

◇ 研究报告 ◇

随钻新型隔声体的声学性能研究*

邹晓晶¹ 郑晓波² 寇兴¹ 王魏魏¹ 关威^{1†}

(1 哈尔滨工业大学航天学院 哈尔滨 150001)

(2 中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

摘要: 随钻声波测井近年来逐渐发展为新兴的勘探方式,但钻探过程中产生的钻铤波会影响地层信号的提取,众多研究学者将如何更有效地提取地层信号作为研究的重点课题。该文基于声子晶体理论设计了一种新型隔声体,相对于传统刻槽结构能够更好地压制钻铤波。首先基于周期结构理论,利用有限元软件计算了不同刻槽结构的能带图,相比于传统刻槽结构,新型隔声体有更宽的带隙,说明新型刻槽结构可以更有效地阻隔钻铤波。接着在测井模型中对刻槽结构进行频响函数曲线的计算,验证了新型刻槽结构隔声效果在所计算频率范围内优于传统刻槽结构。然后分析了在能带计算和频响曲线计算下隔声效果最好的声源频率(17 kHz 和 22 kHz)时新型刻槽结构的时间慢度相关法处理对比。最后对比声源频率 17 kHz 下,新型刻槽和传统刻槽结构时间慢度相关法信号处理的结果,可以发现,声源频率 17 kHz 时新型刻槽结构能更好地提取地层折射横波和纵波。

关键词: 能带;有限元法;频响曲线;信号处理

中图法分类号: TE2

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2021)05-0760-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2021.05.015

Acoustic study of drill collar grooving based on a new type of wave insulation body

ZOU Xiaojing¹ ZHENG Xiaobo² KOU Xing¹ WANG Weiwei¹ GUAN Wei¹

(1 School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2 Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Drilling with acoustic logging has gradually developed into an emerging exploration method in recent years. But the collar waves generated during the drilling process can affect the extraction of formation signals. Many researchers have made the extraction of formation signals more effective a key topic of research. In this paper, a new type of sound isolator is designed based on phononic crystal theory, which can better suppress the collar waves compared with the traditional grooved structure. Firstly, based on the periodic structure theory, the band diagrams of different grooved structures were calculated by using the finite element software. The new sound isolator has a wider band gap compared with the traditional grooved structure, which indicates that the new grooved structure can block the collar waves more effectively. Then, the frequency response function curve of the grooved structure was calculated in the logging model, and it was verified that

2021-05-04 收稿; 2021-07-12 定稿

*国家自然科学基金项目(11734017, 41874129)

作者简介: 邹晓晶(1996-), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 研究方向: 弹性波在地球物理中的应用。

†通信作者 E-mail: guanw@hit.edu.cn

the sound insulation effect of the new grooved structure was better than that of the traditional grooved structure in the calculated frequency range. Then we analyzed the STC processing of the new grooved structure at the source frequencies (17 kHz and 22 kHz) with the best sound insulation effect under the band calculation and frequency response curve calculation. We finally compared the STC signal processing of the new grooved structure and the conventional grooved structure at the source frequency of 17 kHz. It can be found that the new groove structure can better extract the refracted shear waves and compressional waves when the sound source frequency is 17 kHz.

Keywords: Bandgap; Finite element method; Frequency response curve; Signal processing

0 引言

随钻声波测井技术自20世纪90年代出现后^[1], 由于其具有的实时性、地质导向、不依靠仪器重力牵引等优势, 迅速成为油气勘探领域的主流选择, 特别是在大斜度井和水平井中被普遍采用。与传统电缆测井不同, 随钻声波测井时沿厚壁钻铤传播的幅度较大的钻铤波, 给地层纵横波的提取造成了很大麻烦。自从Legget等^[2]报道在钻铤表面刻槽可以有效阻隔钻铤波起, 随钻测井隔声体的设计成为了众多学者研究的课题。传统的刻槽有外刻槽、内刻槽、内外刻槽隔声体等结构, 文献[3-5]的研究表明, 刻槽隔声体的隔声效果受到凹槽的长度、深度、间隔、对称性、数目、钻铤壁厚以及截面形状的影响。Yang等^[6]发现相比于外刻槽结构, 内刻槽可以同时减少钻铤波的高频和低频部分。然而, 在实际应用中, 各种地层提取清晰的纵波仍然是一项艰巨的工作, 现有的传统刻槽结构在某些情况下依然无法有效地获得准确的纵横波速度, 有必要进一步探索新的钻铤波隔声方法。

