

基于孔壁影像的岩体结构面识别及岩体质量特征分析

李炜,张占荣*,李时亮

中铁第四勘察设计院集团有限公司,湖北 武汉 430063



摘要:针对传统结构面特征参数获取技术和方法存在误差大、易受干扰等问题,以及岩体质量指标(RQD)在工程应用中存在的局限性,利用孔内电视技术识别岩体结构面,获取产状等参数,提出了基于孔壁影像数据的孔壁岩体质量指标($WRQD$)的概念与计算方法,并通过工程实例进行了对比验证和分析。研究结果表明:通过孔壁影像数据可精确获取地下岩体结构面产状等关键参数,分析地下岩体结构面产状分布特征;岩体质量指标(RQD)与孔壁岩体质量指标($WRQD$)的关系特征明显, $WRQD$ 值总体较 RQD 值大,但局部也存在 $WRQD$ 值小于 RQD 值的现象,二者大小关系与结构面的类型、填充物类型、胶结程度及岩性等因素密切相关;各岩性 $WRQD$ 值与 RQD 值的拟合优度 R^2 均大于0.83,孔壁岩体质量指标($WRQD$)可作为岩体质量评价的依据。该研究为地下岩体探测和评价提供了新思路,有助于推动工程地质精细化勘察研究与实践。

关键词:岩土工程;孔内电视;孔壁影像;结构面;产状;岩体质量

中图分类号:P642 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)04-0877-11 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.04.107
引用格式:李炜,张占荣,李时亮.基于孔壁影像的岩体结构面识别及岩体质量特征分析[J].黄金科学技术,2025,33(4):877-887. LI Wei, ZHANG Zhanrong, LI Shiliang. Identification of Rock Mass Structural Planes and Analysis of Rock Mass Quality Characteristics Based on Borehole-wall Images[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(4): 877-887.

结构面是岩体中力学强度相对薄弱的部位,其存在导致岩体的力学性能展现出显著的不连续性、非均匀性和各向异性特征(朱合华等,2023;吴金等,2024)。岩体的结构特性在一定荷载作用下对岩体的变形、破坏模式及强度特性具有决定性作用。节理和裂隙等结构面的发育,包括方向、长度、开度、规模和交错复杂度,呈现出高度空间随机性、各向异性和隐蔽性,传统的勘察手段难以实现结构面高精度特征解析。由于结构面特征参数是工程岩体分类和岩体质量评价的关键指标之一,直接关系到工程的安全和稳定性,故实现岩体结构面精确识别、结构面参数精确提取和岩体质量精确分析,是岩土工程精细化分析的关键。

在岩体结构面数据采集和识别分析方面,早期主要采用人工现场测绘实现地面裸露岩体的结构面获取和分析,但该方法存在效率低、主观性强,且受地形和地质条件限制。目前遥感技术(李虹江等,2024)、无人机摄影技术(杨成龙等,2024)和激光扫描技术(李杰林等,2022;张浩等,2023)等非接触式测量方法逐渐应用于岩体结构面识别,实现了大面积岩体表面结构信息的快速获取。然而,对于地下深部岩体,目前仍主要通过工程地质钻探取芯获取地下岩体结构特征,只能获取地下岩体结构面的倾角,无法获取倾向数据,且数据误差较大,地下岩体结构特征数据精确获取成为岩土工程精细化发展需解决的关键技术之一。随着光学成像技术和图

收稿日期:2025-03-10;修订日期:2025-04-08

基金项目:中国铁建股份有限公司科技研发计划项目“钻探一体化智能识别、感知及动态施工关键技术研究”(编号:2022-B20)资助

作者简介:李炜(1995—),男,宁夏固原人,工程师,从事岩土工程勘察、设计及研究工作。E-mail:2060176661@qq.com

*通信作者:张占荣(1982—),男,河北隆尧人,正高级工程师,从事岩土工程勘察、设计及研究工作。E-mail:65158440@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

像数据处理技术的不断进步,孔内电视技术成为地下深部岩体探测的重要手段,在岩体结构特征识别和探查中发挥着重要作用(李炜等,2023;孙红林等,2023)。孔内电视凭借高分辨率、实时图像传输等特点,实现了孔壁结构信息的精确获取(王益腾等,2020),其原位获取的孔壁影像数据减少了人为误差和机械干扰(Dias et al, 2020; 汤克轩等, 2025),为岩体结构面精确识别和参数提取提供了新思路。在岩体质量特征分析方面,传统的岩体质量评价体系主要有 RQD (岩体质量指标)分级体系(Deere et al, 1988)、 RMR 分级体系(Bieniawski et al, 1973)和 GSI 分级体系(Hoek et al, 1998)等。其中, RQD 在工程实践中得到了广泛应用,但存在主观性强、误差大和效率低等局限性(杨光辉等, 2010; 曹云等, 2017),目前工程领域已逐渐认识到其局限性及对岩体质量评价的影响,但仍缺乏有效的替代方法。近年来,以大数据驱动的机器学习和深度学习等方法在工程领域取得了显著进展(宋战平等, 2025),图像识别和深度学习等技术被用于岩体信息提取和分析(赵晓明等, 2023; 李炜等, 2024)。因此,利用深度学习等技术对原位孔壁影像进行识别分析,是提高岩体质量评价准确性及工作效率的新途径。

鉴于此,本文针对传统方法获取岩体结构面特征参数存在误差大、易受干扰等问题,在综合分析岩体质量指标(RQD)局限性的基础上,探究了基于孔壁影像的岩体结构面识别及岩体质量特征分析的新思路和新方法。首先,基于工程地质勘察阶段获取的钻孔孔壁影像数据,提出了基于孔壁影像的岩体结构面倾向、倾角、所处深度和张开度等关键参数的提取算法,得到了基于孔壁影像数据的岩体质量评价指标——孔壁岩体质量指标($WRQD$)的概念及计算方法,为地下岩体质量分析提供新视角和方法。其次,通过工程实例,初步建立了灰岩、砂质泥岩、砂岩和花岗岩的 RQD 值与 $WRQD$ 值的数学关系。研究成果可助力工程地质精细化勘察研究与实践。

