

基于温度梯度分布的宽频带声聚焦效应

刘宸 孙宏祥 袁寿其 夏建平

Broadband acoustic focusing effect based on temperature gradient distribution

Liu Chen Sun Hong-Xiang Yuan Shou-Qi Xia Jian-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 044303 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.044303

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044303>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超声场下刚性界面附近溃灭空化气泡的速度分析

Velocity analysis for collapsing cavitation bubble near a rigid wall under an ultrasound field

物理学报.2016, 65(4): 044304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044304>

基于自适应加权约束最小二乘法的麦克风阵列稳健频率不变波束形成算法

Adaptive weighted constrained least squares algorithm based microphone array robustness beamforming algorithm

物理学报.2015, 64(17): 174303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174303>

匀强磁场对水中气泡运动的影响

Effect of magnetic field on single-bubble in water

物理学报.2015, 64(12): 124301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124301>

声单向操控研究进展

Recent advances in acoustic one-way manipulation

物理学报.2015, 64(9): 094305 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094305>

脉冲微波辐射场空间分布的热声成像研究

Pulsed microwave energy spatial distribution imaging by means of thermoacoustic tomography

物理学报.2015, 64(1): 014301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.014301>

基于温度梯度分布的宽频带声聚焦效应*

刘宸¹⁾ 孙宏祥^{1)2)†} 袁寿其^{1)‡} 夏建平¹⁾

1)(江苏大学理学院, 流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

2)(中国科学院声学研究所, 声场声信息国家重点实验室, 北京 100190)

(2015年8月26日收到; 2015年12月2日收到修改稿)

研究基于温度梯度分布的宽频带声聚焦效应. 利用两个恒温热源产生的温度梯度分布, 控制声波传播路径, 实现声波聚焦效应. 该机理由于温度场连续变化引起声折射率连续变化, 无反射能量损失, 具有宽频带及高聚焦性能等优点. 在此基础上, 分析入射声源频率、热源温度、分界面空间分布、热源位置、介质的衰减系数、热源温度不对称分布等因素对声聚焦性能的影响, 利用气凝胶材料验证单一介质中基于温度梯度分布的声聚焦系统的可行性.

关键词: 声聚焦, 温度梯度, 温度场, 气凝胶

PACS: 43.35.+d, 43.25.+y

DOI: 10.7498/aps.65.044303

1 引言

声聚焦透镜在超声成像、无损检测、超声医学治疗等领域具有广泛的应用前景, 因此, 声聚焦透镜的设计及研制越来越受研究者的重视. 在声聚焦透镜的设计中, 与光聚焦透镜^[1-4]存在着一些差异. 首先, 声波在透镜材料中的速度大于其在介质中的速度, 因此, 声聚焦透镜是凹透镜. 其次, 对于声聚焦透镜, 透镜材料中的声速和密度大于介质中的声速和密度, 透镜材料与介质的声阻抗相差很大, 声波的大部分能量被反射, 从而导致声聚焦效应不明显.

现阶段, 利用负折射机理来实现声聚焦效应已成为声学领域研究热点之一, 基于该机理的声聚焦透镜主要分两种: 声子晶体及声超材料聚焦透镜. 通过逐渐变化声子晶体的结构参数可实现声聚焦效应, 如晶格大小^[5-8]、杨氏模量^[6]、单元形状^[9]

及栅格常数^[10]等. 然而, 由于声子晶体的尺寸与声波的波长相近, 在低频范围中, 不可避免地造成聚焦透镜的尺寸较大. 在基于超材料的声聚焦透镜中^[11-17], 通过排列具有不同负折射率的单元结构, 如赫姆霍兹谐振腔^[11]、十字形^[13]、蠕曲空间^[14-16]及金属空心圆柱^[17], 设计具有梯度折射率的声聚焦透镜, 在此类型声聚焦透镜中, 由于声超材料的单元尺寸较小, 同时具有较大的声负折射率, 从而使得小尺寸、超薄的声聚焦透镜已成为可能. 由于梯度折射率的设计复杂性, 从而不可避免地造成声透镜的聚焦频率范围很窄, 甚至为单一频率, 这主要由于透镜材料(金属、塑料、环氧树脂及橡胶)的声阻抗与周围介质(空气)的声阻抗相差很大^[18]. 因此, 如果能在单一介质中实现梯度折射率分布, 获得声聚焦效应, 就可解决声阻抗匹配的问题, 从而实现频带较宽的声聚焦效应.

通过温度梯度来改变声传播介质(空气)的声学参数, 可以实现对声场的控制. 2007年, Cai

* 国家自然科学基金重大项目(批准号: 51239005)、国家自然科学基金(批准号: 11404147)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20140519)、中国博士后基金(批准号: 2015M571672)、江苏大学高级人才基金(批准号: 13JDG106)、江苏大学青年骨干教师培养工程、江苏省大学生创新训练项目(批准号: 201510299047Y)和江苏大学工业中心大学生创新训练项目资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jsdxshx@ujs.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: Shouqiy@ujs.edu.cn

等^[19]类比光学海市蜃楼现象的原理, 提出温度梯度控制声波传播路径的方案, 分析加热的网格结构对声波传播路径的影响, 获得加热的网格产生的平面声源的聚焦效应. 随后, Dehesa等^[20]使用两个热管, 通过比较热管加热前后相同入射声源产生的声场, 研究声波传播路径的变化, 获得两个热管产生的热场引起的声聚焦效应. 因此, 利用温度梯度在单一介质中实现梯度折射率分布及声场控制已成为可能, 从而为声波聚焦效应的研究提供一种新方法.

本文基于有限元数值模拟方法, 利用两个恒温热源产生的温度梯度场来控制声波传播路径, 实现宽频带的声波聚焦效应, 在此基础上, 研究入射声源频率、热源温度、分界面空间分布、热源位置、介质的衰减系数、热源温度不对称分布等因素对声聚焦性能的影响, 利用气凝胶材料验证单一介质中基于温度梯度分布的声聚焦系统的可行性. 本研究有利于促进在单一介质中实现宽频带声束的聚焦和偏转, 在声学领域具有很好的应用前景.

2 基本理论与数值模型

2.1 基本理论

假设空气为理想流体介质, 且满足理想气体状态方程, 则空气中声速 c 与环境温度 T 之间的关系为

$$c = \sqrt{\frac{\gamma R}{M} T}, \quad (1)$$

式中, 空气的定压比热和定容比热之比 $\gamma = 1.4$, 空气的摩尔质量 $M = 28.97 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$, 普适气体常量 $R = 8.31 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$, T 为介质中的温度. 空气的密度与温度的关系为

$$\rho = p_0 M / (RT), \quad (2)$$

式中, p_0 为温度 273 K 时大气压, 其大小为 101.325 kPa. 空气的折射率与温度之间的关系为

$$n = \frac{c_0}{c} = \sqrt{\frac{273.16}{T}}. \quad (3)$$

式中, c_0 为温度 273 K 时空气中的声速, 其大小为 331.6 m/s. 在空气中设置恒温热源可获得温度梯度变化区域, 从而引起空气中的声速改变, 并对空气折射率产生影响, 进而控制声波的传播路径, 实现声波聚焦效应.

