

黄启云,朱川曲,李青锋,等. 山脚树矿浅表岩溶塌陷诱因及机理分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(3): 1-8. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.001

HUANG Q Y, ZHU C Q, LI Q F, et al. Inducement and Mechanism of Karst Collapse of Shallow Strata at Shanjiaoshu Mine [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(3): 1-8. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.001

山脚树矿浅表岩溶塌陷诱因及机理分析

黄启云,朱川曲*,李青锋,彭跃金

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:为有效预测和防范浅表岩溶塌陷带来的危害,以贵州盘江精煤有限公司山脚树矿为背景,针对山脚树矿出现的地表裂缝、地面陷坑等灾害,采用理论分析、数值模拟和现场观测等方法,分析了其浅表岩溶塌陷的诱因及其形成机理.研究表明,开采扰动会导致开采煤层上覆岩层中断层的活化,断层活化导致裂隙带与采空区导通;在降雨的渗透侵蚀作用下,表土层抗拉强度降低,使裂缝加速扩张;当存在有浅埋溶洞时,在开采扰动和降雨侵蚀作用下,溶洞与表土层裂缝贯通,形成岩溶塌陷坑.

关键词:煤矿开采;岩溶塌陷;侵蚀作用;数值模拟;地质分析

中图分类号:TD327 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)03-0001-08

Inducement and Mechanism of Karst Collapse of Shallow Strata at Shanjiaoshu Mine

HUANG Qiyun, ZHU Chuanqu, LI Qingfeng, PENG Yuejin

(School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Prediction and prevention of karst collapse of shallow strata is critical. Inducement and mechanism of karst collapse of shallow strata was analyzed based on the geotechnical condition at Shanjiaoshu Mine, using theoretical analysis, numerical simulation and field measurement. The results indicate that mining disturbance leads to fault activation in overlying strata, and the activation of the fault will lead to the connection between the fissure zone and the goaf. Tensile strength of rock masses in shallow strata decreases due to infiltration and erosion of rainfall, resulting in acceleration of fissure propagation. Karst craters form if karst caves exist at shallow depth due to connection between fissures in topsoil and these karst caves under the effects of mining disturbance and rainfall erosion.

Keywords: coal mining; karst collapse; erosion effect; numerical simulation; geological analysis

近年来,随着矿产资源的不断开采,我国西南地区特有的复杂地质环境和地表生态脆弱等问题凸显^[1].地下采矿活动引起围岩三向应力状态发生改变,顶板变形下沉、位移、开裂,在断层、裂隙以及岩溶洞隙发育处发生冒顶、塌落等现象.地表塌陷是采动引起岩溶地质失稳最直接的反映,同时也是一种较难预测的地质灾害,造成的后果不仅会对环境造成灾难性的影响,而且可能导致人员伤亡和财产损失^[2-6].贵州

收稿日期:2020-06-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51474104)

*通信作者,E-mail:cqzhu@hnust.edu.cn

地处我国岩溶断层发育的西南地区,岩溶塌陷、地表天坑等时有发生.如2010年的资料显示,贵州遵义市仁江村出现大面积地表塌陷,造成地表房屋建筑被毁,农田百孔千疮,水井干涸,居民迁移,土地荒漠化^[7-10].

岩溶塌陷是较难预测的地质灾害,针对其发生的机理,国内外学者做了大量研究.袁道先^[11]等认为土层覆盖区岩溶塌陷机制主要为潜蚀和真空吸蚀两种.众多研究者^[12-16]认为水动力条件改变是塌陷的控制条件.贺可强^[17]等认为在降雨入渗补给岩溶地下水条件下,渗压效应是岩溶塌陷成因之一.Linares^[18]等认为在干旱期间,非均匀的水力反应会导致上层含水层的减压,进而影响系统的应力和稳定性.王建秀^[19]等认为阻水盖层区岩溶塌陷普遍机制为“溶洞充填物潜蚀流动—压差场—盖层失托增荷效应”.在煤层开采诱发岩溶地表塌陷方面,胡炳南^[20]、王明立^[21]认为:上覆岩层离层开裂和水平拉伸开裂容易引起岩溶地表塌陷.此外,还有部分研究者^[22-27]对相关领域的岩溶塌陷进行了研究.本文在数值模拟及现场观测的基础上,对山脚树矿出现的地表塌陷、天坑等现象进行了理论分析研究,研究区域位于中国贵州省六盘水市盘县以北约30 km的盘关镇境内,地理坐标:东经104°28′20″~104°32′43″;北纬25°48′42″~25°54′25″.本文旨在通过相关研究方法找到山脚树矿地表塌陷、天坑等现象与当地水文地质条件、溶洞以及采矿活动之间的相关联系,为本矿区及相似地质条件的矿区提供参考.

