

技术方法

鲁西南厚煤层顶板覆岩“两带”高度影响因素研究

——以某煤矿1305工作面为例

赵常凤^{1,2}, 刘正文^{1,2}, 沈礼锋¹, 宋峰^{1,2*}, 徐阳¹

(1. 山东省煤田地质局第一勘探队, 山东 青岛 266500; 2. 矿山瓦斯灾害防治山东省工程研究中心, 山东 青岛 266500)

摘要:煤层开采过程中,顶板覆岩发生垮落、破坏,围岩地应力重新分布过程中会造成顶板覆岩采动裂隙发育,形成人为垮落带和导水裂缝带。“两带”高度对于煤层开采影响较大,影响矿井顶板涌水、地面沉降以及顶板支护等矿井工作。以某煤矿1305工作面“两带”高度探测工程实例为背景,通过经验公式、钻孔实测及数值模拟对其“两带”高度进行计算分析。研究结果表明:1305工作面垮落带可发育高度为32.2 m,垮采比为4.29;导水裂缝带可发育高度为94.4 m,裂采比为12.59。为煤矿获取煤层“两带”高度方面提供探测方法参考。

关键词:厚煤层;导水裂缝带;分段注水;数值模拟;鲁西南

中图分类号:P631.1

文献标识码:A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2025.09.009

0 引言

煤层开采过程中,顶板覆岩采动裂隙发育,形成垮落带和导水裂缝带。“两带”发育的高度是矿井防治水及防砂工作的重要参数^[1-2]。本文以鲁西南某煤矿厚煤层工作面“两带”高度探测工程为背景,通过经验公式、钻孔实测及数据模拟对“两带”发育高度计算分析,确定了垮落带和导水裂缝带的发育高度,为煤矿解决煤层顶板水患,保障煤矿安全生产提供了一定的依据,同时为相邻工作面及周边矿井覆岩“两带”高度提供了参考。

1 工程概况

1.1 矿区地质条件

井田内通过钻探工程揭露的地层由老到新有:奥陶纪马家沟群,石炭-二叠纪月门沟群本溪组、太原组、山西组,二叠纪石盒子群、古近系、新近系及第四系。其中含煤地层为山西组和太原组。山西组平均厚度约82.56 m,含3层可采煤层,即2、3_上和3_下

煤层,其中,2煤层为局部可采煤层;3_上煤层和3_下煤层统称为3煤层,是本区内主要的可采煤层;太原组平均厚度170.71 m,含12层石灰岩,含可采、局部可采煤层4层。

井田位于成武背斜南翼的东部、单县煤田的最南端^[3]。受区域构造终兴断裂、谢集断裂及南部单县断层控制,井田构造形态为倾向N的单斜构造伴有部分断层和宽缓的褶曲,地层倾角一般在4°~27°之间;主要发育有近EW向断层和NE、NW向3组断层。根据物探、钻探资料,结合区域构造规律,共组合断层48条。

1.2 矿区水文地质条件

井田位于区域水文地质单元中单县煤田的东南部。主要含水层:第四纪+新近纪松散层含水层富水性较弱;古近系砾岩含水层富水性弱;3煤层顶底板砂岩裂隙含水层富水性弱;三灰岩溶裂隙含水层富水性弱;五至八灰岩溶裂隙含水层组富水性弱;十_下灰岩溶裂隙含水层富水性较弱;奥陶纪石灰岩岩溶裂隙含水层富水性弱^[4]。

收稿日期:2024-10-29;修订日期:2024-12-10;编辑:王敏

基金项目:山东省自然资源厅,《山东省章丘-邹平地区地表基岩层调查》鲁勘字[2023]4号

作者简介:赵常凤(1982—),男,辽宁抚顺人,高级工程师,主要从事矿产勘查和矿井水害治理工作;E-mail:13656370281@126.com

* 通信作者:宋峰(1978—),男,山东泰安人,高级工程师,主要从事矿产勘查和矿井防治水工作;E-mail:68870094@qq.com

1.3 探查工作面概况

本次以某煤矿 1305 工作面顶板“两带”发育高度作为研究对象。1305 工作面倾向长度 160 m,走向长度 798 m,地面标高 +39 m~+40 m,井下标高 -622 m~-710 m。主采 $3_{\text{上}}$ 煤层,厚度 4.7~8.6 m,平均 6.4 m,1305 工作面在回采时对采厚进行了统计,停采线附近采厚约 7.5 m。

