

马 晓, 蒋小珍, 曹细冲, 等. 岩溶空腔水气压力脉动效应的发现及意义[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 404-410.  
DOI: 10. 11932/karst20190310

## 岩溶空腔水气压力脉动效应的发现及意义

马 晓<sup>1,2</sup>, 蒋小珍<sup>1</sup>, 曹细冲<sup>3</sup>, 潘宗源<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/中国地质调查局岩溶塌陷防治重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 青岛地矿岩土工程有限公司, 山东 青岛 266071)

**摘 要:**通过塌陷的地质模式概化,设计物理模型实验探索岩溶空腔在开放、密闭条件下,地下水位下降时水气压力变化的规律。实验结果表明:(1)在密闭条件下水位下降时,空腔内的水气压力处于负压状态,并呈有规律的波动,波动周期和幅度主要受初始水位的影响;(2)在密封—开放—密封实验中,当系统突然转为开放条件时,岩溶空腔内的水气压力发生突变,压力突变值可达密闭系统条件下最大波动值的 3 倍;(3)岩溶空腔水位下降过程中,水气压力对岩溶空腔顶部有周期性的高频振动作用,具有压力脉动的特征;(4)密闭条件下的岩溶空腔水位下降引起的水气压力变化可通过时间变量的一次函数来描述,函数斜率受出水口及岩溶空腔截面积影响,截距与初始水位紧密相关。对水气压力所产生的高频振动特征进行深入研究,将有助于岩溶塌陷机理及防治研究的突破。

**关键词:**岩溶塌陷;水气压力;高频监测;高频振动;压力脉动

**中图分类号:**P642.25 **文献标识码:**A

**文章编号:**1001-4810(2019)03-0404-07

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



### 0 引 言

因工农业、城镇化的发展,地下水大量开采、矿山疏干排水、建筑基坑排水等的影响,导致岩溶地下水位迅速下降,加剧了岩溶塌陷对生命、财产的威胁与破坏。我国约有 75% 的岩溶塌陷属于人类工程活动诱发<sup>[1-2]</sup>,据 1997 年的全国塌陷数据统计,因抽排水导致了大量的塌陷,占塌陷总数的 42.77%<sup>[3]</sup>。典型的例子包括:遵义金塘谷地塌陷,泰安津浦线铁路三角区塌陷和湖南宁乡大成桥塌陷。遵义金塘谷地自七十年代对地下水过量抽取,先后形成塌陷点 68 个,最大塌陷坑长 28 m,宽 15.5 m,深大于 10 m<sup>[4]</sup>;泰安津浦线铁路三角区位于泰安城区水源范围内,由于对岩溶地下水的过量开采(最大达 1.6 万 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>),在水源开采井周边 600 m 影响范围内,发生大量塌陷<sup>[5]</sup>;湖南煤炭坝煤矿由于长期的疏干排水,形成面

积巨大的地下水位降落漏斗,而大成桥镇位于岩溶地下水疏干区,自 1982 年开始,先后发生塌陷 172 处,造成巨大的经济损失<sup>[6]</sup>。

因此,对于地下水位快速下降诱发塌陷,了解地下水气压力变化的规律尤为重要,而且对岩溶塌陷的成因机制以及预警防治有着非常重要的指导意义。岩溶塌陷的负压吸蚀致塌模式从宏观角度考虑负压对土体的吸蚀作用,认为负压是土洞扩张的主要作用力,但岩溶空腔内的负压随着岩溶地下水位下降的形成、消散过程及土体破坏过程,一直未有监测数据支持,因此对于塌陷机理的认知较为模糊。目前岩溶地下水气压力监测技术能实现对岩溶管道系统中的水气压力进行实时监测<sup>[7-8]</sup>,其主要是通过钻孔埋设高精度水气压传感器和孔隙水压力传感器,在密闭状态下对地下水气压力进行高频的数据采集<sup>[9]</sup>,监测数据频率越高,能捕捉到岩溶塌陷发生前后的地下水气压

基金项目:国家自然科学基金(41472298);中国地质调查局项目(DD20190266)

