

文章编号: 1001-1749(2023)05-0597-07

基于激电法半衰时探水的可行性研究

王 程

(中煤科工集团 西安研究院有限公司, 西安 710077)

摘要: 突水灾害在隧(巷)道等隐蔽工程中是重大安全隐患,查明隐伏的强富水区域是亟需研究和解决的重要工程需求,其中水量的预测是重难点。针对此问题,这里开展激电法半衰时探水技术的研究,基于岩石电化学测试分析不同孔隙度含水量条件下相关参数的规律,采用物理模拟实验研究二次时差与含水量之间关系。研究表明:①电阻率与孔隙度含水量之间为正线性相关,极化率和半衰时与孔隙度含水量之间近似“正态”相关;②二次时差法探水机理中二次时差与含水量关系较为复杂,并非简单的线性相关,二次时差法需基于较多已知条件方可粗略估算含水量,目前该方法实际应用仅可作为探水的辅助手段。

关键词: 激电半衰时; 水量估算; 含水构造; 半衰时; 二次时差

中图分类号: P 631.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.05.06

0 引言

据统计,在过去的 20 多年里,我国煤矿水害造成的直接经济损失列煤矿各类事故之首,而且由于水害造成的群死群伤人数也仅次于瓦斯,列为煤矿“四大灾害”之一。我国在交通、水利水电和矿产资源开发领域具有很多的超长、特长隧道,很多隧道面临着复杂的水文地质条件,其中突(涌)水、突(涌)泥灾害是隧道施工中的主要地质灾害之一^[1]。可见突水灾害为隧(巷)道等隐蔽工程的重大安全隐患,查明隐伏的强富水区域成为亟需研究和解决的重要工程科技问题。

目前通常采用地面地球物理勘探和水文地质勘探的方式查明地下强富水的区域,当构造和水文地质条件较为复杂,则需要在隐蔽开挖的地下隧(巷)道中,开展超前水文地质预报工程。目前国内超前水文地质预报工程主要采用的方法有:钻探、物探和

巷探,其中物探方法具有高效快捷、无损探查、成本低廉等优势,在工程和矿产领域得到广泛地研究和应用。物探的方法主要有:地震反射法、瑞雷波法、槽波超前、直流电法、瞬变电磁法等。近年来许多学者针对综合物探方法联合超前探、设备的抗干扰性和精度提高,数据处理与高精度反演方面作出了深入研究,特别是在影响矿井安全生产的含水构造探测方面,取得了许多成果:刘青雯^[2]提出了三点一三极超前探测方法突出巷道前方的地质异常;程久龙^[3]等对以直流三极法为基础的两点三极电阻率法超前探测数据采集与处理方法进行了系统论述;韩德品^[4]等提出了基于几何交汇原理的七电极系超前探测系统,探测巷道掘进前方 100 m 范围的含水构造;黄俊革等^[5-6]在直流电法超前探的数据处理和反演技术进行了较为系统的研究,提高了探测精度,但反演结果只能确定异常体的厚度和电阻率的组合值;于景邨^[7]推导出全空间瞬变电磁视电阻率计算公式和视电阻率-深度曲线的数学模型,开发了煤

收稿日期: 2022-04-22

基金项目: 陕西省自然科学基金(2020JQ-995);天地科技股份有限公司科技创新创业资金项目(2020-TD-QN11)

第一作者: 王程(1986-),男,硕士,副研究员,主要研究方向为电磁法勘探, E-mail: 18629054717@163.com。

矿矿井瞬变电磁法探查含水构造。在此基础上,国内众多学者开展了矿井瞬变电磁法全空间三维正反演研究,许新刚等^[8]对矿井瞬变电磁法电阻率公示等问题进行了讨论解决;孙怀凤等^[9]对瞬变电磁法三维正演和探测方式进行了完善;陈丁等^[10]对全空间下的瞬变场进行研究;程久龙等^[11]对全空间下的瞬变电磁法的反演方法进行了研究;邢修举等^[12]将瞬变电磁法的数据进行了三维成像的研究;范涛等^[13]将瞬变电磁法工艺与钻孔相结合,实现了巷瞬变电磁法。虽然直流电法和瞬变电磁法均能探测含水构造和相对富水区的异常空间位置,但是难以预测异常区的富水量,无法为后期放水工程提供水量依据。

