

井下水力压裂煤层顶板应力监测 及其演化规律

黄飞^{1,2*}, 李树清^{1,2}, 左伟芹³

(1.湖南科技大学 南方煤矿顶板及煤与瓦斯突出预防控制安全生产国家安全监管总局重点实验室,湖南 湘潭 411201;

2.湖南科技大学 煤矿安全开采湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201;

3.河南理工大学 安全学院,河南 焦作 454000)

摘要:针对井下水力压裂过程中未考虑水头压力对煤层顶板地应力的影响,导致煤层顶底板容易被破坏的问题,以松藻矿区同华煤矿水力压裂为例,采用空心包体应力计监测压裂过程中顶板应力变化规律,根据岩石应力-应变关系及检测结果计算出压裂前后煤层顶板地应力增量的大小和方向,分析水力压裂水头压力对煤层顶板地应力的影响规律.结果表明:(1)煤岩体起裂时,顶板主应力增量达到最大值且与煤层起裂压力在数值上基本相等,以煤层起裂方向为基准,主应力的方位角与倾角均发生了相应的旋转;(2)煤层起裂后顶板主应力增量急剧减小,主应力方位角和倾角逐渐恢复至初始状态;(3)停止压裂后,顶板主应力较初始状态均有所增大,主应力方位角和倾角与初始状态基本一致,说明水力压裂能够改变煤层顶板应力状态.

关键词:水力压裂;煤层顶板;空心包体应力计;应力监测

中图分类号:TD322

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2018)03-0023-05

Stress Monitoring of Roof Strata and its Evolution Rule in underground Coal Seam Hydraulic Fracturing

Huang Fei^{1,2}, Li Shuqing^{1,2}, Zuo Weiqin³

(1. The SAWS Laboratory of Prevention and Controlling the Roof, Coal and Gas Outburst in Coal Mine of South China,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Head pressure neglected in underground coal seam hydraulic fracturing process may induce roof-floor strata rupture. A study is presented on change rule of roof strata stress by taking examples from Songzao mining area, Tonghua Coal Mine. Hollow inclusion cells are adopted as a method to monitor stress change during hydraulic fracturing. Roof strata stress increment and its direction are calculated by stress-strain relationship and monitoring results. Besides, the influence of head pressure on roof strata stress is analyzed in this paper. Results show that (1) when crack initiation occurs, principle stress increment in roof strata reaches maximum value and equals to coal seam initiation pressure value, azimuth of principle stress changes clockwise with fracturing, inclination of maximum and intermediate principle stress changes anticlockwise with fracturing, inclination of minimum principle stress changes clockwise with fracturing; (2) After crack initiation, roof strata stress increment has a sharp decline, the azimuth and inclination of principle stress gradually return to original value

收稿日期:2018-07-10

基金项目:国家自然科学基金积极青年基金资助项目(51604092);湖南省自然科学基金青年项目(JJ3072);湖南科技大学博士科研启动基金资助项目(E51686)

*通信作者,E-mail:hftcl2006@163.com

with time; (3) After the fracturing, roof strata principle stress has different degrees of increase, azimuth and inclination of principle stress have little variation compared to its initial state, which shows that roof strata stress state has changed.

Keywords: hydraulic fracturing; coal seam roof strata; hollow inclusion cells; stress monitoring

近年来,我国采用煤层水力压裂技术提高煤层透气性的高瓦斯矿井越来越多.通过大范围的井下水力压裂试验,也暴露出煤矿井下水力压裂存在的一些问题^[1,2].由于目前煤矿井下水力压裂缺乏理论支撑,实施过程中过多依靠经验,导致压裂过程中使煤层顶底板破坏,造成后期巷道掘进及回采过程中支护困难,严重影响矿井安全生产.闫少宏、冯彦军等^[3,4]进行了定向水力压裂弱化坚硬顶板的研究,认为运用定向水力可有效改变顶板应力分布,达到较好的压裂控顶效果.因此,有必要对水力压裂下井下煤层顶底板的应力分布规律展开研究^[5].

