

# 放水试验探查疑似陷落柱导水性的理论依据及实例分析

童世杰<sup>1</sup>, 李毅<sup>2</sup>, 许进鹏<sup>2</sup>, 王创<sup>2</sup>, 王通明<sup>2</sup>, 鹿存金<sup>2</sup>

<sup>1</sup>皖北煤电集团有限责任公司, 安徽 宿州

<sup>2</sup>中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2023年2月27日; 录用日期: 2023年3月28日; 发布日期: 2023年4月10日

## 摘要

陷落柱导水性的探查是矿井防治水的重点和难点。任楼煤矿中六采区发现X1物性陷落柱, 需要探明其导水性。文章从理论上分析了放水试验探查陷落柱导水的可行性, 然后结合实际情况, 在陷落柱区太原组上部灰岩含水层进行井下放水试验, 分析太灰、奥灰含水层之间水位、水压以及水化学时空变化特征, 从而确定X1物性陷落柱为导水陷落柱。结果表明: 井下放水试验可以查明各个含水层的水力联系, 确定陷落柱导水性, 为矿井水害防治提供依据。

## 关键词

放水试验, 陷落柱, 导水性, 水力联系

# Theoretical Basis and Case Analysis of Investigating the Water Conductivity of Suspected Collapse Column by Dewatering Test

Shijie Tong<sup>1</sup>, Yi Li<sup>2</sup>, Jinpeng Xu<sup>2</sup>, Chuang Wang<sup>2</sup>, Tongming Wang<sup>2</sup>, Cunjin Lu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Wanbei Coal Electricity Co., Ltd., Suzhou Anhui

<sup>2</sup>School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

Received: Feb. 27<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 28<sup>th</sup>, 2023; published: Apr. 10<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Investigation of the water conductivity of collapse columns is an important and difficult point in

文章引用: 童世杰, 李毅, 许进鹏, 王创, 王通明, 鹿存金. 放水试验探查疑似陷落柱导水性的理论依据及实例分析[J]. 矿山工程, 2023, 11(2): 122-131. DOI: 10.12677/me.2023.112016

mine water control. X1 physical collapse column was found in Renlou Coal Mine middle sixth mining area, the water conductivity of which needed to be verified. Article analyzed the feasibility of exploring the water conductivity of collapse columns theoretically and performed an actual underground dewatering test in the limestone aquifer in the upper Taiyuan Formation in the collapse column area to analyze the temporal and spatial variation of water level, water pressure and water chemistry in the Taiyuan and Ordovician limestone aquifers, thus determining X1 physical collapse column as a water-conducting collapse column. According to the results, underground dewatering test can find out the hydraulic connections across aquifers, determine the water conductivity of collapse columns, and provide the basis for mine water hazard prevention and control.

## Keywords

Dewatering Test, Collapse Columns, Water Conductivity, Hydraulic Connections

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

伴随着我国煤矿开采深度的不断增大,岩溶陷落柱特别是导水岩溶陷落柱成为矿区所面临的重要安全威胁。岩溶陷落柱导水通道可以沟通各个含水层,导致奥陶系灰岩含水层突水事故,从而产生极大的损失[1]-[6]。因此陷落柱的探查[7] [8] [9] [10] [11]就显得尤为重要,目前对陷落柱的探查以物探和钻探为主。常见物探方法有三维地震勘探[12]、高密度电法探测[13] [14]、瞬变电磁法探测[15]等,钻探[16]方法有地面钻探、井下钻探等。这两种探查方法应用广泛,各有优缺点,物探方法方便、便于控制、分辨力高,但是结果具有多解性,不够准确。钻探法直接准确,但是钻孔只能反映周围很小范围内的地质构造,在进行大范围探查时需要的钻孔数量多,费时费力,资金投入大。而在物探方法大致圈定陷落柱之后,陷落柱是否导水,也是一个重要问题。放水试验是近年发展起来在井下施工钻孔放水并观察水位水量变化以求取含水层参数及地下水流场的方法[17],放水试验目前在各矿井水文地质工作中有较多的应用。本文以任楼煤矿中六采区 X1 物性陷落柱区为例,在物探和钻探的基础上,运用放水试验的基础理论,通过井下放水试验[18],分析太灰、奥灰含水层之间水位、水压以及水化学[19]时空变化特征,综合确定 X1 物性陷落柱及其导水性。

