

基于可钻性知识图谱的深部在钻地层 可钻性智能推断

甘超^{1,2,3}, 刘勇^{1,2,3}, 汪拓^{1,2,3}, 曹卫华^{1,2,3*}, 张毅^{4*}

1. 中国地质大学(武汉)自动化学院, 湖北武汉 430074
2. 复杂系统先进控制与智能自动化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074
3. 地球探测智能化技术教育部工程研究中心, 湖北武汉 430074
4. 中国地质科学院, 深地探测与矿产勘查全国重点实验室, 北京 100094

摘要: 地层可钻性作为衡量钻进过程中地层被钻难易程度的关键指标, 是合理选择钻进方法和优化钻进操作参数的重要依据。针对深部地质钻进过程中可钻性信息获取成本高昂、许多岩石没有对应的地层可钻性范围标准等问题, 本文提出一种基于可钻性知识图谱的深部在钻地层可钻性智能推断方法。该方法首先构建包含岩石关键特征的可钻性知识图谱, 设计基于岩石相似性度量的可钻性推理算法, 将地矿行业标准中的 67 种地层可钻性级别推广至已知的 292 种岩石。其次, 通过钻孔地层岩性动态分析与可钻性智能推断, 实时分析地层岩性分布, 推断在钻地层可钻性级别。最后, 通过微钻实验和压入硬度实验验证所提方法的有效性。该方法为深部地质钻进过程智能控制奠定了重要基础。

关键词: 深部地质钻进过程; 地层可钻性信息获取; 地层可钻性知识图谱。

中图分类号: TE21

收稿日期: 2026-1-13

An intelligent inferring method of deep formation drillability based on drillability knowledge graph

GAN Chao^{1,2,3}, LIU Yong^{1,2,3}, Wang Tuo^{1,2,3}, CAO Weihua^{1,2,3*}, ZHANG Yi^{4*}

1. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Hubei Key Laboratory of Advanced Control and Intelligent Automation for Complex Systems, Wuhan 430074, China
3. Engineering Research Center of Intelligent Technology for Geo-Exploration, Ministry of Education, Wuhan 430074, China
4. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100094, China

Abstract: The formation drillability, as a key indicator for measuring the ease or difficulty of drilling the formation during the

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(项目编号: 2024ZD1000800, 2024ZD1000806); 国家自然科学基金重点项目(No. 62333019)。

作者简介: 甘超 (1990-), 男, 副教授, 博士, 主要从事复杂地质钻进过程建模与优化控制的研究工作. E-mail: ganchao@cug.edu.cn, ORCID: 0000-0002-4460-2279.

***通讯作者:** 曹卫华 (1972-), E-mail: weihuacao@cug.edu.cn, ORCID: 0000-0002-9677-9586; 张毅 (1986-), E-mail: shidazhangyang@163.com

drilling process, serves as an important basis for rationally selecting drilling methods and optimizing drilling operational parameters. Addressing the issues of high cost in acquiring drillability information during deep geological drilling and the lack of corresponding formation drillability range standards for many rocks, this paper proposes an intelligent inference method for deep drilling formation drillability based on a drillability knowledge graph. Firstly, a drillability knowledge graph incorporating the key characteristics of rocks is constructed, and a drillability reasoning algorithm based on rock similarity measurement is designed. This approach extends the 67 rock drillability levels specified in the geomining industry standards to 292 known types of rocks. Secondly, through dynamic analysis of borehole formation lithology and intelligent inference of drillability, the distribution of formation lithology is analyzed in real-time, and the drillability level of the formation being drilled is inferred. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified through micro-drilling experiments and indentation hardness tests. This method lays an important foundation for the intelligent control of the deep geological drilling process.

Keywords: Deep geological drilling process; Acquisition of formation drillability information; Knowledge graph of rock drillability.

0 引言

我国正在实施的深地国家科技重大专项是响应习近平总书记“向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”号召的具体行动。作为“入地”工程的利器,大陆科学钻探是人类获取地球内部信息、揭开地球深部奥秘的最直接和最重要手段。日前,在北京启动的“超万米科学钻探技术与装备”项目旨在推进我国在该领域的关键技术装备和工艺达到国际领先水平,力争打造继“梦想”号大洋钻探船之后又一国之重器(刘烜, 2025)。

地层可钻性作为衡量钻进过程中地层被钻难易程度的关键指标,是合理选择钻进方法和优化钻进操作参数的重要依据(Gan *et al.*, 2020)。在深部地质钻探过程中,往往需要穿越多套地层(甘超等, 2023),地层岩性的复杂多变特性使得及时、准确地获取可钻性信息成为一项颇具挑战性的任务。此外,深部地质钻进过程会遇到如麻粒岩、辉长岩等没有对应地层可钻性范围标准(自然资源部, 2010)的岩石,这些岩石往往表现出强研磨性或高抗压强度,导致钻头磨损加剧、机械钻速骤降甚至井壁失稳,进一步加剧了钻探作业风险。鉴于此,深入分析地层可钻性的变化规律,研究可靠性高、时效性强的地层可钻性信息获取方法,对于提升深部地质钻进过程的安全性和效率具有重要意义。

