

岳中文,岳小磊,杨仁树,等. 随钻岩性识别技术研究进展[J]. 矿业科学学报,2022,7(4):389-402. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2022.04.001  
Yue Zhongwen, Yue Xiaolei, Yang Renshu, et al. Progress of lithology identification technology while drilling[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(4): 389-402. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2022.04.001

## 随钻岩性识别技术研究进展

岳中文<sup>1</sup>,岳小磊<sup>1</sup>,杨仁树<sup>1,2</sup>,王煦<sup>1</sup>,李为<sup>1</sup>,戴诗清<sup>1</sup>,李杨<sup>1</sup>

1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083;
2. 北京科技大学土木与资源工程学院,北京 100083

**摘要:**随钻岩性识别是一种便捷、高效的地层信息获取技术,具有即时、准确、环保以及节能等优点,可应用于岩石边界确定、支护参数设计、爆破参数设计以及区域地层强度参数识别等工程领域,一直是国内外学者研究的重点方向。本文系统分析了随钻岩性识别技术研究现状以及发展趋势,结合近年来随钻岩性识别技术的应用,探讨了该技术作为智能化探测的新方法与新理论。首先,总结了随钻岩性识别关键技术国内外发展历程;其次,阐述了国内外岩性识别系统的研究现状,包括技术原理及系统组成,并对部分国内外典型岩性识别系统进行对比和评价;再次,总结钻进过程中钻进参数与岩石之间的响应关系及建立的钻进指标和评价体系,并根据旋切式及旋切-冲击式两种钻进方式讨论影响随钻岩性识别的因素;最后,根据随钻岩性识别技术研究领域的发展动态,总结现阶段工程应用中存在的问题,展望随钻岩性识别技术研究未来的发展趋势。

**关键词:**随钻岩性识别技术;研究进展;技术原理;系统组成;工程应用

中图分类号:TD 175;TD 263 文献标志码:A 文章编号:2096-2193(2022)04-0389-14

## Progress of lithology identification technology while drilling

Yue Zhongwen<sup>1</sup>, Yue Xiaolei<sup>1</sup>, Yang Renshu<sup>1,2</sup>, Wang Xu<sup>1</sup>, Li Wei<sup>1</sup>, Dai Shiqing<sup>1</sup>, Li Yang<sup>1</sup>

1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

**Abstract:** Lithology identification while in drilling is a convenient and efficient technology to obtain information about formation. It has the advantages of instant, accurate, environmental protection and energy saving. It can be applied to field of engineering such as rock boundaries determination, support parameter design, blast parameter design, and regional formation strength parameter identification. And it has always been the focus of research by scholars in domestic and foreign. This paper systematically analyzes the research status and development trend of lithology identification while in drilling technology, combined with the application of lithology identification while drilling technology in recent years, discusses the technology of lithology identification while drilling as a new method and new theory of intelligent detection. First, the development history of key technologies for lithology identification while drilling in domestic and foreign is summarized. Secondly, it focuses on the research status, including the technical principle and system composition, and compares and evaluates some typical lithology identification systems in domestic and foreign. Thirdly, the response relationship between the drilling parameters

收稿日期:2021-10-10 修回日期:2021-12-20

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC2902103);国家自然科学基金面上项目(51974318,52174094)

作者简介:岳中文(1975—),男,安徽淮南人,教授,博士生导师,主要从事岩土工程、爆破工程等方面的教学与研究工作。Tel:010-62339683, E-mail: zwyue75@163.com

and the rock during the drilling process is summarized, and the established drilling index and evaluation system, and the factors affecting the lithology identification while drilling is discussed according to the two drilling methods of rotary cutting and rotary cutting-impact. Finally, according to the development trend of the research field of lithology identification while drilling technology, the problems existing in the engineering application at this stage are summarized, and the future research of lithology identification while drilling technology is prospected.

**Key words:** lithology recognition technology while drilling; research progress; technical principle; system composition; engineering application

随钻测量技术 ( Measurement-While-Drilling, MWD) 是矿山开采、隧道开挖、石油开采及地质勘探等工程领域的重要技术手段, 它是在钻机钻进过程中对方位角、钻井斜角等钻进参数进行实时监测, 将数据同步上传至终端进行处理分析的技术<sup>[1]</sup>。随钻岩性识别技术是随钻测量技术的进一步发展应用。岩性是反映岩石特征的属性, 如颜色、结构、构造等。随钻岩性识别就是钻进过程中实时区分各项岩石属性的特定过程<sup>[2]</sup>。如何快速、高效地进行岩性识别, 是影响施工作业效率的重要因素之一。近年来, 随着随钻测量技术的发展和智能化钻进需求的提高, 随钻岩性识别技术获得巨大的发展。相比传统的钻孔取芯方法, 随钻岩性识别不仅可以节省大量时间, 还可以更准确、便捷地反映当前地层的岩性、构造等<sup>[3-6]</sup>。

随钻岩性识别作为未来工程开采领域的前期基础工作, 其识别精度直接决定了工作面钻进智能化程度。一方面, 随钻岩性识别是获取、验证钻孔区域岩体性质的重要手段; 另一方面, 根据识别的岩性参数适时调整钻机参数, 可以提高钻进速度, 纠偏以及避免钻井卡钻、塌孔等。厘清随钻岩性识别的发展历程、关键技术及存在问题, 对于攻克随钻岩性识别技术难题、提升工作面钻进智能化程度具有决定性意义。

本文介绍了随钻岩性识别技术的起源及发展, 以技术原理及系统组成、识别方法及效果、关键技术研究现状为主线, 结合研究实例分析各领域随钻岩性识别的技术特点, 从多角度评价岩性识别精度、工作效率、环保指标等方面的技术优势。同时根据随钻岩性识别技术研究现状, 归纳总结工程应用中存在的关键问题, 分析了随钻岩性识别技术在国内研发和推广面临的挑战, 探讨了当前研究存在的不足, 并对未来智能化设备应用前景做出展望。

## 1 发展历程

随钻岩性识别技术发展历程基于掘进装备的

更新大致可分为手动、机械化及自动化、半智能化和全智能化 4 个阶段, 如图 1 所示。从目前我国煤矿巷道掘进装备应用案例来看, 几乎没有智能化、全自动化的智能设备<sup>[7]</sup>。在这种情况下, 相应的装备及技术应采取逐级发展、阶段突破的发展模式。现阶段国内岩性识别技术正处于第一阶段到第二阶段发展的过程, 存在智能设备研制不足、技术难点难以攻克等问题, 应针对性地布局未来发展方向, 加大力度研制智能化钻进设备, 开发核心数据解译算法, 加强机体设备的智能自控, 提升物联网传输速率, 建立一套拥有自主知识产权的智能识别系统<sup>[8-9]</sup>。

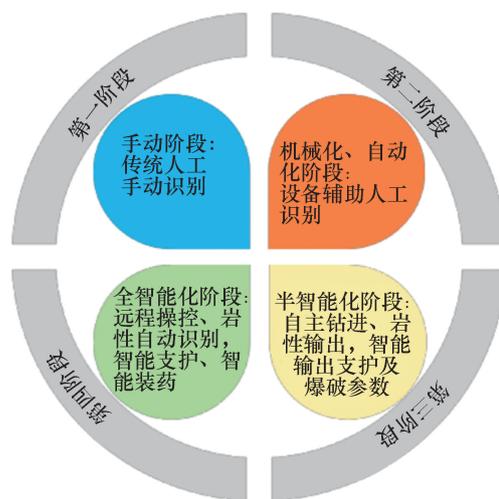


图1 随钻岩性识别技术发展阶段

Fig. 1 Development stage of lithology identification technology while drilling

20 世纪 60 年代, 国外学者、企业开始进行随钻测量技术研发, 最初目的是解决油田开采的盲目性问题。随着技术不断发展, 现阶段国外随钻岩性识别技术已基本实现工程应用。我国由于研发起步晚、试验周期长、研发经验不足及国外技术封锁等原因, 随钻岩性识别技术水平滞后, 大多仍处于试验研发阶段<sup>[10-11]</sup>。表 1 总结了 20 世纪初至今国内外随钻技术的发展历程<sup>[12-16]</sup>。

