

· 非地震 ·

# 天然气水合物的磁电阻率响应特征

翁爱华\* 刘云鹤 高丽娟 高玲玲 陈玉玲

(吉林大学应用地球物理系, 吉林长春 130026)

翁爱华, 刘云鹤, 高丽娟, 高玲玲, 陈玉玲. 天然气水合物的磁电阻率响应特征. 石油地球物理勘探, 2009, 44(增刊1): 158~161

**摘要** 文中将含天然气水合物的海底浅部层状沉积层的电性结构分为低阻海水、相对高阻的海洋沉积物、高阻天然气水合物和相对高阻的沉积物基底四层, 借助点源直流磁电阻率计算公式, 对海底天然气水合物沉积层模型进行了模拟。数值模拟结果表明: ①天然气水合物沉积层可以引起较为明显的磁电阻率高阻异常; ②天然气水合物沉积层的厚度、埋藏深度对磁电阻率异常观测结果影响不大; ③装置相对海底高度的变化、装置间的相对位置变化对磁电阻率异常观测结果影响很大。因此利用磁电阻率法进行海底天然气勘探是可行的, 并且近海底装置是最优的观测装置。

**关键词** 磁电阻率法 天然气水合物 响应特征 深度 厚度 装置配置

## 1 引言

天然气水合物沉积层多呈薄互层产出, 虽然单层厚度可能小于 10m<sup>[1]</sup>, 但水合物沉积层相对围岩电阻率非常高<sup>[2,3]</sup>, 这种特点为利用电磁法进行海底天然气调查提供了地球物理前提。目前主要采用地震勘探、测井等地球物理技术探测天然气水合物<sup>[2,4~7]</sup>, 与此同时, 电磁法在油气勘探以及水合物调查方面的应用也逐渐增多, 近来已由试验阶段发展为工业化生产阶段<sup>[8,9]</sup>。尽管海水的存在可导致基于常规意义的瞬变电磁感应电压曲线形态发生变化, 并使接收线圈接收到的瞬变响应对海底电导率的分辨能力降低<sup>[10]</sup>, 但更多的数值模拟结果表明, 电磁方法能探测到海底电阻率异常体的存在<sup>[11]</sup>。

直流电法的缺点是不能很好地对受高阻层屏蔽的下伏目标体进行探测, 但在天然气水合物探测中, 由于只需了解高阻天然气水合物的信息, 因此可以尝试利用直流电法探测天然气水合物。计算结果表明, 海底天然气水合物能引起较为稳定、可靠的直流电阻率异常, 因此采用直流方法进行水合物调查是一种有前景的方法。但在测量电场时, 所有电法方

法必然会在两个方向受到低阻海水的影响, 即传播到高阻水合物的一次电场和水合物沉积层扰动在观测点处产生的二次电场。因此如何避开或者利用低阻海洋环境对观测场的影响, 对提高海洋电磁技术的应用效果具有非常大的意义。

磁电阻率法是测量异常体扰动电流产生的磁场, 且该近直流磁场基本不受介质电阻率的影响<sup>[12,13]</sup>, 因此在低阻的海洋环境可以避开低阻海水对二次异常场的影响, 从而能获得更强的异常。本文基于层状介质磁电阻率响应模拟技术<sup>[14]</sup>, 对磁电阻率法的特点进行了分析, 展示了利用磁电阻率法进行天然气水合物勘探的良好前景。

## 2 层状介质直流磁场响应

水平层状磁电阻率理论模型如图1所示。强度为  $I$  的点电流源  $A$  在  $P$  点产生的磁场可以采用虚电流法计算<sup>[12]</sup>。其基本原理是: 假设有一条从无穷远垂直到  $A$  点的虚线电流, 与  $A$  点发出的电流线相连接, 构成一个从无穷远来到无穷远去的大回路; 同时假设有一条从  $A$  点出发垂直到无穷远的虚线电流, 该虚线电流与前面附加的虚线电流方向相

