

# 核磁共振测深进行隧道超前地质预报的可行性

孙怀凤<sup>1</sup>, 李术才<sup>1</sup>, 李貅<sup>2</sup>, 戚志鹏<sup>2</sup>, 刘磊<sup>2</sup>, 薛翊国<sup>1</sup>, 苏茂鑫<sup>1</sup>, 刘斌<sup>1</sup>, 张文俊<sup>1</sup>  
(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 针对隧道掌子面前方含水构造有效探测问题, 提出了采用核磁共振测深技术进行隧道超前地质预报。以均匀全空间模型为基础, 计算了均匀导电全空间中回线源形成的谐变电磁场, 模拟了核磁共振超前探测时的扳倒角分布。结果显示隧道核磁共振超前探测时含水体能产生明显核磁共振响应, 但信号较弱。针对地下探测空间的特殊性, 提出了以阶跃波代替现有余弦波激发源、以磁探头代替线圈作为接收装置进行改进的建议。核磁共振测深直接找水有望成为一种非常有潜力的探测掌子面前方水体并区分水与泥的有效方法。

**关键词:** 隧道超前地质预报; 核磁共振测深; 扳倒角; 直接找水; 可行性

**中图分类号:** P631.3<sup>+</sup>25 **文献标志码:** A

## Feasibility of using magnetic resonance sounding in prediction of water bearing structures in front of a tunnel face

SUN Huai-feng<sup>1</sup>, LI Shu-cai<sup>1</sup>, LI Xiu<sup>2</sup>, QI Zhi-peng<sup>2</sup>, LIU Lei<sup>2</sup>,  
XUE Yi-guo<sup>1</sup>, SU Mao-xin<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>1</sup>, ZHANG Wen-jun<sup>1</sup>

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China;  
2. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The use of magnetic resonance sounding in prediction of water bearing structures in front of a tunnel face was proposed in order to realize the effective detection of water in front of a tunnel face. A homogeneous conductive full space was used as the basic model. The distribution of harmonic electromagnetic response was calculated. Distribution of the magnetic resonance toppled angles in magnetic resonance sounding (MRS) detection on tunnel face was also simulated. The modeling result showed the obvious MRS response from the water in front of a tunnel face, while the amplitude was very small. According to the characteristics of MRS detection in tunnels, it was proposed that the currently cosine excitation source could be replaced with step source and the current receiver coil could be replaced with magnetic probe. MRS is a potential method to detect water and distinguish water and mud.

**Key words:** tunnel advanced geology prediction; magnetic resonance sounding (MRS); magnetic resonance toppled angle; direct detection of water bodies; feasibility

## 0 引言

随着国家经济建设的发展,我国在公路、铁路、水电等领域正在修建并计划修建越来越多的深埋长

大隧道。由于我国地质条件复杂,在山区尤其是岩溶地区修建隧道的过程中可能遇到突水、突泥等地质灾害,严重威胁着施工人员的人身生命安全,也对隧道的稳定性构成极大威胁。因此,超前地质预报越来越受到重视<sup>[1]</sup>。近年来,地球物理探测方法在

收稿日期: 2012-09-01 网络出版时间: 2013-01-18 15: 44

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/37.1391.T.20130118.1544.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51139004); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(40902084, 50908134, 41102183); 国家重大科学仪器开发专项资助项目(2011YQ030133); 山东大学优秀研究生科研创新基金资助项目(YYX10014)

作者简介: 孙怀凤(1982 - ) 男, 山东邹平人, 博士研究生, 主要研究方向为电磁探测基本理论及应用。E-mail: sunhuai Feng@gmail.com

