

砂化白云岩隧洞砂化等级的随钻识别模型与应用

董家兴¹, 杨吉¹, 赵永川², 王志荣³, 白锐⁴, 李建国², 米健², 王益仙⁵

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021;
3. 云南省滇中引水建设管理局 玉溪分局, 云南 玉溪 653100; 4. 云南省滇中引水工程有限公司, 云南 昆明 650000;
5. 云南秀川水利水电勘察设计有限公司, 云南 昆明 650021)

摘要: 准确识别砂化等级是砂化白云岩隧洞施工灾害防控的关键抓手, 然而, 现有砂化等级划分方法与超前地质预报尚不能有效结合, 一定程度上削弱了超前水平钻成果在灾害防控中的作用。以灾害案例分析为基础, 开展6种典型工况下钻头破岩的 ABAQUS 数值模拟, 从钻进位移和实时钻进速度两方面对相应岩层的钻进结果进行分析, 并进行现场钻进试验, 分析不同砂化等级围岩的钻进速度频率分布特征, 构建并验证了基于钻进速度的砂化等级预测模型。研究结果表明: (1) 砂化白云岩钻进速度随砂化等级提高而增大, 钻进速度作为白云岩砂化等级预测指标是合理可行的; (2) 基于434组实际超前水平钻钻进速度的统计分析, 弱砂化白云岩钻进速度出现在2.33~5 mm/s 范围的概率为92.47%, 强烈砂化白云岩钻进速度出现在3.33~6.67 mm/s 范围的概率为87.18%, 剧烈砂化白云岩钻进速度出现在4.17~9.17 mm/s 范围的概率为90.74%, 均呈现正态分布; (3) 将构建的砂化等级预测模型应用于滇中引水工程, 识别结果与实际砂化等级吻合度高。研究成果直接推动超前水平钻成果应用于砂化等级预测与识别, 进而指导砂化白云岩隧洞灾害防控。

关键词: 隧道工程; 砂化白云岩; 超前钻探; 钻进速度; 砂化等级预测

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)03-0572-12

Modeling and application of while drilling identification of sandification grade in sandy dolomite tunnels

DONG Jiaying¹, YANG Ji¹, ZHAO Yongchuan², WANG Zhirong³, BAI Rui⁴, LI Jianguo²,
MI Jian², WANG Yixian⁵

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China;
2. Yunnan Institute of Water and Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming, Yunnan 650021, China;
3. Yuxi Branch Bureau, Yunnan Central Yunnan Water Diversion Construction Management Bureau, Yuxi, Yunnan 653100, China;
4. Central Yunnan Water Diversion Construction Administration Bureau, Kunming, Yunnan 650000, China; 5. Yunnan Xiu
Chuan Water and Hydropower Engineering Investigate Design Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650021, China)

Abstract: Accurate identification of sandification grades is crucial for disaster prevention and control in sandy dolomite tunnels. However, the existing sandification grade classification methods cannot be effectively combined

收稿日期: 2024-07-05; **修回日期:** 2024-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42162026); 云南省重大科技专项计划(202002AF080003); 云南省应用基础研究计划(202201AT070083)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 42162026), Major Science and Technology Special Plan of Yunnan Province(Grant No. 202002AF080003) and Applied Basic Research of Yunnan Province(Grant No. 202201AT070083)

作者简介: 董家兴(1986-), 男, 2014年毕业于中国地质大学地质工程专业获博士学位, 现任副教授、硕士生导师, 主要从事隧道(洞)及边坡工程地质与地质灾害等方面的教学与研究工作。E-mail: djx-djx001@163.com。通讯作者: 米健(1982-), 男, 硕士, 现任正高级工程师。E-mail: 34870195@qq.com

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0528

with advanced geological prediction, which weakens the role of advanced horizontal drilling results in disaster prevention and control to a certain extent. Based on the analysis of disaster cases, the rock breaking of bit numerical simulation under six typical working conditions was conducted by the ABAQUS. The drilling results of the corresponding rock strata were analyzed from two aspects of drilling displacement and real-time drilling speed, and the field drilling test was carried out. The frequency distribution characteristics of the drilling speed of the surrounding rock with different sandification grades were analyzed. Furthermore, a prediction model of sandification grade based on drilling speed was constructed and verified. The results show that: (1) The drilling speed of sandy dolomite increases with the increase of sandification grade, and it is reasonable and feasible to use drilling speed as a prediction index of dolomite sandification grade. (2) Based on the statistical analysis of 434 groups of actual advanced horizontal drilling speed, the likelihood of drilling speed in the range of 2.33 – 5 mm/s in weak sandy dolomite is 92.47%, the possibility of drilling speed in the range of 3.33 – 6.67 mm/s in severe sandy dolomite is 87.18%, and the possibility of drilling speed in the range of 4.17 – 9.17 mm/s in complete sandy dolomite is 90.74%, all of which show normal distribution. (3) The prediction model of sandification grade is applied to the Water Diversion Project in Central Yunnan, and the identification results are consistent with the actual sandification grade. The research results directly promote the application of advanced horizontal drilling results to the prediction and identification of sandification grade and guide the disaster prevention and control of sandy dolomite tunnels.

Key words: tunnel engineering; sandy dolomite; advanced drilling; drilling velocity; sandification grade prediction

1 引言

成昆铁路复线、滇中引水工程、文蒙铁路等西南地区重大工程的隧道(洞), 均遭遇或面临砂化白云岩问题, 上述工程在施工期易发频发塌方、突水涌砂等灾害。工程实践和研究表明, 强烈砂化、剧烈砂化洞段是施工地质灾害发生的主要场所, 砂化等级、地下水条件是灾害孕育的关键地质因素。因此, 施工过程中的砂化等级预测与识别是灾害防控的关键。超前水平钻作为超前地质预报的主要手段, 可见, 基于该手段获得的数据, 识别和预测砂化等级, 是砂化白云岩地下工程灾害防控的重要抓手。

快速、准确地了解地下工程的地质特征对地下工程的施工安全具有重要意义。为了更加简便快捷的识别地质特征, 许多学者从取芯, 探测、钻孔成像以及随钻探测等方面开展了大量研究。J. Tian 等^[1]设计了一种新型取芯钻头, 在钻进过程中, 一些小的岩芯从钻头底部小孔中滑落, 从而根据这些小岩芯识别岩层特征。M. B. Valentin 等^[2]提出了用钻孔成像预测岩层的孔隙度, 效果明显。而在随钻参数识别岩性方面, 诸多专家学者从不同角度进行了研究, O. Oloruntobi 和 S. Butt^[3]使用钻进参数计算得到钻进比功, 并根据钻进比功的变化趋势对岩层类

型进行了识别。Z. Li 等^[4]将 Laplacian 支持向量机和 K-means 聚类法相结合, 改进了对岩层类型的识别效果。谭卓英等^[5]以钻进比功为指标, 建立聚类判别准则, 从而实现了对地层实时识别。此外, Kernel Fisher 判别分析也是一种有效的岩层类型识别方法^[6]。

随钻参数也能较好的反应岩层的整体情况, 许多学者研究认为钻速是反应岩层特征的重要指标之一, 并分析了在地层识别方面的意义^[7-12]。马念杰等^[13]通过研制的顶板岩层探测仪采集探测数据, 并利用小波分析和 BP 神经网络动态地对岩层结构进行识别, 有效减少了事故发生。刘灿灿^[14]用 ANSYS 模拟与现场试验结合分析了不同岩层中随钻参数的动态响应特征, 并结合模型试验, 以钻速和声压级为指标识别不同岩层类型和岩层界面, 识别效果良好。刘少伟等^[15]通过数值模拟手段发现了应力状态对钻进速度影响不大, 并通过回弹次数、正面积和负面积等参数对不同岩层进行了识别。Y. Yang 等^[16]通过有限元模拟出不同三维钻头冲击钻进岩石的物理模型, 分析不同荷载作用下钻头的有效性和钻进速度的变化规律。综上, 通过数值模拟结合模型试验或现场试验, 得到的钻进速度均能较好地对应岩层进行识别。

