

李点尚,刘灿灿,王传兵,等. 基于随钻参数响应特征的巷道顶板岩层界面识别方法研究[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(1): 95-104. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024932

LI Dianshang, LIU Cancan, WANG Chuanbing, et al. Identification method of roof rock interface based on response characteristics of drilling parameters[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(1): 95-104. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024932

## 基于随钻参数响应特征的巷道顶板 岩层界面识别方法研究

李点尚<sup>1,3</sup>, 刘灿灿<sup>1,2</sup>, 王传兵<sup>1,3</sup>, 任波<sup>1,3</sup>, 任帅<sup>1,3</sup>, 康志鹏<sup>1,3</sup>

1. 淮南矿业(集团)有限责任公司深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽淮南 232000;

2. 中国矿业大学矿业工程学院, 江苏徐州 221116;

3. 淮河能源控股集团有限责任公司深部煤炭开采耦合灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 安徽淮南 232000

**摘要:**为实现煤矿地质透明化,促进煤矿智能化发展进程,解决传统岩层界面识别方法速度慢、成本高以及精度差的难题,围绕岩层界面智能识别进行研究。首先,在实验室内浇筑地层模型,通过自主研制的随钻装置开展位移、转速、扭矩和声压级等参数的实时采集;其次,采用指数加权损失函数自动过滤位移数据异常值,提出钻速计算方法;然后,用变点检测算法、RStudio软件的Strucchange模型和决策树算法分析钻速、转速、声压级和扭矩等参数,对比分析其识别岩层界面的准确性;最后,在2种典型的地质条件下进行岩层界面随钻识别效果分析。结果表明:以钻速为输入参数,决策树算法是快速准确识别岩层界面的最佳方式;现场试验中煤岩界面位置预测的平均误差为0.04 m,但对于复合顶板岩层界面识别准确性相对较低。

**关键词:**巷道顶板;钻进参数;岩层界面随钻探测;煤岩界面;钻孔

中图分类号:TD 411

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2025)01-0095-10

## Identification method of roof rock interface based on response characteristics of drilling parameters

LI Dianshang<sup>1,3</sup>, LIU Cancan<sup>1,2</sup>, WANG Chuanbing<sup>1,3</sup>, REN Bo<sup>1,3</sup>, REN Shuai<sup>1,3</sup>, KANG Zhipeng<sup>1,3</sup>

1. State Key Laboratory for Safe Mining of Deep Coal Resources and Environment Protection, Huainan Mining (Group) Co., Ltd., Huainan Anhui 232000, China;

2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China;

3. Key Laboratory of Coupled Hazards Prevention and Control in Deep Coal Mining, National Mine Safety Administration, Huaihe Energy Holdings Group Co., Ltd., Huainan Anhui 232000, China

**Abstract:** This paper investigates measurement while drilling for rock strata interface to achieve geological transparency, promote intelligence development, and address the limitations of traditional rock detection methods in coal mines, including slow speed, high costs, and poor accuracy. Firstly, this study proposes a laboratory-level drilling device for real-time data acquisition of displacement, revolutions per minute, torque, and sound pressure level during drilling the formation model poured in the laboratory. Secondly, an exponentially weighted loss function was used for automatic screening of anomalies in dis-

收稿日期:2024-09-28 修回日期:2024-11-10

基金项目:深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室开放基金(HNKY2024YB102);国家自然科学基金(52304107);中国博士后科学基金(2023M733761);江苏省卓越博士后项目(2023ZB191)

作者简介:李点尚(1975—),男,安徽舒城人,本科,高级工程师,主要从事煤矿智能化、安全高效开采等方面的研究工作。E-mail: 297162841@qq.com

通信作者:刘灿灿(1992—),男,山西运城人,博士,副教授,主要从事围岩智能探测、矿山压力与岩层控制方面的研究工作。E-mail: liucancan@cumt.edu.cn

placement data and obtained a penetration rate that better reflect variations in drilling. Then, the accuracy of rock interface identification was analyzed using parameters such as penetration rate, revolution per minute, sound pressure level, and torque using the application of the change point detection algorithm, the strucchange model in RStudio software, and the decision tree algorithm. Finally, the performance of rock interface identification during drilling was evaluated under 2 typical geological conditions. Results indicate that the decision tree algorithm is the most effective method for quick and accurate identification of rock interfaces with penetration rate as the input parameter. On-site tests yielded 0.04m of average error in predicting the position of the coal rock interface. Yet, the method produces relatively low accuracy in rock interface identification of composite roof rock strata.

**Key words:** roadway roof; drilling parameters; rock strata interface; measurement while drilling; coal rock interface; borehole

岩层特征准确识别是支护方案设计的重要依据<sup>[1]</sup>。岩层钻探在石油、采矿和隧道工程等多个领域应用广泛<sup>[2-3]</sup>,是许多工程必不可少的常规工序,钻探过程中的钻进参数中包含大量有用信息,基于随钻参数进行围岩特征识别是重要的发展方向。有学者依托油田钻探工程,利用人工智能通过机械比能估算地质力学参数<sup>[4]</sup>。在采矿领域,刘少伟等<sup>[5-6]</sup>利用数值模拟法分析了顶板锚固孔钻进时钻杆的振动机理、不同强度岩石钻进响应特征和机械比能,认为振动信号是岩层识别的重要指标。目前也出现了许多随钻参数采集设备,王琦等<sup>[7-8]</sup>研发了多功能岩石钻探测试系统,研究了钻进参数与岩石力学参数关系,得出随钻参数与岩石强度、岩石内聚力和内摩擦角关系模型。VARDHAN等<sup>[9-10]</sup>通过试验研究了不同强度岩石钻进时声压级响应特征,得出可以用声压级来预测岩石的抗压强度。KUMAR等<sup>[11]</sup>对5种不同类型的岩石开展钻进试验,并分析钻进时声音频率与岩石单轴抗压强度、抗拉强度和密度之间的关系,验证了单轴抗压强度回归预测模型的准确性。张幼振等<sup>[12]</sup>采用自主研发的钻进试验系统,采集钻速、转速和钻压等钻进参数,并分析了钻进参数响应特征,建立了典型含煤地层钻速预测模型。YASAR等<sup>[13]</sup>在实验室开展水泥砂浆钻进试验,研究发现随着钻进深度的增加,钻进速度逐渐下降。何明明<sup>[14]</sup>采用自主研发的旋切触探仪,开展旋切钻进参数与岩石力学参数关系研究,建立了岩体力学参数和岩体质量等级预测模型,提出现场快速获取岩石力学参数的智能方法。高红科等<sup>[15-16]</sup>利用研发的岩体数字钻进试验系统,开展注浆岩体数字钻进试验,提出围岩注浆强度的随钻评价方法。岳中文等<sup>[17-18]</sup>综合分析当前岩性随钻识别技术发展现状,研发了煤矿巷道液压锚杆钻机随钻参数系统,

