

文章编号: 1001-1986(2019)02-0189-06

人工井液电阻率测井测量时间确定方法

王海军^{1,2,3}, 马 良¹

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069;
3. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要: 测量时间是人工井液电阻率测井的关键参数, 长期依靠施工经验来确定, 尚缺少该参数的计算模型和计算方法。为解决这一问题, 从影响测量时间的地层富水性、渗透率、地层水的视电阻率、示踪剂溶解速度等多种因素入手, 应用质量衡算定律建立测井最佳测量时间计算模型, 推导出最佳测量时间计算公式, 并通过现场钻孔对比实验验证。结果表明, 模型建立的最佳测量时间计算公式可以为盐化测井测量时间的选取提供可靠的依据, 可为人工井液电阻率测井获取含(隔)水层水文地质参数提供技术支持, 更好地指导现场水文测井工作。

关 键 词: 质量衡算定律; 影响因素; 最佳测量时间; 盐化测井; 人工井液电阻率测井

中图分类号: P642.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.02.029



Method for determination of measurement time of resistivity logging in artificial well liquid

WANG Haijun^{1,2,3}, MA Liang¹

(1. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China;
2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 3. State Key Laboratory of Continental Dynamics,
Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: In order to solve the problem of determining the most critical parameter of the logging time of artificial well fluid resistivity logging, and get rid of the method that depends on the construction experience for a long time, guide logging technicians to obtain reliable logging curves, from the factors influencing the measurement time, the mass conservation law was used to build the calculation model for the best measurement time of logging, the computational formula for the best measurement time was derived, which was verified through in-site contrast experiment of boreholes. The results show that the computational formula set up by the model could provide reliable basis for selection of the measurement time of salinized logging and technical support for acquisition of the hydrogeological parameters of aquifers and aquiclude during the artificial well fluid resistivity logging and guide better the in-site hydrological logging.

Keywords: mass conservation law; influencing factors; the best measurement time; salinized logging; artificial well fluid resistivity logging

人工井液电阻率法测井技术是划分含(隔)水层、分析含水层之间补给关系以及研究地下水动力学特征的关键技术。该技术已经被广泛应用于煤矿区含(隔)水层划分, 含水层涌(吸)水量计算, 地下水流速以及地下水污染物迁移监测等领域。近年来国内外研究人员在对井液电阻率法测井施工中示踪剂类型的选择、投放方式的选择、最佳

投放量的计算^[1-2]、曲线的解释^[3]、含水层单层涌水量的计算^[4-7]、地下污染物的迁移^[5]、淡盐水界面的划分^[8]、地下水矿化度的计算^[9-12]、地层水含水饱和度计算^[13-14]等方面进行了深入地研究并取得了理想的效果, 为该技术的成功应用奠定了基础。但是, 测量时间作为人工井液电阻率法测井最关键的参数, 尤其是盐化后每一次测量的测量时间

收稿日期: 2018-03-06

基金项目: 中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金项目(2013XAYQN002); 国家科技重大专项课题(2016ZX05045-002)

Foundation item : Science and Technology Innovation Fund of Xi'an Research Institute of CCTEG(2013XAYQN002); National Science and Technology Major Project(2016ZX05045-002)

第一作者简介: 王海军, 1985 年生, 男, 陕西榆林人, 助理研究员, 从事煤田地质勘探工作. E-mail: wanghaijun10000@163.com

引用格式: 王海军, 马良. 人工井液电阻率测井测量时间确定方法[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(2): 189-194.

WANG Haijun, MA Liang. Method for determination of measurement time of resistivity logging in artificial well liquid[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(2): 189-194.

