

基于物理参数反演的木质颗粒声学特性研究*

郑丽君¹, 闫勇², 胡永辉^{1†}, 符贵梅¹

(1. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206; 2. 英国肯特大学 工程与数字艺术学院, 肯特 CT2 7NT)

摘要: 声学技术可用于非侵入式地测量木质颗粒的温度。为建立堆积生物质的声学测温模型, 有必要对堆积生物质的声学特性进行研究。木质颗粒被视作刚性框架多孔介质, 选择 Johnson-Champoux-Allard (JCA) 模型和 Pàde 近似模型作为木质颗粒的声学模型, 利用阻抗管法测量木质颗粒 (厚度 100 mm) 在频率范围为 200 ~ 1 500 Hz 的声波垂直入射时的声表面特性阻抗和吸声系数, 使用 Nelder-Mead 算法和遗传算法对声表面特性阻抗和吸声系数的代价函数进行优化计算, 确定模型中的物理参数。基于所建立的声学模型计算木质颗粒在不同频率和不同温度下的声速。结果表明, 声波在木质颗粒之间的孔隙中的传播存在频散现象, 室温 23℃ 时, 木质颗粒中的声速处于 200 ~ 220 m/s 范围内, 此后随温度的增加, 速度的变化梯度只有空气中声速随温度变化的一半, 与已有研究的实验结果保持一致, 验证了使用多孔介质声学理论建立堆积生物质测温模型的可行性。

关键词: 木质颗粒; 温度测量; 声学特性; 物理参数反演

中图分类号: TK6; TH89

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2021.04.003

Investigations into the Acoustic Properties of Wood Pellets through Inversion of Physical Parameters

ZHENG Li-jun¹, YAN Yong², HU Yong-hui¹, FU Gui-mei¹

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. School of Engineering and Digital Arts, University of Kent, Kent CT2 7NT, UK)

Abstract: The acoustic technique can be used to measure the temperature of wood pellets noninvasively. In order to establish a temperature measurement model for wood pellets, it is necessary to study the acoustic properties of wood pellets. Piled wood pellets are regarded as porous medium in a rigid frame. The acoustic properties of wood pellets were studied through inversion of physical parameters. An impedance tube was used to measure the surface acoustic characteristic impedance and sound absorption coefficient of wood pellets (with a thickness of 100 mm). The Johnson-Champoux-Allard (JCA) model and Pàde approximate model were selected as the acoustic models. The Nelder Mead simplex algorithm and genetic algorithm were used to minimize the cost function. Then the physical parameters in the models were determined. The sound speed at different frequencies and temperatures was calculated using the models. The sound speed in wood particles at 23°C was in the range of 200-220 m/s and the change gradient in speed was only half of that of sound speed in air with increasing temperature. The results showed that the sound waves disperse while propagating in the pores of wood pellets and the predicted results were in agreement with those from previous experimental studies.

Key words: wood pellets; temperature measurement; acoustic properties; inversion of physical parameters

0 引言

生物质原料常被制成如木质颗粒等成型颗粒, 用于发电产热。生物质存储过程中存在自加热现象, 会造成质量、热量损失, 甚至引发自燃和火灾^[1]。对堆积生物质内部温度进行监测有助于确保生物质

利用的安全性和经济性。目前堆积生物质内部温度主要是通过热电偶进行测量, 只能提供点测温结果, 且易被移动折断。低频声波可以通过堆积物料间隙中的空气传播, 根据声速-温度关系并结合层析成像技术, 可实现生物质内部温度分布测量^[2-4]。

声学法对堆积物料进行测温的应用对象主要是

* 收稿日期: 2021-04-23 修订日期: 2021-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61973115)

† 通信作者: 胡永辉, E-mail: yhhu@ncepu.edu.cn

粮食和生物质。YAN 等^[2]采用实验标定法确定了粮食中声速和温度的物理关系，结合层析成像技术对温度场进行重建，验证了粮食声学法测温的可行性。GUO 等^[3]采用相同的方法对堆积木质颗粒的单路径声学测温进行了实验验证。此外，HU 等^[4]直接使用 Miki 模型探究生物质颗粒粒径等参数对声速的影响。然而，Miki 模型只适用于分析孔隙率和曲折度非常接近 1 的多孔材料。对于孔隙率远小于 1 的木质颗粒，必须同时考虑流阻、孔隙率和曲折度三个参数对其声学特性的影响^[5]。因此，Pàde 近似模型（四参数模型）^[6]、Johnson-Champoux-Allard (JCA) 模型（五参数模型）^[7-8]更适合分析堆积木质颗粒的声学特性。

