

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2024123

引用格式: 郭肖, 庞伟, 张旭东, 等. 井下声学造影超材料颗粒设计与性能模拟 [J]. 石油钻探技术, 2025, 53(1): 130–135.

GUO Xiao, PANG Wei, ZHANG Xudong, et al. Design and performance simulation of acoustic metamaterial particle for downhole imaging [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2025, 53(1): 130–135.

井下声学造影超材料颗粒设计与性能模拟

郭 肖^{1,2,3}, 庞 伟^{1,3}, 张旭东^{2,3}, 王浩东^{2,3}

(1. 中国石化固井与完井重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石化页岩油气钻完井及压裂重点实验室, 北京 102206; 3. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206)

摘 要: 由于传统声波探测技术依赖地层物性差异, 因此识别范围和精度受限。为解决该问题, 基于质量弹簧结构模型, 利用声学超材料独特微观结构的声学原理, 设计了 3 层结构的声学超材料颗粒, 优化了材料的结构尺寸, 优选了材料的组成, 建立了超材料颗粒的声学特征模型, 以表征被动发声超材料颗粒特殊的声频和声强特性。采用有限元数值模拟软件模拟了声学超材料颗粒的性能, 结果表明, 声学超材料颗粒具备特殊声学频带, 且特征频率随着粒径减小逐渐升高。在声学禁带频率范围内, 声波无法穿透超材料颗粒群, 大部分被反射; 在声学禁带频率范围外, 声波可以穿透超材料颗粒群。声学超材料颗粒具备井下声学强化造影能力, 具有评价井筒完整性和监测压裂裂缝的潜力。

关键词: 声学超材料; 井下监测; 颗粒设计; 数值模拟; 特征频段

中图分类号: TE26

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2025)01-0130-06

Design and Performance Simulation of Acoustic Metamaterial Particle for Downhole Imaging

GUO Xiao^{1,2,3}, PANG Wei^{1,3}, ZHANG Xudong^{2,3}, WANG Haodong^{2,3}

(1. Sinopec Key Laboratory for Cementing and Completion, Beijing, 102206, China; 2. Sinopec Key Laboratory of Shale Oil and Gas Drilling and Hydraulic Fracturing, Beijing, 102206, China; 3. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing, 102206, China)

Abstract: The traditional acoustic detection technology depends on the difference in physical properties of formation, and the range and accuracy of information identification are limited. Therefore, acoustic metamaterial particles with a three-layer structure were designed by using the unique microstructure principle of acoustic metamaterials based on the mass-spring structure model. The material structure size was optimized, and the optimal material composition was selected. As a result, the acoustic characteristic model of metamaterial particles was established to characterize the special acoustic frequency and acoustic strength characteristics of passive acoustic metamaterial particles. The particle properties of acoustic metamaterials were simulated by finite element numerical simulation software. The results show that the acoustic metamaterial particles have special acoustic frequency bands, and the characteristic frequency gradually increases as the particle size decreases. Within the frequency range of the acoustic band gap, the acoustic wave cannot penetrate the metamaterial particle cluster, and most of them are reflected. Outside the acoustic band gap, the acoustic wave can penetrate the metamaterial particle cluster. The acoustic metamaterial particles can strengthen the downhole imaging and show potential for evaluating wellbore integrity and monitoring fractures.

Key words: acoustic metamaterials; downhole monitoring; particle design; numerical simulation; characteristic frequency bands

收稿日期: 2023-12-01; 改回日期: 2024-11-01。

作者简介: 郭肖 (1990—), 男, 河南洛阳人, 2013 年毕业于中国石油大学 (华东) 石油工程专业, 2019 年获中国石油大学 (北京) 油气井工程专业博士学位, 副研究员, 主要从事井下智能监测技术研究。E-mail: guoxiao.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 项目 “深井复杂地层安全高效钻井基础研究” (编号: 2010CB226703) 资助。