随着信号检测能力的提升, 随钻震电测井也成为了新兴的勘探技术。Zhu等^[7]最早提出了随钻震电测井的设想。Guan等^[8]通过理论计算证明了这一想法的可行性, 计算结果表明: 在单极源激励的全波形中, 钻铤波诱导电信号相对于其他波组的幅值比声场中的明显减弱。利用这一特点可以有效削弱钻铤波的影响。最近王军等^[9]经过实验研究进一步验证了随钻动电测井技术可以有效抑制钻铤波。但在实际测井勘探中, 震电信号衰减很快, 进一步的应用受到了一定的限制。

近年来, 随着工程减振隔声的发展, 声子晶体作为人造周期性结构材料得到了很广泛的应用^[10-13]。将声子晶体带隙的思想应用到随钻测井

隔声体设计中也是一种可行的思路。Su等^[14-15]介绍了一种不需要刻槽的钻铤波隔振器设计方法, 通过数值模拟的结果可以得到指定宽度的带隙。Yang等^[16]基于声学超表面提出渐变刻槽(渐变凹槽深度)和小尺寸刻槽结构, 发现也可以对钻铤波有很好的削弱作用。不同于传统的隔声体设计思路, Ji等^[17]提出了一种减弱钻铤波的方法——通过使用含有与钢钻铤材料不同夹层的钻铤来实现。但上述钻铤隔声体设计方案的有效性并未得到进一步证明。

针对上述隔声方式的局限性, 本文基于声子晶体理论设计一种新型隔声体, 将其与传统刻槽结构隔声效果进行对比。首先利用有限元软件计算了传统刻槽结构和新型刻槽结构的能带曲线, 并进行对比讨论。其次利用傅里叶变换, 计算了频响曲线。然后对比了17 kHz和22 kHz中心声源频率下新型刻槽结构的时间慢度相关(Slowness time coherence, STC)法处理信息。最后分析了在声源频率17 kHz情况下, 不同刻槽结构的STC信号处理对比。

1 能带计算

传统的钻铤隔声需要在钻铤表面刻槽。刻槽方式一般有外刻槽、内刻槽和内外环形刻槽这几种, 图1为外刻槽结构示意图。通常情况下, 这些刻槽结构为周期结构, 周期结构的最小单位是单胞。外刻槽结构、内刻槽结构和内外环形刻槽结构的单胞如图2所示^[18]。 d 是刻槽的深度, w 是刻槽的宽度, s 是刻槽的间距。在不影响钻探性能的情况下, 钻铤刻槽尺寸可以在合理范围内变化, 不同的尺寸对隔声体的隔声效果有不同的影响。为便于比较, 下文所计算的刻槽结构均为10个周期, 将传统刻槽结构的 d 、 w 和 s 分别设置为0.012 m, 0.09 m和0.09 m。

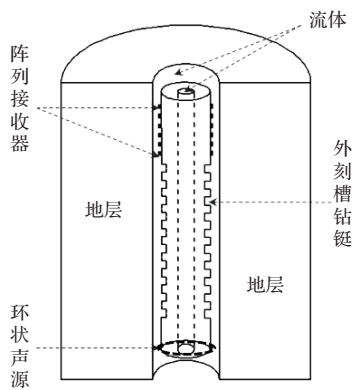


图1 随钻声波测井外刻槽示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the outer grooves of the logging while drilling

