



神东矿区采动裂隙岩体自修复特征研究

李全生 鞠金峰 许家林 曹志国 张凯 王晨煜 郭俊廷

引用本文：

李全生, 鞠金峰, 许家林, 等. 神东矿区采动裂隙岩体自修复特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 12–22.
LI Quansheng, JU Jinfeng, XU Jialin. Self-healing law of mining fractured rock mass in Shendong coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 12–22.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1854>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

化学沉淀修复采动破坏岩体孔隙/裂隙的降渗特性试验

Experimental study on water permeability decrease character due to restoration function on chemical precipitation on holes or fractures in mining failure rock mass

煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f58994e7-ddbe-4fcb-8c94-f9d7a0b94bcc>

裂隙岩体水平孔注浆浆液扩散规律研究

Study on diffusion law of grouting slurry in horizontal hole in fractured rock mass

煤炭科学技术. 2022, 50(7): 233–243 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/aa5717b9-82cf-4be5-9c6b-57d9db04f4fe>

采动含水层生态功能修复研究进展

Progress of ecological remediation technology of mining-damaged aquifer

煤炭科学技术. 2020, 48(9): 102–108 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d6dc56c3-662f-4427-b66e-7692ee24172b>

裂隙岩体注浆理论研究进展及展望

Advance and review on grouting critical problems in fractured rock mass

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 112–126 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8b89b4c2-0db0-4d63-984e-6ea5c668fa1f>

基于浆液岩体耦合效应的裂隙注浆扩散机制研究

Research on the mechanism of fracture grouting diffusion and its application based on slurry–rock mass coupling effect

煤炭科学技术. 2024, 52(7): 158–167 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1239>

弱胶结砂质泥岩注水软化与渗流特性试验研究——以神东矿区为例

Experimental study on water-softening and seepage characteristics of weakly cemented sandy mudstone: Taking Shendong Coal Mining Area as an example

煤炭科学技术. 2022, 50(2): 195–201 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/33ceb135-2b09-4f41-9a1e-e110bd6dee1e>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

李全生,鞠金峰,许家林,等.神东矿区采动裂隙岩体自修复特征研究[J].煤炭科学技术,2023,51(8):12-22.
LI Quansheng, JU Jinfeng, XU Jialin, et al. Self-healing law of mining fractured rock mass in Shendong coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 12-22.

神东矿区采动裂隙岩体自修复特征研究

李全生^{1,2},鞠金峰^{3,4},许家林⁵,曹志国^{1,2},张凯^{1,2},王晨煜⁵,郭俊廷^{1,2}

(1. 煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室,北京 100011; 2. 国家能源投资集团有限责任公司,北京 100011; 3. 中国矿业大学 矿山互联网应用技术国家地方联合工程实验室,江苏 徐州 221008; 4. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心,江苏 徐州 221008; 5. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

摘要:针对采动裂隙岩体在煤层采后长期演变过程中易发生降渗自修复的客观现象,以神东补连塔煤矿12401工作面和大柳塔煤矿52306工作面为典型试验区,开展覆岩不同区域裂隙岩体自修复规律的工程探测与理论研究,揭示了采后覆岩导水裂隙长期自修复过程的演变规律。结果表明,两矿试验面采动覆岩分别在采后15 a和7.3 a均获得了较好的自修复效果,在原先导水裂隙带范围出现导水的区域已明显减少,垮落带虽仍导水,但高度也已有所降低。通过将覆岩由原先导水变为隔水的自修复区段垂向长度占导水裂隙带高度的比值作为自修复率进行统计,得到12401试验面在开采边界附近及倾向中部覆岩中的自修复率已分别达到59.5%和53.5%,52306试验面在对应区域自修复率分别为25.8%和47.5%;因12401试验面采后年限更长、煤层埋深更大,其裂隙岩体自修复效果明显偏好。受覆岩纵向不同层位岩层赋存差异、横向不同区域初始垮裂程度的影响,自修复区域的分布常易呈现离散非连续性,其中间隔的未修复区一般对应于关键层或厚硬岩层位置,且采后年限越短、距开采边界越近,这种离散性越显著。采动裂隙岩体的自修复实际是多因素综合影响下的降渗演变过程,对于神东矿区开采条件,在煤层采后1.5~2 a时间内,是以应力压实作用引起的残余沉降为主导影响自修复进程,这在采区中部覆岩中体现相对显著;而后则一直以采动地下水与裂隙岩体或采空区CO₂等气体发生的水-岩或水-气-岩相互作用为主导影响自修复进程,即相关作用过程产生的衍生物对裂隙的充填封堵效果以及裂隙面受冲蚀后粗糙度降低程度直接影响裂隙自修复效果或程度。因此,采后覆岩中是否长期存在水体渗流决定了裂隙岩体实现自修复的难易程度;神东多数矿井覆岩导水裂隙一般直接沟通第四系松散层或地表,且近年雨水充沛,这为采动覆岩中水-岩或水-气-岩相互作用产生及促进裂隙自修复提供了优越条件。

关键词:神东矿区;裂隙岩体;钻孔探测;自修复;绿色开采

中图分类号:TD325 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2023)08-0012-11

Self-healing law of mining fractured rock mass in Shendong coalfield

LI Quansheng^{1,2}, JU Jinfeng^{3,4}, XU Jialin⁵, CAO Zhiguo^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}, WANG Chenyu⁵, GUO Junting^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 100011, China; 2. China Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing 100011, China; 3. The National and Local Joint Engineering Laboratory of Internet Application Technology on Mine, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 4. IoT Perception Mine Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 5. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The objective phenomenon of seepage reduction and self-healing is easy to occur in the mining fractured rock mass after long-term evolution process of coal seam after mining. In survey of this phenomenon, taking the No. 12401 work face of Bulianta Coal Mine and the No. 52306 work face of Daliuta Coal Mine in Shendong as typical test areas, the engineering exploration and theoretical research

收稿日期:2022-11-07 责任编辑:常琛 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2022-1854

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFC2902104);国家自然科学基金资助项目(51604259)

作者简介:李全生(1965—),男,河南洛阳人,教授级高级工程师,博士。E-mail: 10000424@shenhua.cc

通讯作者:鞠金峰(1986—),男,江苏如皋人,副研究员,博士。E-mail: jjfcumt@163.com

on the self-healing law in different areas of overburden were carried out. The evolution law of long-term self-healing process of overburden after mining was revealed. The results show that the fractured overburden of the two coal mines had achieved good self-healing effects 15 years and 7.3 years after mining, respectively. The areas with water conduction within the original water-conducting fractured zone have been significantly reduced. Although the caved zone still conducts water, the height has also been reduced. By taking the ratio of the vertical length of the self-healing section in overburden from the original water diversion to the water isolation to the height of the water-conducting fractured zone as the self-healing recovery rate for statistics, it is obtained that the self-healing recovery rate of No. 12401 work face in the overburden near the mining boundary and in the middle of the dip has reached 59.5% and 53.5% respectively, and the self-healing recovery rate of 52306 work face in the corresponding area is 25.8% and 47.5% respectively. Due to that No. 12401 work face has mined for a longer time and has a larger coal seam burial depth, its self-healing effect of fractured overburden is obviously better. Affected by the occurrence difference of different strata in the vertical direction of the overburden and the initial damage degree in different areas in the horizontal direction, the distribution of the self-healing area is often discrete and discontinuous, in which the interval of the unrepaired area generally corresponds to the position of the key stratum or thick and hard rock layer, and the shorter the post mining life and the closer to the mining boundary, the more significant the dispersion. The self-healing effect of mining fractured rock mass is actually a process of permeability reduction and evolution under the comprehensive influence of multiple factors. For the mining conditions in Shendong coalfield, the residual settlement caused by stress compaction plays a leading role in the initial process within 1.5 to 2 years after coal mining, which is relatively significant in the overburden in the middle of the mining area. Then, the self-healing process has been dominated by the water-rock or water-gas-rock interactions in goaf. That is, the filling and sealing effect of the derivatives produced in the relevant process on the fractures and the roughness reduction of the fracture surface induced by hydraulic erosion directly affect the self-healing results. Therefore, whether there is long-term water seepage in the overburden after mining determines the difficulty of self-healing of fractured rock mass. Water conducting fractures in the overburden of most mines in Shendong are generally directly connected to the Quaternary loose layer or surface, and in recent years, there is abundant rainfall, which provides superior conditions for the generation of water-rock or water-gas-rock interactions and the promotion of self-healing effect.