表1 国内外随钻技术发展历程  
Table 1 Research progress of MWD technology in domestic and foreign

时间	研究进展	
	国外	国内
20 世纪初期	石油工业领域开始运用电法测井技术,称之为随钻测井	未开展
20 世纪 60 年代	随钻测量技术开始广泛研究、应用	未开展
20 世纪 70 年代	采矿工程领域开始应用,主要用于露天开采超前探测地下台阶的岩性	开始独立研究随钻测量技术,针对信号传输问题做出改进
1978 年	第一套商业化 MWD 系统问世,由意大利 TELECO 公司研发推广	进一步研究、发展随钻测量技术
20 世纪 80 年代	随着计算机不断更新,计算能力增强,随钻测量技术不断发展,众多公司研发出各种型号的 MWD 系统	大量引进高端随钻装备,同时国产 MWD 系统开始进行现场试验、小规模生产。如大港定向井公司引进 Sperry-sun 公司钻井液脉冲随钻仪器后开发了无线测斜系统
20 世纪 80 年代后期	钻井工艺持续改进,随钻测量技术逐渐发展并应用于水平钻井等先进工艺中	水平钻井随钻测量技术引入国内,相关研究逐步完善
20 世纪末至 21 世纪	随钻测量技术进入自动化及人工智能领域,建立数据集成平台,提供实时预测,研发商业化智能凿岩台车	开始发展无线测量技术,引进国外先进 MWD 系统的同时,国内学者研发国产试验系统,如香港大学 DPM 系统、山东大学 SDT 系统等

## 2 系统原理及应用

### 2.1 系统原理

目前针对随钻岩性识别技术的研究结果表明,岩石力学参数影响钻机钻进参数,这为获取地层岩性参数提供了新思路<sup>[17-20]</sup>。而各项钻进参数中,钻进速度与岩性响应关系最明显,因此建立钻机钻进速度与钻杆压力、转速、扭矩等参数之间的校正关系,是该技术的核心<sup>[21]</sup>。当前研究中,除了建立钻进参数与岩石参数的定量关系外,还从能量角度确定岩石参数与钻机之间的响应,提出了钻进比

能、钻进比功等可钻性指标,对钻进过程中输入总能量与输出总能量进行量化分析,得到能量分配规律<sup>[22-24]</sup>。

随钻岩性识别是通过实时采集钻机的钻进参数,然后利用计算机算法进行数据解译并构建相互关系,进而输出钻进岩层的强度和构造信息。因此,随钻岩性识别的基本原理是建立一个在钻机钻进过程中实时监测、传输、分析及记录钻进参数的系统或平台,钻进时同步分析各项钻进参数的变化,从而自动实时确定岩体性质,如图 2 所示。具体过程是:① 在钻机的关键位置安设功能传感器,

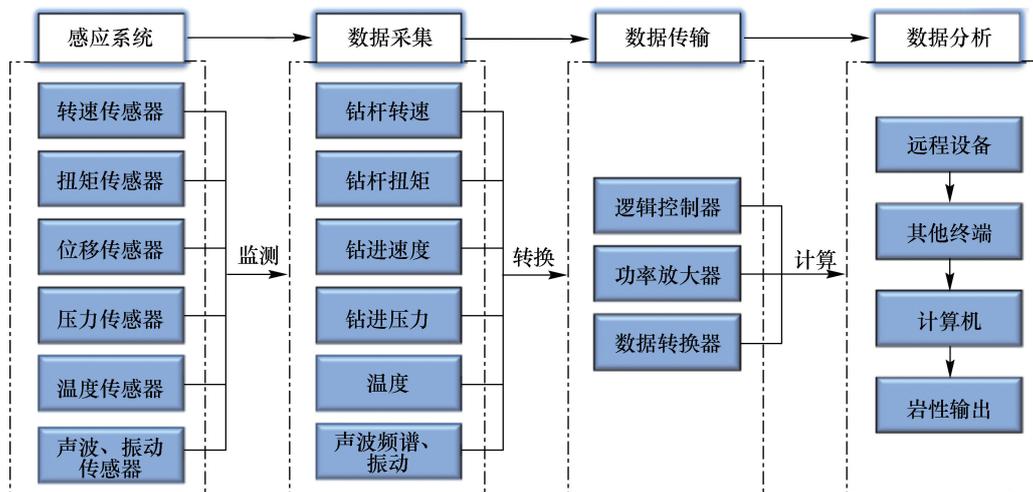


图2 随钻岩性识别监测系统工作原理

Fig. 2 Working principle of lithology identification and monitoring system while drilling

采集钻机的实时钻进参数,包括时间、转速、油压、钻头位移、钻孔倾角、钻进速度、钻杆扭矩、声波频谱等,得到钻机的运行情况及钻机参数与钻孔岩性之间的响应;②以电子脉冲信号或电压信号的形式,将采集的各种钻进参数信息传输到数据采集系统;③通过转换器将钻进参数模拟量数据转化为数字量数据并传输到计算机终端进行分析、显示、存储及打印,最终确定钻孔区域岩体性质<sup>[25-27]</sup>。

随钻岩性识别系统的基本组成结构一般包括钻进装置、数据采集装置、数据传输装置、数据存储及分析装置4部分。

(1) 钻进装置:主要包括用于钻孔施工的关键部件以及动力系统。用于钻孔施工的关键部件包括钻机、钻杆、钻头等;动力系统包括电气系统和液压系统等,满足钻头钻进以及数据采集和传输的动力需求。

(2) 数据采集装置:用于实时采集钻进数据,是随钻岩性识别系统的重要组成部分。传感器作为数据采集装置的核心部件,其性能对钻进过程中数据采集的精度和稳定性有很大影响。因此,传感器的研发与选型是决定岩性识别效果的重要环节。

(3) 数据传输装置:用于将钻进数据实时传输到数据存储及分析装置。传输方式分为有线传输和无线传输。有线传输包括电缆传输、钻杆传输、光纤传输;无线传输包括电磁传输、声波传输和钻井液脉冲传输<sup>[28]</sup>。有线传输速度快,但开发成本高;无线传输速度相对较低,但工艺简单,成本低廉。数据传输的可靠性是保证数据准确性的关键环节,因此数据传输装置对钻进数据处理分析至关重要。

(4) 数据存储及分析装置:将获得的钻进数据进行转换、筛选、提取和计算,将结果显示在系统终端,同时存储数据。终端由计算机、监视器及绘图仪等组成。

随钻监测系统的研发始于20世纪80年代。由于微处理器在数据采集、传输、接收、存储和分析方面的巨大优势,基于高精度传感器的随钻监测系统受到越来越多的学者和公司的关注,它可以克服传统地球物理探测在地层界面识别方面参数解译的差异性和存在多种解译结果的问题<sup>[29]</sup>。利用随钻监测系统对地层界面、岩石岩性、岩土体结构等进行识别是一种有巨大发展空间的方法,吸引了众多能源公司投入研发。依托雄厚的资金注入,随钻岩性识别系统在硬件和软件方面都取得了跨越式

