

基于煤体卸压钻孔钻屑的冲击危险性检测方法及应用

赵同彬^{1,4}, 尹延春^{1,4}, 任文涛², 张庆志¹, 高久国³, 赵志刚^{1,4}

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东能源集团鲁西矿业有限公司, 山东 菏泽 274900; 3. 山东唐口煤业有限公司, 山东 济宁 272055; 4. 山东科技大学 山东省深部矿井动力灾害智能防控重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要: 钻屑法是煤矿常用的冲击地压危险性检测方法, 而大直径卸压钻孔的施工方法与钻屑法类似, 但由于缺少相应的大直径卸压钻孔的钻粉率指数以及高效便捷的称重方法, 大直径卸压钻孔钻屑法未能得到广泛应用。文中基于标准孔径钻屑法的钻粉率指数, 提出考虑卸压扰动的大直径卸压钻孔钻粉率指数及临界煤粉量确定方法; 通过开展室内煤样钻孔卸压-煤粉测量试验, 探究钻孔孔径、煤粉量、煤样初始应力及卸压后应力间的函数关系, 进而给出孔距为 1、2 和 3 m 条件下孔径为 150 mm 的卸压钻孔钻粉率指数及临界煤粉量的建议值; 并结合研发的煤粉自动测量装置, 在井下冲击危险巷道开展大直径卸压钻孔钻屑检测应用。结果表明: 煤样钻孔煤粉量与钻孔孔径、煤样应力呈正相关关系, 钻孔卸压后煤样应力降低率与钻孔孔径-孔距比呈正相关性; 孔径为 150 mm 的卸压钻孔的钻粉率指数大于孔径为 44 mm 的钻孔的钻粉率指数, 且随着钻孔间距的减小而逐渐增大; 山东唐口矿 6310 工作面孔径为 150 mm 的卸压钻孔的煤粉量为 25~93 kg/m, 在巷帮 12~14 和 18~20 m 深处存在高应力区, 沿空巷道煤粉量明显大于实体煤巷道。通过大直径卸压钻孔钻粉率指数确定方法和煤粉自动测量装置相结合, 形成了基于煤体卸压钻孔钻屑的冲击危险性检测方法, 为巷道高应力危险区“卸压-检测”同步作业提供了一种实用技术途径。

关键词: 冲击地压; 卸压钻孔; 钻屑法; 钻粉率指数; 临界煤粉量

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)05-2384-10

Coal burst risk monitoring method based on the drilling powder of destressing drilling in coal seam and its application

ZHAO Tongbin^{1,4}, YIN Yanchun^{1,4}, REN Wentao², ZHANG Qingzhi¹, GAO Jiuguo³, ZHAO Zhigang^{1,4}

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Shandong Energy Group Luxi Mining Co., Ltd., Heze 274900, China; 3. Shandong Tangkou Coal Co., Ltd., Jining 272055, China; 4. Shandong Key Laboratory of Intelligent Prevention and Control of Dynamic Disaster in Deep Mines, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The drilling powder monitoring method is one commonly used method for coal burst risk evaluation in coal mines. The construction method of large-diameter destressing drilling is similar to that of the drilling powder monitoring method. However, due to the lack of drilling powder rate index and efficient weighing method, the drilling powder method based on destressing drilling has not been widely used. Therefore, based on the drilling powder rate index of standard

收稿日期: 2024-06-23 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0715

基金项目: 山东省泰山学者工程专项资助项目(tstp20221126); 国家自然科学基金资助项目(52074167); 山东省高等学校青创科技支持计划资助项目(2023KJ093)

作者简介: 赵同彬(1975—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 教授, 博士。E-mail: ztwh2001@163.com

通讯作者: 尹延春(1988—), 男, 山东济南人, 教授, 博士。E-mail: yycrsd@163.com

引用格式: 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]. 煤炭学报, 2025, 50(5): 2384-2393.

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]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2384-2393.



移动阅读

drilling powder monitoring method, one method for determining the drilling powder rate index and the critical powder of large-diameter destressing drilling is proposed, in which its pressure relief effect is considered. By carrying out the laboratory tests of drilling in coal specimens, the functional relationship among the drilling diameter, powder, initial stress and stress after pressure relief is obtained. Then the suggested value of the drilling powder rate index and critical powder of 150mm diameter drilling with 1, 2 and 3 m spacing are obtained. Finally, by using the auto measuring device, the drilling powder of destressing drillings are measured in coal burst risk roadway. The results show that the drilling powder is positively correlated with the drilling diameter and coal stress. Meanwhile, the stress reduction rate after drilling is positively correlated with the drilling diameter-spacing ratio. The drilling powder rate index of 150 mm diameter destressing drilling is higher than that of 44 mm diameter drilling, and the index increases with the decrease of drilling spacing. The drilling powder of 150 mm diameter drilling in 6310 workingface of Tangkou Mine in Shandong is 25–93 kg/m, and there is high stress area at the depth of 12–14 m and 18–20 m from the coal wall. The drilling powder in the gob-side roadway is significantly heavier than that in the solid-coal roadway. Combing the drilling powder rate index determining method and the powder auto measuring device for large-diameter drilling, the coal burst risk monitoring method based on the drilling powder of destressing drilling is developed, which can provide one operative technical approach for the synchronous operation of pressure relief-monitoring in coal burst risk roadway.

Key words: coal burst; destressing drilling; drilling powder monitoring method; drilling powder rate index; critical drilling powder

0 引言

冲击地压是我国深部煤矿典型的动力灾害之一,其发生频次与强度随开采深度呈急剧增加的趋势^[1-2]。高应力是冲击地压发生的必要条件^[3-5],高应力危险区监测预警对于防治冲击地压灾害具有重要作用。近年来,相关监测方法,诸如钻屑法、应力在线监测、微震、震动波计算机断层扫描等技术的研发与推广使用^[6-8],提高了冲击地压灾害监测预警的准确性和矿井生产的安全性^[9]。

钻屑法是工程现场可靠度较高的一种冲击危险区检测方法,该方法根据钻进过程中钻孔排出的煤粉量和动力效应判别冲击危险性^[10],钻孔煤粉量预警指标的合理确定是钻屑法应用的关键。曲效成等^[11]、唐巨鹏等^[12-13]、周洋等^[14]、李京达等^[15]、顾广耀等^[16]和GENG等^[17]研究了煤体应力和钻孔孔径等因素对煤粉量的影响特征。丁传宏等^[18]给出了不同采深、煤厚和煤体力学参数等因素下钻屑量修正系数。朱广安等^[19-20]针对富水冲击地压矿井钻屑法测试误差大的问题,给出了不同含水率煤体的钻屑法修正系数。杜才溢等^[21]提出了钻屑量临界方程方法,将钻屑法判定的冲击危险区细分为冲击危险区、潜在冲击危险区和无冲击危险区。上述研究为不同工况下的钻孔钻粉率指数及临界煤粉量等预警指标的确定提供了依据,提高了巷道冲击危险性钻屑法的检测准确性。

