引用格式：吕薇, 姜根山, 刘月超, 等 . 温度对核电站传热管阵列声透射特性的影响[J]. 声学技术, 2022, **41**(6): 789-795. [LYU Wei, JIANG Genshan, LIU Yuechao, et al. Influence of temperature on sound transmission characteristics in heat transfer pipe array of nuclear power plant[J].Technical Acoustics, 2022, **41**(6): 789-795.] **DOI**: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.06.001

温度对核电站传热管阵列声透射特性的影响

吕 薇[1]，姜根山[1]，刘月超[2]，张 伟[1]
(1. 华北电力大学，北京 102206；2. 华北电力大学（保定），河北保定 071003)

摘要：为了研究温度分布对于管阵列结构中的声透射特性的影响，以核电站的实际工况为背景，构建了不同的温度场以及周期性变化的非均匀温度场，利用有限元方法进行数值模拟。结果表明：(1) 温度分布会改变管阵列声透射频谱的“禁带”宽度以及中心频率位置。在同一介质中，温度变化对频率较高位置的影响大于频率较低的位置。(2) 在同样为10℃的温度差下，当水的平均声速为1 653 m·s^{-1}、饱和水蒸气的平均声速为522.5 m·s^{-1}时，介质为水时的禁带宽度及中心频率位置变化较大，即声速大的介质的频谱对于温度的变化更敏感。(3) 当温度差在10℃以内，在周期性变化的非均匀温度场和与均匀温度场中管阵列声透射特性在第一中心频率23 996.1 Hz之前，两频谱差别很小，在第一禁带之后会出现明显区别。该研究成果对完善核电站应用的声学检测提供了理论基础。

关键词：核电站；蒸汽发生器；声子晶体；带隙；温度场
中图分类号：O422；O429 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-3630(2022)-06-0789-07

Influence of temperature on sound transmission characteristics in heat transfer pipe array of nuclear power plant

LYU Wei[1], JIANG Genshan[1], LIU Yuechao[2], ZHANG Wei[1]
(1. *North China Electric University, Beijing* 102206*, China*; 2. *North China Electric University*，*Baoding* 071003*, Hebei, China*)

Abstract: In order to study the influence of temperature distribution on the sound transmission characteristics in the pipe array structure, different temperature fields including the periodic non-uniform temperature fields are constructed according to the actual working conditions of nuclear power plant, and the finite element method is used for numerical simulation. The results show that :(1) the temperature distribution changes the width of the "gap" and the location of the center frequency in the sound transmission spectrum of pipe array, and the effect of temperature change on higher frequency locations is greater than that on lower frequency locations in the same medium; (2) in the condition that the temperature difference of 10℃ is the same, the average sound velocity of water is 1 653 m·s^{-1} and the average sound velocity of saturated water vapor is 522.5 m·s^{-1}, the band gap width and the center frequency location change greatly when the medium is water, that is, the sound transmission spectrum of pipe array in the medium with large sound velocity is more sensitive to the temperature change. (3) When the temperature difference is less than 10℃, there is little difference between the two spectra before the first central frequency of 23 996.1 Hz in the non-uniform temperature field with periodic variation and in the uniform temperature field, and a significant difference will appear after the first band gap. The research results provide a theoretical basis for the improvement of acoustic detection method in nuclear power plant.

Key words: nuclear power plant; steam generator; phononic crystal; band gap; the temperature field

0 引 言

在“十四五”时期，我国将大力发展非化石能源，构建以新能源为主体的新型电力系统，推动碳达峰、碳中和目标的实现。核电站发电作为一种节约资源、保护环境的发电方式有效地解决了高用电量的问题，那么如何保证核电厂安全高效的运行就成为了关键。在压水堆(Pressurized Water Reactor)核电厂中使用的蒸汽发生器是核心结构，而蒸汽发生器传热管因内外表面应力腐蚀、高温疲劳、松动部件磨损以及耗蚀造成的蒸发器传热管破裂事故(Steam Generator Tube Rupture, SGTR)[1]严重威胁着核电厂的正常有效运作。声学检测法(Acoustic De-

