

文章编号:0253-9993(2012)12-1953-07

定向水力压裂工作面煤体应力监测及其演化规律

康红普^{1,2},冯彦军^{1,2}

(1. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013;2. 煤炭科学研究总院 开采设计研究分院,北京 100013)

摘要:为研究水力压裂的机理和评价压裂效果,采用空心包体应变计,对水力压裂前后钻孔附近煤层应力的变化,及水力压裂实施后,随着工作面推进,前方煤层应力的变化进行了监测。通过分析监测数据,得到以下应力演化规律与结论:① 水力压裂前后,在压裂钻孔附近煤层中的主应力增量值、倾角和方位角均会出现突变。突变程度与至压裂孔的距离、水压、裂缝扩展方式及煤层力学性质等多种因素有关;压裂后主应力增量得到恢复,但比压裂前均有所降低,水力压裂可改变煤层的应力状态。② 顶板压裂后,再受到工作面采动影响,煤层垂直应力增加,水平应力有降低的趋势,但采动引起的主应力增量变化幅度远小于压裂引起的变化,而且采动对主应力增量的倾角和方位角的影响不大;水力压裂可使顶板来压强度降低,工作面超前支承压力的影响减弱。③ 晋城王台铺煤矿坚硬顶板综采工作面进行水力压裂后,顶板的整体性和强度得到弱化,工作面采动影响减弱,顶板能够紧随工作面推进及时垮落,说明水力压裂效果良好。

关键词:水力压裂;应力变化监测;空心包体应变计;主应力增量;演化规律;顶板弱化

中图分类号:TD324 **文献标志码:**A

Monitoring of stress change in coal seam caused by directional hydraulic fracturing in working face with strong roof and its evolution

KANG Hong-pu^{1,2}, FENG Yan-jun^{1,2}

(1. Coal Mining and Design Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Design Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to study the mechanism and evaluate the effect of hydraulic fracturing, the hollow inclusion cells were adopted for stress monitoring of coal mass nearby the fracturing borehole before and after hydraulic fracturing as well as coal mass ahead of working face after hydraulic fracturing. Through the monitoring data analysis, stress evolution laws and conclusions are as follows: ① The principle stress increment, inclination and azimuth in coal mass nearby the fracturing borehole change suddenly after hydraulic fracturing. The change extent is potentially related to distance between monitoring borehole and fracturing borehole, water pressure, fracture propagation and mechanical property of coal mass; After fracturing, principle stress increments are nearly recovered to the level lower than that before fracturing, therefore, stress state can be changed by hydraulic fracturing. ② Due to the effect of hydraulic fracturing and mining, vertical stress in coal mass increases and horizontal stress decreases, the change extent of principle stress increments caused by mining where inclination and azimuth are almost invariable is much more less than that caused by hydraulic fracturing. Roof weighting intensity can be reduced by hydraulic fracturing; consequently, the effect of abutment pressure on working face is weakened. ③ The directional hydraulic fracturing in the roof of a fully mechanized working face in Wangtaipu Coal Mine is implemented. Afterwards, strength and integrity of roof along with effect of mining are weakened; roof caving is in time with the advance of working face, which demonstrates that the effect of hydraulic fracturing conducted in roof goes well.

Key words: hydraulic fracturing; stress change monitoring; hollow inclusion cell; principal stress increment; evolution law; roof weakening

收稿日期:2012-09-10 责任编辑:常琛

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAK04B06)

作者简介:康红普(1965—),男,山西五台人,研究员,博士生导师。Tel:010-84263125, E-mail:kanghp@163.com

定向水力压裂技术是波兰开发出的用于煤矿坚硬难垮顶板控制及冲击地压防治的方法^[1-3]。该方法的实质是在钻孔中切槽并注高压水,在坚硬岩石中形成定向裂缝,破坏岩石的完整性。在采煤工作面,定向水力压裂可使顶板易于垮落,在巷道围岩中,可使高应力转移,防治冲击地压发生。

我国的定向水力压裂技术是从波兰引进的。最早的井下试验在大同矿区进行,虽然取得一定效果,但是由于钻头、切缝刀具等存在较大问题,使得这项技术没有大面积推广应用。近年来,在国家高技术发展计划(863计划)项目的资助下,煤炭科学研究总院开采设计研究分院又开展了定向水力压裂技术的攻关研究,解决了压裂设备、钻孔与切缝机具及封孔等存在的一系列问题。目前,这种技术已在晋城、潞安等矿区得到应用^[4],并取得良好效果。此外,中国矿业大学等单位也开展了定向水力压裂技术研究,并应用于冲击地压的防治^[5-6]。