## 2. 研究区概况及 X1 陷落柱前期发现情况

任楼煤矿位于安徽省宿州市西南约 30 km 的濉溪、蒙城两县交界处。中六采区位于任楼矿井北部。采区走向长 3580 m~3640 m,平均 3610 m。倾斜宽 880 m~1140 m,平均 1010 m,斜面积约 3,661,600 m<sup>2</sup>。本采区揭露地层(如图 1)由老到新有奥陶系,石炭系中统本溪组(C<sub>2b</sub>)、上统太原组(C<sub>3t</sub>)、二迭系山西组(P<sub>1s</sub>)、下石盒子组(P<sub>1xs</sub>)、上石盒子组(P<sub>2ss</sub>),及第三系中-古近系(E)、新近系(N),第四系。采区大中型构造发育,发现落差大于 5 m 的断层有 20 条,地质构造复杂。井田内的含水层主要包括:松散层孔隙含水层(组)、煤系地层砂岩裂隙含水层、太原组灰岩岩溶裂隙含水层、奥陶系岩溶裂隙含水层。本采区主采煤层为石炭系中统下石盒子组 7<sub>2</sub>煤层和 8<sub>2</sub>煤层,7<sub>2</sub>煤层厚度为 0.36 m~2.44 m,平均煤厚 1.44 m。8<sub>2</sub>煤层厚 0.44 m~3.76 m,平均 1.30 m。任楼煤矿陷落柱发育,自投产至今共揭露过 3 个陷落柱,分别在 7<sub>2</sub>22 工作面、7<sub>2</sub>18 机巷、和 II<sub>5</sub>1 轨道大巷。其中 7<sub>2</sub>22 工作面陷落柱发生突水,最大涌水量达到 576.0 m<sup>3</sup>/min,造成淹

井事故。

本采区各主采煤层的顶底板砂岩裂隙水主要以静储量赋存于砂岩层构造裂隙中，涌水量几年来一直流量稳定，为原矿井主要排水量，对矿井不造成大的影响。太原组灰岩(以下简称太灰)岩溶裂隙含水层，距离 8<sub>2</sub>底板平均为 145.35 m。奥陶系灰岩(以下简称奥灰)含水层距离 8<sub>2</sub>煤底板近 290 m 左右，在正常情况下，太灰水和奥灰水突破底板隔水层进入矿井的可能性不大。但由于区内发育隐伏岩溶导水陷落柱和导水断层，这可能会成为奥灰水和太灰水进入矿井的通道。

根据三维地震资料，在中六采区存在物性陷落柱 X1。陷落柱呈椭圆形，长轴呈东西向，长轴长 100 m，短轴长 50 m。上部陷落到新生界底部，下部开始于奥陶系灰岩中。已在地面施工钻孔对 X1 物性陷落柱进行探查，终孔层位为太原组石灰岩上部，共见 6 个断裂破碎带，正常地层岩层倾角 9°~19°，破碎带附近 9°~41°，所有标志层间距基本正常，地面钻探初步结论认为陷落柱不存在。

因此，X1 物性陷落柱是否存在，以及该陷落柱是否具有导水性，需要进一步探查。

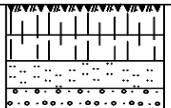
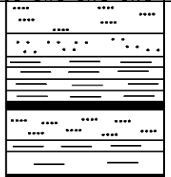


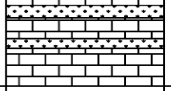
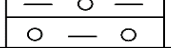
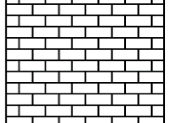
| 地层层位    | 厚度<br>(平均) | 地层柱状  | 岩性描述  |
|---------|------------|---|---|
| 第三系及第四系 | 255 m      |    | 粘土、亚粘土、<br>细砂、泥岩、<br>粉砂质泥岩  |
| 上石盒子组   | 550 m      |   | 中、粗粒长石砂<br>岩、砂岩、砂质<br>页岩，含薄煤层   |
| 下石盒子组   | 210 m      |  | 粉砂岩、细砂岩<br>与泥岩互层<br>7 <sub>2</sub> 煤层平均厚度1.44m<br>8 <sub>2</sub> 煤层平均厚度1.3m |
| 山西组     | 120 m      |  | 砂岩、砂质页<br>岩、泥岩、页<br>岩，含煤层。  |
| 太原组     | 130 m      |  | 灰岩、砂质页<br>岩、泥岩  |
| 本溪组     | 2 m        |  | 铝质粘土岩、泥岩、<br>灰岩、杂色砂岩  |
| 奥陶系灰岩   |            |  | 灰岩、白云质灰<br>岩，白云岩，燧<br>石条带状灰岩  |

Figure 1. Stratum columnar in zhongliu mining area

图 1. 中六采区地层柱状简图

### 3. 放水试验探查陷落柱导水性的理论依据

由于中六采区 X1 物性陷落柱的存在及其导水性的不确定性，需要进行进一步的探查，将在疑似陷落柱区，以太原组灰岩为目的层进行放水试验，查明奥灰和太灰之间的水力联系，从而确定疑似陷落柱的导水性。