针对预测水量的难题,笔者基于谢明魁^[14]所提出“二次时差”法原理,采用岩样电化学测试和物理模拟实验的手段,从电阻率、极化率和半衰时参数着手,分析不同岩性、孔隙度条件下各参数变化的规律,研究基于“二次时差”法的巷(隧)道超前探测在不同含水构造下的响应特征,探讨激电半衰时用于预测水量的可行性。

1 “二次时差”基本原理

激发极化效应(激电效应)是在外电流场作用下,岩、矿石与周围的水溶液产生物理—电化学反应,引起地质介质中出现电荷分离,产生附加“过电位”的一种物理化学现象。极化体被极化是一个先快后慢的过程,经过 T_s 秒后趋于饱和状态。断电后, ΔU_1 已不存在,但极化引起的电位差 $\Delta U_2(t)$ 先快后慢的逐渐减小,直至消失。如图 1 所示, $\Delta U(t)$ 为充电曲线, $\Delta U_2(t)$ 为放电曲线^[15]。常用的参数是视极化率 η_s , 计算公式为式(1)。

$$\eta_s = (\Delta U_2(t_i^{\text{off}})) / (\Delta U(T - \Delta t)) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\Delta U_2(t_i^{\text{off}})$ 是断电后的某时刻 t_i 测得的二次电位; $\Delta U(T - \Delta t)$ 是快断电之前测得的总场电位差。这种测量若干个时间点来研究 $\Delta U_2(t)$ 称为时间域激电法。

根据在含水层中随激发电流的增大,衰减时也相应增大,非含水层中随激发电流的增大基本不变或逐渐减小的原理,在某一极距上按一定的电流制式与时间,先后向地下供入大、小两种激发电流,断电后用稳定可靠的仪器将二次电位的放电过程记录下来,测量大、小两种电流激发出来的二次电位,由断电后的最大值衰减到一半所需要的时间即半衰时

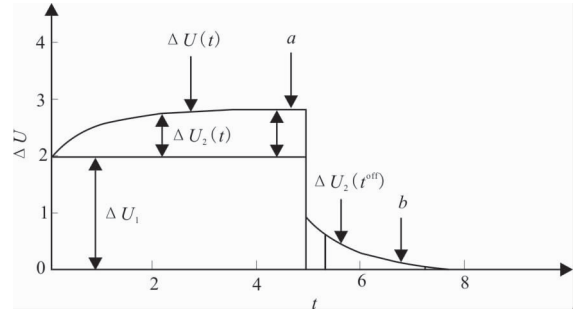


图 1 激发极化现象示意图

Fig. 1 Schematic diagram of excited polarization phenomenon

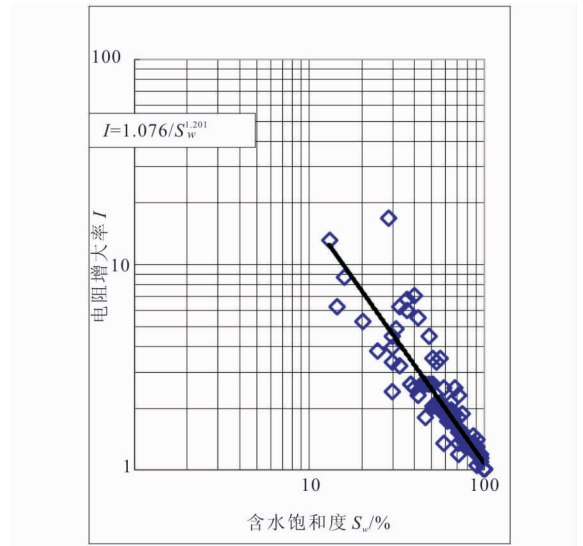


图 2 电阻增大率 I 与含水饱和度 S_w 关系图

Fig. 2 Relationship between resistivity increment I and water saturation S_w

的差值,称二次时差值^[16] s_c 。

$$s_c = s_{td} - s_{tx} \quad (2)$$

式中: s_{td} 、 s_{tx} 分别为采用大、小电流激发测得的半衰时^[17]。

在同一水文地质单元内,有一个或两个已知井作参数时,可根据含水因素推算其他未知点的单位涌水量^[17],在无已知井时,可根据含水因素即各测点时差正异常面积大小相对比较水量大小,这种探测方法称二次时差法^[18-19]。