1 工程背景及塌陷坑的特征分析

1.1 山脚树矿水文地质条件及地表岩溶塌陷特征

贵州盘江精煤山脚树矿是我国西南地区重要的煤炭基地,整合年产量为 180×10^4 t.山脚树矿区内地表水系较发育,有5条长年流水的溪沟及多条季节性流水冲沟,流水汇入拖长江,少部分补给地下水;区内历史最高洪水位为1 548.23 m,最低洪水位为1 543.6 m,正常水位一般在1 544.58~1 547.73 m,最大流量为 $294.08 \text{ m}^3/\text{s}$,最小流量为 $0.809 \text{ m}^3/\text{s}$,正常流量为 $17 \sim 27 \text{ m}^3/\text{s}$.拖长江为当地侵蚀基准面,大部分可采煤层均位于当地侵蚀基准面之下,故开采时,地表溪流对矿井产生充水的可能性较大.山脚树矿位于岩溶发育区,可溶性岩及非可溶性岩相间分布,地形发育受岩性和构造的控制,形成了条带状分布的岩溶地形和侵蚀构造地形.在井下开采过程中,沿回采工作面走向方向出现大量地表裂缝和岩溶塌陷坑,如图1所示.



图1 山脚树矿地表裂缝及陷坑

1.2 山脚树矿岩溶塌陷区下伏煤层开采情况

山脚树矿区下伏岩溶塌陷区有10[#](3 m),12[#](5 m),15[#](5 m)以及18[#](3 m)等可采煤层,目前开采的是埋深为532 m的10[#]煤层.10[#]煤层无伪顶,直接顶为1.0~2.0 m粉砂岩和菱铁质粉砂岩,水平层理,老顶为3.0~5.0 m的细砂岩和菱铁质砂岩,有少量节理和裂隙发育,容易垮落.直接底为0.50 m的泥岩和粉砂质泥岩,老底为菱铁质细砂岩.通过对矿区水文地质条件、岩溶塌陷特征及煤层开采情况的了解,有必要建立数值模型研究煤层开采对岩溶的相关影响.

2 10[#]煤层开采对地表岩溶塌陷诱导的数值模拟

2.1 煤层开采对岩溶洞顶板拉裂

2.1.1 建立模型

数值模拟计算所采用的煤岩物理力学参数主要来自实验室试验,因此,根据相关资料建立数值模拟模

型,数值模拟所用参数如表1和表2所示。

表1 煤岩层接触面力学参数

岩层	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
表土层	4.0	4.0	1.0	2
石灰岩	14.0	14.0	11.0	12
关键层	15.6	14.4	20.0	15
粉砂岩	5.6	4.4	12.0	10
煤层	4.0	3.2	8.0	5
砂质泥岩	5.2	3.3	9.2	5

表2 煤岩层块体物理力学参数

岩性	密度/(kg/m ³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
表土层	1 880	4.44	3.33	0.87	20	0.39
石灰岩	2 480	22.60	11.10	6.72	42	1.58
关键层	2 513	17.36	9.90	3.00	40	7.20
粉砂岩	2 430	11.10	8.30	2.20	35	4.40
煤层	1 500	3.30	2.50	1.00	30	2.00
砂质泥岩	2 250	10.00	6.00	1.30	30	3.20

模型中溶洞位置处于模型上边界正下方 38 m 处,模型为单一煤层开采,煤层埋深 532 m,模型中 10[#]煤层从距离左边界 150 m 处向右开挖,模型如图 2 所示。

2.1.2 模拟结果分析

根据模拟结果分析,图 3 为采煤工作面推进不同距离时上覆浅埋溶洞破坏图.当工作面自切眼后推进 10 m 时,开采引起的扰动应力不足以对溶洞造成破坏;当工作面推进 20 m 时,开采引起的扰动应力致使溶洞帮壁出现拉裂现象,有少量岩石掉落;当工作面推进 50 m 时,溶洞帮壁拉裂现象逐渐明显,同时,溶洞顶部在拉应力作用下略有下沉;当工作面推进 60 m 时,溶洞左帮壁拉裂且岩石与帮壁有脱离迹象,同时,溶洞顶部裂纹逐渐向近地表扩展,下沉量增大;当工作面推进 80 m 时,随着工作面继续推进,采空区跨距增加,在上覆岩层应力以及采动影响作用下,采空区顶板逐渐下沉;当工作面推进 90 m 时,工作面扰动应力剧增,同时使溶洞顶部下沉量剧增,顶部裂纹向表土层扩展,并伴有岩石落下。