2.2 数值模型

基于温度梯度分布的声聚焦透镜二维平面模型, 如图 1 所示. 传播介质为空气, 模型中间的抛物线 (空间分布函数为 $x = 2y^2$) 为热绝缘分隔界面层, 它与空气声阻抗完全匹配, 对声波传播没有影响. 抛物线分隔界面层将温度场分为两个区域, 右侧为恒温区域, 温度为 293 K, 左侧为温度梯度分布区域. 在该区域设置上下两个恒温热源, 温度为 1173 K. 高斯声源从左侧边界入射, 空间分布函数为 $p = 5 \exp(-10y^2)$. 采用有限元数值方法来计算声聚焦性能, 模型的外边界设置为平面波辐射及热通量边界条件. 数值计算中, 空气的热学参数分别为:

热传导系数

$$K = -0.00227583562 + (1.15480022 \times 10^{-4})T - (7.90252856 \times 10^{-8})T^2 + (4.11702505 \times 10^{-11})T^3 - (4.11702505 \times 10^{-15})T^4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)},$$

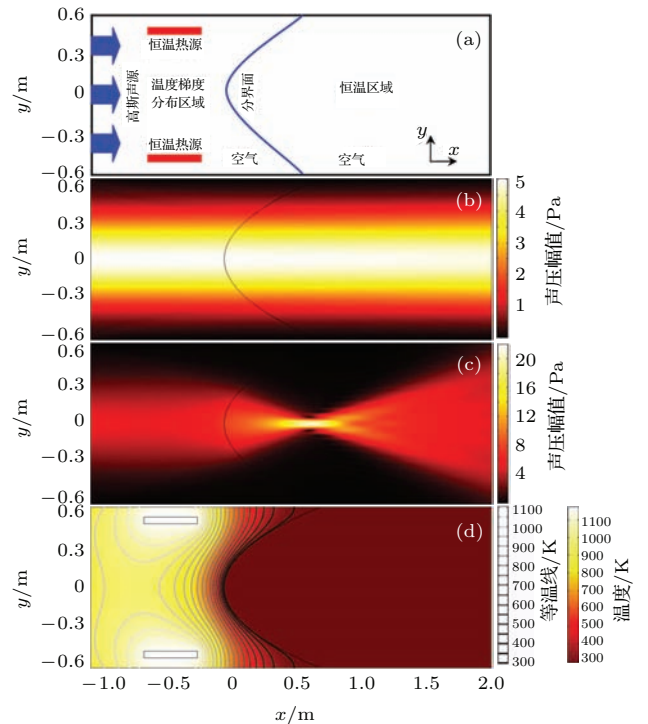


图 1 (网刊彩色) (a) 声聚焦透镜结构示意图; 高斯声束在 (b) 无热源和 (c) 有热源时产生的声压幅值空间分布; (d) 有热源时温度场空间分布

Fig. 1. (color online) (a) Schematics of acoustic focusing lens system; pressure amplitude field distributions induced by Gaussian acoustic beam (b) without and (c) with heat sources; (d) temperature field distribution with heat sources.

热容

$$C_p = 1047.63657 - (0.372589265)T + (9.45304214 \times 10^{-4})T^2 - (6.02409443 \times 10^{-7})T^3 + (1.2858961 \times 10^{-10})T^4 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}^{[21]}$$

声速及密度随温度变化的关系分别见(1)与(2)式.

2.3 数值结果与讨论

首先, 数值计算入射高斯声源在恒温热源作用下产生的声压幅值空间分布, 声波频率为 10 kHz, 上下热源的长度及高度为 0.4 和 0.05 m, 中心位置分别为 (-0.4 m, 0.5 m) 与 (-0.4 m, -0.5 m), 分界面中心顶点与坐标原点重合. 为了比较分析, 同时计算高斯声束在无热源时激发产生的声压幅值分布, 如图 1(b) 所示. 在无热源时, 模型中没有温度梯度变化, 高斯声束的声压幅值在 x 方向上不变, 无法产生声聚焦效应. 然而, 当热源存在时, 图 1(c) 为其声压幅值空间分布, 高斯声束在右侧区域产生明显的声聚焦效应. 这主要是因为热源的作用下, 左侧区域形成明显的温度梯度分布, 如图 1(d), 图中的灰色曲线表示不同大小的等温线, 可以看出, 热源与分界面之间的等温线弯曲形成一个近似凹透镜的区域, 进而控制声波的传播路径, 使得声波产生聚焦效应. 此外, 温度梯度分布区域中温度场连续变化, 因此, 空气中的声阻抗连续变化, 从而有效降低系统中的反射能量, 具有良好的声聚焦性能.

图 2(a) 与图 2(b) 分别显示图 1(c) 中焦点区域的水平与垂直方向声压幅值分布, 同时给出无热源时(图 1(b)) 相应位置的声压幅值分布, 比较图中结果可以看出, 系统在水平及垂直方向表现出良好的声聚焦性能. 焦点的中心位置为 (0.65 m, 0), 声压幅值为 22.0 Pa, 水平方向上焦点宽度(焦区长度)较大, 垂直方向上的声束宽度较小(即横向分辨率较大), 其大小分别为 0.37 m 和 0.04 m.

图 3 为不同频率的高斯声源在热源作用下产生的声压幅值空间分布, 可以看出, 声聚焦频带很宽, 在 5—20 kHz 范围中, 系统表现出良好的声聚焦性能. 随着声源频率的增加, 焦点位置基本不变, 声压幅值增大, 焦区长度减小, 横向分辨率增大. 为了更加清楚地显示该特征, 我们给出了聚焦声场 x 方向的声压幅值分布, 如图 4 所示, 同样可以得到

上述声场特性. 这主要是由于入射声源频率增加, 声波波长逐渐减小, 焦点尺寸逐渐减小, 声波能量更加集中, 声聚焦性能增强.

