有明显的分区性, 但是钻进比能的变化范围较大, 不同硬度的岩石比能值, 其下界值低于次级硬度岩石上界指标, 即不同级别的围岩, 其比能变化区间呈相互交叉的特性。因为开挖时, 前方的围岩中必然包含各种节理、裂隙甚至软弱夹层等结构面, 比能曲线会出现脉冲线条, 比能值会出现较低的下界值。但是, 采用试验指标进行的围岩分级, 岩体中结构面的含有率大大降低, 进而增大了比能指标的下门槛值, 缩短了变化范围, 在应用上对完整性好的岩石才是适合的。

事实上, 工程中对岩石的划分, 要求可操作性强, 不可能也没有必要划分太细。根据图 2, 可将比能值划分为 3 个区间, 即低能耗区、中能耗区和高能耗区。其钻进位移、比能均值和比能变化范围如表 5 所示。

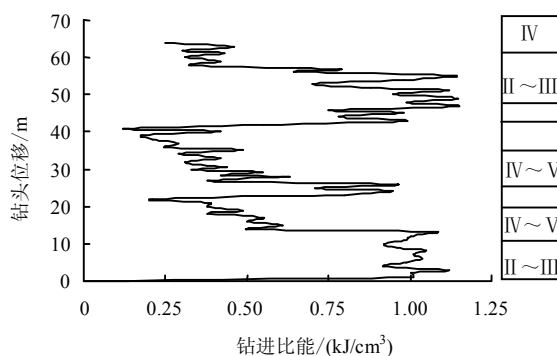


图 6 钻进比能曲线及围岩分级

Fig.6 Change curve of penetrating specific energy and classification of surrounding rock

表 5 钻进比能在凝灰岩中的分布

Table 5 Distribution of penetrating specific energy in tuff stratum

风化程度分级	平均钻进比能/(kJ/cm ³)	钻进比能变化范围/(kJ/cm ³)	风化程度分级	平均钻进比能/(kJ/cm ³)	钻进比能变化范围/(kJ/cm ³)
II	1.062	0.573 2~2.362 4	IV	0.651	0.038 2~0.890 3
II~III	0.902	0.002 1~1.061 0	IV~V	0.467	0.037 6~0.661 7
III	0.937	0.163 2~0.981 8	V	0.373	0.001 5~0.074 4
III~IV	0.764	0.001 7~2.014 6			0.001 3~0.420 1

如表 6 所示, 根据比能均值的变化, 可将相应区间的岩石划分为软岩、中硬岩和硬岩。由图 6 可得, 软岩层主要包含全风化及强风化凝灰岩 (IV~V 级), 中能耗区主要包含中等风化凝灰岩 (III 级), 其中含有少量强风化凝灰岩 (IV 级), 高能耗区主要包含微风化凝灰岩 (II 级)。

表 6 根据钻进比能的凝灰岩分类

Table 6 Classification of tuff by penetrating specific energy

比能区间	岩石类型	钻头位移/m	比能均值/(kJ/cm ³)	比能变化范围/(kJ/cm ³)
低能耗区	软岩	12~13/56~63	0.373	0.005 1~0.429 8
中能耗区	中硬岩	22~26/41~47	0.937	0.250 1~1.498 7
高能耗区	硬岩	0~12/48~55	1.062	0.251 0~1.470 2

5 结 论

(1) 在凝灰岩中, 数字钻机参数与围岩岩性响应程度较高, 围岩完整、坚硬、无裂隙水时, 整体钻进参数值较高; 围岩裂隙发育、含水或有断层、夹泥层时, 钻进速度、推进力、转速、扭矩、打击能等数据会突变, 其值变小。

(2) 通过钻进比能对围岩性质进行判定所得结果, 与钻孔取芯、TSP 超前预报等物探手段得到的结果基本一致。在钻进比能曲线图中能量脉冲较多, 没有明显的过渡区, 各个能量区间内曲线变化较大, 表示地层内的节理、裂隙、夹泥或裂隙水较多, 同时也表明钻进比能曲线与地层复杂内部结构有较好的响应性。因此, 在此类岩石中钻进时可以采用能量法对围岩进行分析, 各级岩石分别对应一定的钻进比能均值和比能变化范围, 进而可以通过钻进比能指标划分相应的岩体区段, 即低能耗区、中能耗区和高能耗区, 每个区段对应不同岩性的岩体, 进而判断出围岩等级。

(3) 通过能量曲线分析, 在断层区域时, 钻进能量均在 0.95 kJ 能量以下, 由此可得在凝灰岩地层中, 当钻进能量小于 0.95 kJ 时会出现断层或较大的节理裂隙区。

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.
- [2] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts**, 1965, 2(1): 57—73.
- [3] JAN Y M, CAMPBELL R L J. Borehole correction of MWD gamma ray and resistivity logs[C]//Transactions of the SPWLA Annual Logging Symposium. Houston: Society of Professional Well Log Analysts Inc., 1984: 189—197.
- [4] GAO D, ZHANG H, WANG J. Method of formation classification while drilling with PDC bits[J]. **Acta Optica Sinica**, 1998, 18(1): 25—26, 36.
- [5] DOWELL I A, YORK P L, JACKSON C E. Evolution of an LWD toolstring with applications for petrophysical logging and drilling control[C]//Proceedings of Annual Offshore Technology Conference, Field Drilling and Development Systems.[S. l.]: [s. n.], 1993: 897—905.
- [6] NAVILLE C, SERBUTOVIEZ S, THROO A, et al. Seismic while drilling(SWD)techniques with down hole measurements, introduced by IFP and its partners in 1990—2000[J]. **Oil and Gas Science and Technology**, 2004, 59(4): 371—403.
- [7] 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(增刊 1): 2939—2945.
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(Supp.1): 2939—2945.
- [8] HOWARTH D F, ADAMSON W R, BERNDT J R. Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock properties[J]. **Journal of Rock Mechanics Sciences & Geomechanics Abstract**, 1986, 23(2): 171—175.
- [9] 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: [s. n.], 1988.
- [10] ZACAS M, KAVADAS M, MIHALIS I. The use of recording drilling parameters in rock mass classification[C]//Proceedings of the 8th ISRM Congress. Tokyo: International Society for Rock Mechanics, 1995, (3): 1121—1124.
- [11] GUI M W, SOGA K, BOLTON M D, et al. Instrumented borehole drilling for subsurface investigation[J]. **ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2002, 128(4): 283—291.
- [12] LABELLE D, BARES J, NOURBAKHSH I. Material classification by drilling[C]//Proceedings of the 17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Taipei: [s. n.], 2000.
- [13] ZACAS M, KAVADAS M, MIHALIS I. The use of recording drilling parameters in rock mass classification[C]//Proceedings of the 8th ISRM Congress. Tokyo: International Society for Rock Mechanics, 1995.
- [14] 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]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2005, 12(6): 481—488.
- [15] GUI M W, SOGA K, BILTON M D, et al. Instrumented borehole drilling for subsurface investigation[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2002, 128(4): 283—291.
- [16] 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—485.
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—485.
- [17] 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.