《防治煤矿冲击地压细则》等相关技术规范,明确要求要对冲击危险区进行必要的卸压解危。目前,大

直径卸压钻孔技术是冲击地压矿井中最常用的、基础性卸压技术^[22-24]。大直径卸压钻孔技术与钻屑法钻孔技术具有相似之处,其排粉量均与煤体应力呈正相关,因此,在理论上,大直径卸压钻孔技术的排粉量也可以用于预测冲击危险性^[25]。但与低扰动的小孔径钻屑法不同,大直径卸压钻孔孔径一般为100~200 mm,部分矿井的孔径达300 mm^[26]。卸压钻孔施工后煤体的应力会在一定时间内进行调整转移^[27],大直径钻孔所测煤粉量为卸压前的数据,反映的是卸压前煤体的应力分布情况。因此,在大直径卸压钻孔的钻屑法应用中,应考虑其卸压效果,但现阶段尚无大直径卸压钻孔的钻粉率指数及临界煤粉量的确定方法,因此,限制了卸压钻孔钻屑法的应用。鉴于此,文中提出了综合考虑钻孔孔径及卸压效果的卸压钻孔钻粉率指数确定方法,并通过室内试验测试孔径为150 mm的钻孔的钻粉率指数和临界煤粉量,最后结合研发的煤粉自动测量装置,开展井下大直径卸压钻孔的钻屑法测试研究,以期为巷道冲击危险性检测提供依据。

1 考虑卸压的钻粉率指数确定方法

1.1 钻粉率指数确定流程

确定大直径卸压钻孔的钻粉率指数及临界煤粉量时,不仅要考虑孔径因素,同时还要考虑卸压效果,只有综合上述因素才能确定合理的钻粉率指数。对于矿井同一条巷道的同一施工位置,其冲击地压发生的临界条件不应受钻屑法或卸压钻孔的施工而发生

变化,二者的区别是卸压钻孔孔径大、可以改变煤体实际的应力值及释能状态,从而降低冲击风险。文中假定用标准钻屑法所得的正常煤粉量表征巷道的正常应力、用临界煤粉量表征巷道冲击临界应力。因此,可利用标准钻屑法所得的正常煤粉量和临界煤粉量得到巷道煤体的正常应力及冲击临界应力,并由煤体应力反算卸压钻孔的正常煤粉量和临界煤粉量,从而确定卸压钻孔的钻粉率指数,具体过程为:

第1步,采用数值模拟、理论分析、室内试验或现场测试等技术手段,研究钻孔孔径及初始应力对煤体钻孔煤粉量的影响特征,并定量分析钻孔前、后的煤体应力降低值;确定标准钻屑法钻孔(孔径为 d)的煤粉量 G_d 与煤体初始应力 σ_v 间的函数表达式、卸压钻孔(孔径为 D)的煤粉量 G_D 与卸压后应力 σ_r 间函数表达式:

$$G_d = f_d(\sigma_v) \quad (1)$$

$$G_D = f_D(\sigma_r) \quad (2)$$

第2步,现场测试,在工作面无采动影响区进行标准钻屑法测试,得到不同钻孔深度 b 处的正常煤粉量 G_{d-0} ,并根据孔深巷高比和钻粉率指数 ζ_d 确定临界煤粉量 G_{d-p} ;根据标准钻屑法钻孔的煤粉量-煤体初始应力函数表达式(1)、不同钻孔深度处的正常煤粉量和临界煤粉量,得到相对应的正常应力 σ_0 和冲击临界

应力 σ_p 。

第3步,根据卸压钻孔的煤粉量-卸压后应力间函数表达式(2),利用正常应力 σ_0 计算得到不同钻孔深度处的卸压钻孔的正常煤粉量 G_{D-0} ,利用冲击临界应力 σ_p 得到不同钻孔深度处的临界煤粉量 G_{D-p} ;进而根据临界煤粉量和正常煤粉量的比值,确定不同钻孔深度处的卸压钻孔钻粉率指数:

$$\zeta_D = \frac{G_{D-p}}{G_{D-0}} = \frac{f_D(\sigma_r = \sigma_p)}{f_D(\sigma_r = \sigma_0)} \quad (3)$$

标准钻屑法和卸压钻孔煤粉量及煤体应力关系及卸压钻孔钻粉率指数确定流程图,如图1和图2所示。

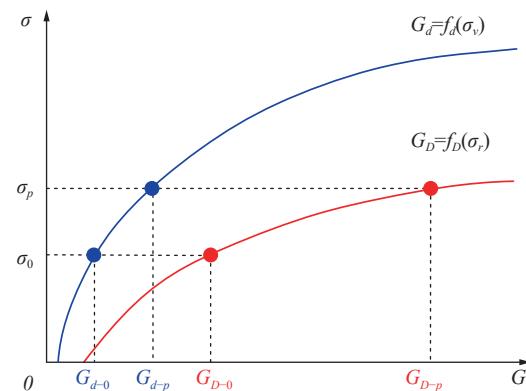


图1 标准钻屑法和卸压钻孔煤粉量及煤体应力关系

Fig.1 Relationship between the standard drilling powder and stress of coal in drilling method and destressing drilling method

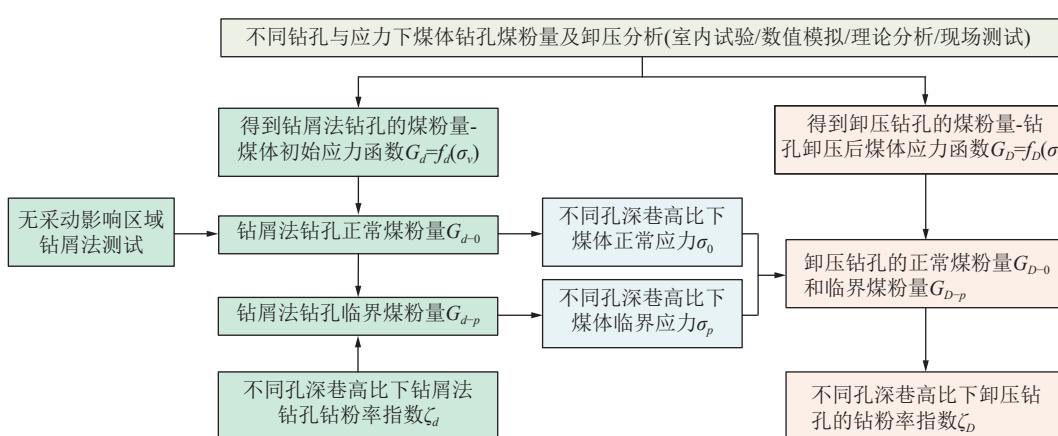


图2 卸压钻孔钻粉率指数确定流程

Fig.2 Flow chart of determining the drilling powder rate index of destressing drilling

