钻进能量与岩石强度关系试验研究*

李淇凡[1],赵志刚[1,2],齐炎山[1],牛旭[1],焦月[1]

(1.山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛市 266590;
2.山东省深部矿井动力灾害智能防控重点实验室, 山东 青岛市 266590)

摘要:准确测试岩石单轴抗压强度是支护设计和岩体稳定性分析的基础。通过开展不同强度岩石的室内钻进试验,分析了钻进过程中的能量转化与耗散情况,研究了钻进过程中多种能量与岩石强度之间的关系。结果表明:钻头输入的机械能中,转矩功占比超过95%,钻压功占比不超过5%,钻头输入能量主要转化为钻屑表面能,平均转化率为95.6%,热能平均转化率为4.2%。不同强度砂浆试块的净钻进比功与单轴抗压强度呈明显的线性关系,拟合得出净钻进比功与强度的关系方程,采用混凝土、砂岩及花岗岩钻进试验结果对该方程进行验证,最大差异率为5.07%。拟合得出钻屑表面能、热能、声能与岩石强度的关系方程,多种能量与岩石强度的关系可以互相验证。基于钻进能量的岩石强度钻测方法具有较好的适用性。

关键词:钻进能量;岩石强度;能量转化;钻进比功;随钻测量

中图分类号:TD313 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)02-0187-11

Study on the Relationship Between Drilling Energy and Rock Strength

LI Qifan[1], *ZHAO Zhigang*[1,2], *QI Yanshan*[1], *NIU Xu*[1], *JIAO Yue*[1]

(1.College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
2.Shandong Key Laboratory of Intelligent Prevention and Control of Dynamic Disaster in Deep Mines, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Accurate measurement of the uniaxial compressive strength of rock is the foundation of support design and rock mass stability analysis. By conducting indoor drilling tests on rocks with different strengths, the energy conversion and dissipation during the drilling process were analyzed, and the relationship between various forms of energy and rock strength in the process was studied. The results show that among the mechanical energy input by the drill bit, the torque work accounts for more than 95%, while the drilling pressure work accounts for no more than 5%. The energy input by the drill bit is mainly converted into the surface energy of drill cuttings, with an average conversion rate of 95.6%, and the average conversion rate of thermal energy is 4.2%. There is an obvious linear relationship between the net specific drilling work and the uniaxial compressive strength of mortar specimens with different strengths. The relational equation between the net specific drilling work and strength is obtained by fitting. This equation has been verified by using the drilling test results of concrete, sandstone and granite, with a maximum discrepancy rate of 5.07%. Relational equations between the surface energy of drill cuttings, thermal energy, acoustic energy and rock strength were obtained by fitting, and the relationships between various forms of energy and rock strength can be verified with each other. The drilling measurement method for rock strength based on drilling energy has good applicability.

Key words: Drilling energy, Rock strength, Energy conversion, Specific drilling work, Measurement while drilling

0 引言

岩石强度是岩体最重要的地质力学参数之一,其准确测试是支护设计和岩体稳定性分析的基础。单轴压缩试验方法周期长、成本高[1],对无法取芯的裂隙发育和软弱破碎的岩体难以进行有效测试。与

* **收稿日期**:2025-02-16
基金项目:国家自然科学基金面上项目(52374097)
作者简介:李淇凡(2001—),男,山东德州人,硕士研究生,主要从事随钻测量方面的研究工作。E-mail:lqf8925@163.com
通信作者:赵志刚(1972—),男,山东滨州人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事矿山岩石力学与随钻测量研究。E-mail:zzgwb1997@163.com

室内试验相比,原位测试结果更接近工程实际,点荷载试验是目前主要的岩石强度现场测试方法[2],但只能测试围岩表面强度,钻孔触探法原位测试顶板岩层和煤壁强度已得到了广泛应用[3]。岩石钻探测试技术是一种有效的岩体强度原位测试方法[4],大量现场钻进和室内钻进研究表明[5-9],岩石强度和钻进参数具有明显的相关性。相较于单一钻进参数,钻头钻进的机械能可以更好地表征岩石强度[10-14],钻头将完整岩石破碎为钻屑,机械能转化为钻屑表面能[15-16],同时,部分机械能以钻头摩擦岩石产生的热能和破碎岩石产生的声能的形式耗散,机械能、表面能和耗散能均与岩石强度有关,机械能与岩石强度的关系已有大量研究成果,但钻屑表面能、热能、声能与岩石强度的关系研究尚不充分。

本文利用自行研制的恒钻压钻进试验系统,开展不同强度试块的室内钻进试验,分析了钻进过程中的能量转化关系,拟合得到净钻进比功、钻屑表面能、热能损耗、声能损耗与试件强度之间的关系,以期为岩石强度原位钻测方法提供新的思路。

1 岩石钻孔能量分析

1.1 钻头切削岩石受力分析

聚晶金刚石复合片(PDC)钻头因进尺快、寿命长和抗冲击能力强等优势,在软至中硬岩层钻进中得到了广泛应用。钻头钻进包括轴向压入和旋转切削两个过程,且在钻进过程中切削功远大于钻压功[17],因此需对钻头切削岩石进行受力分析。PDC钻头切削软岩过程与金属切削类似[18],单个金刚石复合片受力如图1所示。

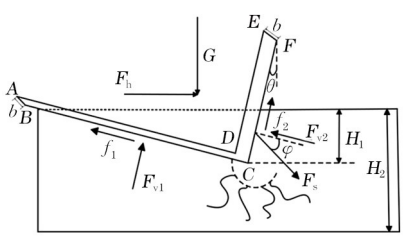


图1 金刚石复合片受力示意

Fig.1 Force schematic of polycrystalline diamond compact

由图1可知,在钻进过程中,钻刃与岩石接触面面积分别为 S_{ABCD}、S_{CDEF},在面 $ABCD$ 上,岩石作用于钻刃的法向力 F_{v1} 和摩擦力 f_1;在面 $CDEF$ 上,钻刃作用于岩石轴向力 G 和切削力 F_h,两个力形成合力 F_s,同时岩石作用于钻刃的有法向力 F_{v2} 和摩擦力 f_2。由于每次旋转的钻进深度 H_1 远小于钻刃刃宽 b,钻刃旋转切削岩石的过程可视为线性运动[19],钻刃切削力 F_k 可表达为[20]:

$$F_k=\xi bDR_cH_1(1-\mu\tan\theta) \tag{1}$$

式中:ξ 为动载调节系数;b 为钻刃刃宽,mm;D 为岩石硬度与岩石单轴抗压强度之间的比例系数;R_c 为岩石单轴抗压强度,MPa;H_1 为钻刃每次旋转的钻进深度,mm;μ 为钻刃与岩石之间的摩擦因数;θ 为钻刃倾角,(°)。