随着越来越多的工程遭遇砂化白云岩这一特殊岩体, 施工面临的挑战也急剧上升, 因此, 许多学

者从不同方面开展了深入研究。目前国内外砂化白云岩的研究主要集中于砂化白云岩物理力学特性、成因机制、砂化等级划分及围岩分类、致灾机制、灾害处置等方面^[17-27]。董家兴等^[28]将颜色、锤击声、易碎程度等定性指标与纵波波速、回弹指标等定量指标相结合,构建了白云岩砂化等级划分标准,将白云岩砂化等级划分微砂化、弱砂化、强烈砂化、剧烈砂化。然而,上述砂化等级划分方法与超前地质预报尚不能有效结合,一定程度上削弱了超前水平钻成果在灾害防控中的作用,因此亟待开展相关研究。

本文以滇中引水工程玉溪段输水隧洞为依托,以灾害案例分析为基础,开展了弱砂化、强烈砂化、剧烈砂化、弱夹剧烈砂化条带、强烈夹弱砂化、剧烈夹弱砂化等 6 种工况下钻头破岩的数值模拟,探究了钻进速度与不同砂化等级白云岩岩层的关系。并统计分析了 434 组现场超前水平钻不同砂化等级白云岩的钻进速度,分析了不同砂化等级围岩钻进速度的频率分布特征,构建并验证了基于钻进速度的砂化等级预测模型,为现场快速准确识别白云岩的砂化等级提供一种手段,为灾害防控提供了重要依据。

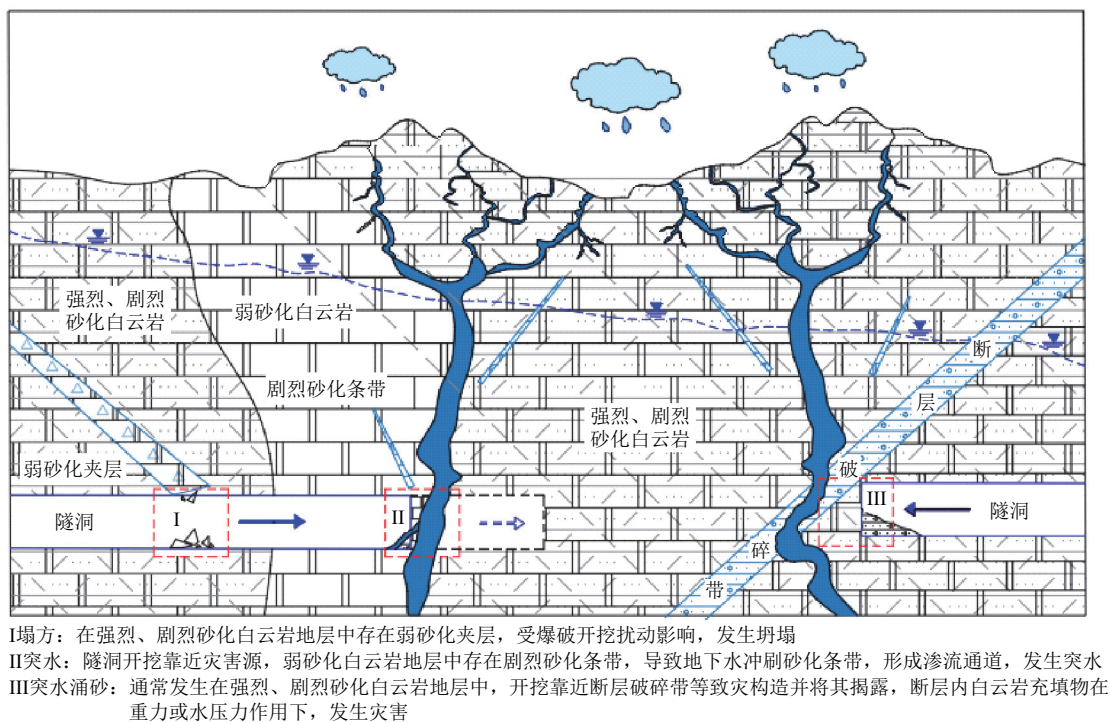
2 砂化等级与隧洞施工地质灾害

施工跟踪表明,滇中引水工程玉溪段输水隧洞

中的 5 座砂化白云岩隧洞,出现的主要地质灾害类型有塌方、突水、突水涌砂 3 类,共计 100 余次^[24]。本文统计了研究区隧洞施工过程中出现的规模较大且影响工程进度的 61 个洞段灾害点,典型洞段灾害概化地质条件如图 1 所示。

调查和研究发现,依托工程的砂化白云岩地层具有明显的非均质性,具体表现为弱砂化白云岩中常夹有强烈、剧烈砂化条带,而强烈、剧烈砂化白云岩地层中也夹有弱砂化岩层。案例统计分析表明,塌方、突水涌砂等灾害的发生往往与这些夹层密切相关。为定量分析砂化等级与施工地质灾害的相关性,将不同砂化等级白云岩洞段发生灾害的频数进行统计分析,结果如图 2 所示。其中,统计分析时遵循如下原则:(1) 同一洞段,若存在两种砂化等级分布比例近似相同的情况,各种砂化等级分别统计一次,例如:强烈~剧烈砂化,则强烈、剧烈砂化等级各统计一次;(2) 砂化等级分布比例相差显著时,统计占比明显大的砂化等级,如:强烈砂化夹弱砂化则统计为强烈砂化。

由图 2 可知,在弱砂化白云岩中发生灾害 14 次,占比为 21.2%;在强烈砂化白云岩中共计发生 32 次,占比为 48.5%;在剧烈砂化白云岩中共计发生 20 次,占比为 30.3%。总体上灾害主要发生在强烈、剧烈砂化白云岩隧洞中,占比高达 78.8%。



I塌方:在强烈、剧烈砂化白云岩地层中存在弱砂化夹层,受爆破开挖扰动影响,发生坍塌
II突水:隧洞开挖靠近灾害源,弱砂化白云岩地层中存在剧烈砂化条带,导致地下水冲刷砂化条带,形成渗流通道,发生突水
III突水涌砂:通常发生在强烈、剧烈砂化白云岩地层中,开挖靠近断层破碎带等致灾构造并将其揭露,断层内白云岩充填物在重力或水压力作用下,发生灾害

图 1 砂化白云岩隧洞典型灾害概化地质条件

Fig.1 The generalized geological conditions of typical disasters in sandy dolomite tunnel

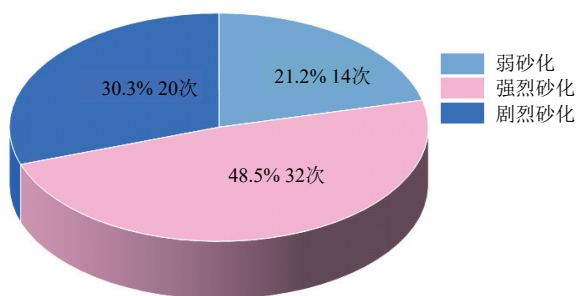


图 2 不同砂化等级洞段发生灾害占比图

Fig.2 The proportion of disasters in different sandification grades of tunnel sections

综上，白云岩砂化等级是成灾关键因素，在砂化白云岩隧洞开挖过程中，及时快速且简便的预测前方围岩白云岩砂化等级，对施工安全以及灾害防控有着至关重要的作用。

3 不同砂化等级白云岩超前水平钻进数值模拟

随钻参数能较好地反映岩层的整体情况，钻进速度是反应岩层特征的重要指标之一。目前，不同砂化等级白云岩与钻进速度之间的联系还不明确，且钻进速度能否较好反映不同砂化等级白云岩特征仍不清楚。因此，有必要开展数值模拟，研究在不同砂化等级白云岩中钻进速度的变化情况。

本文主要研究的岩体材料为滇中引水玉溪段输水隧洞不同砂化等级的白云岩，为了探究砂化等级与钻进速度之间的联系，选择弱砂化、强烈砂化、

剧烈砂化 3 种工况进行模拟研究。同时为了更清楚的了解钻头穿越不同砂化等级时实时钻进位移和瞬时钻进速度的变化过程，选择弱夹剧烈砂化条带、强烈夹弱砂化、剧烈夹弱砂化 3 种工况进行模拟研究，6 种工况的基本工程地质特点如表 1 所示。

