



## EM-MWD信号在钻柱中传输的影响因素研究

张浩 毕雪亮 刘维凯 徐月庆 宋明星 邵帅

### Investigation of the Factors that Influence EM-MWD Signal Transmission in Drill Strings

ZHANG Hao, BI Xueliang, LIU Weikai, XU Yueqing, SONG Mingxing, SHAO Shuai

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021128>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 超深井钻柱粘滑振动特征的测量与分析

Measurement and Analysis of Stick-Slip Characteristics of Drill String in Ultra-Deep Wells

石油钻探技术. 2017, 45(2): 32-39 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201702006>

#### 气体钻井MMWD随钻测量方法研究

Research on Measurement Methods of MMWD during Gas Drilling

石油钻探技术. 2018, 46(5): 52-56 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018055>

#### 超高阻盐膏层随钻电磁中继传输特性研究

Research on Downhole Electromagnetic Repeater Transmission Characteristics in Ultra High Resistivity Gypsum-Salt Layers

石油钻探技术. 2018, 46(3): 114-119 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018092>

#### 低温环境下钻柱材料力学特性试验及强度设计

Mechanical Properties Test and Strength Design of Drill String Materials in Low-Temperature Environments

石油钻探技术. 2021, 49(3): 35-41 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021051>

#### 井下射频电磁识别影响因素研究

Study on the Downhole Influence Factors of Radio Frequency Identification Technology

石油钻探技术. 2018, 46(2): 63-68 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018015>

#### 高频电磁加热稠油储层温度分布及其影响因素分析

Temperature Distribution of Heavy Oil Reservoirs under High Frequency Electromagnetic Heating and an Analysis of Its Influencing Factors

石油钻探技术. 2020, 48(1): 90-97 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019128>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2021128

引用格式: 张浩, 毕雪亮, 刘维凯, 等. EM-MWD 信号在钻柱中传输的影响因素研究 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(6): 125-130.

ZHANG Hao, BI Xueliang, LIU Weikai, et al. Investigation of the factors that influence EM-MWD signal transmission in drill strings [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(6): 125-130.

## EM-MWD 信号在钻柱中传输的影响因素研究

张 浩<sup>1</sup>, 毕雪亮<sup>1</sup>, 刘维凯<sup>1</sup>, 徐月庆<sup>2</sup>, 宋明星<sup>2</sup>, 邵 帅<sup>3</sup>

(1. 东北石油大学石油工程学院, 黑龙江大庆 163318; 2. 中国石油集团大庆钻探工程公司钻井工程技术研究院, 黑龙江大庆 163413; 3. 中国石油大庆油田有限责任公司采油工程研究院, 黑龙江大庆 163453)

**摘 要:** 在现有电磁随钻测量 (EM-MWD) 系统中, 钻柱是重要的 EM-MWD 信号传输信道。为深入了解影响 EM-MWD 信号在钻柱中传输效果的因素, 基于等效传输线法对 EM-MWD 信号信道进行了建模, 并使用 Ansys 软件进行了有限元计算, 分析了地层分层情况下不同规格钻柱在交变电磁场中传输的能量损耗以及套管对 EM-MWD 信号传输的影响规律。研究发现: EM-MWD 信号在钻柱中的能量损耗会随着功率和频率增大而增加, 当信号频率超过 100 Hz 时损耗增加更加明显; 不同规格的钻柱传输信号的效果不同, 但当钻柱壁厚与外径的比为 0.08~0.20 时, EM-MWD 信号传输效果较好; 在钻柱上加套管会对 EM-MWD 信号的传输产生屏蔽作用, 影响传输效果, 不过当井下 EM-MWD 信号的发射频率在 50 Hz 以下时, 套管的影响较小。研究结果更加明确了钻柱自身属性对 EM-MWD 信号传输的影响, 可为 EM-MWD 系统的改进和设计提供参考。

**关键词:** 电磁随钻测量; 信号传输; 钻柱; 影响因素; 等效传输线法; 有限元分析

**中图分类号:** TE927      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-0890(2021)06-0125-06

## Investigation of the Factors that Influence EM-MWD Signal Transmission in Drill Strings

ZHANG Hao<sup>1</sup>, BI Xueliang<sup>1</sup>, LIU Weikai<sup>1</sup>, XU Yueqing<sup>2</sup>, SONG Mingxing<sup>2</sup>, SHAO Shuai<sup>3</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang, 163318, China; 2. Daqing Drilling Engineering Technology Research Institute, Daqing, Heilongjiang, 163413, China; 3. Oil Production Engineering Research Institute, Daqing Oilfield of CNPC, Daqing, Heilongjiang, 163453, China)

