

文章编号: 1673-3363-(2013)06-0799-06

条带煤柱长期承载能力实测研究

王春秋¹, 高立群¹, 陈绍杰^{1,2}, 王海龙¹, 刘江波¹

(1. 山东科技大学矿山灾害预防控制国家重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要 为研究条带煤柱的长期承载能力, 对岱庄煤矿某条带煤柱进行长期观测。建立符合岱庄煤矿条带开采工程实际的条带煤柱稳定状态结构模型, 确定煤柱受力与压力计读数的关系, 采用钻孔压力计和自动监测系统对某条带煤柱进行长期观测。监测表明: 煤柱边缘侧最易破坏, 距煤柱边缘 1, 2, 3 m 部位的实际最大承载能力分别为 6.31, 6.96, 9.76 MPa, 距边缘 5 m 处煤体实际承载能力大于 11.90 MPa; 观测末期煤柱最大承载部位距离煤柱边缘 6~8 m, 70 m 煤柱中部宽约 54 m 的范围内承载力稍小。监测周期内整个煤柱承载呈现出典型的马鞍形, 煤柱是稳定的。

关键词 钻孔压力计; 条带煤柱; 结构模型; 长期实测; 承载能力

中图分类号 TD 315

文献标志码 A

Field research on long-term bearing capacity of strip pillar

WANG Chun-qiu¹, GAO Li-qun¹, CHEN Shao-jie^{1,2}, WANG Hai-long¹, LIU Jiang-bo¹

(1. State Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract In order to study the long-term bearing capacity of strip pillar, a strip pillar of Daizhuang coal mine is monitored. A strip pillar stability state structure model is established according with the engineering practice of Daizhuang coal mine, and the relationship between the stress of pillar and manometer reading is determined. The strip pillar is monitored with drilling pressure meter and automatic monitoring system for a long time. Monitoring results show that the edge of pillar can be destroyed easily, and the actual maximum bearing capacity of the part which is 1, 2, 3 m away from the edge is respectively 6.31, 6.96, 9.76 MPa; the actual bearing capacity at the part which is 5 m away from the edge is greater than 11.90 MPa. In the end of field research, the maximum bearing part is 6~8 m away from the edge of strip pillar, and the bearing capacity of the central part of the 70 m-width pillar is smaller. The bearing shape of whole pillar presents as typical saddle during the whole period of the research, which indicates the pillar can keep stable for a long time.

Key words drilling manometer; strip pillar; structure model; long-term field research; bearing capacity

收稿日期: 2012-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51104094); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-13-0880); 教育部博士学科点专项科研基金项目(20103718110001); 山东省自然科学基金重点项目(ZR2013EEZ001); 中国博士后科学基金项目(2013T60763); 山东科技大学科研创新团队支持计划项目(2010KYTD106)

作者简介: 王春秋(1962-), 男, 山东省临朐县人, 教授, 博士, 从事矿山岩石力学方面的研究。

通信作者: 陈绍杰

E-mail: csjwyb@163.com

Tel: 0532-86057948

条带开采仍然是目前矿区建筑物下煤炭开采的主要方法之一,煤柱的强度和承载能力是其能否支撑覆岩、保护建筑物的关键。D. Bunting^[1]在 1911 年通过测试不同尺度和形状的无烟煤试块的强度,提出了历史上第一个煤柱强度经验公式;F. L. Gaddy^[2]测试不同尺度煤块强度后,提出试块强度随尺寸增加而减小的关系,并首先提出考虑实验室测试值的煤柱强度计算公式;Iannacchione Anthony 等^[3]实测煤柱应力后评价了多个煤柱强度理论;M. D. G. Salamon^[4]调查大量南非煤柱后,总结出成功的煤柱设计大多采用了“反演”方法,但该方法建立在分析大量失稳煤柱的基础上;J. P. Loui 和 P. R. Sheorey^[5]分析了印度 23 个失稳煤柱和 20 个稳定煤柱实例,提出了一个适用于不同宽高比的煤柱强度公式。在我国,邢安仕^[6]监测了峰峰二矿工广野青煤层条带煤柱应力并分析了煤柱应力分布和变化规律;吴立新^[7]对重复条采时上层煤柱应力变化及其稳定性进行了试验研究;熊化云^[8]在韩桥煤矿观测了建筑群下多煤层条带煤柱的受力情况;姜学云和杜计平^[9]观测了沛城煤矿东二采区条带煤柱状态;卫建清^[10]观测了房采煤柱的变形规律和应力分布情况;朱建明^[11]基于黏性材料的 SMP 破坏准则分析了煤柱在二维应力状态下的应力问题,推导了煤柱极限强度的计算公式;张新荣^[12]把不同宽高比的煤块作为煤柱模型,试验研究了煤柱强度与变形特征;林愉等^[13]研究了模压成型煤柱的压力分布、模压力、成型摩擦力、煤柱强度和煤柱密度的理论表达式;李德海等^[14]以弹塑性力学为基础推导了保留条带煤柱的应力极限平衡区宽度;李宏才等^[15]通过建立力学模型研究了综放工作面回采后,煤柱受到采空区一侧引起的支承压力、巷道一侧的支承压力和上部岩层的压力三重作用下的力学特性;段书武^[16]研究了锚杆加固对提高煤柱稳定性和承载能力的作用;陈绍杰等^[17]采用钻孔压力计与位移监测仪研究了条带煤柱的长期受力变形状态。

