

中文引用格式:范超军,孙其旺,罗明坤,等. 受载煤岩随钻参数测定试验装置及耦合关系分析[J]. 中国安全科学学报,2025,35(8): 118-128.

英文引用格式:FAN Chaojun SUN Qiwang LUO Mingkun, et al. Development and coupling relationship analysis of downhole real-time identification experimental device for coal-rock drilling parameters under load[J]. China Safety Science Journal,2025,35(8):118-128.

受载煤岩随钻参数测定试验装置 及耦合关系分析*

范超军^{1,2}教授, 孙其旺^{1,2}, 罗明坤³, 张佳绩^{1,2}, 赖鑫峰^{1,2}

(1 辽宁工程技术大学 鄂尔多斯研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 017004; 2 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 3 山西潞安环保能源开发股份有限公司 通风事业部, 山西 长治 046031)

中图分类号:X936;TD353

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.08.1440

基金项目:国家自然科学基金资助(52174117); 辽宁工程技术大学鄂尔多斯研究院校地科技合作培育项目(YJY-XD-2024-A-009); 鄂尔多斯市科技计划资助项目(YF20250261); 鄂尔多斯市标志性创新团队项目(TD20240005)。

【摘要】 为解决煤矿采掘过程中围岩力学参数非均质和获取困难问题,利用自主研制受载煤岩随钻参数测定试验装置,实时感知岩层强度及结构;分析围压、钻速、转速和旋转扭矩对模拟岩石试样强度的影响,并对采集的随钻参数灰色关联度耦合分析;在受载条件下,通过钻进不同组合类型的分层试件,还原真实环境下钻进煤岩层的效果,验证随钻参数对试件抗压强度识别的准确性。结果表明:试件强度与围压呈正相关,旋转扭矩与钻进速度呈正相关。旋转速度不同时,试件强度基本不变。旋转扭矩、围压、钻进速度、旋转速度与抗压强度关联度分别为0.996、0.831、0.739和0.347。试件强度与旋转扭矩成线性关系。通过分析旋转扭矩曲线的变化特征,可以识别岩层强度,进而定位分界位置。

【关键词】 受载煤岩; 随钻参数; 试验装置; 灰色关联度; 分层试样; 分界面

Development and coupling relationship analysis of downhole real-time identification experimental device for coal-rock drilling parameters under load

FAN Chaojun^{1,2}, SUN Qiwang^{1,2}, LUO Mingkun³, ZHANG Jiaji^{1,2}, LAI Xinfeng^{1,2}

(1 Ordos Research Institute, Liaoning Technical University, Ordos Inner Mongolia 017004, China;

2 College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China;

3 Ventilation Division, Shanxi Lu'an Environmental Protection and Energy
Development Co., Ltd., Changzhi Shanxi 046031, China)

Abstract: Aiming at the problem of non-homogeneity and difficulty in obtaining the mechanical parameters of surrounding rock in the process of coal mining, the experimental device for determining the parameters of loaded coal rock with drilling was developed independently to realize the real-time perception of strength and structure of rock layer. The effects of circumferential pressure, drilling speed, rotational

speed and rotational torque on strength of simulated rock specimens were investigated and analyzed by coupling the gray correlation of collected parameters with drilling. Under loaded conditions, stratified specimens of different combinations of types were drilled in order to restore the actual effect of drilling into coal and rock seams in real environments, and to verify the accuracy of identification of compressive strength of specimens by the following drilling parameters. It was shown that the strength of the specimens was positively correlated with the circumferential pressure, rotating torque and drilling speed. The strength of the specimen remained almost constant when the rotational speed varied. The correlations between rotational torque, circumferential pressure, drilling speed, and rotational speed and compressive strength were 0.996, 0.831, 0.739, and 0.347, respectively. The strength of the specimen was linearly related to the rotational torque. By analyzing the features of change in the rotating torque curve, the strength of the rock formation can be identified and thus the location of the stratum boundary can be located.

Keywords: composite coal-rock; drilling parameters; test device; gray correlation degree; layered specimen; interface

0 引言

煤炭是我国的主体能源,开采过程中需要构建大量的巷道^[1-2]。这些巷道的围岩地质条件复杂,存在许多不明地质构造,巷道的安全性和稳定性面临挑战。为加固巷道,需要进行大量的锚杆和锚索钻孔作业,通过随钻参数测量,在钻探过程中实时获取围岩的力学参数,将地质体透明化,实时了解地质条件,有助于预防和应对地质灾害,优化采掘布局,提高煤炭资源的开采效率和安全性,降低开采成本。因此,研制受载煤岩随钻参数测定装置,实现对岩层强度及结构的实时感知,对煤矿安全开采和资源的高效利用具有重要意义^[3]。

在以往研究中,姚吉康等^[4]通过三轴压缩试验探究不同围压对华山花岗岩力学特性参数的影响,发现随着围压的增加,弹性模量 E 和峰值应变先是上升,随后趋于稳定。李庆辉等^[5]通过对比浅层和超深层砂岩,采用单轴压缩和三轴压缩试验,研究围压对砂岩力学特性参数及最终破坏模式的作用。刘双飞等^[6]采用真三轴加载与卸载试验方法,探究砂岩材料在变化的地应力和加载速率条件下的力学特性。董正东等^[7]利用多场耦合试验系统,研究锦屏大理岩在不同围压等级下的力学特性劣化机制。以上研究发现,围压可以改变岩石力学特性。

李占涛等^[8]开发1套振动试验系统,针对大理石、石灰石和混凝土等典型地质材料执行钻探试验。王少峰等^[9]通过钻探试验,创建1个包含随钻参数综合数据库。李忠华等^[10]设计1套钻杆扭矩测量系统,发现钻杆扭矩与煤岩强度之间呈现出明显的正比增长趋势。TEALE等^[11]利用钻进比能来建立

与岩石单轴抗压强度的关联。尤建平等^[12]开发1种煤矿井下导向钻探用的综合随钻测量数据采集系统。王喆等^[13]开发1套自动化系统,用以实时采集钻探作业中的各种参数,确立钻探压力、扭矩、钻头旋转速率和钻探速率之间的数学模型。岳中文等^[14]为煤矿井下巷道作业中的液压锚固钻机研制1套随钻参数监测系统。廉瑞等^[15]开发1个有限元的随钻探测模拟系统。以上研究发现随钻参数的监测和分析对于理解和预测煤岩的力学行为至关重要,但没有考虑围压对岩石力学特性的影响。