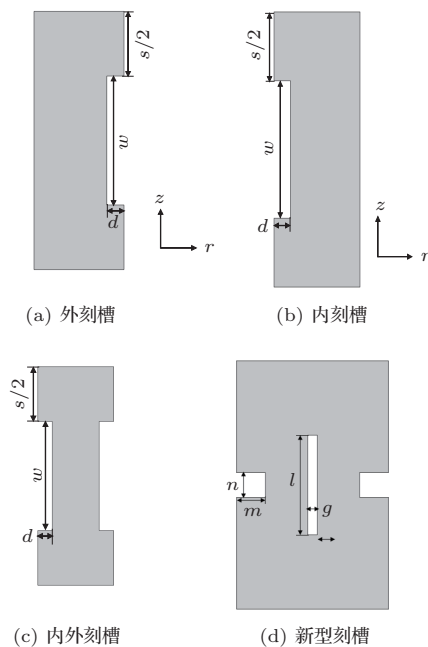


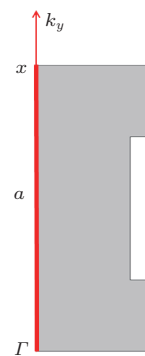
图2 不同刻槽结构的单胞图

Fig. 2 Unit cell diagrams with different grooved structures

受超低孔隙度声子晶体^[19]的启发,本文提出一种新型结构。图2(d)为新型刻槽结构的单胞,晶体的材料是合金钢,通过对结构尺寸进行适当的调整,使其更适合钻铤的设计。测井中的声波频率一般在4~20 kHz左右,根据结构与空腔尺寸的关系大致判断、调整模型的尺寸,使其在合理的频率范围内产生禁带,以达到削弱钻铤波的作用。由于井孔的半径大约在0.1 m,所以单个单胞的大小有限制。这里设置单胞长0.063 m,高0.1 m。刻槽尺寸 m 、 n 、 l 和 g 分别为0.012 m、0.01 m、0.04 m和0.004 m。

根据几何形状分析,声波测井中的钻铤本质上是杆件结构,这里选取一维声子晶体能带的计算方

式进行研究。一维结构的第一布里渊区和不可约布里渊区等相关概念的介绍可参考文献[20],这里不再赘述。图3是单胞为外刻槽结构时的一维布里渊区示意图,其他刻槽结构与之类似。其中 $\Gamma = 0$, $X = \pi/a$, k_y 为竖直方向的波数, a 为单胞的高, Γ 和 X 为不可约布里渊区的高对称点。由于文中研究的钻铤模型关于井轴对称,所以采用二维轴对称模式进行分析。将单胞上下边设置为Bloch周期边界,波矢 k_y 沿一维晶格不可约布里渊区边缘扫描,扫描路径为 $\Gamma-X-\Gamma$,求解特征频率,得到波矢与频率的关系,即为能带结构。

图3 一维晶格的第一布里渊区(红线)和不可约布里渊区(加粗部分)^[20]Fig. 3 First Brillouin zone (the red line) and irreducible Brillouin zone (the bolded part) of the 1D lattice^[20]

柱坐标系下的不同刻槽结构的能带图如图4所示。可以看出,相比于其他传统刻槽结构,新型刻槽结构会产生更宽的带隙,如图4(d)所示,新型刻槽结构在14~16 kHz、16~18 kHz、20~24 kHz和25~27 kHz频率范围内产生带隙,而其他刻槽结构仅在14 kHz和16 kHz附近产生很窄的带隙。从能带的角度来说,新型隔声体更容易产生带隙,相比于传统刻槽结构有更好的隔声能力。

2 频响曲线计算

第1节从声子晶体单胞结构的角度分析了新型隔声体的优势,实际工程中,钻铤隔声体是浸没在井内流体中,由声源激发信号,形成弹性波,再通过地层反射回来。对不同刻槽结构进行隔声性能分析时应充分考虑这些因素的影响。本节考虑隔声体在随钻测井模型中的应用。接下来,通过计算频响曲线的方法考查不同刻槽尺寸的结构在地层中的频响情况。

