

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.07.013

基于隧道掌子面炮孔钻进的超前地质预报技术研究

瞿竹¹, 姬同旭², 田湖南³

(1. 贵州三独高速公路建设有限公司, 贵州 独山 558200;

2. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550081;

3. 中科院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 钻孔过程中钻具与岩土体进行直接接触, 钻具响应信息综合反映了岩土体的力学性质, 钻具响应信息中隐藏的大量地质资料, 可用于分析、测定岩土体的力学参数和空间分布, 是进行地层界面识别和围岩级别划分的重要参考指标。现阶段在岩土工程领域的钻具响应信息并没有被收集, 造成了数据资源的极大浪费。为充分利用隧道炮孔钻进中的相关参数信息, 采集并建立参数与围岩质量的关系, 结合掌子面地质情况, 对掌子面前方围岩级别进行预报。依托贵州三独高速开展基于隧道掌子面炮孔钻进的超前地质预报技术研究并得到以下成果。研究证明了岩石的可钻性与钻进速度、振动加速度以及振动频率有直接的关系。在此基础上完成了隧道掌子面炮孔钻进短距离地质预报的理论研究; 研发了一套随钻监测设备, 应用于气动凿岩机, 随钻设备可采集钻机钻进速率、振动加速度的实时数据; 将采集到的钻进速率, 振动加速度进行分析研究, 构建了岩体级别和钻进信息的定量关系; 通过在依托工程中的应用, 初步建立了基于围岩岩石类型为石英砂岩的不同级别围岩的岩石抗钻系数标准数据库。并与开挖现场的地质报告进行对比, 完善了数据库。

关键词: 隧道工程; 超前地质预报; 掌子面; 炮孔钻进; 凿岩机

中图分类号: U452.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2020)07-0097-06

Advanced Geological Prediction Technology Based on Tunnel Face Borehole Drilling

QU Zhu¹, JI Tong-xu², TIAN Hu-nan³

(1. Guizhou Sandu - Dushan Expressway Construction Co., Ltd., Dushan Guizhou 558200, China;

2. Guizhou Transportation Planning Survey & Design Academe Co., Ltd., Guiyang Guizhou 550081, China;

3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan Hubei 430071, China)

Abstract: In the process of drilling, the drilling tool contacts with the rock and soil directly. The response information of the drilling tool reflects the mechanical properties of the rock and soil comprehensively. A large number of geological data hidden in the response information of the drilling tool can be used to analyze and determine the mechanical parameters and spatial distribution of the rock and soil. It is an important reference indicator for the identification of the formation interface and the classification of the surrounding rock. At present, the response information of drilling tools in the field of geotechnical engineering has not been collected, resulting in a great waste of data resources. In order to make full use of the relevant parameter information in tunnel blasthole drilling, the relationship between the parameters and the quality of surrounding rock is collected and established. Combining with the geological situation of the tunnel face, the level of surrounding rock in front of the tunnel face is predicted. Relying on Guizhou Sandu - Dushan expressway,

收稿日期: 2019-06-19

基金项目: 贵州省交通运输厅科技项目(2017-123-034)

作者简介: 瞿竹(1981-), 男, 贵州遵义人, 高级工程师。(16518358@qq.com)

the advance geological prediction technology based on borehole drilling of tunnel face is researched, and the following results are obtained. It proves that the drillability of rock is directly related to drilling speed, vibration acceleration and vibration frequency. On this basis, the theoretical research on short-distance geological prediction of borehole drilling in tunnel face is completed. A set of monitoring equipment while drilling is developed and applied to pneumatic rock drill. The monitoring equipment while drilling can collect the real-time data of drilling speed and vibration acceleration of the drilling machine. The collected drilling speed and vibration acceleration are analyzed, and the quantitative relationship between rock mass level and drilling information is established. Based on the application in project, the standard data base of rock anti drilling coefficients of different levels of surrounding rock based on the rock type of quartz sandstone is preliminarily established. Compared with the geological report of the excavation site, the database is improved.