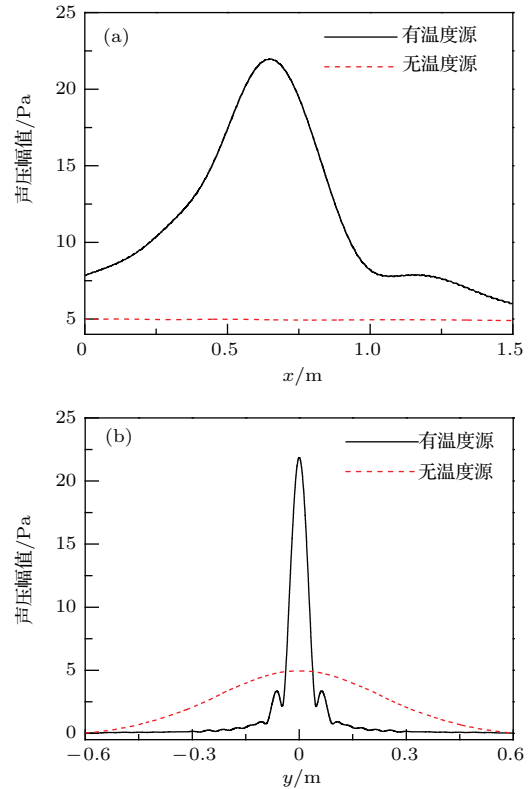


图 2 (网刊彩色) 聚焦焦点 (a) x 方向和 (b) y 方向的声压幅值分布

Fig. 2. (color online) Pressure amplitude distributions through focal spot at (a) x and (b) y directions.

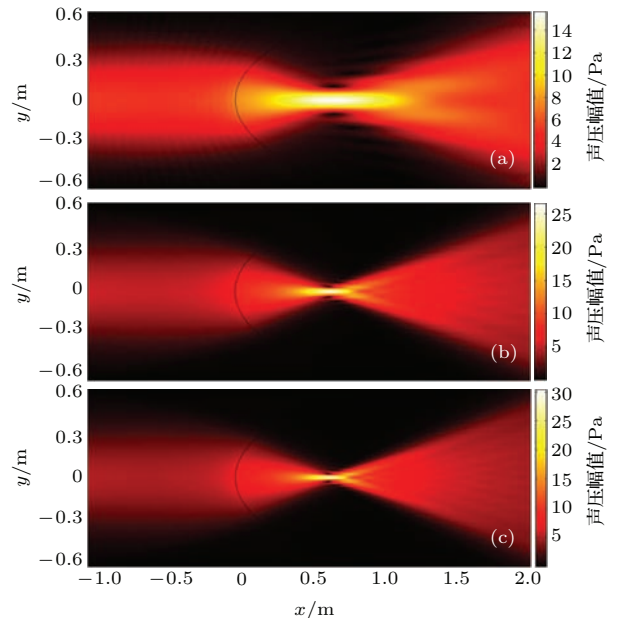


图 3 (网刊彩色) 不同入射频率的高斯声束产生的声压幅值空间分布 (a) 5 kHz; (b) 15 kHz; (c) 20 kHz

Fig. 3. (color online) Pressure amplitude field distributions induced by Gaussian acoustic beam with different frequencies: (a) 5 kHz; (b) 15 kHz; (c) 20 kHz.

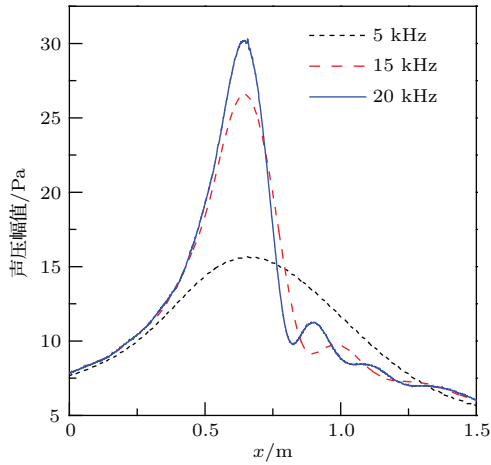


图4 (网刊彩色) 不同频率的高斯声束产生的聚焦点 x 方向的声压幅值分布

Fig. 4. (color online) Pressure amplitude distributions through focal spot at x direction induced by Gaussian acoustic beam with different frequencies.

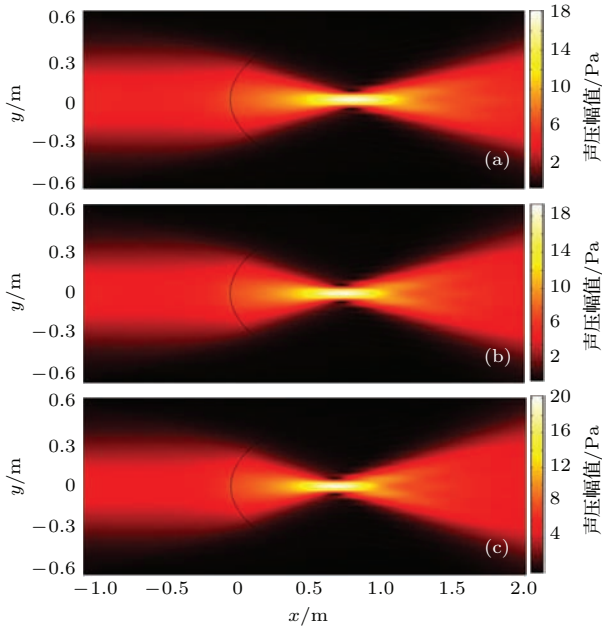


图5 (网刊彩色) 不同温度的热源产生的声压幅值空间分布 (a) 773 K; (b) 873 K; (c) 973 K

Fig. 5. (color online) Pressure amplitude field distributions induced by heat sources with different temperatures: (a) 773 K; (b) 873 K; (c) 973 K.

图5为高斯声源在不同温度的热源作用下产生的声压幅值空间分布, 比较图5(a)—(c)可以看出, 随着热源温度的增加, 焦点位置逐渐向左平移, 焦距逐渐变小, 声聚焦性能逐渐增强, 表现为焦点声压增大, 焦区长度减小与横向分辨率增大, 但变化幅度较小. 图6为聚焦声场的 x 方向声压幅值分布, 同样可以验证上述特性. 这主要由于随着热源温度的提高, 等温线分布越密, 所形成的温度梯度

变化越明显(图7), 从而使得空气中的声速变化更为明显, 形成的聚焦性能更强.

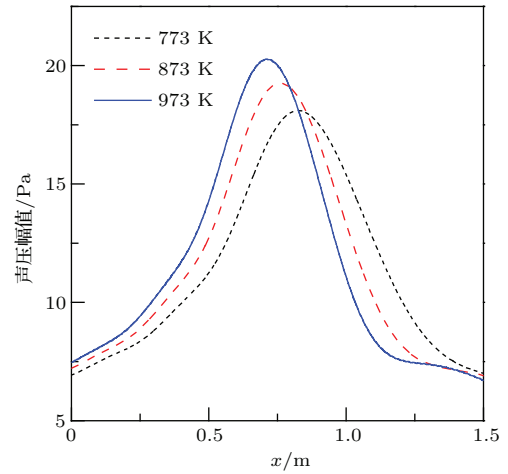


图6 (网刊彩色) 不同温度的热源产生的聚焦点 x 方向的声压幅值分布

Fig. 6. (color online) Pressure amplitude field distributions through focal spot at x direction induced by heat sources with different temperatures.