第一作者简介:马晓(1994-),男,硕士研究生,主要从事岩溶塌陷灾害机理研究。E-mail:532329302@qq.com。

通信作者:蒋小珍(1970-),女,博士,研究员,主要从事岩溶地质灾害防治研究工作及 GIS 应用。E-mail:jxz@karst.ac.cn。

收稿日期:2018-07-15

力变化的几率则越大。湖南宁乡大成桥地区、广西来宾吉利村通过建立岩溶塌陷综合监测站,运用基于岩溶系统水气压力的岩溶塌陷动力监测技术进行监测,对该区岩溶塌陷机理分析后,发现气爆对基岩上伏土体的破坏作用明显<sup>[6,10]</sup>,但是受传统水压力传感器的采集频率限制,难以获得气爆的形成过程。为了探索该过程,本文根据湖南宁乡大成桥塌陷地质模型,概化设计了室内物理试验模型并进行实验,采用采样频率达 20 Hz 的光纤水压力传感器,采集岩溶空腔在开放和密闭条件下排水过程的水气压力数据,精细再现岩溶空腔负压形成、消散过程,以进一步探究岩溶塌陷的成因机理,从而为岩溶塌陷的防治提供更可靠的理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 室内试验模型设计

为了了解矿山在疏排水过程中岩溶空腔的水气压力突变规律,将湖南宁乡大成桥塌陷的地质模型(图 1)概化为图 2 实体模型。实体模型主要包括模拟岩溶空腔、带开关的气孔及进、出水口。出水口位于底部,模拟地下水的抽排;气孔、传感器和进水口位于空腔顶部。

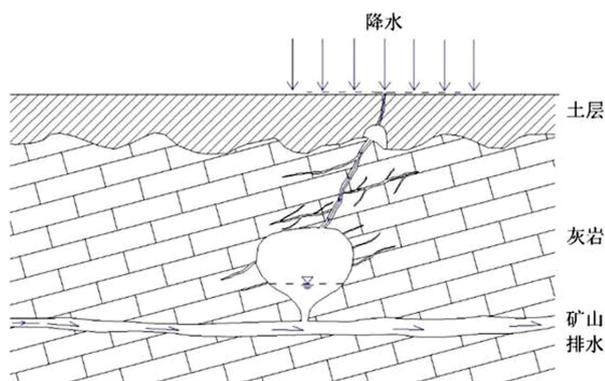


图 1 地质模型

Fig.1 Geological model

本次室内物理实验模型主要包括三部分:岩溶空腔、供排水及通气系统、监测系统。

#### (1) 岩溶空腔

岩溶空腔为直径 27 cm、高 40 cm 透明的塑料圆柱体水箱,容积 18.9 L,人工在水箱外侧由底部向顶部标记刻度,最小刻度为 1 cm,控制初始水位的高度。

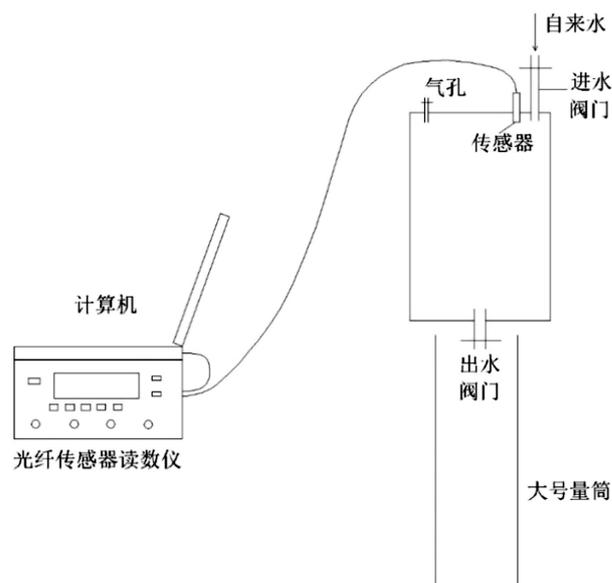


图 2 实验模型

Fig.2 Experimental model

#### (2) 供排水及通气系统

岩溶空腔顶部设置  $\Phi 20$  mm 的进水口,用  $\Phi 25$  mm 皮管连接水源,进水时模拟岩溶空腔水位上升,排水时关闭;排水系统为水箱底部的出水口,直径 20 mm;通气系统是在岩溶空腔顶部设置  $\Phi 10$  mm 进气孔,气孔可用橡胶塞进行封堵,灵活控制岩溶空腔的开放及密封状态。

