



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

——· 中文核心期刊 中国科技核心期刊

一种轻质管束穿孔板吸声结构声学特性试验研究

王明杰 梅中建 潘忠文 吕亚东 姜人伟

Experimental study on acoustic characteristics of a lightweight tube bundle perforated panel sound absorption structure

WANG Mingjie, MEI Zhongjian, PAN Zhongwen, LÜ Yadong, JIANG Renwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2022074>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于p-u探头测试法的双层微穿孔吸声体吸声性能试验研究

Experimental study of sound absorption performance of double layer micro-perforated sound absorber by using p-u sound intensity probe

航天器环境工程. 2021, 38(6): 677–681 <https://doi.org/10.12126/see.2021.06.010>

透明微穿孔吸声板设计与性能实测验证

Structure, material, and process design of transparent micro-perforated sound absorbing panel with validation

航天器环境工程. 2020, 37(1): 42–46 <https://doi.org/10.12126/see.2020.01.007>

热噪声试验中平板温度边界层对近壁面声压分布影响数值分析

Numerical simulation of temperature boundary layer of a flat panel on the near-wall sound pressure distributions in thermal-acoustic test

航天器环境工程. 2020, 37(2): 120–124 <https://doi.org/10.12126/see.2020.02.003>

基于最小二乘均衡反馈法的舱室声场复现

Sound field reproduction system for cabin mock-up by multichannel least square equalization method with feedback control

航天器环境工程. 2021, 38(2): 160–165 <https://doi.org/10.12126/see.2021.02.007>

空间站舱内噪声仿真、验证与声源布局优化

Simulation and validation of interior noise and optimization of sound source layout for space station module

航天器环境工程. 2017, 34(5): 471–477 <https://doi.org/10.12126/see.2017.05.003>

空间站吸声降噪设计的仿真评估与验证

Simulations for evaluation and verification of acoustic design of space station module

航天器环境工程. 2018, 35(4): 330–335 <https://doi.org/10.12126/see.2018.04.004>

一种轻质管束穿孔板吸声结构声学特性 试验研究

王明杰¹, 梅中建², 潘忠文¹, 吕亚东², 姜人伟¹

(1. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 2. 中国科学院声学研究所, 北京 100190)

摘要: 管束穿孔板吸声结构具有低频调谐吸声能力, 但现有管束穿孔板吸声结构质量较大, 限制了其在对运载效率有极高要求的火箭上应用。为此, 在常规管束穿孔板吸声结构的基础上, 提出一种轻质管束穿孔板吸声结构构型, 设计了2种吸声频段互补的结构单元, 并对其开展吸声及隔声测试。测试结果表明, 轻质管束穿孔板吸声结构在100~500 Hz频段内吸声系数基本上都在0.5以上, 隔声量提升达5.1 dB; 此外, 轻质管束穿孔板吸声结构的密度仅为 18 kg/m^3 , 相对于传统管束穿孔板吸声结构减重达80%。

关键词: 管束穿孔板吸声结构; 亥姆霍兹共鸣器; 吸声测试; 隔声测试; 吸声系数; 隔声量

中图分类号: O422.4; TB535

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2022)06-0608-06

DOI: [10.12126/see.2022074](https://doi.org/10.12126/see.2022074)

Experimental study on acoustic characteristics of a lightweight tube bundle perforated panel sound absorption structure

WANG Mingjie¹, MEI Zhongjian², PAN Zhongwen¹, LÜ Yadong², JIANG Renwei¹

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;

2. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The sound absorption structure of tube bundle perforated panel has the ability of low-frequency tuning. However, its large mass limits its application in rockets that has an extremely high requirement for launch efficiency. Therefore, a lightweight sound absorption structure of tube bundle perforated panel was proposed based on its conventional structure. Two structural units with complementary sound absorption frequency bands were designed. The sound absorption and the sound insulation tests were carried out. The results show that the sound absorption coefficient of the lightweight sound absorption structure of tube bundle perforated panel is above 0.5 in the frequency band of 100-500 Hz, and the sound insulation increase 5.1 dB. In addition, the density of lightweight sound absorption structure of tube bundle perforated panel is only 18 kg/m^3 , which is 80% less than the conventional ones.