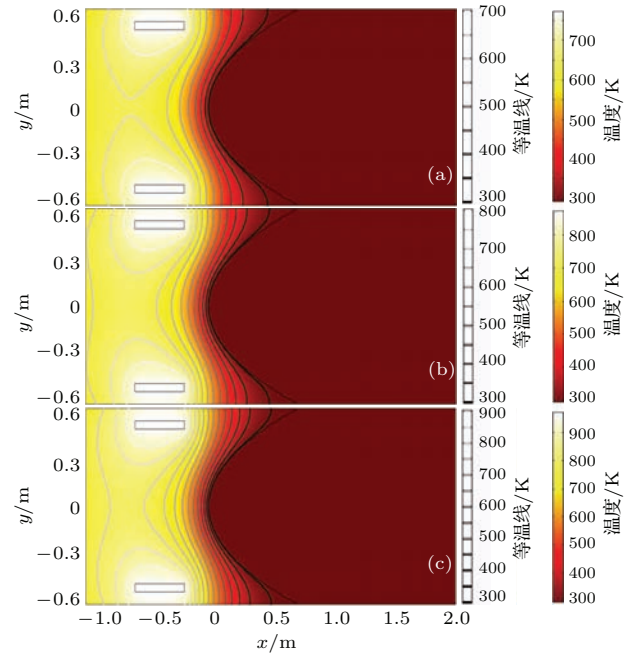


图7 (网刊彩色) 不同温度的热源产生的温度场空间分布 (a) 773 K; (b) 873 K; (c) 973 K

Fig. 7. (color online) Temperature field distributions induced by heat sources with different temperatures: (a) 773 K; (b) 873 K; (c) 973 K.

图8为不同分界面空间分布函数对应的声压幅值空间分布. 可以看出, 随着分界面的曲率增大, 声聚焦性能增强, 焦点的声压幅值增大, 焦区长度减小及横向分辨率增大, 在图8(a)与图8(b)之间变化尤为明显. 此外, 焦点中心位置逐渐向左

平移, 聚焦焦距明显减小. 图9为聚焦声场 x 方向的声压幅值分布, 同样清楚地表现出以上特性. 因此, 声聚焦效应与分界面空间分布函数密切相关. 图10为图8所对应的温度场空间分布, 可以看出, 等温线与分界面曲线的形状同步变化, 与图10(b)与图10(c)相比, 图10(a)中的等温线更加平缓, 弯曲度更小, 从而所形成的声聚焦效应的焦距更大, 性能更弱.

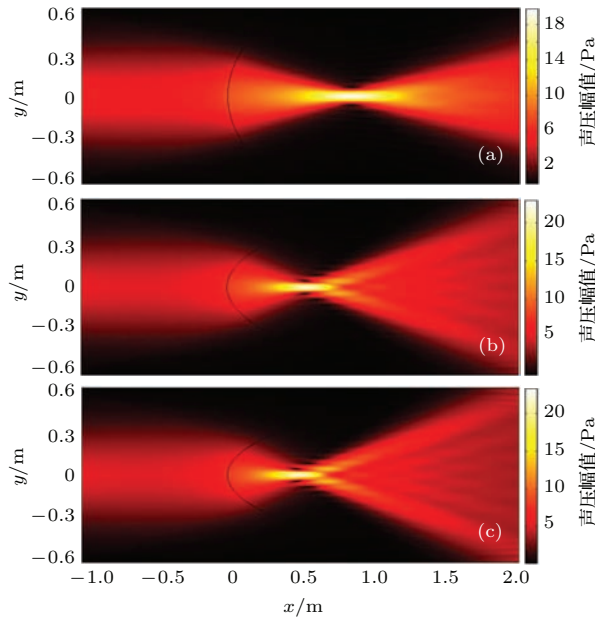


图8 (网刊彩色) 不同空间函数的分界面对应的声压幅值空间分布 (a) $x = y^2$; (b) $x = 3y^2$; (c) $x = 4y^2$

Fig. 8. (color online) Pressure amplitude field distributions induced by different spatial functions of interfaces: (a) $x = y^2$; (b) $x = 3y^2$; (c) $x = 4y^2$.

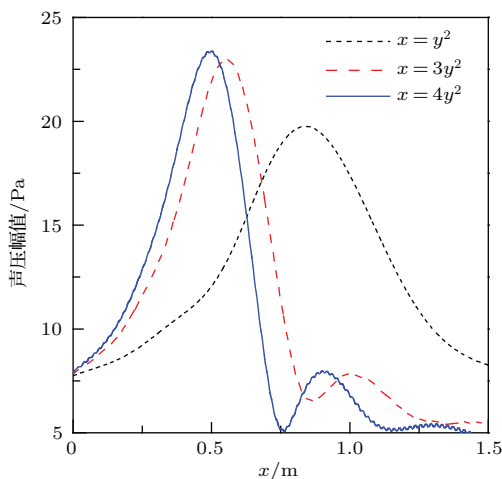


图9 (网刊彩色) 不同空间函数的分界面对应的聚焦焦点 x 方向的声压幅值分布

Fig. 9. (color online) Pressure amplitude field distributions through focal spot at x direction induced by different spatial functions of interfaces.

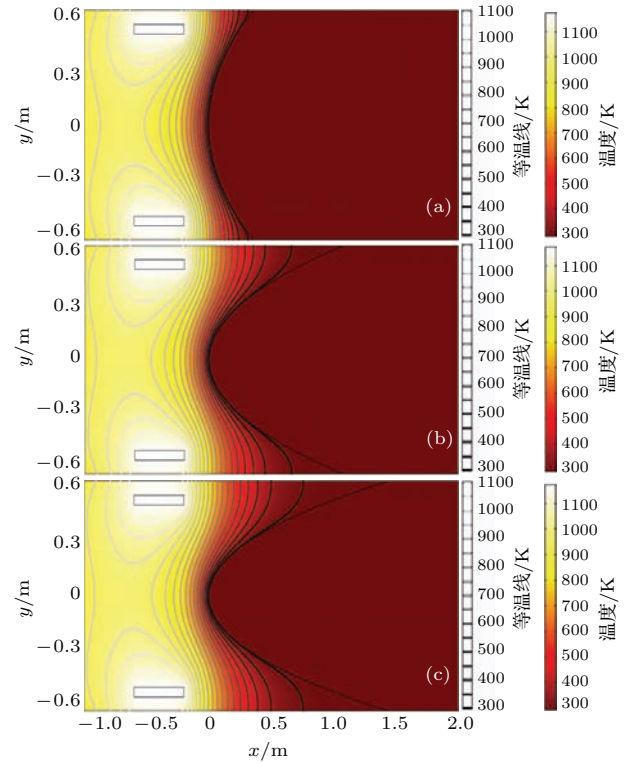


图10 (网刊彩色) 不同空间函数的分界面对应的温度场空间分布 (a) $x = y^2$; (b) $x = 3y^2$; (c) $x = 4y^2$

Fig. 10. (color online) Temperature field distributions induced by different spatial functions of interfaces: (a) $x = y^2$; (b) $x = 3y^2$; (c) $x = 4y^2$.