参数的选择和计算，目前主要依靠测井技术人员的施工经验，尚缺少该参数的计算模型和计算方法，且未见这方面的报道。

笔者从影响最佳测量时间的因素入手，通过对投药量的计算和校正，利用质量衡算定律、溶质稀释定律，结合地质钻探、常规测井以及抽水试验获取含水层的水文参数，建立扩散法测井盐溶液溶解模型，计算并推导出测量时间参数的计算公式，并通过工程实例进行现场验证，以期解决这一问题，从而指导测井技术人员进行现场施测。

1 井液电阻率测井原理

井液电阻率法测井是用来观测井液电阻率随着时间的变化在钻孔井深横纵向上的变化规律，从而解释相关的流体及储存参数^[1]。解决水文地质问题的井液电阻率测井按照人工干预的方式可以划分为无人工干预的自然井液电阻率和有人工干预的人工井液电阻率两种类型。前者主要应用于定性分析，如岩性剖面、含(隔)水层的划分等，后者的应用范围则更广。

人工井液电阻率法主要是人工将盐(NaCl、NH₄Cl 等)或者低矿化度的水通过各种方法投入到钻孔之中，进行人工盐化或淡化井液，使钻孔中井液与含水层中的地下水之间产生一个明显的井液浓度差。在地下水的自然渗透作用和盐溶液浓度差扩散作用下，盐化后的井液浓度随着时间的推移逐步被地下水稀释淡化。通过井液电阻率仪按照测量视电阻率曲线的原理和方法，测量和记录井液在不同深度随着时间的变化情况。根据施工工艺不同将扩散法分为：提捞法、注入法、静止水位法(井液盐化法)、简易提捞法等，在此不再赘述。

2 最佳测量时间的确定

2.1 扩散法水文测井

扩散法是井液电阻率测井中最有效、最常用的一种方法，要求在对钻孔进行清洗后的清水井液中进行测量。

2.2 测量技术要求

a. 方法选择 在施测之前应对含水层地下水矿化度通过电阻率测井、周边钻孔以及相应含水层水质化验资料等，分析评价试验段含水层矿化度。若为高矿化度地下水则可选择淡化测井。

b. 施测时间 应在钻孔其他测井任务完成后进行，若钻孔井壁完整性差，应在钻孔洗井结束后进行，若井壁完整性好或抽水试验段下入过滤筛管时，须待抽水试验结束、水位基本稳定后进行测量；盐

化测井持续时间不应超过 36 h，定量估算水量所需记录的时间精确到秒。

c. 仪器的标定 在测量前应对所有仪器进行刻度标定和检测，要求各项指标的误差和精度满足规范要求，同时检测仪器的绝缘性以及电极系数，保证供电电流的准确、稳定和测量工作的顺利进行，在实测时应在供电线路中串 5~30 kΩ 的固定电阻，以保证供电电流的稳定。

d. 施工条件 要求盐化井液均匀，各条曲线的测量技术条件是一致的，且曲线测量时间把握适当，若含水层富水性很弱，可采用提筒法抽水，在抽水时边抽边测，直至异常反应清晰为止。

e. 盐化程度的要求 注入法形成的盐柱长度 5~10 m，要求盐化后的井液电阻率是盐化前的 3~4 倍。

f. 测量次数的要求 在进行盐化或淡化之前首先测量一条自然状态下井液电阻率 ρ_0 ，供施测时间参数的选择和投盐量的计算以及钻孔井壁完整性分析参考。按照盐化前的 ρ_0 测量技术条件，每间隔一段时间后分别测量盐化后的各条电阻率曲线 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 、...、 ρ_n ，直至最后 2 条曲线的形态接近不变时才能停止施测工作，一般做 5~8 条曲线。