在现有的研究中,获取地层可钻性信息的方法主要可归为两类。其一,是基于区域地层岩心样本的室内实验法,通过采集目标孔所在区域的岩心样本,在实验室环境下进行地层可钻

性级别的测定。其二,是通过建立地层可钻性与钻进、测井、录井等多参数之间的关系模型来对地层可钻性进行软测量的方法。

室内实验法主要包括压入硬度法(李奋强等, 2024)、微钻实验法(国家能源局, 2016)和综合分级法(自然资源部, 2010)。压入硬度法通过评价地层的单项机械性质来判定其可钻性(李奋强等, 2024)。微钻实验法则通过模拟实际钻进过程,记录钻头在不同条件下的钻进时间,并利用标准公式计算地层可钻性(国家能源局, 2016),该方法在石油、天然气工程领域应用尤为广泛。综合分级法则综合考虑地层的物理力学性质和抗机械破碎能力,将地层划分为不同等级(自然资源部, 2010),该方法在地质勘探行业得到广泛的应用。地质钻探行业标准(自然资源部, 2010)采用综合分级法测定岩石的可钻性级别,并详细列出 67 种岩石的具体可钻性级值,为实际钻进过程提供参考。

尽管室内实验法具有较高的准确性,但其成本高昂且耗时较长,因此难以实时应用于钻进决策中。为应对这一挑战,有学者着手研究利用钻进、测井、录井等多参数建立可钻性软测量模型的方法。其中,机理分析法如 dc 指数模型法(付明川, 2024)、测井参数计算法(张亚旭, 高小燕, 2024)以及分形理论法(李嵬岩, 2022)等,通过分析地层特性与多参数之间的关系来计算可钻性。这类方法物理意义相对明确,但在岩性复杂、各向异性强的深部地层中,其普适性和精度常受限制。在复杂地质环境下,各因素之间的强耦合现象使得上述建模方法存在一定误差。近年来,随着新一代信息技术与人工智能技

术赋能千行万业，基于数据驱动的可钻性软测量方法逐渐受到关注（秦颖等, 2025）。

基于数据驱动的可钻性软测量方法利用钻进、测井、录井等多参数，通过机器学习算法建立其与地层可钻性之间的关系模型，以获取地层可钻性级别。有学者（马海等, 2008）通过信息关联建模方法首先建立了实时软测量可钻性的早期思路，后续其团队（马海等, 2010）进一步提出相关向量机预测法，在复杂地层参数强耦合场景下降低了预测误差。还有学者（李玉波等, 2023）在此基础上将矿物含量作为模型输入，显著提升了沉积岩可钻性预测精度。近年来，多源数据融合的地层可钻性智能评估方法（冯建祥等, 2025），进一步提高了复杂地层可钻性的预测精度与空间泛化能力。

此外，笔者在地层可钻性预测与三维地层可钻性场建模方面也开展了系列研究工作。通过融合运用 Nadaboost-ELM 算法、随机森林、极限学习机等智能建模方法，创新性地提出了基于数据驱动的钻进点地层可钻性离线与在线建模方法（Gan *et al.*, 2016; Gan *et al.*, 2017），实现了测井参数与地层可钻性实时关联，通过新数据在线更新地层可钻性模型，取得良好的预测效果。在此基础上，还构建了三维可钻性场建模框架，并提出了基于模糊 C 均值聚类 and 随机森林三维地层可钻性场建模方法，首先对地层可钻性进行空间聚类分析，然后基于空间聚类分析结果分别建立了三维地层可钻性场子模型，最终将各子模型聚合实现了区域三维地层可钻性的准确计算（Gan *et al.*, 2020; Gan *et al.*, 2021）。

上述两类方法为获取地层可钻性信息提供了重要基础，但它们各自存在一些局限。室内实验法虽然精确，但时效性相对较差，无法及时反映地层可钻性的变化。采用可钻性软测量方法时，需依赖区域地层岩心的室内标定实验积累可钻性数据，并采集钻进、测井、录井等多参数作为输入数据建立预测模型。然而，地质钻进过程中，现场条件限制导致难以实时进行可钻性标定实验，且测井参数通常是钻后获得，一定程度上限制了该方法的应用范围。因此，如何在缺乏室内可钻性标定实验结果和关键测井参数的条件下获取相对可靠的地层可钻性信息，是当前深部地质钻进领域亟待解决的问题。针对上

述问题，本文提出了一种基于可钻性知识图谱的在钻地层可钻性智能推断方法，可快速、可靠地获取地层可钻性信息，为钻进方法的实时调整及钻进操作参数的优化提供了有力支撑。

1 基于可钻性知识图谱的在钻地层可钻性智能推断框架

基于可钻性知识图谱的地层可钻性智能推断框架如**错误!不能识别的开关参数**。所示。该框架包括两层，即地层可钻性知识图谱构建层和钻孔地层岩性动态综合分析 with 可钻性智能推断层。这两层可以独立完成相应功能，也可结合使用。

地层可钻性知识图谱构建层主要通过整合岩石类别、成因和矿物组分等关键特征，结合已知的可钻性知识，构建地层可钻性知识图谱。采用基于岩石相似性度量的推理算法，将地矿行业标准中所提67种岩石的可钻性级别（自然资源部, 2010）推广至麻粒岩、片岩、石灰岩等292种已知岩石类型。