收稿日期: 2021-07-29; **修回日期:** 2021-08-29
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12074118，11674093)、河北省自然基金资助项目(A2019502160)、声场声信息国家重点实验室资助项目(SKLA201808)。
作者简介: 吕薇(1996—)，女，硕士研究生，研究方向为核电站内声传播特性研究。
通信作者: 姜根山，E-mail: gsjiang@ncepu.edu.cn

tection Method, ADM)[2]，由于在检测机理上的优势，目前已成为电站锅炉泄漏检测中最具潜力的一种检测手段[3]。

蒸汽发生器内部为周期性管阵列结构，目前对于管阵列中的声传播特性已有大量系统的研究。在20世纪末期，文献[4-6]中将管排阵列看作是衍射光栅，结合光栅衍射理论及法布里-珀罗(Fabry-perot, F-P)效应研究了有限或者无限管排的声传播特性，并将二维模型拓展到三维模型，提出一种斜传播情况。之后有许多研究者将其用于其他领域，例如Carter等[7-8]将这种管阵列模型引入水中，采用匹配渐近展开法求解了水波通过周期性排列的无穷多结构的频域传播问题。目前国内对于管阵列特性已做了系统的研究，姜根山课题组[9-12]利用平面波展开法以及时域有限差分法研究了火电厂炉内的传播特性，分别就单、多排管阵列、二维斜入射以及传热管外声流特性等相关方面进行了具体的论述。

上述研究的适用环境为火电锅炉或者为常温的水中，且均为均匀温度场。对于核电站高温高压环境的研究还较少，且未涉及到非均匀温度场的声透射特性的数值研究。

本文对在不同温度分布下的声透射特性进行研究，分析在不同工况下的频谱禁带宽度、中心频率位置随温度的变化情况，并拟合一个非均匀温度场，研究变化的温度场对声透射率的影响，得到温度分布对蒸汽发生器管阵列中声透射特性的影响规律，为后期声学检测法的完善提供了具体的参考。

1 声波在管阵列中传播的物理模型

1.1 管阵列模型

蒸汽发生器是一种内部为三维周期性传热管阵列结构的热交换机，有方形排列、错排排列和三角形排列共三种排列方式，其中主要是以方形排列为主。本次研究使用Comsol有限元软件进行二维仿真计算，建立如图1所示的计算模型，设置入射声波区域、传热管阵列区域以及声波接收区域，在管阵列区域建立10×10的周期性管排阵列几何模型，选取压水堆蒸汽发生器中的某一经典型号参数，其中管半径r=11 mm与管间距d=32.5 mm，计算区域高$9d+4r$，宽$18d+8r$。入射声压设置为$P_{in}=p_0.\exp[-i(k\cdot u)]$，声压振幅$p_0$=1 Pa，$k=\omega/c$为波数，$\boldsymbol{u}$为位置矢量。

1.2 控制方程

可压缩、无热传导、无黏性流体流动问题的动量方程和连续性方程[13]分别为

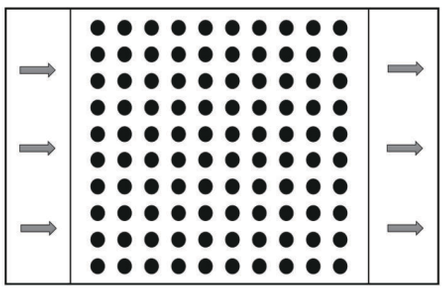


图1 周期性管排阵列模型图

Fig.1 Model diagram of periodic pipe array

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t}+(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}=-\frac{1}{\rho}\nabla p \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\boldsymbol{u})=0 \tag{2}$$

式中：ρ是总密度，p是总声压，$\boldsymbol{u}$是速度场。

在经典的压力声学中，所有的热力学过程都假定是可逆和绝热的。引入声波作用后，在固定流体中存在小参数变化：

$$\begin{cases} p=p_0+p_1 \quad , & p_1<<p_0 \\ \rho=\rho_0+\rho_1 \quad , & \rho_1<<\rho_0 \\ \boldsymbol{u}=\boldsymbol{u}_0+\boldsymbol{u}_1 \quad , & |\boldsymbol{u}_1|<<c \end{cases} \tag{3}$$

式中：p_1、ρ_1、$\boldsymbol{u}_1$表示小的声学变化，将这些插入到控制方程中，并且在小扰动变量中只保留线性项，引入线性声学中的微扰近似$p_1<<\rho_0c^2$。最后，重新整理方程，将动量散度方程插入连续性方程，得到无损介质中声波的波动方程：

$$\nabla\cdot(\frac{1}{\rho}\nabla p)+\frac{k^2p}{\rho}=0 \tag{4}$$

式中：$k=\omega/c$为波数。

1.3 边界条件

本次研究位于核电站高温高压的环境，压强为6.0 MPa，温度范围是260℃～290℃。根据物理模型，设置如下的边界条件：

(1)入口设置

在入射声波区域设置为背景压力场：

$$p=p_0e^{-i(\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{u})}=p_0e^{-ik\left(\frac{\boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{e}_k}{\|\boldsymbol{e}_k\|}\right)} \tag{5}$$