Key words: Shendong coalfield; fractured rock mass; borehole detection; self-healing effect; green mining

0 引言

神东矿区是我国典型的高产高效采煤矿区,煤炭资源丰富、开采强度大,为西北部能源供给作出了重大贡献。然而,大规模采煤同时也对矿区生态环境造成严重影响,导致地下水位下降、土地退化等问题突出。近年来,矿区虽逐年加大对地表生态修复方面的研发投入,并取得显著效果^[1-3],但仍存在修复生态自维持能力低、实施成本高等缺点。如何制定形成适应神东采损条件的高效、低成本修复措施,是矿区亟待解决的重大技术难题。

实际上,已有不少研究与实践发现,煤层开采引起的垮裂岩体或受损地表结构普遍具有一定的自修复能力^[4-7],在采后长期时间的应力压实与水-岩或水-气-岩相互作用下^[7-10],垮裂岩体会逐步由高渗状态转变为低渗、甚至隔水状态,受损的地表结构(如地表变形、地裂缝等)会逐步稳定愈合,由此带来矿区地下水位回升、植被长势变好等生态功能恢复现象。可见,若能遵循采动覆岩由垮裂到愈合的动态演变过程及规律,因地制宜地采取合理的引导修复或治理措施^[2-3,11],势必能产生事半功倍的实施效果。所以,首要任务,需研究掌握神东矿区煤层采动破坏或裂隙发育岩体的自修复特征与规律。

文献[4]以鄂尔多斯东胜矿区万利一矿开采条件为工程背景,采用地面钻孔探测方法,得到了单一和煤层群开采后历时8~12 a垮裂岩体的自修复特征。该矿地质开采条件虽与神东矿区较为类似,但由于其开采当年未能开展覆岩初始破坏状态的探测工作,它并未获得裂隙岩体发生自修复的绝对变化特征;选取神东矿区补连塔煤矿和大柳塔煤矿这2个典型矿井为试验区,在采煤当年曾开展过覆岩导水裂隙发育探测的区域,时隔多年后再次实施探测工作,从而得到两者的差异,揭示裂隙岩体的自修复特征,最终为矿区采损生态的引导修复提供基础参照。

1 典型矿井裂隙岩体自修复的工程探测

补连塔煤矿和大柳塔煤矿位于神东矿区的中心地带,其赋煤条件代表了神东大部分区域的地质特征,因而选取它们作为本次探测的试验区。综合采用钻孔冲洗液漏失量法和钻孔电视观测,以获得工作面采后多年覆岩采动裂隙分布变化情况,揭示其自修复特征。其中,补连塔煤矿选取12401工作面为试验区,该工作面曾于2007年7月开展探测^[12],距本次探测已有15 a;大柳塔煤矿选取52306工作面为试验区,该工作面曾于2015年3月开展探测^[13],

距本次探测已有 7.3 a。

1.1 补连塔煤矿 12401 试验面探测

1) 基本条件。补连塔煤矿 12401 工作面位于 12 煤四盘区, 是该盘区的首采工作面, 其西翼为盘区边界煤柱, 东翼为 12402 接续工作面(图 1)。工作面

开采煤层埋深 221~283 m, 上覆基岩厚度 180~240 m, 地表大多被第 4 系松散层覆盖; 煤层厚度 3.4~6.4 m, 平均厚度 4.6 m; 覆岩柱状如图 2 所示。工作面走向推进长度 4 629 m, 倾向宽 276 m, 设计采高 4.3 m。

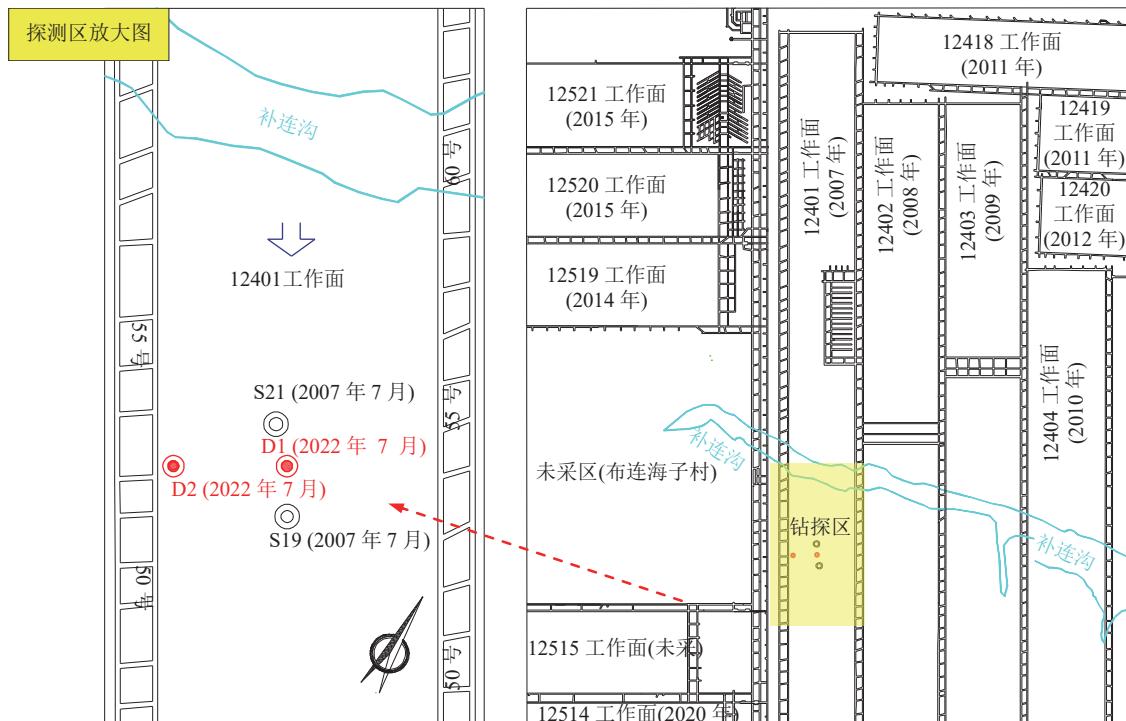


图 1 补连塔煤矿 12401 工作面探测钻孔布置平面图

Fig.1 Layout of detection boreholes at No. 12401 work face of Bulianta Coal Mine

12401 工作面当年在距离开切眼 2 164 m 位置共布置了 S19 和 S21 两个探测孔, 均位于工作面倾向中部, 两孔间距 88.9 m, 终孔深度分别为 243.7 m 和 238.6 m, 如图 1 所示。本次探测, 在上述 2 个钻孔位置附近再次施工了 D1、D2 探测钻孔, 其中 D1 孔位于工作面倾向中部, 并处于 S19 和 S21 之间, D2 钻孔位于工作面西翼开采边界内侧附近, 距离边界煤柱 20 m; 两孔终孔深度均为 250 m, 直至 1~2 煤层底板。

2) 采后当年历史探测结果(S19 孔、S21 孔)^[12]。S19 钻孔在钻进至孔深 86.7~88.0 m 阶段, 冲洗液漏失量从 0.125 L/(s·m) 迅速升至 2.167 L/(s·m), 在钻进 83.7~87.0 m 阶段孔内水位由 11.45 m 瞬间漏失至孔底, 并在孔深 87.1 m 时出现持续的钻孔进风现象。后续在钻进至孔深 120.0 m 时曾出现掉钻、卡钻现象, 钻进至 223.5 m 时, 又出现多次卡钻现象。经综合分析判断, 孔深 86.7 m 和 223.5 m 分别为导水裂隙带和垮落带的顶界, 对应“两带”高度分别为 153.9 m 和 17.1 m。类似地, S21 钻孔在孔深 97.0~97.5 m

