

采动影响下煤矿顶板岩层三维应力变化规律研究

曹怀轩

(兖州煤业股份有限公司 东滩煤矿, 山东 邹城 273500)

摘要: 煤矿采动过程中三维应力重新分布,冲击地压等灾害的发生与应力集中密切相关。为了研究开采过程中煤层顶板三维应力的变化规律,采用光纤光栅三维应力传感器,首先测量了原岩应力,随后构建了采场围岩三维应力在线监测系统,监测得到了工作面推进过程中的顶板岩层三维应力。结果表明:监测断面处,原岩应力主要受构造作用影响;随着工作面的推进,前方上覆岩层三个方向正应力均不断增加,且垂直方向正应力变化大于水平方向正应力;采动影响范围为工作面前方120 m左右,急剧影响范围为工作面前方50 m左右,应力峰值位置在工作面前方18 m内;垂直方向正应力在应力峰值处增加了约147%,其变化规律与传统矿山压力理论较为吻合。

关键词: 岩层;应力;监测;冲击地压

中图分类号: TD323

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)04—0112—05

Three – dimensional Stress Variation of Rock due to Coal Mining

CAO Huaixuan

(Dongtan Coal Mine, Yanzhou Coal Mining Company Limited, Zoucheng, Shandong 273500, China)

Abstract: The three-dimensional stress redistribution in coal mining process and the occurrence of rockburst and other disasters are closely related to stress concentration. In order to analyze the variation of three-dimensional stress in coal seam roof during mining, field monitoring test was carried out. In the field test, three-dimensional stress sensor based on fiber Bragg grating was adopted. Firstly, the original rock stress was measured. Then, the three-dimensional stress of rock on-line monitoring system was constructed, and the three-dimensional stress of roof strata in the process of mining was monitored. The results show that the original rock stress is mainly affected by tectonism in the monitoring sections. With the advancing of working face, the normal stress in three directions in overlying strata increases continuously. The change of the normal stress in the vertical direction is greater than that in the horizontal direction. The mining influence scope is about 120 meters in front of the working face, the rapid influence scope is about 50 meters in front of the working face. The stress peak position is within 18 meters in front of the working face. The vertical normal stress increases by about 147% at the stress peak position, and its variation law is in good agreement with the traditional theory of mine pressure.

Keywords: rock; stress; monitoring; rockburst

随着煤矿开采深度与强度的不断增加,采场地质条件越来越复杂,冲击地压等动力灾害日益加剧,严重威胁着井下人员及设备的安全,对冲击地压进行监控与防治已成为亟待解决的科学与工程难题^[1-3]。煤层开采前,采场煤岩体在自重应力及构造应力的作用下处于平衡状态,煤层开采活动导致煤岩体内部应力集中,能量不断积聚,当应力达到煤

岩体强度时,储存在煤岩体中的能量突然释放诱发冲击地压灾害。由此可见,冲击地压问题本质上就是煤岩体应力问题^[4]。因此,冲击地压灾害的监控,实质上就是监测煤岩体应力并进行及时调控,以保证应力不超过对应的强度。所以,准确监测煤岩体三维应力对预测与防控冲击地压具有重要意义。

目前,针对煤岩体应力场监测的主要手段有矿

压观测^[5-9]、微震监测^[10-12]、钻屑法^[13-15]、煤层应力监测^[16-18]等。其中,矿压观测、微震、钻屑法等只能间接分析煤岩体应力状态,无法直接测量煤岩体应力。煤层应力监测方法可以直接观测煤层应力,但由于煤体比较松软仅能监测煤体相对(采动)应力和其变化趋势,无法实施监测煤体的绝对(真实)应力。由于缺少能够长期监测围岩三维应力的传感器,针对岩层三维应力的在线实时监测尚属空白。鉴于此,本文开展了煤炭开采过程中顶板岩层三维应力的现场监测试验,以期冲击地压的监控与预警提供支撑。本研究采用光纤光栅三维应力传感器,解决了传统应力计无法长期监测岩层应力的难题。首先,在东滩煤矿6305工作面顶板岩层实施了原岩应力测试;接着,构建了采场围岩三维应力在线监测系统,实现了顶板岩层三维真实应力的实时在线监测;最后,利用监测系统,分析得到了工作面推进过程中顶板岩层三维应力的变化规律。本文成果对研究采动影响下顶板岩层断裂及冲击地压发生机理等具有重要意义。

