地面核磁共振找水方法在花岗岩地区的应用

曹光奇[1,2],周仲华[2]
(1. 呼和浩特市 66259 部队,呼和浩特 010051;2. 兰州大学土木工程与力学学院,兰州 730000)

摘要:文章简要地阐述了地面 NMR 方法的直接找水原理、特点以及仪器组成、测量质量的控制。通过在花岗岩地区的找水实践,说明了该方法的可行性和优点,最后总结了影响 NMR 信号采集和 NMR 信号解释结果的因素及解决办法,并提出了几点建议及今后的研究方向。

关键词:地面核磁共振方法;直接找水;花岗岩地区;驰豫;孔隙度
中图分类号:P641.1;P631.3+21 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-3665(2006)02-0108-06

1 前言

核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance,NMR),是当今世界上的尖端技术,具有核磁元素多、选择性高、分辨率高及在一定条件下可提高灵敏度和进行动态观测等特点。自 1946 年被美国科学家 Bloth 和 Purcell 发现以来[1],在物理学、化学、地学、生物学、医学、环境科学、工农业以至考古学等许多领域获得了重要的应用。NMR 方法直接探测地下水是该技术应用的新领域,是一种新型的物探方法[2~4]。近年来我们在河北、内蒙古等地进行的大量水资源勘探实践表明,利用核磁共振地面找水设备,能取得显著的勘探效果和经济效益,特别是在以前很多利用常规物探方法没有找到可供开采水源的贫水区,利用核磁共振技术找到了可供开采和利用的地下水源,它克服了常规物探方法在找水过程中影响因素多、反演解译复杂、多解难辨、对地质资料依赖性强的弱点,具有广阔的开发和应用前景。本文着重阐述了地面核磁共振找水方法的基本思想和在测深找水中的应用效果。

2 地面核磁共振找水方法原理

地面核磁共振(SNMR)方法是目前唯一直接探测地下水的地球物理新方法。它利用了氢原子内的质子在一定的条件下可以产生核磁共振信号的特征,采集和分析 NMR 信号的变化规律以实现对地下水的直接探测。

收稿日期:2005-03-14;**修订日期**:2005-11-03
作者简介:曹光奇(1972-),男,硕士,工程师,从事地面物探,地质工程研究。
E-mail:qgc7211@sohu.com

2.1 核磁共振现象

核磁共振是一个基于原子核特性的物理现象[5~7],即具有核子顺磁性的物质可选择性地吸收电磁能量。由于氢原子内的质子(氢核)是具有核磁矩的旋转带电粒子,在通常情况下,质子磁矩方向与当地地磁场 B_0 一致,而且它们在稳定的地磁场作用下都将处在一定能级上,即处于自然平衡状态(图 1a)。当在外加具有拉摩尔频率 f_0 的电磁场 B_1 作用后,B_1 的垂直于地磁场 B_0 的分量将对质子产生扭力,氢核产生旋进运动,从而发生能级跃迁(图 1b)。当这种外加的电磁场 B_1 终止后,氢核在回复到它们原来位置的过程中产生可以被测量的 NMR 信号(图 1c)。测量并分

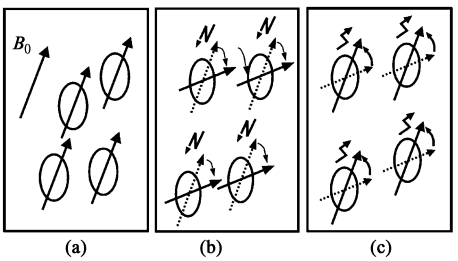


图 1 核磁共振产生的 3 个阶段示意图

Fig. 1 Sketch of three stages in NMR generating

(a)—平衡状态;(b)—吸收状态;(c)—释放状

析这个 NMR 信号可以获取与地下氢核含量相关的信息。其中,拉摩尔频率:

$$f_0 = \gamma B_0 / 2\pi \quad (1)$$

式中:B_0——稳定的地磁场;

