

文章编号:1671-251X(2018)03-0065-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017090070

超声波在尾矿浆传播中的衰减特性数值模拟分析

汪建新, 高鑫, 张艳萍

(内蒙古科技大学 机械工程学院, 内蒙古 包头 014000)

摘要:针对现有尾矿矿浆浓度超声检测法存在精度不高、研究参数较为宽泛、不能准确地反映出超声波在尾矿浆中传播的衰减特性问题,在对超声波衰减特性进行理论分析的基础上,利用 Matlab 软件数值模拟了超声波在固定参数的尾矿浆中传播时的衰减特性,得到了超声波衰减系数与超声波频率、尾矿浆粒径、尾矿浆密度之间的关系:在超声波频率一定时,随着尾矿浆的粒径增加,散射衰减也增大;当超声波频率与尾矿浆粒径均为固定值时,黏滞衰减系数随着尾矿浆密度的增大而增大;当超声波频率与尾矿浆密度均为固定值时,尾矿浆的粒径越大,黏滞衰减系数越小;散射衰减与黏滞衰减都随着超声波频率的增大而增大,散射衰减系数与超声波频率的四次方近似成正比,黏滞衰减系数与超声波频率近似成正比。这一分析结果为设计高精度的超声波浓度传感器提供了理论依据。

关键词:尾矿矿浆; 超声波检测; 超声波频率; 散射衰减; 黏滞衰减; 尾矿浆粒径; 尾矿浆密度

中图分类号:TD85

文献标志码:A

网络出版时间:2018-01-30 16:46

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20180130.1428.004.html>

Numerical simulation analysis of attenuation characteristics of ultrasonic propagation in tailing slurry

WANG Jianxin, GAO Xin, ZHANG Yanping

(College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014000, China)

Abstract: In view of problems that existing ultrasonic detection method for concentration of tailing slurry has low accuracy and too many parameters, and cannot accurately reflect attenuation characteristics of the ultrasonic propagation in tailing slurry, attenuation characteristics of ultrasonic propagation in tailing slurry with fixed parameters were simulated by using Matlab software based on the theoretical analysis of attenuation characteristics of ultrasonic, and relationships between ultrasonic attenuation coefficient and ultrasonic frequency, particle size and density of tailings slurry were obtained: when the ultrasonic frequency is constant, the scattering attenuation increases with increasing of the particle size of tailing slurry; when the ultrasonic frequency and particle size of tail slurry are a fixed value, the viscosity attenuation coefficient increases with increasing of the density of tail slurry; when the ultrasonic frequency and density of tailing slurry are a fixed value, the larger of the particle size of tailings slurry, the smaller of the viscosity attenuation coefficient; both of the scattering attenuation and viscosity attenuation increase with increasing of the ultrasonic frequency, the scattering attenuation coefficient is proportional to the

收稿日期:2017-09-27; **修回日期:**2017-12-27; **责任编辑:**张强。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51365033); 内蒙古科技创新引导奖励基金项目(2015CXYP-3)。

作者简介:汪建新(1962—),男,内蒙古包头人,教授,硕士研究生导师,博士,主要从事机电一体化、选矿等方面的研究工作, E-mail: nkdwjx@imust.cn. 通信作者:高鑫(1994—),男,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,研究方向为超声波传感器, E-mail: gaoxin130@126.com.

引用格式:汪建新,高鑫,张艳萍. 超声波在尾矿浆传播中的衰减特性数值模拟分析[J]. 工矿自动化, 2018, 44(3): 65-69.

WANG Jianxin, GAO Xin, ZHANG Yanping. Numerical simulation analysis of attenuation characteristics of ultrasonic propagation in tailing slurry[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(3): 65-69.

fourth power of ultrasonic frequency, and the viscosity attenuation coefficient is proportional to the ultrasonic frequency. The analysis results provide a theoretical basis for design of ultrasonic concentration sensor with high precision.

