

文章编号:1672-3961(2009)04-0125-05

# 深井巷道涌水探查方法及工程治理研究

刘人太<sup>1</sup>,李术才<sup>1</sup>,潘光明<sup>1</sup>,张庆松<sup>1</sup>,武文东<sup>2</sup>,李海燕<sup>1</sup>,林明远<sup>2</sup>

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250012;

2. 地测部新汶矿业集团新巨龙有限公司, 山东 菏泽 274000)

**摘要:**在岩溶水治理中,岩溶裂隙的空间发育和水力连通规律是决定工程治理成败的关键因素.为了在工程治理中做到有的放矢,将物探方法应用到岩溶水治理工程可以实现以下目标:通过物探方法获取工程目标岩体的裂隙发育位置、规模和空间展布规律;并通过对钻探划定重点含水构造区域,掌握含水构造的地层信息和含水特点;在综合物探和钻探信息的基础上,可以分析得出岩体内部裂隙空间发育规律,从而为注浆钻孔合理位置的选定和注浆浆液扩散路径提供参考.通过水力连通实验和等水位线的绘制,可以分析得到浆液扩散规律,从而为注浆治理中选用注浆材料和注浆工艺提供依据,达到减少工程投入,增加工程效益的目的.

**关键词:**物探方法;裂隙空间发育规律;等水位线;浆液扩散分析;注浆治理

**中图分类号:**TD742 **文献标志码:**A

## The detection of gushing water in deep wells and the research of engineering government

LIU Ren-tai<sup>1</sup>, LI Shu-cai<sup>1</sup>, PAN Guang-ming<sup>1</sup>, ZHANG Qing-song<sup>1</sup>, WU Wen-dong<sup>2</sup>, LI Hai-yan<sup>1</sup>, LIN Ming-yuan<sup>2</sup>

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Office of Geology and Survey, Xinjulong limited company, Xinwen Mining Industry Company Group, Jinan 250061, China)

**Abstract:** In the government of karst water, the law of fissure development and water-power cross-connection are key to engineering management. For identifying the engineering management, the geophysical prospecting method was adopted into the engineering. The position, scale and space law of the fissure was obtained through the geophysical prospecting method. The information of the water-bearing formation and the character of the containing water were obtained by a boring test. On the base of composite geophysical prospecting and boring test, the space law of the fissure and water-power cross-connection inside the karst was concluded, and the proper position for grouting and drilling were chosen. This research can provide a reference for slurry diffusion. The law of slurry diffusion was obtained by hydraulic connectivity experiment and water-power isobar drawing. This research can direct the choosing of the grouting materials and grouting technology. The engineering efficiency can be increased and the cost can be reduced with the help of this method to choose the grouting materials and grouting technology.

**Key words:** geophysical prospecting method; the law of the fissure development; the water-power isobar; the analysis of the slurry diffusion; grouting management

## 0 引言

我国岩溶发育极为广泛,在岩溶地区修建的地下工程中常常面临着涌水的威胁.在西南地区修建

的山岭隧道如沪蓉西高速公路和宜万铁路都发生过多次突水(突泥)事故,造成了不同程度的人员伤亡和财产损失,部分隧道的常年涌水更为反坡施工带来较高的排水压力;矿山行业随着煤矿开采深度持续深入,地下岩溶构造(陷落柱、断层和岩溶裂隙)造

收稿日期:2009-05-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50874068);山东省自然科学基金资助项目(Y2008F22)

作者简介:刘人太(1984-),男,山东威海人,硕士研究生,研究方向为地下工程灾害治理.E-mail:lt@mail.sdu.edu.cn

成的涌水带来矿井淹井事故的风险日益增加.为了保障矿井的排水能力,必然加大排水设备投入,矿山企业也因此背上了沉重的经济负担<sup>[1-2]</sup>.在岩溶水治理过程中,如何准确掌握涌水构造的发育和浆液扩散规律,国内外学者通过计算或数值方法做了大量研究,但是由于岩体裂隙和浆液扩散规律的复杂性,数值计算方法同实际具有一定的偏差<sup>[3-6]</sup>.本文以菏泽龙固煤矿辅二巷道的顶板淋水段治理为例,探讨了如何通过物探方法和钻探方法相结合,取得含水构造边界和空间分布位置,并在此基础上进行水力等压线的绘制,分析浆液扩散规律,为后期的注浆治理提供指导.

