◇ 研究报告 ◇

钻具遇卡声波检测理论与实验研究*

季运佳^{1,2,3} 郭同政⁴ 李 海⁴ 何 晓^{1,2,3†}

(1 中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 北京市海洋深部钻探研究中心 北京 100190)

(4 中石化胜利石油工程有限公司测井公司 东营 257096)

摘要:石油钻探过程中,钻具经常发生陷入泥沙中不能自由活动进而卡在井下的事故。该文提出使用单发双 收声系来检测钻具遇卡的方法,首先使用有限差分模拟了钻具外为自由流体和泥沙两种介质时的钻铤波响应, 通过对比远近接收器的钻铤波衰减,发现泥沙卡钻情况下的钻铤波衰减要明显大于自由钻具情况。随后建立 了实验模型对理论结果进行了验证。理论模拟与实验结果均表明声波方法可用以检测钻具遇卡事故,从而确 定卡钻的深度位置,为解卡钻作业提供解释依据。

关键词:卡钻;钻铤波;衰减;单发双收声系

中图法分类号: O429 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2021)05-0754-06 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2021.05.014

Theoretical and experimental research on the acoustic detection of stuck drill pipes

JI Yunjia^{1,2,3} GUO Tongzheng⁴ LI Hai⁴ HE Xiao^{1,2,3}

(1 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Beijing Engineering Research Center of Sea Deep Drilling and Exploration, Beijing 100190, China)

(4 Well Logging Company, Shengli Petroleum Engineering Co. Ltd. of SINOPEC, Dongying 257096, China)

Abstract: During oil drilling, drill pipes often get stuck in the mud or sand and cannot move freely. In this work, we propose the use of the single-emission and double-receiving acoustic system to detect locations of stuck pipes. First, we simulate the responses of collar waves using finite difference method when the annulus between the drill pipe and formation is filled with fluid and sand, respectively. By comparing the attenuation of collar waves in these two cases, we found that the attenuation in the case of stuck pipe is larger than that in the case of free pipe. An experiment is then carried out to verify the above theoretical results. Both the theoretical and experimental results show that it is feasible to use the acoustic technique to detect stuck-pipe accidents and identify corresponding depths, which help the operation of releasing stuck pipes.

 ${\bf Keywords:} \ {\rm Stuck \ pipe; \ Collar \ waves; \ Attenuation; \ Single-emission \ and \ double-receiving \ system$

²⁰²⁰⁻¹²⁻²⁹ 收稿; 2021-01-24 定稿

^{*}国家自然科学基金项目(11774373, 11734017, 42074215)

作者简介:季运佳(1993-),男,河北沧州人,博士研究生,研究方向:随钻声波测井。

[†]通信作者 E-mail: hex@mail.ioa.ac.cn

0 引言

石油钻井过程中,由于复杂的地质构造和不可 预见的因素、钻井液性能与井内情况的不吻合及其 滞后性,以及措施不当、检查不严、操作不慎等各种 原因都有可能造成钻具陷入泥浆或泥沙中从而不 能在井内自由活动,这种现象称之为卡钻^[1-2]。卡 钻事故发生后,需要确定卡点位置,目前工程卡点测 量方式通常采用注磁式和扭矩式。但注磁方式受低 温影响大,有时不能准确确定卡点位置;而扭矩式操 作繁琐复杂、施工时间长,同时还极易受到井内管 具长度的影响。

声波检测技术是解决卡钻定量评价难题的潜 在可行手段。在固井质量评价中利用套管波响应特 征评价套管与水泥环之间的粘接状况以及探测套 后介质属性,已经有非常成熟的应用^[3-6]。实际情 况下,钻具在井孔中的模型与套管井模型非常相似, 它们都是柱面径向分层的物理模型,由里到外均为 泥浆、钢管、固体或液体、地层,且钻具和套管尺寸较 为接近;待测的对象都是钻具或套管外介质,需要识 别介质的属性;声波仪器都可放置在最内层泥浆之 中。根据上述的几点共同之处,本文考虑将固井质 量声波检测方法应用到钻具卡钻检测之中。

关于以上柱状分层模型的理论研究已相对较为完善,Tubman等^[7]早在1984年就研究了套管井中接收的全波信号,随后又研究了套管外固结质量 较差时的井孔声场^[8];Zhang等^[9]研究了固井水泥 层内外界面固结不好时的泄漏模式和首波;进一步 地,Wang等^[10]研究了固结水泥厚度对井孔声场的 影响;Jiang等^[11]探究了不同水泥胶结情况下的随 钻固井质量评价。