γ——质子的磁旋比。

2.2 SNMR 找水方法原理概述

根据工区的水文地质条件和工区的电磁噪声干扰情况以及工作任务,选择天线形状等技术参数。SNMR

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

方法的测量是通过在地表敷设一个矩形或者圆形线圈(发射/接收天线),向线圈内供入交变电流脉冲[8]并形成激发磁场 B_1。

$$I(t) = I_0\cos(2\pi f_0 t) \tag{2}$$

式中 I_0 为交变电流脉冲的幅值。交变电流的包络线为矩形(图 2a),其频率为测点的拉摩尔频率(800～3000Hz),目前 SNMR 找水仪电流脉冲的持续时间通常为 40 ms。当切断线圈中的交变电流后,线圈中将测量到由地下质子弛豫产生的衰减的 NMR 信号 $e(t)$,NMR 信号包络线按照指数规律衰减(图 2b):

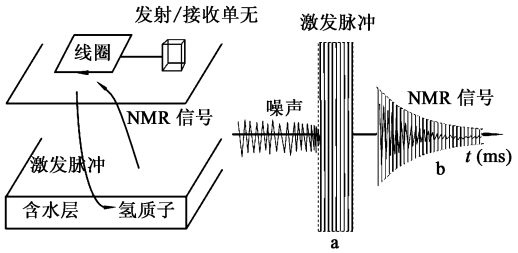


图 2　脉冲激发和 NMR 信号时序图

Fig. 2　Diagram showing the energizing pulses and timing diagram of NMR signal

(a) - 激发电流脉冲;(b) - NMR 信号

$$e(t) = 2\pi f_0 M_0 \int f(r)\, e^{-t/T_2^*} \cos[2\pi f_0 t + \varphi_0(r)] \cdot B_\perp(r)\sin(0.5\gamma B_\perp(r)\, q)\, dV \tag{3}$$

式中:M_0 ——氢核的核磁矩;

$f(r)$ ——地表以下 r 深处含水层的含水量;

T_2^* ——r 深处的质子的弛豫时间;

$B_\perp(r)$ ——激发电磁场 B_1 垂直于地磁场的分量;

$\varphi_0(r)$ ——激发电流和感应电流之间的相位;

q ——激发脉冲矩($q = I_0\tau$, I_0、τ 分别为交变(激发)电流脉冲的幅值和供电持续时间)。

(3)式通常被近似表示为:

$$e(t) = E_0 e^{-t/T_2^*}\cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \tag{4}$$

其中 E_0 是在 $t = 0$ 时刻线圈中 NMR 信号的初始振幅:

$$E_0 = 2\pi f_0 M_0 \int f(r)\, B_\perp(r)\sin(0.5\gamma B_\perp(r)\, q)\, dV \tag{5}$$

从(4)式可以看出,从接收线圈中测量到的 NMR 信号中包含了 3 个重要参数:E_0、T_2^*、φ_0。

NMR 信号初始振幅 E_0,从(5)式可以看出它与地下水的含量直接相关,E_0 值的大小与含水层的含水量成正比,随 q 值变化形成测深曲线,通常用 E_0-q 曲线表示。在一定条件下 q 值越大,则可以探测含水层的深度越大,因此,利用不同的激发脉冲矩可以探测不同深度的含水层,从而实现测深的目的。对该曲线原始资料进行解释后就可得到该测深点探测范围内的水文地质参数,包括含水层的深度、厚度和单位体积的含水量。

弛豫时间 T_2^*(平均衰减时间),为地下水核磁共振的横向弛豫时间,单位为毫秒(ms),它通常与含水层岩石的平均孔隙度相关,而孔隙度是岩层的一个重要特征参数,每个激发脉冲矩 q 均可以得到一条 E_0 随时间按指数规律衰减的 E_0-t 曲线,由此曲线可以求出该 q 值探测深度内含水层的 T_2^*,T_2^* 值的大小可反映含水层类型(平均孔隙度)的信息。国内外的研究统计规律表明,自由水和束缚水具有不同的 T_2^* 值,自由水的 T_2^* 变化范围在 30～1 000ms之间。而束缚水的 T_2^* 小于 30ms。由于 SNMR 找水仪的电流脉冲的间歇时间是 40ms,因此,SNMR 找水仪接收不到束缚水的 NMR 信号。

