

深部冲击地压煤层含水率与钻屑煤粉量相关性研究

亓佳利¹,李伟清¹,张 建¹,王 永²,王维斌²,李学龙³,宋帅锋³

(1. 山东能源集团鲁西矿业有限公司,山东 菏泽 274700;

2. 山东李楼煤业有限公司,山东 菏泽 274700;

3. 山东科技大学 能源与矿业工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:随着煤炭开采向深部推进,冲击地压风险日益严峻。为探究深部冲击地压煤层含水率与钻屑煤粉量的内在关联,优化冲击地压监测预警及防治措施。本研究以山东李楼煤业1306工作面为工程背景,开展了系统的现场试验。通过设计不同注水量梯度下的注水孔与配套钻屑法钻孔,实测了不同含水率、位置及孔深下的每米钻屑煤粉量,并分析了其变化规律。研究表明:煤粉量随含水率呈“先减少后增加再减少”的三段式变化;相同含水率下采动影响区煤粉量比非采动区高8.3%,且与孔深无显著关联;基于含水率对煤粉量的影响机制,提出了钻屑法监测指标的修正系数(H),在特定含水率区间分别取1.0、0.9、1.1,含水率过高时($\geq 5.6\%$)钻屑法失效。研究成果揭示了含水率影响钻屑煤粉量的复杂机制,为修正预警指标、优化煤层注水防冲参数及构建多参量融合预警模型提供了理论依据。

关键词:煤粉量;煤层含水率;煤层注水;钻屑法监测;冲击地压

中图分类号:TD528

文献标志码:A

Study on the correlation between moisture content and drilling cuttings yield of deep coal seams prone to rockburst

QI Jiali¹, LI Weiqing¹, ZHANG Jian¹, WANG Yong²,

WANG Weibin², LI Xuelong³, SONG Shuaifeng³

(1. Shandong Energy Group Luxi Mining Co., Ltd., Heze 274700, China;

2. Shandong Lilou Coal Industry Co., Ltd., Heze 274700, China;

3. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: As coal mining progresses to greater depths, the risk of rockburst becomes increasingly severe. To explore the intrinsic relationship between moisture content and drilling cuttings yield in deep coal seams prone to rockburst and to optimize the monitoring, early warning, and prevention measures for rockburst, this study took the 1306 working face of Shandong Lilou Coal Industry as the engineering background and conducted systematic on-site tests. By designing water injection holes with different water injection volume gradients and matching drill holes for the drilling cuttings method, this study measured the drilling cuttings yield per meter with different moisture content levels, locations, and hole depths, and analyzed the variation patterns of these values. The study results show that the vol drilling cuttings yield exhibits a three-stage variation of first decreasing, then increasing, and finally decreasing again with changes in moisture content. For the same moisture content, the drilling cuttings yield in the mining-affected area is 8.3% higher than that in the non-mining area, and there is no

收稿日期:2025-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目(52574258);山东省自然科学基金项目(ZR2024ME097);泰山学者工程资助项目(tsqnz20221140)

作者简介:亓佳利(1984—),男,山东莱芜人,高级工程师,主要从事冲击地压灾害防治研究。

李学龙(1988—),男,河南濮阳人,副教授,博士,主要从事煤岩动力灾害防治研究,本文通信作者。

E-mail:lixlcumt@126.com

significant correlation between drilling cuttings yield and hole depth. Based on the mechanism by which moisture content affects the drilling cuttings yield, a correction coefficient (H) for the drilling cuttings method monitoring index is proposed and is set to 1.0, 0.9, and 1.1 for specific moisture content intervals respectively. The drilling cuttings method becomes ineffective when the moisture content is excessively high ($\geq 5.6\%$). The findings of this study reveal the complex mechanism by which moisture content affects the drilling cuttings yield and provide a theoretical basis for revising early warning indicators, optimizing coal seam water injection parameters for rockburst prevention, and developing a multi-parameter integrated early warning model.

Key words: drilling cuttings yield; coal seam moisture content; coal seam water injection; drilling cuttings method monitoring; rockburst

随着我国煤炭资源开采深度不断增加,深部开采面临的冲击地压风险日益突出,严重威胁着煤矿安全生产^[1-3]。冲击地压是煤岩体在高应力条件下积聚的弹性应变能突然释放,导致煤岩体急剧破坏的动力现象^[4-5]。其发生机理复杂,影响因素众多,其中煤层含水率和钻屑煤粉量是影响冲击地压的重要指标。

在冲击危险性评价研究中,煤岩体的含水率和钻屑煤粉量逐渐被视为关键评估参数^[6]。钻屑产生大量的煤粉,不仅会显著增加煤尘爆炸的风险,严重威胁井下作业人员的安全,还会加剧通风系统的运行负担,加速设备磨损,极大地降低生产效率。煤层含水率作为一项重要物理特性,其变化会对煤体的力学性质、结构特征等产生重要影响,进而影响钻屑煤粉量^[7-9]。当煤层含水率发生变化时,煤体的硬度、韧性等力学参数也会相应改变,钻头在钻进过程中的切削阻力和煤粉量也将随之不同^[10-12]。因此,探究深部煤层含水率与钻屑煤粉量的关系,对于优化冲击地压监测预警参数、制定科学合理的安全防护措施具有重要的意义。

对于钻屑法理论以及试验,国内外学者已展开诸多研究。赵阳升等^[13]从煤体应变软化及扩容特性着手,在弹塑性假设下对钻屑法理论进一步修正完善。文光才等^[14]根据有效应力原理,结合钻孔直径、煤体强度、地应力和瓦斯压力等因素建立了钻屑量模型,并通过数值分析研究了各因素对钻屑量的影响。陈峰^[15]基于钻屑量与煤体应力理论,通过对比分析得出了冲击危险临界状态钻屑量指标。曲效成等^[16]通过数值计算建立了钻屑量、支承压力与钻孔应力的关系。Lv等^[17]提出了用于表征围岩应力分布的单位切割能与钻孔切割力模型(E_c-N 模型),提高了钻屑法监测的准确性和效率。Wang等^[18]测定了不同粒径、含水率下的煤粉颗粒休止角,探讨了休止角与煤粉流动性、颗粒间黏聚力的关系。