2 岩样电化学测试

目前激电半衰时的研究理论尚不成熟,以往的研究多以物理模拟实验和工程应用主导。笔者采用

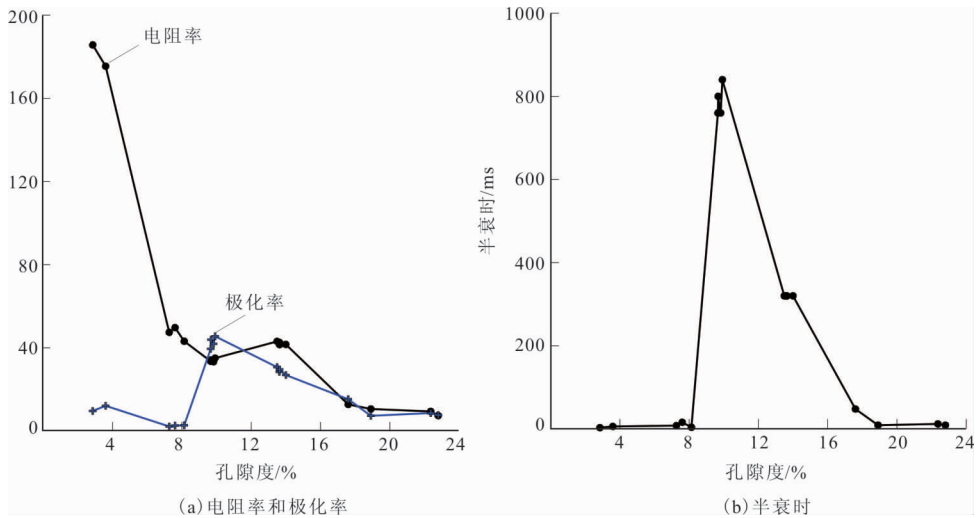


图3 电阻率、极化率和半衰时与孔隙度的关系

Fig. 3 The relationship between resistivity, polarization and half decline and porosity

岩石电化学测试^[20]衰减二次场为研究半衰时提供分析资料。

首批岩石样品 50 个,以砂岩和灰岩为主,根据初测结果选取了 13 个样品,根据孔隙度大小,添加了 4 组岩样,17 组岩样孔隙度介于 2.9%~22.8%。测试采用主要设备:智能 LCR 测量仪 ZL5(01-1796、01-1684),电导率仪 HI4321(A0006314),电子天平 XS205DU(B231179629),检测环境温度($^{\circ}\text{C}$): $20^{\circ}\text{C}\sim 23^{\circ}\text{C}$,检测环境湿度(%RH): $25\sim 41$ 。采用 8 000 mg/L 的 NaCl 溶液作为饱和溶液,测试以上岩样在不同饱和度条件下电阻的变化率(图 2),可以看出随着饱和溶液充填岩石孔隙,电阻逐渐降低。

重点分析电阻率、极化率和半衰时跟孔隙度含水量的关系(图 3):整体上电阻率与孔隙度含水量为正比线性关系。当岩石孔隙度含水量 $< 4\%$ 时(灰岩),电阻率值较大;当孔隙度含水量介于 $4\%\sim 14\%$ 之间时(砂岩),电阻率值介于 $30\ \Omega\cdot\text{m}\sim 50\ \Omega\cdot\text{m}$;当孔隙度含水量 $> 15\%$ 之后(砂岩),电阻率值降低至 $10\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右,并且稳定下来,与图 1 测试趋势一致。

极化率和半衰时与孔隙度含水量的关系并非正比关系,类似于“正态曲线”关系,孔隙度含水量 $< 9\%$ 和 $> 15\%$ 时,极化率低于 20%,半衰时低于 100 ms;当孔隙度含水量介于 $9\%\sim 15\%$,极化率高于 20%,半衰时高于 300 ms,这是区别电阻率较为明显的特征,说明极化率和半衰时与孔隙度含水量等关系不大。

