

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220713001

文章编号:1672-9331(2023)03-0091-11

引用格式:陈祖军,何明明,周佳佩,等.基于数字钻技术的岩石强度特性预测方法研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(3):91-101.

Citation: CHEN Zujun, HE Mingming, ZHOU Jiawei, et al. Research on prediction method of rock strength characteristics based on digital drilling technology[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(3): 91-101.

基于数字钻技术的岩石强度特性预测方法研究

陈祖军¹,何明明²,周佳佩²,邓边员¹

(1. 云南省建设投资控股集团有限公司, 云南 昆明 650501, 2. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要:【目的】快速准确地超前预报岩体力学参数。【方法】通过分析取芯钻头的受力特点,根据力学极限平衡原理建立钻进过程中机-岩相互作用的数学模型,提出一种基于数字钻技术的岩石主要强度参数(内摩擦角、单轴抗压强度和抗拉强度)的解析方法。利用自主研发的高精度数字钻系统预测4种岩石的内摩擦角并与室内试验测定值进行对比,验证该方法的可靠性。通过对岩石强度与内摩擦角、切削强度比(岩石无侧限抗压强度与切削强度之比)进行相关性分析,预测岩石强度并对预测结果进行验证。【结果】通过数字钻技术获得的岩石的内摩擦角与标准室内试验测定值之间的误差为1.0%~3.5%。岩石单轴抗压强度、抗拉强度均与切削强度比呈线性正相关,岩石强度的预测值与室内标准试验测定值之间的误差略超过20.0%。【结论】利用数字钻技术预测的岩石力学参数经过验证具有可靠性,该方法在实际工程中具有一定的应用价值。

关键词:数字钻参数;单轴抗压强度;抗拉强度;切削强度比;预测方法

中图分类号:TU45

文献标志码:A

0 引言

准确测量岩石的单轴抗压强度和抗拉强度是保证工程岩体安全稳定的前提。准确评价岩体强度特性,在工程设计与施工中具有重要的实践意义^[1]。目前,通常采用岩石单轴压缩试验及点荷载试验测量岩石的单轴抗压强度^[2]。具有代表性的岩石抗拉强度测试方法包括直接拉伸试验、巴西劈裂试验、三点或四点弯曲拉伸试验及空心岩柱试验等^[3-4]。然而,岩石强度参数的测定往往要求精心制备试样,特别是对试样进行抛光和形状整改,制备步骤复杂且要求试样完整性良好,费时又费钱。

PALASSI等^[5]、NAEIMIPOUR等^[6]和HE等^[7-8]利用点载荷、划痕、施密特锤等间接方法来确定岩石的单轴抗压强度。王成虎等^[9]利用室内和现场

水压致裂试验联合确定岩石的抗拉强度。然而,采用这些方法获得原位岩石的信息有限,不能完全反映野外岩石的特性^[10]。估算复杂野外条件下岩石的强度参数,间接方法存在局限性^[5]。

数字钻技术作为一种新方法,可用于确定岩石的强度参数^[10-14]。该方法根据监测仪记录的钻进参数,对现场岩石的强度进行预测,具有连续测量、无需采样和操作简单等特点^[5]。近50年来,研究人员基于钻头钻进过程的力平衡和能量平衡,提出了各种分析模型,旨在不断提高数字钻技术对岩石强度参数的预测精度。其中,NAKAJIMA等^[15]和YAHIAOUI等^[16]基于力平衡分析模型,建立了在岩石破碎区钻进数据和岩石强度之间的关系。KALANTARI等^[17]开发了一种“T”形刮刀钻头的分析模型,并用于估算岩石强度参数。MUNOZ等^[13,18]基于能量平衡分析模型,建立了岩石的能量比和单轴抗压强度之间的线性关系。王琦

收稿日期:2022-07-13;修回日期:2022-08-06;接受日期:2022-08-16

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2019JQ395);陕西省教育厅科研计划项目(20JS093)

通信作者:何明明(1986年—)(ORCID:0000-0002-2726-9371),男,副教授,主要从事岩石力学方面的研究。

E-mail:hemingming@xaut.edu.cn

等^[19-21]基于岩石切削破坏过程的力学分析,建立了随钻参数与岩石黏聚力 c 、内摩擦角 φ 间的关系。宋玲等^[22]建立了岩石切削破坏的力学模型,推导了角片式钻头推进力、扭矩与岩石参数(c 、 φ)间的数学关系。李骞等^[23-24]、HE等^[25-26]基于金刚石钻头钻进过程破岩的力学模型,建立了数字钻参数与岩石参数(c 、 φ)之间关系的解析模型,并提出了深度卷积神经网络模型来预测岩石强度参数。另一方面,岩石抗拉强度也是衡量岩石性能的一个重要的力学指标,由于岩石的抗压强度要远大于其抗拉强度,拉伸破坏常常是工程岩体发生破坏的主要形式之一^[8]。综上可知,利用解析分析方法建立数字钻参数与抗拉强度参数关系的研究较少。其根本原因是,已提出的解析模型参数多与钻头几何特征和随钻参数控制量紧密相关,在建立数字钻参数与抗压或抗拉强度参数关系模型时,无法排除钻头对岩石接触面的压缩作用。

本研究基于金刚石钻头钻进岩石过程的工作原理,结合分析模型,将单轴抗压强度和抗拉强度与钻探参数通过岩石力学参数直接建立联系,分析研究岩石内摩擦角、切削强度比(岩石无侧限抗压强度与切削强度之比)、岩石强度(单轴抗压强度、抗拉强度)三者之间的关系,提出了一种估算岩石强度参数的新方法。通过将数字钻试验预测的岩石强度参数值与标准室内试验的测定值进行对比,分析两者之间的误差,验证该方法的可行性。