3.1 钻进模型基本假设

气动凿岩钻机主要通过气压来推进钻杆和旋转钻头，从而切削岩石，逐步钻取孔洞。为了更好地分析钻头在砂化白云岩中的破岩过程，模型做出以下假设：

- (1) 假设钻头与钻杆是一个整体的刚体，在整个钻进过程中不考虑其变形和磨损；
- (2) 钻进过程中，钻头以垂直于掌子面的方式进行钻进，推进压力以面力的形式作用于钻杆；
- (3) 不考虑围压、地应力等的影响；
- (4) 岩石破坏时单元自动删除，不再影响后续的钻进工作。

3.2 模型建立及材料参数设置

本文通过 Rhino 6.0 建立钻杆直径 90 mm 的气动凿岩钻机钻头三维模型，再导入有限元分析软件中，在 ABAQUS 中建立尺寸为 400 mm×300 mm×100 mm 的岩体模型。对钻头采用 C3D10M 四面体单元自由网格划分，网格节点总数为 89 638；岩体部分网格的单元类型为 C3D8R 实体单元，为了保证结果精度及节省计算时间，将钻头接触部分的岩体网格进行细化，而其他地方适当增加网格尺寸，节点总数为 570 550，钻头与岩体装配模型和网格划分如图 3 所示。

表 1 6 种工况的基本工程地质特点

Table 1 Basic engineering geological characteristics of 6 working conditions

工况	基本工程地质特点	典型洞段
弱砂化	岩石表面或裂隙面大部分变色，断口色泽较新鲜~新鲜，岩石原始组织结构清楚完整，岩体多呈碎裂结构，锤击哑声至发音较清脆。在该类型洞段围岩破坏主要以块体失稳为主	小扑隧洞 YX5+084.2~YX5+089.4
强烈砂化	大部分变色，只有局部岩块保持原有颜色，岩石的组织结构大部分已破坏，部分岩石已分解或崩解成粗砂粒或砾砂状，锤击哑声，岩石大部分变酥，易碎，用镐锹可以挖动。在该类型洞段围岩破坏主要以卸荷失稳为主	扯那直隧洞 YX49+026~YX49+031
剧烈砂化	全部变色，光泽消失，岩石的组织结构完全破坏，锤击有松软感，出现凹坑，手可捏碎。在该类型洞段围岩破坏主要以遇水失稳、卸荷失稳为主	小扑隧洞 YX6+764.64~YX6+769.8
弱夹剧烈砂化条带	砂化白云岩地层中的裂隙经地质构造运动和溶蚀作用沿层面及优势结构面发展，形成局部宽度不等的强烈、剧烈砂化条带，结构更为破碎。在该类型洞段围岩主要以单临空面岩体塌方、遇水失稳为主	小扑隧洞 YX6+789.~YX6+823.3
强烈夹弱砂化	强烈砂化白云岩地层中，部分岩体砂化程度不高，形成局部较坚硬的弱砂化夹层，该弱砂化夹层的强度比强烈砂化高。在该类型洞段围岩破坏主要以断层破碎带为主	扯那直隧洞 G0+187.4~G0+285.3
剧烈夹弱砂化	在多期经历多期构造运动的复杂地质构造环境下，受溶蚀和物理风化的等共同作用形成剧烈砂化白云岩，砂化程度低的弱砂化白云岩由于地质构造运动，夹杂在剧烈砂化白云岩地层中，形成剧烈砂化含弱砂化夹层。在该类型洞段围岩破坏主要以块体塌方为主	小扑隧洞 YX8+429.5~YX8+440.3

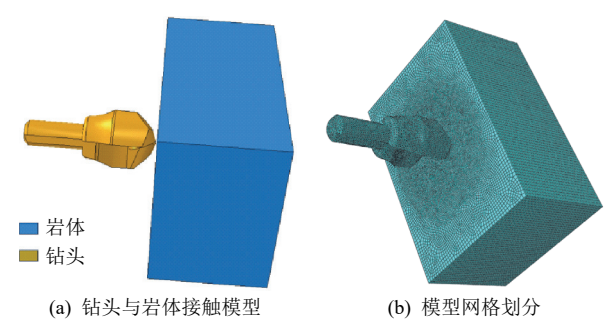


图3 钻进模型与网格划分
Fig.3 Drilling model and grid division

岩体材料本构模型采用 Drucker-Prager 准则，该准则计入了中间主应力的影响，又考虑了静水压力的作用，克服了 M-C 准则的主要弱点，在国内岩土力学与工程的数值计算分析中获得广泛的应用^[29-30]。根据笔者所在课题组相关研究成果，材料参数选取如表 2 所示。

表 2 不同砂化等级白云岩基本参数
Table 2 Basic parameters of dolomite with different sandification grades

砂化等级	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
弱	2.76	13.9	0.29	4.69	57.4
强烈	2.0	2.78	0.35	0.272	30.96
剧烈	1.36	0.8	0.39	0.17	19.29
钻头	4.423×10^{-7}	210	0.3	-	-

3.3 边界条件及荷载设置

除了与钻头接触的岩体边界外，其余 5 个边界面定义为无限无反射边界条件以模拟无限区域的情况^[11]。本文以现场使用的 JK410 型号的气动凿岩钻机性能参数为主要依据来设定对钻头的荷载和边界条件。对岩体的四周和底部施加 x, y, z 三个方向的位移和转动约束，同时在钻具尾部施加 y, z 方向的位移约束和转动约束，保证钻头仅沿着 x 轴运动及绕 x 轴转动。现场地层岩性复杂多变，根据现场实际的工作情况，在数值模拟中，将钻头绕 x 轴

的回转速度设置为 90 r/min，推进压力设置 1.0 MPa，钻头和围岩边界条件及荷载设置示意图如图 4 所示。

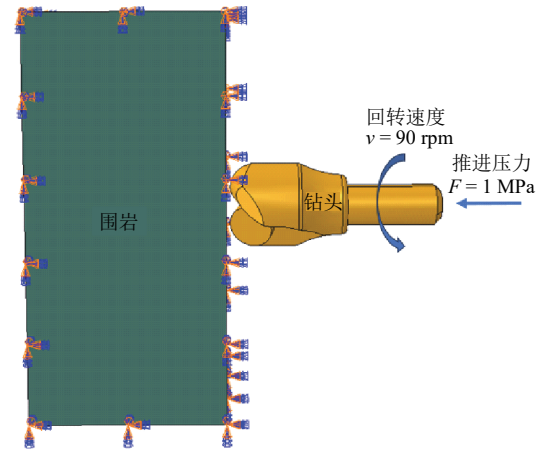


图4 钻头和围岩边界条件及荷载设置示意图
Fig.4 Schematic diagram of boundary conditions and load setting of drill bit and surrounding rock

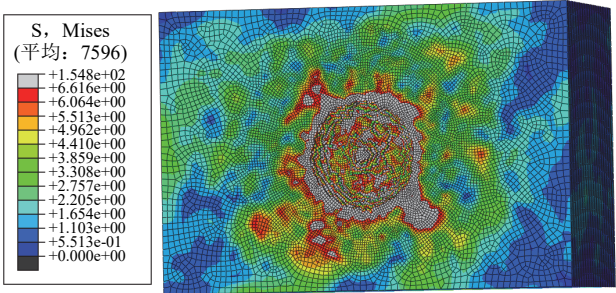
数值模拟计算模型中，钻头与岩体相互作用采用表面与表面接触，采用动态分析方法，具体求解方法为动力显示求解。分析步时间长度设置 1.5 s，时间缩放系数为 1，分析步数设置为 200。

3.4 计算结果分析

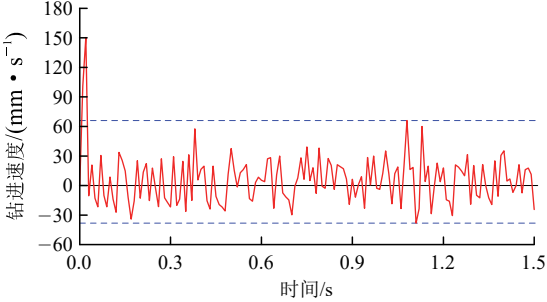
(1) 弱砂化白云岩钻进模拟结果分析

不同砂化等级白云岩钻进结果应力云图及钻头瞬时钻进速度如图 5 所示。弱砂化等级白云岩破岩模拟结果的应力云图如图 5(a)所示。钻头在回转 - 推进压力作用下对岩体产生了切削破坏，都形成了比较规则的破碎孔，而且从图 5(c)和图 5(e)可以看出，同等条件下钻头对弱砂化岩体产生破坏效果最差，强烈砂化次之，剧烈砂化最强。