1 监测方法

1.1 监测原理

根据岩体力学理论,工作面岩体三维应力由两部分组成,一部分是岩体的原岩应力 σ_{ij}^0 ,它是由长期地质作用引起的,在煤体开采前已赋存于岩层中,受埋深、构造、岩层分布等因素影响,对于一个特定位置而言,其大小是固定不变的;第二部分是由于开采活动影响引起的扰动应力或采动应力 $\Delta\sigma_{ij}$,受开采方法、开采速率、工作面大小等因素影响,其大小及方向均随采动活动而变化。因此,采场围岩三维真实(绝对)应力为两部分之和,即:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \Delta\sigma_{ij} \quad (1)$$

岩体的破坏与岩体内三维真实应力相关,当岩体内三维真实应力达到岩体强度时,岩体即会发生失衡破坏。由式(1)可以发现,岩体三维真实应力的监测分两步完成。首先,进行原岩应力测试,原岩应力的测试方法主要有水压致裂法、钻孔应力解除法、应力恢复法等。然后,进行围岩三维扰动应力的监测,由于其随采动活动而不断变化,扰动应力的监测是长期监测。

1.2 监测传感器

1.2.1 应力测量原理

在一无限大的弹性岩体中,施工一个钻孔,当钻孔受到无穷远处的三维应力场作用时,由地应力测量理论^[19]可知,钻孔周边围岩应力与岩体三维应力

具有对应关系。因此,可以通过测量钻孔周边围岩应力(变)来求得岩体三维应力。

如图1所示,建立直角坐标系及孔边柱坐标系。假定岩石为弹性介质,根据弹性力学原理,柱坐标系下钻孔孔周应力与直角坐标系下岩体三维应力间的关系如下:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \tau_{xy} \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \tau_{xy} \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \quad (3)$$

$$\sigma'_z = -\nu \left[2(\sigma_x - \sigma_y) \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta + 4\tau_{xy} \frac{a^2}{r^2} \sin 2\theta \right] + \sigma_z \quad (4)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta + \tau_{xy} \left(1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (5)$$

$$\tau_{\theta z} = (-\tau_{zx} \sin \theta + \tau_{yz} \cos \theta) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \quad (6)$$

$$\tau_{zr} = (\tau_{zx} \cos \theta + \tau_{yz} \sin \theta) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \quad (7)$$

式中: σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 分别为直角坐标系下岩体三维应力; σ_r 、 σ_θ 、 σ'_z 、 $\tau_{r\theta}$ 、 $\tau_{\theta z}$ 、 τ_{zr} 分别为柱坐标系下钻孔孔壁周围应力。

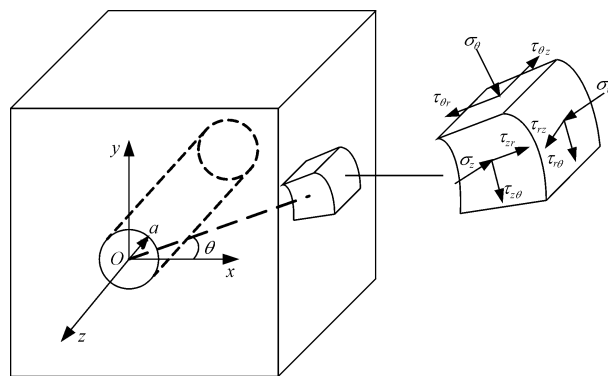


图1 钻孔围岩三维应力分布状态图

1.2.2 光纤光栅三维应力传感器

目前,测量钻孔周边应力(变)主要采用孔径变形计与空心包体传感器两种。但由于两者均采用了电阻应变片作为传感元件,其易受井下强电磁场干扰且长期稳定性不佳,因此无法进行扰动应力的长期准确监测。鉴于此,采用中国科学院武汉岩土力

学研究所研发的光纤光栅三维应力传感器,进行原岩应力的测量与扰动应力的长期监测。

光纤光栅三维应力传感器采用光纤布拉格光栅作为测量元件,具有较强的抗干扰能力和良好的长期稳定性。当入射光经达光纤布拉格光栅时,满足布拉格条件的光波反射回入射端,其余光波透射^[20]。温度变化或者应变变化均会引起反射光中心波长的变化。在实际测量中,即是通过反射光中心波长的变化来计算温度变化或者应变变化。

一般情况下,温度变化值和由外力引起的应变变化值均与反射光中心波长变化值呈线性关系。因此,当光栅所在位置发生变形后,可通过光栅中心波长变化值计算其所在位置处的应力(变)。