得出随钻参数与岩石力学参数具有较强的相关性。

上述研究表明,钻进参数与岩石强度具有很强相关性,这为顶板岩层界面识别提供了依据。从现有的随钻设备来看,这些设备均朝下钻进,这不利于岩屑的排出<sup>[19]</sup>,而在巷道顶板锚固孔钻进时主要采用朝上钻进的方式。目前,对于巷道顶板岩层界面随钻自动化识别的研究工作相对较少。

针对上述问题,通过自主研发锚固孔钻进模拟装置,在实验室浇筑地层模型进行巷道顶板岩层钻进试验,并实时采集随钻参数,分析不同算法下各随钻参数对岩层界面的识别效果。最后,在2种典型地质条件下进行了试验验证,即煤岩界面随钻识别和复合顶板岩层界面随钻识别。

## 1 地层模型界面随钻识别试验

### 1.1 试验设备

自主设计的随钻试验装置如图1所示,该试验装置可以实时采集位移(采集频率25 Hz)、转速(采集频率25 Hz)、扭矩(采集频率10 Hz)和声压级(采集频率1 Hz)等参数。钻机底部磁铁吸力可达14 500 N,调节好钻机位置后,打开磁力开关可以固定钻机位置,防止钻进过程中钻机摇摆。扭矩传感器连接在B19六棱柱钻杆中间,转速传感器通过钻杆上的反光贴反射信号记录转速。岩样通过固定柱固定在重力加载板下方,重力加载板在重力作用下沿着导向柱向下滑动。钻头采用直径为30 mm的两翼型聚晶金刚石复合片(Polycrystalline Diamond Compact, PDC)锚杆钻头。

### 1.2 随钻参数采集

地层模型原材料为砂子(粒径小于3 mm)、黄土和42.5级普通硅酸盐水泥等,各层材料配比见表1。浇筑的地层模型尺寸为150 mm×150 mm×150 mm,如图2所示。该地层模型包含2个岩层

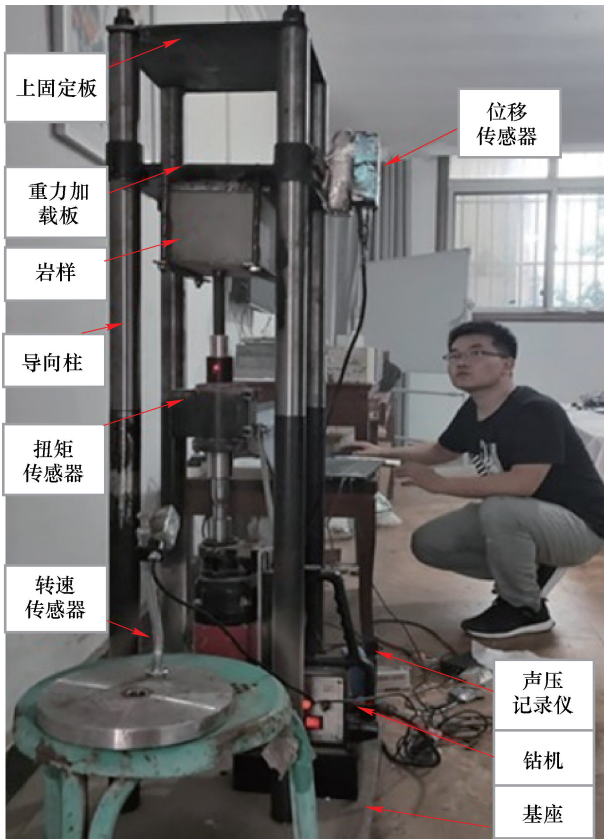


图 1 自主设计的随钻试验装置

Fig. 1 Self-designed experimental device for real-time acquisition of drilling parameters



图 2 浇筑的地层模型

Fig. 2 Poured stratum model

界面,1号岩层和3号岩层材料配比相同。将该地层模型放在常温条件下养护 28 d,1号岩层和3号岩层单轴抗压强度是 6.8 MPa,抗拉强度是 0.6 MPa,内聚力为 2.0 MPa。2号岩层单轴抗压强度、抗拉强度和内聚力分别为 2.8、0.2 和 1.3 MPa。采用自主设计的随钻装置进行钻进,实时采集钻进时的位移、转速、扭矩和声压级。

表 1 岩层材料配比

Table 1 Material ratio of formation samples

| 岩层编号 | 砂子     | 黄土       | 42.5 普通硅酸盐水泥 | 水      |
|------|--------|----------|--------------|--------|
| 1    | 533.33 | 755.56   | 1 185.19     |        |
| 2    | 200.00 | 1 569.83 | 558.46       | 444.44 |
| 3    | 533.33 | 755.56   | 1 185.19     |        |