\* 吉林省长春市西民主大街吉林大学地探学院, 130026

本文于 2008 年 11 月 23 日收到, 修改稿于 2009 年 6 月 30 日收到。

本研究得到国家 863 高新技术研究发展计划项目(2006AA06Z109)、国家自然科学基金项目(40874050)资助。

反,电流强度大小相等,于是两条虚线电流在  $P$  点产生的磁场垂直分量正好相互抵消。因此, $P$  点的磁场没有垂直分量,只有水平分量。先求出大回路在  $P$  点产生的磁场,然后加上后附加的虚线电流产生的磁场,所得即为点电流源  $A$  在  $P$  点产生的磁场。由于模型的柱对称性,采用柱坐标系进行计算。经过推导,该磁场水平分量为<sup>[14,15]</sup>

$$H = \frac{I}{2\pi r} \int_0^\infty [A_i^+(\lambda) e^{-\lambda(z-z_i)} - A_i^-(\lambda) e^{-\lambda(z_{i+1}-z)}] \times J_1(\lambda r) d\lambda - \frac{1}{4\pi r} \left( 1 - \frac{|z-z_s|}{\sqrt{r^2+(z-z_s)^2}} \right) \quad (1)$$

其中: $z_i$  与  $z_{i+1}$  为第  $i$  层的顶、底面  $z$  坐标; $J_1$  为第一类 1 阶贝塞尔函数; $A_j^+(\lambda)$  与  $A_j^-(\lambda)$  为待定系数,可采用递推方法进行计算<sup>[16,17]</sup>。

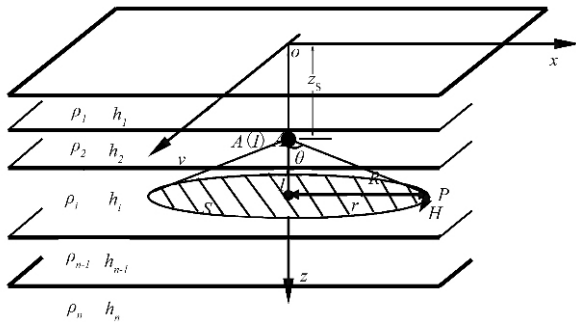


图 1 水平层状磁电阻率理论模型

坐标原点  $o$  位于地表, $z$  轴垂直向下,各层厚度和电阻率分别为  $h_i$  和  $\rho_i$ 。位于  $z$  轴上强度为  $I$  的点电流源  $A$  距地表距离为  $z_s$ 。位于第  $i$  层中的测点  $P$  距地表距离为  $z$ ,点电流源  $A$  和测点  $P$  的水平距离为  $r$ (极距)。 $\theta$  为点电流源  $A$  与测点  $P$  连线与  $z$  轴夹角, $S$  为以  $r$  为半径绕  $z$  轴张成的圆平面

### 3 天然气水合物的磁电阻率响应特征

#### 3.1 典型地电断面

根据已有资料,大致可将含天然气水合物的海底浅部层状沉积层的电性结构分为四层,即低阻海水、相对高阻的海洋沉积物、高阻天然气水合物和相对高阻的沉积物基底<sup>[11]</sup>(表 1)。海水和海洋沉积物的电阻率较为稳定,但天然气水合物的电阻率变化较大,一般大于  $100\Omega \cdot m$ <sup>[6]</sup>。文中假设水合物埋藏于海底沉积物中,其厚度可变。

#### 3.2 水合物埋深、厚度一定的磁电阻率响应

图 2 为表 1 模型中水合物埋深、厚度一定的磁电阻率响应曲线,由图中可见:①在小极距时,两条曲线完全重合,这是由于水合物对海水中的电流扰

表 1 天然气水合物地电断面模型

地层	厚度/m	电阻率/ $(\Omega \cdot m)$
海水	1500	0.3
海底沉积物	300~500	1~3
天然气水合物	10~100	100
水合物基底(沉积物)	$\infty$	1~3