上述学者从不同角度对含水率、钻屑法理论及应用进行了大量研究,取得了丰富成果。然而,在复杂的深部开采条件下,冲击地压煤层中含水率与煤粉量之间的相关性尚未被充分揭示。基于此,本研究以典型深部冲击地压矿井李楼煤业1306工作面为例,通过严谨的试验设计、数据采集与分析,揭示冲击地压煤层中含水率与煤粉量之间的内在规律,有助于完善冲击地压的监测预警体系,并为煤层注水等防冲措施的优化提供理论依据。

1 矿井概况

1.1 工作面概况

山东李楼煤业有限公司位于菏泽市鄄城县东北部,矿井距鄄城县城约6 km。李楼煤业1306工作面东西面长平均235 m,南北推进长度约2 454 m,面积约57.67万 m^2 。如图1所示,1306工作面位于一采区北翼,南侧为一采区下山,工作面北部与一采区北部煤层隐伏露头保护煤柱相邻(距离保护煤柱最近距离约102 m),南部以一采区大巷保护煤柱为界与矿井一采区轨道下山、回风下山以及胶带下山三条已掘大巷为邻,东部与1308工作面采空区相邻,工作面西部目前尚未采掘。

1306工作面主采3煤,采用走向长壁后退式综合机械化放顶煤采煤工艺,液压支架自动跟机支护顶板。该工作面所采煤层赋存于山西组中下部,其下距三灰平均53.2 m,煤层平均厚度7.1 m、平均倾角 13° ,埋深为681~944 m;煤层内含1层砂质泥岩夹矸,该夹矸位于煤层顶板下方0.6 m处,厚度0.15 m。经检测,1306工作面冲击危险指数为0.71,属于中等冲击危险工作面。

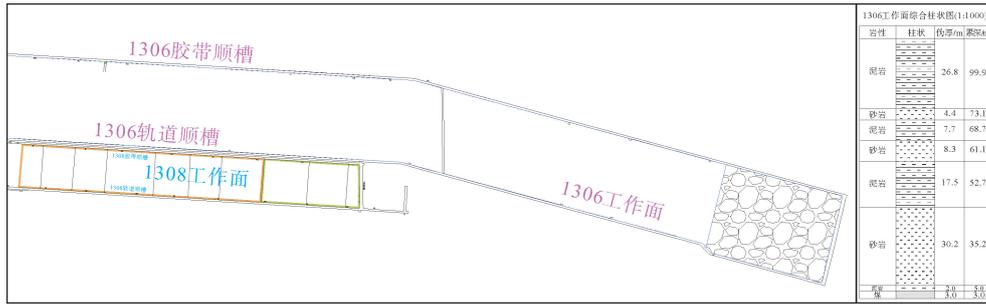


图 1 1306 工作面位置图及综合柱状图

Fig. 1 Location map and comprehensive columnar diagram of 1306 working face

1.2 煤层顶、底板情况

3 煤顶板为中、细砂岩岩组为主,局部夹粉砂岩、泥岩岩组。其中,中、细砂岩的岩石单轴抗压强度为 75.9~175.2 MPa,强度指数为 30~80 MPa,岩体稳定性等级为中等稳定~稳定岩体;粉砂岩、泥岩岩组的强度指数为 30~60 MPa,属中等稳定岩体。

3 煤底板同样以中、细砂岩岩组为主,局部夹粉砂岩、泥岩岩组。其中,中、细砂岩的岩石单轴抗压强度为 66.4~77.1 MPa,强度指数为 40~60 MPa(局部大于 60 MPa),岩体稳定性等级为中等稳定~稳定岩体;粉砂岩、泥岩岩组的强度指数一般大于 30 MPa,但局部小于 30 MPa,属不稳定~中等稳定岩体。

2 现场试验设计方案

2.1 注水孔设计

由图 2 所示的微震事件分布图可以看出,李楼煤业 1306 工作面微震事件主要分布在工作面中部,在靠近轨道顺槽侧集中程度明显大于胶带侧。超前采动集中区分布于超前 150 m 范围以内,其超前影响范围最远边界可达 300 m。

1306 工作面煤层平均厚度 7.1 m,据此设计注水孔深为 50 m。在 1306 工作面胶带顺槽分别选取超前 150、300 及 450 m 处设置试验地点,每个地点设计 3 个注水孔(具体布置如图 3 所示)。钻孔孔径设定为 75 mm,采用垂直于巷道帮部的施工方式;钻孔角度以与煤层倾角保持一致为基本原则,确保钻孔全程处于煤层内部,其开口位置位于底板以上 1.0~2.0 m。

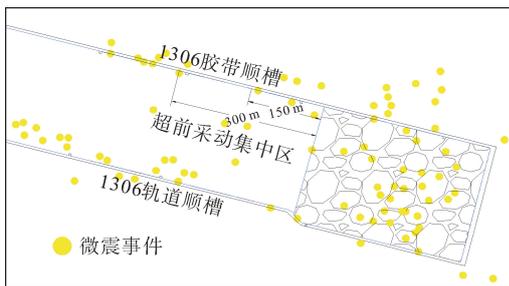


图 2 微震事件分布图

Fig. 2 Distribution map of microseismic events

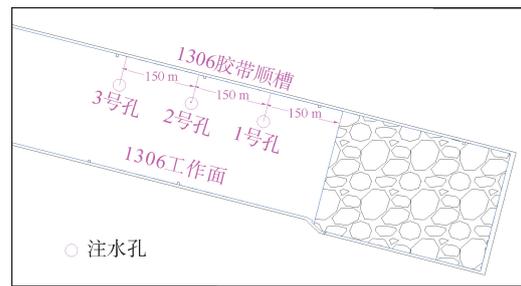


图 3 1306 注水孔布置位置图

Fig. 3 Layout diagram of 1306 water injection holes

2.2 钻屑法设计

1306 工作面钻屑法钻孔直径为 42 mm,设计孔深 25 m,施工时沿煤层倾角进行,开口位置位于底板以上 1.0~1.5 m;共布设 3 个测点,每个测点设计 4 组钻屑法钻孔,分别在注水前及注水量达到设计值的 30%、60%、100%阶段施工,以检验注水过程中煤层含水率的变化。为检验煤层注水在不同扩散半径下煤层含水率及煤粉量的变化,每组钻屑法试验设计 5 个检测孔,分别布置于注水孔右侧 1、5、10 m 处及左侧