阶段, 冲洗液漏失量从 0.006 5 L/(s·m) 迅速升至 29.96 L/(s·m), 孔内水位则由 3.85 m 瞬间漏失至孔底; 在钻进至孔深 217.9 m 后, 同样出现多次卡钻现象。经过综合分析判断, 孔深 97.0 m 和 217.9 m 分别为导水裂隙带和垮落带的顶界, 对应“两带”高度分别为 140.6 m 和 19.7 m。

3) 本次探测结果(D1 孔、D2 孔)。D1 孔、D2 孔钻进过程的冲洗液漏失量和孔内水位变化情况如图 3 所示。D1 孔在浅部区段钻进过程中, 钻孔冲洗液漏失量普遍偏小, 基本处于 0.1~0.2 L/(m·s); 直至钻进孔深 110.0 m 时, 冲洗液漏失量突然增大至 6.04 L/(m·s), 孔内水位随即快速下降; 继续钻进至孔深 118.6 m 时, 冲洗液漏失量又减小为 0.75 L/(m·s), 且孔内水位出现缓慢回升; 直至孔深 174.4 m, 冲洗液漏失量再次突增, 同时孔内水位漏至孔底; 且后续钻进直至终孔一直维持这种冲洗液大量漏失现象。可见, 在孔深 110.0~118.6 m 以及 179.1 m 至终孔的区段, 仍存在裂隙显著发育现象。D2 孔探测结果与 D1 孔基本相同, 但它在孔深 110.0~118.6 m 范围并

层号	厚度/m	埋深/m	岩性	柱状	关键层
1	57.60	57.60	风积砂		
2	1.25	58.85	砂砾岩		
3	1.58	60.43	细粒砂岩		
4	10.72	71.15	砂砾岩		
5	0.80	71.95	粗粒砂岩		
6	8.50	80.45	砂砾岩		
7	4.94	85.39	含砾中砂岩		
8	2.60	87.99	砾岩		
9	3.65	91.64	粗粒砂岩		
10	23.61	115.25	砾岩		
11	1.50	116.75	粗粒砂岩		
12	8.21	124.96	砾岩		
13	1.40	126.36	粗粒砂岩		
14	3.87	130.23	砂质泥岩		
15	10.62	140.85	粉砂岩		
16	8.88	149.73	砂质泥岩		
17	32.07	181.80	细粒砂岩		主关键层
18	5.90	187.70	砂质泥岩		
19	12.92	200.62	粉砂岩		亚关键层
20	3.30	203.92	粗粒砂岩		
21	3.86	207.78	中粒砂岩		
22	1.18	208.96	11煤		
23	2.34	211.30	细粒砂岩		
24	4.30	215.60	粉砂岩		
25	5.00	220.60	中粒砂岩		
26	0.17	220.77	12#煤		
27	9.91	230.68	粉砂岩		亚关键层
28	9.60	240.28	泥岩		
29	1.32	241.60	砂质泥岩		
30	5.92	247.52	12煤		

图 2 12401 工作面覆岩柱状

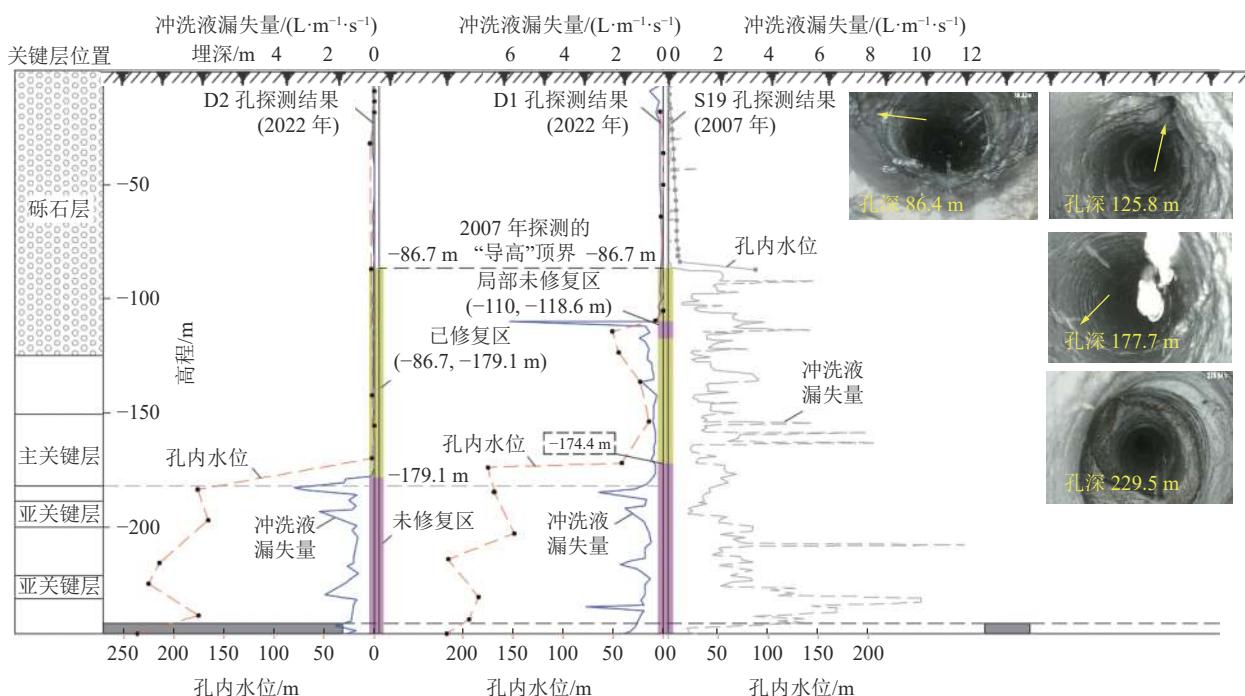
Fig.2 Overburden histogram of No. 12401 work face

未出现冲洗液大量漏失现象, 直到钻进至孔深 179.1 m 时才开始表现出冲洗液显著漏失现象; 当钻进至孔

深 243.5 m 时, 陆续出现 2 次掉钻现象, 掉钻深度 0.3 ~ 0.4 m。

而钻孔电视的观测结果显示, 无论是 D1 还是 D2 孔, 在孔深 86 m 左右开始陆续出现孔壁裂隙发育或破坏的痕迹; 直至孔深 177 m 左右, 这种裂隙发育与破坏的密集程度显著增大。这与工作面采后当年开展的钻探结果相符, 当年施工的 S19 钻孔探测时即是在孔深 86.7 m 位置开始出现冲洗液大量漏失和水位突降现象。可见, 经过 15 a 时间的演变, 覆岩中虽然仍能探测到裂隙发育的显著痕迹, 但其导水渗流性能相比初始状态已发生较大改变, 体现出裂隙自修复的良好效果。利用钻孔电视的观测结果, 结合孔壁围岩的破坏情况, 判断孔深 229.5 m 位置开始进入垮落带, 对应垮落带高度为 12.5 m。

4) 采后 15a 前后对比的自修复特征。通过将工作面采后 15 a 前后的探测结果进行对比后发现(图 3), 采动覆岩裂隙自修复现象显著。在原先孔深 86.7 ~ 174.4 m 钻进范围内出现的冲洗液大量漏失现象, 本次探测时并未出现, 仅 D1 孔在孔深 110.0 ~ 118.6 m 的局部范围出现暂时漏液现象。说明, D1 孔对应采区中部区域覆岩在埋深 86.7 ~ 110.0 m 和 118.6 ~ 174.4 m 区段范围的导水裂隙已实现自修复, 埋深 110.0 ~ 118.6 m 区段仍存在导水裂隙未修复现象, 这与采后覆岩在该区域破坏程度较高、裂隙发育



注: S19 和 S21 钻孔的探测结果基本相同, 故图中仅以 S19 孔的探测结果为代表^[12]。

图 3 补连塔煤矿 12401 工作面采后 15a 覆岩垮裂状况的钻探结果

Fig.3 Drilling results in No.12401 work face of Bulianta Coal Mine 15 years after mining

较明显有关 (S19 孔曾在此出现掉钻、卡钻); 而 D2 孔对应开采边界附近覆岩在埋深 86.7~179.1 m 区段的导水裂隙已实现自修复。可见, 开采边界附近覆岩导水裂隙自修复效果相对偏优。