常规声波探测技术利用声波在不同介质中传播时速度、幅度及频率等的变化,研究地质剖面、评价固井质量和井筒完整性、监测压裂裂缝及识别断层、溶洞等^[1-4],其主要依靠地层自身的差异,具有识别距离近、监测精度低和获得信息少等局限^[5-8]。声学造影材料可以通过加强声波信号提升常规声波探测技术的监测效果,其中,声学超材料颇具潜力。超材料由晶胞组成,拥有自然材料很难具有或不具有的特殊物理性质,如负质量密度、负弹性模量和负折射率等,使其在宏观尺度上表现出独特的电磁、声波、光学或热学效应,为新材料在传统领域解决疑难问题和在新领域的潜在应用提供了机会,实现了诸如声学隐身、低频隔声和声学超分辨等一系列具有直接应用场景的声学功能,目前超材料已经成为声学领域的一大研究热点^[9-12]。声学超材料通过设计材料的亚微观结构,使材料具有奇异的声学特性。最早的声学超材料模型由香港科技大学提出,将硅橡胶包裹的铅球放到环氧树脂基体中作为微结构胞元^[13]。超材料除优异的隔音性能外还具有特殊的低频特性,由于地震方法主要依赖低频声波的地下传播,超材料在地球物理领域的应用效果理想。美国太平洋西北国家实验室在 2018 年提出以聚合物涂覆金属有机框架纳米颗粒的方法研究地下流体的流动空间,并通过玻璃平板流动模拟验证了其可行性^[14-16]。美国 Oceanit 实验室提出用一种具有特定声波带宽的智能超材料水泥颗粒评价井筒完整性和分析加载在水泥环上的应力情况,在固井水泥中加入该颗粒可提高水泥环的声学性能,但由于未涉及颗粒的结构和声学机理,无法最大限度利用声学超材料的声学性能,造影效果受限^[17]。

为此,基于声学超材料理论,设计路了声学超

材料颗粒,基于有限元数值模拟软件建立了声学超材料颗粒多场耦合数值模型,模拟了声学超材料颗粒及颗粒群的声场,分析了影响声学超材料声学性能敏感因素,以揭示声学超材料的声学规律。

1 声学超材料颗粒结构的设计

声学超材料形态结构有 2 种,1 种为由刚性固体颗粒组成的充气或充液孔腔结构,1 种为薄膜或薄板结构,二者形态均具有“硬-软-硬”的结构特征。设计了声学复合超材料颗粒,颗粒由 3 层结构组成,分别为固体高密度核心材料、弹性空间材料和外层硬质保护性材料(见图 1)。硬质核心材料的密度和弹性模量较大,中间弹性层材料的弹性模量和声速较小。

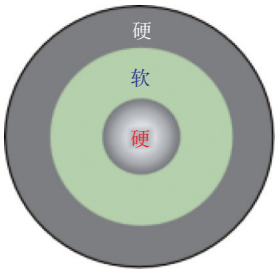


图 1 声学复合超材料颗粒结构示意图
Fig.1 Structure of compound acoustic metamaterial particles

综合考虑超材料颗粒的被动发声性能和应用环境,优选硬质核心(钢铁)+弹性层(橡胶)+外壳(环氧树脂)。优化设计声学超材料尺寸,控制颗粒密度,保证其在固体水泥浆中的携带性和悬浮性,分别设计粒径为 1, 2 和 4 mm 的适用于井下监测的声学超材料颗粒(见表 1)。硬质核心选自陶瓷、金

表 1 所设计声学超材料颗粒的组成
Table 1 Composition of designed acoustic metamaterial particles

编号	设计粒径/mm	材料组成	厚度/mm	弹性模量/GPa	材料密度/(g·cm ⁻³)	泊松比	宏观密度/(g·cm ⁻³)
A	1	钢铁	0.2	200.00	8.00	0.3	1.5
		橡胶	0.2	0.01	0.93	0.4	
		环氧树脂	0.1	0.20	1.20	0.4	
B	2	钢铁	0.6	200.00	8.00	0.3	2.3
		橡胶	0.3	0.01	0.93	0.4	
		环氧树脂	0.1	0.20	1.20	0.4	
C	4	钢铁	1.0	200.00	8.00	0.3	1.9
		橡胶	0.8	0.01	0.93	0.4	
		环氧树脂	0.2	0.20	1.20	0.4	

属、合金材料,优选为金属铁球,铁球半径0.2~1.0 mm。弹性层选自橡胶、类橡胶材料,优选为橡胶,弹性层的厚度为0.2~0.8 mm。外壳选自酚醛树脂、环氧树脂,优选为环氧树脂,厚度为0.1~0.2 mm。颗粒宏观密度保持在1.5~2.3 g/cm³以满足在不同密度水泥浆体系中使用要求。

