

文章编号:1673-9469(2024)05-0071-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.05.010

厚煤层开采覆岩导水裂隙带发育高度研究

侯晨曦, 杨达明*, 郭延华

(河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 针对水体下采煤时覆岩受扰动后可能导致顶板涌水问题,以掌石沟煤矿15102工作面为研究对象,采用数值模拟、分段封堵测漏与钻孔电视法得到该工作面15#煤层的导水裂隙带发育高度。对模拟和实测成果分析表明:模拟和现场观测的导水裂隙带高度分别为49、48.3 m,最终确定导水裂隙带高度为48.3 m,裂采比为11.78,上界面岩层类型为砂质泥岩,厚度为4.2 m,距煤层约48 m。

关键词: 厚煤层开采;数值模拟;导水裂隙带;钻孔漏失量

中图分类号: TD325

文献标识码: A

Study on Height of Overlying Rock Water-conducting Zone in Thick Coal Seam Mining

HOU Chenxi, YANG Daming*, GUO Yanhua

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: Regarding the issue of roof water inrush caused by disturbance to the overlying rock during coal mining under water bodies, in this paper, the 15102 working face of Zhangshigou coal mine is taken as the research object, and the development height of the water-conducting zone of the 15# coal seam of this working face is obtained by the numerical simulation, segmented plugging and leakage testing and drilling TV method. The simulation analysis and actual measurement results shows that the heights of the water-conducting zone are 49 m and 48.3 m from the simulation and field observation, respectively. The final height of the water-conducting zone is 48.3 m, the fracture-mining ratio is 11.78, and the rock layer type at the upper interface is sandy mudstone, with a thickness of 4.2 m and a distance of about 48 m from the coal seam.

Key words: thick coal seam mining; numerical simulation; water-conducting zone; drilling leakage

煤层采动会引起其周围岩体发生移动、变形或破坏,随着工作面推进,此过程不断重复,最终导致采空区覆岩形成垮落带、裂隙带和弯曲带,统称“三带”^[1]。水体下采煤时,发育严重的裂缝贯通到覆岩含水层后成为“导水”通道,不利于安全开采和水资源保护。因此,准确确定导水裂隙带发育高度对水体下安全开采及矿区生态环境保护具有重要意义^[2-3]。

覆岩裂隙发育高度受多种因素影响,难以建立适用范围广泛的理论模型,杨国勇等^[4]对多种

因素进行分析后认为采厚对其高度影响最大。有学者根据大量实测值回归得到不同采厚和覆岩岩性下的导水裂隙带高度计算公式,但由于代入的变量较少,而实际工况错综复杂,结果大多会出现较大误差^[5-7]。近年来大量学者综合采用多种手段对覆岩破坏规律进行研究,取得了一系列的成果^[8-11]。目前业界对导水裂隙带高度的研究多采用回归统计、类比、计算机模拟、物理实验、现场实测以及针对某特定条件的理论分析等研究方法。常用的现场实测方法有钻孔冲洗液法、钻孔电视

收稿日期:2023-04-29

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52074100);国家自然科学基金资助项目(52104081);河北省自然科学基金资助项目(E2022402031, E2020402041);邯郸市科学技术研究与发展计划项目(19422121008-34)

作者简介:侯晨曦(1997-),男,河南周口人,硕士研究生,从事矿山压力与岩层控制方面的研究。

*通信作者:杨达明(1992-),男,河南新乡人,博士,讲师,从事开采损害与环境保护、矿山压力及岩层控制方面的研究。

法、瞬变电磁法、井下仰孔注水测漏法等^[12-13]。本文以掌石沟煤矿 15102 工作面为研究对象,采用数值模拟与现场实测结合的方法对导水裂隙带发育特征进行分析,可为相似采矿地质条件下的覆岩破坏研究提供一定参考。

1 工程概况

掌石沟煤矿位于山西省高平市,矿区面积 5.476 7 km²,生产规模 90×10⁴ t/a。该矿采用斜井开拓,全部垮落法管理顶板,走向长壁综采一次采全高采煤方法。15102 工作面长 120 m,走向长 1 450 m;地面标高 +940 ~ +1 080 m,井下标高 +826.5 ~ 862.1 m,平均采深约 166 m。煤层厚度 3.96 ~ 4.1 m,平均 4.03 m;倾角 0° ~ 6°,平均 3°。工作面整体呈北高南低趋势、西高东低单斜构造,煤层总体倾向南东 20°,走向北东 70°。依据矿井水文地质资料,15#煤层上覆岩层存在 3 个含水层,含水层整体富水性较弱,但局部为强富水性,需要对导水裂隙带高度进行研究,为 15#煤层安全开采提供技术保障。