1 分析模型

近年来,数字钻技术已成为一种用于确定岩石力学特性的原位测试方法^[25]。钻进参数包括钻速、推力、转速和扭矩力,均与岩石的力学参数密切相关。以螺旋方式钻进岩石的过程通常分为切削阶段和摩擦阶段^[26]。在切削阶段,垂直于轴向运动的扭力只切削岩石;在摩擦阶段,压痕随钻头轴向推进而变化,包括压痕、破碎和粉碎。在这两个阶段,推力和扭力起着重要作用,并且在连续快速地推进过程中同时发生。假设取芯钻头的金刚石颗粒形状为梯形体,在钻进过程中钻头所受的推力和扭力满足力的极限平衡条件,钻头破岩满足摩尔库伦准则。如图1所示,推力 F_n 和扭力 F_t

各有两个分量,一个是切削力,另一个是摩擦力,即:

$$F_n = F_{n,c} + F_{n,w} \quad (1)$$

$$F_t = F_{t,c} + F_{t,w} \quad (2)$$

式中: $F_{n,c}$ 和 $F_{t,c}$ 分别是切削力的法向和切向分量; $F_{n,w}$ 和 $F_{t,w}$ 分别是摩擦力的法向和切向分量。

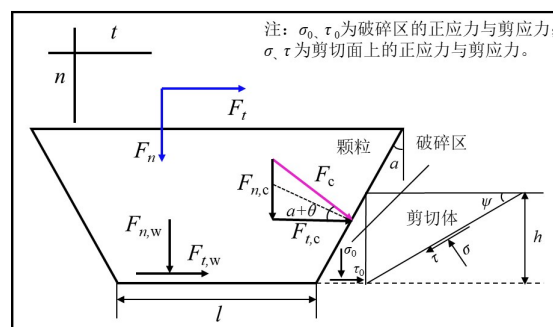


图1 分析模型中作用力的几何形状和机制

Fig. 1 The geometry and mechanism of the force in the analysis model

根据力的极限平衡理论,作用在钻头上的切削力的法向分量 $F_{n,c}$ 和切向分量 $F_{t,c}$ 计算式为:

$$F_{n,c} = \sigma_0 A \tan a + \sigma_0 A \tan \varphi' \quad (3)$$

$$F_{t,c} = \sigma_0 A + \sigma_0 A \tan \varphi' \tan a \quad (4)$$

式中: σ_0 为碎屑岩破碎区的正应力; A 为切口的垂直截面积; a 为钻头几何参数; φ' 为碎屑岩破碎区的摩擦角。碎屑岩破碎区的正应力 σ_0 计算式为^[17]:

$$\sigma_0 = \frac{2c \cos(\varphi' - \varphi)}{[\cos(\varphi' - \varphi) - \sin^2(\varphi' - \varphi) + \sin(\varphi' - \varphi)]} \times \frac{1}{(1 + \tan \varphi \tan \varphi')} \quad (5)$$

式中: c 为完整岩石的黏聚力; φ 为完整岩石的内摩擦角。根据力的极限平衡理论,切削力的法向分量 $F_{n,c}$ 与切削力 F_c 的关系表达式为:

$$F_c = \frac{F_{n,c}}{\sin(a + \theta)} \quad (6)$$

式中: θ 为破碎区岩屑的接触摩擦角(图1)。将式(3)和式(5)代入式(6),求得极限切削力 F'_c 为:

$$F'_c = \frac{2c \cos(\varphi' - \varphi)}{[\cos(\varphi' - \varphi) - \sin^2(\varphi' - \varphi) + \sin(\varphi' - \varphi)]} \times \frac{A \tan a + A \tan \varphi'}{(1 + \tan \varphi \tan \varphi') \sin(a + \theta)} \quad (7)$$

岩石的破坏是由钻头钻进过程的切削力达到岩石极限强度引起的。因此,引入岩石的极限切

削强度 S_c 来表征岩石在切削过程中的极限状态,其表达式为:

$$S_c = F'_c/A = \frac{2c \cos(\varphi' - \varphi)}{[\cos(\varphi' - \varphi) - \sin^2(\varphi' - \varphi) + \sin(\varphi' - \varphi)]} \times \frac{\tan a + \tan \varphi'}{\sin(a + \theta)(1 + \tan \varphi \tan \varphi')} \quad (8)$$

基于 Mohr-Coulomb 准则,岩石的无侧限抗压强度 σ_c 计算式为:

$$\sigma_c = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (9)$$

通过给定钻头的几何参数 a , 本文 $a=5^\circ$, 岩石无侧限抗压强度与极限切削强度的比值定义为切削强度比,其计算式为:

$$\frac{\sigma_c}{S_c} = \frac{\cos(\varphi' - \varphi) - \sin^2(\varphi' - \varphi) + \sin(\varphi' - \varphi)}{(\tan a + \tan \varphi') \cos(\varphi' - \varphi)(1 - \sin \varphi)} \times \frac{1}{(1 + \tan \varphi \tan \varphi') \sin(a + \theta) \cos \varphi} \quad (10)$$

已有研究结果表明,推力和扭力之间呈线性相关^[24], F_t/F_n 主要取决于接触摩擦角 θ 和几何参数 a ^[17], 其计算式如下:

$$\frac{F_t}{F_n} = \frac{1}{\tan(a + \theta)} \quad (11)$$

在钻进过程中形成的岩石破碎区的摩擦系数计算式为^[17]:

$$f = \tan \varphi' = \frac{\tan(a + \theta) - \tan a}{1 - \tan(a + \theta) \tan a} \quad (12)$$

φ' 和 φ 之间的解析关系表达式为^[16-17]:

$$\tan \varphi' = \frac{\pi}{2} \tan \varphi \quad (13)$$

根据式(12)和式(13),计算得到岩石内摩擦角 φ , 即:

$$\varphi = \arctan \frac{2 \tan(a + \theta) - 2 \tan a}{\pi - \pi \tan a \tan(a + \theta)} \quad (14)$$