首先,调试各数据采集传感器和数据采集系统,保障其能够正常工作;其次,将浇筑的地层模型固定在重力加载板下方;然后,调节钻机位置,使钻头对准试件中心;最后,打开钻机磁力开关和各传感器数据采集开关,开始地层模型钻进试验并实时采集钻进参数。整理地层模型钻进过程中采集的数据,如图 3 所示。

### 1.3 钻速获取方法

钻速是反映岩层特性的重要参数之一,钻速可由采集到的位移数据计算获得。假设  $t_i$  时刻对应的位移为  $L_i$ ,则传统计算钻速的方法如下:

$$V_0(t_i) = \frac{L_{i+1} - L_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (1)$$

因为实际位移数据中存在异常值,从传统钻速中难以快速识别出岩层界面处的响应信号。在此采用指数加权损失函数估计原始数据的趋势<sup>[20]</sup>,假设采集的原始位移数据样本数为  $n$ ,第  $m$  点的位移估计值为

$$L(m) = \frac{\sum_{i=1}^m L(i) (1 - \lambda)^{m-i}}{\sum_{i=1}^m (1 - \lambda)^{m-i}}, m = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中, $\lambda$  为平滑参数,取值为 0.05;  $(1 - \lambda)^{m-i}$  为权重; $L(i)$  和  $L(m)$  分别为实际采样点和被估计的点。

通过式(3)可以得到处理后的钻速。

$$V_2(t_{m_2}) = \frac{\sum_{m_1=1}^{m_2} V_1(t_{m_1}) (1 - \lambda)^{m_2-m_1}}{\sum_{m_1=1}^{m_2} (1 - \lambda)^{m_2-m_1}} \quad (3)$$