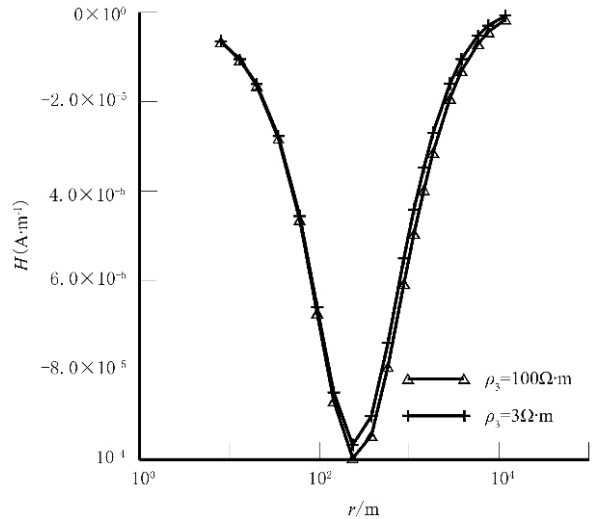


图 2 表 1 模型中水合物埋深、厚度一定时的磁电阻率响应曲线

厚度为 100m 的水合物埋于海底 300m 深处,水合物电阻率  $\rho_s$  分别取 100,  $3\Omega \cdot m$ 。当不存在水合物时,水合物层用海底沉积物代替,其电阻率为沉积物的电阻率。点源与测点在海水中埋深为 1400m(距离海底 100m)处

动可以忽略,尽管水合物电阻率发生很大变化,磁电阻率响应基本不发生变化;②随着极距的增加,存在水合物的模型产生的磁场幅值明显变大。以上现象表明:①高阻水合物的存在,阻止海底沉积物中的电流向更深的海底流动,导致海水中的电流相对增加,磁电阻率响应值增大;②磁电阻率法对海底天然气水合物具有明显可探测的灵敏度;③大致在  $r=300m$  处,水合物磁电阻率响应异常最大,该距离与水合物的海底埋藏深度相当。故相对常规电阻率方法,磁电阻率法的勘探深度较大。

#### 3.3 水合物埋深不变、厚度变化的磁电阻率响应

图 3 为表 1 模型中水合物埋深不变、厚度变化的磁电阻率响应曲线,由图中可见:①在较大极距时,天然气水合物的厚度对磁电阻率响应有一定的影响,表现为厚度大,响应相对变大;随着观测距离的进一步增加,影响逐渐减弱。②在总体上,天然气水合物的厚度对磁电阻率响应的影响相对较小,这是由于水合物可以近似为高阻绝缘板,只有其埋深

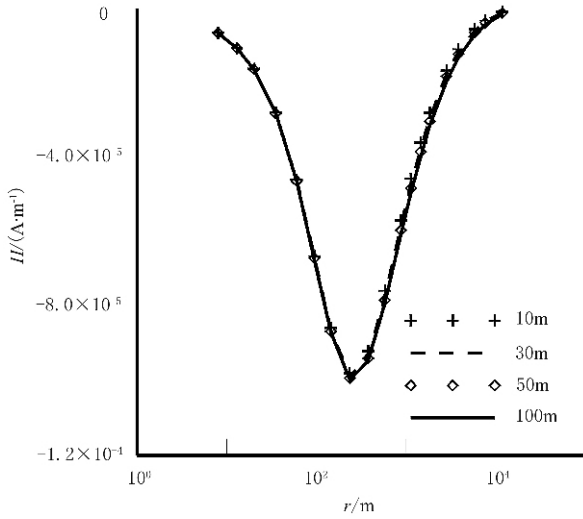


图3 表1模型中水合物埋深不变、厚度变化的磁电阻率响应曲线  
点源和测点在同一水平面上,距海底10m

会影响点源电流的变化<sup>[17]</sup>。

### 3.4 海水厚度变化对磁电阻率响应的影响

由于海洋磁电阻率法是在海水中供电与测量,因此海平面成为影响电流分布的一个因素。为此,在图2数据的基础上,分别计算了不同海水厚度情况下的磁电阻率响应(图4)。从计算结果看:①当海水厚度小于300m时,海水厚度对磁电阻率响应存在明显的影响;②当海水厚度大于300m后,海水厚度对磁电阻率响应影响明显减小。由于一般认为海洋水合物埋深在300m以下,因此可以认为在水合物存在条件下,海水厚度变化对磁电阻率测深曲线影响较弱。