在现场应用中,通常将声学超材料颗粒以一定比例随水泥浆或者压裂液注入到地下,再利用声波探测仪器监测其状态。声学超材料颗粒以颗粒群的形式分布在监测的环境介质中,如图2所示。

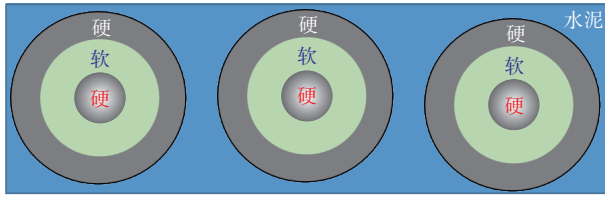


图2 超材料颗粒群在水泥环境中的分布状态

Fig.2 Distribution status of metamaterial particle clusters in cement

2 声学超材料颗粒的特殊声学机理

当声学超材料颗粒胞元尺寸大于1/10波长时,均质化描述不成立,需从微结构角度解释超材料的特殊动态力学属性。基于离散介质理论,建立了质量弹簧模型,表征超材料颗粒的声学特征,将弹性层视为弹簧、硬质核心和外壳视为质量块。简化的一维质量弹簧模型如图3所示,颗粒单元由3个超材料颗粒组成,质量为 m 的外壳通过2个弹性系数 K_0 的弹簧与质量为 m_0 的高密度刚性小球连接。声学超材料颗粒之间通过弹性系数 K 的弹簧相连接。

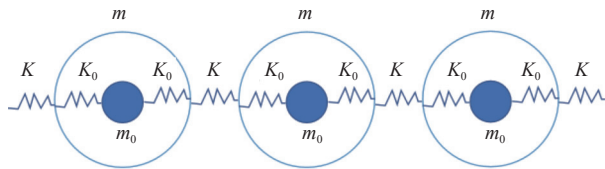


图3 一维质量弹簧模型示意

Fig.3 One-dimensional mass-spring model

对系统施加一个谐振力,系统运动方程为:

$$m \frac{d^2 u_n}{dt^2} = K(u_{n-1} - u_n) - K(u_n - u_{n+1}) - 2K_0 u_n \quad (1)$$

式中: m 为超材料等效外壳质量,kg; u_n 为第 n 个胞元位移,m; t 为时间,s; K 为胞元之间弹簧的弹性系数,N/m; K_0 为硬质核心和外壳之间弹簧的弹性系数,N/m。

假定时间常数遵从 $e^{-i\omega t}$ 变化,且胞元满足布洛

赫条件,则可将系统运动方程简化为^[18]:

$$\left(m - \frac{2K_0}{\omega^2}\right) \omega^2 = 4K \sin^2 \frac{qa}{2} \quad (2)$$

式中: ω 为多元弹簧振子的振荡角频率,rad/s; q 为布洛赫常数,J/T; a 为晶格常数,m。

对比有质量的多元弹簧振子模型,可以得出:

$$m_{\text{eff}} = m \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right) \quad (3)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2K_0}{m}} \quad (4)$$

式中: m_{eff} 为胞元等效质量; ω_0 为系统固有频率。

由于内质量块与弹簧形成谐振,导致内外质量运动相位反向,动态等效质量在特定频率范围内具有负值,超材料产生“负”属性。系统固有频率由胞元内弹簧的弹性系数和外壳质量决定,谐振振动频率低于系统固有频率时,系统表现出负动态质量。

3 声学超材料颗粒声学性能模拟

采用COMSOL Multiphysics有限元数值模拟软件验证所设计声学超材料的特殊声学性能,识别其主控因素,通过模拟和优化设计实现对声波的有效控制和利用。声学超材料颗粒单元如图4所示,以井筒完整性监测及套变预测场景为例,颗粒周围环境设置为水泥,物理场选用固体力学和压力声学,选用Floquet周期性边界条件。

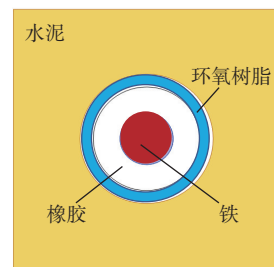


图4 声学超材料颗粒单元

Fig.4 Acoustic metamaterial particle units

3.1 单个声学超材料颗粒的声学特征

针对粒径1 mm的声学超材料颗粒,对其施加 x 方向和 y 方向声压,为分析带隙的形成机制,分析声学超材料颗粒单元的振动模态,常规水泥材料颗粒和声学超材料颗粒在不同频率条件下的振动模态如图5所示,在禁带内可观察到声学超材料颗粒的单极共振模态,说明声学超材料颗粒产生了负动态响应。而常规水泥材料颗粒无明显共振模态出现。

