

周期性螺纹连接管结构中声波的频谱特性测试

刘永旺^{1,2}, 管志川², 都振川³, 金有海¹,
赵国山³, 杜彬彬², 李致远², 王庆²

(1. 中国石油大学化学工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580;
3. 中石化胜利工程有限公司钻井工程技术公司, 山东东营 257064)

摘要: 建立用于测试声波在钻柱信道中传输及衰减特性的试验装置, 对由螺纹连接构成的周期性管结构中声波的传播特性进行试验研究, 将利用传递矩阵法计算的结果与试验结果进行对比。结果表明: 声波在由螺纹连接构成的周期性管结构中传播时, 存在衰减及失真较小的通带和衰减及失真较大的阻带, 通带与阻带交替分布; 随着发射声波频率的升高, 通带声波的衰减增加, 当频率超过一定值时, 声波完全被吸收, 即使发射的声波处于通带, 亦难于接收; 理论计算结果与试验结果前4个通阻带吻合较好, 之后差异明显。这表明理论计算方法在计算低频通阻带分布时具有良好的适用性与计算精度, 在此范围内, 可以用于钻柱结构内声波传播频谱特性的分析及信息载波频率的选择。

关键词: 声波; 周期性管结构; 螺纹; 传递矩阵法; 频谱特性; 通带

中图分类号: TE 927; O 421⁺.5 **文献标志码:** A

引用格式: 刘永旺, 管志川, 都振川, 等. 周期性螺纹连接管结构中声波的频谱特性测试 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(2): 58-62.

LIU Yongwang, GUAN Zhichuan, DU Zhenchuan, et al. Spectrum characteristics testing of acoustic propagation in drill-string with periodic thread connections [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(2): 58-62.

Spectrum characteristics testing of acoustic propagation in drill-string with periodic thread connections

LIU Yongwang^{1,2}, GUAN Zhichuan², DU Zhenchuan³, JIN Youhai¹,
ZHAO Guoshan³, DU Binbin², LI Zhiyuan², WANG Qing²

(1. College of Chemical Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

3. Drilling Engineering & Technology Company of SINOPEC Shengli Engineering Company Limited, Dongying 257064, China)

Abstract: A testing equipment to study the transmission and attenuation behavior of acoustic waves in drill-string was designed, and the propagation characteristics of the acoustic waves in a periodic-thread-connection structure were studied. The experimental results were analyzed and compared with that calculated using a transfer matrix method. The results show that there exists a pass-band with smaller attenuation and distortion and a stop-band with bigger attenuation and distortion when acoustic waves propagate in the drill-string with periodic-thread-connections. The pass-band and stop-band appear alternatively in frequency and their difference reduces with the increase of acoustic frequency. When the frequency exceeds a certain value, the pass-band disappears, which means that the acoustic wave can be completely absorbed. The calculated four lowest-frequency pass-bands and stop-bands agree well with the experimental results, but there after their difference is greater for

收稿日期: 2014-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51404285); 中国博士后科学基金项目(2014M551985); 国家“863”计划项目(2012AA091601); 青岛市博士后研究人员应用研究项目(T1404028)

作者简介: 刘永旺(1983-), 男, 讲师, 博士, 主要从事石油工具研发、深井提速理论与方法及井下信息传输技术研究。E-mail: liuyongwang2003@163.com。

higher frequency. This shows that the theoretical method works well in the calculation of low-frequency pass-band and stop-band distribution, and can be used to analyze the characteristics of acoustic wave propagation in drill-string and to select proper frequency as an acoustic-information carrier in low frequency range.