该区域附近无较大导水断层沟通太灰与奥灰。当该陷落柱不导水(或不存在时)时，太灰含水层作为目

的层放水, 会形成以放水孔为中心的降落漏斗, 太灰观测孔的水压、水位随着时间增加呈现出下降的趋势; 当该陷落柱导通两个含水层时, 奥灰含水层作为补给层, 通过导水通道补给太灰含水层, 会形成以导水通道为中心的降落漏斗, 太灰含水层会形成以放水孔为中心的降落漏斗, 如图 2 所示。太灰、奥灰观测孔的水压、水位随着时间增加总体上呈现出下降的趋势。但由于奥灰含水层水压高, 富水性强, 当奥灰水进入太灰含水层后, 太灰含水层会出现短暂的水压升高的现象。与此同时, 由于奥灰、太灰水质类型的不同, 必然会引起太灰含水层放水孔附近水质类型的改变。

通过上述理论, 可以查明陷落柱存在特别是其导水性。与其它方法相比, 利用流场及水化学场来判断陷落柱导水性, 具有更强的适用性和准确性。

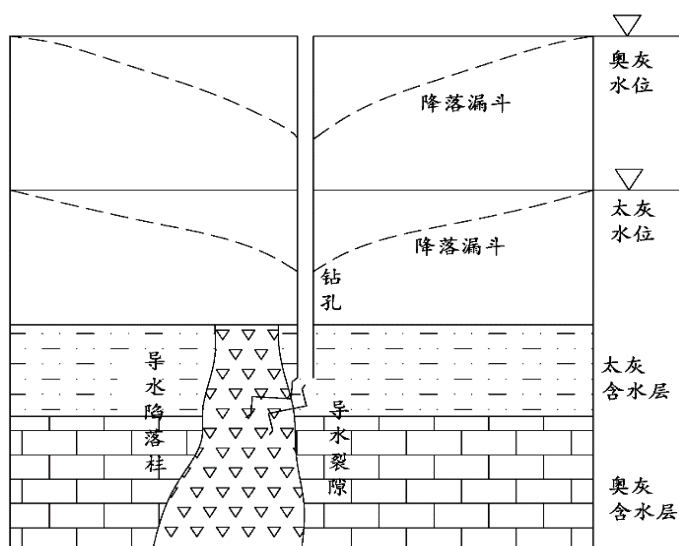


Figure 2. Cone depression of aquifer during water diversion of collapse column

图 2. 陷落柱导水时含水层降落漏斗示意图

## 4. 放水试验工程布置及过程

### 4.1. 放水试验的工程布置

Table 1. Downhole drilling information of dewatering test

表 1. 放水试验井下钻孔信息表

| 孔号    | 性质      | 孔口坐标    |          | 方位(°) | 倾角(°) | 孔深(m) | 终孔层位  |
|-------|---------|---------|----------|-------|-------|-------|-------|
|       |         | X       | Y        |       |       |       |       |
| FS1   | 观测孔     | 3708102 | 39476870 | N256  | -60   | 135   | 太 4 灰 |
| FS2   | 观测孔     | 3708329 | 39476822 | N30   | -60   | 140   | 太 4 灰 |
| FS3   | 放水孔     | 3708100 | 39476820 | N175  | -60   | 126   | 太 4 灰 |
| FS3-1 | 放水孔兼观测孔 | 3709251 | 39476902 | N268  | +2    | 320   | 太 1 灰 |
| FS3-2 | 放水孔     | 3709250 | 39476903 | N263  | -10   | 325   | 太 4 灰 |
| FS3-3 | 放水孔兼观测孔 | 3709249 | 39476903 | N258  | +2    | 295   | 太 1 灰 |

任楼煤矿的中六采区放水试验放水层位为太原组石灰岩含水层上部(1~4 灰), 井下放水孔及观测孔(见表 1)主要布置无构造区和陷落柱区, 如图 3 所示。其中陷落柱区钻孔主要针对 X1 物性陷落柱, 在中六