多孔介质声学模型中的参数可以通过实验和参数反演来确定。实验法操作复杂，价格昂贵，很难实现高精度测量。参数反演只需通过一套实验装置测量多孔介质的声学特性指标如声表面阻抗，就可快速确定多孔材料的声学特征参数。BONFIGLIO 等^[9]对十种不同的多孔材料进行实验研究，通过理论分析探究了参数反演法计算结果的精度和可靠性。这些研究都集中在纤维型和泡沫型的多孔材料，关于尺寸较大的多孔材料如生物质颗粒的研究很少。

目前堆积生物质的声学测温模型是通过实验标定，不能用来分析生物质特性如孔隙率对温度测量的影响，而 Miki 模型是对纤维类吸声材料声学特性的描述，也不适用于木质颗粒。针对上述问题，有必要建立木质颗粒的声学模型，进而探究堆积木质颗粒中的声速机理。因此，本文采用阻抗管测量木质颗粒在低频声波垂直入射时的声表面特性阻抗和吸声系数，采用参数反演方法建立木质颗粒的 JCA 模型和 Pàde 近似模型，并基于 JCA 模型和 Pàde 近似模型探究木质颗粒中的声速特性。

1 物理参数反演方法

多孔材料的声表面阻抗 $Z_s(\omega)$ 、吸声系数 $\alpha_n(\omega)$ 和复阻抗 $Z_c(\omega)$ 、复波数 $k_c(\omega)$ 存在如下关系^[5]：

$$Z_s(\omega) = -jZ_c(\omega) \cot[k_c(\omega)d] \quad (1)$$

$$\alpha_n(\omega) = 1 - \left| \frac{Z_s(\omega) - \rho_0 c_0}{Z_s(\omega) + \rho_0 c_0} \right| \quad (2)$$

式中： d 是多孔材料的厚度，m； ρ_0 是空气密度， kg/m^3 ； c_0 是自由空间里空气中的声速，m/s。

物理参数反演过程：首先计算 JCA 模型和 Pàde 近似模型不同频率下含待求参数的复阻抗和复波数，然后通过式 (1) 和式 (2) 分别计算声表面阻抗和吸声系数的模型值 $Z_{s,model}$ 、 $\alpha_{n,model}$ ；阻抗管法获得生物质颗粒在声波垂直入射时的声表面阻抗和吸声系数的测量值 $Z_{s,meas}$ 、 $\alpha_{n,meas}$ ；根据式 (3) 或式 (4) 计算代价函数 (cost function, CF)^[9]，最后选择合适的优化算法计算代价函数最小值，从而确定模型中的物理参数。

$$CF\{Z_s\} = \sum_{\omega} \left| |Z_{s,meas}(\omega)| - |Z_{s,model}(\omega)| \right| \quad (3)$$

$$CF\{\alpha_n\} = \sum_{\omega} \left| \alpha_{n,meas}(\omega) - \alpha_{n,model}(\omega) \right| \quad (4)$$

1.1 JCA 模型

对多孔介质进行声学特性分析时，JCA 模型是最常用的模型。在 JCA 等效流体模型中，多孔材料用等效密度和等效体积模量的流体来代替，多孔材料骨架和孔隙中饱和流体的黏性效应和热交换可以分开进行表示，关系如下^[7-8]：

$$\rho(\omega) = \frac{\alpha_{\infty} \rho_0}{\phi} \left(1 - j \frac{\sigma \phi}{\omega \alpha_{\infty} \rho_0} \sqrt{1 + j \frac{4\alpha_{\infty}^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \right) \quad (5)$$

$$K(\omega) = \frac{\gamma P_0 / \phi}{\gamma - (\gamma - 1) \left(1 - j \frac{8\eta}{\rho_0 \omega N_{Pr} \Lambda'^2} \sqrt{1 + j \frac{\rho_0 \omega N_{Pr} \Lambda'^2}{16\eta}} \right)^{-1}} \quad (6)$$

