

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2011.03.014

钻柱中声波传播特性理论分析与试验研究

谢 慧, 江正清, 王新峰, 蔡文军

(中国石化胜利石油管理局钻井工艺研究院, 山东东营 257017)

摘 要:为验证声波在钻柱中的传播特性, 获取适合传输井下信息的频率点或频段, 以 $\phi 127.0$ mm 钻杆为研究对象, 基于理想钻柱的频率方程, 分析了不同长度钻杆的频率与波数的关系。分析认为, 钻杆长度的不均匀性将导致钻柱通频带的交集缩小, 若钻柱每个周期由不同长度的钻杆连接组成, 通带将变窄, 甚至在某些频带上因没有重叠部分而形成很宽的阻带。基于理想钻柱的瞬态响应方程, 分析了钻杆接头对声波的反射作用, 得到了声波通过多根钻杆后的瞬态特性。在室内采用每根长 1.5 m 的钻杆短节, 进行了全尺寸接头钻杆短节声波传播特性试验, 研究了不同频率声波在不同长度钻柱中的传播特性, 验证了声波在钻柱中传播存在梳状滤波器特性和色散现象, 得到了适合钻柱中传播的声波频率范围和一些频率点, 可为声波系统样机的研制提供理论基础和依据。

关键词: 钻柱 钻杆 声波传播 滤波 色散

中图分类号: TE921⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2012)03-0067-06

A Theory Analysis and Experimental Study on Acoustic Transmission Properties in Drill String

Xie Hui, Jiang Zhengqing, Wang Xinfeng, Cai Wenjun

(Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong, 257017, China)

Abstract: In order to validate the acoustic transmission properties in drill string, and get the right frequency point or band for underground information transmission, using $\phi 127.0$ mm drill pipe as the research object, and analyzed the relationship between frequency and wave number of drill pipes with different lengths based on the frequency equation of ideal drill string. The analysis results show that unevenness of drill pipe length will lead to smaller intersection of drill string pass band; if each cycle of drill string consists of drill pipes with different lengths, the pass band will become narrow, or, in some frequency bands form very wide stop band because of no overlap. Based on transient response equation of ideal drill string, the reflection action of drill pipe connector to acoustic wave has been analyzed, to get transient properties of acoustic wave through a lot of drill pipes. Through indoor experiments on acoustic transmission properties with the full size joint, 1.5 m-long drill pipe, we studied the transmission properties of different-frequency acoustic waves in different-length drill strings, verified that comb filter and dispersion phenomenon exist in the acoustic transmission in drill string, and got some frequency scope or frequency band that was suitable for acoustic transmission in drill string.

Key words: drill string; drill pipe; acoustic wave propagation; filtering; dispersion

钻柱中的声波传播技术是以钻柱管壁为传播介质、以声波为信号载体, 利用声波在钻柱中的传播进行井下数据无线传输的一种技术。该技术不受钻井介质、地层等外界条件的限制, 不仅可以高速传输数据, 满足常规钻井随钻信息传输的需要, 而且可以满足钻井新技术、新工艺的需求和随钻测量信息高速传输的需要, 是一种具有极大潜力的无线信息传输技术。国外从 20 世纪 40 年代开始研究钻柱中的声

收稿日期: 2010-11-24; **改回日期:** 2012-02-06。

作者简介: 谢慧(1981—), 女, 山东新泰人, 2002 年毕业于石油大学(华东)机械专业, 2009 年获中国石油大学(华东)机械工程专业工程硕士学位, 工程师, 主要从事石油钻井地面装备与井下工具方面的研究工作。

联系方式: (0546)8554121, xiaojiang1009@163.com。

基金项目: 胜利石油管理局产业化项目“直井无线随钻测量系统研制”(编号:GC0803)和胜利石油管理局博士后项目“钻柱中声波传播特性研究”(编号:GKB0812)资助。

