

DOI: 10.11779/CJGE202104010

# 基于钻进过程指数定量评价岩体完整性原位试验研究

曹瑞琅<sup>1</sup>, 王玉杰<sup>1</sup>, 赵宇飞<sup>1\*</sup>, 汪小刚<sup>1</sup>, 和孙文<sup>2</sup>, 彭林军<sup>3</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电第十四工程局有限公司, 云南 昆明 650051; 3. 大连大学院士创业园, 辽宁 大连 750011)

**摘要:** 钻孔过程中钻具实时响应特征蕴藏着大量工程地质信息, 通过解译钻进数据定量评价岩体完整性, 可为快速获取工程岩体的地质特征提供新途径。采用高精度数字液压、扭矩、转速和激光位移传感器监测地质钻机传动部位, 搭建了新型地质钻机数字钻进监测系统。开展了均质材料和裂隙岩体原位钻进试验, 根据实时、连续及同步获取的钻具响应特征参数, 建立了钻进压力、钻进扭矩、钻头转速和钻进速度的函数关系。在此基础上, 滤除钻机机械参数对钻进速度的影响, 提出了用于表达岩体完整性的新指标——钻进过程指数。研究发现, 钻进过程指数的数字变化趋势能综合反映岩体的破碎程度, 能通过信息化方法和数据运算获取岩体完整性, 削减了人工统计 RQD 和编纂岩芯柱状素描图等繁杂的工序, 还降低了人为主观因素的不利影响。

**关键词:** 岩体完整性; 地质钻机; 钻进过程指数; 钻进速度; 原位试验

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)04-0679-09

**作者简介:** 曹瑞琅(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向是隧道及地下工程。E-mail: Caorl@iwhr.com。

## In-situ tests on quantitative evaluation of rock mass integrity based on drilling process index

CAO Rui-lang<sup>1</sup>, WANG Yu-jie<sup>1</sup>, ZHAO Yu-fei<sup>1</sup>, WANG Xiao-gang<sup>1</sup>, HE Sun-wen<sup>2</sup>, PENG Lin-jun<sup>3</sup>

(1. China State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Sinohydro Bureau 14th Corporation, Kunming 650051, China; 3. Academician Pioneering Park, Dalian University, Dalian 116622, China)

**Abstract:** The real-time response characteristics of drilling tools contain important engineering geological information. By interpreting the drilling data, the rock mass integrity can be quantitatively evaluated, which provides a new way to quickly obtain the geological characteristics of engineering rock mass. A new type of digital geological drilling monitoring system is established by using the high-precision digital hydraulic, torque, rotational speed and laser displacement sensors to monitor the transmission part of geological drill. Based on the real-time, continuous and synchronous drilling response characteristic parameters of drilling tools, the functional relationships among drilling thrust, rotational torque, rotational speed and drilling rate are established. On this basis, the influences of drilling machine parameters on drilling rate are filtered out, and a new index, drilling process index, is proposed to express the rock mass integrity. The digital change of the drilling process index can comprehensively reflect the fragmentation degree of rock mass, and the rock mass integrity can be obtained through the information method and data operation. The complicated procedures such as statistical work of RQD and drillingcore sketch are reduced, and the adverse influences of human subjective factors are also reduced.

**Key words:** rock mass integrity; geological drill; drilling process index; drilling rate; in-situ test

## 0 引言

正确认识和定量描述岩体性质是任何岩土工程安全、合理和高效施工的基础。室内岩石力学试验结果往往不能反映节理岩体的宏观特征和工程分类<sup>[1]</sup>, 因此, 现场地质钻探通常作为岩土工程的常规勘测手段<sup>[2-3]</sup>。通过对钻孔和岩芯重新排列后, 岩土工程人员观察结构面分布和判断填充物的性质<sup>[4]</sup>, 在此基础上, 经过

大量繁琐编纂和地质描绘, 形成描述岩体结构特征的图表<sup>[5]</sup>。事实上, 钻孔过程中钻具与岩体直接接触, 钻具响应信息综合反映了岩体性质<sup>[6]</sup>。因此, 钻孔过

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52079150, 51674058); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目(GE0145B092020)

**收稿日期:** 2020-07-14

\*通信作者(E-mail: Zhaoyf@iwhr.com)

程本身就是一种定量测定岩体性质的原位试验。

钻孔过程中蕴藏着大量地质信息，岩土工程界希望利用监测仪器记录钻孔过程的数据，用于分析岩体性质。最初，Teale<sup>[7]</sup>、Hughes<sup>[8]</sup>、Detournay 等<sup>[9]</sup>和Yagiz<sup>[10]</sup>的研究重点是建立钻孔数据与完整岩石力学参数的关系。然而，岩体是由完整岩石和结构面共同组成，工程实践表明，大多数情况下岩体结构特征比完整岩石的性质对工程更重要<sup>[11]</sup>。岩体完整性是地质力学分类中的主要评分项目，如 Q 系统<sup>[12]</sup>、RMR<sup>[13]</sup>和 GSI<sup>[14]</sup>。此后的研究<sup>[15-17]</sup>尝试通过钻探资料获得岩体空间结构特征，特别是钻孔过程在围岩分类<sup>[18-19]</sup>、地层界面辨识<sup>[20-21]</sup>等方面的应用，对实际工程有较大的参考价值。一般认为，使用同一钻机和同一钻头钻取完整岩石时，钻进速度应为常数<sup>[6, 22-23]</sup>。基于这一假设，岳中琦<sup>[24]</sup>通过试验数据拟合建立了钻孔速度与岩石质量指标（RQD）之间的关系；Ru 等<sup>[25]</sup>基于最小二乘支持向量机和蒙特卡罗理论建立了钻速指数的概率评估方法。