**Abstract:** In electromagnetic measurement while drilling (EM-MWD) systems, drill strings are important channels for EM-MWD signal transmission. For a better understanding of the factors that influence the EM-MWD signal transmission effect in drill strings, the equivalent transmission line method was used to model the EM-MWD signal channel, and the finite element calculation was made using ANSYS software. With the analysis of strata division, research was conducted on the energy loss of signal transmission by drill strings with different specifications in an alternating electromagnetic field and the influence law of casing on EM-MWD signal transmission. Several findings were obtained in this paper. The increase in power and frequency would enhance the energy loss of EM-MWD signal in drill strings, and when the signal frequency exceeded 100 Hz, the loss grew more evidently. The transmission effect varied for different drill strings, but it was better when the ratio of drill string wall thickness to outer diameter was 0.08–0.20. Adding casing on the drill string would shield the transmission of EM-MWD signal and affect the transmission effect. However, when the frequency of downhole EM-MWD signal was below 50 Hz, the impact of casing is small. The research results further clarified the influence of the drill string's own properties on the EM-MWD signal transmission, which can provide a reference for the improvement and design of the EM-MWD system.

**Key words:** EM-MWD; signal transmission; drill string; influence factor; equivalent transmission line method; finite element analysis

收稿日期: 2021-03-30; 改回日期: 2021-08-20。

作者简介: 张浩 (1996—), 男, 河北固安人, 2019 年毕业于邢台学院电子信息科学与技术专业, 油气井工程专业在读硕士研究生, 主要研究方向为油气井工程测量及过程控制。E-mail: 870548612@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“页岩气层 CO<sub>2</sub> 干法压裂相态控制机理研究” (编号: 52004064) 资助。

目前,国内外随钻测量传输技术主要有2种:一种依靠钻井液脉冲,一种依靠电磁信号<sup>[1]</sup>。钻井液脉冲传输速率很慢,且在一些气井中无法使用,也不符合自动化钻井的趋势。而电磁随钻测量(EM-MWD)技术以电磁波为载体,具有数据传输速率快、通信方式简单等优点<sup>[2]</sup>,因此成为近年来的研究重点。例如,熊皓等人<sup>[3]</sup>基于等效传输线理论,建立了钻柱、地层电阻率和发射频率与EM-MWD信号传输深度的理论模型;范业活等人<sup>[4]</sup>建立了“分段均匀传输线”理论模型,利用现场试验结果进行了验证,得到了影响信号传输的主要因素是地层电阻率、载波频率和钻柱电阻率的结论;邵春等人<sup>[5]</sup>利用有限元法分析了接地发射电极对EM-MWD信号传输的影响,并提出信号接收效果与发射电极直径存在正相关关系;R. Mugoya等人<sup>[6]</sup>从基础电磁理论出发,分析了不同信号频率、不同地层电阻率下EM-MWD信号的衰减特性。但是,EM-MWD信号在地层中传输时受地层电阻率影响很大。为了保证传输效果,一般将井下钻柱作为偶极子天线,辐射电磁波<sup>[7]</sup>。这样,钻柱既是辐射天线又是传导电流的传输介质<sup>[8]</sup>,其自身属性势必会对EM-MWD信号的传输效果产生影响。但对此,目前国内外鲜有研究。为此,笔者基于等效传输线法分析了EM-MWD信号信道、建立了EM-MWD信号理论模型,然后根据地面EM-MWD系统接收信号的效果,采用Ansys有限元软件,分析了钻柱外径、横截面积以及钻柱上是否加套管、加套管长度等对EM-MWD信号传输的影响,以期对EM-MWD系统的改进和设计提供参考。

## 1 井下EM-MWD信号信道分析

### 1.1 EM-MWD信号信道构成

EM-MWD系统的原理是:井下的随钻仪器捕获钻井及地层参数后,将原始信号传输至井下控制中心,经过放大、调制等一系列操作后,加载于电磁信号经发射机向外发射<sup>[9]</sup>。因此,井下EM-MWD信号传输的信道可以分为钻井液、钻柱和地层3部分<sup>[10]</sup>。

