

阳坡泉特厚煤层留设合理煤柱研究

王 灵

华北科技学院 河北廊坊 065201

摘 要: 以阳坡泉煤矿为研究对象, 建立了三维数值模型, 模拟计算了煤柱在有无对穿锚索加固作用下, 不同宽度煤柱的应力、变形和塑形区分布。结果表明: 没有对穿锚索锚固时, 煤柱水平变形较大, 留设的合理煤柱宽度为 22 m; 有对穿锚索加固煤柱时, 煤柱水平位移较小, 合理煤柱宽度为 15 m。

关键词: 合理煤柱; 数值模拟; 对穿锚索

Study on reasonable coal pillar in Yangpoquan extra-thick coal seam

Ling Wang

North China Institute of Science and Technology, Langfang, Hebei, 065201, China

Abstract: Taking Yangpoquan Coal Mine as the research object, a three-dimensional numerical model is established to simulate and calculate the distribution of stress, deformation, and shape area of coal pillars with different widths under the action of bolting with or without opposite-thread cable. The results show that the horizontal deformation of the coal pillar is large without the anchor cable, and the reasonable width of the coal pillar is 22 m. The horizontal displacement of the coal pillar is small and the reasonable width of the coal pillar is 15 m when the anchor cable is used to reinforce the coal pillar.

Keywords: reasonable coal pillar ; numerical simulation ; Cross the anchor line

引言

煤炭是我国的主要工业能源, 由于煤炭资源的不可再生性, 煤炭资源或将面临日益枯竭的局面, 为提高煤炭的采出率, 对穿锚索加固技术在煤柱加固中逐渐广泛运用^[1]。合理的区段煤柱留设, 不仅可以保证工作面采煤作业安全进行, 还能提高煤炭利用率减少煤炭资源的浪费^[2], 具有很重要的现实意义。

近年来诸多学者研究了合理煤柱预留研究, 李立^[3]、臧敦龙^[4]针对孤岛工作面开采时两侧煤柱应力集中问题, 利用 FLAC3D 建立数值模型, 模拟分析了煤柱受力和变形机理, 得出了合理预留煤柱宽度; 任建慧^[5]利用数值模拟和现场监测的研究方法, 厚煤层综放面区段煤柱预留合理宽度; 黄洪涛^[6]利用理论分析结合数值模拟等研究方法, 建立了断层失稳滑移力学模型, 对比不同煤柱宽度条件下的断层煤柱稳定性, 得到了断层煤柱合理宽度。

以上学者研究具有较强的推广意义, 但是对于煤柱对穿锚索水平加固时, 合理煤柱研究较少, 基于此, 本文以阳坡泉煤矿 10102 工作面为研究背景, 通过建立数值模型, 模拟分析了煤柱在有无对穿锚索水平加固作用下, 10102 工作面合理预留煤柱的宽度。结果表明, 为施加对穿锚索加固时, 合理预留煤柱宽度为 22 m, 施加对穿锚索加固时, 合理预留煤柱为 15 m。对穿锚索可以

显著改善煤柱受力变形, 具有推广意义。

一、工程概况

山西华鹿阳坡泉煤矿位于山西省忻州市河曲县, 地处黄土高原, 西临黄河, 地形变化总的趋势是东高西低, 井田中央分布东西向城塔石河沟, 海拔 935 m, 相对高差 237 m, 属低中山区。井田内 10、13 号煤层均存在采空区, 采空区主要分布在井田的东北部和南部地区, 回采时间从 1956 年到 2010 年, 其中, 东北部 2 处采空区由远阳坡泉煤矿开采形成, 采空区形成时间较长, 南部采空区为 2008-2010 年该矿自采形成 13 号煤层采空区 6 处, 采空区面积约 943111 m², 小窑破坏区 3 处, 均为以往关闭小窑开采形成, 开采年代较久远。