1 孔内电视工作原理

孔内电视技术是一种基于光电成像与数字信号处理相结合的钻孔原位观测技术,其核心原理是

通过高分辨率光学探头沿钻孔轴向连续扫描孔壁形态特征,同步获取三维数字图像及地质属性数据。

孔内电视系统一般由探头、传输电缆、地面采集控制单元和数据分析软件四大模块构成。探头包含光学模块和定位模块:光学模块包含 360° 环形图像传感器和照明光源装置;定位模块主要为三维电子罗盘,实现孔壁几何形貌与空间方位的精确映射。目前市面上的孔内电视设备要求钻孔中为无水或水质清澈环境,为获取高质量孔壁影像数据,测试前一般需要对钻孔孔壁进行清洗。如图1所示,通过孔内电视可获取钻孔孔壁展开图和三维虚拟岩芯,为结构面和破碎带等构造的识别提供基础数据。近年来,结合深度学习和图像识别算法识别裂缝和破碎带等特征并测量参数的技术逐步成熟(葛云峰等, 2019),为提供高效率测试及精细化勘察程度提供了一种新途径。

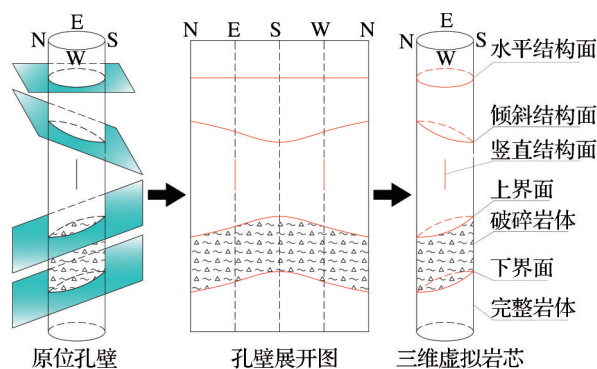


图1 孔内电视技术获取孔壁特征工作原理示意图

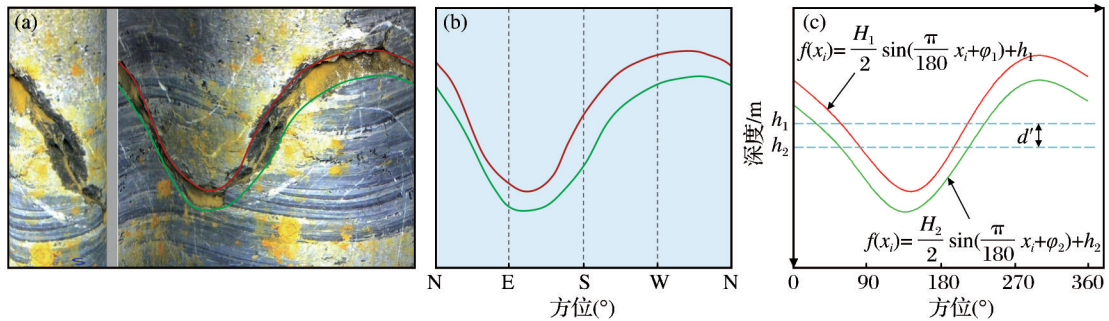
Fig. 1 Schematic diagram of the working principle of borehole television technology for acquiring borehole wall characteristics

2 岩体结构面识别及参数提取

在工程地质勘察中,通常采用钻孔的方式获取地下岩土体岩性、结构及质量等特征,通常竖向钻孔会与岩体结构面相交。一般情况下,根据结构面与水平面的空间位置关系,可将结构面划分为水平结构面、倾斜结构面和竖直结构面,若结构面与竖向钻孔相交,在钻孔孔壁上展现的迹线分别为圆形、椭圆形和直线。如图1所示,孔内电视技术可获取竖向钻孔孔壁图像,并形成孔壁展开图,在二维平面内展示钻孔孔壁上的结构面迹线特征。

在实际过程中,以倾斜结构面居多,其在孔壁展开图上表现为一条类似正弦曲线的迹线。如图3所示,获取结构面上、下边缘的轮廓曲线,假定该结构面在局部空间范围内呈现平面状态,则该结构面上、下边缘在孔壁展开图中的形态特征可用正弦曲线进行拟合,其数学表达式见式(1)。结构面所在平面与水平面的夹角为倾角,由式(2)计算可得。

所拟合正弦曲线最低点对应的横坐标为该结构面的倾向值,由式(3)计算可得。所拟合正弦曲线中部位置对应的纵坐标为该结构面所处深度。准确获取结构面的边缘信息后,形成结构面上、下边缘的轮廓曲线,视张开度为上、下边缘在纵坐标方向上的间距,张开度可由视张开度与结构面倾角通过式(4)计算得到。



(a)孔壁影像;(b)结构面轮廓提取;(c)结构面正弦曲线拟合

图2 结构面边缘识别及特征参数分析

Fig. 2 Edge detection and characteristic parameter analysis of structural planes

$$\begin{cases} f_1(x_i) = \frac{H_1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{180} x_i + \varphi_1\right) + h_1 \\ f_2(x_i) = \frac{H_2}{2} \sin\left(\frac{\pi}{180} x_i + \varphi_2\right) + h_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \\ \alpha_1 = \begin{cases} \varphi_1 + 270^\circ, & (0^\circ < \varphi \leq 90^\circ) \\ \varphi_1 - 90^\circ, & (90^\circ < \varphi \leq 360^\circ) \end{cases} \\ \alpha_2 = \begin{cases} \varphi_2 + 270^\circ, & (0^\circ < \varphi \leq 90^\circ) \\ \varphi_2 - 90^\circ, & (90^\circ < \varphi \leq 360^\circ) \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \beta = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \\ \beta_1 = \arctan \frac{H_1}{D} \\ \beta_2 = \arctan \frac{H_2}{D} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} d' = |h_2 - h_1| \\ d = d' \cos \beta \end{cases} \quad (4)$$

式中: H 、 φ 和 h 为所拟合正弦曲线的期望参数,其中 h 可表示结构面所处位置深度; α 为结构面的倾向; β 为结构面的倾角; D 为钻孔直径; d' 为结构面视张开度,通过结构面上下面所拟合正弦曲线的参数 h_1 和 h_2 计算得到; d 为结构面张开度。