然而，受钻进压力、钻进扭矩和钻头转速影响，钻进速度并不是常数。这一现象普遍反映在岩石可钻性评估中<sup>[26-27]</sup>。将钻进速度作为评价岩体完整性特征的唯一标准显然是不可靠的。只有消除各种因素对钻进速度影响，才能建立合理的岩体完整性评价指标。

为滤除钻进压力、钻进扭矩和钻头转速对钻进速度的影响，本研究在完整和裂隙岩体中开展了各种因

素下的现场数字钻探试验。然后，对钻孔速度修正和归一化，提出了一种新的描述岩体完整性的指标：钻进过程指数（DPI）。钻进过程指数在完整岩块中是一个常数，可以通过数字变化反映裂隙岩体的结构特征。

1 数字钻进过程试验

1.1 试验设备

为了建立钻具响应参数和岩体完整性的关系，将一种新研发的地质钻机数字钻进监测系统（图 1）运用于钻孔原位测试过程。如图 2 所示，这个系统由高精度数字传感器、自动采集仪以及数据分析软件组成。

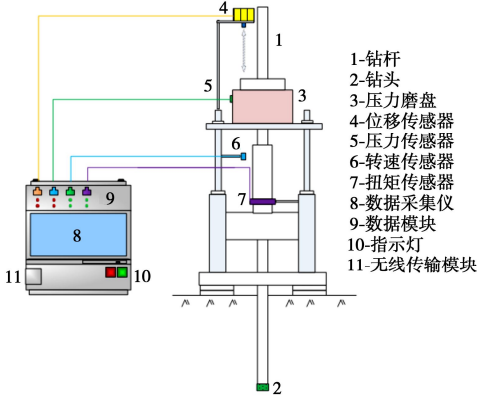


图 1 地质钻机数字钻进监测系统的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of digital drilling monitoring system

液压传感器（图 2（b））安装于钻机推进装置的输油管道，用于监测钻进压力（ $F$ ，kN）。在钻机钻杆



图 2 数字钻进监测系统及原位测试

Fig. 2 Digital drilling system and in-situ tests

上设立特殊的标志点, 转速传感器 (图 2 (g)) 安装在距离标志点 10~12 mm 处, 用于监测钻头转速 ( $N$ , rev/s), 并通过非接触式空气耦合装置传输数据信号。盘式扭矩传感器 (图 2 (f)) 安装于钻杆上, 内部转子随钻杆转动时测量受力, 由外部定子解译信号并传输到数据采集仪, 用于监测钻进扭矩 ( $M$ , N·m)。通过激光传感器 (图 2 (e)) 监测钻进位移 ( $S$ , mm), 激光传感器的标靶放置在随钻杆移动的钻机磨盘上, 监测精度可达 0.1 mm。 $F$ ,  $N$ ,  $M$  以及  $S$  会被同步和实时采集, 数据采样时间间隔为 1 s, 并传输给数据自动采集仪 (图 2 (c)) 和网络云端 (图 2 (d))。

此外, 钻进装置可根据工程对钻孔的实际需要进行调整。试验中采用了地质钻探用金刚石取芯钻头, 其内直径为 75 mm, 钻头长 250 mm, 与岩土工程规定的获取 RQD 用钻头规格相一致<sup>[28]</sup>。

1.2 均质材料钻进试验

为厘清影响钻进速度的关键因素, 开展了一系列均质材料的钻进正交试验。首先, 用直径 200 mm 取芯钻头钻孔; 然后, 在此钻孔中由深到浅回灌 C20 等级砂浆, 并养护至标准强度, 形成均质材料的钻孔; 最后, 采用数字钻进系统开展原位钻进测试。

试验用地质钻机具有 4 个可调节挡位, 各个挡位对应的转速分别是 0.67, 1.92, 3.67 和 6.67 rev/s, 见图 3。钻机钻进压力由油压泵控制, 当油压为零时, 钻具和夹持装置受重力作用使钻头产生最小压力值, 约为 8.5 kN, 钻机钻进压力最大值可以达到 80.0 kN。需要说明的是, 在特定钻杆钻头转速下施加过大的钻进压力, 会导致转速异常, 即卡钻, 所以试验中最终能够实现的钻进压力变化范围为 8.5~66.2 kN (见图 3)。钻头钻进扭矩作为一种破岩过程中的岩体所给予的反作用力, 将受制于钻进压力和岩体特征参数。综上所述, 在正常工作状态下的数字钻进时, 地质钻机的主要特征参数 ( $F$ ,  $N$  和  $M$ ) 被全部监测和数据化。

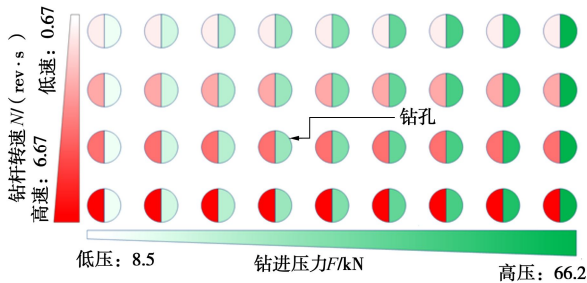


图 3 均质材料钻进试验

Fig. 3 Drilling tests on homogeneous materials

1.3 裂隙岩体钻进试验

裂隙岩体现场试验依托云南省德厚水库, 该工程库区广泛分布石灰岩, 岩溶普遍发育。处理岩溶渗漏及防渗是工程建设的首要任务, 受区域地质条件的限

制, 探明岩体裂隙的分布状况用于指导工程灌浆尤为重要。为能精细获取钻孔附近岩体结构特征分布, 同步开展数字钻进原位试验 (见图 2) 和传统钻孔取芯。

2 影响钻进速度的关键因素分析

2.1 均质材料钻进试验结果

针对均质材料数字钻进试验, 一共开展了 37 组测试, 相应的统计分析见表 1。当钻头转速 ( $N$ ) 分别为 0.67, 1.92, 3.67 和 6.67 rev/s 时, 随着钻进压力 ( $F$ ) 增加, 试验方案编号依次为 A1~A10、B1~B10、C1~C8 和 D1~D9。试验设计的  $F$  值是 10~60 kN, 增加梯度是 10 kN, 但由于实际的  $F$  还要取决于钻具和材料之间相互作用, 所以它是波动值。钻进位移 ( $S$ ) 主要在 200~250 mm, 随着钻进时间 ( $T$ ) 减小, 钻进速度 ( $V$ ) 会逐渐增加, 变化范围是 0.71~5.46 mm/s。