水力压裂效果与岩石物理力学性质、岩体结构、地应力等地质力学条件,及钻孔与切缝布置参数、压裂参数等有关。国内外学者对水力压裂机理,裂缝的扩展形态、特征及影响因素等已进行了大量的理论与试验研究^[7-9],为水力压裂参数设计与井下施工提供了基础。

水力压裂必将引起钻孔周围岩体应力的变化。因此,通过监测压裂前后岩体应力变化,不仅可研究压裂机理和影响因素,还可评价压裂效果。鉴于这方面的研究成果还很少,本文开展了定向水力压裂工作面煤体应力监测及演化规律研究。

关于煤岩体应力变化监测,目前有很多方法^[10-11],包括变形计法、应变计法、刚性包体法、空心包体法,及扁千斤顶与液压钻孔压力计法^[12]。空心包体应变计不仅用于原岩应力测量,而且可用于应力变化监测。同时,一个钻孔可确定出三维应力变化张量的6个应力分量。空心包体应变计已应用于隧道掘进过程中围岩应力变化的监测,进而分析围岩损伤区范围^[13]。在煤矿,兖州矿区引进了澳大利亚CSIRO空心包体应变计,用于工作面周围采动应力监测,取得较好效果^[14]。潞安矿区采用中国地质科学院地质力学研究所开发的KX-81改进型空心包体应变计,进行了邻近巷道掘进引起的应力变化监测,获得了比较可靠的应力变化数据^[15]。为此,本文采用空心包体应变计监测定向水力压裂前后钻孔附近煤体应力变化,及工作面前方煤体应力变化,以期对水力压裂引起的煤体应力变化规律及对坚硬顶板的控制效果有更深入的了解。

1 试验点地质条件及定向水力压裂钻孔布置

1.1 试验点地质条件

试验地点为晋城王台铺煤矿15号煤层XV1306综采工作面。工作面埋深约为140 m,煤层平均倾角4°,煤层平均厚度2.58 m。煤层顶底板岩层分布如图1所示。煤层无伪顶,直接顶为石灰岩,岩层厚度平均为9 m,致密坚硬,单轴抗压强度平均为127 MPa,整体性、稳定性好,属典型的坚硬难垮落顶板。

岩石名称	柱状	累深/m	层厚/m	岩性描述
石灰岩		132.55	2.85	灰色,含动物化石碎屑,具细微裂隙
煤线		132.77	0.22	黑色,煤质一般
泥质砂岩		137.11	4.34	灰色,夹薄层细砂岩,下部具垂直裂隙
石灰岩		146.11	9.00	灰色,含方解石脉,夹薄层泥灰岩
15号煤		148.69	2.58	黑色,似金属光泽,质较好,具水平层理,含两层夹矸,夹矸为泥岩
砂质泥岩		151.93	3.24	深灰色,局部见分散状黄铁矿

图1 采煤工作面柱状图

Fig. 1 The strata columnar section of coal face

在XV1306工作面附近,采用水压致裂法进行过原岩应力测量,测量结果见表1,表中 σ_v 、 σ_H 、 σ_h 分别为垂直应力、最大、最小水平主应力。可见,3个测点最大水平主应力、最小水平主应力均大于垂直应力,最大水平主应力与垂直应力的比值为1.82~2.10,水平应力占绝对优势。

表1 地应力测量结果

Table 1 Results of in-situ stress measurements

测点	埋深/m	σ_v /MPa	σ_H /MPa	σ_h /MPa	最大水平主应力方向
1	177	4.33	7.90	5.64	N34.0°W
2	158	3.95	7.63	4.47	N32.1°W
3	135	3.38	7.13	4.01	N41.0°W

在煤层中没有进行过地应力测量,具体地应力数据不清楚。但由于水平应力与岩层的弹性模量有很大关系,一般弹性模量越大,水平应力越高^[16],因此,相对比较松软的煤层中的水平应力,要明显低于坚硬岩层中的水平应力。

1.2 定向水力压裂钻孔布置

XV1306 工作面长度为 85.5 m,采用定向水力压裂技术对工作面顶板进行弱化处理,使顶板随工作面推进能够及时垮落。根据工作面地质条件与煤矿生产、安全要求,进行了水力压裂设计。在工作面开切眼与工作面巷道中的压裂钻孔布置如图 2 所示。