1.2 煤体应力-钻孔孔径-煤粉量关系确定方法

在卸压钻孔钻粉率指数确定过程中,首先,需要确定2个函数关系,即标准钻屑法钻孔的煤粉量-煤体初始应力间函数表达式(1)、卸压钻孔的煤粉量-卸压后应力间函数表达式(2)。上述表达式可采用现场实测、理论分析和室内试验等方法进行确定。

现场煤体应力实测方法有钻孔应力计法、应力解

除法等,其中钻孔应力计主要监测煤体某点处的应力增量(数据为应力计的增量,不等同于煤体的应力增量),应力解除法可测试确定某点的原岩应力状态,部分矿井也通过安装空心包体应力计(不进行解除)监测顶板三向应力演化特征^[28]。该类实测方法可获得单点应力数据,难以获得煤体支承压力分布的准确数据以用于确定式(1)和式(2)。

理论分析主要是通过建立孔周煤体平面应变或应力模型,根据钻孔体积及形变位移来推算煤粉量。钻孔煤粉量(G)可划分成静态煤粉量和动态煤粉量2部分,静态煤粉量等于钻孔体积内的煤粉量,动态煤粉量则是由于应力作用下的钻孔弹性变形、塑性扩容等产生的附加煤粉量。潘一山^[29]、赵阳升等^[30]给出了煤粉量的基本公式,即:

$$G = \frac{\pi D \rho}{2} \left(\frac{D}{2} + 2u_a \right) \quad (4)$$

式中: ρ 为煤体密度, kg/m^3 ; u_a 为钻孔孔壁位移, mm , 其值与钻孔直径及煤体应力相关。

在式(4)的基础上,学者们又考虑了有效应力、煤岩体损伤等因素,提出了更加具体且有针对性的煤粉量计算式。

在室内试验中,通常将取自现场的原煤加工成小尺寸的立方体试件或圆柱体试件,对试件施加荷载后,利用钻机进行钻孔,并收集钻屑(煤粉)进行称重^[13,20]。煤样应力、钻孔孔径与煤粉量关系常采用曲线拟合的方法进行确定^[13]。

为了更加详细的解释大直径卸压钻孔的钻粉率指数确定方法,检验其实用性,下面将采用室内试验和现场测试的方法确定孔径为150 mm的卸压钻孔的钻粉率指数,并进行工程应用。

2 钻孔钻粉率指数及临界煤粉量

2.1 工程背景

山东唐口煤矿隶属于山东能源集团鲁西矿业公司,该煤矿是大埋深冲击地压矿井,主采3煤层,煤种属于气煤。为了防控冲击地压,布设大直径卸压钻孔为该矿井的基础防冲措施。唐口矿每月施工的卸压钻孔约30 km,钻孔工程量巨大。因此,为了拓展卸压钻孔的冲击危险检测功能,文中以唐口矿6310工作面为试验地点,开展了大直径卸压钻孔钻粉率指数确定及钻屑监测应用。

唐口矿6310工作面走向长度为840.5 m,倾斜长度为189.2 m,煤层平均厚度为9.5 m,工作面埋深约为950 m。6310工作面东南侧为6309工作面采空区留设宽度为5 m的区段煤柱,如图3所示。顶板为粉砂岩、中砂岩、泥岩和细砂岩等,煤层及顶底板具有弱冲击倾向性。巷道为矩形断面,宽为5 m、高为4 m,采用锚杆(索)+钢带+超前液压支架的方式进行组合支护。6310回采工作面冲击危险性影响因素主要有大埋深、坚硬顶板、留底煤和一侧临空等,采用综合指数法分析确定工作面具有中等冲击危险性,并采用多因素耦合法划分冲击危险区域。为了有效防治冲击

地压灾害,6310工作面回采期间,主要采用微震、煤体应力在线和钻屑法等进行冲击危险监测预警,同时采用煤层大直径钻孔和深孔爆破断顶技术作为预卸压技术,采用煤层爆破卸压技术作为解危措施。其中,标准钻屑法钻孔的孔径为44 mm、孔深为14 m,弱冲击危险区钻孔间距为30 m、中等冲击危险区钻孔间距为20 m、强冲击危险区孔间距为10 m;大直径卸压钻孔孔径为150 mm、孔深为25 m,弱冲击危险区孔间距为3 m、中等冲击危险区孔间距为2 m、强冲击危险区孔间距为1 m。

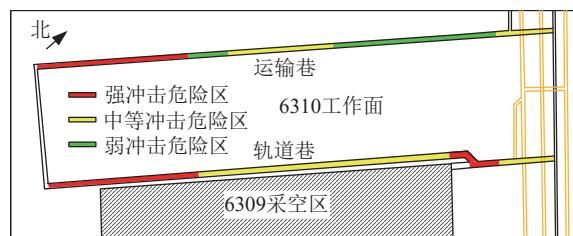


图3 唐口矿6310工作面及冲击危险区域划分

Fig.3 6310 working face and coal burst risk area in Tangkou Coal Mine

2.2 煤样钻孔卸压与煤粉测量试验方案

采用室内试验法确定标准钻屑法钻孔的煤粉量-煤体初始应力间函数表达式、卸压钻孔的煤粉量-卸压后应力间函数表达式。

为了开展煤样钻孔试验,研制了一套煤样钻孔加载装置,该装置包括加载盒、钻机和导轨等。加载盒体可对试件进行侧向位移约束,前部承压板中部留有圆孔,可允许钻杆穿过,以便于对煤样进行钻孔,煤样钻孔加载装置如图4所示。试验所用煤样取自山东唐口煤矿6310工作面,煤样密度为1441 kg/m^3 ,天然含水率为4.9%~6.3%,制备成100 mm×100 mm×100 mm

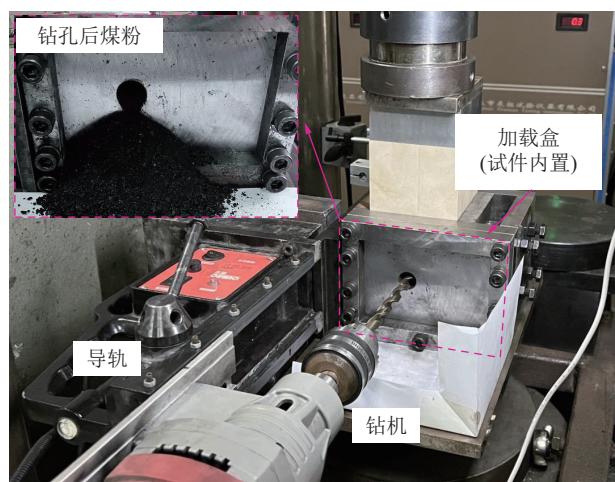


图4 试验布置

Fig.4 Testing scheme

的立方体试件。为了研究钻孔孔径 D 及初始应力 σ_v 对煤体钻孔煤粉量 G 的影响, 试验共设计 4 种初始应力条件, σ_v 分别设计为 10、20、30 和 40 MPa。