2 数值模拟

2.1 建立模型

为掌握掌石沟煤矿 15102 工作面在推进过程中的导水裂隙带发育特征,采用 3DEC 软件对工作面开采进行模拟。以工作面内的钻孔 1-1 作为依据,煤层上方岩层厚度约为 161 m,平均煤厚 4.1 m。设计模型在走向方向推进 220 m,在两侧各留有 40 m 的岩体,最终模型长 300 m,高 80 m,钻孔揭露的 15#煤层上方 52 m 范围内覆岩组合结构如图 1 所示。

柱状	岩性	厚度/m	距煤层高度/m
	砂质泥岩	4.38	51.97
8-1#	煤层	0.77	47.59
	泥岩	0.80	46.82
	砂质泥岩	4.20	46.02
8-2#	煤层	0.40	41.82
	砂质泥岩	0.55	41.42
	粉砂岩	1.15	40.87
	砂质泥岩	5.57	39.72
9#	煤层	0.68	34.15
	炭质泥岩	0.78	33.47
	泥岩	1.17	32.69
K ₄	石灰岩	2.20	31.52
	泥岩	0.50	29.32
11#	煤层	0.30	28.82
	泥岩	2.05	28.52
	石灰岩	0.95	26.47
	泥岩	0.50	25.52
	炭质泥岩	0.25	25.02
	砂质泥岩	1.40	24.77
	粉砂岩	1.45	23.37
	砂质泥岩	2.35	21.92
	炭质泥岩	0.25	19.57
K ₃	石灰岩	2.80	19.32
	泥岩	0.50	16.52
13#	煤层	0.45	16.02
	细粒砂岩	1.55	15.57
	砂质泥岩	1.20	14.02
	细粒砂岩	1.25	12.82
	砂质泥岩	2.30	11.57
	粉砂岩	1.45	9.27
	细粒砂岩	1.40	7.82
K ₂	石灰岩	7.82	0.00
15#	煤层	4.10	

图 1 岩层柱状图

Fig. 1 Rock layer histogram

数值模拟的块体本构模型选择摩尔-库伦破坏准则,节理本构模型选择库伦滑移破坏下的区域接触弹塑性模型。模型 80 m 以上的岩体以加载方式模拟,上部为应力边界条件。载荷设置为均布载荷,模型顶部以上的岩体和表土厚度约 74 m,以均布荷载代替的覆岩平均密度为 2 500 kg/m³,加载压力约为 1.85 MPa。煤层开挖步距为 20 m,共开挖 11 步。

表 1 岩石参数表
Tab. 1 Rock parameters

岩性	密度 /(kg·m ⁻³)	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	黏聚力 /MPa	摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa	法向刚度 /GPa	切向刚度 /GPa
砂质泥岩	2 580	3.72	1.62	3.53	25	2.06	0.06	0.06
泥岩	2 540	1.23	1.06	2.16	24	1.26	0.04	0.04
中粒砂岩	2 630	2.31	1.26	5.92	26	2.86	0.08	0.08
粉砂岩	2 580	2.98	1.88	4.28	23	2.55	0.04	0.04
石灰岩	2 800	14.50	8.91	11.80	39	8.50	0.09	0.09
细粒砂岩	2 610	2.64	1.68	4.36	22	2.32	0.10	0.10
煤	1 400	1.16	0.73	1.54	22	1.03	0.01	0.01

2.2 模拟结果及分析

采动裂隙可分为横向裂隙和竖向裂隙。横向裂隙主要是不同层位之间不协调变形导致岩层之间发生离层现象而产生的,只能导通同一层位水流;竖向裂隙主要表现为岩层破断产生的裂隙,可在竖向方向产生导水通道。因此通过对产生的横向和竖向裂隙进行分析,可以得到导水裂隙带发育情况。不同开挖步距下覆岩的裂隙特征如图 2 所示。

模拟结果表明:随着工作面的推进,采空区上方岩层不断垮落,离层高度不断增加,竖直方向自下而上离层发育程度不断减弱。开挖至 40 m 时,覆岩出现大面积垮落,煤层上方 10.7 m 处出现离层,见图 2(a);开挖至 60 m 时,上方岩层进一步垮落,离层再次向上发育至距煤层 35.6 m,见图 2(b);随着工作面进一步推进(80~220 m),离层不再继续向上发育,并且已有部分离层区域呈闭合趋势,开挖至 160 m 时,可以明显地看出离层已完