式中：p_0为波幅值，e_k为波向矢量，$\boldsymbol{u}$为位置矢量。在本次研究中设定p_0=1 Pa,声波垂直入射。因涉及核电站三种工况的计算，在压强为6 MPa时，均匀温度场及非均匀温度场的温度设置根据实际而定。

(2)硬边界设置

定义所有传热管壁为硬边界，加速度的法向分量为0：

$$\frac{\partial p_t}{\partial \boldsymbol{n}}=0 \tag{6}$$

(3)出口设置

计算域边界均为平面波辐射，对声波接收区域积分得到透射声压p_0，可以得到透射系数

$$T=(p_0/p)^2 \tag{7}$$

1.4　计算结果验证

当声波在声子晶体之间传播时，会在晶体之间产生反射与散射。由于不同的声子晶体之间有不同的晶格常数，当晶格常数与某频段满足某种关系时，声波在此声子晶体之间传播时主要以反射为主，无法通过该区域，那么该频段的集合称之为“禁带”，可以通过该区域的频段称之为“导带”[14]，将透射率低于1/2的频带处定义为“禁带”。声子晶体带隙形成的机理可由布拉格(Bragg)定律来解释，如图1所示，两管排之间间距为d，声波倾斜入射时的入射角为$(\pi/2-\theta)$，P_1与P_2为两束平行声波，图中蓝色的部分为声波程差$L=2d\sin\theta$，当声波程差为波长的整数倍时，声波反射干涉加强，那么根据能量守恒原理，声波的透射减弱，那么产生“禁带”的条件为：$n\lambda=2d\sin\theta$。根据$\lambda=c/f$，可以得到$f=nc/(2d\sin\theta)$(n为整数)，c为声波在常温水中的波速，f为频率。当声波垂直入射时，角度$\theta=\pi/2$，“禁带”的中心频率满足：

$$f=nc/2d \tag{8}$$

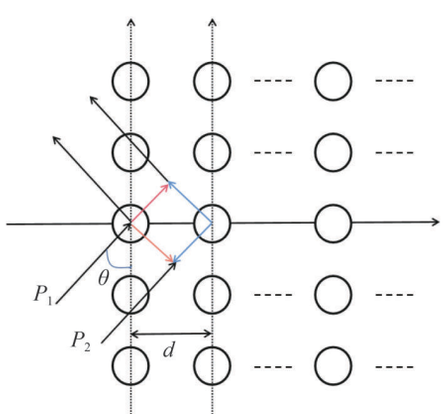


图2　布拉格定律描述声波在管列阵中传播的示意图

Fig.2　Sound propagation in tube array described by Bragg Law

可将计算得出的禁带中心频率与布拉格定律进行对比验证，证实在高温高压环境下计算的高频结果的准确性。

2　传热管阵列声透射特性数值模拟

整个核电厂分成三个回路，蒸汽发生器为一回路与二回路的主要链接部位。传热管内的高温高压水为一回路，管内运行压强可达15.5 MPa，进水温度为315℃~330℃，出水温度约为288℃。管外的流体(水与水蒸气混合物)为二回路，正常工作环境为6.1 MPa，在这种压强下水的沸点为275.56℃，由于管内液体沸腾流动其换热特性会发生很大变化，因此从上到下可简单地分成三个区域，将换热区划分为过热蒸汽区、沸腾区和过冷水区[15]。

2.1　过热蒸汽区管阵列

过热蒸汽区的流体为饱和水蒸气，平均温度为286.3℃，在不同的运行功率下有不同的蒸汽温度，在满功率100%FP时(FP为满功率(Full power, FP))，饱和水蒸汽温度大约为283.18℃，在低功率10%FP时，饱和水蒸汽温度为291.1℃，其中的温度差在8℃左右。根据实际工况分别计算模拟在60个大气压下，281℃和291℃时的传热管排的声透射特性，研究温度对传播特性的影响。对理想气体的小振幅声波，声速的计算公式为

$$c_0^2=\gamma P_0/\rho_0 \tag{9}$$

其中：对于饱和水蒸汽而言比热率为$\gamma=1.3$，在60个大气压$P_0=6.079\times10^6$ Pa下、温度为291℃与281℃时，饱和水蒸气的密度分别为$\rho_0=28.8$ kg·m^{-3}和$\rho_0=30.14$ kg·m^{-3}，根据式(9)计算可得声速分别为$c_0=523.87$ m·m^{-3}和$c_0=512.01$ m·m^{-3}。计算所用材料属性如表1。