在采用 UDEC 计算时,利用 UDEC 中的 Hist 语句对溶洞顶部、底部、左帮以及右帮的垂直应力、垂直位移、水平应力以及水平位移进行了跟踪记录.图 4 和图 5 为随着工作面的推进溶洞各监测点垂直位移变化曲线以及溶洞各监测点垂直应力变化曲线.从图 4 可以看出,随着工作面的推进,溶洞顶部最先出现位移变化,并在开挖至 80 m 处时,各监测点均有位移变化,并随着开挖距离的增大,位移变化逐渐加大.从图 5 可以看出,在开挖至 80 m 之前,各监测点的垂直应力基本处于定值,随着工作面的继续推进,垂直应力突然增大,且顶板、右帮在应力作用下岩石掉落,同时左帮出现拉裂现象。

图 6 和图 7 为随着工作面的推进溶洞各监测点水平位移变化曲线以及溶洞各监测点水平应力变化曲线.从图 6 可以看出,在开挖至 80 m 之前,各监测点几乎没有水平位移,随着工作面的继续推进,左帮位移突然增大,顶部、底部以及右帮都出现不同程度的水平位移.从图 7 可以看出,在开挖至 80 m 之前,底部在拉应力的作用下水平应力逐渐增大,其他应力变化不明显,在工作面推进至 80 m 以后,顶部水平应力突然增大,同时,左帮右帮应力也有明显增加。

