

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0518

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0518

# 基于分布式光纤传感技术的卸压钻孔时间效应研究

李云鹏,张宏伟,韩军,朱峰,郭超

(辽宁工程技术大学矿业学院,辽宁阜新 123000)

**摘要:**以钻孔卸压原理及分布式光纤传感技术为基础,建立了卸压钻孔周边煤体内部应变感测模型,提出了以光纤拉伸应变值及卸压半径为指标的卸压效果评价方法。通过对传感光缆下方钻孔卸压周边煤体内部应变定期测试,并结合钻孔内部表观现象观测,根据不同时间钻孔周围煤体内部应变及表观破坏特征将钻孔卸压过程分为裂隙发育阶段、极限平衡阶段、塌孔阶段、破碎煤体压实阶段等四个阶段。分别确定了在忻州窑矿地质及开采条件下钻孔卸压过程中各阶段的时间区间,得出超前94~101 m以上施工钻孔,其卸压效果较为显著。利用微震监测系统,对比分析了卸压钻孔施工时间调整前后的微震事件分布特征,结果表明:当卸压钻孔施工达到超前工作110 m后,工作面周边高能量事件的频次明显减少、微震事件平均能量明显降低38%。

**关键词:**冲击地压防治;钻孔卸压;分布式光纤传感;原位测试;微震监测

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)11-2834-08

## Time effect of borehole pressure relief based on distributed optical fiber sensing technology

LI Yunpeng, ZHANG Hongwei, HAN Jun, ZHU Feng, GUO Chao

(Mining Institute, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** Based on the principle of borehole pressure relief and distributed optical fiber sensing technology, the internal strain sensing model of coal around the pressure relief boreholes was established. Also, the paper proposed a method of evaluating the pressure relief effect with the optical fiber tensile strain value and the radius of yielded zone. Boreholes are drilled under the sensing cable, and the internal strain of the surrounding coal can be tested periodically. Combined with internal phenomena observation, the borehole pressure relief process can be divided into four stages, according to the characteristics of internal strain and apparent failure of coal in different times. The four stages are respectively fissure development stage, limit equilibrium stage, collapse hole stage, and broken coal compaction stage. The method was used to determine the time interval of each stage in the process of borehole pressure relief under the geological conditions of Xinzhouyao Coal Mine, and concluded that the pressure relief effect of construction drilling above 94 to 101 m was more significant. The distribution characteristics of micro-seismic events before and after the construction time adjustment of pressure relief boreholes were analyzed by micro-seismic monitoring system. The results show that the frequency of high-energy events around the No. 8939 panel is significantly reduced, and the average energy of the micro-seismic event is significantly reduced by 38%.

收稿日期:2017-04-18 修回日期:2017-07-05 责任编辑:毕永华

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274117,51674135)

作者简介:李云鹏(1990—),男,辽宁辽阳人,博士研究生。E-mail:leeyp90123@foxmail.com。通讯作者:张宏伟(1957—),男,黑龙江汤原人,教授,博士生导师。E-mail:kzyhw@263.net

**Key words:** bumping prevention and control; borehole pressure relief; distributed optical fiber sensing; in-situ testing; micro-seismic monitoring

截至目前,我国发生冲击地压的矿井多达 177 个,广泛分布于山西、辽宁、江苏、山东、黑龙江、河南、新疆等多个地区<sup>[1-2]</sup>。随着我国煤炭开采发展变化,东部地区采深不断加大,老矿井开采接近尾声、孤岛面增多,冲击地压已成为威胁我国煤矿安全生产的重要灾害之一<sup>[3-4]</sup>。

目前,国内常用的冲击地压解危措施主要有顶板预裂爆破、煤层卸压爆破、高压注水、钻孔卸压、定向水压致裂、底板爆破、底板卸压槽等方法<sup>[5]</sup>。钻孔卸压具有操作便捷、施工速度快、不影响煤矿生产工作等优点,可降低巷道围岩应力、使应力峰值向深部转移,是一种高效便捷的冲击地压解危措施。卸压钻孔施工后,其自身应力值降低,且局部范围出现小的应力集中现象,当该值超过孔壁强度时,随着时间的推移及钻孔间煤体的压裂,释放煤体内部积聚的弹性能,从而达到防治冲击地压的目的<sup>[6]</sup>。国内外学者采用理论分析、数值计算、电磁辐射等方法,对钻孔卸压半径及卸压程度等进行了大量研究<sup>[7-13]</sup>,但对卸压钻孔效果的实测、卸压效果与时间关系的研究较少。

分布式光纤传感技术是基于自发布里渊散射原理的一种新型传感技术,目前在地面岩土工程应用较为广泛,在煤矿开采领域已应用在覆岩“三带”分布等方面<sup>[14-17]</sup>。鉴于该技术在岩土工程及采矿工程领域中应用的可行性,本文提出采用 BOTDR 分布式光纤传感技术对卸压钻孔效果及其与时间的关系进行实测研究,在具有冲击地压危险的工作面中沿煤层走向布置一条光纤,在其下方施工卸压钻孔,并进行定期测量,结合钻孔窥视仪表观现象观察,对钻孔卸压时间效应进行深入研究,为优化卸压钻孔施工时间提供依据。研究成果将为研究钻孔卸压提供一种全新的方法及丰富的现场经验,并进一步拓展了分布式光纤传感技术在煤矿中的应用范围。