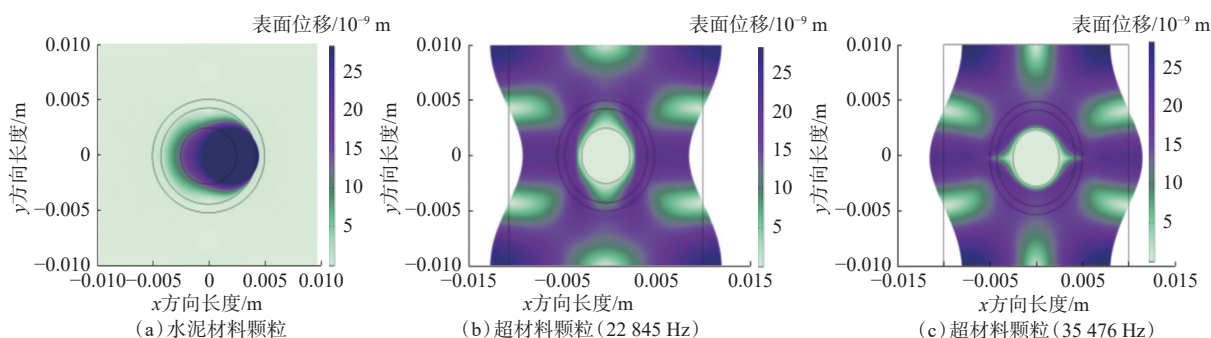


图 5 声学超材料颗粒单元的振动模态

Fig.5 Vibration mode of acoustic metamaterial particle units

计算获得了 3 种被动发声超材料颗粒的能带图, 如图 6 所示。粒径 1 mm 的超材料颗粒存在 50~70 和 280~320 kHz 的 2 个声学禁带, 粒径 2 mm 的超材料颗粒存在 20~25 和 140~160 kHz 的 2 个声学禁带, 粒径 4 mm 的超材料颗粒存在 11~12 和 70~80 kHz 的 2 个声学禁带。声学超材料颗粒声学禁带的主要成因是布拉格散射和高密度散射体引起的局域共振, 颗粒高密度核心共振时, 入射的纵波将向横波转换, 纵波和横波均会产生散射横波, 并受到晶格的干涉, 从而形成声学禁带。对比不同粒径超材料颗粒的能带区间, 发现颗粒粒径对特征频率分布的影响明显, 特征频率随粒径减小而升高。

3.2 声学超材料颗粒群的声学特征

为验证声学超材料颗粒群的声学特性, 分析了 11×11 颗粒群的声波穿透反射特性, 声学场设计如图 7 所示。将虚拟结构 1 和 5 设计为完美匹配层, 作为无限大边界, 结构 2 设计为 1 Pa 的背景声场, 结构 3 设计为 11×11 的声学超材料颗粒群阵列。

作为对照组, 将超材料颗粒设计为水泥颗粒, 普通水泥颗粒群的声强分布如图 8 所示。声波可在普通水泥材料颗粒中不受明显阻碍而正常穿透。声学超材料颗粒群在禁带频率范围内的声压级分布如图 9 所示。在声学禁带频率范围内, 声波无法穿透超材料颗粒群, 大部分被反射; 在声学禁带频率范围外, 声波可穿透声学超材料颗粒群。

3 种粒径颗粒群均存在高穿透损失频段(见图 10), 粒径 1 mm 声学超材料颗粒群在 50~75 kHz 频率范围内的穿透损失较大, 该频段范围内大部分声波被反射, 可通过识别该特征频段声波进行井下监测。粒径 2 mm 声学超材料颗粒群的高穿透损失频段为 20~25 kHz。粒径 4 mm 声学超材料颗粒群