$$V_1(t_{m_1}) = \frac{L_{m_1+1} - L_{m_1}}{t_{m_1+1} - t_{m_1}} \quad (4)$$

处理原始位移数据得到钻速曲线如图 4 所示。由图 4 可知,相比于原始位移和传统钻速,处理后的位移和钻速更能反映钻进参数变化趋势。

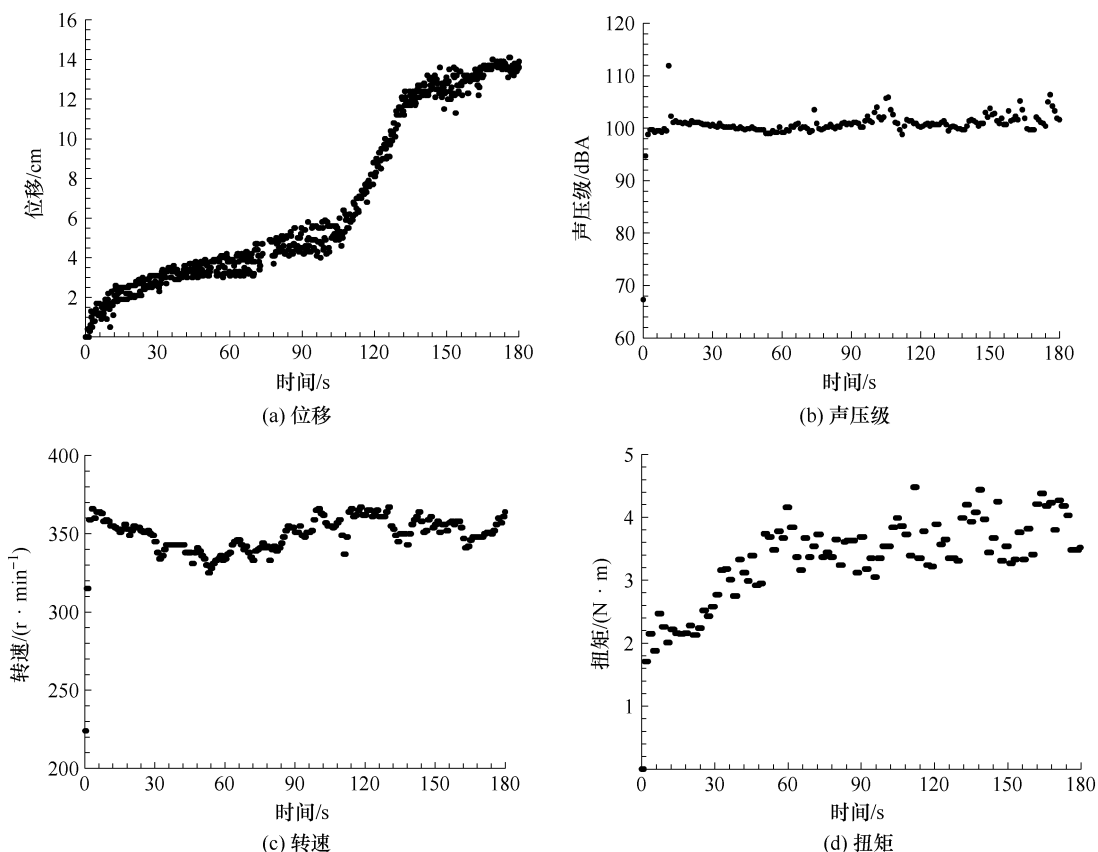


图3 地层模型钻进数据散点图

Fig. 3 Scatter plot of data from stratum model drilling

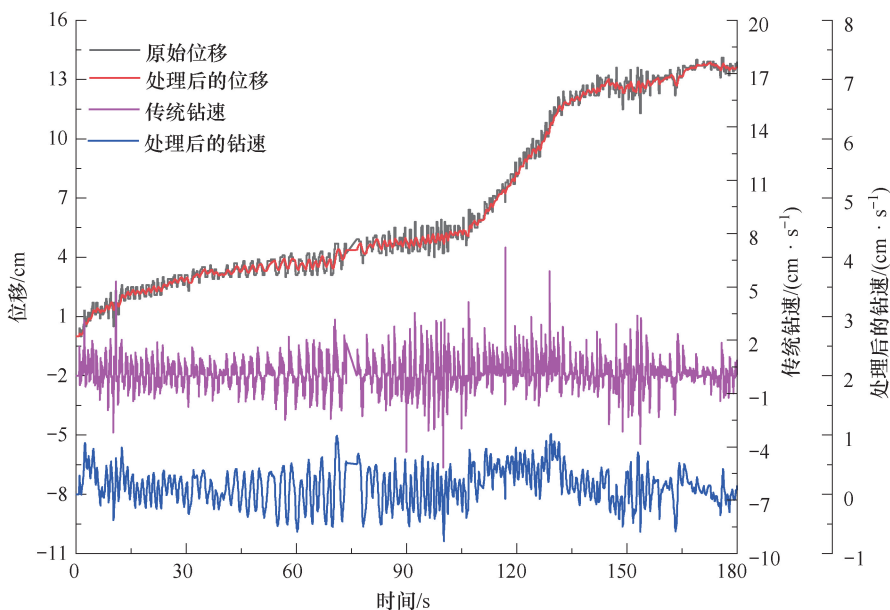


图4 数据处理前后曲线

Fig. 4 Curves before and after data processing

### 1.4 岩层界面自动识别

通过人工观察法,难以从钻速、转速、扭矩和声压级等曲线中快速识别岩层界面位置。为比较不同算法模型和钻进参数对岩层界面的识别效果,文

中采用3种算法:算法一是变点检测模型,主要参考 QIU 等<sup>[21]</sup>提出的变点检测步骤;算法二是基于 RStudio 软件的 Strucchange 模型<sup>[22]</sup>;算法三是决策树算法, RStudio 软件提供了 tree 包专门用于分类。

这些算法在统计学中已经发展成熟,但很少在岩层界面随钻识别中应用。

以岩层界面识别精度和识别所用时间 2 个指标来筛选最佳预测方法。3 种算法基于不同随钻参数的岩层界面识别结果如图 5 所示(不同颜色代表不同岩层),识别结果统计见表 2。由图 5 和表 2 可知,3 种算法以钻速为输入参数时,岩层界面识别结果相同,且相比于其他钻进参数,基于钻

速对岩层界面位置进行识别更准确,基于声压级对岩层界面位置的识别准确性次之,基于转速和扭矩对岩层界面位置的识别结果较差。以钻速作为输入参数时,变点检测模型用时 354 s,Strucchange 模型用时 95 s,决策树算法用时 2 s。综合比较可以得出,以钻速为指标,用决策树算法进行岩层界面识别是最佳选择。

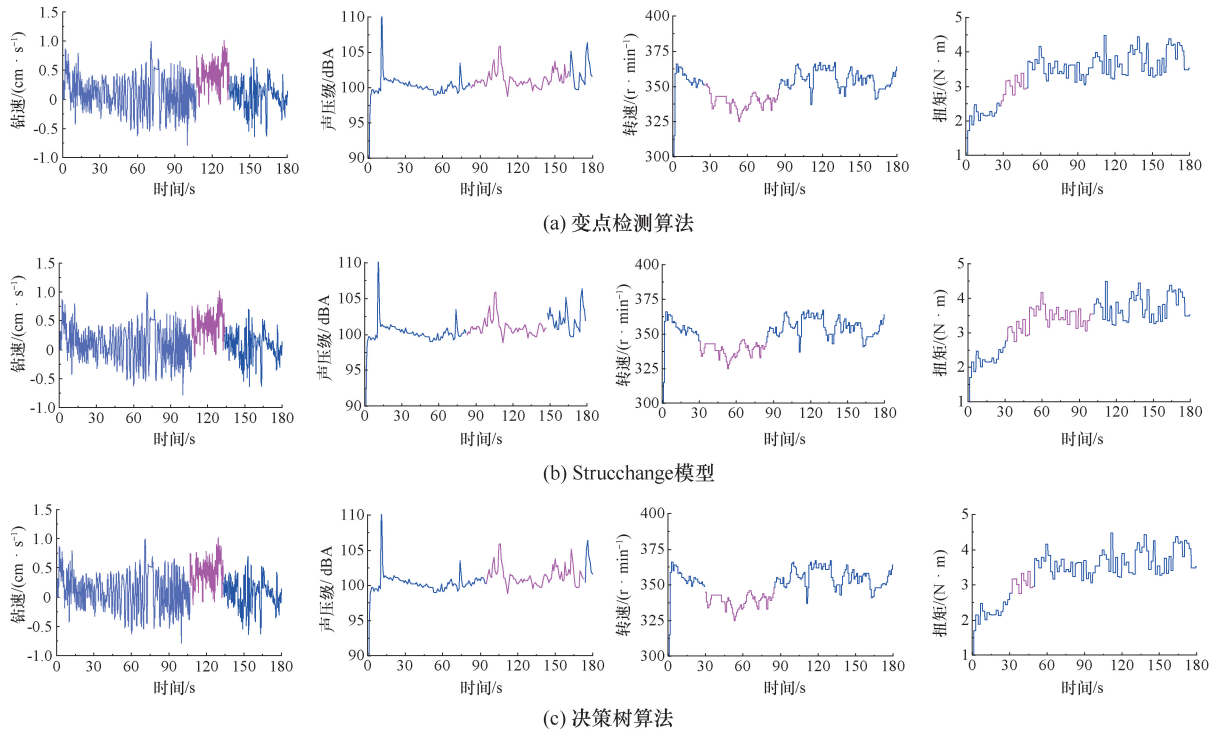


图 5 不同随钻参数和算法岩层界面识别结果

Fig. 5 Identification results of strata interface with different parameters and algorithms while drilling