$3_{\text{上}}$ 煤层直接顶板为泥岩,深灰色,平均厚度 0.75 m,硬度系数 $f=1\sim3$;老顶为粉砂岩,灰色,平均厚度 5.2 m,硬度系数 $f=2\sim4$;直接底为砂质泥岩,深灰色,平均厚度 3.6 m,硬度系数 $f=1\sim3$;基本底为细砂岩,灰色,平均厚度 3.15 m,硬度系数 $f=2\sim4$ 。

1305 工作面位于张小楼背斜的西翼,依据工作面巷道实际揭露情况,煤(岩)层起伏较小,工作面内部无大的褶曲。在工作面巷道掘进过程中,1305 轨道顺槽实际揭露 3 条断层,落差在 0.6~3 m 之间。

2 “两带”高度影响因素与观测方法

2.1 “两带”高度的影响因素

垮落带和导水裂缝带最大高度的形成主要与上覆岩层的性质、煤层的开采厚度、采煤方法、控顶方式、采空区的尺寸、煤层倾角、地质构造以及含水层的水头压力等因素有关。

2.2 “两带”观测方法

目前常用的“两带”观测方法有:钻孔冲洗液消耗量法、岩层移动钻孔探测法、钻孔超声成像探测法、孔间无线电波透测法、电视成像探测技术、井下仰斜钻孔“两带”高度观测方法。

3 “两带”高度探查对比

本次 1305 工作面顶板“两带”发育高度采用:经验公式法、井下仰斜钻孔“两带”高度观测方法及数值模拟方法,相结合的方式研究 1305 工作面顶板“两带”发育高度情况。

3.1 经验公式法

根据 1305 工作面顶板覆岩岩性条件,顶板岩层由粉砂岩、砂质泥岩等组成,根据其强度 $3_{\text{上}}$ 煤层覆岩属于软弱偏中硬顶板,计算按中硬岩层考虑^[5-8]。

按《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与

压煤开采指南》中经验公式进行计算^[9-14],中误差取正值,其计算公式(1~2):

$$\text{垮落带: } H_k = 6M + 5 \quad (1)$$

$$\text{导水裂缝带: } H_{li} = \frac{100M}{0.23M + 6.10} \pm 10.42 \quad (2)$$

式中: H_k 为垮落带发育高度(m); H_{li} 为导水裂缝带高度(m); M 为采厚(m)。

将煤层厚度 M 按停采线附近厚度 7.5 m 进行计算,得到覆岩垮落带发育高度为 50.00 m,导水裂缝带发育高度为 85.43~106.27 m。

当垮落带和导水裂缝带进入第四系时,其发育高度势必会受到有效地抑制,在第四系内一般不会超过 10 m。因此,基于 1305 工作面基岩厚度等值线,将上顺槽处的导水裂缝带控制高度定为 90 m。

3.2 井下仰斜钻孔“两带”高度观测法

对 1305 工作面采用井下仰斜钻孔“两带”高度观测方法进行观测^[15-16]。本次井下实测时间为观测断面对应的 1305 工作面推进约 2 个月左右,1305 工作面地质采矿条件下此时导水裂缝带已发育到最大,观测成果能够反映现场实际,可以作为分析研究 1305 工作面开采后覆岩垮落带和导水裂缝带发育高度与形态的依据^[17-18]。

从停采线附近钻窝向 1305 工作面方向施工 2 个采后导水裂缝带观测孔,向其反方向施工 1 个采前孔,钻孔布置参数及剖面如表 1 及图 1 所示。

将采后孔与采前孔漏失量进行了对比(图 2),从图 2 中可以看出:

采后孔 CH1 漏失量可大致分为 3 个范围:25~37 m 范围采后孔 CH1 漏失量远大于采前孔 CQ1 漏失量,该段为垮落带;38~106 m 范围采后孔 CH1 与采前孔 CQ1 相比漏失量相差较大,该段为导水裂缝带;107~116 m 范围采后孔 CH1 与采前孔 CQ1 基本一致,进入弯曲下沉带。