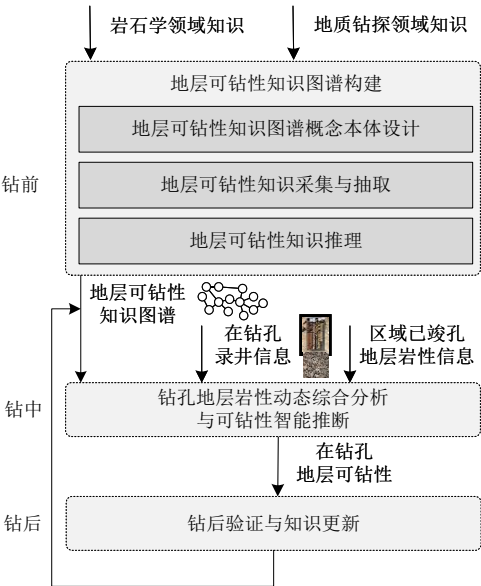


图 1 基于可钻性知识图谱的在钻地层可钻性智能推断框架

Fig.1 An intelligent framework of drillability inferring method of in-drilling formation based on drillability knowledge graph

本方法贯穿钻前、钻中、钻后全流程，钻前基于岩石学与地质钻探领域知识，完成地层可钻性知识图谱的构建、概念本体设计、知识采集与推理，形成可钻性评价的先验知识库。钻中钻孔地层岩性动态综合分析与可钻性智能推断层则结合区域已竣工地质资料与录井数据，动态评估在钻地层岩性信息，并依据地层可钻性知识图谱，智能推断地层可钻性级别。钻后通过实验验证与现场数据反馈，对可钻性推断结果进行评估，并将新的岩石特征与可钻性知识更新至知识图谱，形成构建、推断、验证和更新的闭环优化机制。

1.1 地层可钻性知识图谱构建

在地层可钻性知识图谱构建方面，首先基于岩石的类别、成因特征和矿物成分间的关系，以及已知的地层可钻性数据，构建了地层可钻性知识图谱。该知识图谱从逻辑上分为数据层和模式层，如错误!不能识别的开关参数。所示。数据层存储了实际数据和知识，例如各种岩石的可钻性级别和其特征。模式层则存储了经过提炼和整理的知识，并通过本体库来管理和规范知识图谱中的模式，确保实体、关系以及实体属性等本体之间的关联得到准确的描述。

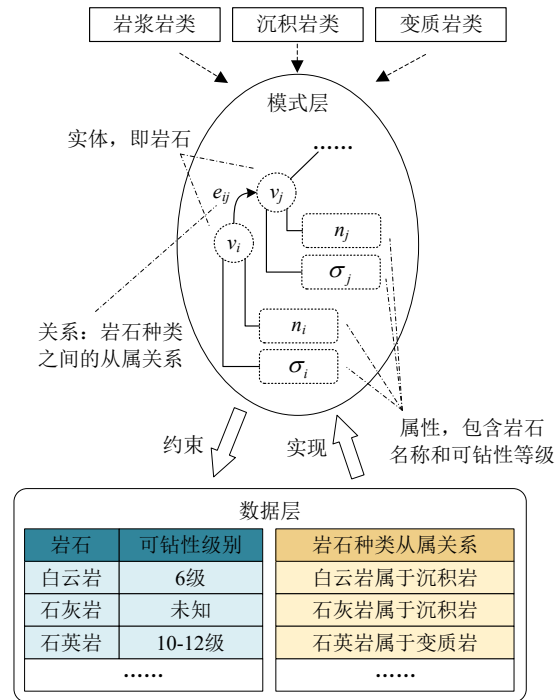


图2 地层可钻性知识图谱构建

Fig.2 Construction of rock drillability knowledge graph

1.1.1 地层可钻性知识图谱概念本体设计

为了构建地层可钻性知识图谱，首先需要定义实体、关系和属性等概念本体。实体包括各类岩石，在岩石学领域的研究（王达，何远信，2014）中，其根据成因可分为岩浆岩、沉积岩和变质岩，为了评估各类岩石的可钻性，需要对其进行详细分类，包括岩浆岩的酸碱性质、沉积岩的基本物质和变质岩的变质作用类型等。关系主要有“包含”或“属于”，例如，沉积岩中的泥质岩包含泥岩和页岩，而超基性岩类则属于岩浆岩。

岩石属性包括名称和可钻性级别，岩石的名称通常根据矿物成分和结构特征来确定（王达，何远信，2014），如橄榄岩、花岗岩。岩石的可钻性是指其在特定钻进技术条件下的抵抗钻头破碎能力的量化指标。鉴于不同岩石类型在成因、矿物组成以及胶结方式等内在属性上存在显著差异，它们展现出独特的物理力学特性，从而决定了各自的可钻性级别。另一方面，那些在物理力学性质上相近的岩石，其可钻性评级也会表现出一定的相似性。地层可钻性评级与物理力学性质相关，我国地矿行业制定了一套评估标准（自然资源部，2010），基于实际钻进经验和技术规范，将地层可钻性分为1至12个等级，并列举了67种岩石的具体可钻性级值，为地层可钻性的研究提供了支持和指导，详情如表1所示。

