

# 基于嵌入式粗糙颈亥姆霍兹共振器的 低频宽带通风消声器\*

李婷<sup>1)</sup> 吴丰民<sup>1)†</sup> 张同涛<sup>1)</sup> 王军军<sup>1)</sup> 杨彬<sup>2)</sup> 章东<sup>1)3)‡</sup>

1) (哈尔滨理工大学理学院, 哈尔滨 150080)

2) (哈尔滨工业大学仪器科学与工程学院, 哈尔滨 150080)

3) (南京大学物理学院, 南京 210093)

(2023 年 6 月 27 日收到; 2023 年 10 月 8 日收到修改稿)

针对目前亥姆霍兹共振器的低频吸声效果不理想的问题, 提出了一种粗糙颈管亥姆霍兹共振器吸声体, 将粗糙度引入亥姆霍兹共振器的颈管, 改变经典亥姆霍兹共振器颈管形状并构建粗糙颈管亥姆霍兹共振器吸声体结构, 可以在不改变整体尺寸的前提下, 有效地为吸声器提供低频吸声所需的声阻抗, 从而降低共振频率. 利用有限元法对结构进行了仿真并通过阻抗管吸声测试进行验证, 实验与仿真具有较高的一致性. 基于以上验证, 颈管引入粗糙度后可以有效降低亥姆霍兹共振器吸收峰值频率, 设计了 8 个吸声单元紧凑组合的粗糙颈管低频宽带通风消声器. 相比于光滑颈管的消声器, 吸声效果由 500—1100 Hz 频段内 0.8 以上的宽频吸声优化为 400—1200 Hz 频段内 0.8 以上的吸声效果, 可为低频宽带通风消声器的设计与优化提供参考.

**关键词:** 亥姆霍兹共振器, 粗糙颈管, 低频吸声, 声阻抗

**PACS:** 43.40.+s, 43.50.+y

**DOI:** 10.7498/aps.72.20231047

## 1 引言

亥姆霍兹共振器是一类经典的声学器件, 是最基本的声学共振系统之一<sup>[1,2]</sup>. 经典亥姆霍兹共振器由于其结构简单, 易于制作, 吸声系数不受材料的限制, 且只与本身的参数有关而受到广泛学者的关注<sup>[3-5]</sup>. 学者们为了进一步提升亥姆霍兹共振器的低频吸声性能做了许多工作. 苏胜利等<sup>[6]</sup>于 2014 年对亥姆霍兹共振器进行了声学改进, 通过三维声学有限元法预测了亥姆霍兹共振器的传递损失, 研究颈管延伸长度、横截面形状对声学特性的影响. 另外还研究了亥姆霍兹共振器在串并联组合方式下声学特性的变化, 为拓宽消声器的吸声

带宽提供了借鉴思路. 2016 年, Romero-García 等<sup>[7]</sup>基于亥姆霍兹共振器结构设计了一种亚波长多共振散射体. 通过临界耦合的机制, 实验和解析地解释了对可听声音的理想宽带吸收. 证明具有大的固有损耗的系统可以使用具有大耗散的共振来进行临界耦合. 同年, Jiménez 等<sup>[8]</sup>利用慢声和临界耦合的思想, 设计了一种由亥姆霍兹共振器和具有周期性分布的闭合狭缝的刚性板构成的具有准全向吸声的超薄声学超材料板. 通过控制狭缝的几何形状, 可以调节其本征黏热损耗, 以准确补偿系统的声能泄漏, 满足由深亚波长尺度在大的入射角度范围内产生完美吸声的临界耦合条件. 2020 年, Duan 等<sup>[9]</sup>通过在嵌入式亥姆霍兹共振器颈部引入表面粗糙度, 实现声阻抗调节, 表面粗糙度触发颈部流

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11934009) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [fmwu@hrbust.edu.cn](mailto:fmwu@hrbust.edu.cn)

‡ 通信作者. E-mail: [dzhang@nju.edu.cn](mailto:dzhang@nju.edu.cn)

体振动的周期性集中效应, 改变了吸收器的共振阻尼状态, 吸收峰位置向较低的频率移动了 16.0%, 峰值增大 19.6%, 为消声器设计和阻抗调节提供了一种方法. 同年, Nguyen 等<sup>[10]</sup> 基于狭缝型亥姆霍兹共振器构建了一种在保持通风的同时实现低频宽带隔声的双层声学消声器. 实验结果表明, 在 480—950 Hz 的目标工作频带内, 隔声量平均可达 30 dB 以上, 最高峰值可达 50 dB 以上. 然而这种多单元平行排布不可避免的声面板面积, 随单元数量线性增强, 导致结构表面阻抗的变化, 多单元耦合效应差, 吸声系数降低, 此外较大的吸音板面积也给实际应用带来了困难, 在保持紧凑结构有效通风的同时, 实现高效的宽带吸声的机制仍有待讨论<sup>[11]</sup>. 2021 年, Duan 等<sup>[12]</sup> 设计了一种声学多层亥姆霍兹共振超材料, 其可以在给定的低频目标上实现多个吸收峰. 通过调整多层亥姆霍兹共振器的结构参数, 可以相应地改变其阻抗, 实现对多组特定频率噪声的吸收. 2022 年, Zhang 等<sup>[13]</sup> 提出了一种全粗糙颈嵌入式亥姆霍兹共振器, 通过调整亥姆霍兹共振器中嵌入颈的壁形, 以提高其低频吸声性能. 结果表明, 当颈部轴向及径向粗糙度同时存在时, 声能耗散不仅在颈部增大, 气腔内也增大.

目前看来, 尽管学者们对亥姆霍兹共振器的结构进行了许多适应性的改进工作, 拓展了其潜在的声学性能<sup>[14–16]</sup>, 但不难发现, 亥姆霍兹共振器的共振频率取决于空腔与颈管的几何尺寸, 而在吸声降噪的实际应用中为了有效实现降低吸声频率的目标, 需要增大空腔体积或颈管长度. 但是一些实际应用场合, 如船舶内部通风管路系统、内燃机进排气系统等, 空间布置非常紧凑, 对设备外形及尺寸等参数的控制十分严格, 期望通过增大亥姆霍兹共振器的几何尺寸来降低吸声频率的可行性微乎其微.

利用超材料设计的思想, 以亥姆霍兹共振器为基础, 将粗糙度引入亥姆霍兹共振器的颈管, 改变经典亥姆霍兹共振器颈管形状并构建粗糙颈管亥姆霍兹共振器吸声体结构, 可以有效地为吸声器提供低频吸声所需的声阻抗, 从而降低共振频率. 通过有限元法对设计的粗糙颈管亥姆霍兹共振器进行模拟仿真, 并通过实验验证了理论和仿真的正确性, 将实验结果与仿真预测进行对比分析. 之后讨论了颈管粗糙度参数变化对吸声性能的影响, 分析各个参数降低吸声峰值频率提高吸声性能的原因. 而后据此设计了基于多个粗糙颈亥姆霍兹谐振器

吸声单元紧凑组合的低频宽带通风吸声器, 得以在保持通风的同时实现低频宽带吸声.