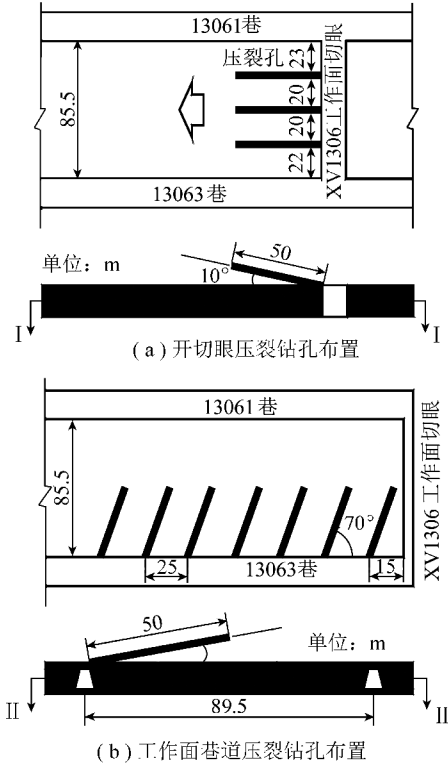


图 2 XV1306 工作面压裂钻孔布置

Fig. 2 The layout of hydraulic fracturing boreholes in XV1306 working face

2 监测仪器与测站布置

2.1 监测仪器

采用中国地质科学院地质力学研究所研制的 KX-81 改进型空心包体应变计进行煤体应力变化监测。KX-81 改进型空心包体应变计外径为 36 mm,内径为 30 mm,壁厚为 3 mm。粘贴 3 组应变花,每组应变花由 4 支应变片组成,相互间隔 45°。

本文监测水力压裂前后钻孔周围煤体应力变化,及随工作面推进前方煤体中应力的变化。进行应力变化监测时,先在监测地点钻进一个大孔至设计深度,然后钻进小孔,将空心包体应变计安装在测点,不进行应力解除,直至工作面推过测站。监测得到的是相对应变变化量,再结合煤体及包体材料的弹性模量和泊松比,可得到相对应力变化量。

2.2 测站布置

在 XV1306 轨道巷共布置 3 个测站,用于监测

XV1306 工作面前方煤体应力变化,如图 3 所示。每个测站布置 4 个测试孔,孔深分别是 4, 7, 10, 13 m (用 2C, 2D, 2E, 2F 表示),钻孔间距为 5 m。钻孔参数见表 2。其中定向仪读数用于确定应变花在钻孔中的具体位置。

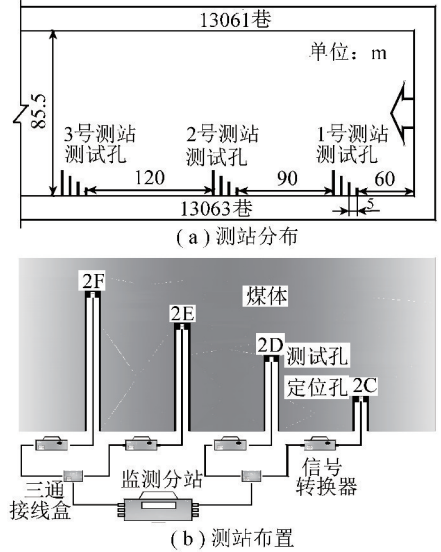


图 3 空心包体应变计应力监测站布置

Fig. 3 Layout of stress monitoring stations with hollow inclusion cells

表 2 钻孔参数

Table 2 Borehole parameters

测站	钻孔号	方位角/ (°)	倾角/ (°)	定向仪读 数/(°)
1 号测站	2C	100	4	1 215
	2D	103	4	404
	2E	100	3	513
	2F	102	3	878
2 号测站	2C	102	3	1 481
	2D	108	5	359
	2E	95	5	1 635
	2F	98	4	1 073
3 号测站	2C	108	5	1 402
	2D	102	4	9
	2E	98	4	309
	2F	100	4	1 676

3 监测结果

本次监测的是主应力的变化,为论述方便,在下面的分析中将主应力的变化称为主应力增量,最大、中间及最小主应力增量分别用 $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3$ 表示。在测站安装初期,受钻孔周围应力调整的影响,应变变化波动较大,为排除安装初期应力调整对测试结果的影响,选取应变变化趋于稳定后的主应力增量值。

3.1 水力压裂前后钻孔周围应力状态变化

在还没有受到工作面采动影响的位置,对水力压裂前后钻孔下方煤层中的应力变化进行了监测。具体位置是在 2 号测站 2C 孔上方布置压裂钻孔,压裂时该孔距工作面 75 m。2D,2E 及 2F 钻孔分别距工