钻头转矩 M 可表达为:

$$M=\frac{\xi bsvD(1-\mu\tan\theta)R_c}{N} \tag{2}$$

式中:s 为钻刃中心与切削力之间的距离,mm;v 为钻进速度,mm/s;N 为转速,r/s。

由式(2)可知,钻头转矩与岩石单轴抗压强度强度成正比。

1.2 钻孔过程中的能量转化

钻孔过程中,破碎岩石所需的能量由使钻头侵入岩石的钻压功和钻头旋转的转矩功提供,根据Evans剪切破碎理论,岩石剪切破坏的能量阈值显著低于其他破坏模式。钻头旋转时,剪切应力直接作用于岩石弱面,优先触发低能量阈值的剪切失稳。相比轴向压力,转矩功通过局部剪切带实现能量高效聚焦,单位体积破碎能耗降低,从而占据主导地位。钻压功和转矩功是钻孔过程中的输入能量,钻头将完整岩体破碎成钻屑,输入的部分机械能转化为钻屑表面能;同时,部分机械能转化为钻头与钻孔壁和钻孔底部摩擦产生的热能。另外,岩石破碎释放出弹性波以声能的形式耗散,根据能量守恒原理,钻进过程中的能量转化方程为:

$$W_1+W_2=E_{表}+E_{热}+E_{声} \tag{3}$$

式中:W_1 和 W_2 分别为钻压功和转矩功,J;$E_{表}$ 为岩石破碎形成钻屑的表面能,J;$E_{热}$ 为钻进过程中的热能损耗,J;$E_{声}$ 为钻进过程中的声能损耗,J。

1.3 输入能量

钻孔过程中钻头输入的能量为钻压功 W_1 和转矩功 W_2,可分别表示为:

$$W_1=F_Nvt \tag{4}$$

$$W_2=2\pi MNt \tag{5}$$

式中:F_N 为钻进压力,N;t 为钻进时间,s。

总输入能量 $E_{入}$ 表示为:

$$E_{入}=W_1+W_2=F_Nvt+2\pi MNt \tag{6}$$

1.4 输出能量

钻屑的表面能是能量输出的最主要部分,将岩

石从粒度G破碎到粒度d的过程表示为破碎比i,则破碎比功a可表示为[15]:

$$a=K\left(\frac{1}{d}-\frac{1}{G}\right) \tag{7}$$

式中,K为经验系数,由岩石材料性质决定。

由于钻进过程中岩石破碎比较大,$1/G$极小,因此将其忽略不计。根据Rittinger提出的新表面说,外力所做的功用于建立新表面和弥补部分损耗,将岩石破碎的颗粒看作圆球形,则单位体积具有的表面积为$6/d$,此时,破碎比功a可表示为[15]:

$$a=6W_{\mathrm{n}}\sum\left(\gamma_i\frac{1}{d_i}\right) \tag{8}$$

式中:W_{n}为破碎岩石建立单位新表面积的能量,取0.3 J/cm^2;γ_i为直径d_i的颗粒在所有颗粒中所占的比例。

破碎功转化为新表面的能量,则钻屑表面能为:

$$E_{表}=a\pi r^2L \tag{9}$$

式中:L为钻进深度,mm;r为钻头半径,mm。

钻进过程中热量损耗主要包括四个部分:钻孔底壁吸收热量Q_1;钻孔侧壁吸收热量Q_2;钻头吸收热量Q_3;钻屑吸收热量Q_4。这四部分损耗可以分别表示为[21-22]:

$$Q_1=\pi r^2hC_1\rho_1\Delta T_1J \tag{10}$$

$$Q_2=2\pi rLhC_1\rho_1\Delta T_2J \tag{11}$$

$$Q_3=C_2m\Delta T_3J \tag{12}$$

$$Q_4=\pi r^2LC_1\rho_1\Delta T_4J \tag{13}$$

式中:h为岩石被加热层厚度,一般小于4 mm;C_1为岩石的比热,J/(kg·K);C_2为钻头的比热,J/(kg·K);ρ_1为岩石密度,kg/m^3;m为钻头质量,kg;ΔT_1为钻孔孔底的温度变化量,℃;ΔT_2为钻孔孔壁的温度变化量,℃;ΔT_3为钻进前后钻头的温度变化量,其计算方式为取钻前、钻后钻头的刀尖和刀面温度的平均值的差值,℃;ΔT_4为钻屑的温度变化量,℃;J为热功当量系数。

热能损耗$E_{热}$为:

$$E_{热}=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4 \tag{14}$$

声能损耗通常用声发射系统采集的均方电压或均方根电压进行计算,在t_1到t_2时间内,对于一个声发射信号,其均方根电压V_{rms}和均方电压V_{ms}分别定义为:

$$V_{\mathrm{rms}}=\sqrt{V_{\mathrm{ms}}} \tag{15}$$

$$V_{\mathrm{ms}}=\frac{1}{\Delta t}\int_{t_1}^{t_2}V^2(t)\mathrm{d}t \tag{16}$$

式中:Δt为信号持续时间,s;$V(t)$为随时间变化的信号电压值,V。

由于均方电压与均方根电压不受电子系统增益和换能器耦合情况变化的影响,也不依赖于任何阈值电压,声发射信号的能量变化体现为信号电压值$V(t)$随时间的变化,因此可以通过计算$V(t)$随时间变化的积分来计算声发射能量值,声发射信号从t_1到t_2时间内的能量$E_{声}$可以表示为[23]:

$$E_{声}=\frac{1}{R_{内}}\int_{t_1}^{t_2}V(t)^2\mathrm{d}t \tag{17}$$

式中,$R_{内}$为电路的内阻值,取10 kΩ。

2 室内钻进试验

2.1 试验设备

为研究钻进过程中各能量变化与岩石单轴抗压强度的关系,本文利用恒钻压钻进试验装置开展了不同强度试块的室内钻进试验[24]。室内钻进试验装置如图2所示,由钻机主体和数据采集模块组成,钻机通过砝码配重,在钻进过程中保持钻压恒定不变。数据采集模块包括转矩、转速传感器、位移传感器、声发射传感器、数据采集仪和声发射分析仪,数据采集仪实时显示钻进过程中的转矩、转速和钻进深度。声发射分析仪通过声发射传感器接收声发射信号并实时显示各特征参数的变化情况。