对可钻性知识图谱中的实体、关系和属性进行定义后，便完成了地层可钻性知识图谱模式层的设计，可以采用公式(1)来描述地层可钻性知识图谱的结构：

$$G_{FD} = (V, E) \quad (1)$$

其中， G_{FD} 代表地层可钻性知识图谱， V 代表节点集合，每一个节点 $v_i \in V$ 均对应着一种岩石类型。 E 则是边集合， $e_{ij} \in E$ 表示从节点 v_i 到节点 v_j 的一条边，即不同岩石种类之间的关系。为了更具体地描述节点特征，为节点 v_i 定义了两个属性，即 n_i 和 σ_i ，分别代表其对应的岩石名称和地层可钻性级别。

表 1 DZ/T 0227—2010 地质岩心钻探规程中给出的地层可钻性分级表（自然资源部, 2010）

Table 1 DZ/T 0227—2010 The rock drillability classification table provided in the geological core drilling regulations(Ministry of Natural Resources, 2010)

地层可钻性 级别	代表岩石举例	钻进时效 (m/h)
1~4	粉砂质泥岩、碳质页岩、粉砂岩、中粒砂岩、透闪岩、煌斑岩	/
5	硅化粉砂岩、碳质硅页岩、滑石透闪岩、橄榄大理岩、白色大理岩、石英闪长玢岩、黑色片岩、透辉石大理岩、大理岩	2.90~3.60
6	角闪斜长片麻岩、白云斜长片麻岩、石英白云石大理岩、黑云母大理岩、白云岩、蚀变角闪闪长岩、角闪变粒岩、角闪岩、黑云母石英片岩、角岩、透辉石榴石砂卡岩、黑云白云母大理岩	2.30~3.10
7	白云斜长片麻岩、石英白云石大理岩、透辉石化闪长玢岩、混合岩化浅粒岩、黑云角闪斜长岩、透辉石岩、白云母大理岩、蚀变石英闪长玢岩、黑云角石英片岩	1.90~2.60
8	花岗岩、砂卡岩化闪长玢岩、石榴石砂卡岩、石英闪长斑岩、黑云母斜长角闪岩、伟晶岩、黑云母花岗岩、斜长角闪岩、石英角闪岩、混合片麻岩、凝灰岩、闪长岩、混合岩化浅粒岩	1.50~2.10
9	混合岩化浅粒岩、花岗岩、斜长角闪岩、混合闪长岩、斜长闪长岩、钾长伟晶岩、橄榄岩、混合岩、闪长玢岩、石英闪长玢岩、似斑状花岗岩、斑状花岗闪长岩	1.10~1.70
10	硅化大理岩、砂卡岩、混合斜长片麻岩、钠长斑岩、钾长伟晶岩、斜长角闪岩、安山质熔岩、混合岩化角闪岩、斜长岩、花岗岩、石英岩、硅质凝灰砂砾岩、英安质角砾熔岩	0.80~1.20
11	凝灰岩、熔凝灰岩、石英岩、英安岩	0.50~0.95
12	石英岩、硅质岩、熔凝灰岩	<0.60

1.1.2 地层可钻性知识采集与抽取

地层可钻性知识的采集主要源自于岩石学领域的权威文献（邓红江等, 2025）、地质钻探领域的专业指导手册（王达, 何远信, 2014）以及地矿行业的规范文档（自然资源部, 2010）。这些资源提供了大量的非结构化文本数据，形成了构建知识图谱的基础。为了构建一个全面的地层可钻性知识图谱，需要收集的关键知识包括：各种常见岩石的名称、它们之间的关联关系，以及通过实验测定得到的地层可钻性级别。

知识抽取是指从各种类型的数据源中提取

出实体、属性以及实体间的相互关系，在此基础上形成本体化的知识表达（Xiao *et al.*, 2023），这一过程通常依赖于自然语言处理和图像处理等技术。然而，在本研究中，由于采集的原始信息有限，涉及的实体、关系及属性的数量相对较少，且自动化抽取易引发语义歧义与实体错误，因此选择采用人工抽取的方式，以确保能够准确、高效地获取地层可钻性知识中的结构化信息。最终，经过对地层可钻性知识的抽取，得到了292种常见的岩石类型和其中67种岩石的地层可钻性级别，详情如

表2所示。

表 2 地层可钻性知识抽取结果

Table 2 The extracted knowledge regarding the drillability

of rocks			
岩石类型	岩浆岩	沉积岩	变质岩
总数	103	104	85
其中已知可钻 性的岩石数量	18	11	38

1.1.3 地层可钻性知识扩展

地矿行业虽然已设定了相关标准，但这些标准覆盖的岩石种类有限，无法完全满足实际钻探的需求。为了更全面地评估不同岩石的可钻性，本节基于岩石的成因、矿物组分和胶结形式等特征，对现有的可钻性分级进行了扩展。

为深入探讨岩石种类与其可钻性级别之间的变化规律，本研究依据地矿行业标准中给出的67种岩石的可钻性标定实验结果（自然资源部, 2010），统计了各类岩石的可钻性级别分布情况，如错误!未找到引用源。所示。值得注意的是，地矿行业标准中存在未明确可钻性级别的岩石，这一现象并非标准疏漏，而是由岩石自身性质的复杂性、可钻性评价的综合性及标准适用性的局限性共同导致的。以常见的石灰岩为例，其可钻性并非由单一矿物组分决定，而是受微观结构、胶结程度、蚀变作用及杂质含量等多种因素的综合影响，导致其力学性质差异极大，无法用一个固定的可钻性级别进行概括。