## 1 BOTDR 钻孔卸压检测原理

### 1.1 BOTDR 测量原理

BOTDR 是一种通过感测背向布里渊散射光的频率漂移量,从而得到整条光纤的温度和应变分布情况的测量技术。当光纤轴向应变或周边温度发生变化时,沿光纤中的背向布里渊散射光的频率将随之产生漂移,该频率漂移量与光纤变化具有很好的线性关系,煤矿井下的温度变化很小可忽略不计,线性关系可表示<sup>[18-19]</sup>为

$$v_B(\varepsilon) = v_B(0) + \frac{dv_B(\varepsilon)}{d\varepsilon} \varepsilon \quad (1)$$

式中, $\varepsilon$  为应变值; $v_B(\varepsilon)$  为应变为  $\varepsilon$  时布里渊光频率漂移量; $v_B(0)$  为自由状态的布里渊光中心频率; $dv_B(\varepsilon)/d\varepsilon$  为比例系数。

基于 BOTDR 原理及传感光纤具有防水防潮、耐久性好、抗电磁干扰、耐腐蚀、柔软可弯曲等特点,只需将特殊封装的单模光纤植入煤体中,通过连接解调仪,便可较为精确的感测卸压钻孔周边煤体内部变形情况,从而实现对接卸压钻孔时间效应的分析。

### 1.2 传感光缆感测模型

随着时间的推移,卸压钻孔周围煤体破裂,并向孔内自由空间内坍塌,导致钻孔周围应力重新分布,塑性区随之不断扩大,最终破碎坍塌的煤块充满钻孔空间,钻孔孔壁由内至外形成破裂区、塑性区、弹性区,从而形成卸压区域<sup>[20]</sup>。因此,为分析卸压钻孔周围煤体内部变形情况并简化计算,认为卸压钻孔处于双向应力状态,建立如图 1 所示的模型。

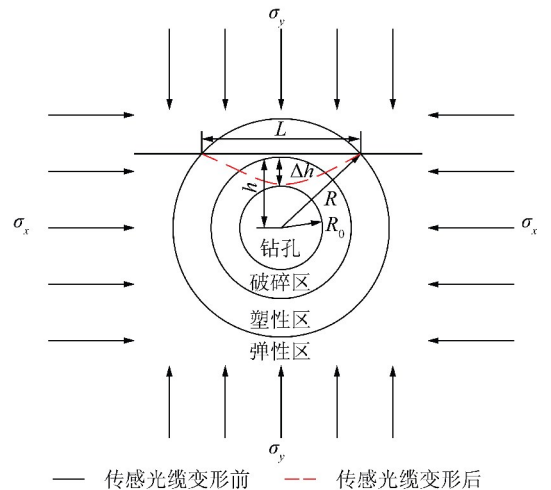


图 1 钻孔卸压几何模型

Fig. 1 Geometric model of borehole pressure relief

将传感光缆与卸压钻孔交叉布置,当卸压钻孔沿径向方向产生卸压区域时,在垂直应力作用下,传感光缆随破碎煤体一同弯曲下沉,从而使传感光缆产生轴向应变。假设在上部煤岩体垂直应力的作用下,传感光缆向下移动,下沉量为  $h$ ,传感光缆产生拉伸变形的长度为  $L$ ,则其几何关系如下:

$$R = \sqrt{h^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad (2)$$

式中, $R$  为卸压半径,m; $h$  为卸压钻孔中心与传感光缆距离,m; $L$  为传感光缆拉伸变形段长度,m。

由布里渊光测量原理可知,应变为正值表示光纤轴向处于受拉状态,应变为负值表示光纤轴向处于受压状态。由固支梁受力特征可知<sup>[21]</sup>,传感光缆中部处于受拉状态、弯矩为正,两端头附近处于受压状态、弯矩为负,因此,认为在传感光缆应变出现负值时为卸压范围边界,即可确定传感光缆拉伸变形段长度 $L$ ,代入式(2)可求得卸压半径 $R$ 。由卸压半径 $R$ 及传感光缆应变值,即可确定卸压钻孔的时间效应。

## 2 测试方案设计与现场施工

### 2.1 工作面概况

忻州窑矿位于山西省大同矿区,井田西南部与煤峪口矿相邻,北部与云冈矿和晋华宫矿相邻。是目前大同煤矿集团的主力生产矿井。8939工作面位于忻州窑矿西二盘区,主采11号煤层,其西侧为8937采空区,东侧一部分为8941采空区,另一部分紧邻云冈矿采空区,是典型的孤岛工作面,工作面布置平面如图2所示。