3、8 m 处;其中第 2、3、4 组钻孔施工时,需位于注水前原钻孔的上、下 0.5 m 位置,共设计 60 个钻孔,具体布置如图 4 所示。钻屑法施工时,将钻屑孔每米孔深对应的煤粉放置在专用的塑料袋内,并贴标签,标明孔号、孔深、施工日期,每班施工结束后,将装有煤粉的塑料袋集中带上井。

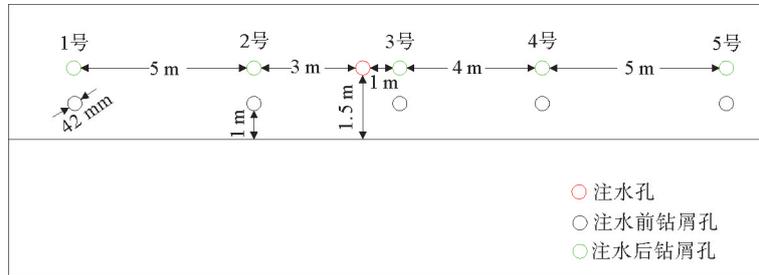


图 4 钻孔布置剖面图

Fig. 4 Sectional diagram of borehole layout

2.3 封孔工艺

受卸压钻孔、锚杆(索)等因素影响,注水过程中出现漏水、渗水等情况,需对注水孔周边卸压孔实施注浆封堵,在注水孔前后 3 m 范围内施工注浆孔,孔深 4 m,每个注浆孔安装 1.5 m 长注浆插管,通过灌注水泥浆实现煤壁封堵。结合 1306 工作面生产情况及地质条件,煤

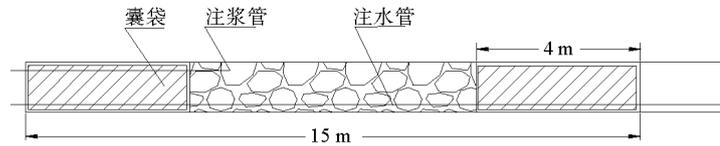


图 5 注水孔封孔示意图

Fig. 5 Diagram of water injection hole sealing

层注水孔封孔工艺采用“两堵一注”,以囊袋配合注浆完成封孔(图 5),封孔长度不少于 15 m。两端分别设置 4 m 长囊袋,囊袋间以水泥浆封孔,注浆压力控制在 6 MPa。

2.4 注水量的确定

注水量的确定是实现煤层含水率精准调控的关键环节,直接影响煤层注水防冲效果与钻屑法监测可靠性。由于煤层含水率需通过注水作业逐步调整至目标区间,因此注水量计算需以煤层基础物理特性为依据,结合现场试验实测数据,分阶段完成参数核定与理论计算。同时,还需匹配现场注水工况设计定量注水方案,确保注水量与煤层渗流特性、钻孔布置参数相适应。

1) 样本含水率

使用李楼煤业自有的“101-B 型电热鼓风干燥箱配合 ME204E 电子天平”测定样本含水率 M 。

$$M = (G_1 - G_2) / G_1 \quad (1)$$

式中: G_1 为样本质量, G_2 为烘干后的样本质量。

2) 煤层含水率

根据山东鼎安检测技术有限公司鉴定结果,3 煤层煤体全水分 2.19%、孔隙率 3.42%、自然吸水率 2.44%。为实测煤层注水前含水率及饱和含水率,在 1306 工作面取煤块,对煤块进行钻孔模拟煤体裂隙,并通过在水中浸泡 2 周实测无裂隙煤块和有裂隙煤块(图 6)的饱和含水率。试样浸水前平均含水率为 2.30%,无裂隙试样浸水后平均含水率为 3.42%,有裂隙试样浸水后平均含水率为 3.92%。

3) 计算理论注水量

根据第一次实测数据计算可得,煤层实际含水率为 3.1%(体积比),饱和含水率为 5.28%(体积比),计算理论注水量 Q 。

$$Q = (h - l + 2r) \times 2r \times d \times (\omega_{\text{sat}} - \omega_{\text{act}}) \quad (2)$$

式中: h 表示孔深,取 50 m; l 表示封孔长度,取 15 m; r 表示扩散半径,取 9.78 m; d 表示煤层厚度,取 7.1 m; ω_{sat} 表示饱和含水率,取 5.28%; ω_{act} 表示实际含水率,取 3.1%。



(a) 试样浸水前

(b) 试样浸水后

图 6 煤块取样浸水测试

Fig. 6 Coal sample immersion test

经计算,饱和含水率理论注水量为 163.1 m³。在每个注水孔与主高压胶管之间设置一组控制流量的截止阀及流量计,观测注水流量。每个孔注水量分别按照理论注水量 30%、60%、100% 定量,检修班采用动压注水,生产班采用静压注水。

3 含水率对钻屑法施工及煤粉量的影响

3.1 含水率与煤粉量的相关性

此次试验每个试点各施工钻屑孔 60 个,统计了所有钻屑孔每米孔深对应的煤粉量和含水率,并按照含水率大小顺序整理了对应的煤粉量。将含水率按照每 0.5% 为一个区间进行分档,每个区间含水率对应该区间煤粉量的平均值。本研究以煤层未注水状态下的初始煤粉量均值作为基准,分析每米钻屑孔煤体的含水率与煤粉量的相关性。