表 1 均质材料钻进试验结果

Table 1 Drilling test results of homogeneous materials						
编号	$N$ /(rev·s <sup>-1</sup> )	$F$ /kN	$M$ /(N·m <sup>-1</sup> )	$S$ /mm	$T$ /s	$V$ /(mm·s <sup>-1</sup> )
A1	0.67	9.3	75.87	251.34	354	0.71
A2	0.67	11.5	92.59	252.75	337	0.75
A3	0.67	19.3	100.21	265.92	277	0.96
A4	0.67	28.8	119.40	260.91	223	1.17
A5	0.67	35.7	135.62	248.92	196	1.27
A6	0.67	41.3	153.17	239.94	186	1.29
A7	0.67	45.5	194.11	265.22	149	1.78
A8	0.67	51.6	184.27	258.44	142	1.82
A9	0.67	60.4	198.10	259.86	122	2.13
A10	0.67	66.2	224.30	170.04	78	2.18
B1	1.92	8.5	68.62	245.96	143	1.72
B2	1.92	19.3	96.66	266.40	120	2.22
B3	1.92	23.5	115.26	271.20	120	2.26
B4	1.92	29.3	119.63	226.54	94	2.41
B5	1.92	35.8	140.94	263.68	103	2.56
B6	1.92	42	165.21	252.01	79	3.19
B7	1.92	46.5	166.01	264.60	70	3.78
B8	1.92	53.1	186.22	252.72	72	3.51
B9	1.92	58.2	193.7	237.25	65	3.65
B10	1.92	60.5	211.73	199.92	68	2.94
C1	3.67	9.7	73.66	235.47	141	1.67
C2	3.67	18.3	99.04	236.71	90	2.63
C3	3.67	29.0	120.11	284.00	80	3.55
C4	3.67	34.9	138.58	241.68	57	4.24
C5	3.67	40.2	142.66	264.24	72	3.67
C6	3.67	46.7	172.63	246.62	59	4.18
C7	3.67	51.5	192.12	211.19	49	4.31
C8	3.67	57.5	200.30	178.02	43	4.14
D1	6.67	8.5	69.01	255.06	117	2.18
D2	6.67	11.5	79.32	263.61	101	2.61
D3	6.67	18.8	99.36	265.68	81	3.28
D4	6.67	25.1	110.88	236.28	66	3.58
D5	6.67	30.4	126.78	247.04	64	3.86
D6	6.67	35.5	143.69	240.30	54	4.45
D7	6.67	42.5	157.99	261.66	42	6.23
D8	6.67	48.8	175.45	231.65	41	5.65
D9	6.67	53.6	195.36	202.02	37	5.46

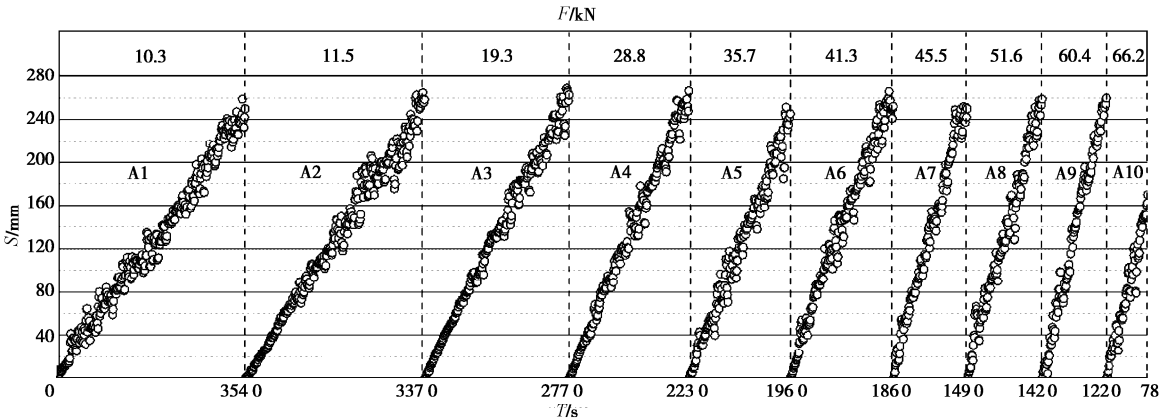


图 4 各种钻进压力下钻进位移和钻进时间监测值

Fig. 4 Monitoring values of drilling displacement and drilling time under various thrusts

2.2 钻进压力

不同钻进压力时钻进位移和钻进时间的监测值见图 4。 $S$  和  $T$  的散点值会聚集成直线，直线斜率为钻进速度 ( $V$ , mm/s)。在相同钻进压力时，钻进速度基本为固定值，这与 Yue 等<sup>[6,24]</sup>和 Yarali 等<sup>[22]</sup>的研究结论一致。但是，随着钻进压力增加，直线斜率明显不同，这表明钻进速度会随着钻进压力增大而改变，并非为固定值。钻进位移约 250 mm，当钻进压力位 9.3 kN 时，用时为 354 s；当钻进压力位 60.4 kN 时，用时仅为 122 s。这个钻进压力变化前后，钻进速度由 0.71 mm/s 增加至 2.13 mm/s，增加了将近 200 %。由此可见，钻进压力对钻进速度的影响是显著的。