统计结果显示，在所研究的67种已知可钻性的岩石中，沉积岩的可钻性级别以1~6区间为主，占沉积岩总数的54.5%；而岩浆岩的可钻性级别则多处于6~10之间，占比达到88.9%。值得注意的是，变质岩由于其变质作用类型及原岩种类的多样性，展现出了差异化的可钻性级别分布特点。尽管如此，依然有84.2%的变质岩其可钻性级别分布在5~9之间。上述统计与分析结果不仅量化了不同岩性的可钻性谱系差异，更从成因机理上揭示了可钻性级别的分异规律，有力支持了岩石种类对其可钻性级别具有显著影响的观点，从而为通过岩石种类来预测其可钻性提供了坚实的科学依据。

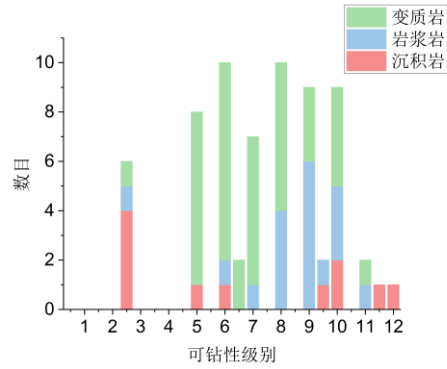


图 3 已知岩石的可钻性级别分布图

Fig.3 A distribution chart of the drillability grades of known rocks

（注：图中可钻性级别为其地层可钻性范围平均值）

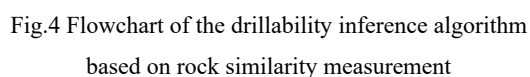
根据上述分析，可以观察到联系紧密的岩石往往具有相似的可钻性级别。因此，针对可钻性未知的岩石，可以利用与其在成因、矿物组分、胶结形式等关键特征上最为相似的岩石的可钻性知识，来推测该岩石的可钻性级别。为了量化岩石之间的相似度，本研究引入了岩石相似度指标 D ，并提出了一种基于相似度的可钻性推理算法。该算法能够推断出未知岩石的可钻性级别，为实际钻探提供了更为科学和可靠的依据。其中，岩石相似度指标 D 的计算方式如下：

$$D_{ij} = D(\text{root}, v_i) + D(\text{root}, v_j) - 2 \cdot D(\text{root}, lca) \quad (2)$$

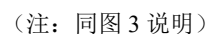
其中， D_{ij} 表示可钻性知识图谱 G_{FD} 中节点 v_i 和 v_j 之间最短路径上的边数量，节点之间的最短路径越短，则其对应的岩石相似度越高。 root 是 G_{FD} 的根节点，即节点“岩石”， lca 是节点 v_i 和 v_j 的最近公共祖先节点。

下面，通过例子来说明岩石相似度指标的有效性和合理性。根据岩石学知识，石灰岩和白云岩均属于沉积岩类下的碳酸盐类，而泥岩和页岩则归类于沉积岩类中的泥质岩类。这一分类层次结构表明，相较于泥岩和页岩，白云岩与石灰岩之间的关系更为紧密。当运用公式(2)对这些岩石间的相似性进行量化评估时，石灰岩与白云岩之间的相似度指标值为2，而石灰岩与泥岩、页岩之间的相似度指标值均为4。这一数值结果与先前的分析结论相吻合，进一步验证了石灰岩与白云岩之间更高的相似性，也印证了相似度指标 D 计算公式的合理性与科学性。

采用平均值作为目标节点可钻性级别的推断,主要是由于相似岩石的物理力学特性相近,其可钻性级别分布较为集中,平均值能够更稳健、更具代表性地表征目标岩石的可钻性水平。



统计结果显示,在所研究的292种可钻性的岩石中,沉积岩的可钻性级别以1~6区间为主,占沉积岩总数的55.8%;而岩浆岩的可钻性级别则多处于6~10之间,占比达到88.3%。值得注意的是,变质岩由于其变质作用类型及原岩种类的多样性,展现出了差异化的可钻性级别分布特点。尽管如此,依然有85.9%的变质岩其可钻性级别分布在5~9之间。上述统计与分析结果,既充分印证了岩石种类对其可钻性级别具有显著影响的结论,也为依托岩石种类预测其可钻性提供了扎实的科学支撑。



1.2 钻孔地层岩性动态综合分析 with 地层可钻性智能推断

针对在钻地层可钻性智能推断方面，首先利用区域内已经完成钻探的地层岩性信息，对待钻孔的地层岩性分布进行预估。一旦开始钻进，利用录井数据中的岩性信息来更新钻孔地层岩性分布，以实现对地层岩性描述的动态更新。最后，结合钻孔地层岩性信息和建立的地层可钻性知识图谱，进行地层可钻性级别的推断。

在进行待钻孔地层岩性钻前估计时，根据区域内已经完成钻探的地层岩性信息，对待钻孔的地层岩性进行估计。假设每个钻孔都由多个孔段组成，并将同一地层岩性的钻孔区间作为一个孔段进行处理。通过统计区域内钻孔地层岩性分布信息，对待钻孔在不同深度的地层岩性进行了估计。

在钻进过程中，常常利用岩心录井或岩屑录井等技术手段来获取钻孔内的地层岩性信息，以实现地层岩性描述的更新。基于前一步针对地层岩性的估计结果，进一步利用录井资料对钻孔地层岩性进行自适应更新，以确保地层岩性描述与实际情况更加吻合。