表 2 不同参数和算法岩层界面识别结果统计

Table 2 Statistics of identification results of rock formations with different parameters and algorithms

| 方法                | 参数  | 界面 1/ | 误差 1/ | 界面 2/ | 误差 2/ | 用时/ |
|-------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-----|
|                   |     | cm    | cm    | cm    | cm    |     |
| 变点检测<br>算法        | 钻速  | 5.14  | 0.14  | 11.82 | 1.32  | 354 |
|                   | 声压级 | 4.84  | -0.16 | 12.95 | 2.45  | 3   |
|                   | 转速  | 2.63  | -2.37 | 4.78  | -5.72 | 246 |
|                   | 扭矩  | 2.81  | -2.19 | 3.51  | -6.99 | 27  |
| Strucchange<br>模型 | 钻速  | 5.14  | 0.14  | 11.82 | 1.32  | 95  |
|                   | 声压级 | 4.58  | -0.42 | 12.62 | 2.12  | 2   |
|                   | 转速  | 2.73  | -2.27 | 4.56  | -5.94 | 42  |
|                   | 扭矩  | 2.90  | -2.10 | 5.68  | -4.82 | 3   |
| 决策树<br>算法         | 钻速  | 5.14  | 0.14  | 11.82 | 1.32  | 2   |
|                   | 声压级 | 4.76  | -0.24 | 13.70 | 3.20  | 2   |
|                   | 转速  | 2.80  | -2.20 | 4.78  | -5.72 | 2   |
|                   | 扭矩  | 2.90  | -2.10 | 3.51  | -6.99 | 2   |

## 2 煤岩界面识别

### 2.1 试验点工程地质概况

汪家寨煤矿 P41106 回风巷埋深约 400 m,设计长度为 1 350 m,采用炮掘方式开挖,采用梯形断面和全锚索支护。煤层平均倾角和厚度分别为 15°和 7.0 m,巷道顶板上方煤层厚度在 3~4 m 之间,采用放顶煤开采,煤层上方为厚度 1.8~3.0 m 的泥质粉砂岩。在巷道掘进期间利用上述方法进行煤岩界面识别,依次判断顶板上方煤层厚度,为回采期间放顶煤开采工艺优化提供参考。

### 2.2 现场数据采集

在距回采侧煤壁约 1.5 m 处,沿掘进方向每隔 1 m 施工 1 个长度约 6 m 的钻孔,钻孔垂直于巷道顶板。根据实验室试验结果可知,相比于转速和扭矩,以钻速和声压级作为输入参数时对岩层界面识别准确性更高。因此,现场采集的随钻参数为声压

级和位移数据(可以计算得到钻速)。现场随钻参数采集时,锚杆钻机底部扎进底板约 10 cm,钻机底部周围要求平整,然后放置激光反射板。将位移传感器固定在锚杆钻机气腿上,声压记录仪通过通用串行总线(Universal Serial Bus,USB)直接与电脑相连。调节位移传感器和声压记录仪,确保其处于正常工作状态。当第 1 根钻杆钻进完成时,暂停数据的采集,第 2 根钻杆开始钻进时恢复数据采集。

现场采集了 5 个钻孔,然后通过钻孔成像仪观察煤岩界面位置,对比分析钻孔成像结果与笔者所提方法的识别结果。现场获取的钻进参数曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出,第 5 根和第 6 根钻杆钻进用时明显较长。钻头位移数据存在许多异常值,且在同种岩层中钻进时,位移曲线的斜率也在不断波动,在此采用式(2)对位移数据进行处理。

2.3 煤岩界面识别结果

根据采集的数据,分别以声压级和处理后的钻速数据为输入参数,用决策树算法识别煤岩界面。以 1 号钻孔数据为例,用钻速作为输入参数时得到的结果如图 7 所示。从结果中可知,  $t = 119.149$  s 时,钻头所处位置为煤岩界面,从采集数据中可知

此时刻对应的煤岩界面位置为 3.59 m。同样,用声压级作为输入参数,得到的煤岩界面位置为 2.97 m。通过钻孔成像观测,煤岩界面位置约位于 3.63 m。

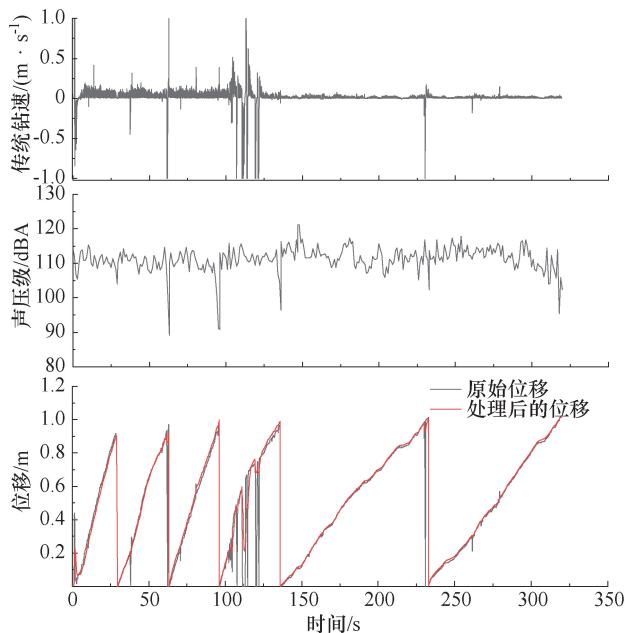


图 6 位移、声压级和钻速曲线

Fig. 6 The curves of displacement, sound pressure level, and penetration rate

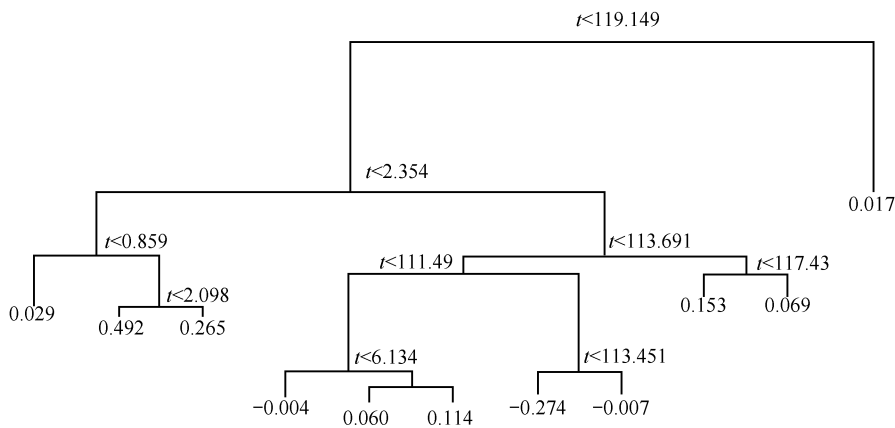


图 7 决策树算法下煤岩界面识别结果

Fig. 7 Identification result of coal-rock interface using decision tree algorithm