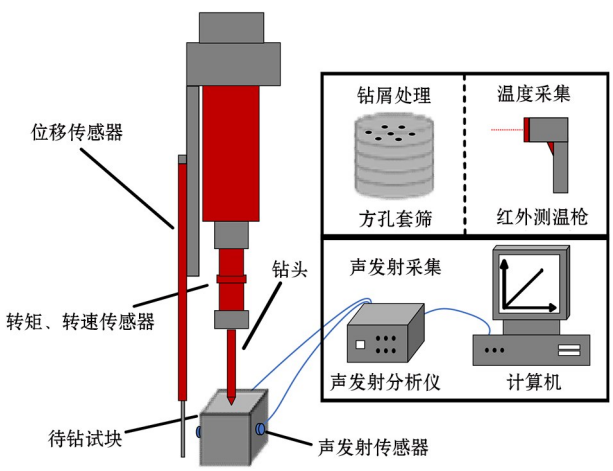


图2 室内钻进试验装置

Fig.2 Indoor drilling test device

2.2 试验方案设计

试验使用水泥砂浆制作试块,共8组,每组3块,设计强度为2.5~40 MPa,配比方案见表1。每组钻进试验使用相同配比的3个试块,取3次钻

进过程中试验数据的平均值进行分析计算。试块均为边长 100 mm 的正方体标准试块,每个试块表面都经过仔细研磨,两端不平行度小于0.02 mm。

表 1 不同砂浆强度配比

Table 1 Different ratios of mortar strength

试块编号	设计强度/MPa	水泥/(kg/m³)	河砂/(kg/m³)	水/(kg/m³)	实际强度/MPa
A_1	2.5	200	1 450	300	2.01
A_2	5.0	215			4.79
A_3	7.5	245			5.27
A_4	10.0	275			8.90
A_5	15.0	310			12.20
A_6	20.0	370			19.35
A_7	30.0	455			27.80
A_8	40.0	609			38.10

根据预试验,在本次试验中统一采用直径为 8 mm 的钻头进行钻孔,钻机的钻压恒定为 200 N。钻进过程中实时采集转矩、转速和位移数据,平均钻速可以根据钻进位移数据计算得到,利用式(6)计算输入能量。钻孔完成后,对产生的钻屑进行收集,使用不同规格的方孔套筛进行筛分,分离出不同粒径的钻屑并记录筛分结果,通过式(7)至式(9)计算得出钻屑表面能。使用红外线测温枪测量试块钻孔孔底的温度变化量 ΔT_1、钻孔孔壁的温度变化量 ΔT_2、钻进前后钻头的温度变化量 ΔT_3 和钻屑的温度变化量 ΔT_4。通过式(10)至式(14)计算得出钻进过程中损耗的热能。利用声发射采集仪实时采集声发射信号的能量、振铃计数、均方电压、信号强度等声发射参数,根据式(15)至式(17)计算声能损耗。

2.3 试验结果

2.3.1 输入能量

以设计强度 5 MPa 的砂浆试块为例,采集试验中钻进位移、转矩、转速等参数,得出钻进位移-时间曲线,如图 3(a)所示,转速、转矩-位移曲线如图 3(b)所示。

由图 3(a)可知,钻进深度与钻进时间近似呈现线性变化关系,通过钻进深度与钻进时间的比值可以得出钻进过程的平均钻速。由图 3(b)可知,钻进过程中转矩随着钻进位移的增加先快速增大,之后在一定范围内波动,因此取波动段平均转矩作为代表值,转速随着钻进深度先迅速增加后基本保持不变。计算得出钻进过程中输入能量随位移的变化曲线,如图 4 所示。

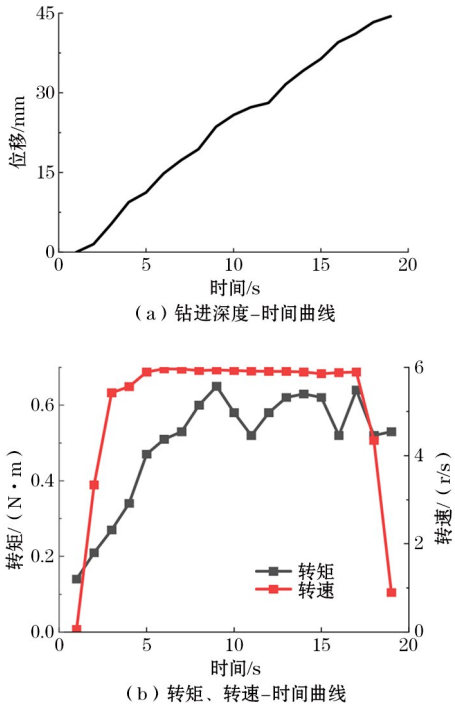


图 3 位移、转矩、转速随时间的变化曲线

Fig.3 Variation curves of displacement, torque, and rotational speed with time

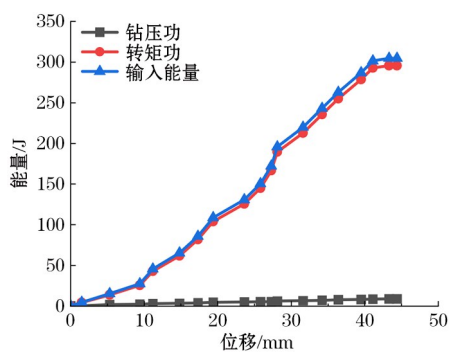


图 4 输入能量随位移的变化曲线

Fig.4 Variation curves of input energy with displacement

由图 4 可知,随着钻进深度的增加,钻压功与钻进深度呈线性关系,钻压功-钻进深度曲线的斜率为钻压值,钻进过程中钻压恒定;钻压功在输入能量中占比很小,输入能量主要由转矩功提供,转矩功和输入能量随钻进深度的变化曲线基本一致。