波传播技术,通过一系列理论研究、室内实验和现场试验,该技术不断发展、成熟。2000年,Halliburton公司成功开发了油井测试声波传播系统,并商业化应用,最大传播深度达3 600 m;2005年,Extreme Engineering研制出了 $\phi 120.6$ 和 $\phi 165.1$ mm 2种规格的井下声波发生器、地面接收和处理设备以及井下声波隔离工具等并进行了现场试验,基本达到了商业化应用要求,目前该公司研制的声波MWD系统已在现场推广应用^[1-3]。国内在钻柱中声波传播技术方面的研究工作较少,根据公开的文献资料,赵国山等^[4-5]从2007年开始对随钻数据声波传播技术以及井下超声波短距离数据无线传输技术进行了研究,取得了一些成果;车小花等^[6]对钻柱随钻声波传播特性进行了研究,但尚未研制出井下声波传播工具。因此,进一步研究钻柱中的声波传播特性,获取适合传输井下信息的频率点或频段,为声波传播系统样机的研制提供理论基础和依据具有现实意义。

1 声波传播特性分析

1.1 频率特性分析

以理想钻柱模型为研究对象,分析钻柱中的声波频率特性。理想钻柱模型是由钻杆与接头组成的周期性结构,一个周期内包括钻杆与接头两种结构,其特征参数都是常数,则频率方程为^[7-9]:

$$\cos(kl) = \cos\left(\frac{\omega l_1}{c_1}\right) \cos\left(\frac{\omega l_2}{c_2}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{z_1}{z_2} + \frac{z_2}{z_1} \right) \sin\left(\frac{\omega l_1}{c_1}\right) \sin\left(\frac{\omega l_2}{c_2}\right) \quad (1)$$

式中: k 为波数, m^{-1} ; $l = l_1 + l_2$; l_1 为钻杆的长度, m ; l_2 为接箍的长度, m ; ω 为相速, s^{-1} ; c_1 为钻杆中的声速, m/s ; c_2 为接箍中的声速, m/s ; $z_i = \rho_i a_i c_i$ ($i=1,2$); ρ_1 为钻杆的密度, kg/m^3 ; ρ_2 为接箍的密度, kg/m^3 ; a_1 为钻杆的截面积, m^2 ; a_2 为接箍的截面积, m^2 。

将 $\phi 127.0$ mm标准钻杆参数($l_1=9.1$ m, $a_1=0.003\ 404$ m^2 , $l_2=0.52$ m, $a_2=0.016\ 023$ m^2 , $\rho_1=\rho_2=7\ 800$ kg/m^3 , $c_1=c_2=5\ 100$ m/s)代入式(1),采用Matlab软件编写程序计算得到的钻杆频率 f 与 $\cos(kl)$ 的关系曲线,如图1所示。 $|\cos(kl)|=1$ 对应的频率构成阻带, $|\cos(kl)|<1$ 对应的频率构成通带。从图1可以看出,声波在钻杆中传播时,通带和阻带交替出现,呈现梳状滤波器的结构特

性,通带宽度呈现出“先宽后窄再宽”的周期性变化规律,在一个周期内以其中心对称,其周期约为5.5 kHz。

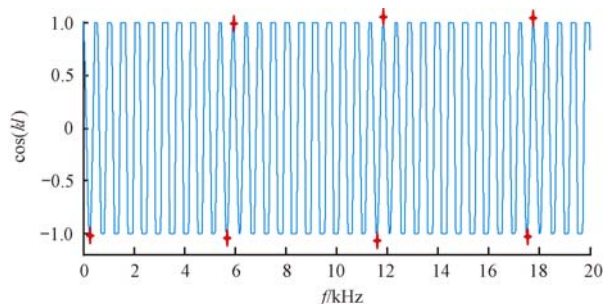


图1 标准钻杆的 $f-\cos(kl)$ 曲线

Fig. 1 Relationship between frequency and $\cos(kl)$ of ideal drill string

将2种长度不同(分别为9.1和9.6 m)、其他参数相同的 $\phi 127.0$ mm标准钻杆的参数代入式(1),采用Matlab软件编写程序计算得到普通钻杆与加长钻杆组成的钻柱的波数与频率($k-f$)特性对比曲线,如图2所示。从图2可以看出,钻杆长度对声波传播色散现象影响严重,长度增加使通带位置向低频偏移,且通带变窄。因此,如果实际应用的钻杆长短不一,则通带是不同长度钻杆色散曲线的重叠部分,通带将变窄,甚至在一些频段因没有重合频段而变为阻带;如果钻杆长度变化达到0.5 m,则通带带宽随频率的增大而逐渐变窄,当频率约大于1.5 kHz时通带带宽基本变为零,即变为阻带。