对于 1 号钻孔,不同参数下煤岩界面如图 8 所示,图 8 中不同颜色代表不同岩层。钻速中虽明显存在一些很大波动值,但对煤岩界面识别结果仍比声压级准确。

统计分析基于 5 个钻孔随钻参数识别的煤岩界面位置与钻孔成像得到的煤岩界面位置,结果见表 3。从表 3 可以看出,以声压级作为输入参数时,煤岩界面位置识别误差明显较大,平均误差达 0.38 m;以钻速作为输入参数时,煤岩界面位置识别平均误差为 0.04 m。

表 3 煤岩界面识别结果统计

Table 3 Statistics of coal-rock interface identification results

| 钻孔编号 | 钻孔成像结果/m | 输入参数  |      |
|------|----------|-------|------|
|      |          | 声压级/m | 钻速/m |
| 1    | 3.63     | 2.97  | 3.59 |
| 2    | 3.53     | 3.92  | 3.47 |
| 3    | 3.71     | 4.00  | 3.74 |
| 4    | 3.66     | 3.31  | 3.68 |
| 5    | 3.55     | 3.76  | 3.60 |

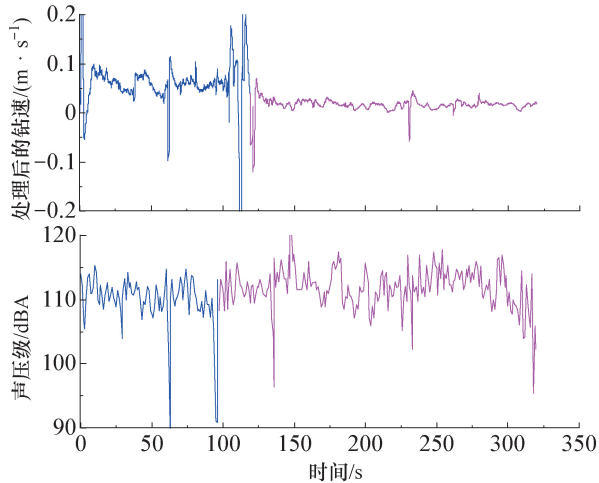


图 8 不同参数下煤岩界面识别结果

Fig. 8 Coal-rock interface identification results under different parameters

### 3 典型复合顶板岩层界面识别

#### 3.1 试验地点及复合顶板特征

老母坡矿 3 号煤层最大厚度为 1.95 m, 最小厚度为 1.4 m, 平均厚度为 1.8 m, 不含夹矸, 结构简单, 赋存基本稳定。该煤层为近水平煤层, 平均倾角为 4°, 普氏系数在 2~3 之间。3 号煤层顶板

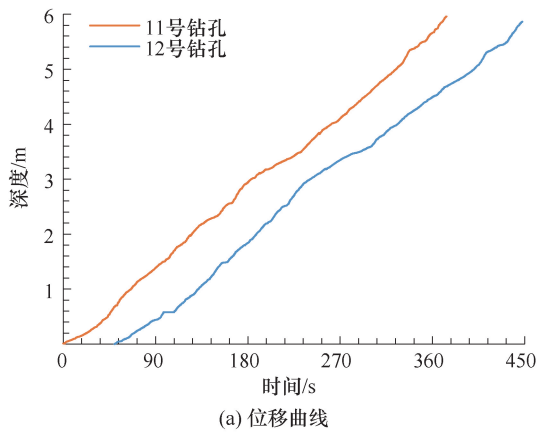
依次为炭质泥岩(0.45 m)、细粒砂岩(1.0 m)、砂质泥岩(2.3 m)、细粒砂岩(1.7 m)和泥岩(0.35 m), 属于典型的复合顶板岩层。

#### 3.2 钻孔方案及数据采集过程

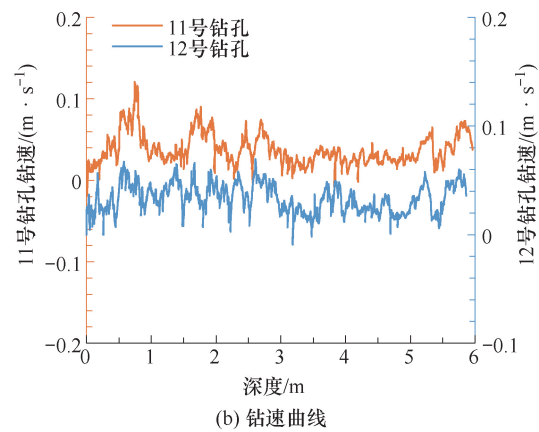
在巷道顶板施工 3 排钻孔, 每排 2 个钻孔, 总计 6 个钻孔, 每个钻孔钻进 6 根钻杆(钻杆长度为 1 m), 钻孔的间排距为 1 m。为方便描述, 对钻孔进行编号, 第 1 个数字表示该钻孔所处的排, 第 2 个数字表示钻孔在该排的位置。例如, 编号为 12 的钻孔表示第 1 排第 2 个钻孔。钻进期间采集位移和声压级参数, 钻进结束后, 用 CXK12(A) 矿用本安型钻孔成像仪进行钻孔成像。部分处理后的位移和钻速曲线如图 9 所示。