二、数值模型

阳坡泉煤矿 10102 工作面为研究对象, 根据 10102 工作面相关巷道尺寸, 确定模型大小为 400 m × 65 m × 5 m。模型上边界自由, 其余边界均受界面法向约束。上边界施加大小为 3.7MPa 的垂直应力。利用 ABAQUS 有限元软件模拟在未水平加固作用下煤柱宽度为 5 m、10 m、15 m、20 m、25 m、30 m 及在水平加固作用下煤柱宽度为 10 m、15 m、20 m 条件下 10102 工作面在进行回采时对煤柱的影响。岩石力学参数见下表 1, 三维数值模拟模型如图 1 所示。

表 7-2 岩石力学参数

岩性	密度 / kg/m ³	单向抗压强度 / MPa	单向抗拉强度 / MPa	弹性模量 / Gpa	泊松比	粘结力 / MPa	内摩擦角 / °
粗砂岩	2470	51.703	2.24	13.016	0.276	2.5	26
9# 煤	1432	8.996	0.54	1.597	0.378	2.9	30
砂质泥岩	2483	19.081	3.7	5.058	0.116	3.3	24
粉砂岩	2451	52.757	2.15	15.073	0.176	2.9	23
泥岩	2340	30.432	2.32	8.785	0.26	2.9	23
10# 煤	1456	14.221	0.68	2.216	0.306	2.9	28
泥岩	2456	35.547	2.36	9.425	0.24	3.2	25
11# 煤	1520	18.149	0.74	2.375	0.325	3.1	28
粉砂岩	2512	51.982	4.99	15.377	0.092	3.1	25

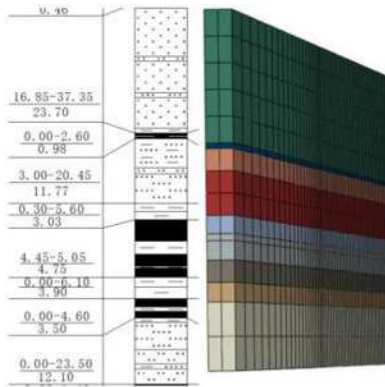


图 1 数值模拟模型

三、未水平加固作用下合理煤柱确定

3.1 不同煤柱宽度应力分布特征

在 5 m、10 m、15 m、20 m、25 m、30 m 六种煤柱宽度条件下,分析 10102 工作面回采期间煤柱所受垂直应力分布规律,如图 2 所示。在不同煤柱宽度条件下,工作面回采引起围岩应力重新分布,造成巷道两侧煤柱和实体煤内出现不同程度的非对称性应力集中。当煤柱宽度为 5 m 时,应力主要集中在实体煤内,煤柱内的应力较大,最大值应力值约为 17.39 MPa,煤柱顶板和底板出现应力集中现象,大小为 7~10 MPa,煤柱两帮应力相对较大,在 8~12MPa 之间,煤柱与采空区顶板夹角出现较大应力集中,应力大小在 13~15 MPa 之间;随着煤柱宽度的不断增加,煤柱内应力集中区域逐渐变小,应力值逐渐由 18 MPa (5 m 煤柱宽度时)减小至 1.37 MPa (30 m 煤柱宽度时),当煤柱宽度从 5 m 增加到 15 m 时两帮集中区域明显减小,当煤柱宽度大于 20 m 时,两帮应力减小范围逐渐减小,两帮应力逐步呈现稳定趋势,应力大小为 6.34~9.37 MPa 之间。