## 2 结构模型及结果分析

### 2.1 模型构建

传统亥姆霍兹共振器的共振频率与其颈管横截面积成正比, 与颈管长度和空腔体积成反比<sup>[17]</sup>. 许多以前的研究已经报道了在亥姆霍兹共振器中使用加长的颈管可以在不增大其结构尺寸的情况下以较低的频率产生共振吸声的优点<sup>[18–20]</sup>. 本文研究了将粗糙度引入共振器颈管中所得到的低频优势. 在设计的粗糙颈管亥姆霍兹共振器吸声体中, 整体结构由颈管与背腔两部分构成, 整体外观为边长为  $a$ , 壁厚为  $t$  的立方体结构. 在传统亥姆霍兹共振器的基础上, 引入粗糙度后构建的粗糙颈管以三维一阶希尔伯特曲线的形式进行折叠, 以期尽可能地延长颈管长度, 如图 1(f) 所示. 值得注意的是, 嵌入背腔的延伸颈管的折叠路径也可以是如之字形等其他类型, 通过设计使得颈管延长, 将有助于共振频率向低频方向进一步移动. 同时, 将粗糙颈管嵌入背腔中, 可进一步实现节省空间的作用. 为了对比粗糙颈管亥姆霍兹共振器吸声体的优异的低频吸声效果, 同样设计了以相同方式折叠的光滑颈管亥姆霍兹共振器吸声体, 其外观尺寸及壁厚与粗糙颈管亥姆霍兹共振器吸声体相同, 如图 1(c) 所示.

粗糙颈管亥姆霍兹共振器吸声体的整体结构由嵌入共振器背腔的折叠颈管与外壳框架构成的背腔两部分构成, 二者通过顶部的连接孔相连. 在设计中嵌入背腔的粗糙颈管由 1 段直管与 3 段弯曲管首尾相连, 以三维一阶希尔伯特曲线的形式折叠. 图 1(a), (d) 分别展示了直管与弯曲管的粗糙和光滑结构对比. 图中,  $d_n$  与  $d_c$  分别为直管与弯曲管的等效管径,  $l_n$  与  $r_c$  分别为颈管中直管的长度与弯曲管的弯曲半径.

图 1(b) 是直角坐标系下两种颈管的内壁曲线图, 粗糙颈管的内壁表面是一条理想的余弦线, 在此处引入表面粗糙度的概念, 这里的两个参数, 余弦线的周期  $b$  代表颈管的轴向粗糙度, 而幅值  $\delta$  则表征颈管的径向粗糙度. 粗糙直管内壁的函数为

$$\Gamma(x) = \pm \left[ \delta \cos \left( \frac{2\pi}{b} x \right) + \frac{d_n}{2} \right], \quad (1)$$

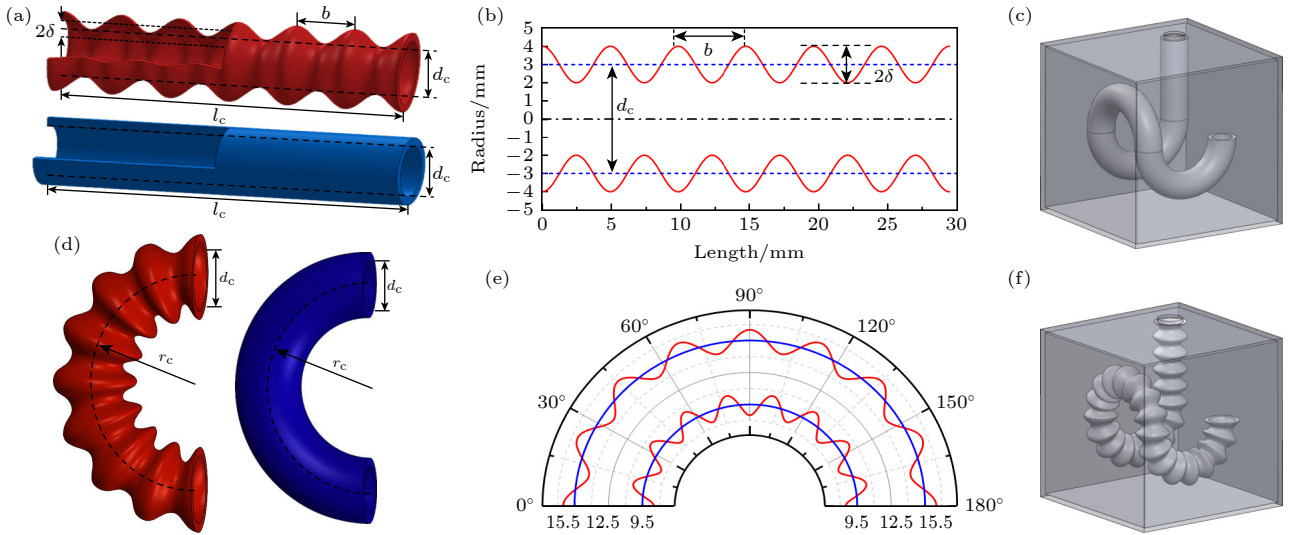


图 1 (a) 粗糙直管与光滑直管对比; (b) 直角坐标系下两种直管结构对比; (c) 光滑颈管亥姆霍兹共振器吸声体结构; (d) 粗糙弯曲管与光滑弯曲管结构对比; (e) 极坐标系下两种弯曲管内壁曲线函数; (f) 粗糙颈管亥姆霍兹共振器吸声体结构

Fig. 1. (a) Comparison of rough and smooth straight pipes; (b) comparison of two kinds of straight pipe structures in cartesian coordinate system; (c) sound absorber structure of smooth neck Helmholtz resonator; (d) comparison of rough-curved and smooth-curved tubes; (e) curve function of two kinds of bending tube inwall in polar coordinate system; (f) sound absorber structure of rough neck Helmholtz resonator.

其中,  $x$  是沿颈管长度方向的位置坐标. 图 1(e) 是极坐标系下两种颈管的内壁曲线图. 粗糙弯曲管的内壁函数曲线可以在极坐标系中由以下函数式表示:

$$\Omega(\theta) = r_c \pm \left[ \delta \cos\left(\frac{2\pi r_c}{b} \theta\right) + \frac{d_c}{2} \right]. \quad (2)$$

## 2.2 理论

从声学角度讲, 粗糙颈管亥姆霍兹共振器的腔体底面和嵌入空腔的颈管内壁都被视为刚性. 对于有刚性衬垫的空气腔, 其声阻抗为

$$Z_c = -jZ_0 \cot(\delta_1 k_0 l_c), \quad (3)$$

其中,  $j$  是虚数单位. 空气的特性阻抗  $Z_0 = \rho_0 c_0$ ,  $\rho_0 = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_0 = 343 \text{ m/s}$ ,  $k_0 = 2\pi f/c_0$  分别为空气的密度、声速和波数,  $f$  为声波频率.  $\delta_1$  是考虑到颈管所占空腔体积的深度修正系数, 而具有余弦线轴向粗糙度的粗糙颈管的弯曲度可以用下式计算<sup>[21]</sup>:

$$\alpha_\infty = 1 + \frac{\varepsilon^2 \beta^2 [(J_0^2(\beta/2)) - (J_1^2(\beta/2))]}{2J_1^2(\beta/2)}, \quad (4)$$