由图 7 可知,注水对煤层软化作用不明显。含水率低于 5.0%,煤粉量由含水率 2.0%~2.5% 时的 2.5 kg 降至含水率 4.6%~5.0% 时的 2.3 kg,下降幅度 8%。当含水率饱和后,煤粉量先呈上升趋势,由含水率 4.6%~5.0% 时的 2.3 kg 增至含水率 5.1%~5.5% 时的 2.7 kg,增幅 17%;含水率继续增加,钻屑施工受多余水分影响,导致出现吐粉不畅、糊钻杆等现象,煤粉量随含水率增加逐渐降低。

由图 8 可以看出,距注水孔 2~5 m 范围煤体破碎程度较高,其煤粉量受含水率变化的影响不大,基本保持稳定,该范围的煤粉量大致与钻屑孔体积质量相同;而 6~10 m 范围的煤粉量受含水率影响较大,煤粉量呈现出一定的波动性,当含水率处于 4.6%~5.0% 时,煤粉量达到最大值 3.1 kg,之后随着含水率的增加,煤粉量有所下降;至 11~15 m 范围,该区域煤体处于封孔端部位置,动压注水对煤体产生劈裂效果,煤体强度降低程度较高且区域应力释放转移较明显,注水至饱和含水率,煤粉量下降 30%,随着含水率继续增加,煤体塑性增强,钻屑孔出粉范围加大,煤粉量也随之增加。

含水率低于饱和含水率前,受注水软化作用较小,煤粉量随含水率增加略有下降。超过饱和含水率后,随着含水率增加,煤粉量呈先增大后下降趋势。因为当含水率低于饱和值时,水分主要填充煤体原生孔隙及微裂隙,未形成连续水膜。此时煤体内部颗粒间的摩擦阻力因水的“楔入效应”略有增大,导致钻屑过程中煤粉破碎难度上升,剥落量略有下降。水分渗入微裂隙后,降低了裂隙面的摩擦系数,促使部分张开裂隙闭合,减少了钻屑时的煤粉剥落通道,进一步抑制煤粉量增长。当含水率饱和后,形成连续水膜包

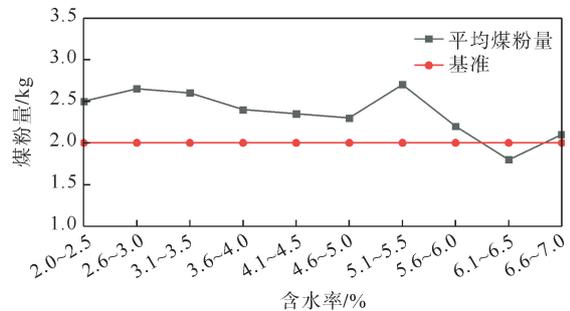


图 7 注水孔含水率(总体)与煤粉量变化曲线

Fig. 7 Variation curves of moisture content of water injection holes (total) and drilling cuttings yield

裹煤体颗粒,削弱颗粒间的胶结力,煤体强度显著降低。同时,动压注水产生的劈裂裂隙扩展,应力集中区域释放,导致钻屑时煤粉剥落范围扩大。过量水分使煤粉颗粒间形成水膜黏结,流动性降低,钻屑过程中出现“糊钻杆”现象^[19]。

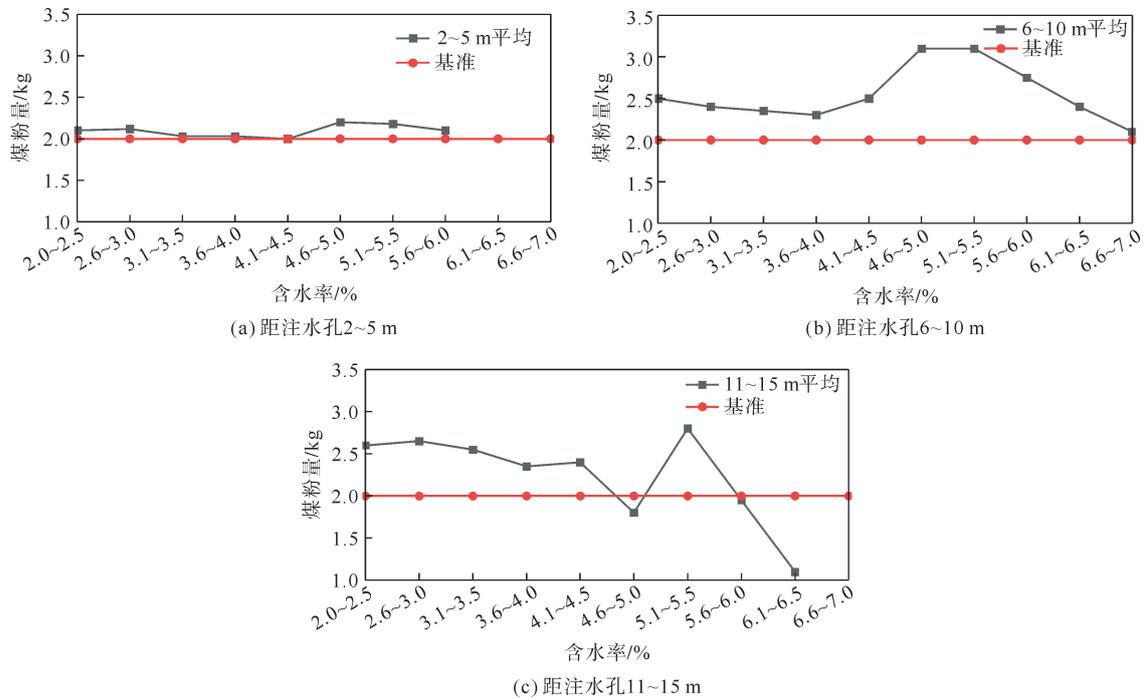


图8 注水孔含水率(分段)与煤粉量变化曲线

Fig. 8 Variation curves of moisture content of water injection holes (subsection) and coal powder content