如图 6 所示，钻头在弱砂化白云岩中钻进位移随着时间逐渐增大。在开始破岩阶段，钻头在推进压力作用下沿轴向运动，在与岩体发生撞击后，钻头位移先下降，后缓慢增加。稳定钻进时，位移钻进曲线在一定斜率的直线附近波动，即弱砂化白云岩的钻进速度可以通过直线的斜率近似表示。除去



(a) 弱砂化钻进应力云图(单位: MPa)



(b) 弱砂化瞬时钻进速度

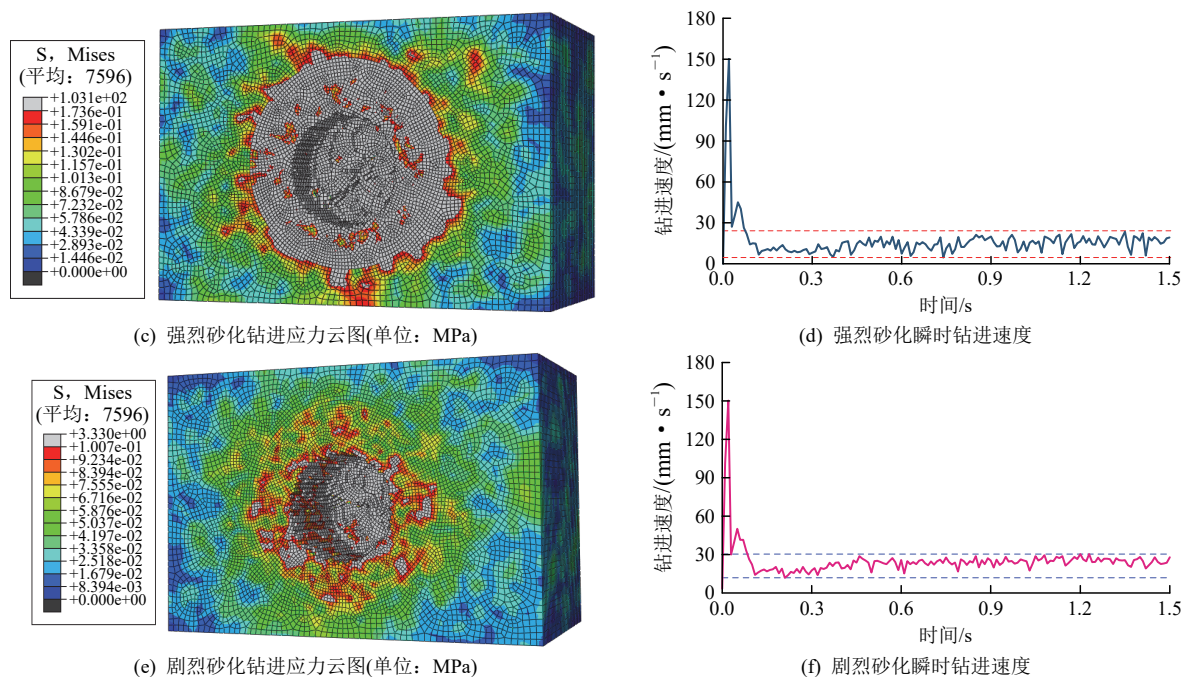


图5 不同砂化等级白云岩钻进结果应力云图及钻头瞬时钻进速度

Fig.5 Stress nephogram and instantaneous drilling speed of drill bit in dolomite drilling results of different sandification grades

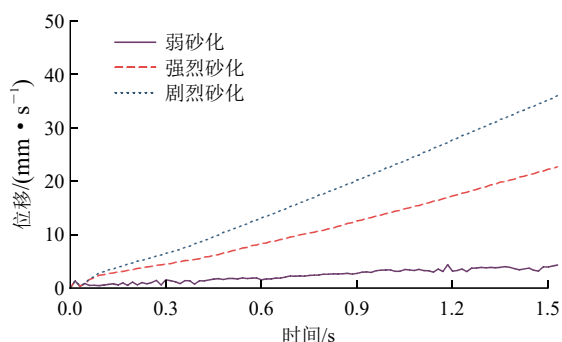


图6 钻进不同砂化等级白云岩时钻头位移

Fig.6 Drilling bit displacement of different sandification grades of dolomite

钻头未接触岩体区域,可以得到弱砂化白云岩的平均钻进速度最大为 4.36 mm/s,最小为 2.87 mm/s,相差仅 1.49 mm/s。

岩石的强度对钻头的钻进速度有很大影响,不同的钻进速度在一定程度上可以反映出不同强度的岩石。如图 5(b)所示,钻头与岩体发生撞击后,钻头瞬时速度急剧下降,但在轴推进压力作用下,逐渐稳定,钻进速度都在一定范围内波动。在钻进弱砂化白云岩时,瞬时钻进速度波动范围比较大,大部分在 $-30 \sim 30$ mm/s 范围来回波动。

(2) 强烈砂化白云岩钻进模拟结果分析

如图 6 所示,钻头在强烈砂化白云岩中钻进位移随着时间逐渐增大。钻头在与岩体发生撞击后,钻头位移下降,钻进稳定时,钻进位移曲线在一定斜率的直线附近波动,除去钻头未接触岩体区域,强烈砂化白云岩的平均钻进速度最大为 15.14 mm/s,

最小为 14.07 mm/s,相差仅 1.07 mm/s。

由图 5(d)可知,在钻头在与强烈砂化岩体接触后,瞬时钻进速度急剧下降,下降至 2 mm/s 左右后逐渐稳定,并在 5~20 mm/s 范围波动,波动范围比较小。

(3) 剧烈砂化白云岩钻进模拟结果分析

如图 6 所示,钻头在剧烈砂化白云岩中钻进位移随着时间逐渐增大。钻头在与岩体发生撞击后,钻头位移下降,钻进稳定时,钻进位移曲线在一定斜率的直线附近波动,除去钻头未接触岩体区域,剧烈砂化白云岩的平均钻进速度最大为 24.03 mm/s,最小为 22.63 mm/s,相差仅 1.40 mm/s。

由图 5(f)可知,在钻头在与剧烈砂化岩体接触后,瞬时钻进速度急剧下降,下降至 15 mm/s 左右后逐渐稳定,并在 11~30 mm/s 范围波动,波动范围也较小。

(4) 弱夹剧烈砂化条带钻进模拟结果分析

为了更清楚地了解钻头穿越不同砂化等级实时钻进位移和瞬时钻进速度的变化过程,将弱夹剧烈砂化、强烈夹弱砂化、剧烈夹弱砂化 3 种工况的分析步时间长度设置为 4.0 s,夹层厚度设置为 10 mm,其余设置一致,3 种工况的模型如图 7(a), 8(a) 和 9(a)所示。

在相同的回转速度、推进压力条件下,钻头在含有夹层的不同砂化等级白云岩中,钻进位移随着时间逐渐增大,当遭遇夹层时,位移出现加快或减缓的趋势,但钻头穿越夹层后,恢复正常,整体呈“上台阶式”。