图11显示不同位置热源对应的声压幅值空间分布. 当热源位置同时水平向右平移时(图11(a)–(c)), 焦点中心向左平移, 焦距逐渐减小, 聚焦效应增强, 但变化幅度较小. 而当热源位置同时向中心轴垂直相向平移时(图11(d)–(f)), 焦点中心向左平移, 焦距逐渐减小, 但聚焦效应减弱. 图12为聚焦声场 x 方向的声压幅值分布, 同样可以清楚地表征上述特性. 图13为图11所对应的温度场空间分布, 随着热源向右水平平移(图13(a)–(c)), 靠近分界面的温度场分布曲线越密, 弯曲度更大, 所形成的聚焦效应增强; 而当热源向中心轴垂直相向平移时(图13(d)–(f)), 热源与分界面之间的部分等温线变得平缓, 弯曲度变小, 从而导致声聚焦效应变弱.

此外, 研究发现当上下两个恒温热源温度不同时, 可以实现聚焦焦点位置的纵向偏移. 数值计算中, 上侧热源温度恒为1173 K, 逐渐降低下侧热源的溫度, 图14为声场幅值空间分布, 与图1(c)相比, 焦点位置向下偏移(图14(a)), 随着下侧热源的溫度降低, 聚集焦点的位置向下偏移(图14(b)与

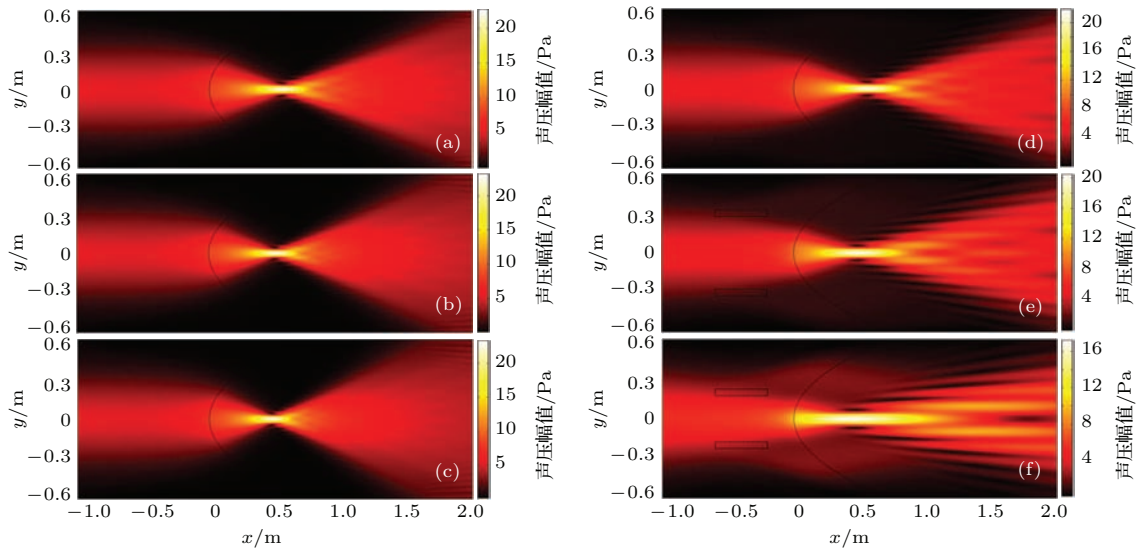


图 11 (网刊彩色) 热源水平向右平移 (a) 0.1 m, (b) 0.2 m, (c) 0.3 m 及向中心轴垂直相向平移 (d) 0.1 m, (e) 0.2 m, (f) 0.3 m 对应的声压幅值空间分布

Fig. 11. (color online) Pressure amplitude field distributions with heat sources moving (a) 0.1 m, (b) 0.2 m, and (c) 0.3 m to right, and moving (d) 0.1 m, (e) 0.2 m, and (f) 0.3 m to central axis.

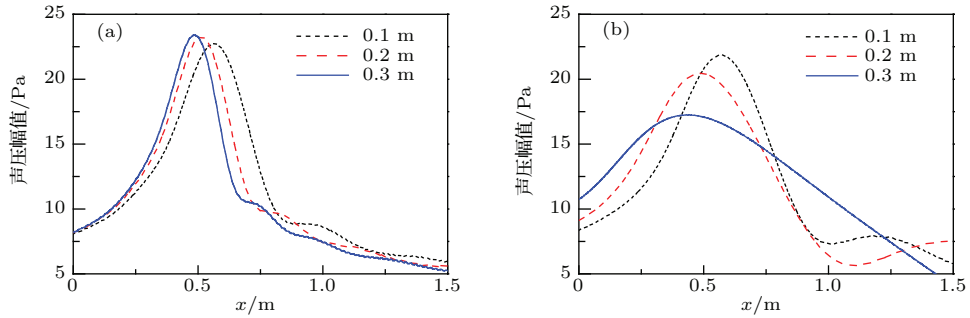


图 12 (网刊彩色) 热源 (a) 水平向右平移与 (b) 向中心轴垂直相向平移对应的聚焦点 x 方向的声压幅值分布

Fig. 12. (color online) Pressure amplitude field distributions through focal spot at x direction with heat sources shifting to (a) right and (b) central axis.