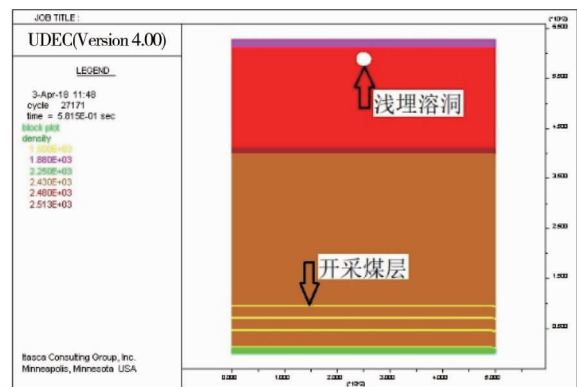


图2 数值模拟模型

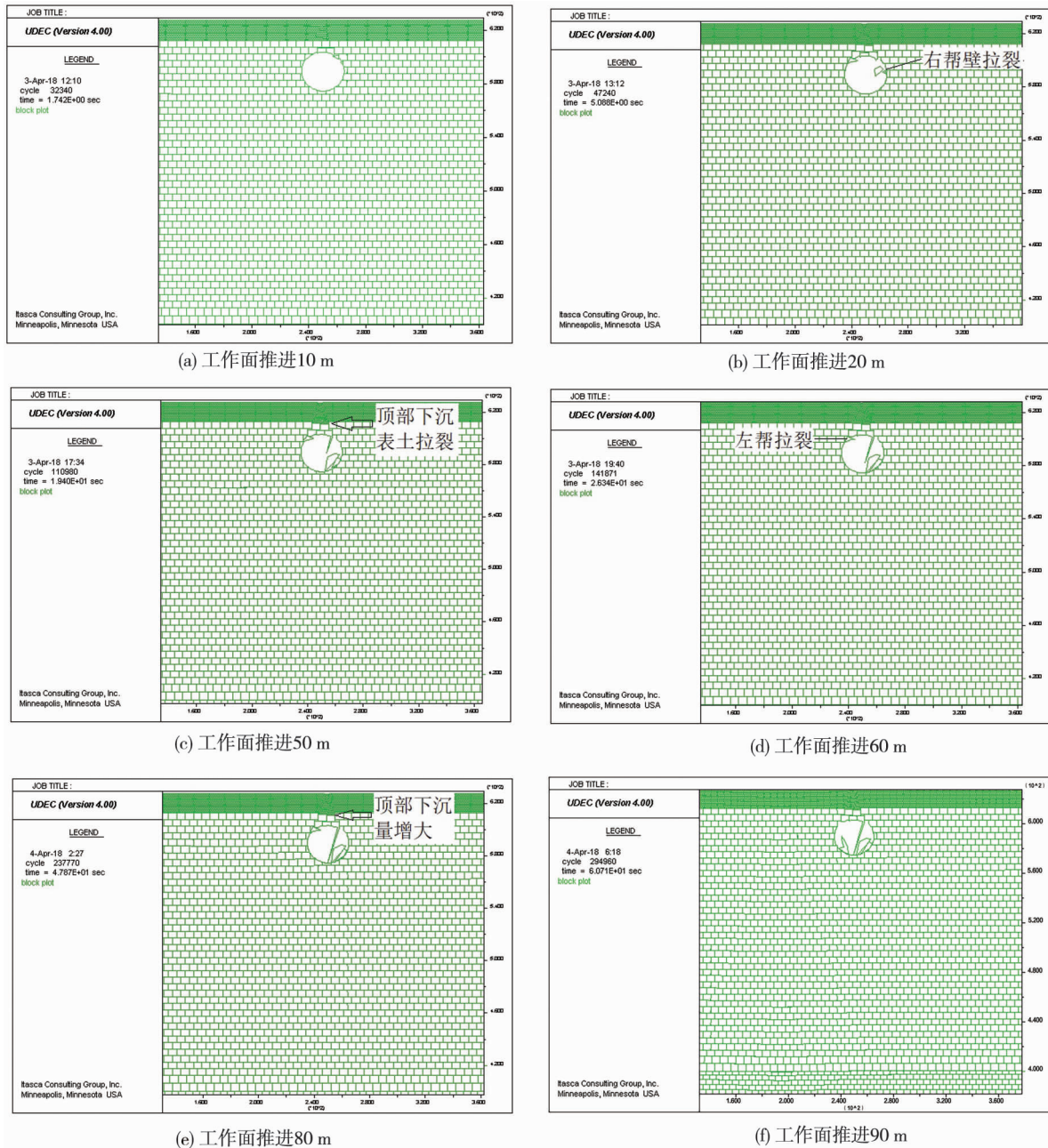


图3 不同推进距离溶洞破坏状态

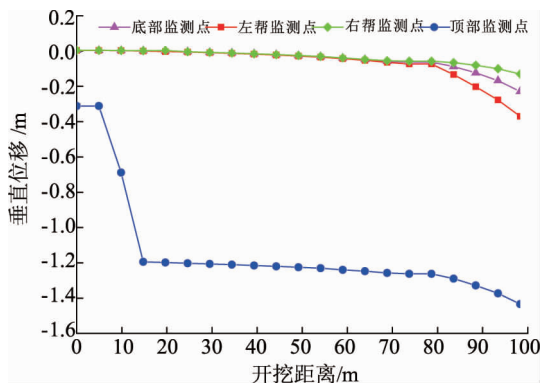


图4 各监测点垂直位移变化曲线

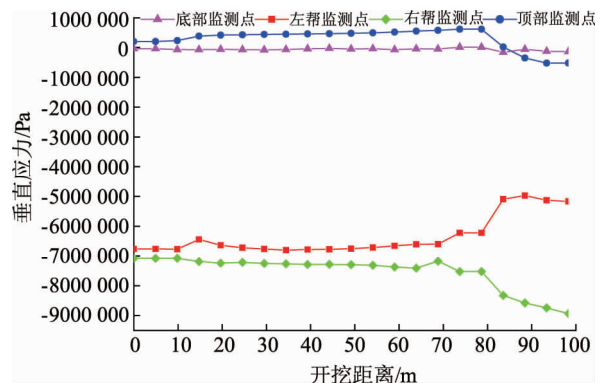


图5 各监测点垂直应力变化曲线

由此可见,溶洞在采动影响下发生破坏,且溶洞顶板及周帮破坏产生的裂隙向表土层方向以及两帮周边扩展,破坏了原有的岩石隔水性.

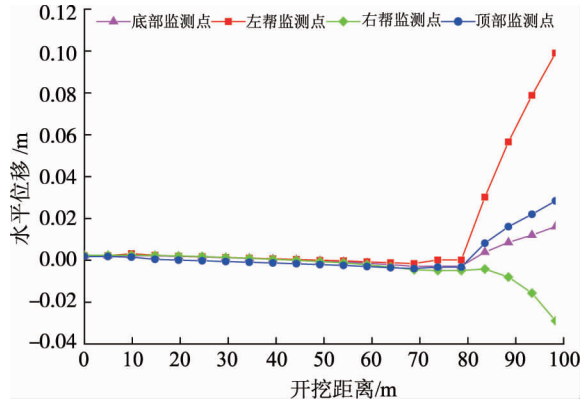


图 6 各监测点水平位移变化曲线

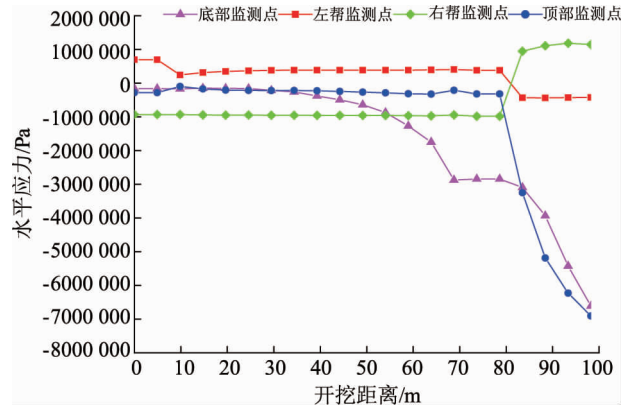


图 7 各监测点水平应力变化曲线

2.2 采动地表裂缝与岩溶洞间隔水层性质分析

采动地表裂缝的形成及特征与有无第四纪松散层密切相关.根据山脚树资料显示,表土层为第四纪由坡积、残积、冲积形成的松散层,其土体抗剪强度较低,在土体单元受到竖直剪应变破坏时,极易形成地裂缝.体积应变大于零表示单元体膨胀,若取地表移动盆地走向主断面单元体的 $\varepsilon_y = 0$, 则地表移动盆地走向主断面走向地表裂缝发育的条件为

$$\varepsilon_x + \varepsilon_z \geq 0. \tag{1}$$

即有

$$\varepsilon_x + \varepsilon_z = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{E}(\sigma_x + \sigma_z) \geq 0. \tag{2}$$