6310 工作面钻孔孔径为 44 和 150 mm, 钻距 L 按照 1 m 计算时, 则孔径-孔距比 D/L 为 0.044~0.15。考虑尺寸相似比和试验条件, 室内试验中每种初始应力下共进行 5 种孔径钻孔测试, D 分别为 6、8、10、12 和 14 mm, 试验中 L 可视为 100 mm, 则实验室中 D/L 为 0.06~0.14, 与现场钻孔参数满足相似条件。

试验过程中, 将加载盒放置在 RLJW-2000 岩石力学试验机加载台上, 煤样放置在加载盒内部后, 固定盒体侧板, 限制煤样侧向位移。安装钻机和导轨, 使钻杆对准加载盒前部的圆孔。试验机按照位移加载方式对煤样施加轴向载荷, 加载速度为 0.005 mm/s。当轴向应力加载至设计初始应力后, 将试验机加载目

标由载荷调整为位移, 即后续试验中保持煤样轴向应变不变。采用人工推进钻机的方式对煤样进行钻孔, 为了减小钻机钻进造成的试验误差, 参考工程现场施工方法, 钻进时尽量保持推进力相同, 每个煤样钻进 2~3 min, 以完成钻孔。试验过程中, 收集钻孔排出的煤粉, 并对其进行称重。由于钻孔过程中利用试验机控制煤样轴向应变保持不变, 钻孔完毕后可以监测到应力降低现象, 进而研究钻孔对煤样应力的卸压效果。

2.3 煤粉量与应力关系

试验得到的不同初始应力和不同孔径钻孔下的煤样煤粉量见表 1, 变化特征如图 5 所示。随着初始应力的增加和钻孔孔径的增大, 钻孔过程产生的煤粉量逐渐增大^[11-12], 且增量梯度与孔径、应力呈正相关关系。

表 1 不同初始应力、孔径下煤粉量及煤样应力降低率

Table 1 Drilling powder and stress reduction rate of coal under different initial stress and drilling diameter

| D/mm | $G/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$ | | | | $\delta_\sigma/\%$ | | | |
|---------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | $\sigma_v=10 \text{ MPa}$ | $\sigma_v=20 \text{ MPa}$ | $\sigma_v=30 \text{ MPa}$ | $\sigma_v=40 \text{ MPa}$ | $\sigma_v=10 \text{ MPa}$ | $\sigma_v=20 \text{ MPa}$ | $\sigma_v=30 \text{ MPa}$ | $\sigma_v=40 \text{ MPa}$ |
| 6 | 0.045 | 0.065 | 0.071 | 0.099 | 1.07 | 1.55 | 1.72 | 3.64 |
| 8 | 0.081 | 0.103 | 0.119 | 0.164 | 1.59 | 2.27 | 2.52 | 4.73 |
| 10 | 0.113 | 0.137 | 0.167 | 0.205 | 2.07 | 2.94 | 4.01 | 5.40 |
| 12 | 0.175 | 0.205 | 0.253 | 0.326 | 3.08 | 4.35 | 6.02 | 9.14 |
| 14 | 0.228 | 0.267 | 0.339 | 0.407 | 3.68 | 5.30 | 8.72 | 10.78 |

注: δ_σ 为煤样应力降低率, %。

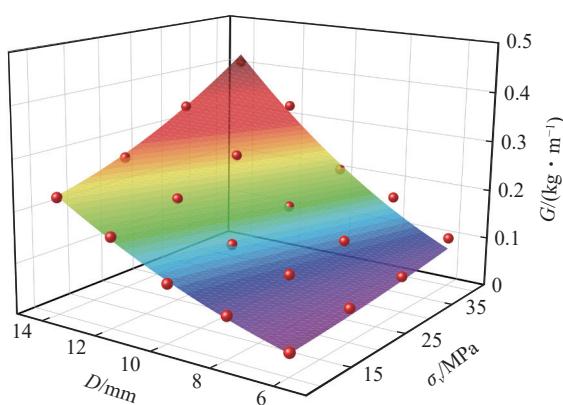


图 5 煤粉量-钻孔孔径-初始应力关系

Fig.5 Relationship among the drilling powder, drilling diameter and initial stress

为了确定煤粉量-钻孔孔径-初始应力关系表达式, 在理论公式(式(4))的基础上, 将函数简化为:

$$G = \frac{\pi D^2 \rho}{4} (1 + A) \quad (5)$$

式中: A 为与煤体应力相关的一个参数。

利用式(5)进行曲面拟合, 具体表达式为

$$G = 0.00109 D^2 \left(1 + 0.00153 \sigma_v^{1.756}\right), \quad R^2 = 0.987 \quad (6)$$

试验得到的不同初始应力和不同孔径钻孔下的煤样应力降低率见表 1。试验中煤样整体变形量不变时, 钻孔施工完毕后, 卸压钻孔为煤样变形提供了补偿空间, 从而导致煤样应力降低^[31]。当初始应力为 30 MPa 时, 钻孔孔径从 6 mm 增大至 14 mm 时, 煤样的应力降低率由 1.72% 增大至 8.72%。当钻孔孔径为 14 mm, 初始应力从 10 MPa 增大至 40 MPa 时, 煤样应力降低率由 3.68% 增大至 10.78%。随着初始应力和钻孔孔径的增大, 钻孔周围煤体在高应力作用下更易产生裂隙, 形成卸压区, 此外应力降低程度及卸压效果也随之变得更加明显。

研究表明^[22,31-32], 钻孔 D 与 L 共同影响钻孔的卸压效果, 煤体冲击倾向性弱化程度、巷帮峰值应力降低值与孔径呈正相关性, 与孔距呈负相关性。因此, 在煤样应力卸压室内试验数据分析中, 用 D/L 代替 D

作为一个变量, 如图6所示。将应力降低率、钻孔孔径-孔距比、初始应力等数据进行曲面拟合, 可得拟合函数为

$$\delta_{\sigma} = 0.117\sigma_v^{0.871} \left(\frac{D}{L}\right)^{1.68}, R^2 = 0.96 \quad (7)$$

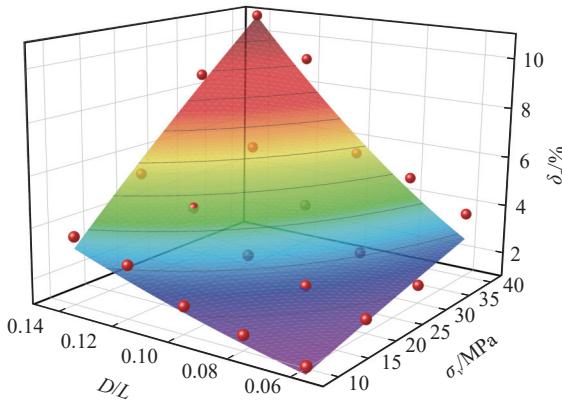


图6 煤样应力降低率-钻孔孔径-初始应力关系

Fig.6 Relationship among the stress reduction rate, drilling diameter and initial stress

