

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.01.002

多孔橡胶材料声传递损失性能分析:数值结果

应申舜, 卢免采, 姜 伟

(特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学), 浙江 杭州 310014)

摘 要:研究带有无孔薄覆盖层的多孔橡胶板构件的声传递损失特性,给出了 63 Hz ~ 8 kHz 频率范围内,不同材料特性如弹性模量、橡胶密度,不同结构参数如开孔率、黏性特征长度、热特征长度对多孔橡胶板声传递损失的影响。数值分析结果表明:如其它参数保持为常数,在 2 ~ 8 kHz 频率范围内增加开孔率、在 350 Hz ~ 2 kHz 频率范围内增加材料密度、在 63 ~ 160 Hz 频率范围内调整材料弹性模量,都可显著改善多孔橡胶板的隔声性能。

关 键 词:多孔橡胶板;声传递损失;有限元与统计能量混合方法;有限元法;统计能量分析法

中图分类号:TB535.1

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)01-0004-04

Sound Transmission Loss Analysis of a Porous Rubber Plate: Numerical Results

YING Shenshun, LU Huancai, JIANG Wei

(Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Sound transmission loss characters of a porous rubber square plate with thin solid rubber coating is studied. The impacts of various material properties such as modulus of elasticity and rubber density, as well as structural dimensions such as porosity, viscous characteristic length and thermal characteristic length to TL within 63 Hz ~ 8 kHz frequency range is presented in detail. The numerical results show that either increasing the porosity in 2 kHz ~ 8 kHz, or increasing the density in 350 Hz ~ 2 kHz, or increasing the Young's modulus in 63 Hz ~ 160 Hz while all other parameters hold constant, can remarkably improve the performance of sound transmission loss of porous rubber plate.

Key words: porous rubber square plate; sound transmission loss; Hybrid FE-SEA method; Finite Element Analysis (FE); Statistical Energy Analysis (SEA)

橡胶是一种具有黏弹性的、传统的结构振动阻尼材料,而无孔薄层橡胶覆盖的多孔橡胶材料构件,除了具有抑制振动的阻尼性能外,还具有隔声、吸声、耐热、耐寒、阻燃等优良性能,因而非常适合作大型装备的减振降噪执行或控制构件。国内外科学家早在上世纪 30 年代末,就开始了多孔橡胶材料的声学性能的研究^[1-2]。然而,之前的研究工作,主要集中在多孔橡胶材料的吸声性能方面^[3]。关于其声传递损失(Transmission Loss, 简称 TL)的研究,公开发表的文献不多。由于多孔橡胶材料的 TL 性能,是直接表达材料对声的阻隔作用性能的重要参数之一,因而研究其对于噪声控制中,多孔橡胶构件的材料构成和结构设

计,具有重要科学和实际意义。

文章选择以 FE-SEA 混合方法为核心的计算平台 VAONE,对多孔橡胶材料构件 TL 性能,进行了系统研究。文章第 2 部分在第 1 部分仿真模型的基础上^[4],对一正方形的带有无孔薄覆盖层的多孔橡胶板构件,在 63 Hz ~ 8 kHz 的频率范围,进行 TL 性能数值分析研究。首先给出多孔橡胶板结构参数、边界条件和分析频率范围内倍频程中心频率处的振型,然后给出开孔率、孔径宏观参数、弹性模量以及材料密度对 TL 性能影响的分析结果;最后,对研究的结果进行了总结和讨论,根据已有的分析结果,对多孔橡胶材料在噪声控制中,其材料及结构的优化设计提出建议。

收稿日期:2013-05-06;修回日期:2013-07-10

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(Y1110953);浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室开放基金(2011EM008)。

作者简介:应申舜(1978),男,浙江缙云人,博士,主要研究方向为声学振动、机器人。E-mail:yss@zjut.edu.cn

1 声传递损失简介

TL 是度量隔声材料阻隔声功率传播的重要指标,定义如下

$$TL = 10 \lg(1/\tau)$$

其中, τ 是声功率系数,它是穿过隔声材料的声功率与入射声功率的比值。根据质量定律,由隔声构件引起的 TL,取决于许多物理参数,如隔声材料的质量、刚度和阻尼等,还与波入射角度和传播频率有关^[5]。