Key words: tunnel engineering; advanced geological prediction; tunnel face; borehole drilling; rock drill

0 引言

随着我国水电、交通、矿山等行业工程建设的迅猛发展,越来越多的隧道修建在地质环境复杂的岩层中。在复杂地质条件下隧道开挖过程中,由于前方地质条件不清,不能提前做出预防,坍塌、冒顶、涌水、突泥等地质灾害时有发生,造成的财产损失和人员伤亡巨大。因此,施工期隧道开展超前地质预报工作尤为重要。目前常用的各类超前地质预报的物探方法都有其局限性^[1-2],由于地质环境的复杂性和物探方法本身的多解性,基于间接法的超前预报和结构探测的精度还不是很高,需要融合直接法,形成多方法多设备综合探测和超前地质预报技术体系。因此寻找新方法、新技术,从而进一步完善隧道超前地质预报的体系^[3-15]。

钻孔过程中钻具与岩土体进行直接接触,钻具响应信息综合反映了岩土体的力学性质,钻具响应信息中隐藏的大量地质资料,可用于分析、测定岩土体的力学参数和空间分布,是进行地层界面识别和围岩级别划分的重要参考指标。现阶段在岩土工程领域的钻具响应信息并没有被收集,造成了数据资源的极大浪费。眼鉴于此,本研究基于气动凿岩机破岩原理提供一种操作方便、费用低廉且较为可靠高效的隧道超前地质预报方法,可以进行实时的超前地质预报。炮孔是钻爆法开挖隧道钻爆开挖法施工过程中的必须环节,炮孔数量大、钻进快,不另外占用施工时间,研究表明炮孔钻进过程中的相关参数与前方围岩质量有非常密切的联系,本研究充分利用隧道炮孔钻进中的相关参数信息,采集并建立参数与围岩质量的关系,结合掌子面地质情况,对掌子面前方围岩级别进行预报。

1 岩石抗钻系数模型建立

1.1 气动凿岩机破岩原理

气动凿岩机破岩利用钻进过程中的冲击荷载作用破碎岩石,是一种常见的碎岩方式。在冲击荷载下,岩石内的微裂隙、空隙等受到挤压,相对的空间被迫减少、错动,从而产生新的裂隙,岩石表面先形成裂纹,随着冲击作用进行,产生承压核,发育成破碎坑最终导致岩石破碎^[16]。

1.2 抗钻系数

由破碎的过程可知,冲击过程中,消耗的能量主要用于使岩石发生各种形变破碎、钻杆钻头与岩石的摩擦、钻杆冲击岩石时抵消回弹做功等,其中有效的破岩消耗能量是造成各种岩石变形的能量。当钻机相同时,这部分能量消耗只与岩石自身力学性质有关,是岩石抵抗钻凿破坏能力的重要标志^[17]。

试验针对岩石抵抗钻凿破坏的能力进行研究,因每种级别的围岩物理力学性状不同,单位体积破碎功是不同的,在相同条件下,某一种围岩单位体积的破碎功是一个定值,它不仅反映了围岩抗破碎的属性,也能反映围岩综合物理力学特征^[18]。

基于钻进破岩的能量观点,引入的岩体抗钻系数,用于刻画不同岩体级别围岩的综合物理特性指标。设破碎岩石总体积为 V ;单位时间(钻机冲击功为 W ;钻杆的质量为 m ;考虑到因钻进过程钻机能量传导、钻杆钻头与岩石的非必要摩擦、抵消冲击回弹、钻头剪切破岩等消耗一部分钻机能量,引入效能系数 u 表示钻进破岩能量转化的有效系数。破岩总体积 V 取决于钻头底面积 A ,钻进速率 v 以及钻进时间 t ,根据能量守恒定律有:

$$Avtq = uma\Delta stf, \quad (1)$$

式中, t 为钻进时间; q 为单位体积岩石破碎功; Δs 为钻杆单次冲击位移 (冲程); f 为冲击频率; a 为振动加速度。

令 $K = \frac{q}{u}$, $C = \frac{m\Delta sf}{A}$, 有:

$$K = C\left(\frac{a}{v}\right), \quad (2)$$

式中, K 为抗钻系数, 在相同的钻机条件下, 抗钻系数 K 与钻进速率 v 、振动加速度 a 相关; u 为钻进破岩能量转化的有效系数。

2 典型围岩级别标准数据库

2.1 建立围岩级别标准数据库

建立典型围岩级别的抗钻系数数据库 $\{K_i\}$ ($i = \text{I, II, III, IV, V}$, 分别表示 I, II, III, IV, V 级围岩, 下同), 抗钻系数值越大, 则围岩性质越好, i 表示的数字越小。通过在 i 级围岩中进行多次炮孔钻进并获得钻进信息, 由式 (2) 计算得到一系列抗钻系数 $K_{i1}, K_{i2}, K_{i3}, \dots, K_{in}$, 从而得到 i 级围岩的抗钻系数数据库 $\{K_i\}$ 。对 i 级围岩的抗钻系数数据库 $\{K_i\}$ 内的数据 $K_{i1}, K_{i2}, K_{i3}, \dots, K_{in}$, 根据概率统计方法进行数据筛选, 筛选后的数据可以作为抗钻系数标准数据库 $\{K_i\}$ 。根据中心极限定理, 认为 i 级围岩的抗钻系数数据库 $\{K_i\}$ 内的数据 $K_{i1}, K_{i2}, K_{i3}, \dots, K_{in}$ 服从正态分布。

可计算出抗钻系数的均值 \bar{K}_i 为:

$$\bar{K}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n K_{ij}. \quad (3)$$

取置信水平为 95% 的置信区间值, 则 $z = 1.96$, 即抗钻系数的置信区间为:

$$K_{ij} \in \left(\bar{K}_i - 1.96 \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (K_{ij} - \bar{K}_i)^2}}{\sqrt{n}}, \bar{K}_i + 1.96 \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (K_{ij} - \bar{K}_i)^2}}{\sqrt{n}} \right) \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (4)$$

将计算所得数据纳入抗钻系数标准数据库, 形成 i 级围岩的抗钻系数标准数据库 $\{K_i\}$ 。

2.2 建立围岩级别标准数据库判别标准

对采集的钻进参数根据式 (2) 计算抗钻系数 K , 然后与上述建立的抗钻系数标准数据库 $\{K_i\}$ 进行对比, 计算待测抗钻系数 K 值的所在范围区间,

若计算的抗钻系数指数 $K \in (\min\{K_i\}, \max\{K_i\})$, ($i = \text{I, II, III, IV, V}$), 即式 (4) 区间, 则可以认为该钻进段的基本围岩级别为 i 级。根据掌子面现场围岩的情况和岩石的点荷载强度、单轴抗压强度的判别, 与计算抗钻系数得到的围岩级别进行对比、验证, 对抗钻系数标准数据库 $\{K_i\}$ 进行修正, 再将隧道开挖后的实际围岩级别结合采集到的数据扩充到抗钻系数标准数据库 $\{K_i\}$ 中, 这样在下次预报的时候, 可以利用丰富的抗钻系数标准数据库 $\{K_i\}$, 提高数据库的准确性。