钻井液作为连通井下与地面的循环介质,其成分非常复杂,且导电性不强,因此不是良好的传输介质。钻柱主要由钻杆构成,主要成分是钢铁,为良导体,利于井下交变电磁场的传播。但钻柱嵌于地层之中,两者之间并没有绝缘,因此,EM-MWD信号多以钻柱、地层为共同传输媒介<sup>[11]</sup>。信号传输过程

中,钻柱向外辐射电磁波,钻柱同时也是传导电流的主要传输介质,在信道中起到非常重要的作用。

目前,EM-MWD系统多利用绝缘短节将钻柱上下截开,构成非对称的偶极子天线形式<sup>[12]</sup>。EM-MWD信号传输的物理模型如图1所示。

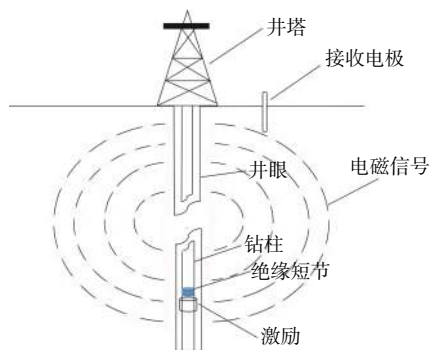


图1 EM-MWD信号传输模型

Fig.1 EM-MWD signal transmission model

### 1.2 EM-MWD信号理论模型

目前,建立EM-MWD系统模型的方法主要有2种:一种是等效传输线法,一种是求场方程边值法<sup>[13]</sup>。求场方程边值法理论复杂,求解方程得到的结果常与实际相差很大。所以,国内外学者多基于等效传输线法建立模型、分析,该方法也较为成熟。因此,笔者也利用等效传输线法,建立非均匀地层中EM-MWD信号传输信道的理论模型。

实际传输中,由于传输介质不断发生变化,电场强度、磁场强度等变量可能是不连续的,而在经典电磁场理论中要求这些变量必须连续分布。为了解决该问题,需要引进旋度变量<sup>[14]</sup>。EM-MWD信号在各地层中传输都应满足麦克斯韦方程组,而麦克斯韦方程组中涉及旋度的公式为:

$$\oint_l H dl = \int_S J dS + \int_S \frac{\partial D}{\partial t} dS \quad (1)$$

$$\oint_l E dl = - \int_S \frac{\partial B}{\partial t} dS \quad (2)$$

式中: $H$ 为磁场强度, A/m;  $l$ 为导体回路长度, m;  $J$ 为电流密度, A/m<sup>2</sup>;  $S$ 为 $l$ 所限定曲面的面积, m<sup>2</sup>;  $t$ 为时间, s;  $D$ 为电通量密度, C/m<sup>2</sup>;  $E$ 为电场强度, V/m;  $B$ 为磁通量密度, Wb/m。

根据等效传输线理论,作为“传输线”的上、下钻柱均为带电导体,并同时向地层中辐射能量,需要分别计算钻柱、地层的电位变化,然后积分求和。而有限元分析法,其本质是将求解微分方程的边值问题转化为等价的泛函求极值的变分问题,然后将场域划分为有限个小的单元,通过求每个小单

元中的极值得到原微分方程的近似解<sup>[15]</sup>, 其数学公式为:

$$b_k(\eta) = \sum_{i=1}^n b_i h(x) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中:  $b_k$  为所求有限元中所划定单元得到的方程近似解;  $\eta$  为坐标轴;  $b_i$  为补偿系数;  $h(x)$  为有限元模型中计算参数的极值;  $n$  为网格划分的个数。

由式(1)和式(2)可推导出导电物体中传导电流的电位差公式:

$$V(x) = \int_0^l E dl = \int_0^l \frac{J}{\sigma} dl \quad (4)$$

式中:  $V(x)$  为电位差,  $V$ ;  $\sigma$  为电导率, S/m。

又因旋度空间中, 矢量函数存在如下关系:

$$\nabla \cdot G(\eta) = \frac{\partial G_2(\eta_2)}{\partial \eta_1} - \frac{\partial G_1(\eta_1)}{\partial \eta_2} \quad (5)$$

式中:  $\nabla$  为哈密顿算符;  $G(\eta)$  为有限元求解中  $\eta$  点处的矢量函数;  $\eta_1, \eta_2$  为有限元坐标中任意两点处的矢量函数。