其中  $J_n$  为第一类修正的  $n$  阶贝塞尔函数,  $\varepsilon = \delta/d_n$  和  $\beta = 2\pi d_n/b$  分别被定义为相对粗糙度和表面粗糙度的波数. 当相对粗糙度  $\varepsilon = 0$  时, (4) 式对应减小为光滑颈管的弯曲度  $\alpha_\infty = 1$ . 粗糙颈管的静态

流阻率由下式给出<sup>[22]</sup>:

$$\sigma_r = \sigma_s \left\{ \frac{1}{(1-2\varepsilon)^4} + \left[ \frac{6\varepsilon^2 + 1}{(1-4\varepsilon^2)^{7/2}} - \frac{1}{(1-2\varepsilon)^4} \right] \frac{2e^{-\frac{1}{5\pi}\beta}}{1 + e^{-\frac{1}{5\pi}\beta}} \right\}, \quad (5)$$

式中,  $\sigma_s = 32\mu_0/d_n^2$  为光滑颈管的静态流阻率,  $\mu_0 = 1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  是空气的动态黏度. 当  $\varepsilon = 0$  时, (5) 式也减少为光滑颈管的情况.

可使用 Pride 等<sup>[23]</sup> 的模型来计算结构顶部吸声面板的声阻抗:

$$Z_n = \left\{ \frac{v_0}{j\omega q_0} + \left\{ 1 - \chi + \chi \left[ 1 + \left( \frac{8\alpha_\infty q_0}{3\Lambda} \right)^2 \frac{j\omega}{v_0} \right]^{1/2} \right\} + \alpha_\infty \right\} \rho_0 \omega j l_n, \quad (6)$$

式中,  $\omega = 2\pi f$  为角频率,  $v_0 = \mu_0/\rho_0$  为运动黏度,  $q_0 = \mu_0/\sigma_r$  为黏性渗透率,  $\Lambda = \sqrt{8\mu_0\alpha_\infty/\sigma_r}$  为黏性特征长度,  $\chi = 3/4$  为轴对称的颈管的扭矩比. 考虑到粗糙颈管对声阻的端部影响,  $Z_n$  应修改为

$$Z'_n = Z_n + \frac{4\sqrt{2}\mu_0 y}{d_e} + 0.85d_e j\omega \rho_0, \quad (7)$$

式中,  $y = d_e \sqrt{\rho_0 \omega / \mu_0} / 2$  是颈管半径与黏性边界层厚度之比,  $d_e = d_n(1 + 2\varepsilon)$  是颈管的末端直径. 然后, 结构的表面声阻抗可以计算为



$$Z_s = \delta_2 (Z_c + Z'_n/\varphi), \quad (8)$$

式中,  $\varphi$  是顶部吸声面板的穿孔比,  $\delta_2$  是考虑腔体壁厚的声阻抗修正系数. 考虑到颈部的粗糙度, 上述理论模型实际上是将经典的光滑颈管亥姆霍兹共振器理论推广到粗糙颈管.

然而当结构为满足实际应用需求时, 将结构辅以通风功能, 通风结构的吸声系数可以表示为<sup>[24]</sup>

$$\alpha = 1 - |r|^2 - |t|^2, \quad (9)$$

式中,  $r$  是反射系数,  $t$  是透射系数. 由此可以看出结构的吸声系数与通风环境中的反射和透射密切相关, 为了提高通风性能, 最佳方法是增大通风面积, 而通风面积的增大将不可避免地会导致透射声波在总入射声波中比例的增大, 从而降低了吸声系数, 因此通风和吸声往往难以结合在一个结构中.

### 2.3 有限元仿真及结果分析

接下来利用有限元仿真计算的方式来模拟设计

吸声体结构的声学性能. 使用有限元软件 COMSOL Multiphysics 中的声学模块构建, 为考虑模型中的热损耗及黏性损耗, 仿真模块构建同时使用了热黏性声学模型及压力声学模型, 如图 2(a) 所示. 对于空气所涉及的参数为质量密度  $\rho_0 = 1.21 \text{ kg/m}$  和声速  $c_0 = 343 \text{ m/s}$ , 动态黏度  $\eta = 1.814 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 空气温度  $T = 293.5 \text{ K}$ . 由于模型材料阻抗远大于空气, 因此将热黏性模块中嵌入背腔的粗糙颈管内壁视为刚性壁, 将压力声学中的结构壁与空气的接触面设置为硬声场边界. 由于模型材料阻抗远大于空气, 因此将热黏性模块中的嵌入背腔的粗糙颈管内壁视为刚性壁, 将压力声学中的结构壁与空气的接触面设置为硬声场边界. 在模型的上方设置背景声场, 用大小为  $1 \text{ Pa}$  的平面波垂直向下入射来模拟入射声波的传输, 图中红色箭头为入射方向. 利用有限元法对其吸声性能进行了仿真模拟, 如图 2(b) 所示. 可以看到, 光滑颈管亥姆霍兹共振器的吸声峰值在  $70 \text{ Hz}$ , 吸声系数为  $0.85$ . 而粗糙管共振器

