

引用格式: 张诣强, 李双, 范学良, 等. 石墨烯薄膜热声性能的三维数值计算与测试[J]. 声学技术, 2022, 41(2): 160-166. [ZHANG Yiqiang, LI Shuang, FAN Xueliang, et al. Three-dimensional numerical calculation and measurement of thermoacoustic properties of graphene films[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(2): 160-166.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.02.002

# 石墨烯薄膜热声性能的三维数值计算与测试

张诣强<sup>1</sup>, 李 双<sup>1</sup>, 范学良<sup>1</sup>, 李 成<sup>2</sup>, 唐金龙<sup>1</sup>

(1. 苏州大学轨道交通学院, 江苏苏州 215131; 2. 桂林电子科技大学广西密码学与信息安全重点实验室, 广西桂林 541004)

**摘要:** 对石墨烯薄膜进行电-热-声耦合的三维建模计算, 并将计算结果与实验测试值进行对比分析。首先建立了通电石墨烯薄膜焦耳热的三维模型, 计算出石墨烯薄膜表面的温度振荡和稳态温度分布; 在此基础上, 建立了热黏性声学 and 压力声学耦合的声扩散模型, 计算出空间中声压的分布; 分析了基底和空气参数对石墨烯薄膜发声的影响; 最后对通电石墨烯薄膜进行温度测试和声压测试。结果表明: 三维模型数值计算的温度分布与测试结果吻合良好, 数值计算的声压值比一维近似解析解更接近实验值, 验证了数值计算方法的有效性。三维模型的数值计算方法在复杂边界条件下分析薄膜的声学性能更具优势。

**关键词:** 石墨烯薄膜; 声扩散; 热声效应; 三维建模

中图分类号: O429

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-02-0160-07

## Three-dimensional numerical calculation and measurement of thermoacoustic properties of graphene films

ZHANG Yiqiang<sup>1</sup>, LI Shuang<sup>1</sup>, FAN Xueliang<sup>1</sup>, LI Cheng<sup>2</sup>, TANG Jinlong<sup>1</sup>

(1. School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 215131, Jiangsu, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Cryptography and Information Security, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

**Abstract:** The three-dimensional modeling calculation of electric thermal acoustic coupling of graphene film is carried out, and the calculation results are compared with experimental data. Firstly, a three-dimensional Joule heat model of graphene film is established to calculate the temperature oscillation and steady-state temperature distribution of graphene film. On this basis, the acoustic diffusion model combining viscous acoustics and pressure acoustics is established, and the distribution of sound pressure in space is calculated. Then the effects of substrate and air parameters on the sound emission of graphene films are analyzed. Finally, the temperature and sound pressure of the graphene films are measured. The results show that: The temperature distribution calculated by the three-dimensional model agrees well with the measured temperature distribution. The numerical results are closer to the experimental values than the one-dimensional approximate analytical solution, which verifies the effectiveness of the numerical method. The numerical method of three-dimensional model has more advantages in analyzing the acoustic performance of thin films in complex boundary conditions.

**Key words:** graphene film; acoustic diffusion; thermoacoustic effect; three-dimensional modeling

## 0 引 言

1917 年, Arnold 和 Crandall 首次系统地阐述了热声的发声机制, 并且建立了交流电通过薄层导体的模型, 不过由于当时的材料限制, 只是检测到微弱的声音<sup>[1]</sup>。1978 年, F.Alan Mcdonald 和 Grover C. Wetsel 建立了典型的光声模型, 并且得出了声波

方程的一维近似解析解<sup>[2]</sup>。1999 年, 我国声学家马大猷对热声理论进行了系统阐述<sup>[3]</sup>。

近年来, 纳米技术突飞猛进, 给基于热声效应扬声器的研究开辟了一条新的路径<sup>[4]</sup>。2008 年, Xiao 等发现通电的碳纳米管薄膜会在其周围产生声波<sup>[5]</sup>。2011 年, Tian 等制作了纸质材料为基底的石墨烯薄膜扬声器, 并且对其做了发声实验<sup>[6]</sup>。2012 年, Suk 等探究了不同基底上石墨烯薄膜的发声情况<sup>[7]</sup>。2015 年, 王严冬等对多孔硅热致发声进行建模研究<sup>[8]</sup>, Fei 等制备出三维石墨烯泡沫扬声器, 此类扬声器优于其他石墨烯薄膜扬声器<sup>[9]</sup>。2016 年, Kim 等做了三维还原石墨烯扬声器的阵列<sup>[10]</sup>和聚合物网格支撑的石墨烯薄膜发声实验<sup>[11]</sup>。

收稿日期: 2020-12-01; 修回日期: 2021-01-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51875374, 11972240)、广西密码学与信息安全重点实验室研究课题(GCIS201905)资助项目。