NMR 信号初始相位 φ_0,是天线中激发的电流与测量到的衰减电压之间的相位差。NMR 信号的初始相位反映地下岩石的导电性。它可以用于定量估计岩层的电导率。

核磁共振的机理表明,水中的氢核在孔隙中作横向弛豫运动时,会与孔隙壁产生碰撞作用。碰撞过程造成氢核的能量损失,使水中氢核从高能态回到低能态,即氢核的横向弛豫过程。碰撞越频繁,氢核的能量损失也越快,也就是加快了氢核的横向弛豫过程。很显然,孔隙的大小决定了氢核与孔隙壁碰撞过程的多少,孔隙越小,则氢核在做横向弛豫的过程中,与孔隙壁的碰撞机率越大。由此得出孔隙的大小与氢核的弛豫率成反比关系(即孔隙越小,氢核的横向弛豫率越高)。研究还表明:核磁共振资料的横向弛豫时间是岩石孔隙结构的一种反映,小孔隙使弛豫时间缩短,最短的弛豫时间对应于粘土束缚水和毛细管束缚水的弛豫特性;大孔隙使弛豫时间变长,对应于自由水的弛豫特性。因此,弛豫差异能反映岩石的孔隙度和透水性的差异。

从以上的阐述可以得出:水溶液中的氢质子和固相晶格中的氢质子对外加磁场的弛豫响应机理不同;用 SNMR 找水方法得到的含水量与传统的称重烘干所

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

得到的含水量不同,SNMR 法主要研究存在于地下含水层孔隙和裂隙中的自由水;SNMR 找水方法测量的参数有 E_0、T_2^*、ϕ_0。该方法能直接找水,主要是因为这些参数的变化能直接反映地下含水层的赋存状态和特征。

3 仪器设备和工作站的建立

本次野外工作利用了法国 IRIS 公司研制的地面核磁感应系统(Nuclear Magnetic Induction System,缩写为 NUMIS)。地面核磁共振 NUMIS 工作站包括:①发送机/接收机;②DC/DC 变换器;③天线电缆(300m 长);④汽车电瓶(12V ×2);⑤笔记本电脑;⑥质子磁力仪。

NUMIS 各部分连线如图 3 所示。

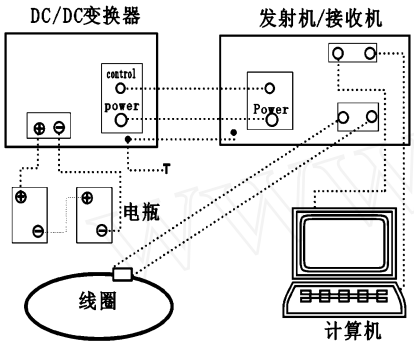


图 3 NMR 工作站仪器连线图

Fig. 3 Instrument on-line diagram of NMR working station

4 测量质量的控制

测量过程是否正常进行是通过以下参数监测的。

(1)放大因子 NUMIS 与线圈的形状、大小、大地电阻率和线圈的电感有关。NUMIS 系统规定,当放大因子大于 5 000 时,表明线圈连接正常。表 1 列举了几个 NMR 测深点上的阻抗和放大因子数值。由表 1 可见,NUMIS 系统的发射/接收线圈连接正常,NUMIS 系统工作状态正常。

表 1 几个 NMR 测深点的阻抗和放大因子

Table 1 Impedance and enlarge factors of NMR sounding points

点号	阻抗(Ω)	放大因子
HK1 - 2	11.477	155 48.2
HK1 - 3	11.267	12 560.8
HK3 - 1	11.881	16 927.0
HK3 - 4	11.755	12 555.3
HK4 - 2	11.461	15 758.0

(2)根据环境噪声和信号幅值确定接收 NMR 信号的叠加次数,提高了信噪比,保证了观测质量,使 NMR 信号按指数规律衰减。

(3)有地下水存在的各个 NMR 测深点上,接收到 NMR 信号频率相对激发脉冲频率变化大部分在 ±1 Hz,是在调谐频率之内进行工作的。

(4)工区范围不是很大,地磁场强度和倾角认为是不变化的。但是在地下存在火成岩体时,造成局部磁场的不均匀性。这是引起信号频率变化大于 1Hz 的原因之一,例如:HK3 - 1 点激发脉冲频率为 2 367.3Hz,当激发脉冲矩在 100～1 428A·ms 的 9 个脉冲矩时,接收到的 NMR 信号频率 f_0 = 2 377.3Hz。而在 1 871～7 842A·ms 的 7 个脉冲矩时的 f_0 = 2 383.3Hz,f_0 相对激发频率变化了 16Hz,即随深度增加地磁场强度增大 23nT/Hz ×16 = 368nT。