表1　计算所用饱和水蒸气参数

Table 1　Parameters of saturated steam used in the calculation

温度/℃	声速/(m·s^{-1})	密度/(kg·m^{-3})
291	523.87	28.80
281	512.01	30.14

图3与图4为利用仿真软件模拟得到的声波透射图。通过结果可知在计算频率范围内出现了两个完整的“禁带”，在291℃时，5 404.1～9 801.5 Hz与13 346.8～19 929.6 Hz频段范围内声音被阻止，而在281℃时，两个完全“禁带”频率范围分别为5 281.9～9 579.9 Hz与13 346.8～19 929.6 Hz。通过公式(8)可以计算在291℃时的第一“禁带”和第二“禁带”中心频率分别为8 059.5 Hz与16 119.1 Hz，而由图得到的中心频率为7 602.5 Hz与16 638.1 Hz，其数值大小与布拉格定律计算结果相差无几。在281℃时，公式计算得两个“禁带”的中心频率分别为7 877.1 Hz与15 754.2 Hz，图中的两个中心频率为7 430.9 Hz与16 162.1 Hz，两种方法计算的中心频率位置相近。

图5为281℃和291℃时的声透射特性的对比图。通过对比可以发现在不同温度时的透射频谱是有差别的，其禁带宽度以及中心频率位置均有改

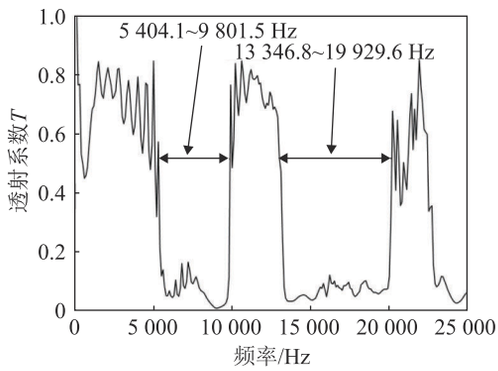


图3 管阵列在291℃时声波透射频谱图

Fig.3 Sound transmission spectrum of the pipe array at 291℃

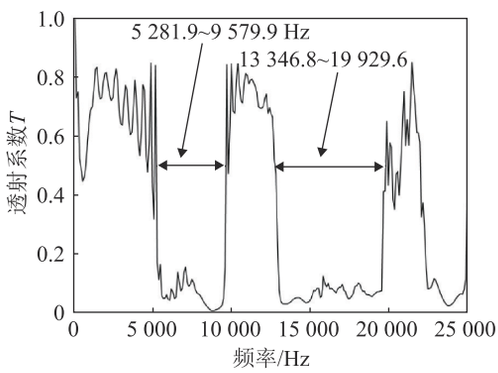


图4 管阵列在281℃时声波透射频谱图

Fig.4 Sound transmission spectrum of the pipe array at 281℃

变，但频谱在整体走势上是相似的。在291℃时，第一禁带宽度为4 397.4 Hz，而在281℃时，第一禁带宽度为4 298 Hz。对于第二禁带，291℃时带宽为6 582.8 Hz，281℃时带宽为6 434 Hz，通过对比可知，温度较高的同级禁带带宽相较于湿度较低时会增加。在10℃的温度差下，第一禁带带宽增加了89.4 Hz，中心频率位置向高频处偏移了161.6 Hz；第二禁带带宽增加了146.8 Hz，中心频率位置偏移了476 Hz。说明在同等温度差下，温度对于频率越高位置的禁带带宽以及中心频率位置的影响越大。

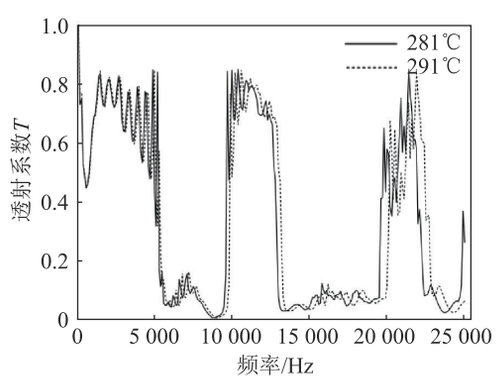


图5 在281℃与291℃时管阵列透射频谱对比图

Fig.5 Comparison of sound transmission spectrums of the pipe array at 281℃ and 291℃