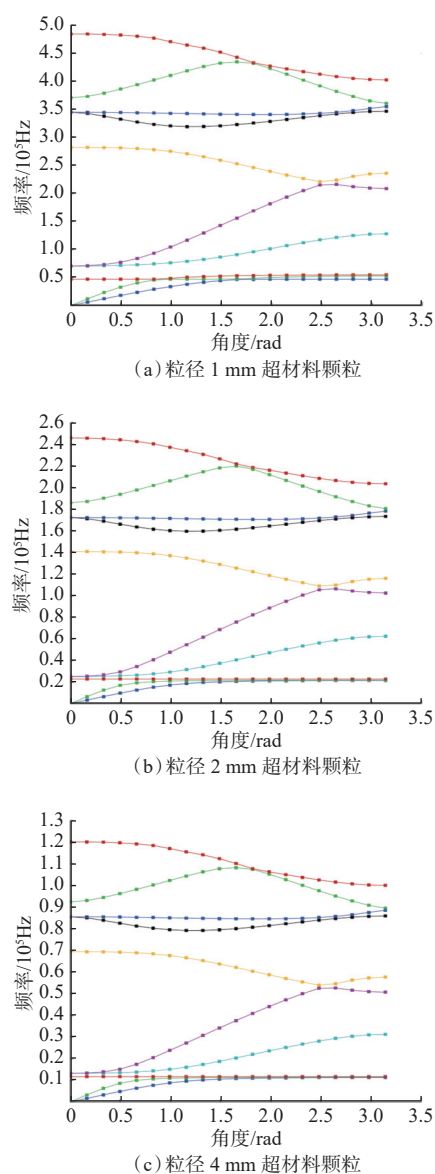
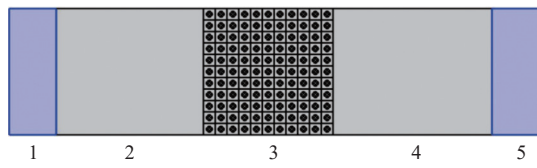


图 6 不同粒径声学超材料颗粒 x 方向波矢扫描结果

Fig.6 x-direction wave vector scanning results of acoustic metamaterial particles with different particle sizes



1.完美匹配层; 2.声源场; 3.超材料颗粒群; 4.声传播通道;
5.完美匹配层

图7 声学超材料颗粒群的声场结构

Fig.7 Acoustic field structure of acoustic metamaterial particle clusters

的高穿透损失频段为 10~13 kHz。高穿透损失频率随颗粒粒径减小逐渐升高。声学超材料颗粒在井下受应力挤压变形, 粒径减小, 进而造成声波特征频段的迁移, 可依据该特性监测井下应力。

颗粒间距分别为 2, 3, 4 和 5 mm 声学超材料颗粒群不同频率声波穿透损失强度的分布如图 11 所示。4 种颗粒间距均存在高穿透损失频段, 随着颗粒间距增大, 特征频段宽度有一定减小, 穿透损失