Keywords: sound absorption structure of tube bundle perforated panel; Helmholtz resonator; sound absorption test; sound insulation test; sound absorption coefficient; sound insulation

收稿日期: 2022-07-22; 修回日期: 2022-11-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“空气和水介质中低频管腔耦合共振吸声机理新概念研究”(编号: 10574139)

引用格式: 王明杰, 梅中建, 潘忠文, 等. 一种轻质管束穿孔板吸声结构声学特性试验研究[J]. 航天器环境工程, 2022, 39(6): 608-613

WANG M J, MEI Z J, PAN Z W, et al. Experimental study on acoustic characteristics of a lightweight tube bundle perforated panel sound absorption structure[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2022, 39(6): 608-613

0 引言

运载火箭飞行过程中承受着高量级宽频噪声、振动环境,可能引发舱段内重要仪器设备的故障或失效,严重时甚至导致飞行任务失败。因此,研究如何降低舱段内噪声环境具有十分重要的意义。

国内外研究表明,在舱段内壁敷设吸声结构是一种有效的降噪手段,所用吸声结构有玻璃纤维^[1-2]、多孔泡沫^[3-4]及声学覆盖层^[5-6]等。以上吸声结构主要依靠空气的黏滞效应或空气与孔壁的摩擦、热传导作用将声波能量转换为热量,从而达到降噪的效果。这类吸声结构对于 500 Hz 以上中高频噪声的降低效果明显,但低频降噪效果有限。常见的低频吸声结构有亥姆霍兹共鸣器^[7]、穿孔板吸声结构^[8-10]、微穿孔板吸声结构^[10]、声学超材料结构^[11-12]及管束穿孔板吸声结构^[13-19]等。亥姆霍兹共鸣器^[7]的吸声机理为共振吸声,当入射声波频率与共鸣器共振频率一致时降噪效果最佳,但吸声频带较窄。穿孔板吸声结构^[8]利用声波与板后空腔的共振吸声,其吸声频率与穿孔板穿孔率、空腔深度有关,可在穿孔板吸声结构内填充多孔材料来提高结构的吸声性能与带宽^[9]。微穿孔板吸声结构^[10]的吸声原理与穿孔板吸声结构一致,由于其微孔孔径较小,需要考虑声波的黏滞效应。声学超材料为人工设计制造的吸声结构,具有负等效质量密度^[11]、负等效体积模量^[12]等特殊性质,可以在亚波长尺寸下实现低频吸声、隔声,但由于其结构形式复杂,加工工艺上尚无法实现工程应用。吕亚东等^[13]提出在穿孔处向声腔内延伸一定长度的管束以形成管束穿孔板吸声结构,可以将第 1 个共振吸声频率向低频移动,实现了有限腔深下低频吸声能力的增强。张倩^[14]通过声类比法获取了管束穿孔板吸声结构的等效电路模型,准确预测了其低频第 1 个吸声峰的吸声系数。Simon^[15]采用传递矩阵法对管束穿孔板吸声结构的吸声特性进行理论研究,同时利用气动声学试验台对管束穿孔板吸声结构试件开展试验研究,理论与试验结果表明,延伸管可将吸声频率向低频移动,吸声结构厚度仅为吸声频率对应波长的 1/30。Huang 等^[16]提出在亥姆霍兹共鸣器内部设置延伸管,并通过理论分析与试验测试证明该结构具有吸声频率可调控、吸声效率高等优点。Guo 等^[17]设计了一种由 16 个带有不同延伸管

的亥姆霍兹共鸣器组成的声衬,试验结果表明该结构能够实现 700~1000 Hz 频带内有效吸声,且各频点的传递损失水平相当。苏玉等^[18]建立了考虑热黏性效应的管束穿孔板有限元仿真模型,并对管束穿孔板内部声场分布特征及吸声特性进行计算,经与试验结果对比发现,管束穿孔板的低频吸声主要为腔体共振吸声,部分发生在管中;高频主吸声峰主要为管共振吸声,次吸声峰为管腔耦合共振吸声;该研究揭示了管束穿孔板吸声结构的吸声机理,为管束穿孔板吸声结构的结构吸声调谐设计提供了依据。