采区避难硐室，施工放水孔 FS3-2 (图 4)，终孔层位为太 4 灰；施工放水孔兼观测孔 FS3-1 和 FS3-3，终孔层位为太 1 灰。

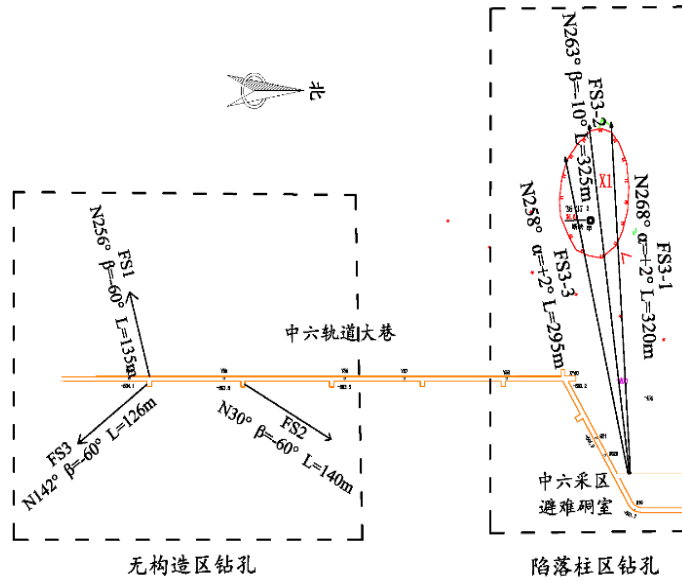


Figure 3. Dewatering test downhole drilling  
图 3. 放水试验井下钻孔示意图

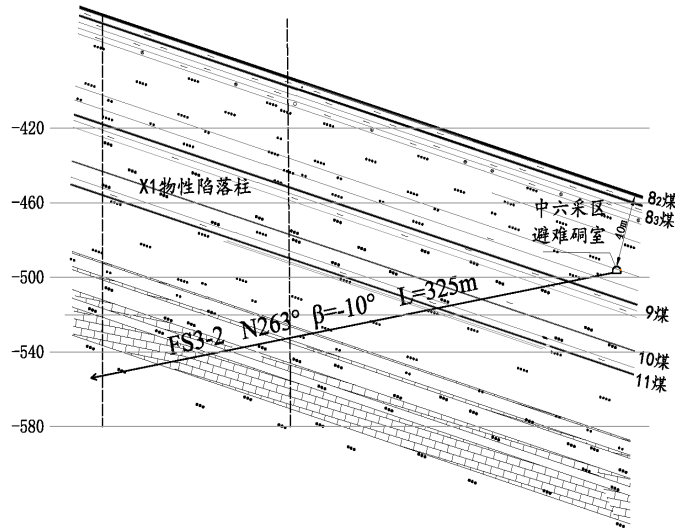


Figure 4. FS3-2 borehole sections  
图 4. FS3-2 钻孔剖面

#### 4.2. 放水试验过程

任楼煤矿中六采区放水试验自 2021 年 3 月开始，至 5 月结束。分为放水试验间期和水位恢复两个阶段。在放水试验过程中，对中六采区及附近的井下钻孔的水压力和地面长观孔水位进行压力(水位)监测。

除了进行正常地段的放水试验以外，本次重点进行了 X1 物性陷落柱附近的放水试验工作。先后施工了 FS3-1、FS3-3 和 FS3-2 钻孔进行放水试验，记录了各个钻孔的放水流量，与此同时，在放水试验的过程中，对地面奥灰长观孔的水位进行监测，每 4 小时记录一次水位数据，并且定期采集各个钻孔的水

样，测试分析其主要化学成分，放水试验各个钻孔位置如图 5 所示。

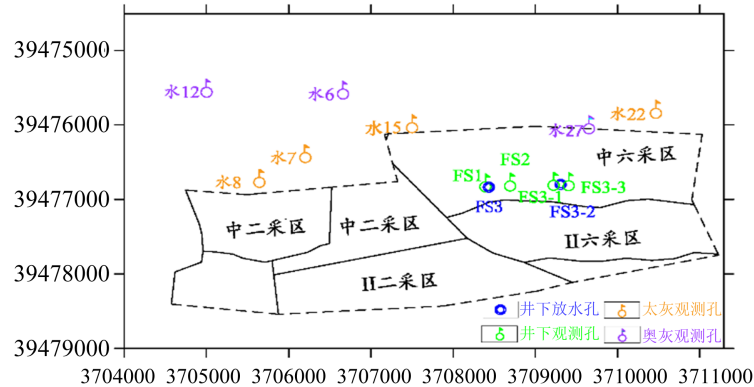


Figure 5. Location of each borehole for dewatering test

图 5. 放水试验各钻孔位置图

### 4.3. 放水试验数据分析及陷落柱确定

#### 4.3.1. 放水孔流量变化

钻孔 FS3 终孔层位为太四灰，于 3 月 25 日完成施工并开始放水，放水至 5 月 13 日 14 时结束，并注浆封孔。总放水时长 1180 小时，最小流量 1.8 m<sup>3</sup>/h，最大流量 2.4 m<sup>3</sup>/h，平均流量 2.2 m<sup>3</sup>/h，总放水量约 2585.7 m<sup>3</sup>。放水孔 FS3 于 5 月 13 日封孔。