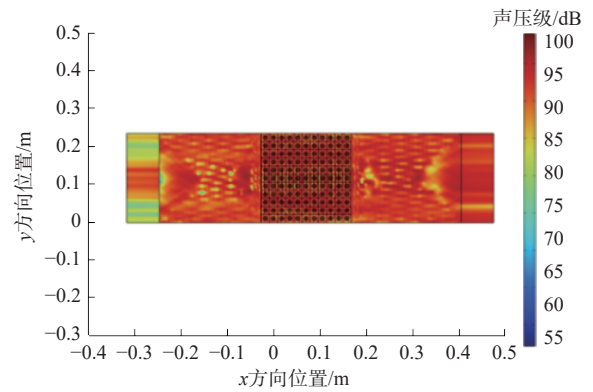


图8 普通水泥颗粒的声压级分布

Fig.8 Acoustic pressure level distribution of ordinary cement materials

强度有小幅降低, 但是仍有明显声压显示, 较少用量的声学超材料颗粒即可实现井下监测功能。

所设计声学超材料与水泥介质存在明显的声阻抗差异, 同时具有特殊频带特性, 声学禁带频率范

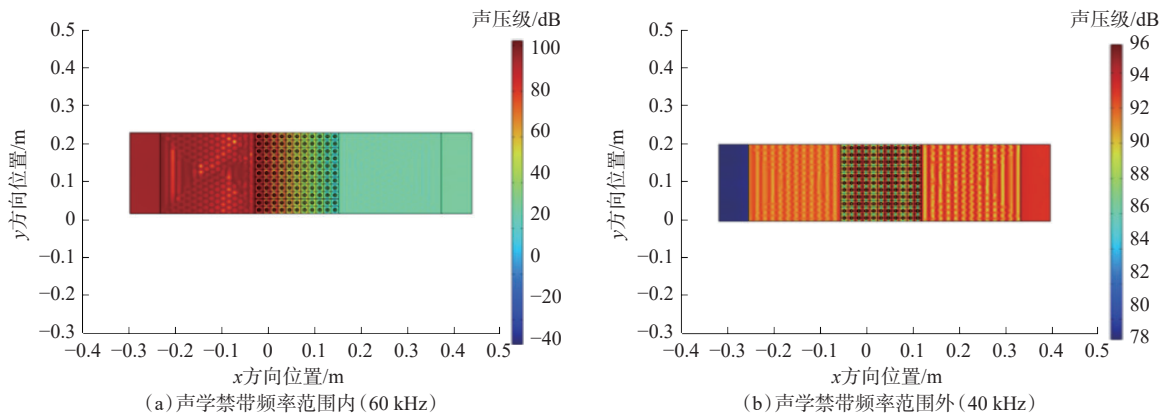


图9 声学超材料颗粒群的声压级分布

Fig.9 Acoustic pressure level distribution of acoustic metamaterial particles

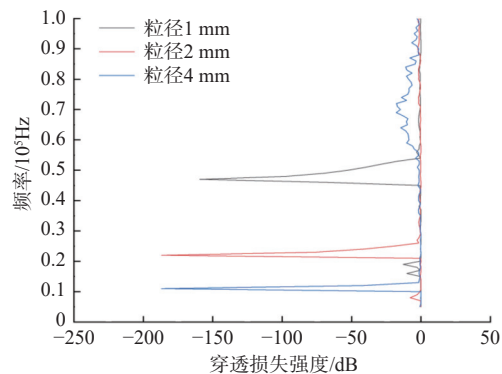


图10 不同粒径声学超材料颗粒群不同频率声波穿透损失强度的分布

Fig.10 Penetration loss intensity distribution of acoustic metamaterial particle clusters at different sizes and frequencies

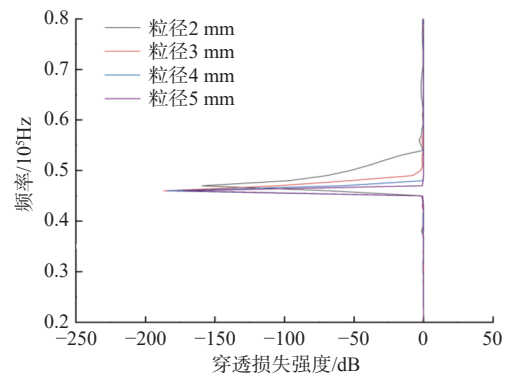


图11 不同颗粒间距下声学超材料颗粒群不同频率声波穿透损失强度的分布

Fig.11 Penetration loss intensity distribution of acoustic metamaterial particle clusters at different particle spacing and frequencies

国内声学超材料颗粒的声阻抗大, 声学禁带频率范围外声波容易穿透声学超材料。特殊频带的位置、宽度和幅度等受颗粒粒径、颗粒间距等因素的影响。在固井水泥中加入具有特殊声学性能的超材料颗粒可提高水泥环的声学性能, 进而可利用常规声波测井工具评价固井质量。声学超材料颗粒具有特定的声波频率带宽, 可用于评价井筒完整性和分析加载在水泥环上的应力情况。

4 结 论

1) 声学超材料颗粒具有“硬-软-硬”的结构特点, 材料组成常见且便宜, 控制颗粒密度可保证其在不同密度固体水泥浆中的携带性和悬浮性。

2) 超材料颗粒的声学特征模型揭示了超材料颗粒的共振发声机理, 超材料的主控因素为核心材料质量和中间层材料弹性模量, 设计的超材料颗粒均具有声学禁带特性, 可用于提升井下监测精度。