2 试验方案

2.1 试验设备

本文数字钻试验采用由西安理工大学岩土所研发的 XCY-1 型岩体力学参数数字钻系统(图2), 该系统能够应对大多数野外钻探工作, 其主要由电气控制系统、液压系统、油泵传动系统、实时监测系统和数据采集控制系统, 以及一个内径为 50 mm、外径为 60 mm 的金刚石钻头 6 部分组成。岩

体力学参数数字钻系统在作业时可采用普通钻进和参数采集两种模式。普通钻进模式适用于试验深度前的预掘进阶段; 参数采集模式适用于数字钻参数的精确获取阶段。根据前期地质勘探报告设置掘进参数, 数字钻系统根据设置参数自动运行, 通过各系统间的相互配合, 实现钻进过程中的有效控制。在钻进过程中, 该系统记录不同试验深度下的给进力、扭矩、扭阻力、转速、钻进速度和每转进尺等参数。同时, 该系统中的加载伺服电机和扭转伺服电机各自独立运行, 可分别提供 18 kN 的最大推力和 2.458 N·m 的最大扭矩。数字钻系统通过自适应控制方式可以精确测量推力、扭矩和钻进深度。在试验中, 以钻头转速 w 和钻进速率 v 作为控制参数, 同时将得到的推力和扭矩作为钻进响应, 推力和扭矩随着钻进深度的增加而发生变化。该系统可以自动将作业数据保存在 Excel 文件中, 最大 500 条/s 的数据采集能力使得该设备可以准确存储数百组数据。

本研究单轴压缩试验和巴西劈裂试验所采用的试验设备为 WDT-1500 多功能材料试验机, 其控制系统采用的是德国进口 DOLI 全数字伺服控制器。该试验机主要是为岩石、混凝土等高强度材料研制的刚性动态力学设备, 具有功能多、精度高、可靠性及稳定性好等特点, 为本研究提供了可靠的技术保证。本试验完全在计算机控制下进行, 采用了先进的自适应控制方式和后处理软件 Test, 可以实现数据的实时记录, 同时可以直接显示试验所得的应力-应变曲线, 准确反映试件的力学特性变化。



图2 XCY-1 型岩体力学参数数字钻系统

Fig. 2 The XCY-1 digital drilling system for rock mass mechanical parameters

2.2 野外钻探及室内试验方案

2.2.1 野外钻探方案

本研究数字钻试验场地选在岩石种类丰富的陕西秦岭山脉, 经钻孔获得了砂岩、大理岩、页岩、

闪长岩共4种岩石样品。钻孔深度高于地下水位,岩芯保持其天然含水率。采样点的大理岩主要含白云石和方解石两种矿物成分,其粒径分布为0.4~1.4 mm;砂岩的碎屑结构呈亚圆形,碎片体积分数为86%,间隙体积分数为14%,岩石中主要以钾长石为主,岩屑以火山岩碎屑为主;页岩以黏土类矿物(高岭石、水云母等)为主,具有明显的薄层理构造;闪长岩主要是由斜长石和一种或几种暗色矿物组成,其中暗色矿物的体积分数一般为20%~35%。为了减少岩石不连续性对试验结果的影响,同一岩性岩石在同一均匀、整合的岩层上获取。对于同一岩性的岩石,使用金刚石钻头进行的钻孔测试次数都超过5次,对岩性条件类似的岩石进行重复测试。此外,对所有钻孔进行快速测试,以避免外界环境因素影响测试结果。

本试验野外数字钻采用金刚石取芯钻头进行钻孔,钻头内、外直径分别为50、60 mm,将岩石试样固定好位置,保证岩石与钻头处于同一轴心线上,并向下移动操作杆,使钻头与岩石之间留出合适的距离。该试验参数包括钻速、扭矩、转速和钻进推力。钻头初始钻进速率设置为0.1 mm/min,逐渐增大至1.2 mm/min;钻头初始转速设置为200 r/min,逐渐增大至600 r/min。使用扭矩传感器和压力传感器可以直接监测到钻进过程所需的扭力和推力。为了保护测试系统,当钻入速度超过1.0 mm/min时,将钻头转速控制在200 r/min以上。经过多组数字钻试验,最终获得钻头钻进过程所需的平均推力和扭力。

2.2.2 室内试验方案

按照《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)中的相关要求,对岩石试样进行切割打磨,制备尺寸为50 mm(直径)×100 mm(高)和25 mm(直径)×50 mm(高)的两种圆柱形标准试样,试样高径比为2:1。其中,尺寸为50 mm(直径)×100 mm(高)的试样用于单轴压缩试验,尺寸为25 mm(直径)×50 mm(高)的试样用于巴西劈裂试验。试样需满足的要求为断面的不平行误差小于0.005 mm,断面的不平整误差小于0.020 mm,侧面足够光滑,垂直直径误差小于0.300 mm。

室内单轴压缩试验和巴西劈裂试验采用位移控制加载方法,以0.5 mm/min的加载速率进行加载,直至试样破坏。通过对应力-应变曲线分析,以峰值强度作为压缩试验和劈裂试验的极限强

度。试样单轴压缩试验的峰值强度为岩石的单轴抗压强度,巴西劈裂试验所得到的峰值强度为岩石的抗拉强度。通过进行平行试验,得到每种岩石的平均单轴抗压强度和平均抗拉强度。