由图9可以看出,在孔深8 m处,含水率低于4.0%时,煤粉量由含水率2.0%~2.5%时的2.8 kg降至含水率3.6%~4.0%时的2.2 kg;当含水率饱和后,煤粉量呈上升趋势,由含水率3.6%~4.0%时的2.2 kg增至含水率4.1%~4.5%时的2.9 kg;含水率继续增加,煤粉量逐渐降低。在孔深14 m处,含水率低于4.0%时,煤粉量由含水率2.0%~2.5%时的2.8 kg降至含水率3.6%~4.0%时的2.2 kg;当含水率饱和后,煤粉量呈上升趋势,由含水率3.6%~4.0%时的2.2 kg增至含水率4.1%~4.5%时的2.4 kg;含水率增加到5.1%~5.5%时,煤粉量逐渐降低。

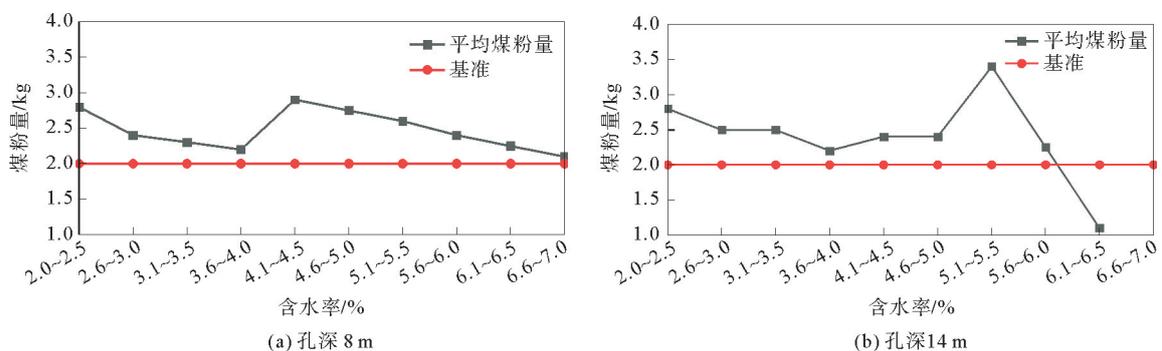


图9 注水孔含水率与煤粉量变化曲线

Fig. 9 Variation curves of moisture content of water injection holes and drilling cuttings yield

总体而言,钻屑孔每米孔深对应的煤粉量均随含水率增大呈先减少后增加再减少的趋势。第1阶段,含水率较低时,水分优先填充煤体原生孔隙及微裂隙,形成吸附水膜,这导致煤体颗粒间摩擦阻力增大,钻屑过程中煤粉破碎所需能量上升,煤粉剥落量减少;第2阶段,当含水率超过临界值,水分形成连续水膜包

裹煤体颗粒,削弱颗粒间的分子键,煤体抗压强度下降 20%~30%,注水导致煤体内部孔隙水压力升高,促使地应力集中区域释放,煤体弹性储能转化为破碎动能,增大煤粉剥落量;第 3 阶段,含水率过高时,煤粉颗粒间形成水膜黏结,导致煤粉流动性显著下降。

如图 10 所示,测点含水率低于 5.0% 时,煤粉量随含水率增加呈下降趋势,含水率 4.6%~5.0% 时下降至 2.3 kg;当含水率饱和后,煤粉量先呈上升趋势,含水率 5.1%~5.5% 时采动影响区和非采动影响区煤粉量分别达 2.7 和 2.6 kg。相同含水率条件下,采动影响区煤粉量均大于非采动影响区煤粉量;含水率小于 5.5% 时,采动影响区煤粉量平均 2.6 kg,非采动影响区煤粉量平均 2.4 kg,采动影响区煤粉量较非采动影响区煤粉量增加 8.3%。

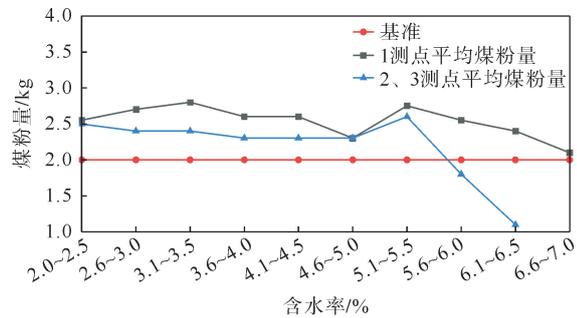


图 10 不同测点含水率与煤粉量变化曲线

Fig. 10 Variation curves of moisture content and drilling cuttings yield at different measuring points

相同含水率时,采动影响区煤粉量大于非采动影响区煤粉量。由于采动裂隙为水分运移提供优势通道,采动区煤体的实际有效含水量更高(自由水占比更大),对煤体强度的削弱更显著。且破碎界面增多,裂隙网络将煤体分割为更小的块体,钻进时破碎单元数量增加,煤粉产出量随之上升。

如图 11 所示,分别对应钻屑孔孔深 6、8、12、14 m 的位置,展示了各测点在不同孔深处的煤粉量与含水率的关系曲线。在煤粉量的上升阶段,孔深 6 m 处,煤粉量增加幅度达 29.2%,每米煤粉量增加 0.7 kg;在孔深 8 m 处,各测点煤粉量相较于原始煤粉量增加幅度为 3.6%,对应每米煤粉量增加 0.1 kg。煤粉量上升阶段的平均增加幅度为 20.4%,平均每米增加 0.5 kg。在煤粉量的下降阶段,在孔深 12 m 处,各测点煤粉量相较于原始煤粉量减少幅度为 4.2%,对应每米煤粉量减少 0.1 kg;在孔深 14 m 处,煤粉量减少幅度高达 21.4%,每米煤粉量减少 0.6 kg。煤粉量下降阶段的平均减少幅度为 12.0%,平均每米减少 0.3 kg。