计算得出全部砂浆钻进试验的钻压功、转矩功及总输入能量,见表 2。根据表 2 中数据得出钻进试验中钻压功、转矩功和输入能量与强度之间的关系曲线如图 5(a)所示,钻压功、转矩功在输入能量中的占比如图 5(b)所示。

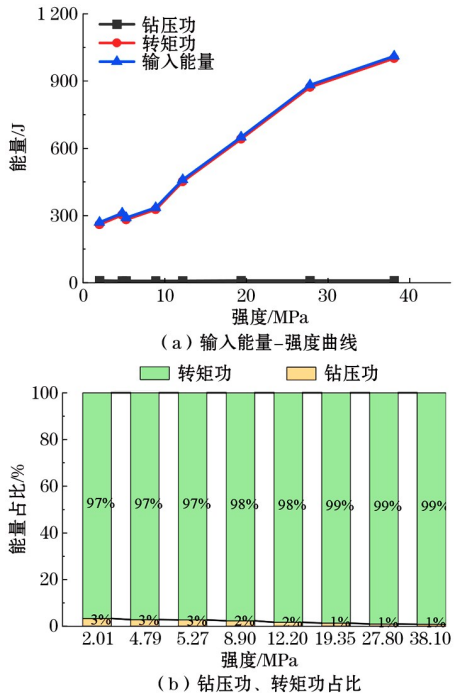


图 5 输入能量与强度的关系

Fig.5 Relationship between input energy and strength

由图 5 可知,随着试块强度增加,转矩功和输入能量逐渐增加,钻压功基本保持恒定,不随试块强度变化;转矩功提供了大部分的输入能量,最高达到总输入能量的 99%,钻压功在输入能量中占比极小,最高仅有 3%;随着试块强度的逐渐增加,转矩功在输入能量中占比逐渐增加,而钻压功在输入能量中的占比逐渐降低。

表 2 砂浆钻进输入能量

Table 2 Input energy for mortar drilling

试块编号	试件强度/MPa	转矩/(N·m)	转速/($r \cdot s^{-1}$)	钻进位移/mm	钻压功/J	转矩功/J	总输入能量/J
A_1	2.01	0.41	5.05	46.10	9.22	260.31	269.53
A_2	4.79	0.50	5.08	44.40	8.88	302.30	311.18
A_3	5.27	0.59	5.07	40.80	8.16	281.65	289.81
A_4	8.90	0.62	5.29	40.60	8.12	327.17	335.29
A_5	12.20	0.64	5.58	40.30	8.06	451.64	459.70
A_6	19.35	0.81	5.50	45.20	9.04	641.10	650.14
A_7	27.80	1.03	5.41	50.60	10.12	872.86	882.98
A_8	38.10	1.11	5.32	48.10	9.62	1 001.34	1 010.96

2.3.2 输出能量

(1) 钻屑表面能。

收集试验中产生的钻屑并进行筛分,以设计强度为 5 MPa、7.5 MPa、10 MPa、15 MPa 的试验组为例,以粒径为 x 轴,以对应粒径下的分计含量和累计含量为 y 轴,绘制钻屑粒径分布图,如图 6 所示。由图 6 可知,钻屑的粒径主要分布在 0.063~1 mm,小于 0.063 mm 和大于 2 mm 的钻屑均低于 10%,曲线呈现向上凸起的趋势,表明细颗粒占比较高。基于这一分布特征,采用 Rittinger 提出的新表面说理论来验证表面能的合理性。

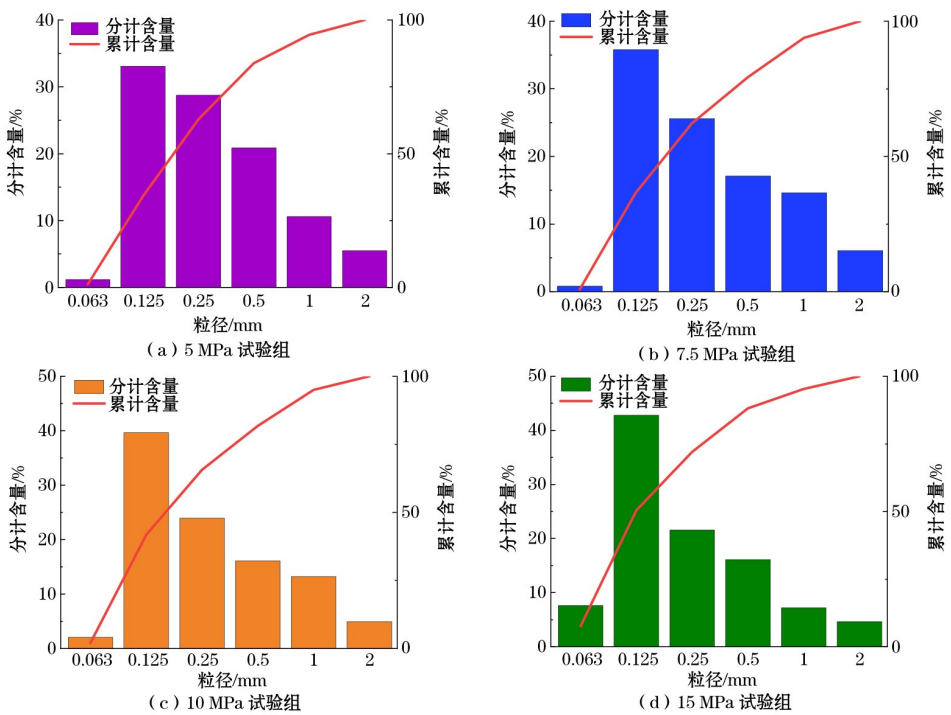


图 6 钻屑粒径分布

Fig.6 Distribution of drill cuttings particle size

根据不同强度试块钻进试验的钻屑参数计算表面能,矿浆钻进输出能量见表 3。由表 3 可知,表面能在输出能量中占比 90%以上,钻头输入的机械能主要转化为钻屑表面能,随着试块强度的增大,表面能逐渐增大。