Keywords: acoustic wave; periodic pipe structure; thread connection; transfer matrix method; frequency spectrum characteristics; pass-band

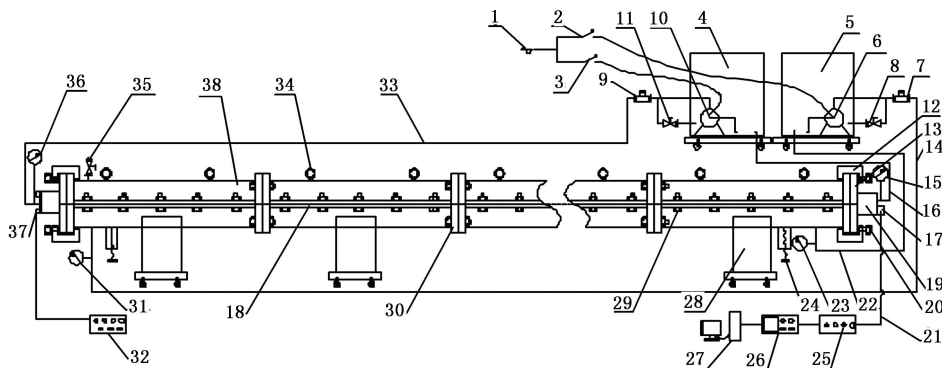
开发快速、可靠、高效、低成本的井下信息传输技术是目前油气井工程领域研究的一个重要方向^[1]。以声波作为信号载体,钻柱作为信息传输通道进行井下信息无线传输的方式由于不依赖于钻井液的性质,不受地层内磁性物质的干扰,并且实现设备的结构简单、成本较低、载波易于定向发射及信息传播速度极快等优点,成为当前井下信息传输技术研究的热点之一^[2-7]。在近几十年的研究中,众多学者根据弹性波在理想周期性管结构中传播的相关理论提出了多种钻柱中声传播特性的计算方法。比较常用的钻柱中声传播频谱特性计算方法大体可分为中心有限差分法和传递矩阵法两类^[8-16]。利用这两种方法计算相同的钻柱结构所获得的频谱特性中,通带与阻带的位置、宽度等分布规律基本相同,但透射系数存在着差异^[1]。仅从数学角度分析,传递矩阵法为解析算法,计算精度更高^[16]。尽管如此,上述理论计算过程忽略了吸收衰减、钻柱螺纹等因素,其计算结果的精度及适用范围有待试验验证。笔者

通过建立的测试声波在钻柱信道中传输及衰减特性的试验装置,对由螺纹连接构成的周期性管结构中声传播的频谱特性进行测试研究,并与理论计算结果对比分析,以期对理论计算结果的适应性进行评价,从而更加深入地了解钻柱中声波的传播特性。

1 试验装置

测试声波在钻柱信道中传输及衰减特性的试验装置见图1。试验装置由声波发射系统、井筒模拟系统、模拟钻柱和钻井液循环系统、声波接收及处理系统等组成。

声波发射系统由换能器和任意波发生器组成,任意波发生器通过换能器与模拟钻柱连接,可实现声波的发射功能;钻井液循环系统与模拟钻柱及井筒模拟系统连接,用于完成钻井液在井筒模拟系统与模拟钻柱构成的环空及模拟钻柱内的循环。模拟钻柱另一端连接声波接收及处理系统,用于声波信号的显示、记录、保存及进行时域和频域分析。



1-交流电源(360V); 2-2号泵开关; 3-1号泵开关; 4-1号钻井液池; 5-2号钻井液池; 6-2号泵; 7-环空液体流量计; 8-2号泵排量调节阀; 9-钻柱内液体流量计; 10-1号泵; 11-1号泵调节阀; 12-法兰卡紧套; 13-堵头法兰; 14-环空流体入口管汇; 15-钻柱内液体出口压力表; 16-钻柱内液体出口管汇; 17-加速度计; 18-加速度计转换接头; 19-模拟钻柱; 20-边法兰紧固螺栓; 21-声接收信号传输电路; 22-环空流体出口管汇; 23-环空流体出口压力表; 24-调节螺栓; 25-信号调理器; 26-示波器; 27-信号处理电脑; 28-模拟井筒支撑架; 29-锁紧螺栓; 30-模拟井筒法兰; 31-环空流体入口压力表; 32-任意波发生器; 33-钻柱流体入口管汇; 34-吊环; 35-排气阀; 36-钻柱内液体入口压力表; 37-换能器; 38-模拟井筒