3 参数获取

为获取围岩级别标准数据库相关参数, 本研究设计一套随钻监测设备, 随钻监测设备示意图见图 1。

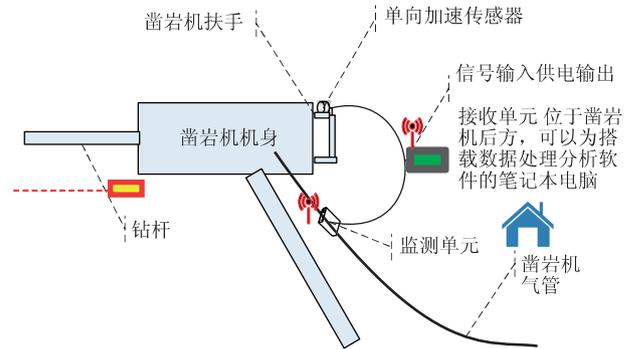


图 1 设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of equipment

安装于气动凿岩机上, 采集钻进速率、振动加速度的实时数据, 利用隧道开挖过程中普遍的炮孔钻进信息, 即钻进速率、振动加速度、振动频率, 绘制钻进时间与炮孔钻进信息的关系曲线图, 建立典型的围岩抗钻系数标准数据库, 构建围岩级别与炮孔钻进信息的关系, 实现不良地质体探测与岩体基本质量判别等功能, 形成隧道掌子面炮孔钻进的短距离地质预报信息系统。

4 现场测试

为验证设备和系统工作的稳定性和可靠性, 本研究选取贵州在建三独高速的紫林山隧道 ZK36 + 177 掌子面处 (设计围岩级别为 III 级) 和罗平隧道 YK26 + 670 (断层带, 设计围岩级别为 V 级)、ZK27 + 077 掌子面处 (设计围岩级别为 IV 级) 作为依托点进行现场测试工作。通过在不同围岩级别的炮孔钻进过程中采集信息, 分析认证钻进速率、振

动加速度、振动频率与围岩级别的关系,根据炮孔钻进破岩原理的研究,利用提出的建立岩石抗凿钻能力模型的方法,采用抗钻系数公式进行计算,分析隧道现场围岩级别,与地质预报结果进行比对,为建立抗钻系数标准数据库扩充数据量。

4.1 钻进速率

经过现场炮孔钻进试验,采集钻进深度数据,建立钻进深度—时间曲线,取紫林山隧道掌子面 ZK36 + 177、罗平隧道掌子面 ZK27 + 077、罗平隧道 YK26 + 670 断层 3 处典型炮孔钻进信息,根据钻进深度变化量 ΔL 除以钻进时间变化量 Δt , 即: $v = \Delta L / \Delta t$, 可以计算得到钻进速率,对散点图拟合趋势线,可以得到钻进速率的平均值。经统计,紫林山隧道 III 级围岩的钻进速率取值范围为 0.18 ~ 0.26 m/min; 罗平隧道 IV 级围岩的钻进速率范围为 0.25 ~ 0.45 m/min; 罗平隧道 V 级围岩的钻进速率范围为 0.49 ~ 0.55 m/min。

对 3 个炮孔的平均钻进速率进行比较发现罗平断层钻速最快,罗平掌子面钻速次之,紫林山隧道掌子面钻速最慢,根据钻进速率越快,围岩强度越差,可以得到 3 个测试地点的围岩强度有明显的差异。

4.2 振动加速度

分析钻进试验中典型的振动加速度波形图(图 2),由图可以看出,整个凿岩过程可以用一系列振动加速度的波形进行体现。从振动加速度波形中可以看出,每次冲击波形的持续时间与 YT-28 气动凿岩机的冲击周期相一致,大约为 25 ~ 30 ms,可以反映振动加速度传感器采集的数据具有可靠性。在凿岩机单次冲击破岩过程中,钻杆的运动状态可以分为冲击段、钻杆回程段和再次冲击段 3 个阶段,为准确建立振动加速度与围岩级别的关系,本研究选取冲击段作为主体数据进行分析研究。