FS3-2 钻孔于 3 月 31 日开始出水，出水量为 8 m<sup>3</sup>/h，4 月 3 日 19 时，在提取钻杆过程中涌水量陡增，涌水量达到 80 m<sup>3</sup>/h 左右，此后流量稳定在 35 m<sup>3</sup>/h。放水孔 FS3-2 于 5 月 20 日封孔。

FS3-1、FS3-3 终孔层位为太灰顶板，出水量分别为 0.1 m<sup>3</sup>/h、0.4 m<sup>3</sup>/h (见表 2)。

FS3-2 出水水量存在明显异常，远大于太四灰钻孔正常出水量。从表中据可以看到，太灰含水层钻孔流量总体偏小，但是 FS3-2 钻孔出现了涌水量突然增大的现象，并且一直稳定在涌水量相对较大的程度，可以初步推测钻孔 FS3-2 接近了 X1 陷落柱，导通了深部奥灰水进入钻孔。

Table 2. Dewatering test discharge hole flow

表 2. 放水试验放水孔流量统计表

| 钻孔    | 流量(m <sup>3</sup> /h) |     |      |
|-------|-----------------------|-----|------|
|       | 最小值                   | 最大值 | 稳定流量 |
| FS3   | 1.8                   | 2.4 | 2.2  |
| FS3-1 |                       | 0.1 |      |
| FS3-2 | 8                     | 80  | 35   |
| FS3-3 |                       | 0.4 |      |

#### 4.3.2. 观测孔压力(水位)变化

##### (1) FS1、FS2 观测孔水压变化

钻孔水压监测如图 6、图 7 所示，从图中可以看出，钻孔 FS1、FS2 水压变化分为四个阶段。第 1 阶段，3 月 27 日至 4 月 5 日左右，由于 FS3 钻孔放水，水压下降；第 2 阶段，4 月 5 日至 4 月 13 日，FS3-2 钻孔出水，水压上升；第 3 阶段，4 月 13 日至 5 月 13 日，由于 FS3 和 FS3-2 钻孔同时放水，水压下降；第 4 阶段，5 月 13 日以后，FS3 钻孔封口导致水压恢复。

在第2阶段, FS3-2 出水后 FS1、FS2 压力上升, 说明深部奥灰地下水通过陷落柱及 FS3-2 钻孔进入太灰含水层, 使太灰含水层的水压力上升。证明了 X1 陷落柱的存在以及 X1 陷落柱的导水性。