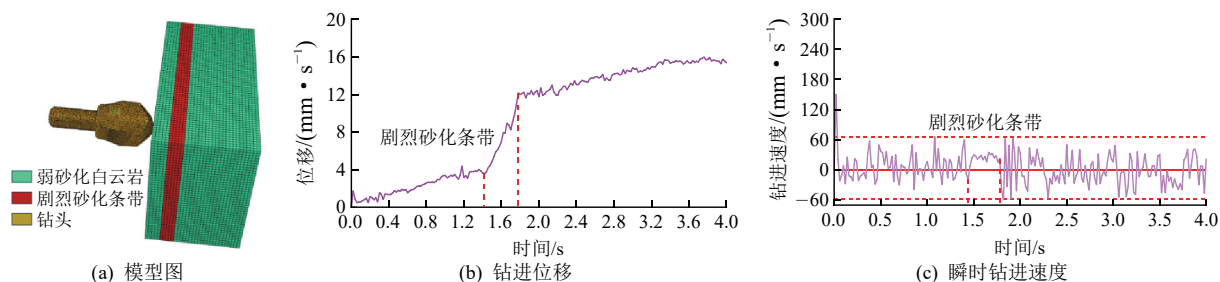


图7 弱夹剧烈砂化条带模拟结果

Fig.7 Simulation results of weak clip complete sandification strip

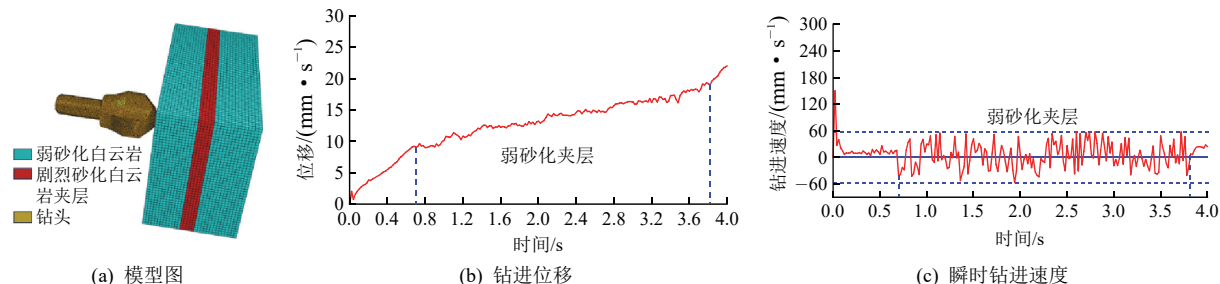


图8 强烈夹弱砂化模拟结果

Fig.8 Simulation results of severe clip weak sandification

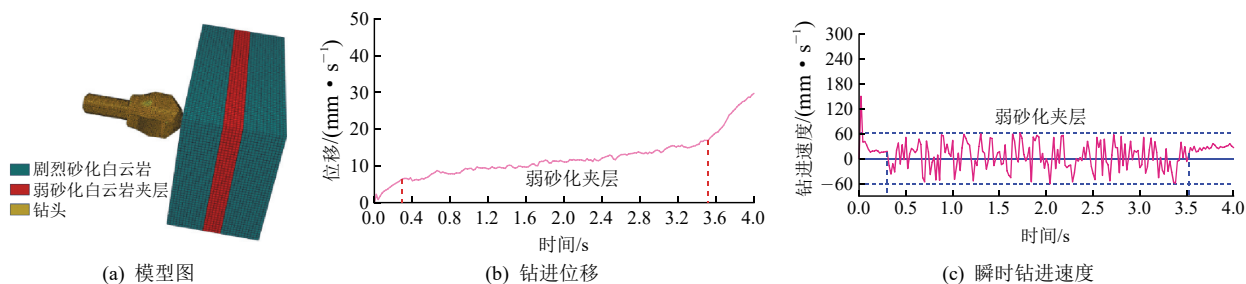


图9 剧烈夹弱砂化模拟结果

Fig.9 Simulation results of complete clip weak sandification

由图 7(b)可知,在弱夹剧烈砂化白云岩地层中,钻头位移增长缓慢,在 1.44 s 时遭遇剧烈砂化条带,钻进时间减短,钻进位移加快,在 1.78 s 穿越剧烈砂化条带后,钻进位移增长有所减缓。从模拟总时间和位移来计算钻进速度,钻头在弱砂化夹剧烈砂化条带中钻进时,钻进速度为 3.85 mm/s。

由图 7(c)可知,当钻头钻进到剧烈砂化条带时,瞬时钻进速度急剧增加,并在 30 mm/s 左右波动,波动范围小,比较稳定,且钻进位移加快。当穿越砂化条带后,岩层变为弱砂化白云岩,瞬时钻进速度急剧降低,之后在 $-60 \sim 60$ mm/s 范围大范围波动,波形各不相同,不稳定。

(5) 强烈夹弱砂化钻进模拟结果分析

在强烈夹弱砂化白云岩中钻进时,由图 8(b)可知,在 0.7 s 遭遇弱砂化夹层后,钻进位移变为缓慢增长,而 3.82 s 穿越弱砂化夹层后,位移增长加快。从模拟总时间和位移来计算钻进速度,钻头在强烈

夹弱砂化白云岩中钻进时,钻进速度为 5.51 mm/s。

由图 8(c)可知,当钻头钻进到弱砂化夹层时,瞬时钻进速度急剧下降,在弱砂化夹层中瞬时钻进速度大部分在 $-45 \sim 45$ mm/s 范围来回波动,波动不稳定,钻进时间变长,钻进位移减缓。当钻头穿越夹层后,钻进位移加快,瞬时钻进速度恢复在 22 mm/s 左右波动,比较稳定。

(6) 剧烈夹弱砂化钻进模拟结果分析

在剧烈夹弱砂化白云岩中钻进时,由图 9(b)可知,钻头位移增长速度比强烈砂化快,在 0.3 s 时遭遇弱砂化夹层,钻进位移变为缓慢增长,而 3.52 s 穿越弱砂化夹层后,位移增长加快。从模拟总时间和位移来计算钻进速度,钻头在剧烈夹弱砂化白云岩中钻进时,钻进速度为 7.42 mm/s。

由图 9(c)可知,当钻头钻进到弱砂化夹层时,瞬时钻进速度同样急剧下降,剧烈夹弱砂化白云岩中瞬时钻进速度大部分在 $-45 \sim 60$ mm/s 范围来回

波动,波动不稳定,钻进位移减缓。当钻头穿越夹层后,钻进位移加快,瞬时钻进速度恢复在 30 mm/s 左右波动,比较稳定。

综上,通过上述 6 种工况模拟结果可知,钻进速度随砂化等级提高而增大,呈正相关;且在遭遇夹层时钻进位移和瞬时钻进速度出现突变,这与现场钻进过程中,常出现时快时慢现象相吻合。与刘少伟等^[15, 31-32]的研究成果进行分析,可以认为钻进速度能较好反映不同砂化等级白云岩特征,因此,钻进速度作为白云岩砂化等级预测指标是合理可行的。

4 钻速识别砂化等级模型构建及验证

4.1 现场超前水平钻钻进速度统计分析

本文对滇中引水工程玉溪段输水隧洞中实施的超前水平钻相关成果进行统计分析。在小扑、老尖山、扯那直、大塘子、螺峰山等隧洞进行现场超前水平钻,同时对砂化白云岩进行等级划分。原位钻进试验所用钻机为 JK410 履带式气动凿岩钻机,该钻机主要参数如下:质量约 6 000 kg、钻孔直径 $\phi 90$ mm、最大回转转速 200 r/min、回转扭矩 280 N·m、凿岩机冲击功率 7 kW。现场掌子面钻孔及布置如图 10 所示。



图 10 现场掌子面钻孔试验
Fig.10 Field drilling test of tunnel face

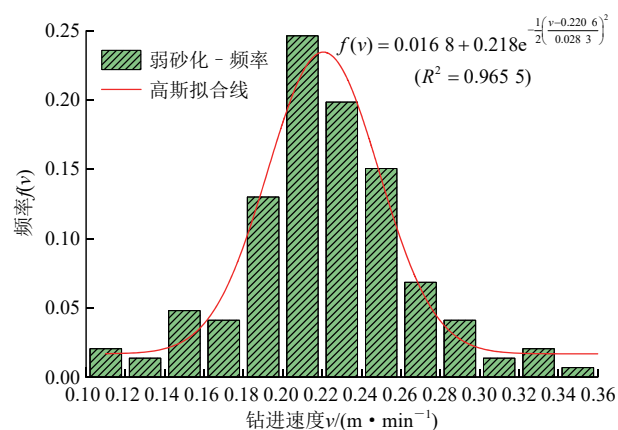
由于工程地质条件复杂,为研究不同砂化等级白云岩的钻进速度频率分布特征,遵循“2 砂化等级与隧洞施工地质灾害”部分所述灾害案例分析中砂化等级统计原则,对不同砂化等级白云岩钻进速度进行统计,共获得了 446 组 3 种砂化等级白云岩的钻进速度。选取其中 434 组进行分析,12 组用于模型验证。对不同砂化等级白云岩的钻进速度进行统计分析,获得了其各自总体分布规律,如图 11 所示。