在测量原岩应力时,通常采用钻孔应力解除法,采用光纤光栅三维应力传感器,主体部分的壳体为圆柱状空心筒,为内径 34 mm、外径 36 mm 的空心弹性钢圆筒,在规定位置嵌埋光纤光栅传感器。首先将光纤光栅三维应力传感器安置在直径为 38 mm ~ 39 mm 的小孔内,然后采用直径为 127 mm 的取芯钻头将岩芯解除,重分布应力影响范围为 3 倍直径,因此,解除直径大于 3 倍传感器直径即可。由于解除过程中钻孔外围原岩应力释放,传感器所在位置的应力(变)也随之减小至零。通过传感器监测到的应力(变)变化即可求得钻孔所在位置处的原岩应力。

扰动应力的监测原理相同,当传感器长期安装在钻孔内时,受采动影响,钻孔外围岩体三维应力会发生变化,传感器所在位置处的应力也随之变化。通过传感器所在位置处的应力变化即可以求得围岩扰动应力的变化。由于扰动应力不断变化,所以扰动应力需长期监测。

1.3 监测断面及系统

试验地点选择在东滩煤矿 6305 工作面。东滩煤矿是兖州煤业股份有限公司的骨干矿井之一,设计年产 750 万 t。围岩应力状态是多因素综合影响的结果,地质条件影响原岩应力的分布及大小。6305 工作面煤层平均厚度约为 5.0 m,面长约为 250 m,推进长度约为 1 500 m,埋深约为 660 m,顶板主要为砂岩。6305 轨道顺槽一侧为工作面,另一侧临近采空区。由于采空区一侧应力集中程度较高,故将监测断面布置在 6305 轨道顺槽内。

在 6305 轨道顺槽内,布置 3 个监测断面 I、II、III,其分别距离开切眼 800 m、900 m、1 000 m。在每个监测断面处,分别施工一个监测钻孔,如图 2 所示。

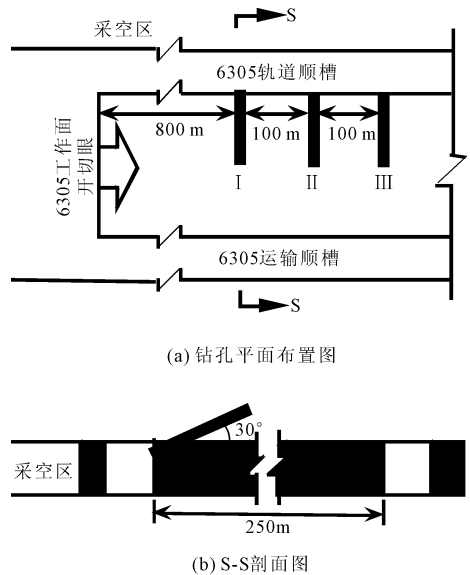


图 2 监测断面钻孔布置图

原岩应力测试过程如下:

- (1) 在顺槽内斜向上方施工内径为 130 mm 钻孔,钻孔开孔高度为 3 m 左右,水平投影垂直于巷帮,上倾斜角取 30°,深度取 13 m 以上。
- (2) 在上述大孔底部施工内径为 38 mm ~ 40 mm 的小钻孔,钻孔深度取 30 cm ~ 40 cm。
- (3) 用清水冲洗小孔,然后将光纤光栅三维应力传感器安装在小钻孔中,并确保其与孔壁粘结牢固。
- (4) 采用外径为 127 mm 的取芯钻头将小钻孔进行解除,在解除过程中连续读取各光栅的波长变化。
- (5) 将内含传感器的岩芯取出,并放置在双轴试验系统中,测试岩芯的弹性模量与泊松比。
- (6) 根据第(4)步中不同方位光栅中心波长的变化量及岩芯的弹性模量及泊松比,计算得到传感器所在位置处的原岩应力。

真实应力的监测过程如下:

- (7) 将上述钻孔的孔底磨平,然后继续向前施工内径为 38 mm ~ 40 mm 的小钻孔,钻孔深度取 30 cm ~ 40 cm。
- (8) 用清水冲洗小孔,然后再次将光纤光栅三维应力传感器安装在小钻孔中,并确保其与孔壁粘结牢固。
- (9) 如图 3 所示,将传感器通过光缆与光纤解调分析仪连接,并通过井下局域网将数据传输至井上监控室。
- (10) 在监测室系统软件中,对监测数据进行处