一般情况下,条带煤柱具有一定的强度,在留设初期大多能够支撑上覆岩层,但随着时间的推移,有些原本稳定的煤柱会失稳坍塌,引起地表塌陷。另外,条带煤柱及顶板的变形在开采初期快速增加,之后虽然趋于稳定,但较长时间损伤积累后,变形再次快速增加,导致煤柱或顶板失稳破坏。因此,条带煤柱长期的承载能力是能否长期维护矿区

地表构(建)筑物安全的关键。

本文以山东岱庄煤矿条带开采为工程背景,对采动过程中及采动结束后的该矿某条带煤柱内部不同位置的承载能力进行实测研究,避免了考虑多种因素影响煤柱强度和承载能力的复杂性,确定了该条带煤柱不同位置的实际支撑能力,对于分析条带煤柱强度、合理留设煤柱宽度、研究煤柱长期稳定性等具有一定的现实意义。

1 条带开采采场围岩结构模型

根据实用矿山压力理论和采场围岩空间结构模型^[18],在条带开采中采出宽度较小、顶板坚硬时,采空区顶板不垮或仅直接顶垮落而基本顶不垮落,如图 1 所示。

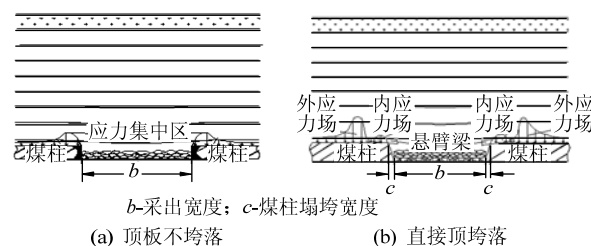


图 1 小采宽条带开采采场围岩结构模型

Fig.1 Country rock structure model of narrow strip mining

根据煤柱边缘是否塌垮,条带开采采场空间结构模型分别形成图 1 中 a, b 所示形式。如果回收条带煤柱两侧的支护系统,并且煤层强度较大,煤柱边缘破坏较轻或者不会破坏,这时整个条带煤柱均能支撑覆岩重量,如图 1a 所示。如果回收了条带煤柱两侧的支护系统,并且煤层强度较小,煤柱边缘一定范围将会塌垮,如图 1b 所示。此时,煤柱边缘塌垮部分不再承载,其上方覆岩的重量也将转移到煤柱中央。

2 条带煤柱长期承载能力实测方法

直接实测条带煤柱的长期承载能力,可以避免考虑其诸多影响因素的复杂性。目前对煤柱的监测方法大多不能对进入采空区的煤柱进行长期监测,或者不是对煤柱自身进行直接监测。

采用钻孔压力计连接数据线对条带煤柱进行长期监测(如图 2),可克服以往监测方法的不足。该监测方法按如下进行: 1) 在条带开采工作面顺槽停采线 150 m 以外区域煤柱侧钻孔,钻孔间隔 1 m,用钻机打 1 排共 n 个钻孔,编号为 1, 2, \dots , n ; 2) 在煤柱上钻孔中安设压力计,每个钻孔压力计可