图 4 中的 10 种钻进压力和其对应钻进速度整理成图 5 的散点图。通过曲线拟合得到了钻进压力和钻进速度的关系，两者呈现良好的指数函数关系，相关指数 ( $R^2$ ) 达到了 0.90，关系式如下所示：

$$V = 0.25F^{0.5} \quad (R^2 = 0.90) \quad (1)$$

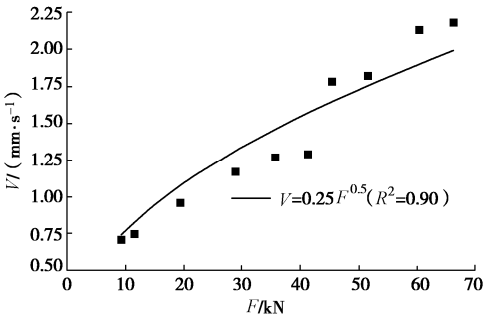


图 5 钻进压力和钻进速度的函数关系

Fig. 5 Relationship between thrust and drilling rate

2.3 钻进扭矩

钻进扭矩 ( $M$ ) 并非是非是钻机的直接输出参数，而是钻进过程中岩体对钻机的反作用效果。钻机在运行中实际钻进压力和钻进扭矩都是持续波动的，从图 6 可以看出， $M$  和  $F$  呈现出典型的正相关，二者关系可表达为

$$M = 2.623F + 47.040 \quad (R^2 = 0.83) \quad (2)$$

尤其在  $F < 70$  kN 时， $M$  和  $F$  的相关性会更好，实际钻进过程中，钻进压力普遍小于 70 kN，这种现象对解释钻进压力和钻进扭矩关系是有利的。对于一般地质钻机采用钻进压力表达钻进扭矩是可靠的，可以将两种因素合并为一个独立因素考虑。同时，数字钻进时监测钻进压力是非常容易实现的，而采用扭矩传感器监测钻进扭矩异常困难（见图 2）。所以，采用钻进压力表达钻进扭矩，将降低了数字钻机技术的硬件应用难度，有利于这种新技术在工程中的广泛应用。

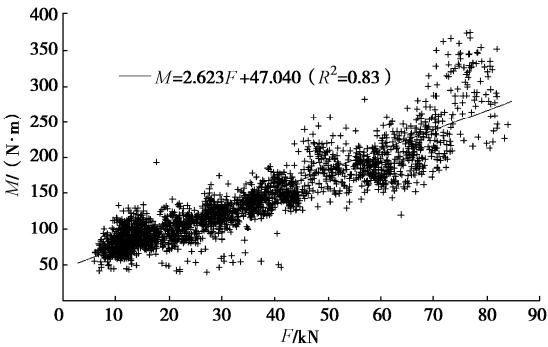


图 6 钻进扭矩与钻进压力的相关性

Fig. 6 Correlation between rotational torque and thrust

2.4 钻头转速

在钻进压力接近 20 kN 时，不同钻头转速下钻进位移 ( $S$ ) 和钻进时间 ( $T$ ) 的监测值见图 7。钻头转速由 0.67 rev/s 增加至 6.67 rev/s，钻进速度由 0.96 mm/s 增加至 3.28 mm/s，增加了 3.42 倍。钻头转速  $N$  和钻进速度  $V$  之间同样存在很好的指数函数关系（图 8），表达为

$$V = 1.31N^{0.5} \quad (R^2 = 0.93) \quad (3)$$

2.5 多重因素组合

将正交试验的所有结果进行统计分析，得到了图 9 所示的钻进速度变化曲线。需要指出，在数据统计分析中，考虑到式 (2) 的转换关系，将钻进扭矩的作用融入钻进压力加以考虑。从图 9 中可以看出，各个线条形成辐射状的曲线簇，钻进速度与钻进压力和钻

头转速呈现较好的指数函数关系, 相关系数 ( $R^2$ ) 均在 0.74 以上, 最高达 0.97。

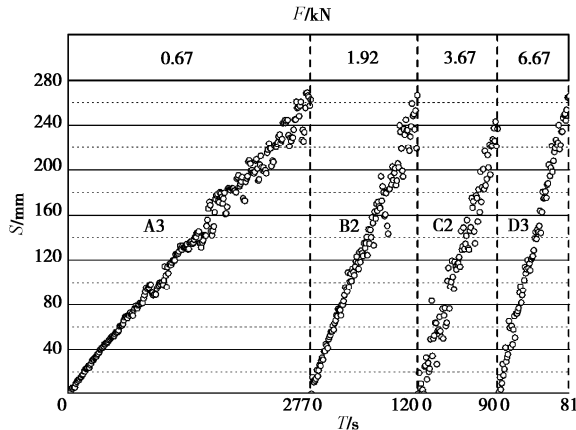


图7 各种钻头转速下钻头位移和钻进时间监测值

Fig. 7 Monitoring values of bit displacement and drilling time at various bit rotational speeds