钻铤波是在钻具中传播的导波,也是仪器接收 到的首波。钻铤波的幅度和衰减等响应特征是评价 钻具外介质属性的重要评判参数。杨玉峰等^[12]研 究了钻铤完好和截断情况下接收到的钻铤波;Wang 等^[13]研究了钻铤自身性质对钻铤波速度频散的影 响,发现钻铤横波速度对频散影响较大;He等^[14]将 钻铤波分为直接钻铤波和间接钻铤波,并通过波场 分离单独研究了各自的传播特性;Zheng等^[15]通 过解析方法单独研究了钻铤波的频散和激发特性, 发现地层性质不影响钻铤波速度频散但会影响其 激发强度。 基于前人的一系列研究,本文拟借鉴固井质量 评价中的声波检测方法,使用单发双收声系记录到 的钻铤波响应特征来检测钻具遇卡事故。首先使用 有限差分方法模拟了钻具外为流体和泥沙介质时 接收到的钻铤波,随后开展了实验,结合理论与实际 数据分析结果,证实了使用声波检测技术进行卡钻 检测的有效性。

1 理论模拟

钻具在井孔中的模型是柱面径向分层的物理 结构,考虑到模型的对称性,图1仅给出了该模型的 二维示意图,从左到右的4层介质分别表示流体、钻 具、流体或泥沙、地层。图1(a)和图1(b)分别表示钻 具自由状态和遇卡状态模型,其区别在于钻具与地 层的环向空间中充填的是流体还是泥沙。采用单发 双收声系,依照固井质量检测声波仪器,两个接收器 的源距分别设定为91.44 cm和152.4 cm。钻具外径 为127 mm,内径为100 mm,井径为244.5 mm。流 体假设为理想流体,钻具、泥沙、地层均被看作弹性 固体。



图 1 钻具置于井孔内的径向分层模型二维示意图 Fig. 1 A 2D schematic diagram of the drill collar in the borehole

针对该模型,本文采用柱坐标系下的二维 时域有限差分方法(Finite difference time-domain, FDTD)进行模拟仿真并在计算区域外设置了完全 匹配层(Perfectly matched layer, PML)^[16],用以 吸收传到边界处的声波,从而可模拟模型无穷大 的状态。声源为点源激发,源函数采用余弦包络 脉冲,具体表达式见文献[17]。有限差分计算区 域为0.75 m×3 m (r × z), 径向和轴向网格大小 均为2 mm, 时间采样长度为10⁻³ s, 时间间隔为 1.96 × 10⁻⁷ s。各层介质参数见表1。声源主频为 20 kHz。

表1 钻具遇卡模型中的介质参数 Table 1 Parameters of the model

	纵波速度/ (m·s ⁻¹)	横波速度/ (m·s ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)
钻具内流体	1500		1000
钻具	5900	3300	7800
钻具外流体	1500		1000
钻具外泥沙	1540	500	1500
地层	3630	2200	2300

本文拟采用远近源距接收器记录的首波(钻铤 波)的衰减大小来区分钻具为自由状态还是遇卡状态。为引入钻铤波的衰减,首先将波形幅度定义 如下:

$$A_i = \int_t^{t+\Delta t} \left| p_i \right|^2 \mathrm{d}t,\tag{1}$$

其中, p_i 为声压,i=1,2分别对应近源距和远源距 接收器; Δt 为截取的时间窗长,这里选择 60 μ s。

定义衰减率α为

$$\alpha = -20 \lg \left(\frac{A_2}{A_1}\right) / L, \qquad (2)$$

其中,L表示两接收器间的距离,单位为ft;衰减率 α 的单位是dB/ft。

图 2(a) 和图 2(b) 分别给出了自由钻具和遇卡 钻具的钻铤波时域信号及其衰减情况, 图中给出了 近源距和远源距两个接收器记录的 0.5 ms 内的时 域波形, 计算的衰减率标于图形左下角。对比衰减 率可知钻具外为自由流体和泥沙时的衰减率有较 大差异, 这是因为泥沙与钢制钻具的声阻抗差异较 水与钻具的声阻抗差异更小, 导致钻具遇卡时钻铤 波泄漏出的能量较多, 从而表现出的衰减较大。基 于以上结果, 理论上可以根据钻铤波衰减大小来检 测卡钻事故。此外, 本文计算并对比了不同尺寸井 眼下计算的钻铤波衰减率, 发现井孔尺寸不影响计 算的钻铤波衰减率, 也即该方法判断钻具遇卡具有 普适性, 不受井眼尺寸的影响。为避免冗余, 这里不 再展示其他井孔尺寸的计算结果。