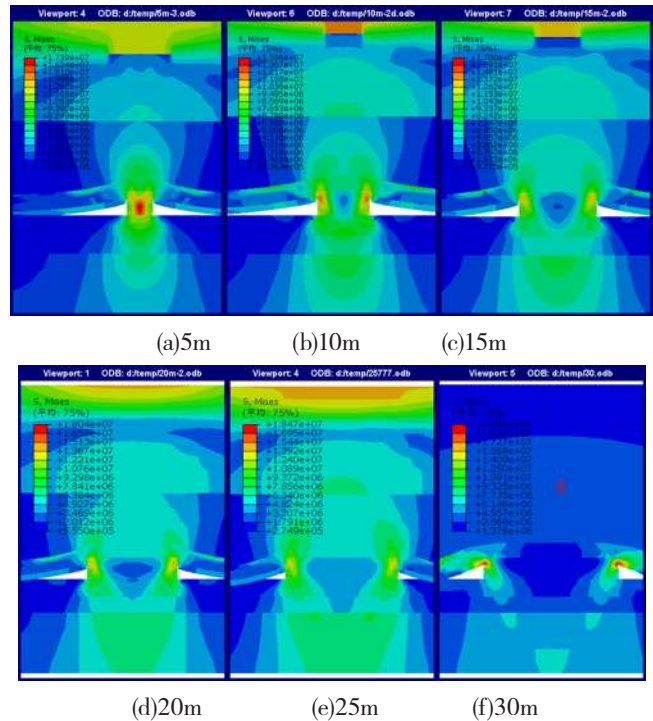
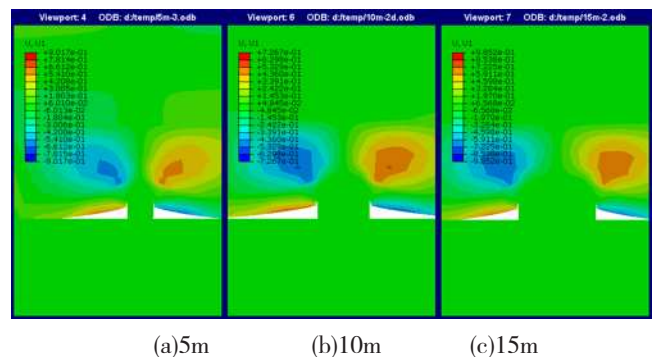


图 2 不同煤柱宽度下煤柱应力云图

3.2 不同煤柱宽度位移分布特征

在 5 m、10 m、15 m、20 m、25 m、30 m 六种煤柱宽度条件下,10102 工作面回采期间煤柱水平位移分布规律,如图 2 所示,煤柱内两帮水平位移出现明显的对称现象。随着煤柱宽度的增加,煤柱向采空区内的位移逐渐减小,最后趋于稳定。当煤柱宽度 5~15 m 时,向巷道内煤柱的位移量逐渐减小到 65 mm。当煤柱宽度在 20~30 m 时,煤柱向巷道内的水平位移趋于稳定。当煤柱宽度小于 25 m 时,煤柱中部水平位移增长较大;当煤柱宽度大于 25 m,煤柱中部水平位移量增加不大。煤柱的应力分布及变形情况以及实体煤应力及变形情况都受到煤柱宽度的影响,随着煤柱宽度的提高,煤柱及实体煤内部存在不同程度的应力集中,对巷道两侧控制围岩的变形和收敛能力也不断提高。



(a)5m (b)10m (c)15m

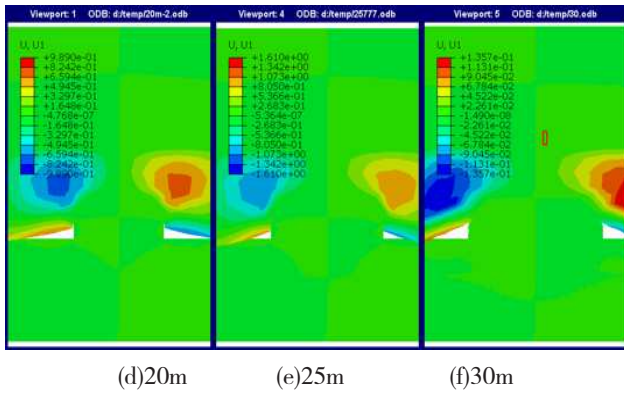


图 2 不同宽度煤柱水平位移图

煤柱所受垂直应力分布规律, 如图 3 所示。由 3 可以看出, 当工作面回采后, 由于开挖卸载, 煤柱有一定程度回弹位移, 位移大小为 2~8 mm, 煤柱宽度对煤柱垂直位移影响相对较小, 煤柱位移随煤柱增加呈先增大后减小的趋势, 工作面上部未开采煤由煤柱逐渐向工作面中心塔落, 最大值出现在煤柱宽度为 25 m 时, 位移量为 8.93 mm, 最小值出现在煤柱宽度为 30 m 时, 位移值为 2.82 mm。