(5)相位变化规律与地下岩层导电性有关。用 ϕ_0 - q 曲线变化来分析岩石导电性变化。从 HK3 - 1 点的 NMR 信号的初始相位 ϕ_0 随脉冲矩 q 变化的 ϕ_0 - q 曲线(图 4)中可看出,在 1 871～7 482A·ms 的 7 个 q 值范围内,ϕ_0 明显变大,表明地下岩石导电性明显增强。

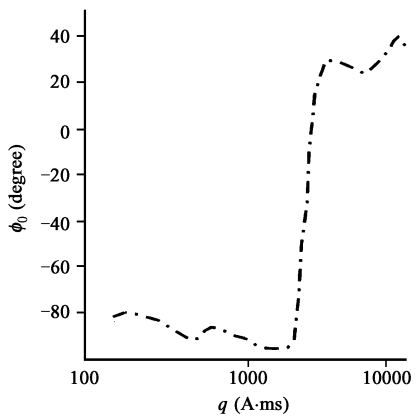


图 4 HK3 - 1 号测深点的 ϕ_0 - q 曲线

Fig. 4 ϕ_0 - q curve of sounding point of No. HK3 - 1

5 工区的主要地电特征

实测工区位于河北省花岗岩发育的康保地区(工区代号为 HK),早期的物探和钻孔揭露的数据表明,在风化花岗岩中夹有裂隙较发育的花岗岩碎石或胶结半胶结的砂砾石,构成层间含水层,地下水一般具有承压性,富水性差异较大,浅部电性不均匀。在电测深曲线上风化的花岗岩含水层与不含水的低阻层表现为同一电性层。并且出现低阻层屏蔽掩盖高阻层的现象。

区内第四系覆盖层视电阻率一般在 20～30Ω·m;

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

深部风化花岗岩的视电阻率在 40～90Ω·m,裂隙发育,在电阻率测深曲线上反映为高阻异常。

6　应用实例

(1) NMR 测深的数据采集　　工区地磁场强度为 55 300nT,倾角为 59.8°,激发频率 f_0 = 2 368～2 369Hz。进行 NMR 测深时,使用 75m ×75m 的大方天线,勘探可达 100m 左右,在 100m 深度内可做定量解释,提供含水层的深度、厚度、含水量和平均孔隙度的信息,100～130m 深度内可定性预示是否有含水层存在。

大部分测深点采用 16 个脉冲矩,个别测深点使用 20、15 个脉冲矩,大部分测点的脉冲矩最大值为7 700～8 300A·ms,个别点(HK3 - 4)因地表电阻率过低,使 q_{max} = 5 854A·ms。

在实测的 5 个 NMR 测点中,NMR 信号初始振幅 E_0 值范围是:4 个 NMR 测点的 E_0 > 10nV,在 17～164nV 之间变化,仅 1 个点的 E_0 变化范围是 9～100nV。即 80 %的测点的 NMR 信号 E_0 值均大于 NUMIS 系统的阈值,这样,实测的结果是可靠的。以上技术数据见表 2。

(2) NMR 信号解释结果　　利用 NUMIS 系统配备的一维解释软件,对采集的 NMR 信号进行定量解释。在野外进行数据采集时,每个 NMR 测深点将有两种文件被保存,一种文件保存从计算机输出的未加计算的原始数据,这些原始数据通常用专用软件来解释;另一种文件是合成文件(表 3),其记录的内容有天线类型,激发脉冲矩 q 的个数,q 值和每个 q 值的信号振幅值 E、平均衰减时间 T_2^*、噪声的平均值、DC/DC 变换器的电压值、测量到的信号频率 f_0 以及信号的初始相位 Φ_0。