2 结构参数与边界条件

多孔橡胶板结构参数和边界条件如下:设橡胶材

料各向同性;尺寸为 500 mm × 500 mm × 30 mm,其中薄覆盖层厚 10 mm,多孔层厚 20 mm,假设基准开孔率取 0.35,需要指出的是,开孔率为多孔层的开孔率;SIF 距 FE 模型 500 mm,DAF 取值为 1 Pa。按照空气中声压级定义,参考声压取 2×10^{-5} Pa(声压级为 94.0 dB)。置于空气中的多孔橡胶板的基本参数见表 1。在 63 Hz ~ 8 kHz 频率范围内分析仿真计算多孔橡胶板的振动与声学特性。图 1 为在 63 Hz ~ 8 kHz 分析频率范围内 1/3 倍频程中心频率所对应的多孔橡胶板无孔薄层的结构振型。

表 1 多孔橡胶板多孔层的基本参数

Table 1 Basic parameters of descriptive model of porous rubber

空气密度 $\rho_0/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	声音在空气中传播 速度 $c_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	运动黏度 $\nu_0/$ ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	绝热指数 γ	普朗特数 B^2	空气在橡胶孔中 流阻 $\sigma/(\text{Ns} \cdot \text{m}^{-4})$	开孔率 $\Phi/\%$
1.210	343	15	1.400	0.710	11 500	0.350
弯曲度 α_∞	黏性特征长度 Λ/mm	热特征长 Λ'/mm	橡胶密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	橡胶弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	损耗系数 η
1.900	0.065	0.390	1 100	2.300	0.490	0.100

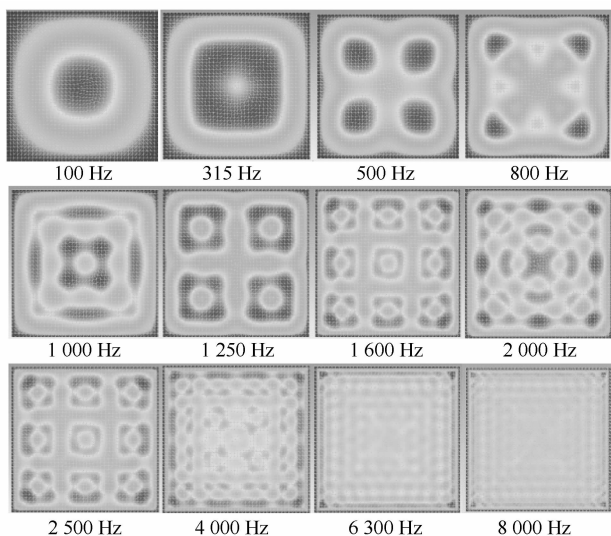


图 1 多孔橡胶板无孔薄层的结构振型
(对应 63 Hz ~ 8 kHz 范围内 1/3 倍频程中心频率)

Figure 1 Mode shape of porous rubber plate
without porous sound absorption layer

3 孔径和开孔率对传递损失的影响

3.1 开孔率对传递损失的影响

按照 Biot 在泡沫材料中的传播理论^[6-7],开孔率和孔径宏观参数直接影响开孔橡胶的隔声性能。在前述仿真模型和 VA ONE 软件平台上,进行仿真实验以考察该参数对多孔橡胶板 TL 的影响。在以下各项仿真计算中,只有 1 个被考察的参数在变化,其它参数都

保持表 1 的数值,为常数不变。

在设定了 5 种不同开孔率 Φ (分别取 0.01, 0.05, 0.1, 0.35, 0.5) 的条件下,多孔橡胶板的 TL 变化曲线,结果如图 2 所示。其中多孔橡胶构件的其它参数如表 1 所示,保持为常数。由图可见在 63 Hz ~ 2 kHz 频段中,5 种开孔率对应的 TL 取值和变化趋势比较接近,其中在 63 ~ 170 Hz 频段,随着频率增加,TL 在下降。开孔率较小(如 $\Phi = 0.05$)时,TL 变化趋势有所震荡。在 2 ~ 8 kHz 频段,5 种开孔率对应的 TL 值之差逐渐增加,如在 2 kHz 处,开孔率 Φ 分别取 0.01 和 0.5 时,对应的 TL 值之差并不大于 4.5 dB,而在 8 kHz 处,两者 TL 值之差已达到 12.8 dB;开孔率越大,TL 越大,如在 8 kHz 时,开孔率分别取 0.01 和 0.5 时,对应的 TL 值分别是 56.6 dB 和 69.4 dB。可见,增加开孔率,在 63 Hz ~ 2 kHz 频段对提高多孔橡胶板隔声性能帮助不大,而在 2 ~ 8 kHz 频段,增加多孔率可显著提高开孔橡胶板的隔声性能。