#### (3) 监测及采集系统

监测系统主要包括人工记录及自动记录,人工记录包括水位下降的速度、气泡现象及照片;自动记录包括高精度的光纤水气压力探头、光纤传感器读数仪 UMI-4 及控制光纤传感器读数仪的笔记本电脑。光纤水压力探头及 UMI-4 数据采集仪的数据采集频率设置为 20 Hz (0.05 s 采样间隔),实现对模拟岩溶空腔内水气压力变化的高频数据采集。

### 1.2 实验设计

岩溶空腔内的水气压力随着水位的降低而变化,因此设计 3 种实验类型,分别模拟岩溶空腔在开放、密闭及密闭—开放转换条件下的水位下降(表 1),此外还设计不同初始水位高度,探索水气压力变化的影响因素及规律:

(1) 开放条件:模拟水位下降时岩溶空腔通过孔隙裂隙与外界大气进行联通。模拟实验中,水位在下降时保持气孔处于开启状态;

(2) 密闭条件:模拟水位下降时岩溶空腔处于密封系统,即与外界大气连通的裂隙被充填或第四系水

位的抬升形成的密封系统。模拟实验中,水位在下降时保持气孔处于封堵状态;

(3)密闭—开放—密闭条件:该系统模拟密封状态下,岩溶空腔从一定初始水位下降,在水位下降一定时间后,孔隙或裂隙突然疏通可以与外界进行气体交换,然后岩溶空腔再次处于密闭状态。模拟实验中,水位在下降到某一高度时开启气孔,保持开启状态使水位下降到设计高度再次封堵,直至实验结束。

表 1 实验类型

Table 1 Experiment type

| 实验类型           | 起始水位/cm | 气孔状态                   |
|----------------|---------|------------------------|
| 开放系统           | 30      | 开启                     |
|                | 25      | 开启                     |
|                | 20      | 开启                     |
| 密闭系统           | 30      | 关闭                     |
|                | 25      | 关闭                     |
|                | 20      | 关闭                     |
| 密闭—开放—<br>密闭系统 | 30      | 25~20 cm 开启, 20 cm 后关闭 |
|                | 30      | 25~15 cm 开启, 15 cm 后关闭 |
|                | 30      | 25~10 cm 开启, 10 cm 后关闭 |
|                | 30      | 20~15 cm 开启, 15 cm 后关闭 |
|                | 30      | 20~10 cm 开启, 10 cm 后关闭 |
|                | 25      | 20~15 cm 开启, 15 cm 后关闭 |
|                | 25      | 20~10 cm 开启, 10 cm 后关闭 |
|                | 25      | 15~10 cm 开启, 10 cm 后关闭 |
|                | 25      | 20~10 cm 开启, 10 cm 后关闭 |
|                | 20      | 15~10 cm 开启, 10 cm 后关闭 |

注:3 种类型的实验终止水位都为 5 cm。

## 2 试验结果

### 2.1 密闭状态下水位下降,岩溶空腔水气压力具有高频振动的特征

在密闭系统条件下水位下降时,岩溶空腔内会出现负压,负压随着水位下降呈现周期性的波动,并逐渐趋为 0 值。岩溶空腔为透明塑料材质,出水口放水初期,岩溶空腔内气泡到达水面前,岩溶空腔侧壁、顶部出现凹陷现象,当气泡在水面溃散瞬间,凹陷迅速回复原状。水位下降过程中,岩溶空腔顶部、侧壁在不断重复凹陷、复原的过程,如同“呼吸”一般,直至实验结束。此外,实验过程中,出水口处间歇性的产生气泡,水体中的气泡在浮力的作用下迅速上升并在水面溃散,气泡溃散有一定的冲击作用,在水面涌起水

柱(图 3),产生激荡效果。水柱最高时可达模拟岩溶空腔顶部。



图 3 两种不同水位高度气泡溃散形成的水柱

Fig. 3 Water column formed by the bubbles collapsing at two different water levels