作者简介: 张诣强(1996—), 男, 江苏常州人, 硕士研究生, 研究方向为振动与声学。

通信作者: 李双, E-mail: lishuang@suda.edu.cn

Tian 和 Suk 等在实验中发现声压和输入功率成正比,并且得出了声压随频率的变化规律,但是对模型缺乏系统的理论分析<sup>[6-7]</sup>。Vesterinen 等使用格林函数法给出了考虑基底吸收热对声压的影响,并且提到瑞利距离的概念,但没有考虑薄膜单位面积热容量的影响<sup>[12]</sup>;Xiao 等在 Arnold 和 Crandall 的热声模型的基础上考虑薄膜的自身热容,但是声压表达式仅适用于远场(瑞利距离之外)<sup>[13]</sup>。Hu 等在 Mcdonald 和 Wetsel 建立的光声模型基础上,推导出了一般固体的热致发声模型的一维解析解<sup>[14]</sup>;Lim 等将声场分成近场和远场,瑞利距离之内是平面波,瑞利距离之外是球面波,推导出了无基底石墨烯薄膜的一维近似声压公式<sup>[15]</sup>。本课题组的卞安华等<sup>[16]</sup>和 Xing 等<sup>[17]</sup>推导出了考虑基底传热的一维近似声压公式,并且进行了实验的论证。

上述研究均是采用一维模型进行分析,计算的石墨烯薄膜声压分布并不连续,在瑞利距离处突变,但实际上声压分布是连续的,并且一维模型无法计算石墨烯表面的温度分布。本文将建立石墨烯薄膜的三维热传导和声扩散模型,进行数值计算,并将计算值与一维近似解析解及实验测试值进行对比分析。

## 1 石墨烯薄膜三维传热模型

通入交流电的石墨烯薄膜的温度特性由振荡温度和稳态温度分布描述。基底材料的电阻相对于石墨烯而言很大,可视作绝缘体。因此,假设石墨烯薄膜的热量全部由石墨烯的焦耳热产生。石墨烯的上表面分别与电极的下表面和空气接触进行传热,电极的上表面与空气进行对流换热,石墨烯的下表面与基底的上表面接触进行传热,而且基底的下表面与空气接触进行对流换热。由于基底的厚度为 0.3 mm 左右,石墨烯仅有 10 nm,可以认为只有薄膜上下表面有热传导。考虑理想情况,假设石墨烯的电流密度的分布是均匀的。石墨烯的热传导模型如图 1 所示。

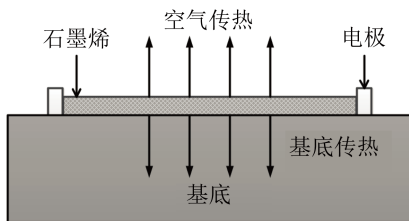


图 1 石墨烯薄膜的热传导模型

Fig.1 Heat conduction model of graphene film

### 1.1 石墨烯的焦耳热过程

由于石墨烯的厚度只有 10 nm,因此可以将石墨烯作为电阻层和热薄层来处理,其焦耳热方程组<sup>[18]</sup>表示为

$$\begin{cases} -\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = d_s Q_s - d_s \rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} + \nabla_t \cdot (d_s k_s \nabla_t T_s) - d_s k_s \nabla_t T_s \\ \nabla_t \cdot \left[ d_s \left( \sigma \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J} \right) \right] = 0 \\ Q_s = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}^*) \\ \mathbf{E} = -\nabla_t V \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{q}$  为薄层的热流密度( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $d_s$  为薄层厚度(m);  $Q_s$  为薄层热源( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $\rho_s$  为薄层密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $k_s$  为薄层的热传导率( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $V$  为薄层电势(V);  $c_{p,s}$  为薄层的恒压热容( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $\mathbf{n}$  为朝向外部的法向量;  $\varepsilon_r$  为薄层相对介电常数;  $\sigma$  为薄层的电导率( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $\mathbf{E}$  为薄层的电场强度( $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ),  $T_s$  为薄层温度(K);  $\nabla_t$  为切向梯度算子;  $\varepsilon_0$  为薄层介电常数( $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $\mathbf{J}$  为薄层的电流密度( $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ )。

石墨烯薄膜两端通入电流,输入电压  $V$  随时间变化的方程为

$$V = V_0 \sin(2\pi f t) \quad (2)$$

式中:  $V_0$  为两端通入电压的幅值(V);  $f$  为输入交流电的频率(Hz)。

### 1.2 基底传热过程

将基底作为研究对象,基底与电极的传热方程组<sup>[18]</sup>为

$$\begin{cases} \rho_b c_{p,b} \frac{\partial T_b}{\partial t} = \nabla \cdot (-k_b \nabla T_b) \\ \rho_p c_{p,p} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \nabla \cdot (-k_p \nabla T_p) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\rho_b$  为基底密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $c_{p,b}$  为基底恒压热容( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $T_b$  为基底温度(K);  $k_b$  为基底的热传导率( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $T_p$  为电极温度(K);  $\rho_p$  为电极密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $c_{p,p}$  为电极恒压热容( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $k_p$  为电极的热传导率( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )。