3.2 孔径对传递损失的影响

图 3 表示 5 种不同孔径条件下,多孔橡胶板的 TL 变化曲线。其中黏性特征长度 Λ 和热特性长度 Λ' 分别对应最小平均孔径和最大平均孔径。多孔橡胶板的其它参数如表 1 所示,保持为常数。由图可见在 63 Hz ~ 2 kHz 频段,5 条曲线基本重合;在 2 ~ 8 kHz 频段,5 条曲线的走势开始有所不同。这说明孔径变化对 TL 值的影响,在高频段比低频段更明显。随着 Λ 和 Λ' 取

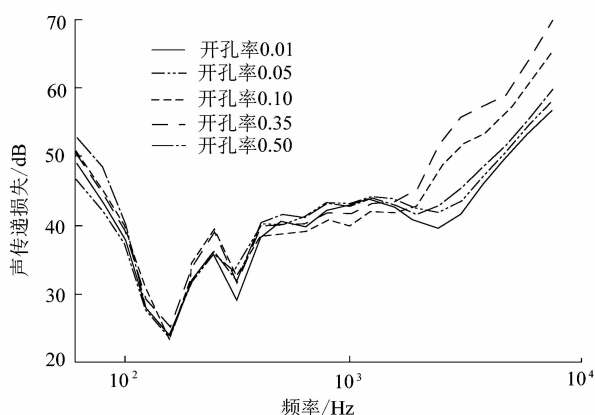
图2 开孔率 Φ 变化对橡胶板 TL 的影响

Figure 2 Transmission loss vs. porosity

值增加,在 2~8 kHz 频段,TL 震荡变化愈加强烈。图 3 中,有两组曲线对应着较小的平均孔径, Λ 和 Λ' 分别是:0.20 mm 和 0.38 mm,以及 0.065 mm 和 0.390 mm,此时孔径取值非常接近马大猷的微孔板吸声结构(将普通穿孔板孔径减小到丝米级(1.0×10^{-4} m)^[8-9]),对应的 TL 值较其它几组较大孔径条件下的 TL 值变化趋势更加平缓;而当平均孔径大于这个数量级时,孔径变化对 TL 值的影响很有限。

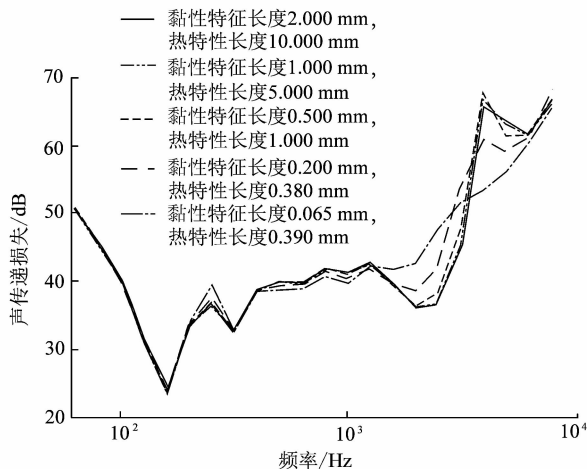


图3 孔径对橡胶板 TL 的影响

Figure 3 Transmission loss vs. Λ and Λ'

Λ 和 Λ' 分别取 0.20 mm 和 0.38 mm 时,在 2~5 kHz 频段,对应 TL 值大于较大孔径条件下的 TL 值,在 5~6.5 kHz 频段,对应 TL 值低于较大孔径条件下的 TL 值,在 6.5~8 kHz 其 TL 值又大于较大孔径条件下的 TL 值。 Λ 和 Λ' 分别取 0.065 mm 和 0.390 mm 时,在 1~4 kHz 频段,其 TL 值大于较大孔径条件下的 TL 值,在 4~8 kHz 频段,其 TL 值小于较大孔径条件下的 TL 值,在 2.5 Hz 时,TL 值之差可达 11 dB。可见,在