其次,本文还探究了不同卡钻介质参数下对 钻铤波时域信号及衰减率的影响。图3(a)给出了 固定卡钻介质的纵横波速度(1500 m/s, 500 m/s) 不变, 密度分别为1000 kg/m³、1500 kg/m³和 2000 kg/m³时记录的钻铤波信号,根据公式(2) 计算的衰减率分别为6.01 dB/ft、7.12 dB/ft和 8.23 dB/ft; 图3(b)给出了固定卡钻介质的密度 (1000 kg/m³)和横波速度(500 m/s)不变,纵波速 度分别为1000 m/s、1500 m/s和2000 m/s时记录 的钻铤波信号,计算的衰减率分别为6.26 dB/ft、 6.01 dB/ft和5.67 dB/ft;图3(c)给出了固定卡钻 介质的密度(1000 kg/m³)和纵波速度(1500 m/s) 不变, 横波速度分别为0 m/s、200 m/s和500 m/s 时记录的钻铤波信号, 衰减率分别为3.41 dB/ft、 4.65 dB/ft 和 6.01 dB/ft。图 3(a) 与图 3(c) 表明随 卡钻介质密度和横波速度的增大,两个接收器记 录的波形幅度减小并且基于两个接收器计算的衰 减率增大。而当卡钻介质纵波速度逐渐增大时,如 图 3(b) 所示, 近源距接收器记录的波形幅度在窗长 60 µs内略微增大,而远源距接收器的波形几乎不 变,导致计算的衰减率随纵波速度的增大而略微减 小。以上分析结果表明,记录的钻铤波信号可能对 卡钻介质密度和横波速度的变化更为敏感。





Fig. 2 Recorded collar waves with free and stuck collars



图 3 不同卡钻介质参数下记录的钻铤波信号

Fig. 3 Recorded collar waves with different parameters of the stuck material

2 实验验证

下面建立实际模型并进行实验,验证以上理论 模拟结果。图4(a)展示了建立的实验模型及装置, 实验中使用的是单发三收声系,声源主频为20 kHz。 3个接收器按照源距由近及远分别为R1、R2、R3。 声系置于加满水的钢管内,并使用扶正器使其居中。 地层用红色桶中的固结水泥来代替,钻具外环空间 加入水来模拟钻具自由状态,加入干沙和湿沙模拟 钻具遇卡状态。示波器中从上到下分别显示了R1、 R2、R3接收的3道波形,可明显看到其到时逐渐延 迟且幅度降低。为更清晰地理解此模型,图4(b)对 实验模型抽象化并显示成二维示意图的形式,各长 度参数均标注在图中。



(a) 实验模型及装置



图4 实验模型、装置及简化二维示意图 Fig. 4 Experiment model

为更清晰地显示幅度变化和衰减情况,这里仅 使用R1和R3两个接收器,间距为30.48 cm。图5 分别给出了钢管(钻具)外为水、干沙和湿沙3种介 质时两接收器记录的钻铤波信号。计算的衰减率同 样置于每个子图的左下方。对比钻具外不同介质情 况下的衰减率可以看到,钻具外为干沙和湿沙时的 衰减率明显大于钻具外为水的情况,且湿沙卡钻的 衰减率要大于干沙卡钻的衰减率。通过对图5中窗 长为60 µs内的波形做傅里叶变换可以得到其幅度 谱,如图6所示。从图6中可以看出,钻具外为湿沙 时,两个接收器幅度差最大;其次为干沙情况,自由 钻具时幅度差异最小。

以上实验结果表明相对于自由钻具,遇卡钻具 的钻铤波衰减更为明显,可以此来判断钻具是否遇 卡及遇卡深度,因此本实验验证了上述理论模拟结 果的正确性。实际计算过程中,窗长的选取影响计 算的衰减率,合理的选择窗长有利于扩大钻具自由 和遇卡的计算衰减差异,从而更清晰地识别钻具遇 卡事故。图7给出了钻具外为水、干沙和湿沙时,选 取的窗长从60 µs到110 µs对应的衰减率,并绘制 成散点图。从图7中可以看出,窗长为60 µs时,钻 具遇卡时的衰减大约是自由钻具下的2倍,分别约 为4 dB/ft和2 dB/ft;而窗长为70 µs时,钻具遇卡 和自由状态的衰减差异较小,可以看到干沙遇卡的 衰减大约比自由状态下多0.5 dB/ft,湿沙遇卡的衰 减比自由状态下约多1 dB/ft;窗长为80 µs时,钻具



图 5 实验条件下,钻具外分别为流体、干沙和湿沙时的钻铤波信号

Fig. 5 Recorded collar waves with fluid, dry sand, and wet sand outside the drill collar in the experiment 遇卡和自由状态的衰减差异较70 μs的情况要大一些,但是同样劣于窗长为60 μs 情况;窗长90 μs到 110 μs时,钻具遇卡与自由状态的衰减差异也比较 大。因此,以本实验为例,为更清晰地辨识钻具是否 遇卡,以上分析结果表明波形窗长应介于1.0 ~ 1.5 倍波形的准周期之间。