关于岩体应力变化监测,目前主要采用空心包体法、应变计法、变形计法、刚性包体法等^[6,7].李涛^[8]采用RZB型钻孔应变计对青藏高原东缘地应力进行连续监测,揭示了该区域应力场活动与地震的关系.刘宁等^[9]采用空心包体应变计监测了隧道掘进过程中的围岩应力变化,获得了开挖隧道围岩的塑性区分布.刘超儒^[10]在兖州矿区采用CSIRO空心包体应变计开展了工作面围岩采动应力监测,监测效果显著.康红普^[11]采用空心包体应变计对压裂前后钻孔附近煤体及工作面前方煤体的应力变化进行了监测,探讨了压裂诱导的围岩应力演化规律.

本文以松藻矿区同华煤矿水力压裂试验为例,采用空心包体应力计监测水力压裂过程中压裂钻孔附近顶板围岩应变,通过分析顶板围岩应变,以期获得水力压裂引起煤层顶板应力变化规律.

1 工程背景

1.1 矿井简介

松藻矿区同华煤矿煤岩层的地层年代为上二叠统,该矿区共含煤12层,其中只有 K_1 和 K_3^b 这2层煤层可采,其他为部分可采甚至不可采煤层. K_1 煤层属于倾斜煤层,倾角约为 24.5° ,其平均厚度约为0.66 m,煤与瓦斯突出呈一般性,而 K_3^b 煤层煤与瓦斯突出严重.近年来,同华煤矿逐渐形成了以水力割缝技术和水力压裂技术为主的保护层水力化增透措施.尤其是水力压裂技术以其增透范围广,增透效果好,施工工艺简单,而得到广泛应用.

1.2 试验区域概况

试验地点位于松藻矿区同华煤矿二区水平阶段(0 m)大巷.地质资料显示区域有三层煤,试验煤层为 K_1 煤层,同华煤矿 K_1 煤层作为下保护层开采.由于煤层透气性系数极低,掘进条带预抽浓度长期小于5%,平均单孔瓦斯抽采纯量小于 $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$,由于抽采效果差, K_1 煤层月平均掘进进尺不足30 m.煤层埋深400~500 m,厚度在0.50~1.65 m,倾角 $29.88^\circ \sim 48.00^\circ$.上覆岩层以泥岩、泥灰岩为主,平均容重为 25 kN/m^3 .3121回风巷位于三水平二区-60 m阶段北边界石门至四石门,走向长950 m, K_1 巷位于茅口巷上方提高7 m布置,两巷真厚10~12 m.掘进条带压裂孔布置在-60 m阶段茅口巷浅钻场内,压裂孔沿走向间距60~150 m,共布置压裂孔8个.

2 顶板应力监测

2.1 地应力监测原理

本文采用现场测试岩体三维应力的方法来实时监测水力压裂过程中地应力的变化规律.选取岩体中任意一点的6个分量($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$)来描述岩体的应力状态(如图1).根据静力学原理,地应力的6个分量处于相对静止的平衡状态,且很难被直接测试获得.因此,本文采用监测应力效应的方法来间接

获取压裂过程中煤岩体的地应力变化规律^[12,13].

应力效应是指力和应力会导致位移和应变.因此,本文首先采用应变计监测获取岩体的应变数据,然后基于高等岩石力学构建岩石应力-应变本构数学模型,最后将所获的应变数据代入应力-应变数学模型即可计算出地应力的大小和方向.

确定大地的坐标系为XYZ,地下某点所受应力可表示为 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$.根据空心包体应变计的工作原理,由应变计算地应力的公式如下:

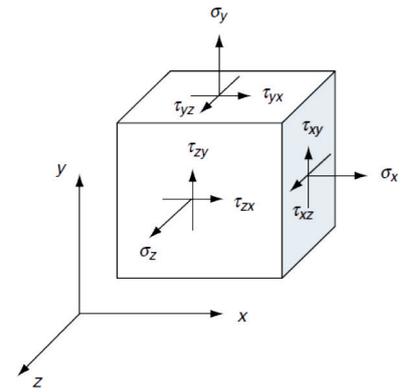


图1 煤岩体中任意一点的应力分布

$$\begin{cases} \varepsilon_{\theta} = \frac{1}{E} \{ (\sigma_x + \sigma_y) k_1 + 2(1 - \nu^2) [(\sigma_y - \sigma_x) \cos 2\theta - 2\tau_{xy} \sin 2\theta] k_2 - \nu \sigma_z k_4 \}; \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]; \\ \varepsilon_{\theta z} = \frac{4}{E} (1 + \nu) (\tau_{yz} \cos \theta - \tau_{zx} \sin \theta) k_3. \end{cases} \quad (1)$$