为保证结构具有足够的强度和刚度,工程上应用的管束穿孔板吸声结构主体结构多以钢、铝等材质为主,且结构厚度、质量均较大,无法满足火箭对降噪产品尺寸及重量方面的约束^[19-20]。为此,本文提出了一种轻质管束穿孔板吸声结构构型,设计了 2 种吸声频段互补的中低频结构单元,并开展阻抗管吸声系数测试与隔声测试,对轻质管束穿孔板吸声结构的吸声、隔声性能进行评估。

1 管束穿孔板吸声结构设计介绍

1.1 吸声原理

管束穿孔板吸声结构可以看作亥姆霍兹共鸣器的颈部向腔内延长而形成的吸声结构,根据亥姆霍兹共鸣器共振频率的理论模型,可以近似得到管束穿孔板吸声结构的低频共振吸声频率为

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{lV}}, \quad (1)$$

式中: c 为声波在空气中的传播速度; S 为管束穿孔板腔体的横截面积; l 为管长; V 为腔体体积。从式(1)可以看出,在相同外廓尺寸下,管束穿孔板吸声结构可通过增加管长 l 使其低频共振吸声频率相对于亥姆霍兹共鸣器的更低,并可通过调整管长来实现共振频率调谐设计。

管束穿孔板吸声结构的声阻抗 Z 由管束部分的声阻抗 Z_n 与下腔体的声阻抗 Z_c 组成,即

$$Z = Z_n + Z_c. \quad (2)$$

基于 Crandall 吸声理论并考虑管束内的热黏性效应,延长管的声阻抗为^[16]

$$Z_n = p^{-1} \left(\frac{-2j\rho_0 c \sin(k_n l_i / 2)}{\sqrt{[\gamma - (\gamma - 1)\psi_n] \psi_v}} + \sqrt{2\omega\rho_0 \eta} + j\omega\rho_0 \delta_i \right), \quad (3)$$

式中: $p = (m\pi d_1^2)/4A$, 为多个延长管在穿孔板面板上的总穿孔率, 其中, m 为延长管的个数, d_1 为延长管内径, A 为穿孔面板的表面积; ρ_0 为空气密度; k_n 为孔中的复波数; l_i 为延长管长度; ω 为角频率; γ 为空气的比热比; ψ_v 和 ψ_h 分别表示管中黏滞场和热场; η 为空气的运动黏滞系数; $\delta_i = [1 + (1 - 2.5d_i/b)] \times (4/3\pi)d_i$, 为与孔末端辐射带来的声质量相关的修正系数, 其中 b 为穿孔的间距。

对于一个高度为 h 、横截面积为 S_c 的矩形空腔, 其声阻抗为

$$Z_c = -j \frac{A\rho_c c_c \tau}{S_c} \cot(k_c h), \quad (4)$$

式中: ρ_c 、 c_c 和 k_c 分别表示矩形腔中的复空气密度、复声速和复波数; $\tau = S_c h / (S_c h - m\pi d_1^2 l_i)$, 为修正系数^[10]。

管束穿孔板可以看作 $N(N = 2, 3, \dots)$ 个等宽吸声单体的并联结构, 则由阻抗并联公式可得管束穿孔板总声阻抗为

$$Z_{\text{all}} = N / (Z_1^{-1} + Z_2^{-1} + \dots + Z_N^{-1}), \quad (5)$$

并联吸声结构的吸声系数为

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_{\text{all}}/Z_0 - 1}{Z_{\text{all}}/Z_0 + 1} \right|^2, \quad (6)$$

其中 $Z_0 = \rho_0 c$, 为空气声阻抗。

1.2 吸声结构组成

本文针对运载火箭对降噪产品轻质化的需求, 并考虑降噪产品材料的阻燃性、洁净度等, 提出一种轻质管束穿孔板吸声结构构型。该结构为长方体(如图1所示), 面板、背板、管束材质均为聚酰亚胺, 外侧板采用轻质碳纤维板, 面板下方空腔内部填充多孔泡沫材料。下面的章节将对轻质管束穿孔板吸声结构进行具体结构参数设计, 并制作测试件进行吸声和隔声测试。

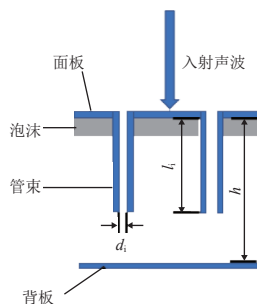


图1 轻质管束穿孔板吸声结构构型示意

Fig. 1 Schematic diagram of a lightweight sound absorption structure of tube bundle perforated panel