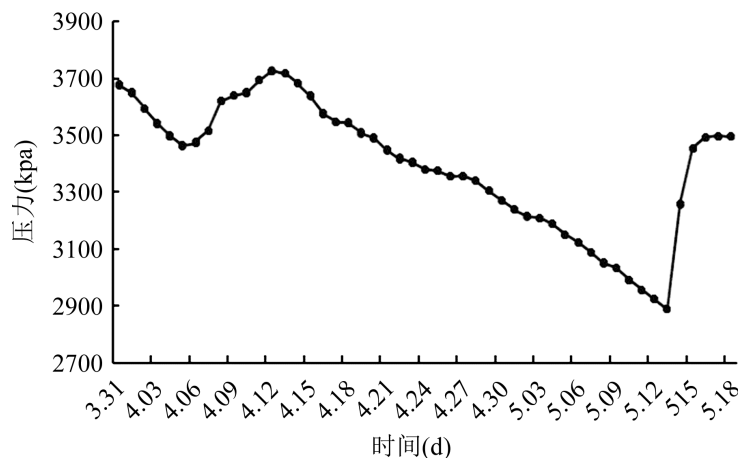


Figure 6. Downhole borehole FS1 pressure change curve

图 6. 井下 FS1 钻孔压力变化曲线图

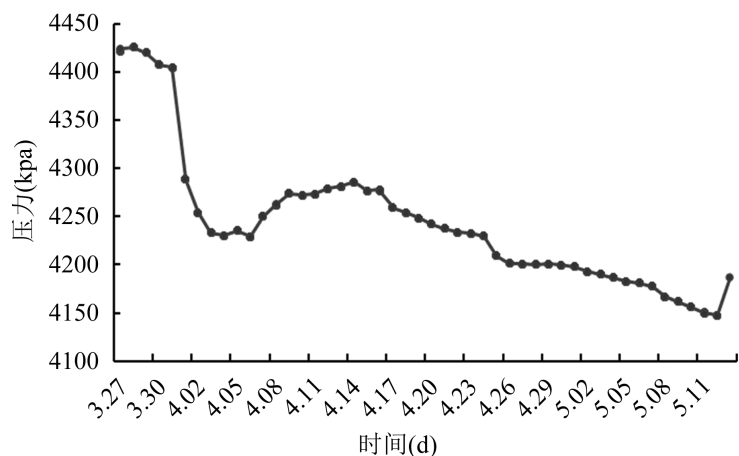


Figure 7. Downhole borehole FS2 pressure change curve

图 7. 井下 FS2 钻孔压力变化曲线图

## (2) 地面太灰观测孔水位变化

放水试验期间, 地面太灰常观孔水 7、水 8、水 15、水 22 水位均有影响, 如图 8 所示。自 3 月 25 日 FS3 开始放水一段时间后, 地面各太灰观测孔水位均有下降, 且水位开始下降时间和水位降幅与观测孔至放水孔的距离有关。其中, 水 15 和水 22 距离井下放水孔较近, 水位开始下降时间早(3 月 25 日), 水位降幅大(16 m~18 m); 水 7、水 8 距离井下放水孔较远, 水位开始下降时间晚(4 月 1 日), 水位降幅小(1.7 m~3 m)。自 5 月 13 日井下太灰放水孔 FS3 封孔后, 放水孔附近的水 15 和水 22 水位开始恢复, 水位涨幅小(1 m~2 m); 5 月 20 日井下放水孔 FS3-2 封孔后, 水 15、水 22、水位恢复速度加快, 涨幅大, 水 7、水 8 长观孔水位开始恢复, 并且水位恢复值超过初始水位值。

5 月 20 日 FS3-2 封口后, 水 15、水 22 水位恢复速度加快, 水 7、水 8 水位恢复值超过初始水位值。说明 FS3-2 封口后奥灰水通过陷落柱补给太灰含水层导致太灰水位增加, 恢复速度加快。证明了 X1 陷落柱的存在及其导水性。

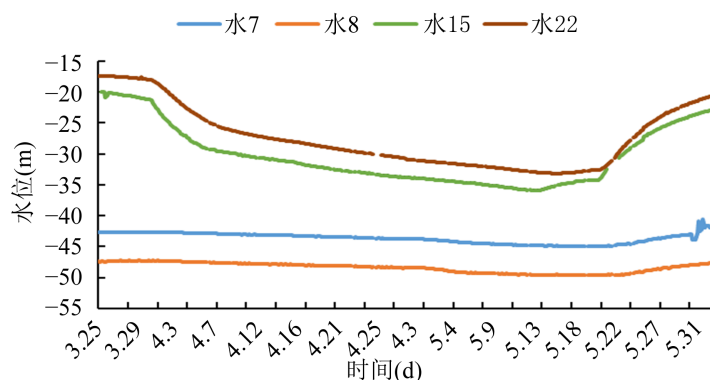


Figure 8. Water level change curve of ground taihui observation hole  
图 8. 地面太灰常观孔水位变化曲线图

#### 4.3.3. 地面奥灰观测孔水位变化

放水试验期间, 奥灰孔水位变化过程如图 9 所示。从图中可以看出, 4 月 3 日放水孔 FS3-2 涌水量突然增大后, 各奥灰观测孔水位于开始急剧下降, 并且之后一直呈现下降趋势, 其中水 6 下降 2.1 m, 水 19 下降 2 m, 水 27 下降 1.5 m。直至 5 月 20 日, FS3-2 封口后, 各奥灰观测孔中水位逐渐开始上升。水 6 水位标高由 -2.1 m 上升至 -0.2 m, 水 19 水位标高由 -3 m 上升至 -2 m, 水 27 水位标高由 -3.6 m 上升至 -3.2 m。

FS3-2 出水后, 地面奥灰长观孔水位下降。FS3-2 封口后地面奥灰孔水位很快恢复。说明 FS3-2 钻孔是奥灰与太灰含水层的水力联系通道, 而钻孔 FS3-2 为 X1 物性陷落柱探查钻孔, 进一步证明了 X1 陷落柱存在且为导水陷落柱的结论。

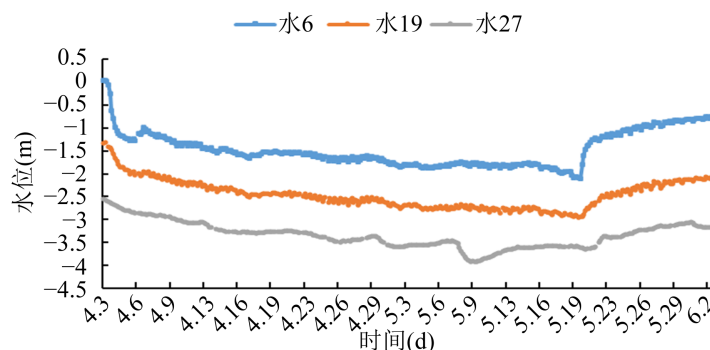


Figure 9. Water level change curve of ground Ordovician limestone hole water 6, water 19 and water 27  
图 9. 地面奥灰孔水 6、水 19、水 27 水位变化曲线图