60 组不同初始水位的实验中,放置在岩溶空腔顶部的水气压力传感器得到的监测数据也较好地反映了水气压力具有高频振动的特征,压力波动是导致岩溶空腔桶壁的“呼吸”的原因。图 4 为其中一组初始水位 30 cm 的水气压力曲线图。实验初始,水气压力负值达最大-0.037 bar,振幅值 0.004 5 bar,周期 0.85 s;69 s 时,即实验中段,水气压力最大值减小至-0.035 bar,振幅值增大到 0.01 bar,周期 1.40 s;实验末段,幅值达 0.019 bar,为初始值的 4.2 倍,周期延长到 1.67 s。该次实验作用于岩溶空腔的最大负压折算为水头高度为 37 cm,高出初始水位 7 cm。

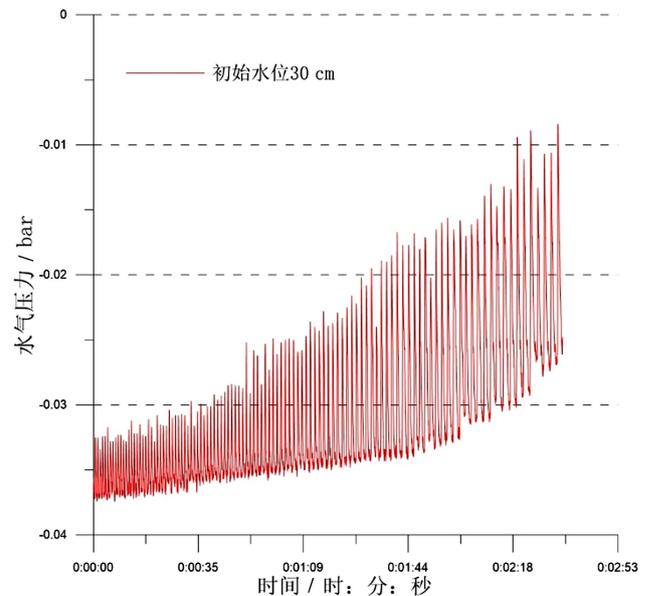


图 4 水位下降水气压力变化图

Fig. 4 Water-gas pressure change against water level drop

### 2.2 岩溶空腔由密闭系统至开放系统,水气压力突变明显

通过对比 3 种实验条件(开放、密封、密封—开放—密封),岩溶空腔中水气压力变化具有明显规律性(图 5):

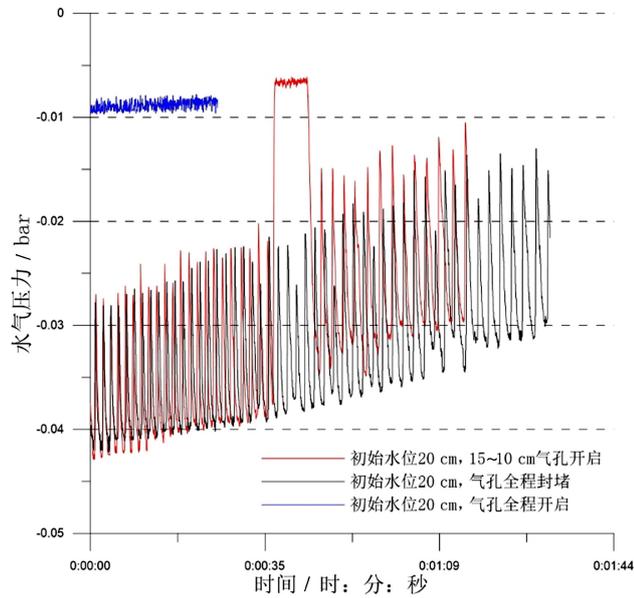


图 5 岩溶空腔开放—密闭条件下水气压力曲线对比图  
Fig. 5 Comparison of water-gas pressure curves under open-airtight conditions of karst cavity

(1)岩溶空腔在开放条件下,水位下降,水气压力变化波动幅度小,近于直线;

(2)岩溶空腔在密闭条件下,水位下降,水气压力高频振动;

(3)岩溶空腔在密闭—开放—密闭条件下,水位下降过程中岩溶空腔一直处于负压状态,水气压力变化曲线在整体上与密闭状态下类似,呈现先密后疏、高频振动及负压逐渐减小的趋势。但是,当岩溶空腔气孔突然打开,岩溶空腔从密闭转为开放时,空腔内的水气压力会发生突变,突变值为正常密闭状态波动值的 3 倍;随着气孔的堵塞,水气压力又开始高频振动,振幅基本与完全密闭条件下一致,只是振动向上平移,最大负压值变小。