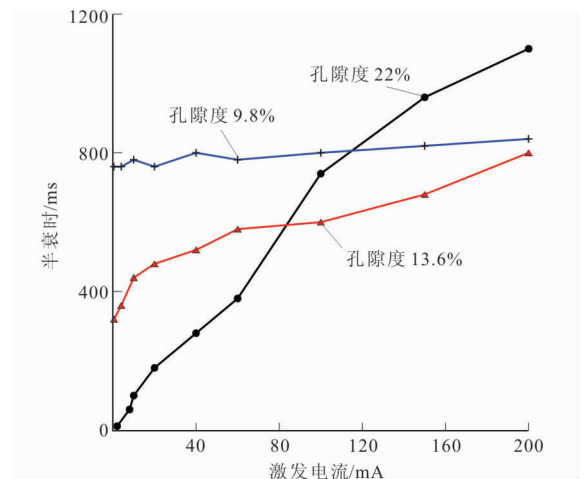


图4 电阻率和极化率随孔隙度变化的关系

Fig. 4 The relationship between resistivity and polarization with porosity

为研究“二次时差”法原理中,最关键的半衰时随着电流的变化规律,选取三个具有代表性的孔隙度岩石,供以不同电流大小分析半衰时的变化规律(图 4)。孔隙度含水量 $> 20\%$ 的岩石半衰时与电流基本成正线性关系,孔隙度 $< 15\%$ 的 2 块岩石半衰时随着电流增加不变或者变化不明显。可以推测,在含水层富水性较强的区域中测试二次时差 > 0 ,富水性较弱的区域则可能 ≤ 0 。

3 物理模拟实验

设计物理模型为:巷道开挖长度为 10 m 左右,

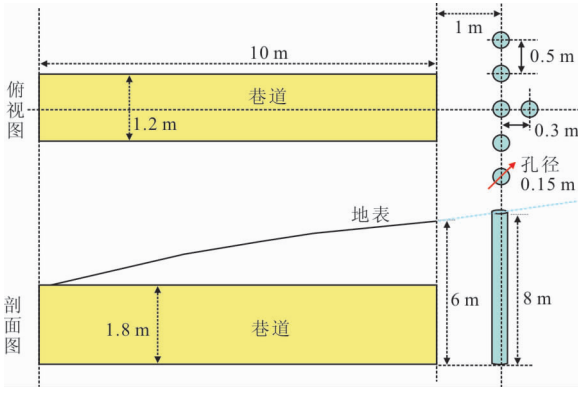


图 5 巷道和钻孔工程参数

Fig. 5 Tunnel and drilling engineering parameters

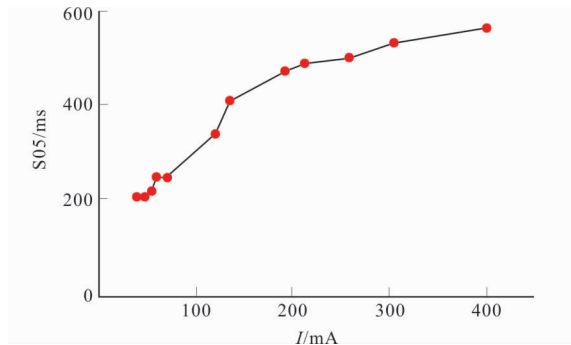


图 6 背景场多电流实验

Fig. 6 Background field multi-current experiment

最大埋深约 6 m, 掌子面前方约 1 m 打钻 6 个, 孔径为 15 cm, 水平孔间距为 50 cm, 垂直孔间距为 30 cm, 具体模型尺寸如图 5 所示, 利用 6 个钻孔, 可模拟实现采空区、陷落柱和断层构造。

首先测试的数据是在背景场条件下, 半衰时随电流变化的过程见图 6。物理模拟得到, 半衰时随着电流的增加近似于线性增大。

在无承重墙体, 无钻孔, 干燥坑道的情况测试背景场, 采用直流电法三极装置, A 位于掌子面, 掌子面离钻孔模型 1 m 远, $AM=2\text{ m}$, $MN=0.5\text{ m}$, 电流大小为 144 mA 和 73 mA。实验得到大小电流的二次时差和视电阻率对比(图 7), 可以看到电流大小对视电阻率值几乎没有影响; 电流大小对半衰时有影响, 得到二次时差在小极距时基本为 0, 当极距 $AO>5\text{ m}$ 后, 二次时差趋势 >0 。