式中： σ 是流阻， $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ； ϕ 是孔隙率； α_{∞} 是曲折度； Λ 是黏性特征长度，m； Λ' 是热特征长度，m； ω 是角频率， rad/s ； η 是空气的动力黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； γ 是比热比，空气取 $\gamma = 1.4$ ； N_{Pr} 是普朗特数，空气取 $N_{Pr} = 0.71$ ； P_0 是环境大气压，Pa。温度在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 范围内，查阅文献^[10]得到不同温度下饱和空气的密度和动力黏度值，对其进行拟合结果如下：

$$\rho_0 = 1.0743 \times 10^{-5} T^2 - 4.5 \times 10^{-3} T + 1.2904 \quad (7)$$

$$\eta = 10^{-6} (0.046T + 17.1977) \quad (8)$$

式中： T 是温度， $^\circ\text{C}$ 。

复阻抗和复波数为：

$$Z_c(\omega) = \sqrt{\rho(\omega)K(\omega)} \quad (9)$$

$$k_c(\omega) = \omega \sqrt{\rho(\omega)/K(\omega)} \quad (10)$$

1.2 Pàde 近似模型

刚性多孔介质的孔隙可以近似为具有固定截面形状的棱柱状孔隙，此时孔隙的孔径接近对数正态

分布。多孔材料的动力黏度 $\rho(\omega)$ 和复合可压缩系数 $C(\omega)$ 可表示如下^[6]:

$$\rho(\omega) = \frac{\alpha_\infty}{\varphi} \left[\rho_0 + j \frac{\sigma\varphi}{\omega\alpha_\infty} F(\omega) \right] \quad (11)$$

$$C(\omega) = \frac{\varphi}{\gamma P_0} \left[\gamma - \frac{\alpha_\infty \rho_0 (\gamma - 1)}{\varphi \omega N_{Pr} \rho(\omega)} \right] \quad (12)$$

式中: $F(\omega)$ 是黏度校正函数。本文中假定堆积生物质孔隙的横截面为圆形, 则黏度校正函数的 Pade 近似如下^[6]:

$$F(\omega) = 1 + \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} e^{\frac{3}{2} \ln_2^2 \sigma_s^2} \left(\frac{4}{3} e^{4 \ln_2^2 \sigma_s^2} - 1 \right) \varepsilon^2}{\frac{\sqrt{2}}{2} e^{\frac{3}{2} \ln_2^2 \sigma_s^2} + \left(\frac{4}{3} e^{4 \ln_2^2 \sigma_s^2} - 1 \right) \varepsilon} \quad (13)$$

$$\varepsilon = -j \frac{\omega \rho_0 \alpha_\infty}{\sigma \varphi} \quad (14)$$

式中: ε 是复合无量纲的参数组合; σ_s 为孔径分布的标准差。

Pade 近似模型中复阻抗和复波数为:

$$Z_c(\omega) = \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{C(\omega)}} \quad (15)$$

$$k_c(\omega) = \omega \sqrt{\rho(\omega) C(\omega)} \quad (16)$$

1.3 最小化算法

在类似的反演问题中, Nelder-Mead 单纯形算法 (Nelder-Mead simplex method, NMSM) 应用最为广泛^[9,11]。遗传算法 (genetic algorithms, GA) 可以解决有约束优化问题, 利于全局寻优。由于缺少先验知识, 并且理论上来说, 生物质颗粒的声学模型参数不会因为最小化算法的选择发生改变, 因此, 本文采用 Nelder-Mead 单纯形算法和遗传算法对声表面阻抗和吸声系数的差值表示的代价函数进行优化, 当两种方法的解趋于一致时, 作为最终结果。

2 实验装置

图 1 所示为基于阻抗管法测量木质颗粒在声波垂直入射时的声表面阻抗和吸声系数的硬件示意图。按照 ISO 10534-2 测试标准里传递函数法进行测试^[13]。测试样品安装在阻抗管的一端, 信号发生器产生线性调频信号, 在靠近样品的两个位置上测量声压, 再计算法向入射吸声系数和声表面阻抗。阻