监测1个部位的压力,不同压力计串联,把压力信号转换成电信号传输到监测分机中;3)将分机采集到的信号通过井下电话线传输到地面监测主机内并转换成压力数据;4)工作面推过安装仪器位置时,特别注意采煤支架不要损坏压力计。

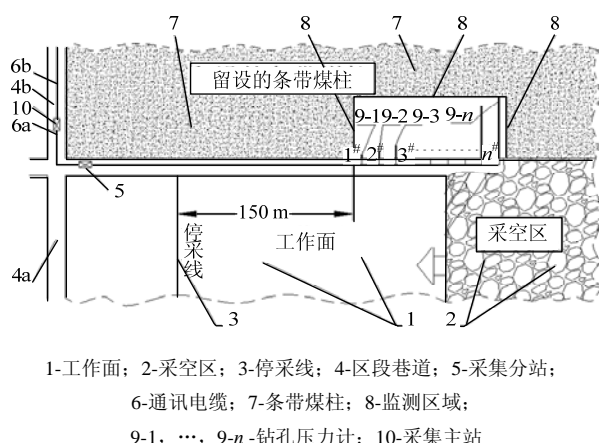


图2 条带煤柱承载能力长期监测系统布置平面图

Fig.2 Plan of the long-term monitoring system for the bearing capacity of strip pillar

使用该方法观测煤柱时,采用仪器自动采集可保证数据准确,数据采集频率高,可分析煤柱受力的细微变化;直接监测煤柱的附加压力,可了解煤柱的真实情况;长期监测采空区内条带煤柱,有助于研究长时间内煤柱状态、正确评估其长期承载能力并进行失稳预测。

3 钻孔压力计的标定与修正

钻孔压力计是监测系统的基本单元和重要工具,煤柱承受采动影响附加应力后,只有在煤柱变形达到一定程度钻孔变形与压力计耦合后压力计才显示附加应力的读数。如果只考察煤柱受力规律,可直接使用压力计的读数;如果分析煤柱受力值或承载能力,需要事先对钻孔压力计进行标定与修正,以确定钻孔压力计受力后读数及其与周围介质受力的关系。

3.1 钻孔压力计标定

所采用的应变片式钻孔压力计在受力后输出变化的电压,根据输出电压设定显示不同压力读数。每个传感器在制作时均标定。不受压力时,调整传感器输出为零。将压力计的受力面放在标定装置间,每级1 MPa加载,调整压力计增益使输出值与理论值相对应。

图3为部分钻孔压力计的标定曲线,压力计的线性度和重复性都较好。

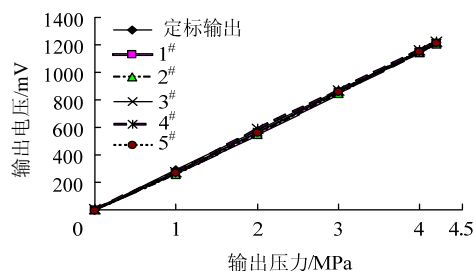


图3 钻孔压力计输出电压-读数曲线

Fig.3 Curves of drilling manometers output voltage-reading

3.2 钻孔压力计读数修正

在钻孔压力计的实际使用中,一方面打钻孔前煤柱内已存在应力,钻孔压力计测得的读数是煤体后继变形引起的附加应力;另一方面,钻孔压力计制作标定时其受力部位与加载装置为刚性接触,这与压力计与煤体接触不同,实际监测中压力计读数和煤柱后继增加受力间的关系尚不明确。首先在室内将钻孔压力计放入沙土中加载,查看与煤体类似的沙土受力和压力计读数间的关系,以此近似地把压力计读数转化为煤柱承载的实际附加应力。