2 轻质管束穿孔板吸声结构吸声测试

2.1 测试件

为实现 100~500 Hz 宽频带吸声降噪, 同时考虑到结构腔深不大于 100 mm, 以及结构的加工工艺复杂度、加工成本等约束, 单一结构管束穿孔板吸声结构很难满足要求, 故本文提出吸声频率互补的设计思路, 设计制造了 2 种吸声测试件。

吸声测试件 1 的实物如图 2 所示, 直径、厚度均为 100 mm, 外侧板为碳纤维板, 将穿孔的聚酰亚胺薄膜平均划分为大小相等的 9 个单元, 各个单元间也用聚酰亚胺薄膜隔开, 各单元下铺设一层不同厚度的多孔泡沫, 并将不同内径和长度的聚酰亚胺管插入各个单元中, 具体结构参数见表 1。

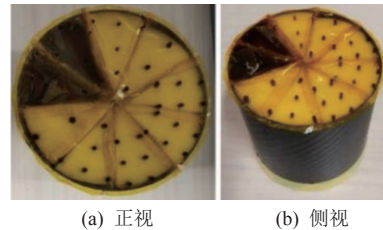


图2 吸声测试件 1

Fig. 2 Sound absorption test sample 1

表 1 吸声测试件 1 结构参数

Table 1 Structural parameters of sound absorption test sample 1

单元序号	管长/mm	管内径/mm	穿孔率/%	泡沫厚/mm
1	6	1.5	1.01	0
2	6	1.5	0.81	0
3	10	1.5	1.01	8
4	22	2.0	1.08	15
5	24	2.0	2.16	15
6	34	2.0	2.16	15
7	32	2.0	2.16	15
8	45	2.0	1.80	15
9	45	3.0	1.62	15

吸声测试件 2 的实物如图 3 所示, 图中实物不含碳纤维外侧板, 在吸声测试过程中将阻抗管的内壁作为其壁板与背板。吸声测试件 2 仅有 1 种单元结构, 具体结构参数为管长 80 mm、管内径 4 mm、穿孔率 0.77%、泡沫厚 30 mm。

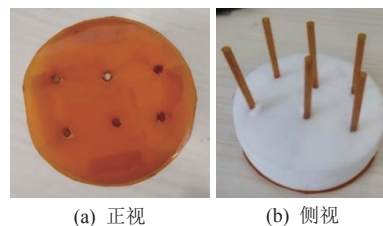


图3 吸声测试件 2

Fig. 3 Sound absorption test sample 2

2.2 测量方法

吸声系数测试按照 GB/T 18696.2—2002《声学阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第2部分: 传递函数法》开展, 将轻质管束穿孔板吸声结构放置在阻抗管的测试腔中, 管中平面波由声源产生, 用2个传声器对测试样件前的声压进行测量, 并对2个传声器信号的声传递函数进行计算, 求解出轻质管束穿孔板吸声结构的法向入射吸声系数。吸声测试系统如图4所示, 测试所用仪器均为丹麦 B&K 公司产品, 包括 4206T 型声阻抗测试仪、4187-A-021 型传声器、3560C 型数据采集及信号发生器、2716C 型功率放大器。

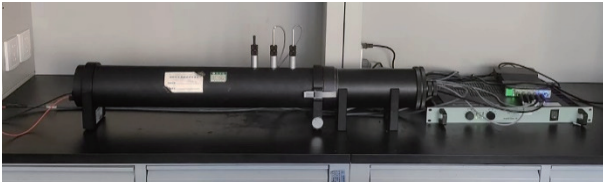


图4 吸声测试系统

Fig. 4 Sound absorption test system

2.3 测试结果及分析

针对2种吸声测试件开展了50~1600 Hz 频段内的吸声系数测试, 结果见图5。从图中可以看出: 吸声测试件1在100~200 Hz 频段的吸声系数在0.5之上, 低频吸声效果较好; 但在200~300 Hz 频段出现1个吸声谷。吸声测试件2在100~200 Hz 频段的吸声系数在0.1之下, 低频吸声效果较差; 但在200~250 Hz 频段吸声系数随频率增加上升很快, 在250~500 Hz 频段吸声系数可达到0.8之上, 中频吸声效果较好。图5中的虚线为吸声系数0.5的水平线, 可以看出, 2种结构搭配组合后在100~500 Hz 频带内的吸声系数基本上都在0.5以上。