鉴于此,笔者拟采用自主搭建的微型钻进试验装置,对各种试样在不同围压下进行钻进试验和单轴压缩试验,分析受载作用下煤岩力学参数随钻识别变化特征,以期进一步提高煤矿井下实时识别地质异常区域的技术水平,保障煤矿安全稳定开采。

1 受载煤岩随钻参数测定试验装置研制

自主研制受载煤岩随钻参数测定试验装置,如图1所示。该试验装置包含推进机构、钻进机构、随钻参数采集系统及围压加载系统4个部分。受载煤岩随钻参数测定试验装置结构如图2所示。

1.1 推进机构

推进机构包含丝杆滑台、步进电机及可编程自动化控制器3部分。丝杆滑台的有效工作距离为1 m,滚珠丝杆的直径为20 mm,导程为5 mm,滑台水平、垂直负载均值 ≤ 200 kg,运行精度 ± 0.03 mm,控制工作台在进行直线运动过程中保持稳定、平衡。步进电机最大钻进速度10 m/min,输出力矩为

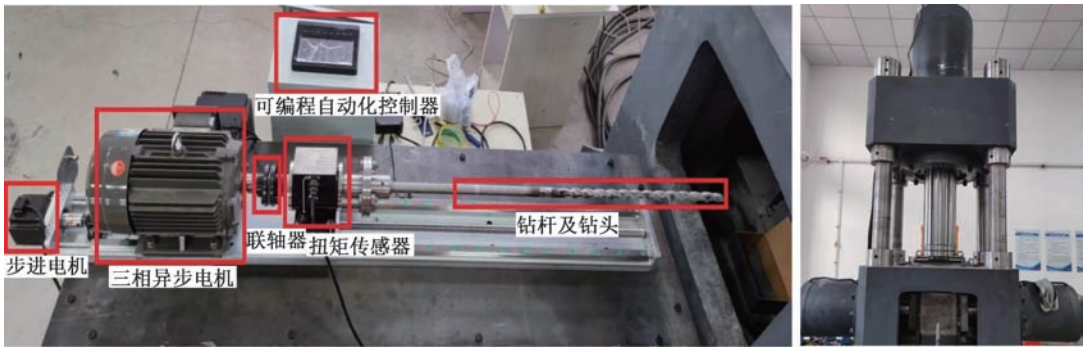


图 1 受载煤岩随钻参数测定试验装置

Fig. 1 Experimental device for measuring parameters of loaded coal rock while drilling

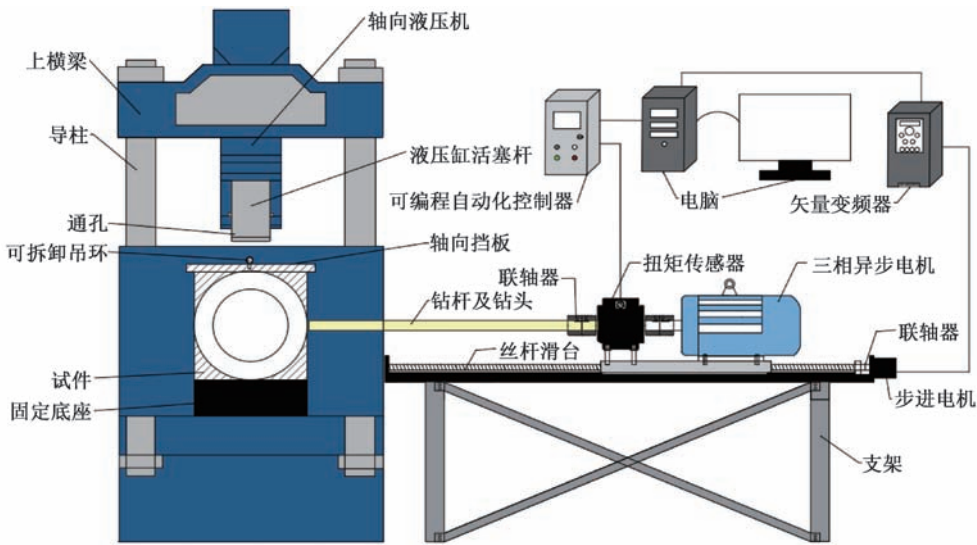


图 2 测量系统结构

Fig. 2 Measurement system structure

4.5 N·m, 为工作台提供推力的同时实现钻机在水平方向的前进和后退运动。编程自动化控制器通过编写数控程序, 实现步进电机的速度控制。

1.2 钻进机构

钻进机构包含三相异步电机、矢量变频器、刚性联轴器、钻杆及钻头部分。三相异步电机的额定转速 945 r/min, 额定旋转扭矩 15.1 N·m。矢量变频器可以实现将 220 V 电压到 380 V 的电压转变。试验采用 Φ28 mm 的麻花钻头, 钻杆长度为 70 cm。

1.3 随钻参数采集系统

数据采集系统主要由旋转扭矩传感器、拉绳式位移传感器及无纸记录仪等部分组成。旋转扭矩传感器支持多种标准信号输出, 包括 4~20 mA, 脉冲方波和 1~5 V 等。拉绳式位移传感器采集钻机的钻进位移。无纸记录仪, 可实时将数据传输至电脑并进行动态显示, 设置数据采集周期为 1 s。

1.4 围压加载系统

围压加载系统主要由控制系统、压力室和加荷系统组成, 用于模拟煤岩在地下的赋存条件。压力室可放入长×宽×高为 300 mm×300 mm×300 mm 的模拟试样。通过液压加载, 用油泵将液压油注入密闭的液压缸, 液压油通过活塞杆传递压力至试件周围。在试件左右及上下方向加载, 而前后方向不加载, 空间用于钻进, 应力加载方式如图 3 所示。

2 受载煤岩随钻参数测定试验

2.1 受载煤岩随钻参数测定试件制备

利用水泥砂浆制造模拟煤岩试样, 主要原料为河砂、水泥和水。根据《砌筑砂浆配合比设计规程》(JGJ/98—1996), 制备 7 种强度 (5、7.5、10、15、20、25、30 MPa) 的混凝土试件, 记为 M5、M7.5、M10、M15、M20、M25 和 M30, 每种强度制作 4 块 300 mm×