边界条件如下:

(1) 将石墨烯薄层作为边界条件,则在石墨烯和基底的接触条件的方程为

$$\begin{cases} -\mathbf{q} \cdot \mathbf{n} = -\lambda_b \left( \frac{\partial T_b}{\partial n} \right) \\ T_s = T_b \end{cases} \quad (4)$$

(2) 与空气对流换热作为边界条件,则在基底与空气的接触条件的方程为

$$-\lambda_b \left( \frac{\partial T_b}{\partial n} \right) = h(T_b - T_{\text{ext}}) \quad (5)$$

式中:  $T_{\text{ext}}$  为环境温度(K);  $h$  为换热系数。

(3) 基底与电极接触条件的方程为

$$\begin{cases} -\lambda_p \left( \frac{\partial T_p}{\partial n} \right) = -\lambda_b \left( \frac{\partial T_b}{\partial n} \right) \\ T_p = T_b \end{cases} \quad (6)$$

(4) 空气与电极的接触条件的方程为

$$-\lambda_p \left( \frac{\partial T_p}{\partial n} \right) = h(T_p - T_{\text{ext}}) \quad (7)$$

### 1.3 传热模型的数值计算

使用 COMSOL Multiphysics 进行数值计算,使结果可视化。其中用到的材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数  
Table 1 Parameters of the materials

| 材料类型        | 密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 恒压热容/<br>( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) | 热传导率/<br>( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) | 电导率/<br>( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ ) | 相对介电常数 |
|-------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------|
| 石墨烯         | 2 100                                      | 710                                                              | 130                                                             | $1 \times 10^{-6}$                         | 4.5    |
| 基底<br>(PET) | 1 390                                      | 1 172                                                            | 0.15                                                            | —                                          | —      |
| 电极(银)       | $1.093 \times 10^4$                        | 232                                                              | 429                                                             | —                                          | —      |

#### (1) 温度振荡

石墨烯薄膜两端通入 30 V 的交流电(有效功率 0.73 W),数值计算结果如图 2 所示。石墨烯薄膜的温度是随时间振荡变化的,振荡温度的幅值不随时间改变。由于振荡温度的幅值极小,频率较高,而温度测量仪的精度和帧率无法达到要求,则温度振荡部分仅能做理论分析。数值计算结果表明,温度振荡的幅值在石墨烯薄膜表面是均匀分布的,且温度振荡的频率是电流频率的两倍,这也很好解释了输出信号的频率是输入电信号频率两倍的现象。

在其他条件不变的情况下,当有效输入功率为 0.73 W 时,温度振荡的幅值随频率的增加而下降,如图 3 所示。

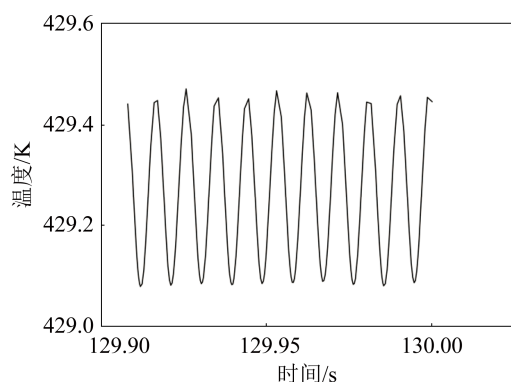


图 2 石墨烯薄膜表面的温度振荡(输入电流频率为 50 Hz,有效功率 0.73 W)

Fig.2 Temperature oscillation of graphene film surface (Input current frequency is 50 Hz, effective power is 0.73 W)

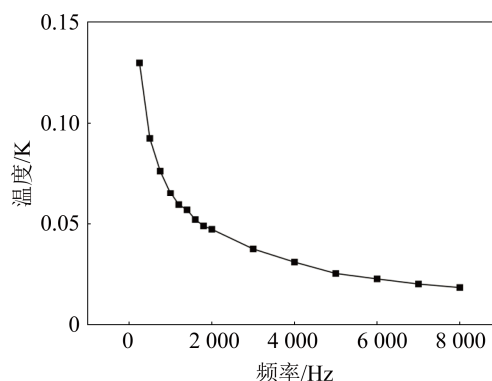


图 3 温度振荡的幅值与温度振荡频率的关系  
Fig.3 Relationship between amplitude and frequency of temperature oscillation