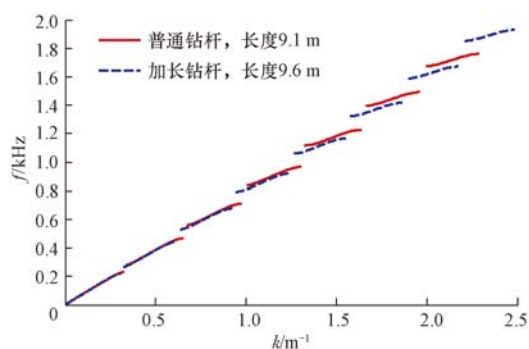


图2 钻杆杆体长度变化时的 $k-f$ 曲线

Fig. 2 Relationship between frequency and wave number of different-length drill pipes

1.2 瞬态波形分析

通过求解钻柱声波色散方程可以得到声波通带和阻带出现的频段,但这种方法只能显示钻柱中声波传播梳状滤波器的特性,不能显示钻柱中接

头对声波的反射作用。为了得到声波信号通过多根钻杆后的时延特性,即钻杆对声波的瞬态响应,需通过钻柱的瞬态响应方程对声波在实际钻柱中传播的瞬态特性进行仿真模拟分析。瞬间响应方程为^[8-10]:

$$u_n^{j+1} = \frac{2(\Delta r_{n+1/2} u_{n+1}^j + \Delta r_{n-1/2} u_{n-1}^j)}{\Delta r_{n+1/2} + \Delta r_{n-1/2}} - u_n^{j-1} \quad (2)$$

其中,

$$\Delta r_{n+1/2} = \rho_{n+1/2} c_{n+1/2} a_{n+1/2} \quad (3)$$

式中: u_n^{j+1} 为偏移量; $\rho_{n+1/2}$, $c_{n+1/2}$, $a_{n+1/2}$ 分别为每个 Δt 时间增量内的钻柱密度、声速和横截面积,均为常数; n 为多节钻杆的网格点标记, $n=0, 1, \dots, N$; 上标 j 表示经过时间为 $j\Delta t$ 。

将 10 根 $\phi 127.0$ mm 标准钻杆的参数代入式(2),采用 Matlab 软件编写程序计算得到 10 根钻杆连接成有限长钻柱的声波传播瞬态频率特性,如图 3 所示。从图 3 可以看出,声波在钻柱中传播时,通带与阻带交替出现,这是周期性结构的色散特性所致。每一个通带内出现尖峰,原因在于接箍反射导致时延扩展引起频率选择性衰落,这一点与通常的“多径传播”在本质上是相同的,只是具体的反射情况不一样。对一种钻柱结构,其所有的通带具有相同的尖峰数。尖峰数与钻柱的钻杆数量相等,即钻柱含有 10 根钻杆,通带将产生 10 个尖峰。产生这

一现象的原因是每个通带的宽度取决于频率的变化,在同一通带内上下沿频率的变化对应的半波长整数倍相差一个钻杆长度。即整个钻柱含有 10 根钻杆,其每一通带内部包含 10 种频率,当频率从通带的低频向高频变化时,钻柱将增加 10 个通带半波长,并在两端面之间的入射波与反射波的相位相同处叠加发生 10 次共振,产生 10 个谐振尖峰。

2 声波传播特性试验

为验证声波在钻柱中传播存在的梳状滤波器特性和钻柱串接头对声波的反射作用,得到不同频率点在钻柱中的传播特性和一些可用的信号频率,开展了全尺寸接头钻杆短节声波传播特性室内试验。

2.1 试验系统

声波在钻柱中传播时,很大一部分能量消耗在接箍处声波的散射和反射中。为分析多接头钻杆中声波传播的频率特性,确定适用于钻柱中传播的声波频率以及传播损失,受试验场地的限制,试验中采用每根长 1.5 m 的短钻杆。

分别对 10 根、20 根、30 根钻杆短节进行了空气状态、充水状态等工况下的试验。笔者仅对 30 根钻杆短节空气状态下的试验结果进行分析。30 根钻杆短节的连接如图 4 所示:共 6 个支架,在第 1 根、第 22 根和第 29 根上安装有接收传感器。激振器激励时,测试的频率点有:0.50~1.00 kHz,以 0.05 kHz 递增;1.00~7.00 kHz,以 0.10 kHz 递增。