隧道超前地质预报中得到了广泛的应用和发展<sup>[2]</sup>。隧道地震波超前探测、隧道直流电法超前探测、地质雷达超前地质预报以及近年发展起来的隧道激发极化法和瞬变电磁法超前地质预报等技术<sup>[3-4]</sup>均得到了应用和发展。Andisheh A 等采用地震波方法进行隧道超前探测的研究<sup>[5]</sup>,用于定位断层等地质构造。然而,地震波探测主要用于寻找掌子面前方的断层等构造,其对于水体探测存在一定难度。其余的几种探测方法都可以在不同程度上寻找含水构造,许多学者进行了多种新的探索与尝试来提高超前探测的精度与准确性。例如,改进的S反演技术用于隧道瞬变电磁超前预报<sup>[6]</sup>,二电流激发极化半衰时之差法对隧道含水量预报的新探索<sup>[7]</sup>,隧道瞬变电磁超前探测的多分量<sup>[8]</sup>多点阵列式探测方法<sup>[9]</sup>。上述探测含水构造的方法均是基于电阻率差异、介电常数差异、电化学特性等地球物理特征实现超前探测的。这些方法均是采用间接的方法寻找低电阻率目标体来实现含水构造的探测。

目前,国际上发展的一种直接探测地下水的核磁共振测深(magnetic resonance sounding, MRS)技术<sup>[10-11]</sup>,与常规的地球物理间接探测水体的方法相比,该方法能够直接寻找含水层,并且可以获得地下水层的深度、储水量和储水层的孔隙度等水文地质信息<sup>[12-13]</sup>。早在1962年,Varian就提出核磁共振探测地下水的设想并申请了专利。之后,前苏联、法国、德国等也进行了该技术的研发。形成了较为完善的数据采集、解释方法。法国还推出了核磁共振探水的商业产品NUMIS。在我国,张昌达等最早进行了相关的试验研究,后来潘玉玲、李振宇、林君、翁爱华等进行了较多的研究<sup>[12,14-17]</sup>,目前该方法已经应用于地面水资源探测中<sup>[18]</sup>。林君等还推出了国内第一套核磁共振探水系统JLMRS<sup>[15]</sup>。本研究根据隧道内的特殊环境与需求,对应用核磁共振测深进行超前地质预报的可行性进行了探讨。

## 1 隧道核磁共振方法基础

### 1.1 核磁共振测深找水原理

核磁共振测深是利用水中氢质子弛豫特性差异所产生的核磁共振现象来实现水体定位与水量识别的。目前关于核磁共振原理解释主要有能级跃迁的观点和核磁感应的观点<sup>[19]</sup>。能得跃迁的观点认为水中的氢核是磁偶极子,在地磁场作用下以地磁场方向为轴转动时处于稳态能级,称为低能态。根据量子力学的理论,外加适当的磁场,核自旋系统将

发生共振吸收现象,处于低能态的核磁矩将通过吸收外加磁场提供的能量,跃迁到高能态。当外加磁场撤去后,核自旋便会从高能级的非平衡状态恢复到低能级的平衡状态,从而观测到核磁共振信号。核磁感应的观点沿用了经典电磁学中的法拉第电磁感应定律,认为磁化强度本质上是宏观磁矩,它在线圈中有自身的磁通量,当磁化强度绕磁场旋进时,线圈中的磁通量就要发生周期性的变化,因而可以记录到磁共振信号<sup>[15]</sup>。

由于能级跃迁的观点对于有光学中能量吸收知识的人来说能够很容易理解,较容易接受,因而被广泛用作核磁共振测深基本原理的解释中。而核磁感应的观点则需要较高的电磁场理论知识,不容易被理解。两种不同的观点都能合理地解释某一客观现象。就理论本身而言,本研究更倾向核磁感应的观点。

地面核磁共振测深找水通常在地面铺设一圆形回线,在线圈中供入频率为拉莫尔频率的正弦或余弦电流作为激励源。在回线形成的外加磁场和地磁场的共同作用下,水中的氢核产生能级跃迁。当切断发射电流后,采用同一回线接收核磁共振信号。通过改变激发脉冲矩实现测深。核磁共振信号呈指数衰减,其幅值与探测目标区域内自由水的含量存在一定关系。