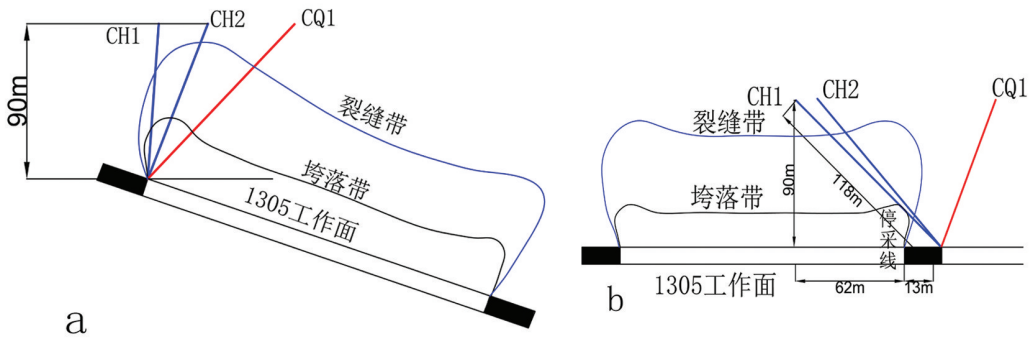
采后孔 CH2 漏失量同样可大致分为 3 个范围:25~38 m 范围采后孔 CH1 漏失量远大于采前孔 CQ1 漏失量,该段为垮落带;39~113 m 范围采后孔 CH1 与采前孔 CQ1 相比漏失量相比较较大,该段为导水裂缝带;114~117 m 范围采后孔 CH1 与采前孔 CQ1 基本一致,进入弯曲下沉带。

根据对各个钻孔漏失量对比分析,得到了 2 个采后孔揭露垮落带和导水裂缝带顶界面位置,结合钻孔与工作面的相对位置关系,得到了采后孔 CH1

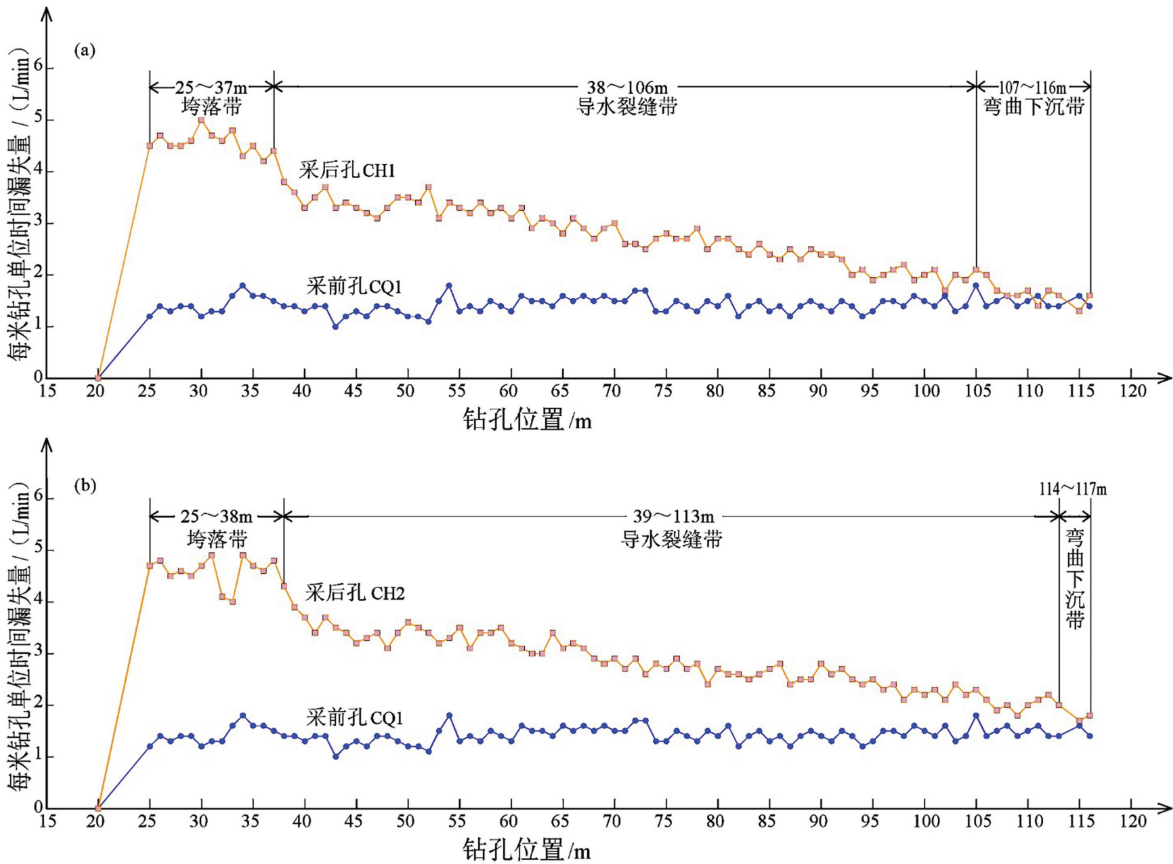
揭露的垮落带高度为 28.34 m,导水裂缝带高度为 29.11 m,导水裂缝带高度为 87.33 m。
81.20 m;采后孔 CH2 揭露的垮落带高度为