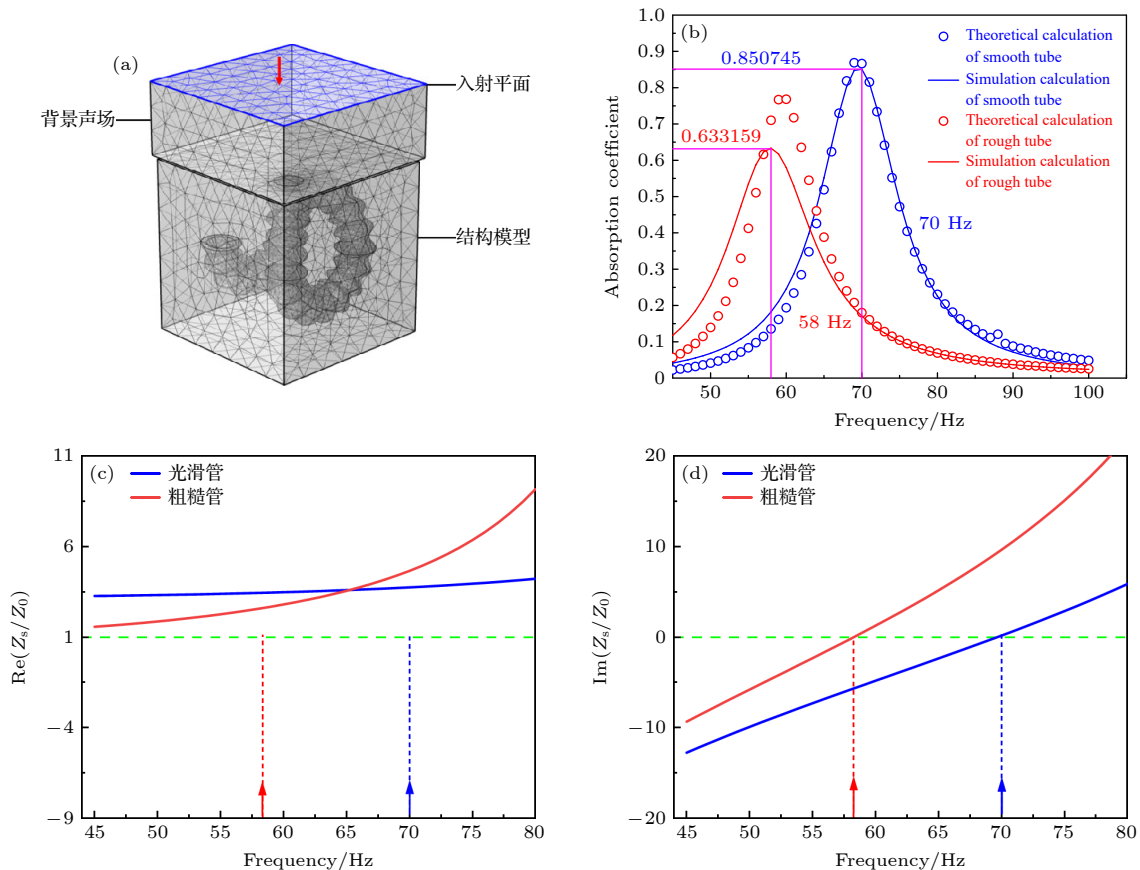


图 2 结构有限元仿真 (a) 有限元网格划分模型; (b) 两种结构理论及仿真吸声曲线对比; (c) 两种结构相对阻抗实部对比; (d) 两种结构相对阻抗虚部对比

Fig. 2. Finite element simulation of structures: (a) Finite element meshing model; (b) comparison of two structural theories and simulation sound absorption curves; (c) comparison of the relative impedance realities of the two structures; (d) comparison of the relative impedance imaginary parts of the two structures.

在 58 Hz 达到峰值, 吸声系数为 0.63. 共振频率向低频移动, 由 70 Hz 降低为 58 Hz 降低约 17.1%. 整体尺寸达到对应峰值频率声波波长的 1/118, 表现出很强的亚波长特性, 显著的性能改进归功于通过粗糙的颈管的声阻抗的调节.

结构的吸声性能与其声阻抗密切相关, 将粗糙颈管共振器与光滑颈管共振器的表面声阻抗  $Z_s$  与空气的特性阻抗  $Z_0$  的比值, 即相对阻抗  $Z_s/Z_0$  实部和虚部分别进行对比. 根据阻抗匹配条件表明, 只有同时满足相对阻抗实部  $\text{Re}(Z_s/Z_0) = 1$  和虚部  $\text{Im}(Z_s/Z_0) = 0$ , 才能实现完美声吸收. 由于相对阻抗不是自变量, 这样的条件往往不能严格满足. 一般来说, 在相对较低的频率下, 相对阻抗虚部  $\text{Im}(Z_s/Z_0)$  的绝对值大于实部  $\text{Re}(Z_s/Z_0)$ , 因此吸收峰值频率通常由相对阻抗虚部  $\text{Im}(Z_s/Z_0)$  的零点决定, 而吸收峰值则由相对阻抗的实部  $\text{Re}(Z_s/Z_0)$  所控制的阻尼态决定<sup>[9]</sup>. 在图 2(d) 中, 可以看到在声阻抗的调节下, 在所研究的频带内, 粗糙管的相对阻抗虚部  $\text{Im}(Z_s/Z_0)$  明显高于光滑管, 从而导致粗糙管的相对阻抗虚部  $\text{Im}(Z_s/Z_0)$  在更低的频率处达到 0. 即粗糙管共振器实现了较低的共振频率. 此外, 如图 2(c) 所示, 与光滑管相比, 粗糙管的相对阻抗实部  $\text{Re}(Z_s/Z_0)$  有所改善. 在各自共振频率处, 粗糙管相比光滑管的相对阻抗实部  $\text{Re}(Z_s/Z_0)$  更靠近 1. 因此, 在共振频率处, 虽然二者均为过阻尼态, 但相比之下粗糙管更贴近临界阻尼态, 从而有更高的吸收系数.

为进一步了解粗糙颈管亥姆霍兹共振器吸声体的吸声机理, 通过有限元法绘制了两种结构的粒子振动速度分布图, 如图 3(a), (c) 所示, 图中粗糙颈管与光滑颈管中的粒子振动速度分布进行比较. 能明显看到, 光滑颈管的振动速度分布均匀, 管道中心振速整体约为 0.1 m/s, 在弯曲管内圆壁面振速达到最大. 而与光滑颈管明显不同的是, 粗糙颈管的粒子振动速度分布沿颈长呈周期性变化, 在各窄处截面上粒子振速最大达到 0.2 m/s. 这是由于表面粗糙度改变了颈部的流体流动特性, 观察到流体振动的周期性集中效应. 周期性的集中效应阻碍了流体的流动, 从而在宏观水平上调节了结构的低频声阻抗.

图 3(b), (d) 比较了光滑颈管和粗糙颈管的声能耗散密度. 前者的耗能主要发生在内壁附近, 中心的耗能很小. 与之形成鲜明对比的是, 粗糙颈管

的能量耗散与振动速度呈现相同的周期变化趋势. 由于振动速度的周期性集中效应, 较高振动速度集中在粗糙颈部的每个狭窄部分, 导致流体与颈管内表面之间的强烈摩擦, 从而出现了图 3(b) 所示的强烈能量耗散. 因此, 粗糙的颈管表现出优越的耗能性能, 宏观上表现为声阻增大. 由此可见, 表面粗糙度的引入触发了振速的周期性集中效应, 调节了声阻抗, 实现了更优的低频吸声性能.

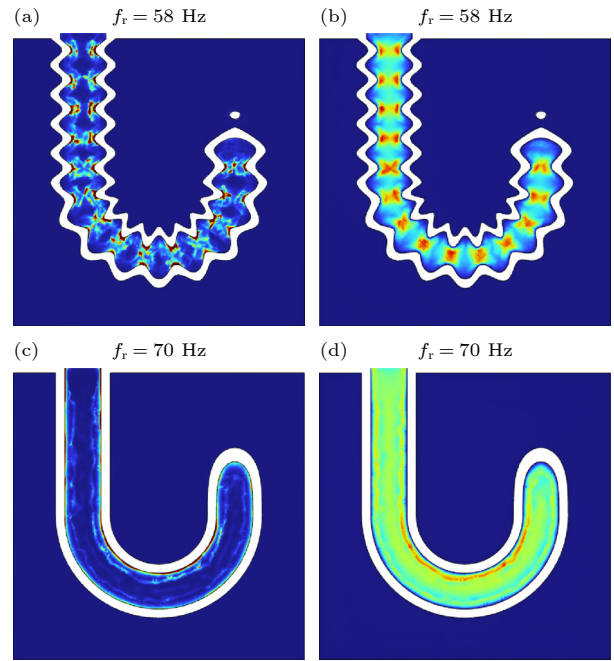


图 3 粗糙颈管亥姆霍兹共振器吸声体吸声机理 (a) 粗糙颈管的声能耗散密度; (b) 粗糙颈管的粒子振动速度分布; (c) 光滑颈管的声能耗散密度; (d) 光滑颈管的粒子振动速度分布

Fig. 3. Sound absorption mechanism of Helmholtz resonator sound-absorber in rough neck tube: (a) Distribution of particle vibration velocity in smooth neck canal; (b) distribution of particle vibration velocity in rough neck canals; (c) acoustic energy dissipation density of smooth neck tubes; (d) acoustic dissipation density of the rough neck tube.

