

民采煤窑浅层采空区覆岩应力研究

郝森¹⁾, 关雨男¹⁾, 王强¹⁾, 胡维哲²⁾, 田柯²⁾

1) 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北廊坊, 065000;

2) 北京网格天地软件技术股份有限公司, 北京, 100089

关键词: 城市地质; 浅层采空区; 覆岩应力

为了解决城镇居民区下部民采煤窑浅层采空区覆岩应力状态对于地质灾害防治带来的问题, 结合采空区物探调查, 应用北京网格天地公司深探软件, 建立采空区数学模型, 选取合理的计算参数, 进行数值模拟, 对采空区在自重、不同含水条件下进行分析, 结果表明: 一般采空区覆岩质地越坚硬, 沉降量越小, 应力分布越均匀, 但当外力超过坚硬岩形变临界值时, 坚硬覆岩更易受破坏。地下水作用下的软弱松散层及覆岩沉降量更大, 在垂向上应力变化较大, 且明显受地层走向影响。采空区覆岩应力研究是采空区防治的一个重要条件。

1 研究区基本情况

研究区位于灯塔市烟台煤矿西大窑镇茨山村, 面积 0.5 km²。该区地处山前倾斜平原, 地面海拔 110~200 m, 地形总体呈东高西低, 地形坡度总体在 0~15°。

处于铍子沟向斜构造南段的西翼(转折端), 区内第四纪地层主要为更新统坡洪积粉土、粉质黏土, 厚度 6~11 m; 基岩层为中石炭统太原组砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩。地层呈 NE 向展布, 倾向 SE。区内尚未发现岩浆岩。研究区内无河流等地表水体, 地下含水系统主要分为第四纪松散层孔隙含水系统及碎屑岩孔隙裂隙含水系统, 含煤岩系夹有的较为致密的泥岩、页岩层, 成为区内地下水天然隔水层, 连通的构造裂隙和采空区塌陷形成的导水裂隙成为地下水运移通道, 地下水以大气降水为主, 侧向径流补给为辅。通过对钻孔岩芯取样分析, 得知煤层顶底板岩石抗压、抗剪强度均低于 30 Mpa, 属软质岩。矿区煤层主要赋存于太原组地层中, 至上

而下分为 5 个采煤层: 大槽(1.5 m 厚), 大黄(2 m 厚, 民采主采煤层), 上接(1.3 m 厚), 二路(1.5 m 厚), 三路(2 m 厚)(图 1)。

2 采空区覆岩应力演化规律

2.1 研究方法和内容

研究方法: 采用北京网格天地软件技术股份有限公司深探软件, 依托辽阳市多要素城市地质调查项目物探技术方法取得的采空区分布范围资料(张健桥等, 2021; 王强等, 2022;), 选取适合岩土力学参数(表 1), 以莫尔—库仑模型为本构模型(姚康, 2014; 王涛等, 2019)。

研究内容: ①采空区在地表自重载荷作用下的覆岩变形破坏规律。②采空区上覆地层含水量变化导致的覆岩变形破坏规律。在建立采空区三维地质结构模型和属性模型的基础上, 结合采空区埋深、采厚、产状及松散层厚度情况, 采用顶面为自由边界, 底面固定, 四周侧面施加法向约束(禁止法向位移)的方式, 按照 20 m×20 m 的网格精度建立数值模拟模型, 该模型共有 92762 个单元, 527430 个节点。

2.2 研究结果

2.2.1 采空区在自重作用下影响分析

通过模拟分析, 对比开挖前(无采空区空洞)与开挖后(产生采空区空洞)地表下沉位移量变化趋势。开挖前, 地表最大下沉位移量 71 mm, 下沉正异常区主要位于西南侧区域。结合地质条件分析, 主要是由于地层隆起所导致的下沉。开挖之后, 2 区(大黄 1)及 5 区(大黄连井)北段、6 区(上接 3)、10 区(三路 5)等采空区投影区出现明显地表下沉正异常区, 其中 2 区南端平面投影区面积最

注: 本文为中国地质调查局项目“辽阳市多要素城市地质调查”(编号: DD20191025)的成果。

收稿日期: 2023-12-10; 改回日期: 2024-02-05; 责任编辑: 蔡志慧。DOI: 10.16509/j.georeview.2024.s1.117