将各个钻孔等量分次注入水, 测量不同水量情况下二次时差的规律, 得到曲线震荡且无规律。因此为分析二次时差曲线与横坐标轴的包围面积与含

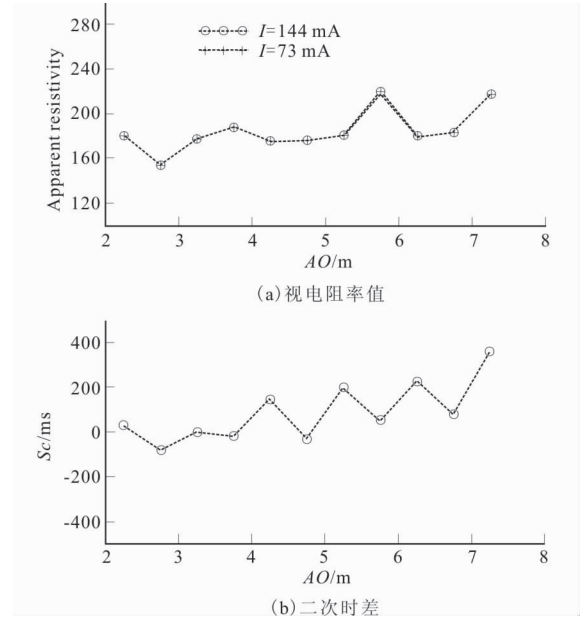


图 7 背景场下的参数特征

Fig. 7 Parameter characteristics in the background field

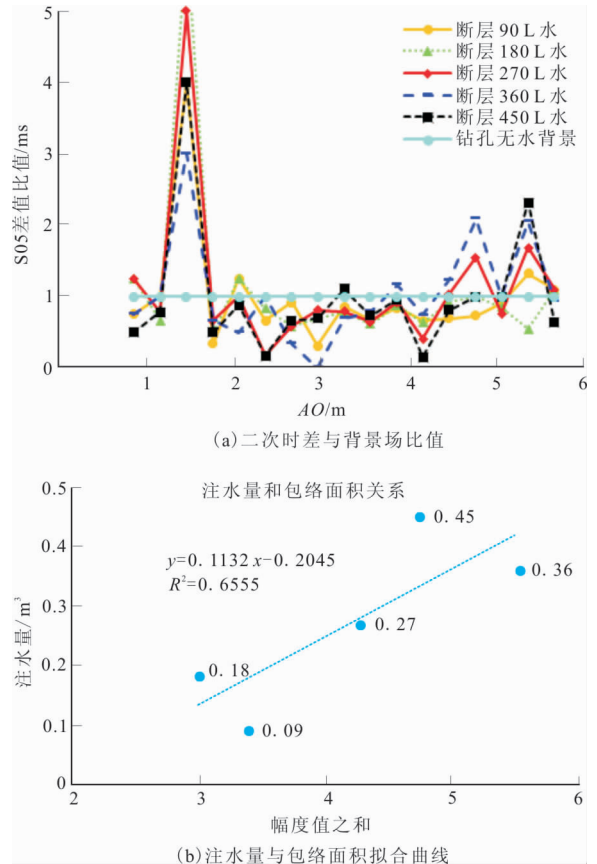


图 8 不同注水量的二次时差比值关系

Fig. 8 Ratio relationship of quadratic time difference of different water injection volumes

水量之间关系,将不同注水量的二次时差特征值与背景值作比值,获取二次时差比值随极距变化的特征(图 8(a))。可以看到极距较小时数据失真,因此选用极距为 2 m 以后的数据,可以看到不同注水量半衰时之差比值曲线相对于 $y=1$ 的直线包围面积有增大趋势,同样将 $y=1$ 之上正幅度与 $y=1$ 值下负幅度进行累加,来反映不同测线对含水量的响应综合,获取含水量与幅度之和的关系(图 8(b))。