作面 80,85 及 90 m(图 3)。主应力增量监测结果如图 4 所示,主应力增量倾角和方位角变化如图 5 所示,图中极径表示测点距工作面距离(单位:m),极角表示主应力增量倾角或方位角的变化(单位:(°))。

从图 4,5 可看出:

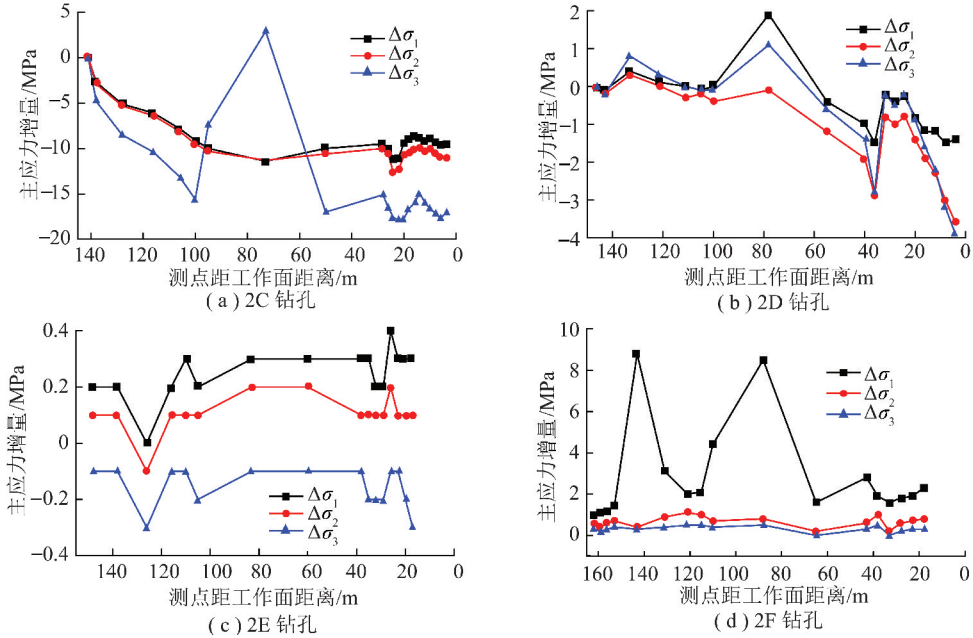


图 4 2 号测站主应力增量变化监测曲线

Fig. 4 Monitoring curves of principal stress increment variation at No. 2 station