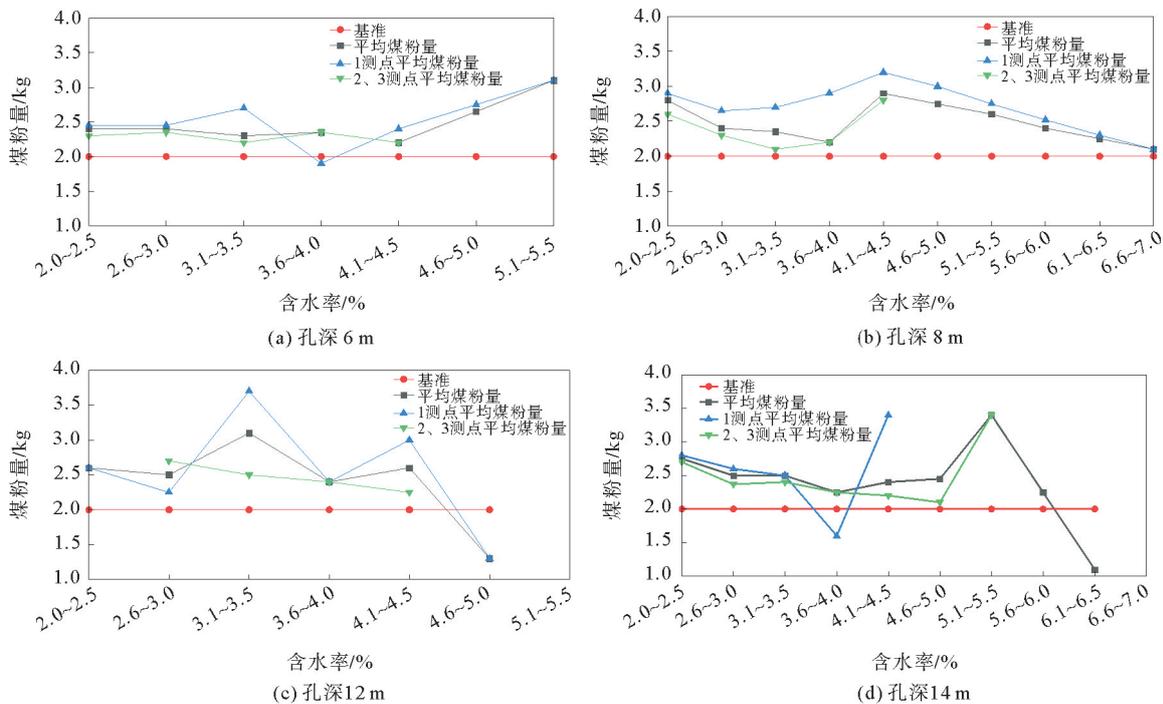


图 11 不同孔深下各测点煤粉量与含水率变化曲线

Fig. 11 Variation curves of drilling cuttings yield and moisture content at each measuring point under different borehole depths

含水率对钻屑煤粉量的影响显著。煤体作为非均质多孔介质,其内部的孔隙率、裂隙发育程度、矿物质分布等存在差异;煤粉量变化程度离散性较大,与钻屑孔施工深度之间无明显关联。不同深度的煤体具有不同的显微结构,导致含水率对煤粉量的影响呈现离散性,因此煤粉量变化离散性与深度无相关性^[20]。

如图 12 所示,在测点进行钻屑法施工时,煤粉潮湿现象集中出现在孔深 11~16 m 的区域,该区域的煤层含水率在 4.0%~6.5%,均高于饱和含水率。结合含水率与煤粉量的变化趋势以及含水率与监测失效的关联规律分析,当含水率达到 5.6% 后,水对煤体的弱化作用显著增强,大部分煤粉会因水的黏结作用难以排出,不仅导致监测施工受阻,还会使监测结果出现较大误差,因此判定此时钻屑法已失效。

煤粉潮湿导致无法施工的情况主要集中在第 11~16 m 位置,监测失效区域的含水率均大于饱和含水率。当含水率小于 5.6% 时,煤粉以“干燥-半湿润”状态存在,排渣阻力较小;超过 5.6% 后,水膜黏结力超过排渣动力,煤粉团无法被有效吹排,钻孔内形成“泥饼堵塞层”,阻碍后续煤粉排出,导致施工停滞。

3.2 含水率与注水量的相关性

1[#]~5[#] 钻屑法钻孔由工作面内向工作面外方向顺序排列,钻屑法钻孔与注水孔距离如表 1。

如图 13 所示,1 测点处于工作面超前支承压力集中区域,注水扩散范围均达到 10 m。注水后含水率普遍比注水前有明显提高,且不同注水比例下,含水率随距离注水孔距离的变化趋势较为相似,但具体数值有所差异。注水对距离注水孔较近区域(如 1~3 m)含水率的提升相对较为稳定,而在距离较远区域(如 8 m 左右),含水率的变化幅度较大。说明含水率与工作面回采扰动程度存在直接关系,回采扰动对裂隙发育影响较大。

近区(1~3 m)含水率提升稳定且与注水比例呈线性相关,由于高压水直接作用形成径向渗流场,均匀填充原生孔隙与微裂隙,同时水力劈裂效应促使裂隙规则扩展,降低渗流阻力;而远区(8 m 左右)含水率波动显著,因注水压力衰减后,水分运移依赖原生裂隙与采动裂隙非均匀切割形成的天然裂隙网络,此时毛管力主导渗流,煤体孔隙率差异导致渗流速度不一,造成含水率离散性大。

3.3 不同含水率钻屑法监测指标修正

由于水的弱化和黏结作用对钻屑量的影响显著,导致判别冲击危险的误差较大,故划分合理区间对水的弱化和黏结作用进行分级,在各个区间内合理确定修正系数 H 。

1) 修正系数与临界指标的确立

当煤层含水率小于 3.5% 时,钻屑法监测的煤粉量基本无变化,这表明此含水率条件下水对煤体的弱

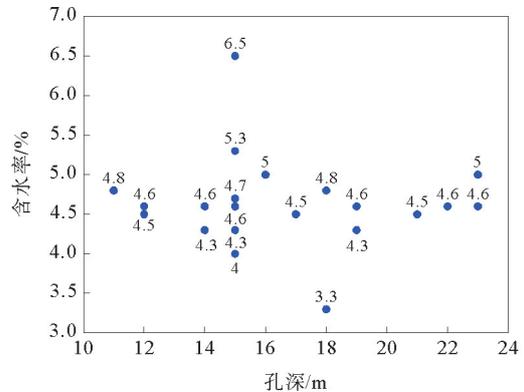


图 12 煤粉潮湿无法施工时孔深与含水率关系图
Fig. 12 Relationship between hole depth and moisture content when coal powder is too wet for construction