## 1 工程概况

菏泽龙固矿辅二大巷穿越多个岩层,其涌水主要位于灰岩、泥岩、泥质细砂岩、粉砂岩、细砂岩等层位.区域内两处主要断裂 FL8-1、FL8-2 切断了三灰,造成巷道顶板淋水和地板涌水严重.从 2 号水仓入口开始向内,约存在 300 m 的顶板淋水段和底板涌水段,总涌水量约为 760 m<sup>3</sup>/h.涌水为约 49 °C 高温水,推断为该区域的地热补给导致.一期工程主要为治理改造顶板淋水段,改善巷道施工环境,解决顶板淋水给通风和安全运输带来的负面影响.

## 2 岩溶裂隙富水区域探测

### 2.1 地质雷达和瞬变电磁探测富水区域

为了查明淋水段的涌水补给来源和裂隙的空间展布规律,对龙固煤矿辅二巷道进行了瞬变电磁探测和地质雷达探测,探测方法采用连续采集,使用的仪器型号为美国产低频组合地质雷达和瞬变电磁 IGGEM-MA.探测区域为顶板淋水段,探测深度为 10 m.由于探测段全部采用钢支撑支护,所以导致电磁法探测信号受到干扰.通过探测试验取得现场支护干扰样本信号,与淋水段探测信号进行对比以去除噪声.同时为了提供地质雷达的探测精度,采用不同频率组合进行了信息采集<sup>[7]</sup>.对取得探测信号采用相应软件进行处理分析,得到处理图像如图 1.

### 2.2 富水区域的位置和边界确定

将瞬变电磁和雷达探测信号解译结果标示在巷道剖面图和平面图上,绘制了含水构造区域的位置和边界(见图 2).

经实际施工结果证实上述探测基本同顶板淋水段含水构造分布相吻合,可以看出在 FL8-1 断层前

方顶板存在两个较强富水区域,并推断两个富水区域与 FL8-1 断层的含导水特性密切相关,可能成为顶板淋水段的直接补给区域.

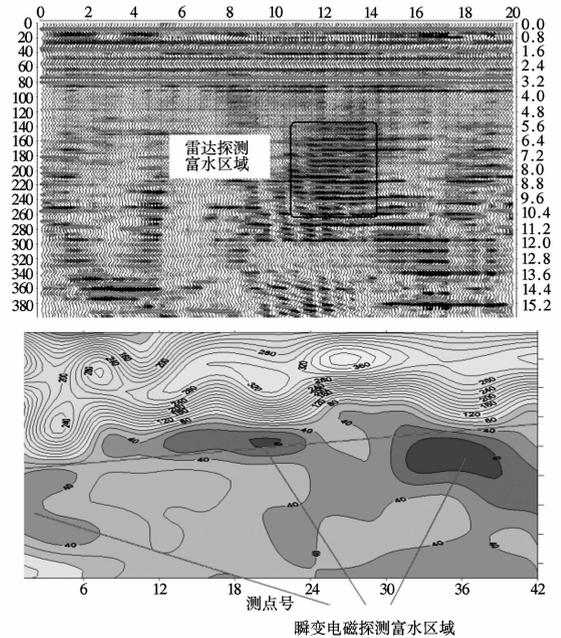


图 1 地质雷达和瞬变电磁信号处理  
Fig. 1 The result of geological radar and transient electromagnetic signal processing