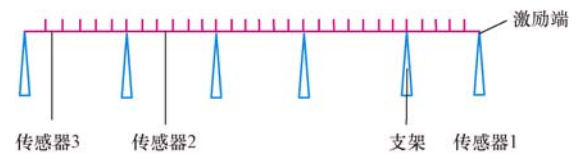


图 4 30 根钻杆短节测试状态示意

Fig. 4 Testing state schemes for 30 short length drill pipes

2.2 数据处理方式与试验结果

采用时域分析和频域分析两种方式对试验数据进行处理分析。时域分析是根据采集到的实时数据分析声波的特性;频域分析是采用 Matlab 软件对采

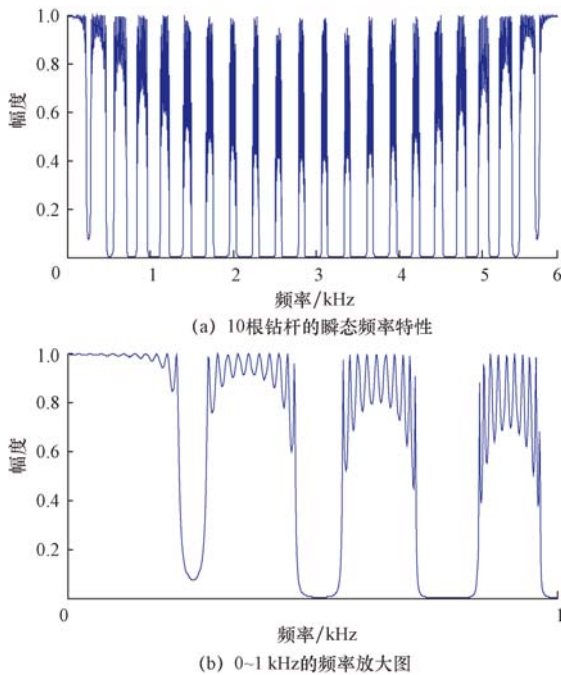


图 3 $\phi 127.0$ mm 钻柱瞬态频率特性

Fig. 3 Transient frequency properties of $\phi 127$ mm drill strings

集的数据进行功率谱分析,分析声波的传播频率特性和衰减特性。其中功率谱图的幅度为采集信号经过计算后的实际幅度。

2.2.1 时域特性分析

对试验得到的实时波形分析表明,钻杆中传播的声波以纵波为主。图5为30根钻杆短节空气状态下3个位置的传感器接收到的时域波形图。从图5可以明显看出:声波在钻杆中传播过程的时间延迟关系,从激励端开始,越往后的传感器接收到的信号越迟;由22根和29根处接收到的时域波形可知,22根处信号到达时间约为27.25 ms,29根处信号到达时间约为29.15 ms,时间差为1.90 ms,而两个传感器之间的距离大约为9.73 m,由此可以得出纵波在钻杆中的传输速度大约为5 121 m/s,说明传感器收到的前段信号以纵波为主。

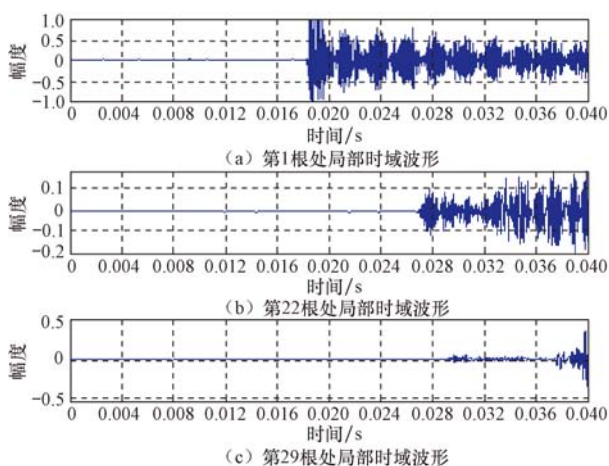


图5 30根钻杆短节的时域波形

Fig. 5 Time domain waveform of 30 short length drill pipes

2.2.2 频率特性分析

对试验测得的数据进行功率谱分析,可得出以下结论:

1) 声波在钻杆中传播存在严重的色散现象。某一频率点的信号能激起其他频率的信号,如图6所示。由图6可知,30根钻杆短节空气状态下频率1.00 kHz的信号,由于色散会产生其他频率(0.90, 0.95 kHz等)的信号。这些由于色散而产生的频率点在实际中是不能采用的。