### 2.3 岩溶空腔在密闭状态下,水位下降水气压力波动的敏感性因素统计

敏感性因素分析主要针对初始水位为 30 cm, 25 cm, 20 cm 不同水位高度进行统计。统计值包括岩溶空腔始末水位高度、水气压力波动的始末周期和幅度(表 2、表 3)。统计数据表明,不同的初始水位,水气压力曲线的周期、幅度及其差值不同。

表 2 周期变化统计

Table 2 Periodic change statistics

| 初始水位/<br>cm | 初始周期范围/<br>s | 末尾周期范围/<br>s | 周期差值范围/<br>s |
|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 30          | 0.89~0.97    | 1.78~2.2     | 0.73~0.97    |
| 25          | 1.25~1.30    | 1.88~2.0     | 0.63~0.70    |
| 20          | 1.67~1.75    | 1.95~2.1     | 0.25~0.40    |

表 3 波动幅度变化统计

Table 3 Fluctuation change statistics

| 初始水位/<br>cm | 初始幅度/<br>bar | 末尾幅度/<br>bar | 幅度差值范围/<br>bar |
|-------------|--------------|--------------|----------------|
| 30          | 0.005~0.015  | 0.015~0.020  | 0.004~0.015    |
| 25          | 0.010~0.012  | 0.015~0.020  | 0.003~0.008    |
| 20          | 0.012~0.015  | 0.016~0.018  | 0.002~0.004    |

在压力波动周期方面,初始水位越高,初始周期与末尾周期相差越大(表 2)。初始水位 30 cm 时,周期差值范围可达 0.73~0.97 s,而初始水位在 20 cm 时,其周期差值范围只有 0.25~0.40 s,周期差值范围随初始水位的升高呈正相关。另外,三种不同初始水位实验末期的水气压力波动周期相近,说明末尾周期大小与初始水位无关。

在压力波动幅度方面,初始波动幅值与初始水位呈负相关。初始水位为 30 cm 时,多组实验所得水气压力波动的初始范围仅为 0.005~0.015 bar,而初始水位为 20 cm 时,水气压力波动的初始范围升高到 0.012~0.015 bar。末尾幅度却不受初始水位影响,整体幅度都在 0.015~0.020 bar 之间。此外,首尾水气压力波动幅值的差值与初始水位呈正相关关系,初始水位越高,其幅度差值范围越大。表 3 中,初始水位 30 cm 的幅度差值最大可达 0.015 bar,而初始水位为 20 cm 时,最大差值仅为 0.004 bar。

综上所述,初始水位的高低影响水气压力波动曲线的初始周期与初始波动幅度,实验结束时的周期与幅度与初始水位无关,同一终止水位条件下,压力波动末尾周期与幅度相近。初始水位与终止水位相差值越大,始末水气压力波动的周期和幅度差值也越大。

### 2.4 岩溶空腔密闭状态水位下降水气压力曲线拟合方程

岩溶空腔在密闭状态水位下降过程中,水气压力随时间变化整体呈现规律性上升趋势,为了直观显示水气压力整体的上升幅度,将不同初始水位的水气压

力曲线拟合为一次函数趋势线,量化水气压力变化的主要影响因素。

拟合方程主要针对密闭和开放状态下 30 cm、25 cm 以及 20 cm 三种初始水位下降实验,每种实验类型要求进行 30 组以上。图 6 为岩溶空腔在密闭条件下