表 1 钻场 I 钻孔参数一览表

孔号	孔性	孔径/ mm	方位/ (°)	仰角/ (°)	孔深/ m	钻场位置	备 注
CQ1	采前孔	Φ89	11	50	118	钻场 I	进入第四系 10 m 即可终孔
CH1	采后孔	Φ89	257	50	118	钻场 I	设计孔深为参考值,以进入第四系 10 m 为终孔标准
CH2	采后孔	Φ89	267	50	118	钻场 I	设计孔深为参考值,以进入第四系 10 m 为终孔标准



a—倾向剖面;b—走向剖面。
图 1 钻孔布置剖面示意图



a—采前孔 CQ1 与采后孔 CH1 漏失量对比分析图;b—采前孔 CQ1 与采后孔 CH2 漏失量对比分析图。
图 2 钻孔漏失量对比分析图

根据实测垮落带和导水裂缝带高度数据,结合缓倾斜煤层长壁法回采结束后导水裂缝带基本形态,推断得到了 1305 工作面垮落带和导水裂缝带的形态和发育高度(图 3),以煤层采厚 7.5 m 计算,得到了 1305 工作面垮落带发育高度为 30.96 m,垮采比为 4.13;导水裂缝带高度为 87.45 m,裂采比为 11.66。

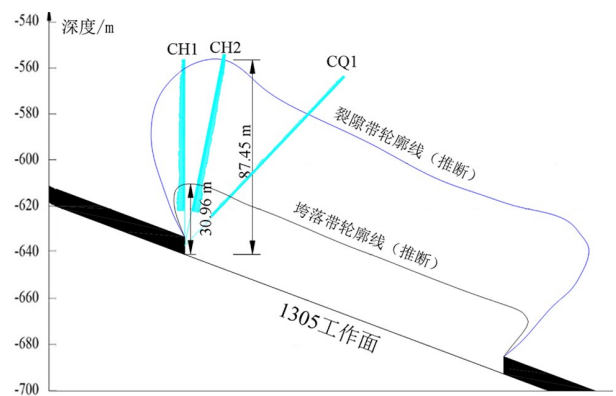


图 3 1305 工作面垮落带和导水裂缝带形态推断图

3.3 数值模拟法

为了全面了解 1305 工作面垮落带和导水裂缝带发育高度及形态^①,采用 FLAC3D 和 UDEC 对 1305 工作面的垮落带和导水裂缝带发育情况进一步模拟研究^[19-20]。

3.3.1 FLAC3D 数值模拟

(1)数值模型建立。1305 工作面地面投影长度约 150 m,工作面两端各留 75 m 边界煤柱,由此确定模型沿倾向(X)的尺寸定为 300 m;不考虑工作面推进过程中上覆岩层的运动过程,同时为减小运算量,将模型沿走向(Y)的尺寸定为 100 m;在竖直方向上,考虑到地层倾角达到 23°,同时为保证上覆岩层移动足够的运动范围,将模型在竖直方向(Z)上的尺寸定为 300 m。数值模型如图 4 所示。模型所包含网格数目为 133 900,节点数目为 144 144。

模型边界条件设置为:东、南、西、北及底部采取滚支边界,垂直方向上的初始地应力主要考虑上覆岩体自重应力。在假设岩体为均质各向同性材料的情况下,体自重应力为: $\gamma H=10.8\text{MPa}$ 。本次模拟的是静力平衡状态,以在模型达到初始平衡后,将所有节点速度和变形清零。1305 工作面开采数值模型采取本构模型为摩尔-库伦(M-C)破坏准则,它既适用于塑性岩石也适用于脆性岩石的剪切破坏。Flac3D 程序对岩体工程模拟效果的好坏,关键问题