2.3 影响测量时间的因素

测量时间参数的选取是决定人工井液电阻率测井曲线质量的关键，测量时间受地层的富水性、渗透率、地层水的视电阻率、示踪剂溶解速度等多种因素的影响。

a. 地层的富水性

地层的富水性反映含水层的出水能力，在同等地质条件下地层的富水性越强，地下水的渗透、径流速度越大，溶液扩散速度越快，淡化的速度也越快。

b. 地层的渗透率

地层的渗透率反映试验段含水层地下水流的速度，渗透率越大地下水径流速度越快，因此，渗透率越大盐化溶液扩散的速度越快，淡化速度越快，反之则相反。

c. 地层水的视电阻率

研究表明，地下水的视电阻率与地层水的矿化度呈双曲线负相关关系^[15-16](图 1)，因此，地下水的矿化度越高所需要投入的盐越多，淡化时间也越长。从图 1 不难看出当地下水矿化度超过 4 g/L 时，电阻率随矿化度变化不大，所以对高矿化度或超高矿化度地层进行盐化测井时，淡化所需的时间较长^[16]。因此，对于高矿化度含水层而言采取适当的注入法或者注入低矿化的水依靠高矿化度地层扩散产生盐化过程，效果更佳。

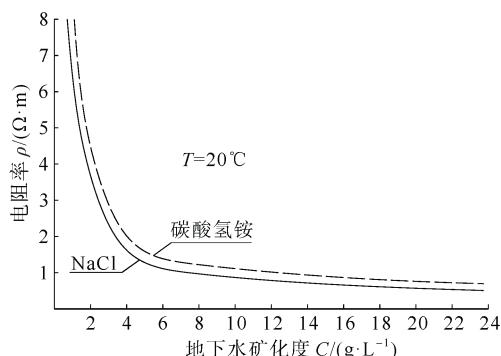
图1 电阻率与地下水矿化度之间的关系^[12]

Fig.1 Relationship between the resistivity and the salinity

d. 示踪剂的类型

目前，在水文测井中应用的示踪剂主要为粉末状盐类(NaCl、KCl等)、工业盐(块状海盐)以及碳酸氢铵(NH₄HCO₃)，其中前2种的应用范围最为广泛。

粉末状食盐适用于强-极强富水性含水层，由于其颗粒呈粉末状，在盐化时与水接触的表面积较大，因此，溶解的速度较快，可以在较短的时间内完成大量盐的投放溶解，同时由于快速大量的溶解可以使钻孔能溶解液体柱与地层地下水之间产生密度差，因此，产生浓度压力的扩散，盐分进入地层从而降低地层淡化的速度。当水量大、地下水水流速快、承压水头较高时，投入盐量一旦偏小就很难获得理想的曲线，导致盐化工作刚完成后，井液已经被快速地淡化，表现为第1条曲线与后续曲线幅度相差不大，出现第1条曲线就是最终曲线的现象。因此，投入大量的盐可以延缓淡化过程从而获得良好的含水层动力学特征曲线。而当地下含水层富水性弱、含水量较小、径流速度慢时，大盐量投入将延缓淡化并加剧地层的慢速渗透。

工业盐适用于富水性中等的含水层，钻孔较深时，由于颗粒较大时，颗粒表面积与水没有完全接触，因此，溶解速度较慢，可实现少量盐较深孔的均匀盐化。

碳酸氢铵适用于浅孔、富水性弱-极弱的含水层，由于碳酸氢铵溶解速度较快，且密度较小，对地层产生的浓度压力差较小，因此，在含水层中的侵入深度较小，颗粒重力沉降作用影响较小。此外，由于碳酸氢铵的溶解度与温度呈正相关性，随着地层深度的增加地温逐渐增加这种作用恰可抵消由于钻孔深度增加而引起的溶解量减小，有利于均匀盐化，提高盐化质量。因此，碳酸氢铵是浅孔、小水量扩散法测井的良好示踪剂。

e. 示踪剂的投放方式

目前示踪剂投放的方式主要分为2种。其中，

广泛应用的方式为在电缆上捆绑装有示踪剂的布袋，然后使电缆在井液中往复运动，使其均匀溶解。该方法具有溶解速度快的优点，但存在溶解速度难以控制，容易造成上部溶液浓度高下部低，不易均匀盐化的缺点。尤其是在地层富水性强、地下水径流速度快、承压含水层水头高的地区，往往在示踪剂还未进入含水层的盐化段时大部分的盐量已经被溶解掉了，造成顶底部浓度差较大，形成向下扩散的曲线产生纵向水流的假象。