3 岩体质量特征分析

3.1 岩体质量影响因素

我国现行国家标准《工程岩体分级标准》(GB50218-2014)(中华人民共和国住房和城乡建设部,2015)建立了多维度的岩体质量评价体系,基于力学特性和结构特征2个维度构建分级框架,采用定性分析与定量评价相结合的方法实现工程岩体基本质量分级。在岩石坚硬程度评价方面,依据锤击声特征及浸水后的物理反应将岩石坚硬程度定性划分为5个等级,将岩石单轴饱和抗压强度(R_c)作为定量评价指标,其与定性分级体系的对应关系见表1。针对岩体完整程度评价,依据结构面发育程度、结合程度、结构面类型及结构类型等定性划分为5个等级,同时引入岩体完整性指数(K_v)作为量化分析参数,具体对应关系见表1。岩体基本质量分级则依据岩体坚硬程度定性描述和岩体基本质量指标 BQ 定量计算相结合的方法,将岩体基本质量划分为5个等级,详见表2。可见,岩体质量是由岩石物理力学特性、结构面空间分布等多因素耦合作用的复杂系统,其中结构面作为关键控制要素,通过控制岩体体积节理数量、岩体完整程度

表1 R_c 与岩石坚硬程度的对应关系以及 K_v 与岩体完整程度的对应关系

Table 1 Correspondence between R_c and rock hardness classification and between K_v and rock mass integrity

等级	R_c /MPa	岩石坚硬度	K_v	岩石完整度
1	>60	坚硬岩	>0.75	完整
2	60~30	较坚硬岩	0.75~0.55	较完整
3	30~15	较软岩	0.55~0.35	较破碎
4	15~5	软岩	0.35~0.15	破碎
5	≤5	极软岩	≤0.15	极破碎

表2 岩体基本质量分级

Table 2 Basic quality classification of rock mass

岩体基本质量级别	岩体基本质量的定性特征	岩体基本质量指标(BQ)
I	坚硬岩, 岩体完整	>550
II	坚硬岩, 岩体较完整; 较坚硬岩, 岩体完整	550~451
III	坚硬岩, 岩体较破碎; 较坚硬岩, 岩体较完整; 较软岩, 岩体完整	450~351
IV	坚硬岩, 岩体破碎; 较坚硬岩, 岩体较完整—破碎; 较软岩, 岩体较完整—较破碎; 软岩, 岩体完整—较完整	350~251
V	坚硬岩, 岩体破碎; 较坚硬岩, 岩体较破碎—破碎; 全部极软岩及全部极破碎岩	≤250

定性划分,进而影响岩体质量指标和岩体基本质量分级。

3.2 岩石质量指标

岩石质量指标(RQD)通过特定的钻探采样方式来量化表征岩石质量,是目前常用的岩石质量评价指标,其在实际工程应用中较为便捷,但也可能存在一定局限性。具体分析如下:

(1)人为误差。 RQD 的计算依赖技术人员对岩芯完整段的识别,不同经验的技术人员对“完整段”的判断存在偏差,且在人工测量岩芯长度时,可能存在精度或读数误差。

(2)机械扰动影响。钻探过程中可能造成岩芯二次破裂,取芯过程中岩芯卡断、掉落或碰撞均可能导致完整段岩芯进一步破碎,导致 RQD 值低于原位岩体真实值。

(3)钻探工艺影响。钻孔直径和取芯方式等均会影响岩芯完整性和采取率,进而影响其 RQD 值。

(4)结构面充填特征的影响。结构面的充填物状态直接影响岩芯的完整特征及 RQD 值的准确获取,如岩芯未在充填胶结性物质的结构面处断开,但胶结性充填物与原岩体强度特性存在差异,影响对岩体质量的判断。

(5)人为搬运、存储不当或其他意外因素造成的岩芯破碎,同样会使 RQD 值偏离真实岩体质量状况。

3.3 基于孔壁影像的岩体质量特征及指标

钻孔全景数字成像技术通过对保存有地质特征的钻孔孔壁进行高精度探测,实现了岩体结构特征的三维可视化重构和结构面几何参数的定量解析。该技术突破传统勘察方法的局限,不仅完成全孔段地质信息的数字化建模,而且构建了钻孔地质信息三维数据库,为岩体结构完整性多尺度评估提供数据支撑。成像数据中地层界面、节理网络和构造破碎带等地质要素具有毫米级辨识度,其原位表征精度显著优于钻孔岩芯资料,有效规避取芯过程中的人为干扰和机械扰动,为工程地质勘察提供了原位高精度测试的解决方案。

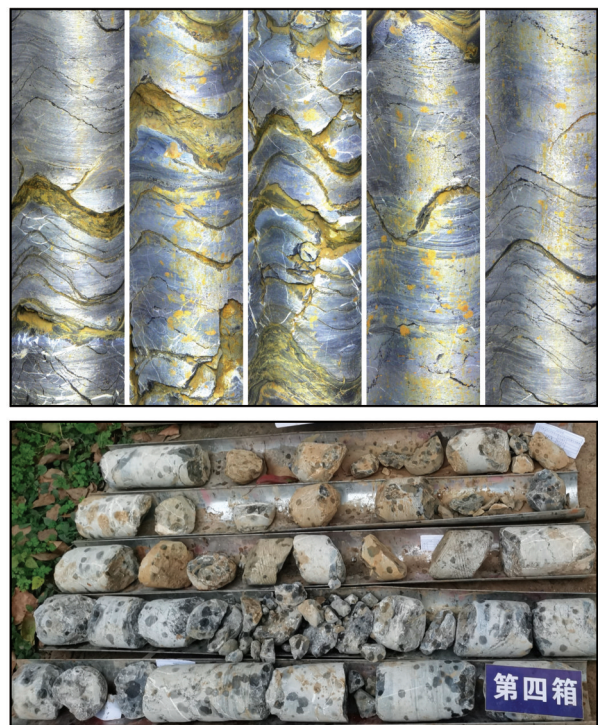


图3 某钻孔15~20 m区段孔壁影像及岩芯照片
Fig. 3 Borehole wall images and core photos from the 15~20 m section of a borehole

在传统岩石质量指标(*RQD*)理论上,提出基于数字钻孔摄像技术的孔壁岩体质量指标(Wall Rock Quality Designation, *WRQD*)。该指标通过以下方法实现岩体完整性的定量化表征:首先在钻孔孔壁影像中选定长度区段(区段总长度可根据摄像数据质量、地质分层及工程需求等确定),随后计算该区段内大于10 cm的完整孔壁累计长度与选定区段总长度的百分比值,是一种定量描述。在实际应用中可按照以下流程和方法得到:

(1)根据需求在钻探结束后进行孔内电视测试,获取质量可靠的孔壁影像数据;

(2)基于孔壁影像进行裂隙和破碎带界面等结构面的边缘信息识别及参数提取,形成数据库;

(3)根据地层及工程需求对钻孔影像分段,根据式(6)计算每一段的*WRQD*值;

(4)依据*WRQD*值进行岩体破碎特征和岩体质量特征分析。

$$WRQD = \frac{L - \sum L_1 - \sum L_2 - \sum d'}{L} \times 100\% \quad (6)$$

式中:*L*为分段总长度; $\sum L_1$ 为该分段区间内破碎段长度总和; $\sum L_2$ 为该分段区间内小于10 cm岩块长度总和; $\sum d'$ 为该分段区间内所有结构面视张开度总和。

目前,孔内电视技术在工程勘察领域的应用较为成熟,设备精度可满足测试需求,且能够根据不同钻孔孔径选择不同规格的探头而获取孔壁影像数据。利用孔壁岩体质量指标(*WRQD*)进行岩体质量分析时,对测试环境和岩性的要求如下:

(1)对测试环境的要求较高,包括钻孔成孔后孔内无水或孔内水质清澈、测试地区为无磁环境,以便获取完整、准确的孔壁影像数据,是获取*WRQD*数据并进行岩体质量分析的基础。

(2)目前该技术适用于岩质地层,对于土层及松散地层,由于洗孔时容易造成堵孔和塌孔,不利于数据采集。

4 工程实例分析

4.1 数据来源

依托实际工程项目,在钻探完成后对钻孔进行

精细防护和清洗,利用孔内电视技术采集了4个钻孔的孔壁影像数据。其中,钻孔ZK-1和ZK-2为工点1处的钻孔,岩性主要为砂岩和砂质泥岩;钻孔ZK-3和ZK-3为工点2处的2个钻孔。2处实验场地区均有粉质黏土覆盖层,为保证孔内电视测试顺利进行,均进行了套管护壁,且4个钻孔底部均有部分钻渣沉淀,故ZK-1~ZK-4钻孔的孔内电视有效测试深度分别为64.3,70.1,14.9,14.1 m。各测试钻孔信息详见表3。

表3 试验钻孔信息

Table 3 Test borehole information

钻孔编号	岩性	有效测试深度/m
ZK-1	砂岩、砂质泥岩	64.3
ZK-2	砂岩、砂质泥岩	70.1
ZK-3	花岗岩	14.9
ZK-4	花岗岩	14.1

4.2 结构面数据获取

对4个钻孔孔壁影像数据进行分析和解译,识别结构面特征和位置,计算机构面的产状参数,其中ZK-1钻孔共识别149条结构面,ZK-2钻孔共识别176条结构面,ZK-3钻孔共识别73条结构面,ZK-4钻孔共识别51条结构面。各钻孔结构面产状特征如图4所示,各钻孔结构面沿深度方向的分布情况如图5所示。统计显示,ZK-1和ZK-2钻孔的结构面产状近水平,产状优势方向较为明显;ZK-1钻孔结构面的倾向集中于30°~80°,倾角以5°~20°为主,结构面走向为280°~290°;ZK-2钻孔结构面的倾向集中于280°~320°,倾角以12°~25°为主,结构面走向为40°~50°;ZK-3和ZK-4钻孔的结构面倾角较大,ZK-3钻孔结构面的倾向集中于130°~150°,倾角以45°~65°为主,结构面走向为40°~60°;ZK-4钻孔结构面的倾向集中于100°~110°和140°~160°,倾角以60°~75°为主,结构面走向为0°~10°和70°~80°。

4.3 岩体质量特征分析

本研究以1 m为一个区段对孔壁影像数据进行划分,结合识别的结构面位置和结构面张开度等数据,根据式(5)计算每个钻孔的*WRQD*值;结合现场钻探数据及钻孔岩芯照片数据,统计得到各钻孔对应的每米岩性的*RQD*值,如图6所示。