2.2 过冷水区管阵列

过冷水区的主要介质为水，进水温度为226℃，在压强为6 MPa时，水的沸点为275.56℃，所以在这个区域温度分布在226℃～275.56℃。为了与过热蒸汽区相比较，将计算范围也控制在10℃的温度差下，分别计算275℃和265℃时的均匀温度场下的声透射特性。对液体等一般流体，可由物态方程推得声速公式：

$$c^2=\left(\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}\rho}\right)_{s,0}=\frac{K_\mathrm{s}}{\rho} \tag{10}$$

其中：K_S为体积弹性系数，ρ为当前环境下的水的密度。因c^2通常是ρ的函数，且在温度差较小时，体积弹性系数的变化较小[16]，所以考虑其中的误差，取K_S=2.1×10^9 Pa。在P_0=6.079×10^6 Pa下、温度为275℃与265℃时水的密度为ρ_0=759.4 kg·m^{-3}和ρ_0=777.1 kg·m^{-3}。根据式(10)计算得在两种温度下的声速分别为1 662.9 m·s^{-3}和1 643.9 m·s^{-3}，所用水的参数如表2所示。

表2 计算所用水的参数

Table 2 Parameters of water used in the calculation

温度/℃	声速/(m·s^{-1})	密度/(kg·m^{-3})
275	1 662.9	759.4
265	1 643.9	777.1

图6、图7为在275℃与265℃的均匀温度场下模拟计算所得的结果。同样在以水为管外介质的传播空间中，也会出现相应的“导带”与“禁带”，相对于以饱和水蒸气为介质的传播空间，每级禁带出现的频率都较高，这与不同介质的声速大小有关。对于275℃，在17 154.6～31 113.4 Hz、42 367.6～63 263.9 Hz区间声音被阻断。在265℃时，声透射“禁带”区间为16 958.6～30 757.9 Hz与41 883.5～62 541.0 Hz。由图6、7中结果可以看出在275℃时，两中心频率位置分别为24 134.0 Hz与52 815.8 Hz；在265℃时，中心频率为23 858.3 Hz与52 212.3 Hz，其数值符合布拉格定律。

图8为275℃与265℃时的声透射特性对比图。对比图整体趋势符合之前的结论，对于频率越高的位置温度影响越大。在275℃时的第一禁带宽度为13 958.8 Hz，相较于265℃时的13 799.6 Hz增加了159.2 Hz。而第二禁带，275℃时带宽为20 896.3 Hz，265℃时带宽为20 657.5 Hz，相较于之前降低了238.8 Hz。两中心频率位置分别向高频处偏移了275.7 Hz和603.5 Hz。结果验证了之前的结论，温度升高会使禁带宽度增加，中心频率增大。