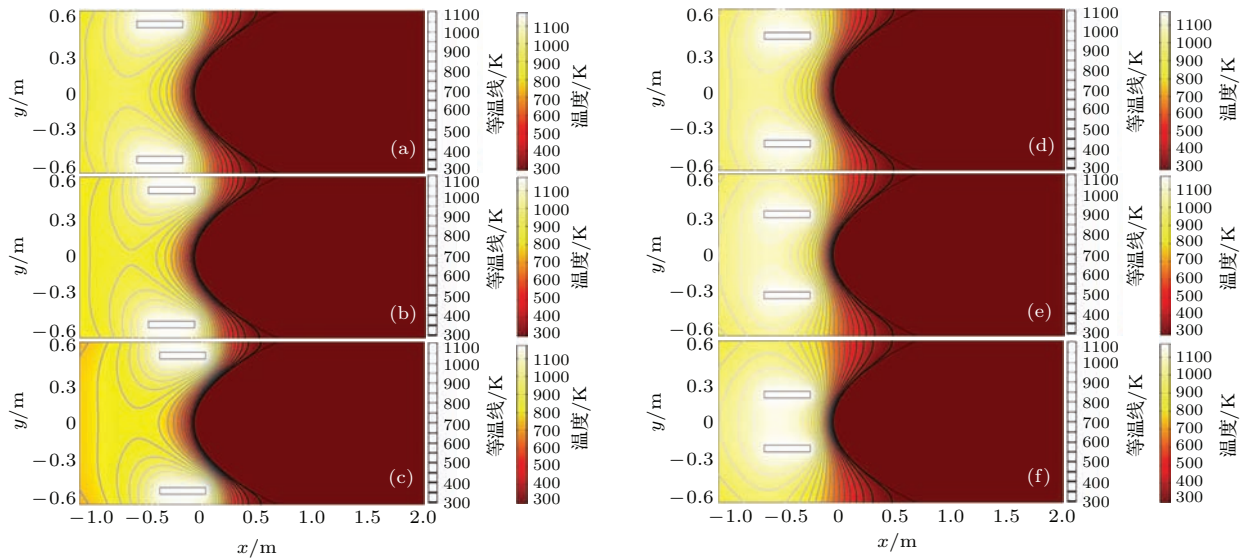


图 13 (网刊彩色) 热源水平向右平移 (a) 0.1 m, (b) 0.2 m, (c) 0.3 m 及向中心轴垂直相向平移 (d) 0.1 m, (e) 0.2 m 及 (f) 0.3 m 对应的温度场空间分布

Fig. 13. (color online) Temperature field distributions with heat sources moving (a) 0.1 m, (b) 0.2 m, and (c) 0.3 m to right, and moving (d) 0.1 m, (e) 0.2 m, and (f) 0.3 m to central axis.

图 14(c)). 该现象与上下热源的温度梯度变化密切相关, 如图 15 所示, 当上侧热源温度高于下侧热源温度, 上侧热源周围的等温线更多, 更密集, 从而形成一个非对称的温度梯度分布区域, 进而使得焦点位置发生纵向偏移. 因此, 可以通过调节单侧热源温度来控制焦点的上下位置.

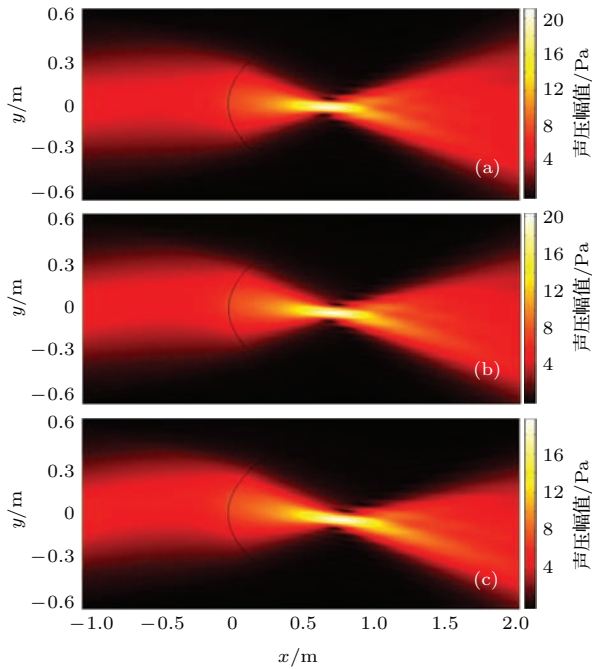


图 14 (网刊彩色) 下侧热源温度变化对应的声压幅值空间分布 (a) 973 K; (b) 873 K; (c) 773 K
 Fig. 14. (color online) Pressure amplitude field distributions induced by subjacent heat source with different temperatures: (a) 973 K; (b) 873 K; (c) 773 K.

下面研究空气的衰减损耗对声聚焦性能的影响. 数值计算中, 将空气中波数设置为复数 $k^* = \omega/c - j\alpha$, 其中 ω 为声波的角频率, $\alpha = 0.00125 \text{ m}^{-1}$ 为空气衰减系数 [18], 其他参数不变. 图 16(a) 为考虑空气衰减系数的声场幅值空间分布, 与忽略空气衰减系数的结果相比 (图 1(c)), 声聚焦性能几乎没有影响. 下面设 $\alpha = 0.0625 \text{ m}^{-1}$ 和 $\alpha = 0.625 \text{ m}^{-1}$, 研究 α 对声聚焦性能的影响, 模拟结果分别如图 16(b) 和图 16(c) 所示, 当 α 增大到 0.0625 m^{-1} 时, 与图 16(a) 比较, 焦点中心的声压幅值明显降低, 当 α 增大到 0.625 m^{-1} 时 (图 16(c)), 焦点中心的声压幅值减少到 16.0 Pa 左右. 从上述结果, 我们得到考虑空气衰减损耗, 声聚焦效应依然存在, 但对聚焦强度有一定的影响, 因此, 研究基于温度梯度分布的声聚焦效应需要考虑传播介质中的衰减损耗.

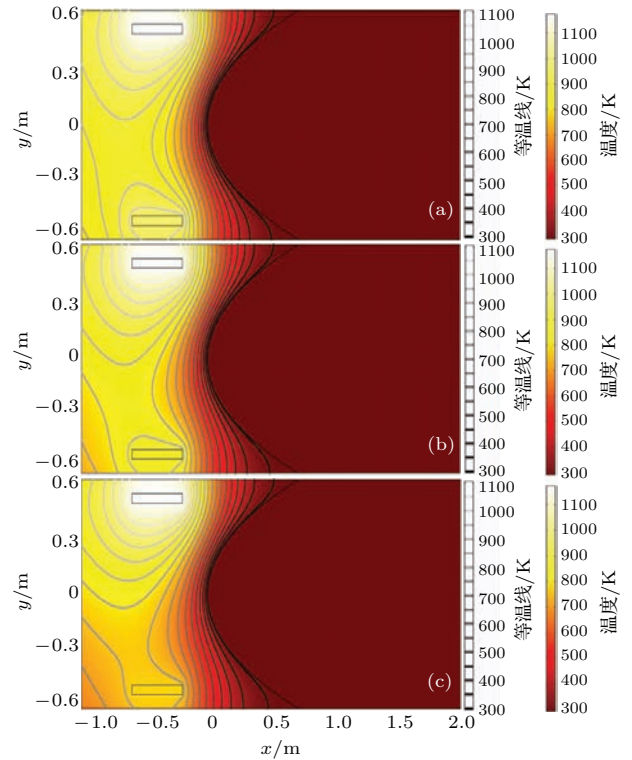


图 15 (网刊彩色) 上侧热源温度变化对应的温度场空间分布 (a) 973 K; (b) 873 K; (c) 773 K
 Fig. 15. (color online) Temperature field distributions induced by upper heat source with different temperatures: (a) 973 K; (b) 873 K; (c) 773 K.