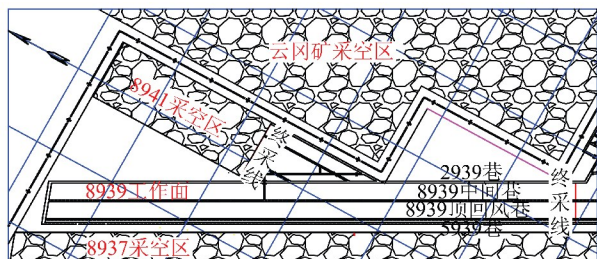


图2 8939工作面布置平面

Fig. 2 Plan view of No. 8939 panel layout

8939工作面煤层结构简单,平均埋深345 m,工作面长度95 m,走向长度1 400 m,与8937工作面间留有20 m保护煤柱,煤层平均厚度7.5 m,平均倾角3°,绝对瓦斯涌出量4.7 m<sup>3</sup>/min,采用综采放顶煤回采工艺。煤层硬度3.2~4.4,为坚硬煤层;煤层上部无伪顶,顶底板均为以砂岩为主的坚硬岩层,属于典型的顶板、煤层、底板均坚硬的“三硬”煤层。

大同煤田东部矿井毗邻口泉断裂,地质构造运动为诱发冲击地压提供了能量条件,口泉断裂附近煤峪口矿、忻州窑矿、同家梁矿等均有不同强度的冲击地压现象发生,邻近8935,8937工作面在开采期间,回风平巷超前100 m范围内也曾发生多次冲击地压现象<sup>[22-23]</sup>。因此,8939孤岛工作面具有较高的冲击危险性。

钻孔卸压是忻州窑矿冲击防治体系中的重要环节之一,现有钻孔卸压措施参数为:孔径108 mm,深度8.0 m,高度0.5 m,采用爬道钻机施工,对钻孔施工时间未做明确规定。因此,研究卸压钻孔的时间效

应,对提高钻孔卸压效果、保障8939工作面安全回采是十分必要的。

### 2.2 光纤监测孔布置

为保证光纤布置位置处于煤体弹性区内,在8939工作面回风巷道(5939巷)距工作面开切眼1 254 m处宽约3 m、深约2 m的绞车硐室布置一个分布式光纤监测孔。分布式光纤监测孔参数为:孔口距煤壁1.4 m,距底板1.2 m,光纤监测孔与煤壁水平夹角5°,垂直夹角向上1°,钻孔孔径65 mm,孔深44 m。为确保钻孔方向保持稳定,施工时先用钻机开孔,当孔深达到1.5 m后,在钻头后部连接一长1.0 m、直径60 mm的导向装置,钻孔布置平面示意图如图3所示。

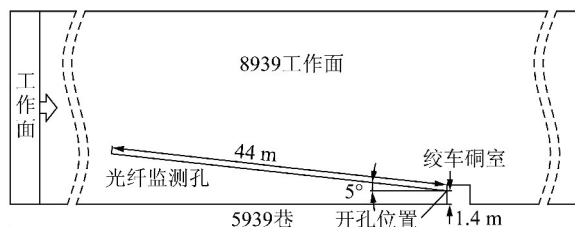


图3 光纤监测孔布置平面

Fig. 3 Scheme of detection fiber optic

### 2.3 传感光缆选择及其安装

根据以往工程实践经验,且为满足传感器安装和卸压钻孔周围应变监测的要求,本次研究采用韧性较强的金属基索状应变传感光缆,以灌注水泥砂浆的方式植入光纤监测孔内。传感光缆直径为 $5.0 \pm 0.2$  mm,应变系数为499.8 MHz/%,最大拉断力2 350 N。为保证植入的传感光缆与煤体具有良好的协同变形能力,根据实验室内测得8939工作面11号煤层的弹性模量为3.66 GPa、泊松比为0.23<sup>[24]</sup>。因此,选择刚度较低且变形参数与其接近的M7.5标号水泥砂浆灌注至光纤监测孔中<sup>[25]</sup>。传感光缆安装步骤如下:

(1) 光纤钻孔施工完毕,将传感光缆捆绑在40 mm直径的PVC管件上,并植入到钻孔中,如图4所示;

(2) 待传感光缆全部放入孔内后,将注浆管插入钻孔中(PVC管壁外侧)约2 m深,用聚氨酯将钻孔封口1 m;

(3) 待聚氨酯凝固后,开启注浆泵注浆直至水泥砂浆由PVC管内部反出为止。

### 2.4 卸压钻孔布置方案与施工

设计卸压钻孔间距1.5 m,深度6.0 m,钻孔顶部与光纤监测孔底部相距0.2 m,卸压钻孔孔径为65, 90, 108 mm,以开孔位置为原点,具体布置方式如图5所示。