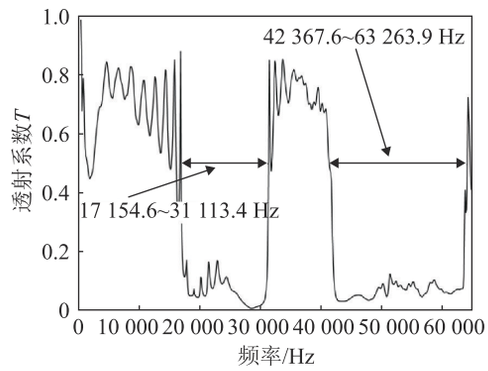


图6　在275℃时管阵列声波透射频谱图

Fig.6　Sound transmission spectrum of the pipe array at 275℃

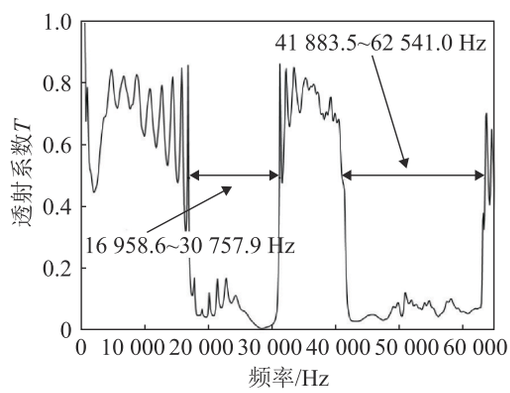


图7　在265℃时管阵列声波透射频谱图

Fig.7　Sound transmission spectrum of the pipe array at 265℃

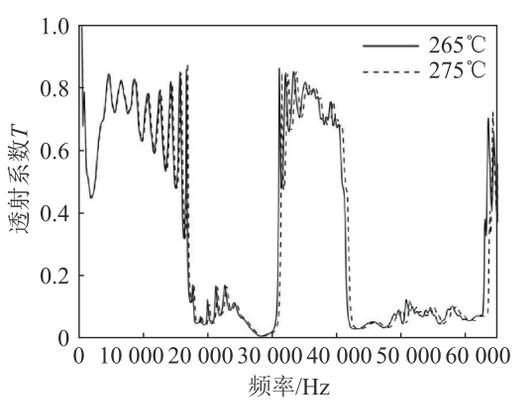


图8　在265℃与275℃管阵列透射频谱对比图

Fig.8　Comparison of sound transmission spectrums of the pipe array at 265℃ and 275℃

根据图3~8中的研究结果发现，声波在充满液体和饱和水蒸汽的传热管阵列中传播，透射频谱会产生“导带”与“禁带”，并且在正常情况下，声压的透射系数是小于1的。这种晶体带隙形成主要是由于布拉格散射导致的。当晶格常数一定时，声速越大，同一“禁带”的中心频率位置会随着声速的增加而增加。对于同一介质而言，温度升高会使每级禁带的宽度增大、中心频率位置向高频处偏移，且温度对频率较高位置的影响程度大于频率较低位置。

在同样10℃的温度差下，同一频谱位置不同传播介质反映出来的改变程度也不同。如图9所示，当管外介质为平均声速是1 653 m·s^{-1}的水时，第一禁带带宽增加了159.2 Hz、中心频率位置变化了275.7 Hz，而当管外介质为饱和水蒸气，平均声速为522.5 m·s^{-1}时，第一禁带带宽增加了89.4 Hz且中心频率位置变化了161.6 Hz。说明声速较大的介质对温度的变化更敏感，其频谱变化更明显。

在同一种介质中，温度及压强会影响介质的声速，即弹性波波长发生改变，从而影响带隙的产生，禁带宽度及中心频率位置均发生变化；而对于不同介质，因其本身声速差别较大所以产生了完全不同的带隙结构，因此应对不同介质的传热管阵列的声透射特性进行下一步研究。

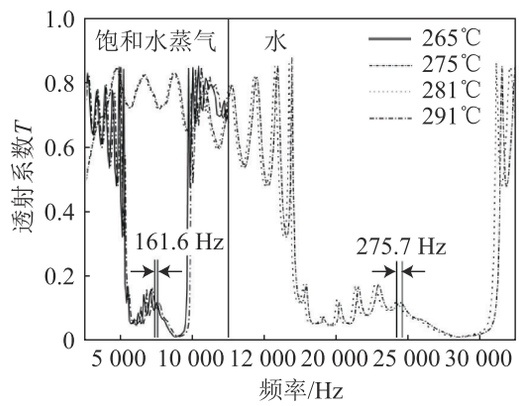


图9　不同介质中管阵列不同温度时的声透射频谱对比图

Fig.9　Comparison of sound transmission spectrums of the pipe array at different temperatures in different media

3　非均匀温度场对管阵列中声透射特性的影响

在蒸汽发生器内的温度场实际上是不均匀的，简单模拟一个在沸腾区的非均匀周期性变化的温度场。管间距与半径与之前的参数相同，分别为32.5 mm和11 mm，管内压强为16 MPa，因此水的沸点可达400℃以上，管外是压强为6 MPa时的水。因为水的沸点是275.56℃，所以即使管内进水温度达到310℃以上，管外水温最高依然是275.56℃。考虑一个温度范围是275.56℃~265℃的非均匀温度场，管外壁周围为275.56℃，距离管中心最远点为265℃，管陈列中温度呈周期性分布，如图10所示。