试验中,选取6个实际监测中使用的压力计进行修正,图4、5为部分修正试验结果。

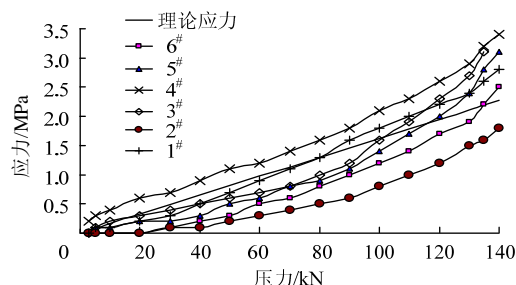


图4 初次加载钻孔压力计读数

Fig.4 Readings of drilling manometers under initial loading

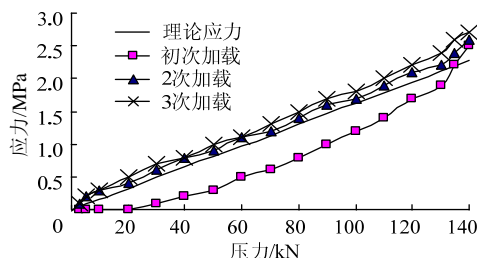


图5 6#钻孔压力计多次加载读数

Fig.5 Readings of drilling manometer 6# under different loadings

钻孔压力计初次加载读数曲线如图4。开始加载时河沙松散尚未压实,导致与压力计耦合较差,压力计读数均低于实际值,之后河沙被压密,压力计读数逐渐趋向沙土受力真实值。

6[#]压力计重复加载曲线如图 5, 河沙被压密后加载时, 压力计读数线性度和趋真性变好。把第 3 次加载时的压力计读数和理论应力值进行回归, 得

$$\sigma_{\text{真}} = 0.9303\sigma_{\text{读}} - 0.0143 \quad R = 0.9965 \quad (1)$$

在钻孔压力计监测煤柱受力过程中, 刚安装后压力计周边存在空洞, 压力计不受力; 只有在煤柱受力变形与压力计耦合密实后, 压力计读数才反映其受力情况。这一过程与本次室内试验相类似, 可采用试验数据对现场实测数据修正, 以分析煤柱承受的实际附加应力。

4 条带煤柱长期承载能力实测与分析

4.1 监测煤柱采矿地质条件

岱庄煤矿 2333 工作面西北侧的条带面已开采, 两面间的煤柱将形成典型的条带煤柱, 选择在 2333 工作面皮带顺槽对该煤柱进行观测; 监测区域位于工作面切眼外 200~215 m 区域内的条带煤柱上; 采用钻孔压力计对煤柱的长期承载能力进行实测。

监测煤柱区域煤层埋深 540~603 m, 煤厚 0.8~3.6 m、平均 2.9 m。基本顶为厚约 11.6 m 的中砂岩, 直接顶为厚约 1.4 m 的泥岩; 直接底为厚约 1.9 m 的粉砂岩, 基本底为厚约 6.2 m 的细砂岩。该区域开采、留设宽度均为 70 m, 工作面顶板全部垮落法管理, 顺槽采用锚带网联合支护, 煤层开采高度 2.93 m, 循环进尺 0.63 m, 日进尺 12.6 m。

在钻孔压力计实际安装过程中, 由于煤层中夹有矸石和泥层, 压力计实际安装深度与原计划有所不同。煤柱上测站的监测仪器布设示意如图 6 所示, 图中 Z1~Z9 为 9 个钻孔压力计, 每个钻孔压力计可以监测煤柱 1 个深度的竖向应力。各钻孔压力计的安装深度见表 1。

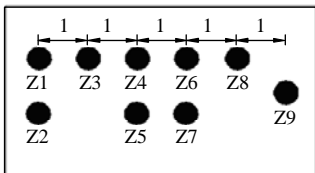


图 6 煤柱状态监测测站布设示意图 (m)
Fig.6 Sketch of observation station of strip pillar state

表 1 钻孔压力计布设深度

Table 1 Installation depths of drilling manometers

编号	深度/m	编号	深度/m	编号	深度/m
Z1	1.0	Z4	2.0	Z7	5.0
Z2	1.0	Z5	2.0	Z8	8.0
Z3	3.0	Z6	5.0	Z9	10.5

4.2 条带煤柱承载能力监测结果与分析

因安装不规范, 7[#]压力计未测得有效数据, 其余压力计监测曲线如图 7 所示。

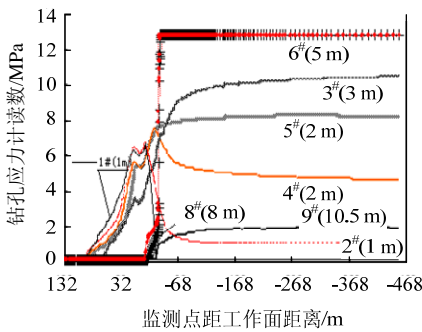


图 7 煤柱不同深度钻孔压力计监测曲线
Fig.7 Curves of drilling manometers in different depths of pillar