另一种方式为采用盐化罐投放示踪剂，由于其在专用盐化管内进行装盐，在其到达盐化层位后打开盐化罐，接触面积小、盐化速度慢，地下水水流速对示踪剂的溶解速度影响较小。因此，可以通过控制电缆的下放和上提速度来控制示踪剂的溶解，使其更均匀地被盐化，而且可通过盐化罐上部连接的电阻率探管适时监测盐化后的井液电阻率变化，根据监测结果分析盐化是否均匀，适时控制盐化速度，从而实现试验段的均匀盐化。因此，该方法具有盐化均匀、实现适时控制、地下水的流速和水头高度等因素对其盐化效果影响较小的优点。其他方法大同小异在此不再赘述。

f. 投盐量的计算

示踪剂的投放量与盐化段的厚度、钻孔直径、地层水的电阻率等因素相关。研究表明^[16-17]，在溶液质量浓度小于2 g/L时，电阻率随着溶液浓度变化剧烈变化；在2~4 g/L间的变化相对较小；而当质量浓度大于4 g/L时，电阻率随着溶液质量浓度的变化基本保持不变(图1)。因此，当地层为高矿化度含水层富水性弱时，淡化效果不明显，只有水量特别大时，才需要大浓度盐化。所以，2 g/L可作为富水性弱含水层盐化的最佳溶液浓度。

$$m = \pi D^2 HC / 4 \times 10^6 \quad (1)$$

式中 m 为钻孔的最佳投盐量，kg； $D=2R$ 为钻孔的直径，m； H 为计划盐化段的长度(盐化段水柱高度)，m； C 为预计盐化后井液要达到的质量浓度，g/L。

富水性弱、低渗透的孔隙及裂隙型含水层可以直接利用式(1)进行计算，地下水的径流对钻孔盐化浓度的影响可以忽略；而对于裂隙型或岩溶型富水性强、涌水量大的含水层时，这种影响就不能忽略，需要对式(1)进行修正，修正后的投盐量计算公式为

$$m_{\text{amend}} = m + 2\pi R K M C t \quad (2)$$

式中 R 为钻孔的半径，m； K 为含水层的渗透系数，m/d； M 为含水层的厚度，m； t 为从盐化开始到盐化结束持续的时间，d； m_{amend} 为修改后的投盐量，kg。

2.4 最佳测量时间确定方法

在对含水层的水文地质参数有初步认识后，最佳的投药量是盐化测井能否成功的基础，但对测量时间的把握是能否获得理想测井曲线的关键技术。

2.4.1 模型的建立

根据钻孔扩散法水文测井的原理，将其简化为一个体积为 $V=\pi R^2 H$ 的开放系统内加入一定质量 m 的盐，瞬间达到完全溶解，在溶解过程中没有稀释或流出，溶解后溶液的质量浓度为 C ，在单位时间内一侧供给体积为 V_s 的清水溶液稀释溶液系统，另一侧排出体积为 V_e 的稀释后的溶液，同时假设清水进入系统后瞬间溶解，其稀释溶解时间忽略不计(图 2)。

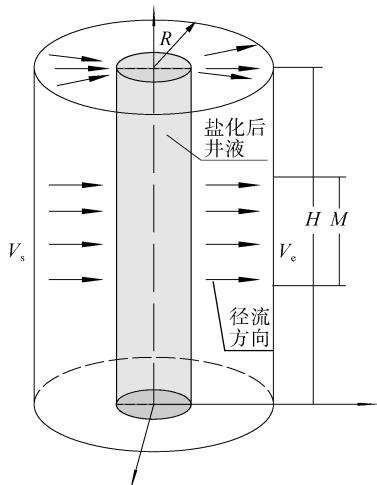


图 2 井液电阻率测井模型图

Fig.2 Model diagram of well fluid resistivity logging

2.4.2 最佳测量时间公式推导及计算

在此模型下，根据质量衡算定律，总物料衡算可以反映过程中各种物料之间的关系，当发生化学反应时物质既没有产生也没有消失。按照盐化测井的原理分析，该系统中物质的质量和浓度随着时间变化，因此，需要采用微分衡算式^[17]，通过在初始状态和最终状态下对溶解时间 t 进行积分。