Key words: tailing slurry; ultrasonic testing; ultrasonic frequency; scattering attenuation; viscosity attenuation; particle size of tailings slurry; density of tailing slurry

0 引言

在铁精粉生产中,尾矿是主要的废弃物,近年来尾矿干排作为一种环保型尾矿处理手段在国内兴起。为了提高沉淀池中尾矿浆悬沙的沉降速度,需要在矿浆中加入絮凝剂。目前是以恒定的速率连续向矿浆中加入絮凝剂,但由于管道中矿浆悬沙含量不稳定,为了避免絮凝剂的浪费,需要在线检测密闭管道中矿浆的浓度,以此来控制絮凝剂添加管道阀门的开口度。

常用的在线检测矿浆浓度的方式有 γ 射线式浓度传感器、差压法浓度传感器和超声波浓度传感器等。其中: γ 射线式浓度传感器的放射源在安全管理上具有一定的困难;差压法浓度传感器笨重且精度低;超声波具有穿透性强、非接触测量及频率范围较宽等优点,在高浓度固液两相流的测量中超声波检测法具有明显的优势^[1]。超声波检测法是通过测量两相流中的声衰减,通过反演计算与数学模型中的预测结果相比较获得固相浓度^[2]。在这一过程中,精准地分析超声波在尾矿浆中传播的衰减特性尤为重要。许多学者曾研究过超声波在泥浆中的传播特性,但研究参数较为宽泛且不够精细,不能准确地反映出超声波在尾矿浆中传播的衰减特性^[3-7]。针对上述问题,本文结合尾矿浆实际参数特征,对超声波在尾矿浆中传播的衰减特性进行了数值模拟分析,以期尾矿浆检测设计合适的、高精度的超声波浓度传感器提供理论基础。

1 超声波衰减特性理论分析

超声波的衰减主要包括扩散衰减、散射衰减和黏滞衰减^[8]。

1.1 扩散衰减

扩散衰减是指超声波在传播过程中,因为随着传播距离的增大,非平面波的声速一直在扩展增大,单位面积上的声压随着距离的增大而减弱^[9]。扩散衰减只与传播距离有关系,超声波存在或者不存在,尾矿浆中传播扩散衰减的值不会改变,所以,本文不对扩散衰减进行研究。

1.2 散射衰减

散射衰减是指当超声波在尾矿浆中进行传播时,会受到尾矿浆粒子的阻挡,相当一部分的超声波就会散射出去,超声波的声波强度会被减弱。散射衰减不仅与尾矿浆中固体颗粒的浓度与粒子粒度有关系,还与尾矿浆本身的性质有关系。在理论研究时,需要把尾矿浆粒子理想地认为是一个刚性球状物体,它的半径为 r ^[10-12],在这种理想条件下,可以计算出散射衰减系数 α_s 为

$$\alpha_s = \frac{2}{9} Nm^4 \pi r^6 \quad (1)$$

式中: N 为单位体积内粒子的个数; m 为超声波的波数, $m = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。

1.3 黏滞衰减

超声波在尾矿浆中传播时产生黏滞衰减这一现象的原因:首先是因为尾矿浆本身具有黏滞性,尾矿浆中相邻的粒子运动速度不同导致摩擦力产生;其次是尾矿浆粒子之间本身发生的热传导现象,密度不同的尾矿浆在受力时会产生不同的热量,这就会造成超声波的能量减小,从而发生衰减^[13]。通过理论准确研究超声波在尾矿中传播时的黏滞衰减是难以实现的,国内外学者研究发现,由 Urick-Lamb 公式可以得到密度与黏滞衰减系数之间的关系^[14-15]。由 Urick-Lamb 公式得出的超声波黏滞衰减系数公式为

$$\alpha_v = \frac{3}{8} \pi m r \frac{q(h-1)^2}{q^2 + (h+j)^2} \quad (2)$$

式中: $q = \frac{4}{9er} \left(1 + \frac{1}{er}\right)$, $e = (b/2g)^{\frac{1}{2}}$, b 为角频率, g 为水的黏滞率; h 为矿浆粒子密度与液体密度之比; $j = \frac{1}{2} + \frac{9}{4er}$ 。

2 散射衰减数值模拟仿真

经实地取样测量铁精粉尾矿干排尾矿浆,其粒度为 80~200 目(75~180 μm),密度为 1.145~1.29 g/cm^3 。

2.1 尾矿浆粒径与散射衰减系数的关系

将尾矿浆粒径变化范围设为 $7.5 \times 10^{-5} \sim$

1.8×10^{-4} m, 超声波频率设为 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 MHz, 对超声波的散射衰减系数进行数值模拟仿真, 尾矿浆粒径与散射衰减系数的关系曲线如图 1 所示。