微孔条件下(丝米级 0.10 mm),孔径的变化对开孔板隔声性能产生较大影响,但是变化关系较复杂。随着孔径减小,对应的 TL 曲线呈现出更好的线性和稳定性。

4 弹性模量和橡胶密度对声传递损失的影响

开孔率和孔径对应于多孔橡胶板的结构尺寸,弹性模量和密度代表了多孔橡胶的材料属性,在低频段,材料隔声性能主要处于弹性区控制(反比于密度),随着密度的增加隔声量减少;在高频段,隔声量处于质量控制区(正比于密度),随着密度的增加隔声量增加^[10]。

4.1 密度对声传递损失的影响

图 4 是 5 种不同密度条件下多孔橡胶板的 TL 变化曲线,密度 ρ 依次取 500 kg/m³, 800 kg/m³, 900 kg/m³, 1 000 kg/m³ 和 1 100 kg/m³。多孔橡胶构件的其它参数如表 1 所示,保持为常数。在 63~100 Hz 频段,随着密度增加,对应的 TL 值减小;在 100~400 Hz 频段,TL 曲线震荡变化较强烈,TL 值增减趋势较复杂;在 400 Hz~8 kHz 频段,TL 值随着密度增加而增大,其中 2~8 kHz 频段,随着密度增加,对应的 TL 值增幅减小。可见,在 350 Hz~2 kHz 频段,增加密度对于提高隔声性能有较大帮助;在 2~8 kHz 频段,增加密度可提高多孔橡胶板 TL 值,在 63~100 Hz,减小密度可提高开孔橡胶板 TL 值,但两者的效果均不如在 350 Hz~2 kHz 频段增加密度那么明显。

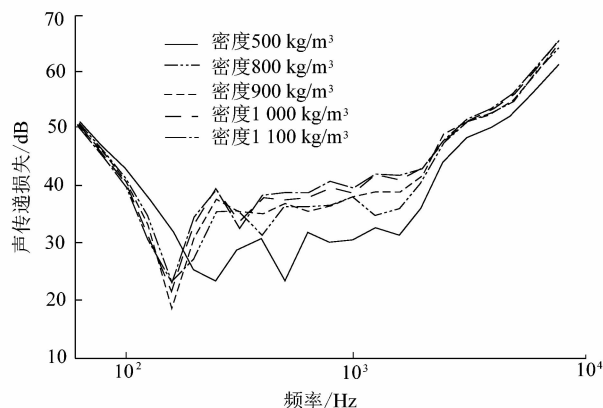
图4 密度 ρ 对橡胶板 TL 的影响

Figure 4 Transmission loss vs. density

4.2 弹性模量对声传递损失的影响

弹性模量对 TL 影响机制复杂,目前还未有成熟的研究成果报导^[11-12]。如图 5 所示,文中计算了 5 种不同弹性模量条件下开孔橡胶板的 TL 变化曲线,弹性模量 E 依次取 10 GPa, 8.0 GPa, 6.0 GPa, 4.0 GPa

和 2.3 GPa。多孔橡胶构件的其它参数如表 1 所示,保持为常数。由图可见,在 63 ~ 160 Hz 频段,TL 值随着弹性模量的增加而增加;在 160 Hz ~ 1.5 kHz,曲线震荡变化较强烈,TL 值增减趋势较复杂;在 1.5 ~ 8 kHz,5 条曲线逐渐趋于重合。可见,在 63 ~ 160 Hz 频段,通过调整弹性模量对于提高开孔橡胶隔声性能有较大帮助,在 160 Hz ~ 1.5 kHz 频段由于弹性模量对应的 TL 值变化复杂,通过调整其弹性模量改善开孔橡胶板的隔声性能难度较大;在 1.5 ~ 8 kHz 频段,弹性模量对 TL 影响较小,通过调整弹性模量改善此频段开孔橡胶板的隔声性能作用有限。