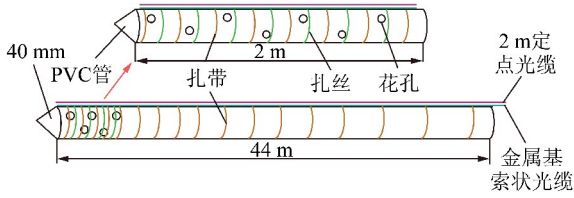


图 4 分布式光纤传感器组装置示意

Fig. 4 Distributed optic fiber sensor assemble scheme



图 7 光时域应变仪数据采集

Fig. 7 Data acquisition of BOTDR instrument

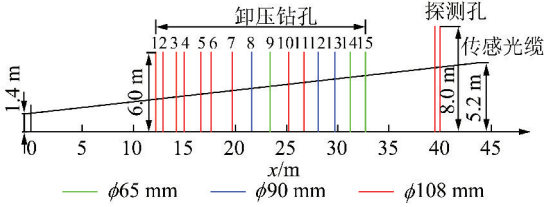


图 5 卸压钻孔布置平面

Fig. 5 Plan view of pressure relief boreholes layout

为确认传感光缆位置是否与理论状态相符,在距光纤监测孔孔口约 40 m 处,采用爬道式钻机在竖直方向上每隔 0.2 m 施工水平探测钻孔,共施工两排,排距 0.5 m,若传感光缆测出光纤应变突变,则可认为传感光缆位置与设计相符。待确认光纤位置后,按照设计方案垂直于巷帮施工,现场施工如图 6 所示。



图 6 卸压钻孔现场施工

Fig. 6 Pressure relief borehole constructed in field

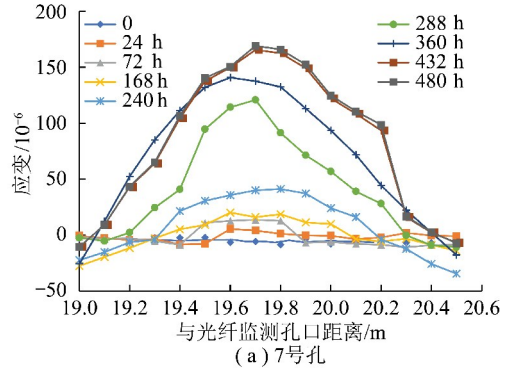
### 3 传感光缆应变数据采集与分析

#### 3.1 传感光缆应变数据采集

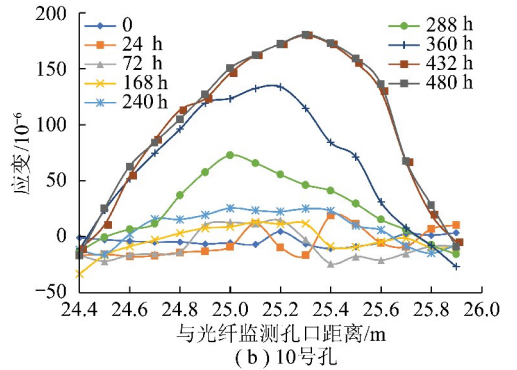
测试采用中电 41 所研制的 AV6419 型光时域应变仪,由监测孔引出长约 300 m 的信号光缆,在 5939 巷道与 901 盘区轨道巷连接处与应变仪连接。待光纤监测孔内水泥砂浆凝固达到理论测试强度后,采集传感光缆的初始应变值。之后,分别采集钻孔施工结束后 0, 24, 72, 168, 240, 288, 360, 432, 480 h 传感光缆的应变数据,将测得数据与初始应变值逐一作差,从而实现卸压钻孔时间效应的探求。为保证本次测试的精度,采集频率设置为 0.1 m,即每 0.1 m 采集一个应变数据。现场采集过程如图 7 所示。

#### 3.2 传感光缆应变分析

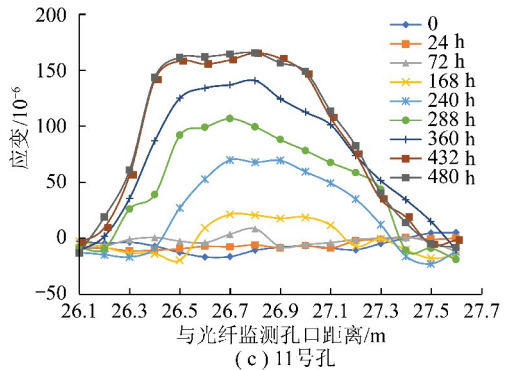
针对忻州窑矿实际情况,选择 3 组 108 mm 孔径的卸压钻孔应变数据进行分析,不同测量时间的应变曲线如图 8 所示。



(a) 7号孔



(b) 10号孔



(c) 11号孔

图 8 7,10,11 号孔应变变化曲线

Fig. 8 Strain curve of Nos. 7,10,11 borehole

现场施工时,传感光缆与钻孔交叉 5° 布置,由此产生卸压半径计算误差约为 4 mm,对卸压范围确定

影响较小,可忽略不计。则有:

7号钻孔距离光纤监测孔口19.7 m,施工结束后立即测量,煤体内部应变几乎未发生变化,应变值均在 $10 \times 10^{-6}$ 左右;钻孔施工24,72,168 h后钻孔周围煤体内部应变发生较小的变化,最大应变值均在 $20 \times 10^{-6}$ 以内,卸压半径逐渐开始增大,半径分别为0.15,0.16,0.22 m;当钻孔施工240 h后,卸压钻孔周围煤体内部应变开始增大,应变最大值达到 $41 \times 10^{-6}$ ,卸压半径继续增大,达到0.40 m;当钻孔施工288 h后,卸压钻孔周围煤体内部应变显著增大,最大值达到 $120 \times 10^{-6}$ ,卸压半径显著增大,达到0.55 m;当钻孔施工360 h后,卸压钻孔周围煤体内部应变进一步增大,最大值达到 $140 \times 10^{-6}$ ,卸压半径进一步增大,达到0.71 m;当钻孔施工432 h后,卸压钻孔周围煤体内部应变继续增大,最大值达到 $166 \times 10^{-6}$ ,卸压半径基本保持不变;当钻孔施工480 h后,卸压钻孔周围煤体应变及卸压半径基本保持不变,卸压钻孔达到平衡状态。

10号钻孔距离光纤监测孔口25.2 m,施工结束后立即测量,煤体内部应变几乎未发生变化,应变值均在 $10 \times 10^{-6}$ 以内;钻孔施工24,72,168,240 h后钻孔周围煤体内部应变发生较小的变化,最大应变值均在 $25 \times 10^{-6}$ 以内,卸压半径逐渐开始增大,分别为0.12,0.18,0.27,0.48 m;当钻孔施工288 h后,卸压钻孔周围煤体内部应变明显增大,最大值达到 $72 \times 10^{-6}$ ,卸压半径显著增大,达到0.52 m;当钻孔施工360 h后,卸压钻孔周围煤体内部应变显著增大,最大值达到 $133 \times 10^{-6}$ ,卸压半径进一步增大,达到0.74 m;当钻孔施工432 h后,卸压钻孔周围煤体内部应变继续增大,最大值达到 $179 \times 10^{-6}$ ,卸压半径基本保持不变;当钻孔施工480 h后,卸压钻孔周围煤体应变和卸压半径基本保持不变,卸压钻孔达到平衡状态。

11号钻孔距离光纤监测孔口26.8 m,施工结束后0,24,72 h,煤体内部应变几乎未发生变化,应变值均在 $11 \times 10^{-6}$ 以内,施工72 h后卸压半径开始发育,为0.10 m;钻孔施工168 h后钻孔周围煤体内部应变发生较小的变化,最大应变值 $21 \times 10^{-6}$ ,卸压半径增大至0.28 m;当钻孔施工240 h后,卸压钻孔周围煤体内部应变开始增大,应变最大值达到 $69 \times 10^{-6}$ ,卸压半径继续增大,达到0.42 m;当钻孔施工288 h后,卸压钻孔周围煤体内部应变显著增大,最大值达到 $106 \times 10^{-6}$ ,卸压半径显著增大,达到0.57 m;当钻孔施工360 h后,卸压钻孔周围煤体内部应变进一步增大,最大值达到 $141 \times 10^{-6}$ ,卸压半径进一步增大,达

到0.68 m;当钻孔施工432 h后,卸压钻孔周围煤体内部应变继续增大,最大值达到 $165 \times 10^{-6}$ ,卸压半径基本保持不变;当钻孔施工480 h后,卸压钻孔周围煤体应变和卸压半径基本保持不变,卸压钻孔达到平衡状态。

### 3.3 卸压钻孔时间效应分析

为验证光纤测试结果的正确性,在进行光纤测试的同时,采用钻孔窥视仪对其进行了窥视。以10号孔为例,钻孔施工48 h后,钻孔孔壁较为光滑,未塌孔,如图9(a)所示;钻孔施工168 h后,钻孔孔壁产生部分裂隙,孔壁较48 h时粗糙,孔底存在细碎煤渣如图9(b)所示;钻孔施工240 h后,钻孔内部部分塌孔,孔底存在破碎块状煤体,如图9(c)所示;钻孔施工432 h后,钻孔内部完全塌孔,破碎煤体充满孔内自由空间,如图9(d)所示。