表 2　测区 NMR 测深参数

Table 2　General chart of NMR sounding parameter in surveying area

NMR 测深点号	NMR 信号 f_0(Hz)	q 的个数	q_{max} (A·ms)	E_0 范围 (nV)	含水层定量解释结果				备注
					起(m)	止(m)	含水量(%)	T_2^*(ms)	
HK1 - 2	2 368.2	16	8 327	27～164	7.5	10.0	5.38	63.5	放大因子:15547.2 电抗:11.377Ω Δf < 1Hz 出水量 300m³/d
					13.4	17.9	6.59	267	
					17.9	23.9	6.17	128.3	
					31.9	42.5	4.16	175.7	
HK1 - 3	2 368	16	7 990	20～119	2.0	3.0	8.64	70.0	6 个 q 的 f_0 > 2Hz(深处)
					6.0	7.5	4.64	30.0	
					13.4	17.9	6.32	57.1	
					42.5	56.7	6.91	135.6	
HK3 - 1	2 367.4	16	7 771	17～40	1.0	2.0	1.29	50.7	
					3.0	4.0	2.82	70.5	
					5.0	6.0	3.34	30.0	
					7.5	10.0	3.83	69.6	
					31.9	42.5	4.01	120.4	
					42.5	56.7	4.92	316	
HK3 - 4	2 369.7	16	5 854	9～100	1.0	2.0	3.25	170.7	电压 361V 时电容器放电
					6.3	8.6	2.17	57.1	
					74.3	100	3.73	342.7	
HK4 - 2	2 369.7	16	7 784	27～116	1.0	2.0	1.33	139	出水量 400m³/d
					13.4	17.9	5.99	52.3	
					23.7	31.9	3.55	533.8	
					31.9	42.5	5.89	218.9	
					75.7	100	6.15	253.8	

对工区的 5 个 NMR 测深点均进行了反演解释,各测深点解释结果见表 2。由表 2 可见,在本工区,被 NMR 测深点查明的含水层有 5 个,分别位于 13.4～17.9m(HK1 - 2、HK1 - 3、HK4 - 2),17.9～23.9m(HK1 - 2),31.9～42.5m(HK1 - 2、HK3 - 1、HK4 - 2),42.5～56.7m(HK1-3、HK3-1),75.7～100m(HK3 - 4、HK4 - 2)。

(3) HK1 - 2 NMR 测深点解释结果与钻井资料对比　　以 HK1 - 2 测深点解释结果为例,与钻探结果进行对比。HK1 - 2 的原始技术参数见表 2 和表 3。而实测 NMR 信号初始振幅 E_0 随激发脉冲矩 q 的变化曲线(E_0 - q 曲线)和信号衰减曲线(E_0 - t 曲线)分别用图 5(a)、(b)所示。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 HK1 - 2 测深点 NUMIS 合成文件的描述

Table 3 Describing of synthetical document of No. HK1 - 2

天线类型:2			测量脉冲矩的个数:16			
q (A·ms)	E (nV)	T_2^* (ms)	噪声 (nV)	DC 电压 (V)	f_0 (Hz)	ϕ_0 (度)
0	0	0	0	0	0.00	0
76	27	1 000	1 473	6	2 368.10	- 40
102	34	164	294	7	2 368.10	- 33
210	60	171	1 267	10	2 369.00	2
273	75	163	1 392	12	2 368.80	1
399	79	317	221	16	2 368.80	6
564	118	221	329	21	2 369.00	9
767	130	230	416	27	2 368.80	7
1026	164	199	131	35	2 368.80	11
1388	151	259	273	46	2 368.60	10
1822	149	189	1 423	59	2 368.60	9
2369	111	198	1 256	76	2 368.60	12
3091	78	191	1 494	98	2 368.10	- 5
4027	54	298	296	127	2 368.10	- 11
5192	55	255	657	163	2 368.10	- 13
6710	54	244	772	211	2 368.10	- 13
8321	51	287	621	272	2 368.20	- 12