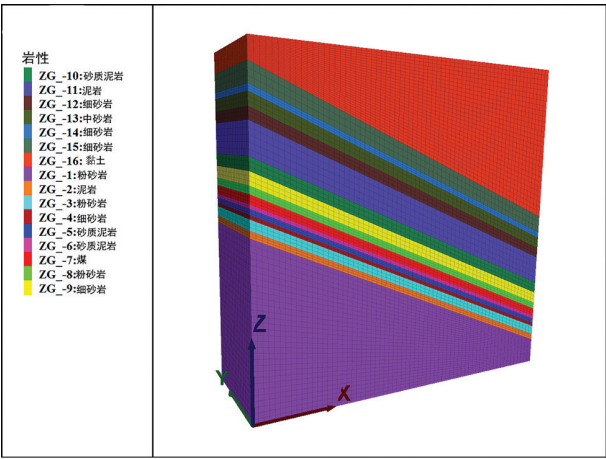


图 4 1305 工作面数值模型图

在于模拟选用的岩体参数是否合理,参数不合理则数值模拟无法真实反映岩体的变形以及破坏等问题,去了模拟的意义。模型各分层厚度及岩性参数见表 2。

(2)模拟结果及分析。图 5 表明,1305 工作面开采后上覆岩层沿倾向出现不对称下沉,下沉区域表现为“下偏”的趋势,即埋深大的一侧顶板下沉量偏大。

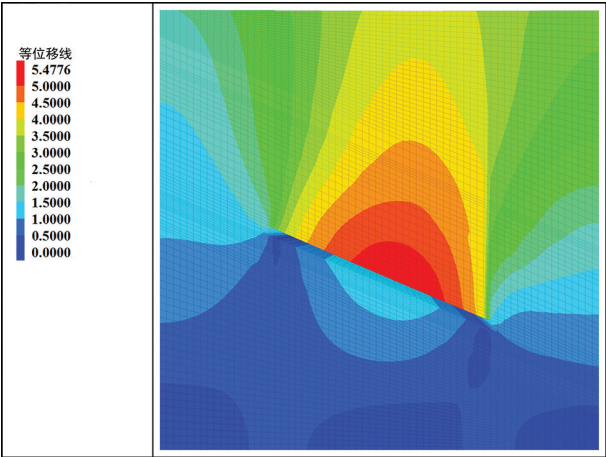


图 5 1305 工作面位移图

图 6 表明,煤层开挖后顶底板出现卸压区,拉应力的范围为工作面上方 0~55 m 和工作面下方 0~44 m。通过拉应力的范围分析得出,工作面上方垮落带的高度约为 55 m。工作面两端出现垂直应力集中区,侧向支承压力峰值达到 46.2 MPa,以原岩应力 15.0 MPa 计算得到应力集中系数达到 3.1。

① 山东科技大学,单县丰源实业有限公司 1305 工作面“两带”高度探测研究总结报告,2019 年。

图 7 为工作面开挖后水平应力分布,在工作面顶底板出现水平应力的卸压区,水平拉应力区在工作面顶板的范围约为 0~40 m。在工作面两侧水平应力集中范围较大,应力集中峰值达到 23.4 MPa,以初始平衡条件下水平应力 8.0 MPa 计算得到水平应力峰值的集中系数达到 2.9。

图 8 为 1305 工作面回采结束后塑性区分布图,

从图中可以看出由于地层倾角的存在,1305 工作面开挖后在工作面两侧出现不对称的塑性区。工作面上巷侧剪切塑性区发育高度约 94.4 m,工作面下巷侧剪切塑性区发育高度约 90.1 m,工作面下巷侧塑性区发育高度和范围比上巷侧略大。以煤层厚度 7.5 m 为标准,计算得到了 1305 工作面裂采比为 12.59。

表 2 1305 工作面岩性参数

岩性	厚度/m	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	密度/(kg/m ³)
上覆岩层	—	3.34	2.84	3.14	32.8	1.5	2179
中粒砂岩	16.3	3.0	2.6	4.6	33	3.01	2456
粉砂岩	3.15	4.0	3.0	3.5	33	2.2	2231
细砂岩	6.2	3.3	2.4	5.6	32	2.8	2186
泥岩	24.4	2.8	1.9	3.4	32	1.8	2214
砂质泥岩	8.5	2.5	2.4	6.4	32	2.2	2345
细砂岩	10.0	3.3	2.4	5.6	32	2.8	2186
粉砂岩	5.2	4.0	3.0	3.5	33	2.2	2231
3 煤	7.5	1.8	1.4	3.0	30	1.8	1450
砂质泥岩	3.6	2.5	2.4	6.4	32	2.2	2345
细砂岩	3.15	3.3	2.4	5.6	32	2.8	2186
粉砂岩	7.71	4.0	3.0	3.5	33	2.2	2231
细砂岩	5.3	3.3	2.4	5.6	32	2.8	2186
泥岩	6.2	2.8	1.9	3.4	32	1.8	2214
粉砂岩	—	4.0	3.0	3.5	33	2.2	2231