对式(3)、式(4)、式(5)进行积分变换, 并应用于有限元模型, 得两点间的电位差为:

$$V(x) = \sum_{i=1}^n b_i \int_0^l \frac{J_i - J_{i-1}}{\sigma_i} dl \quad (6)$$

式中:  $J_i$  和  $J_{i-1}$  分别为有限元节点  $i$  和  $i-1$  处的电流密度, A/m<sup>2</sup>;  $\sigma_i$  为有限元节点  $i$  处的电导率, S/m。

## 2 有限元模型的建立及模拟结果

由上述理论分析可知, 计算两点间的电位差, 只需对井下电流回路上每点的电势差积分求和。基于此, 可建立有限元分析模型, 用以模拟分析 EM-MWD 信号在钻柱中传输时的受影响情况。

### 2.1 有限元分析模型的建立

建立有限元分析模型时, 设定所钻井为直井, 井眼规则, 钻柱组合中所有工具的组成材料相同, 地层分为 3 层并均为矩形; 井径 0.2 m, 钻杆外径 127.0 mm, 内径 108.6 mm, 壁厚 9.2 mm, 每根钻杆长 9.50 m, 钻杆间公接头、母接头为 NC40 型。建立的有限元分析模型如图 2 所示。

该有限元分析模型高 800 m ( $z$  轴), 长 650 m ( $y$  轴), 宽 200 m ( $x$  轴), 井眼位于模型长 50 m、宽 100 m 处; 绝缘短节长 0.5 m, 激励长 0.2 m, 在距离井眼 10 m 处设置接收电极; 地层中 EM-MWD 信号

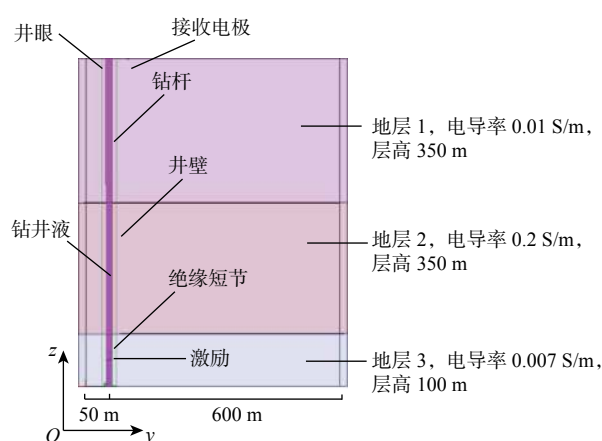


图 2 有限元分析模型示意

Fig. 2 Finite element analysis model

的发射频率为 10 Hz; 钻柱的电导率为  $2 \times 10^6$  S/m, 激励处电导率为  $5.8 \times 10^7$  S/m, EM-MWD 信号的发射功率为 5 W; 钻井液的电阻率为  $5 \Omega \cdot m$  (忽略钻井液在湍流状态时对电磁信号传输的影响)。

### 2.2 模型求解方法

采用 Ansys 软件求解有限元分析模型的数值解, 分析交变电场, 规定最小分析步为 6 步, 每步计算结果比上一步前进 30%, 每步的分析误差为百分之一, 最大分析步为 20 步。

由于需要将模型划分为多个网格, 通过这些网格将模型映射到参考域, 然后对参考域进行计算, 所以网格大小极为重要。为了保证结果准确, 将钻柱、激励、绝缘短节、钻井液网格的最大长度设为 0.01 m。对于地层模型, 其体积较大, 应采用 Ansys 中的自适应网格。