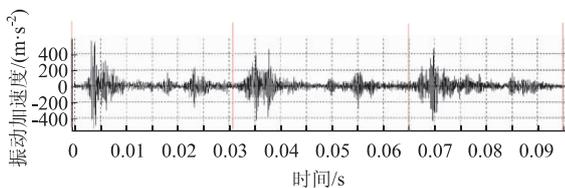


图 2 钻机三次冲击破岩振动加速度曲线

Fig. 2 Acceleration curve of rock vibration caused by 3 impacts of drill

对 3 个炮孔的典型振动加速度波形进行比较发现,紫林山掌子面 ZK36 + 177 炮孔、罗平掌子面

表 1 冲击段振动加速度采集数据

Tab. 1 Collected vibration acceleration data of impact section

位置	时间范围/s	加速度均值/ ($m \cdot s^{-2}$)	加速度极值/ ($m \cdot s^{-2}$)
紫林山隧道 ZK36 + 177 掌子面	0 ~ 0.011	62.5	389.5
罗平隧道 ZK26 + 670 掌子面	0 ~ 0.009	11.5	152.3
罗平隧道 YK27 + 077 掌子面	0 ~ 0.014	23.1	206.8

YK27 + 077 炮孔、罗平断层 ZK26 + 670 炮孔,3 者的振动加速度均值和振动加速度极值均依次减小,根据凿岩机破岩原理的分析研究,可知振动加速度越大,凿岩机破岩所做冲击功越多,围岩强度越大,围岩级别就好。

4.3 振动频率

当单次冲击做功一定时,岩体质量越好,所反映的振动强烈程度也就越明显,所以在钻进的信息中,振动强烈程度可以作为识别岩体基本质量的重要指标,而振动强烈程度可以由岩石的振动频率所反映。所以利用冲击段振动加速度波形进行频谱分析,通过傅里叶变换可以得到对应的振动频率并绘制典型的冲击振动频谱图,得到相应的主频范围。

通过对 3 个不同掌子面振动频率的统计进行分析来看,3 个冲击段振动加速度主频范围有明显的差别,且岩体质量级别与振动主频具有正相关,振动主频范围高的岩体质量较好。根据(表 2)可以看出,冲击段振动加速度、振动主频率与围岩级别具有明显的相关性,反映为主频范围区间值、振动加速度值越大,围岩的质量越差。

表 2 冲击段主频范围与振动加速度、围岩级别关系表

Tab. 2 Relationship of main frequency range of impact section with vibration acceleration and surrounding rock level

位置	钻进 阶段	主频范围/ Hz	振动加 速度均值/ ($m \cdot s^{-2}$)	振动加 速度极值/ ($m \cdot s^{-2}$)	围岩 级别
紫林山隧道 ZK36 + 177 掌子面	冲击段	2 500 ~ 3 500	62.5	389.5	III
罗平隧道 ZK27 + 077 掌子面	冲击段	2 000 ~ 2 500	23.1	206.8	IV
罗平隧道 YK26 + 670 掌子面	冲击段	1 500 ~ 2 000	11.5	152.3	V

4.4 围岩级别

对紫林山掌子面Ⅲ级围岩、罗平掌子面Ⅳ级围岩、罗平断层Ⅴ级围岩 3 地的炮孔钻进速率、冲击段主频范围、冲击段振动加速度进行统计汇, 确定其钻进速率、冲击段主频范围、冲击段的取值范围(见表 3)。

表 3 不同级别围岩的围岩钻进速率、钻进振动主要参数范围

Tab. 3 Main parameter ranges of drilling speed and of drilling vibration of different levels surrounding rock

围岩级别	主要参数范围			
	钻进速率范围/ (m·min ⁻¹)	冲击段加速度极值 范围/(m·s ⁻²)	冲击段加速度均值 范围/(m·s ⁻²)	冲击段主 频范围/Hz
Ⅲ	0.18~0.26	270~890	31~68	2 500~3 500
Ⅳ	0.25~0.45	120~670	28~50	2 000~3 000
Ⅴ	0.49~0.55	85~560	17~34	1 500~2 500