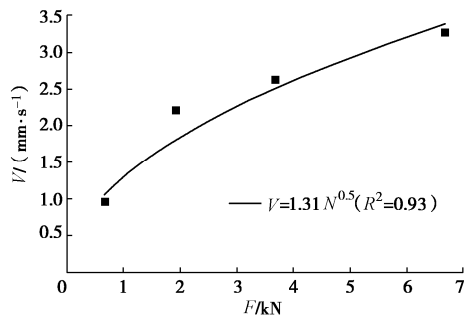
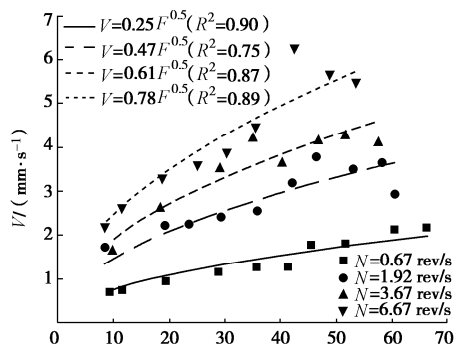
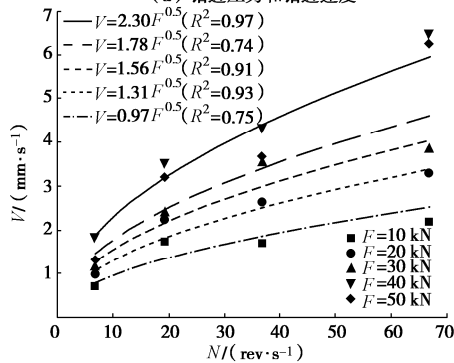


图8 钻头转速和钻进速度的函数关系

Fig. 8 Functional relationship between rotational speed and drilling rate



(a) 钻进压力和钻进速度



(b) 钻头转速和钻进速度

图9 钻进速度的变化规律

Fig. 9 Variation patterns of drilling rate

### 3 钻进过程指数

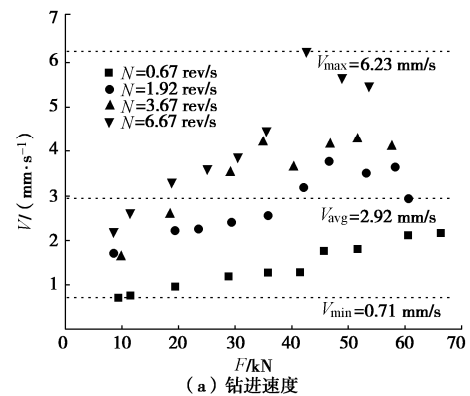
#### 3.1 均质材料钻进过程指数

如图 10 (a) 所示, 在钻进压力和钻头转速发生变化时, 钻进速度的离散性非常大, 最小钻进速度 ( $V_{\min}$ ) 为 0.71 mm/s, 而最大钻进速度 ( $V_{\max}$ ) 达到了 6.23 mm/s。所以, 试验数据表明, 即使在均质材料中机械参数对钻进速度的影响是显著的, 仅采用钻进速度作为评价岩体参数的唯一标准是不合理的。为此, 在钻进速度指标的基础上, 滤除  $F$ ,  $N$  和  $M$  对  $V$  的影响, 提出了钻进速度的归一化参数: 钻进过程指数 (drilling process index, DPI)。这个新指标在均质材料中应具有唯一性, 基于图 9 的曲线规律, 采用多元函数回归, 将 DPI 定义为

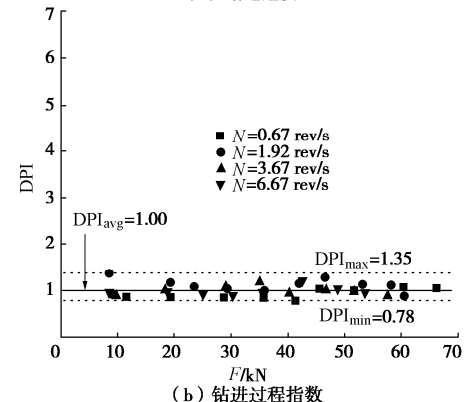
$$\text{DPI} = \alpha \cdot V \cdot F^{-0.5} \cdot N^{-0.5} \quad (4)$$

式中,  $\alpha$  为常量, 是一个与岩石强度有关的参数, 根据表 1 和图 9 的试验数据, 本试验中  $\alpha = 3.19$ 。

钻进过程指数变化规律见图 10 (b), 无论钻进压力和钻头转速怎么变化, DPI 均处于 0.78 和 1.35 之间, 在均质材料中它是非常稳定的数值, 平均值 ( $\text{DPI}_{\text{avg}}$ ) 为 1。因此, 利用钻进过程指数表达岩体完整性明显比传统的钻进速度更为合理。