式中:变量 $\varepsilon_z, \varepsilon_{\theta}, \varepsilon_{\theta z}$ 分别为应变计的轴向、周向、剪切应变; E 为弹性模量; θ 为岩层所受应力方向与主应力方向间的倾角; ν 为泊松比; k_1, k_2, k_3, k_4 为常数.

2.2 地应力监测点布置

监测地点位于K₁煤层的11#钻场,需压裂的煤层为3122掘进条带.因此,在7#压裂孔南侧22 m处布置地应力监测点,为了准确监测地应力,监测钻孔需要达到一定的深度,通常需穿透煤层顶板3 m以上,详细钻孔参数见图2与表1.将空心包体应力计固定在监测钻孔的底部并采用封孔材料进行封孔至孔底,等待3 d后进行压裂试验并同步监测底板应力.

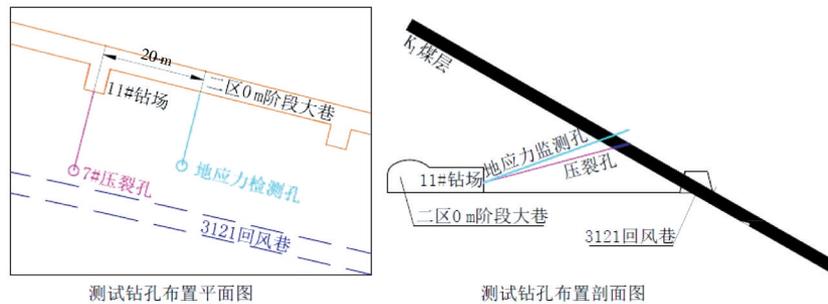


图2 压裂与应力监测钻孔布置

表1 压裂与应力监测钻孔参数 (°)

钻孔分类	钻孔长度/m	钻孔方位角	钻孔倾角	定向仪数值
水力压裂钻孔	15.7	330	16	—
地应力监测钻孔	18.0	328	26	50

3 地应力监测结果及讨论

本试验的主要目的是获取水力压裂过程中煤层顶板的应力变化规律,因此在试验开展的过程中主要通过监测注水压力和监测孔围岩的应变来间接描述煤层顶板的应力变化.通常情况下,应力的增量能更方便的显示出应力的变化规律,因此本文采用主应力增量来表示主应力的变化,最大、中间及最小主应力增量分别表示为 $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3$.

3.1 水力压裂过程中钻孔围岩应变状态

本试验中,空心包体应变监测仪的采集时间间隔确定为 1 min,从水力压裂试验开始后记录至水力压裂试验结束.同时记录水力压裂注水压力随时间变化关系,注水压力与时间关系见图 3.

具体试验步骤:首先开启应变采集仪直至稳定,然后开启压裂泵向煤层注水进行压裂,该过程中应变仪连续采集钻孔围岩的应变数据.图 4 所示为主应力增量随时间的变化曲线图,从图 4 可以看出压裂泵开启注水压力急剧增大,此时压裂钻孔围岩出现了相应的应变,但监测钻孔围岩几乎没发现明显的应变.分析表明压裂钻孔与应变监测钻孔之间有一定的间隙,这将导致压裂孔附近的应变经过一段时间后才能传递至监测孔.当压裂 9 min 后泵压有所下降,煤岩体围岩应变也随之减小.继续压裂,注水泵压呈现出缓慢升高的趋势,此过程中煤岩体围岩应变逐渐增大;当压裂进行至约 29 min 时,煤岩体围岩应变由缓慢增大转变为急剧增大,这种趋势一直持续至约 36 min,此时围岩应变达到峰值,峰值过后围岩应变急剧减小.由此推断表明,压裂进行到约 36 min 时高压水能传递至监测钻孔围岩,导致监测钻孔围岩起裂,起裂后高压水能迅速卸压,监测钻孔围岩应变随之迅速减小;当压裂进行至 51min 后关闭高压泵,此后围岩应变维持稳定.