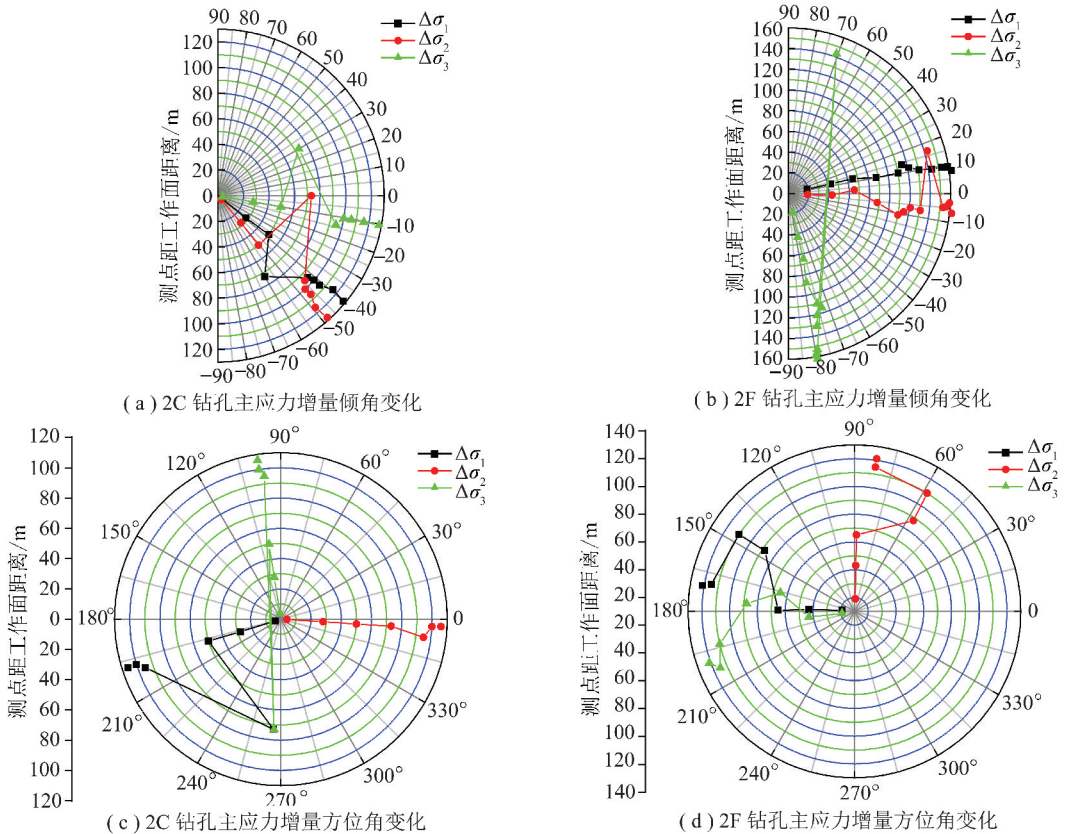


图 5 2 号测站主应力增量倾角与方位角变化

Fig. 5 Variation of principal stress increment inclination and azimuth at No. 2 station

(1) 在压裂过程中,各钻孔测得的主应力增量数值与方向均出现突变现象。此外,2D,2E及2F孔分别在距离工作面135,128和145 m处监测到邻近压裂作业对主应力增量的显著影响。表明水力压裂可使煤体应力大小与方向发生显著变化。

(2) 在水力压裂过程中,由于压裂孔与各监测钻孔相对位置不同,各个钻孔测得的主应力增量突变形式不尽相同。

(3) 监测孔在压裂孔的正下方时(2C孔),近似水平的主应力增量 $\Delta\sigma_3$ 发生了突变,其中应力值增加近20 MPa(图4(a)),倾角变化 40° (图5(a)),方位角变化 170° (图5(c));其它两个主应力增量 $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2$ 数值上有所降低,但变化不大,倾角分别变化 $20^\circ, 50^\circ$,方位角变化 $72^\circ, 5^\circ$ 。可见,在压裂过程中,产生了近似垂直的裂缝,由于水压的作用,使得垂直于裂缝方向的水平应力显著增加。当压裂作业结束后, $\Delta\sigma_3$ 得到恢复,却低于压裂前的水平, $\Delta\sigma_3$ 比压裂前降低9%。各个主应力增量的倾角与方位角基本都恢复到压裂前的角度。

(4) 监测孔在压裂孔的斜下方时(2D孔),在压裂位置(距工作面80 m),3个主应力增量均出现突变现象,但增加量不超过2 MPa(图4(b)),远低于2C孔。其中,倾角比较小的 $\Delta\sigma_1$ 增加较大,说明压裂形成的近垂直裂缝对水平应力影响较大。3个主应力增量倾角分别变化 $40^\circ, 32^\circ$ 及 115° ,方位角变化 $132^\circ, 28^\circ$ 及 150° , $\Delta\sigma_3$ 方向变化剧烈。压裂结束后,3个主应力增量得到恢复,但明显低于压裂前的水平。同2C孔一样,各个主应力增量的倾角与方位角基本都恢复到压裂前的角度。在距离工作面135 m处,3个主应力增量都出现了较小幅度的增加,是邻近压裂作业所致,但影响程度不大。

(5) 监测孔距离压裂孔更远时(2E孔),在压裂位置(距工作面85 m),没有出现明显的应力变化(图4(c))。在距工作面128 m处,3个主应力增量均有所减小,但降低幅度不超过0.3 MPa,这可能由邻近压裂作业引起。3个主应力增量倾角变化不超过 20° ,方位角变化不超过 40° ,变化量都不大。可见,水力压裂对该测孔影响不大。

(6) 监测孔距离压裂孔最远时(2F孔),在压裂位置(距工作面90 m),近似水平方向的主应力增量 $\Delta\sigma_1$ 发生突变,应力值增加8.5 MPa(图4(d)),倾角变化不明显(图5(b)),方位角变化 32° (图5(d));其它两个主应力增量 $\Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3$ 数值上变化不大,倾角变化也不大,方位角变化在 30° 左右。 $\Delta\sigma_1$ 的显著增加同样是近似垂直裂缝中水压作用的