全闭合,见图 2(c)(d)(e)。竖向裂隙具有先开裂后闭合的特征。

可总结出覆岩竖向裂隙发育特征(覆岩裂隙特征图中正值为开裂,负值为闭合):开挖至 40 m 时,覆岩上部虽有大量竖向开裂裂隙产生,但煤层上方 10.7 m 处岩层内部的竖向裂隙多为闭合裂隙,形成了隔水岩层;开挖至 60 m 时,在煤层上方 35.6 m 处岩层内部的竖向裂隙为闭合裂隙,形成了隔水岩层,并且原有的部分开裂裂隙逐步演化为闭合裂隙;随着工作面向前推进直至开采结束,采空区中部的大部分竖向裂隙呈闭合状态,而在工作面开切眼位置和终采线附近,竖向裂隙较为发育,这两个区域内竖向裂隙以煤层上方 49 m 处岩层为分界,此岩层内部竖向裂隙较为闭合,而此岩层的上部和下部岩层内均有大量竖向开裂裂隙。由以上对覆岩离层和竖向裂隙发育特征的分析,可以得到 15102 工作面的导水裂隙带高度约为 49 m。

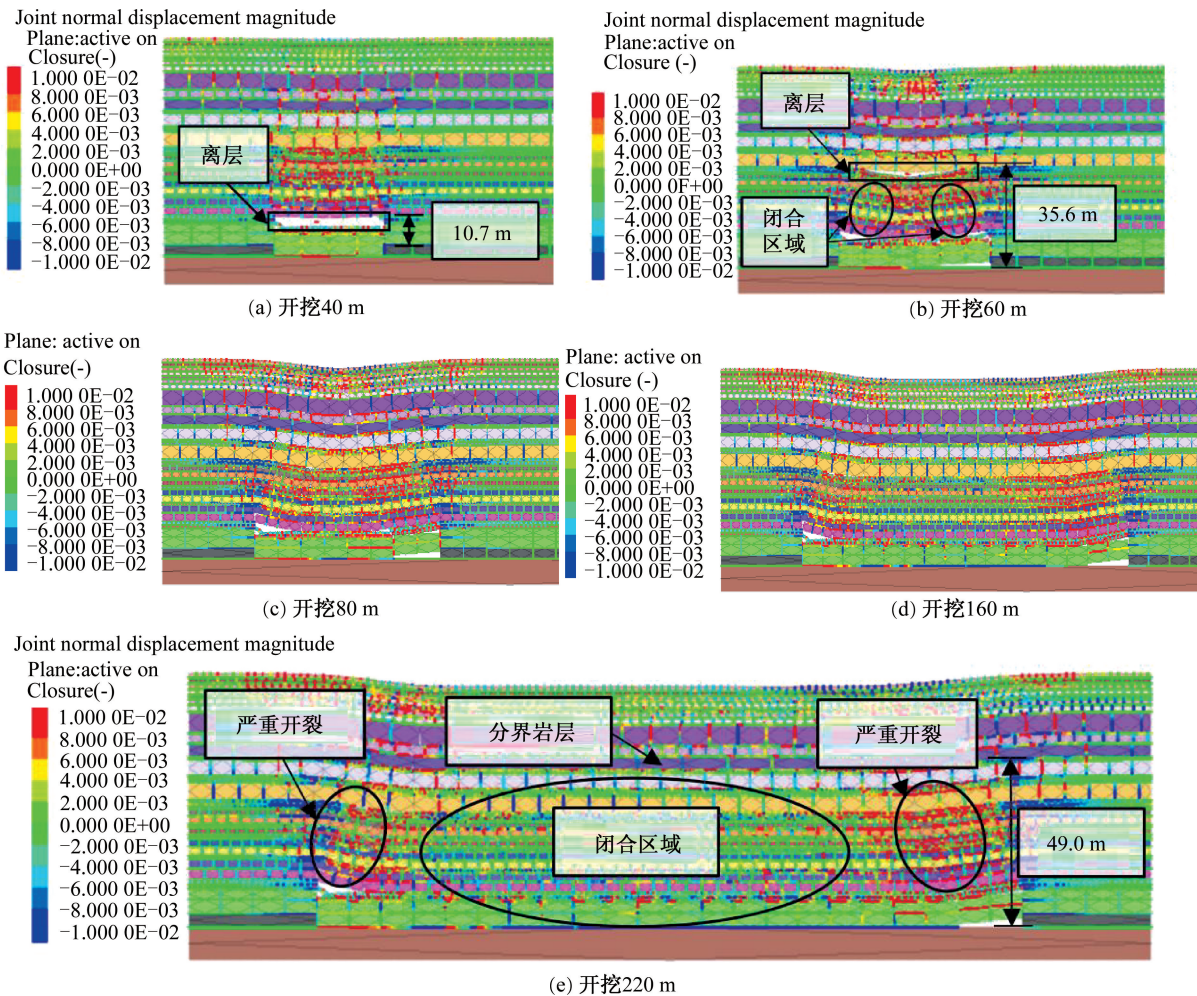


图 2 不同开挖步距下覆岩裂隙特征图

Fig. 2 Fracture characteristics of overburden under different excavation steps

3 现场观测

3.1 观测方案设计