2.4 煤体正常应力及冲击临界应力

在6310工作面无采动影响区进行孔径为44 mm的钻孔标准钻屑法测试, 可得到不同钻孔深度处的正常钻屑量: 孔深巷高比 $a < 1.5$ 段, 正常煤粉量为2.27 kg; 孔深巷高比 $a=1.5 \sim 3$ 段, 正常煤粉量为2.78 kg; 孔深巷高比 $a > 3$ 段, 正常煤粉量为3.58 kg。将正常煤粉量乘以对应的钻粉率指数, 可得到孔径为44 mm的钻孔标准钻屑法的临界煤粉量, 具体见表2。

根据6310工作面煤体的室内试验测试结果及拟合关系式(6), 可得到孔径为44 mm的钻孔的煤体应力-煤粉量的拟合关系式为

$$\sigma_v = (309.722G_{44} - 653.588)^{0.569} \quad (8)$$

分别将不同孔深处的孔径为44 mm的钻孔的正常煤粉量、临界煤粉量代入关系式(8), 可得到不同孔

表2 44 mm孔径钻孔的煤粉量及煤体应力

Table 2 Drilling powder and stress of coal with 44 mm diameter drilling

| a | < 1.5 | $1.5 \sim 3$ | > 3 |
|--|---------|--------------|-------|
| 正常煤粉量 G_{44-0} / (kg · m ⁻¹) | 2.27 | 2.78 | 3.58 |
| 正常应力 σ_0 / MPa | 9.21 | 20.82 | 32.55 |
| 钻粉率指数 ζ_{44} | 1.50 | 2.00 | 3.00 |
| 临界煤粉量 G_{44-p} / (kg · m ⁻¹) | 3.41 | 5.56 | 10.74 |
| 冲击临界应力 σ_p / MPa | 30.35 | 52.89 | 89.11 |

深处的煤体正常应力和冲击临界应力, 具体结果为: 孔深巷高比 $a < 1.5$ 段, 煤体正常应力为9.21 MPa、冲击临界应力为30.35 MPa; 孔深巷高比 $a=1.5 \sim 3$ 段, 煤体正常应力为20.82 MPa、冲击临界应力为52.89 MPa; 孔深巷高比 $a > 3$ 段, 煤体正常应力为32.55 MPa、冲击临界应力为89.11 MPa。

2.5 钻粉率指数和临界煤粉量

针对不同冲击危险区可知: 6310工作面的大直径钻孔施工间距是变化的。以中等冲击危险区为例, 大直径钻孔间距为2 m, 根据式(6)和式(7), 可得到孔径为150 mm的卸压钻孔的煤粉量-卸压后煤体应力的拟合关系式为

$$\sigma_r = (26.667G_{150} - 653.595)^{0.569} - 0.0015(26.667G_{150} - 653.595)^{1.065} \quad (9)$$

对于同一条巷道, 施工钻屑法或卸压钻孔, 巷道正常应力和冲击临界应力是不变的, 仅实际应力发生改变。因此, 将表2中不同孔深处的煤体正常应力和冲击临界应力代入式(9), 可得到不同孔深处孔径为150 mm的钻孔的正常煤粉量和临界煤粉量, 如图7所示。临界煤粉量和正常煤粉量的比值即为钻粉率指数。对于中等冲击危险区域(孔距2 m), 孔深巷高比 $a < 1.5$ 段, 钻粉率指数为1.53; 孔深巷高比 $a=1.5 \sim 3$ 段, 钻粉率指数为2.12; 孔深巷高比 $a > 3$ 段, 钻粉率指数为3.39, 具体数据见表3。

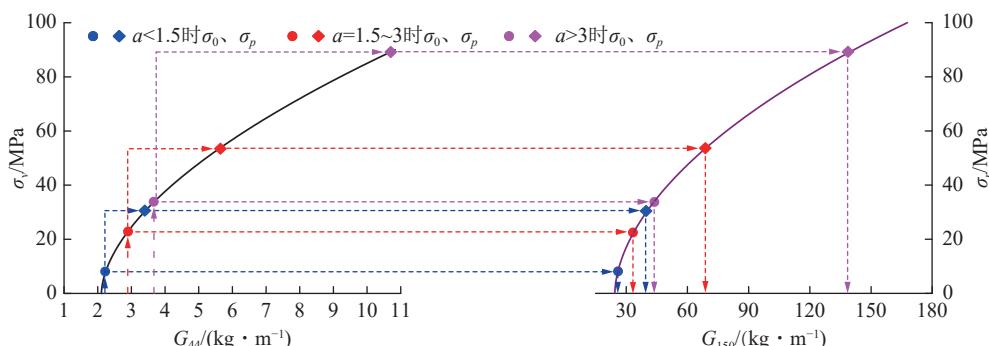


图7 基于孔径为44 mm的钻孔煤粉量计算孔径为150 mm的钻孔煤粉量曲线

Fig.7 Calculation curves of drilling powder in 150 mm diameter drilling based on that in 44 mm diameter drilling

表3 孔距2 m时孔径为150 mm的钻孔煤粉量及
钻粉率指数

Table 3 Drilling powder and rate index of coal when the
drilling diameter is 150 mm, and the space is 2 m

| a | <1.5 | 1.5~3 | >3 |
|--|-------|-------|--------|
| 正常应力 σ_0 /MPa | 9.21 | 20.82 | 32.55 |
| 正常煤粉量 G_{150-0} /(kg·m ⁻¹) | 26.38 | 32.28 | 41.52 |
| 冲击临界应力 σ_p /MPa | 30.35 | 52.89 | 89.11 |
| 临界煤粉量 G_{150-p} /(kg·m ⁻¹) | 40.44 | 68.35 | 140.74 |
| 钻粉率指数 ζ_{150} | 1.53 | 2.12 | 3.39 |

利用上述方法,也可以得到强冲击危险区(孔间距1 m)、弱冲击危险区(孔间距3 m)的钻粉率指数,具体见表4。

根据大直径卸压钻孔的钻粉率指数及正常煤粉量,可以确定相应的临界煤粉量。由于卸压孔孔深为25 m,距煤壁20 m以外范围的高应力对巷帮冲击破坏的作用很小,文中仅计算孔深 $b=20$ m范围内的煤粉量。同时,根据孔深巷高比和工程实际,将临界煤粉量划分为4个区间,每5 m作为1个区间,不同钻