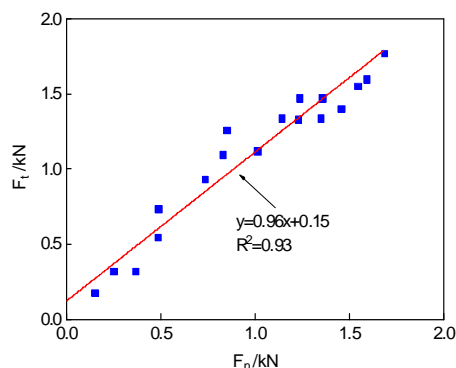
3 结果分析

3.1 数字钻参数

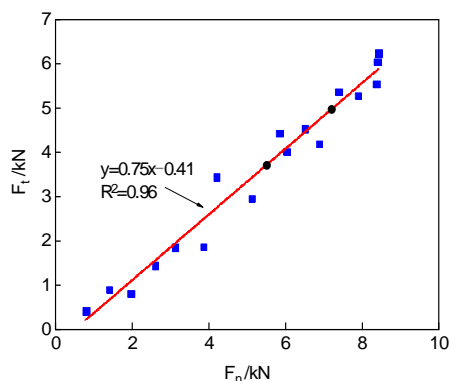
数字钻系统通过控制钻进速率 v 和转速 w ,实时监测并记录钻头钻入岩石的推力 F_n 和扭力 F_t 。从钻头刚钻进岩石表面至深入岩石内部的过程中,钻头受到的 F_n 和 F_t 不断发生变化。为了准确地反映岩石的力学特性,本研究对砂岩、页岩、大理岩、闪长岩4种岩石分别监测了18组钻探参数。根据这4种岩石对应的监测结果,建立 F_n 与 F_t 之间的数学关系。将 x 轴设置为 F_n , y 轴设置为 F_t ,并对 F_t 和 F_n 的关系散点图进行绘制,结果如图3(a)~3(d)所示。

从图3可以看出,由于不同岩石的颗粒粗细、密实程度及构造方式存在差异,钻头在钻进不同岩石时需要的 F_n 和 F_t 不同,这使得两者的拟合方程也不同。例如,砂岩是由各种砂粒紧密胶结而成的一种沉积岩,钻头在钻进砂岩时所受的扭转力接近于推进压力,因此,相较于其他3种岩石,砂岩的 F_n 和 F_t 拟合方程的斜率最大。闪长岩是全晶质中性深成岩的代表岩石,也是花岗岩类型之一,由于其结晶体直径微小,岩石结构紧密,硬度极高,在钻进闪长岩时需要的推力要远大于扭力,所以,相较于其他三种岩石,闪长岩的 F_n 和 F_t 拟合方程的斜率最小。钻头在刚侵入岩石时,所受的 F_n 和 F_t 均为零,所以认为各岩石对应的拟合方程的截距可忽略不计,各拟合方程的斜率认为是扭力和推力的比值,即 F_t/F_n 。

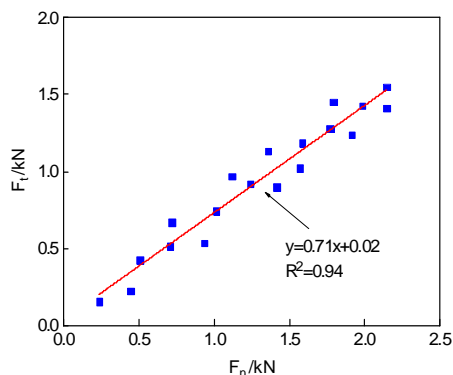
随着钻头侵入岩石的深度不断增大,钻头的 F_n 和 F_t 也不断增大,表明钻头承受的钻进压强和扭矩不断增大。经过线性拟合,4种岩石的 F_n 和 F_t 相关系数都超过了90%,表明拟合度极好。由此可见, F_n 和 F_t 之间成良好的线性相关。砂岩、页岩、大理岩和闪长岩4种岩石所对应的 F_t/F_n 分别为0.96、0.75、0.71和0.58。根据式(11),求得以上4种岩石的接触摩擦角 θ (式中 $\alpha=5^\circ$)。再根据式(14),可以获得数字钻试验下这4种岩石的内摩擦角 φ 。



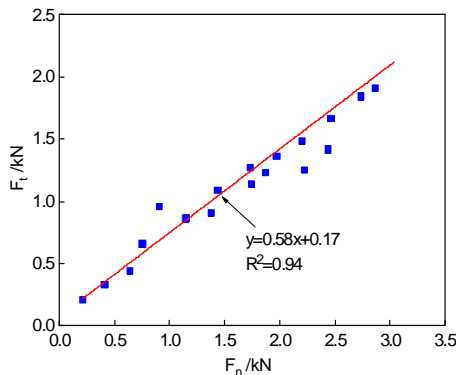
(a) 砂岩



(b) 页岩



(c) 大理岩



(d) 闪长岩

图3 不同岩石在钻进过程中的扭力与推力

Fig. 3 Tangential force and thrust of different rocks during drilling

3.2 室内试验结果分析

通过室内试验,对砂岩、页岩、大理岩和闪长岩4种岩石的物理性质及力学指标进行测定,这4种岩石的基本物理力学参数见表1。

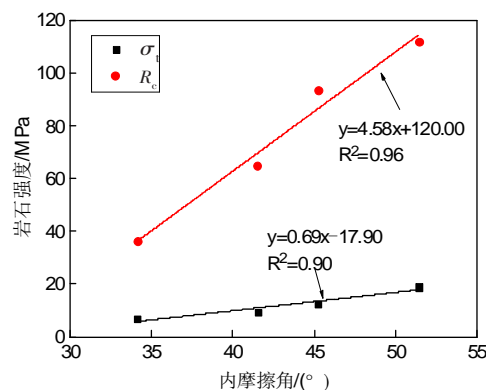
表1 岩石基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of rock

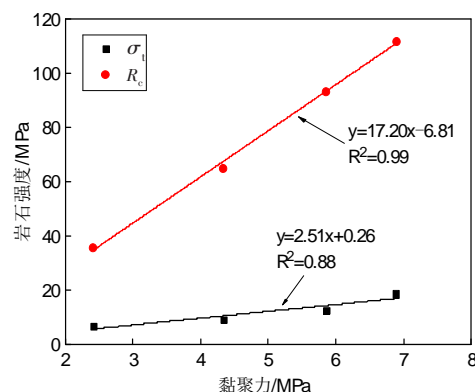
岩性	$\varphi/(^{\circ})$	c/MPa	R_c/MPa	σ_t/MPa
砂岩	34.1	2.41	36.2	6.89
页岩	41.5	4.33	65.1	9.41
大理岩	45.2	5.85	93.6	12.70
闪长岩	51.4	6.88	112.0	18.90