(a) 钻进速度



(b) 钻进过程指数

图10 钻进速度的变化规律

Fig. 10 Discreteness of drilling rate and DPI

#### 3.2 裂隙岩体钻进过程指数

为了获取裂隙岩体的 DPI 分布特征, 在德厚水库



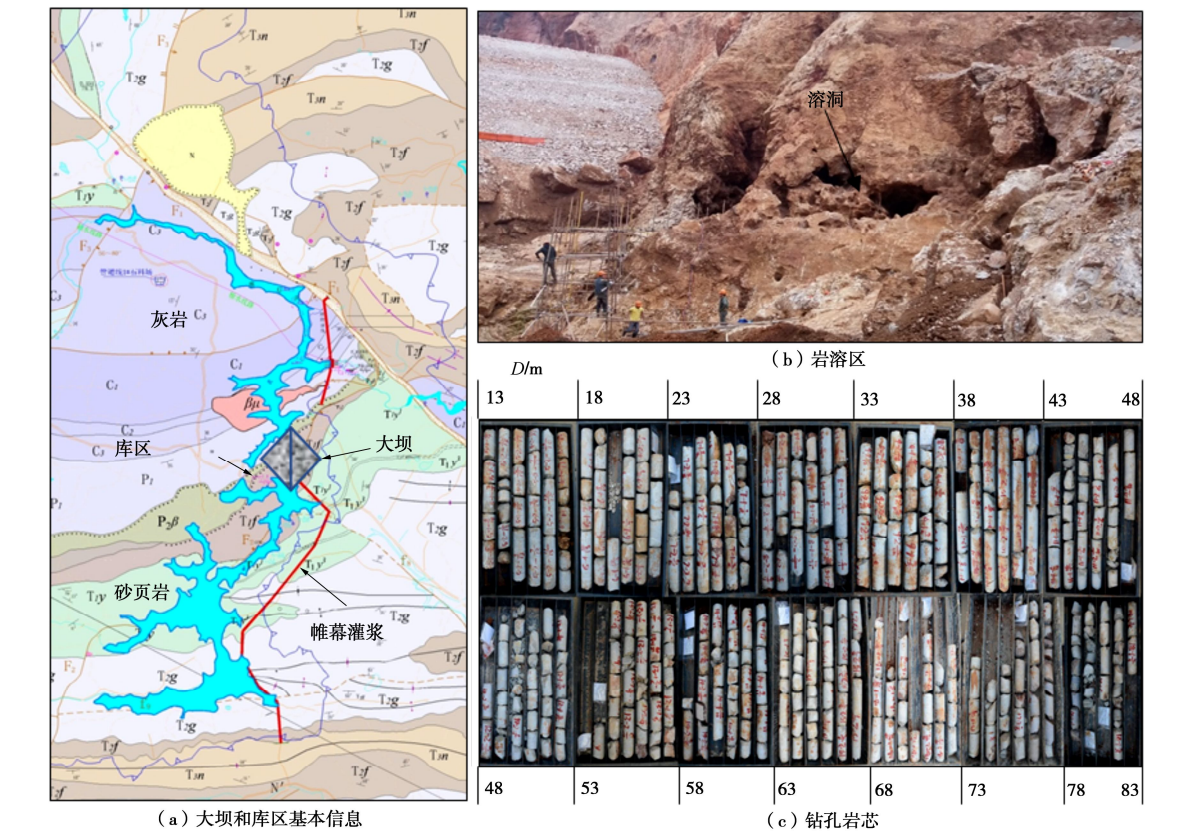


图 11 现场试验场地资料

Fig. 11 Basic information of in-situ tests

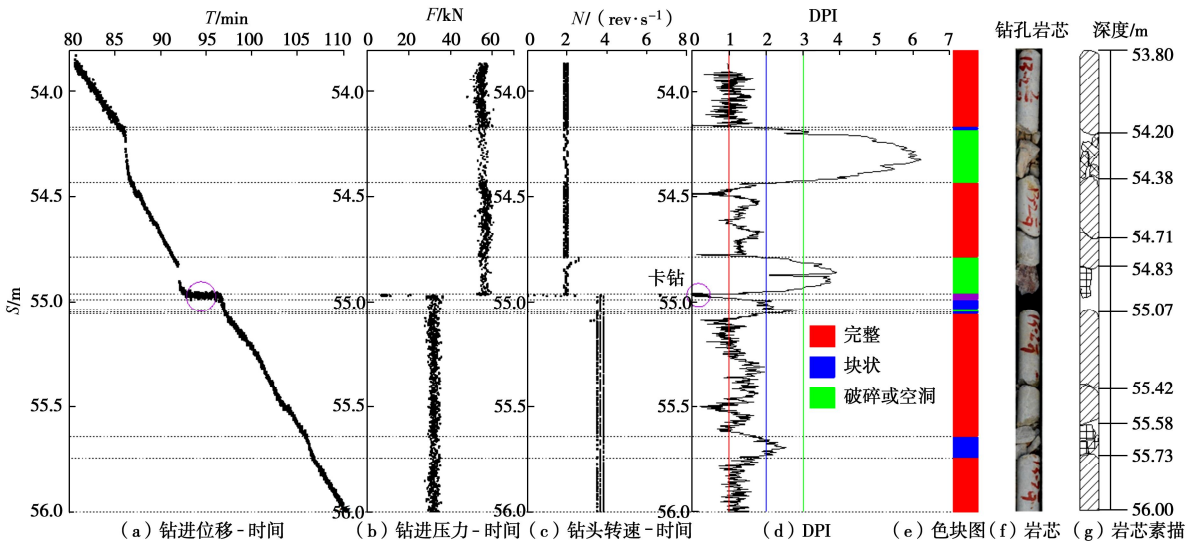


图 12 裂隙岩体的 DPI 和完整性

Fig. 12 DPI and integrity of fractured rock mass

开展了工程岩体的数字钻进试验，同时钻孔取芯观测以实现对比验证。图 11 (a) 描绘了库区的覆盖范围和大坝的位置，探测区域主要分布石灰岩，岩溶特别发育，岩体存在破碎层和空洞（见图 11 (b)），获取的岩芯按照深度排列（见图 11 (c)）。

在裂隙岩体中数字钻进位移-时间曲线是波动的（见图 12 (a)），对应钻进压力和钻头转速见图 12 (b) 和图 12 (c)，进一步数据处理得到裂隙岩体的

DPI（见图 12 (d)）。均质岩体中的 DPI 的理想值为 1，而在裂隙岩体中的 DPI 是一个变量，主要特征可归纳如下：

（1）当岩体完整时，DPI 的变化范围是 0~2，平均 DPI 接近 1，例如钻进深度为 53.8~54.2 m、54.4~54.8 m、55.1~55.6 m 以及 55.7~56.0 m，在图 12 (e) 中用红色区域填充。

（2）当岩体为块状或小裂隙时，DPI 会增大，处

于2~3之间,分布在钻进深度54.2, 55.1和55.6 m处,在图12(e)中用蓝色区域填充。

(3) 岩体非常破碎或出现空洞时,钻进深度54.2~54.4 m和54.8~55.0 m, DPI会超过3,在图12(e)中用绿色区域填充。DPI峰值甚至可以达到6以上,此时DPI的具体数值意义不大,可以统一认为是岩体不完整。