4.2 钻进速度 - 砂化等级预测模型

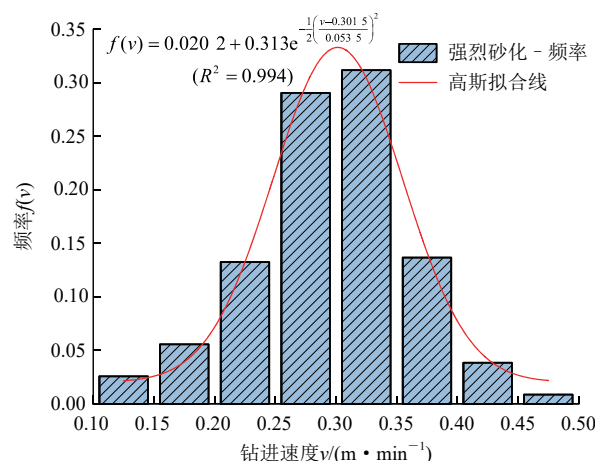
由图 11 可知,弱砂化、强烈砂化和剧烈砂化白云岩现场钻进速度均呈现正态分布,采用 Gauss-Amp 方程,对不同砂化等级白云岩的频率 - 钻进速度进行拟合可得弱砂化白云岩的关系式:

$$f(v) = 0.0168 + 0.218e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{v-0.2206}{0.0283}\right)^2} \quad (1)$$

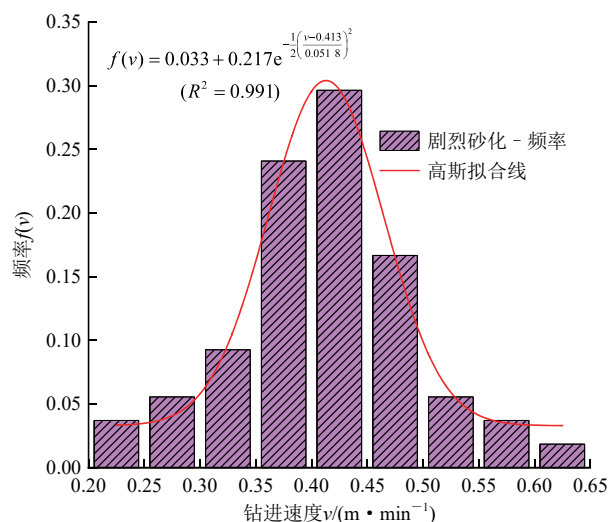
式中: $f(v)$ 为频率, v 为钻进速度(m/min)。



(a) 弱砂化白云岩钻进速度频率分布直方图



(b) 强烈砂化白云岩钻进速度频率分布直方图



(c) 剧烈砂化白云岩钻进速度频率

图 11 不同砂化白云岩钻进速度频率分布直方图

Fig.11 Frequency histogram of drilling velocity distribution with different sandy dolomite

强烈砂化白云岩的关系式:

$$f(v) = 0.0202 + 0.313e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{v-0.3015}{0.0535}\right)^2} \quad (2)$$

剧烈砂化白云岩的关系式:

$$f(v) = 0.033 + 0.271e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{v-0.413}{0.0518}\right)^2} \quad (3)$$

由图 11(a)可知,该地区弱砂化白云岩的钻进速度分布在 $0.1 \sim 0.38 \text{ m/min}$ ($1.67 \sim 6.33 \text{ mm/s}$) 范围,其中, 92.47% 的钻进速度分布在 $0.14 \sim 0.3 \text{ m/min}$ ($2.33 \sim 5 \text{ mm/s}$) 范围, 钻进速度在 $0.2 \sim 0.22 \text{ m/min}$ ($3.33 \sim 3.67 \text{ mm/s}$) 范围出现的频率最高, 为 24.66%。

由图 11(b)可知,强烈砂化白云岩的钻进速度分布在 $0.1 \sim 0.5 \text{ m/min}$ ($1.67 \sim 8.33 \text{ mm/s}$) 范围,其中, 87.18% 的钻进速度分布在 $0.2 \sim 0.4 \text{ m/min}$ ($3.33 \sim 6.67 \text{ mm/s}$) 范围, 钻进速度在 $0.3 \sim 0.35 \text{ m/min}$ ($5 \sim 5.83 \text{ mm/s}$) 范围出现的频率最高, 为 31.19%。

由图 11(c)可知,剧烈砂化白云岩的钻进速度分布在 $0.2 \sim 0.65 \text{ m/min}$ ($3.33 \sim 10.83 \text{ mm/s}$) 范围,其中, 90.74% 的钻进速度分布在 $0.25 \sim 0.55 \text{ m/min}$ ($4.17 \sim 9.17 \text{ mm/s}$) 范围, 钻进速度在 $0.4 \sim 0.45 \text{ m/min}$ ($6.67 \sim 7.5 \text{ mm/s}$) 范围出现的频率最高, 为 29.63%。

如图 12 所示,砂化等级与钻进速度呈正相关,即砂化白云岩钻进速度随砂化等级提高而增大,并建立砂化等级与钻进速度的关系模型:

$$y = 10.354 5v^{0.456} - 3.915 2 \quad (4)$$

式中: $y=1, 2, 3$ 分别表示弱砂化、强烈砂化、剧烈砂化, $R^2=0.991$, 拟合结果好,说明钻进速度与砂化等级存在较强的关联性,可以采用钻进速度预测和识别砂化等级。

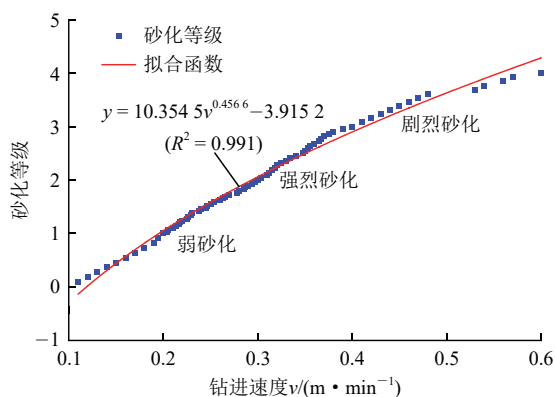


图 12 钻进速度与白云岩砂化等级的关系图

Fig.12 Relationship between drilling velocity and dolomite sandification grade

4.3 数值模拟与现场钻进结果的对比分析

对 434 组现场超前水平钻的钻进速度统计分析,发现弱砂化白云岩钻进速度出现在 $2.33 \sim 5 \text{ mm/s}$ 范围的概率为 92.47%,强烈砂化白云岩钻进速度出现在 $3.33 \text{ mm/s} \sim 6.67 \text{ mm/s}$ 范围的概率为 87.18%,剧烈砂化白云岩钻进速度出现在 $4.17 \sim 9.17 \text{ mm/s}$ 范围的概率为 90.74%,均呈现正态分布。

从实时钻进速度分析不同砂化等级白云岩的平均钻进速度,在弱砂化、强烈砂化、剧烈砂化 3 种工况中钻进时,瞬时钻进速度都在一定范围内波动,波形各不相同。弱砂化大部分在 $-30 \sim 30 \text{ mm/s}$ 范围波动,强烈砂化在 $5 \sim 20 \text{ mm/s}$ 范围波动,剧烈砂化在 $11 \sim 30 \text{ mm/s}$ 范围波动,弱砂化瞬时钻进速度波动范围比较大,强烈、剧烈砂化比较小。而在弱夹剧烈砂化条带、强烈夹弱砂化、剧烈夹弱砂化三种工况中钻进时,瞬时钻进速度在遭遇夹层时都会发生突变,且波动范围都不相同。