### 1.2 均匀全空间中回线源形成的谐变场

以均匀导电媒质近似隧道模型,按照均匀导电全空间假设计算回线源形成的谐变电磁场。以圆回线中心为坐标原点建立如图1所示的柱坐标系。均匀导电媒质中回线源形成的谐变电磁场满足亥姆霍兹方程<sup>[20]</sup>:

$$\nabla^2 F - k^2 F = 0, \quad (1)$$

其中, $F$ 为引入的辅助标量赫兹位, $k$ 为均匀导电空间的波数。

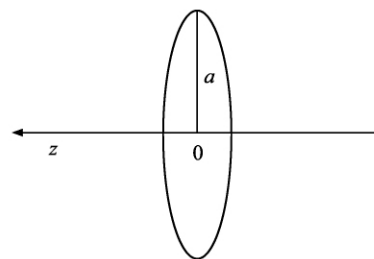


图1 均匀导电全空间中的圆回线源模型  
Fig. 1 Circle loop source model in homogeneous conductive full space

将方程(1)改写为柱坐标的形式:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} - k^2 F = 0, \quad (2)$$

其中, $r, z$ 分别为柱坐标的变量。

应用分离变量法解方程(2),并应用无穷远边界条件可以得到赫兹位  $F$  的通解:

$$F(r, z) = \frac{I_0 a \cos(\omega t)}{2} \int_0^\infty b \frac{J_1(\lambda a)}{\lambda} J_0(\lambda r) e^{-u_1 |z|} d\lambda, \quad (3)$$

其中  $a$  为圆回线的半径  $I_0$  为线圈的发射电流  $b$  为待定系数。 $J_0$  和  $J_1$  分别表示0阶和1阶的第一类贝塞尔函数  $\omega$  为频率  $t$  为时间。

对方程(3)求偏导可以得到磁场的2个分量:

$$H_r = \frac{I_0 a \cos(\omega t)}{2} \int_0^\infty -u_1 J_1(\lambda a) J_0(\lambda r) e^{-u_1 |z|} d\lambda; \quad (4)$$

$$H_z = \frac{I_0 a \cos(\omega t)}{2} \int_0^\infty b \lambda J_1(\lambda a) J_0(\lambda r) e^{-u_1 |z|} d\lambda. \quad (5)$$

为了求得系数  $b$ ,对模型应用毕奥-萨伐尔定律<sup>[21]</sup> 载流圆线圈中心产生的磁场强度为

$$H_1 = \frac{I_0}{2a}. \quad (6)$$

真空中线圈中心点的垂直磁场强度为

$$H_2 = \frac{I_0 a}{2} \int_0^\infty b \lambda J_1(\lambda a) d\lambda. \quad (7)$$

由于  $H_1 = H_2$ ,并考虑如下的特殊积分:

$$\int_0^\infty \lambda J_1(\lambda a) d\lambda = \frac{1}{a^2}, \quad (8)$$

得  $b = 1$ 。

以线圈半径  $a = 3 \text{ m}$ , 电流  $I = 1 \text{ A}$  持续供电时间为  $1000 \text{ ms}$ , 拉莫尔频率  $f = 2350 \text{ Hz}$  为参数求解了方程(4)和方程(5)均匀导电全空间中回线源形成的谐变电磁场分布如图2所示。从图2中可以看出,磁场强的区域主要集中在导线附近,并且具有对称性。 $H_z$  和  $H_r$  的虚部数值( $10^{-6}$ 量级)较实部小的多,虚部对磁场强度的模几乎没有影响,因而本研究只计算了磁场的实部。

### 1.3 隧道核磁共振测深找水数值模拟

地磁场随空间和时间的变化而变化,时间变化的影响对小区域短时间的探测是没有影响的。地磁场强度一般随纬度的改变而变化,我国的地磁场强度一般在  $40000 \text{ nT}$  到  $59000 \text{ nT}$  之间<sup>[15]</sup>。实际进行核磁共振探测时需要使用磁力仪进行现场测量。如图3所示  $B_d$  为地磁场方向,人工激发的磁场与地磁场垂直的分量  $B_v$  对扳倒角产生贡献,与地磁场平行的分量对扳倒角没有贡献,在激发源的作用下,氢质子的核磁化强度偏离地磁场的角度  $\theta$  为扳倒角。扳倒角是进行核磁共振测深计算的重要参数之一,它反映了激发源对水中氢质子的作用,激发源能量大