1.2 大柳塔煤矿 52306 试验面探测

大柳塔煤矿 52306 工作面位于 5-2 煤三盘区, 其南翼为邻近已采的 52305 工作面采空区, 北翼为接续开采的 52307 工作面 (图 4)。工作面对应地面标高 +1 160.8 ~ +1 216.2 m, 底板标高 +1 009.87 ~ +1 024.97 m; 煤层厚度 7.2 ~ 7.6 m, 平均 7.35 m; 上覆岩层柱状如图 5 所示。工作面走向推进长度 1 285 m, 倾向宽 292.5 m, 设计采高 6.6 m, 采用 7.0 m 支架进行回采。

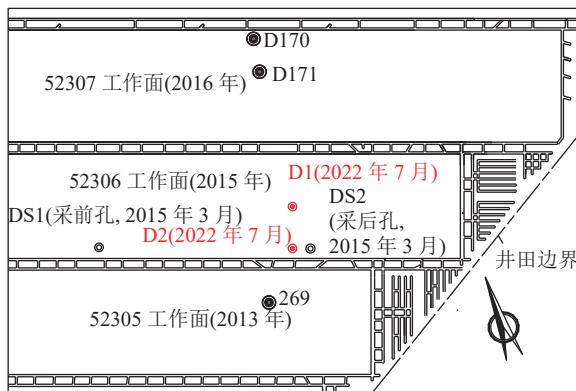


图4 大柳塔煤矿 52306 工作面探测钻孔布置
Fig.4 Layout of detection boreholes at No.52306 work face of
Daliuta Coal Mine

52306 工作面当年曾在距开切眼 412.6 m 和 980.9 m 位置分别布置了采后孔 DS2 和采前孔 DS1, 两孔均位于工作面区段煤柱附近, 距煤柱边界 26 m; 两孔终孔深度 165 m, 如图 4 所示。本次探测, 在采后孔 DS2 附近对应工作面倾向中部和开采边界附近分别布置了 D1、D2 探测钻孔, 两孔终孔深度 190 m, 直至 5-2 煤底板。其中 D2 孔与 DS2 孔一样距煤柱边界 26 m, 与 DS2 孔间距 48.5 m, 与 D1 孔间距 112.4 m。

1) 采后当年历史探测结果(DS2孔)^[13]。因DS1采前孔冲洗液漏失并不明显,故本节主要叙述DS2采后孔钻进过程的探测结果。当DS2钻进至31.8 m时,开始出现孔口不返浆现象,对应冲洗液漏失量增至3.25 L/(m·s);而后钻进至35.8 m时,孔口恢复返浆,但冲洗液漏失量处于0.6~1.3 L/(m·s)的偏高水平;继续钻进至46.3 m时,再次出现孔口不返浆,且孔内水位降至孔底。此后钻进过程冲洗液一直呈现较高漏失量。同时,钻孔钻进至孔深146.3 m时出现

层号	厚度/m	埋深/m	岩性	柱状	关键层
1	4.78	4.78	黄土		
2	1.90	6.68	细粒砂岩		
3	0.35	7.03	22 上煤		
4	1.32	8.35	泥岩		
5	3.34	11.69	细粒砂岩		
6	6.47	18.16	粉砂岩		
7	0.66	18.82	22 煤		
8	4.41	23.23	粉砂岩		
9	1.00	24.23	泥岩		
10	3.65	27.88	粉砂岩		
11	0.60	28.48	中粒砂岩		
12	3.85	32.33	粉砂岩		
13	0.89	33.22	细粒砂岩		
14	3.00	36.22	粉砂岩		
15	0.80	37.02	泥岩		
16	1.55	38.57	粉砂岩		
17	1.10	39.67	泥岩		
18	0.80	40.47	细粒砂岩		
19	1.72	42.19	粉砂岩		
20	1.70	43.89	细粒砂岩		
21	2.37	46.26	粉砂岩		
22	0.35	46.61	煤线		
23	0.58	47.19	粉砂岩		
24	0.18	47.37	煤线		
25	0.34	47.71	粉砂岩		
26	0.35	48.06	31 煤		
27	3.55	51.61	泥岩		
28	13.43	65.04	中粒砂岩		
29	2.10	67.14	砂质泥岩		
30	1.18	68.32	细粒砂岩		
31	5.40	73.72	粉砂岩		
32	0.88	74.60	砂质泥岩		
33	8.98	83.58	粉砂岩		
34	3.00	86.58	中粒砂岩		
35	4.46	91.04	粉砂岩		
36	0.35	91.39	煤线		
37	4.43	95.82	粉砂岩		
38	1.15	96.97	砂质泥岩		
39	5.58	102.55	粉砂岩		
40	1.30	103.85	粗粒砂岩		
41	1.68	105.53	粉砂岩		
42	0.95	106.48	中粒砂岩		
43	0.44	106.92	42 煤		
44	6.09	113.01	粉砂岩		
45	1.35	114.36	中粒砂岩		
46	0.57	114.93	煤线		
47	4.92	119.85	细粒砂岩		
48	4.17	124.02	粉砂岩		
49	1.50	125.52	中粒砂岩		
50	1.80	127.32	粉砂岩		
51	0.60	127.92	砂质泥岩		
52	3.84	131.76	细粒砂岩		
53	1.55	133.31	泥岩		
54	1.25	134.56	中粒砂岩		
55	0.25	134.81	煤线		
56	0.24	135.05	细粒砂岩		
57	3.75	138.80	粉砂岩		
58	0.15	138.95	44 煤		
59	3.50	142.45	粉砂岩		
60	4.22	146.67	细粒砂岩		
61	0.80	147.47	砂质泥岩		
62	27.64	175.11	中粒砂岩		
63	2.07	177.18	粉砂岩		
64	7.14	184.32	52 煤		

图 5 52306 工作面覆岩柱状
Fig.5 Overburden histogram of No.52306 work face

吸风现象,钻进至孔深 149.0 处发生 0.30 m 掉钻,后续又在孔深 163.8 m 处,再次发生掉钻,掉钻高度达 0.50 m,孔内吸风瞬间加剧,可听到风声,并发生卡钻。

综合分析判定孔深 46.3 m 和 163.8 m 处分别为导水裂隙带和垮落带的顶界, 对应“两带”高度分别为 137.3 m 和 19.8 m。

2) 本次探测结果(D1、D2 孔)。D1、D2 孔钻进过程中冲洗液漏失量与孔内水位变化曲线如图 6a 所示。D1 孔钻进至孔深 47 m 时, 孔口出现数次短暂不反浆现象, 但冲洗液漏失并不明显, 基本处于 $0.06 \sim 0.07 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$; 继续钻进至孔深 51.5 m 时, 孔口

不再反浆, 冲洗液漏失量迅速升至 $0.55 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$; 后续钻进过程冲洗液漏失量基本维持在 $0.4 \sim 0.7 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 范围, 但从孔深 56.7 m 测得水位为 53 m 后, 孔内水位基本保持不变, 说明对应范围无明显裂隙发育现象; 直至孔深 116.5 m 后, 孔内水位由 49.5 m 开始持续快速下降, 并在孔深 147.5 m 处基本漏至孔底。同时, 在钻进至孔深 172.2 m 时, 还曾出现 3 次掉钻现象, 掉钻深度 $0.2 \sim 0.3 \text{ m}$ 。