由 $\sigma_z = -\gamma h$ 可得 $\sigma_x \geq \gamma h$, 于是有

$$2c \cdot \tan(45 + 0.5\varphi) - \gamma h \cdot \tan^2(45 + 0.5\varphi) \geq 0; \tag{3}$$

$$h \leq \frac{2c \cdot \tan(45 + 0.5\varphi)}{\tan^2(45 + 0.5\varphi) - 1}. \tag{4}$$

根据实验资料显示,第四纪土层的内聚力以及内摩擦角分别为 87 kPa 及 20° , 此计算可知:

$$h \leq \frac{2c \cdot \tan(45 + 0.5\varphi)}{\tan^2(45 + 0.5\varphi) - 1} \leq \frac{2 \times 0.087 \times \tan(45 + 0.5 \times 20)}{\tan^2(45 + 0.5 \times 20) - 1} = 0.24. \tag{5}$$

即地表裂缝发育深度 $h \leq 0.24$ m.

而溶洞处于地表正下方 38 m 处的位置,由此可见,采动引起的地裂缝并未与溶洞贯通,但根据资料可知,第四纪表土层遇水极易处于饱和状态,致使其抗剪强度降低,在外力作用下极易崩解,裂缝进一步扩张,因此极易与溶洞导通.当雨季来临时,地表水的溶蚀和侵蚀作用将第四纪表土层的松散物质带入岩溶洞.因此,地表裂缝与岩溶洞间的表土层部分并不能起到隔水层的作用,反而形成了导水通道.降雨来临时,部分地表水由地面排水沟流走,部分地表水可能通过上述导水通道与井下裂隙带形成的渗透通道进入井下,故裂隙带发育高度的计算尤为重要.

2.3 开采诱导出采动裂隙带高度分析

以山脚树矿开采至 10#煤层为基本数据进行理论计算,其中煤层累计采厚为 13 m,离地面最近的煤层埋深为 532 m.按照最大裂隙带经验计算公式:

$$H_f = \frac{100M}{(3.3n + 3.8)} + 5.1 = 99.99. \tag{6}$$

式中: H_f 为最大裂隙带高度; M 为累计采厚; n 为煤分层数,取 3.

计算可知最大裂隙带高度 $H_f = 99.99$ m,而 10#煤层处于井下 532 m 处,地表裂缝与溶洞也可以形成导水通道.所以,

$$H - 38 - H_f = 394.01. \tag{7}$$

式中: H 为 10#煤层埋深;38 为溶洞所处位置.

由此可见,地表裂缝及溶洞形成的导水通道与最大裂隙带高度 H_f 之间有 394.01 m 的隔水层,因此在没有其他因素影响下,最大裂隙带与地表裂缝及溶洞之间岩层并没有贯通.同时根据模拟结果显示,随着井下开采,采动裂隙带发育但依然未能与地表裂缝及溶洞导通.但是矿区内断层发育,当溶洞破坏区与活化断层连通,便会形成完整的流动通道.

3 地表岩溶塌陷的形成机理

3.1 岩溶洞与断层伴生关系

根据山脚树矿勘探资料提供和实际生产证实,矿区内有大小断层 50 多条,断层发育,且多数出露地表,且矿区处于岩溶发育区,各种岩溶地貌千姿百态以及星罗棋布的漏斗和洼地、形态奇异的溶洞等,可溶性岩及非可溶性岩相间分布.因此,断层极易与浅埋溶洞导通,形成连通结构.Jacek Szczygieł^[28]认为发育于地表的断层,在遭到侵蚀后,当溶洞顶部向上延伸的地方与断层相遇时特别容易形成塌陷坑.根据山脚树矿断层分布及落坑分布有如下空间分布关系,如图 8 所示.

从图 8 可以看出,溶洞塌陷区基本位于断层交汇处或断层附近,可见断层是岩溶塌陷的影响因素,断层可作为溶洞与采空区之间连接的桥梁.