结果。压裂结束后, $\Delta\sigma_1$ 得到恢复,且比压裂前小,另外两个主应力增量也有所降低。该测孔在距离工作面145 m的位置 $\Delta\sigma_1$ 出现了类似90 m处的突变,而且 $\Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3$ 的倾角发生了 $25^\circ, 150^\circ$ 的变化。主要原因是受到邻近压裂作业的影响,而且距压裂孔比较近。

(7) 工作面坚硬顶板经压裂后,随着工作面逐渐接近测点,煤层应力出现“升高—降低—再升高—再降低”的变化趋势,但变化幅度较小,特别是2C,2F测孔,采动影响期间的应力变化幅度远小于压裂引起的应力变化。表明坚硬岩石水力压裂后,内部出现不同程度的裂缝,整体性受到破坏,从而降低了支承压力在工作面前方煤体中的显现程度。

3.2 随工作面推进煤体应力状态变化

图6为1号测站主应力增量随工作面推进的变化规律。主应力增量倾角和方位角随工作面的变化如图7所示。在1号测站安装之前,已对该测站上方顶板完成了压裂作业。从图6,7可看出以下几点:

(1) 2C测孔在距工作面20 m以外主应力增量变化不大,在20 m位置, $\Delta\sigma_1$ 突然增大约20 MPa(图6(a)),倾角也从近水平方向转向近垂直方向(图7(a)),之后又迅速降低到原来的值,但倾角变化不大。方位角发生了多次剧烈的变化(图7(c))。 $\Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3$ 数值在距工作面20~10 m的范围内变化不大,但倾角变化明显,如 $\Delta\sigma_2$ 由近垂直方向变为近水平方向, $\Delta\sigma_3$ 的倾角变化也达到 45° 。同时,方位角变化也很大。出现这种现象的原因可能有两方面:一是该测点正好位于煤层的夹矸中(图1,煤层含有一层泥岩夹矸),夹矸的硬度明显大于煤层,导致受到采动影响后出现了应力异常;二是该测点位于裂缝尖端附近,受到采动应力作用后,应力变化出现异常。在距工作面10 m范围内, $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2$ 先有所增加,之后又随着工作面接近不断降低, $\Delta\sigma_3$ 则不断降低。

(2) 2D测孔在距工作面65~40 m范围内,各主应力增量均出现了波动,但总的趋势是不断降低(图6(b)),降低幅度最大为1.1 MPa。距工作面40~30 m范围内主应力增量非常稳定。之后,随着工作面推进, $\Delta\sigma_1$ 有所增加,但幅度很小;近似垂直的 $\Delta\sigma_2$ 先降低后增加,增加幅度为0.6 MPa;近似水平的 $\Delta\sigma_3$ 先降低后增加,又降低,变化幅度为0.5 MPa。可见,受采动影响后,垂直应力增加比较快。3个主应力增量的倾角与方位角几乎没有发生变化。表明顶板经过压裂后,回采动压对煤层主应力增量倾角和方位角的影响较小。

(3) 2E测孔在距工作面30 m外,各主应力增量变化不大(图6(c))。距工作面30 m以内,近水平的

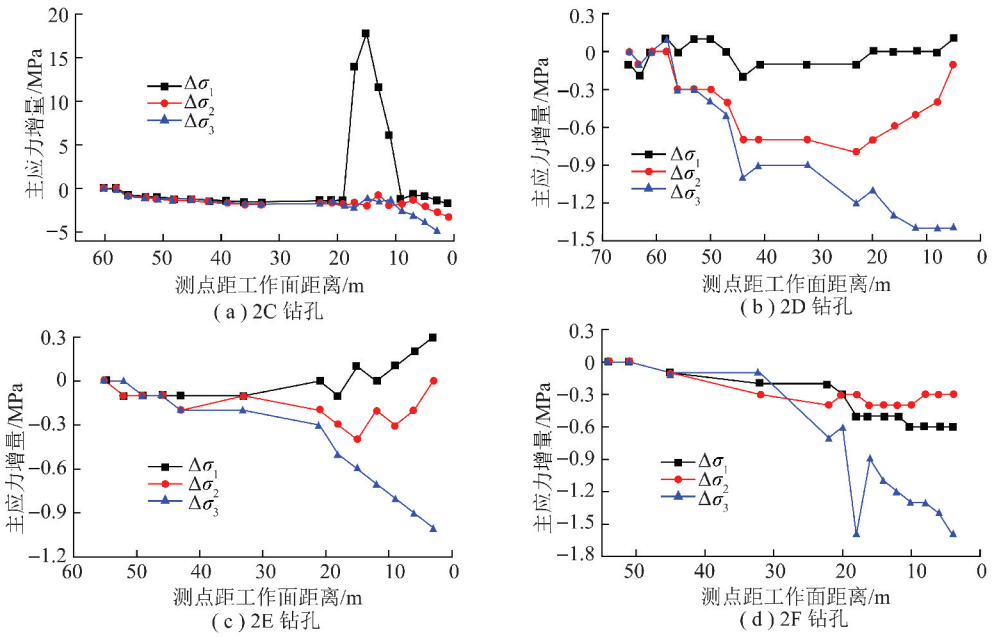


图 6 1 号测站主应力增量变化监测曲线

Fig. 6 Monitoring curves of principal stress increment variation at No. 1 station