#### (2) 温度稳态分布

由于温度振荡的幅值相对于石墨烯薄膜表面的温度是极小的,在研究石墨烯薄膜的温度分布时可以忽略温度振荡。图 4 为有效输入功率 0.2 W 时(测量稳态温度时,为避免长时间通入大电流导致损坏石墨烯薄膜,此处取相对较小的输入功率),石墨烯薄膜温度的稳态分布。从图 4 中可以看出石墨烯薄膜中央的温度最高,沿四周逐渐下降。

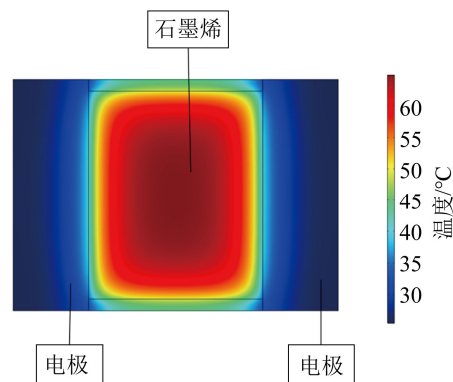


图 4 石墨烯薄膜表面稳态温度分布  
Fig.4 Steady state temperature distribution of graphene film surface

## 2 三维声扩散模型及数值计算

石墨烯薄膜的热声效应是指石墨烯表面的温度振荡使得附近空气进行周期性的热胀冷缩,从而产生声波<sup>[15]</sup>。在得出石墨烯薄膜表面温度振荡幅度随频率的变化后,将其作为边界条件,建立声扩散模型。由于热黏性声学的计算量极大,且热损失仅在热边界层内损失很大,则可在靠近薄膜的小区域内考虑热黏性损耗,而其他部分依然利用传统压力声学的计算公式。声扩散模型如图 5 所示。

### 2.1 热黏性声学

假设空气为理想气体,考虑热损耗和黏滞损耗

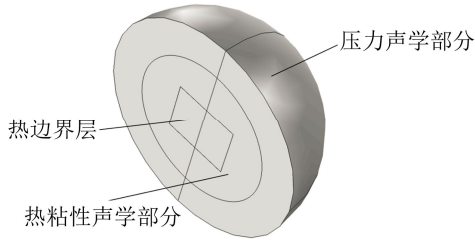


图5 声扩散模型  
Fig.5 Sound diffusion model

的无源声扩散方程组<sup>[18]</sup>为

$$\begin{cases} i\omega\rho_0\mathbf{u}=\nabla\cdot\left\{-p\mathbf{I}+\mu\left[\nabla\mathbf{u}+(\nabla\mathbf{u})^T\right]-\right. \\ \left.\left(\frac{2}{3}\mu-\mu_B\right)(\nabla\cdot\mathbf{u})\mathbf{I}\right\} \\ \rho_0c_p(i\omega T)-(i\omega p)=\nabla\cdot(k\nabla T) \\ i\omega\rho+\nabla\cdot(\rho_0\mathbf{u})=0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\rho_0$  为空气的平衡密度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $\rho$  为空气密度的扰动量( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $\omega$  为角速度( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $\mathbf{u}$  为空气速度的扰动量( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $\mu$  为空气的动力黏度( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );  $p$  为空气的声压(Pa);  $\mu_B$  为空气的体积黏度( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );  $c_p$  为空气的恒压热容( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ );  $T$  为空气温度的扰动量(K)。

边界条件如下:

(1) 由于石墨烯薄膜是放置在壁面上的, 则与热源一个平面的其他区域当壁来处理, 方程为

$$\begin{cases} \mathbf{u}=0 \\ T=0 \end{cases} \quad (9)$$

(2) 石墨烯表面温度振荡的幅值为

$$T=T_{\text{bnd}} \quad (10)$$

式中:  $T_{\text{bnd}}$  是石墨烯薄膜的温度振荡的幅值(由三维传热模型计算得出)。

(3) 压力声学-热黏性声学边界方程组<sup>[18]</sup>为

$$\begin{cases} -p\mathbf{n}=\left\{-p\mathbf{I}+\mu\left[\nabla\mathbf{u}+(\nabla\mathbf{u})^T\right]-\right. \\ \left.\left(\frac{2}{3}\mu-\mu_B\right)(\nabla\cdot\mathbf{u})\mathbf{I}\right\}\mathbf{n} \\ \mathbf{u}\cdot\left[\frac{1}{\rho}(\nabla p)\right]=-n\cdot i\omega\mathbf{u} \\ -n\cdot(-k\nabla T)=0 \end{cases} \quad (11)$$

## 2.2 压力声学

压力声学部分无源声扩散方程组<sup>[18]</sup>为

$$\begin{cases} (\nabla^2+k_{\text{eq}}^2)p=0 \\ k_{\text{eq}}^2=\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \end{cases} \quad (12)$$