3.2 断层与井下采空区关系

根据山脚树矿地质资料以及区内断层分布情况可知断层与采空区空间分布关系如图 9 所示.从图 9 可以看出,21104,21126 以及 21156 工作面都处于 F909 大断层附近.F909 断层属于斜交正断层,断层有较大倾角,此断层结构面紊乱,局部地层带 1 m 左右,落差 1~8 m.相关研究表明^[29-31],断层会降低矿体上盘岩体的整体性和连续性,且断层附近煤岩体破碎,距离断层越近煤岩体的裂隙发育程度越强,致使采空区附近压应力增大,采空区顶板下沉,并可能会使顶板出现拉裂现象.同时,在采动影响下,可能会加剧断层的活化,并伴有裂隙深度发育,形成滑坡构造裂隙.据山脚树钻孔资料显示,滑坡积水水位较深,凡在该滑坡体内施工的钻孔穿过滑坡体时均见严重漏水.因此,在采动影响下,断层及滑坡裂隙构造极易与采空区导通.综上所述,断层即与岩溶洞裂隙相互伴生,同时又与井下采空区导通.

因此降水会通过地表裂缝与溶洞破坏区经过断层裂隙进入井下采空区,进一步加大地表水和松散的流失.故断层是形成岩溶塌陷的必要条件.

3.3 降雨的渗压效应

渗压效应是指由于降雨或地表水等上部水体补给岩溶地下水时对上覆岩土产生的综合作用^[17,32-34].降雨过程中及雨后,一方面雨水沿盖层土体的孔隙下渗过程时,造成土体含水量升高、饱和度增加,引起土体天然容重增加;另一方面,地表雨水积聚,积水水体重量对土体构成静荷载.由于土体含水量增加而造成土体抗剪强度降低的作用.降雨使土体含水量升高,土质变软,改变了土体的力学性能.Charles^[35]利用改进的三轴仪进行了室内土体失水与吸水 2 种过程的水-土特征曲线的对比测定试验.根据试验所得的 2 种过程的水-土特征曲线不难看出,无论是失水还是吸水过程土体基质吸力都随含水量的增高而降低,但土体

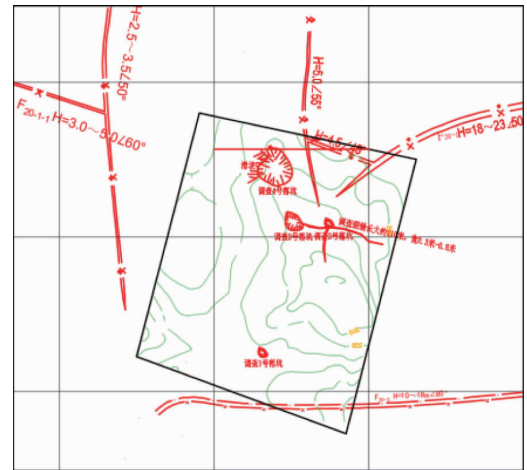


图 8 断层与落坑空间分布关系

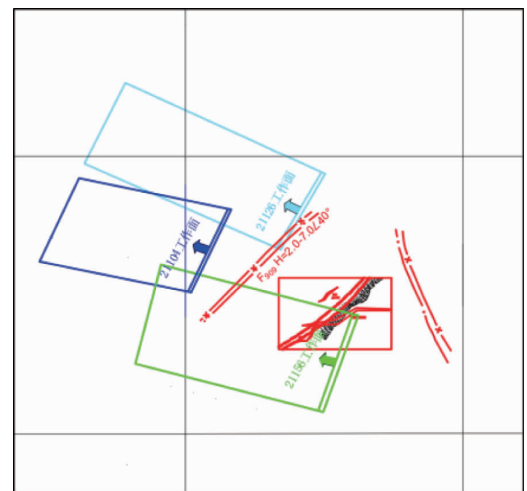


图 9 断层与采空区空间关系

在同样含水量情况下,土体吸水过程中的吸力要明显小于失水过程.即土体的抗剪强度随着含水量的增高而降低,特别是吸水情况下,土体软化的速度很快.

在雨水作用下,会致使土体饱和度增加,土体孔隙中气水含量比降低,透气性变差,从而在地下水变化时,溶洞空腔内易于形成较大的真空负压差,主要为负压封闭效应,使空洞平衡拱不断破坏而陷落致塌.Gutiérrez^[36]等认为自然以及人为因素的影响对塌陷坑发展具有诱导作用,尤其降雨以及采矿导致的水位下降是主要的诱导因素.根据山脚树矿水文地质条件可知,矿井涌水量与降雨量的关系如图10所示.