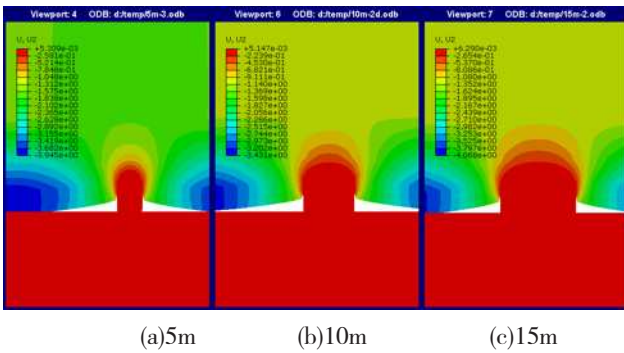


图 3 不同宽度煤柱垂直位移图

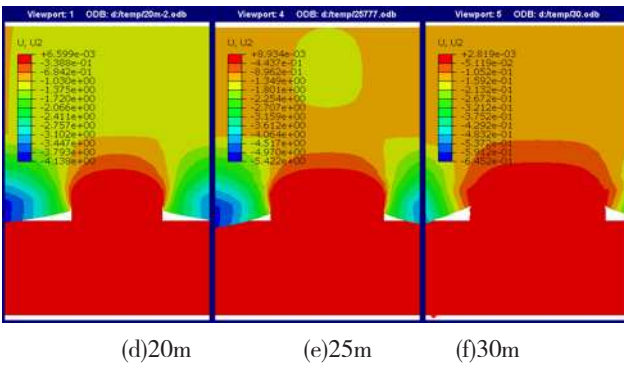


图 4 不同宽度煤柱塑性区分布特征

3.3 不同煤柱宽度塑性区分布特征

在 5 m、10 m、15 m、20 m、25 m、30 m 六种煤柱宽度条件下, 10102 工面回采期间煤柱塑性区域分布规律如图 4 所示: 由图可知, 随着煤柱宽度的不断增加, 煤柱内部未发生塑性破坏的区域也不断增长, 煤柱宽度在 5~30 m 之间变化时, 煤柱内部的未破坏区宽度分别为 0m、1 m、2 m、4 m、12 m、17 m。对比发现, 在煤柱宽度由 20 m 增加至 25 m 过程中, 煤柱内部未发生塑性

破坏的区域骤增 8 m, 此时可认为煤柱处于稳定状态, 可以推断, 合理的煤柱留设尺寸应在 20 m 至 25 m 之间, 可取 22 m。

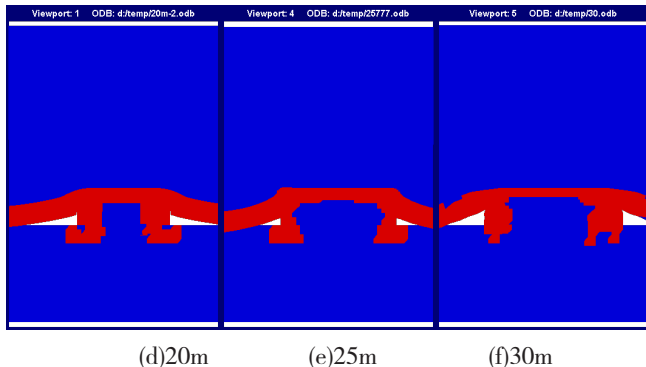
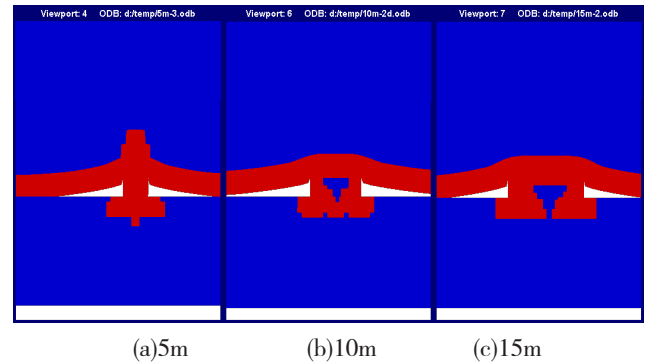