3) 声学超材料可用于监测井下应力, 其颗粒粒径、颗粒间距对造影水泥的声学特性均有影响, 颗粒粒径越大特征频率越小, 特征频率宽度和幅度随颗粒间距增大而减小。

参 考 文 献

References

- [1] 张波, 罗方伟, 孙秉才, 等. 深层油气井井筒完整性检测方法[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(5): 114-120.
ZHANG Bo, LUO Fangwei, SUN Bingcai, et al. A method for wellbore integrity detection in deep oil and gas wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(5): 114-120.
- [2] 牛德成, 苏远大. 基于声波远探测的浅海软地层邻井井眼成像方法[J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(6): 21-27.
NIU Decheng, SU Yuanda. Adjacent borehole imaging method based on acoustic remote detection in shallow unconsolidated formations[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(6): 21-27.
- [3] 李宁, 刘鹏, 范华军, 等. 基于阵列声波测井的井下多尺度压裂效果评价方法[J]. *石油钻探技术*, 2024, 52(1): 1-7.
LI Ning, LIU Peng, FAN Huajun, et al. Evaluation method of downhole multi-scale fracturing effect based on array acoustic logging[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2024, 52(1): 1-7.
- [4] 陈斌, 蔺敬旗, 李兆春, 等. 阵列声波测井在页岩油体积压裂效果评价中的应用[J]. *断块油气田*, 2021, 28(4): 550-554.
CHEN Bin, LIN Jingqi, LI Zhaochun, et al. Application of array acoustic logging in shale oil volume fracturing effect evaluation[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, 28(4): 550-554.
- [5] 祁晓, 张璋, 李东, 等. 基于阵列声波测井技术的海上砂岩储层压裂效果评价方法[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(6): 128-134.
QI Xiao, ZHANG Zhang, LI Dong, et al. Evaluation of fracturing effects in offshore sandstone reservoirs based on array acoustic logging technology[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(6): 128-134.
- [6] 孙小芳, 刘峰, 张聪慧, 等. 慢速地层偶极声波远探测井眼成像发射频率优选[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(1): 98-105.
SUN Xiaofang, LIU Feng, ZHANG Conghui, et al. Emission frequency optimization of borehole imaging for dipole acoustic remote detection of slow formations[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(1): 98-105.
- [7] 赵辉, 齐怀彦, 王凯, 等. 致密砂岩油藏测井响应特征及有利区评价[J]. *特种油气藏*, 2023, 30(5): 35-41.
ZHAO Hui, QI Huaiyan, WANG Kai, et al. Characteristics of well logging response and evaluation of favorable zones in tight sandstone reservoirs[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(5): 35-41.
- [8] 刘美成. 致密储层测井评价技术及发展方向[J]. *特种油气藏*, 2022, 29(4): 12-20.
LIU Meicheng. Logging evaluation technology and further development of tight reservoirs[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(4): 12-20.
- [9] 夏百战, 杨天智. 声学超材料和声子晶体研究进展[J]. *动力学与控制学报*, 2023, 21(7): 1-4.
XIA Baizhan, YANG Tianzhi. Progress in acoustic metamaterials and phononic crystals[J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2023, 21(7): 1-4.
- [10] PALISCH T, AL-TAILJI W, BARTEL L, et al. Far-field proppant detection using electromagnetic methods-Latest field results[R]. SPE 184880, 2017.
- [11] RAMM A G. A recipe for making materials with negative refraction in acoustics[J]. *Physics Letters A*, 2008, 372(13): 2319-2321.
- [12] ZHAO Honggang, WEN Jihong, YU Dianlong, et al. Low-frequency acoustic absorption of localized resonances: experiment and theory[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(2): 023519.
- [13] LIU Z, ZHANG X, MAO Y, et al. Locally resonant sonic materials[J]. *Science*, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [14] MILLER Q R S, NUNE S K, SCHAEF H T, et al. Microporous and flexible framework acoustic metamaterials for sound attenuation and contrast agent applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(51): 44226-44230.
- [15] MILLER Q R S, SCHAEF H T, NUNE S K, et al. Geophysical monitoring with seismic metamaterial contrast agents[R]. URTEC 2019-1123, 2019.
- [16] NUNE S K, MILLER Q R S, SCHAEF H T, et al. Transport of polymer-coated metal-organic framework nanoparticles in porous media[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 13962.
- [17] POLLOCK J, VEEDU V, ELSHAHAWI H. Acoustically responsive cement for enhanced well integrity[R]. OTC 29021, 2018.
- [18] 张宏宽, 周萧明. 声波超材料设计的力学原理与进展[J]. *固体力学学报*, 2016, 37(5): 387-397.
ZHANG Hongkuan, ZHOU Xiaoming. Mechanics concepts and advances of acoustic metamaterials design[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2016, 37(5): 387-397.

[编辑 曹耐]