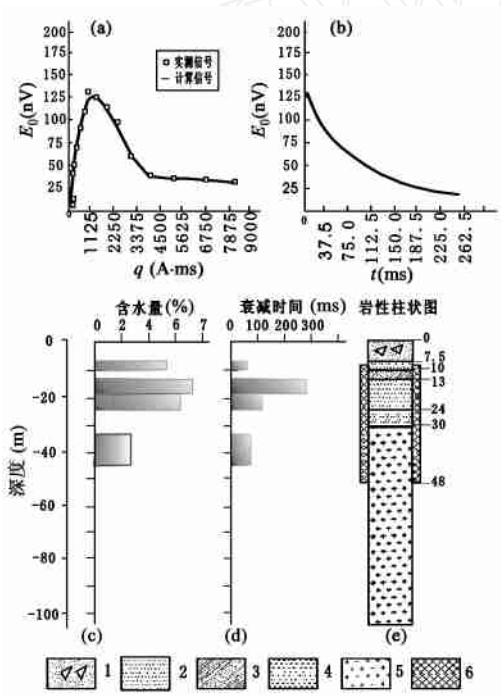


图 5 NMR 测深资料与钻孔资料对比图

Fig. 5 Comparison of NMR sounding data with drilling data

1 —亚粘土、亚粘土和碎石;2 —砂层;3 —粘质沙土;4 —粘土;5 —分化花岗岩;6 —下花管位置

在采集 NMR 信号时,使用大方天线(75m ×75m),激发脉冲矩的个数为 16 个,噪声水平小于1 500nV,记录长度为 240ms。由图 5(a)可见,实测信号(小方块)与理论计算信号(实线)拟合较好;由图 5(b)可见,E_0 - t 曲线呈指数规律衰减。图 5(c)、(d)为 NMR 测深反演解释结果,图 5(e)为根据 NMR 测深资料施钻的岩性柱状图。对比图 5(c)、(d)、(e)可见,NMR 测深解释资料与钻孔资料符合很好。该工区有 3 个含水层,分别位于 7.5～10m、13～24m、31～43m,其中第一含水层的 NMR 信号衰减时间 T_2^* = 64ms,与钻孔钻到的 2.5m 厚含水砂层相对应;第二含水层(层厚为 11m)的含水量为 6 %左右。该含水层上、下部的 NMR 信号的衰减时间分别为 267ms 和 128ms,说明上、下部岩石颗粒不同,上部颗粒较大,平均孔隙度较大,则 T_2^* 值也大。第二含水层与岩性柱状图的 11m 厚砂层相对应。第三含水层(层厚为 12m)的含水量为 4 %左右,T_2^* 值为 76ms,与风化花岗岩岩层相对应。

在 HK1 - 2 点附近的钻井工作是这样进行的:每隔 1m 提取一次岩样,根据电测井和岩样鉴定,编录制成岩性柱状图。根据 NMR 测深解释资料,成井采用一次性提吊法下入 8 英寸铸铁管 48.5m,其中 0～9m 为实管,9～48m 为花管,48～48.5m 为实管(见图 5e)。经抽水试验,出水量为 300m^3/d。该井水质良好,适于饮用。这是一个典型的火成岩 —风化花岗岩含水的实例,在火成岩地区找水是 SNMR 找水方法应用的进一步扩展,是当前 SNMR 方法找水应用研究的新课题。

7 核磁共振找水的特点

(1) NMR 找水仪的输出功率高,接收灵敏度高。

(2) 地面 NMR 找水方法是一种直接找水方法,它直接作用于水分子中的氢核,其信号强弱与地下水中氢核成正比。凡是含有自由水的地层,该方法都有明显的 NMR 信号反映,特别是在岩溶发育的石灰岩地区,风化的花岗岩地区,裂隙发育的玄武岩地区,当岩溶、裂隙被泥质充填或含水时,视电阻率均表现为低阻异常,是泥是水难以区分。利用常规电阻率法很难区分,而地面 NMR 法不受泥质充填物的干扰,能够准确地划分泥质充填物和含水构造。

(3) 和常规物探方法相比,地面 NMR 法反演解释结果具有量化的特点,不打钻孔就可以直接确定含水层的厚度、深度、单位体积含水量、含水层的平均孔隙度等参数。从而避免了探测、开发地下水资源的盲目性。