取冲击段加速度均值进行抗钻系数的计算, 并且确定不同级别围岩的抗钻系数区间, 建立抗钻系数标准数据库 {K_i}。通过式(2)利用冲击段振动加速度均值和钻进速率计算不同围岩级别的一系列抗钻系数, 并通过式(4)求可信度为 95% 的正态分布区间, 可以得到如下抗钻系数范围

$$\begin{cases} K_1 \in (132.3, 419.4) \\ K_2 \in (69.1, 222.0) \\ K_3 \in (34.3, 77.1) \end{cases}, \quad (5)$$

式中, K₁, K₂, K₃ 分别为Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ级围岩的抗钻系数区间。由于数据样本较少的原因为, 抗钻系数区间存在重叠部分, 如计算结果在重叠范围内, 需结合现场掌子面情况综合判定。

紫林山隧道 ZK36+177 后半段与罗平隧道 YK27+077 后半段和 YK26+670 的Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ级围岩钻进信息数据, 重复上述计算步骤, 对 YT-28 型气动凿岩机抗钻系数标准数据库进行验证, 如表 4 所示。

表 4 YT-28 型气动凿岩机抗钻系数标准数据库验证计算表

Tab. 4 Checking table of standard database of anti-drilling coefficient of YT-28 pneumatic rock drill

实际岩体级别	计算的主要指标和预测结果			
	钻进速率均值/ (m·min ⁻¹)	冲击段加速度 均值/(m·s ⁻²)	抗钻系数 K	预测岩体 级别
Ⅲ	0.24	54.3	251.1	Ⅲ
Ⅳ	0.41	35.2	95.3	Ⅳ
Ⅴ	0.51	23.6	51.4	Ⅴ

验证结果表明, 上述 YT-28 型气动凿岩机抗钻系数标准数据库结果较好, 计算得到的抗钻系数 K 值均属于对应的围岩抗钻系数范围区间。通过钻进速率、振动加速度计算抗钻系数, 具有较好的判断围岩基本级别的能力。

5 结论

(1) 进行岩石的可钻性研究, 证明了岩石的可钻性与钻进速度 v、振动加速度 a 以及振动频率 f 有直接的关系, 引入了岩石抗钻系数, 并且建立了岩石抗钻系数的关系式, 建立了不同级别围岩的岩石抗钻系数标准数据库, 完成了隧道掌子面炮孔钻进短距离地质预报的理论研究。

(2) 研发了一套随钻监测设备, 应用于气动凿岩机, 随钻设备可采集钻机钻进速率 v、振动加速度 a 的实时数据, 由监测单元储存并无线传输给接收单元(笔记本电脑等), 接收单元加载了钻进信息采集软件, 可以显示振动加速度波形与钻进深度的动态变化情况。

(3) 将采集到的钻进速率 v, 振动加速度 a 的时间变化绘制二维曲线图, 并将振动信号进行傅里叶变换, 进行信号的频谱分析。构建了岩体级别和钻进信息的定量关系, 可以在较短时间内用来判别围岩级别, 探测前方不良地质体情况。

(4) 在贵州三独高速罗平隧道、紫林山隧道等隧道进行推广应用, 并初步建立了基于围岩岩石类型为石英砂岩的不同级别围岩的岩石抗钻系数标准数据库。同时与开挖现场的地质报告进行比对, 完善了数据库。

参考文献:

References:

[1] 毛正君, 倪万魁, 付晓刚. 隧道超前地质灾害预报综述 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18 (4): 79-81, 87.
MAO Zheng-jun, NI Wan-kui, FU Xiao-gang. Review on Advanced Geological Hazards Prediction of Tunnel [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18 (4): 79-81, 87.

[2] 欧阳刚杰. 隧道超前地质预报综述 [J]. 企业技术开发, 2009, 28 (1): 28-30.
OUYANG Gang-jie. Summary of Tunnel Leading Geology Forecast [J]. Technological Development of Enterprise, 2009, 28 (1): 28-30.