的进步,向安全、经济、环保、空间占用小的方向发展<sup>[30-33]</sup>。

## 2.2 系统应用

表2为国内外随钻测量系统应用情况统计<sup>[34-49]</sup>。具有参考意义的随钻测量系统包括ENPASOL系统、香港大学的DPM系统、西安理工大学的XCY-1系统和山东大学的SDT系统等。

ENPASOL系统<sup>[34]</sup>由加拿大公司Soletanche-Bachy基于履带式Hutte200/2TF液压伺服回转钻机开发并成功应用于地层探测试验。该系统安设的传感器及主要监测数据包括:利用电磁转速传感器监测钻具转速;利用力传感器监测钻杆轴力和力矩;利用位移传感器监测孔深;利用液控防逆传感器监测钻机运行状态。整个钻机系统要求钻杆转速、钻井液流速、压力等参数保持相对稳定。Yue等<sup>[35]</sup>2002年研制的DPM系统成功应用于风化花岗岩土斜坡加固,实现了对钻孔过程中各种参数的动态监测,为岩土工程设计施工和工程质量管控提供了丰富的参考资料。何明明<sup>[15]</sup>研制的XCY-1型岩石力学参数旋切触探仪,成功应用于现场原位测试,实现了通过旋切触探技术直接获取岩体力学基本参数的功能,并初步集成了基于神经网络的智能控制系统,为国内随钻岩性识别领域提供了丰富的技术储备。但该设备也存在一定不足,如设备体型过大,操作不便等。王琦等<sup>[24]</sup>基于室内岩体力学参数测试系统研发了现场围岩参数测试SDT系统,该系统通过智能控制设备液压子系统、导向钻进子系统、监测控制子系统和测试辅助子系统4个关键结构,实现对工程现场围岩参数的测试,完成了对巷道围岩强度的评价,进一步证明通过钻进参数反演岩体参数的可行性,但在设备的智能化方面还需进一步改善。

## 3 随钻岩性识别方法及效果

### 3.1 岩石可钻性

不同岩石抵抗机械破碎作用产生的效果不同,因此在进行地层钻孔作业时,不同岩性的地层产生的破坏形式不同<sup>[50]</sup>。岩石可钻性是表征岩石物理力学性质、破碎能量、钻孔速率、钻孔深度等参数的指标,可划分为强度指标、能量指标及位移指标等<sup>[51-53]</sup>。这些指标中,强度指标可以反映岩石抵抗钻进破坏的能力,但不能体现破坏过程;能量指标具有一定程度的可变性,钻杆旋切精度及钻头磨损程度的变化都会导致无法准确计算钻孔内岩石的应力状态;位移指标的条件性很强,钻进参数起

表2 国内外随钻测量系统应用情况统计  
Table 2 Application Statistics of MWD system in domestic and foreign

时间	系统名称	研发单位	应用方向	监测数据	应用情况
1911年	LWD	国外	石油钻探	电阻率、声速、密度、钻压、扭矩、转速、环空压力、温度	在石油工业领域得到成功应用
1978年	MWD	TELECO公司	矿山开采	井斜角、方位角、工具面角、井底钻压、扭矩、转速	在矿山开采工程中得到成功应用
1985年	KYPC	俄罗斯	钻探优化	钻压、钻速、扭矩、转数、升降速度、泵量和泵压等	完成现场试验
1995年	Kajima	日本	地质勘探	钻速、轴压、扭矩、回转频率、钻井液压力与流量	在地质勘探工程中得到成功应用
1999年	ENPASOL	Soletanche-Bachy	地质勘探	钻井液流速、转速、推力、扭矩、钻进速度	在地质勘探工程中得到成功应用
2002年	DPM	香港大学	边坡防护	钻头位移、转速、压力、钻进液流量	在边坡防护工程中得到成功应用
2002年	CUG-1	中国地质大学(武汉)	地质勘探	瞬时机械钻速、钻压、转速、扭矩、功率、泵量、泵压	在地质勘探工程中得到成功应用,识别效果良好
2002年	ZCY	山东煤田地质局	地质勘探	钻进回次进尺、孔深、钻压、钻速、立轴转速、立轴扭矩、钻机功率、泵压、泵量、返水量、泥浆密度、pH值	已投入生产应用,可靠性较强、通过部级鉴定
2003年	WZY-1	中国地质大学(武汉)	地质钻探	钻压、功率、扭矩、转速、钻速、孔深进尺、泵压、泵量	实验室试验阶段,识别效果好,安装方便,性能良好
2015年	钻机钻进系统	辽宁工程技术大学	露天矿山爆破	回转压力、加压压力、回转速度、钻进深度、倾斜角度、风压	完成现场试验
2015年	EM-MWD	中国地质大学(武汉)	地质深层勘察	钻进压力、温度、井斜角、方位角	可有效监测井下钻井参数,并通过电磁波信号向地面发送信息
2015年	数字钻进系统	山东大学	岩体力学参数测试	钻进深度、钻进速度、扭矩、压力和转速	在地质勘探工程中得到成功应用
2015年	钻机监测系统	北京矿冶研究总院	露天矿山爆破	钻压、转速、扭矩、钻速、进尺、孔深	在露天爆破工程中得到成功应用
2017年	TRD	山东大学	地下工程围岩稳定性分析及支护设计	钻进速度、钻进压力、转速和扭矩	实验室试验阶段
2017年	A. B. C	美国 Atlas Copco	矿山开采	钻压、功率、扭矩、转速、钻速、孔深进尺、泵压	技术先进,现场工程应用良好,设备智能化程度较高
2017年	iSURE	瑞典 Sandvik	矿山开采	钻头位移、转速、压力、扭矩	在矿山开采工程中得到成功应用,识别效果良好,商业化产品
2017年	Bever Control	挪威 Bever Control	矿山开采	角度、压力、深度、钻进扭矩、钻头转速和钻进速度	设备智能化程度高,技术应用效果明显
2017年	XCY-1	西安理工大学	岩性预测	钻进压力、钻进扭矩、钻头转速和钻进速度	已实现工程应用
2019年	SDT	山东大学	岩性预测	钻进速度、钻头转速、钻进扭矩、钻进推力和钻进深度	实验室试验阶段
2019年	多功能数字钻进测试系统	中国水利水电科学研究院	岩性预测	钻进压强、钻进位移、转速和扭矩	已实现工程应用

决定性作用,在一定条件下反映了钻杆穿透围岩的应力状态。随着研究的深入,新的可钻性指标不断被提出<sup>[54]</sup>。

如图3所示,钻具的钻进形式可分为旋切式钻进和旋切-冲击复合型钻进。无论哪种钻进形式,钻具与岩石之间的接触都体现一种能量消耗过程。岩石的可钻性指标不仅反映了钻具与钻进地层岩石间的关系,还体现了岩石抵抗入侵破坏的能力,可钻性指标表征为单位能量的穿孔速率<sup>[55-57]</sup>。