还建立了一个可钻性知识图谱，根据不同岩石种类快速查询其对应的可钻性级别。在获取钻孔地层的岩性信息后，可以依托这一知识图谱，对在钻地层的可钻性进行准确推断。具体流程是将钻地层的岩石类型名称作为输入，再利用公式(3)计算 Jaccard 距离，在知识图谱中搜索与输入岩石类型名称最接近的节点，并将其确定为目标节点（吴润泽等, 2025）这一方法能够确保即使录井资料与知识图谱中对同一种岩石的称呼存在差异，依然能够成功匹配到相应的岩石节点，适配深部地质钻进地层岩性多变、现场录井命名易受人员习惯影响且难以开展实时岩性成分校验的特点，为深部复杂环境下可钻性信息的快速获取提供了关键支撑。

$$J(s_i, s_j) = \frac{|s_i \cap s_j|}{|s_i \cup s_j|} \quad (3)$$

2 实验结果与分析

为了验证本文所提的基于可钻性知识图谱

的在钻地层可钻性智能推断方法的有效性，本文以地质钻探中常见的14种岩石作为实验对象，标本如图9所示。首先，通过微钻实验法（国家能源局, 2016）和压入硬度法（李奋强等, 2024）对这些岩石的可钻性进行了标定，实验装置如图7和图8所示，并将标定结果视为可钻性级别的真实值。使用TS19E型钻进系统开展微钻实验，分别装配微型牙轮钻头与聚晶金刚石复合片钻头，在设定的钻压与转速条件下，记录钻头钻入岩样2.4毫米与3毫米深度的耗时，根据标准公式和记录的时间计算得到地层可钻性（国家能源局, 2016）；使用HYY-B型岩石压入硬度计开展压入硬度实验，通过液压系统施加恒定载荷，以岩石的压入硬度这一单项力学性质为核心评价依据，对地层可钻性进行测定与分级（李奋强等, 2024）。随后，将本文所提的可钻性智能推断方法应用于这些岩石，其推断结果与真实值的对比如表3所示。所选取的14种岩石种类位于表3的第一列，其中，A类岩石（白云岩、砂岩、花岗岩、石英岩以及大理岩）的可钻性级别在地矿行业标准（自然资源部, 2010）中已明确给出，而B类岩石（石灰岩、辉长岩、片岩和麻粒岩）的可钻性级别则尚未在地矿行业标准（自然资源部, 2010）中给出。

实验结果表明，对于所研究的14种岩石，采用本文提出的可钻性智能推断方法所得出的可钻性级别与实验标定结果呈现出高度的一致性。具体来说，对于地矿行业标准（自然资源部, 2010）中已给出可钻性级别的5种岩石，其推断结果直接来源于行业标准（自然资源部, 2010）中的可钻性知识，这种高度吻合性验证了本研究所依据的地矿行业知识的可靠性。



图 7 微钻实验法装置
Fig.7 Micro-drill experimental apparatus

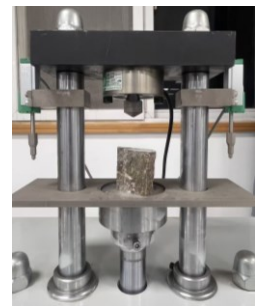


图 8 压入硬度法装置
Fig.8 Indentation hardness testing apparatus

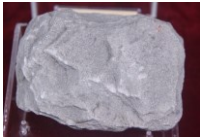
表 3 九种常见岩石的可钻性智能推断结果与实验标定结果对比

Table 3 A comparison between the inferred results and experimental calibration outcomes for the drillability of nine common rock types

岩石类别		实验标定的可钻性级别	可钻性级别推断值	参考岩石
A	白云岩	6.82	6.00	白云岩
	中粒砂岩	3.87	[1.00, 4.00]	中粒砂岩
	花岗岩	8.22	[8.00, 10.00]	花岗岩
	石英岩	12.00	[10.00, 12.00]	石英岩
	大理岩	5.81	5.00	大理岩
B	泥质页岩	3.00	[3.00, 4.50]	碳质页岩、碳质硅页岩
	石灰岩	5.17	6.00	白云岩
	角砾岩	6.00	[6.50, 8.00]	粉砂岩、硅质岩
	千枚岩	6.50	[6.80, 7.30]	大理岩、石英岩、黑色片岩、黑云角石英片岩、黑云母石英片岩、角闪斜长片麻岩、白云斜长片麻岩、斜长角闪岩、角闪岩、混合岩
				黑云角石英片岩、黑云母石英片岩、黑色片岩
				角闪斜长片麻岩、白云斜长片麻岩、斜长角闪岩、角闪岩、石英岩、大理岩
	片岩	7.00	6.00	闪长岩、斜长闪长岩、闪长玢岩、石英闪长玢岩、石英闪长斑岩、蚀变角闪闪长岩、钠长斑岩、安山质熔岩、煌斑岩、伟晶岩
	麻粒岩	7.00	[6.83, 7.67]	斜长岩
	霞石正长岩	8.00	[7.40, 8.10]	凝灰岩
	辉长岩	9.00	10.00	
火山角砾岩	10.00	[8.00, 11.00]		