#### 4.3.4. 钻孔水化学特征变化

在放水试验的过程中对 FS3-1、FS3-2 和 FS3-3 钻孔定期取样测试分析, 测试指标包括  $K^+/Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2+}$ 、 $HCO_3^{2-}$ 、矿化度、全硬度、永久硬度、暂时硬度、负硬度、碱度。

FS3-2 钻孔 4 月 3 日出水量变化后, 各个钻孔的  $K^+/Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2+}$ 、 $HCO_3^{2-}$ 、矿化度、碱度、全硬度、永久硬度、暂时硬度均有所增加。其中  $K^+/Na^+$  离子浓度随时间变化过程如图 10。

FS3-2 钻孔刚开始出水时, 其水质化验全硬度 29.49 德国度, 永久硬度 15.08 德国度; 4 月 3 日涌水量增大后水质化验全硬度在 67.73~69.49 德国度之间变化, 永久硬度在 54.16~55.57 德国度之间变化。如图 11 所示。



根据出水资料可知, FS1、FS2 钻孔终孔层位为太四灰(太灰水), 出水水质分别为全硬度 42.97 德国度、永久硬度 29.06 德国度, 全硬度 53.05 德国度、永久硬度 39.48 德国度。而 7218 机巷(奥灰水)出水水质全硬度 67.32 德国度, 永久硬度 53.41 德国度, 7222 风巷(奥灰水)出水水质全硬度 81.32 德国度, 永久硬度 68.73 德国度。因此, FS3-2 钻孔出水水质和奥灰水质相近。

FS3-2 钻孔涌水量增大后各个钻孔的离子含量都有所增大, 说明出水水源发生了变化, 而 FS3-2 钻孔出水水质与奥灰水水质相近, 说明陷落柱导通奥灰水进入太灰含水层, 证明了陷落柱的导水性。

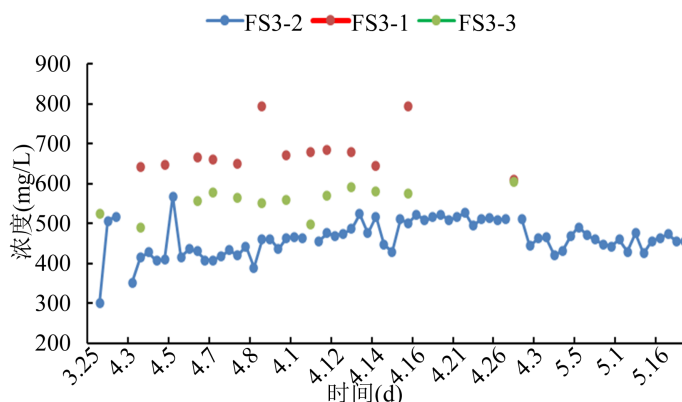


Figure 10. Change of  $K^+/Na^+$  potency in borehole

图 10. 井下钻孔  $K^+/Na^+$  离子浓度变化图

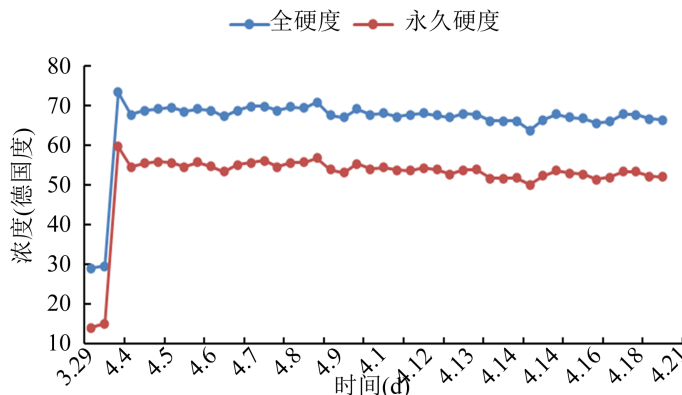


Figure 11. FS3-2 borehole water quality change curve

图 11. FS3-2 钻孔出水水质变化曲线图

综合以上数据资料, 从物探、钻探、井下钻孔和地面钻孔的水位(水压)变化情况以及水化学特征。综合确定三维地震探查的物性陷落柱是存在的, 并且该陷落柱在太原组灰岩到奥灰段是具有导水性的。

除此以外 FS3-2 钻孔穿过 X1 物性陷落柱时, 出水浑浊, 水色发黄, 说明出水位于构造破碎带; 也可以进一步认为陷落柱存在且具有导水性。

## 5. 结论与展望

### 5.1. 结论

通过理论分析和对现场放水试验的大量数据的研究分析, 结合物探钻探资料, 得到以下结论:

(1) 放水试验中钻孔 FS3-2 出现涌水量突然增大的现象, 并且涌水量比本区域正常太四灰钻孔涌水量大, 出水水质全硬度与奥灰水质相近, 前期探查资料及钻孔未揭露大型断层, 初步分析钻孔 FS3-2 出水

通道为陷落柱。

(2) 放水试验中钻孔 FS3-2 涌水量增大后, 井下太原组灰岩含水层压力监测孔 FS1、FS2 压力不再下降, 反而增加, 同时奥灰长观孔水位出现不同程度的下降。FS3-2 封孔后, 太灰、奥灰长观孔水位很快恢复。进一步确定 X1 陷落柱为导水陷落柱。

(3) 综合地面三维地震、井下放水试验诊断, 三维地震显示 X1 物性陷落柱确实存在, 且有一定导水性。地面钻探孔可能由于位置偏差或其它原因未能明确确定陷落柱。

(4) 理论上说明了放水试验查找陷落柱的可行性, 而放水试验探查陷落柱在具体工程中的应用说明了这种方法的有效性, 为以后陷落柱探查提供了一种新方法和新思路, 具有一定的参考价值。

## 5.2. 展望

虽然放水试验可以探查陷落柱导水性, 但陷落柱柱体的大小和边界还需要结合物探、钻探进行进一步圈定。在今后的工作中, 可以在放水试验过程中, 增加物探监测, 可以更准确确定陷落柱导水性。

## 基金项目

国家基金面上项目(52274243)。

## 参考文献

- [1] 尹尚先, 连会青, 刘德民, 尹慧超. 华北型煤田岩溶陷落柱研究 70 年: 成因·机理·防治[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(11): 1-29.
- [2] 许进鹏. 陷落柱活化导水机理研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2006.
- [3] 史先志, 钱自卫, 李通文, 等. 煤系地层顶板岩溶地下水赋存特征研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(1): 63.
- [4] 魏大勇. 淮北矿区南北水文地质单元陷落柱导水性差异研究[J]. 煤炭科技, 2021, 42(4): 1-5.
- [5] 杨建, 梁向阳, 丁湘. 蒙陕接壤区深埋煤层开发过程中矿井涌水量变化特征[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(4): 97-101.
- [6] 任海峰. 矿山地质防治水关键技术研究[J]. 煤炭科技, 2021, 42(5): 76-78.
- [7] 张永双, 曲永新, 刘国林, 吕朋菊. 华北型煤田岩溶陷落柱某些问题研究[J]. 工程地质学报, 2000(1): 35-39.
- [8] 尹尚先, 武强. 煤层底板陷落柱突水模拟及机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(15): 2551-2556.
- [9] 朱志刚. 掘进巷道前方陷落柱的综合探查[J]. 江西煤炭科技, 2021(4): 131-133.
- [10] 田干. 大型导水陷落柱发育特征综合探查技术研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(6): 63-67.
- [11] 王真海. 大采深水文地质极复杂矿井陷落柱探查治理[J]. 煤炭与化工, 2021, 44(4): 61-63+80.
- [12] 赵亚飞. 花家湖煤矿 F10 断层导水性研究[J]. 华北科技学院学报, 2018, 15(5): 24-28.
- [13] 段建华, 许超. 地面物探技术在煤矿隐蔽致灾地质因素探测中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2015, 27(10): 53-57.
- [14] Panno, S.V., Hackley, K.C., Hwang, H.H., et al. (2001) Determination of the Sources of Nitrate Contamination in Karst Springs Using Isotopic and Chemical Indicators. *Chemical Geology*, **179**, 113-128. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00318-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00318-7)
- [15] 李宁, 郝志超, 吕梁栋, 等. 综合物探法在陷落柱探测中的应用[J]. 能源与环保, 2013(4): 45-48.
- [16] 廉法宪, 高生保, 张鸣, 夏辉, 闫鑫. 定向钻进技术在深部薄层灰岩隐伏导水构造探查中的应用[J]. 中国矿业, 2021, 30(11): 141-148.
- [17] 赵宝峰, 吕玉广. 基于抽水试验和放水试验的断层导水性分析[J]. 煤矿安全, 2022, 53(1): 56-62. <https://doi.org/10.13347/j.cnki.mkaq.2022.01.009>
- [18] 张成行, 郑洁铭, 徐智敏, 骆俊峰. 基于水化学特征的顺和煤矿太灰水动力条件分析[J]. 煤炭工程, 2020, 52(6): 126-129.
- [19] 高家平, 张金陵, 丁亚恒, 朱术云. 基于放水试验过程中的水化学场变化特征研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(9): 46-49. <https://doi.org/10.13827/j.cnki.kyyk.2018.09.010>