图1 声传播特性试验装置结构

Fig.1 Structure of device for testing acoustic characteristic

模拟钻柱可以由不同尺寸不同类型的钻具组成。

柱中声波的频谱特性,确定了测试方案,如图2所示。

测试步骤:

2 试验方法及测试结果分析

2.1 1 m长钻杆组成的钻柱声波频谱测试

为了获得由1 m长钻杆通过螺纹连接组成的钻

(1)选择8根1 m长模拟钻杆,通过螺纹连接成模拟钻柱作为声波传输通道,钻杆的尺寸及参数见图3;钻杆一端安装变幅杆并与声波发射换能器

紧密胶结, 钻杆另一端面安装变幅杆和加速度计。

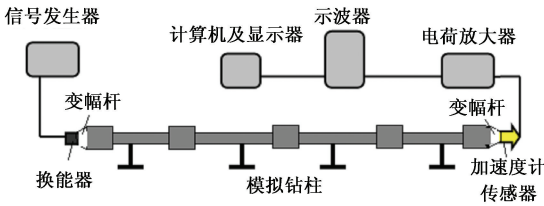


图2 频谱特性试验方案简图

Fig.2 Test plan of acoustic spectrum characteristic

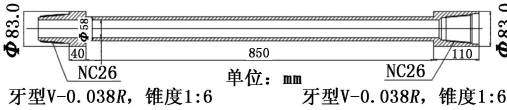


图3 1 m长钻杆尺寸

Fig.3 Simulated 1 m long drill pipe size

(2) 声波发射换能器端施加激励信号电压幅值 10 V, 波形为正弦波; 调节信号发生器的频率输出, 加速度计端采集数据记录接收信号幅值; 发射声波频率为 0.1 ~ 15 kHz, 频率每增加 100 Hz 记录一组数据。

对发射的正弦声波信号频率及幅值与接收到的声波信号频率与幅值之间的关系进行研究, 获得声波的频谱特性。由于换能器本身具有滤波功能, 即换能器存在谐振频率, 当激励电压频率为谐振频率时, 发射出的声波强度最强, 在谐振频率以外的频率上, 发射出的声波强度较低, 所以取接收到的信号与发射出的信号的比值作为分析对象更具有可信性。实测 1 m 长钻杆组成的钻杆的频谱特性如图 4 所示。为了获得理论计算方法的精度及适用范围, 利用传递矩阵法^[2]对该钻杆的频谱特性进行计算, 结果如图 5 所示。

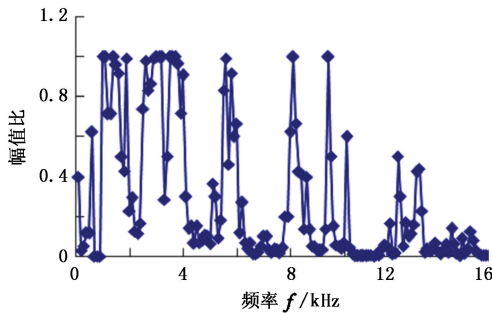


图4 实测1 m长钻杆组成的钻杆声波传播特性曲线

Fig.4 Propagation characteristics of acoustic in drilling string composed by 1 m long drill pipe

定义实测接收到的信号与发射出的信号的比值与频率关系的曲线为声波传播特性曲线。对比图 4 和图 5 可以看出, 由 1 m 长钻杆组成的钻杆中声波传播特性曲线呈现以下规律:

(1) 实测钻杆声波传播特性曲线与理论计算钻杆频谱特性曲线具有一定的相似性, 存在着衰减相对较小的频带与衰减较大的频带, 即通带和阻带, 且通带与阻带交替分布。

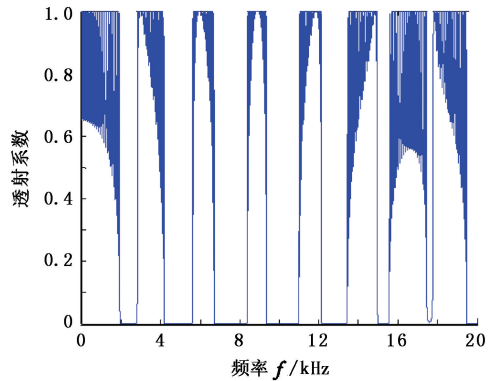


图5 传递矩阵法计算 1 m 长钻杆组成的钻杆透射系数
Fig.5 Transmission coefficient of drill string composed of 1 m long drill pipe calculation by transfer matrix method

(2) 实测钻杆声波传播特性曲线的前 4 个通带位置与理论计算钻杆频谱特性曲线非常接近, 不同点在于频率小于 1 kHz 时, 实测钻杆声波传播特性曲线幅值较小, 其他的通带曲线顶部未出现大量的毛刺曲线。

(3) 当发射声波的频率大于 10 kHz 时, 实测钻杆声波传播特性曲线与理论计算钻杆频谱特性曲线出现较大差异, 表现为通带位置差异。实测钻杆声波传播特性曲线仍然出现通带与阻带交替分布的规律, 但通带与阻带的位置与理论计算结果不吻合。通带声波的透射情况差异明显, 实测钻杆声波传播特性曲线在大于 10 kHz 的高频带出现了衰减, 且衰减幅度随频率的增加而增大, 与理论计算的透射系数差异明显。

发射 10 kHz 以下声波实测钻杆声波传播特性曲线幅值较小的原因在于: 声波发射装置为压电陶瓷换能器, 主要用来产生中高频的声波及超声波, 利用其所产生低频波强度较小, 传输一定距离后很难探测到, 因此下述测试不再测试频率低于 10 kHz 的声波。

2.2 1.5 m 长钻杆组成的钻杆声波频谱测试

为了研究组成钻杆的钻杆本体长度发生变化时通阻带分布规律的变化, 为实际井下信息声波传输选频提供指导, 对由 1.5 m 长钻杆组成的钻杆中声波的频谱特性进行测试。确定的测试方案同图 2 所示。

测试步骤亦同上, 但钻杆存在差异, 选择 7 根 1.5 m 长的模拟钻杆连接成模拟钻杆作为声波传输

通道,钻杆的具体尺寸参数如图6所示。取接收到的信号与发射出的信号的比值作为分析对象,得出1.5 m钻杆组成的钻柱的声波传播特性曲线,并与传递矩阵法理论计算结果进行对比分析。

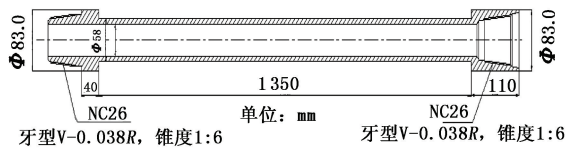


图6 1.5 m长钻杆尺寸

Fig. 6 Simulated 1.5 m long drill pipe size

实测1.5 m钻杆组成的钻柱的声波传播特性曲线如图7所示,基于传递矩阵法^[2]的理论计算结果如图8所示。

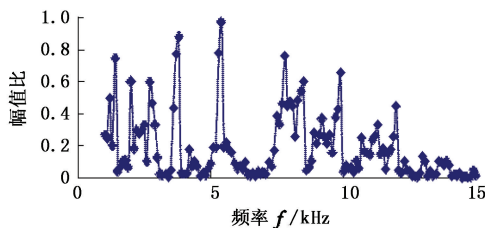


图7 实测1.5 m长钻杆组成的钻柱声波传播特性曲线

Fig. 7 Propagation characteristics of acoustic in drilling string composed by 1.5 m long drill pipe