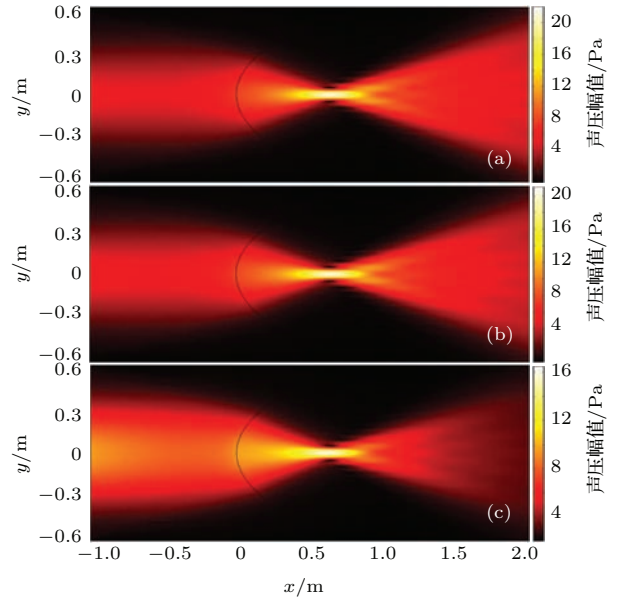


图 16 (网刊彩色) 不同衰减系数对应的声压幅值空间分布 (a) $\alpha = 0.00125 \text{ m}^{-1}$; (b) $\alpha = 0.0625 \text{ m}^{-1}$; (c) $\alpha = 0.625 \text{ m}^{-1}$
 Fig. 16. (color online) Pressure amplitude field distributions with different attenuation coefficients: (a) $\alpha = 0.00125 \text{ m}^{-1}$; (b) $\alpha = 0.0625 \text{ m}^{-1}$; (c) $\alpha = 0.625 \text{ m}^{-1}$.

该声聚焦机理还可适用于凸形分界面, 如图 17 所示. 凸形分界面的空间分布函数为 $x =$

$-2y^2$, 在右侧区域设置上下两个热源, 中心位置分别为 $(0.4 \text{ m}, 0.5 \text{ m})$ 及 $(0.4 \text{ m}, -0.5 \text{ m})$, 温度均为 1173 K , 其他参数与图 1 相同, 图 16(a) 为温度场空间分布, 与图 1(d) 类似, 在热源与凸形分界面之间, 等温线形成近似凹透镜形状的温度梯度分布. 因此, 当入射高斯声源传播到右侧区域时, 在温度梯度场的作用下, 声波的传播路径发生改变, 同样产生声聚焦效应 (图 17(b)).

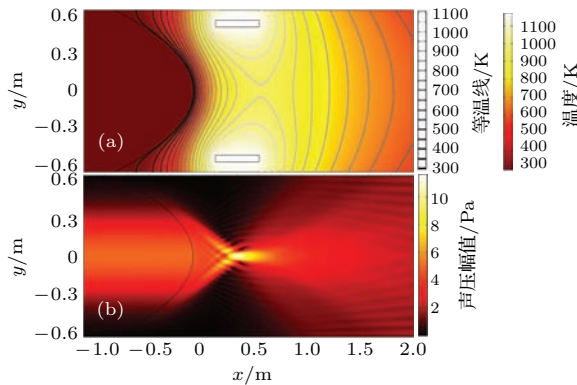


图 17 (网刊彩色) 凸形分界面对应的 (a) 温度场和 (b) 声压幅值空间分布
Fig. 17. (color online) (a) Temperature field and (b) pressure amplitude field distributions induced by convex interface.

最后, 采用气凝胶模拟抛物线分界面, 验证声聚焦系统的可行性. 气凝胶是纳米多孔材料, 由固体颗粒和孔洞中的气体分子组成, 具有良好的弹性、耐高温及隔热性能 [22-24], 因此, 可以加工成抛物线分界面形状, 且能够有效地抑制热量传输. 此外, 气凝胶的声阻抗与空气接近, 对声波的传播性能影响较小. 如图 18(a) 所示, 气凝胶左右两侧界面的空间分布函数分别为 $x = 2y^2$ 与 $x = 2y^2 + 0.3$, 其他计算参数与图 1 相同. 气凝胶的声学和热力学参数分别为: 密度 $\rho = 3.00 \text{ kg/m}^3$, 声速 $c = 333 \text{ m/s}$, 热传导系数 $K = 0.03 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 热容 $C_p = 0.05 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ [22-24].

图 18(b) 显示无热源时高斯声束激发产生的声压幅值分布, 可以看出, 大部分声能量可以透过气凝胶, 到达右侧区域. 从而验证气凝胶对声波的传播性能影响较小. 图 18(c) 为有热源时声压幅值分布, 高斯声束同样在气凝胶右侧区域产生声聚焦效应, 说明本文所提出的声聚焦机理在实际应用中是可实现的. 图 18(d) 为有热源时温度场分布, 与图 1(d) 相比, 部分热量可以透过气凝胶传输到右

侧区域, 然而, 由于气凝胶的热传导系数较低, 温度场在气凝胶两侧形成梯度分布区域, 进而产生声聚焦效应. 综上所述, 利用气凝胶在单一介质中实现声聚焦效应具有一定的可行性.

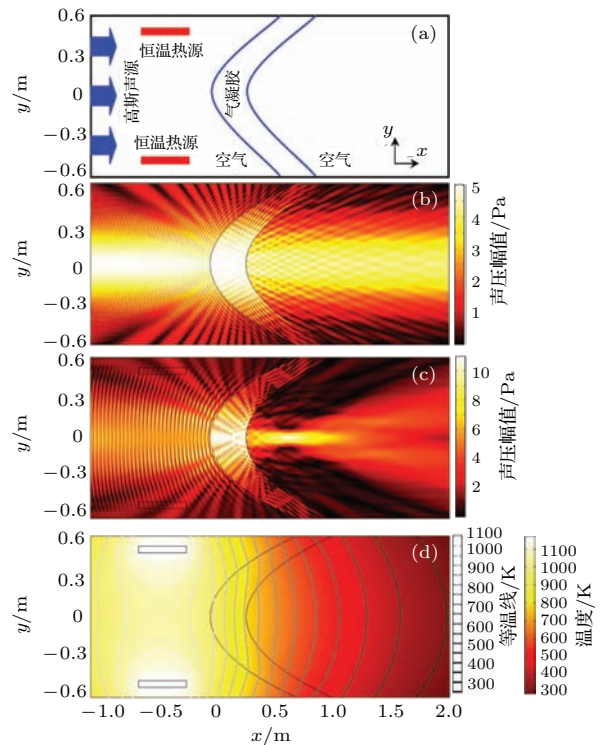


图 18 (网刊彩色) (a) 利用气凝胶的声聚焦透镜结构示意图; 高斯声束在 (b) 无热源及 (c) 有热源时产生的声压幅值空间分布; (d) 有热源时温度场空间分布
Fig. 18. (color online) (a) Schematics of acoustic focusing lens system by using aerogel; Pressure amplitude field distributions induced by Gaussian acoustic beam (b) without and (c) with heat sources; (d) temperature field distribution with heat sources.