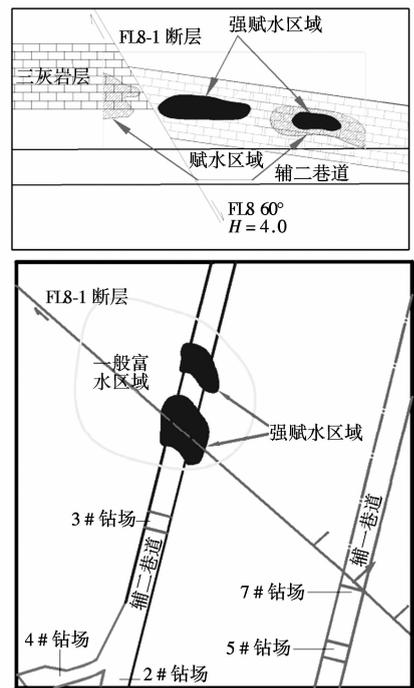


图 2 含水区域位置和钻场布置图  
Fig. 2 Position of containing water area and drilling plan

## 3 确定关键区域的钻探位置

根据物探成果确定的强富水区域空间展布范围

作为钻探布孔的重点区域.为钻孔能够更多地揭露灰岩裂隙和提高钻孔利用率,在保证钻孔能够准确命中目标区域的前提下,采用调整钻孔方位角和倾角的方法,以增加钻孔长度并采用多方位布设钻孔.根据井下现有的施工场地,并结合施工能力和动力条件(风、水、电等管道接入)综合考虑后,决定布置5个钻场进行钻进.在辅二巷道布置3个钻场,重点治理辅二巷道顶板淋水段;在辅1巷道布置2个钻场主要治理辅一巷道和辅二巷道之间的含导水构造,钻场布置见图2.

## 4 等水位线的绘制和水力补给分析

### 4.1 等水位线的绘制

在所有揭露涌水的钻孔,取得水压和水量信息,将水压相近的涌水点采用等压线进行包络,形成降水漏斗区域的等水位线图<sup>[8-9]</sup>.通过等水位线图和涌水量信息确定降水漏斗的形态和主要的汇水补给区域.为了最佳注浆孔的选择,将主要钻孔和涌水位置对应进行标示在巷道平面图上(见图3).

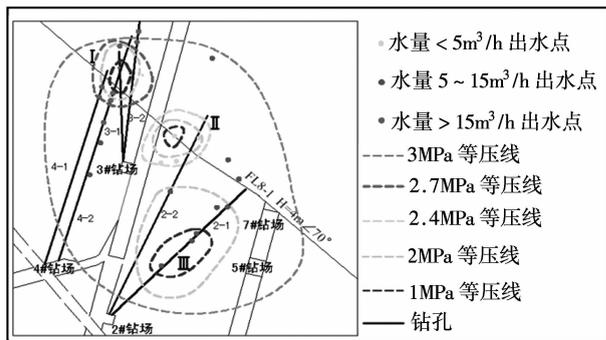


图3 治理区域等水位线图

Fig.3 Phreatic water contour of the management area

### 4.2 水力补给路径分析

(1) 从等压线图上可以分析得出,顶板淋水段附近共有3个局部降水漏斗的存在,分别是区域I、II、III.

(2) I、II两个区域都通过FL8-1断层向辅二巷道顶板淋水段泄水,因此顶板淋水段水源来自巷道两侧的补给,必须对I、II区域同时进行治理才能根治该段淋水.

(3) 降水漏斗III在辅二巷道没有相对应的泄水位置,该降水漏斗的形成推断为是由辅一巷道相应的涌水点泄水形成的.

(4) 在各个降水漏斗区域内进行注浆,各个降水漏斗区域在没有封堵完成前不会相互串浆.但是在某个降水漏斗封堵完成后,水压上升后,该处可能

成为其他降水漏斗的上游.