(4) 在深度54.9 m处, DPI值突变为0,主因是钻进速度瞬间降低至零,出现了卡钻现象。

按照表2中DPI和岩体完整性的关系,绘制了图12(e)的岩体完整性的色彩柱状图,和传统的岩芯柱状图(图12(f))及素描图(图12(g))相比,它能定量的表述钻孔内岩体完整性,具有重要应用价值。

表2 DPI和岩体完整性的关系

Table 2 Relationship between DPI and rock mass integrity			
岩体完整性	完整	块体状	破碎或空洞
DPI	$0 < \text{DPI} \leq 2$	$2 < \text{DPI} \leq 3$	$3 < \text{DPI}$

### 3.3 钻进过程指数的本质

以往研究常采用钻进速度描述岩体参数,本项试验结果(表1和图9)证实钻进速度会受到钻进压力 $F$ 和钻头转速 $N$ 的影响。因此,必须根据不同钻进状态下的变化规律,再消除各种因素的影响,才能解释真实的数字钻进指标和岩体参数之间的映射关系。

由图9可以看出,均质材料中“钻进速度 $V$ 和钻进压力 $F$ ”以及“钻进速度 $V$ 和钻头转速 $N$ ”均呈现良好的指数关系( $V$ 与 $F^{0.5}$ 和 $N^{0.5}$ )。因此,可将钻进速度 $V$ 与钻进压力 $F$ 和钻头转速 $N$ 的负指数( $F^{-0.5}$ 和 $N^{-0.5}$ )相乘,来消除 $F$ 和 $N$ 对 $V$ 的影响。也就是说钻进过程中的真实常量并非钻进速度<sup>[6, 22-23]</sup>,而是 $V \cdot F^{0.5} \cdot N^{0.5}$ 。为使数字钻进数据( $V \cdot F^{0.5} \cdot N^{0.5}$ )能表达裂隙岩体的完整性,定义了钻进过程指数(DPI)。在完整岩石中,平均钻进过程指数( $\text{DPI}_{\text{avg}}$ )固定为1,满足下式:

$$\text{DPI}_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \cdot F_i^{-0.5} \cdot N_i^{-0.5}}{n \cdot V_{\text{avg}} \cdot F_{\text{avg}}^{-0.5} \cdot N_{\text{avg}}^{-0.5}} = 1 \quad (5)$$

式中, $V_{\text{avg}}$ ,  $F_{\text{avg}}$ 和 $N_{\text{avg}}$ 分别为完整岩石的钻进速度、钻进压力和钻头转速的平均值。

对于一段完整岩体,根据式(5),可以得出式(4)中拟合参数 $\alpha$ 为

$$\alpha = \frac{1}{V_{\text{avg}} \cdot F_{\text{avg}}^{-0.5} \cdot N_{\text{avg}}^{-0.5}} \quad (6)$$

若 $F$ 和 $N$ 不发生变化,在软质岩钻进中, $V_{\text{avg}}$ 相对较大,对应 $\alpha$ 值相对较小,那么在硬质岩中 $\alpha$ 值相

对较大,所以 $\alpha$ 是一个与岩体强度参数有关的参数。另外,需要指出,在完整岩石中, $\alpha$ 可直接按式(6)计算取值,在裂隙岩体中, $\alpha$ 应在完整岩体段取值。例如,在图12(d)中, $\alpha$ 可采用53.8~54.2 m、54.4~54.8 m、55.1~55.6 m或55.7~56.0 m段对应的 $V_{\text{avg}} \cdot F_{\text{avg}}^{-0.5} \cdot N_{\text{avg}}^{-0.5}$ 的倒数。

对于裂隙岩体,完整段岩体DPI均值仍接近1;破碎段岩体材料均一性发生变化,本质是在 $\alpha$ ,  $F$ 和 $N$ 不变时 $V$ 会增大,也即常量 $V \cdot F^{0.5} \cdot N^{0.5}$ 的增加,表现为DPI升高。

### 3.4 DPI和RQD的关系

岩土工程中常用RQD表达岩体的完整性,并广泛应用到岩体质量评价和岩体分类<sup>[13]</sup>。根据RQD实际意义和DPI的特点,RQD和DPI的关系可定义为

$$\left. \begin{aligned} \text{RQD} &= \frac{\sum L_i (0 < \text{DPI} \leq 2)}{L} \times 100\% \\ L_i (0 < \text{DPI} \leq 2) &\geq 10 \text{ cm} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中, $L_i (0 < \text{DPI} \leq 2)$ 指DPI处于0~2之间时对应的岩芯长度。

对于图12的裂隙岩体,根据式(7)得到的RQD值为74,采用图12(f)的岩芯传统量测方法得到的RQD为72,二者是非常吻合。数字钻进过程指数为获取RQD提供了一种简易的、定量的新方法。通过自动化和信息化的数据运算得到DPI以获取岩体完整性,减少了人工统计RQD和编纂岩芯柱状素描图等繁杂的工序,还降低了人为主观因素在评价岩体完整性中的不利影响。

## 4 结 论

通过开展均质材料和裂隙岩体中的数字钻进试验,重点探讨了钻进压力、钻头转速和钻进扭矩等机械参数对钻进速度的影响,并提出了一种用于定量评价岩体完整性的新指标。研究结果表明:

(1) 钻进压力和钻进扭矩具有良好的线性相关性,两个因素可简化为单因素:钻进压力。数字钻进过程中钻进速度是变量,与钻进压力和钻头转速呈现较好的指数函数关系。

(2) 通过对钻进速度进行归一化处理,滤除了钻机械参数对钻进速度的影响,得到了用于表达岩体完整性的新指标:DPI。完整岩体DPI为0~2、块状岩体DPI为2~3,非常破碎与空洞岩体DPI大于3。