时产生的扳倒角大,观测到的核磁共振响应也就大。

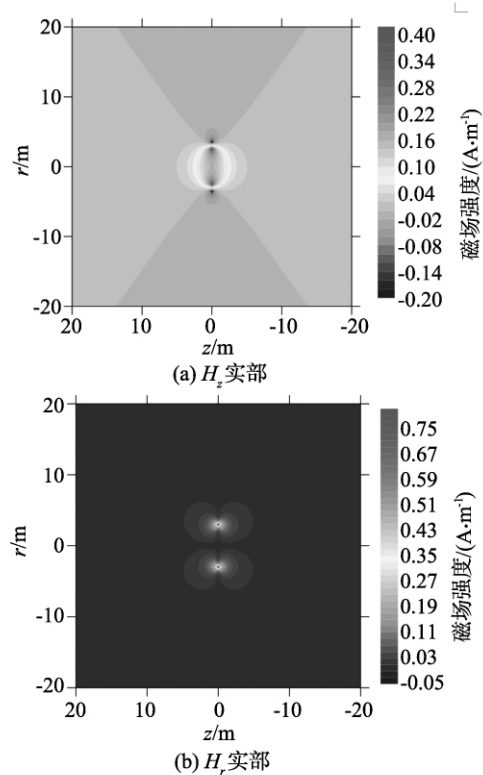


图2 均匀全空间中回线源形成的谐变场空间分布  
Fig. 2 Distribution of the magnetic fields in the homogeneous conductive full space induced by a circle loop

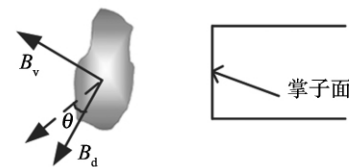


图3 扳倒角计算示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of the magnetic resonance toppled angle

以我国四川省中部地区的地磁场参数为例进行隧道核磁共振测深的数值模拟,地磁场强度  $B_d = 50000 \text{ nT}$ , 地磁倾角  $\theta = 60^\circ$ , 计算均匀导电全空间中的扳倒角如图4所示。从图4中可以看出扳倒角是不对称的,这主要是由于地磁场存在一定倾角的缘故。在本研究给出的计算参数下,仅在线圈附近能够形成有效的扳倒角,线圈前方  $2 \text{ m}$  以外的区域形成的扳倒角非常小(接近  $0^\circ$ )。

以线圈正前方  $2 \text{ m}$  和  $10 \text{ m}$  存在含水率为  $80\%$  的含水层为模型分别计算了核磁共振响应的  $E_0 - q$  曲线,如图5所示,图5(a)是含水层在线圈正前方  $2 \text{ m}$  时的核磁共振初始振幅随不同脉冲距的曲线,图5(b)是水体在线圈正前方  $10 \text{ m}$  时的曲线。可以看到在给定较大的脉冲矩下,得到的核磁共振响应初始振幅仍然较小,水体位于  $2 \text{ m}$  时最大脉冲矩是  $\text{nV}$  级别,而水体位于线圈正前方  $10 \text{ m}$  时最大振幅

均小于 1 nV, 这主要是由于线圈发送能量较小, 对含水区域产生的扳倒角较小的缘故。地面核磁共振测深采用大线圈时的初始振幅一般能够达到几百到几千 nV<sup>[15]</sup>。本研究试图继续增大含水水体与线圈之间的距离进行较大距离的探测尝试, 但初始振幅值均太小, 得到的核磁共振响应初始振幅已经无法采用仪器进行分辨。对于 nV 级别更小的信号, 基本上会被淹没在干扰噪声中。当信号比噪声小很多时, 提取有用信号将会变得非常困难。

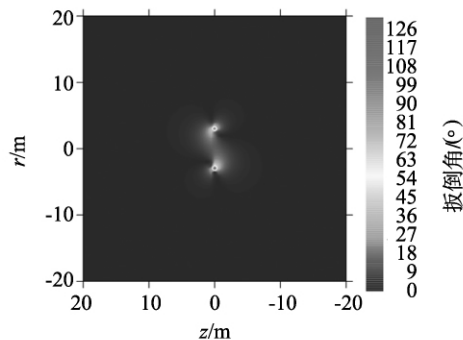


图 4 均匀导电全空间扳倒角分布

Fig. 4 Distribution of the magnetic resonance toppled angle in homogeneous conductive full space