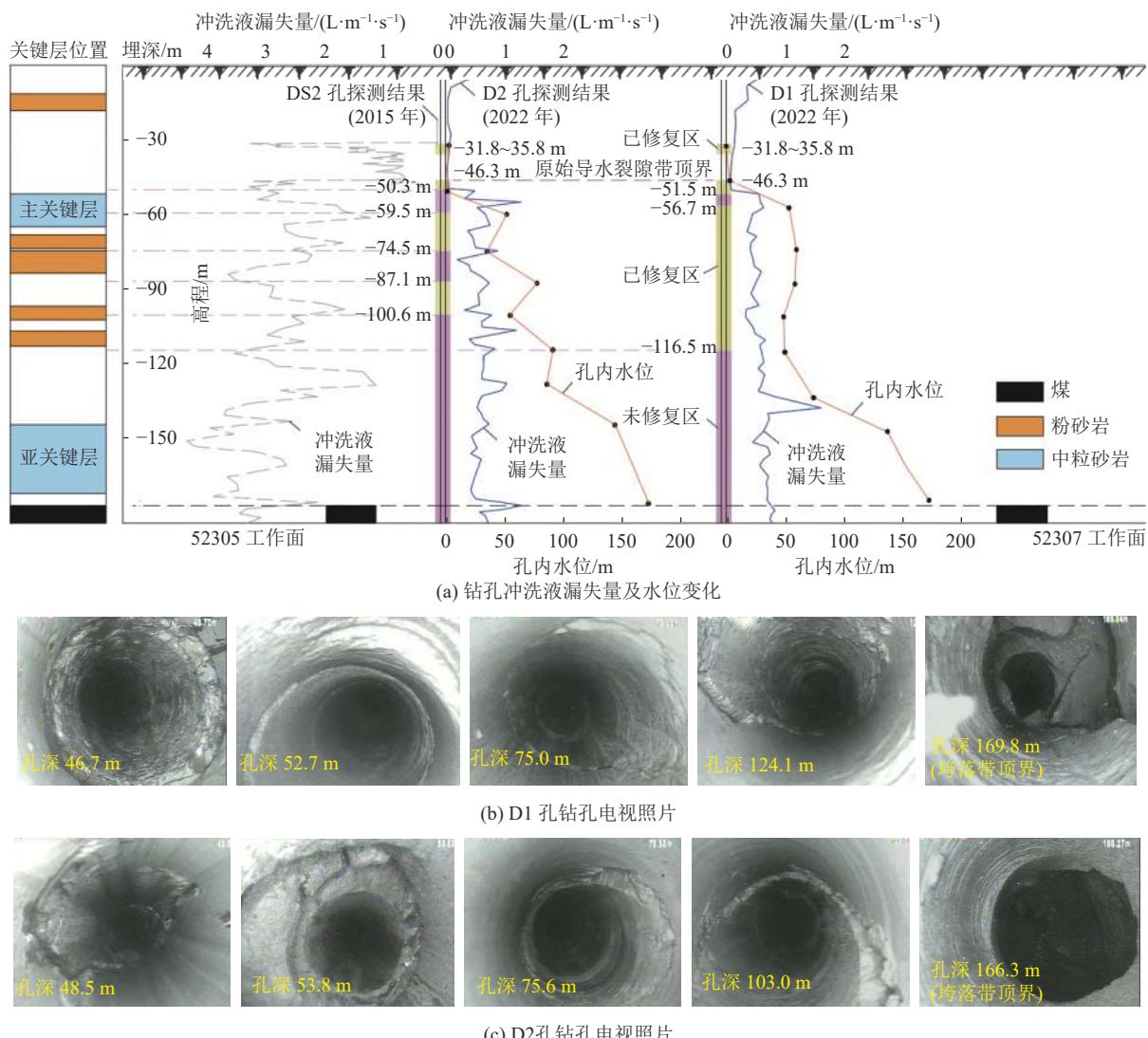


图 6 大柳塔煤矿 52306 工作面采后 7.3 a 覆岩垮裂状况的探测结果

Fig.6 Drilling results in No.52306 work face of Daliuta Coal Mine 7.3 years after mining

D2 孔自孔深 50.3 m 位置开始孔口反浆量明显减小, 冲洗液漏失量由原先的 $0.02 \sim 0.03 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 快速增至 $0.5 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$; 钻进至孔深 53.7 m 时, 孔口直接不反浆。顶水钻进至孔深 59.5 m 时, 测得水位 52 m; 而后钻进过程, 孔口持续不返浆, 孔内水位呈跳跃式下降趋势, 说明对应范围出现局部无裂隙发育区和裂隙发育区交替存在现象; 直至孔深 100.6 m 时, 水

位持续下降, 并在孔深 144.1 m 时水位降至孔底。同时, 在钻进至孔深 163 m 开始陆续出现 4 次掉钻现象, 掉钻深度 $0.3 \sim 0.4 \text{ m}$ 。

而钻孔电视的观测结果显示, 无论是 D1 还是 D2 孔, 在孔深 46 m 左右开始陆续出现孔壁裂隙发育或破坏的痕迹(这与工作面采后当年 DS2 孔的探测结果相符), 直至孔深 123 m 左右, 这种裂隙发育

与破坏的密集程度显著增大;但总体而言D2孔的孔壁破坏及裂隙发育程度要明显偏高,如图6b所示。利用钻孔电视的观测结果,结合孔壁围岩的破坏情况,判断D1孔对应深度169.8 m位置开始进入垮落带,对应垮落带高度为13.8 m;D2孔对应深度166.3 m位置开始进入垮落带,对应垮落带高度为17.3 m。

4)采后7.3a前后对比的自修复特征。与前述补连塔煤矿12401试验工作面的实测案例类似,对52306工作面采后7.3 a前后的探测结果进行了对比,发现采动垮裂覆岩同样呈现出一定的自修复特征,如图6所示。D2孔与原先的DS2孔位置较为接近,对比两孔钻进过程的冲洗液漏失量变化曲线可见,孔深31.8~50.3 m曾发生冲洗液显著漏失区段已实现自修复。而对于下部钻进区段,虽然D2孔始终保持孔口不返浆现象,但孔内水位在孔深59.5~100.6 m范围呈现明显跳跃波动现象;根据水位回升或下降的区段分布,可判断在孔深59.5~74.5 m和87.1~100.6 m区段导水裂隙已实现自修复,而其余区段裂隙尚处于发育导水状态。类似地,将D2孔的探测结果也和DS2孔对比后可判断,孔深31.8~51.5 m区段已实现自修复,孔深56.7~116.5 m区段孔内水位基本保持不变,表明也已发生自修复。可见,工作面倾向中部D1孔对应区域覆岩的自修复效果均明显

优于开采边界附近,这与补连塔矿试验面的探测结果存在一定差异。

1.3 两矿探测结果对比分析

根据两矿试验面前后两次的探测结果,对两者采动覆岩的自修复特征进行了统计,详见表1。计算得到了覆岩已发生自修复区段长度占导水裂隙带高度的比值,即导水裂隙的自修复率。由统计结果可见,由于补连塔煤矿试验面采后自修复年限明显偏长(是大柳塔煤矿试验工作面的2倍多),因而其覆岩自修复效果明显偏优。这不仅体现在已发生自修复的区段长度上,自修复区段的整体连续性也相对偏好。补连塔煤矿试验面覆岩整体自修复率已超过50%,而大柳塔煤矿试验面覆岩仅在中部压实区自修复率接近50%,在开采边界附近对应覆岩自修复率仅25.8%,且出现多处间断修复的离散分布现象。对比两矿试验面在发生自修复区段的岩层赋存情况可见(图2、图5),12401工作面覆岩发生自修复区段对应埋深明显偏大(表1),且其浅部主要以松散砾石层赋存为主,直至埋深125 m以下区段,才呈现砂泥互层的赋存特征;而对于52306工作面,不仅其自修复区段对应埋深偏小,而且覆岩整体均呈现砂泥互层的赋存状态,相比前者而言,其岩层岩性分布明显偏硬;这或许也是引起它自修复效果明显欠缺的另一因素(除修复时间外)。

表1 两矿试验面探测得到的覆岩自修复特征统计

Table 1 Statistics of overburden self-healing characteristics detected in two mines

补连塔煤矿12401试验面				大柳塔煤矿52306试验面					
自修复地质条件	自修复特征			自修复地质条件	自修复特征				
	探测钻孔	D1	D2		探测钻孔	D1	D2		
修复年限/a	15	修复区段长度/m	83.15	92.45	修复年限/a	7.3	修复区段长度/m	62.05	33.75
采高/m	4.3	自修复率/%	53.5	59.5	采高/m	6.6	自修复率/%	47.5	25.8
埋深/m	242	连续未修复	67.6	62.9	埋深/m	177	连续未修复	62.3	76.4
关键层数	3	区段长度/m			区段长度/m				
		自修复区	-86.7~	-86.7~	关键层数	2	自修复区	-46.3~	-46.3~
		对应埋深/m	-174.4	-179.1			对应埋深/m	-116.5	-100.6