从钻进位移分析 6 种工况砂化白云岩的平均钻进速度,模拟在弱砂化、强烈砂化、剧烈砂化三种工况中钻进时,得到在弱砂化白云岩地层中平均钻进速度为 $2.87 \sim 4.36 \text{ mm/s}$,强烈砂化中平均钻进速度为 $14.07 \sim 15.14 \text{ mm/s}$,剧烈砂化中平均钻进速度为 $22.63 \sim 24.03 \text{ mm/s}$ 。发现在不同砂化等级白云岩地层中钻进速度弱砂化 < 强烈砂化 < 剧烈砂化,弱砂化钻进速度模拟结果符合现场结果,而强烈、剧烈砂化白云岩模拟结果偏大。

而模拟在含有夹层的不同砂化等级白云岩地层中钻进时,在弱砂化白云岩中钻进到剧烈砂化条带时钻进加快,弱砂化白云岩中钻进速度为 3.85 mm/s 。而在强烈、剧烈砂化白云岩中钻进到弱砂化夹层时,钻进减缓,钻进所需时间更长,强烈砂化白云岩中钻进速度为 5.51 mm/s ,剧烈砂化白云岩中钻进速度为 7.42 mm/s 。与现场钻进速度统计结果相比较,含有夹层不同砂化等级白云岩中钻进速度模拟结果更符合现场钻进结果。

综上,钻进速度作为白云岩砂化等级预测指标是合理可行的,并且发现在遭遇夹层时钻进位移和瞬时钻进速度出现突变。因此,现场进行超前水平钻时,有必要及时采集钻进位移及瞬时钻进速度数据分析,有助于灾害防控。

4.4 钻速-砂化等级识别模型的工程验证

滇中引水工程玉溪段小扑隧洞全长约 32.1 km ,最大埋深 334 m 。地层岩性以 Z_{bdn} 白云岩为主,碎裂散体结构,岩体破碎~较破碎。本文选取小扑隧洞掌子面桩号 YX08+028.1, YX23+844.7, YX23+952.1, YX24+270.1 四个洞段开展的超前钻探结果进行验证。每个桩号布置了 3 个超前钻孔,统计了每个钻孔的钻进速度,并判别了白云岩砂化等级。通过频率-砂化等级关系式得到了不同砂化等级的概率大小和钻进速度-砂化等级预测模型计算值预测砂化等级,钻进及预测结果如表 3 所示。

表 3 现场超前钻探与模型预测结果表
Table 3 Field advanced drilling and model prediction results table

桩号	钻孔	钻进速度/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	砂化等级概率预测	模型预测值及砂化等级	现场岩层砂化等级
YX08+028.1~ YX08+058.1	1	0.33	弱砂化 1.69%、强烈砂化 29.18%、剧烈砂化 10.8%	2.32(强烈砂化)	强烈砂化
	2	0.33	弱砂化 1.69%、强烈砂化 29.18%、剧烈砂化 10.8%	2.32(强烈砂化)	强烈砂化
	3	0.33	弱砂化 1.69%、强烈砂化 29.18%、剧烈砂化 10.8%	2.32(强烈砂化)	强烈砂化
YX23+844.7~ YX23+863.7	1	0.24	弱砂化 18.92%、强烈砂化 18.19%、剧烈砂化 3.4%	1.48(弱砂化~强烈砂化)	弱砂化~强烈砂化
	2	0.25	弱砂化 14.39%、强烈砂化 21.71%、剧烈砂化 3.49%	1.58(强烈砂化~弱砂化)	弱砂化~强烈砂化
	3	0.24	弱砂化 18.92%、强烈砂化 18.19%、剧烈砂化 3.4%	1.48(弱砂化~强烈砂化)	弱砂化~强烈砂化
YX23+952.1~ YX23+977.1	1	0.2	弱砂化 18.41%、强烈砂化 7.2%、剧烈砂化 3.31%	1.05(弱砂化)	弱砂化
	2	0.21	弱砂化 22%、强烈砂化 9.27%、剧烈砂化 3.31%	1.16(弱砂化)	弱砂化
	3	0.19	弱砂化 13.83%、强烈砂化 5.98%、剧烈砂化 3.3%	0.936(弱砂化)	弱砂化
YX24+270.1~ YX24+295.1	1	0.26	弱砂化 9.95%、强烈砂化 25.19%、剧烈砂化 3.65%	1.68(强烈砂化~弱砂化)	强烈砂化夹弱砂化
	2	0.22	弱砂化 23.48%、强烈砂化 11.83%、剧烈砂化 3.33%	1.27(弱砂化~强烈砂化)	强烈砂化夹弱砂化
	3	0.23	弱砂化 22.31%、强烈砂化 14.83%、剧烈砂化 3.34%	1.38(弱砂化~强烈砂化)	强烈砂化夹弱砂化

由表 3 可知, 根据不同砂化等级围岩的钻进速度频率分布特征和通过钻进速度—砂化等级预测模型的计算值预测砂化等级, 与现场开展的超前钻探结果进行对比, 发现预测结果和实际砂化等级吻合度很高, 预测结果均能较好反应白云岩砂化等级。可以认为该模型具有较好的准确性。

5 结 论

本文以不同砂化等级白云岩为研究对象, 采用数值模拟结合现场超前水平钻手段分析钻进速度与砂化等级之间的联系, 旨在提高超前水平钻成果在灾害防控中的作用, 为现场快速判别白云岩砂化等级提供依据, 为塌方、突水涌砂等灾害预防提供一种手段。本文根据数值模拟结合现场超前水平钻钻进速度统计分析, 得到以下结论:

(1) 从钻进位移和实时钻进速度 2 个方面对 6 种砂化白云岩工况钻进结果分析可知, 钻进速度作为白云岩砂化等级预测指标是合理可行的。钻进速度随砂化等级提高而增大, 呈正相关; 岩层在遭遇夹层时钻进位移和瞬时钻进速度出现突变, 与现场钻进过程中, 常出现时快时慢现象相吻合。

(2) 基于现场超前水平钻 434 组钻进速度数据统计分析, 得到不同砂化等级围岩的钻进速度频率分布特征, 弱砂化白云岩钻进速度出现在 2.33~5 mm/s 范围的概率为 92.47%, 强烈砂化白云岩钻进

速度出现在 3.33~6.67 mm/s 范围的概率为 87.18%, 剧烈砂化白云岩钻进速度出现在 4.17~9.17 mm/s 范围的概率为 90.74%, 且均呈现正态分布。

(3) 构建了基于钻进速度的砂化等级预测模型, 通过钻进速度频率分布特征以及钻进速度—砂化等级预测模型识别了白云岩砂化等级, 所得结果与开挖揭露实际情况的吻合度很高, 表明工程施工中可以通过钻进速度快速简便的预测砂化等级, 对灾害的预防具有重要的指导作用。

参考文献(References):

[1] TIAN J, LI J, CHENG W, et al. Working mechanism and rock-breaking characteristics of coring drill bit[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 162: 348 - 357.

[2] VALENTIN M B, BOM C R, MARTINS C A L, et al. Estimation of permeability and effective porosity logs using deep auto encoders in borehole image logs from the Brazilian pre-salt carbonate[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 170: 315 - 330.

[3] OLORUNTOBI O, BUTTS S. Application of specific energy for lithology identification[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 184: 106402.

[4] LI Z, KANG Y, FENG D, et al. Semi-supervised learning for lithology identification using Laplacian support vector machine[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 195: 107510.