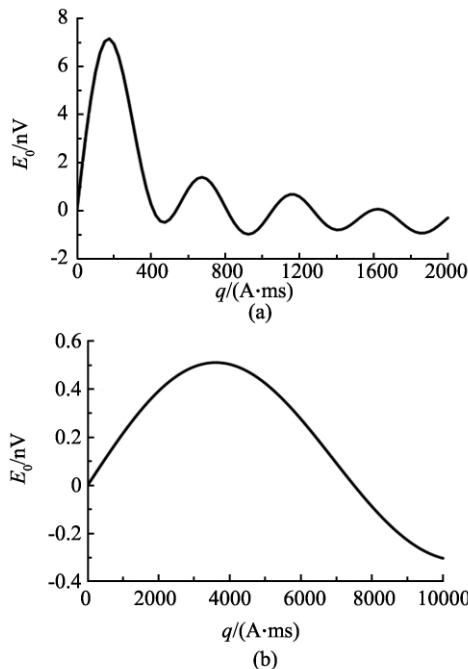


图 5 单层含水的核磁共振响应曲线

Fig. 5 MRS response curve of single aquifer layer

数值算例显示, 隧道核磁共振超前探测能够产生核磁共振响应, 因此可以将核磁共振测深引入到隧道超前地质预报中。但是, 模拟产生的核磁共振响应信号较弱, 尤其是含水水体与掌子面距离较大时模拟的核磁共振响应信号为 nV 级别。隧道内的核磁共振测深不能照搬地面核磁共振找水的理论与观测装置, 必须对现有工作方式改进, 主要是提高发

射能量, 增大有效扳倒角, 提高接收信号的数量级, 才有可能实现核磁共振隧道超前地质预报。

## 2 隧道核磁共振测深找水方案

借鉴地面核磁共振找水的工作方式与装置型式, 并考虑到隧道腔体为无耗的高电阻率(电导率为 0), 电磁波在腔体内不会形成涡流, 而且无损耗。采用与地面类似的方法分析和改进。

### 2.1 工作方式

与瞬变电磁隧道超前地质预报的工作方式类似, 核磁共振测深进行隧道超前探测时在掌子面铺设一圆形回线作为发射和接收天线(见图 6), 在天线中供拉莫尔频率的余弦电流, 供电关断后使用同一回线接收核磁共振响应的自由衰减信号(free induction decay, FID), 通过改变电流的供电时间来进行多次测量实现核磁共振测深。

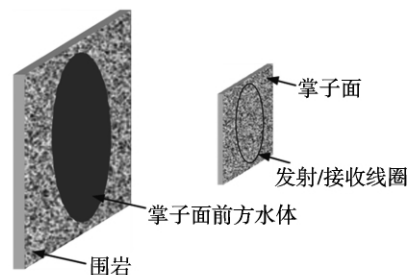


图 6 隧道核磁共振测深示意图

Fig. 6 Schematic diagram of MRS detection in tunnels

### 2.2 技术改进

针对隧道的特殊性, 对现有的地面核磁共振测深工作方法进行了技术改进。

#### 2.2.1 激发源的改进

由麦克斯韦方程组可知, 以方波代替余弦波作为激励源能够提高发射天线的辐射能量。同时, 参照隧道瞬变电磁超前探测的应用经验, 以多匝回线代替单匝回线作为发射天线, 能够提高发送磁矩。通过两种措施提高激发源的发送能量, 能够增大产生的扳倒角, 进而提高核磁共振响应。

#### 2.2.2 接收装置的改进

采用同一线圈进行发射和接收在理论计算上比较方便, 然而在实际操作中却存在许多问题, 例如, 作为发射线圈时, 为了获得较大的发射电流, 要求线圈的阻抗较低, 而作为接收线圈时, 为了提高信噪比, 要求线圈的阻抗较高。虽然目前有研究已经采用分离回线进行探测, 但隧道内的干扰如金属等较多, 其对回线接收的影响仍然较大。同样参照隧道瞬变电磁超前探测, 采用磁探头接收能够实现较大的接