另一方面,两矿在覆岩不同区域自修复差异上也呈现明显不同。补连塔煤矿试验面开采边界附近覆岩自修复效果明显好于工作面中部覆岩,而大柳塔煤矿试验面的探测情况恰恰相反。这必然与两矿井所处的不同地质开采条件密切相关,后节将会讨论分析。

2 神东矿区采动裂隙岩体自修复规律

2.1 裂隙岩体自修复特征

综合上述两矿的探测结果,并结合文献[4]东胜

矿区万利一矿的工程案例,可对采动裂隙岩体的自修复特征进行总结。主要呈现3方面特征:

1)采动覆岩中发生自修复的区域呈现离散的非连续性分布。这种离散性在开采边界或采空区煤柱区域附近对应覆岩中较易出现,且自修复时间越短,离散性越明显。这在大柳塔煤矿和万利一矿的案例中都得到了体现。万利一矿42112工作面采后8 a在距离开采边界35 m和25 m处分别施工了T2-1和T2-2,开采边界附近T2-2钻孔探测得到的覆岩自修复区域分布的离散性更明显。

2) 采动覆岩中已修复与未修复区域的交界位置一般对应于关键层或厚硬岩层位置, 尤其是这类岩层底界面位置。补连塔煤矿试验面D1、D2孔分别在孔深174.4 m和179.1 m出现未修复区的位置正好处于覆岩主关键层底界面附近(图3)。而对于大柳塔煤矿试验面, 图6左侧标明了覆岩关键层及厚度5 m以上的砂岩层位, 无论是D1孔还是D2孔, 已修复与未修复交界位置均处于关键层或厚硬砂岩位置。万利一矿的探测案例也存在类似的现象^[4]。这种现象主要与关键层或厚硬岩层采动破断产生的导水裂隙发育开度偏大有关, 尤其在其底界面还易有显著的离层裂隙发育, 导致自修复难度相比其他区域裂隙偏高。

3) 裂隙岩体所处的层位越低, 其发生自修复的难度越大, 尤其在埋深较浅条件下。相关实测案例显示, 发生自修复的裂隙岩体一般处于导水裂隙带的中上部区域, 处于导水裂隙带中下部及垮落带岩体均未能实现有效自修复。这与中下部裂隙岩体堆积不规则、裂隙或自由空洞十分发育密切相关。从钻孔电视的探测结果就能说明这一问题, 在进入探测钻孔中下段时, 围岩破坏程度明显偏高, 裂隙发育宏观开度甚至超过厘米级别。

2.2 裂隙岩体自修复程度的影响因素

根据采动裂隙岩体的自修复机理, 其主要与采动应力的压实以及裂隙岩体与地下水、采空区气体这3者的水-岩或水-气-岩相互作用密切相关^[7-10]。由此可对影响采动裂隙岩体自修复程度的因素进行归类分析。大体可分为5大类: 修复时间、岩层赋存、水文特征、开采参数、以及裂隙岩体所处覆岩的区域位置。

修复时间主要影响采动覆岩在应力压实作用下是否能实现稳沉^[14], 影响水-岩或水-气-岩相互作用产生的溶解、溶蚀、以及离子交换生成衍生物的物理化学过程是否充分; 显然, 修复时间越长, 所达到的自修复效果越好。补连塔煤矿试验面采后自修复时长约为大柳塔煤矿试验面的2倍, 因而获得了相对更好的自修复效果。当然, 当修复时间超过采空区覆岩稳沉的临界时间后, 应力压实作用起到的自修复效果将开始衰减, 由此导致自修复效果的增长速率可能放缓。

岩层赋存因素主要包括埋深、覆岩关键层或厚硬岩层特征(数量、位置、厚度、力学强度等)、岩层岩性等几方面。其中, 埋深直接影响裂隙岩体受压实的载荷大小, 埋深越大, 覆岩受压效果越好(尤其是采区中部), 裂隙岩体自修复难度相应降低。当然,

埋深变大也会使得采空区覆岩整体稳沉的临界时间加长, 一定程度制约自修复进程, 但神东矿区多数浅埋煤层开采条件, 因而这种制约作用表现并不突出。覆岩关键层或厚硬岩层赋存特征主要影响开采边界附近覆岩对应关键层或厚硬岩层位置附近裂隙的自修复; 这类岩层的厚度越小、破断距与下部相邻岩层差异越小, 越有利于裂隙的自修复。而对于岩层岩性, 松散性或泥质类岩层赋存越多, 对应覆岩整体越软, 裂隙岩体越易在应力压实作用下发生蠕变而压密裂隙; 补连塔煤矿12401试验面覆岩浅部大量赋存的砾石层即为其裂隙自修复创造了良好条件。同时, 泥质类岩石中富含亲水矿物的遇水膨胀作用也会进一步提高裂隙修复效果^[15]。

水文特征主要涉及采后覆岩导水裂隙沟通地下水的赋存情况及其水质特征。地下水的水质特征直接影响水-岩或水-气-岩相互作用引起的自修复效果。根据相关研究^[8-9], 偏碱性地下水有利于泥质类裂隙岩层的自修复, 而偏酸性地下水则有利于砂岩类裂隙岩层的自修复。神东矿区地下水多属于偏碱性条件, 因而有利于泥质类裂隙岩层的自修复。另一方面, 若采后导水裂隙沟通多层含水层, 则这些含水层的赋水是否存在相互能发生化学沉淀反应的离子成分, 也是影响自修复效果的重要方面。当这些不同层位、不同水质的地下水在导水裂隙中交汇混流时, 产生的化学沉淀将有助于促进裂隙的修复进程, 实现良好修复效果^[16]。

开采参数因素主要是煤层采高的影响, 这不仅关系到导水裂带最终的发育范围, 也影响到裂隙发育后的宏观开度或其导水性, 这种影响主要体现在开采边界附近覆岩中(该区域导水裂隙处于张开状态, 而采区中部裂隙趋于闭合)^[17], 对采区中部覆岩影响并不明显。显然, 煤层采高越大, 对应开采边界附近覆岩导水裂隙的宏观开度也相应提高, 由此提高裂隙自修复的难度。

裂隙岩体所处覆岩的区域位置主要影响采后导水裂隙和自由空隙的原始发育状态。处于开采边界或遗留煤柱附近对应覆岩, 裂隙显著发育, 宏观开度大、空隙分布多^[17]; 而处于采区中部的压实区, 裂隙相对闭合。相当于在这2种不同的区域, 裂隙岩体要实现自修复的初始条件显著不同, 前者初始条件明显偏差, 造成其后期实现自修复的难度高、效果偏低。大柳塔煤矿试验面虽然历经的修复时间偏短, 但在D1孔对应的工作面中部区, 其覆岩仍获得了自修复率接近50%的良好效果, 且与补连塔煤矿试验面在修复时长是其2倍条件下的效果接近, 进一步

说明了中部压实区优越的自修复条件。

2.3 采后覆岩自修复过程演变描述

当工作面回采完毕形成采空区后,采动覆岩中将长期同时发生2种作用过程,并对裂隙岩体产生降渗自修复作用。其一是覆岩残余沉降直至逐步实现稳沉的过程;采动岩体中的裂隙、空隙等自由空间在应力压实作用下趋于闭合、甚至消失。其二是流失地下水在导水裂隙中流动过程中产生的水-岩或水-气-岩相互作用;裂隙面岩石受溶解、溶蚀,一方面产生的矿物离子与地下水或CO₂等气体发生离子交换反应并生成沉淀物或次生矿物充填封堵裂隙,另一方面会降低裂隙面粗糙度,促进裂隙更紧密贴合。相比而言,前者作用对裂隙岩体的降渗速度更快些,而后者由于需要水对岩石产生的溶解、溶蚀作用达到一定程度后,才能显现出对裂隙岩体的降渗修复效果。因而,在煤层采后,首先以覆岩残余沉降作用为主导影响裂隙岩体的自修复,且这种作用在采区中部覆岩中体现更为显著;当采后年限达到覆

岩整体稳沉临界时间后(国家“规程”^[18]中确定约为采深2.5倍,单位:天;神东浅埋条件为1.3~2a),将由水-岩或水-气-岩相互作用占据主导影响自修复进程,且受采区水文地质条件的影响,覆岩不同区域裂隙岩体受水-岩或水-气-岩相互作用的影响也会明显不同。