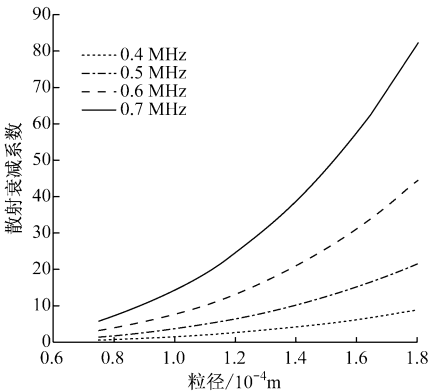


图 1 尾矿浆粒径与散射衰减系数的关系曲线
Fig. 1 The relationship curve between particle size and scattering attenuation coefficient of tailing slurry

从图 1 可看出, 超声波的频率一定时, 随着尾矿浆粒径的增大, 散射衰减系数也会增大, 且衰减系数与粒径的三次方近似成正比关系; 当尾矿浆的粒径相等、超声波频率不同时, 散射衰减系数随着超声波的频率增大而增大。

另外, 从图 1 还可以看出, 尾矿浆粒径太小时, 散射衰减会很小。设置频率区间为 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ MHz, 应用 Matlab 计算出尾矿浆粒径极小点为 $a = 5.5637 \times 10^{-5}$ m, 而尾矿浆粒径的最小值为 7.5×10^{-6} m, 大于极小值点, 所以, 超声波在尾矿浆中传播时的散射衰减不可忽略。

2.2 超声波频率与散射衰减系数的关系

通过上述分析可大概得到, 当尾矿浆的粒径值一定时, 随着超声波频率的增大, 散射衰减系数也在增大。为了使理论分析更加有说服力, 设置尾矿浆密度与粒径分别为 $1.2 \text{ g/cm}^3, 10^{-4} \text{ m}$, 设置频率范围为 0.25~1 MHz, 超声波频率与散射衰减系数关系曲线如图 2 所示。

由图 2 可看出, 散射衰减系数值随着超声波频率的增加而增加, 通过 Matlab 软件对图 2 中曲线拟合发现, 散射衰减系数与超声波频率的四次方约成正比关系。

3 黏滞衰减数值模拟仿真

通过式(2)可知, 影响超声波黏滞衰减的主要因素是超声波频率、尾矿浆密度、尾矿浆粒径。常温、标准大气压下水的密度与水的黏滞率分别为

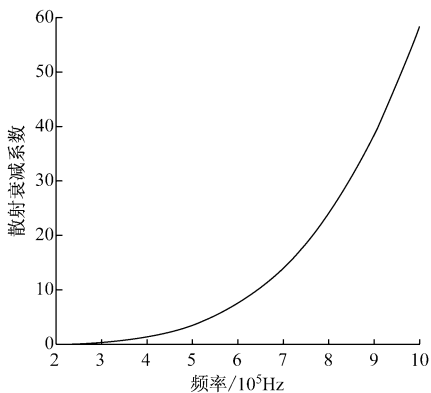


图 2 超声波频率与散射衰减系数关系曲线
Fig. 2 The relationship curve between ultrasonic frequency and scattering attenuation coefficient

$1 \text{ g/cm}^3, 1.006 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

3.1 尾矿浆密度与黏滞衰减系数的关系

分析尾矿浆密度与黏滞衰减系数之间的关系, 需把尾矿浆粒径与超声波频率设为固定参数。设超声波频率为 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 MHz, 尾矿浆密度为 $1.145 \sim 1.29 \text{ g/cm}^3$, 尾矿浆粒径分别为 $10^{-5}, 10^{-4} \text{ m}$, 应用 Matlab 软件进行数值模拟仿真, 尾矿浆密度和超声波黏滞衰减系数的关系曲线如图 3、图 4 所示。

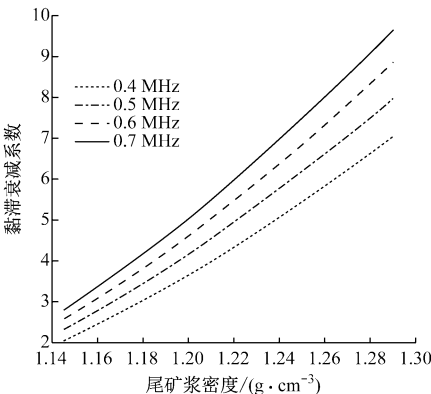


图 3 粒径为 10^{-5} m 时尾矿浆密度与黏滞衰减系数的关系曲线
Fig. 3 The relationship curve between density of tailing slurry and viscosity attenuation coefficient with particle size is 10^{-5} m

从图 3、图 4 可看出, 当超声波的频率与尾矿浆的密度都一样时, 随着尾矿浆粒径的增加, 超声波的黏滞衰减系数反而在减小; 当尾矿浆粒径固定时, 尾矿浆的密度越大, 黏滞衰减系数越大, 超声波的频率越高, 黏滞衰减系数越大。