白云岩 dolomite



中粒砂岩 medium sandstone



花岗岩 moorstone



石英岩 quartzite



大理岩 marble



泥质页岩 muddy shale



图 9 岩石样本图

Fig.9 Rock sample image

而对于地矿行业标准（自然资源部, 2010）中尚未给出可钻性级别的9种岩石，即泥质页岩、石灰岩、角砾岩、千枚岩、片岩、麻粒岩、霞石正长岩、辉长岩和火山角砾岩，本章在构建地层可钻性知识图谱时采用了基于岩石相似性度量的可钻性推理算法对其可钻性级别进行推理。具体地，该方法通过在已知的、具有可钻性级别的岩石集合中筛选出与目标岩石最为接近的岩石样本，并计算这些相似岩石样本的可钻性级别的平均值，以此作为目标岩石的可钻性级别推断值。实验结果显示，这4种岩石的可钻性智能推断结果与实验标定结果同样具有高度的吻合性，这充分证明了本文所构建的地层可钻性知识图谱及所提出的可钻性智能推断方法的有效性。

进一步地，对于地矿行业标准（自然资源部, 2010）中未给出可钻性级别的9种岩石，表3.6还详细列出了推断其可钻性级别时所依据的相似岩石样本。例如，对于石灰岩，本文通过岩石相似度指标筛选出了同属“沉积岩类”下的“碳酸盐岩类”的白云岩作为依据，推断石灰岩的可钻性级别为6级，与实验标定的5.17级较为接近。对于“变质岩类”下的“区域变质岩类”中的麻粒岩，本文通过相似度指标筛选出了与其相似度最高的同属“区域变质岩类”的6种岩石，计算其可钻性级别的均值作为麻粒岩的可钻性级

别推断值，与实验结果也高度一致。

经计算，泥质页岩、石灰岩、角砾岩、千枚岩、片岩、麻粒岩、霞石正长岩、辉长岩和火山角砾岩 9 种岩石可钻性推断结果与实验标定值的平均相对误差约为 10.42%，表明所提方法具有良好的推断精度。综上所述，以上实验结果充分验证了本文所提的基于可钻性知识图谱的在钻地层可钻性智能推断方法的有效性和准确性。

3 结论

在深部地质钻进的过程中，地层岩性的复杂多变特性使得及时、准确地获取地层可钻性信息成为一项颇具挑战性的任务。当前的地层可钻性信息获取方法存在时效性不足和成本较高等局限性，这在很大程度上制约了钻进策略的及时调整和钻探效率提升。针对上述问题，本文提出了一种基于可钻性知识图谱的在钻地层可钻性智能推断方法。即便在缺乏室内可钻性标定实验结果及关键测井参数的情况下，本文方法仍能快速、可靠地获取地层可钻性信息，为钻进方法的实时调整及钻进操作参数的优化提供了有力的数据支撑。通过微钻实验与压入硬度实验，本文方法的有效性得到了充分验证。

本文不仅为深部地质钻进过程中的地层可钻性信息获取提供了新的思路和方法，也为深

部地质钻进过程智能控制关键技术的工程应用奠定了重要基础。本文主要基于岩石成因类型、矿物组分等分类学特征构建知识图谱，并以图谱距离衡量可钻性相似性，存在一定局限性，比如：没有充分考虑结构、构造、胶结物、风化程度及蚀变作用影响。

未来研究将重点从以下方面展开：一是进一步丰富岩石样本类型与特征维度，将微观结构、胶结类型、蚀变程度等力学关键指标纳入知识图谱，提升模型在复杂地层条件下的覆盖范围与推理精度；二是结合实时钻井数据实现知识图谱的动态更新与迭代优化，构建自适应钻进过程的可钻性智能评价体系；三是将可钻性推断结果与钻进参数智能调控相结合，为深部地质高效、安全钻进提供更全面的理论与技术支撑。