### 2.3 数值模拟结果

利用有限元分析模型, 模拟得到了 EM-MWD 电位与电流信号的截面云图, 分别如图 3、图 4 所示。

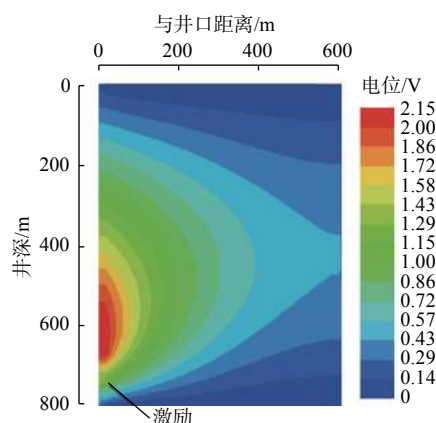


图 3 EM-MWD 电位模拟结果

Fig. 3 Results of EM-MWD electric potential simulation



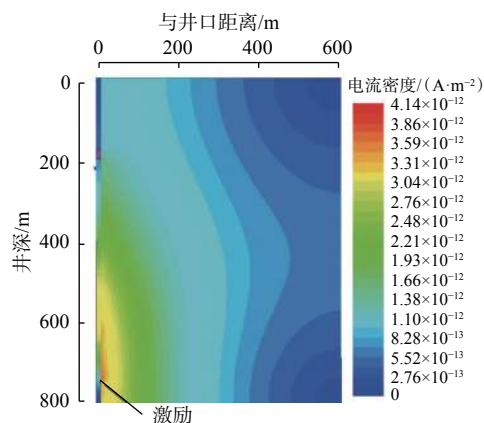


图4 EM-MWD 电流模拟结果

Fig.4 Results of EM-MWD current simulation

由图3、图4可知, EM-MWD 电位和电流信号密度的分布是分层呈阶梯状的, 井眼附近的电位最高、电流信号密度最强。这是因为, 钻柱在传输传导电流和向地层辐射电磁波时, 由于趋肤效应, 电信号在弱导体中传输过程中, 电磁波会在导体中沿内法线方向传播、会靠近每层介质的表面, 且出现分层现象<sup>[16]</sup>。井眼附近(即钻柱附近)信号最强, 也证明钻柱对信号传输具有重要影响。

### 3 钻柱属性对信号传输效果的影响

为了明确钻柱属性对 EM-MWD 信号传输效果的具体影响, 利用上述有限元分析模型, 应用变量控制法(即只改变某一参数, 其他参数不变), 通过反复求解, 分析了钻柱外径、钻柱横截面积以及钻柱上是否加套管、加套管长度等与 EM-MWD 信号传输间的关系。

#### 3.1 信号在钻柱中的能量损耗

目前钻柱多为钢质, 传输 EM-MWD 信号会产生损耗。由电阻定律可知, 导体横截面积越大电阻越小, 因此, 钻柱横截面积越大导电效果越好<sup>[17]</sup>。实际生产中, 最常用的是  $\phi 88.9$ 、 $\phi 114.3$  和  $\phi 127.0$  mm (壁厚分别为 6.5, 9.2 和 12.7 mm) 等 3 种钻柱<sup>[18]</sup>。为此, 以外径 88.9 mm、内径 76.0 mm 和外径 127.0 mm、内径 108.6 mm 钻柱为例, 改变信号发射功率和信号频率, 分析单位长度钻柱中 EM-MWD 信号的能量损耗, 结果如图5、图6所示。

从图5、图6可以看出, 随着信号发射功率和频率增大, EM-MWD 信号在钻柱中的能量损耗也相应增大。当信号发射频率超过 100 Hz 时, 钻柱中信号的能量损耗显著增加。

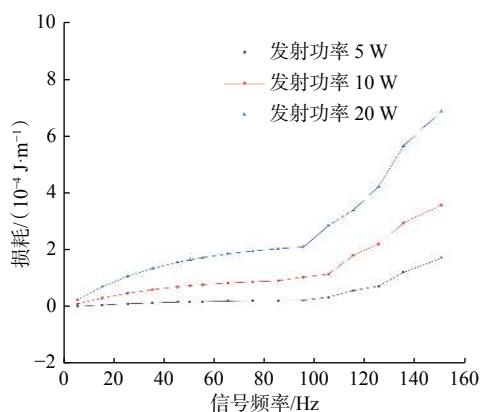


图5 EM-MWD 信号在外径 127.0 mm、内径 108.6 mm 钻柱中的能量损耗

Fig.5 Energy loss of EM-MWD signal in the drill string with an outer diameter (OD) of 127.0 mm and an inner diameter (ID) of 108.6 mm

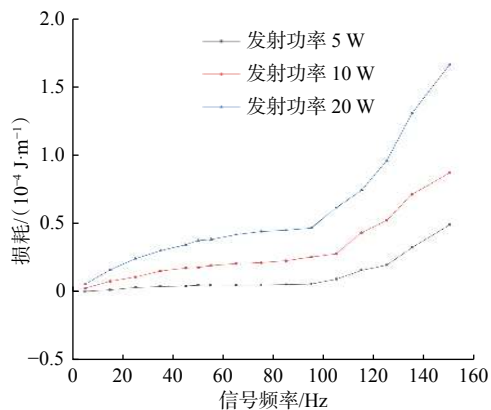


图6 EM-MWD 信号在外径 88.9 mm、内径 76.0 mm 钻柱中的能量损耗

Fig.6 Energy loss of EM-MWD signal in the drill string with an OD of 88.9 mm and an ID of 76.0 mm