抗管内径为 100 mm, 测试频率范围是 60 ~ 1 800 Hz。高频声波在堆积生物质内衰减极大, 因此使用 200 ~ 1 500 Hz 声波进行测量。

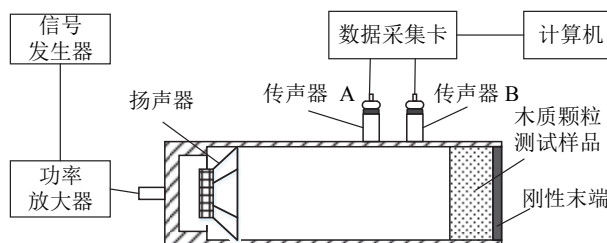


图 1 阻抗管法测量木质颗粒的声表面阻抗和吸声系数的硬件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of impedance tube for measuring the surface acoustic impedance and sound absorption coefficient

单个木质颗粒是圆柱体型的, 直径和长度分别为 8 mm 和 10 ~ 35 mm。图 2 所示为测量样品。颗粒被装在亚克力管内, 两端用金属网格固定, 其长度和外径均为 100 mm, 壁厚为 2 mm。对三个样品进行测量, 取平均值作为测量结果。实验时, 环境大气压为 101.7 kPa, 温度为 23 °C。



图 2 木质颗粒测试样品

Fig. 2 Test samples of wood pellets

3 结果和分析

3.1 阻抗管测量结果

木质颗粒在声波垂直入射时的声表面阻抗和吸声系数测量结果如图 3 所示。声表面阻抗和吸声系数呈现一定的周期性。在实验频段内, 声表面阻抗出现两个峰值, 与堆积沙石 (平均粒径 15 ~ 20 mm) 的声表面阻抗随频率的变化规律类似^[5]。对于纤维型和泡沫型多孔材料, 在该频段的声表面阻抗没有出现峰值, 实部是接近平行于横轴的直线, 虚部是单调递增的^[5-6,11]。产生这种差异的原因主要在于圆柱体颗粒的平均粒径大小对流阻、孔隙率等参数的影响。纤维型和泡沫型的多孔材料骨架的平均粒径大概在 100 μm 数量级, 而木质颗粒的平均粒径大概

是它们的 80 倍。平均粒径越大，声表面阻抗的峰值往低频方向偏移，峰值变化周期缩短，因此可以在 200 ~ 1 500 Hz 频段内观察到两个峰值。吸声系数也

表现出类似的变化，这与 PEREIRA 等^[12]对不同粒径黏土颗粒的吸声系数的测量结果一致。

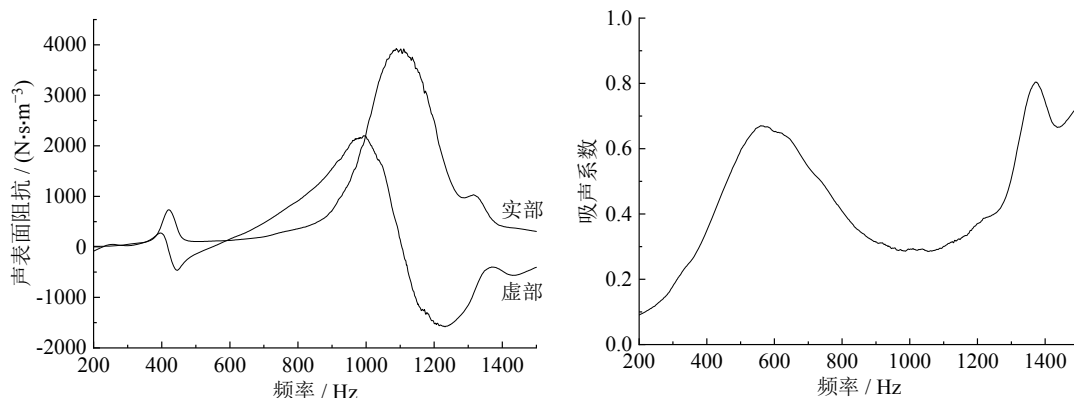


图 3 (a) 木质颗粒的声表面阻抗测量值; (b) 木质颗粒的吸声系数测量值

Fig. 3 (a) Measured values of surface acoustic impedance of wood pellets; (b) measured values of sound absorption coefficient of wood pellets

3.2 物理参数反演结果

物理参数反演方法确定 JCA 模型和 Pade 近似模型中的物理参数，包括流阻、孔隙率、曲折度、黏性特征长度、热特征长度和孔径分布的标准差，计算结果如表 1 所示，表中 Imp_JCA_NMSM 表示基于声表面阻抗的采用 NMSM 算法进行参数反演