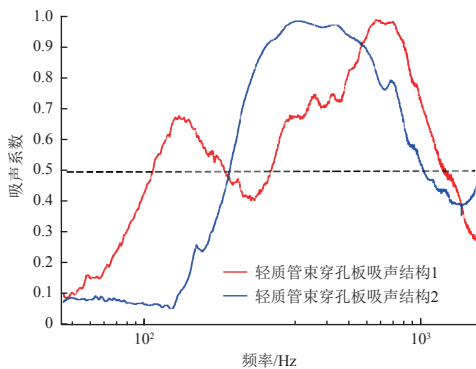


图5 吸声测试件的吸声系数曲线

Fig. 5 Sound absorption coefficient curves of the sound absorption test samples

为进一步证实本文所提出的轻质管束穿孔板吸声结构宽带吸声的有效性, 用3D打印技术加工制作了与吸声测试件1结构参数相同的传统管束穿孔板吸声样件; 不同的是, 该样件的制作材料为光敏树脂, 穿孔面板厚度为1.5 mm, 底板和中间隔板的厚度均为1.0 mm。因为面板和隔板的特性声阻抗远大于空气的特性声阻抗且厚度较大, 所以可以将其视作声学硬边界。此时, 可用1.1节中的理论公式预测该样件的吸声系数, 理论预测结果与实验测试结果对比如图6所示, 二者能够较好地吻合; 但是, 吸声样件只在100~200 Hz 频段有较好的吸声性能, 在200 Hz 之后吸声系数逐渐降低。这是因为传统管束穿孔板是一种共振吸声结构, 只在共振频率附近具有吸声效果, 远离共振频率时吸声效果变差甚至不吸声。而本文设计的轻质管束穿孔板吸声结构1不仅具有共振吸声特性, 还具有声与结构相互耦合的特点, 因此除了共振吸声频带外, 还在250~1000 Hz 频段具有连续的吸声带宽(如图6红色曲线所示)。可见, 与传统管束穿孔板相比, 轻质管束穿孔板不仅极大减轻了结构重量, 而且具有更宽的吸声频带。

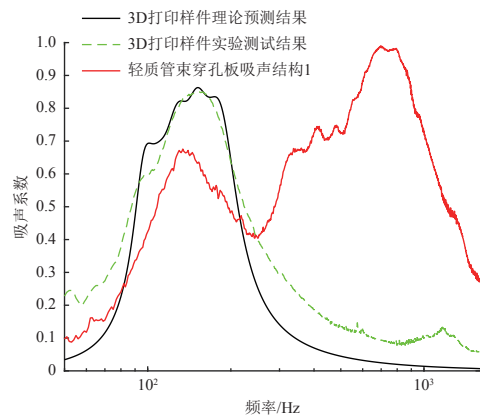


图6 吸声样件吸声系数的理论预测与实验测试结果对比
Fig. 6 Comparison between theoretical prediction and experimental result of sound absorption coefficients of sound absorption test samples

3 轻质管束穿孔板吸声结构隔声测试

3.1 测试件

考虑到轻质管束穿孔板吸声结构敷设于火箭整流罩或仪器舱等舱段内壁, 为验证其对隔声量的提升, 开展隔声测试。将上述2种轻质管束穿孔板吸声结构组合成如图7(a)所示的吸声结构, 作为隔

声测试件, 结构尺寸为 $1.11\text{ m} \times 1.25\text{ m} \times 0.1\text{ m}$, 密度为 18 kg/m^3 , 总重约 2.5 kg , 相对于传统管束穿孔板吸声结构(如图7(b)所示)减重达80%。