[5] 谭卓英, 王思敬, 蔡美峰. 岩土工程界面识别中的地层判别分类方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 316 - 322.(TAN

- Zhuoying, WANG Sijing, CAI Meifeng. Study on discriminant classification method for ground formation in identification of geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 316 – 322.(in Chinese))
- [6] DONG S, WANG Z, ZENG L. Lithology identification using kernel Fisher discriminant analysis with well logs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 143: 95 – 102.
- [7] 谭卓英, 李文, 岳鹏君, 等. 基于钻进参数的岩土地层结构识别技术与方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1 328 – 1 333.(TAN Zhuoying, LI Wen, YUE Pengjun, et al. Techniques and approaches for identification of geo-formation structure based on diamond drilling parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1 328 – 1 333.(in Chinese))
- [8] YANG Y, LIAO H, XU Y, et al. Coupled fluid-structure simulation of a vibration-assisted rotary percussion drilling tool[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2019, 41(14): 1 725 – 1 738.
- [9] 谭卓英, 蔡美峰, 岳中琦, 等. 基于仪器钻进系统的风化花岗岩地层界面识别[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(7): 665 – 669.(TAN Zhuoying, CAI Meifeng, YUE Zhongqi, et al. Interface identification in weathered granite strata based on a instrumented drilling system[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(7): 665 – 669.(in Chinese))
- [10] KAHRAMAN S, BALCI C, YAZICI S, et al. Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drillability index[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(5): 729 – 743.
- [11] 张强, 索江伟, 王海舰, 等. 基于 ABAQUS 的凿岩机钻头破岩数值模拟分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(1): 136 – 141.(ZHANG Qiang, SUO Jiangwei, WANG Haijian, et al. Numerical simulation analysis on the drill bit rock breaking process based on ABAQUS[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(1): 136 – 141.(in Chinese))
- [12] 谭卓英, 蔡美峰, 岳中琦, 等. 基于岩石可钻性指标的地层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.(in Chinese))
- [13] 马念杰, 邹光华, 张凤岩, 等. 新型煤巷顶板岩层结构探测仪的研究[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(1): 78 – 81.(MA Nianjie, ZOU Guanghua, ZHANG Fengyan, et al. Research on new roof rock structure probe of seam gateway[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(1): 78 – 81.(in Chinese))
- [14] 刘灿灿. 煤巷顶板岩层地质特征随钻探测机制研究与应用[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.(LIU Cancan. Research and application of detection while drilling mechanism for geological features of coalmine roadway roof strata[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.(in Chinese))
- [15] 刘少伟, 刘栋梁, 冯友良, 等. 应力状态对煤巷顶板锚固孔钻进速度的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(4): 608 – 613.(LIU Shaowei, LIU Dongliang, FENG Youliang, et al. Influence of stress states on drilling velocity of anchorage hole on coal roadway roof[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(4): 608 – 613.(in Chinese))
- [16] YANG Y, LIAO H, NIU J, et al. Three-dimensional simulation of rock breaking efficiency under various impact drilling loads[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(12): 93 – 98.
- [17] 董家兴, 周志强, 赵永川, 等. 滇中引水工程砂化白云岩隧洞围岩地质特征与破坏机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(增 1): 3 464 – 3 476.(DONG Jiaxing, ZHOU Zhiqiang, ZHAO Yongchuan, et al. Study on geological characteristics and failure mechanism of surrounding rock of sandy dolomite tunnel in water diversion project in central Yunnan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(Supp.1): 3 464 – 3 476.(in Chinese))
- [18] ZHOU P, JIANG Y F, ZHOU F C, et al. Disaster mechanism of tunnel face with large section in sandy dolomite stratum[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 131: 105905.
- [19] 王志杰, 杜逸文, 姜逸帆, 等. 砂化白云岩地层隧道掌子面失稳机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增 2): 3 118 – 3 126.(WANG Zhijie, DU Yiwen, JIANG Yifan, et al. Study on instability mechanism of tunnel face in sandy dolomite strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(Supp.2): 3 118 – 3 126.(in Chinese))
- [20] 张延杰, 董家兴, 周志强, 等. 近断层砂化白云岩隧洞突水涌砂演化过程及防突岩盘安全厚度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(3): 639 – 652.(ZHANG Yanjie, DONG Jiaxing, ZHOU Zhiqiang, et al. Water and sand inrush evolution and minimum safe thickness of waterproof-resistant slab in sandy dolomite tunnels near the faults[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(3): 639 – 652.(in Chinese))
- [21] JIANG Y F, ZHOU P, ZHOU F C, et al. Failure analysis and control measures for tunnel faces in water-rich sandy dolomite formations[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 138: 106350.
- [22] 董家兴, 龚欣月, 米健, 等. 砂化白云岩隧洞围岩分类方法 SHF 构建及应用[J]. 地球科学, 2024, 49(8): 2 813 – 2 825.(DONG

- Jiaying, GONG Xinyue, MI Jian, et al. Structure and application of shf classification method for surrounding rock of sandy dolomite tunnel[J]. Earth Science, 2024, 49(8): 2 813 - 2 825.(in Chinese))
- [23] POROS Z, MACHEL H G, MINDSZENTY A, et al. Cryogenic powderization of Triassic dolostones in the Buda Hills, Hungary[J]. International Journal of Earth Sciences, 2013, 102(5): 1 513 - 1 539.
- [24] 董家兴, 杨吉, 周伦顺, 等. 砂化白云岩隧洞围岩致灾构造分类、孕灾及破坏模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(5): 1 064 - 1 079.(DONG Jiaying, YANG Ji, ZHOU Lunshun, et al. Study on disaster-causing structure classification, disaster-pregnant and failure modes of surrounding rock mass in sandy dolomite tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(5): 1 064 - 1 079.(in Chinese))
- [25] MACHEL H G, BORRERO M L, DEMBICKI E, et al. The Grosmont: the world's largest unconventional oil reservoir hosted in carbonate rocks[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2012, 370(1): 49 - 81.
- [26] 董家兴, 周志强, 王志荣, 等. Hoek-Brown 强度准则在强烈砂化白云岩力学参数估算中的应用[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(12): 21 - 25.(DONG Jiaying, ZHOU Zhiqiang, WANG Zhirong, et al. Estimation of mechanical parameters of intense sandy dolomite based on Hoek-Brown strength criterion[J]. Journal Changjiang River Scientific Research Institute, 2022, 39(12): 21 - 25.(in Chinese))
- [27] RICHTER D K, GILLHAUS A, NEUSER R D. The alteration and disintegration of dolostones with stoichiometric dolomite crystals to dolomite sand: new insights from the Franconian Alb(Upper Jurassic, SE Germany)[J]. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 2018, 169(1): 27 - 46.
- [28] 董家兴, 张晟玮, 程娟, 等. 模糊层次分析法在白云岩砂化等级划分中的应用[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(2): 109 - 114.(DONG Jiaying, ZHANG Shengwei, CHENG Juan, et al. Application of fuzzy AHP method to classification of dolomite sandification level[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(2): 109 - 114.(in Chinese))
- [29] 肖诗云, 林皋, 王哲. Drucker-Prager 材料一致率型本构模型[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 147 - 151.(XIAO Shiyun, LIN Gao, WANG Zhe. A Drucker-Prager consistent rate-dependent model[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(4): 147 - 151.(in Chinese))
- [30] 刘金龙, 栾茂田, 许成顺, 等. Drucker-Prager 准则参数特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 4 010 - 4 015.(LIU Jinlong, LUAN Maotian, XU Chengshun, et al. Study on parametric characters of Drucker-Prager[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 4 010 - 4 015.(in Chinese))
- [31] 赵思光, 王明年, 罗丽菊, 等. 基于凿岩台车钻进速度的隧道围岩基本质量指标计算方法[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(2): 83 - 91.(ZHAO Siguang, WANG Mingnian, LUO Liju, et al. Calculation method for basic quality index of tunnel surrounding rock based on penetration velocity of drill jumbo[J]. China Railway Science, 2023, 44(2): 83 - 91.(in Chinese))
- [32] 刘勇斌, 张晓平, 李馨芳, 等. 基于冲击回转钻进的岩石强度随钻识别研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(3): 857 - 866.(LIU Yongbin, ZHANG Xiaoping, LI Xinfang, et al. Rock strength identification while drilling based on percussive rotary drilling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(3): 857 - 866.(in Chinese))

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章：

- (1) 不同倾角断层滑移型岩爆黏滑过程声电响应特征研究；
- (2) 深部煤巷高三向应力差异区冲击失稳机制；
- (3) 热应力和天然裂缝影响下干热岩水力裂缝扩展机制研究；
- (4) 岩石矿物成分与宏微观摩擦特性关联性研究；
- (5) 基于全过程信息的多源数据融合隧道超前地质预报方法；
- (6) 砂岩三轴循环加卸载峰后力学突变行为；
- (7) CNL 及 DNL 两类边界条件下粗糙结构面剪切力学特性及破坏机制比较研究；
- (8) 侧向卸荷条件下砂岩孔道试样的力学特性及破坏机制研究。

土工基础