由上述分析可知, 粗糙度的引入对亥姆霍兹共振器的声阻抗有着显著的提升, 接下来探究颈管粗糙度参数变化对吸声性能的影响. 粗糙颈管的内表面可以视为由一条标准的余弦函数旋转  $360^\circ$  后形成的曲面, 轴向粗糙度是余弦函数的周期, 径向粗糙度是余弦函数的幅值. 在此讨论轴向粗糙度  $b$  以及径向粗糙度  $\delta$  对亥姆霍兹共振器吸声体吸声性能的影响.

通过有限元法对粗糙颈管亥姆霍兹共振器吸声体进行模拟仿真, 预设了 4 组不同轴向粗糙度以

及 5 组不同径向粗糙度的结构模拟颈管粗糙度发生变化对吸声性能的影响. 4 组共振器颈管的轴向粗糙度  $b$  分别为 2.5, 5.0, 7.5, 10 mm, 5 组共振器颈管的径向粗糙度分别为 0 (即光滑颈管, 无粗糙度), 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm. 得到了这些亥姆霍兹共振器 10—200 Hz 内的吸声曲线, 并绘制了不同颈管粗糙度下的吸收谱, 如图 4 所示.

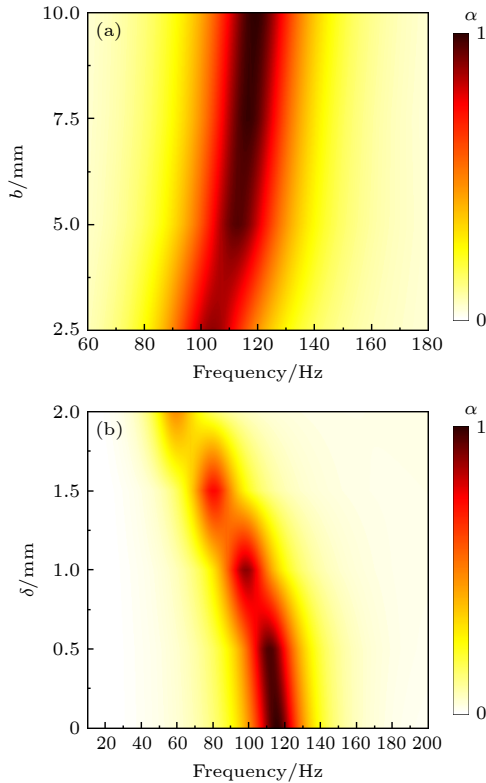


图 4 粗糙度对吸声性能的影响 (a) 不同轴向粗糙度下的吸收谱; (b) 不同径向粗糙度下的吸收谱

Fig. 4. Effect of roughness on sound absorption performance: (a) Absorption spectra at different axial roughness; (b) absorption spectra at different radial roughness.

图 4(a) 绘制了轴向粗糙度对吸声性能的影响, 当颈管轴向粗糙度从 10 mm 降低到 2.5 mm 时, 共振频率从 119 Hz 逐渐降低到 104 Hz, 吸声峰值从 0.94 降低到 0.83. 随着颈管轴向粗糙度逐渐变大, 共振频率与颈管轴向粗糙度成正相关变化, 其斜率逐渐减小, 变化趋势逐渐变缓. 可以预测, 当轴向粗糙度向更大值变化时, 其变化趋势会逐渐向光滑管靠近. 而吸声峰值与颈管轴向粗糙度同样成正相关变化, 整个过程中吸收峰值均大于 0.8. 因此轴向粗糙度对结构的声学性能的影响较小. 图 4(b) 绘制了径向粗糙度对吸声性能的影响, 能够看到当颈管径向粗糙度从 0 mm 增大到 2 mm

时, 共振频率从 116 Hz 逐渐降低到 59 Hz, 但吸声峰值是先增大后减小, 从 0.817 增大到 0.886, 之后再降低到 0.457. 随着颈管径向粗糙度逐渐变大, 共振频率与颈管径向粗糙度成负相关变化, 其斜率逐渐减增大, 变化趋势逐渐陡峭; 而吸声峰值在一定增大后急剧得降低. 可见径向粗糙度对结构的声学性能的影响较大.

### 3 低频通风吸声器结构设计及实验结果分析

为解决在同一结构中平衡吸声及通风性能的问题, 实现满足宽带通风和有效低频吸声要求的结构设计, 设计了一个由多个亥姆霍兹谐振器吸声单元组成的低频通风吸声器 (LBVA), 其单独吸声单元二维原理图如图 5(a) 所示, 后通过实验验证其吸声性能, 其结构如图 6(a) 所示, 其吸声系数在 500—1100 Hz 内达到 0.8 以上. 此外依据前文验证工作设计一种由多个粗糙颈亥姆霍兹谐振器吸声单元组成的低频通风吸声器 (R-LBVA), 其二维原理图如图 5(b) 所示, 以提高宽带通风性能, 其结构如图 6(c) 所示, 所设计的 R-LBVA 在通风条件下, 400—1200 Hz 内的吸声系数高于 0.8. 表 1 列出了各个 R-LBVA 单元的具体几何尺寸.

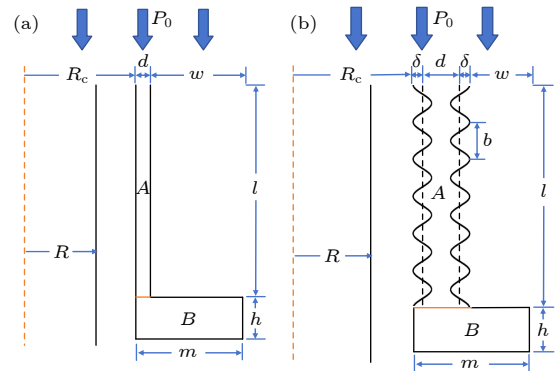


图 5 (a) LBVA 单元的二维示意图; (b) R-LBVA 单元的二维示意图

Fig. 5. (a) 2D schematic diagram of LBVA cell; (b) 2D schematic diagram of R-LBVA cell.