对比图5和图6发现, 外径 127.0 mm、内径 108.6 mm 钻柱的横截面积约为外径 88.9 mm、内径 76.0 mm 钻柱的 2 倍, 而前者的 EM-MWD 信号能量损耗, 在发射功率为 5 W 时约为后者的 4 倍, 在发射功率为 10 W 时约为后者的 4.2 倍, 在发射功率达到 20 W 时约为后者的 4.5 倍。

可见, 钻柱的横截面积、EM-MWD 信号的发射频率和发射功率, 都对钻柱中信号的能量损耗有很大影响。

#### 3.2 钻柱外径对信号传输的影响

在实际工程中钻柱具有多种规格, 不同规格的钻柱其壁厚、外径都不相同, 且钻柱内存在的钻井液为非良导体, 这使 EM-MWD 信号在钻柱中的传输变得较为复杂<sup>[19]</sup>。由上文可知壁厚 6.5, 9.2 和 12.7 mm 具有较大代表性, 因此设定壁厚为 6.5,

9.2 和 12.7 mm 分析不同钻柱外径与地面接收到的信号强度的关系, 得到地面接收到的 EM-MWD 信号强度与钻柱外径的关系曲线, 如图 7 所示。

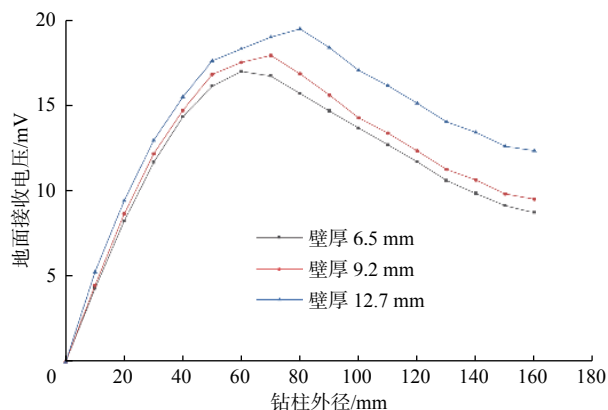


图 7 不同壁厚条件下地面接收到的 EM-MWD 信号强度与钻柱外径的关系

Fig.7 Relationship between the EM-MWD signal intensity received on the surface and the OD of drill strings under different wall thicknesses

由图 7 可知, 随着钻柱外径增加地面接收到信号强度先快速升高后缓缓降低, 这是因为, 开始时钻柱的横截面积增大, EM-MWD 信号整体的传输效果变好, 但随着钻柱外径进一步增大, 钻柱内的钻井液消耗了大部分能量。

由图 7 还可以分析得出, 不同规格的钻柱, 信号传输效果也不同。例如: 壁厚为 6.5 mm 时, 钻柱外径在 40~80 mm 间, 地面接收到信号的强度较强且出现峰值; 壁厚为 9.2 mm 时, 钻柱外径在 50~90 mm 间, 地面接收信号的强度较强且出现峰值; 壁厚为 12.7 mm 时, 钻柱外径在 60~100 mm 间, 地面接收信号的强度较强且出现峰值。总体看来, 当壁厚与外径的比在 0.08~0.20 之间时传输效果较好。

### 3.3 套管对信号传输的影响

在钻井施工中, 为了提高钻柱强度或为了隔离复杂地层, 会下入套管, 套管也会对 EM-MWD 信号传输产生影响。为此, 在激励处添加 10 m 长的套管, 分析了有、无套管情况下钻柱中电压信号强度分布情况, 如图 8 所示。

由图 8 可知, 在激励至钻头段 EM-MWD 信号强度衰减很快, 有无套管对此段信号强度并无影响; 经过激励之后, EM-MWD 信号强度在钻柱上衰减速度逐渐变弱。进一步分析可以发现, 有套管时钻柱上的电信号衰减速度更慢, 尤其在套管段, 与无套管相比, EM-MWD 信号强度衰减速度明显变缓。这