(3) DPI和RQD具有很好的相关性,通过这种数字技术获取DPI评价岩体完整性,减少了人工繁琐地质编纂工作和人为主观因素。

## 参考文献:

- [1] HOEK E. Strength of jointed rock masses[J]. *Géotechnique*, 2015, **33**(3): 187 – 223.
- [2] ANDO M. Geological and geophysical studies of the Nojima fault from drilling: an outline of the Nojima fault zone probe[J]. *The Island Arc*, 2001, **10**(3/4): 206 – 214.
- [3] FILLION M H, HADJIGEORGIOU J. Quantifying influence of drilling additional boreholes on quality of geological model[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, **56**: 347 – 363.
- [4] OLSON L, SAMSON C, MCKINNON SD. 3-D laser imaging of drill core for fracture detection and rock quality designation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, **73**: 156 – 164.
- [5] SARICAM T, OZTURK H. Estimation of RQD by digital image analysis using a shadow-based method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, **112**: 253 – 265.
- [6] 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.
- [7] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1965, **2**(2): 57 – 73.
- [8] HUGHES H M. Some aspects of rock machining[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1972, **9**(2): 205 – 211.
- [9] DETOURNAY E, DEFOURNY E. A phenomenological model for the drilling action of drag bits[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1992, **29**(1): 13 – 23.
- [10] YAGIZ S. Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, **24**(1): 66 – 74.
- [11] JANTUNEN E. A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, **42**(9): 997 – 1010.
- [12] BARTON NR, LIEN R, LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1974, **6**(4): 189 – 236.
- [13] 许宏发, 陈 锋, 王斌魏, 等. 岩体分级 BQ 与 RMR 的关系及其力学参数估计[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(1): 195 – 198. (XU Hong-fa, CHEN Feng, WANG Bin-wei, et al. Relationship between RMR and BQ for rock mass classification and estimation of its mechanical parameters [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(1): 195 – 198. (in Chinese))
- [14] HOEK E, MARINOS P, BENISSI M. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: The case of Athens schist formation[J]. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 1998, **57**: 151 – 160.
- [15] SCHUNNESSON. The drillability assessment of rocks using the different brittleness values[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 1996, **11**(3): 345 – 351.
- [16] GUI M W, SOGA K, BOLTON M D, et al. Instrumented borehole drilling for subsurface investigation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2002, **128**(4): 283 – 291.
- [17] SAEIDI O, TORABI SR, ATAIEI M. Development of a new index to assess the rock mass drillability[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2013, **31**(5): 1477 – 1495.
- [18] 刘建民, 曹治国. 考虑钻孔速率的公路隧道围岩类别超前分类研究[J]. *公路交通科技*, 2007, **24**(5): 99 – 102. (LIU Jian-min, CAO Zhi-guo. Study of surrounding rock stability classification considering drilling rock rate[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2007, **24**(5): 99 – 102. (in Chinese))
- [19] 邱道宏, 李术才, 薛翊国, 等. 基于数字钻进技术和量子遗传-径向基函数神经网络的围岩类别超前识别技术研究[J]. *岩土力学*, 2014, **35**(7): 2013 – 2018. (QIU Dao-hong, LI Shu-cai, XUE Yi-guo, et al. Advanced prediction of surrounding rock classification based on digital drilling technology and QGA-RBF neural network[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(7): 2013 – 2018. (in Chinese))
- [20] 田 昊, 李术才, 薛翊国, 等. 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[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(8): 2457 – 2464. (TIAN Hao, LI Shu-cai, XUE Yi-guo, et al. Identification of interface of tuff stratum and classification of surrounding rock of tunnel using drilling energy theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(8): 2457 – 2464. (in Chinese))
- [21] 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**(S1): 2939 - 2945. (in Chinese))

[22] YARALI O, KAHRAMAN S. The drillability assessment of rocks using the different brittleness values[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, **26**(2): 406 - 414.

[23] DARBOR M, FARAMARZI L, SHARIFZADEH M. Performance assessment of rotary drilling using non-linear multiple regression analysis and multilayer perceptron neural network[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, **78**: 1501 - 1513.

[24] 岳中琦. 钻孔过程监测 (DPM) 对工程岩体质量评价方法的完善与提升[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(10): 1977 - 1996. (YUE Zhong-qi. Drilling process monitoring for refining and upgrading rock mass quality classification methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(10):1977 - 1996. (in Chinese))

[25] RU Z L, ZHAO H B, ZHU C X. Probabilistic evaluation of drilling rate index based on a least square support vector machine and Monte Carlo simulation. Bulletin of Engineering Geology and the Environment[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, **78**: 3111 - 3118.

[26] KALANTARI S, BAGHBANAN A, HASHEMALHOSSEINI H. An analytical model for estimating rock strength parameters from small-scale drilling data[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, **11**(1): 139 - 149.

[27] WANG Q, GAO H, JIANG B, et al. Research on an evaluation method for the strength of broken coal mass reinforced by cement slurry based on digital drilling test technology[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, **78**: 4599 - 4609.

[28] HARRISON J P. Selection of the threshold value in RQD assessments[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1999, **36**(5): 673 - 685.

---

彩色插图索引

Doi: 10.11779/CJGE202104001 一文彩色插图 .....	(封 2)
Doi: 10.11779/CJGE202104007 一文彩色插图 .....	(后插 1)
Doi: 10.11779/CJGE202104010 一文彩色插图 .....	(后插 2)
Doi: 10.11779/CJGE202104011 一文彩色插图 .....	(后插 2, 封 3)
Doi: 10.11779/CJGE202104012 一文彩色插图 .....	(封 4)
Doi: 10.11779/CJGE202104015 一文彩色插图 .....	(后插 1, 后插 2)