图 5 不同宽度煤柱塑性区示意图

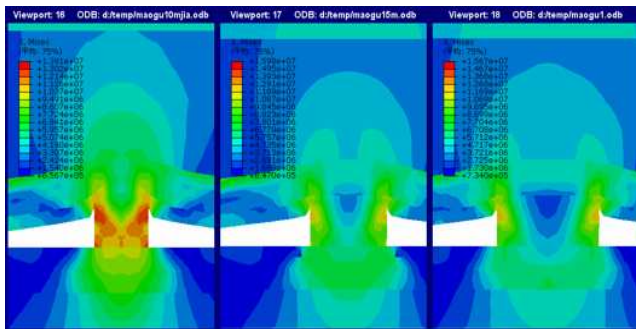
四、平加固作用下合理煤柱确定

4.1 对穿锚索锚固作用下不同宽度煤柱应力分布规律

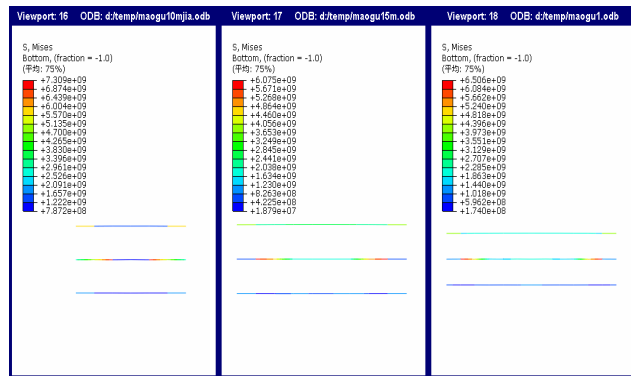
在对穿锚索锚固作用下煤柱宽度为 10 m、15 m、20 m 时, 煤柱与锚索应力受力云图如图 5 所示, 不同宽度煤柱应力云图如图 5 (a), 不同长度锚索应力云图如图 5 (b) 所示。由图 5 可知, 在对穿锚索水平加固作用下, 煤柱水平方向受力主要由对穿锚索承担, 煤柱宽度为 10 m、15 m、20 m 时对穿锚索应力最大值分别为 730 MPa、607 MPa、650 MPa, 可见煤柱宽度为 15 m 时锚索受力较小; 煤柱宽度为 10 m 时, 煤柱内部压应力应力集中现象比较明显, 煤柱内部应力在 10~14 MPa 左右, 随着煤柱宽度增加, 煤柱内部应力逐渐减小, 当煤柱宽度为 15m 时煤柱上部应力减小至 1.7~3.7 MPa, 两帮及顶底板应力在 5~9.8 MPa 之间, 顶板与煤柱夹角处有 11.8~12.9 MPa 的应力集中; 当煤柱宽度为 20m 时, 煤柱内部应力减小至 0.73~3.7 MPa, 顶板与煤柱夹角处有 10.7~11.7 MPa 的应力集中说明在对穿锚索加固作用下, 煤柱宽度对煤柱受力由明显的卸荷作用。

由图 5 (b) 可知, 在不同长度锚索锚固作用下, 锚索受力呈由上到下逐渐变小, 单根锚索受力呈由两头向中心逐渐减小的趋势。在 15m 锚固长度作用下, 锚固力在 78~730 MPa 之间, 此时中间部位锚索受力最大; 在 20m 锚固长度作用下, 锚固力在 18~607 MPa 之间, 此