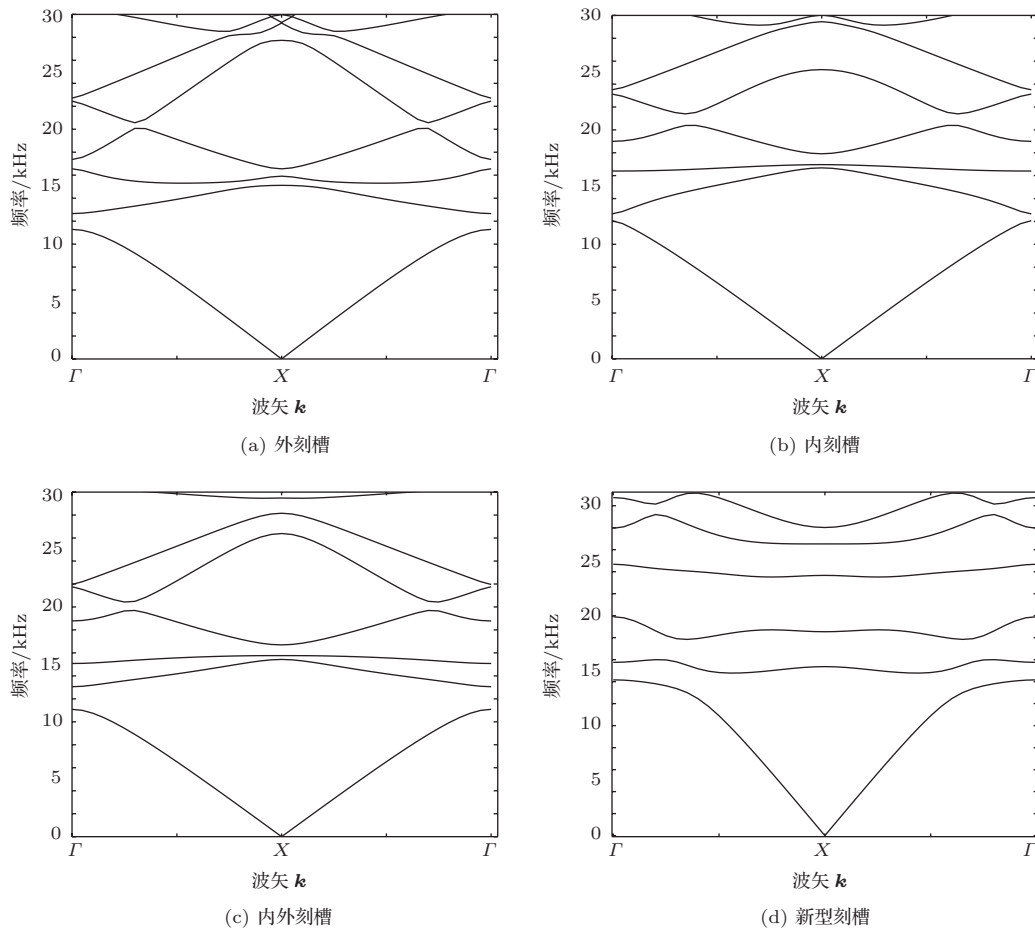


图4 不同刻槽结构的能带图

Fig. 4 Band diagrams for different grooved structures

表1 声波测井计算参数^[21]

Table 1 Parameters of acoustic logging^[21]

介质	纵波速度/ (m·s ⁻¹)	横波速度/ (m·s ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	半径/m
钻铤内流体	1470		1000	0.027
钻铤	5860	3130	7800	0.09
钻铤外流体	1470		1000	0.117
快速地层	3900	1850	2320	∞