图 3 应力加载方式
Fig. 3 Stress loading method

300 mm×300 mm 的试件,用于室内钻进试验;3 块 50 mm×50 mm×100 mm 的标准混凝土试件,用于单轴抗压强度测定,试件材料配比和抗压强度见表 1。

在试样的制作过程中,需要特别注意的关键点包括:①确保河砂按要求过筛以去除泥砂中的较大石块和杂质;②在装模时需要在模具内侧涂抹毛虫油以便脱模;③使用震动器震动密实砂浆,防止砂浆内部出现孔隙。混凝土试件如图 4 所示。

表 1 混凝土试件材料配比

Table 1 Material ratio of concrete specimen				
试样类型	河砂/ (kg·m ⁻³)	水/ (kg·m ⁻³)	水泥/ (kg·m ⁻³)	抗压强度/ MPa
M5	1 450	310	210	3. 49
M7. 5	1 450	310	230	4. 73
M10	1 450	310	275	7. 25
M15	1 450	310	320	8. 20
M20	1 450	310	360	11. 42
M25	1 450	310	400	12. 18
M30	1 450	310	440	13. 54



图 4 混凝土试件
Fig. 4 Concrete specimens

2.2 受载煤岩随钻参数测定试验方案

对 7 种强度的岩石试件进行钻进试验,在试验过程中,改变围压、钻进速度和旋转速度等参数,得到在不同钻进条件下的随钻参数。具体试验方案见表 2。

表 2 钻进试验方案

Table 2 Drilling experiment scheme				
编号	试件类型	钻进速度/ (mm·min ⁻¹)	旋转速度/ (r·min ⁻¹)	围压/ MPa
1	M5	60	300	2
2		60	350	2
3		80	350	2
4		80	350	4
5	M7. 5	60	300	2
6		60	350	2
7		80	350	2
8		80	350	4
9	M10	60	300	3
10		60	350	3
11		80	350	3
12		80	350	5
13	M15	60	300	3
14		60	350	3
15		80	350	3
16		80	350	5
17	M20	60	300	4
18		60	350	4
19		80	350	4
20		80	350	7
21	M25	60	300	4
22		60	350	4
23		80	350	4
24		80	350	7
25	M30	60	300	4
26		60	350	4
27		80	350	4
28		80	350	7

3 随钻参数耦合关系分析

3.1 钻削破岩过程中受力理论分析

3.1.1 钻头切削齿受力分析

分析梅花钻头破岩过程受力状态,结果如图 5 所示,图 5 中,钻削破岩过程可近似为轴向侵入与旋转切削 2 个动作的复合效果,表示为:

$$\begin{cases} F_s = P_1 \sin(\gamma + \beta) + P_3 \\ F_c = P_1 \cos(\gamma + \beta) + \mu_1 P_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_s 为轴向侵入煤岩对底部的力,N; P_1 为煤岩斜面对钻头切削齿作用力,N; γ 为钻头切削齿倾角,(°); β 为 P_1 与斜面法线的夹角, $\beta = \arctan \mu_1$, (°); P_3 为钻孔底部煤岩对钻头的正向压力,N; F_c 为旋转切削对底部的力,N; μ_1 为煤岩底部与钻头切削齿的摩擦因数。

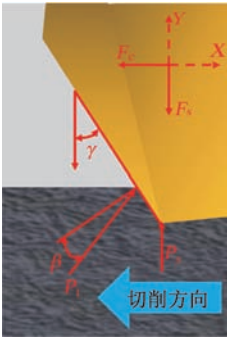


图5 破岩过程中麻花钻头受力分析

Fig. 5 Force analysis of spiral bit in rock breaking process

在钻头的切削齿与煤岩接触的界面上,存在正压力和摩擦力。如图6所示。

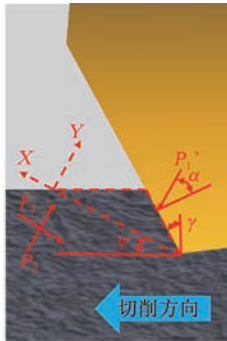


图6 剪切体受力分析

Fig. 6 Force analysis of shear body

当煤岩处于破碎前的临界状态时,根据剪切面上 \$X\$ 和 \$Y\$ 这2个方向的受力平衡条件,可得力平衡方程:

$$\begin{cases} P_4 \sin(\frac{\pi}{2} - \gamma - \psi - \alpha) - F_2 = 0, \sum X = 0 \\ P_2 - P_4 \cos(\frac{\pi}{2} - \gamma - \psi - \alpha) = 0, \sum Y = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: \$P_4\$ 为 \$P_2\$ 与 \$F_2\$ 的合力的反作用力, N; \$\psi\$ 为剪切面与切削方向的夹角, (\$^\circ\$); \$\alpha\$ 为摩擦角, (\$^\circ\$); \$F_2\$ 为剪切反作用力, N; \$P_2\$ 为煤岩体的反作用力, N。

煤岩斜面对麻花钻头反作用力表示为:

$$P_4 = \frac{cb_1 v \cos \varphi}{n \cos(\gamma + \varphi + \alpha + \psi) \cos \psi} \quad (3)$$

式中: \$c\$ 为黏聚力, kPa; \$b_1\$ 为切削齿刃宽, m; \$v\$ 为钻进速度, m/s; \$n\$ 为旋转速度, r/min; \$\varphi\$ 为内摩擦角, (\$^\circ\$);

钻头切削齿对煤岩正压力如下:

$$P_3 = (\sigma_c + \sigma_m) S_a \quad (4)$$

式中: \$\sigma_c\$ 为试件强度, MPa; \$\sigma_m\$ 为轴向应力, MPa;

\$S_a\$ 为切削齿底部与煤岩的接触面积, m²。

将式(3)、式(4)代入式(1), 由于麻花钻头表面很光滑, \$\mu_1\$ 值非常小, 假设 \$\mu_1 = 0\$。钻头切削齿切削过程中的受力分析如下:

$$\begin{cases} F_s = \frac{cb_1 v \cos \varphi \sin(\gamma + \beta)}{n \cos(\gamma + \varphi + \alpha + \psi) \cos \psi} + (\sigma_c + \sigma_m) S_a \\ F_c = \frac{cb_1 v \cos \varphi \cos(\gamma + \beta)}{n \cos(\gamma + \varphi + \alpha + \psi) \cos \psi} \end{cases} \quad (5)$$