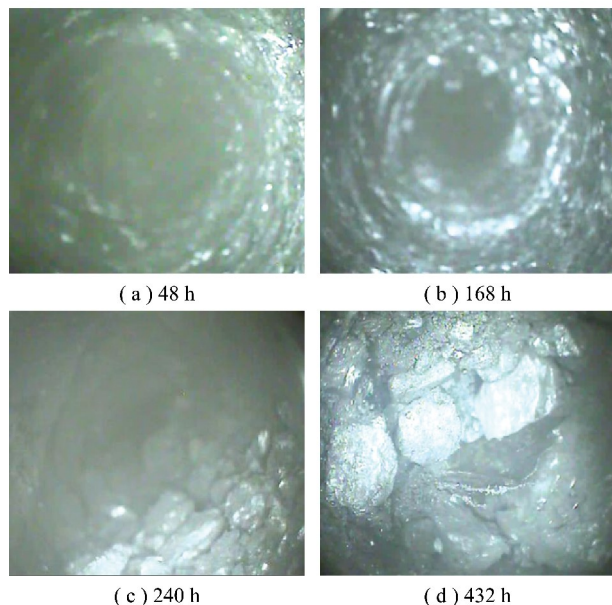


图9 10号钻孔内部表现窥视

Fig.9 External peek in No.10 borehole

分别将上文选取的3组钻孔最大应变值及卸压半径的平均值与对应测量时间绘制成散点图,并拟合成曲线,如图10所示。分析可知,卸压半径与时间的关系函数在0~480 h区间呈单调递增趋势,随着时间的不断推进,钻孔周围形成的卸压区域逐渐增大;在0~72 h时卸压半径开始缓慢增大;在72~402 h时卸压半径近似呈线性增长;当超过402 h后趋于平稳。钻孔周围煤体内部最大应变值与时间的关系函数在0~480 h区间内也呈单调递增趋势;在0~72 h时应变变化较小;在72~190 h时应变开始增大,增大速率较慢;在190~402 h时近似呈线性增长,增长速率较快;超过402 h后,应变值趋于平稳。



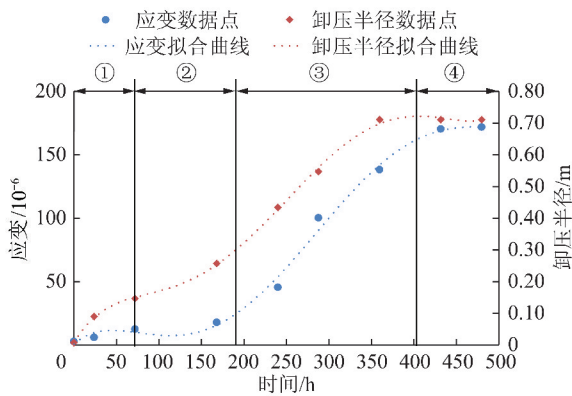


图 10 不同时间钻孔卸压效果散点及拟合曲线

Fig. 10 Scatter plot and fitting curve of borehole pressure relief under different time condition

综合拟合曲线及钻孔窥视分析结果,根据不同时间钻孔周围煤体内部应变及表观破坏特征,可将钻孔卸压过程分为 4 个阶段:裂隙发育阶段、极限平衡

阶段、塌孔阶段、破碎煤体压实阶段,分别对应图 10 中①~④四个区间,钻孔各阶段特征见表 1。

#### 4 现场微震监测分析

8939 工作面自 2015-09-13 开始回采,开采初期,由于采掘接续较为紧张,卸压钻孔仅超前工作面 50~70 m 施工。针对忻州窑矿 8939 工作面地质条件而言,为使钻孔卸压起到最佳效果,应至少提前 402 h 施工卸压钻孔,以 8939 工作面实际日推进度(5~6 m/d)计算,建议超前工作面 94~101 m 施工卸压钻孔。忻州窑矿 8939 工作面安装有 SOS 微震监测系统,2015-10-30 卸压钻孔施工达到超前工作面约 110 m,对比 10 月 30 日前后 48 d 的微震监测数据,工作面分别推进至采位 13.5,427.4 m,如图 11 所示,其中 2939 巷道为运输平巷、5939 巷为回风巷道,回风巷道邻近 8937 采空区。

表 1 钻孔发育各阶段特征

Table 1 Characteristics of boreholes development

阶段	内部特征	表观特征	时间区间/h
裂隙发育阶段	煤体内部应变变化很小,卸压半径开始发育	孔壁光滑完整,未见明显破坏	0~72
极限平衡阶段	煤体内部应变开始增大,速度缓慢;卸压半径继续增大,近似呈线性增长	孔壁粗糙,孔底有煤渣,未塌孔	72~190
塌孔阶段	煤体内部应变增大,卸压半径增大,增长速率均近似呈线性	钻孔塌孔,破碎煤体涌向孔内自由空间	190~402
破碎煤体压实阶段	卸压半径不再继续增大,煤体内部应变变化很小,应力达到二次平衡	破碎煤体充满卸压钻孔内自由空间	>402

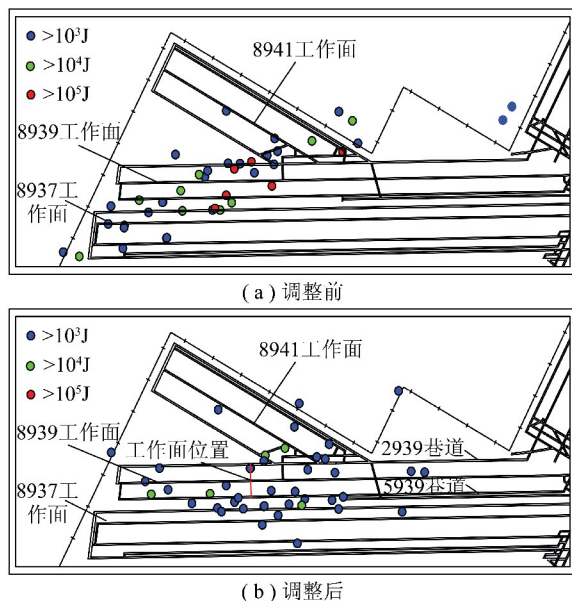


图 11 钻孔施工时间调整前后微震事件分布

Fig. 11 Micro-seismic event distribution before and after adjustment of borehole constructed time