因此，存在以下关系式：

$$C_1 \times V = C_2 \times V_2 = C_2(V_1 + V_s) \quad (3)$$

$$\text{系统内总的液体体积} : V = \pi R^2 H \quad (4)$$

$$V_e = V_s = 2\pi R K M C t \quad (5)$$

式中 C_1 、 C_2 分别为 t_1 、 t_2 时的井液质量浓度，g/L； V_s 为含水层补给水的体积， m^3 ； V_e 为含水层排出水的体积， m^3 。

令 $a=2\pi R K M C t$ ， $\ln C=A$ 根据溶解平衡原理^[17]，存在以下关系：

$$C \times V - a dt \times C = (C + dC) \times V \quad (6)$$

$$C(t) = A \times e^{(-a/V \times t)} \quad (7)$$

$t=0$ 时， $C=m/V$ ，则

$$C(t) = m/V \times e^{(-a/V \times t)} \quad (8)$$

$$t = \ln \frac{C(t)}{C} \times \frac{2KM}{RH} \quad (9)$$

式中 $\ln \frac{C(t)}{C}$ 的取值与测试次数相关，其中

$$\frac{C(t)}{C} = \frac{N-n}{N}, \quad N \text{ 为测试的次数}(5 \sim 8); n \text{ 为第 } n(1 \sim N) \text{ 条曲线}.$$

最终，通过建立井液电阻率值与井液质量浓度之间的 $f(\rho)=C(t)$ 关系式，计算最佳测量时间时对应的井液电阻率值。

$$\rho = k \frac{1}{C} \quad (10)$$

式中 k 为井液温度不变时的常数。

因此，通过建立的最佳测量时间计算模型和计算公式，首先根据施工区钻孔含水层抽水试验结果、富水性特征以及 ρ_0 和 ρ_1 曲线的测量结果综合选择合理的测量条数，之后根据确定的测量条数计算每一次测量的时间参数，按照计算的最佳测量参数进行现场测量施工，从而获取理想的测井曲线，进而为含水层划分、水质评价、含水层非均质评价以及矿井涌水量计算等提供可靠的测井资料。

3 工程应用实例

为了验证人工井液电阻率测井测量时间这一关键参数对测井曲线解释的影响，以鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田陕蒙接壤地区施工的水文钻孔为例，采用 3 种方法：第 1 种为根据模型计算的测量时间参数进行施工，第 2 种为经验丰富的测井技术人员根据自身实践经验进行施工，第 3 种为经验一般的测井技术人员根据自身实践经验进行施工。在采集设备、投盐量等施工条件相同的情况下对同一个水文钻孔的同一抽水试验时段先后各进行一次测井，测井结束后根据 3 次测井获取的成果曲线结合岩心描述、抽水试验结果共同进行综合解释。从解释结果对比不难看出(图 3)：第 1 种方法获得了 10 条曲线，有效曲线 10 条，解释了 4 层含水层和 4 层隔水层(图 3a)；该方法不仅可以清晰地反应顶部含水层横纵扩散的特征，而且可以识别中部薄层隔水层以及顶部含水层向上和向下补给的特征。第 2 种方法获得了 10 条曲线，有效曲线 10 条；解释了 3 层含水层和 3 层隔水层(图 3b)；由于错过了最佳测量时间，导致顶部薄层隔水层的解释漏失，将上部 2 个含水层 1 个隔水层解释为 1 个含水层，且顶部含水层的扩散类型及其补给关系反应不明显，仅能反应向下补给