边界条件如下:

(1) 由于石墨烯薄膜是放置在壁面上的, 则声场中贴近壁面的边界当作硬边界来处理, 方程为

$$\mathbf{n}\cdot(\nabla p)=0 \quad (13)$$

(2) 由于外层边界与声源相距很远, 则可以当作球面波辐射边界来处理, 方程组<sup>[18]</sup>为

$$\begin{cases} \mathbf{n}\cdot(\nabla p)+\left(jk_{\text{eq}}+\frac{1}{r_{\text{rf}}}\right)p-\frac{r_{\text{rf}}\nabla_s p}{2(1+jk_{\text{eq}}r_{\text{rf}})}=0 \\ r_{\text{rf}}=|(\mathbf{x}-\mathbf{r}_0)| \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $r_{\text{rf}}$  为声源到空间某点的距离(m);  $\nabla_s$  为边界上一个给定点切面上的拉普拉斯算子;  $\mathbf{x}$  为空间点的位置矢量;  $\mathbf{r}_0$  为声源的位置矢量。

## 2.3 数值计算

使用 COMSOL Multiphysics 进行数值计算, 使结果可视化。其中用到的空气参数如表 2 所示。

表2 空气参数  
Table 2 Parameters of air

| 密度/<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 恒压热容/<br>( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) | 热传导率/<br>( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) | 动力黏度/<br>( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) | 比热<br>比 | 声速/<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------|-----------------------------------------|
| 1.16                                     | 1 006                                                        | 0.026 3                                                     | $1.79\times 10^{-5}$                  | 1.4     | 347                                     |

(1) 热黏性声学部分的总压力分布

通过计算可得到热黏性声学部分声压的分布, 其中频率为 8 000 Hz 时的声压分布如图 6 所示。等压线在靠近声源的地方曲率较小, 而距离声源越远曲率越大, 最后趋近于球面波。



图6 热黏性声学部分声压分布  
Fig.6 Sound pressure distribution of thermoviscous acoustic part

(2) 压力声学部分的声压分布

图7是频率为 8 000 Hz 时的压力声学部分的声压分布图, 其规律符合一维解析解中远场声压近似于球面波的结论。

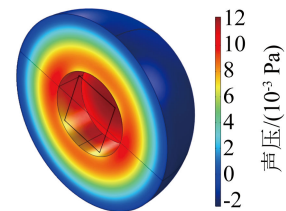


图7 压力声学部分的声压级分布  
Fig.7 Distribution of sound pressure level in the pressure acoustic part

### 3 石墨烯薄膜发声的影响因素

#### 3.1 基底对石墨烯薄膜发声的影响

基底吸收了石墨烯薄膜产生的大部分焦耳热,因此基底对石墨烯薄膜发声效果有很大的影响。在其他条件不变的情况下,分别计算了基底的密度、恒压热容和导热系数对石墨烯发声的影响,结果如图 8~10 所示。从图 8~10 中可以看出,基底的密度、恒压热容和导热系数与石墨烯薄膜的声压级呈

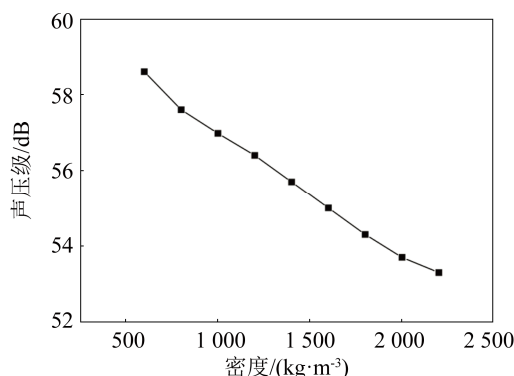


图 8 基底密度与石墨烯薄膜声压级的关系  
Fig.8 Relationship between substrate density and sound pressure level of graphene thin films

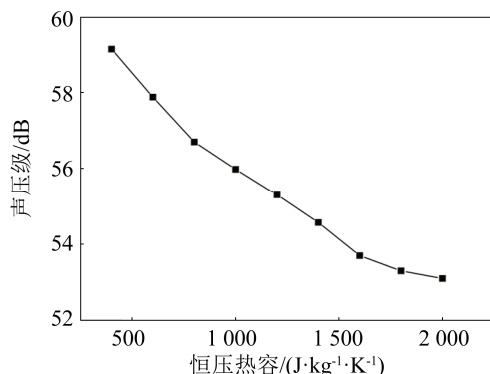


图 9 基底恒压热容与石墨烯薄膜声压级的关系  
Fig.9 Relationship between substrate heat capacity at constant pressure and sound pressure level of graphene thin films