4 结论

1)通过岩石电化学测试得到:①电阻率与岩石孔隙度含水量基本成正线性相关;②极化率和半衰时与孔隙度含水量的关系并非正比关系,类似于“正态曲线”关系;③当孔隙度含水量 $>20\%$ 的岩石半衰时与电流基本成正线性关系,当孔隙度含水量 $<15\%$ 的岩石半衰时随着电流增加不变或者变化不明显。

2)通过物理模拟实验得到:①全空间条件下,半衰时与电流成近似正线性相关;②模拟断层模型在不同含水量情况,二次时差曲线变化复杂且无规律,通过二次时差与背景场的比值,分析得到二次时差与横轴包围面积与含水量存在一定线性关系。

3)二次时差与含水量之间关系复杂,需具有较多已知条件下方可用于估算水量,离实际应用还需进一步研究分析,可作为探水辅助手段。

参考文献:

- [1] 李术才,刘斌,李树忱,等. 基于激发极化法的隧道含水地质构造超前探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 7-19.
LI S C, LIU B, LI S C, et al. Study of advanced detection for tunnel water-bearing geological structures with induce polarization method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 7-19. (In Chinese)
- [2] 刘青雯. 井下电法超前探测方法及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(5): 60-62.
LIU Q W. Underground electrical lead survey method and its application[J]. Coal Geology and Exploration, 2001, 29(5): 60-62. (In Chinese)
- [3] 程久龙,王玉和,于师建,等. 巷道掘进中电阻率法超前探测原理与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(4): 60-62.
CHENG J L, WANG Y H, YU S J, et al. The principle and application of advance surveying in roadway excavation by resistivity method[J]. Coal Geology and Exploration, 2000, 28(4): 60-62. (In Chinese)
- [4] 韩德品,李丹,程久龙,等. 超前探测灾害性含导水地质构造的直流电法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 109-113.
HAN D P, LI D, CHENG J L, et al. DC method of advanced detecting disastrous water-conducting or water-bearing geological structures along same layer [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 109-113. (In Chinese)
- [5] 黄俊革,阮百尧,王家林. 坑道直流电阻率法超前探测的快速反演[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 619-624.
HUANG J G, RUAN B Y, WANG J L. The fast inversion for advanced detection using DC resistivity in tunnel[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(2): 619-624. (In Chinese)
- [6] 刘斌,李术才,聂利超,等. 基于自适应加权光滑约束与 PCG 算法的三维电阻率探测反演成像[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 92-99.
LIU B, LI S C, NIE L C, et al. Inversion imaging of 3D resistivity detection based on adaptive weighted smooth constraint and PCG Algorithm[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 92-99. (In Chinese)
- [7] 于景邨,刘志新,刘树才,等. 深部采场突水构造矿井瞬变电磁法探查理论及应用[J]. 煤炭学报, 2007(8): 818-821.
YU J C, LIU Z X, LIU S C, et al. Theoretical analysis of mine transient electromagnetic method and its application in detecting water burst structures in deep coal stope[J]. Journal of China Coal Society, 2007(8): 818-821 (In Chinese)
- [8] 许新刚,岳建华,张莹. 矿井瞬变电磁探测几个问题探讨[J]. 煤炭与化工, 2017, 40(4): 136-139.