表 1 钻屑法孔号与注水孔距离

Table 1 Distance between cuttings-monitoring holes and water injection holes

钻屑法孔号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
距注水孔距离/m	8	3	1	5	10

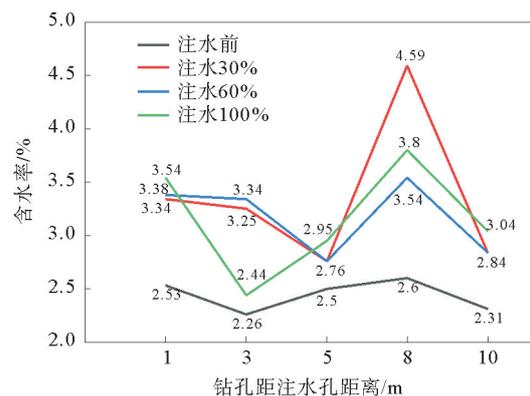


图 13 1 测点注水孔含水率与距注水孔距离变化图
Fig. 13 Variations of moisture content and distance from the injection hole at measurement point 1

化作用并不明显,因此可直接利用钻屑量来判别冲击危险性。具体可参照表 2,其中孔深巷高比 a 是指钻孔深度与巷道高度的比值,反映应力集中区域的相对空间位置;钻粉率指数 b 是指每米钻孔中排出的煤粉量与对应标准煤粉量的比值,用于量化煤粉产生的相对强度。在表 2 所列孔深巷高比 a 的区间内,若实际监测得到的钻粉率指数 b 达到或超过表中对应的指标值,即可判定该工作地点具有冲击危险。

当煤层含水率处于 3.6%~5.0%时,监测煤粉量相较于自然状态(含水率 2.0%~2.5%)时降低 0.1~0.2 kg,且随煤体浸水程度加深,两者质量差异逐渐增大。对此,采用试验称量煤粉量与自然状态钻屑质量的比值作为修正系数,取修正系数 $H=0.9$,将该系数与自然状态下的钻屑监测指标相乘,得到修正后的指标用于冲击危险性判别;同理,含水率处于 5.1%~5.5%时,修正系数 H 取 1.1;当含水率达到 5.6%及以上时,认为钻屑法监测失效,无法用于冲击危险性判别,具体见表 3。

2) 修正系数说明

不同钻屑深度条件下,煤粉量随含水率变化呈现减少或增大的程度离散性较大,煤粉量的变化程度与钻屑孔施工深度之间无明显关联。由于现场试验受施工操作水平、煤层赋存条件等干扰因素较多,煤粉量数据存在较大误差,本研究所列修正系数为总体估算平均值,未区分钻屑深度、外部条件等情况。

3.4 防冲措施及应用展望

在注水防冲方面,可依据含水率阈值优化注水参数,采用“分区注水策略”,控制近区含水率不超过 5.0%以避免煤粉黏结堵塞,远区通过脉冲式注水强化裂隙渗透,同时结合修正系数($H=0.9\sim 1.1$)动态调整注水量,平衡水弱化与黏结效应。在监测预警方面,将修正系数集成至钻屑法监测系统,当含水率 3.6%~5.0%时采用 $H=0.9$ 修正煤粉量预警指标,含水率 $\geq 5.6\%$ 时联合微震、应力监测等手段构建多参量预警模型,通过实时耦合含水率-煤粉量数据,提升深部冲击地压预警的精准度与可靠性,为深井安全开采提供技术支撑。

4 结论

以李楼煤业 1306 工作面为工程背景,综合运用现场试验、数据分析等研究方法,针对深部冲击地压煤层含水率与煤粉量的相关性进行了探究,提出了基于含水率变化的钻屑法监测指标修正策略,明晰了二者之间的内在关联,为深部煤层开采作业的优化与安全保障提供了关键支撑。主要研究结论如下:

1) 含水率与煤粉量呈现“先减少后增加再减少”的三段式变化。含水率低于 5.0%时,煤粉量呈减少趋势,因水分填充孔隙形成吸附水膜,增大颗粒间摩擦阻力;含水率 5.1%~5.5%时,因饱和水膜削弱煤体强度及动压注水的劈裂作用,煤粉量呈增加趋势;含水率超过 5.6%后,煤粉因水膜黏结堵塞钻孔,排出量骤减,导致施工失效。

2) 由于煤体的非均质性及含水率分布的随机性,导致煤粉量变化与孔深无明显规律。在相同含水率下,采动应力场促使煤体裂隙发育,为水分运移提供通道,增强“楔入效应”,同时裂隙网络分割煤体,增加破碎单元数量,回采扰动对裂隙发育影响较大。

3) 注水对距离注水孔较近区域含水率提升与注水比例呈线性相关,由高压水形成的径向渗流场及规则裂隙网络主导;较远区域含水率波动显著,因注水压力衰减后,水分运移依赖原生裂隙与采动裂隙的非均匀切割,毛管力主导渗流,孔隙率差异导致渗流速度不一。

4) 建立了含水率与分段修正系数的关系,含水率 2.0%~3.5%时,修正系数 H 取 1.0,直接采用钻

表 2 含水煤层冲击危险性的钻粉率指数指标

Table 2 Index of drilling powder ratio for impact risk of water-bearing coal seam