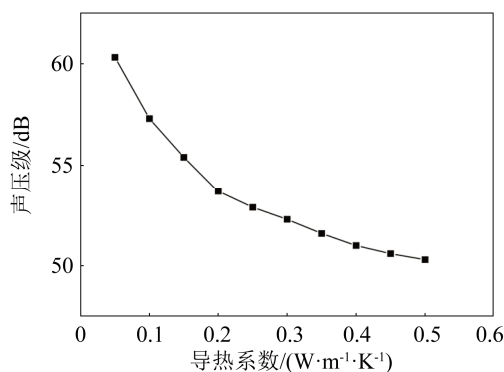


图 10 基底导热系数与石墨烯薄膜声压级的关系  
Fig.10 Relationship between substrate thermal conductivity and sound pressure level of graphene thin films

负相关。

#### 3.2 气体对石墨烯薄膜发声的影响

气体作为声波传播的媒介,本身的参数对石墨烯薄膜的发声效果也很重要。在其他条件不变的情况下,分别计算了气体的密度、恒压热容和导热系数对石墨烯发声的影响,结果如图 11~13 所示。从图 11~13 中可以看出,气体的密度和导热系数与石墨烯薄膜的声压级成正相关,气体的恒压热容

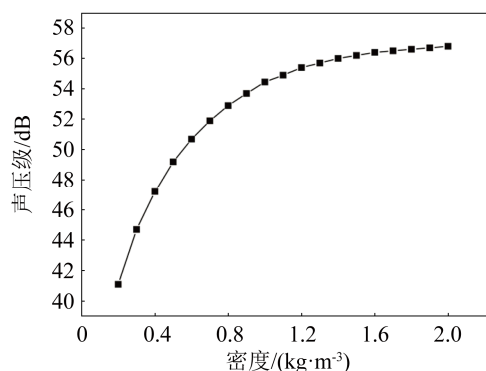


图 11 气体密度与石墨烯薄膜声压级的关系  
Fig.11 Relationship between gas density and sound pressure level of graphene thin films

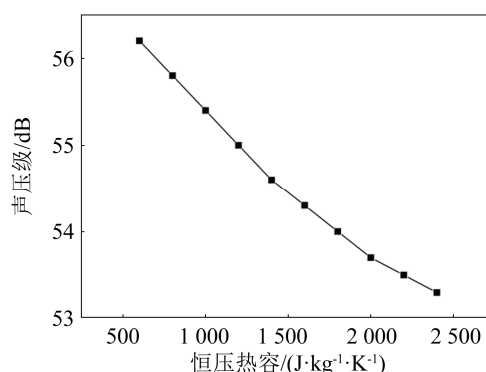


图 12 气体恒压热容与石墨烯薄膜声压级的关系  
Fig.12 Relationship between gas heat capacity at constant pressure and sound pressure level of graphene thin films

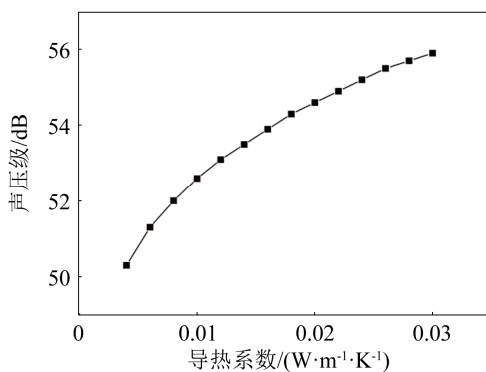


图 13 气体导热系数与石墨烯薄膜声压级的关系  
Fig.13 Relationship between gas thermal conductivity and sound pressure level of graphene thin films

与石墨烯的声压级呈负相关。

4 实验测试与对比分析

4.1 表面稳态温度分布测试

为了验证传热模型，设计传热实验如图 14 所示。实验中使用的石墨烯薄膜(PET 基底)如图 15 所示。当输入功率为 0.2 W 时，待石墨烯薄膜的表面温度达到稳态，测试结果如图 16 所示，实验值与图 4 中的计算值基本吻合。