井孔半径为0.1 m，钻铤半径为0.063 m。声源形式采用余弦包络函数，函数的形式可参考文献[18]。本节所采用的声源中心频率为15 kHz，脉冲时间为0.5 ms。隔声量是衡量隔声性能的一个物理量，为某一振动分量经过隔声器后在某一频率部分的衰减。如图5所示，对一个刻槽结构而言，点a和点b分别为周期刻槽的位置起始处和结束处。这里称离声源距离较近的点a为近场点，离声源距离

较远的点b为远场点。将点a和点b接收的时域波形分别进行傅里叶变换，转化为频率-幅值的关系。利用公式^[16]

$$\alpha = 20 \lg(B_f/A_f), \quad (1)$$

其中， A_f 和 B_f 分别为点a和点b处接收到的时域波形转化的频率域波形幅值。 α 为分贝值，表示隔声量大小，负值越大，代表隔声量越大。在本节计算中，点a距离声源0.5 m，点b距离声源3.5 m，所有结构刻槽的范围均在点a和点b之间。



图5 频响分析示意图

Fig. 5 Frequency response analysis schematic

隔声量大小与隔声体长度成正比。通过计算单位长度隔声体的隔声量，不同刻槽结构的归一化

频响曲线如图6所示。外刻槽结构在15~18 kHz之间隔声效果比内刻槽更好,内刻槽在12~14 kHz之间的隔声效果比外刻槽更好。内外刻槽隔声频率主要在9~11 kHz、12~16 kHz,其隔声范围更