3.1.2 钻头整体受力分析

图7为麻花钻头受钻孔壁施加压力, 钻头旋转切削受到的扭矩主要为:

$$M_c = F_c D \quad (6)$$

$$M_f = \frac{1}{4} \mu_2 \int_s \sigma_n D ds = \frac{1}{2} \mu_2 \sigma_n s \quad (7)$$

$$M_b = M_c + M_f \quad (8)$$

式中: \$M_c\$ 为旋切力产生的扭矩, N·m; \$M_f\$ 为径向应力产生的摩擦扭矩, N·m; \$D\$ 为钻头直径, m; \$\mu_2\$ 为煤岩对钻头周壁摩擦因数; \$\sigma_n\$ 为径向应力, MPa; \$s\$ 为钻头侧面与钻孔壁面之间的接触面积, m²; \$M_b\$ 为钻头侧面在旋转切削过程中受到的总扭矩, N·m。

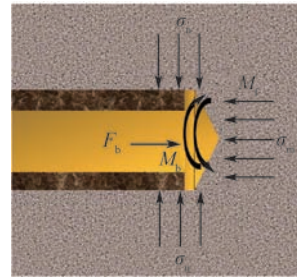


图7 麻花钻头受钻孔壁施加压力

Fig. 7 Spiral bit subjected to pressure on the drilling wall

将式(5)一式(7)代入式(8), 得:

$$M_b = \frac{cb_1 v D \cos \varphi \cos(\gamma + \beta)}{n \cos(\gamma + \varphi + \alpha + \psi) \cos \psi} + \frac{1}{2} \mu_2 \sigma_n s \quad (9)$$

由于麻花钻头有2个切削刃, 根据式(5), 将钻头轴向受到的压力表示:

$$F_b = 2F_s = \frac{2cb_1 v \cos \varphi \sin(\gamma + \beta)}{n \cos(\gamma + \varphi + \alpha + \psi) \cos \psi} + 2(\sigma_c + \sigma_m) S_a \quad (10)$$

式中 \$F_b\$ 为钻头轴向受到的压力, N。

由式(9)、式(10)可知: 围压会影响钻头扭矩 \$M_b\$ 与钻头轴向受到的压力 \$F_b\$。其中, 扭矩 \$M_b\$ 主要

受径向应力 σ_n 的影响, 钻头轴向受到的压力 F_b 主要受轴向应力 σ_m 的影响。

将式(10)代入式(9), 得到 M_b 与 F_b 的关系式:

$$M_b = \frac{F_b D}{2 \tan(\gamma + \beta)} - \frac{(\sigma_c + \sigma_m) S_a D}{\tan(\gamma + \beta)} + \frac{1}{2} \mu_2 \sigma_n D s \tag{11}$$

综上, 旋转扭矩与试件强度、围压、钻进速度成正相关, 旋转速度对旋转扭矩的影响较小。

3.2 钻进速度、旋转速度与时间的关系

对试样钻孔, 监测钻进过程中的随钻参数。钻进速度、旋转速度随时间变化曲线如图 8 所示。

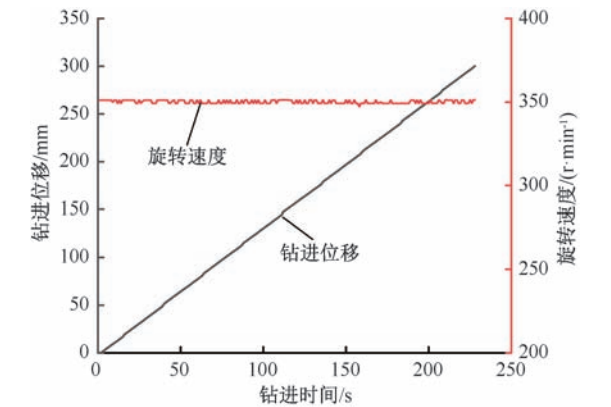


图 8 钻进速度、旋转速度随时间变化曲线
Fig. 8 Curves of drilling and rotation speed changing with time

由图 8 可知: 在 2 s 时钻进过程开始, 钻进位移为 0 mm, 227 s 时试验完成, 位移为 300 mm。该过程中钻进速度(曲线斜率)基本保持不变, 钻进速度为 80 mm/min。整个过程旋转速度波动非常小, 维持在 350 r/min 附近。由此可知: 试验装置系统可以保持“恒转速-恒钻速”的钻进控制方式。

3.3 试件强度对旋转扭矩的影响

不同强度试件旋转扭矩随钻进深度变化曲线如图 9 所示, 由图 9 可知: 当麻花钻头钻进不同强度的混凝土试件时, M30 混凝土试件的扭矩值明显大于 M25, M25 混凝土试件的扭矩值大于 M20, 即混凝土试件的强度越大, 钻进过程中的扭矩也越大。

3.4 围压对旋转扭矩的影响

不同围压下旋转扭矩随钻进深度变化曲线如图 10 所示, 由图 10 可知: 在保持钻进速度及旋转速度相同, 只改变施加在混凝土试件上的围压, 在施加不同围压的混凝土试件上采集到的旋转扭矩值存在差异, 具体表现为对混凝土试件施加的围压越大, 对

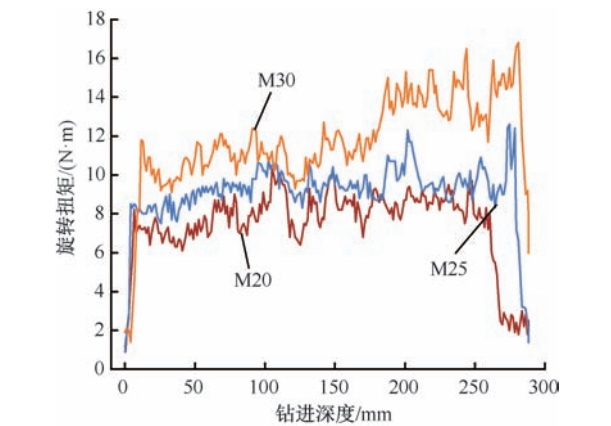


图 9 不同强度试件旋转扭矩随钻进深度变化曲线
Fig. 9 Variation curve of rotation torque of specimens with different strength with drilling depth