表 3 砂浆钻进输出能量

Table 3 Output energy for mortar drilling

试块编号	强度/MPa	钻孔体积/cm^3	ΔT_1/℃	ΔT_2/℃	ΔT_3/℃	ΔT_4/℃	平均均方根电压/μV	表面能/J	热能/J	声能/J
A_1	2.01	2.32	0.74	0.48	0.62	0.53	323.64	264.53	4.95	3.41E-08
A_2	4.79	2.23	0.24	0.89	1.26	0.49	791.13	302.77	7.65	4.34E-08
A_3	5.27	2.05	0.51	0.95	1.41	0.52	1 189.09	281.42	7.85	4.80E-08
A_4	8.90	2.04	1.09	1.28	1.03	0.86	801.43	321.91	12.84	7.65E-08
A_5	12.20	2.02	0.48	2.17	4.83	3.53	1 101.24	433.26	26.40	1.67E-07
A_6	19.35	2.27	2.44	1.25	4.29	5.12	2 514.18	613.16	34.55	4.09E-07
A_7	27.80	2.54	3.48	1.38	8.47	5.85	1 315.88	829.69	51.78	6.33E-07
A_8	38.10	2.42	3.02	2.24	9.05	7.02	1 191.07	946.41	59.67	1.52E-06

(2) 热能。

试验测得钻进过程中各温度变化量 ΔT_1、ΔT_2、ΔT_3、ΔT_4,计算得出钻进不同强度试块的热能。由表 3 可知,热能在输出能量中平均占比为 4.2%,最高占比为 5.9%;随着试块强度的增大,钻进过程中产生的热能损耗也随之增加。

(3) 声能。

声能损耗也是输出能量的一部分,以设计强度为 5 MPa 的试块为例,利用声发射系统可以采集到钻进过程中的各类声发射特征参数如图 7 所示,图 7(a)为钻进过程中声发射信号超过门限电压的撞击数随钻进时间变化图。图 7(b)为钻进过程中声发射信号的信号强度变化图。图 7(c)为钻进过程中声发射信号越过门槛信号的振荡次数,即振铃计数变化图。图 7(d)为均方根电压值随钻进时间变化图。由表 3 可知,钻进过程中声能损耗的数值极小,但对强度的变化较为敏感,试块强度从 2.01 MPa 增大到 38.1 MPa,增加了 18.96 倍,声能从 3.41E-08 J 增加至 1.52E-06 J,增加了 44.6 倍。

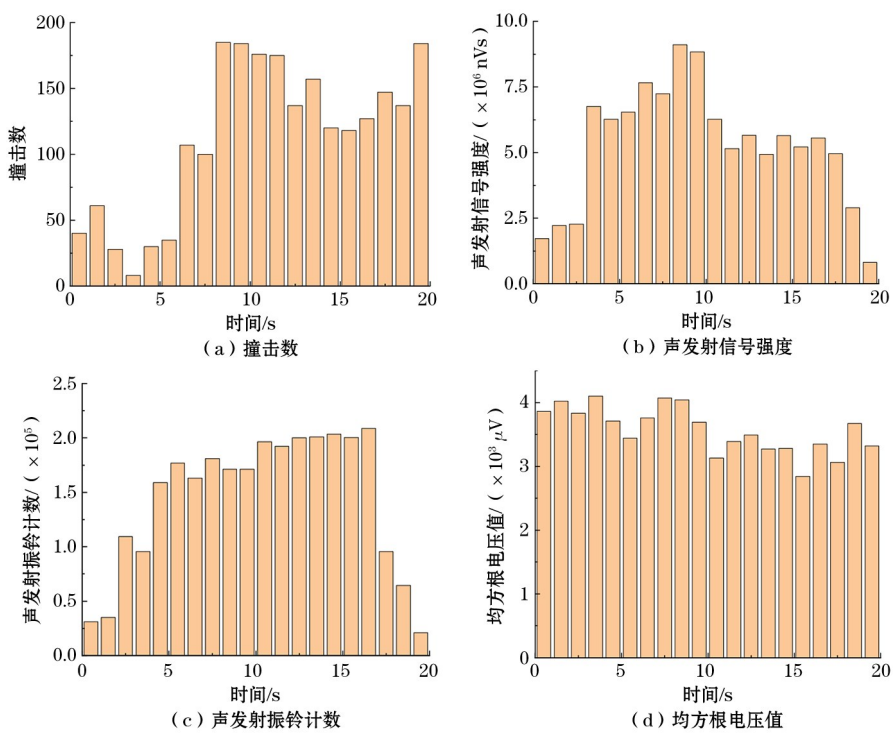


图 7 声发射特征参数

Fig.7 Acoustic emission characteristic parameters

2.3.3 能量转化分析

对钻进过程中能量转化情况进行分析,由于声能的数值远远小于其他能量,忽略其影响,试验中各部分能量已列入表 4 中。由表 4 可知,在钻头钻进

破岩过程中,钻机输入的钻压功和转矩功提供钻削破岩能量,其中转矩功为输入能量的最主要部分,占输入能量的95%以上,而表面能为最主要的输出部分,平均有95.6%的输入能量转化为表面能,其余能量主要转化为热能输出,平均占输入能量的4.2%。随着试块强度的增加,表面能的转化率有所下降,而热能的转化率有所上升,其原因在于钻头摩擦和钻屑升温产生的热量随试块强度的增加而增加[20],使得热能的转化率增大。总输入-输出能量的转化率基本稳定在99%以上,即几乎所有能量均转化为表面能与热能,只有极少部分能量以声能等其他方式输出。

表4 钻进过程中能量转化情况

Table 4 Energy conversion during drilling

试块编号	强度/MPa	输入能量/J		输出能量/J		能量转化率/%		
		钻压功	转矩功	表面能	热能	表面能	热能	输出能量
A_1	2.01	9.22	260.31	264.53	4.95	98.14	1.84	99.98
A_2	4.79	8.88	302.30	302.77	7.65	97.30	2.46	99.76
A_3	5.27	8.16	281.65	281.42	7.85	97.10	2.71	99.81
A_4	8.90	8.12	327.17	321.91	12.84	96.01	3.83	99.84
A_5	12.20	8.06	451.64	433.26	26.40	94.25	5.74	99.99
A_6	19.35	9.04	641.10	613.16	34.55	94.31	5.31	99.63
A_7	27.80	10.12	872.86	829.69	51.78	93.96	5.86	99.83
A_8	38.10	9.62	1 001.34	946.41	59.67	93.61	5.90	99.52