时上部锚索受力最大; 在 25m 锚固长度作用下, 锚固力在 17~650 MPa 之间, 此时上部中部锚索受力较大。



(a) 锚固作用下不同宽度煤柱应力云图

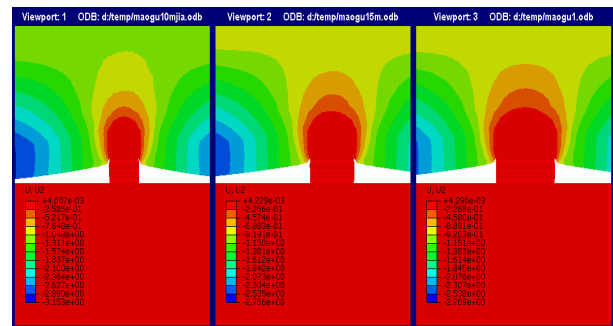


(b) 不同长度锚索应力云图

图 5 锚固作用下不同宽度煤柱应力云图

4.2 对穿锚索锚固作用下不同宽度煤柱位移分布规律

对穿锚索锚固作用下不同宽度煤柱水平位移云图如图 6 (a) 所示, 对穿锚索锚固作用下不同宽度煤柱竖直位移云图如图 6 (b) 所示。由图 6 (a) 可知, 在对穿锚索锚固作用下, 煤柱水平位移在 -86~90 mm 之间, 可见对穿锚索的水平加固作用可以明显改善煤柱两帮位移; 由图 7-16 可知, 由于工作面煤体开挖卸载作用, 煤柱有一定的回弹位移, 位移为 4.29~4.60 mm, 可见对穿锚索加固作用下, 对煤柱竖向位移影响变化不大。

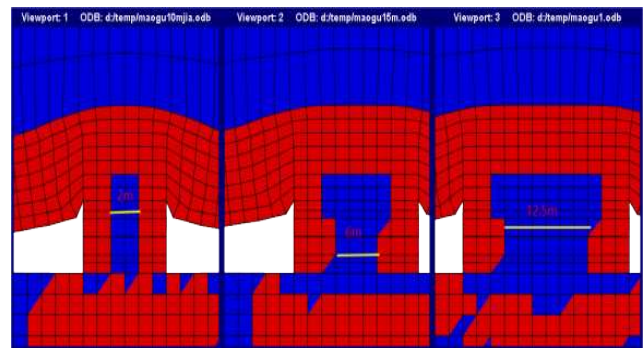


(b) 锚固作用下不同宽度煤柱竖直位移云图

图 6 对穿锚索锚固作用下不同宽度煤柱竖直位移云图

4.3 对穿锚索锚固作用下不同宽度煤柱塑性区域分布规律

对穿锚索锚固作用下不同宽度煤柱塑性区域分布规律如图 7 所示, 在对穿锚索水平加固作用下, 煤柱宽度 10 m、15 m、20 m 的煤柱内部的弹性区域分别为 2 m、6m、12.5m, 由图 4 可知未加固作用下煤柱宽度为 10 m、15 m、20 m 的煤柱内部弹性区域分别为 1 m、2 m、7 m, 水平锚固作用对减小煤柱内部塑性区有明显提升作用。