卸压钻孔施工时间调整前,8939 工作面周边发生能量高于  $10^3$  J 的微震事件 58 次,其中能量在  $10^5$  J 以上的 6 次,能量在  $10^4 \sim 10^5$  J 之间的 13 次,能量在  $10^3 \sim 10^4$  J 之间的 39 次,平均能量为  $4.16 \times 10^4$  J,在 2015-10-26 采位 400 m 处连续发生两次能量高达  $10^5$  J 以上的冲击现象,导致 5939 巷道底板产生底臃,底臃长度约 200 m,底臃高度 0.5~0.8 m,折损单体支柱 5 根;卸压钻孔施工时间调整后,8939 工作面周边发生能量高于  $10^3$  J 的微震事件 62 次,其中能量在  $10^5$  J 以上的 0 次,能量在  $10^4 \sim 10^5$  J 之间的 13 次,能量在  $10^3 \sim 10^4$  J 之间的 49 次,平均能量为  $2.58 \times 10^4$  J,未出现巷道底板大范围底臃现象。综上分析可知,卸压钻孔施工时间未调整前卸压钻孔可起到一定的卸压作用,8939 工作面开采并未出现巷道冲毁等严重事故;卸压钻孔施工时间调整后,煤体内部积聚的能量在时间作用下较好的释放,发生微震事件的平均能量下降约 38%,验证了上述钻孔卸压时间效应分析的正确性。

## 5 结 论

(1)以钻孔卸压原理及分布式光纤传感技术为基础,建立了卸压钻孔周边煤体内部应变感测模型,提出了以光纤拉伸应变值及卸压半径为指标的卸压效果评价方法。

(2)通过对卸压钻孔周围煤体内部应变的定期测试,结合钻孔窥视仪对钻孔孔内表面现象观测,得出卸压钻孔的卸压过程随时间变化可分为裂隙发育阶段、极限平衡阶段、塌孔阶段、破碎煤体压实阶段。

(3)确定了在忻州窑矿 8939 工作面地质条件下,卸压钻孔的裂隙发育阶段时间为施工后 0 ~ 72 h、极限平衡阶段 72 ~ 190 h、塌孔阶段时间为施工后 190 ~ 402 h、破碎煤体压实阶段为施工 402 h 后。

(4)8939 工作面超前工作面 110 m 以上施工卸压钻孔,工作面周边的高能量事件频次及微震事件平均能量明显降低,说明进入破碎煤体压实阶段的钻孔可较大程度的降低其周边煤体内部的弹性能,达到较好的卸压效果。

## 参考文献 (References):

- [1] 蓝航,陈东科,毛德兵.我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J].煤炭科学技术,2016,44(1):39-46.  
LAN Hang, CHEN Dongke, MAO Debing. Current status of deep mining and disaster prevention in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 39-46.
- [2] 张宏伟,朱峰,韩军,等.冲击地压的地质动力条件与监测预测方法[J].煤炭学报,2016,41(3):545-551.  
ZHANG Hongwei, ZHU Feng, HAN Jun, et al. Geological dynamic conditions and forecast technology for rock bursts[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 545-551.
- [3] 蓝航,齐庆新,潘俊锋,等.我国煤矿冲击地压特点及防治技术分析[J].煤炭科学技术,2011,39(1):11-15.  
LAN Hang, QI Qingxin, PAN Junfeng, et al. Analysis on features as well as prevention and control technology of mine strata pressure bumping in China[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1): 11-15.
- [4] 姜耀东,赵毅鑫.我国煤矿冲击地压的研究现状:机制、预警与控制[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2188-2204.  
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin. State of the art: investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2188-2204.
- [5] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213.  
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [6] 钱鸣高,石平五,许家林.矿山压力及岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [7] 朱斯陶,姜福兴,史先锋,等.防冲钻孔参数确定的能量耗散指数法[J].岩土力学,2015,36(8):2270-2276.  
ZHU Sitao, JIANG Fuxing, SHI Xianfeng, et al. Energy dissipation index method for determining rockburst prevention drilling parameters [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(8): 2270-2276.
- [8] 马振乾,姜耀东,李彦伟,等.极软煤层巷道钻孔卸压与 U 型钢协同控制[J].煤炭学报,2015,40(10):2279-2286.  
MA Zhenqian, JIANG Yaodong, LI Yanwei, et al. Collaborative control of pressure released boreholes with U-steel of roadways in ultra-soft coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2279-2286.
- [9] 耿敏敏,马占国,龚鹏,等.高应力煤巷卸压孔布置方式对卸压效果影响分析[J].中国安全生产科学技术,2012,8(11):5-10.  
GENG Minmin, MA Zhanguo, GONG Peng, et al. Analysis of the effect on pressure relief by the pressure relieving hole layouts in high stress coal roadway [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(11): 5-10.
- [10] 易恩兵,牟宗龙,窦林名,等.软及硬煤层钻孔卸压效果对比分析研究[J].煤炭科学技术,2011,39(6):1-5,85.  
YI Enbing, MOU Zonglong, DOU Linming, et al. Study on comparison and analysis on pressure releasing effect of boreholes in soft and hard seam [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(6): 1-5, 85.
- [11] 兰永伟,高红梅,陈学华.钻孔卸压效果影响因素数值模拟研究[J].矿业安全与环保,2013,40(3):6-9.  
LAN Yongwei, GAO Hongmei, CHEN Xuehua. Numerical simulation study on influence factors of borehole pressure relief effect [J]. Mining Safety & Environment Protection, 2013, 40(3): 6-9.
- [12] 刘红岗,贺永年,徐金海,等.深井煤巷钻孔卸压技术的数值模拟与工业试验[J].煤炭学报,2007,32(1):33-37.  
LIU Honggang, HE Yongnian, XU Jinhai, et al. Numerical simulation and industrial test of boreholes destressing technology in deep coal tunnel [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 33-37.
- [13] 吴鑫,张东升,王旭锋,等.深部高应力巷道钻孔卸压的 3DEC 模拟分析[J].煤矿安全,2008,39(10):15-16,35.  
WU Xin, ZHANG Dongsheng, WANG Xufeng, et al. Analysis of pressure relief boreholes on 3DEC simulation in deep and high stress roadway [J]. Safety in Coal Mines, 2008, 39(10): 15-16, 35.
- [14] 柴敬,王正师,袁强,等. BOTDA 在岩层移动相似材料模拟试验中的应用[J].煤炭科学技术,2015,43(1):1-4.  
CHAI Jing, WANG Zhengshuai, YUAN Qiang, et al. Application of Brillouin optical time domain analysis in strata movement similar material simulation experiment [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 1-4.
- [15] 张丹,张平松,施斌,等.采场覆岩变形与破坏的分布式光纤监测与分析[J].岩土工程学报,2015,37(5):952-957.  
ZHANG Dan, ZHANG Pingsong, SHI Bin, et al. Monitoring and analysis of overburden deformation and failure using distributed fiber optic sensing, 2015, 37(5): 952-957.