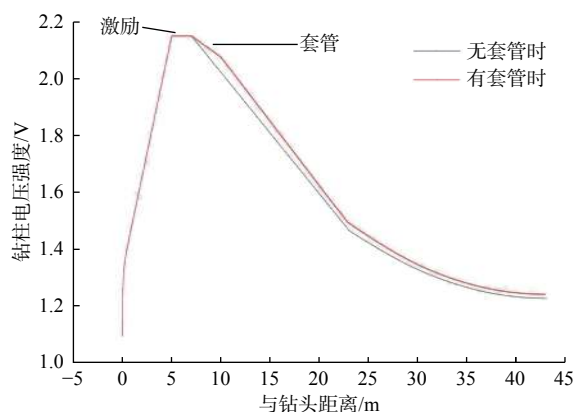


图 8 有无套管两种情况下钻柱中电压信号强度分布  
Fig.8 Voltage signal intensity distribution in drill strings with or without casing

说明套管对于电磁信号传输具有屏蔽作用, 这有利于电磁信号在钻柱中的传输。

分析了套管长度对钻柱中 EM-MWD 信号传输的具体影响, 结果如图 9 所示。

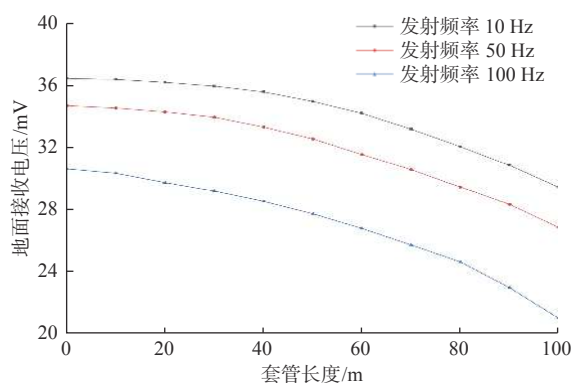


图 9 不同发射频率、不同套管长度下钻柱传输到地面的信号强度

Fig.9 Signal intensity transmitted to the surface under different transmission frequencies and casing lengths

由图 9 可知, 当发射频率在 50 Hz 以下时, 套管形成的屏蔽电场对 EM-MWD 信号的传输影响较小; 发射信号为 100 Hz 时, 套管会对 EM-MWD 信号传输产生较大影响。套管的长度对 EM-MWD 信号传输也具有一定影响, 当套管长度大于 40 m 时, 地面所接收信号强度的下降趋势更为明显。

## 4 结 论

1) EM-MWD 信号在钻柱中传输时的能量损失随发射功率和频率增加而增加, 且当频率超过 100 Hz 时, 能量损失明显增加。钻柱横截面积与能量损耗之间存在一定比例关系, 但总的来说钻柱横截面积

越小,能量损失越少。

2) 钻柱规格会对钻柱中 EM-MWD 信号的能量损耗、信号遥测深度产生影响。在钻井施工中,钻柱壁厚与外径的比保持在 0.08~0.20 传输效果较好。

3) 在钻柱上加套管会形成屏蔽效应,相较未加套管时,地面接收到的 EM-MWD 信号减弱,但沿钻柱传输的 EM-MWD 信号增强。当发射频率在 50 Hz 以下时,套管形成的屏蔽电场对 EM-MWD 信号的传输影响较小。另外,钻井施工中,在满足工程要求的前提下,应尽量将套管长度控制在 40 m 以下。