现场采用双端封堵和钻孔电视两种观测方法,15102工作面于2019年12月回采结束,观测时间为2020年12月,采动覆岩已停止发育,满足观测条件,钻孔施工要素见表2。现场观测装置如图3所示,双端封堵系统由双端堵水器、控制台和注水管路组成,将封堵器推入钻孔后通过控制台对胶囊注水,然后对钻杆注水,同时监测水压直至注水量与漏失量达到相对平衡,记录此时漏失量,即完成一次观测。钻孔电视系统由主机、探头编码器等组成,可以实现对钻孔孔壁的成像、录像、关键部位抓拍等,可以直观地看到裂隙发育情况。

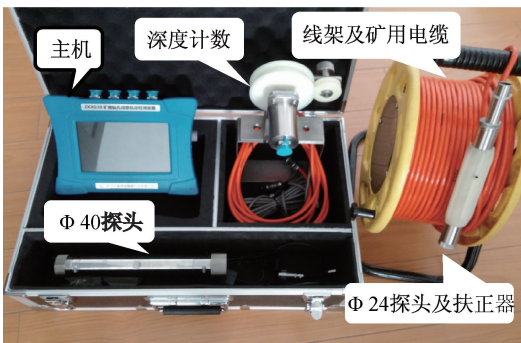
表2 钻孔施工要素表

Tab. 2 Drilling construction elements

孔号	仰角 / (°)	方位角 / (°)	套管段 孔径/mm	观测段 孔径/mm	孔深 /m	孔高 /m
1#	45	N90	113	94	85	60
2#	45	N270	113	94	85	60
3#	40	N270	113	94	94	60



(a) 双端封堵器



(b) 钻孔电视系统

图3 现场观测装置

Fig. 3 Field observation devices

观测钻孔设在15103工作面回风顺槽内(与15102工作面间的煤柱宽度为16m),钻场位置距停采线约70m。设计1个对比孔(1#钻孔)和2个观测孔(2#、3#钻孔)。钻孔布置如图4、图5所示。