2) 声波在钻杆中传输的梳状滤波器结构可以在试验中得到验证。图7分别给出了30根钻杆短节在空气状态下0.50, 0.55, 0.95和2.60 kHz 4种典型频率的功率谱曲线。

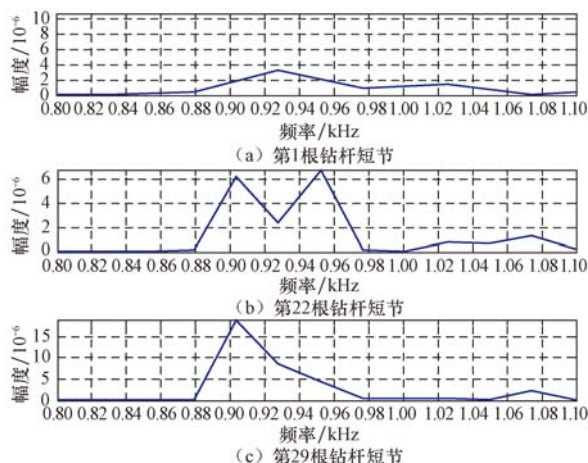


图6 30根钻杆短节1.00 kHz激励下各传感器功率谱

Fig. 6 Power spectrum of 30 short length drill pipes excited by vibration generator for 1 000 Hz

对各功率谱进行分析,各频率点可以分为以下3种情况:

a. 信号处于通带中。这些频率点在钻杆中衰减较小,受其他频率的干扰也较小,各传感器可以较好地接收到该频率点的信号。

b. 传感器可以接收到信号,但受其他频率的干扰较大。这是由色散引起的,在实际应用中这些频率点不可用。在试验中这种现象比较常见(如0.95 kHz频率信号),各传感器可以接收到频率0.95 kHz的信号,但同时还存在频率0.90 kHz的信号。

c. 信号处于阻带中。这些频率点在传播过程中衰减较快(如2.60 kHz频率信号),各传感器接收不到该频率信号。

2.3 与理论模型计算结果的对比

将钻杆短节参数代入式(2)后得到瞬态频带特性曲线,如图8所示。由于理论模型对钻杆的边界条件等进行了理想化假设,没有考虑实际工程中外部条件对声波传播的影响,同时目前的理论模型无法模拟色散现象,所以理论模型计算结果与实际中钻杆中的声传播有一定的不同,理论模型计算结果只能作为参考。根据试验数据的功率谱分析,低频0~0.80 kHz频带与理论模型较为相符,该频带内的信号大部分能接收到(有些频率点接收不到,可能是因为测量方法及传感器自身的原因),尤其是频率0.50 kHz的信号在各种工况下基本都能接收到。有些频率点在理论模型中是阻带,但在实际中却能接收到信号(如2.30和4.10 kHz),其有两方面原因:一是