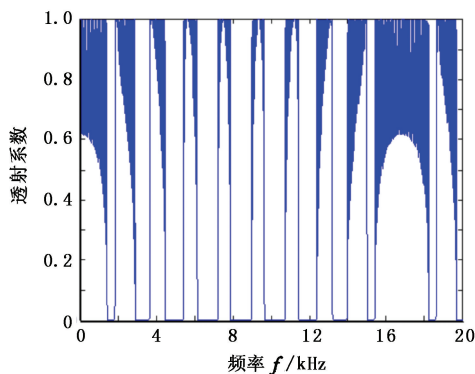


图8 传递矩阵法计算1.5 m长钻杆组成的钻柱透射系数

Fig. 8 Transmission coefficient of drill string composed of 1.5 m long drill pipe calculation by transfer matrix method

对比图7、8可以看出,声波传播特性曲线呈现以下规律:

(1) 实测1.5 m钻杆组成的钻柱声波传播特性曲线与理论计算钻柱频谱特性曲线同样具有一定的相似性,存在着衰减相对较小的频带与衰减较大的频带,即通带和阻带,通带与阻带交替分布。

(2) 实测钻柱声波传播特性曲线的前4个通带位置亦是与理论计算钻柱频谱特性曲线非常接近。第4个通带以后,实测钻柱声波传播特性曲线与理

论计算钻柱频谱特性曲线出现较大的差异。

1.5 m钻杆与1.0 m钻杆组成的钻柱的测试规律基本一致,说明利用理论方法分析钻杆结构的频谱特性在前4个通带具有较强的实用性,而高频端应该更多地依赖于试验结果。

2.3 频谱测试结果探讨

对比图4与图7可以看出:在相对低频范围内,随着组成钻柱的钻杆本体长度的增加,实测钻柱频谱特性曲线表现出相同的规律,即通带向低频端移动,通带与阻带数量变多,宽度变窄,这与理论计算结果一致。第4通带以后的通阻带位置与理论计算结果吻合性很差,且通带声波的衰减加剧,当频率足够高时不再表现通带特性,声波全部衰减。

相对高频段通带位置差异的原因是:理论计算存在前提条件,即钻杆的接头连接处忽略螺纹的影响,等效为均匀介质。由于试验所用模拟钻柱的接头和钻杆用螺纹连接,而且连接存在不紧密的现象,声波在通过钻杆和接头连接处时,会在螺纹的截面发生多重反射,成为试验和理论结果差异比较大的主要原因。另外一个原因是螺纹连接处存在着扭矩,此扭矩是否对声传播特性产生影响还有待于进一步研究。试验过程中的钻柱轴线并非为直线,与理论计算时把钻柱轴线并等效为直线存在差异,理论计算时如何考虑轴线为非直线有待深入研究。

实测钻柱声波传播特性曲线在大于10 kHz的高频带出现了衰减而理论计算未出现此状况的原因在于,理论计算假设声波在均匀介质中能够无衰减地传输,实际声波在传输过程中能量会不断损耗,而且声波频率越高衰减越严重,只是这种衰减不会对通阻带的位置产生影响,反映在频谱结构上只是高频部分频率对应振幅相对减小。

3 结论

(1) 周期性螺纹连接管结构中声波传播存在通带与阻带,且通、阻带交替分布。理论计算结果与试验结果低频段通带存在较好的一致性(前4个通带),高频段理论计算结果与试验结果差异明显。利用理论计算频谱的前4个通带可以直接指导声载波的选择。

(2) 实测高频段声传播的频谱特性曲线表现出较强的衰减特性,且并未出现理论计算结果所述的在一个频带周期内随着频率的增加通带先变窄再变宽,阻带则先变宽再变窄,频带周期重复出现的性质。