孔间距下的大直径钻孔临界煤粉量见表4,其中距煤壁11~15 m区间的临界煤粉量可通过插值法进行确定。

3 卸压钻孔的钻屑监测应用及结果分析

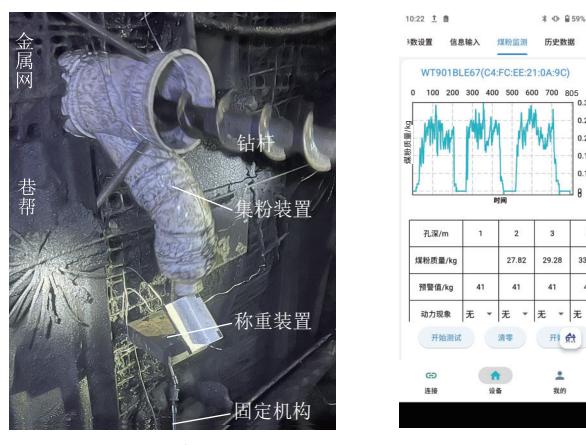
3.1 煤粉流动称重方法

在钻屑法应用中,煤粉称重是一个重要环节。目前,钻屑法常采用袋子或小桶收集煤粉,然后用电子秤对其进行称重。对于孔径为150 mm的大直径钻孔,因其钻屑过程中产生的煤粉量很大,采用小桶+电子秤称重法时,劳动强度大、工作效率低。因此,针对大直径钻孔煤粉称重难题,笔者团队提出了“散体流动质量”测量法,并研发了一套煤粉自动测量装置^[10],该装置由集粉装置、称重装置、数据处理系统和固定装置等组成,如图8所示。钻孔排出的煤粉通过集粉装置流至称重装置的称重滑槽中,称重滑槽底部安装有称重传感器从而实现实时监测滑槽上部的煤粉质量,并利用数据处理系统计算得到每米钻孔排出的煤粉质量。

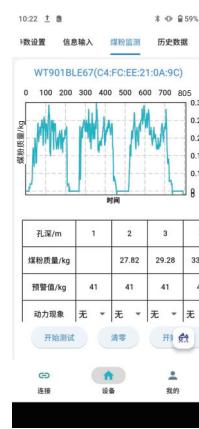
表4 不同孔距下孔径为150 mm的卸压钻孔的钻粉率指数和临界煤粉量

Table 4 Drilling powder rate index and critical drilling powder of the 150 mm diameter destressing
drilling with different spacing

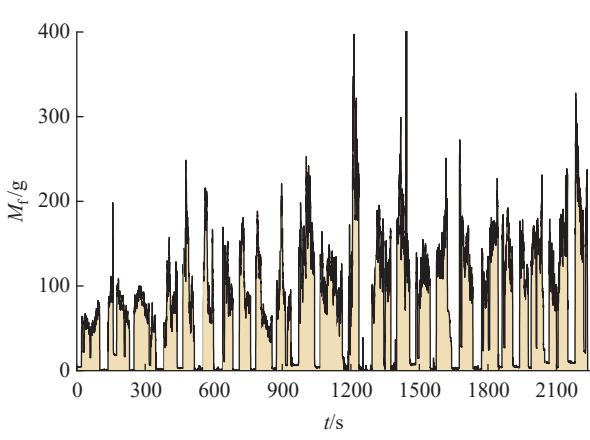
| 孔距 L /m | 钻粉率指数 ζ_{150} | | | 临界煤粉量 G_{150-p} /(kg·m ⁻¹) | | | |
|-----------|---------------------|---------------------|---------|--|----------------|-----------------|-----------------|
| | $A < 1.5$ | $1.5 \leq a \leq 3$ | $a > 3$ | $b=1\sim 5$ m | $b=6\sim 10$ m | $b=11\sim 15$ m | $b=16\sim 20$ m |
| 1 | ≥1.62 | ≥2.52 | ≥5.73 | 42.75 | 81.31 | 137.12 | 237.92 |
| 2 | ≥1.53 | ≥2.12 | ≥3.39 | 40.44 | 68.35 | 95.71 | 140.74 |
| 3 | ≥1.52 | ≥2.05 | ≥3.17 | 39.97 | 66.17 | 91.00 | 131.43 |



(a) 测量装置^[9]



(b) APP



(c) 卸压钻孔煤粉流动质量-时间曲线

图8 煤粉自动测量装置及数据曲线

Fig.8 Auto measuring device for drilling powder and data curve

称重滑槽倾斜放置、倾角大于煤粉休止角,煤粉在称重滑槽上处于流动状态,称重传感器监测数据为

某一时刻 t 称重滑槽上的煤粉质量,将其定义为煤粉流动质量 M_f ,监测数据如图8c所示。某时间段内钻

孔排出的煤粉总质量 M , 可对煤粉流动质量 M_f 进行积分求解, 函数关系为^[10]:

$$M = v_t \int_{t_1}^{t_2} M_f dt = f(M_s, M) M_s \quad (10)$$

式中: v_t 为称重滑槽上部煤粉流动速度, m/s; M_s 为煤粉累加质量, 是 $t_1 \sim t_2$ 时间段内煤粉流动质量 M_f 的总和, kg; $f(M_s, M)$ 为煤粉质量标定函数, 可通过现场测试获得。

现场测试表明^[10], 在标准孔径钻屑法测试中, 煤粉自动测量方法的误差均值为 5.13%, 误差小于 10% 的数据占比 86.91%, 因此, 采用煤粉自动测量装置能够在保证测量高准确度的同时, 降低人员劳动量。

笔者团队在原有装置基础上对称重装置进行了升级, 监测数据通过蓝牙实时传输至煤安手机, 利用开发的煤粉钻测应用程序 (Application, APP) 计算煤粉量, 并且记录钻孔过程中的动力现象。

3.2 卸压钻孔煤粉量监测结果

6310 工作面沿空巷道和实体煤巷道中等冲击危险区的大直径卸压钻孔 (孔距 2 m) 煤粉量监测结果如图 9 所示。对于实体煤巷道, 2~6 m 内煤粉量为 25~55 kg/m, 为低应力区; 距巷帮 12~14 m 和 18~20 m 处煤粉量多, 最大煤粉量达 93 kg/m, 为高应力集中区。对于沿空巷道, 煤粉量分布特征与实体煤巷道类似, 但煤粉量明显增多, 且高应力区范围明显大于实体煤巷道, 与沿空巷道强矿压显现特征基本吻合。现场测试中, 大直径卸压钻孔煤粉量未超过临界煤粉量, 且工作面回采过程中无大能量微震事件、冲击破坏现象等, 表明当前卸压钻孔参数设计及布置可以满足卸压需求。

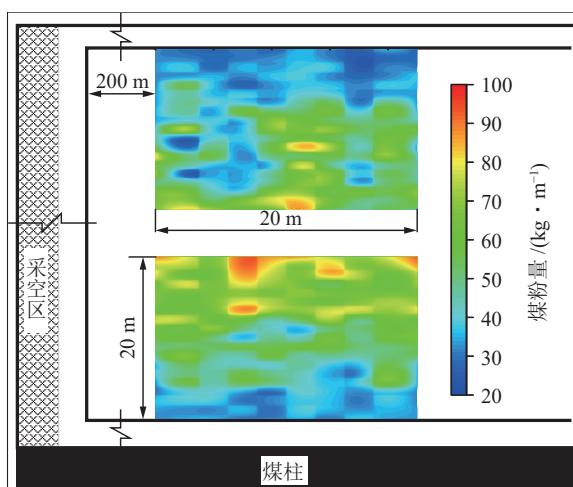


图 9 中等冲击危险区大直径钻孔煤粉量分布云图

Fig.9 Drilling powder distribution of destressing drilling in middle coal burst risk area