3 钻进过程中能量与强度的关系

3.1 模型假设

为分析钻头切削岩石过程,建立钻进能量与岩石强度模型时依据以下假设。

(1) 钻孔岩石为均质、各向同性,忽略岩石内部的孔隙、裂隙等不连续特征,将其视为连续体。

(2) 假设钻进能量仅消耗于钻头与岩石接触区域,忽略振动能量损耗。

(3) 假设钻头与岩石接触面的摩擦因数为恒定值,忽略局部摩擦因数变化。

3.2 净钻进比功与强度的关系

钻头与孔底摩擦力做功消耗的能量 W_μ 为:

$$W_\mu = 2\pi r\mu F_N Nt \tag{18}$$

将钻头输入的机械能扣除摩擦力做功后的剩余能量定义为净钻进功 $E_{净}$,则有:

$$E_{净} = F_N vt + 2\pi(M - \mu r F_N)Nt \tag{19}$$

将净钻进功除以钻孔体积,可以得到净钻进比功 $P_{净}$:

$$P_{净} = \frac{F_N vt + 2\pi(M - \mu r F_N)Nt}{\pi r^2 L} \tag{20}$$

利用式(19)、式(20),计算不同强度试块的 $E_{净}$ 和 $P_{净}$,并列入表5。以净钻进比功为横坐标,以试块强度为纵坐标绘制净钻进比功-强度拟合曲线,如图8所示。由图8可知,净钻进比功和强度呈明显线性关系,拟合的净钻进比功与强度的关系式为:

$$\begin{cases} R_c = 0.12P_{净} - 7.10 \\ R^2 = 0.991 \end{cases} \tag{21}$$

式中,R^2 为相关系数。

表5 钻进过程中单位体积能量

Table 5 Unit volume energy during drilling

试块编号	强度/MPa	净钻进功/J	净钻进比功/(J/cm³)	单位体积表面能/(J/cm³)	单位体积热能/(J/cm³)	单位体积声能/(J/cm³)
A_1	2.01	162.87	70.32	114.22	2.14	1.47E-08
A_2	4.79	209.40	93.87	135.73	3.43	1.95E-08
A_3	5.27	209.52	102.22	137.29	3.83	2.34E-08
A_4	8.90	245.92	120.56	157.82	6.29	3.75E-08
A_5	12.20	341.88	168.86	213.99	13.04	8.26E-08
A_6	19.35	516.67	227.52	270.01	15.22	1.80E-07
A_7	27.80	740.19	291.17	326.37	20.37	2.49E-07
A_8	38.10	859.55	355.70	391.64	24.69	6.30E-07

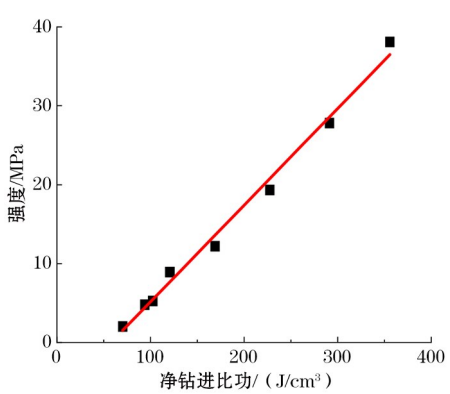


图8 净钻进比功-强度拟合曲线

Fig.8 Fitting curve of net drilling specific work and strength

钻进过程中钻压变化导致摩擦力不同,进而使钻头输入机械能与净钻进功也不同,相较于利用机械能拟合分析岩石强度,采用净钻进比功进行分析可消除钻压变化影响,分析结果更准确。

为了检验式(21)的准确性,分别对强度为 54.9 MPa 的混凝土试块(B_1)和强度为 87.2 MPa 的砂岩试块(C_1)进行钻进试验,试验条件与砂浆试块相同,根据实测钻进参数计算净钻进比功,根据式(21)计算试块强度。另外,采用文献[13](S_2)和文献[25](S_1)的试验数据,分别计算净钻进比功和岩石强度,模型验证所用的相关试验参数见表 6。

表 6 模型验证所用的相关试验参数

Table 6 Relevanttest parameters for model validation

试块编号	试块强度 R_c/MPa	净钻进比功 $P_{净}$/(J/cm³)	预测试块强度 $R_{\eta c}$/MPa	差异率/%
B_1	54.90	476.32	50.06	4.44
C_1	87.20	864.65	96.66	5.07
S_1	40.50	386.30	39.23	3.14
S_2	120.00	1 109.96	126.10	4.84

对比 4 组验证试验的试块强度 R_c 和预测试块强度 $R_{\eta c}$,如图 9 所示。R_c 与 $R_{\eta c}$ 的最大差异率为 5.07%,平均差异率为 4.37%。

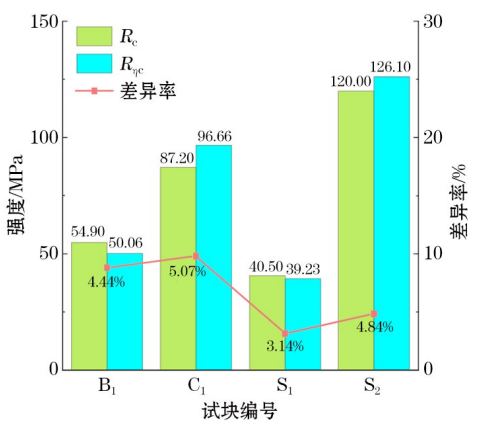


图 9 R_c 与 $R_{\eta c}$ 对比分析

Fig.9 Comparative analysis of R_c and $R_{\eta c}$

3.3 表面能与强度的关系

将各组试验的表面能分别除以钻孔体积,计算得到单位体积表面能 $P_{表}$,并列入表 5 中,$P_{表}$ 与 R_c 的关系如图 10 所示,$P_{表}$ 与 R_c 呈明显线性关系,拟合 $P_{表}$ 与 R_c 的关系式为:

$$\begin{cases} R_c = 0.12P_{表} - 12.31 \\ R^2 = 0.985 \end{cases} \tag{22}$$

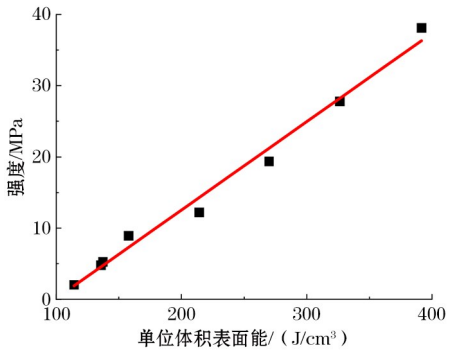


图 10 单位体积表面能-强度拟合曲线

Fig.10 Fitting curve of surface energy per unit volume and strength

3.4 热能与强度的关系

将钻进不同强度试块的热能损耗 $E_{热}$ 除以钻孔体积,计算得到单位体积热能 $P_{热}$,并列入表 5 中,$P_{热}$ 与 R_c 关系如图 11 所示,$P_{热}$ 与 R_c 呈明显线性关系,拟合 $P_{热}$ 与 R_c 的关系式为:

$$\begin{cases} R_c = 1.46P_{热} - 1.45 \\ R^2 = 0.951 \end{cases} \tag{23}$$

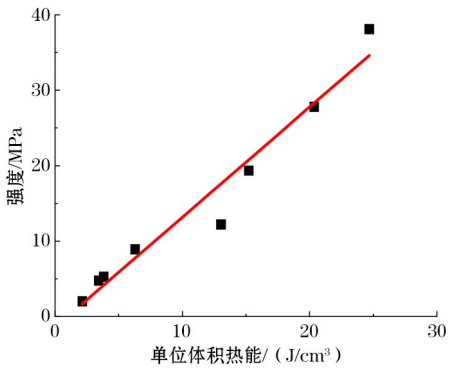


图 11 单位体积热能-强度拟合曲线

Fig.11 Fitting curve of thermal energy per unit volume and strength

3.5 声能与强度的关系

将钻进试验中的声能除以钻孔体积,计算得到单位体积声能 $P_{声}$,并列入表 5 中,$P_{声}$ 与 R_c 的关系如图 12 所示,二者的关系式如下:

$$\begin{cases} R_c = 67.54 - \dfrac{68.09}{1+\left(\dfrac{P_{声}}{4.43E-7}\right)^{0.82}} \\ R^2 = 0.949 \end{cases} \tag{24}$$

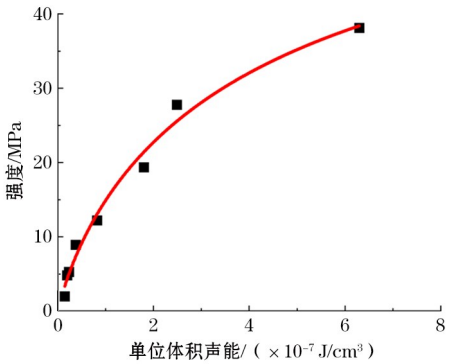


图 12 单位体积声能-强度曲线

Fig.12 Curve of acoustic energy per unit volume and strength

4 讨论

理论上讲,同种强度岩石的钻进比功应为恒定值,但实际试验结果表明,同种强度岩石钻进比功存在一定差异性。这主要是在实际的钻进过程中,由于转速、钻压等因素使得钻速发生变化,因此在钻进过程中钻进能量的利用效率不同。钻速较大时,钻头升温更快、钻头磨损程度更严重,钻进能量损耗增加。

传统单轴试验在单一岩层的条件下仍具一定优势,但整个测试过程繁琐、周期较长、测试结果滞后,在复杂环境中由于岩性变化需要增加采样频率,导致成本大幅增加。而随钻测量技术虽需要安装各类传感器,初期经济投入较高,但通过随钻参数测定,可以实时获取岩层强度及界面分布信息,提高顶板支护与岩层地质条件的匹配性,具有极高的安全效益和经济效益。另外,通过提升钻孔效率,可以缩短钻孔时间、降低能耗,在复杂地质条件中具有长期经济效益。

5 结论

(1) 利用自行研制的恒钻压钻进试验系统开展不同强度试块的室内钻进试验,实时采集了钻头转矩、转速及位移参数,计算得出钻头输入的机械能;通过测量钻屑粒径计算得出钻屑表面能,通过测量钻头、钻屑及钻孔壁温度,计算得出钻进损耗的热能,通过测量钻进过程中的声发射特征参数,计算得出钻进损耗的声能。

(2) 分析了钻进过程中的能量转化情况,总输入能量中,转矩功占比超过 95%,钻压功占比不超过 5%;钻头输入的机械能主要转化为钻屑表面能,平均转化率为 95.6%,热能平均转化率为 4.2%。

(3) 砂浆试块钻进试验结果表明,净钻进比功与单轴抗压强度呈明显的线性关系,拟合得出净钻进比功-强度关系方程,采用混凝土、砂岩及花岗岩钻进试验结果对该方程进行验证,最大差异率为 5.07%。

(4) 分别将破碎单位体积岩石的钻屑表面能、热能及声能与试块强度进行拟合,并得出拟合方程;钻进过程中不同能量与岩石强度的关系可以互相验证,岩石强度钻测结果具有很好的适用性。

参考文献(References):

[1] 尹小涛,葛修润,李春光,等.加载速率对岩石材料力学行为的影响[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊 1):2610-2615.
YIN Xiaotao, GE Xiurun, LI Chunguang, et al. Influence of loading rates on mechanical behaviors of rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(Suppl.1):2610-2615.

[2] 张建明,唐志成,刘泉声.点荷载强度指数估算与岩浆岩的单轴压缩强度的关系[J].岩土力学,2015,36(增刊 2):595-602.
ZHANG Jianming, TANG Zhicheng, LIU Quansheng. Relation between point load index and uniaxial compressive strength for igneous rock[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(Suppl.2):595-602.

[3] 康红普,司林坡.深部矿区煤岩体强度测试与分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1312-1320.
KANG Hongpu, SI Linpo. Test and analysis of coal and rock mass strength in deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(7):1312-1320.

[4] 王凯,俞启香.钻孔法测定煤体强度的研究[J].煤炭学报,1998,23(6):43-47.
WANG Kai, YU Qixiang. Study on determination of coal mass strength by boring method[J]. Journal of China Coal Society,1998,23(6):43-47.

[5] 谭卓英,岳中琦,谭国焕,等.金刚石钻进比功及风化花岗岩实时分级研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增刊 1):2907-2912.
TAN Zhuoying, YUE Zhongqi, TAN Guohuan, et al. Study on specific energy of diamond drilling and real-time classification of weathered granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (Suppl. 1): 2907-2912.