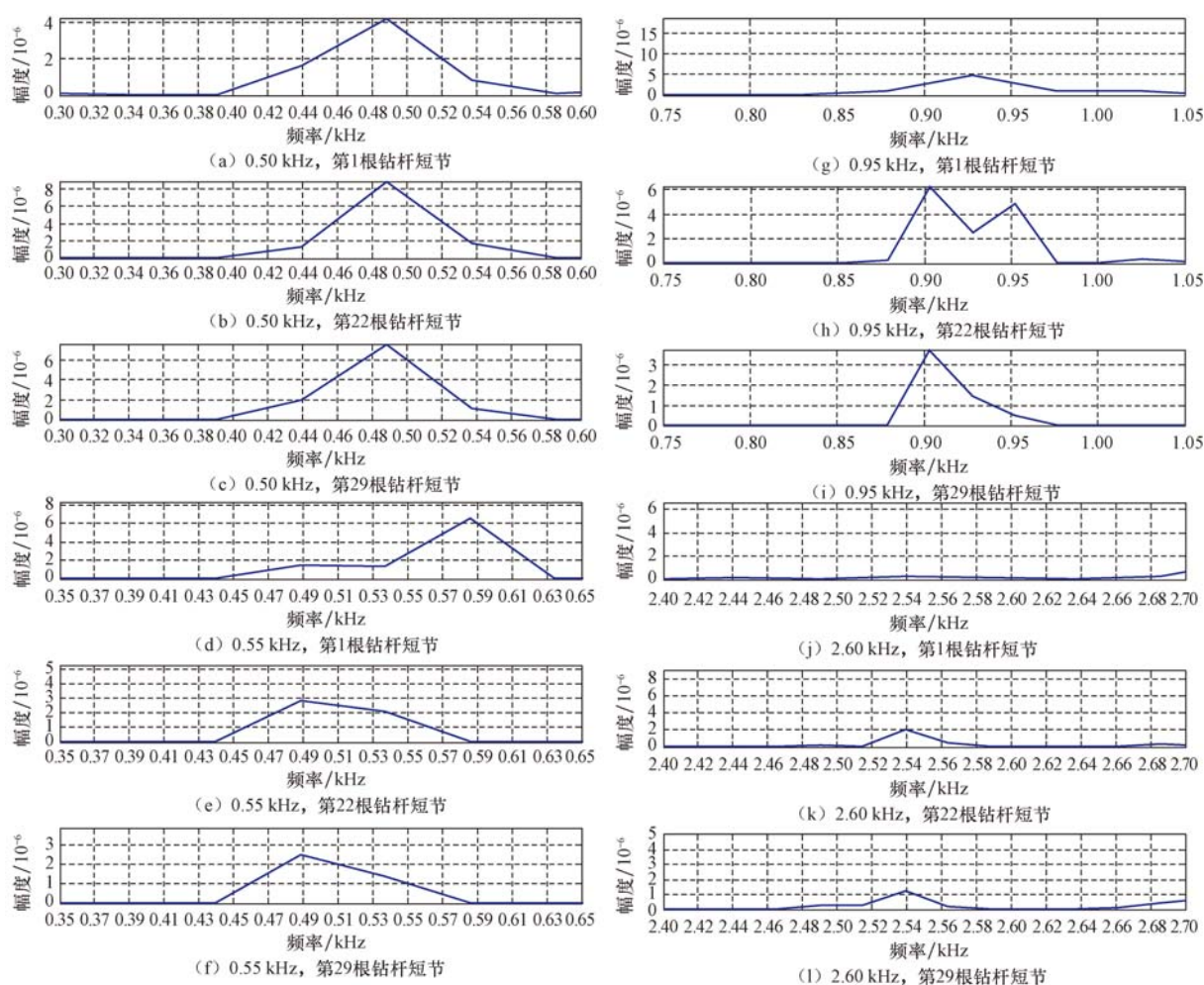


图 7 30 根钻杆短节的典型频率功率谱

Fig. 7 Typical power spectrum of 30 short length drill pipes

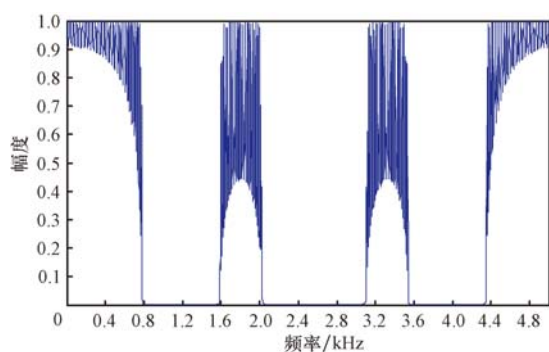


图 8 30 根钻杆短节理论频带特性

Fig. 8 Theory frequency properties of 30 short length drill pipes

理论模型不够准确,与实际存在一定的误差;二是声波在钻杆中传播色散现象严重,接收到的信号波形可能是其他频率点色散产生的,例如 30 根钻杆短节空气状态下频率 1.20 kHz 激励时的情况。

3 结 论

1) 理想钻柱的周期性结构使其在信号传输中呈现出通带和阻带交替的梳状滤波器结构特性,频带分布具有一定的周期性,在一个周期内通带先变窄再变宽,而阻带则先变宽再变窄,在一个周期内频带具有一定的对称性。

2) 声波传播试验表明,有些频带的声波可以通过钻柱传播,有些无法传播。试验结果与理论分析结果有一定的不同,主要有两方面原因:一是理论模型不够准确,与实际存在一定的误差;二是声波在钻杆中传播色散现象严重,接收到的信号波形可能由其他频率点色散产生。