建立一个关于二维坐标的空间分布温度场函数$T=T(x,y)$，其温度不随时间而发生变化，理想的温度分布表达式为

$$T=4.0447\times[\cos(2\pi x/0.032\,5)+\cos(2\pi y/0.032\,5)+2]+265 \tag{11}$$

模型温度场如图11所示。根据式(10)可以计

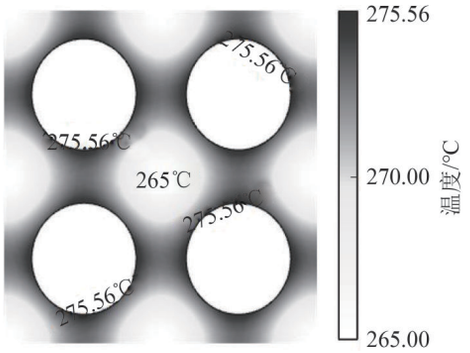


图10 管阵列中温度分布模拟图

Fig.10 Simulation chart of temperature distribution in the pipe array

算得到温度在265℃~275.56℃时，声速为1 643.9～1 663.1 m·s^{-1}，声速差约为20 m·s^{-1}。

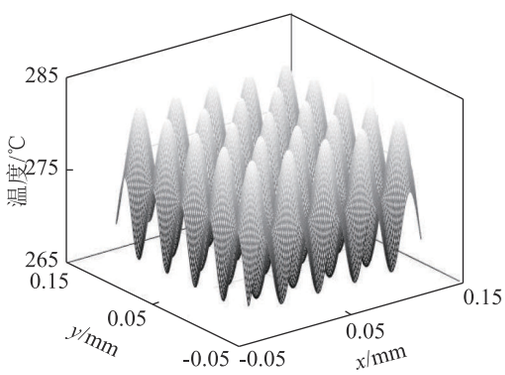


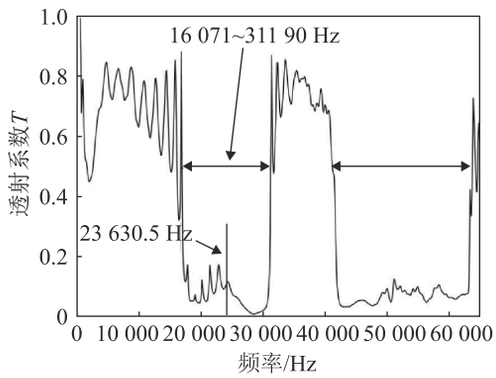
图11 二维温度场分布图

Fig.11 Two dimensional distribution diagram of temperature field

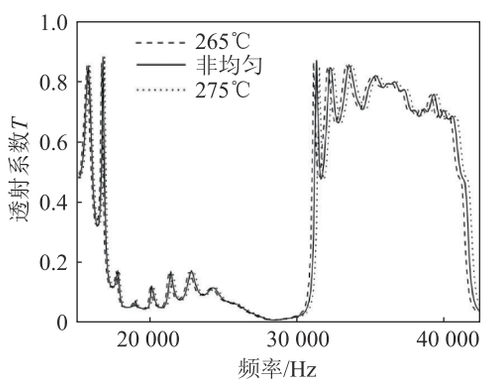
图12(a)所示为在265℃~275.56℃非均匀温度场下的声透射频谱，整体与均匀温度场相似，出现了明显的完全禁带。取部分频率区间与图6、7进行对比，得到图12(b)，发现非均匀温度场下与均匀温度场下的声透射频谱基本是一致的，“禁带”的宽度与中心频率的位置基本相同。在低频时，两种频谱的重合率较高，说明在低频时温度对于声波在管排阵列中的传播特性影响较小。在第一中心频率23 996.1 Hz之后，随着频率的升高，两种频谱就已经有了明显的差别，且之后产生的“禁带”宽度及中心频率的位置都有了明显的偏移。

由研究可知，在核电站的实际工况下，非均匀温度场对于声能量的透射率影响不大。因此，在之后关于这方面的研究中，为了计算简便可以简化核电站蒸汽发生器管阵列的模型，将非均匀温度场看作均匀温度场进行研究。但在射线声学方面，温度波动会造成声线弯曲[17]，使结果产生误差，因此还需另加讨论。

声波在传热管阵列中传播存在“禁带”与“导带”的这一现象给声检测技术的开发带来了一定的阻碍。当管壁发生泄漏产生泄漏声时，若泄漏声频率正好处在某级“禁带”的频率范围时，声检测系统就无法捕捉到泄漏声信号，此时就会产生误判，所以对于声检测系统还需要做进一步研究。本文分别模拟计算了两种介质、不同温度下以及非均匀温度场下的工况，而非均匀介质、多种介质混合的情况拟另文讨论。



(a) 非均匀温度场



(b) 非均匀温度场与均匀温度场对比

图12 均匀和非均匀温度场下的管阵列声透射频谱的比较

Fig.12 Comparison of sound transmission spectrums of the piper array in the uniform and non-uniform temperature fields