确定 JCA 模型中的参数值，其余同理。从表中可以看到，虽然通过参数反演的方法不能得到物理参数的唯一值，但可以确定物理参数的大概取值范围。相比这些参数的具体取值，通过反演方法计算的木质颗粒的声表面阻抗和吸声系数的模型值和实验值的一致性更重要。

表 1 JCA 模型和 Pade 近似模型中物理参数反演结果

Table 1 Inversion results of physical parameters in JCA model and Pade approximate model

| 编号 | 参数设置 | $\sigma / (Pa \cdot s \cdot m^{-2})$ | φ | α_{∞} | $\Lambda / \mu m$ | $\Lambda' / \mu m$ | σ_s |
|----|---------------|--------------------------------------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------|------------|
| 1 | Imp_JCA_NMSM | 1 698 | 0.496 | 1.90 | 344 | 385 | — |
| 2 | Imp_JCA_GA | 1 521 | 0.543 | 2.03 | 284 | 577 | — |
| 3 | Imp_Pade_NMSM | 1 037 | 0.479 | 1.56 | — | — | 0.76 |
| 4 | Imp_Pade_GA | 1 587 | 0.476 | 1.57 | — | — | 0.52 |
| 5 | Coe_JCA_NMSM | 1 532 | 0.627 | 1.58 | 174 | 301 | — |
| 6 | Coe_JCA_GA | 2 532 | 0.722 | 2.20 | 157 | 510 | — |
| 7 | Coe_Pade_NMSM | 2 271 | 0.706 | 1.75 | — | — | 0.46 |
| 8 | Coe_Pade_GA | 2 153 | 0.706 | 1.74 | — | — | 0.49 |

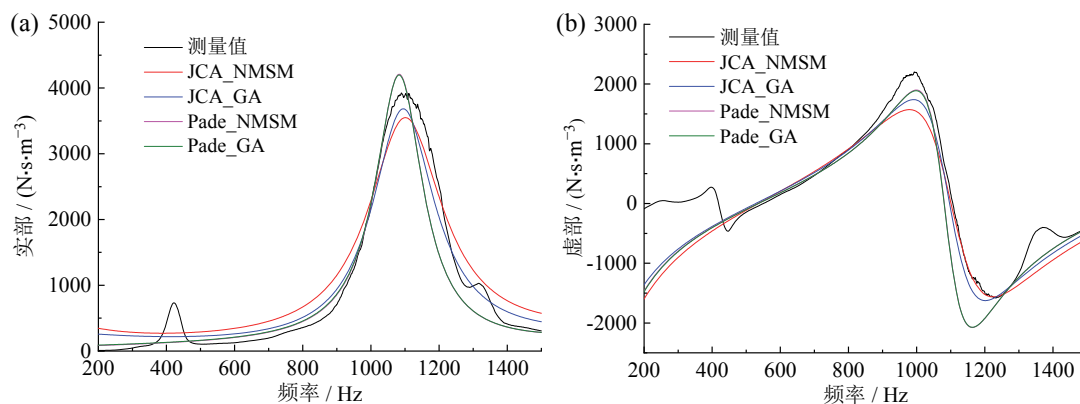


图 4 基于参数反演的木质颗粒的声表面阻抗模型值: (a) 实部; (b) 虚部

Fig. 4 Predicted values of surface acoustic impedance of wood pellets based on parameter inversion: (a) real part; (b) imaginary part

木质颗粒的声表面阻抗和吸声系数的模型值计算结果如图 4 和图 5 所示。对于声表面阻抗,木质颗粒的声表面阻抗测量值的实部在频率为 400 Hz 和 1 100 Hz 处均出现峰值,整个实验频段内呈现“双峰特性”,但木质颗粒的声表面阻抗模型值只能拟合出 1 100 Hz 处的峰值。这是由于木质颗粒在 400 Hz 处声表面阻抗实部测量值只有 1 100 Hz 处峰值的 20%,两个峰值是随频率递增的,而 JCA 模型和 Pade 近似模型计算的声表面阻抗实部的峰值呈现周期性衰减,不能拟合出峰值递增的状态。木质颗粒的吸声系数的模型值和实验值的一致性更好。频率在 200~1 200 Hz 范围内,木质颗粒吸声系数的模型值与测量值基本吻合。