3.2 双端封堵测漏结果及分析

对1#孔(对比孔)自下往上进行观测,在孔深

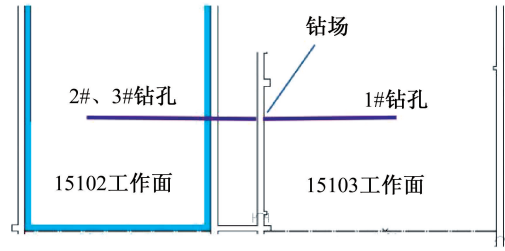


图4 钻孔布置平面图

Fig. 4 Borehole layout plan

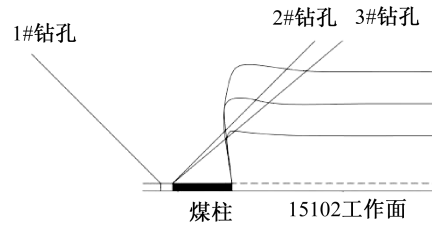


图5 钻孔布置剖面图

Fig. 5 Borehole layout section

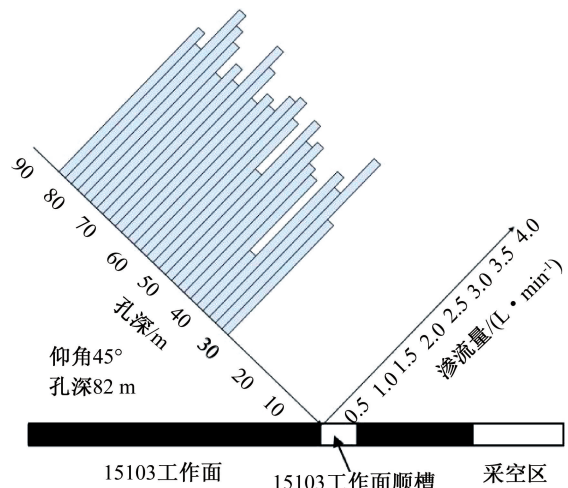


图6 1#孔分段注水岩层渗流量

Fig. 6 Seepage flow of 1#hole sectional water

injection rock layer

30~82m范围内依次分段观测,观测结果如图6所示。从图6可以看出:1#钻孔区域内,孔深30~82m,垂高21~53m阶段,岩层渗水量1.1~3.5L/min。说明岩层渗水量小于3.5L/min时,岩层保持完整状态。

2#钻孔注水漏失量如图7所示。从图中可以看出:2#钻孔观测到的各岩层段注水漏失量(以下均简称漏失量)可分为I、II两个区域。按照由上往下的观测顺序,在区域II内(即孔深70~82m,垂高47.5~57.98m区域),漏失量为2.1~3.4L/min,各段渗透量均小于4L/min,说明此段岩层次生裂隙发育不明显,主要为原生裂隙,裂隙带尚未发育

到此高度;在区域 I (孔深 30~68 m,垂高 21.1~48.1 m 区域)内,岩层漏失量为 16.6~18.5 L/min,说明此时钻孔已经穿入裂隙带内,此区域次生裂隙发育较为明显,岩层导水性较强。在观测过程中,钻孔垂高由 49.5 m 降低至 48.1 m 时,岩层的漏失量发生突变,差值达 13.7 L/min,说明此处(垂高 48.1 m)为导水裂隙带临界高度。

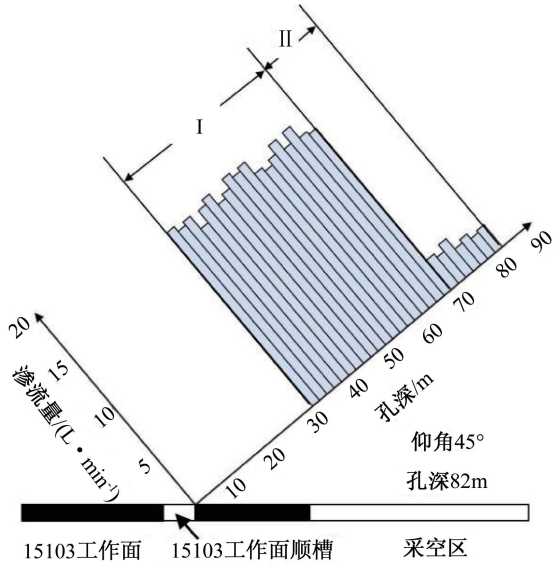


图 7 2#孔分段注水岩层渗流量

Fig. 7 Seepage flow of 2#hole sectional water injection rock layer

3#钻孔漏失量如图 8 所示,在区域II(孔深 74~90 m,垂高 47.6~57.9 m)内,漏失量范围为 2.3~7.3 L/min。区域 I(孔深 30~74 m,垂高 19.3~46.3 m)内,漏失量增至 15.7~18.3 L/min,各岩层段的漏失量均大于 10 L/min。

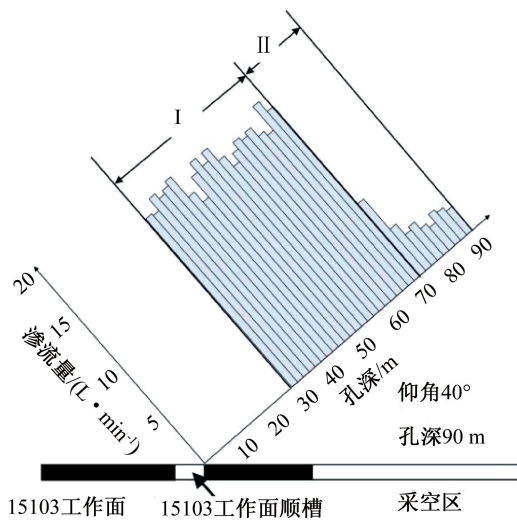


图 8 3#孔分段注水岩层渗流量

Fig. 8 Seepage flow of 3#hole sectional water injection rock layer

本次进行现场作业的 2#、3#钻孔均比较准确地测出了导水裂隙带的上限值,得到 15102 工作面的导水裂隙带发育高度:2#孔: $H_1 = 48.1\text{ m}$,3#孔: $H_2 = 46.3\text{ m}$ 。