[6] 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 and Technology,2015,44(4):612-616.

[7] 李宁,李骞,宋玲.基于回转切削的岩石力学参数获取新思路[J].岩石力学与工程学报,2015,34(2):323-329.
LI Ning, LI Qian, SONG Ling. Acquiring mechanical parameters of rock based on rotational cutting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(2):323-329.

[8] 赵同彬,赵志刚,齐炎山,等.基于大直径钻孔钻进多参量的煤体应力钻测方法[J].煤炭科学技术,2025,53(1):122-132.
ZHAO Tongbin, ZHAO Zhigang, QI Yanshan, et al. Research on coal stress measurement and assessment while drilling method based on multiple drilling parameters in large diameter drilling[J]. Coal Science and Technology, 2025,53(1):122-132.

[9] 吴洋,左宇军,陈庆港,等.深部高应力巷道钻孔卸压围岩能量耗散特征与钻孔参数研究[J].矿业研究与开发,2024,44(10):1-9.
WU Yang, ZUO Yujun, CHEN Qinggang, et al. Research on energy dissipation characteristics and drilling parameters of borehole pressure relief surrounding rock in deep high stress roadway[J]. Mining Research and Development, 2024,44(10):1-9.

[10] 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.

[11] 王琦,孙会彬,江贝,等.基于数字钻探和支持向量机预测岩体单轴抗压强度的方法[J].岩土力学,2019,40(3):1221-1228.
WANG Qi, SUN Huibin, JIANG Bei, et al. A method for predicting uniaxial compressive strength of rock mass based on digital drilling test technology and support vector machine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 1221-1228.

[12] 王玉杰,余磊,赵宇飞,等.基于数字钻进技术的岩石强度参数测定试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(9):1669-1678.
WANG Yujie, SHE Lei, ZHAO Yufei, et al. Experimental study on measurement of rock strength parameters based on digital drilling technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(9):1669-1678.

[13] 曾俊强,王玉杰,曹瑞琅,等.基于钻孔过程监测的花岗岩钻进比能研究[J].水利水电技术,2017,48(4):112-117.
ZENG Junqiang, WANG Yujie, CAO Ruilang, et al. Drilling process monitoring-based study on granite drilling specific energy [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2017,48(4):112-117.

[14] 金彤,徐振洋,王雪松,等.旋转钻进过程中的破岩能耗特征分析[J].矿业研究与开发,2024,44(4):228-236.
JIN Tong, XU Zhenyang, WANG Xuesong, et al. Energy consumption characteristics of rock breaking during rotary drilling process[J]. Mining Research and Development, 2024,44(4):228-236.

[15] 徐小荷,余静.岩石破碎学[M].北京:煤炭工业出版社,1984.
XU Xiaohe, YU Jing. Rock fragmentation[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House,1984.

[16] 赵同彬,尹延春,任文涛,等.基于煤体卸压钻孔钻屑的冲击危险性检测方法及应用[J/OL].煤炭学报:1-10[2025-01-14].https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0715.
ZHAO Tongbin, YIN Yanchun, REN Wentao, et al. Coal burst risk monitoring method based on the drilling powder of destressing drilling in coal seam and its application[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-10[2025-01-14]. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0715.

[17] 赵志刚,张凯,尹延春,等.不同应力下煤体钻孔试验及钻进能量响应研究[J].岩土力学,2023,44(10):2899-2906.
ZHAO Zhigang, ZHANG Kai, YIN Yanchun, et al. Drilling test and drilling energy response of coal under different stresses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(10):2899-2906.

[18] 李田军.PDC钻头破碎岩石的力学分析与机理研究[D].武汉:中国地质大学,2012.
LI Tianjun. Mechanical analysis and fragmentation mechanism of PDC bits drilling rock[D]. Wuhan: China University of Geosciences,2012.

[19] 于恒昌.基于数字钻探测试技术的岩石力学参数测定方法研究[D].济南:山东大学,2018.
YU Hengchang. Study on testing methods of rock mechanics parameters based on digital drilling testing technology[D]. Jinan:Shandong University,2018.

[20] 齐炎山,赵志刚,牛旭,等.钻进参数与顶板塑性软岩单轴抗压强度关系研究[J/OL].矿业安全与环保:1-8[2025-01-10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1062.TD.20241008.1026.002.html.
QI Yanshan, ZHAO Zhigang, NIU Xu, et al. Research on the relationship between drilling parameters and uniaxial compressive strength of plastic soft rock in the top plate[J/OL]. Mining Safety & Environmental Protection:1-8[2025-01-10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1062.TD.20241008.1026.002.html.

[21] 潘一山,徐连满.钻屑温度法预测冲击地压的试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(12):2228-2232.
PAN Yishan, XU Lianman. Experimental investigation on temperature of drilling cuttings to predict rock burst[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(12): 2228-2232.

[22] 李忠华,于文鑫,徐连满,等.钻进速度对钻屑温度影响的实验研究[J].实验力学,2012,27(4):498-502.
LI Zhonghua, YU Wenxin, XU Lianman, et al. Experimental study of the effect of drilling speed on drill cuttings temperature [J]. Journal of Experimental Mechanics,2012,27(4):498-502.

[23] 谢凯楠.基于声发射的岩石脆性破坏雪崩动力学统计特征及其应用研究[D].重庆:重庆大学,2020.
XIE Kainan. Statistical characteristics of avalanche dynamics and its application based on acoustic emission of rock brittle fracture[D]. Chongqing:Chongqing University,2020.

[24] 张凯,刘光伟,赵志刚,等.煤体应力监测模拟试验设备研制与应用[J].矿业安全与环保,2023,50(2):71-76.
ZHANG Kai, LIU Guangwei, ZHAO Zhigang, et al. Development and application of simulation experimental equipment for coal stress measurement while drilling[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(2): 71-76.

[25] 王宇恒,于庆磊,牛鹏,等.基于随钻参数的岩石单轴抗压强度表征模型研究[J].东北大学学报(自然科学版),2023,44(8):1168-1176.
WANG Yuheng, YU Qinglei, NIU Peng, et al. Uniaxial compressive strength model of rock using measurement while drilling (MWD) data[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2023, 44(8): 1168-1176.