### 参 考 文 献

#### References

- [1] 陈晓晖,高炳堂,宋朝晖.超高阻盐膏层随钻电磁中继传输特性研究[J].石油钻探技术,2018,46(3):114-119.  
CHEN Xiaohui, GAO Bingtang, SONG Zhaohui. Research on downhole electromagnetic repeater transmission characteristics in ultra high resistivity gypsum-salt layers[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(3): 114-119.
- [2] 康厚清.煤矿井下 EM-MWD 仪器研制[J].煤矿安全,2019,50(4):135-137,141.  
KANG Houqing. Development of underground electromagnetic wireless measurement while drilling instrument[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(4): 135-137, 141.
- [3] 熊皓,胡斌杰.随钻测量电磁传输信道研究[J].地球物理学报,1997,40(3):431-441.  
XIONG Hao, HU Binjie. Investigation of the EM channel characteristics for MWD[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(3): 431-441.
- [4] 范业活,聂在平,李天禄.随钻电磁波传输理论模型与信道特性分析[J].电波科学学报,2013,28(5):909-914.  
FAN Yehuo, NIE Zaiping, LI Tianlu. EM channel theory model and characteristics analysis for MWD[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013, 28(5): 909-914.
- [5] 邵春,韩坚,褚志伟,等.基于 ANSYS 的接地发射电极对双向 EM-MWD 下传信号的影响分析[J].煤田地质与勘探,2019,47(1):206-210.  
SHAO Chun, HAN Jian, CHU Zhiwei, et al. Analysis on influence of ground transmitting electrode on bidirectional EM-MWD signal transmission based on ANSYS[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(1): 206-210.
- [6] MUGOYA R, YAO Aiguo, DE LA PAIX M J. The study of signal propagation in electromagnetic-measurement while drilling (EM-MWD) telemetry systems[J]. Journal of American Science, 2011, 7(3): 153-157.
- [7] 刘科满,作杰.电磁随钻传输理论与应用[M].北京:科学出版社,2020:27-31.  
LIU Keman, WU Jie. Theory and application of electromagnetic transmission while drilling[M]. Beijing: Science Press, 2020: 27-31.
- [8] FAN Yehuo, NIE Zaiping, SUN Xiangyang. Theoretical study on the while drilling electromagnetic signal transmission of horizontal well[C]//Proceedings of 2017 2nd International Conference on Software, Multimedia and Communication Engineering (SMCE 2017), Shanghai: Science and Engineering Research Center, 2017: 248-253.
- [9] 刘伟,黄崇君,连太炜.电磁波随钻测量仪器测量效果影响因子分析[J].钻采工艺,2017,40(5):11-14.  
LIU Wei, HUANG Chongjun, LIAN Taiwei. Numerical analysis of factors affecting EM-MWD electromagnetic signal attenuation[J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(5): 11-14.
- [10] 肖俊.涪陵工区应用电磁波随钻仪器(EM-MWD)的探讨[J].江汉石油科技,2017(3):47-50,68.  
XIAO Jun. Discussion on application of electromagnetic wave while-drilling instrument (EM-MWD) in Fuling working area[J]. Jiangnan Petroleum Science and Technology, 2017(3): 47-50, 68.
- [11] 王家豪.煤矿井下电磁波随钻测量系统关键技术研究[D].武汉:中国地质大学,2015.  
WANG Jiahao. Research on key technology of EM-MWD in underground coal mine[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015.
- [12] 张东旭,白璟,谢意,等.电磁波接力传输随钻测量系统研制与应用[J].天然气工业,2014,34(2):76-80.  
ZHANG Dongxu, BAI Jing, XIE Yi, et al. Development and application of an electromagnetic relay transmission MWD system[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(2): 76-80.
- [13] 王家豪,董浩斌,石智军,等.煤矿井下随钻测量电磁传输信道建模[J].煤炭学报,2015,40(7):1705-1710.  
WANG Jiahao, DONG Haobin, SHI Zhijun, et al. Modeling an EM channel for MWD in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1705-1710.
- [14] 李辉.随钻电磁波电阻率测井仪器响应数值模拟及应用[M].镇江:江苏大学出版社,2017:25-29.  
LI Hui. Numerical simulation and application on electromagnetic wave resistivity logging-while-drilling tool responses[M]. Zhenjiang: Jiangsu University Press, 2017: 25-29.
- [15] 马西奎.电磁场有限元与解析结合解法[M].北京:科学出版社,2016:68-71.  
MA Xikui. Finite element and analytical solution of electromagnetic field[M]. Beijing: Science Press, 2016: 68-71.
- [16] 李凯.分层介质中的电磁场和电磁波[M].杭州:浙江大学出版社,2010:21-25.  
LI Kai. Fields and waves in layered media[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2010: 21-25.
- [17] 文盛乐,李泽军,杨江河.导电介质内传播电磁波特性研究[J].湖南文理学院学报(自然科学版),2006,18(1):19-22.  
WEN Shengle, LI Zejun, YANG Jianghe. Discussion of propagation electromagnetic wave in conductive medium[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science(Natural Science Edition), 2006, 18(1): 19-22.
- [18] 陈庭根,管志川.钻井工程理论与技术[M].东营:中国石油大学出版社,2000:74-75.  
CHEN Tinggen, GUAN Zhichuan. Drilling engineering theory and technology[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2000: 74-75.
- [19] LIU Keman. Model and control method of a downhole electromagnetic transmitter for EM-MWD system[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 192: 107210.