(3) 随组成钻柱的钻杆本体长度的增加,实测钻柱频谱特性曲线中通带向低频端移动,通带与阻带数量变多,宽度变窄。

(4) 井下信息声波传输过程中声载波应选择在低频通带范围内,但频率也不可以过低,因为过低频率的声波其发生装置体积较大,与井下有限空间存在矛盾。

参考文献:

- [1] 刘永旺. 井下信息声波传输系统理论与方法研究[D]. 青岛:中国石油大学石油工程学院,2013.
LIU Yongwang. Research on the theory and method of downhole information acoustic waves transmitted system [D]. Qingdao: School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, 2013.
- [2] 李志刚,管志川,王以法. 随钻声波遥测及其关键问题分析[J]. 石油矿场机械,2008,37(9):6-9.
LI Zhigang, GUAN Zhichuan, WANG Yifa. Acoustic telemetry while drilling and analysis on its key problems [J]. Oil Field Equipment, 2008,37(9):6-9.
- [3] 赵国山. 钻柱中声传播特性的理论及实验研究[D]. 青岛:中国石油大学石油工程学院,2010.
ZHAO Guoshan. Theoretical and experimental study of acoustic transmitting characteristics within drillstrings [D]. Qingdao: School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, 2010.
- [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] 隆志强. 钻柱中声波传播特性的实验研究[D]. 青岛:中国石油大学石油工程学院,2011.
LONG Zhiqiang. Experimental study of acoustic transmitting properties of drillstrings [D]. Qingdao: School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, 2011.
- [6] DRUMHELLER D S. Acoustical properties of drill strings [J]. J Acoust Soc Am, 1989, 85: 1048-1064.
- [7] GAO L, GARDNER W, ROBBINS C, et al. Limits on data communication along the drillstring using acoustic waves[R]. SPE 95490, 2005.
- [8] 管志川,刘永旺,赵国山,等. 钻柱结构对声波传输特性的影响[J]. 石油学报,2012,33(4):687-691.
GUAN Zhichuan, LIU Yongwang, ZHAO Guoshan, et al. An influence of the drill-string structure diversity on acoustic transmission characteristic [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(4):687-691.
- [9] 赵国山,管志川,都振川,等. 井下钻柱信道的声传播特性[J]. 石油学报,2013,34(1):151-156.
ZHAO Guoshan, GUAN Zhichuan, DU Zhenchuan, et al. Acoustic propagation characteristics of the communication channel of downhole drill-string [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013,34(1):151-156.
- [10] 张美玲,闫向宏,刘文丽,等. 非周期型理想钻柱系统声传播特性研究[J]. 振动与冲击,2012,31(1):72-75.
ZHANG Meiling, YAN Xianghong, LIU Wenli, et al. Propagation characteristics of acoustic wave along a non-periodic ideal drill string system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,31(1):72-75.
- [11] 刘永旺,管志川,隆志强,等. 钻柱中声传播的影响因素[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(5):89-95.
LIU Yongwang, GUAN Zhichuan, LONG Zhiqiang, et al. Influence factors of acoustic transmission in drill strings [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012,36(5):89-95.
- [12] REEVES M E, CAMWELL P L, MCRORY J. High speed acoustic telemetry network enables real-time along string measurements, greatly reducing drilling risk[R]. SPE 145566, 2011.
- [13] FARRAJ A K, MILLER S L, QARAQE K A. Channel characterization for acoustic downhole communication systems [R]. SPE 158939, 2012.
- [14] 李成,丁天怀. 信道阻尼边界对井下钻杆声传输的影响[J]. 振动与冲击,2006,25(6):17-20.
LI Cheng, DING Tianhuai. Effect of damping boundary conditions on acoustic transmission of drill strings [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006,25(6):17-20.
- [15] 马西庚,李超,柳颖. 钻杆中声波传输特性测试[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(4):70-74.
MA Xigeng, LI Chao, LIU Ying. Transmission characteristics test of acoustic wave in drill string [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(4):70-74.
- [16] 车小花,乔文孝. 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. 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.