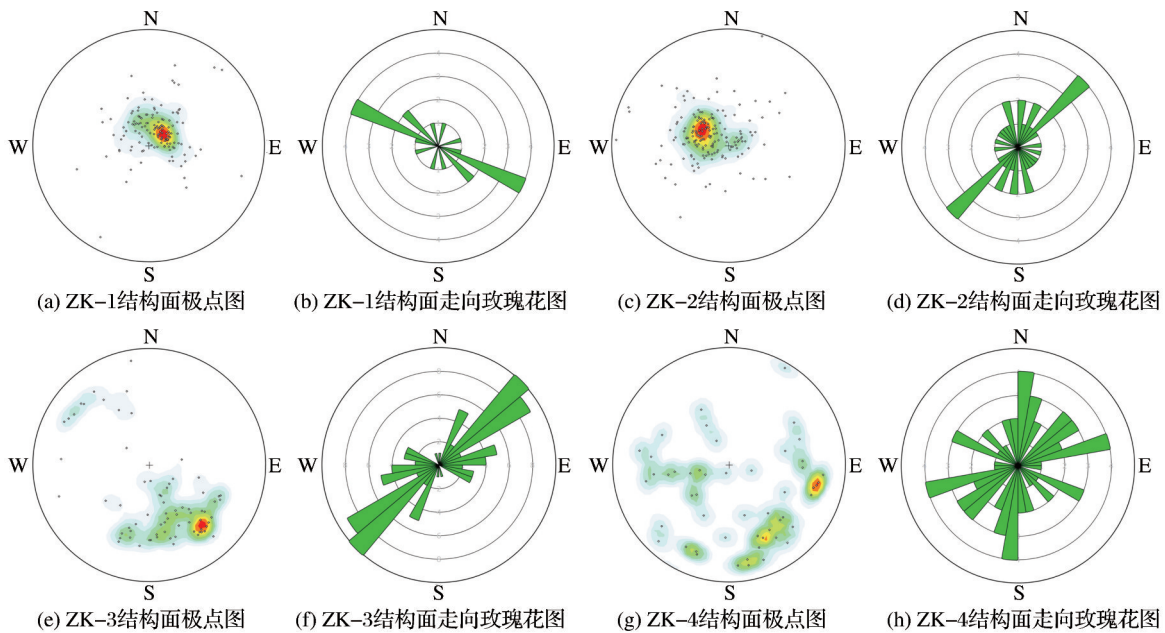


图4 结构面产状特征图

Fig. 4 Occurrence characteristics diagram of structural planes

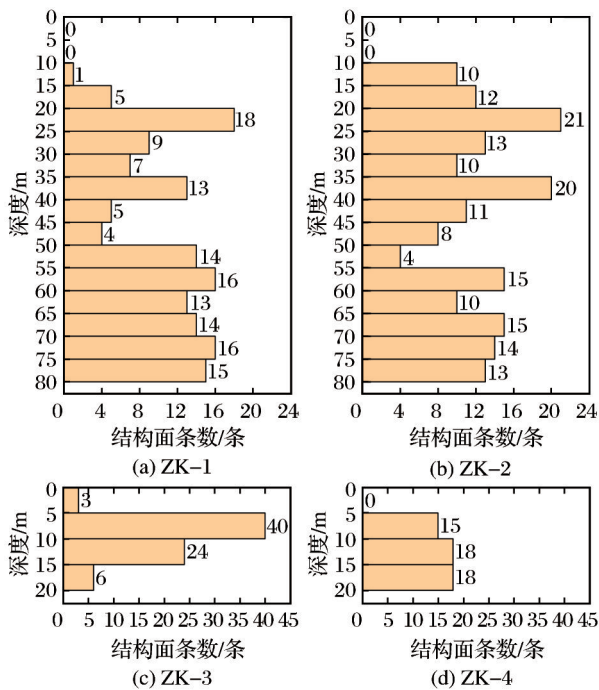


图5 结构面沿深度方向分布图

Fig. 5 Distribution diagram of structural planes along depth direction

根据统计分析结果, $WRQD$ 值和 RQD 值的变化趋势具有相关性, $WRQD$ 值可反映岩体质量特征, 且 $WRQD$ 值通常较 RQD 值大, 但局部也出现了

$WRQD$ 值小于 RQD 值的情况。具体分析如下:

(1) 钻探过程中存在机械扰动等影响, 在钻进和取芯过程中均会导致岩芯断裂, 而在孔壁影像中岩体完整, 无结构面基破碎带等特征, 故 $WRQD$ 值较 RQD 值大, 如图7(a)所示。

(2) 岩体中存在闭合结构面, 若该类结构面裂隙颜色与周边岩体颜色有差异, 一般通过孔壁影像可准确识别; 若该类结构面张开度为0, 且与周围岩体在颜色上无明显差异, 则通过孔壁影像识别较困难, 但在取芯过程中可对该类结构面造成扰动, 岩芯呈断开状态, 故导致 $WRQD$ 值较 RQD 值大, 如图7(b)所示。

(3) 结构面在孔壁影像中清晰可见, 但该结构面为充填张开型结构面, 且结构面内充填物胶结较好, 结构面及临近岩体为一整体, 钻探过程的扰动未破坏岩体及结构面的完整性, 其岩芯表现完整, 导致局部 $WRQD$ 值小于 RQD 值, 如图7(c)和图7(d)所示。

ZK-1 和 ZK-2 钻孔揭示的地层为砂岩与泥质砂岩互层, 根据试验结果, 砂岩和砂质泥岩的饱和抗压强度分别为 42.92 MPa 和 22.88 MPa, 由表1可判断砂岩为较坚硬岩、砂质泥岩为较软岩。图6(a)和图6(b)显示, 砂岩区段 $WRQD$ 值与 RQD 值较为

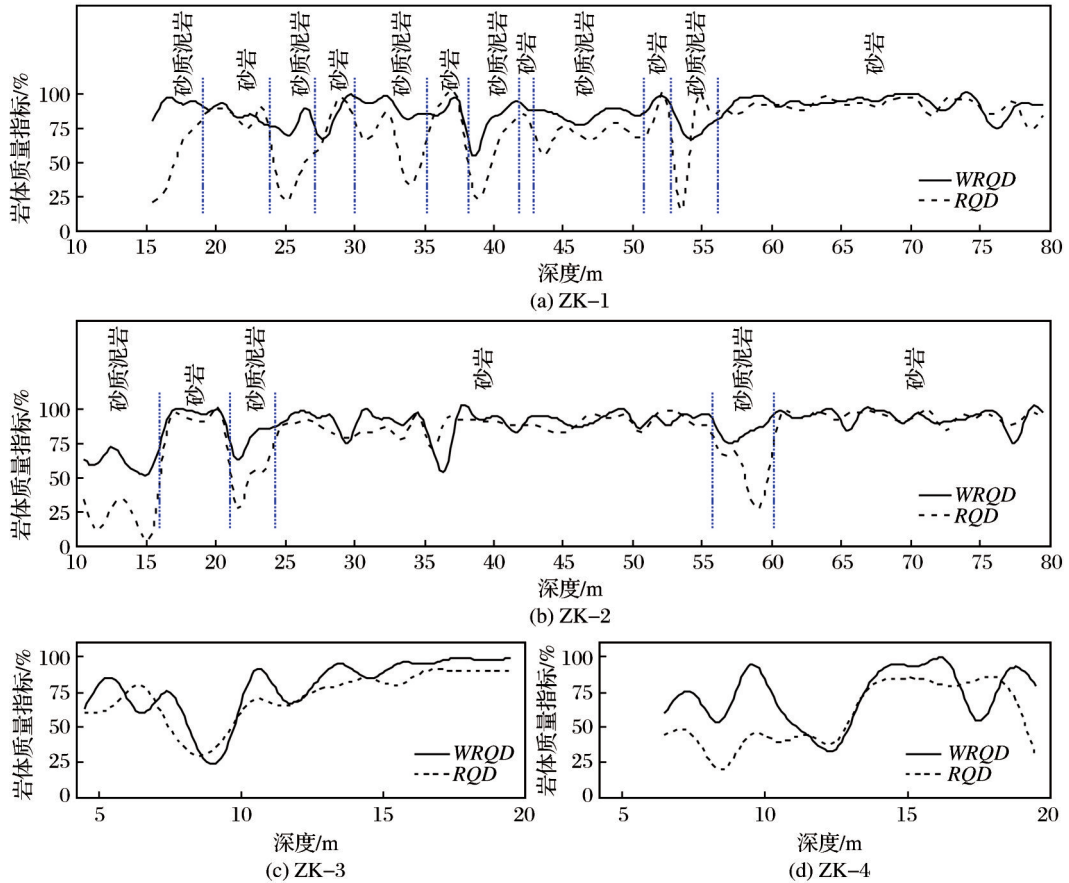


图6 钻孔岩芯RQD值和孔壁影像WRQD值随钻孔深度变化曲线

Fig. 6 Curves of drill hole core RQD values and borehole wall image WRQD values varying with drill hole depth