应的旋转扭矩值越高。由此可知: 钻进过程中围压会对旋转扭矩值产生影响。

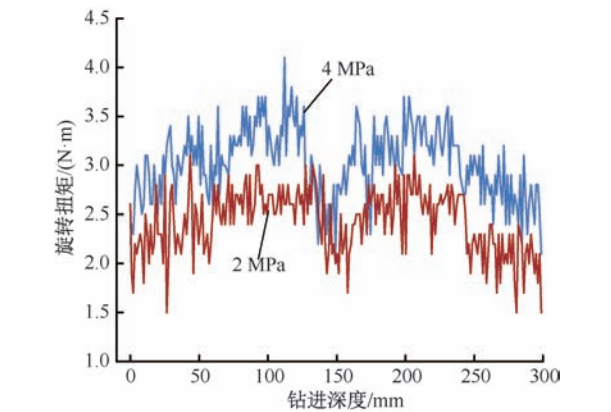


图 10 不同围压下旋转扭矩随钻进深度变化曲线
Fig. 10 Variation curve of rotary torque with drilling depth under different confining pressures

3.5 钻进速度对旋转扭矩的影响

不同钻进速度下旋转扭矩随钻进深度变化曲线如图 11 所示, 由图 11 可知: 将钻进速度分别设置为 60、80 mm/min 时, 所测得的旋转扭矩不同。表现为: 钻进速度增加时, 相应的扭矩也会增大。同时, 旋转扭矩随钻进深度的加深而逐渐上升, 这主要是因为钻头在钻入混凝土试件的过程中, 位置越深, 与钻孔周壁的摩擦力也越强, 从而引起旋转扭矩的增加。

3.6 旋转速度对旋转扭矩的影响

不同旋转速度下旋转扭矩随钻进深度变化曲线如图 12 所示, 由图 12 可知: 在 300、350 r/min 对应的旋转速度下, 旋转扭矩变化几乎一致, 不同旋转速度下对应的扭矩均值也基本相同, 无明显差异, 这表

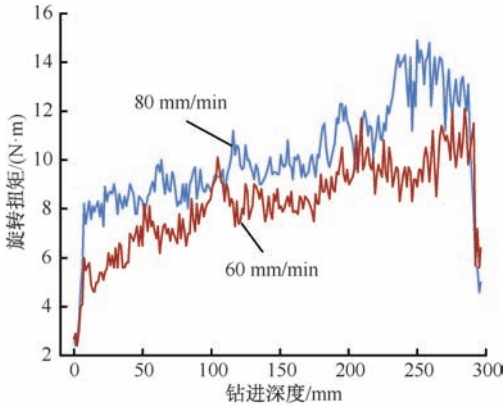


图 11 不同钻进速度下旋转扭矩随钻进深度变化曲线
Fig. 11 Variation curve of rotary torque with drilling depth at different drilling speeds

明转速变化对旋转扭矩影响较小。

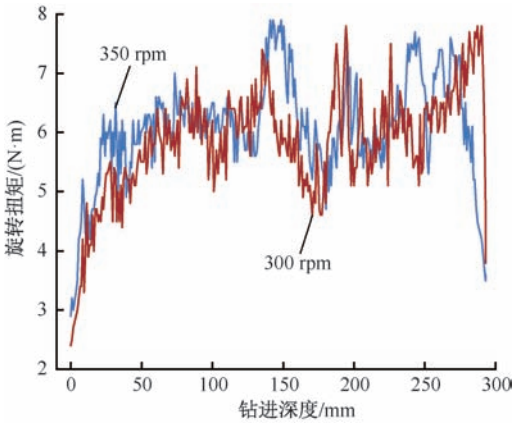


图 12 不同旋转速度下旋转扭矩随钻进深度变化曲线
Fig. 12 Variation curve of rotation torque with drilling depth at different rotation speeds

上述试验结果与理论预测相一致,证明该理论模型在当前条件下具备一定的适用性。

3.7 基于灰色关联度的随钻参数耦合分析

为降低评价项数据的多样性和不同评价项数据量纲不同对指标筛选造成的影响,并确保不同评价项间的对比有效,对数据作标准化、归一化处理。归一化公式为:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}}{\max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} - \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}} \quad (12)$$

$$y_{ij} = \frac{\max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} - \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}} \quad (13)$$

式中: $\{u_0(i)\}$ 为状态变量; $\{u_0(i)\}$ 为归一化值; $i \in [0, m]$, m 为项数; $j \in [0, n]$, n 为评价项容量; $\{u_0(i)\} \in [0, 1]$ 。

式(12)用于评价项数据取值越大对评估效果越好时,式(13)用于评价项数据,取值越小,评估效果越好。

计算评价项关联度,母序列表示为:

$$\{u_0(i)\} = \{u_0(1), u_0(2), \dots, u_0(m)\} \quad (14)$$

子序列表示为:

$$\{v_j(i)\} = \{v_j(1), v_j(2), \dots, v_j(m)\} \quad (15)$$

计算得到 i 点处 $\{u_0(i)\}$ 与 $\{v_j(i)\}$ 的关联度值:

$$\xi_{0j}i = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_{0j}i + \rho\Delta_{\max}} \quad (16)$$

$$\Delta_{0j}i = |u_0(i) - v_j(i)| \quad (17)$$

$$\Delta_{\min} = \min_j \min_i |u_0(i) - v_j(i)| \quad (18)$$

$$\Delta_{\max} = \max_j \max_i |u_0(i) - v_j(i)| \quad (19)$$

式中: ξ_{0j} 为计算得到的在 i 点处 $\{u_0(i)\}$ 与 $\Delta_{0j}i$ 的关联系数; $\Delta_{0j}i$ 为在 i 点处 $\{u_0(i)\}$ 与 $\{v_j(i)\}$ 的绝对差, ρ 为分辨系数,一般取 0.5; $\Delta_{\min}$ 为两级最小差; $\Delta_{\max}$ 为两级最大差。

综合评价项中每一点处的关联系数:

$$r_{0j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_{0j}i \quad (20)$$

式中 r_{0j} 为 $\{u_0(i)\}$ 与 $\{v_j(i)\}$ 的相关系数。

采用灰色关联度衡量数据序列之间的相互联系程度。选择抗压强度作为系统特征数据序列,评估旋转扭矩、钻进速度、旋转速度和围压等参数与旋转扭矩的灰色关联度,旨在确定哪些参数对抗压强度的变化贡献较大。