广。新型隔声体结构的隔声范围为12~18 kHz,均优于其他刻槽结构。总体而言,在所计算频率范围内新型刻槽结构整体的隔声效果优于传统刻槽结构。

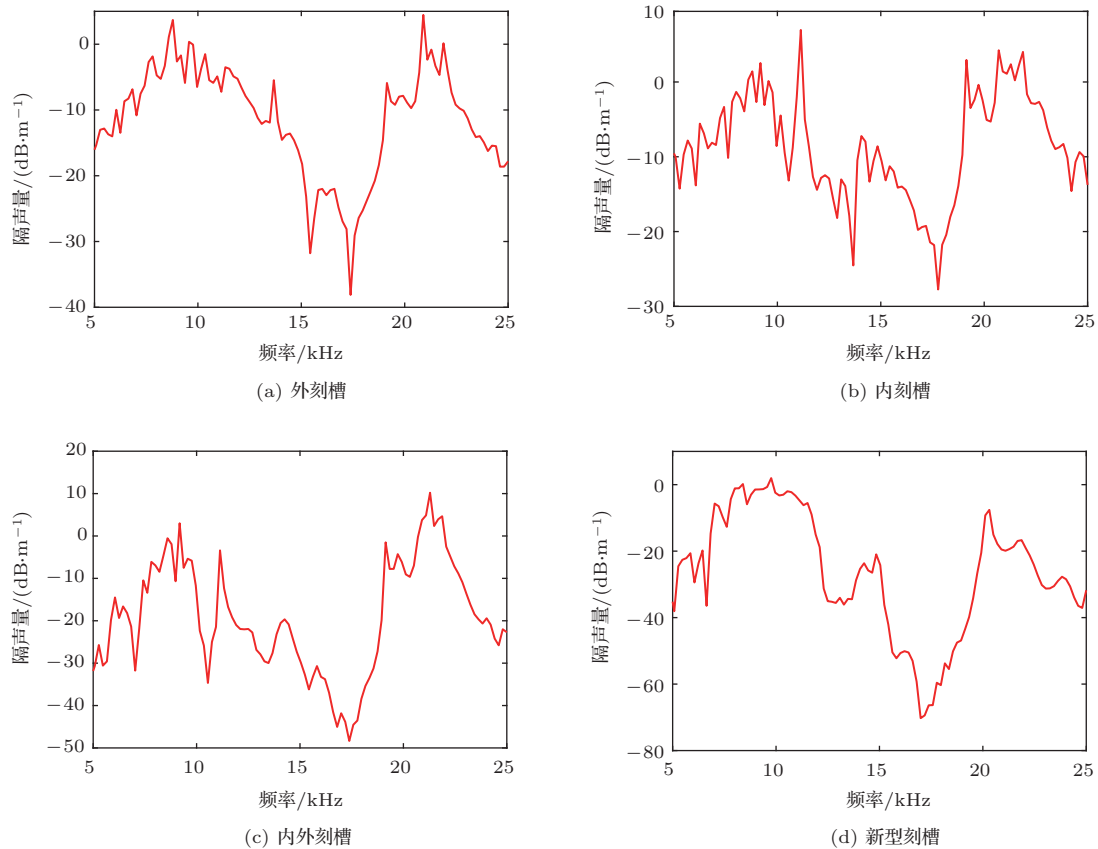


图6 不同刻槽结构频响曲线

Fig. 6 Frequency response curves of different groove structures

3 时间慢度信号处理

第2节在频域考察优势,本节从时域的STC考察。首先计算刻槽结构的波场,所接收的信号为钻铤的径向位移。传统刻槽和新型隔声体的尺寸与第1节能带计算时相同。然后将接收器接收到的全波信号进行处理,可得到STC慢度图。测井工程中声源中心频率一般不高于25 kHz,本节采用第1节新型刻槽结构的带隙范围作为声源中心频率(17 kHz, 22 kHz),和第2节频响曲线计算中隔声效果最好的频率作为声源中心频率(17 kHz)进行计算,脉冲时间均为0.5 ms。

通过图7可以看出,声源频率为17 kHz时,新

型刻槽结构可以较好地分离出地层的纵横波,当声源频率为22 kHz时,地层纵波并未与钻铤波较好的分离,而且不能观察到横波信号。第1节计算的能带只针对刻槽结构本身,当刻槽结构在测井中时,由于井内流体和地层的作用,隔声效果会与单独的隔声体结构产生一定的区别。

图8为声源中心频率为17 kHz时,不同刻槽结构的STC信号处理图对比。对外刻槽结构而言,钻铤波和地层纵波能够分离,但地层横波几乎提取不到;对内刻槽结构和内外刻槽结构而言,可以提取到地层横波信息,但纵波和钻铤波混杂在一起,无法分离。相比与传统的刻槽结构,新型能够更好提取地层纵横波信息。

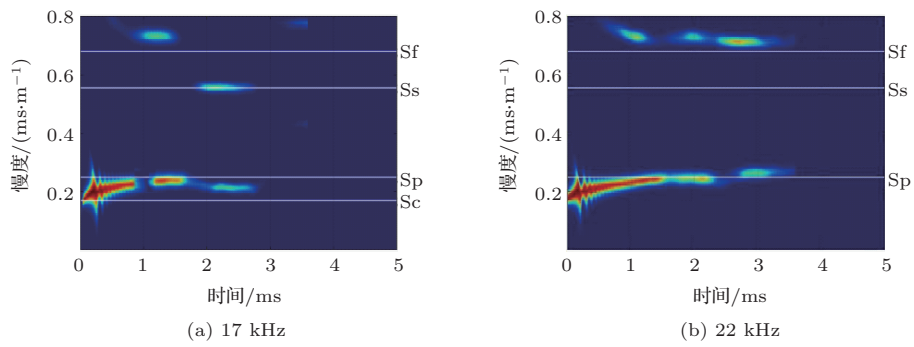


图7 不同中心声源频率下新型刻槽结构的图

Fig. 7 STC diagrams of the new grooved structure at different center frequencies of the sound source