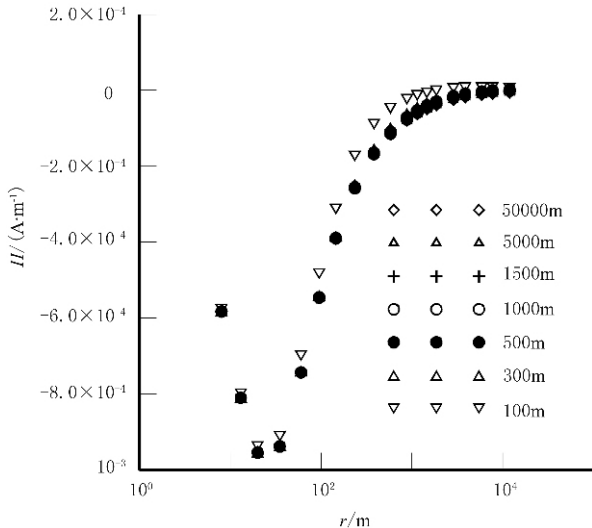


图4 不同海水厚度的磁电阻率响应曲线  
点源和测点距离海底10m

### 3.5 装置深度变化对磁电阻率响应的影响

在图2数据基础上,图5给出了装置距离海底不同高度时的磁电阻率响应曲线,从图中可见,装置深度变化时对磁电阻率响应有很大影响,表现为距离海底越近,水合物的影响越大。因此为了获得较明显的磁电阻率异常,应该采用近海底观测装置。

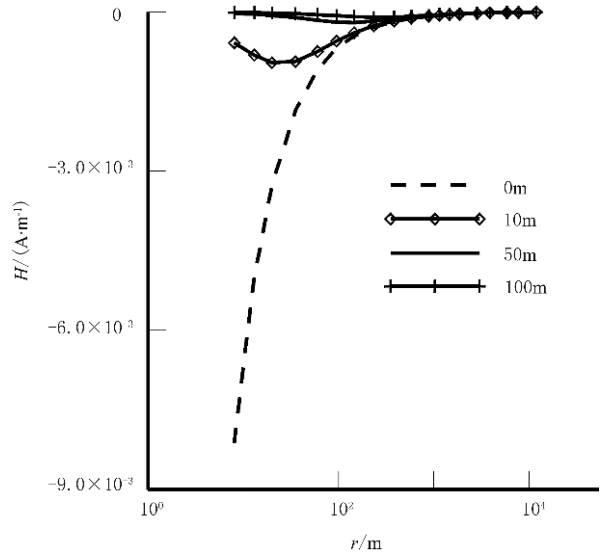


图5 装置距离海底不同高度时的磁电阻率响应曲线  
水合物厚度为100m,点源和测点(在同一深度)距离海底不同高度

### 3.6 装置配置差异对磁电阻率响应的影响

图6为点源深度固定、测点深度不同时磁电阻率响应曲线,从图中可见,由于装置的变形,测量的磁电阻率响应曲线差别很大。显然,装置间的配置关系对测量结果影响很大。因此在数据解释时,

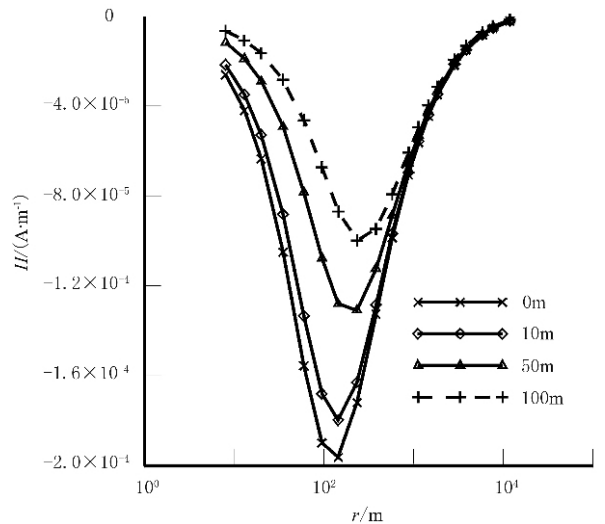


图6 点源深度固定、测点深度不同时磁电阻率响应曲线  
供电点距海底100m,测点在源点下方相对埋深不同

为了获得较为准确的地电断面,必须较为精确地确定电极系的具体几何参数。

## 4 结论

文中借助点源直流磁电阻率计算公式,对海底天然气水合物沉积层模型进行了模拟,获得以下认识:①天然气水合物沉积层可以引起较为明显的磁电阻率高阻异常;②天然气水合物沉积层的厚度、埋藏深度对磁电阻率异常观测结果影响不大;③装置相对海底高度的变化、装置间的相对位置变化对磁电阻率异常观测结果影响很大。因此,利用磁电阻率法进行海底天然气勘探是可行的,并且近海底装置是最优的观测装置。