References

- Deng H. J., Xiao Y. F., Zheng R. C., 2017. Concise Textbook of Petrology (4th Edition). Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Fu M. C., 2020. Study on DC Index Correction. *Mud Logging Engineering*, 31(03): 8-13(in Chinese with English abstract).
- Feng J. X., Yuan S. Y., Luo C. M., et al., 2025. Research and Application of Intelligent Evaluation Method for Formation Drillability Based on Multi-Source Data Fusion. *Petroleum Science Bulletin*, 10(5): 892-907(in Chinese with English abstract).
- Gan C., Cao W. H., Wu M., et al., 2016. Intelligent Nadaboost-ELM Modeling Method for Formation Drillability Using Well Logging Data. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 20(7): 1103-1111. <https://doi.org/10.20965/jaciii.2016.p1103>.
- Gan C., Cao W. H., Wu M., et al., 2017. An Online Modeling Method for Formation Drillability Based on OS-Nadaboost-ELM Algorithm in Deep Drilling Process. *IFAC-PapersOnLine*, 50(01): 12886-12891. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1941>.
- Gan C., Cao W. H., Liu K. Z., et al., 2020. Spatial Estimation for 3D Formation Drillability Field: A New Modeling Framework. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 84: 103628. <https://doi.org/10.1016/j.jn-gse.2020.103628>.
- Gan C., Cao W. H., Liu K. Z., et al., 2021. A New Spatial Modeling Method for 3D Formation Drillability Field Using Fuzzy C-Means Clustering and Random Forest. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 200: 108371. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108371>.
- Gan C., Wang X., Wang L. Z., et al., 2023. Dynamic Prediction Method of Drilling Rate in Deep Geological Drilling Based on Regional Multi-well Data Optimization and Model Pre-Training. *Drilling Engineering*, 50(04): 1-8(in Chinese with English abstract).
- Li W. Y., 2022. Prediction of Rock Drillability of Gypsum Interlayer Based on Fractal Theory and Modified Drilling Rate Equation. *West-China Exploration Engineering*, 34(02): 52-54(in Chinese).
- Li Y. B., Li Z. H., Hu P. J., et al., 2023. Evaluation and Application of Rock Drill-Resistant Characteristics Based on Mineral Composition. *Drilling & Production Technology*, 46(06): 177-183(in Chinese with English abstract).
- Li F. Q., Su Q. Y., Liu S. P., et al., 2024. Study and Application of Drillability of Red Bed Rock Strata in Changsha Basin. *Drilling Engineering*, 51(01): 51-57(in Chinese with English abstract).
- Liu X., 2025. Launch of the National Science and Technology Major Project for Deep Earth Exploration "Ultra-deep Scientific Drilling Technology and Equipment (over 10,000 meters)". *China Natural Resources News*(in Chinese).
- Ma H., Wang Y. J., Wei M. A., et al., 2008. A New Method for Predicting Formation Drillability Grade. *Acta Petrolei Sinica*, (05): 761-765(in Chinese with English abstract).
- Ma H., Wang Y. J., Hu R., et al., 2010. Prediction of Formation Drillability Grade Based on Relevance Vector Machine. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 34(02): 67-70(in Chinese with English abstract).
- Ministry of Natural Resources., 2010. DZ/T 0227—2010, Specifications for Geological Core Drilling. *National Technical Committee for Standardization of Natural Resources and Territorial Spatial Planning*(in Chinese).
- National Energy Administration., 2016. SY/T 5426-2016, Methods for Determination and Classification of Rock

- Drillability. *Petroleum Drilling Engineering Professional Standardization Committee*(in Chinese).
- Qin Y., Yang H., Cui L., et al., 2025. Construction Method of Knowledge Graph for Associated and Symbiotic Minerals Driven by Data-Knowledge Collaboration. *Earth Science*, 1-19(in Chinese with English abstract).
- Wang D., He Y. X., 2014. Geological Drilling Handbook. *Changsha: Central South University Press*(in Chinese).
- Xiao Y. Z., Zheng S. A., Shi J. C., et al., 2023. Knowledge Graph-Based Manufacturing Process Planning: A State-of-the-Art Review. *Journal of Manufacturing Systems*, 70:417-435.<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.08.006>.
- Zhang Y. X., Gao X. Y., 2011. Study on Rock Drillability Based on Logging Data. *Information System Engineering*, (09): 97-98(in Chinese).
- Wu R. Z., Li H., Mei H. B., et al., 2025. A Landslide Monitoring and Early Warning System with Retrieval-Augmented Generation Enhanced by Knowledge Graph. *Earth Science*, 50(10): 4125-4136. (in Chinese with English abstract).
- 新方法.石油学报, (05): 761-765.
- 马海, 王延江, 胡睿, 等, 2010. 基于相关向量机的地层可钻性级值预测. 中国石油大学学报(自然科学版), 34(02): 67-70.
- 自然资源部, 2010. DZ/T 0227—2010, 地质岩心钻探规程. 全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会.
- 秦颖, 杨慧, 崔柳, 等, 2025. 数据-知识协同驱动的共生矿产知识图谱构建方法. 地球科学, 1-19.
- 王达, 何远信, 2014. 地质钻探手册. 长沙: 中南大学出版社.
- 张亚旭, 高小燕, 2011. 基于测井资料的岩石可钻性研究. 信息系统工程, (09): 97-98.
- 吴润泽, 李浩, 梅红波, 等, 2025. 基于知识图谱检索增强生成的滑坡监测预警系统. 地球科学, 50(10): 4125-4136.

中文参考文献

- 邓红江, 肖渊甫, 郑荣才, 2017. 岩石学简明教程第4版. 北京: 地质出版社.
- 冯建祥, 袁三一, 骆春妹, 等, 2025. 多源数据融合的地层可钻性智能评估方法研究及应用. 石油科学通报, 10(5): 892-907.
- 付明川, 2020. dc指数校正研究. 录井工程, 31(03): 8-13.
- 甘超, 汪祥, 王鲁朝, 等, 2023. 基于区域多井数据优选与模型预训练的深部地质钻探过程钻速动态预测方法. 钻探工程, 50(04): 1-8.
- 国家能源局, 2016. SY/T 5426-2016, 岩石可钻性测定及分级方法. 石油钻井工程专业标准化委员会.
- 李嵬岩, 2022. 分形理论及修正钻速方程预测石膏夹层岩石可钻性. 西部探矿工程, 34(02): 52-54.
- 李玉波, 李忠慧, 胡棚杰, 等, 2023. 基于矿物组分的岩石抗钻特性评价及应用. 钻采工艺, 46(06): 177-183.
- 李奋强, 粟琼玉, 刘素平, 等, 2024. 长沙盆地红层岩石地层可钻性研究及应用. 钻探工程, 51(01): 51-57.
- 刘烜, 2025. 深地国家科技重大专项“超万米科学钻探技术与装备”项目启动. 中国自然资源报.
- 马海, 王延江, 魏茂安, 等, 2008. 地层可钻性级值预测