3.3 讨论

不同冲击地压矿井、不同煤层、不同采区及采掘工作面的工程地质和技术条件具有明显的差异性, 冲击地压发生时的临界条件也是不同的^[3,9]。卸压钻孔的钻粉率指数及临界煤粉量应根据矿井或工作面具体条件及钻孔卸压参数等进行合理确定。文中所提出的钻粉率指数是根据唐口矿煤样及卸压参数确定的, 适用于唐口矿 3 煤工作面条件施工孔径为 150 mm 的卸压钻孔, 在该矿井同一煤层具有一定的通用性。所提出的临界煤粉量适用于唐口矿 6310 工作面, 在唐口矿其他工作面应用时, 应参照标准钻屑法, 根据应用工作面无采动影响区的卸压钻孔正常煤粉量及钻粉率指数来确定卸压钻孔的临界煤粉量。在其他矿井应用时, 应在相应矿井的采掘工作面采集煤样重新进行试验以确定钻孔孔径、煤体应力、煤粉量及应力降低率间的函数关系, 进而结合应用工作面自身条件确定相应的大直径卸压钻孔钻粉率指数及临界煤粉量。同时, 当卸压钻孔煤粉量超标时, 建议利用标准钻屑法进一步检验, 并根据检验结果采取相应措施。

煤体应力钻测技术是矿山采动应力监测的新方法, 文中所提出基于卸压钻孔钻屑的冲击危险性钻测方法是该技术的一种新途径。煤体应力钻测技术主要通过监测卸压钻机的转矩、转速、推进力和振动响应等钻进参数, 利用钻进参数反演煤体应力^[33-35], 相比于钻孔应力计等点监测方法, 钻测技术可获得卸压孔区支承压力的空间分布特征, 为冲击危险智能判识、钻机钻进自主决策和卸压效果实时评价等提供关键数据。与文中所解决的问题类似, 煤体应力钻测技术所测钻进参数反映的是施工过程中的煤体应力, 应力反演过程中也应考虑卸压效果, 而文中的研究成果可以为其提供理论参考。

4 结论

- 提出了考虑卸压扰动的大直径钻孔钻粉率指数及临界煤粉量确定方法, 结合室内试验得到的钻孔孔径、煤粉量、初始应力及卸压后应力间的函数关系式, 给出了唐口矿孔距 1、2 和 3 m 时孔径为 150 mm 的钻孔钻粉率指数和临界煤粉量建议值。

- 钻孔煤粉量与钻孔孔径、煤体应力呈正相关性, 钻孔卸压后应力降低率与钻孔孔径呈正相关性、与孔距呈负相关性。孔径为 150 mm 卸压钻孔钻粉率指数的数值大于孔径为 44 mm 标准钻屑法, 且随着钻孔间距的减小而逐渐增大。

- 利用研发的煤粉测量装置及手机 APP 得到了

唐口矿6310工作面大直径卸压钻孔的煤粉量,卸压钻孔煤粉量为25~93 kg/m,沿空巷道煤粉量明显大于实体煤巷道,在巷帮12~14和18~20 m深处存在高应力区。卸压钻孔煤粉量未超过临界煤粉量,间接验证了钻孔卸压参数设计的合理性和有效性。

参考文献(References):

- [1] 潘一山,宋义敏,刘军.我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J].岩石力学与工程学报,2023,42(9):2081~2095.
PAN Yishan, SONG Yimin, LIU Jun. Pattern, change and new situation of coal mine rockburst prevention and control in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(9): 2081~2095.
- [2] 袁亮,王恩元,马衍坤,等.我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J].煤炭学报,2023,48(5):1825~1845.
YUAN Liang, WANG Enyuan, MA Yankun, et al. Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1825~1845.
- [3] DAI L P, PAN Y S, ZHANG C G, et al. New criterion of critical mining stress index for risk evaluation of roadway rockburst[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(8): 4783~4799.
- [4] 谭云亮,张修峰,肖自义,等.冲击地压主控因素及孕灾机制[J].煤炭学报,2024,49(1):367~379.
TAN Yunliang, ZHANG Xiufeng, XIAO Ziyi, et al. Main control factors of rock burst and its disaster evolution mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 367~379.
- [5] 张俊文,邓雪杰,郑通达.充填开采防治坚硬顶板型冲击地压综述研究[J].绿色矿山,2024(2):103~121.
ZHANG Junwen, DENG Xuejie, ZHENG Tongda. A review on hard roof rock burst prevention and control by backfill technology[J]. Journal of Green Mine, 2024(2): 103~121.
- [6] 王国法,潘一山,赵善坤,等.冲击地压煤层如何实现安全高效智能开采[J].煤炭科学技术,2024,52(1):1~14.
WANG Guofa, PAN Yishan, ZHAO Shunkun, et al. How to realize safe-efficient-intelligent mining of rock burst coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(1): 1~14.
- [7] 谭云亮,郭伟耀,辛恒奇,等.煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究[J].煤炭学报,2019,44(1):160~172.
TAN Yunliang, GUO Weiyao, XIN Hengqi, et al. Key technology of rock burst monitoring and control in deep coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 160~172.
- [8] ZHENG Y H, ZHAO Z G, ZHAO T B, et al. A new method for monitoring coal stress while drilling process: Theoretical and experimental study[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2023, 45(2): 3980~3993.
- [9] 潘一山,肖永惠,罗浩,等.冲击地压矿井安全性研究[J].煤炭学报,2023,48(5):1846~1860.
PAN Yishan, XIAO Yonghui, LUO Hao, et al. Study on safety of rockburst mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1846~1860.
- [10] 尹延春,郑武威,赵同彬,等.煤层钻孔钻进煤粉自动测量方法及试验研究[J].*煤炭科学技术*,2023,51(11):23~32.
YIN Yanchun, ZHENG Wuwei, ZHAO Tongbin, et al. Automatic measurement method of drilling-cuttings of boreholes in the coal seam and test study[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(11): 23~32.
- [11] 曲效成,姜福兴,于正兴,等.基于当量钻屑法的冲击地压监测预警技术研究及应用[J].岩石力学与工程学报,2011,30(11):2346~2351.
QU Xiaocheng, JIANG Fuxing, YU Zhengxing, et al. Rockburst monitoring and precaution technology based on equivalent drilling research and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2346~2351.
- [12] 唐巨鹏,陈帅,于宁.基于平均有效应力煤与瓦斯突出钻屑量指标研究[J].*地球物理学进展*,2017,32(1):395~400.
TANG Jupeng, CHEN Shuai, YU Ning. Study on the drilling cuttings bits index of coal and gas outburst based on average effective stress[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(1): 395~400.
- [13] 唐巨鹏,李卫军,潘一山,等.钻杆直径及钻进速度对钻屑量影响试验研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(1):166~174.
TANG Jupeng, LI Weijun, PAN Yishan, et al. Experimental study on the influence of drill pipe diameter and drilling velocity on drilling cuttings[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(1): 166~174.
- [14] 周洋,梁冰,孙维吉,等.深部煤层钻屑粒度随钻进深度分布规律[J].中国安全生产科学技术,2020,16(1):66~72.
ZHOU Yang, LIANG Bing, SUN Weiji, et al. Distribution laws of particle size of drilling cuttings with drilling depth in deep coal seams[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(1): 66~72.
- [15] 李京达,魏全德,贾明魁.大直径钻孔钻屑检验方法及现场应用[J].煤矿安全,2016,47(1):126~129.
LI Jingda, WEI Quande, JIA Mingkui. Method of large diameter drilling cuttings inspection and its application[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(1): 126~129.
- [16] 顾广耀,王家玉.大直径钻孔钻屑指标法临界值的研究[J].煤炭技术,2007,26(3):60~62.
GU Guangyao, WANG Jiayu. Research on critical value of drilling index for bigger diameter borehole[J]. Coal Technology, 2007, 26(3): 60~62.
- [17] GENG Y F, TAN J, YIN Y C, et al. Theoretical analysis of drilling cuttings considering stress zoning of surrounding rock and its application in stress detection[J]. *Energy Science & Engineering*, 2023, 11(5): 1662~1670.
- [18] 丁传宏,吴振华,潘鹏志,等.不同地质条件下冲击地压特厚煤层钻屑法检测指标确立方法研究及应用[J].武汉理工大学学报,2018,40(9):52~58.
DING Chuanhong, WU Zhenhua, PAN Pengzhi, et al. Research and application of determining evaluating index of rock burst in exceptionally thick coal with drilling cutting method under the different geological conditions[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2018, 40(9): 52~58.
- [19] 朱广安,刘欢,苏晓华,等.基于声发射特征的含水煤体钻屑法临