(5) 由于降水漏斗III区域内,钻孔揭露的涌水量较小,可以推断该处在历次注浆治理过程中取得了良好效果.该处裂隙被大量封堵,在封堵降水漏斗III后,有望根治其对应的涌水区域.

(6) 由于三灰层内裂隙极为发育,在I、II两个区域封堵完成后,涌水区域可能向巷道前方移动,形成新的降水漏斗导致巷道前方各个涌水点涌水变大,但是总水量会相应减少.

## 5 浆液扩散分析和最佳注浆孔选择

### 5.1 水力连通试验

由于该处涌水经历过多次超前预注浆和顶板淋水注浆治理,三灰的裂隙连通情况已经变得极为复杂,必须对钻孔揭露的3个低压汇水区进行水力连通试验.由于通过5#钻场和7#钻场揭露的涌水点较少、涌水量较小,不利于大规模注浆封堵涌水裂隙,所以只在2#、3#和4#钻场的部分钻孔(涌水点多、涌水量大的钻孔)进行水力连通实验水力连通试验采用从钻孔中注入高锰酸钾溶液或稀水泥浆作用示踪剂,观察顶板淋水段和各个钻孔示踪溶液扩散情况.根据从钻孔或淋水段观察的示踪剂浓度情况,将水力连通的相对程度划分为3个等级:(1)不连通:没有观测到示踪剂.(2)弱连通:示踪剂浓度较低,从淋水段或钻孔出现的示踪剂溶液呈轻微着色或半透明状态.(3)强连通:从淋水段或钻孔出现的示踪剂溶液呈严重变色或者不透明状态.试验结果见表1.

由表中实验数据可以得出以下结论:

(1) 通过分析2#和4#钻场钻孔之间的连通性,可以得出:不同降水漏斗之间水力连通性极差,基本上不连通.

(2) 通过分析4-1和3-2、4-1和4-2的连通关系可以得出:由于同区域不同钻孔处在降水漏斗的不同位置,钻孔之间的连通性不具有对称性.

(3) 通过2-1和2-2、3-1和3-2对淋水段连通结果分析得出:同区域的不同钻孔同涌水点的连通性差异较大.

### 5.2 浆液扩散路径范围确定

浆液在裂隙网络中的扩散路径和速度主要由水力梯度决定,根据已经取得水力等压线,并结合水力连通实验,可以运用地下水动力学的基本原理对浆液扩散方向和加固区域进行分析<sup>[10-11]</sup>.

表1 水力连通试验结果表  
Table 1 The result of water-power cross-connection test

钻孔编号	水力连通情况(强连通、弱连通、不连通)连通时间 $T/\text{min}$						辅二淋水段
	2-1	2-2	3-1	3-2	4-1	4-2	
2-1	—	不连通	不连通	不连通	不连通	不连通	不连通
2-2	不连通	—	不连通	不连通	不连通	不连通	弱连通 42
3-1	不连通	不连通	—	弱连通	强连通 15	弱连通 37	弱连通 32
3-2	不连通	不连通	强连通 17	—	强连通 14	强连通 24	强连通 27
4-1	不连通	不连通	弱连通 35	不连通	—	不连通	强连通 47
4-2	不连通	不连通	弱连通 28	弱连通 19	强连通 26	—	强连通 17

(1) 浆液在钻孔中注入后,必然沿着水力梯度线从高压区域向低压区域扩散,可以分析得出从4-1钻孔进行注浆后,浆液将向降水漏斗区域Ⅰ的低压区进行扩散,并经过断层导水构造扩散至巷道顶板淋水段。

(2) 浆液进入裂隙后,由于不同的降水漏斗区域都有相对应的泄水区域,所以在完全封堵该降水漏斗区域内所有裂隙前,不会向其他区域扩散。在注浆治理Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ对应的涌水区域过程中,必须分别选取不同钻孔进行注浆治理,不可能通过单一钻孔注浆达到封堵整个淋水段的目的。