作者简介: 郝森, 男, 1987 年生, 硕士, 工程师, 主要从事城市地质调查; Email: haosen@mail.cgs.gov.cn。

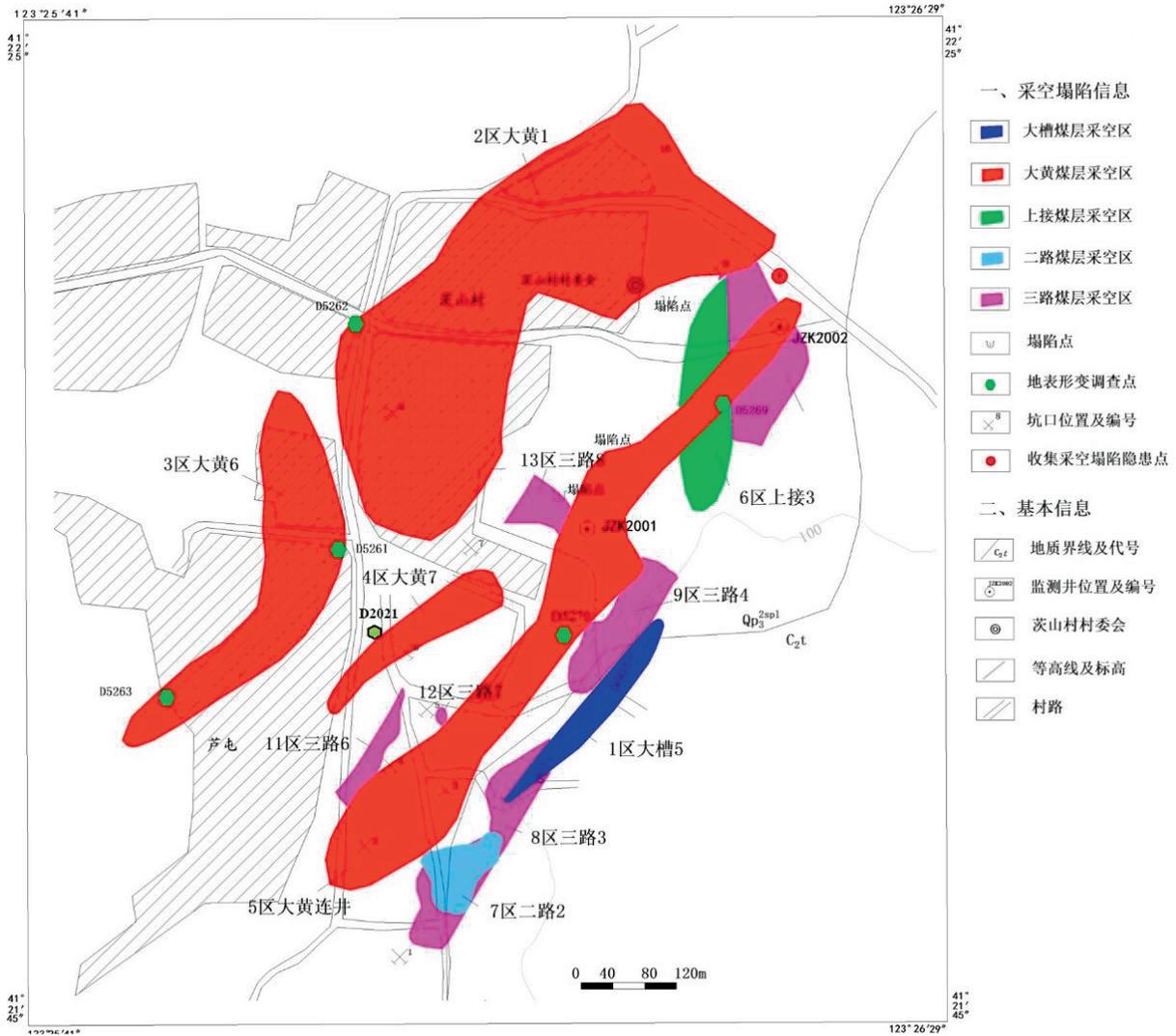


图 1 茨山村煤矿采空区分布图

表 1 数值模型材料参数

模型分层	容量	体积模量	黏聚力	弹性模量	内摩擦角	抗拉强度
	(kg/m^3)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	($^\circ$)	(MPa)
松散层	2.70×10^3	7.58×10^3	4.69	14.1×10^3	36.6	2.60
含水饱和层	2.76×10^3	4.51×10^3	3.06	7.6×10^3	34.5	2.58
煤层	2.61×10^3	6.98×10^3	6.70	13.4×10^3	34.3	2.52
底板	2.70×10^3	6.98×10^3	6.70	13.4×10^3	36.6	2.52
侵蚀基岩层	2.90×10^3	5.93×10^3	6.00	11.3×10^3	34.5	2.40

大，此下沉位移量达全区最大至 129 mm。这是由于采空区上覆地层缺乏支撑，在自重力与岩土力学规律的作用下，产生沉降位移。整体上，地表下沉量分布区域与大黄煤层采空区关联性较为明显，而且埋深越浅的采空区，上覆地层更薄，结构稳定性越差，下沉量越大。另外，东南侧地表受上覆山体

影响，出现明显沉降位移异常；开挖前后，异常变化不大。最大主应力分布与地表剪应力表征相似，分带现象明显，表明覆岩破坏对地表形变控制作用显著。最大主应力正、负异常区，位于采空 2 区南端中心，其值域达到 1~6 MPa，区域均值约为 3 MPa，均超过了对应岩层的抗拉强度，顶板、覆岩易发生