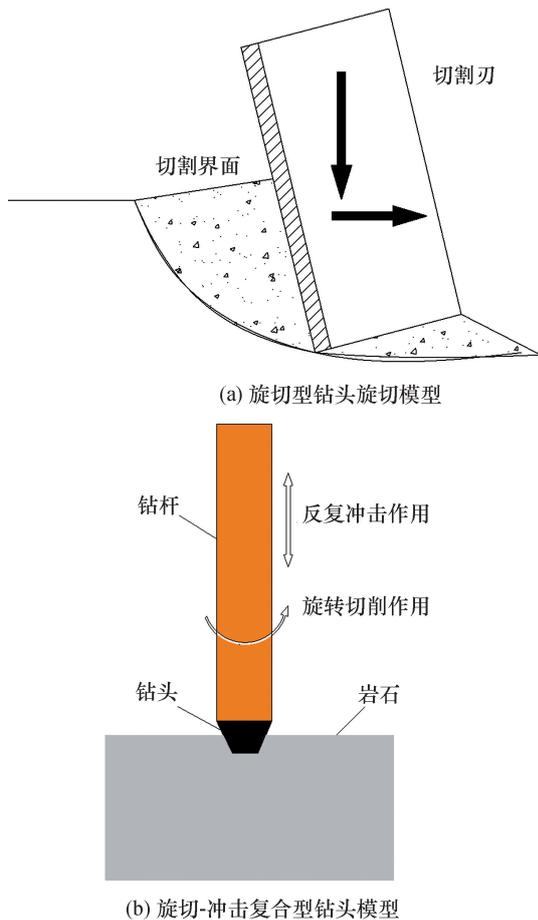


图3 钻孔形式示意图

Fig.3 Drilling form

### 3.2 岩石破碎比功

不同种类岩石的力学特性有所差别,而同一类型的岩石其各项特性也在特定范围内变化。以莫氏硬度为例,大理岩在1~2范围内,属于软岩;花岗岩在3~5之间,属于中硬岩<sup>[58]</sup>。因此,有学者认为通过岩石的力学特性识别岩石种类是不准确的。对于岩石而言钻机的钻进是一种作用方式,钻机采用不同钻进频率及进给压力,间接反映了岩石产生的抵抗作用力。破碎比功也称比能或凿碎比功(Specific Energy, SE),1965年由美国学者

Teale<sup>[59]</sup>利用 Specific Energy 方程提出,定义为破碎单位体积的岩石所消耗的功,表征岩石破碎过程中体积和能量之间的关系,此后常用于MWD技术中识别岩石性质,其表达式为

$$SE = \frac{F}{A} + \frac{2\pi NT}{60Au} \quad (1)$$

式中, $F$ 为轴力; $T$ 为扭矩; $N$ 为转速; $A$ 为钻孔面积; $u$ 为所钻岩石的渗透率。

根据Teale的研究结果,所有岩石钻孔产生的破碎比功值都与岩石的抗压强度呈现一定相关性,且各种岩石的SE最小值恒定不变。这说明利用破碎岩石所消耗的能量表征岩石的岩性具有一定的合理性,但由于不能精确识别所破碎岩石的种类,实际上其输出的是岩石的相对岩性。此后,很多研究取SE值表征钻孔过程中的岩石岩性。美国矿业局的一项研究表明,岩石条件的变化与比能的变化具有很好的相关性<sup>[60]</sup>。Jain等<sup>[61]</sup>将比能应用到矿业工程领域中,作为表征岩石可钻性和抗压强度的评价指标,试验结果显示这种评价体系是可靠的,具有很好的相关性。

针对能量角度判断岩石种类的技术研究,国内研究人员也做了大量创新性工作。闫铁等<sup>[62]</sup>应用分形岩石力学理论,对旋转式钻机钻进破碎岩石能耗进行分析,从多角度建立了破碎岩石消耗能量的分形描述模型,并结合钻进参数、破碎岩石块度及粒度分布分形维数对破碎比功的计算方法进行优化,使该分形模型更具有普适性。曹钧等<sup>[63]</sup>通过量化分析钻机性能与钻进参数之间的关系,结合破碎比功的概念,提出针对性的函数计算关系式并应用于工程实践中。陈加胜等<sup>[39]</sup>通过监测钻进过程中钻机液压系统各液压油缸的压力及流量建立随钻岩性识别系统,识别巷道顶板岩层岩性,结合破碎比功推导、优化钻进参数计算公式,试验结果与岩样单轴抗压强度对比表明,该计算公式可以推算出巷道顶板的岩层层位和强度。谭卓英等<sup>[64]</sup>根据钻进参数获取方式及可钻性定义中存在的缺点,提出以单位能量下的穿孔速率表征可钻性的新概念,并建立了多参数耦合的破碎比功计算公式:

$$E_s = \frac{4(K_1 T_e V_p + K_2 M N_r)}{\pi R^2 V_p} \quad (2)$$

式中, $K_1$ 、 $K_2$ 分别为轴力和扭矩对岩石破碎所做功的贡献程度系数; $T_e$ 为有效轴压力; $V_p$ 为穿孔速率; $M$ 为扭矩; $N_r$ 为钻杆转速; $R$ 为钻头内外径之差。

公式(2)是基于轴力-转速-穿孔速率耦合计

算破碎比功,通过计算结果的识别处理达到识别岩石岩性的目的。在多参数耦合方式识别岩性的过程中,由于钻进过程中随着钻进深度的变化,有效轴压力改变,钻头磨损程度增加,因此识别过程中需要对参数进行修正,以实际穿孔速率和理论穿孔速率之比作为修正系数<sup>[65]</sup>。

### 3.3 其他指标

针对随钻测量岩体指标参数难以精确监测的问题,有学者提出一种反映钻进过程中岩石质量的指标,即岩石质量系数(Rock Quality Index, RQI),为施加在钻头上的重量(W)与所钻岩层的渗透率(PR)之间的比值<sup>[66]</sup>:

$$RQI = \frac{W}{PR} \quad (3)$$

试验结果显示,穿孔速率与钻杆转速及施加在钻头上的重量呈正相关,与岩石的强度呈负相关。RQI值的计算精度主要取决于各种钻进参数的采集精度,因此参数的准确性是决定其能否作为表征岩石质量指标的关键。Yin等<sup>[67]</sup>将RQI指标应用于某矿山硬岩巷道,试验结果表明,RQI可以作为关联岩性与钻机机械性能指标。

有研究指出,钻进过程中不改变钻机和钻头的型号,且岩石的完整性符合要求时,理论上穿孔速度为常数<sup>[68-70]</sup>。但事实上,随着钻进深度的增加,由于钻压升高、钻杆扭矩增大以及钻杆受到的摩擦程度的增加,导致钻进速度并非一个常数,这也是岩石可钻性评估体系着重考虑的因素<sup>[71-72]</sup>。曹瑞琅等<sup>[73]</sup>建立了一种新型数字钻探监测系统,为了消减钻进参数对穿孔速率的影响,提出一种钻进过程指数(DPI),基于穿孔速率修正及归一化来描述岩体的完整性,并进行了一系列的试验。试验结果表明,钻进过程指数(DPI)能综合描述钻进破坏程度,实现了岩体完整性监测的量化和信息化。

### 3.4 机器学习算法

机器学习算法是使计算机模拟或实现人类学习行为,以获取新的知识或技能,对已有的知识结构进行重组分析,使自身性能不断改变的特定指令。机器学习含多种不同模式的算法,如支持向量机、神经网络、决策树和聚类算法等。随钻岩性识别技术对岩性的辨识大多基于神经网络和模糊聚类分析2种算法。神经网络算法是通过已知单元数据进行推理延伸,简单处理大量单元数据后进行广义链接各单元构成神经网络系统的方法;模糊聚类分析是根据数据间的特征与相似性进行聚类判别及分析的方法<sup>[74-76]</sup>。1982年Wolf等<sup>[77]</sup>首次