(3) 根据水力连通试验的结果分析,浆液必然在水力连通密切的裂隙间相互扩散。

(4) 在同一降水漏斗区域内,若存在多个钻孔揭露涌水,如果钻孔之间不相连通,那么必须选择多个注浆孔进行注浆,以保障注浆加固治理的范围。

### 5.3 最佳注浆孔位的选择

所谓的最佳注浆钻孔,就是指可以通过该钻孔注浆能达到浆液扩散范围的最大化,注浆材料消耗最小化的目标。一般在开放性涌水区域,将降水漏斗的上游钻孔(即处于水力补给上游的钻孔)作为注浆孔,处于下游的钻孔作为引流孔,做到一孔注浆,多孔引流,最大程度地使浆液扩散到该降水漏斗影响区域内所有位置。发现引流孔串浆后,逐步关闭引流孔,注浆孔继续注浆,从而满足对出水裂隙进行堵水加固的要求。由于该治理工程中岩溶裂隙连通的复杂性和涌水段较长,因此通过单个钻孔注浆难以彻底根治水患<sup>[12-13]</sup>。注浆孔的选择要满足如下条件:

(1) 钻孔揭露涌水量较大,且该钻孔放水时,工程治理目标区域涌水点水量明显减少。

(2) 该钻孔在连通试验中,对工程治理目标区域涌水连通较好。

(3) 该钻孔揭露涌水位置位于降水漏斗的上游,该孔与同区域内其他钻孔水力连通性较好。

(4) 该钻孔周边围岩较为稳定,在注浆过程中不易塌孔,造成注浆孔堵塞。

(5) 该孔注浆后,浆液扩散到涌水点的时间要略微大于材料的初凝时间。

经过对钻孔连通性和浆液扩散分析,在3#钻场和4#钻场选定3-2、4-1和4-2钻孔进行注浆,来加固治理降水漏斗区域Ⅰ内揭露的裂隙带;在2#钻场中选用2-2对降水漏斗区域Ⅱ揭露的裂隙带进行注浆治理;在2#钻场中选用2-1对降水漏斗区域Ⅲ揭露的裂隙带进行注浆治理。由于使用的速凝早强水泥初凝时间在15~45 min内可调,所以根据水力连通试验的结果,上述钻孔满足注浆要求。

## 6 注浆治理效果

对3-1、4-2、2-1和2-2 4个钻孔进行了注浆,注浆开始后,3#钻场前方淋水段发生大面积的轻微跑浆,有力证明了注浆钻孔选取的合理性。随着注浆材料的凝固,注浆封堵了3#钻场前段15 m范围内的顶板淋水,共减少淋水段涌水约40 m<sup>3</sup>/h,基本取得了预期治理效果。注浆效果检查采用了钻孔压水试验的方法,在注水终压为10 MPa的条件下,单孔吸水量小于0.5 L,符合设计制定的注浆结束标准。

经过注浆治理后,顶板淋水段已无股状和线状涌水,将原有的挡水石棉瓦层拆除后,可以明显观察到原顶板淋水段涌水点的水痕。由于该处涌水中富含硫元素,所以水痕多成黄褐色(见图4)。



图4 注浆治理效果图

Fig. 4 The result of grouting management

## 7 结论

(1) 在深井巷道大范围涌水治理工程中,可以

引入物探方法进行涌水构造的探查,减少注浆钻孔的工程量,取得了良好的工程效益。

(2) 对物探确定的关键含水构造,辅助进行钻探验证,取得裂隙构造的涌水水压和流量参数.将取得的数据信息综合后,可得到裂隙含水构造的发育规模和空间展布规律,为后期注浆治理提供指导依据。