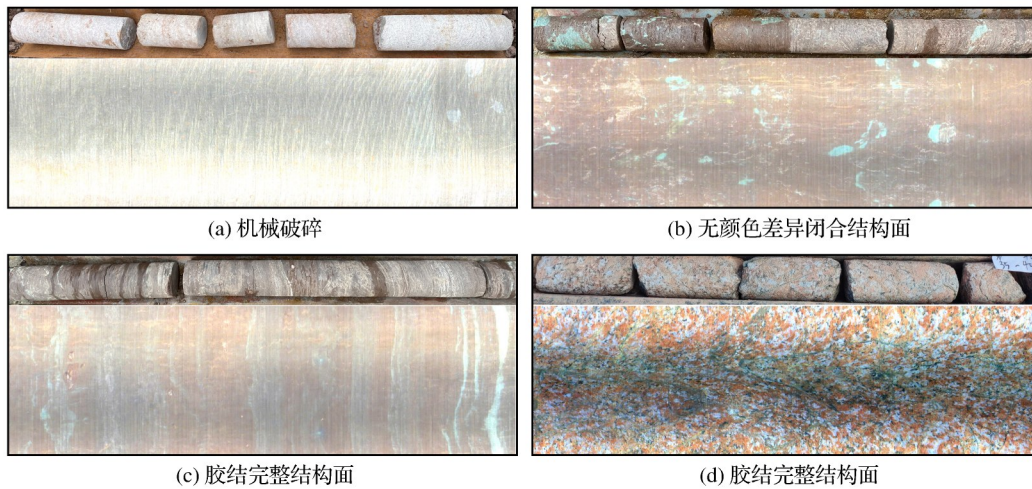


图7 典型孔壁影像与岩芯对比

Fig. 7 Comparison of typical borehole wall image and core sample

接近,而砂质泥岩区段WRQD值与RQD值差别较大。这是因为砂质泥岩为较软岩,钻进过程中由于泥浆的浸润和冲刷、钻头的振动以及取芯过程的扰

动,砂质泥岩岩芯受破坏呈碎裂或碎块状态,而孔壁影像基本展现砂质泥岩原位状态,故砂质泥岩区段WRQD值与RQD值差别较大。

在上述分析的基础上,补充选取灰岩钻孔岩芯及其孔壁影像数据,获取其RQD值和WRQD值,并按照灰岩、砂质泥岩、砂岩和花岗岩等岩性,分别对获取的WRQD值与RQD值进行拟合分析,如图8所示,初步建立了各岩性的RQD值与WRQD值的关系,见表4。由图8和表4可知,总体上RQD值和WRQD值呈非线性正相关关系,且变化趋势明显。其中,WRQD值作为自变量时,关系曲线呈“下凹”形态,当WRQD值小于70%时,RQD值增速略低,当WRQD值大于70%时,RQD值增速较大;RQD值作为自变量时,关系曲线呈“上凸”形态,RQD值小于

60%时,WRQD值增速较大,RQD值大于60%时,WRQD值增速较缓。

对4类岩性的RQD值和WRQD值进行二项式拟合,其拟合优度 R^2 均大于0.83,数据拟合程度较好,但各类岩性之间的拟合优度 R^2 存在差异。这表明各类岩性特有的岩石矿物组成和结构构造等对RQD-WRQD关系具有控制作用,如花岗岩一般具有完整晶质结构表现出较优相关性,而砂质泥岩受层理发育和岩体强度等影响导致其相关数据离散度增大,因此建议在后续研究中可按照岩性分类继续深化探讨分析二者关系。

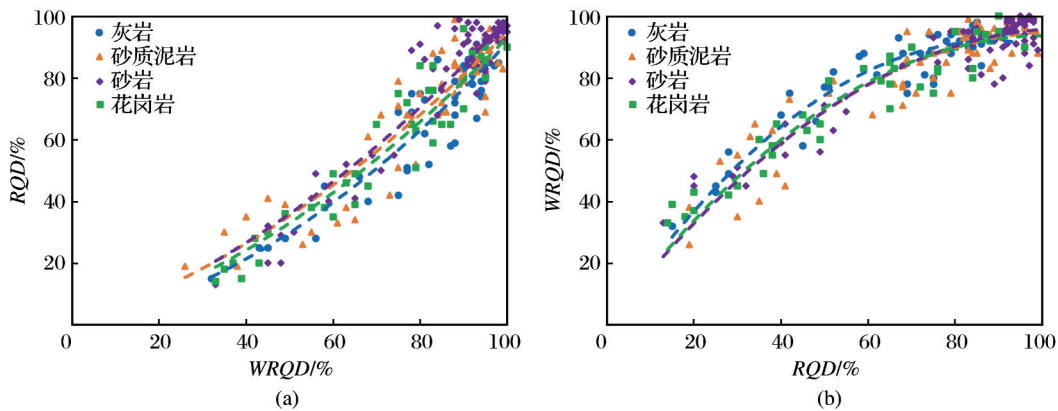


图8 WRQD值与RQD值拟合分析

Fig. 8 Fitting analysis of WRQD values and RQD values

表4 WRQD值与RQD值拟合关系统计

Table 4 Statistics of fitting relationship between WRQD values and RQD values

岩性	WRQD值与RQD值的拟合关系	
灰岩	$RQD=0.0063 WRQD^2+0.2803 WRQD, R^2=0.8393$	$WRQD=-0.0116 RQD^2+2.0681 RQD, R^2=0.8902$
泥质砂岩	$RQD=0.0048 WRQD^2+0.4654 WRQD, R^2=0.8421$	$WRQD=-0.0087 RQD^2+1.8157 RQD, R^2=0.8550$
砂岩	$RQD=0.0054 WRQD^2+0.4482 WRQD, R^2=0.8440$	$WRQD=-0.0085 RQD^2+1.8102 RQD, R^2=0.8940$
花岗岩	$RQD=0.0054 WRQD^2+0.3879 WRQD, R^2=0.9024$	$WRQD=-0.0094 RQD^2+1.8722 RQD, R^2=0.9101$