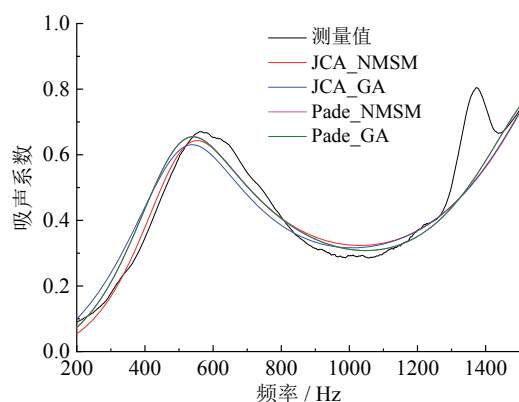


图 5 基于参数反演的木质颗粒吸声系数模型值

Fig. 5 Predicted values of sound absorption coefficient of wood pellets based on parameter inversion

3.3 木质颗粒中声波传播速度

多孔介质复波数的实部和声速存在如下关系:

$$c_f = \frac{2\pi f}{\text{Re}(k_c)} \quad (17)$$

式中: c_f 是频率 f 下的声速。把表 1 中的物理参数代入对应声学模型,计算木质颗粒的复波数。根据式(17)计算实验环境温度 23℃ 下在 200~1 500 Hz 频率范围内木质颗粒中的声速,结果如图 6 所示。木质颗粒孔隙中的声速和频率是单调递增,这种变化趋势和 GUO 等^[3]的实验结果一致。这也意味着声波在多孔介质中的传播存在严重的频散现象。

线性扫频信号是探究声学法测温时最常用的声源信号。在选择线性扫频信号作为声源时,测得声波速度是在实验频段里的平均声波速度。根据式(18)可以计算固定频率范围内的平均声波速度 c_m :

$$c_m = \frac{\int c_f df}{\int df} \quad (18)$$

生物质内部因自加热温度超过 80℃ 时,自燃风险达到预警点^[1]。因此,应用声学法进行堆积生物质内部温度测量,要求声学法在 20~80℃ 范围内的测温精度尽可能高。对于 JCA 模型和 Pade 近似模型,由式(5)和式(6)、式(11)和式(12)可知,0~100℃ 温度范围内,随温度变化最大的参数是空气密度和空气动力黏度,其他参数随温度变化很小,可视为定值。根据式(7)和式(8)计算 20~80℃ 的空气密度和空气动力黏度,然后代入 JCA 模型和 Pade 近似模型计算复波数,最后根据式(17)和式(18)计算不同温度下木质颗粒孔隙中的声速,结果如图 7 所示。在同一温度下,木质颗粒中的声速远小于自由空间空气中的声速,数值约为自由空间中声速的三分之二。当温度发生变化时,自由空间中空气里的声速变化梯度比木质颗粒孔隙中更明显,大约是孔隙中声速的两倍。这个理论温度和声速关系和 GUO 等^[3]和 HU 等^[4]利用线性扫频信号测得的实验结果具有高度一致性。

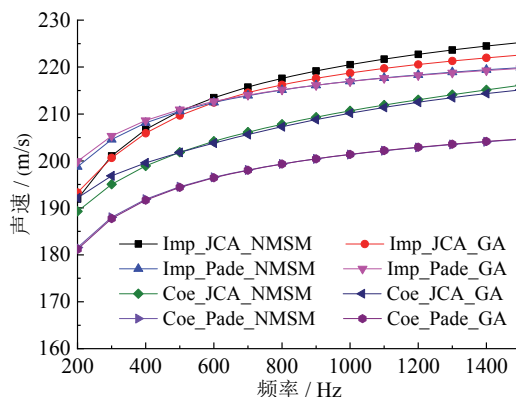


图 6 23℃ 时不同频率下木质颗粒的声速模型值

Fig. 6 Theoretical relationship between frequency and sound speed of wood pellets with $T = 23^\circ\text{C}$

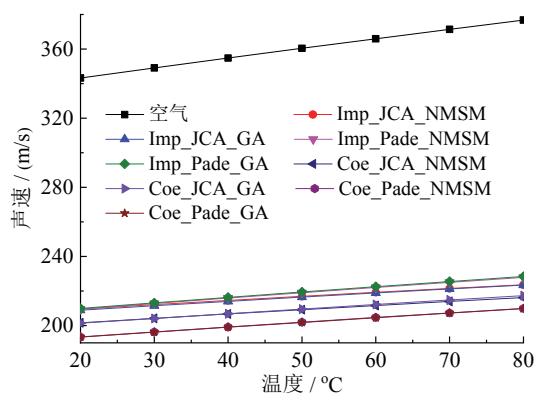


图 7 200~1 500 Hz 内木质颗粒的平均声速和温度关系

Fig. 7 Theoretical relationship between temperature and average sound speed of wood pellets with the frequency of sound waves (in the range of 200-1500 Hz)