注: R_c 为岩石单轴抗压强度; σ_t 为岩石抗拉强度。

根据表1数据,本研究分析了岩石强度与内摩擦角、黏聚力之间的关系,如图4(a)、4(b)所示。从图4(a)可知,随着内摩擦角的增大,岩石的单轴抗压强度和抗拉强度都增大。其中,岩石的单轴抗压强度相较于抗拉强度增加趋势更为明显。将4种岩石的单轴抗压强度、抗拉强度分别与内摩擦角进行线性拟合,并得到拟合方程,相关系数 R^2



(a) 岩石强度与内摩擦角之间的关系



(b) 岩石强度与黏聚力之间的关系

图4 岩石强度与内摩擦角、黏聚力之间的关系

Fig. 4 The relationship between rock strength and internal friction angle and cohesion

分别为0.96和0.90,这表明岩石的单轴抗压强度、抗拉强度均与内摩擦角的相关性很好,且呈线性相关。从图4(b)可知,随着黏聚力的增大,岩石的单轴抗压强度和抗拉强度也都增大,且岩石的单轴抗压强度的增加趋势比抗拉强度的明显。经过线性拟合,得到岩石的单轴抗压强度、抗拉强度分别与黏聚力的拟合方程,相关系数 R^2 分别为0.99和0.88,这表明岩石强度与黏聚力也成良好的线性相关。

3.3 两种试验的岩石内摩擦角对比分析

将上文通过数字钻试验获得的砂岩、页岩、大理石和闪长岩的内摩擦角与标准室内试验实测值进行误差对比分析,见表2。由表2可知,这4种岩石内摩擦角的误差介于1.0%~3.5%,均小于10.0%,表明通过数字钻试验获得的岩石内摩擦角比较准确。另外,通过数字钻试验获得的砂岩、页岩和闪长岩的内摩擦角比大理岩的更接近室内试验实测值。

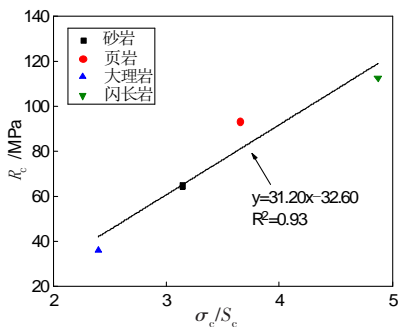
表2 数字钻试验和室内试验内摩擦角误差分析

Table 2 Error analysis of the rock internal friction angle between the digital drill test and the laboratory test

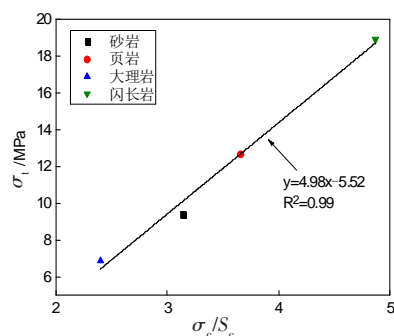
岩性	φ (室内)/(°)	φ (钻探)/(°)	误差/%
砂岩	34.1	33.6	1.5
页岩	41.5	41.9	1.0
大理石	45.2	43.6	3.5
闪长岩	51.4	50.8	1.2

3.4 岩石强度与切削强度比的关系

由上文可知,岩石强度与内摩擦角、黏聚力具有很好的正相关关系。为进一步研究岩石强度与内摩擦角之间的关系,本研究对岩石强度与切削强度比之间的关系进行分析。分别以砂岩、页岩、大理石、闪长岩的切削强度比为横坐标,岩石的单轴抗压强度 R_c 、抗拉强度 σ_t 为纵坐标,绘制散点图并进行关系拟合,如图6(a)、6(b)所示。由图6可



(a) 岩石单轴抗压强度与切削强度比的关系



(b) 岩石抗拉强度与切削强度比的关系

图6 岩石抗拉、抗压强度与切削强度比的关系

Fig. 6 The relationship between rock tensile and compressive strength and cutting strength ratio

以看出,岩石的单轴抗压强度、抗拉强度均随切削强度比的增大而增大。岩石的单轴抗压强度、抗拉强度与切削强度比相关系数 R^2 分别为0.93、0.99。这表明岩石的单轴抗压强度和抗拉强度均与切削强度比成良好的正线性相关。

4 讨论

图7展示了本研究岩石强度的预测流程。基于力学模型,数字钻试验能够获得接近于室内物理试验的岩石内摩擦角,且误差很小。通过将预测得到的岩石内摩擦角代入式(10)可求得岩石的

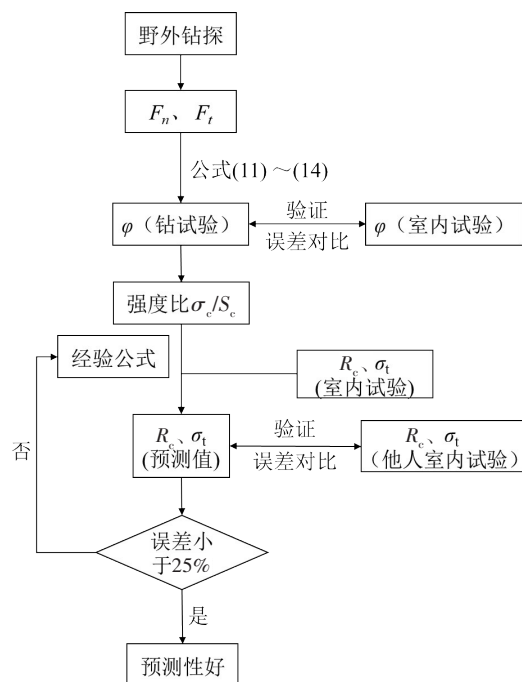


图7 岩石强度预测流程图

Fig. 7 Flow chart of rock strength prediction

切削强度比,再根据分析得出的岩石强度与切削强度比线性拟合方程,对岩石强度进行预测。为检验该岩石强度预测方法的准确性,基于其他学者研究中的岩石力学试验参数 φ ,再根据内摩擦角与切削强度比、切削强度比与强度(单轴抗压强度、抗拉强度)的关系方程,求得岩石的强度预测值,再将预测值与实验室获得的岩石强度实测值进行对比并分析误差。