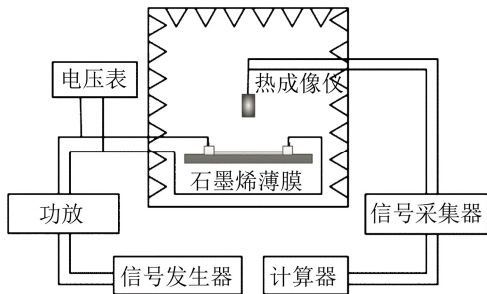


图 14 传热实验设计示意图  
Fig.14 Schematic diagram of heat transfer experiment design

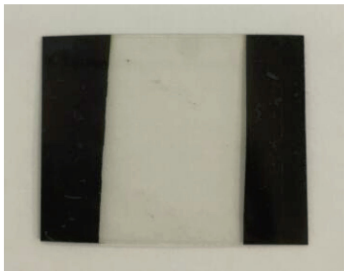


图 15 石墨烯薄膜实物图  
Fig.15 Picture of graphene film

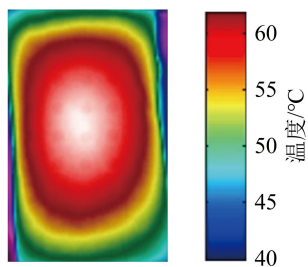


图 16 石墨烯薄膜的表面温度分布  
Fig.16 Surface temperature distribution of graphene film

4.2 声压测试

声学实验设计如图 17 所示。薄膜产生的声音信号由传声器接收，然后传送到动态信号分析仪。现场测试如图 18 所示。测点位于薄膜的中轴线上距离薄膜 1、2 cm 和偏中轴线 45°距离薄膜中心点 2 cm 处。当薄膜的有效输入功率为 0.73 W 时，测试薄膜声压随频率的变化如图 19(a)、19(b)和 19(c)所示。将声压的一维近似解析解和三维数值计算结

果列入图 19 中进行对比，发现三维数值解比一维近似解析解更接近实验值。

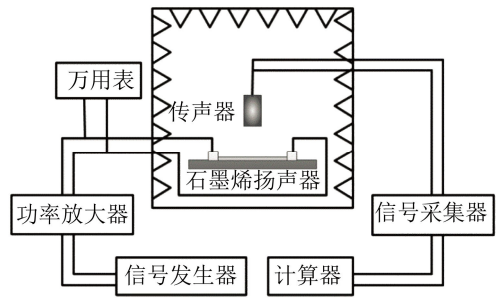


图 17 声学实验设计示意图  
Fig.17 Schematic diagram of acoustic experiment design

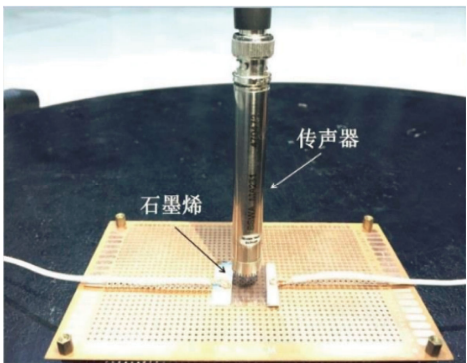
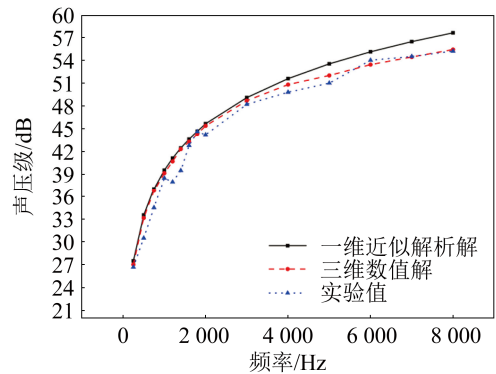
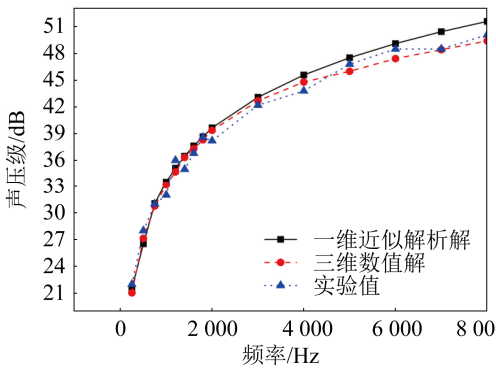


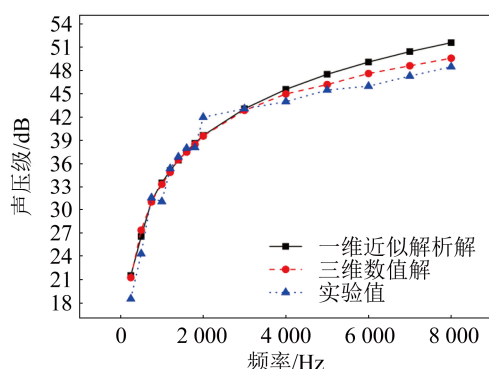
图 18 测试现场照片  
Fig.18 Picture of test field



(a) 测量点位于薄膜的中轴线上距离薄膜 1 cm 处



(b) 测量点位于薄膜的中轴线上距离薄膜 2cm 处



(c) 测量点位于薄膜的偏中轴线  $45^\circ$  距离薄膜中心点 2 cm 处

图 19 在不同测量点的声压级与频率的关系

Fig.19 Relationships between sound pressure level and frequency at different measuring points