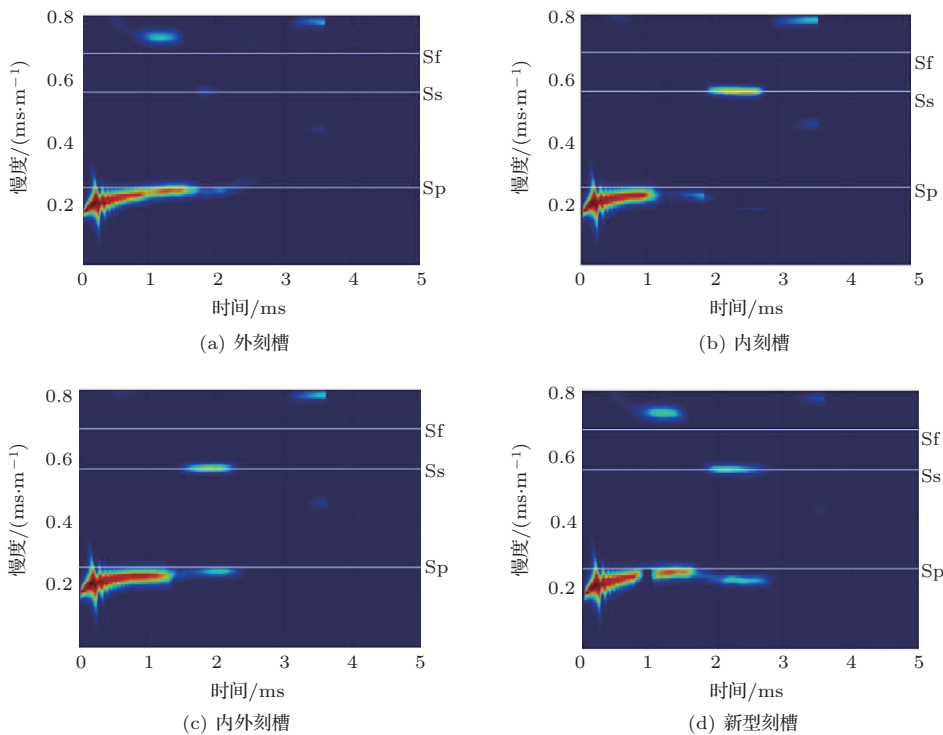


图8 不同刻槽结构的STC图

Fig. 8 STC diagrams for different groove structures

4 结论

本文提出了一种新型隔声结构,利用有限元软件计算了不同刻槽结构的能带,发现新型隔声体的比传统结构更容易形成带隙。接着考虑地层影响下的频响函数曲线,在钻铤隔声体两端设置远场点和近场点,并利用傅里叶变换进行频响函数的计算,对比得到了不同刻槽结构在不同频率下的隔声能力,本文重点分析了10~20 kHz范围内的隔声能力,验证了新型隔声体结构在所计算的频率范围内的隔

声效果优于传统的刻槽结构。然后分析了17 kHz、22 kHz声源频率下新型隔声体结构的STC信号处理图,发现声源频率为17 kHz时可以较好地分离出地层的纵横波。虽然在能带图中,中心频率为22 kHz时带隙更宽,但经过计算发现,刻槽结构本身的隔声效果与刻槽结构在测井模型中会有一些的区别,这可能是由于井内流体和地层的作用,具体原因值得进一步分析探究。最后对比了声源频率17 kHz下,不同刻槽结构的STC信号处理图,发现相比于其他结构,新型隔声体结构可以更好地提取分离地层的纵横波。