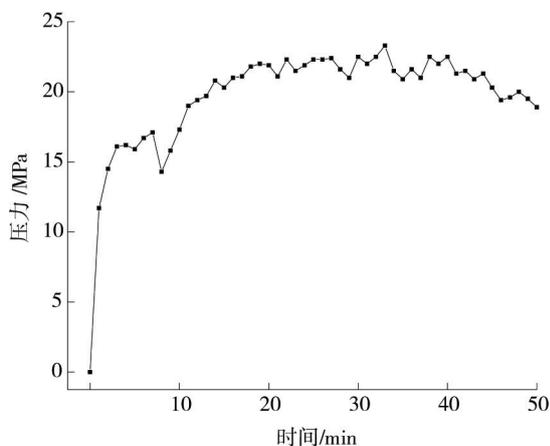


图 3 注水压力随时间的变化规律

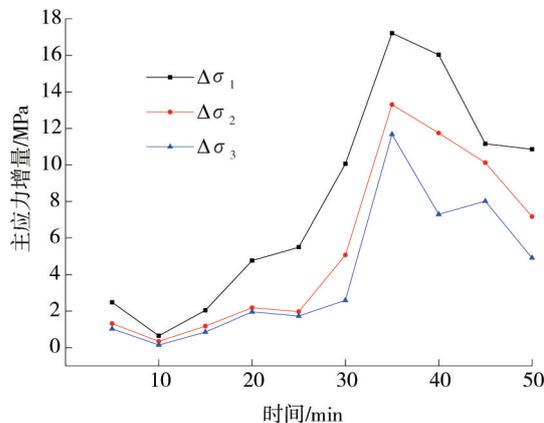


图 4 主应力随时间的变化规律

3.2 水力压裂过程中钻孔围岩应力状态

在 MATLAB 中编制计算程序,将监测数据输入程序即可计算出主应力的增量,计算结果如图 5 和图 6 所示.根据图 4 的变化曲线,监测钻孔应力随压裂时间而逐渐增大.压裂进行 36 min 后,高压水的能量从压裂孔围岩传递至监测孔围岩,导致监测区域围岩的应力达到峰值,此时的最大主应力增量为 17.2 MPa,中间主应力增量为 13.3 MPa,最小主应力增量为 11.7 MPa;继续进行压裂至 36 min 后,监测钻孔附近煤岩体被压裂,各个主应力增量急剧减小;压裂至 51 min 后关闭压裂泵停止压裂,但由于高压水被封存在裂隙内使得围岩体所受应力保持稳定,此时中间、最大与最小主应力增量分别为 7.2, 10.9, 4.9 MPa.通过以上分析表明,煤层围岩在压裂过程中所受最大主应力值为 17.2 MPa,此时对应的泵压约为 20.9 MPa.整个压裂过程中,高压水需经过一定的距离到达煤岩裂隙,在传递流动的过程中必然有压力的损失.因此在注水泵压的数值上减去水头损失即为煤层顶板所受应力.从以上数据看出,煤层顶板所受的应力最大值与煤层的起裂压力大致相同.

图 5 和图 6 为煤岩体所受应力的方位角与倾角随时间的变化规律.根据图示,36 min 的为方位角和倾角转变的一个时间节点.根据以上的分析表明,监测孔附近煤层在压裂至 36 min 时发生了起裂,导致附近围岩的应力状态发生急剧变化.总体来看,以煤层起裂的方向为基准,煤层主应力的方位角与最小主应力倾角呈顺时针变化,而最大主应力和中间主应力倾角呈现逆时针变化;压裂 51 min 后停止压裂,各应力状态随之逐渐恢复至初始状态.