关系。第3种方法获得了6条曲线，有效曲线5条；解释了2层含水层和2层隔水层(图3c)；由于 ρ_3 和 ρ_4 测井曲线施测时间间隔太长，在施测 ρ_4 曲线时井

液已被完全溶解稀释，后续曲线变化不大，导致遗漏上部和中部的隔水层，将中上部整体解释为一个厚层含水层，顶部向上补给关系不明显。

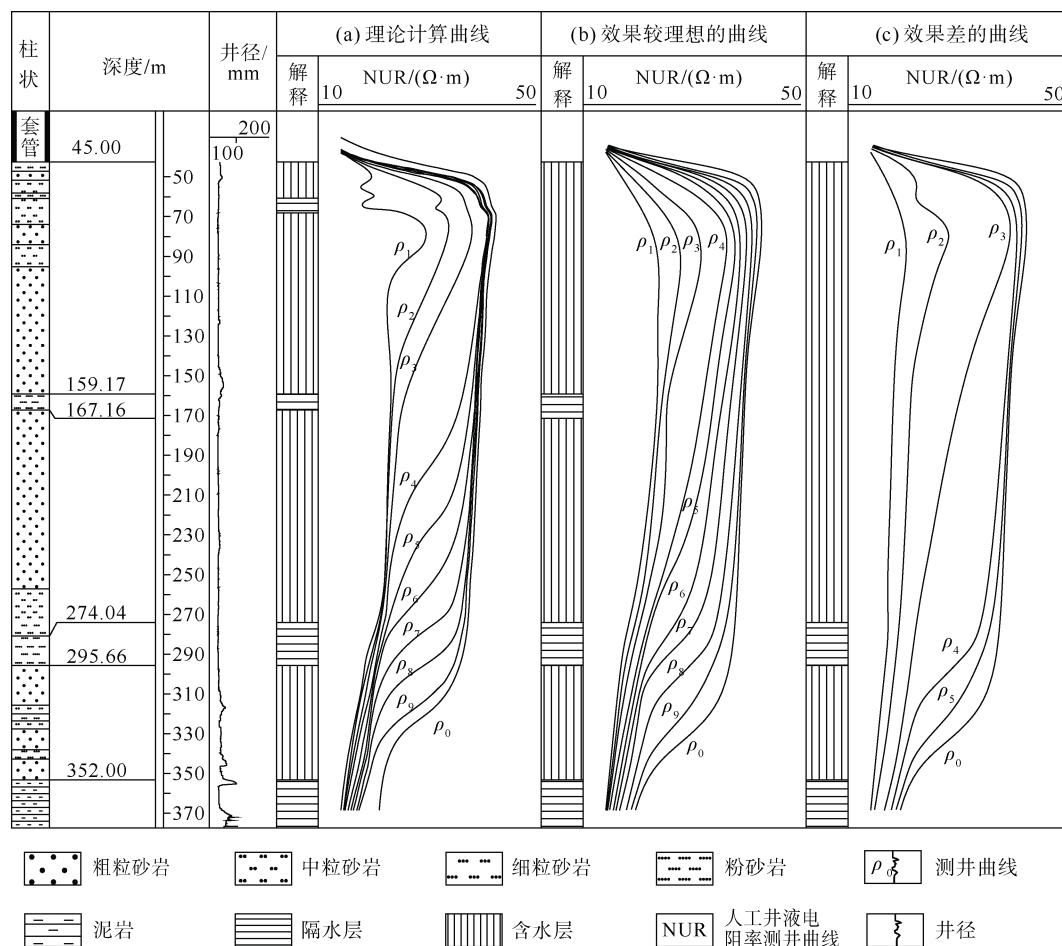


图3 人工井液电阻率测井曲线效果对比图
Fig.3 Comparison of log results of artificial well fluid resistivity method