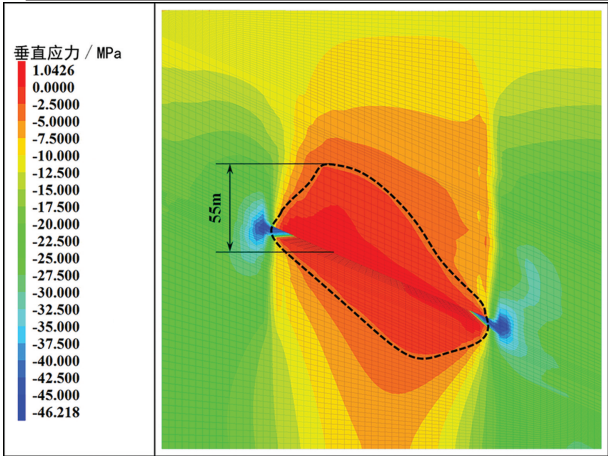


图 6 1305 工作面垂直应力示意图

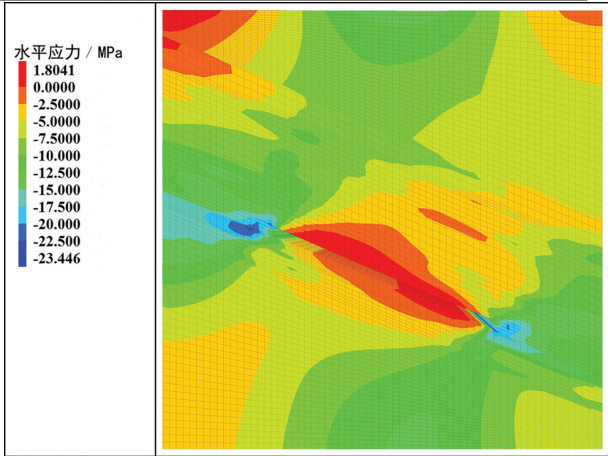


图 7 1305 工作面水平应力示意图

3.3.2 UDEC 数值模拟

(1) 数值模型建立。以 1305 工作面为工程背景,建立的离散元几何模型,模型采用平面应变模型,模型尺寸(长×高)为 300 m×150 m,开采方法为综采放顶煤开采。

模型的底部界和左、右边界均采用零位移边界条件,即:底部边界条件为全约束边界($u=0$ 且 $v=0$);左、右边界条件为单约束边界($u=0, v \neq 0$);上边界为自由边界,无约束,上边界以上的岩层作为外载荷施加在模型的上边界上。

对所建立模型的各岩层进行块体划分。基岩分块基本是按实际产状特征划分的,煤层、直接顶及垮落带范围内块度尺较小,底板、老顶划分块体尺寸相对大些;各地层均具有水平和垂直节理,地层均为交错沉积块体^[21-22]。

(2) 模拟结果与分析。图 9 为 1305 工作面回采结束后覆岩垮落情况,从图中可以看出由于地层倾角的存在,1305 工作面开挖后在上覆岩层垮落呈不对称分布,工作面上顺槽侧垮落带和导水裂缝带高度较下顺槽侧高,上顺槽侧垮落带发育高度为