- 界指标优化试验研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4433–4442.
- ZHU Guang'an, LIU Huan, SU Xiaohua, et al. Experimental study on critical index optimization of drilling cuttings method of water-bearing coal based on acoustic emission features[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(12): 4433–4442.
- [20] 朱广安, 刘海洋, 沈威, 等. 富水条件下冲击煤体钻屑法试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2417–2431.
- ZHU Guang'an, LIU Haiyang, SHEN Wei, et al. Experimental research on burst-prone coal mass of drilling method under rich water condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(12): 2417–2431.
- [21] 杜才溢, 张玉江, 孟鑫, 等. 基于钻屑量界限方程的冲击危险性判定新方法[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(1): 86–91.
- DU Caiyi, ZHANG Yujiang, MENG Xin, et al. A new method of rock burst hazard determination based on drilling cuttings limit equation[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(1): 86–91.
- [22] YIN Y C, CHEN B, ZHANG Y B, et al. Experimental study and evaluation on the weakening of bursting liability of coal with boreholes[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 155: 107754.
- [23] 谭云亮, 郭伟耀, 赵同彬, 等. 深部煤巷帮部失稳诱冲机理及“卸-固”协同控制研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 66–81.
- TAN Yunliang, GUO Weiyao, ZHAO Tongbin, et al. Coal rib burst mechanism in deep roadway and “stress relief-support reinforcement” synergetic control and prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 66–81.
- [24] 张东晓, 王翔宇, 郭伟耀, 等. 煤层厚度影响下大直径钻孔卸压释能机理[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 40–50.
- ZHANG Dongxiao, WANG Xiangyu, GUO Weiyao, et al. The influence of coal seam thickness on the pressure relief and energy release mechanism of large-diameter drilling hole[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(6): 40–50.
- [25] 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.
- [26] 潘俊锋, 闫耀东, 马宏源, 等. 一次成孔 300 mm 煤层大直径钻孔防冲效能试验[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(5): 5–15.
- PAN Junfeng, YAN Yaodong, MA Hongyuan, et al. Using 300 mm diameter boreholes for coal burst prevention a case study[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(5): 5–15.
- [27] 李云鹏, 张宏伟, 韩军, 等. 基于分布式光纤传感技术的卸压钻孔时间效应研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(11): 2834–2841.
- LI Yunpeng, ZHANG Hongwei, HAN Jun, et al. Time effect of borehole pressure relief based on distributed optical fiber sensing technology[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(11): 2834–2841.
- [28] 苏超, 康红普, 姜鹏飞, 等. 基于连续实测的煤巷围岩掘-采期间采动应力演化与破坏模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(9): 2201–2213.
- SU Chao, KANG Hongpu, JIANG Pengfei, et al. Analysis on mining-induced stress evolution and surrounding rock failure mode of roadway during heading-mining period based on continuous measurement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(9): 2201–2213.
- [29] 潘一山. 煤体钻粉理论的研究[J]. 阜新矿业学院学报, 1985, 4(S1): 91–97.
- PAN Yishan. Study on the theory of coal body drilling powder[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 1985, 4(S1): 91–97.
- [30] 赵阳升, 梁纯升, 刘成丹. 钻屑法测量围岩压力的探索[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(2): 104–110.
- ZHAO Yangsheng, LIANG Chunsheng, LIU Chengdan. Exploration of measuring surrounding rock pressure by drilling cuttings method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1987, 9(2): 104–110.
- [31] LU X W, JIANG J Y, WANG W, et al. Laboratory experimental study on the pressure relief effect of boreholes in sandstone under high-stress conditions[J]. *Sustainability*, 2023, 15(21): 15557.
- [32] GONG F Q, HE Z C, SI X F. Experimental study on revealing the mechanism of rockburst prevention by drilling pressure relief: Status-of-the-art and prospects[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2022, 13(1): 2442–2470.
- [33] ZHAO R J, YAO R B, ZHANG T, et al. Estimation of tunnel in situ stress magnitude and direction using measurement while drilling data and acoustic wave information[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 152: 105905.
- [34] 吕祥锋, 曹立厅, 孟令峰, 等. 旋压触探随钻摩阻表征围岩应力分布特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(10): 2385–2399.
- LYU Xiangfeng, CAO Liting, MENG Lingfeng, et al. Surrounding rock stress distribution characterization via drilling friction resistance while rotary sounding[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(10): 2385–2399.
- [35] ZHANG W L, LI C, JIN J X, et al. A new monitoring-while-drilling method of large diameter drilling in underground coal mine and their application[J]. *Measurement*, 2021, 173: 108840.