工作面推进到距监测区域约 90~100 m 时, 采动应力超前影响, 1~3 m 深的钻孔压力计开始监测到压力; 覆岩重量作用在工作面前方, 工作面推进到距离压力计 7~5 m 时, 1~3 m 深的压力计都出现了第 1 个峰值, 直接顶尚未断裂, 覆岩重量传递到监测区域; 工作面推过监测区域 3~6 m 时, 对煤柱直接施载的直接顶垮落, 冒落矸石对采空区覆岩开始起到支撑作用, 同时基本顶及其上覆岩层的重量传递到工作面前方更远的位置, 1~3 m 深的压力计读数先后降到最低。工作面继续推进, 随着监测区域煤柱进入采空区, 曾经下降的 1[#]~5[#]压力计读数逐渐上升, 而安装较深的钻孔压力计也相继出现读数并增大, 说明进入采空区后煤柱整体受力增大, 尤其在煤柱深部受力的增大幅度要远大于煤柱未进入采空区时。

安装在 1 m 深度的 1[#], 2[#]压力计读数达到最大后降低, 该区域煤柱达到承载极限后破坏; 2 个压力计最大值分别为 6.7, 6.9 MPa, 平均 6.8 MPa。根据式(1)修正, 其附加应力为 6.31 MPa, 这一数值可作为煤柱距离边缘 1 m 部位煤体的最大承载能力。在达到承载极限破坏后, 煤柱上部的 1[#]压力计读数几乎下降到零, 说明区域部煤柱完全破坏; 在冒落矸石和坍塌煤柱的支阻下, 煤柱下部边缘还有轻微的承载能力, 煤柱下部 2[#]压力计最后仍有 1 MPa 的读数。由于坍塌, 煤柱边缘 1 m 范围内整体上承载已经失效。

安装在 2 m 深度的 4[#], 5[#]压力计监测结果差别较大。煤柱上部的 4[#]压力计读数达到最大后降低到 4.7 MPa 后保持稳定, 该部分煤柱达到强度极限后塑性破坏, 但在尚未完全坍塌的煤柱边缘横向约束下, 仍然保持着一定的残余支承能力; 煤柱下部的

5[#]压力计读数达到 8.2 MPa 后保持不变,虽然该部煤柱已经破坏,在煤柱边缘约束下处于三向受力状态,其尚能保持稳定并具有一定的承载能力。可以把 4[#]压力计最大读数修正后的 6.96 MPa 作为 2 m 深度煤柱的最大承载能力,把最后读数修正值 4.36 MPa 作为其残余承载能力。

煤柱 3 m 深度的 3[#]压力计读数达到 10.5 MPa 后保持稳定,比较 2 m 深度压力计发现煤柱 3 m 深度的承载能力明显增大。3[#]压力计稳定后,更深位置的压力计读数仍在增大,可把 3[#]压力计的稳定读数修正后的 9.76 MPa 作为该部位煤柱的最大承载能力。

6[#]压力计安装在煤柱 5 m 深度,其读数与浅部压力计差别较大。出现读数时工作面已经推过 10 m,但推过约 34 m 时读数迅速增大直到满量程,表明煤柱缓慢弹性变形直到钻孔壁与压力计耦合、煤柱受力迅速反映到压力计的过程。读数在迅速增大之前和之后均有短暂降低,反映了采空区不同层位覆岩的运动过程。压力计达到了满量程 12.8 MPa,该部位煤柱的承载能力应大于其修正后的 11.90 MPa。

8[#]压力计安装在煤柱 8 m 深度,其受力趋势与 6[#]压力计类似,但读数要稍微滞后,表明深部压力计受力滞后于浅部压力计,反映了煤柱承载由边缘向中部转移的规律。

9[#]压力计安装在煤柱 10.5 m 深度,其读数一直较小,表明该部位煤柱承受的附加应力不大或变形较小,钻孔壁尚未与压力计耦合密实,煤柱处于弹性、稳定状态。

压力计峰值从煤柱边缘到中间逐渐增加,表明煤柱上附加应力随工作面推进和上覆岩层运动逐渐向煤柱中央转移。采空区覆岩运动和稳定是一个长期过程,煤柱上的受力变化也是长期变化的;在长期载荷下,煤柱力学性质也会发生改变,其承载能力也发生着改变。煤柱边缘最易失稳塌垮,煤柱中央部位的承载能力要远远高于煤柱边缘。实测表明,岱庄煤矿 2333 工作面西北侧的条带煤柱距其边缘 1, 2, 3 m 处的煤体最大承载能力分别为 6.31, 6.96, 9.76 MPa, 距离边缘 5 m 部位的承载能力大于 11.90 MPa。