因旋转速度对旋转扭矩几乎没有影响,所以将表 2 中 7 种强度的试验方案(共 28 个)均去除第 1 个方案,得到 21 组旋转扭矩、围压等数据,针对旋转扭矩、钻进速度、旋转速度和围压 4 个评价项,以及 21 项数据进行灰色关联度分析,将抗压强度作为母序列,分析 4 个评价项旋转扭矩、钻进速度、旋转速度及围压与抗压强度的关联关系。进行灰色关联度分析时,设定分辨系数为 0.5,并应用关联系数公式计算出 21 个关联度数值,其关联系数结果如图 13 所示。根据 21 项关联系数值,计算出 4 个评价项与母序列的关联度值,值越接近 1,表示与母序列的相关性越强。旋转扭矩、围压、钻进速度、旋转速度与抗压强度的关联度如图 14 所示,针对 4 个评价项,旋转扭矩的综合评价最高,关联度为 0.996,其次是围压的关联度为 0.831,再次是钻进速度关联度为 0.739,旋转速度关联度为 0.347。

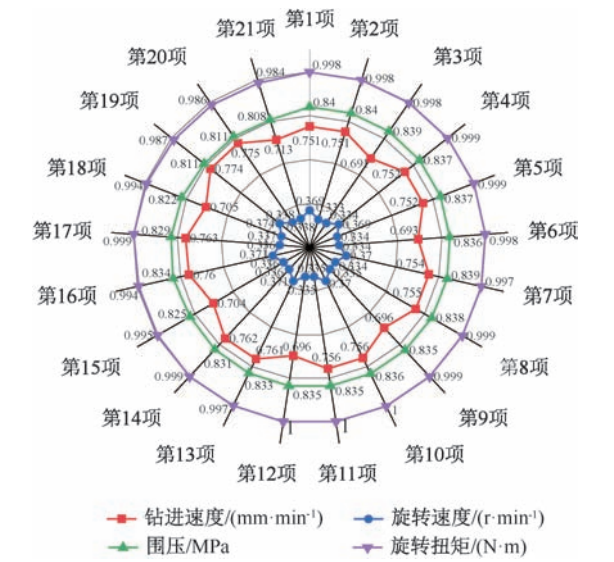


图 13 21 项数据的关联系数结果

Fig. 13 Correlation coefficient results of 21 data

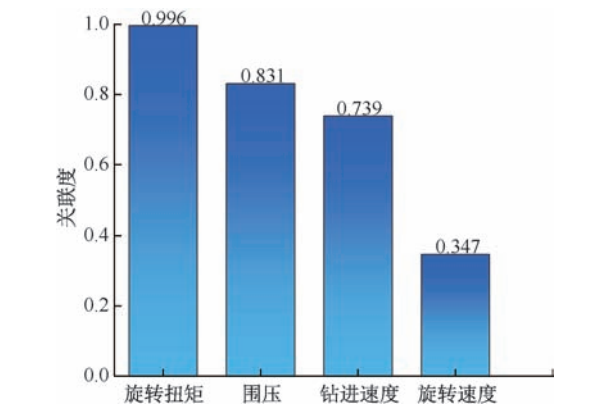


图 14 旋转扭矩、围压、钻进速度、旋转速度与抗压强度的关联度

Fig. 14 Rotation torque, confining pressure, drilling speed, rotary speed Correlation with compressive strength

根据上述分析可得出,旋转扭矩对抗压强度的影响在所有因素中最为显著,明显大于围压、钻进速度和旋转速度的影响,表明旋转扭矩与抗压强度关联度最高,围压和钻进速度次之。

4 岩层分界面识别

当单一强度试样变为组合分层试样后,钻头在不同岩层钻进过程中,会使得随钻参数在岩层分界面随位移显著变化,岩层间的强度差越大,曲线的波动也越剧烈。根据钻进过程中参数平均值突变,可以判断岩层的分界位置和各层的强度。因此,制备 4 种组合分层试样,用于评估岩层分界面识别的准确性,试件类型见表 3,分层试件如图 15 所示。

表 3 分层钻进试验方案				
Table 3 Layered drilling experiment scheme				
编号	试件类型	钻进速度/ (mm·min ⁻¹)	旋转速度/ (r·min ⁻¹)	围压/ MPa
1	M20+M10+M30	80	350	4
2	M15+M7.5+M25	80	350	4
3	M10+M5+M20	80	350	4
4	M15+M5+M30	80	350	4

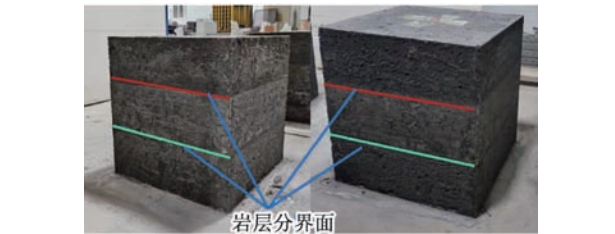


图 15 分层试样

Fig. 15 Layered specimen

钻进过程中,钻进速度和旋转速度分别设置为 80 mm/min 和 350r/min, M20+M10+M30 组合下,旋转扭矩在 7.5 ~ 94.7 mm 之间保持稳定,均值为 7.83 N·m。但在 94.7 mm 位置,扭矩突降。经过 4 mm 的位移后,旋转扭矩在 98.7 ~ 191.7 mm 之间保持稳定,均值为 5.56 N·m,在 191.7 mm 位置,扭矩突增。经过大约 3 mm 的钻进位移后,旋转扭矩在 194.7 ~ 300 mm 之间保持稳定,均值为 12.02 N·m。根据实际测量试样,发现试样的分界面位置正是在 93 ~ 99 mm、191 ~ 195 mm。因此,试验装置进行钻进时,通过旋转扭矩均值和变化曲线预测岩石强度及分界面位置,结果如图 16a 所示。M15+M7.5+M25 组合下,前 2 层虽然强度存在差异,但在 M7.5 钻进时的前半部分扭矩曲线与 M15 的扭矩曲线变化较小,岩层分界面位置识别效果不太明显,如图 16b 所示。

M10+M5+M20 组合下,在 M10 岩层中钻进时,扭矩均值稳定在 6.14 N·m,突变发生在 91.3 ~ 96.4 mm,随后钻进参数趋于稳定,扭矩均值减小为 3.45 N·m,然后在 96.4 ~ 197.2 mm 之间保持稳定,经过 2 mm 后,扭矩均值为 8.37 N·m,表明 91.3 ~ 96.4 mm、199.2 ~ 202.3 mm 内存在分界面。根据实际测量试样,发现试样的分界面位置正是在 96 ~ 100 mm、197 ~ 200.4 mm 之间,如图 16c 所示。