### 参考文献

- [1] 张胜业,杨梅霞,罗延钟. 天然气水合物的瞬变电磁响应研究. 石油地球物理勘探, 2004, 39(增刊): 62~65
- [2] 王祝文,李舟波,刘菁华. 天然气水合物评价的测井响应特征. 物探与化探, 2003, 27(1): 13~17
- [3] 许红,刘守全等. 国际天然气水合物调查研究现状及其主要技术构成. 海洋地质动态, 2000, 16(11): 1~4
- [4] 张明,伍忠良. 天然气水合物BSR的识别与地震勘探频率. 海洋学报(中文版), 2004, 26(4): 80~88
- [5] 唐勇,金翔龙,方银霞等. 冲绳海槽天然气水合物

BSR的地震研究. 海洋学报(中文版), 2003, 25(4): 59~66

- [6] 王虑远,徐振中,陈世悦等. 天然气水合物的识别标志及研究进展. 海洋通报, 2006, 25(2): 55~63
- [7] 高兴军,于长河等. 地球物理测井在天然气水合物勘探中的应用. 地球科学进展, 2003, 18(2): 305~311
- [8] 何继善,鲍力知. 海洋电磁法研究的现状和进展. 地球物理学进展, 1999, 14(1): 7~39
- [9] 何展翔,余刚. 海洋电磁勘探技术及新进展. 勘探地球物理学进展, 2008, 31(1): 2~8
- [10] 刘长胜,林君. 海底表面磁源瞬变响应建模及海水影响分析. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1891~1898
- [11] 郑仁淑. 海底油藏模型的瞬变电磁响应正演模拟研究. 石油天然气学报, 2005, 27(2): 190~193
- [12] 傅良魁. 磁电勘探法原理. 北京:地质出版社, 1984
- [13] Edwards R N. A downhole magnetometric resistivity technique for electrical sounding beneath a conductive surface layer. *Geophysics*, 1988, 53(4): 528~536
- [14] 刘云鹤. 异性点源层状介质直流磁场响应计算[硕士学位论文]. 吉林大学, 2008
- [15] Inayat-Hussein A A. Magnetic fields of direct currents in horizontally stratified conductors. *J Appl Phys*, 1989, 65(5): 3731~3732
- [16] Das U C, de Hoop A T. Efficient computation of apparent resistivity curves for depth profiling of a layered earth. *Geophysics*, 1995, 60(6): 1691~1697
- [17] 翁爱华. 层状介质电位法三维积分方程模拟及反演方法研究 [博士后研究报告]. 浙江大学理学院, 2006

(本文编辑:刘勇)

## 欢迎订阅 2010 年《石油地球物理勘探》

《石油地球物理勘探》是一份创刊于 1966 年、伴随着我国石油工业的飞速发展而迅速成长起来的优秀科技期刊。她于 1992 年、1997 年蝉联全国优秀科技期刊一等奖, 1999 年荣获首届国家期刊奖, 2001 年进入中国期刊方阵, 获“双高期刊”荣誉; 2003 年、2005 年蝉联第二届和第三届国家期刊奖百种重点期刊; 2008 年被评为“中国精品科技期刊”。当前已是美国工程引文索引(EI)收录的源刊。

《石油地球物理勘探》主要报道内容有石油物探的新理论、新方法、新技术、新经验, 范围涉及地震资料采集、处理、综合解释、非地震勘探、物探仪器及装备的研制等, 为从事石油勘探及相关领域的广大科技和生产人员服务。该刊为双月刊, 外加一期增刊。每期定价 42.00 元, 全年订价 294.00 元。

凡订阅《石油地球物理勘探》杂志的单位和个人, 可以通过本刊的邮寄订单或登录本刊网站下载订单按要求完成订阅。

《石油地球物理勘探》编辑部