4.1 数据搜集

本研究通过搜集相关文献,对不同岩石的内摩擦角、单轴抗压强度、抗拉强度等岩石基本物理力学参数^[27-34]进行了统计与汇总,见表3~4。

表3 岩石基本物理力学性质参数(1)

Table 3 Basic physical and mechanical parameters of rocks (1)

岩石类型	σ_c / MPa	φ / (°)	参考文献
大理岩	4.89	27.95	[33]
大理岩	3.87	27.98	[27]
大理岩	5.20	31.22	[27]
片岩	5.30	35.00	[30]
大理岩	6.57	33.56	[28]
石英斑岩	6.56	36.35	[32]
花岗岩	9.17	38.08	[33]
花岗岩	10.50	39.06	[27]

表4 岩石基本物理力学性质参数(2)

Table 4 Basic physical and mechanical parameters of rocks (2)

岩石种类	R_c / MPa	φ / (°)	参考文献
石英砂岩	72.41	38.23	[32]
花岗岩	70.64	38.56	[32]
矿岩	71.00	39.46	[34]
矿岩	89.21	42.61	[32]
硅化灰岩	91.02	46.91	[32]
闪长岩	67.97	47.22	[29]
结晶灰岩	121.44	55.63	[31]
辉长岩	144.50	55.68	[35]

4.2 强度预测和误差分析

将表3中岩石的内摩擦角代入式(13)~(14),再根据式(10),求出各类岩石的切削强度比,其中金刚石颗粒的前角 $\alpha=5^\circ$ 。再分别根据单轴抗压强度、抗拉强度与切削强度比之间的拟合方程,得到各岩石的单轴抗压强度和抗拉强度的预测值。将各岩石的单轴抗压强度、抗拉强度的预测值与标

准室内试验的实测值进行对比并分析误差,从而判断预测值的准确度,结果如图8(a)、8(b)所示。

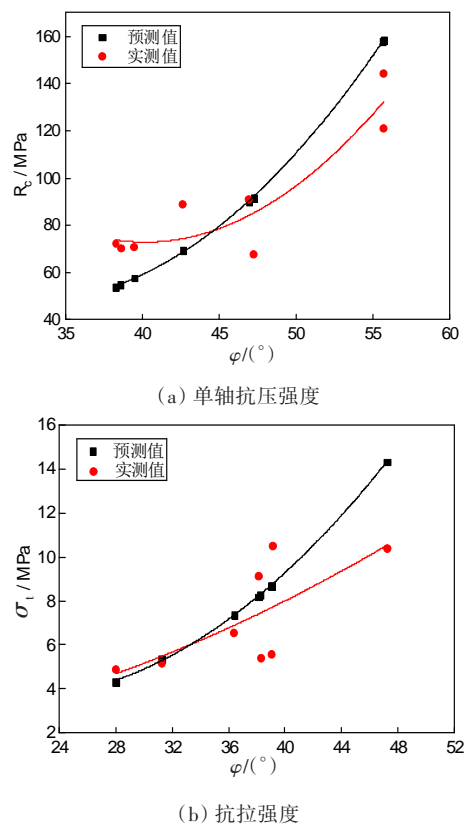


图8 数字钻试验预测强度与室内试验测定强度对比分析

Fig. 8 Comparison and analysis of the predicted strength of digital drill test and laboratory test strength

由图8(a)、8(b)可知,不同岩石的单轴抗压强度和抗拉强度的预测值与实测值均存在差异。岩石的单轴抗压强度及抗拉强度的实测值与预测值均随岩石内摩擦角的增大而增大^[36]。两种强度的预测值都较接近于标准室内试验的实测值,其中,岩石单轴抗压强度的数字钻试验预测值与室内试验实测值之间的误差介于1.18%~34.87%;岩石抗拉强度的数字钻试验预测值与室内试验测定值误差介于3.07%~55.00%;两者的平均误差分别为20.57%、24.93%。由此可知,本文提出的数字钻岩石强度预测方法对岩石单轴抗压强度和抗拉强度预测的平均误差略超过20.00%。综上所述,该方法能够对岩石强度进行合理预测,同时验证了该分析模型的有效性。

5 结论

1) 基于金刚石钻头破岩过程的工作原理,提

出钻头钻进过程的数学模型。根据数字钻系统监测记录的钻进参数,预测出4种岩石的内摩擦角 φ 。结果表明,通过数字钻技术获得的4种岩石的内摩擦角与标准室内试验测得的接近,二者误差在可接受的10.00%范围内。该技术预测岩石的强度参数比标准实验室测试快得多,高效且实用。

2) 基于室内试验,分析4种不同岩石强度(单轴抗压强度、抗拉强度)与内摩擦角、黏聚力的关系。试验结果表明,岩石强度与内摩擦角、黏聚力成正线性相关。

3) 基于分析模型,通过钻探获得的内摩擦角,提出岩石切削强度比的概念。通过分析研究4种岩石单轴抗压强度、抗拉强度与切削强度比之间的相关性,获得岩石强度与切削强度比之间的经验公式。根据岩石内摩擦角、切削强度比、岩石强度(单轴抗压强度、抗拉强度)之间的联系,提出了一种基于数字钻技术的预测岩石强度的方法。

4) 利用其他研究人员通过室内试验获得的岩石物理力学参数进行验证。结果表明,基于数字钻技术的岩石强度的预测值与标准室内试验的实测值接近,单轴抗压强度的平均误差为20.44%,岩石抗拉强度的平均误差为24.93%。基于数字钻技术的岩石强度预测方法是有效的,该方法提高了室内岩石强度的测定效率,可大大缩短工程工期。