提出自动判别方法识别测井数据中的岩性信息。随后Doveton、Busch等<sup>[78-79]</sup>针对多变量模型提出统计判别分析的方法对岩性进行识别。Yao、邱颖等<sup>[80-81]</sup>阐述了神经网络和模糊聚类分析2种算法应用于岩性识别的可行性。张洪、张幼振等<sup>[82-83]</sup>利用神经网络模型进行岩性识别的工作。张乐文等<sup>[84]</sup>将模糊聚类分析与粗糙集理论进行结合,建立多组别判别分析方法并对地层的岩性进行识别。Zhang等<sup>[85]</sup>将神经网络模型应用于随钻自动测量泥浆脉冲信号识别,提高了识别的准确率。

以大数据为核心的基于神经网络模型、聚类分析数据解译思想的随钻岩性识别方法,具有自适应、自学习等功能,降低了传统岩性识别的约束条件,突出了复杂地质条件下钻孔过程的稳定性。目前,基于神经网络模型的算法在随钻岩性识别中的应用并不深入,但大部分学者都做了某个单一延伸模型的研究和改进,显示出了巨大潜力。

### 3.5 声波频谱特性

钻孔过程中必不可少地伴随着因旋切或冲击产生的声音,这些声波中蕴含着与岩石相关的丰富信息,因此钻进过程中钻杆与岩石产生的声波频谱特性可以作为未来随钻岩性识别研究的新内容。有些学者已在这方面开展了一定的研究工作。

Kumar等<sup>[86-89]</sup>对钻进过程中产生的声音信号进行FFT(Fast Fourier Transform,快速傅里叶变换)处理,得到了5种主声频,回归分析后发现,这5种主频与岩石的单轴抗压强度、抗拉强度存在明显相关性。Ivaničová等<sup>[90]</sup>从实验室研究入手,深入研究了金属切割岩石过程中产生的声理学特性。Shreedharan等<sup>[91]</sup>认为,利用已知参数的钻头钻进地层,即试验过程中保持钻头直径、切割齿数量、钻进速度及钻杆轴力为常数,采集钻进过程中的声音信号,有助于区分岩石性质。试验结果也表明该方法可以得到不错的识别效果,但存在一定的缺点,即钻进高强度的岩石时,钻头的磨损不可避免,会导致钻头的参数产生一定的变化。

Vardhan等<sup>[92]</sup>建立小型便携式气动钻探平台,研究钻孔过程中声级与岩石性质的关系。试验通过测量加权等效连续声级,建立其与抗压强度及耐磨性之间的关系。结果表明,钻杆附近的声级明显受到岩石抗压强度的影响。因此,使用声级识别岩石特性,对于爆破装药孔设计具有一定的意义。

李辉等<sup>[93]</sup>将随钻振动声波技术(VWD)应用于塔北地区风化壳界面的识别。试验结果表明,振动声波频谱在风化壳界面上呈现一定的变化规律,

具有明显的对应关系, VWD 频谱的主频、颜色变化、频率分布和频矩的变化反映了岩性的变化。

李占涛等<sup>[94]</sup>对不同岩石材料进行了室内钻孔实验,采集钻进过程中的振动及声波信号,探究声波特征与岩石性质之间的关系,采用特定的方法揭示典型岩石的声波频谱特性,通过将声频分段后,取各段平均值作为代表趋势,根据趋势线的变化能较好地识别岩石特性。

综上所述可以看出,利用岩石钻孔产生的声波信号能够成功反映岩性信息,但目前应用声波参数研究岩石岩性的成果非常有限,主要问题是定量研究少、各领域研究背景不同导致研究结果无法对比。想要通过某种特性正确定性一种岩石的物理力学性质,必须建立一个完整的数据支撑,从而获得两者之间的关系<sup>[95-96]</sup>。在未来随钻岩性识别领域的研究中,探究声波频谱特性与岩石岩性的定量关系并排除多解问题,寻求岩性与多种钻进数据形式的关联,将大大有利于岩土工程的发展。

#### 4 影响因素分析

经过多年试验研究,随钻岩性识别技术的探测精度不断提高,在数据传输、探测距离、地质反演、数据解译、配套设备研发以及岩体参数精准识别等方面都取得了突破性进展。但是因工作环境复杂、

数字解译多解性及地质条件差等问题,导致随钻岩性识别技术的工程应用精准性依旧不足。分析和讨论各种因素对随钻岩性识别结果的影响有利于进一步发展该技术<sup>[97]</sup>。图4为随钻岩性识别技术的主要影响因素。

常规掘进状态下,综合地质记录数据与物理探测数据即可达到地质超前探测的目的。为实现掘进的实时测量与可视化,生成地下岩体结构与地质力学模型,构建随钻岩性识别技术体系,提升巷道掘进效率,必须充分考虑各种因素对岩性识别结果的影响<sup>[98]</sup>。2种钻进模式主要影响因素包括以下3个方面。

##### 4.1 地质因素

地质学中地层界面本身属于一种非连续面,岩土工程领域中地层界面包含很多工程属性。例如,结构面、滑移面、物质分界面和岩溶空洞等<sup>[49]</sup>。钻进过程中岩体的构造、内部断层、含水层及部分地段出现的陷落空洞等都属于地质结构的一部分。这些结构是造成岩体不连续的主要原因,同时也影响工程岩体的完整性及物理力学性质。随钻岩性识别过程中对这些地质结构的精确定位至关重要,因此地质结构是影响岩性识别结果的主要因素之一。钻探设备需要突破一定的技术瓶颈,实现精准定位同质不连续岩体间的断层构造,减少或避免对岩性的错误识别。

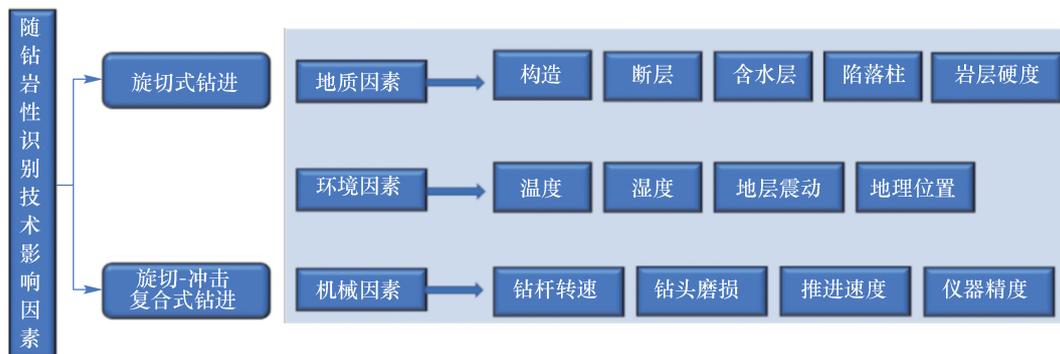


图4 随钻岩性识别技术影响因素

Fig. 4 Influencing factors of lithology identification technology while drilling

##### 4.2 环境因素

随钻岩性识别工作多用于矿山开采、隧道掘进、基坑支护等领域,工作环境多处于野外,环境因素对机械的影响不可避免。不同区域温湿度的变化、所钻地层引起的震动等都对机械性能产生一定影响。工程开采多处于极端环境中,容易引起设备锈蚀、发动机功率降低、传感器精度下降、电器元件故障增多等诸多不利因素。因此,考虑环境因素对

机械设备的影晌并做出有针对性的防护措施,可以提高岩性识别的效率。

##### 4.3 机械因素

随钻岩性识别主要监测设备钻进过程中钻杆的转速、扭矩、轴压力和钻机位移等参数。有时也会根据需要监测冲洗液压力、噪声与振动等参数,这些参数中一部分是根据机械设备定量控制的可控因素,另一部分是不可控因素,但都属于机械的