3) 声波在钻杆中传播存在色散现象,某一频率点的信号能激起其他频率的信号,但在实际中不能

采用由色散产生的频率点。分析不同工况下的功率谱,频率点存在3种情况:信号处于通带中;传感器可以接收到信号,但受其他频率的干扰较大;信号处于阻带中,传播过程中频率点衰减较快。

参 考 文 献

References

- [1] 马哲,杨锦舟,赵金海.无线随钻测量技术的应用现状与发展趋势[J].石油钻探技术,2007,35(6):112-115.
Ma Zhe, Yang Jinzhou, Zhao Jinhai. Status quo and development trend of MWD technique[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(6): 112-115.
- [2] Camwell P L, McRory J G, Neff J M. Acoustic telemetry, with multiple nodes in drill string, used to achieve distributed MWD[J]. Drilling Contractor, 2009, 65(2): 30-35.
- [3] Neff J M, Camwell P L. Field test results of an acoustic MWD system[R]. SPE/IADC 105021, 2007.
- [4] 赵国山,管志川,刘永旺.声波在钻柱中的传播特性[J].中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(1):55-59.
Zhao Guoshan, Guan Zhichuan, Liu Yongwang. Acoustic transmission properties in drill string[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2010, 34(1): 55-59.
- [5] 赵国山,管志川,王以法,等.钻柱中声信号传输试验研究[J].石油机械,2010,38(1):1-4.
Zhao Guoshan, Guan Zhichuan, Wang Yifa, et al. An experimental study of the transmission of sound signal in drillstring[J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(1): 1-4.
- [6] 车小花,乔文孝,李俊,等.随钻测井钻柱声波的频谱特性[J].中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(6):66-70.
Che Xiaohua, Qiao Wenxiao, Li Jun, et al. Acoustic spectral characteristics of drill string of logging while drilling[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2008, 32(6): 66-70.
- [7] 刘峰,孙超,李斌.油管声波色散特性仿真[J].计算机仿真,2005,26(6):241-243.
Liu Feng, Sun Chao, Li Bin. Simulation of acoustical dispersion in wall of oil pipeline[J]. Computer Simulation, 2005, 26(6): 241-243.
- [8] Drumheller D S. Acoustical properties of drill strings[J]. Acoustical Society of America, 1989, 85(3): 1048-1064.
- [9] Louis Soulier. Method and system for the transmission of informations by electromagnetic wave; US, 6628206[P]. 2003-09-30.
- [10] 李成,丁天怀.不连续边界因素对周期管结构声传输特性的影响[J].振动与冲击,2006,25(3):172-175.
Li Cheng, Ding Tianhuai. Influence of discontinuous boundaries on acoustic transmission in periodic cascade with application to drill pipes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(3): 172-175.

水平井化学固砂加固井壁技术在辽河油田试验成功

辽河油田油井出砂十分普遍,90%以上的水平井均采用筛管防砂完井,但随着注汽轮次的增加,筛管变形、损坏日益严重。为此,辽河油田在综合分析水平井出砂原因、出砂特点的基础上,根据油层物性、出砂类型、流体特征及井身结构等资料,研制成功了适用于水平井温固型树脂高温固砂剂(耐温可达350℃),形成了水平井化学固砂加固井壁技术。

水平井化学固砂加固井壁技术具有作业简便、施工成功率高、适用范围广等特点,作为筛管防砂的补救措施,适用于细粉砂、套损井防砂,可有效延长检泵周期。该技术在辽河油田洼38-H305井和海1-东H231井两口水平井进行了现场试验,并取得了很好的防砂效果,其中洼38-H305井连续生产200d,累计产液4724.7m³,累计产油599.6t。

中国石化首个煤层气V形井组压裂成功

近日,随着延5-V1-P2井第3段压裂顺利完成,中国石化首个煤层气V形井组——延5-V1井组压裂获得圆满成功。

延5-V1井组位于鄂尔多斯盆地东南缘延川南气田谭坪构造带,由2口水平井(延5-V1-P1井、延5-V1-P2井)和1口排采井(延5-V1井)对接形成,目的是探索V形井技术、评价增产措施对煤层气水平井产能的影响、获取工业气流及落实煤层气产能、研究煤层气特殊工艺产能变化规律,也可为进一步煤层气整体开发工程、工艺技术参数的优化提供依据。