Fig. 6 Amplitude spectra of 60 μ s waveforms of collar waves with fluid, dry sand, and wet sand outside the drill collar in the experiment



图 7 选取不同窗长时计算的衰减率

Fig. 7 Attenuation values with varying window lengths

3 结论

为探究声波技术能否应用于钻具遇卡事故的 检测,本文首先通过二维时域有限差分方法计算了 钻具外分别为自由流体和泥沙时的井孔声场,分析 了远近两接收器接收到的钻铤首波信号并计算了 两种情况下钻铤波信号的衰减率,结果表明钻具遇 卡时的钻铤波衰减明显大于钻具自由的情况。此 外,应用控制变量法分别探究了卡钻介质密度、纵横 波速度等3个参数对记录的钻铤波信号的影响。分 析表明记录的钻铤波信号可能对卡钻介质密度和 横波速度的变化更为敏感。随后通过分析钻具外为 水、干沙和湿沙3组实验数据,发现钻具外为干沙和 湿沙时的衰减要明显大于钻具外为水时的衰减,且 湿沙卡钻的衰减要大于干沙卡钻。理论与实验结果 都表明,声波技术可应用于钻具遇卡事故的检测,可 通过分析远近两接收器的钻铤波信号衰减大小来 评价钻具遇卡情况。此外,窗长的选取对计算的衰 减率有影响,合理的选择窗长有利于扩大钻具自由 和遇卡的计算衰减差异,从而更清晰地识别钻具遇 卡事故。

参考文献

- 田相元,王相磊,曹庆和,等.小井眼卡钻现象分析 [J]. 断块 油气田,2002,9(6):79-82,94.
- [2] 张林强. 井下卡钻分析及处理[J]. 海洋石油, 2007, 27(3): 112-115.

- [3] 陈晓华. 声波测井固井质量评价研究 [J]. 地球物理测井, 1991, 15(3): 191-196, 5.
- [4] 李盛清,林剑松,江灿,等. 随钻声波测井固井质量评价理论与数值模拟研究 [J]. 地球物理学报, 2020, 63(7): 2762–2773.
 Li Shengqing, Lin Jiansong, Jiang Can, et al. Theoretical and numerical simulation of LWD acoustic cement logging[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(7): 2762–2773.
- [5] 陈德华. 低密度水泥固井的井孔声场及其在水泥胶结质量评价中的应用 [D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 2007.
- [6] 唐晓明,郑传汉. 定量测井声学 [M]. 北京:石油工业出版社, 2004.
- [7] Tubman K M, Cheng C H, Toksöz M N. Synthetic full waveform acoustic logs in cased boreholes[J]. Geophysics, 1984, 49(7): 1051–1059.
- [8] Tubman K M, Cheng C H, Cole S P, et al. Synthetic full-waveform acoustic logs in cased boreholes, II—Poorly bonded casing[J]. Geophysics, 1986, 51(4): 902–913.
- [9] Zhang X, Wang X, Zhang H. Leaky modes and the first arrivals in cased boreholes with poorly bonded conditions[J].
 Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2016, 59(2): 624301.
- [10] Wang H, Michael F. The wavefield of acoustic logging in a cased-hole with a single casing–Part I: a monopole tool[J]. Geophysical Journal International, 2018, 212(1): 612–626.
- [11] Jiang C, Chen X, Su Y, et al. Cased borehole acousticwave propagation with varying bonding conditions: theoretical and experimental modeling[J]. Geophysics, 2019, 84(4): D161–D169.
- [12] 杨玉峰, 关威, 崔乃刚, 等. 随钻声波测井 FDTD 模拟及钻铤 波传播特性研究 [J]. 地球物理学报, 2016, 59(1): 368-380.
 Yang Yufeng, Guan Wei, Cui Naigang, et al. FDTD simulation and analysis of the collar wave propagation in acoustic logging while drilling[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(1): 368-380.
- [13] Wang H, Michael F, Tao G, et al. Investigation of collar properties on data-acquisition scheme for acoustic loggingwhile-drilling[J]. Geophysics, 2016, 81(6): D611–D624.
- [14] He X, Wang X, Chen H. Theoretical simulations of wave field variation excited by a monopole within collar for acoustic logging while drilling[J]. Wave Motion, 2017, 72: 287–302.
- [15] Zheng X, Hu H. A theoretical investigation of acoustic monopole logging-while-drilling individual waves with emphasis on the collar wave and its dependence on formation[J]. Geophysics, 2017, 82(1): D1–D11.
- [16] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. Journal of Computational Physics, 1994, 114(2): 185–200.
- [17] 崔志文. 多孔介质声学模型与多极源声电效应测井和多极随 钻声测井的理论与数值研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2004.