3.2 尾矿浆粒径与黏滞衰减系数关系

为了更准确地分析尾矿浆粒径与黏滞衰减系数的关系, 将尾矿浆的密度与超声波的频率设置为固定值, 设置尾矿浆的密度为 1.2 g/cm^3 , 超声波的频

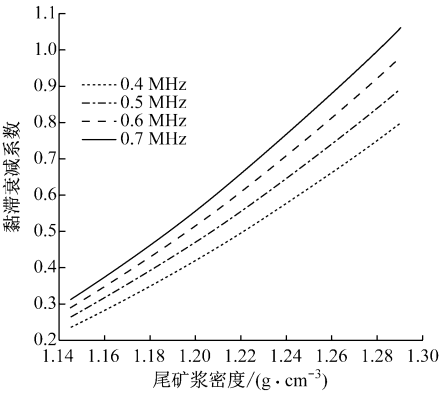


图 4 粒径为 10^{-4} m 时尾矿浆密度与黏滞衰减系数的关系曲线

Fig. 4 The relationship curve between density of tailing slurry and viscosity attenuation coefficient with particle size is 10^{-4} m

率为 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 MHz, 尾矿浆粒径与超声波黏滞衰减系数关系曲线如图 5 所示。

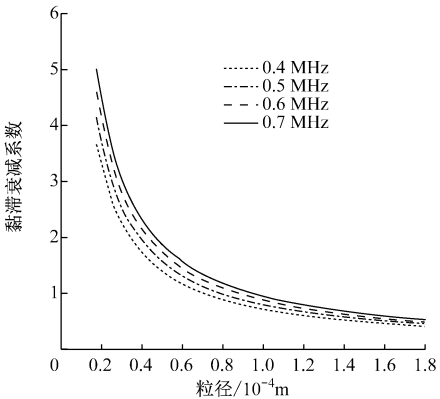


图 5 尾矿浆粒径与黏滞衰减系数的关系曲线

Fig. 5 The relationship curve between particle size and viscosity attenuation coefficient of tailing slurry

由图 5 可以很直观地观察到,随着粒径的增加,超声波的黏滞衰减系数逐渐减小。所以,可以用 Matlab 软件计算找到一个极小值点,如果尾矿浆粒径大于这个极小值点,黏滞衰减系数很小,甚至可以忽略不计。计算得到的极小值点为 1.15×10^{-4} m。尾矿浆粒径为 $1.15 \times 10^{-4} \sim 1.8 \times 10^{-4}$ m 时与黏滞衰减系数的关系曲线如图 6 所示。

由图 6 可以很清晰地看到,在尾矿浆粒径大于极限值点 1.15×10^{-4} m 时,黏滞衰减系数小于 1,对整体衰减的影响非常小,完全可以忽略不计。

3.3 超声波频率与黏滞衰减系数的关系

由上文可知,随着超声波频率的增大,黏滞衰减系数也增大。为了更清晰地分析超声波频率与黏滞衰减系数的关系,设置尾矿浆粒径和密度分别为 10^{-4} m, 1.2 g/cm^3 。超声波频率与黏滞衰减系数的

关系曲线如图 7 所示。

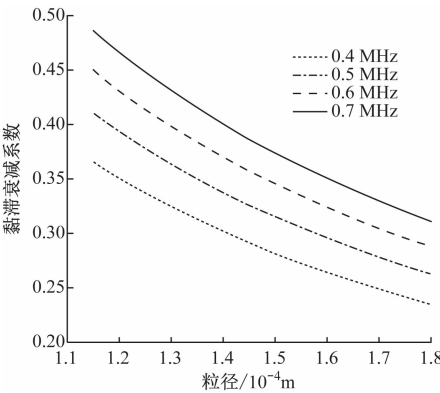


图 6 尾矿浆粒径为 $1.15 \times 10^{-4} \sim 1.8 \times 10^{-4}$ m 时与黏滞衰减系数的关系曲线

Fig. 6 The relationship curve between viscosity attenuation coefficient and particle size of tailing slurry with $1.15 \times 10^{-4} \sim 1.8 \times 10^{-4}$ m