性能参数,是影响随钻识别过程的关键参数。上述机械参数通过高精度传感器进行监测,传感器是随钻测量的核心。机械的振动、钻杆转速、冲击频率等各种因素都对传感器产生不同程度的影响。如何提高传感器的测量精度以及减弱机械因素对传感器的影响,是发展随钻岩性识别技术需要重点考虑的问题。

## 5 问题与展望

### 5.1 存在问题

(1) 基础理论不足。当前国内研究成果还未完善远程处理系统的自主核心算法,对参数解译的过程和结果难以得到具有普适性的规律,理论研究少,需要进一步加强核心算法的开发<sup>[99]</sup>。

(2) 智能化钻进设备研制不足。目前,智能台车、智能钻机及配套的智能系统研制不足,设备智能集成化程度低,仍需人工调试操控;同时,钻孔自动定位、钻进轨迹控制及信息传输控制等技术较为落后,无法满足智能钻进需求。这些不足极大限制了岩性识别技术的发展。

(3) 设备感知程度低。面对复杂的工作条件,设备及配套的传感器精度不足,导致设备对环境因素的感知程度低,得到的数据信息不精确,恶劣环境下无法采集数据,钻进过程中空间位置难以掌控。因此,需进一步提升复杂环境下设备的智能感知功能。

### 5.2 发展趋势

随钻岩性识别技术作为一项多元交互技术,在发展过程中需要加大学科的融合交互,在不同阶段采用不同技术,达到识别岩性的目标。随着认知智能、计算机视觉、图像识别、数据传输、云计算、机器学习算法等人机交互技术与信息科学技术的快速发展,未来随钻岩性识别关键技术研究中多元信息融合发展成为可能。人工智能的多元技术深度融合,是随钻岩性识别的必然发展趋势。但是,由于现场工作条件恶劣、探测空间小、数据解译结果不唯一等各种技术难题的阻碍,随钻岩性识别技术的发展仍任重道远。图5为随钻岩性识别未来发展趋势示意图。

(1) 基于传感器感知程度的增加,未来人工智能技术向着能够自主分析、思考及判断的认知智能方向发展。将人工智能技术应用于随钻岩性识别技术,能够辅助人工智能钻进,处理大量的信息数据,优化工程方案<sup>[100]</sup>。

(2) 计算机视觉是一项新颖的技术,将其引入

随钻岩性识别系统,处理钻进过程产生的图形、信息数据等,可以降低人力成本,提升工作效率。

(3) 图像识别技术与计算机视觉相辅相成,其作为人眼识别的衍生技术,集成计算机及人脑的一部分,模拟人的视觉功能,具备图像的分析处理能力。未来在随钻岩性识别设备上引入图像识别技术,能够提高设备自动化程度,增加生产活动的灵活性。



图5 随钻岩性识别发展趋势

Fig. 5 Development trend of lithology identification while drilling

(4) 数据传输方式的发展对于完善随钻岩性识别技术至关重要。智能钻杆传输是将来的重点发展方向。下一步可以深入研究不同的数据传输方式作为随钻岩性识别的技术储备,重点提升数据传输速度。

(5) 数据云计算。云计算技术能够突破传统的计算机硬盘存储限制,为随钻岩性识别产生的大量图片数据、文档数据、模型数据及动态数据等提供充足的信息存储空间,增加信息容错率,保证信息的安全性和完整性。未来需要建立集成化、信息化、一体化的大数据云计算平台,进一步拓展随钻岩性识别数据安全管理模式。

(6) 机器学习算法。机器学习算法是解译随钻岩性识别参数的重要工具,算法的精度决定了岩性识别最终结果的精度。如何根据钻进参数数据集的特点和规模研发合适的算法并对其进行训练以提高算法的精度,是未来的研究重点之一。

## 参考文献

- [1] Schunnesson H. Rock characterisation using percussive drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics

- and Mining Sciences, 1998, 35(6): 711-725.
- [2] Messaoud A, Weihs C. Monitoring a deep hole drilling process by nonlinear time series modeling[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 321(3/4/5): 620-630.
- [3] Beattie N C M. Monitoring-while-drilling for open-pit mining in a hard rock environment: an investigation of pattern recognition techniques applied to rock identification[D]. Canada: Queen's University 2009.
- [4] Huang S L, Wang Z W. The mechanics of diamond core drilling of rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3/4): 612.
- [5] Schunnesson H, Mozaffari S. Production control and optimization in open pit mining using a drill monitoring system and an image analysis system-A case study from Aitik copper mine in Sweden [J]. Journal of Mines, Metals and Fuels, 2009, 57(9): 244-251.
- [6] Van Eldert J, Schunnesson H, Saiang D, et al. Improved filtering and normalizing of Measurement-While-Drilling (MWD) data in tunnel excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 103: 103467.
- [7] 吴昊骏, 纪洪广, 龚敏, 等. 我国地下矿山凿岩装备应用现状与凿岩智能化发展方向[J]. 金属矿山, 2021(1): 185-201, 212.
- Wu Haojun, Ji Hongguang, Gong Min, et al. Present application status of rock drilling equipment in underground mine and the development direction for intelligent rock drilling in china[J]. Metal Mine, 2021(1): 185-201, 212.
- [8] 韩志磊, 张达. 物联网技术在金属矿山的应用思考[J]. 工矿自动化, 2018, 44(5): 1-6.
- Han Zhilei, Zhang Da. Thinking about application of Internet of things in metal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(5): 1-6.
- [9] 丁恩杰, 俞啸, 廖玉波, 等. 基于物联网的矿山机械设备状态智能感知与诊断[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2308-2319.
- Ding Enjie, Yu Xiao, Liao Yubo, et al. Key technology of mine equipment state perception and online diagnosis under Internet of Things[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2308-2319.
- [10] Galende-Hernández M, Menéndez M, Fuente M J, et al. Monitor-While-Drilling-based estimation of rock mass rating with computational intelligence; The case of tunnel excavation front [J]. Automation in Construction, 2018, 93: 325-338.
- [11] Navarro J, Sanchidrián J A, Segarra P, et al. Detection of potential overbreak zones in tunnel blasting from MWD data [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 82: 504-516.
- [12] 蔡文军. 机械式无线随钻测斜仪系统研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2007: 6-30.
- [13] 李泉新. 煤矿井下复合定向钻进及配套泥浆脉冲无线随钻测量技术研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2018: 14-17.
- [14] 田昊. 隧道地质数字钻进精细化识别方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2015: 8-22.
- [15] 何明明. 基于旋切触探技术的岩体力学参数预报研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017: 3-16.
- [16] 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: 17-42.
- [17] Yang W W, Yue Z Q, Tham L G. Automatic monitoring of inserting or retrieving SPT sampler in drillhole[J]. Geotechnical Testing Journal, 2012, 35(3): 103450.
- [18] 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.
- 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.
- [19] Gui M W, Soga K, Bolton M D, et al. Instrumented borehole drilling for subsurface investigation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(4): 283-291.
- [20] Kahraman S, Bilgin N, Feridunoglu C. Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(5): 711-723.
- [21] 曹正林, 周丽清, 王志章, 等. 利用钻井参数进行随钻岩性预测[J]. 天然气工业, 2000, 20(1): 48-50.
- Cao Zhenglin, Zhou Liqing, Wang Zhizhang, et al. Lithology prediction while drilling by use of drilling parameters[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(1): 48-50.
- [22] 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 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.
- [23] 谭卓英, 岳中琦, 谭国焕, 等. 金刚石钻进比功及风化花岗岩实时分级研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 2907-2912.
- Tan Zhuoying, Yue Zhongqi, Tan Guohuan, et al. Study on specific energy of diamond drilling and real-time classification of weathered granite[J]. Chinese Journal