3.3 钻孔电视观测结果及分析

2#钻孔电视图像如图 9 所示,2#钻孔自孔深 30.31 m(垂高 21.43 m)处即进入裂隙区,且裂隙

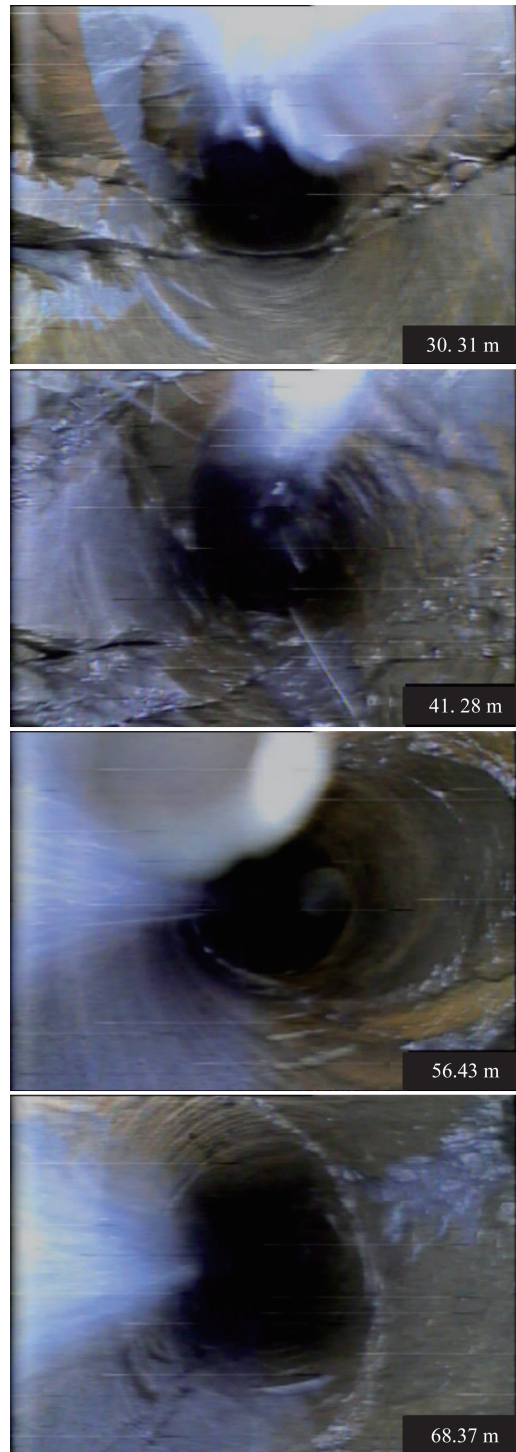


图 9 2#钻孔不同深度图像

Fig. 9 Image of different depths of 2# borehole

较为发育,判断该处位于采空区边界上方,岩层出现较大的不均匀移动,岩层破坏严重。自孔深 41.28 m(垂高 29.19 m)往上横向和竖向裂隙交叉分布,裂隙分布较为均匀;自孔深 56.43 m(垂高 39.9 m)开始覆岩裂隙发育程度减弱,这是由于距离煤层顶板越来越远,受采动影响也越来越小;自 68.37 m(垂高 48.3 m)开始直至孔底,可以明显看出孔壁保持完整,部分孔壁出现原生微小裂隙。

3#钻孔电视图像如图 10 所示,2#钻孔自孔深 29.14 m(垂高 18.65 m)处开始进入裂隙区,裂隙发育明显,岩层破坏严重。从孔深 43.42 m(垂高 27.79 m)往上,裂隙分布较为均匀;从 71.54 m(垂高 46 m)以后,裂隙基本不再发育,孔壁保持较完整,观察结果与漏失规律一致。

综合 2#钻孔和 3#钻孔窥视结果,2 个钻孔所观测到的导水裂隙带分别发育至孔深 68.37 m 和 71.54 m 处,距煤层高度分别为 48.3 m 和 46.0 m,与双端封堵测漏系统观测结果基本一致。