而在 M15+M5+M30 组合下,曲线在 M15 岩层中钻进时,扭矩均值稳定在 6.84 N·m,突变发生在 91 ~ 101.1 mm,随后钻进参数再次趋于稳定,扭矩均值减小为 3.68 N·m,然后在 101.1 ~ 189 mm 之间保持稳定,突变范围在 189 ~ 195.4 mm 表明

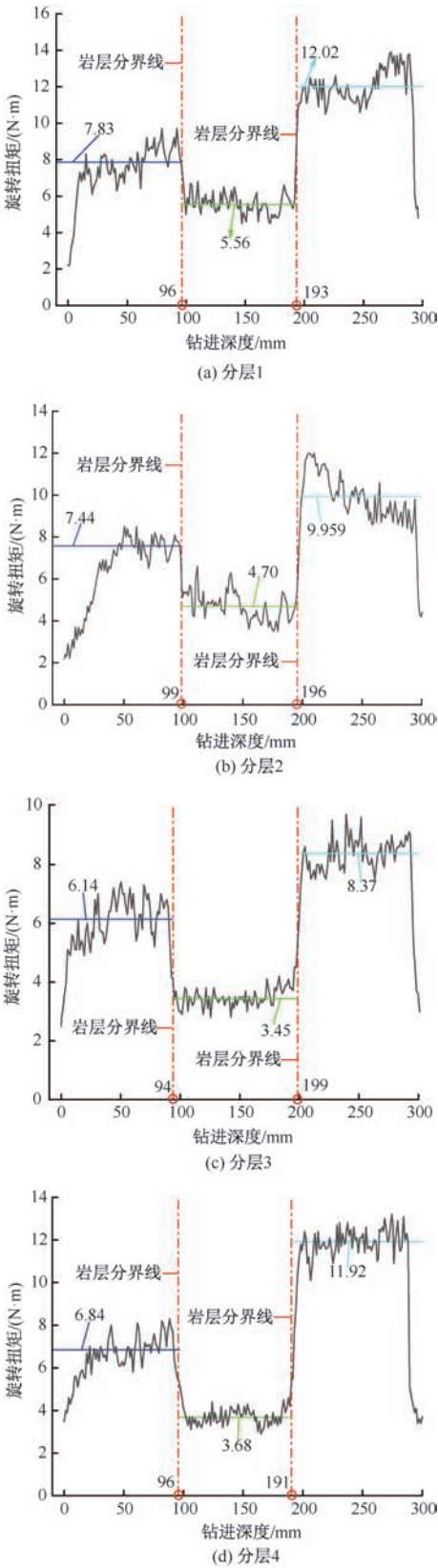


图 16 不同组合分层试样旋转扭矩随钻进位移变化曲线
Fig. 16 Variation curve of rotation torque of different combinations of layered samples with drilling displacement

91~101.1、189~195.4 mm 内存在分界面。实测试样分界面位置分别在 96~100、190~194 mm 之间,由此可知:钻进参数变化可以实现岩层分界预测,但预测分界面厚度仍比较困难,因为系统的鲁棒性差,控制系统存在误差导致的,如图 16d 所示。

试件强度变化量与界面响应时间关系曲线如图 17 所示,随着分界面两侧试件抗压强度变化量增大,响应时间越长,在抗压强度变化量达到 6.4 MPa 以上时,响应时间不再增加,趋于稳定。

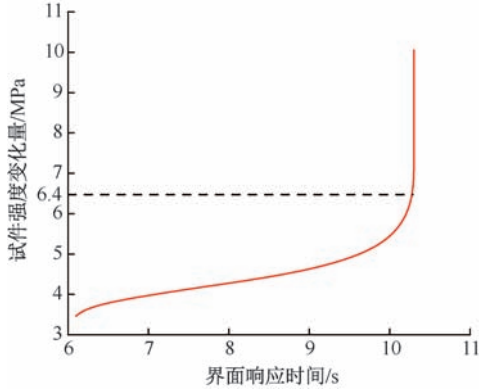


图 17 试件强度变化量与界面响应时间关系曲线
Fig. 17 Relationship between the strength variation of the specimen and the interface response time

试件强度与平均扭矩关系曲线如图 18 所示。线性拟合扭矩值与抗压强度关系进行,得到单一试件的拟合方程为 $y=1.252x+0.259$, $R^2=0.934$, 分层试件的拟合方程为 $y=1.256x+0.545$, $R^2=0.958$, 可见:扭矩值与试件强度均成一次线性关系。

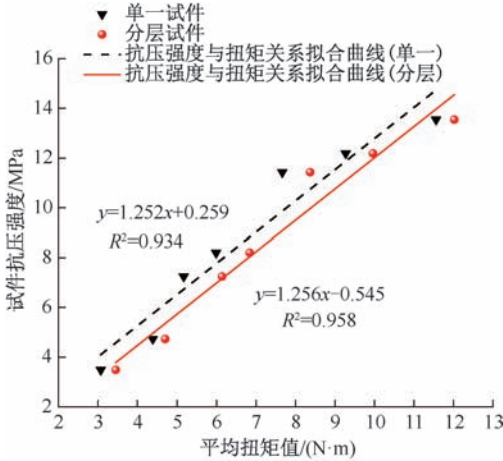


图 18 试件强度与平均扭矩关系曲线
Fig. 18 Relationship between strength and average torque of specimen

试件强度变化量与扭矩变化量关系曲线如

图 19 所示。线性拟合扭矩变化量与抗压强度变化量, 得到的拟合方程为 $y = 1.218x + 0.254$, $R^2 = 0.933$, 由图 19 可知: 旋转扭矩与抗压强度有很强的相关性, 可以根据钻进过程中的旋转扭矩来预测煤岩的抗压强度。