- of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 ( S1 ) : 2907-2912.
- [24] 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.  
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.
- [25] Van Eldert J, Funehag J, Saiang D, et al. Rock support prediction based on measurement while drilling technology [ J ]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80 ( 2 ) : 1449-1465.
- [26] Shirkevand M J, Azizi H, Ghasemi I, et al. A correlation between microstructure and rheological properties of broad MWD high-density polyethylene [ J ]. Iranian Polymer Journal, 2015, 24 ( 11 ) : 953-963.
- [27] El-Kosasy A M, Hussein L A, Salama N N, et al. Kinetic study and peak purity determination of bupropion hydrochloride using RRLC/DAD and HPLC/MWD methods; stability study and application in pharmaceutical preparation and in synthetic mixtures with nicotine [ J ]. RSC Advances, 2015, 5 ( 79 ) : 64274-64285.
- [28] 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 Hongliang, Shi Wenlong, 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.
- [29] Liu Z W, Song J C. A low-cost calibration strategy for measurement-while-drilling system [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65 ( 4 ) : 3559-3567.
- [30] Lu C H, Jiang G S, Wang Z Q, et al. The development of and experiments on electromagnetic measurement while a drilling system is used for deep exploration [ J ]. Journal of Geophysics and Engineering, 2016, 13 ( 5 ) : 824-831.
- [31] Denney D. Risk management in exploration drilling [ J ]. Journal of Petroleum Technology, 2000, 52 ( 9 ) : 87-90.
- [32] Lakshminarayana C R, Tripathi A K, Pal S K. Experimental investigation on potential use of drilling parameters to quantify rock strength [ J ]. International Journal of Geo-Engineering, 2021, 12 ( 1 ) : 1-15.
- [33] Seibi A, Karrech A, Boukadi F, et al. Wellbore path estimation using measurement while drilling techniques: a comparative study and suggestions for improvements [ J ]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2009, 31 ( 14 ) : 1205-1216.
- [34] Gui M W, Soga K, Bolton M D, et al. Instrumented borehole drilling for subsurface investigation [ J ]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128 ( 4 ) : 283-291.
- [35] 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.
- [36] SANDVIK Group. Sandvik mining and rock technology [ EB/OL ]. ( 2021-09-29 ) [ 2021-12-20 ]. <https://www.rocktechnology.sandvik.html>
- [37] Atlas Copco Group. Atlas Copco drilling solutions [ A ]. Workshop on Technology Development & Mechanisations of Mines, IHC, New Delhi, 2015.
- [38] BEVER Control. Bever team online MWD module [ EB/OL ]. ( 2021-08-20 ) [ 2021-12-20 ]. <https://www.bevercontrol.com/produkt-ter//produktinformasjon.html>
- [39] 陈加胜,邓海顺,高明中,等. 掘进巷道顶板岩层随钻识别研究 [ J ]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33 ( 2 ) : 271-277.  
Chen Jiasheng, Deng Haishun, Gao Mingzhong, et al. Study on identification along with drilling of roof strata of excavation roadway [ J ]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33 ( 2 ) : 271-277.
- [40] Wang Q, Gao H K, Jiang B, et al. In-situ test and bolt-grouting design evaluation method of underground engineering based on digital drilling [ J ]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138 : 104575.
- [41] Sugawara J, Yue Z Q, Tham L G, et al. Weathered rock characterization using drilling parameters [ J ]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40 ( 3 ) : 661-668.
- [42] Aalizad S A, Rashidinejad F. Prediction of penetration rate of rotary-percussive drilling using artificial neural networks—a case study/Prognozowanie postępu wiercenia przy użyciu wiertła udarowo-obrotowego przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych-studium przypadku [ J ]. Archives of Mining Sciences, 2012, 57 ( 3 ) : 715-728.
- [43] 于恒昌. 基于数字钻探测试技术的岩石力学参数测定方法研究 [ D ]. 济南:山东大学, 2018.
- [44] 段云,熊代余,徐国权. 钻孔数字化与钻孔岩性自动识别技术 [ J ]. 金属矿山, 2015 ( 10 ) : 125-129.  
Duan Yun, Xiong Daiyu, Xu Guoquan. A new technology for digital drilling and automatic lithology identification [ J ]. Metal Mine, 2015 ( 10 ) : 125-129.

- [45] 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.  
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.
- [46] 朱海成,韩新平,冀常鹏,等. 钻孔岩性识别条件下的数字爆破技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2018,46(10):184-189.  
Zhu Haicheng, Han Xinping, Ji Changpeng, et al. Research on digital blasting technique with lithology identification of borehole [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 184-189.
- [47] 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.
- [48] Wang L, Zhang C X, Lin T, et al. Characterization of a fiber optic gyroscope in a measurement while drilling system with the dynamic Allan variance[J]. Measurement, 2015, 75:263-272.
- [49] 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.
- [50] Yu B S, Zhang K, Niu G G, et al. Real-time rock strength determination based on rock drillability index and drilling specific energy: an experimental study[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(5):3589-3603.
- [51] Yang P, Zhang Y, Wang H B. Optimization and establishment of drillability in gravel formation [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 570(3):032018.
- [52] Shi X C, Wu J, Gao L Y, et al. Evaluation methods and standards for rock drillability in oil and gas drilling engineering in China: a review[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 570(3):032057.
- [53] Lakshminarayana C R, Tripathi A K, Pal S K. Rock strength characterization using measurement while drilling technique[J]. Indian Geotechnical Journal, 2020, 50(6):994-1005.
- [54] Liu H, Karen Yin K. Analysis and interpretation of monitored rotary blasthole drill data [J]. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 2001, 15(3):177-203.
- [55] 董方政. 基于钻孔过程监测(DPM)的岩石可钻性评价[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2019.
- [56] Abdullaevna Kudaikulova G. The relationship of the density and consumption of drilling mud with a model of rock drillability [J]. American Journal of Engineering and Technology Management, 2019, 4(1):5.
- [57] Mao S, Shi X C, Meng Y F, et al. Experimental investigation of rock drillability for three rock types under varying wellbore pressure conditions [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(8):2439-2445.
- [58] Drumheller D S. Attenuation of sound waves in drill strings [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 94(4):2387-2396.
- [59] Teale R. The concept of specific energy in rock drilling [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1965, 2(1):57-73.
- [60] Lee S, Park B, Kim Y, et al. Peak detection with pile-up rejection using multiple-template cross-correlation for MWD (measurement while drilling) [C]//Robot Intelligence Technology and Applications, 2015:753-758.
- [61] Jain A K, Singh D P. Specific energy as a criterion for drillability of rocks—A laboratory study[M]//Geotechnical Instrumentation and Monitoring in Open Pit and Underground Mining. CRC Press, 2020:253-263.
- [62] 闫铁,李玮,毕雪亮,等. 旋转钻井中岩石破碎能耗的分形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2):3649-3654.  
Yan Tie, Li Wei, Bi Xueliang, et al. Fractal analysis of energy consumption of rock fragmentation in rotary drilling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2):3649-3654.
- [63] 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(S2):145-149.  
Cao Jun, Shen Zhikang, Hu Yongle, 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.
- [64] 谭卓英,蔡美峰,岳中琦,等. 基于岩石可钻性指标的地质界面识别理论与方法[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(9):803-807.  
Tan Zhuoying, Cai Meifeng, Yue Zhongqi, et al. Theory and approach of identification of ground interfaces based on rock drillability index [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(9): 803-807.
- [65] 卢勇. 智能双管钻机的岩性识别以及钻具磨损识别[D]. 沈阳:东北大学, 2017.