## 5 结 论

从通电石墨烯薄膜的热声效应出发,建立了薄膜的三维热传导模型和三维声扩散模型,计算了薄膜表面的稳态温度分布、温度振荡幅值和声压值,并进行了实验论证,得到以下结论:

(1) 薄膜表面稳态温度分布特点是中央最高,沿四周下降。温度振荡幅值随频率增加而减小。

(2) 声压等压线在靠近声源的地方曲率较小,距离声源越远曲率越大,最后趋近于球面波。声压值随着频率的增加而增加。

(3) 基底的密度、恒压热容和导热系数与石墨烯薄膜的声压级呈负相关。气体的密度和导热系数与石墨烯薄膜的声压级呈正相关,气体的恒压热容与石墨烯的声压级呈负相关。

(4) 将三维模型数值计算的声压值与一维近似解析解及实验值进行对比,三维数值计算结果更加接近实验值,且能计算出声压在空间的连续分布。

## 参 考 文 献

- [1] ARNOLD H D, CRANDALL I B. The thermophone as a precision source of sound[J]. Physical Review, 1917, **10**(1): 22-38.
- [2] MCDONALD F A, WETSEL G C. Generalized theory of the photoacoustic effect[J]. Journal of Applied Physics, 1978, **49**(4): 2313-2322.
- [3] 马大猷. 热声学的基本理论和非线性, I 热声学[J]. 声学学报, 1999, **24**(4): 337-350.  
MA Dayou. Theory and nonlinearity of thermoacoustics[J]. Acta Acustica, 1999, **24**(4): 337-350.
- [4] BALANDIN A A, GHOSH S, BAO W Z, et al. Superior thermal conductivity of single-layer graphene[J]. Nano Letters, 2008, **8**(3): 902-907.
- [5] XIAO L, CHEN Z, FENG C, et al. Flexible, stretchable, transparent carbon nanotube thin film loudspeakers[J]. Nano Letters, 2008, **8**(12): 4539-4545.
- [6] TIAN H, REN T L, XIE D, et al. Graphene-on-paper sound source devices[J]. ACS Nano, 2011, **5**(6): 4878-4885.
- [7] SUK J W, KIRK K, HAO Y F, et al. Thermoacoustic sound generation from monolayer graphene for transparent and flexible sound sources[J]. Advanced Materials, 2012, **24**(47): 6342-6347.
- [8] 王严冬. 多孔硅热致超声发射的建模研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015
- [9] FEI W W, ZHOU J X, GUO W L. Graphene foams: low-voltage driven graphene foam thermoacoustic speaker (small 19/2015)[J]. Small, 2015, **11**(19): 2344.
- [10] KIM C S, LEE K E, LEE J M, et al. Application of N-doped three-dimensional reduced graphene oxide aerogel to thin film loudspeaker[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, **8**(34): 22295-22300.
- [11] KIM C S, HONG S K, LEE J M, et al. Free-standing graphene thermophone on a polymer-mesh substrate[J]. Small, 2016, **12**(2): 185-189.
- [12] VESTERINEN V, NISKANEN A O, HASSEL J, et al. Fundamental efficiency of nanothermophones: modeling and experiments[J]. Nano Letters, 2010, **10**(12): 5020-5024.
- [13] XIAO L, LIU P, LIU L, et al. High frequency response of carbon nanotube thin film speaker in gases[J]. Journal of Applied Physics, 2011, **110**(8): 084311.
- [14] HU H P, ZHU T, XU J. Model for thermoacoustic emission from solids[J]. Applied Physics Letters, 2010, **96**(21): 214101.
- [15] LIM C W, TONG L H, LI Y C. Theory of suspended carbon nanotube thinfilm as a thermal-acoustic source[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, **332**(21): 5451-5461.
- [16] 卞安华, 李双, 邢倩荷, 等. 考虑基底热传导的石墨烯薄膜热声理论[J]. 声学学报, 2017, **42**(6): 755-761.  
BIAN Anhua, LI Shuang, XING Qianhe, et al. Thermo-acoustic theory of graphene films considering heat transfer of substrate materials[J]. Acta Acustica, 2017, **42**(6): 755-761.
- [17] XING Q H, LI S, FAN X L, et al. Influential factors on thermoacoustic efficiency of multilayered graphene film loudspeakers for optimal design[J]. Journal of Applied Physics, 2017, **122**(12): 125107.
- [18] Acoustics Module User's Guide. Stockholm, Sweden: COMSOL Multiphysics® v.5.4. COMSOL AB, 2018 [2020-12-12][EB/OL]. <http://cn.comsol.com>.