5 结论

(1)基于孔内电视技术获取孔壁影像数据及其竖向钻孔与结构面的空间关系特征,分析了结构面在孔壁影像中展现的形态特征,得到了产状、深度位置和张开度等结构面关键参数的计算方法。

(2)系统分析了岩体质量指标(RQD)在实际工程应用中存在的局限性及其原因,提出了孔壁岩体质量指标(WRQD)的计算方法,实现了基于孔壁影

像数据进行地下岩体质量特征分析,减少人为误差和机械干扰的目标。

(3)基于实际工程钻孔的孔壁影像数据,实现了对所揭示的地下岩体结构面识别和特征参数计算,得到了地下岩体产状及其分布特征。通过对比分析RQD值与WRQD值的变化特征,发现WRQD值通常大于RQD值,但局部存在相反现象,二者关系与结构面类型、填充物类型、胶结程度及岩性等因素紧密相关。初步建立了灰岩、砂质泥岩、砂岩和

花岗岩的RQD值与WRQD值的关系。本研究为地下岩体质量评估提供了新的视角和方法。

参考文献 (References):

- Bieniawski Z T, 1973. Engineering classification of jointed rock masses[J]. Transactions of the South African Institution of Civil Engineers, 15(15): 335-344.
- Deere D U, Deere D W, 1988. The rock quality designation (RQD) index in practice[M]//Rock classification systems for engineering purposes. Philadelphia: ASTM.
- Dias L O, Bom C R, Faria E L, et al, 2020. Automatic detection of fractures and breakouts patterns in acoustic borehole image logs using fast-region convolutional neural networks [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 191: 107099.
- Hoek E, Marinos P, Benissi M, 1998. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 57(2): 151-160.
- Lovell M A, Williamson G, Harvey P K, 1999. Borehole imaging: applications and cases histories [M]. London: The Geological Society Special Publication.
- 曹云, 李庶林, 林恺帆, 2017. 岩石RQD值计算中岩芯取值问题的探讨[J]. 矿业研究与开发, 37(12): 18-22. Cao Yun, Li Shulin, Lin Kaifan, 2017. Discussion about how to determine the value of rock core during calculating the RQD value of rock mass [J]. Mining Research and Development, 37(12): 18-22.
- 葛云峰, 钟鹏, 唐辉明, 等, 2019. 基于钻孔图像的岩体结构面几何信息智能测量[J]. 岩土力学, 40(11): 4467-4476. Ge Yunfeng, Zhong Peng, Tang Huiming, et al, 2019. Intelligent measurement on geometric information of rock discontinuities based on borehole image [J]. Rock and Soil Mechanics, 40(11): 4467-4476.
- 李虹江, 于昕左, 马佳, 等, 2024. 多源遥感数据融合的高陡边坡危岩体信息提取[J/OL]. 地质科技通报: 1-16. (2024-02-27). <https://link.cnki.net/doi/10.19509/j.cnki.dzqk.tb20230695>. Li Hongjiang, Yu Xinzuo, Ma Jia, et al, 2024. Information extraction of dangerous rock mass on high and steep slopes based on fusion of multi-source remote sensing data [J/OL]. Bulletin of Geological Science and Technology: 1-16. (2024-02-27). <https://link.cnki.net/doi/10.19509/j.cnki.dzqk.tb20230695>.
- 李杰林, 白德威, 杨承业, 等, 2022. 基于三维激光扫描点云数据的地下巷道岩体结构面识别及稳定性分析[J]. 黄金科学技术, 30(3): 343-351. Li Jielin, Bai Dewei, Yang Chengye, et al, 2022. Recognition and stability analysis of underground tunnel rock mass structural plane based on 3D laser scanning point cloud data [J]. Gold Science and Technology, 30(3): 343-351.
- 李炜, 刘耕, 葛云峰, 等, 2024. 基于深度学习的钻孔图像岩体结构面识别[J]. 应用基础与工程科学学报, 32(3): 702-720. Li Wei, Liu Geng, Ge Yunfeng, et al, 2024. Detection of rock discontinuities in borehole images based on a deep learning method [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 32(3): 702-720.
- 李炜, 张占荣, 黄国良, 等, 2023. 基于钻孔多属性测试的地下岩体质量评价[J]. 工程地球物理学报, 20(1): 63-71. Li Wei, Zhang Zhanrong, Huang Guoliang, et al, 2023. Quality evaluation of the underground rock mass quality based on borehole multi-attribute test [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 20(1): 63-71.
- 宋战平, 杨子凡, 张玉伟, 等, 2025. 深度学习在隧道与地下工程中的应用现状及展望[J]. 隧道建设(中英文), 45(2): 221-255. Song Zhanping, Yang Zifan, Zhang Yuwei, et al, 2025. Application status and prospects of deep learning in tunnels and underground engineering [J]. Tunnel Construction, 45(2): 221-255.
- 孙红林, 李炜, 张占荣, 等, 2023. 基于孔内多属性测试的地下岩土工程地质信息评价研究[J]. 安全与环境工程, 30(4): 62-69, 77. Sun Honglin, Li Wei, Zhang Zhanrong, et al, 2023. Research on evaluation of engineering geological information of underground rock and soil masses based on multi-attribute test in holes [J]. Safety and Environmental Engineering, 30(4): 62-69, 77.
- 汤克轩, 赵吉祥, 刘栋臣, 等, 2025. 钻孔电视在水库枢纽工程勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 22(1): 31-40. Tang Kexuan, Zhao Jixiang, Liu Dongchen, et al, 2025. Application of borehole TV in the exploration of water conservancy project [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 22(1): 31-40.
- 王益腾, 王川婴, 邹先坚, 等, 2020. 基于钻孔摄像技术的孔壁剖面线形貌特征描述方法及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 39(增刊2): 3412-3420. Wang Yiteng, Wang Chuanying, Zou Xianjian, et al, 2020. Study on the morphology description method of borehole wall profile line and its application based on borehole camera technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineer-