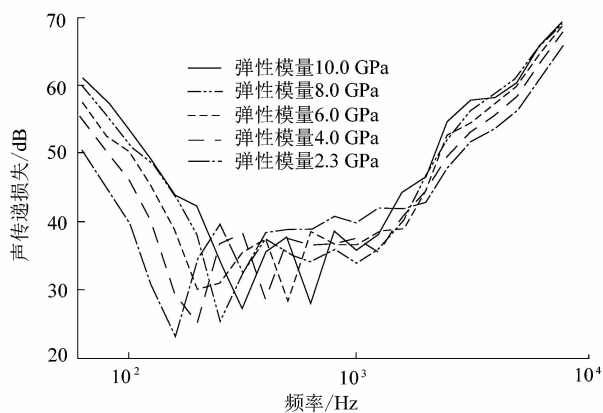


图 5 弹性模量 E 对橡胶板 TL 的影响

Figure 5 Transmission loss vs. modulus of elasticity

5 结语

在文章的第 1 部分,建立了多孔橡胶板构件的 FE-SEA 混合分析模型;而在第 2 部分,则研究了在 63 Hz ~ 8 kHz 的频率范围内,开孔率、孔径宏观参数、弹性模量以及材料密度的变化对开孔橡胶板 TL 性能的影响。根据数值仿真分析的结果,得出以下结论:

1) 开孔率与密度、弹性模量和损耗因子等参数共同影响 TL 性能。文中计算结果表明,在其它参数为常数时,增加开孔率对提高开孔橡胶板在 100 Hz ~ 2 kHz 频段的隔声性能帮助不大,而在 2 ~ 8 kHz 频段,增加开孔率可显著提高开孔橡胶板 TL 值。

2) 在微孔条件下(丝米级(1.0×10^{-4} m)),调整孔径对开孔板在 2 ~ 8 kHz 频段的隔声性能产生影响较大,但是变化关系较复杂,其它频段调整孔径作用微小;大于微孔条件下,调整孔径对开孔板隔声性能帮助不大。

3) 在高频段,增加橡胶密度可提高材料与空气的

阻抗失配程度,通过文中计算结果表明,增加密度对于提高开孔橡胶 350 Hz ~ 2 kHz 频段的隔声性能有较大帮助。

4) 文中计算结果表明,调整弹性模量对于提高开孔橡胶板在 63 ~ 160 Hz 频段的隔声性能有较大帮助,对改善 1.5 ~ 8 kHz 频段的隔声性能则作用有限。

多孔橡胶材料构件的 TL 性能,除了受开孔率、孔径宏观参数、弹性模量以及材料密度等参数变化的影响,也会受到周围流体特性的影响。文中所给出的结果,是多孔橡胶材料构件在空气介质中 TL 的性能。当周围流体为水,如海水时,TL 性能会大为不同,特别是当多孔橡胶隔声材料在深水工作时,橡胶的形变恢复会受到水压的制约,孔中空气的振动减弱,TL 性能会发生明显的变化。此方面的研究结果将在后续文章中发表。

参考文献:

- [1] KOSTEN C W, ZWIKKER C. Theory of the absorption of sound by compressible walls with a non-porous surface-layer [J]. Physica, 1941, 8(2): 251 - 272.
- [2] KOSTEN C W. Absorption of sound by coated porous rubber wallcovering layers [J]. The Journal of Acoustical Society of America, 1946, 18(2): 457 - 471.
- [3] 丁航. 水下吸声橡胶的性能研究 [J]. 特种橡胶制品, 2004, 25(6): 21 - 23.
- [4] 应申舜, 卢奕采, 姜伟. 多孔橡胶材料声传递损失性能分析: 模型描述 [J]. 轻工机械, 2013, 31(6): 1 - 4.
- [5] WANG T. Predictions of the sound transmission of composite sandwich panels [D]. Los Angeles: University of southern california, 2006.
- [6] BIOT M A. Bending settlement of a slab resting on a consolidating foundation [J]. Journal of Applied Physics, 1942(13): 35 - 40.
- [7] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid: I low-frequency rang [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 168 - 178.
- [8] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid: II higher frequency rang [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 179 - 191.
- [9] MA Dayou. Wide-band sound absorber based on microperforated panels [J]. Chinese Journal of Acoustics, 1985, 4(3): 197 - 208.
- [10] MA Dayou. Design of microperforated panel constructions [J]. Chinese Journal of Acoustics, 1988, 7(3): 193 - 200.
- [11] 史晓峰, 陶建成, 邱小军. 点声源入射下无限大平板的隔声 [J]. 声学学报: 中文版, 2008, 33(3): 268 - 274.
- [12] 姚磊, 刘宏伟, 赵洪, 等. 一种测量高分子材料低频声学性能的混合方法 [J]. 中国科学: G 辑物理学力学天文学, 2008, 38(5): 546 - 554.