#### 3.3 岩层界面识别结果

以钻速为输入参数, 通过决策树算法得到的岩层界面自动识别结果如图 10 所示, 图 10 中不同颜色代表不同岩层。从图 10 中可以看出, 虽然 11 号钻孔和 12 号钻孔间距仅 1 m, 但 2 个钻孔处柱状图存在明显差别。对于 12 号钻孔的柱状图, 人眼观察法难以看出有明显岩层分界面。但从 2 个钻孔的岩层界面随钻识别结果看, 二者岩层界面随钻识别结果一致性较强。



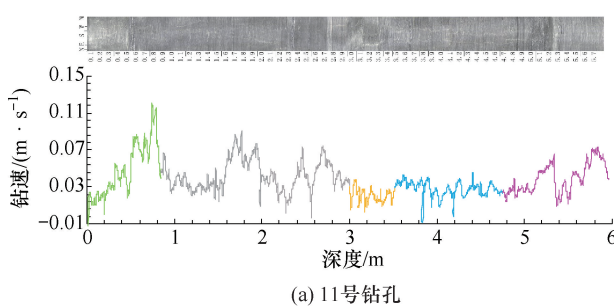
(a) 位移曲线



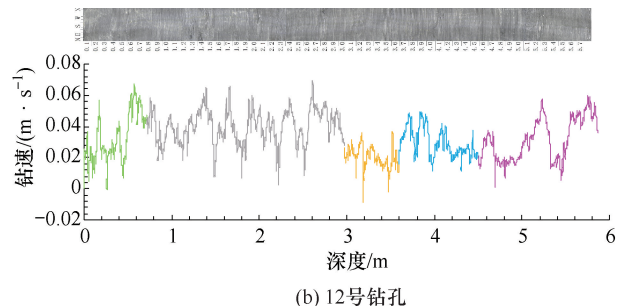
(b) 钻速曲线

图 9 处理后的位移和钻速曲线

Fig. 9 Displacement and penetration rate curves after processing



(a) 11号钻孔



(b) 12号钻孔

图 10 岩层界面自动识别结果

Fig. 10 Automatic identification result of rock layer interface

为进一步分析各岩层界面位置识别精度,统计分析6组钻孔数据。以钻孔成像为依据,人工确定各岩层界面位置。然后,统计分析岩层界面位置随钻识别结果与人工识别结果(表4)。

表4 各岩层界面位置识别统计结果

Table 4 Statistical results of identification of interface position of each rock layer m

| 钻孔编号 | 探测方法 | 界面1  | 界面2  | 界面3  | 界面4  | 界面5  |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 11   | 人工法  | 0.46 | —    | 2.73 | 3.68 | 4.78 |
|      | 随钻探测 | 0.84 | 2.06 | 3.00 | 3.52 | 4.75 |
| 12   | 人工法  | 0.43 | —    | 2.90 | 3.80 | 4.80 |
|      | 随钻探测 | 0.71 | 1.84 | 2.97 | 3.60 | 4.50 |
| 21   | 人工法  | 0.39 | —    | 2.60 | 3.46 | 5.17 |
|      | 随钻探测 | 0.83 | 1.91 | 2.93 | 3.35 | 4.35 |
| 22   | 人工法  | 0.35 | 1.68 | 3.15 | 3.86 | 4.83 |
|      | 随钻探测 | 0.68 | 1.88 | 3.14 | 3.71 | 4.73 |
| 31   | 人工法  | 0.35 | 2.33 | 3.02 | 3.96 | 4.85 |
|      | 随钻探测 | 0.68 | 2.39 | 2.95 | 3.75 | 4.71 |
| 32   | 人工法  | 0.33 | 2.38 | 3.15 | 3.52 | 4.94 |
|      | 随钻探测 | 0.81 | 2.29 | 3.08 | 3.71 | 4.83 |
| 平均误差 | 随钻探测 | 0.37 | 0.12 | 0.14 | 0.17 | 0.25 |

对于界面1,随钻探测法的平均误差达0.37 m。对于界面2,前3个钻孔人工法难以确定岩层界面位置,随钻探测法平均误差为0.12 m。对于界面3,从钻孔成像中可以明显看到该界面位置,随钻探测法结果平均误差为0.14 m。对于界面4,随钻探测法结果平均误差为0.17 m。对于界面5,11号钻孔和21号钻孔人工法确定的岩层界面位置与随钻探测结果偏差较大,其余钻孔偏差较小。

## 4 讨论

实验室试验朝上钻进锚固孔,采用煤矿常用的两翼型PDC钻头B19六棱柱钻杆。朝上钻进和朝下钻进原理相同,都是利用钻进参数的响应特征进行岩层特性识别,但2种钻进模式下钻进参数响应特征不同,以钻速为例,相比于朝下钻进,朝上钻进的钻速快、振幅小、振动频率慢。在数据处理方法方面,采用了指数加权损失函数处理原始数据,并提出了钻速处理方法。

已有的研究多聚焦于岩石力学参数、岩石类型随钻预测,采用的算法多为有监督机器学习法。本文主要聚焦于岩层界面随钻识别,采用的算法主要是统计学中无监督算法。相比于多数实验室研究,

文中除了在实验室进行试验外,还在2种典型煤矿地质条件进行测试,对岩层界面随钻识别推广应用具有一定促进作用。

理论上当钻机推力一定时,扭矩越大,转速越高。在扭矩一定情况下,当岩层强度增加至一定值时,切削深度极小,主要依靠钻头底部与孔底岩石摩擦做功,此时转速可能较大。相反,当岩层强度较低时,切削深度增加,转速反而会下降的情况。在同种岩层中钻进时,转速和扭矩的响应特征理论上不变,在岩层界面处,由于岩石力学性能差异,转速和扭矩的响应特征会发生突变,该突变特征为岩层界面识别提供了依据。