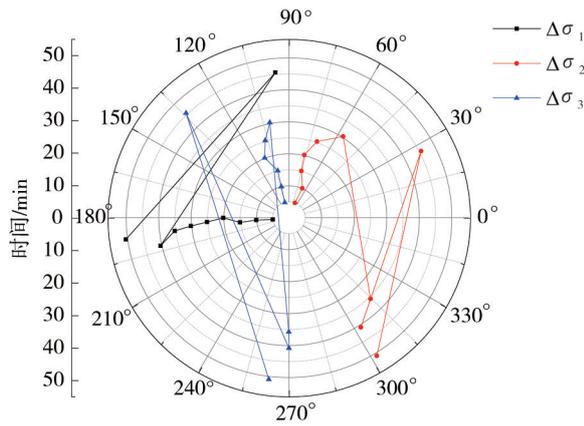


图5 主应力方位角随时间的变化规律

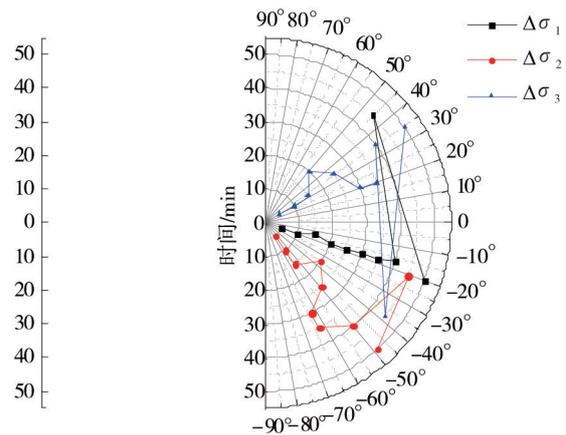


图6 主应力倾角随时间的变化规律

4 结论

- 1) 煤岩体起裂时,煤层顶板主应力增量、方位角和倾角均会出现突变.顶板主应力增量最大值与煤层起裂压力在数值上基本相等,以煤层起裂方向为基准,主应力的方位角与倾角均发生了相应的旋转.
- 2) 煤层起裂后,顶板主应力增量急剧减小,主应力方位角和倾角逐渐恢复至初始状态.
- 3) 停止压裂后,煤层顶板主应力增量、方位角和倾角趋于稳定.顶板主应力较初始状态均有所增大,主应力方位角和倾角与初始状态基本一致,说明水力压裂能够改变煤层顶板应力状态.

参考文献:

- [1] 卢昊阳,周利华,黄华州,等.大兴矿煤层气水力压裂工艺及储层改造分析[J].矿业工程研究,2013,28(4):57-62.
- [2] 黄贵炳.论水力挤出防突技术措施的防突机理和应用前景[J].湘潭师范学院学报(自然科学版),2008,30(2):105-106.
- [3] 闫少宏,宁宇,康立军,等.用水力压裂处理坚硬顶板的机制及实验研究[J].煤炭学报,2000,25(1):32-35.
- [4] 冯彦军,康红普.定向水力压裂控制煤矿坚硬难垮顶板试验[J].岩石力学与工程学报,2012,31(6):1148-1155.
- [5] 王志磊.低透气性煤层井下水力压裂技术研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2015.
- [6] 闫振雄,郭奇峰,王培涛.空心包体应变计地应力分量计算方法及应用[J].岩土力学,2018(2):715-721.
- [7] 孙东生.非弹性应变恢复原地应力测量方法的实验研究及应用[D].北京:中国地质科学院,2014.
- [8] 李涛,陈群策,欧阳祖熙,等.RZB型钻孔应变仪在青藏高原东缘地应力监测中的应用[J].北京大学学报(自然科学版),2011,47(4):677-683.
- [9] 刘宁,张春生,陈祥荣,等.深埋隧洞开挖围岩应力演化过程监测及特征研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(9):1729-1737.
- [10] 刘超儒.深部煤矿井地应力分布特征及对巷道围岩应力场的影响研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2012.
- [11] 康红普,冯彦军.定向水力压裂工作面煤体应力监测及其演化规律[J].煤炭学报,2012,37(12):1953-1959.
- [12] Ercelebi S G. Analysis of in-situ stress measurements[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1997, 15:235-245.
- [13] 蔡美峰,乔兰,李华斌.地应力测量原理和技术[M].北京:科学出版社,1995.