4 结 论

本文通过数值模拟了不同温度以及不同介质下的工况，拟合了非均匀温度场下的声传播，得到以下结论：

(1) 在同一介质中，温度会改变频谱的“禁带”宽度以及中心频率位置，并且对频率较高的位置温度的影响大于频率较低的位置，即频率越高“禁带”宽度及中心频率位置改变越多。

(2) 在同样为10℃的温度差下，不同介质对温度变化的反应程度不同。当水的声速为1 662.9、1 643.9 m·s^{-1}时、饱和水蒸气的声速为523.9、521.0 m·s^{-1}，温度变化对介质为水的传播特性影响更大，即声速大的介质对温度变化更敏感。

(3) 非均匀温度场的声透射特性与均匀温度场

的声透射特性在10℃的基础上有非常微小的差异。在第一中心频率23 996.1 Hz之前，两种频谱差别很小，在第一禁带之后会出现明显区别。当温度差在10℃以内，为了简化核电站内管阵列的研究模型，可将非均匀温度场简化为均匀温度场进行研究。

参 考 文 献

[1] 周红, 陶书生 . 核电厂蒸汽发生器完整性[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2015.

[2] 王军 . 管道泄漏的声学检测方法研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.
WANG Jun. Leak detection for based on acoustic emission techniques[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.

[3] 吴根华, 阎建芳, 许遵言 . 核电站蒸汽发生器的无损检测[J]. 无损检测, 2005, **27**(10): 547-550.
WU Genhua, YAN Jianfang, XU Zunyan. Nondestructive testing of the steam generator of nuclear power station[J]. Nondestructive Testing Technologying, 2005, **27**(10): 547-550.

[4] MULHOLLAND L S, HECKL M A. Multi-directional sound wave propagation through A tube bundle[J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, **176**(3): 377-398.

[5] HECKL M A. Oblique sound transmission through tube bundles and tube gratings[J]. Ultrasonics, 1994, **32**(4): 275-286.

[6] HECKL M A, MULHOLLAND L S. Some recent developments in the theory of acoustic transmission in tube bundles [J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, **179**(1): 37-62.

[7] CARTER B G, MCIVER P. Water-wave propagation through an infinite array of floating structures[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2013, **81**(1): 9-45.

[8] CARTER B G, MCIVER P. Water-wave propagation through an infinite array of floating structures[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2013, **81**(1): 9-45.

[9] 姜根山, 张荣英, 安连锁, 等 . 周期性管阵列的声传播特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, **31**(29): 9-14.
JIANG Genshan, ZHANG Rongying, AN Liansuo, et al. Experimental study on the propagation characteristics of sound wave through periodic tube arrays[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, **31**(29): 9-14.

[10] 刘月超, 姜根山 . 电厂锅炉内换热器管阵列的声传播特性[J]. 声学技术, 2013, **32**(S1): 19-20.
LIU Yuechao, JIANG Genshan. Sound propagation characteristics of the heat exchanger tube array in power plant boiler[J]. Technical Acoustics, 2013, **32**(S1): 19-20.

[11] 吴亚攀 . 斜入射声波在管阵列中的传播特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
WU Yapan. The study of sound waves incidence angle on acoustic propagation through tube arrays[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.

[12] 姜羽, 姜根山, 于淼, 等 . 声波作用下的单圆柱绕流及传热特性数值研究[J]. 声学技术, 2021, **40**(3): 308-315.
JIANG Yu, JIANG Genshan, YU Miao, et al. Numerical study of flow and its heat transfer characteristics of a single cylinder under the action of acoustic waves[J]. Technical Acoustics, 2021, **40**(3): 308-315.

[13] 任玉新, 陈海昕 . 计算流体力学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[14] 刘月超 . 炉内管阵列中的泄漏源声辐射与传播特性研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
LIU Yuechao. Research on acoustic radiation and propagation characteristics of leakage sources in boiler tube arrays[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.

[15] 李海军 . 岭澳核电站蒸汽发生器的运行特性分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
LI Haijun. Operating characteristics analysis for steam generator of Ling ao nuclear power station[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

[16] 劳振花, 姜兆波 . 液体体积弹性模量与温度关系测量实验研究[J]. 科学技术与工程, 2009, **9**(2): 386-390.
LAO Zhenhua, JIANG Zhaobo. Experiments research on the measurement of liquid bulk elastic modulus and temperature relationship[J]. Science Technology and Engineering, 2009, **9**(2): 386-390.

[17] LIU H, WANG Z, WU S Y, et al. A positioning determination of multi-transponders with sound ray bending in shallow waters[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, **54**(1): 9-15, 5.