(a) 轻质管束穿孔板 (b) 传统管束穿孔板

图7 隔声测试件

Fig. 7 Sound insulation test samples

3.2 测试方法与结果分析

隔声测试按照 GB/T 19889.3—2005《声学建筑和建筑构件隔声量测量 第3部分: 建筑构件空气声隔声的实验室测量》开展, 测试工况包括: 工况 A——仅蜂窝板结构(模拟某整流罩壁板); 工况 B——蜂窝板结构一面粘贴轻质管束穿孔板吸声结构。图8为工况 B 的隔声测试现场, 可以看到蜂窝板敷设轻质管束穿孔板吸声结构的一面朝向接收室, 以模拟火箭噪声从壁面传至舱段内的传播途径。



(a) 声源室 (b) 接收室

图8 工况 B 的隔声测试现场

Fig. 8 Sound insulation test site for condition B

隔声测试时, 在声源室和接收室各布置5个随机测点, 所有测点与墙面距离均不小于 1 m , 在每个测点测试 10 s 的连续等效声压级; 测试混响时间时, 在接收室随机布置5个测点, 每个测点测试混响时间3次, 将15组混响时间测试结果的平均值作为接收室混响时间测试结果; 隔声量测试的有效频段为 $100\sim 4000\text{ Hz}$ 。测试所用仪器均为丹麦 B&K 公司产品, 包括 3160-A-042 型多通道分析仪、4189-A-021 型传声器及 4321 型声级校准器。

工况 A、B 隔声量测试结果, 以及工况 B 相对工况 A 的隔声量提升情况见表2所示。分析表中数据发现, 敷设轻质管束穿孔板吸声结构后, 除 125 Hz 外, $100\sim 200\text{ Hz}$ 频段的隔声量提升均在 2.9 dB 以上, $250\sim 500\text{ Hz}$ 频段的隔声量提升均在

6.8 dB 之上, 其中 400 Hz 的隔声量提升值最大, 为 8.9 dB 。在 $100\sim 500\text{ Hz}$ 频段, 工况 B 的平均隔声量(21.8 dB)的比工况 A 的平均隔声量(16.7 dB)提升 5.1 dB ; 同时发现, 在 $630\sim 1250\text{ Hz}$ 频段也有不错的隔声效果, 但 1500 Hz 以上频段的隔声量提升值较小, 几乎可以忽略。

表2 隔声量测试结果 ($100\sim 4000\text{ Hz}$)

Table 2 Test results of sound insulation ($100\sim 4000\text{ Hz}$)

频率/Hz	隔声量/dB		隔声量提升值/dB (工况B-工况A)
	工况A	工况B	
100	10.0	12.9	2.9
125	15.6	15.8	0.2
160	14.0	17.5	3.5
200	14.2	18.4	4.2
250	16.5	23.8	7.3
315	18.9	25.7	6.8
400	20.8	29.7	8.9
500	23.5	30.7	7.2
630	24.1	31.8	7.7
800	24.6	33.7	9.1
1000	25.9	34.2	8.3
1250	28.2	34.9	6.7
1600	30.7	33.6	2.9
2000	34.2	35.2	1.0
2500	37.4	39.2	1.8
3150	39.5	41.4	1.9
4000	42.1	46.2	4.1

4 结论

针对运载火箭发射舱段对中低频降噪的迫切需求, 综合考虑降噪产品密度、产品厚度、加工工艺及洁净度等各方面约束条件, 本文提出2种吸声频率互补的轻质管束穿孔板吸声结构, 并分别制作了吸声及隔声测试件, 依次开展了吸声及隔声测试, 得到如下结论:

1) 从吸声测试结果可以发现, 2种吸声测试件在吸声频段上可实现互补, 工程上可通过分频段吸声设计实现有效降噪;

2) 结合吸声与隔声测试结果可以发现, 除 $100\sim 500\text{ Hz}$ 频段外, 轻质管束穿孔板吸声结构在 $630\sim 1250\text{ Hz}$ 也具有较好的吸声降噪性能, 产品覆盖频带比预期更宽;

3) 本文提出的轻质管束穿孔板吸声结构相对而言密度小、体积小、中低频降噪性能好, 具有广阔的应用前景。

后续会结合整流罩或仪器舱等舱段开展大型

地面噪声试验,进一步验证轻质管束穿孔板吸声结构的降噪性能及产品的环境适应性等。

参考文献 (References)