图 6(b) 为通过有限元仿真和阻抗管吸声测试得到的 R-LBVA 吸声曲线图. 图 6(d) 展示了有限元方法及阻抗管实验得到的 LBVA 和 R-LBVA 吸声系数曲线的比较. 与 LBVA 类似, R-LBVA 也有 8 个相对连续的吸收峰连接在一起, 这些峰对应频率分别为 439, 472, 531, 606, 702, 817, 957,



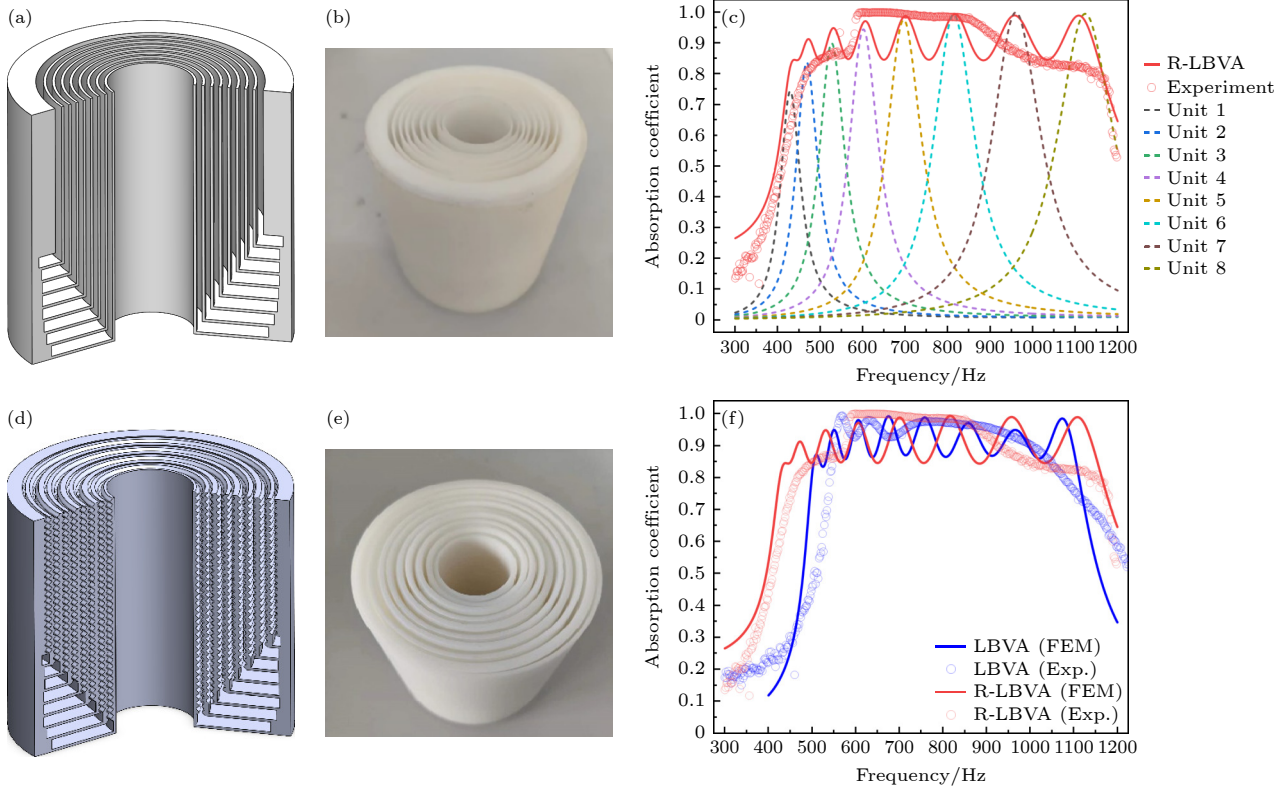


图6 结构及结果 (a) LBVA 三维截面视图; (b) LBVA-3D 打印结构图; (c) 有限元仿真及阻抗管测试所得 R-LBVA 和各个吸声单元的吸声曲线; (d) R-LBVA 三维截面视图; (e) R-LBVA-3D 打印结构图; (f) 有限元仿真及阻抗管测试所得 LBVA 和 R-LBVA 的吸声曲线

Fig. 6. Structure and results: (a) LBVA 3D section view; (b) LBVA-3D printing structure diagram; (c) R-LBVA and absorption curves of each absorption unit obtained by finite element simulation and impedance tube measurement; (d) R-LBVA 3D section view; (e) R-LBVA-3D printing structure diagram; (f) LBVA and R-LBVA obtained by finite element simulation and impedance tube measurement.

1109 Hz, 8 个吸收峰的振幅均在 0.95 以上. 并将它们组合起来, 形成一个吸声系数 0.8 以上带宽为 800 Hz 的宽带吸声效果. 实验与仿真一致性高, 但实验数据中无明显峰值, 形成连续宽带. 这种差异可能是由于样品生产的尺寸误差和粗糙度引起的表面毛刺. 从图 6(d) 不难看出, 在恒定体积条件下, R-LBVA 具有优于 LBVA 的低频和宽带效应的吸声性能.

表 1 LBVA 单元的几何参数 (单位: mm)  
Table 1. Geometric parameters of R-LBVA units (in: mm).

|          | Unit1 | Unit2 | Unit3 | Unit4 | Unit5 | Unit6 | Unit7 | Unit8 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $d$      | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     |
| $R_c$    | 16    | 20.5  | 23.5  | 26.5  | 28    | 31    | 35.5  | 38.5  |
| $h$      | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     |
| $w$      | 26.3  | 24    | 22.2  | 19    | 17.5  | 14.1  | 9.8   | 7.7   |
| $l$      | 90    | 85    | 80    | 75    | 70    | 65    | 60    | 55    |
| $d$      | 5     | 5     | 5     | 5     | 5     | 5     | 5     | 5     |
| $\delta$ | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |

为了探讨引入粗糙颈以提高 R-LBVA 的声学性能和声学阻抗的物理机制, 采用有限元法建立了 R-LBVA 的相对声压分布如图 7(a) 所示. 声压场的分布用相对声压  $|P/P_0|$ ,  $P_0$  为入射压力场. 由此可以看出, 与 LBVA 相似, 每个吸收峰恰好对应于单个吸声单元的共振, 当吸声器处于谐振频率时, 在吸声器单元的后腔端获得结构的最大相对声压, 振幅达到入射声压的 16 倍. 这意味着 R-LBVA 上下端面的声压存在明显差异, 会导致空气粒子快速振动, 同时, 快速流动的空气粒子与颈部狭窄的壁面发生强烈的摩擦, 导致声能耗散. 另外, 以 1109 Hz 处的第 8 个单元为例, 在 R-LBVA 峰值处的粒子振动速度分布和声能耗散密度分布如图 7(b), (c) 所示. 可以看出, 粒子振动速度主要集中在颈部的窄段, 粗糙颈部的粒子振动速度沿颈部的长度周期性变化. 在每个最大振动速度为 0.06 m/s 的狭窄区域上, 颈部的流体流动特性因表面粗糙度而变化, 并观察到流体振动的周期性集中效应 [25].