水气压力随着水位下降时间的变化曲线及拟合方程。

压力曲线一次函数拟合方程如下:

$$y = kx + C$$

式中: $x$ —时间(s); $y$ —水气压力(bar); $k$ —负压消散系数; $C$ —常数。

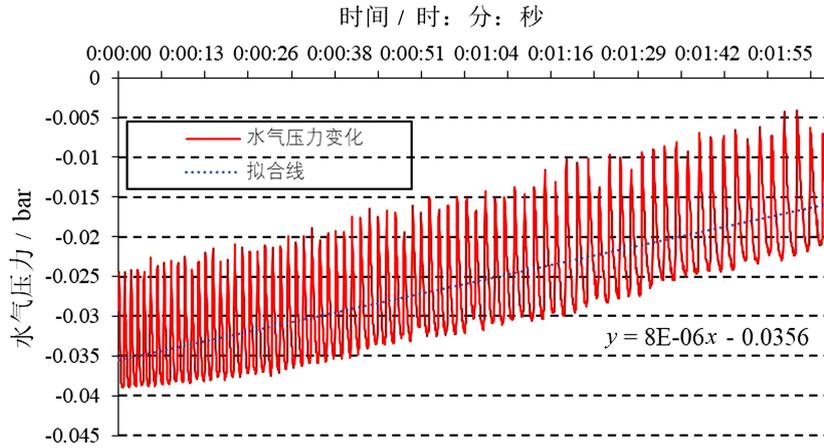


图 6 初始水位 25 cm 水气压力变化趋势

Fig. 6 Variation trend of water-gas at an initial water level of 25 cm

拟合方程的常数(C)主要受初始水位的影响。当初始水位为 30 cm 时,C 值在  $-0.040 \pm 0.0005$  bar 区间内波动;初始水位为 25 cm 时,C 值在  $-0.035 \pm 0.0005$  bar 区间波动;而初始水位为 20 cm 时,C 值减小,为  $-0.030 \pm 0.0005$  bar。水位每升高 5 cm,C 值相应会增加 0.005 左右。

在岩溶空腔为密闭系统,且进行水位下降实验时,斜率( $k$ )的大小与初始水位高度无关,实验拟合的斜率为  $8 \times 10^{-6}$  常数。但是,当出水口截面面积逐渐变小时, $k$  也相应逐渐变小,统计结果表明, $k$  与空腔、出水口的截面面积有关,经过计算与初步验证,得到斜率  $k$  的计算方法:

$$k = [S_2 / (S_1 - 2S_2)]^3$$

式中: $S_1$ —岩溶空腔截面面积; $S_2$ —出水口截面面积。

### 3 岩溶空腔内水气压力脉动效应对岩溶塌陷的影响

岩溶空腔在气孔封闭状态水位下降过程中,外界大气从出水口进入空腔,在水中不断上升直至于水面处溃散,空腔内的水气压力值主要有以下特征:

(1)岩溶空腔中的水气压力随水位下降进行有规律的波动,具有一定周期性;

(2)在空腔内不同位置产生不同的水气压力,即

水气压力作用于被作用对象上并不均匀<sup>[11]</sup>;

(3)水气压力变化周期持续时间短。

综上所述,实验中岩溶空腔内水气压力波动的特征较好地吻合了流体力学的水气压力脉动理论<sup>[12-17]</sup>。但是,在理论计算公式方面仍需后续进一步推导并加以验证。

密闭系统岩溶水位的下降,导致空腔内的水气压力处于负压状态,且进行高频率的振动,这是以前地下水水位监测未发现的。说明岩溶空腔顶部的岩土体不止受到负压的吸蚀作用<sup>[18]</sup>,并且会受到水气压力的高频振动所形成的共振效应影响。

该过程的发现较好地解释了岩溶土层塌陷多发于地下水位在基岩面波动阶段<sup>[19-23]</sup>及雨季<sup>[10,24]</sup>。岩溶区抽排水导致地下水快速下降,岩溶空腔周围的通气裂隙无法与外界进行有效气体交换时会迅速形成负压,为了平衡岩溶空腔内形成的巨大负压,在岩溶管道中或出水口会有气体反复间歇性地进入到岩溶空腔负压区(地质结构表现为具有较好的密封层,如隔水层、双层地下水、地表积水等),导致岩溶空腔内水气压力进行周期性的高频振动,长时间的水气压力振动导致空腔壁的共振及破坏。特别是溶沟溶槽的上伏软流塑状土层,负压的高频振动导致土体的流失,形成土洞,随着水气压力的不断波动,土洞继续扩张,当上覆土层的内聚力不足以支撑土层自重时,地面产生塌陷。