- [1] HUGHES W O, MCNELIS A M. Acoustic testing of the Cassini spacecraft and Titan IV payload fairing: Part 1- Introduction and test configuration: NASA-TM-107474[R], 1997
- [2] HUGHES W O, MCNELIS A M. Acoustic testing of the Cassini spacecraft and Titan IV payload fairing: Part 2- Results: NASA-TM-107475[R], 1997
- [3] 任方,张正平,李海波,等.基于吸声材料的火箭整流罩噪声环境控制[J].固体火箭技术,2016,39(6):851-856
REN F, ZHANG Z P, LI H B, et al. Noise control technology of launch vehicle fairing using sound-absorbing material[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2016, 39(6): 851-856
- [4] 杨树涛,祁峰,姜人伟,等.运载火箭整流罩降噪试验技术研究[J].强度与环境,2020,47(6):61-64
YANG S T, QI F, JIANG R W, et al. Experimental research on noise reduction of launch vehicle fairing[J]. Structure & Environment Engineering, 2020, 47(6): 61-64
- [5] HUGHES W O, MCNELIS A M. Acoustic test characterization of melamine foam for usage in NASA's payload fairing acoustic attenuation systems: NASA/TM-2014-218127[R], 2014
- [6] HUGHES W O, MCNELIS A M. Acoustic test results of melamine foam with application to payload fairing acoustic attenuation systems: NASA/TM-2014-218350[R], 2014
- [7] 马大猷.亥姆霍兹共鸣器的发展[J].物理,1993,22(8):452-456
- [8] 左言言,周晋花,刘海波,等.穿孔板吸声结构的吸声性能及其应用[J].中国机械工程,2007,18(7):778-780
ZUO Y Y, ZHOU J H, LIU H B, et al. Sound absorptivity and application of perforated panel structure[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(7): 778-780
- [9] 刘付华.空腔内加吸声材料的穿孔板共振吸声结构吸声性能研究[D].大连:大连交通大学,2007:52-61
- [10] 马大猷.微穿孔板吸声体的准确理论和设计[J].声学学报,1997,22(5):385-393
MAA D Y. General theory and design of microperforated-panel absorbers[J]. Acta Acustica, 1997, 22(5): 385-393
- [11] YANG Z, MEI J, YANG M, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass[J]. Physical Review Letters, 2008, 101: 204301
- [12] HAO L M, DING C L, ZHAO X P. Design of a passive controllable negative modulus metamaterial with a split hollow sphere of multiple holes[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2013, 135(4): 595-606
- [13] 吕亚东,魏文,朱永波,等.管束式穿孔板共振吸声装置:CN 1307329A[P].2001-08-08
- [14] 张倩.管束穿孔板和内置共振腔吸声结构的吸声机理研究[D].北京:中国科学院研究生院,2011:19-45
- [15] SIMON F. Long elastic open neck acoustic resonator for low frequency absorption[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 421: 1-16
- [16] HUANG S, FANG X, WANG X, et al. Acoustic perfect absorbers via Helmholtz resonators with embedded apertures[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 145(1): 254-262
- [17] GUO J, FANG Y, JIANG Z, et al. An investigation on noise attenuation by acoustic liner constructed by Helmholtz resonators with extended necks[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2021, 149(1): 70-81
- [18] 苏玉,梅中建,吕亚东,等.管束穿孔板的管腔耦合共振吸声[J].声学学报,2021,46(6):1202-1211
SU Y, MEI Z J, LÜ Y D, et al. The tube-cavity coupling resonance sound absorption mechanism of the perforated panel resonator with tube bundles[J]. Acta Acustica, 2021, 46(6): 1202-1211
- [19] 龙乐豪,李平岐,秦旭东,等.我国航天运输系统60年发展回顾[J].宇航总体技术,2018,2(2):1-6
LONG L H, LI P Q, QIN X D, et al. The review on China space transportation system of past 60 years[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2(2): 1-6
- [20] 王国辉,曾杜娟,刘观日,等.中国下一代运载火箭结构技术发展方向与关键技术分析[J].宇航总体技术,2021,5(5):1-11
WANG G H, ZENG D J, LIU G R, et al. Development direction and key technology analysis for China's next generation launch vehicles structure[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(5): 1-11

(编辑:张艳艳)

一作简介:王明杰(1989—),男,博士学位,主要研究方向为载荷与力学环境。E-mail: fnmjwang12@126.com。