[3] 张存亮. 隧道超前地质预报方法及应用研究 [D]. 西

- 安: 西安科技大学, 2011.
- ZHANG Cun-liang. Study on Method and Application of Advanced Geological Forecast in Tunnel [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011.
- [4] 曲海锋, 刘志刚, 朱合华. 隧道信息化施工中综合超前地质预报技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (6): 1246-1251.
- QU Hai-feng, LIU Zhi-gang, ZHU He-hua. Technique of Synthetic Geologic Prediction Ahead in Tunnel Informational Construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (6): 1246-1251.
- [5] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (6): 1090-1113.
- LI Shu-cai, LIU Bin, SUN Huai-feng, et al. State of Art and Trends of Advanced Geological Prediction in Tunnel Construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (6): 1090-1113.
- [6] 李天斌, 孟陆波, 朱劲, 等. 隧道超前地质预报综合分析方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (12): 2429-2436.
- LI Tian-bin, MENG Lu-bo, ZHU Jin, et al. Comprehensive Analysis Method for Advanced Forecast of Geology in Tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (12): 2429-2436.
- [7] 雷坚强, 丁彰芳. 公路隧道施工监控量测与超前地质预报技术现状及思考 [J]. 现代隧道技术, 2013, 50 (6): 32-38.
- LEI Jian-qiang, DING Zhang-fang. Current Status of and Suggestion on Monitoring and Measurement and Advance Geological Prediction Technology for Highway Tunnel Construction [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50 (6): 32-38.
- [8] 张晓. 齐岳山隧道岩溶超前预报及综合集成系统研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- ZHANG Xiao. Advanced Forecast and Research of Integrated System of Karst in Qiyueshan Tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [9] 柳厚祥, 查焕奕, 钱程, 等. 基于掌子面结构量化的公路隧道围岩分级方法 [J]. 公路交通科技, 2019, 36 (7): 90-97.
- LIU Hou-xiang, ZHA Huan-yi, QIAN Cheng, et al. A Method for Classifying Surrounding Rock of Highway Tunnel Based on Quantization of Tunnel Face Structure [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36 (7): 90-97.
- [10] 叶英. 隧道施工超前地质预报技术综述 [J]. 市政技术, 2012, 30 (5): 19-23.
- YE Ying. A Review on Tunnel Construction Ahead Geological Prediction Technology [J]. Municipal Engineering Technology, 2012, 30 (5): 19-23.
- [11] 葛颜慧, 李术才, 张庆松, 等. 基于风险评价的岩溶隧道综合超前地质预报技术研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32 (7): 1124-1130.
- GE Yan-hui, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Comprehensive Geological Prediction Based on Risk Evaluation during Tunneling in Karst Area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (7): 1124-1130.
- [12] 王晓睿, 王元汉, 张世海. 模糊推理的综合评判系统在隧道围岩智能分类中的应用研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 36 (3): 100-104.
- WANG Xiao-rui, WANG Yuan-han, ZHANG Shi-hai. Study on Synthetic Judge System of Fuzzy Reasoning Applied to Intellectual Classification of Tunnel Surrounding Rock [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 36 (3): 100-104.
- [13] 闫宏亮, 石文龙, 李琳. 随钻测量信息传输方式的发展现状综述研究 [J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2015, 17 (6): 69-72, 83.
- YAN Hong-liang, SHI Wen-long, LI Lin. Research on the Status and Future of the MWD Data Transmission [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2015, 17 (6): 69-72, 83.
- [14] 苏永华, 马宁, 胡检. 采用小样本统计理论的隧道围岩分类 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (8): 66-69, 80.
- SU Yong-hua, MA Ning, HU Jian. Classification of Tunnel Surrounding Rock Based on Small Sample Statistical Theory [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (8): 66-69, 80.
- [15] 胡小林, 黄麟森, 王清峰. 煤矿井下随钻测量技术的应用研究 [J]. 矿冶, 2012, 21 (4): 89-92.
- HU Xiao-lin, HUANG Lin-sen, WANG Qing-feng. Study on Measurement While Drilling Technology Application in Coal Mine Underground [J]. Mining and Metallurgy, 2012, 21 (4): 89-92.
- [16] 曹钧, 沈志康, 胡永乐, 等. 冲击作用下岩石破碎比功理论分析及模糊预测模型 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (增2): 145-149.