- [16] 柴敬,袁强,李毅,等. 采场覆岩变形的分布式光纤检测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,36(S2):3589-3596.  
CHAI Jing, YUAN Qiang, LI Yi, et al. Experimental study on overlying strata deformation based on distributed optical fiber sensing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 36(S2):3589-3596.
- [17] 刘少林,张丹,张平松,等. 基于分布式光纤传感技术的采动覆岩变形监测[J]. 工程地质学报,2016,24(6):1118-1125.  
LIU Shaolin, ZHANG Dan, ZHANG Pingsong, et al. Deformation monitoring of overburden based on distributed optical fiber sensing[J]. Journal of Engineer Geology, 2016, 24(6):1118-1125.
- [18] 魏广庆,施斌,余小奎,等. BOTDR 分布式检测技术在复杂地层钻孔灌注桩测试中的应用研究[J]. 工程地质学报,2008,16(6):826-832.  
WEI Guangqing, SHI Bin, YU Xiaokui, et al. BOTDR based distributed strain test on bored pile buried in complicated geological ground [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6):826-832.
- [19] 魏广庆,施斌,贾建勋,等. 分布式光纤传感技术在预制桩基桩内力测试中的应用[J]. 岩土工程学报,2009,31(6):911-916.  
WEI Guangqing, SHI bin, JIA Jianxun, et al. Application of distributed optical fiber sensing to testing inner force of prefabricated piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(6):911-916.
- [20] 张寅. 强冲击危险矿井冲击地压灾害防治[M]. 北京:煤炭工业出版社,2010.
- [21] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京:高等教育出版社,2013.
- [22] 于斌,陈莹,韩军,等. 口泉断裂与同忻井田强矿压显现的关系[J]. 煤炭学报,2013,38(1):73-77.  
YU Bin, CHEN Ying, HAN Jun, et al. Study of the relationship between the Kouquan fault and strong ground pressure in Tongxin Coal Mine [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1):73-77.
- [23] 王旭宏. 大同矿区“三硬”煤层冲击地压发生机理研究[D]. 太原:太原理工大学,2010.  
WANG Xuhong. Research on the mechanism of rock burst occurring in “three hard” coal seam of datong coal mining area [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [24] 张宏伟,李云鹏,陈莹,等. 三硬条件下孤岛工作面安全推进速度研究[J]. 煤炭科学技术,2017,45(2):6-11.  
ZHANG Hongwei, LI Yunpeng, CHEN Ying, et al. Study on safety pushing forward speed of island coal mining face under hard roof and hard seam and hard floor conditions [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(2):6-11.
- [25] 吴浪,宋固全,雷斌. 硬化水泥浆体的弹性模量预测[J]. 建筑材料学报,2011,14(6):819-823.  
WU Lang, SONG Guquan, LEI Bin. Prediction of elastic modulus of hardened cement pastes [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(6):819-823.