[参考文献]

- [1] 鲜振兴, 许旭堂 杨枫, 等. 循环荷载对单裂隙岩体疲劳损伤的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(2): 125-136. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20221116003.
XIAN Zhenxing, XU Xutang, YANG Feng, et al. Effect of cyclic load on fatigue damage of single fracture rock mass[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 20(2): 125-136. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20221116003.
- [2] 王琦, 秦乾, 高松, 等. 数字钻探随钻参数与岩石单轴抗压强度关系[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1289-1295. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.1113.
WANG Qi, QIN Qian, GAO Song, et al. Relationship between rock drilling parameters and rock uniaxial compressive strength based on energy analysis [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1289-1295. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.1113.
- [3] 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. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.10.005.
- YUE Zhongqi. 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. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.10.005.
- [4] 王玉杰, 余磊, 赵宇飞, 等. 基于数字钻进技术的岩石强度参数测定试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1669-1678. DOI: 10.11779/CJGE202009010.
WANG Yujie, SHE Lei, ZHAO Yufei, et al. Experimental study on measurement of rock strength parameters based on digital drilling technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1669-1678. DOI: 10.11779/CJGE202009010.
- [5] PALASSI M, EMAMI V. A new nail penetration test for estimation of rock strength [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 66: 124-127. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.12.016.
- [6] NAEIMPOUR A, ROSTAMI J, BUYUKSAGIS I S, et al. Estimation of rock strength using scratch test by a miniature disc cutter on rock cores or inside boreholes [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 107: 9-18. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.03.020.
- [7] HE M M, LI N, ZHANG Z Q, et al. An empirical method for determining the mechanical properties of jointed rock mass using drilling energy [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 116: 64-74. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.03.010.
- [8] HE M M, ZHANG Z Q, REN J, et al. Deep convolutional neural network for fast determination of the rock strength parameters using drilling data [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 123: 104084. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.104084.
- [9] 王成虎, 高桂云, 王洪, 等. 利用室内和现场水压致裂试验联合确定地应力与岩石抗拉强度[J]. 地质力学学报, 2020, 26(2): 167-174. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.02.016.
WANG Chenghu, GAO Guiyun, WANG Hong, et al. Integrated determination of principal stress and tensile strength of rock based on the laboratory and field hydraulic fracturing tests [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(2): 167-174. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.02.016.
- [10] 张有斌. 劈裂法检测花岗岩抗拉强度测量结果的不确定度评定[J]. 居舍, 2021(16): 35-36.
ZHANG Youbin. Uncertainty evaluation of tensile strength measurement results of granite by splitting

- method[J]. Ju She, 2021(16): 35-36.
- [11] 江贝, 马凤林, 王琦, 等. 基于切削理论的数字钻探参数与岩石单轴抗压强度关系研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(5): 1601-1609. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.05.021.
- JIANG Bei, MA Fenglin, WANG Qi, et al. Research of relationship between digital drilling parameters and rock uniaxial compressive strength based on cutting theory[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(5): 1601-1609. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.05.021.
- [12] WANG Q, GAO H K, YU H C, et al. Method for measuring rock mass characteristics and evaluating the grouting-reinforced effect based on digital drilling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(3): 841-851. DOI: 10.1007/s00603-018-1624-9.
- [13] MUNOZ H, TAHERI A, CHANDA E. Rock cutting characteristics on soft-to-hard rocks under different cutter inclinations [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 87: 85-89. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.05.014.
- [14] 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. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2007.03.006.
- TAN Zhuoying, YUE Zhongqi, 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. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2007.03.006.
- [15] NAKAJIMA I, KINOSHITA S. Theoretical Studies on Cutting Force of Rock: fracture mechanism in rock cutting [J]. Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan, 1979, 95: 49-55. DOI: 10.2473/SHIGENTOSOZAI1953.95.1092_49.
- [16] YAHIAOUI M, GERBAUD L, PARIS, et al. A study on PDC drill bits quality[J]. Wear, 2013, 298: 32-41. DOI: 10.1016/j.wear.2012.12.026.
- [17] KALANTARI S, HASHEMOLHOSSEINI H, BAGHBANAN A. Estimating rock strength parameters using drilling data [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 104: 45-52. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.02.013.
- [18] MUNOZ H, TAHERI A, CHANDA E. Rock cutting performance assessment using strain energy characteristics of rocks [J]. Mining Technology, 2017, 126(4): 191-199. DOI: 10.1080/14749009.2017.1291552.
- [19] 王琦, 高红科, 蒋振华, 等. 地下工程围岩数字钻探测试系统研发与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 301-310. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0744.
- WANG Qi, GAO Hongke, JIANG Zhenhua, et al. Development and application of a surrounding rock digital drilling test system of underground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(2): 301-310. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0744.
- [20] WANG Q, GAO S, LI S C, et al. Upper bound analytic mechanics model for rock cutting and its application in field testing [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 73: 287-294. DOI: 10.1016/j.tust.2017.12.023.
- [21] WANG Q, GAO S, JIANG B, et al. Rock-cutting mechanics model and its application based on slip-line theory [J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(5): 04018025. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001136.
- [22] 宋玲, 李宁, 李骞. 软岩的旋转触探参数与力学参数的内在关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1274-1282. DOI: 1000-6915(2011)30:6<1274:RYDXZC>2.0.TX;2-N.
- SONG Ling, LI Ning, LI Qian. Study of intrinsic relationship between mechanical parameters and parameters of rotary penetration test of soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1274-1282. DOI: 1000-6915(2011)30:6<1274:RYDXZC>2.0.TX;2-N.
- [23] 李骞, 李宁, 宋玲. 岩石回转触探试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(S1): 116-123. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.S1.018.
- LI Qian, LI Ning, SONG Ling. Study on rock penetration test [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(S1): 116-123. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.S1.018.
- [24] 李骞. 岩石的切削强度特性及岩体力学参数的旋切触探试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
- LI Qian. Research on cutting strength characteristics of rock and rotary cutting penetration test for mechanical parameters of rock mass [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.
- [25] HE M M, ZHANG Z Q, ZHENG J, et al. A new perspective on the constant m_i of the Hoek-Brown failure criterion and a new model for determining the residual strength of rock [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(9): 3953-3967. DOI: 10.1007/s00603-020-02164-6.
- [26] HE M M, LI N, ZHU J W, et al. Advanced prediction for field strength parameters of rock using drilling operational data from impregnated diamond bit [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 187: 106847. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106847.