5 岱庄煤矿条带煤柱稳定状态分析

不同时期不同区域煤柱的附加应力如图 8 所示。煤柱受力首先表现在边缘;随着工作面的推进,煤柱边缘承载增大并破坏,同时煤柱受力向中部转移,并形成内外应力场;随后煤柱边缘塌垮范围增

大,内应力场消失,煤柱受力状态趋向稳定,这基本符合条带开采采场围岩结构模型,此时该煤柱的应力峰值在 6~8 m 之间,而其破坏和塑性区宽度大于 5 m。

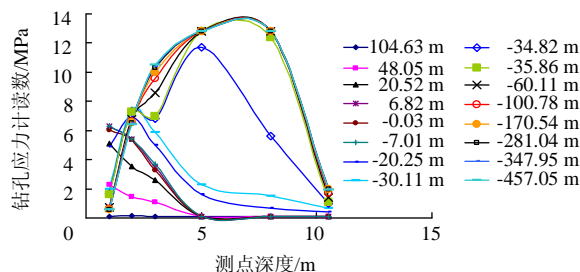


图 8 不同时间的各监测点实测压力值

Fig.8 Measured pressures values of monitoring points in different times

实测结果表明,煤柱中部承载能力大于边缘,但煤柱本身的成分结构是相同的。煤柱不同部位受力状态不同,导致其表现出不同的承载能力。煤柱边缘主要受垂向压力 σ_1 和煤柱走向约束力 σ_2 ;在煤柱边缘横向约束力 σ_3 的作用下,煤柱中部的强度增大;但随着时间的推移,煤柱边缘破坏范围增大,煤柱内同一位置受到的 σ_3 发生改变,其承载能力也将改变;在观测末期,煤柱最大承载部位距离煤柱边缘 6~8 m, 70 m 煤柱中部宽约 54 m 的范围内承受的载荷要稍小些,整个煤柱承载呈现出典型的马鞍形,就观测时间内来看,该煤柱保持稳定状态。

岱庄煤矿条带开采采空区直接顶和部分基本顶冒落成矸石,对覆岩有一定的承载能力;此外,本次没有考虑煤柱本身所受压力即其原始承载能力,监测到的仅是煤柱变形到钻孔壁与压力计耦合密实后的煤柱附加压力。因此,相较于监测结果,煤柱的实际承载能力更大、稳定性更好。

6 结 论

1) 对岱庄煤矿某条带煤柱进行了长期、直接监测。实测表明,煤柱边缘最易破坏塌垮,煤柱中央部位的承载能力要远远高于煤柱边缘;岱庄煤矿 2333 工作面西北侧的条带煤柱距其边缘 1, 2, 3 m 处的煤体最大承载能力分别为 6.31, 6.96, 9.76 MPa, 距离边缘 5 m 部位的承载能力大于 11.90 MPa。

2) 压力计峰值从煤柱边缘到中间逐渐增加,煤柱上附加应力随工作面推进和上覆岩层运动逐渐向煤柱中央转移。采空区覆岩运动和稳定是一个长期过程,煤柱上的受力也是长期变化的;在长期载荷下,煤柱力学性质也会发生改变,其承载能力也

发生着改变。

3) 在观测末期,煤柱最大承载部位距离煤柱边缘 6~8 m, 70 m 煤柱中部宽约 54 m 的范围内承载要稍小些,整个煤柱承载呈现出典型的马鞍形,该煤柱在监测周期内是稳定的;采空区顶板冒落成矸石,对覆岩有一定的承载能力,煤柱本身具有原始承载能力,相较于监测结果,煤柱的实际承载能力更大、稳定性更好。

参考文献:

- [1] BUNTING D. Chamber pillars in deep anthracite mines [M]. London: Trans. AIME, 1911: 236-268.
- [2] GADDY F L. A study of the ultimate strength of coal as related to the absolute size of cubical specimens tested [J]. Virginia Polytechnic Bulletin, 1956, 112: 1-27.
- [3] IANNACCHIONE ANTHONY, MARK CHRISTOPHER. Evaluating coal pillar mechanics through field measurements[C]// ANTHONY I. Proc 11 Int Conf Ground Control Min. West Virginia: West Virginia University Press, 1992: 38-47.
- [4] SALAMON M D G. Stability, instability and design of pillar workings[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1970, 7(6): 613-631.
- [5] LOUI J P, SHEOREY P R. Estimation of non-effective width for different panel shapes in room and pillar extraction[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, 39(1): 95-99.
- [6] 邢安仕. 条带开采煤柱稳定性监控初探[J]. 矿山测量, 1992(4): 29-32.
XING An-shi. Strip mining pillar stability monitoring [J]. Mine Surveying, 1992(4): 29-32.
- [7] 吴立新. 重复条采时上层煤柱应力变化及其稳定性的试验研究[J]. 煤矿开采, 1994, 9(2): 37-40.
WU Li-xin. Research on stress and stability of upper coal pillar in repeated strip mining[J]. Coal Mining Technology, 1994, 9(2): 37-40.
- [8] 熊化云. 条带煤柱的受力观测与分析[J]. 能源技术与管理, 1995(1): 6-9.
XIONG Hua-yun. Stress observation and analysis of strip coal pillar[J]. Energy Technology and Management, 1995(1): 6-9.
- [9] 姜学云, 杜计平. 急倾斜厚煤层条带开采的煤柱稳定性实测研究[J]. 中国矿业大学学报, 1995, 24(1): 29-35.
JIANG Xue-yun, DU Ji-ping. Field observation and study of the stability of pillar in strip extraction of thick coal seam with a big dip[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1995, 24(1): 29-35.
- [10] 卫建清. 房柱式开采煤房与煤柱参数的合理确定[J]. 矿山压力与顶板管理, 2003, 20(1): 106-108.
WEI Jian-qing. Study on the reasonable parameters of room and pillar mining[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2003, 20(1): 106-108.
- [11] 朱建明, 彭新坡, 姚仰平, 等. SMP 准则在计算煤柱极限强度中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2987-2990.
ZHU Jian-ming, PENG Xin-po, YAO Yang-ping, et al. Application of SMP failure criterion to computing limit strength of coal pillars[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2987-2990.
- [12] 张新荣. 煤柱强度与变形特征的实验室试验研究[J]. 煤矿开采, 2012, 17(3): 17-20.
ZHANG Xin-rong. Laboratory test of coal pillar strength and deformation characteristic[J]. Coal Mining Technology, 2012, 17(3): 17-20.
- [13] 林愉, 刘书灵, 林群. 模压成型煤柱的强度研究和实验分析[J]. 煤炭学报, 2005, 30(2): 241-244.
LIN Yu, LIU Shu-ling, LIN Qun. Study on the strength of compaction coal logs[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(2): 241-244.
- [14] 李德海, 赵忠明, 李东升. 条带煤柱强度弹塑性理论公式的修正[J]. 矿冶工程, 2004, 24(3): 16-18.
LI De-hai, ZHAO Zhong-ming, LI Dong-sheng. Theoretical formula of elast plasticity of strip coal pillar—a revision[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2004, 24(3): 16-18.
- [15] 李宏才, 欧阳振华, 樊少武. 综放工作面煤柱受力特性与稳定性研究[J]. 煤矿开采, 2011, 16(4): 5-8.
LI Hong-cai, OUYANG Zhen-hua, FAN Shao-wu. Stress characteristic and stability of coal pillar in full-mechanized caving mining face[J]. Coal Mining Technology, 2011, 16(4): 5-8.
- [16] 段书武. 煤柱锚杆加固机理与煤柱强度影响因素分析[J]. 煤矿开采, 2009, 14(3): 61-64.
DUAN Shu-wu. Reinforcement mechanism of anchored bolt for coal pillar and analysis of influence factors of pillar strength[J]. Coal Mining Technology, 2009, 14(3): 61-64.
- [17] 陈绍杰, 周辉, 郭惟嘉, 等. 条带煤柱长期受力变形特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 376-380.
CHEN Shao-jie, ZHOU Hui, GUO Wei-jia, et al. Study on long-term stress and deformation characteristic of strip pillar[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(3): 376-380.
- [18] 宋振骥, 蒋宇静, 杨增夫, 等. 煤矿重大事故预测和控制的动力信息基础的研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003.