如图7所示,煤层采后,处于开采区域正上方对应导水裂隙沟通的含水层内静态储水基本已疏放殆尽,开采边界附近裂隙岩体主要接受侧向补给地下水的渗流,而采区中部覆岩中仅在导水裂隙沟通第四系松散层条件下才能接受降雨的补给渗流,否则仅能依靠越层渗流作用接受上部弯曲下沉带含水层水体补给。可见,开采边界附近裂隙岩体中发生的水-岩或水-气-岩相互作用相对更显著些。也正因为此,才出现了补连塔煤矿试验面开采边界附近覆岩的自修复效果要好于中部区域覆岩的现象。该试验面探测区处于整个四盘区采空区的开采边界处,开采边界覆岩能接受地下水侧向补给的渗流作用;而大柳塔煤矿试验面之所以未出现与其类似的自修

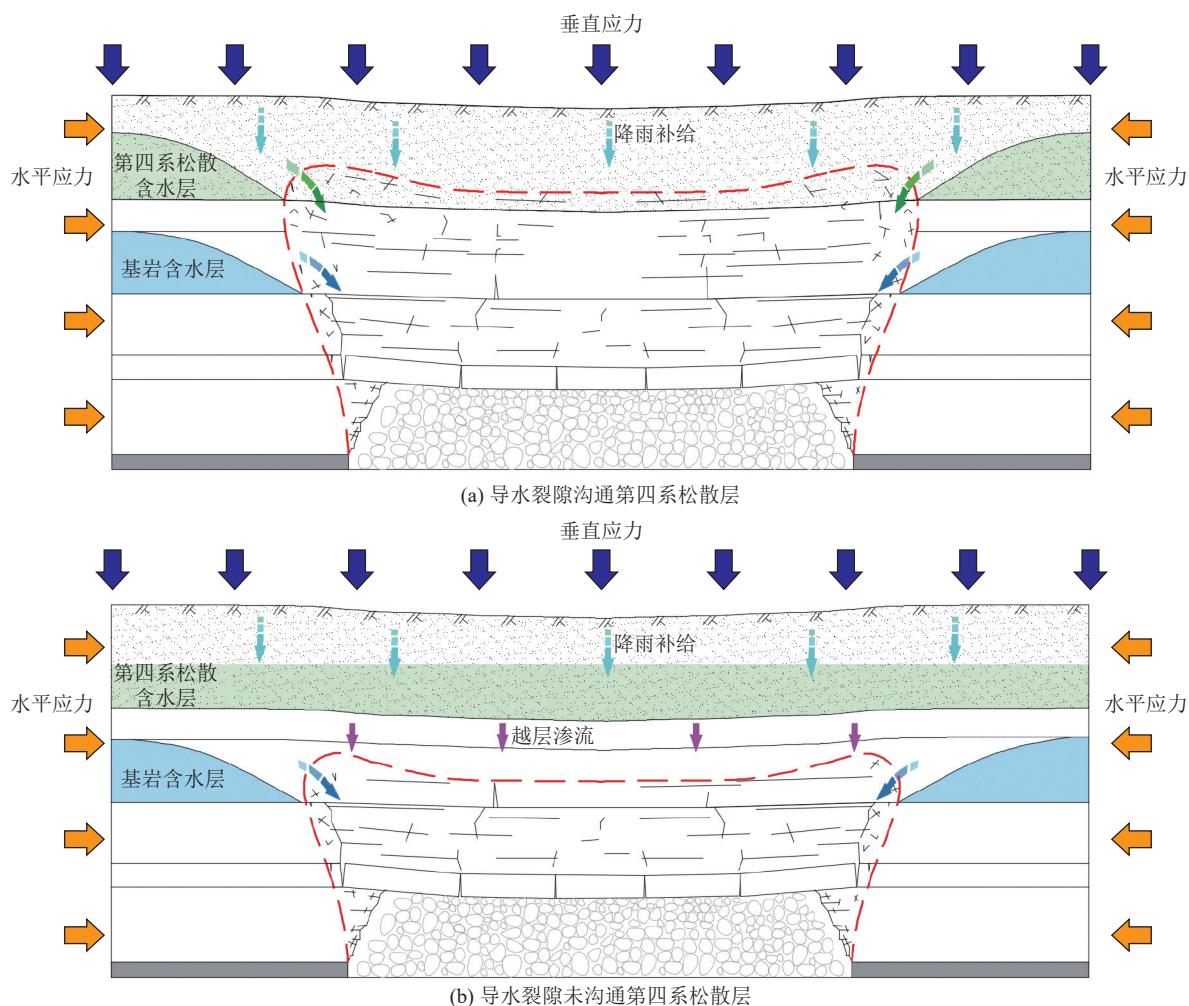


图7 不同条件下采动覆岩自修复过程差异

Fig.7 Difference of self-healing process of mining overburden under different conditions

复探测结果,主要是由于该试验面处于整个三盘区采空区中部,工作面开采边界覆岩已无法接受基岩地下水侧向补给的渗流作用,因而在其中产生的水-岩或水-气-岩相互作用与工作面中部覆岩类似,并无显著优势。

综上分析可知,对于整个采区中部的裂隙岩体而言,是以应力压实和水-岩或水-气-岩相互作用共同影响自修复效果;而对于采区边界附近裂隙岩体而言,是以水-岩或水-气-岩相互作用为主影响自修复效果。

3 讨 论

1) 对于神东矿区开采条件而言,多数开采区域覆岩导水裂隙已直接沟通第四系松散层^[19-20];且随着多年来开采面积的不断扩大,以及周边邻近矿井开采活动的影响,基岩含水层的地下水侧向补给作用已越趋微弱;所以从这个角度看,神东矿区采动覆岩长期主要接受降雨补给而产生水-岩或水-气-岩相互作用,由此引起的裂隙岩体自修复效果将直接受季节降雨影响。近年来神东矿区雨水充沛,这给裂隙岩体的自修复提供了优越条件。

2) 神东矿区普遍采用双巷采掘布置模式,采空区遗留有大量的走向区段煤柱(一般20 m宽),这些煤柱的存在也会影响煤柱区域及其附近对应上覆裂隙岩体的自修复效果。由于煤层开采普遍偏浅,这些区段煤柱往往能保持长期承载稳定,因而其附近岩体中的裂隙或空隙的宏观尺寸相对偏大,实现自修复的难度大、效果差。由此出现了大柳塔煤矿试验面在煤柱边界附近覆岩中自修复区域离散分布的现象。所以,可对整个采区不同区域裂隙岩体发生自修复的难度(或效果)由易到难(或由好到差)进行排序:采区中部无煤柱区或煤柱已发生塑性失稳区→采区边界附近→采区中部尚存在弹性支撑能力的煤柱区及其附近。

3) 神东矿区普遍属于煤层群开采条件,下煤层的接续开采必然会对上煤层采空区已有的自修复状态产生破坏;因此,判断某一采区裂隙岩体的自修复状况应根据最下部已采煤层的开采年限及其开采地质条件进行分析。由于本次探测涉及的案例相对偏少,尚不足以从中得出神东矿区采动覆岩自修复的临界条件,后续将选取更多典型工作面开展进一步的探测和分析研究。

4 结 论

1) 开展了神东矿区典型矿井采动裂隙岩体自修

复特征的地面钻孔工程探测,分别获得了补连塔煤矿12401试验面采后15 a、大柳塔煤矿52306试验面采后7.3 a覆岩不同区域导水裂隙带与垮落带的修复演变规律。补连塔煤矿12401试验面覆岩导水裂隙带高度已由采后初始的154.9 m降低为62.5~67.2 m,导水裂隙自修复率53.5%~59.5%;垮落带高度由原来的17.1~19.7 m降低为12.5 m。大柳塔煤矿52306试验面覆岩导水裂隙带中上部离散分布有多个自修复区,导水裂隙自修复率25.8%~47.5%;垮落带高度由原来的19.8 m降低为17.3 m。补连塔煤矿试验面裂隙岩体自修复效果明显偏好。