在不同应力水平或异常情况下,随钻参数会出现明显差别。当不同岩层处于同一区域时被认为受到的应力大小一样,因此,对物理力学性能不同的岩层进行岩层界面随钻识别是可行的。本文研究重点聚焦于巷道顶板岩层界面识别,通常认为锚固孔钻进深度范围内岩层应力相同,主要依据岩层物理力学性能差异进行岩层界面识别。当岩层受到不同应力大小作用时,应力会对岩层界面随钻识别效果产生影响。

理论上当不同岩层力学性能差异越大时,岩层界面识别的精度越高,这也是煤岩界面现场识别精度高的主要原因。实际钻进过程中,钻机稳定性、岩层各向异性等因素对岩层界面识别精度有很大影响,现场测试表明,单一钻进参数对复合顶板岩层界面识别精度明显变差。因此,研究多个随钻参数在不同影响因素下钻进响应特征,提出多参数岩层界面随钻识别方法,是下一步研究的主要方向。

## 5 结论

(1) 自主研制了随钻参数采集装置,可以实现位移、转速、扭矩和声压级的实时采集,为煤矿巷道顶板岩层特征随钻识别提供了数据基础。

(2) 采用指数加权损失函数处理位移数据得到钻速数据方法,可以更好地反映钻进参数变化趋势,且可以自动过滤异常值,为岩层界面随钻识别奠定了基础。

(3) 相比于变点检测模型和Strucchange模型,采用决策树算法岩层界面识别速度最快。相比于声压级、转速和扭矩,以钻速为输入参数,用决策树算法可以快速准确识别煤岩界面位置。现场试验结果表明,用该算法得到的煤岩界面位置平均误差为0.04 m;对于典型复合顶板岩层,岩层界面随钻识别准确性相对较低。

## 参考文献

- [1] 左建平,文金浩,刘德军,等.深部巷道等强支护控制理论[J].矿业科学学报,2021,6(2):148-159.  
ZUO Jianping, WEN Jinhao, LIU Dejun, et al. Control theory of uniform strength support in deep roadway[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(2): 148-159.
- [2] SAKSALA T, FOURMEAU M, KANE P A, et al. 3D finite elements modelling of percussive rock drilling: estimation of rate of penetration based on multiple impact simulations with a commercial drill bit[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 99: 55-63.
- [3] SAKSALA T. Numerical study of the influence of hydrostatic and confining pressure on percussive drilling of hard rock[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 76: 120-128.
- [4] ANEMANGELY M, RAMEZANZADEH A, MOHAMMADI BEHBOUD M. Geomechanical parameter estimation from mechanical specific energy using artificial intelligence[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 175: 407-429.
- [5] 刘少伟,付孟雄,张辉,等.煤巷顶板锚固孔钻进钻杆振动机理与特征分析[J].中国矿业大学学报,2016,45(5):893-900.  
LIU Shaowei, FU Mengxiong, ZHANG Hui, et al. Vibration mechanism and characteristics analysis of drill rod when drilling roof bolt hole[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(5): 893-900.
- [6] 刘少伟,罗亚飞,贾后省.煤巷顶板锚固孔钻进岩层界面能量响应特性研究[J].中国矿业大学学报,2018,47(1):88-96.  
LIU Shaowei, LUO Yafei, JIA Housheng. Energy response characteristics of rock interface under drilling of roof anchorage borehole in coal roadway[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 88-96.
- [7] 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.
- [8] 王琦,秦乾,高红科,等.基于数字钻探的岩石  $c-\varphi$  参数测试方法[J].煤炭学报,2019,44(3):916-923.  
WANG Qi, QIN Qian, GAO Hongke, et al. A testing method for rock  $c-\varphi$  parameter based on digital drilling test technology[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 916-923.
- [9] VARDHAN H, MURTHY C S N. An experimental investigation of jack hammer drill noise with special emphasis on drilling in rocks of different compressive strengths[J]. Noise Control Engineering Journal, 2007, 55(3): 282.
- [10] VARDHAN H, ADHIKARI G R, GOVINDA M. Estimating rock properties using sound levels produced during drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(3): 604-612.
- [11] KUMAR B R, VARDHAN H, GOVINDARAJ M. A new approach for estimation of properties of metamorphic rocks[J]. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2011, 3(2): 109.
- [12] 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.
- [13] YASAR E, RANJITH P G, VIETE D R. An experimental investigation into the drilling and physico-mechanical properties of a rock-like brittle material[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 76(3/4): 185-193.
- [14] 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.  
HE Mingming. Research on the prediction of rock mass mechanics characteristics based on the rotary penetration technique[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [15] 高红科,王琦,李术才,等.注浆岩体强度随钻评价试验研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(2):326-333.  
GAO Hongke, WANG Qi, LI Shucui, et al. Experimental study on the while-drilling evaluation of the strength of grouted rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(2): 326-333.
- [16] 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.
- [17] 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.  
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.
- [18] 岳中文,戴诗清,李杨,等. 煤巷液压锚杆钻机随钻参数采集系统及其应用[J]. *矿业科学学报*,2023,8(1): 66-73.  
YUE Zhongwen,DAI Shiqing,LI Yang,et al. The drilling parameter acquisition system of hydraulic anchor drilling rig in coal mine roadways and its application [J]. *Journal of Mining Science and Technology*,2023,8(1): 66-73.
- [19] LIU C C,ZHENG X G,WANG G,et al. Research on drilling response characteristics of two-wing PDC bit [J]. *Sustainability*,2020,12(1): 406.
- [20] QIU P H,ZI X M,ZOU C L. Nonparametric dynamic curve monitoring [J]. *Technometrics*,2018,60(3): 386-397.
- [21] QIU P H. *Introduction to Statistical Process Control* [M]. Boca Raton: CRC Press,2013.
- [22] ZEILEIS A, LEISCH F, HORNIK K, et al. Structural change: AnRPackage for testing for structural change in linear regression models [J]. *Journal of Statistical Software*,2002,7(2): 1-38.

(责任编辑:陈骏)