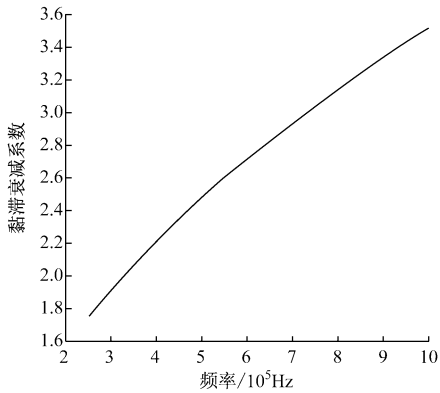


图 7 超声波频率与黏滞衰减系数的关系曲线

Fig. 7 The relationship curve between ultrasonic frequency and viscosity attenuation coefficient

由图 7 可以看出,超声波频率越大,尾矿浆的黏滞衰减系数也越大。通过 Matlab 软件拟合发现,超声波频率与黏滞衰减系数近似成正比关系。

4 结论

通过原理分析与数值模拟仿真,分析了超声波在尾矿浆中传播的衰减特性,包括超声波散射衰减与黏滞衰减,得到了超声波衰减系数与超声波频率、尾矿浆粒径、尾矿浆密度之间的关系,为设计高精度的超声波浓度传感器提供了理论依据。

(1) 散射衰减相对于整体的衰减占比非常大。在超声波频率一定时,随着尾矿浆的粒径增加,散射衰减也增大。

(2) 黏滞衰减相对于整体的衰减占比较小,且尾矿浆粒径为 $1.15 \times 10^{-4} \sim 1.8 \times 10^{-4}$ m 时,黏滞衰减系数非常小,可以忽略不计。当超声波的频率

与尾矿浆的粒径均为固定值时,黏滞衰减系数随着尾矿浆密度的增大而增大;当超声波频率与尾矿浆密度均为固定值时,尾矿浆的粒径越大,黏滞衰减系数越小。

(3) 散射衰减与黏滞衰减都随着超声波频率的增大而增大,散射衰减系数与超声波频率的四次方近似成正比,黏滞衰减系数与超声波频率近似成正比。

参考文献(References):

- [1] 薛明华,苏明旭,蔡小舒. 超声法测量高浓度矿浆两相流粒径分布和浓度[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(9):1520-1523.
XUE Minghua, SU Mingxu, CAI Xiaoshu. Particle size distribution and concentration characterization in mineral slurry by ultrasonic methods [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(9):1520-1523.
- [2] 苏明旭,蔡小舒,徐峰,等. 超声衰减法测量悬浊液中颗粒粒度和浓度[J]. 声学学报, 2004(5):440-444.
SU Mingxu, CAI Xiaoshu, XU Feng. The measurement of particle size and concentration in suspensions by ultrasonic attenuation [J]. Acta Acustica, 2004(5):440-444.
- [3] 魏露. 超声波矿浆粒度与浓度系统的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2016.
- [4] 张全兴. 超声波非均匀介质传播衰减特性研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2015.
- [5] 伍科. 超声波泥浆密度在线检测系统研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2015.
- [6] 郝壮. 超声波在井下混合介质中传播特性的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- [7] 董清华. 混凝土超声波衰减成像中的声场特性研究[J]. 工业建筑, 2007(增刊1):1020-1022.
DONG Qinghua. Study on acoustic field characteristic of the ultrasonic attenuation tomography in concrete [J]. Industrial Construction, 2007(S1):1020-1022.
- [8] 同济大学声学研究室. 超声测量[M]. 上海:同济大学出版, 2004.
- [9] 陈贤志. 超声波传播及水处理性能的实验研究[D]. 北京:北京工业大学, 2012.
- [10] 胡博. 超声波测量河流泥沙含量的算法研究[D]. 郑州:郑州大学, 2005.
- [11] SELDIS T, PECORARI C. Scattering-induced attenuation of an ultrasonic beam in austenitic steel [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 108(2):580-587.
- [12] MATSUSHIMA J, SUZUKI M, KATO Y, et al. Estimation of ultrasonic scattering attenuation in partially frozen brines using magnetic resonance images[J]. Geophysics, 2011, 76(1):1873-1874.
- [13] 聂世均. 超声波在泥浆中的传输规律研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2007.
- [14] 苏明旭,蔡小舒. 超细颗粒悬浊液中声衰减和声速的数值模拟——4种模型的比较[J]. 上海理工大学学报, 2002, 24(1):21-25.
SU Mingxu, CAI Xiaoshu. Numerical study on acoustical attenuation and acoustical velocity in suspension of superfine particles: a comparison of four models. [J] Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2002, 24(1):21-2.
- [15] 张宁波. 基于超声衰减的污水悬浊液浓度检测装置研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016.