- [27] 蒋中明, 秦双专, 唐栋, 等. 基于三轴压缩数值试验的岩石损伤特性[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(4): 73-79. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2018.04.011.
JIANG Zhongming, QIN Shuangzhuan, TANG Dong, et al. Rock damage characteristic based on triaxial compression numerical experiment [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(4): 73-79. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2018.04.011.
- [28] 邹久群. 深井复杂条件下镶齿滚刀破岩规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020. DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2020.002551.
ZOU Jiuqun. Research on the law of rock fragmentation with inserted tooth hob under complicated conditions in deep shafts [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020. DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2020.002551.
- [29] 李俊平. 缓倾斜采空场处理新方法及采场地压控制研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2003.
LI Junping. Study of the new method disposing gently inclined abandoned stope and ground pressure control at the stope [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2003.
- [30] 彭林. 复杂采空区三维建模及稳定性分析研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2012.
PENG Lin. Research on 3D modeling and stability analysis of complicated goaf [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2012.
- [31] 许学良. 脆性岩石抗拉特性及其破裂机制的试验与细观模拟研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
XU Xueliang. Research on the experiment and meso-simulation of tensile characteristics and its fracture mechanism of brittle rock [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [32] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 厂坝铅锌矿岩石物理力学性质测试研究[J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(5): 12-13, 16. DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2003.05.004.
YIN Xiangang, LI Shulin, TANG Haiyan, et al. The tests and studies of the physical mechanical properties of the rocks from changba lead-zinc mine [J]. Mining Research and Development, 2003, 23(5): 12-13, 16. DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2003.05.004.
- [33] 黄惟盛, 骆宇. 某铜矿边坡稳定性分析岩石力学参数确定[J]. 新疆有色金属, 2019, 42(3): 62-63. DOI: 10.16206/j.cnki.65-1136/tg.2019.03.027.
HUANG Weisheng, LUO Yu. Determination of rock mechanical parameters for slope stability analysis of a copper mine [J]. Xinjiang Youse Jinshu, 2019, 42(3): 62-63. DOI: 10.16206/j.cnki.65-1136/tg.2019.03.027.
- [34] 杨泽, 侯克鹏, 李克钢, 等. 云锡大屯锡矿岩体力学参数的确定[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1923-1928. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.06.045.
YANG Ze, HOU Kepeng, LI Kegang, et al. Determination of mechanical parameters of rock mass from Yunxi Datun Tin Mine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1923-1928. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.06.045.
- [35] 孙小康, 朱卓慧, 徐燕飞. 三岔河矿区矿体岩石物理力学试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2011, 31(5): 40-42. DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2011.05.002.
SUN Xiaokang, ZHU Zhuohui, XU Yanfei. Experimental study on physical and mechanical properties of rock for Sanchahe mining area [J]. Mining Research and Development, 2011, 31(5): 40-42. DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2011.05.002.
- [36] 刘发红. 毕机沟露天矿岩石力学参数试验研究[J]. 中国金属通报, 2015(11): 37-40.
LIU Fahong. Experimental study on rock mechanical parameters of Bijigou open pit mine [J]. China Metal Bulletin, 2015(11): 37-40.

Research on prediction method of rock strength characteristics based on digital drilling technology

CHEN Zujun¹, HE Mingming², ZHOU Jiapei², DENG Bianyuan¹

(1. Yunnan Construction and Investment Holding Group Co., Ltd., Kunming 650501, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: [Purposes] This work aims to predict rock mechanical parameters in advance rapidly and accurately. [Methods] By analyzing the force characteristics of the drill bit, a mathematical model is established to describe the machine-rock interaction during the drilling process using the principle of mechanical limit equilibrium. An analytical method of the primary rock strength parameter, which includes the internal friction

angle, uniaxial compressive strength, and tensile strength is proposed based on digital drilling technology. To verify the reliability of this method, a self-developed high-precision digital drilling system is employed to predict the internal friction angles of four different types of rocks. Which are compared with the measured values obtained from laboratory tests. Through correlation analysis of rock strength, internal friction angle, and cutting strength ratio (the ratio of rock unconfined compressive strength to cutting strength), the rock strength is predicted and the results are verified. **[Findings]** The discrepancy of internal friction angle obtained by digital drilling technology and the standard test ranges from 1.0% to 3.5%. Moreover, the uniaxial compressive strength and tensile strength of the rock demonstrate linear and positive correlations with the cutting strength ratio. The error between the predicted rock strength and the measured values from standard tests is less than 20%. **[Conclusions]** The reliability of rock mechanical parameters predicted by digital drilling technology is confirmed, this method has certain application value in practical engineering.

Key words: digital drilling parameters; uniaxial compressive strength; tensile strength; cutting strength ratio; prediction method

Manuscript received: 2022-07-13; **revised:** 2022-08-06; **accepted:** 2022-08-16

Foundation item: Project (2019JQ395) supported by the Shaanxi Province Natural Science Foundation; Project (20JS093) supported by the Scientific Research Plan Projects of Shaanxi Education Department

Corresponding author: HE Mingming (1986—) (ORCID: 0000-0002-2726-9371), male, associate professor, research interest: rock mechanics. E-mail: hemingming@xaut.edu.cn

(责任编辑:刘平;校对:赵冰;英文编辑:陈璐)