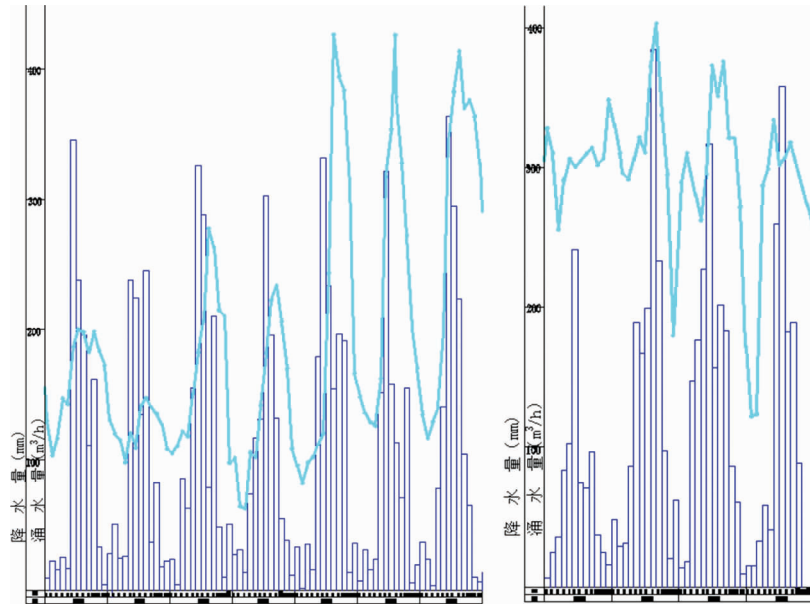


图10 矿井涌水量与降雨量动态曲线

从图10可以看出,2001年—2007年间以及2014年—2017年间山脚树矿区随着降雨量的增加,矿井涌水量也随之增加,并呈现雨季旱季的周期性变化.山脚树矿区有调查研究结果表明,岩溶塌陷发生时,岩溶地下水位埋深一般在10~20 m左右,且适逢大雨量降水.自然塌陷均发生在雨季,特别是暴雨之后.由于降雨作用的诱发,使一些塌陷区的塌陷活动呈现出周期性,即每年雨季塌陷活动频繁,并使一些早期塌陷复活;旱季塌陷活动明显减弱,一般处于相对稳定.结合本文之前所述,雨水流经溶洞空腔—断层裂隙—采空区等,形成地面、岩层以及井下的连通整体,为形成地表裂缝,岩溶塌陷提供了条件.因此,在预测岩溶塌陷等灾害时,应重视断层,浅埋溶洞等复杂的地质因素以及降水的影响.

4 结论

1) 数值模拟结果表明,井下开采引起的应力扰动对上方浅埋溶洞具有破坏作用,致使溶洞顶部、底部、左帮以及右帮出现不同程度的拉裂现象,溶洞周围出现破坏区,为与断层及表土层导通创造了条件.

2) 通过理论分析及实际观测可知,井下开采对断层活化具有引导作用,同时断层活化加剧采空区周边煤岩体的破碎及裂隙的发育,为采空区与断层及裂隙导通提供了条件.

3) 根据矿井水文地质条件可知,在降雨作用下,雨水对土体渗透并侵蚀,致使溶洞塌陷,并在断层裂隙作用下,雨水进入采空区致使矿井涌水量增加,地表塌陷坑进一步扩大.

4) 数值模拟、理论分析以及现场观测结合表明,雨水会流经地表裂隙—溶洞破坏区—断层裂隙—导水裂隙带等,形成地面、上覆岩层以及井下采空区或工作面的通道,为形成地表裂缝,岩溶塌陷提供了条件.

参考文献:

- [1] 彭祖武,杨帆,尹欧,等.源市七甲村岩溶塌陷形成条件与机理分析[J].华南地质与矿产,2017,33(2):177-186.