理分析,得到实时扰动应力大小,然后再将扰动应力与原岩应力相加,得到顶板岩层实时真实应力。

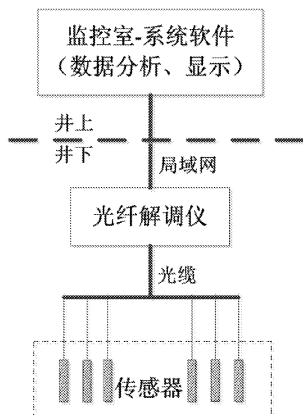


图 3 三维应力在线监测系统示意图

2 监测结果

2.1 原岩应力

在每个监测断面,均测量了原岩应力,3 组原岩应力结果基本相同。因此,选取 3 组原岩应力的平均值作为监测断面处的原岩应力值。

以 6305 工作面为基础,建立如图 4 所示的局部坐标系,其中 z 方向为垂直方向, x 方向为回采方向,与顺槽方向平行, y 方向平行于工作面。在局部坐标系中,原岩应力如表 1 所示。从表中可以看出,监测断面处水平应力较大, x 、 y 两水平方向的侧压力系数分别约 0.66 和 1.47。

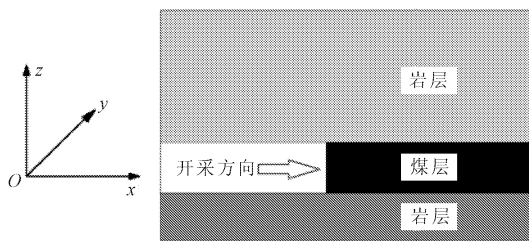


图 4 局部坐标系

表 1 局部坐标系下原岩应力分量 单位:MPa

σ_{xx}	σ_{yy}	σ_{zz}	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
13.35	29.82	20.32	0.09	-0.45	2.73

注:正应力以压为正。

运用坐标转换,将局部坐标系下的应力转换至主应力空间,得到如表 2 所示的主应力大小及方向。从表中可以看出,最大主应力为 29.84 MPa,接近水平方向;其余两个主应力与水平面均有一定夹角。由此可以看出,监测位置处受构造作用明显。

表 2 主应力坐标系下的原岩应力分量

主应力	应力值/MPa	方位角/(°)	倾角/(°)
σ_1	29.84	-10.15	-2.75
σ_2	21.24	71.95	70.71
σ_3	12.41	80.81	-19.07

注:方位角北起顺时针为正,倾角从水平面向上为正。

2.2 真实应力

为了便于工程应用,在局部坐标系下分析顶板岩层三维应力随工作面推进的变化规律,得到图 5。图 5 为监测断面 I 处真实应力在采动影响下的变化曲线。从图 5 可以看出,当工作面推进至距监测断面约 120 m 左右时,采动应力开始显现,顶板岩层三个方向正应力均开始缓慢增加;当工作面距监测断面 50 m 左右时,顶板岩层三维应力增长速度加快,说明此时采动影响加剧;当工作面距监测断面 15 m ~ 18 m 时, x 方向与 z 方向正应力达到峰值, x 方向正应力约为 20.39 MPa,增加了约 53%, y 方向正应力约为 36.98 MPa,增加了约 24%,垂直方向正应力约为 50.17 MPa,增加了约 147%。

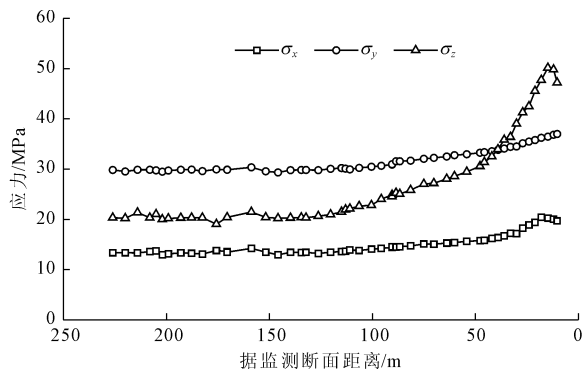


图 5 采动影响下顶板岩层三维应力变化曲线

采动影响下,前方上覆岩层的压力逐渐转移至顶板岩层上,顶板岩层三个方向正应力均不断增加,且垂直方向正应力增加程度明显大于两水平方向。当工作面推进至距离监测断面约 37 m 处时, z 方向正应力的大小超过 y 方向正应力,说明垂直方向正应力开始占据主导地位。

钱鸣高等^[5]提出了“砌体梁”理论,宋振骥院士^[6]提出了“传递岩梁”理论,都从不同角度对开采过程中矿山压力的变化进行了论述,指导了安全生产。从曲线中可以看出,垂直方向正应力的变化曲线与经典压力理论基本吻合,验证并发展了传统矿压理论。