收面积,提高信噪比,并且容易进行后向屏蔽。目前,关于高温超导磁探头的应用已经有报道<sup>[22]</sup>,超导磁探头对弱信号具有较高的分辨能力,如果超导磁探头能够应用到核磁共振测深中用作接收装置,对于提高核磁共振响应的分辨率与弱信号的观测将会非常有利。

### 3 研究展望

#### 3.1 建立更贴近隧道实际的计算模型

以均匀导电全空间模型为基础对隧道核磁共振测深直接找水进行数值模拟。忽略隧道腔体的均匀全空间模型进行隧道核磁共振直接找水的计算还存在许多问题。隧道腔体属于高电阻部分,对空间中形成的谐变电磁场存在一定的影响。实际进行探测的磁场分布应当与计算的结果存在差异。然而,作为初步的研究与可行性分析,本研究的模型仍然具有一定的意义。

应当尽快完善纯隧道腔体异常影响下的核磁共振响应磁场分布理论模型。本研究正尝试采用以柱坐标下均匀全空间中圆环线源正前方存在无限长高阻圆柱体的模型进行德拜位或矢量赫兹位表示的基本理论模型的建立与尝试。同时也可以尝试采用三维模型并考虑隧道腔体,对三维隧道进行建模,计算核磁共振隧道超前探测的磁场与扳倒角分布。

目前地面核磁共振测深找水中主要应用的是均匀半空间模型和层状模型,部分学者研究了准三维目标体的探测与数值模型<sup>[23]</sup>,而真正的复杂三维模型的核磁共振响应还较难实现。对于隧道更为复杂的情况,如何进行隧道复杂三维地质模型的核磁共振响应计算与分析还需要进行更加深入的研究。

同时,隧道内的干扰因素较地面更多,隧道内的钢拱架、钢筋网以及开挖的隧道腔体都会对激发源的磁场分布产生较大的影响。要分析复杂模型的核磁共振响应必须考虑这些干扰因素。分析这些干扰的影响对探测结果的解释非常重要。同时,需要通过干扰的响应特征研究不同干扰的识别与剔除技术。

#### 3.2 发展适合隧道探测核磁共振响应的数据解释

目前的研究主要采用一维的方法来进行核磁共振响应的解释来确定含水量,二维、三维的解释方法还在研究之中<sup>[24-25]</sup>。除了传统的地球物理反演方法外,核磁共振测深响应的正演约束了反演的发展。而对于隧道内的特殊情况,环境更加复杂,模型也更复杂,有效地解决其响应计算与结果解释仍是需要进行深入研究的课题。同时,与地面半空间的解决方法

不同,部分等效的、近似的解释方法还无法应用于隧道核磁共振探测中来,研究适合隧道核磁共振探测的解释技术是应用该方法的前提。

#### 3.3 解决隧道核磁共振测深的探测深度问题

目前地面探测采用50~100m的发射/接收线圈并采用大电流(50~100A)发射最大探测深度只有100~150m左右。报道称俄罗斯的MRS探测最大达到200m<sup>[15]</sup>。进行隧道超前探测时,掌子面空间狭小,无法布置大环线,直接影响发射磁矩。从数值模拟的结果也可以看到激发的磁场强度较小。虽然可以通过前述的增加线圈匝数、优化发射电流波形和增大发送电流的方法来增大发送磁矩,然而,线圈匝数与发送电流存在一定的矛盾,发送电流较大时,多匝线圈的互感将会变的非常大,对发送和接收产生较大的影响。进行隧道超前探测时,必须通过理论计算和模型试验,对发送天线进行整体优化,选择合适线圈尺寸、匝数与发送电流,以达到最优的探测深度。

### 4 结论

(1) 隧道核磁共振测深能够产生核磁共振响应,证明进行隧道核磁共振测深超前地质预报是可行的。然而,由于得到的响应较弱,地面核磁共振的方法不能照搬直接应用到隧道超前探测中来。需要对隧道内的核磁共振探测发射、接收系统等问题进行进一步研究,提高探测深度,应用该方法才有意义。