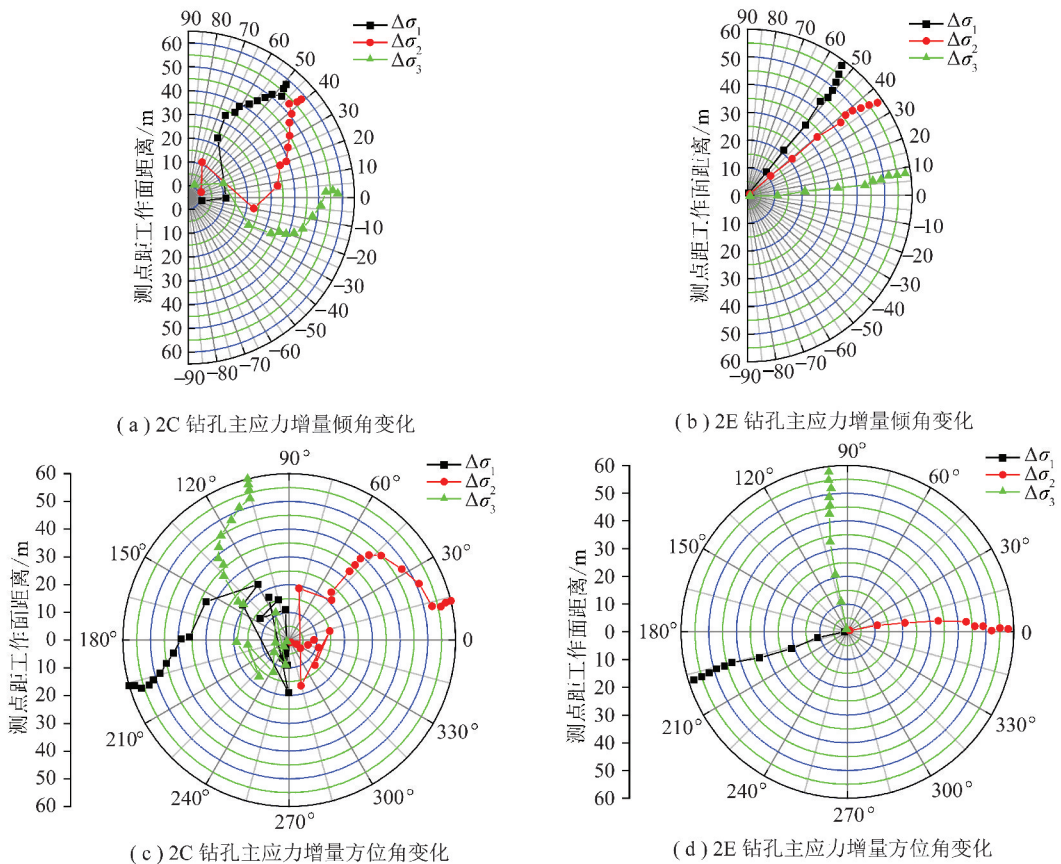


图 7 1 号测站主应力增量倾角与方位角变化

Fig. 7 Variation of principal stress increment inclination and azimuth at No. 1 station

$\Delta\sigma_3$ 随着工作面接近不断降低,降低幅度为 0.8 MPa; $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2$ 出现波动,但总体上为增大,增加幅度为 0.4 MPa。3 个主应力增量的倾角与方位角有所变化,但幅度不大(图 7(b),(d))。

(4) 2F 测孔在距工作面 30 m 外,各主应力增量变化也很小(图 6(d))。距工作面 30 m 以内,近似垂直的 $\Delta\sigma_2$ 出现波动,但总体变化不大;近似水平的 $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_3$ 也出现波动,但总体上为降低,其中 $\Delta\sigma_3$ 降