(下转第110页)

- 沈阳: 东北大学, 2009.
- WAN Ming-fu. Study of Mechanical Behavior on Super-span Road Tunnel Construction Process [D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.
- [12] 伍尚干, 严宗雪. 龙头山隧道洞口段核心土临时支撑拆除方案研究 [J]. 公路, 2010 (4): 207-210.
- WU Shang-gan, YAN Zong-xue. Study on Dismantling Temporary Supports of Longtou Mountain Tunnel in Portal Section with Core Soil [J]. Highway, 2010 (4): 207-210.
- [13] PIGORINI A, SCIOTTI A, ZOPPO G, et al. Prediction and Performance of a Ground Freezing Application to the Rehabilitation Works of an Existing Tunnel: Geotechnical Investigations, Numerical Modelling and Real-scale Trial Tests [J]. Ingegneria Ferroviaria, 2011, 66 (6): 569-584.
- [14] 张俊儒, 吴洁, 严丛文, 等. 中国四车道及以上超大断面公路隧道修建技术的发展 [J]. 中国公路学报, 2020, 33 (1): 14-31.
- ZHANG Jun-ru, WU Jie, YAN Cong-wen, et al. Construction Technology of Super-large Section of Highway Tunnels with Four or More Lanes in China [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (1): 14-31.
- [15] 谢琪. 福州三环路金鸡山隧道和罗汉山隧道设计的若干分析 [J]. 公路工程, 2016, 41 (5): 139-143.
- XIE Qi. Some Analyses of the Design for Jinjishan Tunnel and Luohanshan Tunnel on the Third Ring Road in Fuzhou [J]. Highway Engineering, 2016, 41 (5): 139-143.
- [16] JTG/T D70—2010, 公路隧道设计细则 [S].
- JTG/T D70—2010, Guidelines for Design of Highway Tunnel [S].
- [17] 吴正恺. 大断面市政公路隧道扁平率与支护参数适宜性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- WU Zheng-kai. Study on Suitability of Flat Ratio and Support Parameters of Large Section Highway Tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [18] 田志宇, 林国进, 杨枫, 等. 隧道不同支护体系的支护效果模型试验研究 [J]. 现代隧道技术, 2018, 55 (2): 134-139.
- TIAN Zhi-yu, LIN Guo-jin, YANG Feng, et al. Experimental Test of Support Effect of Different Tunnel Support Systems [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55 (2): 134-139.
- [19] 苏晓堃. 隧道开挖数值模拟的围岩边界取值范围研究 [J]. 铁道工程学报, 2012, 29 (3): 64-68.
- SU Xiao-kun. Research on Choosing Boundary Range of Surrounding Rock in Numerical Simulation of Tunnel Excavation [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29 (3): 64-68.
- [20] 何川, 唐志成, 汪波, 等. 应力场对缺陷隧道结构承载力影响的模型试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5 (2): 227-234.
- HE Chuan, TANG Zhi-cheng, WANG Bo, et al. Study on Effects of Stress Field for Bearing Capacity in Defect Tunnel [J]. Chinese Journal of Underground space and Engineering, 2009, 5 (2): 227-234.

(上接第102页)

- CAO Jun, SHEN Zhi-kang, HU Yong-le, et al. Theoretic Analysis of Specific Power of Broken Hard Rock by Impact Action and Its Fuzzy Prediction Model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (S2): 145-149.
- [17] 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, 27 (3): 478-483.
- [18] 田昊, 李树才, 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.