- [2] 崔小平,向锋,肖松春.邵地区岩溶塌陷的形成条件与机理分析[J].国土资源导刊,2017,14(2):53-57.
- [3] 李颜贵,于孝民,刘子龙.滦县黄庄岩溶塌陷形成地质条件与岩溶塌陷机理分析[C]//中国地质学会.中国地质学会2013年学术年会论文摘要汇编——SO₂资源与环境地球物理勘查理论与方法技术分会场,中国地质学会:中国地质学会,2013:6.
- [4] Bell F G, Stacey T R, Genske D D. Mining subsidence and its effect on the environment; some differing examples[J]. *Environmental Geology*, 2000, 40: 135-152.
- [5] 刘辉,何春桂,邓喀中,等.开采引起地表塌陷型裂缝的形成机理分析[J].采矿与安全工程学报,2013,30(3):380-384.
- [6] Sasaoka T, Takamoto H, Shimada H, et al. Surface subsidence due to underground mining operation under weak geological condition in Indonesia[J]. *Journal of Rock Mechanics & Geotechnical Engineering*, 2015, 7(3): 337-344.
- [7] 王勇.遵义市仁江岩溶塌陷机制形成模式分析[J].勘察科学技术,2011(4):22-25.
- [8] 褚学伟,党爽,丁坚平.贵州岩溶塌陷分布及其影响因素分析[J].人民长江,2015,46(12):42-44.
- [9] 雷国良,周济祚,邓自民,等.贵州水城工业区覆盖型岩溶塌陷研究[J].中国地质灾害与防治学报,1996(4):39-46.
- [10] 宋小庆.影响贵阳地下空间开发的环境地质因素分析[J].地下空间与工程学报,2017,13(s2):503-507.
- [11] 袁道先.中国岩溶学[M].北京:地质出版社,1994.
- [12] Palmer A N, Palmer M V.天坑形成的水力机制[J].中国岩溶,2006(s1):71-78.
- [13] 蒋小珍,雷明堂.第十届岩溶塌陷、工程、环境影响国际会议综述[J].中国岩溶,2005(4):349.
- [14] 杨晓燕,袁仁茂,陈锁忠.南京栖霞山地区岩溶地面塌陷成因研究[J].北京大学学报(自然科学版),2001,37(6):839-844.
- [15] 蒙彦,殷坤龙,雷明堂.水位波动诱发岩溶塌陷的概率分析[J].中国岩溶,2006,25(3):239-241.
- [16] 刘秀敏,陈从新,沈强,等.覆盖型岩溶塌陷的空间预测与评价[J].岩土力学,2011,32(9):2785-2790.
- [17] 贺可强,王滨,万继涛.枣庄岩溶塌陷形成机理与致塌模型的研究[J].岩土力学,2002,23(5):564-569.
- [18] Linares R, Roque C, Gutierrez F, et al. The impact of droughts and climate change on sinkhole occurrence. A case study from the evaporite karst of the Fluvia Valley, NE Spain[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 579:345-358.
- [19] 王建秀,杨立中,刘丹,等.阻水盖层分布区岩溶塌陷的物质基础及成因研究[J].水文地质工程地质,2000,27(4):25-29.
- [20] 胡炳南.丰城矿区坪湖煤矿岩溶塌陷破坏研究[J].矿山测量,2012(6):1-4.
- [21] 王明立.煤矿开采诱发岩溶地表现象的机理分析[J].煤炭科学技术,2014,42(8):5-7.
- [22] 王三丁,张令明.湖南省涟源市岩溶地面塌陷特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(2):122-126.
- [23] Bai H, Ma D, Chen Z. Mechanical behavior of groundwater seepage in karst collapse pillars[J]. *Engineering Geology*, 2013, 164:101-106.
- [24] 陈明晓.岩溶覆盖层塌陷的原因分析及其半定量预测[J].岩石力学与工程学报,2002,21(2):285-289.
- [25] Frumldn A, Zaidner Y, Na'aman I, et al. Sagging and collapse sinkholes over hypogenic hydrothermal karst in a carbonate terrain[J]. *Geomorphology*, 2015, 229(15):45-57.
- [26] 张丽芬,曾夏生,姚运生,等.我国岩溶塌陷研究综述[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(3):126-130.
- [27] Sahu P, Lokhande R D. An investigation of sinkhole subsidence and its preventive measures in underground coal mining[J]. *Procedia Earth & Planetary Science*, 2015, 11: 63-75.
- [28] Szczygiel J, Golicz M, Hercman H, et al. Geological constraints on cave development in the plateau-gorge karst of South China (Wulong, Chongqing)[J]. *Geomorphology*, 2017, 304: 50-63.
- [29] 张敏,仵磊,郭源,等.断层对采空区地表沉降影响的模拟[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(6):1834-1838.
- [30] 史秀志,黄刚海,张舒.复杂条件下露天转地下开采断层对采空区影响研究[J].金属矿山,2009(12):15-19.
- [31] Michael R S, Thomas J. Fault induced rock bursts and micro-tremors - Experiences from the Gotthard Base Tunnel[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2018, 81: 358-366.
- [32] 高培德,王林峰.覆盖型岩溶塌陷的塌陷机制分析[J].中国岩溶,2017,36(6):770-776.
- [33] 焦阳,白海波.煤层底板含隐伏溶洞滞后突水机理[J].煤炭学报,2013,38(s2):377-382.
- [34] 王滨,李治广,董昕,等.岩溶塌陷的致塌力学模型研究—以泰安市东羊娄岩溶塌陷为例[J].自然灾害学报,2011,20(4):119-125.
- [35] Ng C W W, Pang Y W. Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(2):157-166.
- [36] Gutierrez F, Fabregat I, Roque C, et al. Sinkholes and caves related to evaporite dissolution in a stratigraphically and structurally complex setting, Fluvia Valley, eastern Spanish Pyrenees. Geological, geomorphological and environmental implications[J]. *Geomorphology*, 2016, 267(15):76-97.