断裂、破碎、冒落，造成地面塌陷灾害。

2.2.2 采空区在不同含水条件下的影响分析

本次主要模拟在天然条件下、饱和含水（地下水长期作用）条件下，覆岩弹性模量的改变后，载荷作用下的地表、覆岩形变和主应力变化趋势。采空 2 区（大黄 1）由于埋深较浅沉降量最大，为凸显饱和含水条件下的沉降量变化，实验选取在北侧 10 区（三路 5）加载点施加 0.34 MPa 载荷。地表模拟中，松散层饱和含水，模拟结果反映：天然状态下，载荷施加处地表最大下沉量为 54.469 mm；饱和含水状态下，载荷施加处地表最大下沉量为 51.991 mm 推测后者沉降量更小是由于地表为松散层覆盖，在饱和含水状态下，松散物粒间孔隙受地下水填充，并产生向上的浮力抵消部分荷载作用。

覆岩层模拟结果显示，地下水长期作用下覆岩层受溶解侵蚀作用影响，模拟结果反映：天然状态下，在载荷施加处基岩层最大沉降量为 53.567 mm；地下水长期侵蚀后，基岩层最大沉降量增至 65.411 mm。地下水长期侵蚀后，载荷作用下覆岩层沉降范围和沉降量增大。同时，这说明地下水长期冲刷侵蚀作用下，岩石逐步软化，直接破坏了岩层稳定。

在地表模拟结果显示，只有松散层的物理性质产生了变化，其沉降量相比天然状态降低了 4.5%，而在覆岩层模拟中，覆岩层的物理性质也产生了变化，其沉降量相比天然状态增加了 22%，两者的差别显示，地下水对沉降量的影响是渐进的：在地表作用下，沉降量有较小减少，沉降范围变化不大，在作用至覆岩层后，沉降量明显增加，沉降范围明显增大，同时水平方向上沉降量变化较为缓和。此外，沉降变化范围的中心并非载荷施加处，而是略偏向采空 10 区（三路 5），这说明采空区与地下水作用对沉降量的影响是耦合的。

垂向上，地下水长期侵蚀后，在载荷作用下，覆岩形变量和沉降范围显著增大。地应力模拟分析认为，受浅部含水层载荷传递作用，载荷所形成的挤压应力异常在浅部成规则带状分布，极值达到 -0.83 MPa。在天然状态下，其应力在水平、纵向上的分布较为均匀。在地下水长期作用下，松散层及覆岩层的材料强度相对较低，其应力分布在垂向变化较大，其松散层负应力较大，大槽煤层正应力较大，都顺地层方向延伸较广。

2.2.3 小结

在重力作用下，区内地表残余下沉与大黄煤层采空区关联性较大。一般采空区覆岩质地越坚硬，地表形变区域越小；另外，当外力超过坚硬岩形变临界值时，坚硬覆岩更易受破坏。地下水作用对沉降量的影响在采空区范围内更大，其与采空区的影响具有耦合效应。

3 覆岩应力规律实际指导意义

地下开采使岩层内部的原始应力平衡状态受到破坏，造成应力重新分布，上覆岩体因采动影响形成次生岩体结构，达到岩体系统内部新的平衡和相对稳定。水对岩土的动力学效应的影响在于地层岩土抗压强度、弹性模量等力学性质随着含水量的变化而改变；特别是地下水长期侵蚀，使得顶板和围岩的结构破坏、力学性质变差，更易发生变形断裂而诱发塌陷失稳。地下水对巷道的稳定性也有一定的影响，地下水会使围岩强度降低，使塑性区域变大，围岩浸水深度和浸水量的大小，都会对围岩的塑性区产生影响，会引起巷道的变形。目前该地区地表采空区塌陷主要为多为圆形、椭圆形塌陷坑。煤矿开采已存在多层采空区，且深浅迭加，当较低采空区冒落时，影响了上部采空区底板的稳定性，进而也影响了其上矿柱的稳定，造成了垂直于地面方向的累进性破坏，使地表变形。通过调查以及本次分析可知浅部大黄煤层上覆围岩较为不稳定，未来当地的采空区地质灾害防治要重点关注该煤层的以往开采分布范围。

参 考 文 献 / References

- 王强, 田野, 刘欢, 朱春光, 白超琨, 郝森. 2022. 综合物探方法在煤矿采空区探测中的应用. 物探与化探, 46(2): 531~536.
- 王涛, 魏善明, 姜秉霖, 李龙. 2019. 急倾斜煤层采空区地表变形对管道的影响研究. 地质学报, (S1): 314~318.
- 姚康. 2014. 采空区地表变形的机理及数值模拟研究. 长春: 吉林大学硕士学位论文.
- 张健桥, 尹维民, 张兴洲. 2021. 综合物探方法在厚覆盖煤矿采空区探测中的应用. 地质论评, 67(S1): 51~53.

HAO Sen, GUAN Yunan, WANG Qiang, HU Weizhe, TIAN Ke: Stress research of overburden strata in shallow mined-out area of civilian coal pit

Keywords: urban geology; shallow mined-out area; overburden stress