4 导水裂隙带高度对比分析

根据不同方法得到的导水裂隙带高度数据如表 3 所示。可以看出:现场观测结果均表明 2#钻孔导高大于 3#钻孔,且两种方法的不同钻孔导高差值分别为 1.8、2.2 m,差值在 2 m 左右,说明不是偶然误差,分析认为由于 2#钻孔更接近开采边界(图 5),边界处岩层破坏严重,裂隙发育程度更高,因此导水裂隙带高度较大。

表 3 导水裂隙带高度对比 (单位:m)

方法	数值模拟	双端封堵测漏		钻孔电视图像	
		2#孔	3#孔	2#孔	3#孔
H	49	48.1	46.3	48.3	46.1

虽然数值模拟不能完全复现覆岩全部实际情况(如原生裂隙,岩层不同产状等),但通过对开采过程中采动覆岩破断特征进行分析,确定的导水裂隙带临界岩层位置与实测结果一致,可见基于现实条件的适当简化后的数值模型对模拟结果不会造成严重影响,可以满足预测导水裂隙带高度的要求。导水裂隙在临界岩层内的具体高度可结合现场观测等其他方法确定。

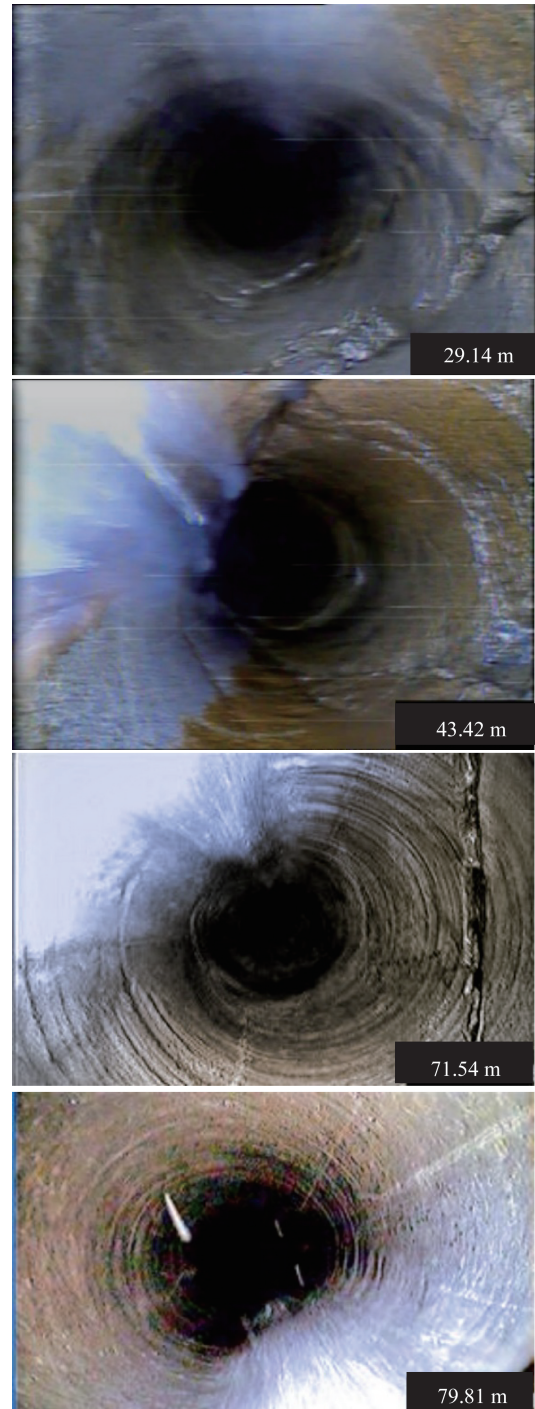


图 10 3#钻孔不同深度图像

Fig. 10 Image of different depths of 3# borehole

5 结论

1) 掌石沟煤矿 15102 工作面覆岩初次垮落步距为 40 m;开采 160 m 时离层和裂隙停止发育;导水裂隙临界岩层为距煤层 47.5 m 的砂质泥岩层。

2) 现场实测确定导水裂隙带最大高度为 48.3 m,裂采比为 11.78;导水裂隙带区域内岩层漏失量在

15.7~18.5 L/min 之间。

3)数值模拟得到的覆岩裂隙特征与现场实测显示的结果基本一致,说明采用数值模拟定性分析与现场定量观测相结合,综合分析得到采动覆岩导水裂隙带高度的方法是科学、有效的。

参考文献:

- [1] 刘天泉. 矿山岩体采动影响与控制工程学及其应用[J]. 煤炭学报, 1995(1): 1-5.
- [2] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010: 3-6.
- [3] 郭文兵. 煤矿开采损害与保护[M]. 北京: 应急管理出版社, 2019.
- [4] 杨国勇, 陈超, 高树林, 等. 基于层次分析-模糊聚类分析法的导水裂隙带发育高度研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 206-212.
- [5] 国家安全监管总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局, 等. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [6] 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水细则[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018.