3 结 论

基于温度梯度分布在空气中实现声聚焦效应. 该机理源于温度场连续变化引起的声折射率连续变化, 无反射能量损失, 具有宽频带及高聚焦性能等优点. 结果表明: 入射声源频率、热源温度、分界面空间分布、热源位置及介质的衰减系数与声聚焦性能密切相关; 其中, 热源温度、分界面空间分布及热源位置还与焦点横向位置相关; 此外, 设置上下热源不同温度可用来调节焦点的纵向位置, 且该声聚焦机理可适用于凹形及凸形分界面; 最后, 利用气凝胶材料验证声聚焦系统的可行性. 本文为单一介质中实现声场聚焦及偏转提供一种新型有效的方法.

参考文献

- [1] Li J M, Tang P, Wang J J, Huang T, Lin F, Fang Z Y, Zhu X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 194201 (in Chinese) [李嘉明, 唐鹏, 王佳见, 黄涛, 林峰, 方哲宇, 朱星 2015 物理学报 **64** 194201]
- [2] Chen Z, Xu L, Chen R C, Du G H, Deng B, Xie H L, Xiao T Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 164104 (in Chinese) [陈直, 许良, 陈荣昌, 杜国浩, 邓彪, 谢红兰, 肖体乔 2015 物理学报 **64** 164104]
- [3] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Wu X, Xu Z, Zhang A X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 124102 (in Chinese) [李勇峰, 张介秋, 屈绍波, 王甲富, 吴翔, 徐卓, 张安学 2015 物理学报 **64** 124102]
- [4] Zhong Y, Xu J, Lu Y Q, Wang M J, Wang J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 237801 (in Chinese) [仲义, 许吉, 陆云清, 王敏娟, 王瑾 2014 物理学报 **63** 237801]
- [5] Deng K, Ding Y Q, He Z J, Zhao H P, Shi J, Liu Z Y 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 185505
- [6] Lin S C S, Huang T J, Sun J H, Wu T T 2009 *Phys. Rev. B* **79** 094302
- [7] Martin T P, Nicholas M, Orris G J, Cai L W, Torrent D, Sanchez-Dehesa J 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 113503
- [8] Martin T P, Layman C N, Moore K M, Orris G J 2012 *Phys. Rev. B* **85** 161103
- [9] Torrent D, Sánchez-Dehesa J 2007 *New J. Phys.* **9** 323
- [10] Peng S S, He Z J, Jia H, Zhang A Q, Qiu C Y, Ke M Z, Liu Z Y 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 263502
- [11] Zhang S, Yin L, Fang N 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 194301
- [12] Zhou X, Hu G 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 263510
- [13] Zigoneanu L, Popa B I, Cummer S A 2011 *Phys. Rev. B* **84** 024305
- [14] Li Y, Liang B, Tao X, Zhu X F, Zou X Y, Cheng J C 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 233508
- [15] Wang W, Xie Y, Konneker A, Popa B I, Cummer S A 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 101904
- [16] Yuan B G, Cheng Y, Liu X J 2015 *Appl. Phys. Express* **8** 027301
- [17] Xia J P, Sun H X 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 063505
- [18] Du G H, Zhu Z M, Gong X F 2001 *Fundament of Acoustics* (Nanjing: Nanjing University Press) (in Chinese) [杜功焕, 朱哲明, 龚秀芬 2001 声学基础 [南京: 南京大学出版社]
- [19] Cai L W, Sánchez-Dehesa J 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 181915
- [20] Dehesa J S, Angelov M I, Cervera F, Cai L W 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 204102
- [21] COMSOL Multiphysics User's Guide, Version 5.1 <http://www.comsol.com> [2015-8-1]
- [22] Hrubesh LW 1990 *Chem. Industry* **24** 824
- [23] Shen J, Wang J, Wu X 1994 *Mater. Sci. Eng.* **12** 1 (in Chinese) [沈军, 王珏, 吴翔 1994 材料科学与工程 **12** 1]
- [24] <http://baike.baidu.com/view/270440.htm>. [2015-8-2]

Broadband acoustic focusing effect based on temperature gradient distribution*

Liu Chen¹⁾ Sun Hong-Xiang^{1)2)†} Yuan Shou-Qi^{1)‡} Xia Jian-Ping¹⁾

1) (*Faculty of Science, Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

2) (*State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(Received 26 August 2015; revised manuscript received 2 December 2015)

Abstract

Acoustic focusing effect with broad bandwidth based on the temperature gradient distribution is studied. The propagation paths of the acoustic waves can be controlled by the temperature gradient distribution generated by two heat sources, which is adopted to realize the acoustic focusing effect. This focusing effect arises from the continuous change of the acoustic refractive index induced by the change of temperature, and has no reflection energy loss. Therefore, the acoustic focusing effect has the advantages of broad bandwidth and high focusing performance. In addition, we have investigated the influences of the factors (incident frequency, temperature of heat source, spatial distribution of interface, position of heat source, attenuation coefficient of the medium, and asymmetric distribution of heat source temperature) on the acoustic focusing effect in detail, and verified the feasibility of the acoustic focusing system by using aerogel based on temperature gradient distribution in single medium.

Keywords: acoustic focusing, temperature gradient, temperature field, aerogel

PACS: 43.35.+d, 43.25.+y

DOI: 10.7498/aps.65.044303

* Project supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51239005), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11404147), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (Grant No. BK20140519), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2015M571672), the Research Fund for Advanced Talents of Jiangsu University, China (Grant No. 13JDG106), the Training Project of Young Backbone Teachers of Jiangsu University, and the Practice Innovation Training Program Projects for Jiangsu College Students, China (Grant No. 201510299047Y) and for Industrial Center of Jiangsu University.

† Corresponding author. E-mail: jsdxshx@ujs.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: Shouqi@ujs.edu.cn