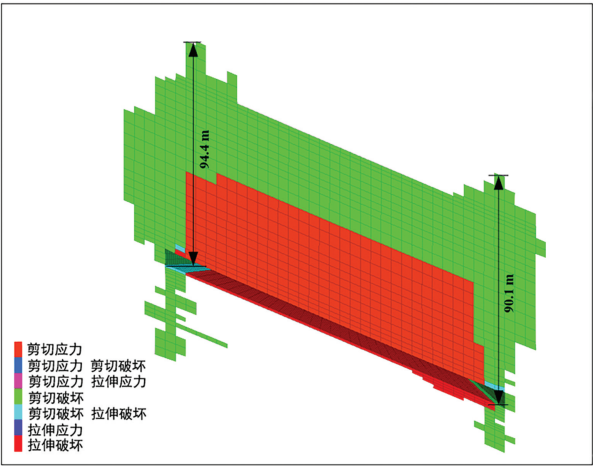


图 8 1305 工作面塑性区示意图

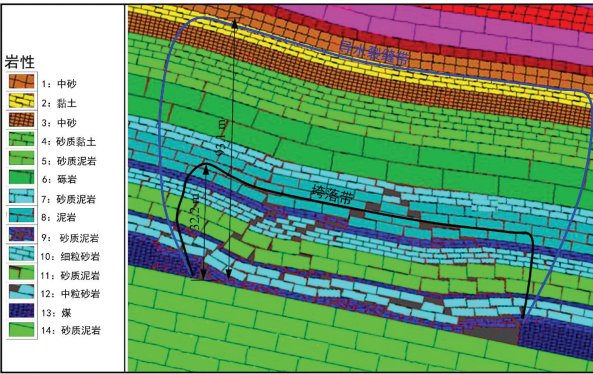


图 9 1305 工作面覆岩垮落形态示意图

32.2 m,导水裂缝带发育高度为 93.1 m,煤层开采厚度以 7.5 m 为标准,计算得到了 1305 工作面的垮采比为 4.29,裂采比为 12.41。

4 结语

通过经验公式法、井下仰斜钻孔“两带”高度观测法及数值模拟法,对煤层顶板覆岩破坏发育规律进行了研究,三种方法相互对比,最后综合分析得出了工作面“两带”发育高度,为该矿相邻工作面“两带”发育高度的探查及评价提供了参考方法,同时为周边矿井煤层“两带”发育高度提供探测方法参考。

(1)煤层厚度按最大煤层厚度 7.5 m 进行计算,按经验公式法得出覆岩垮落带发育高度为 50.00 m,导水裂缝带预计发育高度为 85.43~106.27 mm。

(2)通过井下仰斜钻孔“两带”高度观测法,得出 1305 工作面垮落带发育高度为 30.96 m,导水裂缝带发育高度为 87.45 m,计算出 1305 工作面垮采比

为 4.13,裂采比为 11.66。

(3)煤层开采厚度以 7.5 m 为标准,通过 2 种数值模拟计算得出：

FLAC3D 模拟计算,1305 工作面导水裂缝带最大发育高度为 94.40 m,得出 1305 工作面导水裂缝带裂采比为 12.59。

UDEC 模拟计算,1305 工作面垮落带发育高度为 32.2 m,导水裂缝带发育高度为 93.1 m,得出 1305 工作面的垮采比为 4.29,裂采比为 12.41。

综合现场实测和数值模拟结果得出了 1305 工作面垮落带可发育高度为 32.2 m,垮采比为 4.29;导水裂缝带可发育高度为 94.4 m,裂采比为 12.59。

(4)“两带”发育高度探测结果往往受现场客观因素影响较大,本文中顶板覆岩没有考虑断层影响,但实际上断层的影响是不可忽视的。由于存在断层定位、落差测量等方面的困难,尤其是工作面内的小断层往往容易被忽视,许多事实证明小断层的切割并不一定不深,已有资料亦证实在断层带覆岩导水裂缝带发育高于正常区域,这就造成顶板有效隔水层的厚度大大减少。因此,在断层附近生产,安全性大为降低,此时一方面应加强断层的勘查和定位工作,另一方面应根据《煤矿安全规程》有关内容制定完善的安全预防措施,指定避灾路线,提高采区与矿井的排水能力,确保生产和人员安全。

参考文献：

[1] 孟宇平. 煤层覆岩“两带”高度探测方法对比[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(增刊 1): 67-71.

[2] 舒宗运, 黎灵, 李宏杰. 特厚煤层综放开采覆岩“两带”高度研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(增刊 1): 52-54.

[3] 荣丹文, 荣晓伟. 鲁西区域构造演化对单县煤田成煤作用的影响: 以张集井田为例[J]. 资源导刊·地球科技版, 2014(10): 35-37.

[4] 曹艳玲, 田振环, 王琳. 海域煤层防水安全煤柱估算方法评述: 以山东省黄县煤田梁家煤矿扩大区(西海域)为例[J]. 山东国土资源, 2016, 32(2): 73-76.

[5] 朱伟. 中硬覆岩综放开采裂缝带发育高度研究[J]. 煤矿安全, 2013, 44(2): 61-63.