监测断面 II、III 处的监测结果与监测断面 I 处类似,故不再赘述。

由强度理论可知,当煤岩体三维应力超过其极

限强度时,即达到冲击地压发生的应力条件,就会诱发冲击地压灾害。因此,监测煤岩体真实应力有助于实现冲击地压的有效预警。以莫尔-库仑强度准则为例,有:

$$\sigma_1^c = \frac{\sigma_3(1 + \sin\varphi) + 2c\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (8)$$

式中: σ_1^c 为临界最大主应力; σ_3 为最小主应力; c 为岩石黏聚力; φ 为岩石内摩擦角。通过本文提出的顶板岩层三维应力的监测方法,可以得到围岩真实应力,将最小主应力 σ_3 和岩石黏聚力 c 及内摩擦角 φ 代入式(2),即可得到临界最大主应力 σ_1^c 。将监测得到的最大主应力 σ_1 与临界最大主应力 σ_1^c 进行对比,根据两者比值,即可进行冲击地压的监测预警。针对基于煤岩体真实应力的冲击地压监测预警,本文进行了简单分析,尚需进一步深入研究和验证。

3 结 论

(1) 东滩煤矿 6305 工作面监测断面处原岩应力三个主应力分量分别为 29.84 MPa、21.24 MPa、12.41 MPa,其中最大主应力接近水平方向,其余两个主应力与水平及竖直面均有一定夹角,监测断面处顶板岩层应力主要受构造作用影响。

(2) 采动影响范围为工作面前方 120 m 左右,采动急剧影响范围为工作面前方 50 m 左右,应力峰值位置在工作面前方 18 m 内。

(3) 随着工作面向前推进,顶板岩层三个方向正应力均不断增加,其中垂直方向正应力增加幅度明显大于两水平方向;当工作面距监测断面 15 m ~ 18 m 时,顶板岩层应力达到峰值,两水平方向正应力分别增长约 53%、24%,垂直方向正应力增长接近 150%。随着工作面的继续推进,顶板岩层应力开始迅速下降。顶板岩层垂直方向正应力的变化与传统矿山压力理论较为吻合。

参考文献:

[1] 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.
 [2] 姜福兴,姚顺利,魏全德,等.矿震诱发型冲击地压临场预警机制及应用研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3372-3380.
 [3] 何学秋.中国煤矿灾害防治理论与技术[M].徐州:中

国矿业大学出版社,2006.

[4] 齐庆新,李晓璐,赵善坤.煤矿冲击地压应力控制理论与实践[J].煤炭科学技术,2013,41(6):1-5.
 [5] 钱鸣高,石平五,许家林.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学,2010.
 [6] 宋振骥.实用矿山压力控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,1988.
 [7] 王路军,朱卫兵,许家林,等.浅埋深极近距离煤层工作面矿压显现规律研究[J].煤炭科学技术,2013,41(3):47-50.
 [8] 陈锦涛,韩爱果,任光明.基于应力监测的软岩隧道支护结构稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(1):178-182.
 [9] 赵文忠,侯哲生,王丙兴,等.基于现场围岩压力监测的黄岩子隧道衬砌结构安全性评价[J].水利与建筑工程学报,2015,13(2):24-27.
 [10] 姜福兴,苗小虎,王存文,等.构造控制型冲击地压的微地震监测预警研究与实践[J].煤炭学报,2010,35(6):900-903.
 [11] 窦林名,李振雷,张敏.煤矿冲击地压灾害监测预警技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(7):41-46.
 [12] 李楠,王恩元,GE Maochen.微震监测技术及其在煤矿的应用现状与展望[J].煤炭学报,2017,42(S1):83-96.
 [13] 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.
 [14] 邓小林.东滩煤矿钻屑法检测冲击地压危险的认识[J].煤矿现代化,2006(1):27-29.
 [15] 刘金海.煤矿冲击地压监测预警技术新进展[J].煤炭科学技术,2016,44(6):71-77.
 [16] 姜福兴,曲效成,王颜亮,等.基于云计算的煤矿冲击地压监控预警技术研究[J].煤炭科学技术,2018,46(1):199-206,244.
 [17] 桂兵,张广文,张士斌,等.冲击地压实时监测预警技术及其应用[J].煤炭科学技术,2010,38(8):22-24,29.
 [18] 韩刚,李旭东,曲晓成,等.采场覆岩空间破裂与采动应力场分布关联性研究[J].煤炭科学技术,2019,47(2):53-58.
 [19] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
 [20] 赵勇.光纤光栅及其传感技术[M].北京:国防工业出版社,2007.