(3) 在注浆治理工程中可以依据取得的水压参数,进行含水构造区域等水位线的绘制,掌握降水漏斗的形态和水力补给路径。

(4) 在水力连通复杂区域,可采用水力连通试验的方法,全面把握各个钻孔揭露裂隙的水力连通情况,为浆液的扩散范围和扩散路径的确定提供依据。

(5) 注浆钻孔的选定要能够最大程度地满足浆液扩散范围的需要;同时为了保证不严重跑浆,该钻孔到涌水点的连通时间要略大于材料的初凝时间。

#### 参考文献:

- [1] 韩行瑞. 岩溶隧道涌水及其专家评判系统[J]. 中国岩溶, 2004, 23(3): 213-218.  
HAN Xingrui. Karst water bursting in tunnel and expert judging system[J]. Carsologica Sinica, 2004, 23(3):213-218.
- [2] 张之淦. 岩溶圈系统及其研究方法[J]. 中国岩溶, 2007, 26(1): 1-10.  
ZHANG Zhigan. Karstosphere system and its research methodology [J]. Carsologica Sinica, 2007, 26(1): 1-10.
- [3] 卢文喜. 地下水运动数值模拟过程中边界条件问题探讨[J]. 水利学报, 2003(3): 33-36.  
LU Wenxi. Approach on boundary condition in numerical simulation of groundwater flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(3):33-36.
- [4] 杨秀竹,雷金山,夏力农,等. 幂律型浆液扩散半径研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1803-1806.  
YANG Xiuzhu, LEI Jinshan, XIA Linong, et al. Study on grouting diffusion radius of exponential fluids[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11):1803-1806.
- [5] 葛晓光,钱家忠,汪家权,等. 井壁破坏注浆治理中的浆液孔隙压强模型[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(6): 37-39.

- GE Xiaoguang, QIAN Jiazhong, WANG Jiaquan, et al. Porous grout pressure modeling in mending shaft-lining ruptures[J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(6):37-39.
- [6] 王哲,孟祥瑞,赵光明,等. 浅谈巷道注浆作用机理及参数的确定依据[J]. 矿业科学技术, 2008, 36(1):15-17.  
WANG Zhe, MENG Xiangrui, ZHAO Guangming, et al. Comments on the determine basis of roadway grouting mechanism and parametric [J]. Mining Science & Technology, 2008, 36(1):15-17.
- [7] 崔阿李,刘康和. 探地雷达技术在岩溶探测中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(2):197-199.  
CUI Ali, LIU Kanghe. Application of ground penetrating radar (GPR) technology in karst survey[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(2):197-199.
- [8] 张耀先,丁新求. 水力学[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2008.  
ZHANG Yaolian, DING Xinqiu. Hydraulics[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2008.
- [9] 陈崇希,贾晓青. 地下水动力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1999.  
CHEN Chongxi, JIA Xiaoqing. Groundwater dynamics [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999.
- [10] 周光■,严宗毅,许世雄. 流体力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.  
ZHOU Guangdong, YAN Zongyi, XU Shixiong, et al. Fluid mechanics[M]. Beijing: High Education Press, 2000.
- [11] 米尔恩-汤姆森. 理论流体动力学[M]. 李裕立,晏名文,译. 北京:机械工业出版社, 1984.  
MILNETHOMSON L M. Theoretical hydrodynamics [M]. LI yuli, YAN mingwen, Trans. Beijing: China Machine Press, 1984.
- [12] 牛学良,付志亮. 深井巷道岩石注浆加固试验与巷道稳定性控制[J]. 金属矿山, 2007, 11:18-21.  
NIU Xueliang, FU Zhiliang. Test of grouting reinforcement of deep roadway and control of its stability [J]. Metal Mine, 2007, 11:18-21.
- [13] 曾祥熹,郑长成. 水泥浆的流变性及其对浆液运动的影响[J]. 华东地质学院学报, 1999, 22(2):137-141.  
ZENG Xiangxi, ZHENG Changcheng. The rheology of cement grouts and it's effect on grout penetrating[J]. Journal of East China Geological Institute, 1999, 22(2):137-141.

(编辑:孙培芹)