代群力<sup>[25]</sup>从水位波动的宏观角度提出:突水初期或降雨期间,极易引起水位的波动。地下水在下降过程中,地下水位处于覆盖层时,水位的波动直接作用于覆盖层底部;地下水位低于覆盖层时,水面的波动通过气压传递而作用于覆盖层,当水位波动与上覆盖层固有频率一致时,就可能与盖层形成共振,引发塌陷。与本文所提出的水气压力脉动引发共振有所不同。

岩溶区在塌陷防治过程中,为了平衡空腔内的水气压力,往往会采用钻孔通气法来防止水气压力的高频振动及突变<sup>[19]</sup>。而本实验发现的水气压力变化规律,更是从科学实验的角度解释了钻孔通气法防治岩溶塌陷的科学内涵。但是,气孔孔径大小设置仍需下一步实验进行探索。

## 4 结 论

本文所设计的实验较好地模拟了地下水位下降过程中岩溶空腔内水气压力的变化。通过实验数据的整理,发现了岩溶空腔水气压力脉动效应,总结了其主要影响因素及对岩溶塌陷的机理过程及防治研究方面的意义,主要包括以下几点:

(1)岩溶空腔在密闭系统水位下降时,外界大气从出水口以气泡形式反复间歇性地进入岩溶空腔,气泡上升至水面溃散产生激荡作用,溃散后的气体对空腔有较大的冲击作用,并偶发共振现象。高频水气压力采样(0.05 s)的数据显示,岩溶空腔水气压力不仅处于负压状态,而且在高频振动。实验结果统计表明,初始水位影响高频振动的初始周期与初始波动幅度,不同实验由于终止水位相同,压力波动的末尾周期与末尾波动幅度相近。但是,初始水位与终止水位相差越大,始末周期与始末波动幅度差值也越大。

(2)密闭条件下监测所得水气压力变化数据能更好的反映水气压力对地下岩溶空腔上覆土体的破坏作用。模拟岩溶空腔在密闭系统水位下降时,一个周期的水气压力波动幅度在0.016 bar左右,而突然开启气孔会导致水气压力发生突变,突变幅度可达0.032 bar,约是正常波动状态的2倍。

(3)岩溶空腔在相对密闭条件下,水位下降导致的水气压力规律性波动是压力脉动现象。但相关计算公式需进一步的推导。

(4)该实验条件下,水气压力波动拟合线可用一次函数方程  $y = [S_2 / (S_1 - 2S_2)]^3 x + C$  表示。其中  $[S_2 / (S_1 - 2S_2)]^3$  为斜率,该值大小受出水口与模拟