- XU X G, YUE J H, ZHANG Y. Discussion on several problems of mine transient electromagnetic exploration[J]. Coal & Chemical Industry, 2017, 40(4): 136—139. (In Chinese)
- [9] 孙怀凤. 隧道含水构造三维瞬变电磁场响应特征及突水灾害源预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 222.
- SUN H F. Research on three-dimensional transient electromagnetic field response characteristics and prediction of water inrush disaster source of tunnel water-bearing structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 222. (In Chinese)
- [10] 陈丁, 程久龙, 王阿明. 矿井全空间孔中瞬变电磁响应积分方程法数值模拟研究[J]. 地球物理学报, 2018, 61(10): 4182—4193.
- CHEN D, CHENG J L, WANG A M. Numerical simulation of transient electromagnetic response in full-space hole of mine using integral equation method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(10): 4182—4193. (In Chinese)
- [11] 程久龙, 李明星, 肖艳丽, 等. 全空间条件下矿井瞬变电磁法粒子群优化反演研究[J]. 地球物理学报, 2014, 57(10): 394—400.
- CHENG J L, LI M X, XIAO Y L, et al. Study on particle swarm optimization inversion of mine transient electromagnetic method in whole-space[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(10): 394—400. (In Chinese)
- [12] 邢修举, 吴正飞, 张依瑞, 等. 三维瞬变电磁超前探测技术在隧道探水中的应用[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(1): 162—167.
- XING X J, WU Z F, ZHANG Y R, et al. Study on sealing effect of 3D transient electromagnetic method in advance detecting exploration drilling borehole[J]. Coal Science and Technology, 2020, 57(1): 162—167. (In Chinese)
- [13] 范涛. 孔巷瞬变电磁动源定接收方法探测采空区试验[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 169—178.
- FAN T. Experimental study on the exploration of coal mine goaf by dynamic source and fixed reception Roadway—Borehole TEM detection method[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 169—178. (In Chinese)
- [14] 谢明魁, 刘永炳. 地下水探测仪二次时差法[J]. 铁道工程学报, 1993(2): 58—60.
- XIE M K, LIU Y B. Quadratic time difference method for groundwater detector[J]. Journal of Railway Engineering, 1993(2): 58—60. (In Chinese)
- [15] 李金铭, 程学栋, 高杰. 激电找水应用基础研究[J]. 物探与化探, 1990(4): 266—275.
- LI J M, CHENG X D, GAO J. Basic research on the application of induced polarization in water exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1990(4): 266—275. (In Chinese)
- [16] 夏治平. 用二次电位放电曲线计算半衰时[J]. 物探与化探, 1986(5): 400—401.
- XIA Z P. Calculation of half-decline time by using secondary potential discharge curve[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1986(5): 400—401. (In Chinese)
- [17] 刘斌. 基于电阻率法与激电法的隧道含水地质构造超前探测与突水灾害实时监测研究[D]. 山东: 山东大学, 2010.
- LIU B. Research on advanced detection of water-bearing geological structure and real-time monitoring of water inrush disaster in tunnel based on resistivity method and IP method [D]. Shandong: Shandong University, 2010. (In Chinese)
- [18] 石显新. 二次时差法在地下水资源勘察中的应用[C]. 中国地质学会, 中国煤炭学会煤田地质专业委员会学术交流会, 2004.
- SHI X X. Application of quadratic time difference method in groundwater resources exploration[C]. Geological Society of China, Academic Exchange Meeting of the Coalfield Geology Professional Committee of the Chinese Coal Society, 2004. (In Chinese)
- [19] 张彬, 陈小玮, 张海荣. 激发极化法在矿井地下水勘探中的应用研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2012, 37(5): 1004—1007.
- ZHANG B, CHEN X W, ZHANG H R. Application of induced polarization method in groundwater exploration

tion of mine [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2012, 37(5): 1004—1007. (In Chinese)

[20] SY/T 6352—1998, 岩石电化学参数的实验室测定

[S]. 1998.

SY/T 6352—1998, Laboratory determination of electrochemical parameters of rocks [S]. 1998. (In Chinese)

Feasibility study of water exploration based on IP method in half decline

WANG Cheng

(Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: The water inrush disaster is a significant hidden danger in the tunnel (lane) and other hidden projects. It is a crucial engineering demand to find the hidden areas with strong and prosperous water, and the prediction of water quantity is a crucial difficulty. In order to solve this problem, this paper carried out research on the water exploration technology of IP method in half decline. The law of related parameters under different porosity water content was analyzed based on the electrochemical test of rock. A physical simulation experiment studied the relationship between secondary time difference and water content. The results show a positive linear correlation between resistivity and porosity water content and an approximate "normal" correlation between polarization and half decline and porosity water content. The relationship between the quadratic time difference method and water content in the mechanism of water exploration is complicated, rather than a simple linear correlation. The quadratic time difference method can estimate water content roughly only based on more known conditions. The practical application of this method can only be used as an auxiliary means of water exploration.

Keywords: IP half decline time; water estimation; water-bearing structure; half failure; the second time