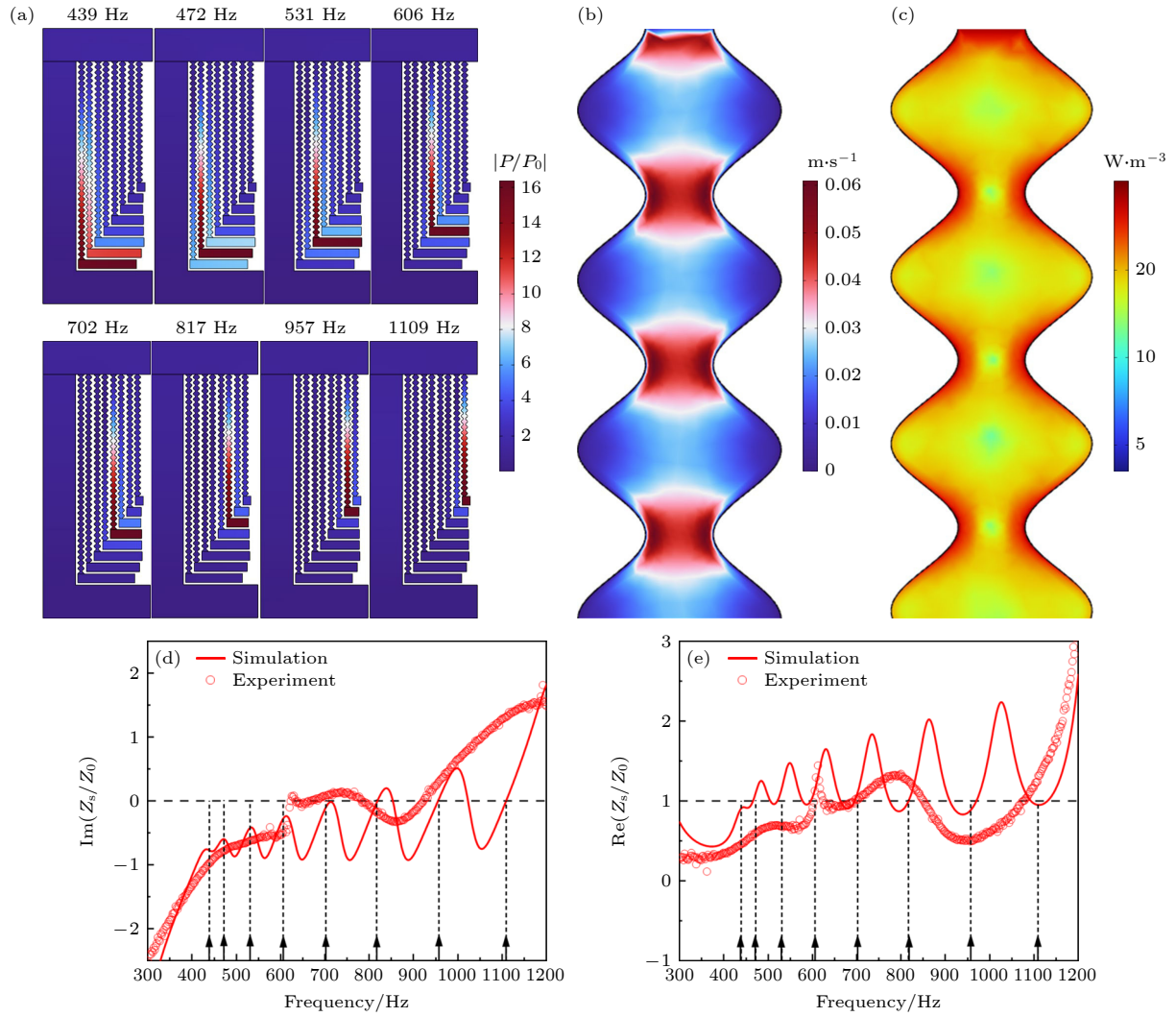


图 7 (a) R-LBVA 各峰值频率下的相对声压分布; (b) 1109 Hz 处 R-LBVA 第 8 个吸声单元颈部的粒子振动速度分布; (c) 1109 Hz 处 R-LBVA 第 8 个吸声单元颈部的声能耗散密度分布; (d) R-LBVA 的相对阻抗虚部; (e) R-LBVA 的相对阻抗实部

Fig. 7. (a) Relative sound pressure distribution at each peak frequency of R-LBVA; (b) particle vibration velocity distribution at the neck of R-LBVA sound absorption unit 8 at 1109 Hz; (c) sound energy dissipation density distribution at the neck of R-LBVA sound absorption unit 8 at 1109 Hz; (d) imaginary part of relative impedance of R-LBVA; (e) real part of relative impedance of R-LBVA.

周期性集中效应阻碍了流体流动, 从而在宏观水平增大了具有粗糙颈的吸声器的声阻抗. 同时, 最大声能耗散密度主要集中在颈部, 粗糙颈部的能量耗散与振动速度沿颈部长度的能量耗散呈相同的周期趋势. 由于振动速度的周期性集中效应, 强振动速度主要发生在粗糙颈的每个窄段, 导致流体与颈内表面产生强烈的摩擦, 以及强烈的能量耗散.

对 R-LBVA 进行阻抗分析, 结果如图 7(d), (e) 所示, 可以看出, 在 600—800 Hz 的频率范围内, 阻抗匹配效果相对理想; 在此范围内, 相对阻抗的虚部  $\text{Im}(Z_s/Z_0)$  非常接近于 0, 而相对阻抗实部  $\text{Re}(Z_s/Z_0)$  的实部接近于 1, 在范围之外, 相对阻

抗逐渐偏离阻抗匹配条件. 实验结果与仿真结果具有较高的一致性, 但实验结果的总体趋势没有与仿真数据同样明显的峰值.

## 4 结 论

本文在亥姆霍兹共振器的基础上, 通过在颈管位置引入表面粗糙度后, 设计了粗糙颈管亥姆霍兹共振器吸声体, 能有效降低共振频率. 利用有限元法对粗糙颈管亥姆霍兹共振器吸声性能进行模拟仿真, 共振频率向低频方向移动, 由 70 Hz 降低为 58 Hz, 降低约 17.1%. 通过探究发现颈管粗糙度的改变会在很大程度上影响其吸声性能, 并且随着颈



管粗糙度的增大, 对吸声峰值的影响愈发明显. 对于粗糙颈管亥姆霍兹共振器而言, 可以使用增大颈管粗糙度的方式来调控共振吸声频率向低频方向移动. 但颈管粗糙度一旦增大, 有可能会造成吸声体声阻抗过大而出现阻抗失配, 导致吸声系数急剧降低, 达不到实际应用中低频有效吸声的目标需求. 因此在优化过程中要合理地更改颈管的粗糙度, 在保证有效降低共振吸声频率的前提下, 尽可能地提高吸声系数. 粗糙颈管亥姆霍兹共振器吸声体表现出的有效降低频率性能展现了一种降低共振吸声频率的调控方法, 为噪声控制提供了可借鉴的手段. 依据以上引入粗糙度及延长颈管长度可以有效降低亥姆霍兹共振器共振吸声频率的结论, 继而本文设计了多个亥姆霍兹谐振器吸声单元紧凑组合的 LBVA 作为一个低频宽带通风吸声装置, 并在此基础上在每个吸声单元颈部表面引入粗糙度来调节表面声阻抗, 从而进一步优化结构得到 R-LBVA, 优化后的结构组合了 439, 472, 531, 606, 702, 817, 957 和 1109 Hz 处的吸收峰, 在 400—1200 Hz 频率内获得了吸声系数 0.8 以上的宽带通风吸声效果.