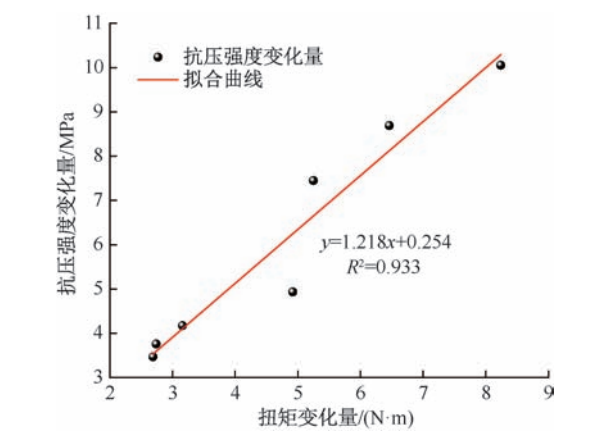


图 19 试件强度变化量与扭矩变化量关系曲线
Fig. 19 Relationship curve between the strength change and the torque change of the specimen

5 结 论

- 1) 旋转扭矩值与围压、试件强度、钻进速度呈正相关, 表现为参数增大旋转扭矩值升高; 旋转速度不同时, 旋转扭矩值基本不变。各随钻参数与抗压强度的关联度由大到小依次为: 旋转扭矩>围压>钻进速度>旋转速度。
- 2) 旋转扭矩随试件抗压强度的增大而升高, 成一次线性关系; 旋转扭矩变化量与抗压强度变化量之间也存在一次线性关系。得出旋转扭矩可以反演试件抗压强度的结论。
- 3) 通过旋转扭矩曲线的变化特征, 可以识别岩层强度, 进而确定分界位置。钻头钻过界面时, 若由较软的岩层过渡到较硬的岩层, 曲线会出现上升阶段, 反之则下降。验证了随钻参数对试件抗压强度识别的准确性, 为实际工程中的煤岩层强度预测提供有效的手段。
- 4) 本文研究围压、旋转扭矩、钻进速度、旋转速度与抗压强度的关系, 后续多随钻参数与多物理力学参数耦合分析是今后的研究方向, 以提高预测准确性。

参 考 文 献

[1] 王海军, 齐庆杰, 梁运涛, 等. 我国煤矿重特重大事故统计分析对策建议[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(9): 9-18.
WANG Haijun, QI Qingjie, LIANG Yuntao, et al. Statistical analysis and countermeasures of major accidents in coal mines in China [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 9-18.

[2] 付恩三, 白润才, 刘光伟, 等. “十三五”期间我国煤矿事故特征及演变趋势分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(12): 88-94.
FU Ensan, BAI Runcai, LIU Guangwei, et al. Analysis on characteristics and evolution trend of coal mine accidents in our country during "13th five-year" plan period [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(12): 88-94.

[3] 贾真真, 叶青, 杨卓华. 瓦斯爆炸冲击-地应力动静载荷下巷道壁面损伤特性[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(10): 116-123.
JIA Zhenzhen, YE Qing, YANG Zuohua. Damage characteristics of roadway wall under dynamic-static loads by gas explosion impact and geostress [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(10): 116-123.

[4] 姚吉康, 王志亮. 华山花岗岩力学特性及能量演化规律研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(3): 78-85.
YAO Jikang, WANG Zhiliang. Study on mechanical property and energy evolution law of huashan granite [J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(3): 78-85.

[5] 李庆辉, 李少轩. 超深层砂岩储层岩石力学特性实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 948-957.
LI Qinghui, LI Shaoxuan. Experimental study on mechanical properties of ultra-deep sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 948-957.

[6] 刘双飞. 真三轴卸加载下砂岩力学特性的速率效应[J]. 采矿技术, 2022, 22(1): 109-112.
LIU Shuangfei. Rate effect of mechanical properties of sandstone under true triaxial loading and unloading [J]. Mining Technology, 2022, 22(1): 109-112.

[7] 董正东, 田浩源. 大理岩常规三轴压缩试验研究[J]. 土工基础, 2021, 35(5): 635-639.

DONG Zhengdong, TIAN Haoyuan. Experimental study on the conventional triaxial compression of marble rock samples[J]. Soil Engineering and Foundation, 2021, 35(5):635-639.

[8] 李占涛, 林小国, 宋春霞. 岩石钻孔振动与声波频谱特性实验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(4): 1 008-1 016.

LI Zhantao, LIN Xiaoguo, SONG Chunxia. Experimental study on vibration and acoustic spectrum characteristics of borehole in rock [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(4):1 008-1 016.

[9] 王少锋, 吴毓萌, 蔡鑫, 等. 基于随钻参数的岩石强度预测与可钻性识别[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(12):4 036-4 051.

WANG Shaofeng, WU Yumeng, CAI Xin, et al. Strength prediction and drillability identification for rock based on measurement while drilling parameters [J]. Journal of Central South University, 2023, 30(12):4 036- 405.

[10] 李忠华, 朱丽媛, 李国臻, 等. 钻杆扭矩法测定煤岩强度的理论与试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(4):612-616.

LI Zhonghua, ZHU Liyuan, LI Guozhen, et al. Experimental and theoretical study of determination of coal rock strength using the drill rod torque method [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(4):612-616.

[11] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling [C]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts[J]. Pergamon, 1965, 2(1):57-73.

[12] 尤建平, 陈果, 马统师, 等. 煤矿井下定向钻孔随钻测量数据综合采集系统研究[J]. 煤矿机械, 2024, 45(1): 182-184.

YIU Jianping, CHEN Guo, MA Tongshi, et al. Research on comprehensive acquisition system of data of directional drilling measurement while drilling in underground coal mine [J]. Coal Mine Machinery, 2024, 45(1):182-184.

[13] 王喆, 仇安兵, 龚敏, 等. 基于实测钻凿参数的类岩石材料强度识别研究[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(4): 55-62, 67.

WANG Zhe, QIU Anbing, GONG Min, et al. Research on strength identification of rock-like materials based on measured drilling parameters [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2023, 50(4):55-62, 67.

[14] 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 dilling parameler acquisilion system of hydraulic anchor driling rig in coal mine roadways and its application [J]. Journal of Mining Seience and Technology, 2023, 8(1):66-73.

[15] 廉瑞, 刘灿灿, 杨璐. 煤矿巷道顶板岩石强度随钻探测技术研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(8):69-71.

LIAN Rui, LIU Cancan, YANG Lu. Research on measurement while drilling technology of rock strength of coal mine roadway roof [J]. Coal Technology, 2018, 37(8):69-71.

作者简介： 范超军 （1990—）,男,四川内江人,博士,教授,主要从事矿山安全与灾害防控方面的研究。Email:chaojunfan@139.com。