- [66] Bauer A. Open pit drilling and blasting[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1971, 71(6): 115-121.
- [67] Yin K, Liu H. Using information extracted from drill data to improve blasting design and fragmentation[J]. Fragblast, 2001, 5(3): 157-179.
- [68] 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(3): 1501-1513.
- [69] Yarali O, Kahraman S. The drillability assessment of rocks using the different brittleness values[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2011, 26(2): 406-414.
- [70] Chen J, Yue Z Q. Weak zone characterization using full drilling analysis of rotary-percussive instrumented drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 89: 227-234.
- [71] 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): 135-145.
- [72] Wang Q, Gao H K, 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(6): 4599-4609.
- [73] 曹瑞琅, 王玉杰, 赵宇飞, 等. 基于钻进过程指数定量评价岩体完整性原位试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 679-687.  
Cao Ruilang, Wang Yujie, Zhao Yufei, et al. In-situ tests on quantitative evaluation of rock mass integrity based on drilling process index[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(4): 679-687.
- [74] Ligtenberg J H, Wansink A G. Neural network prediction of permeability in the el garia formation, ash-tart oilfield, offshore Tunisia[J]. Journal of Petroleum Geology, 2001, 24(4): 389-404.
- [75] 苏永华. 岩土参数模糊隶属函数的构造方法及应用[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1772-1779.  
Su Yonghua. Constructing method of fuzzy membership function of geotechnical parameters and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1772-1779.
- [76] Singh T, Gosain A. Comparison of different fuzzy clustering algorithms: a replicated case study [C]//Information and Decision Sciences, 2018: 267-275.
- [77] Wolf M, Pelissier-Combes J. Faciolog-automatic electrofacies determination[C]//SPWLA 23rd Annual Logging Symposium. OnePetro, 1982.
- [78] Doveton J H. Geologic log analysis using computer methods: American association of petroleum geologists [J]. Computer Applications in Geology, 1994, 2: 1-22.
- [79] Busch J M, Fortney W G, Berry L N. Determination of lithology from well logs by statistical analysis[J]. SPE Formation Evaluation, 1987, 2(4): 412-418.
- [80] Yao Z H, Wu L D. A clustering approach based on Marr's operator with its application to lithologic recognition[J]. Pattern Recognition Letters, 1991, 12(8): 451-456.
- [81] 邱颖, 孟庆武, 李梯, 等. 神经网络用于岩性及岩相预测的可行性分析[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(3): 76-84.  
Qin Ying, Meng Qingwu, Li Ti, et al. The feasibility analysis of neural network in the prediction of lithology and lithofacies[J]. Progress in Geophysics, 2001, 16(3): 76-84.
- [82] 张洪, 邹乐君, 沈晓华. BP神经网络在测井岩性识别中的应用[J]. 地质与勘探, 2002, 38(6): 63-65.  
Zhang Hong, Zou Lejun, Shen Xiaohua. The application of bp neural network in well lithology identification [J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(6): 63-65.
- [83] 张幼振, 张宁, 邵俊杰, 等. 基于钻进参数聚类的含煤地层岩性模糊识别[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2328-2335.  
Zhang Youzhen, Zhang Ning, Shao Junjie, et al. Fuzzy identification of coal-bearing strata lithology based on drilling parameter clustering[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2328-2335.
- [84] 张乐文, 张德永, 李术才, 等. 基于粗糙集理论的遗传-RBF神经网络在岩爆预测中的应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(S1): 270-276.  
Zhang Lewen, Zhang Deyong, Li Shucai, et al. Application of RBF neural network to rockburst prediction based on rough set theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S1): 270-276.
- [85] Zhang X S, Zhang H X, Guo J S, et al. Auto measurement while drilling mud pulse signal recognition based on deep neural network[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 167: 37-43.
- [86] Kumar B R, Vardhan H, Govindaraj M. Estimating rock properties using sound level during drilling: field investigation [J]. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2010, 2(3): 169.
- [87] Kumar B R, Vardhan H, Govindaraj M. Prediction of uniaxial compressive strength, tensile strength and

- porosity of sedimentary rocks using sound level produced during rotary drilling [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2011, 44(5):613-620.
- [88] Kumar V, Vardhan H, Murthy C S N. Quantification of rock properties using frequency analysis during diamond core drilling operations [J]. *Journal of the Institution of Engineers: India; Series D*, 2019, 100(1):67-81.
- [89] Kumar V, Vardhan H, Murthy C S N. Multiple regression model for prediction of rock properties using acoustic frequency during core drilling operations [J]. *Geomechanics and Geoengineering*, 2020, 15(4):297-312.
- [90] Ivaničová L, Futó J, Krepelka F. Acoustic and physiological effects of the surroundings in rock cutting process [J]. *Acta Montanistica Slovaca*, 2010, 15(3):220-224.
- [91] Shreedharan S, Hegde C, Sharma S, et al. Acoustic fingerprinting for rock identification during drilling [J]. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 2014, 5(2):89-105.
- [92] Vardhan H, Adhikari G R, Govinda R M. Estimating rock properties using sound levels produced during drilling [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(3):604-612.
- [93] 李辉, 谢平, 杨文飞, 等. 随钻钻柱振动声波技术对塔北地区风化壳的识别 [J]. *录井工程*, 2014, 25(3):10-14, 99.  
Li Hui, Xie Ping, Yang Wenfei, et al. Vibro-acoustic while drilling technique for identifying the weathering crust in northern Tarim Basin [J]. *Mud Logging Engineering*, 2014, 25(3):10-14, 99.
- [94] 李占涛, 林小国, 宋春霞. 岩石钻孔振动与声波频谱特性实验研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(4):1008-1016.  
Li Zhantao, Lin Xiaoguo, Song Chunxia. Experimental study on spectral characteristics of sound and vibrations in rock drilling [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(4):1008-1016.
- [95] Futó J, Krepelka F, Chlebová Z, et al. Measuring procedure of experimental data acquisition and data evaluation of acoustic emission in rock disintegration [J]. *Acta Montanistica Slovaca*, 2009, 14(3):254.
- [96] Miklušová V, Ušlová L, Ivaničová L, et al. Acoustic signal-new feature in monitoring of rock disintegration process [J]. *Contributions to geophysics and geodesy*, 2006, 36:125-133.
- [97] Mainjot A K, Schajer G S, Vanheusden A J, et al. Influence of cooling rate on residual stress profile in veneering ceramic: measurement by hole-drilling [J]. *Dental Materials*, 2011, 27(9):906-914.
- [98] Rodgers M, McVay M, Horhota D, et al. Assessment of rock strength from measuring while drilling shafts in Florida limestone [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(8):1154-1167.
- [99] 王国法, 任怀伟, 庞义辉, 等. 煤矿智能化(初级阶段)技术体系研究与工程进展 [J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7):1-27.  
Wang Guofa, Ren Huaiwei, Pang Yihui, et al. Research and engineering progress of intelligent coal mine technical system in early stages [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7):1-27.
- [100] 闫铁, 许瑞, 刘维凯, 等. 中国智能化钻井技术研究发展 [J]. *东北石油大学学报*, 2020, 44(4):15-21, 6.  
Yan Tie, Xu Rui, Liu Weikai, et al. Research and development of intelligent drilling technology in China [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020, 44(4):15-21, 6.

(责任编辑:陈骏)