(上接第55页)

确定的吊杆力进一步优化,对拱肋端部位置加以约束后,使得整体上最大弯矩下降,得到更合理的吊杆力及成桥状态,同时也验证该桥的成桥杆力满足设计要求。

4)要确定吊杆初拉力,先以优化的目标吊杆力作为初拉力赋予给索单元进行正装迭代,利用杆力影响矩阵,依据最小二乘法原理修正施工过程中的杆力值,与合理成桥杆力状态对比差值控制在1%之内,实现至预先设定的成桥内力,同时验证该桥的成桥杆力满足施工阶段的要求。

参考文献:

- [1] 周绪红, 戴鹏, 狄谨, 等. 钢箱梁斜拉桥成桥索力优化分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(2): 19-23.
- [2] 徐岳, 展丙来, 李扬, 等. 钢管混凝土拱桥斜拉扣挂施工扣索索力的优化计算方法[J]. 公路交通科技, 2016, 33(6): 61-67.
- [3] 刘世建. 基于加权影响矩阵的提篮拱二次调索方法研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2019, 36(2): 43-46.
- [4] 李健, 辛克贵, 张崇厚, 等. 梁拱组合体系桥梁的设计实例[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2008(1): 5-8.

- [7] 胡小娟, 李文平, 曹丁涛, 等. 综采导水裂隙带多因素影响指标研究与高度预计[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 613-620.
- [8] 刘英锋, 王世东, 王晓蕾. 深埋特厚煤层综放开采覆岩导水裂缝带发育特征[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1970-1976.
- [9] 高延法, 黄万朋, 刘国磊, 等. 覆岩导水裂缝与岩层拉伸变形量的关系研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 301-306.
- [10] 杜文刚, 柴敬, 张丁丁, 等. 采动覆岩导水裂隙发育光纤感测与表征模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1565-1575.
- [11] 袁峰, 申涛, 谢晓深, 等. 基于深度学习的地震多属性融合技术在导水裂隙带探测中的应用[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3234-3244.
- [12] 杨达明, 郭文兵, 赵高博, 等. 厚松散层软弱覆岩下综放开采导水裂隙带发育高度[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3308-3316.
- [13] 谭毅, 郭文兵, 杨达明, 等. 非充分采动下浅埋坚硬顶板“两带”高度分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(5): 845-851.

(责任编辑 王利君)

- [5] 代金鹏. 128 m 系杆拱桥成桥及施工阶段索力优化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- [6] 傅金龙, 黄天立. 刚性系杆拱桥成桥吊杆索力优化方法的适用性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(4): 6-13.
- [7] 朱利明, 申昆, 濮卫, 等. 空间三索面斜吊杆非对称系杆钢拱桥合理成桥索力优化[J]. 世界桥梁, 2020, 48(6): 54-59.
- [8] 虞建成, 邵荣光, 王小林. 系杆拱桥吊杆初始张拉力及施工控制[J]. 东南大学学报, 1998, 28(3): 112-116.
- [9] 王震, 卫东, 沈剑卿. 斜跨曲线拱桥施工阶段索力优化分析[J]. 黑龙江交通科技, 2017(6): 90-92.
- [10] 王鹏亮. 吊杆拱桥索力二次调整几何求解与优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [11] 曹璐, 秦大燕. 中承式提篮拱桥“过程最优, 结果可控”索力优化法研究[J]. 世界桥梁, 2022, 50(6): 52-58.
- [12] 计静, 罗干, 姜信贺, 等. 斜靠式钢箱系杆拱桥成桥索力检测及稳定性分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40(1): 41-48.
- [13] 赵伟, 郑剑涵, 陆森强. 特大跨系杆钢拱桥成桥状态与吊杆张拉力优化分析赵伟[J]. 中外公路, 2016, 36(1): 113-118.

(责任编辑 王利君)