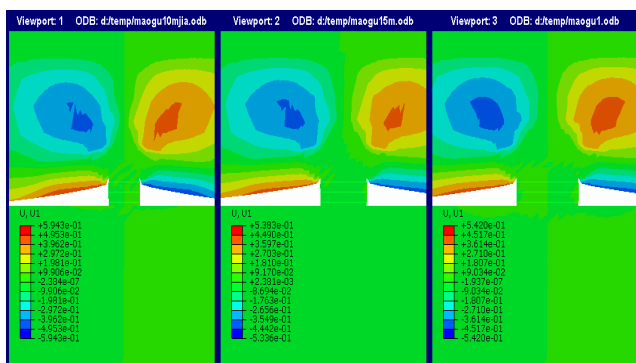
(a)10m (b)15m (c)20m

图 7 对穿锚索锚固作用下不同宽度煤柱塑性区域分布图

根据数值模拟结果, 当煤柱宽度为 15 m 时, 在水平锚固作用下, 煤柱内应力集中区域已不明显, 煤柱两帮应力在 5~9.8 MPa 之间, 锚索受力均匀, 煤柱水平位移在 2.38~91 mm 之间, 煤柱内部有 6 m 的弹性区间, 满足煤柱应有 3~5 m 弹性区设计要求, 相比在无水平锚索支护条件下, 煤柱宽度可减少 5 m。当预留煤柱小于 15 m 时, 煤柱内部弹性区域宽度将小于设计要求, 如加大锚固力来保证设计弹性区域, 在锚索周围会形成局部应力集中, 不利于煤柱稳定性。同时, 当预留煤柱过大时, 不仅煤矿开采率降低, 而且对穿锚索支护难度加大, 锚固作用也将降低, 因此合理预留煤柱应为 15 m。

五、结论

(1) 在不同煤柱宽度条件下, 工作面回采引起围岩应力重新分布, 造成巷道两侧煤柱和实体煤内出现不同程度的非对称性应力集中。当煤柱宽度从 5 m 增加到 15 m 时两帮集中区域明显减小, 当煤柱宽度大于 20



(a) 锚固作用下不同宽度煤柱水平位移云图

m时, 两帮应力减小范围逐渐减小, 两帮应力逐步呈现稳定趋势, 应力大小为 6.34~9.37 MPa 之间。

(2) 未对煤柱施加对穿锚索水平加固时, 在煤柱宽度由 20 m 增加至 25 m 过程中, 煤柱内部未发生塑性破坏的区域骤增 8 m, 此时可认为煤柱处于稳定状态, 可以推断, 合理的煤柱留设尺寸应在 20m 至 25 m 之间, 可取 22m。

(3) 在对穿锚索水平锚固作用下, 煤柱水平位移显著减小, 煤柱水平锚索受力呈由上到下逐渐变小, 单根锚索受力呈由两头向中心逐渐减小的趋势。

(4) 根据数值模拟结果, 当煤柱宽度为 15 m 时, 在水平锚固作用下, 煤柱内应力集中区域已不明显, 煤柱两帮应力在 5~9.8 MPa 之间, 锚索受力均匀, 煤柱水平位移在 2.38~91 mm 之间, 煤柱内部有 6 m 的弹性区间, 因此合理预留煤柱应为 15 m。

参考文献:

[1] 张洪雨. 孤岛工作面沿空掘巷煤柱合理宽度初探

[J]. 能源与节能, 2018(03):37-38+60.

[2] 王德超, 李术才, 王琦, 李为腾, 王富奇, 王洪涛, 彭蓬, 阮国强. 深部厚煤层综放沿空掘巷煤柱合理宽度试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(03):539-548.

[3] 李立, 郭亚奔, 刘慧妮, 丁科, 李宏儒. 孤岛工作面沿空掘巷窄煤柱合理宽度确定 [J]. 中国矿业, 2022, 31(12):121-128+137.

[4] 臧敦龙, 董士莹, 齐明友, 薛岩, 吴夫星, 刘云峰. 孤岛工作面回采合理煤柱宽度研究 [J]. 煤, 2022, 31(12):41-43.

[5] 任建慧, 王帆, 王文. 厚煤层综放工作面区段煤柱内沿空掘巷小煤柱合理宽度研究 [J]. 中国煤炭, 2022, 48(S1):275-282.

[6] 黄洪涛, 邓重青, 李继路. 深部大断层保护煤柱合理宽度研究 [J]. 山东煤炭科技, 2022, 40(10):68-70+74.

[7] 郝东梁. 特厚煤层综放开采小煤柱合理宽度及支护技术研究 [D]. 内蒙古科技大学, 2021.