岩溶空腔截面积的影响;C为截距,由初始水位决定,表现为初始水位越高,C值越小。但是该参数的可靠性及应用有待于下一步改变实验装置的截面积及出水口大小进行论证。

## 参考文献

- [1] 徐卫国,赵桂荣.论岩溶塌陷形成机理[J].煤炭学报,1986(2):1-11.
- [2] 左平怡.论岩溶地面塌陷的形成过程与机理[J].中国岩溶,1987,6(1):71-79.
- [3] 雷明堂,蒋小珍.岩溶塌陷研究现状、发展趋势及其支撑技术方法[J].中国地质灾害与防治学报,1998,9(3):1-6.
- [4] 李卫民.人为岩溶塌陷机理分析及防治措施[J].工程勘察,2010(S1):112-117.
- [5] 王延岭,陈伟清,蒋小珍,等.山东省泰莱盆地岩溶塌陷发育特征及形成机理[J].中国岩溶,2015,34(5):495-506.
- [6] 蒋小珍,雷明堂,管振德.湖南宁乡大成桥充水矿山疏干区岩溶系统水气压力监测及突变特征[J].中国岩溶,2016,35(2):179-189.
- [7] 李瑜,朱平,雷明堂,等.岩溶地面塌陷监测技术与方法[J].中国岩溶,2005,24(2):103-108.
- [8] 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(3):126-130.
- [9] 雷明堂,李瑜,蒋小珍,等.岩溶塌陷灾害监测预报技术与方法初步研究:以桂林市柘木村岩溶塌陷监测为例[J].中国地质灾害与防治学报,2004(S1):148-152.
- [10] 戴建玲,罗伟权,吴远斌,等.广西来宾市良江镇吉利村岩溶塌陷成因机制分析[J].中国岩溶,2017,36(6):808-818.
- [11] 曹细冲.矿井疏干区岩溶塌陷的水击气爆作用研究[D].北京:中国地质大学(北京),2017.
- [12] 郑源,汪宝罗,屈波.混流式水轮机尾水管压力脉动研究综述[J].水力发电,2007(2):66-69.
- [13] 吴玉林,吴晓晶,刘树红.水轮机内部涡流与尾水管压力脉动相关性分析[J].水力发电学报,2007(5):122-127.
- [14] 杨建东,胡金弘,曾威,等.原型混流式水泵水轮机过渡过程中的压力脉动[J].水利学报,2016,47(7):858-864.
- [15] 钱忠东,陆杰,郭志伟,等.水泵水轮机在水轮机工况下压力脉动特性[J].排灌机械工程学报,2016,34(8):672-678.
- [16] 杨孙圣,孔繁余,张新鹏,等.液力透平非定常压力脉动的数值计算与分析[J].农业工程学报,2012,28(7):67-72.
- [17] 李琪飞,刘超,王源凯,等.异常低水头下水泵水轮机压力脉动特性分析[J].兰州理工大学学报,2017,43(2):59-64.
- [18] 徐卫国,赵桂荣.试论岩溶矿区地面塌陷的真空吸蚀作用[J].地质论评,1981(2):174-180,183.
- [19] 蒋小珍.岩溶塌陷中水压力的触发作用[J].中国地质灾害与防治学报,1998(3):42-47.
- [20] 蒋小珍,雷明堂,管振德.岩溶塌陷灾害的水动力条件危险性评价指标:以广西贵港青云村为例[J].地下空间与工程学报,2012,8(6):1316-1321.
- [21] 蒋小珍,雷明堂,管振德.单层土体结构岩溶土洞的形成机理[J].中国岩溶,2012,31(4):426-432.

- [22] 王延岭. 山东省泰莱盆地岩溶地面塌陷影响因素分析[J]. 中国岩溶, 2016, 35(1): 60-66.
- [23] 潘宗源, 蒋小珍, 戴建玲, 等. 岩溶矿床疏干区地下水水位恢复对岩溶塌陷作用机制的研究: 以湖南宁乡大成桥为例[J]. 中国岩溶, 2017, 36(6): 786-794.
- [24] 袁杰, 高宗军, 马海会. 论岩溶地下水位对岩溶塌陷形成的控制作用: 以山东枣庄市岩溶地面塌陷区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(4): 95-98.
- [25] 代群力. 岩溶矿区地面塌陷成因新说: 共振论[J]. 中国煤田地质, 1991(3): 66-68.

## Discovery and significance of water-gas pressure pulsation effect within karst cavity

MA Xiao<sup>1,2</sup>, JIANG Xiaozhen<sup>1</sup>, CAO Xichong<sup>3</sup>, PAN Zongyuan<sup>1</sup>

(1. Institute of Karst Geology, CAGS / Key Laboratory of Karst Collapse Prevention, CGS, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Qingdao Geological, Mineral and Geotechnical

Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266071, China)

**Abstract** Through the generalization of geological model of collapse, a physical experimental model was designed to explore the change of water-gas pressure within the karst cavity under the conditions of both open and closed systems when groundwater level declined. The experimental results show that, (1) When the karst cavity is of a closed system, negative pressure with regular fluctuations appears during the declining process of groundwater. Their periodicity and amplitude of fluctuations relate well to the initial water level. (2) Once the airtight system suddenly turns into open one, a sudden change of water-gas pressure within karst cavity occurs. This change value could reach 3 times of original value. (3) The periodical high-frequency vibration of water-air pressure is acting on the cavity roof during the declining process of groundwater and has the characteristics of pressure pulsation. (4) The change of water-gas pressure caused by the decrease of water level under closed condition can be described by a linear function of time variable. The slope of the function is affected by the section area of karst cavity and the outlet. The intercept of the function is closely related to initial water level. The effect of high-frequency vibration of water-air pressure on overburden needs further studies, which will contribute to the formation mechanism of karst collapse and breakthroughs in prevention research.

**Key words** karst collapse, water-air pressure, high frequency monitoring, high-frequency vibration, pressure pulsation

(编辑 张玲)