## 参考文献

- [1] Ma D Y 1993 *Physics* **22** 8 (in Chinese) [马大猷 1993 物理 **22** 8]
- [2] Ma D Y 2002 *Tech. Acoust.* **1** 2 (in Chinese) [马大猷 2002 声学技术 **1** 2]
- [3] Wang Z M, Rao W, Li D Y 2019 *Acta Acust.* **44** 834 (in Chinese) [王正敏, 饶伟, 李德玉 2019 声学学报 **44** 834]
- [4] Liu H T, Zheng S F, Lian X M, Dan J B 2014 *Acta Acust.* **39** 353 (in Chinese) [刘海涛, 郑四发, 连小珉, 但佳璧 2014 声学学报 **39** 353]
- [5] Bai C G, Wu F M, Wang J J, Jiang J X, Yang B 2022 *J. Vib. Control* **29** 2
- [6] Su S L, Zhang M, Cao W W 2014 *Ship Sci. Technol.* **36** 128 (in Chinese) [苏胜利, 张苗, 曹为午 2014 舰船科学技术 **36** 128]
- [7] Romero-García V, Theocharis O, Merkel A, Tournat V, Pagneux V 2016 *Sci. Rep.* **6** 1
- [8] Jiménez N, Huang W, Romero-García V, Pagneux V, Groby J P 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 121902
- [9] Duan M Y, Yu C L, Xu Z M, Xin F X, Lu T J 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 151904
- [10] Nguyen H, Wu Q, Xu X, Chen H, Tracy Sharon, Huang G L 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 134103
- [11] Mao Q B, Li S Q, Liu W W 2018 *Appl. Acoust.* **141** 348
- [12] Duan H Q, Shen X M, Wang Y S, Yang F, Zhang X N, Yin Q 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 241904
- [13] Zhang L, Xin F X 2022 *J. Acoust. Soc. Am.* **151** 1191
- [14] Liu G S, Peng Y Y, Liu M H, Zou X Y, Cheng J C 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 153503
- [15] Duan M Y, Yu C L, Xin F X, Lu T J 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 071904
- [16] Chang H T, Liu L, Zhang C, Xu X H 2018 *AIP Adv.* **8** 045115
- [17] Yang D, Wang X L, Zhu M 2014 *J. Sound Vib.* **333** 6843
- [18] Huang S B, Fang X S, Wang X S, Assouar Badreddine, Cheng Q, Li Y 2019 *J. Acoust. Soc. Am.* **145** 254
- [19] Guo J W, Zhang X, Fang Y, Jiang Z Y 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 221902
- [20] Duan M Y, Yu C L, Xin F X, Lu T J 2021 *J. Appl. Phys.* **130** 135102
- [21] Song S Y, Yang X H, Xin F X, Lu T J 2018 *Phys. Fluids* **30** 023604
- [22] Xu Z M, Peng X J, Liu X W, Xin F X, Lu T J 2019 *EPL* **125** 34004
- [23] Pride S R, Morgan F D, Gangi A F 1993 *Phys. Rev. B* **47** 4964
- [24] Long H, Cheng Y, Liu X 2018 *Sci. Rep.* **8** 15678
- [25] Hong Z H, Wu F M, Bai C G, An K X, Wang J J, Yang B 2022 *Appl. Acoust.* **192** 108730

# A low-frequency wideband ventilation muffler based on an embedded rough-necked Helmholtz resonator\*

Li Ting<sup>1)</sup> Wu Feng-Min<sup>1)†</sup> Zhang Tong-Tao<sup>1)</sup> Wang Jun-Jun<sup>1)</sup>  
Yang Bin<sup>2)</sup> Zhang Dong<sup>1)3)‡</sup>

<sup>1)</sup> (School of Science, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

<sup>2)</sup> (School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

<sup>3)</sup> (School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

( Received 27 June 2023; revised manuscript received 8 October 2023 )

## Abstract

Aiming at the unsatisfactory low-frequency sound absorption effect of Helmholtz resonator, a novel broadband low-frequency ventilation absorber with rough neck is proposed. The roughness is introduced into the neck of Helmholtz resonator to change the shape of the neck and achieve the structure of rough neck Helmholtz resonator. The proposed absorber can effectively provide the acoustic impedance required for low-frequency sound absorption without changing the overall size, thereby reducing the resonant frequency. The finite element method is used to simulate the structure, and the impedance tube sound absorption test is carried out to verify it. The experimental and simulation results show high consistency with each other. The results also indicate that the rough neck Helmholtz resonator absorber with roughness introduced in the neck achieves an absorption peak at 58 Hz, with an absorption coefficient of about 0.63. Comparing with the absorber without roughness introduced, the resonant peak frequency becomes low, from 70 Hz to 58 Hz, reducing 17.1%. Therefore, adjusting the neck roughness can serve as a method of tuning the acoustic performance, and the absorption peak frequency can be adjusted by appropriately increasing the neck roughness so as to move it in the low frequency direction. Based on the verification that the roughness of the neck can effectively reduce the absorption peak frequency of Helmholtz resonator, a broadband low-frequency ventilation absorber with a rough neck, which is composed of eight absorption units, is designed. Through simulation calculation and experimental exploration, the absorption coefficient can achieve more than 0.8 in a target working frequency band of 500–1100 Hz. On this basis, the acoustic impedance of the structure can be adjusted by introducing roughness into the neck of Helmholtz resonator, so as to obtain the optimized broadband low-frequency ventilation absorber with a rough neck, which achieves a broadband sound absorption coefficient higher than 0.8 in a frequency range of 400–1200 Hz. The optimized structure also has 8 consecutive absorption peaks with amplitudes above 0.95. The proposed low-frequency broadband ventilation absorber provides a reference for designing and optimizing efficient low-frequency subwavelength acoustic absorbers. It has a wide range of applications in pipeline noise control.

**Keywords:** Helmholtz resonator, rough neck, low frequency sound absorption, acoustic impedance

**PACS:** 43.40.+s, 43.50.+y

**DOI:** 10.7498/aps.72.20231047

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11934009).

† Corresponding author. E-mail: [fmwu@hrbust.edu.cn](mailto:fmwu@hrbust.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [dzhang@nju.edu.cn](mailto:dzhang@nju.edu.cn)

## 基于嵌入式粗糙颈亥姆霍兹共振器的低频宽带通风消声器

李婷 吴丰民 张同涛 王军军 杨彬 章东

## A low-frequency wideband ventilation muffler based on an embedded rough-necked Helmholtz resonator

Li Ting Wu Feng-Min Zhang Tong-Tao Wang Jun-Jun Yang Bin Zhang Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 224301 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20231047

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231047>

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

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 窗口声阻抗对锆相变动力学的影响

Phase transformation kinetics of zirconium under ramp wave loading with different windows

物理学报. 2018, 67(7): 070204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172198>

#### 基于二阶共鸣器单元的宽频消声器研究与设计

Research and design of broadband muffler based on second-order Helmholtz resonators

物理学报. 2022, 71(23): 234301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221377>

#### 基于微孔板与折曲通道的亚波长宽带吸声结构设计

Design of subwavelength broadband hybrid sound absorption structure based on micro-perforated plate and coiled channels

物理学报. 2020, 69(13): 134303 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200368>

#### 薄膜与Helmholtz腔耦合结构低频带隙

Low frequency band gaps of Helmholtz resonator coupled with membrane

物理学报. 2019, 68(21): 214208 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190673>

#### 基于声学超材料的低频可调吸声器

A kind of tunable acoustic metamaterial for low frequency absorption

物理学报. 2019, 68(3): 034301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181908>

#### 新型Helmholtz型声子晶体的低频带隙及隔声特性

Low-frequency bandgaps and sound isolation characteristics of a novel Helmholtz-type phononic crystal

物理学报. 2022, 71(11): 114301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211932>