8 结论和建议

(1) 在河北康保地区进行的找水实践表明:在花岗

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

岩地区,将地面 NMR 法应用于测深找水是完全可行的。利用地面 NMR 找水方法,能够在含有花岗岩的复杂地层中,探测到 100m 以内的地下水。

(2) 了解和正确认识影响 NMR 信号反演解释的主要因素,是提高 NMR 找水方法资料解释水平的关键。在影响 NMR 信号解释结果的诸多因素中,应对以下几个方面给与注意:

确保 NMR 信号采集的质量:勘测过程中发现,地面 NMR 找水方法在数据采集时,脉冲矩的个数一定要经过优选,才能保证 NMR 信号采集乃至资料解释的可靠性。因为不同强度的脉冲矩探测不同深度的含水层,原则上是激发脉冲矩愈大,勘测深度亦愈大。但是,由于 NMR 测深是一种体积勘探,对深部的分辨力随深度加大而降低。

采取必要的技术措施,压制电磁干扰,提高信噪比:今后要加强对 NMR 找水仪抗电磁干扰能力的研究,原则上应从研究场的激发\接收方式入手,引进弱信号处理技术,提高信噪比。找水过程中发现,NMR 找水方法抗电磁干扰能力较低,有时会出现 NMR 测深解释结果与实际水文地质资料不一致的情况,出现 NMR 信号假异常,究其原因是低信噪比所致。

正确评估低阻层的影响:在有低阻良导层的地方,特别是含水层上方存在低阻层,使 NMR 信号衰减(良导体屏蔽效应),导致了 SNMR 找水方法的探测深度降低和垂向分辨率下降。

(3) 建立并形成综合物探方法找水的工作程序,是提高物探方法找水地质效果的基本保证。目前,在我国 NMR 法找水还处在研究和开发阶段,为了扬长避短,必须合理结合间接找水的其它地球物理方法,这样即可以扩大 SNMR 找水方法的应用领域,又可以提高物探方法找水的地质效果和找水资料的解释水平。

(4) 开发、研制新一代的地面 NMR 找水仪。新一代 SNMR 找水仪要加大勘探深度。

参考文献:

[1] 王金山. 核磁共振波谱仪与实验技术[M]. 北京:机械工业出版社,1982:1 - 108

[2] Yuling Pan, Bernard Jean. Surface nuclear magnetic induction system and its 'application in hydrogeological investigations[J]. Computerized Tomography Theory and Applications,2000, 9(2):37 - 43.

[3] 潘玉玲,张昌达. 地面核磁共振找水理论和方法[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2000:60 - 110

[4] Legchenko A,Valla P. A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements [J]. Journal of Applied Geophysics,2002,50(1):3 - 20.

[5] 毛希安. 核磁共振基础简论[M]. 北京:科学出版社,1996:38 - 44.

[6] 李国栋. 当代磁学[M]. 合肥:中国科学技术出版社,1999.

[7] 杨桂新,武毅,郭建强,等. 地面核磁共振技术勘查西北干旱浅层地下水效果浅析[J]. CT 理论与应用研究,2000,(增刊):53 - 55.

[8] 邓靖武,潘玉玲,熊玉珍,等. 探查地下水的新方法[J]. 现代地质,2004,1:121 - 122.

Application of the surface nuclear magnetic resonance method to detecting groundwater in granite regions

CAO Guang-qi[1,2], ZHOU Zhong-hua[2]

(1. *Unit* 66259, *Chinese PLA*, *Hohhot*, *Inner Mengolia* 010051, *China*;
2. *The College of Civil Engineering & Mechanics*, *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract: The paper mainly elaborates the principle and characteristics of directly detecting underground water with the Surface Nuclear Magnetic Resonance (SNMR) method, the apparatus, and the control of surveying quantity. On the basis of the pracice of exploring groundwater in granite regions, the feasibility of the method and its advantage are illuminated in this article. The factors of effecting NMR signal connection and NMR signal interpretation results are summarized. A few proposals and future research directions are also put forward.

Key words: SNMR method; direct detection of groundwater; granite region; longitudinal relaxation; porosity

编辑:汪美华 吴霞芬

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net