孔深巷高比 a	<1.5	1.5~3.0	>3.0
钻粉率指数 b	≥ 1.5	≥ 2.0	≥ 3.0

表 3 钻屑监测指标修正系数

Table 3 Drill cuttings monitoring index correction factor

含水率/%	2.0~2.5	2.6~3.5	3.6~5.0	5.1~5.5	≥ 5.6
H	1.0	1.0	0.9	1.1	失效

屑量指标;含水率 3.6%~5.0%时, H 取 0.9(水分弱化导致煤粉量低);含水率 5.1%~5.5%时, H 取 1.1(水致破碎增强);含水率 $\geq 5.6\%$ 时钻屑法失效,需结合微震等手段监测。

参考文献:

- [1] 刘峰,郭林峰,张建明,等.煤炭工业数字智能绿色三化协同模式与新质生产力建设路径[J].煤炭学报,2024,49(1):1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHANG Jianming, et al. Synergistic mode of digitalization-intelligentization-greeniation of the coal industry and its path of building new coal productivity[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 1-15.
- [2] 李学龙,陈绍杰,李忠辉,等.基于共振效应的冲击地压机理研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(3):527-535.
LI Xuelong, CHEN Shaojie, LI Zhonghui, et al. Research on the mechanism of rockburst based on resonance effect[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(3): 527-535.
- [3] 胡昌硕,李东,周法乐,等.多因素耦合诱发孤立煤体冲击地压机理研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2022,41(5):40-50.
HU Changshuo, LI Dong, ZHOU Fale, et al. Research on mechanism of rock burst induced by multi-factor coupling in isolated coal body[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(5): 40-50.
- [4] 李学龙,陈德友,刘淑敏,等.孔洞裂隙砂岩声发射特性与能量演化过程的多尺度关联性分析[J].采矿与岩层控制工程学报,2025,7(4):174-190.
LI Xuelong, CHEN Deyou, LIU Shumin, et al. Multi-scale correlation analysis of acoustic emission characteristics and energy evolution process of cavernous fractured sandstone[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(4): 174-190.
- [5] 彭雨杰,王强,曹安业,等.特厚煤层掘进巷道冲击地压机理及影响因素[J].煤田地质与勘探,2024,52(12):25-39.
PENG Yujie, WANG Qiang, CAO Anye, et al. Mechanisms and influential factors of rock bursts in tunneling roadways of extra-thick coal seams[J]. Coal Geology and Exploration, 2024, 52(12): 25-39.
- [6] 王刚,陈雪畅,程卫民,等.煤层注水渗流与润湿机制研究进展[J].山东科技大学学报(自然科学版),2025,44(1):1-17.
WANG Gang, CHEN Xuechang, CHENG Weimin, et al. Research progress on seepage and wetting mechanism of water injection[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2025, 44(1): 1-17.
- [7] 朱广安,石志贤,蒋启鹏,等.富水冲击地压煤层区段煤柱等效宽度研究[J].煤矿安全,2023,54(7):19-25.
ZHU Guang'an, SHI Zhixian, JIANG Qipeng, et al. Study on equivalent width of section coal pillar in rock burst coal seam under water-rich conditions[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(7): 19-25.
- [8] 李勇,徐立富,张守仁,等.深煤层含气系统差异及开发对策[J].煤炭学报,2023,48(2):900-917.
LI Yong, XU Lifu, ZHANG Shouren, et al. Gas bearing system difference in deep coal seams and corresponded development strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 900-917.
- [9] 张俊杰,袁新立,张汉桥,等.水分对煤力学性能及冲击能量指数的影响研究[J].煤矿安全,2023,54(7):26-33.
ZHANG Junjie, YUAN Xinli, ZHANG Hanqiao, et al. Study on the effect of moisture on mechanical properties and impact energy index of coal[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(7): 26-33.
- [10] 朱传奇,王磊,张宇,等.含水率对松软煤体波速及破坏特征影响的试验研究[J].岩土力学,2024,45(11):3271-3285.
ZHU Chuanqi, WANG Lei, ZHANG Yu, et al. Effect of moisture content on wave velocity and failure characteristics of soft coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(11): 3271-3285.
- [11] 冯仁俊.脉冲射流割缝控制压裂技术关键参数研究及应用[J].煤炭工程,2022,54(1):63-69.
FENG Renjun. Research on key technical parameters of control fracturing with pulse jet slotting and its application[J]. Coal Engineering, 2022, 54(1): 63-69.
- [12] 邹双英,杜联营,张开仲,等.顺层瓦斯抽采钻孔定点定长封孔应用研究[J].矿业安全与环保,2023,50(3):95-99.
ZOU Shuangying, DU Lianying, ZHANG Kaizhong, et al. Application study on fixed-point and fixed-length sealing of gas drainage drillings along coal seam[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2023, 50(3): 95-99.
- [13] 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):106-112.
ZHAO Yangsheng, LIANG Chunsheng, LIU Chengdan. Exploration on measuring surrounding rock pressure by drilling cuttings method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(2): 106-112.
- [14] 文光才,王先义.突出预测钻屑量指标的探讨[J].煤炭工程师,1998(3):32-34.

- WEN Guangcai, WANG Xianyi. Inquiring into the index of drillings volume for outburst prediction[J]. Coal Engineer, 1998(3):32-34.
- [15] 陈峰. 利用钻屑法预测冲击地压危险性的试验研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
CHEN Feng. Experimental study on prediction of rock burst hazard by drilling cuttings method[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017.
- [16] 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]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11):2346-2351.
- [17] LV X F, CAO L T, LI X Y, et al. Surrounding rock stress distribution characterization via unit cutting energy[J/OL]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2022, 8(6). DOI:10.1007/s40948-022-00498-9.
- [18] WANG W, ZHANG J S, YANG S, et al. Experimental study on the angle of repose of pulverized coal[J]. Particuology, 2010, 8(5):482-486.
- [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] 单鹏飞, 高健铭, 来兴平, 等. 考虑初始损伤差异性的煤样声发射率响应研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(4):798-808.
SHAN Pengfei, GAO Jianming, LAI Xingping, et al. Study on acoustic emission rate response of coal samples considering initial damage difference[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2023, 40(4):798-808.

(责任编辑:吕海亮)