4 结 论

提出了一种基于木质颗粒的声学特性建立声学测温模型的方法。首先使用阻抗管测量频率范围在 200 ~ 1 500 Hz 内木质颗粒的声表面阻抗和吸声系数，并且通过参数反演确定模型参数，其中木质颗粒样品的流阻取值范围是 1 037 ~ 2 532 Pa·s/m²，孔隙率取值范围是 0.476 ~ 0.722，曲折度取值范围是 1.56 ~ 2.22。JCA 模型和 Pàde 近似模型能对木质颗粒的声学特性进行准确描述，验证了基于物理参数反演的多孔介质声学理论对堆积木质颗粒进行声学特性分析的可行性。根据建立的 JCA 模型和 Pàde 近似模型，结合空气密度、动力黏度和温度的关系计算得到不同温度下木制颗粒中的声速。室温 23℃ 时，木质颗粒中的声速处于 200 ~ 220 m/s 范围内，此后随温度的升高，速度的变化梯度只有空气中声速随温度变化的一半，与已有研究的实验结果一致。该声学测温模型能准确地反映堆积木质颗粒中的声速规律。

参考文献：

- [1] 范朋慧, 张辉, 盛昌栋. 生物质燃料自加热、自燃及其防范综述[J]. 生物质化学工程, 2014, 48(4): 51-56. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5854.2014.04.010.
- [2] YAN H, CHEN G N, ZHOU Y G, et al. Primary study of temperature distribution measurement in stored grain based on acoustic tomography[J]. Experimental thermal and fluid science, 2012, 42: 55-63. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2012.04.010.
- [3] GUO M, YAN Y, HU Y H, et al. Temperature measurement of stored biomass using low-frequency acoustic waves and correlation signal processing techniques[J]. Fuel, 2018, 227: 89-98. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.04.062.
- [4] HU Y H, GUO M, YAN Y, et al. Temperature measurement of stored biomass of different types and bulk densities using acoustic techniques[J]. Fuel, 2019, 257: 115986. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.115986.
- [5] HOROSHENKOV K V. A review of acoustical method for porous material characterisation[J]. International journal of acoustics and vibration, 2017, 22(1): 92-103. DOI: 10.20855/ijav.2017.22.1455.
- [6] HOROSHENKOV K V, ATTENBOROUGH K, CHANDLER-WILDE S N. Pàde approximants for the acoustical properties of rigid frame porous media with pore size distributions[J]. Journal of the acoustical society of America, 1998, 104(3): 1198-1209. DOI: 10.1121/1.424328.
- [7] JOHNSON D L, KOPLIK J, DASHEN R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media[J]. Journal of fluid mechanics, 1987, 176: 379-402. DOI: 10.1017/s0022112087000727.
- [8] CHAMPOUX Y, ALLARD J F. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media[J]. Journal of applied physics, 1991, 70(4): 1975-1979. DOI: 10.1063/1.349482.
- [9] BONFIGLIO P, POMPOLI F. Inversion problems for determining physical parameters of porous materials: overview and comparison between different methods[J]. Acta acustica united with acustica, 2013, 99(3): 341-351. DOI: 10.3813/AAA.918616.
- [10] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 408-409.
- [11] BERARDI U, IANNACE G. Predicting the sound absorption of natural materials: best-fit inverse laws for the acoustic impedance and the propagation constant[J]. Applied acoustics, 2017, 115: 131-138. DOI: 10.1016/j.apacoust.2016.08.012.
- [12] PEREIRA M, CARBAJO J, GODINHO L, et al. Acoustic behavior of porous concrete. Characterization by experimental and Inversion Methods[J]. Materiales de construcción, 2019, 69(336): e202. DOI: 10.3989/mc.2019.03619.
- [13] ISO. Acoustics—determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes—part 2: transfer-function method: ISO 10534-2: 1998[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1998.

作者简介：

郑丽君 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事堆积生物质声学法温度测量研究。

闫 勇 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事多相流检测技术、智能仪表与状态监测等研究。