(2) 需要建立一种符合隧道实际情况的模型来模拟隧道内的核磁共振测深过程。可以尝试柱坐标下均匀全空间中圆环线正前方存在无限长高阻圆柱体的模型进行基本模型建立与尝试,但采用德拜位或矢量赫兹位进行解析求解的过程仍然非常困难。同样也可以尝试采用三维模型并考虑隧道腔体,对三维隧道进行建模,计算核磁共振隧道超前探测的磁场与扳倒角分布,并计算和分析隧道内电磁干扰源的响应特征。

(3) 与地面核磁共振测深不同,在隧道内探测时存在更多的电磁干扰源。如何提高核磁共振发射能量与接收信号强度或者从低信噪比的信号中对核磁共振响应信号进行提取和分离也限制着该方法在隧道超前探测中的应用。

(4) 现有的地面核磁共振响应解释方法对隧道超前探测成果解释具有指导作用,但由于模型的复杂性无法直接套用到隧道超前探测中。要应用该方法进行隧道超前探测,必须研究适合的解释技术。

(5) 核磁共振测深找水是一种直接寻找水体的方法。该方法可以区分含水水体是否充泥,可以计算含水量,是一种非常有潜力的寻找地下水的地球物理探测方法。通过对核磁共振原理的进一步认识和核磁共振测深理论的分析与试验研究,可以推动该方法的发展,但应用该方法进行隧道含水体的直接探查还需要进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] 李术才,薛翊国,张庆松,等. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(07): 1297-1307.  
LI Shucai, XUE Yiguo, ZHANG Qingsong, et al. Key technology study on comprehensive prediction and early-warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(07): 1297-1307.
- [2] 薛翊国,李术才,苏茂鑫,等. 青岛胶州湾海底隧道含水断层综合超前预报实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2081-2087.  
XUE Yiguo, LI Shucai, SU Maoxin, et al. Practice of comprehensive early-warning geological prediction on aquifer fault in qingdao kiaochoh bay subsea tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2081-2087.
- [3] 李貅,戚志鹏,薛国强,等. 瞬变电磁虚拟波场的三维曲面延拓成像[J]. 地球物理学报, 2010, 53(12): 3005-3011.  
LI Xiu, QI Zhipeng, XUE Guoqiang, et al. Three dimensional curved surface continuation image based on TEM pseudo wave-field [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(12): 3005-3011.
- [4] 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]. 济南: 山东大学, 2010.  
LIU Bin. Study on the water-bearing structure advanced detection and water inrush hazards real-time monitoring in tunnel based on the electrical resistivity method and induced polarization method [D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [5] ANDISHEH Alimoradi, ALI Moradzadeh, REZA Naderi, et al. Prediction of geological hazardous zones in front of a tunnel face using TSP-203 and artificial neural networks [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(6): 711-717.
- [6] XUE G Q, YAN Y J, LI X, et al. Transient electromagnetic S-inversion in tunnel prediction [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(18): 403. DOI: 10.1029/2007GL031080
- [7] 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): 1297-1309.  
LI Shucai, LIU Bin, LI Shuchen, et al. Study of advanced detection for tunnel water-bearing geological structures with induced polarization method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1297-1309.
- [8] SUN Huaifeng, LI Xiu, LI Shucai, et al. Multi-component and multi-array TEM detection in karst tunnels [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2012, 9(4): 359-373.
- [9] 孙怀凤,李术才,李貅,等. 隧道瞬变电磁多点阵列式探测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2225-2233.  
SUN Huaifeng, LI Shucai, LI Xiu, et al. Research on transient electromagnetic multipoint array detection method in tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2225-2233.
- [10] ELLIOT Grunewald, ROSEMARY Knight. A laboratory study of NMR relaxation times in unconsolidated heterogeneous sediments [J]. Geophysics, 2011, 76(4): 73-83.
- [11] TRACI Bryar, ROSEMARY Knight. Laboratory studies of the effect of sorbed oil on proton nuclear magnetic resonance [J]. Geophysics, 2003, 68(3): 942-948.
- [12] 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.
- [13] ANATOLY Legchenko, OLEG Shushakov. Inversion of surface NMR data [J]. Geophysics, 1998, 63(1): 75-84.
- [14] 李振宇,唐辉明,潘玉玲. 地面核磁共振方法在地质工程中的应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2006.
- [15] 林君,段清明,王应吉. 核磁共振找水仪原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [16] 翁爱华,李舟波,王雪秋. 层状导电介质中地面核磁共振响应特征理论研究[J]. 地球物理学报, 2004(1): 156-163.  
WENG Aihua, LI Zhoubo, WANG Xueqiu. A study on surface nuclear magnetic resonance over layered conductive earth [J]. Chinese J Geophys, 2004, 47(1): 156-163.
- [17] 翁爱华,王雪秋,刘国兴,等. 导电性影响的地面核磁共振反演[J]. 地球物理学报, 2007(3): 890-896.  
WENG Aihua, WANG Xueqiu, LIU Guoxing, et al. Nonlinear inversion of surface nuclear magnetic resonance over electrically conductive medium [J]. Chinese J Geophys, 2007, 50(3): 890-896.
- [18] STEPHAN Costabel, UGUR Yaramanci. Relative hydraulic conductivity in the vadose zone from magnetic resonance sounding-brooks-corey parameterization of the capillary fringe [J]. Geophysics, 2011, 76(3): 61-71.