4 结论

a. 影响井液电阻率测井因素很多，其中最佳投药量是盐化测井能否成功的基础，最佳测量时间的把握是获得高质量盐化测井曲线的关键。

b. 建立了人工井液电阻率测井最佳测量时间计算模型和计算公式，使施工经验变为理论计算公式，从而更好地指导现场测井工作，实现在最佳投药量和最短时间内获得最理想的测井曲线。

c. 通过应用计算公式可以获得井液电阻率在现场施工过程中测量时间这一关键参数，进而解决因经验不足而不能获得较理想的井液电阻率曲线的问题。

d. 通过实践工程验证，取得了理想的效果。但由于该模型的验证是在洛河组强富水性砂岩孔隙型含水层内进行的，对于中等或弱富水性的孔隙型砂

岩含水层或岩溶型、裂隙型含水层是否能够取得良好的效果，还需要在今后的工作过程中进一步验证，并逐步完善。

参考文献

- [1] 郭崇光, 李振拴, 赵莹, 等. 水文地球物理测井方法及应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2010.
- [2] 辛静. 扩散法水文测井在铁路隧道勘察中的应用[J]. 铁道勘察, 2017(5): 109–111.
XIN Jing. The application of diffusion hydrological logging in exploration of railway tunnel[J]. Railway Investigation and Surveying, 2017(5): 109–111.
- [3] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Petroleum Transactions, 1942, 146: 54–62.
- [4] 康跃明. 利用井液电阻率法测定含水层位置及涌水量[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(3): 74–76.