2) 总结得到了采动裂隙岩体3方面的自修复特征。
①覆岩中发生自修复的区域易呈现离散的非连续性分布,这在开采边界或采空区煤柱区域附近对应覆岩中最易出现,且自修复时间越短,离散性越明显。
②覆岩中已修复与未修复区的交界位置一般对应于关键层或厚硬岩层位置,尤其是这类岩层底界面位置。
③裂隙岩体所处层位越低,其发生自修复的难度越大,尤其在埋深较浅条件下。

3) 分析了修复时间、岩层赋存、水文特征、开采参数、以及裂隙岩体所处覆岩的区域位置等5类关键因素对采动裂隙自修复程度或效果的影响规律,其中影响权重最大的是修复时间,其次为关键层或厚硬岩层赋存(数量、位置、厚度等)。覆岩中对应采区中部和开采边界(或煤柱)附近不同区域,因各自岩体初始垮裂状态不同,因而在相同时间内表现的自修复效果也差异显著;煤层埋深对采区中部采动覆岩自修复效果影响权重偏大,而煤层采高对开采边界或煤柱附近采动覆岩自修复效果影响权重偏大。据此进行了煤层采后覆岩修复过程演变的描述分析。

4) 神东矿区煤层赋存多、开采规模大,已有采空区裂隙岩体的自修复不仅受接续煤层开采活化的影响,还会受到邻近采区或矿井开采活动的干扰,因而实现自修复的难度整体偏高;如何基于大量实测样本形成神东矿区裂隙岩体自修复临界条件的判别方法是后期需进一步研究的重要课题。

致谢:感谢国能神东煤炭集团有限责任公司补连塔煤矿刘兆祥总工程师、大柳塔煤矿周海丰总工程师在现场实测过程中提供的帮助!

参考文献(References):

- [1] 杨俊哲.神东矿区井上井下生态环境综合治理技术[J].煤炭科学技术,2020,48(9):56~65.

- YANG Junzhe. Comprehensive treatment technology of ecological environment on surface and underground in Shendong Mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(9): 56–65.
- [2] 刘英,雷少刚,陈孝杨,等.神东矿区植被覆盖度时序变化与驱动因素分析及引导恢复策略[J].*煤炭学报*,2021,46(10):3319–3331.
- LIU Ying, LEI Shaogang, CHEN Xiaoyang, *et al.* Temporal variation and driving factors of vegetation coverage in Shendong central mining area based on the perspective of guided restoration[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(10): 3319–3331.
- [3] 张建民,李全生,胡振琪,等.西部风积沙区超大综采工作面开采生态修复研究[J].*煤炭科学技术*,2013,41(9):173–177.
- ZHANG Jianmin, LI Quansheng, HU Zhenqi, *et al.* Study on ecological restoration mode of ultra wide fully-mechanized coal mining in west China aeolian sand area[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(9): 173–177.
- [4] 李全生,鞠金峰,曹志国,等.采后10 a垮裂岩体自修复特征的钻孔探测研究:以神东矿区万利一矿为例[J].*煤炭学报*,2021,46(5):1428–1438.
- LI Quansheng, JU Jinfeng, CAO Zhiguo, *et al.* Detection of the self-healing characteristics of mining fractured rock mass after 10 years of underground coal mining: A case study of Wanli Coal Mine Shendong mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1428–1438.
- [5] 李全生,李晓斌,许家林,等.岩层采动裂隙演化规律与生态治理技术研究进展[J].*煤炭科学技术*,2022,50(1):28–47.
- LI Quansheng, LI Xiaobin, XU Jialin, *et al.* Research advances in mining fractures evolution law of rock strata and ecological treatment technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 28–47.
- [6] 胡振琪,王新静,贺安民.风积沙区采煤沉陷地裂缝分布特征与发生发育规律[J].*煤炭学报*,2014,39(1):11–18.
- HU Zhenqi, WANG Xinjing, HE Anmin. Distribution characteristic and development rules of ground fissures due to coal mining in windy and sandy region[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(1): 11–18.
- [7] JU Jinfeng, LI Quansheng, XU Jialin, *et al.* Self-healing effect of water-conducted fractures due to water-rock interactions in undermined rock strata and its mechanisms[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(1): 287–297.
- [8] 鞠金峰,李全生,许家林,等.采动岩体裂隙自修复的水–CO₂岩相互作用试验研究[J].*煤炭学报*,2019,44(12):3700–3709.
- JU Jinfeng, LI Quansheng, XU Jialin, *et al.* Water–CO₂–rock interaction experiments to reveal the self-healing effect of fractured mining damaged rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3700–3709.
- [9] JU Jinfeng, LI Quansheng, XU Jialin. Experimental study on the self-healing behavior of fractured rocks induced by water–CO₂–rock interactions in the Shendong coalfield[J]. *Geofluids*, 2020, 8863898: 1–12.
- [10] 鞠金峰,许家林,方志远.酸性水对含铁破碎岩体降渗特性的实验研究[J].*煤炭学报*,2019,44(11):3388–3395.
- JU Jinfeng, XU Jialin, FANG Zhiyuan. Water–rock interaction experiments with acidic aqueous solution and iron beating broken rocks and characteristics of water permeability decline[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(11): 3388–3395.
- [11] 鞠金峰,李全生,许家林,等.采动含水层生态功能修复研究进展[J].*煤炭科学技术*,2020,48(9):102–108.
- JU Jinfeng, LI Quansheng, XU Jialin, *et al.* Progress of ecological remediation technology of mining-damaged aquifer[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(9): 102–108.
- [12] 许家林,王晓振,刘文涛,等.覆岩主关键层位置对导水裂隙带高度的影响[J].*岩石力学与工程学报*,2009,28(2):380–385.
- XU Jialin, WANG Xiaozhen, LIU Wentao, *et al.* Effects of primary key stratum location on height of water flowing fracture zone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(2): 380–385.
- [13] 杨俊哲.7m大采高综采工作面导水断裂带发育规律研究[J].*煤炭科学技术*,2016,44(1):61–66.
- YANG Junzhe. Study on development law of water conducted zone in fully-mechanized mining face with 7 m mining height[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(1): 61–66.
- [14] 朱广铁,徐征慧,解陈,等.老采空区地表残余移动变形影响函数研究[J].*岩石力学与工程学报*,2014,33(10):1962–1970.
- ZHU Guangyi, XU Zhenghui, XIE Chen, *et al.* Study of functions of surface residual movement and deformation above old goaf[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(10): 1962–1970.
- [15] 谭罗荣.关于粘土岩崩解、泥化机理的讨论[J].*岩土力学*,2001,22(1):1–5.
- TAN Luorong. Discussion on mechanism of disintegration and argillitization of clay-rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(1): 1–5.
- [16] 鞠金峰,李全生,许家林,等.化学沉淀修复采动破坏岩体孔隙/裂隙的降渗特性试验[J].*煤炭科学技术*,2020,48(2):89–96.
- JU Jinfeng, LI Quansheng, XU Jialin, *et al.* Experimental study on water permeability decrease character due to restoration function of chemical precipitation on holes or fractures in mining failure rock mass[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(2): 89–96.
- [17] 曹志国,鞠金峰,许家林.采动覆岩导水裂隙主通道分布模型及其水流动特性[J].*煤炭学报*,2019,44(12):3719–3728.
- CAO Zhiguo, JU Jinfeng, XU Jialin. Distribution model of water-conducted fracture main channel and its flow characteristics[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3719–3728.
- [18] 中华人民共和国行业标准编写组.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[S].北京:煤炭工业出版社,2000.
- [19] 马剑飞,李向全.神东矿区煤炭开采对含水层破坏模式研究[J].*煤炭科学技术*,2019,47(3):207–213.
- MA Jianfei, LI Xiangquan. Study on models of aquifer failure caused by coal mining in Shendong Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(3): 207–213.
- [20] 鞠金峰,马祥,赵富强,等.东胜煤田导水裂隙发育及其分区特征研究[J].*煤炭科学技术*,2022,50(2):202–212.
- JU Jinfeng, MA Xiang, ZHAO Fuqiang, *et al.* Development and zoning characteristics of water-conducting fractures in Dongsheng Coalfield[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 202–212.