[6] 黄乐亭. 采场覆岩两带高度与覆岩硬度的函数关系[J]. 矿山测量, 1999(1): 20-21.

[7] 于建军. 中硬覆岩大采高工作面顶底板“三带”发育高度观测研究[J]. 山西煤炭, 2013, 33(12): 34-35.

[8] 胡炳南, 张华兴, 申宝宏. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采指南[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017: 34-35.

[9] 许延春, 李俊成, 刘世奇, 等. 综放开采覆岩“两带”高度的计算

公式及适用性分析[J]. 煤矿开采, 2011, 16(2): 4-7.

[10] 马其华, 曹富荣, 徐壮飞. 复杂结构顶板两带高度计算方法研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(1): 7-10.

[11] 黄学满. 煤矿采场“竖三带”的确定方法及应用[J]. 煤炭科学技术, 2013(增刊 2): 48-50.

[12] 丁鑫品, 郭继圣, 李绍臣, 等. 综放开采条件下上覆岩层“两带”发育高度预计经验公式的确定[J]. 煤炭工程, 2012(11): 75-78.

[13] 路兵, 杨海博. 新疆塔什店矿区导水裂隙带发育高度预测[J]. 山东国土资源, 2024, 40(8): 23-28.

[14] 刘世奇, 许延春, 郭文砚, 等. 一种近距离煤层组(群)两带高度计算方法[P]. 中国专利: CN201610679487. X, 2016-08-17.

[15] 李磊, 王盼盼, 赵蕻. 贵州六盘水水城矿区小牛煤矿钻孔中断层发育特征分析[J]. 山东国土资源, 2015, 31(12): 23-26.

[16] 煤安监调查[2018]14 号. 煤矿防治水细则[S].

[17] 丁亚恒, 张胜军, 朱术云, 等. 大采宽综采工作面导水裂隙带高度探究[J]. 煤炭技术, 2024, 43(1): 166-171.

[18] 陈晴丰, 韩希伟, 王立英. 山东邹平里彦煤矿水体下开采可行性研究[J]. 山东国土资源, 2024, 40(11): 25-32.

[19] 许明能, 姚多喜, 鲁海峰. 五沟煤矿 1011 工作面开采“两带”高度发育的数值模拟分析[J]. 煤矿开采, 2007, 12(5): 64-67.

[20] 梁泽鹏, 姚多喜, 董旭, 等. 基于 FLAC3D 的“两带”高度预测数值模拟[J]. 中州煤炭, 2013(2): 14-16.

[21] 彭苏萍, 凌标灿, 郑高升, 等. 采场弯曲下沉带内部巷道变形与岩层移动规律研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(1): 21-25.

[22] 臧浩, 种衍飞, 冯堂武, 等. 基于 FLAC3D 数值模拟的老采空区剩余沉降量分析计算: 以山东枣庄安博化工项目为例[J]. 山东国土资源, 2015, 31(7): 55-58.

Study on the Height Development of the "Two Zones" of Roof Overburden in Thick Coal Seams in Southwestern Shandong Provice

——Taking the 1305 Working Face of a Certain Coal Mine as an Example

ZHAO Changfeng^{1,2}, LIU Zhengwen^{1,2}, SHEN Lifeng¹, SONG Feng^{1,2}, XU Yang¹

(1. No. 1 Exploration Brigade of Shandong Coalfield Geologic Bureau, Shandong Qingdao 266500, China; 2. Shandong Engineering Research Center for Mine Gas Disaster Prevention, Shandong Qingdao 266500, China)

Abstract: During the process of coal seam mining, the overlying rock of the roof collapses and breaks, and the redistribution of surrounding rock stress can cause the development of mining induced fractures in the overlying rock of the roof, and form artificial collapse zones and water conducting fracture zones. The height of the "two zones" has a significant impact on coal seam mining, affecting mining operations, such as roof water inflow, ground subsidence and roof support. Taking the "two zones" height detection project in the 1305 working face of a certain coal mine as an example, the height of the "two zones" has been calculated and analyzed through empirical formulas, drilling measurements, and numerical simulations. It is showed that the height of the collapse zone in the 1305 working face could be 32.2 m, and the collapse mining ratio could be 4.29. The height of the developed water conducting fracture zone could be 94.4 m, and the fracture mining ratio could be 12.59. It will provide a detection method for obtaining the height of the "two zones" of coal seams in coal mines.

Key words: Thick coal seam; water conducting crack zone; segmented water injection; numerical simulation; southwestern Shandong province