- KANG Yueming . Determination of aquifer location and water inflow in mine with drilling liquid resistivity[J]. Mining Safety & Environmental Protection , 2016 , 43(3) : 74–76.
- [5] 王春辉 , 查恩来 , 连晟. 水文电测井参数预测单井涌水量试验研究[J]. 工程勘察 , 2013(9) : 90–94 .
- WANG Chunhui , ZHA Enlai , LIAN Sheng. The experimental study of predicting specific capacity using hydrological electrical logging data[J]. Geotechnical Investigation & Surveying , 2013(9) : 90–94 .
- [6] 王海军. 人工井液电阻率法测井在煤田水文地质勘探中的应用[J]. 煤田地质与勘探 , 2017 , 45(5) : 115–120.
- WANG Haijun. Application of artificial drilling fluid resistivity well logging in hydrogeological exploration of coalfield[J]. Coal Geology & Exploration , 2017 , 45(5) : 115–120.
- [7] 陈荣武. 扩散法测井在地质勘探中的应用[J]. 陕西煤炭 , 2016(3) : 91–93.
- CHEN Rongwu. Application of diffusion logging method in geological exploration[J]. Shaanxi Coal , 2016(3) : 91–93.
- [8] 骆森 , 潘和平 , 黄东山. 地球物理测井在水文地质勘查中的应用综述[J]. 工程地球物理学报 , 2004 , 1(2) : 136–145.
- LUO Miao , PAN Heping , HUANG Dongshan. Overview of the application of geophysical well logging in hydrogeologic survey[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics , 2004 , 1(2) : 136–145.
- [9] 郭崇光. 利用自然井液电阻率法确定岩溶含水层[J]. 煤田地质与勘探 , 1996 , 24(2) : 47–50.
- GUO Chongguang. Ascertain karst aquifer by resistivity of natural drilling fluid[J]. Coal Geology & Exploration , 1996 , 24(2) : 47–50.
- [10] 郭崇光. 岩溶水勘察中测井资料的综合应用[J]. 华北地质矿产杂志 , 1994 , 9(3) : 317–322.
- GUO Chongguang. Comprehensive application of well logging data in karst water exploration[J]. Journal Geological & Mineral Resource North China , 1994 , 9(3) : 317–322 .
- [11] 赵发展 , 戚洪彬 , 王贊. 地层水矿化度检测的地球物理测井方法[J]. 地球物理学进展 , 2002 , 17(3) : 551–558.
- ZHAO Fazhan , QI Hongbin , WANG Yun. A geophysical logging method to detect the water mineralization intensity underground[J]. Progress in Geophysics , 2002 , 17(3) : 551–558.
- [12] 林满意 , 冯亿年 , 吴文君. 地下水矿化度与视电阻率关系模型的建立[J]. 人民黄河 , 2006 , 28(6) : 42–43.
- LIN Manyi , FENG Yinian , WU Wenjun. Establishment of groundwater mineralization and apparent resistivity relationship model[J]. Yellow River , 2006 , 28(6) : 42–43.
- [13] 王功军 , 黄文新 , 张超模. 硼中子测井解释方法研究[J]. 石油地球物理勘探 , 2010 , 45(增刊 1) : 210–213.
- WANG Gongjun , HUANG Wenxin , ZHANG Chaomo. Studies on boron neutron logging interpretation method[J]. Oil Geophysical Prospecting , 2010 , 45(S1) : 210–213.
- [14] 张雪芹 , 李孝胜 , 王青川 , 等. 注硼中子寿命测井综合解释技术研究与应用[J]. 测井技术 , 2007 , 31(2) : 178–182.
- ZHANG Xueqin , LI Xiaosheng , WANG Qingchuan , et al. Research and application of comprehensive interpretation technology for boron inject neutron lifetime logging[J]. Well Logging Technology , 2007 , 31(2) : 178–182.
- [15] 金虎杰 , 韩德万 , 王成贵. 液体电阻率与温度和浓度之间关系的测量[J]. 延边大学学报(自然科学版) , 2003 , 29(1) : 72–75.
- JIN Hujie , HAN Dewan , WANG Chenggui. Measurement of relations between liquid electric resistivity and its temperature and density[J]. Journal of Yanbian University(Natural Science) , 2003 , 29(1) : 72–75.
- [16] 邓少贵 , 范宜仁 , 段兆芳 , 等. 多温度多矿化度岩石电阻率实验研究[J]. 石油地球物理勘探 , 2000 , 35(6) : 763–767.
- DENG Shaogui , FAN Yiren , DUAN Zhaofang , et al. Experiment study of rock resistivity with multi temperature and multi salinity[J]. Oil Geophysical Prospecting , 2000 , 35(6) : 763–767.
- [17] 胡洪营 , 张旭 , 黄霞 , 等. 环境工程原理[M]. 北京 : 高等教育出版社 , 2015.

(责任编辑 聂爱兰)

(上接第 188 页)

- [23] 丁拼搏 , 狄帮让 , 魏建新 , 等. 不同尺度裂缝对弹性波速度和各向异性影响的实验研究[J]. 地球物理学报 , 2017 , 60(4) : 1538–1546.
- DING Pingbo , DI Bangrang , WEI Jianxin , et al. Velocity and anisotropy influenced by different scale fractures: Experiments on synthetic rocks with controlled fractures[J]. Chinese Journal of Geophysics , 2017 , 60(4) : 1538–1546.
- [24] 赵阳 , 周宏伟 , 钟江城 , 等. 黏土配比对人工砂岩渗透率影响规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2018 , 37(增刊 1) : 3253–3262.

- ZHAO Yang , ZHOU Hongwei , ZHONG Jiangcheng , et al. An experimental study on artificial sandstone-clay proportioning on permeation behavior[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2018 , 37(S1) : 3253–3262.
- [25] VINEGAR J , WAXMANM H. Induced polarization of shaly sands[J]. Geophysics , 1984 , 49(8) : 1267–1287.
- [26] REVIL A. Spectral induced polarization of shaly sands: Influence of the electrical double layer[J]. Water Resources Research , 2012 , 48 , W02517.

(责任编辑 聂爱兰 周建军)