幅达到 1.5 MPa。3 个主应力增量的倾角与方位角同样也变化不大。

可见,随着工作面推进,煤层中垂直应力增加,水平应力有降低的趋势,但除个别测点外,变化幅度不大。由此可知,坚硬顶板经过压裂后,顶板来压强度降低,工作面超前支承压力的影响减弱。

此外,统计王台铺煤矿 15 号煤层没有采取水力压裂的综采工作面,顶板周期来压步距约为 10 ~ 15 m,而实施了水力压裂的 XV1306 工作面顶板,能够随工作面的推进及时垮落,周期来压现象不明显。这也充分说明了水力压裂具有较好的效果。

3 号测站的监测结果与 1 号测站类似,不再赘述。

4 结 论

(1)在水力压裂前后,由于受水压与裂缝扩展的影响,在压裂钻孔附近煤层中的主应力增量值、倾角和方位角一般均会出现突变。主应力增量变化程度与至压裂孔的距离、水压、裂缝扩展方式及煤层力学性质有关。压裂结束后,主应力增量得到恢复,但与压裂前相比,主应力增量均有下降趋势,水力压裂可改变煤层的应力状态。

(2)坚硬顶板压裂后,随着工作面推进,煤层中垂直应力增加,水平应力有降低的趋势,但采动影响期间的应力变化幅度远小于压裂引起的应力变化。表明水力压裂使得顶板来压强度降低,工作面超前支承压力的影响减弱。回采工作面动压对主应力增量的倾角和方位角的影响不大。

(3)王台铺煤矿 XV1306 综采工作面顶板实施水力压裂后,坚硬顶板的整体性和强度得到了一定程度的弱化,周期来压变得不明显,顶板能够紧随工作面推进及时垮落,说明水力压裂具有较好的控制坚硬顶板的效果。

参考文献:

[1] 陈炎光,钱鸣高. 中国煤矿采场围岩控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1994:137-143.

[2] 史元伟,宁宇,魏景云. 采煤工作面围岩控制原理和技术(下)[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003:108-125.

[3] 孙守山,宁宇,葛钧. 波兰煤矿坚硬顶板定向水力压裂技术[J]. 煤炭科学技术,1999,27(2):51-52.

Sun Shoushan, Ning Yu, Ge Jun. The technology of hard roof directional hydraulic fracturing in Poland[J]. Coal Science and Technol-

ogy, 1999, 27(2):51-52.

- [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.
- Feng Yanjun, Kang Hongpu. Test on hard and stable roof control by means of directional hydraulic fracturing in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6):1148-1155.
- [5] Fan J, Dou L, He H, et al. Directional hydraulic fracturing to control hard-roof rockburst in coal mines[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(2):177-181.
- [6] 黄炳香. 煤岩体水力致裂弱化的理论与应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2009.
- [7] Matsui K, Shimada H, Anwar H Z. Acceleration of massive roof caving in a longwall gob using a hydraulic fracturing[A]. Proceedings of the 4th International Symposium on Mining Science and Technology[C]. Beijing, 1999:43-46.
- [8] 闫少宏,宁宇,康立军,等. 用水力压裂处理坚硬顶板的机理及实验研究[J]. 煤炭学报,2000,25(1):32-35.
- Yan Shaohong, Ning Yu, Kang Lijun, et al. The mechanism of hydrobreakage to control hard roof and its test study[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1):32-35.
- [9] 邓广哲,王世斌,黄炳香. 煤岩水压裂缝扩展行为特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(20):3489-3493.
- Deng Guangzhe, Wang Shibin, Huang Bingxiang. Research on behavior character of crack development induced by hydraulic fracturing in coal-rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20):3489-3493.
- [10] Amadei B, Stephansson O. Rock stress and its measurement[M]. London: Chapman & Hall, 1997:361-385.
- [11] Walton R J, Worotnicki G. A comparison of three borehole instruments for monitoring the change of rock stress with time[A]. Proceedings of the International Symposium on Rock Stress and Rock Stress Measurements[C]. Stockholm, 1986:479-488.
- [12] Franklin J. Suggested methods for pressure monitoring using hydraulic cells[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1980, 17:117-127.
- [13] 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.
- Liu Ning, Zhang Chunsheng, Chen Xiangrong, et al. Monitoring and characteristics study of stress evolution of surrounding rock during deep tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9):1729-1737.
- [14] 倪兴华. 地应力研究与应用[M]. 北京:煤炭工业出版社,2007:52-129.
- [15] 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.
- [16] Sheorey P R, Murali Mohan G, Sinha A. Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38:1211-1216.