(下转第103页)

长沙:湖南科技大学,2009.

LI Gang. Experimental research on the efficient water spraying dust-settling technology and engineering application[D]. Changsha: Hunan University of Science and Technology, 2009.

- [18] 陈海安. 高压喷雾在炮采工作面应用研究[D]. 西安:西安科技大学,2011.

CHEN Hai'an. Study on application of high-pressure spray in blasting face [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011.

- [19] 程瑞端,黄兢. 矿井可控循环通风及其应用[J]. 四川建材学院学报,1997(2):65-67.

CHENG Ruiduan, HUANG Jin. Theory and application of mine controlled cycle ventilate [J]. Sichuan Institute of Building Materials, 1997(2):65-67.

- [20] 赵梓成. 矿井通风计算及程序设计[M]. 昆明:云南科技出版社,1992.

- [21] 牛保炉,苗惠东. 可控循环风的发展与研究现状[J]. 煤炭安全,2002,33(12):18-20.

NIU Baolu, MIAO Huidong. Development and present research on controlled recirculating ventilation[J]. Safety In Coal Mines, 2002,33(12):18-20.

(编辑:孙培芹)

(上接第97页)

- [19] 毛希安. 现代核磁共振实用技术及应用[M]. 北京:科学技术文献出版社,2000.

- [20] 李貅. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2002.

- [21] KAUFMAN A A, KELLER G V. Frequency and transient soundings[M]. Elsevier Science Ltd, 1983.

- [22] 陈晓东,赵毅,张杰,等. 高温超导磁强计在瞬变电磁法中的应用研究[J]. 地球物理学报,2012,55(2):702-708.

CHEN Xiaodong, ZHAO Yi, ZHANG Jie, et al. The applications of HTc SQUID magnetometer to TEM [J]. Chinese J Geophys, 2012, 55(2):702-708.

- [23] 王鹏. 均匀地电条件下地面核磁共振三维正演[D]. 武汉:中国地质大学,2007.

WANG Peng. Three dimensional forward of surface nuclear magnetic resonance in uniformity medium [D]. Wuhan: China University of Geoscience, 2007.

- [24] MIKE Mueller Petke, UGUR Yaramanci. QT inversion-Comprehensive use of the complete surface NMR data set [J]. Geophysics, 2010, 75(4):199-209.

- [25] 林峰,王祝文,刘菁华等. 核磁共振 T<sub>2</sub> 谱奇异值反演改进算法[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2009,6(06):1150-1155.

LIN Feng, WANG Zhuwen, LIU Jinghua, et al. An improved algorithm for singular value decomposition inversion of T<sub>2</sub> spectrum in nuclear magnetic resonance [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 6(06):1150-1155.

(编辑:孙培芹)