参 考 文 献

- [1] Robbins C A, Mallett A J, Minear J W, et al. Acoustic logging while drilling tool to determine bed boundaries: U.S., 5678643[P]. 1997-10-21.
- [2] Leggett J V, Vladimir D, Doug P, et al. Field test results demonstrating improved real-time data quality in an advanced LWD acoustic system[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2001.
- [3] 杨勇, 车小花, 李俊, 等. 基于时域有限差分法的随钻声波测井仪隔声体隔声效果的数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(3): 66-70.
Yang Yong, Che Xiaohua, Li Jun, et al. Numerical simulation of the sound insulation effect of the sound insulation body of the follow-on acoustic logger based on the time-domain finite difference method[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2009, 33(3): 66-70.
- [4] 闫向宏, 苏远大, 孙建孟, 等. 周期性轴对称凹槽结构隔声特性数值模拟[J]. 计算物理, 2010, 27(6): 869-876.
Yan Xianghong, Su Yuanda, Sun Jianmeng, et al. Numerical simulation of sound insulation characteristics of periodic axisymmetric recess structures[J]. Journal of Computational Physics, 2010, 27(6): 869-876.
- [5] 刘彬, 王芳, 陈德华, 等. 周期性非轴对称孔槽结构隔声性能数值模拟研究[J]. 应用声学, 2012, 31(5): 333-338.
Liu Bin, Wang Fang, Chen Dehua, et al. Numerical simulation study on the sound insulation performance of periodic non-axisymmetric hole and slot structure[J]. Journal of Applied Acoustics, 2012, 31(5): 333-338.
- [6] Yang Y F, Guan W, Hu H S, et al. Numerical study of the collar wave characteristics and the effects of grooves in acoustic logging while drilling[J]. Geophysical Journal International, 2017, 209(2): 749-761.
- [7] Zhu Z Y, Haartsen M W, Toksoz M N, et al. Experimental studies of electrokinetic conversions in fluid-saturated borehole models[J]. Geophysics, 1999, 64(5): 1349-1356.
- [8] Guan W, Hu H S, Zheng X B. Theoretical simulation of the multipole seismoelectric logging while drilling[J]. Geophysical Journal International, 2013, 195(2): 1239-1250.
- [9] 王军, 李红一, 关威, 等. 单极源钻铤波传播机制的实验研究[J]. 地球物理学报, 2019, 62(4): 1541-1553.
Wang Jun, Li Hongyi, Guan Wei, et al. Experimental studies on the mechanism of monopole acoustic collar wave[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(4): 1541-1553.
- [10] Ardito R, Cremonesi M, Dalessandro L, et al. Application of optimally-shaped phononic crystals to reduce anchor losses of MEMS resonators[C]. International Ultrasonics Symposium, 2016: 1-3.
- [11] Wang P, Shim J, Bertoldi K. Effects of geometric and material nonlinearities on tunable band gaps and low-frequency directionality of phononic crystals[J]. Physical Review B, 2013, 88(1): 2466-2472.
- [12] Li S B, Dou Y H, Chen T N, et al. Designing a broad locally-resonant bandgap in a phononic crystals[J]. Physics Letters A, 2019, 383(12): 1371-1377.
- [13] Zhang S, Xia C, Fang N X, et al. Broadband acoustic cloak for ultrasound waves[J]. Physical Review Letters, 2011, 106(2): 024301.
- [14] Su Y D, Tang X M, Xu S, et al. Acoustic isolation of a monopole logging while drilling tool by combining natural stopbands of pipe extensional waves[J]. Geophysical Journal International, 2015, 202: 439-445.
- [15] 苏远大, 庄春喜, 唐晓明, 等. 一种刻槽式随钻声波测井隔声体的理论与实验研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4521-4528.
Su Yuanda, Zhuang Chunxi, Tang Xiaoming, et al. A theoretical and experimental study of a grooved follow-on acoustic logging sound insulator[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(12): 4521-4528.
- [16] Yang P N, Chen D H, He X, et al. Numerical simulations of acoustic isolators in monopole acoustic logging while drilling based on phononic crystal structures[J]. The Journal of Geophysics and Engineering, 2020, 17(2): 212-221.
- [17] Ji Y J, He X, Chen H, et al. Monopole collar wave characteristics for acoustic logging while drilling in fast formations in the frequency and spatial domains[J]. Wave Motion, 2019, 90: 66-81.
- [18] 杨玉峰. 随钻声测井三维有限差分模拟与钻铤刻槽隔声性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 70
- [19] Javid F, Wang P, Shanian A, et al. Architected materials with ultra-low porosity for vibration control[J]. Advanced Materials, 2016, 28(28): 5943-5948.
- [20] 石志飞, 程志宝, 向宏军. 周期结构理论及其在隔震减震中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 50-58.
- [21] 寇兴. 随钻测井隔声体的声学和力学性能仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 30.