- ing, 39(Suppl.2): 3412-3420.
- 吴金, 吴顺川, 王焘, 等, 2024. 基于深度学习的复杂地层钻孔图像岩体结构面识别方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 64(7): 1136-1146. Wu Jin, Wu Shunchuan, Wang Tao, et al., 2024. Deep learning-based method for rock discontinuity recognition in complex stratum borehole images [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 64(7): 1136-1146.
- 杨成龙, 侯慧娟, 2024. 基于无人机倾斜摄影技术和三维点云技术的碎裂松动岩体结构面识别研究[J]. 水利与建筑工程学报, 22(5): 24-29. Yang Chenglong, Gou Huijuan, 2024. Identification of fractured loose rock mass structural surfaces based on UAV oblique photography and 3D point cloud technology [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 22(5): 24-29.
- 杨光辉, 毛慧龙, 2010. 岩石质量指标(RQD)应用中存在问题的商榷[J]. 工程勘察, 38(增刊1): 158-160. Yang Guanghui, Mao Huilong, 2010. Discussion on the problems in the application of rock quality designation (RQD) [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 38(Suppl.1): 158-160.
- 张浩, 卿黎, 邱士利, 等, 2023. 三维激光扫描在隧洞围岩结构信息获取中的应用研究[J]. 黄金科学技术, 31(2): 313-322. Zhang Hao, Qing Li, Qiu Shili, et al., 2023. Application of three-dimensional laser scanning in extracting rock mass structure information of tunnel [J]. Gold Science and Technology, 31(2): 313-322.
- 赵晓明, 李想, 李杰林, 等, 2023. 巷道岩体结构面“人工+半自动”识别方法及应用研究[J]. 黄金科学技术, 31(5): 773-784. Zhao Xiaoming, Li Xiang, Li Jielin, et al., 2023. Research on “Manual+Semi-automatic” identification method and application of roadway rock mass structural plane [J]. Gold Science and Technology, 31(5): 773-784.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2015. 工程岩体分级标准 GB/T 50218-2014[S]. 北京: 中国计划出版社. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2015. Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218-2014 [S]. Beijing: China Planning Press.
- 朱合华, 潘柄屹, 武威, 等, 2023. 岩体结构面信息采集及识别方法研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报, 31(6): 1339-1360. Zhu Hehua, Pan Bingyi, Wu Wei, et al., 2023. Review on collection and extraction methods of rock mass discontinuity information [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 31(6): 1339-1360.

Identification of Rock Mass Structural Planes and Analysis of Rock Mass Quality Characteristics Based on Borehole-wall Images

LI Wei, ZHANG Zhanrong, LI Shiliang

China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China

Abstract: In the field of geotechnical engineering, the characteristic parameters of rock mass structural planes are pivotal for the classification and quality assessment of engineering rock masses, with direct implications for project safety and stability. Traditional methods, such as field measurements and core sampling from drillings, are commonly utilized to determine the structural plane parameters necessary for evaluating rock mass quality. However, these conventional techniques are constrained by limitations, including substantial errors and vulnerability to external interferences, rendering them inadequate for the demands of detailed geological investigations. In contrast, borehole televiewer technology offers significant advantages in capturing the in-situ structural characteristics of borehole walls in underground rock masses. This technology is characterized by high precision and minimal error rates, thereby providing innovative solutions for the accurate identification of structural planes, parameter acquisition, and comprehensive evaluation of rock mass quality. This study developed algorithms to accurately and efficiently determine key structural plane parameters—such as orientation characteristics, depth positions, and aperture—by analyzing spatial geometric features and planar characteristics derived from borehole wall image data obtained via borehole televiewer technology. The research critiques the

limitations of the Rock Quality Designation (*RQD*) in engineering applications and integrates structural plane feature data from borehole wall images to propose the concept and calculation method of the Wall Rock Quality Designation (*WRQD*). This approach aims to reduce human interference and mechanical disturbances in rock mass quality evaluation. Through engineering case studies, the distribution characteristics of structural plane occurrences in underground rock masses, as revealed by boreholes, were analyzed. Additionally, the variation features of *RQD* and *WRQD* across boreholes were investigated. The results indicate that *WRQD* values generally exceed *RQD* values, although localized instances were observed where *WRQD* values were lower than *RQD*. The interrelationship between the *RQD* value and the *WRQD* value is intricately associated with factors such as the types of structural planes, properties of filling materials, degree of cementation, lithology, and mechanical disturbances encountered during drilling. Utilizing empirical engineering data, an initial correlation between the *RQD* and *WRQD* values for limestone, sandy mudstone, sandstone, and granite was established, with correlation coefficients (R^2) exceeding 0.83, indicating a strong fit of the data. This finding substantiates the reliability of *WRQD* as a basis for evaluating rock mass quality. The study has enhanced precise identification methods for rock mass structural planes and developed analytical approaches for quality characterization through borehole wall imaging. These advancements offer innovative methodologies for the detection and evaluation of underground rock masses, thereby contributing to the progress of research and practical applications in detailed engineering geological investigations.

Key words: geotechnical engineering; borehole televiewer; borehole wall image; structural planes; attitude; rock mass quality

2025年上半年,全国新发现矿产地38处

2025年上半年,全国新发现矿产地38处,同比增长逾三成,其中铀、铷、金、钴、锰等战略性金属找矿实现重大突破,新发现一批大型特大超大型矿产地。

据自然资源部新一轮找矿突破战略行动办公室7月10日发布数据,这些新发现包括在黑龙江省发现全省首个特大型铀矿;在河北省兴隆县,新增铷资源量337万t,达到特大型规模,进一步巩固我国铷矿优势地位;在河北省隆化县,新增钴资源量2.7万t,达到大型规模;在贵州省松桃苗族自治县,新增锰资源量2 285万t,达到大型规模;在新疆特克斯县,新增金资源量81 t,累计查明近百吨,达到超大型规模。

在公众较为熟悉的铀、金、钴、锰之外,铷是一

种稀有金属元素,广泛应用于航空航天、国防军工、信息技术、生物医药、新能源等高新技术领域。铷的熔点、沸点都较低,这一特性有可能把热能直接变为电能。

经初步统计,上半年全国非油气矿产勘查投入资金69.93亿元,同比增长23.9%。其中,社会资金33.59亿元,同比增长28.2%,占矿产勘查总投入的48.0%,表明企业投入矿产勘查的积极性不断增强;中央和地方财政资金36.34亿元,同比增长20.1%。从矿种来看,锡、铝土、钨、铜、磷等矿种勘查投入同比增长50%以上。2025年以来,自然资源部门进一步加大探矿权供给,上半年战略性矿产探矿权投放318个。

(来源:新华社)