

整流罩用降噪材料与结构及声场分析方法

王博尧 高 坤 张兆恒 邢亚娟 王保林

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

文 摘 为了有效改善整流罩内声振环境,最常见并且高效的方法是通过在整流罩的壁面铺覆降噪材料来降低噪声的声压级。本文总结了国内外整流罩降噪材料的工程应用及研究进展,详细介绍了几种主要降噪材料的基本性能和降噪原理,对不同频段下适用的声场分析方法及过程作了阐述,并提出了对我国在降噪材料领域研究发展的建议。

关键词 整流罩,降噪材料,声振环境,降噪原理,仿真分析

中图分类号:V45

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2023.06.002

Sound Field Analysis Method for Noise Reduction in Fairing Materials and Structures

WANG Boyao GAO Kun ZHANG Zhaoheng XING Yajuan WANG Baolin

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract In order to improve the acoustic-vibration environment inside the fairing, the most common and efficient method is laying noise reduction materials on the inner wall of fairing to reduce the sound pressure level of noise. In this paper, the engineering application and research progress of fairing noise reduction materials and applicable frequency bands at home and abroad were summarized. Baseline properties and noise reduction principles of several main noise reduction materials were introduced in detail. On top of all, suggestions for the research and development of noise reduction materials in China were put forward.

Key words Fairing, Noise reduction material, Acoustic-vibration environment, Noise reduction principle, Simulation analysis

0 引言

整流罩是运载火箭的重要组成部分,其结构主要包括端头、前锥、柱段、倒锥。火箭在发射过程中,整流罩能够防止内部的航天器与外界直接接触,避免其承受摩擦力和暴露在低温、灰尘、噪声等严峻的环境中。其中噪声环境对火箭的影响尤为关键,噪声的产生源于两方面:一是发射升空时,大功率发动机喷出的强烈气流直接作用或通过发射板间接反射至整流罩外表面;二是主动飞行时,附近的气动载荷环境会产生强烈的噪声,并以宽频、随机的形式作用在结构上,再以结构共振或透射等方式延伸到整流罩内部^[1]。

近年来,随着发展重型火箭的需求日趋迫切,整流罩外部噪声的声压级也面临着逐渐升高的趋势;与此同时整流罩将采用轻质、高强的结构复合材料,其隔声效果会有降低,这些因素使整流罩内噪声的

声压级大幅上升^[2]。发射阶段的近场声压级可达170 dB以上^[3],尽管整流罩有着一定的隔声作用,但是整流罩内部噪声的声压级仍可达到120~140 dB。噪声的声压级过高有可能会造成有效载荷和整体结构的损坏,尤其是会导致关键部件的疲劳破坏,使总体的可靠性出现极大风险,严重时直接造成此次飞行任务的失败。据美国国家航空航天局数据统计^[4],在火箭发射的短时间内,卫星失效的主要原因是噪声危害。由此看来,开展整流罩内降噪技术研究,降低内声压级尤为重要。

整流罩的降噪技术可分为主动控制、被动控制和反应控制技术。主动控制的原理是利用相反声波的相消性干涉来降低噪声,在低频领域具有较明显的降噪效果,但因设计过于复杂使其在实际工程应用中受限。被动噪声控制通常采用吸声、隔声、减缓振动等手段,此类降噪方法的机理是利用声学材料

收稿日期:2022-05-13

第一作者简介:王博尧,1995年出生,工程师,主要从事夹层结构复合材料成型技术方面的研究。E-mail: wangboyaowby@163.com

抵消声波,适合于降低中高频噪声,在低频的降噪效果一般。反应控制,即通过结构或声场的谐振对整流罩内声场进行控制。调整谐振频率可以在较窄的频域范围内产生很高的阻抗,通过声学共振达到显著的降噪效果,常被用于降低低频噪声。

本文主要针对被动控制降噪和反应控制降噪技术所使用的降噪材料展开研究,介绍了不同降噪材料各自的性能及降噪机理,并对全频段降噪技术的主要研究方法进行了阐述,提出了优化整流罩降噪材料技术的未来发展方向。

1 降噪材料及结构

在整流罩内,被动控制降噪技术主要通过吸收内声场能量和减缓壁面振动两种方式进行,与此对应的降噪材料可分为吸声材料和阻尼材料;反应控制降噪技术主要通过特殊吸声结构来开展,最常用的是亥姆霍兹共鸣器。

1.1 吸声材料及结构

当声波入射到吸声材料表面上时,会有一部分声波进入材料内部结构向前传播,在孔洞中引起空

气振动,与孔壁间反复摩擦,通过黏滞性和热传导作用,将声能转化为热能,从而吸声降噪。按照吸声机理不同,将吸声材料区分为多孔吸声和共振吸声材料^[6]。

多孔吸声材料的结构孔隙率高,内部具有大量贯通的微孔或间隙,声波传播过程中增加了与孔壁的摩擦,提高了声能损耗。多孔吸声材料为泡沫或纤维类结构,主要包括玻璃棉、岩棉、矿棉、纤维毡、聚氨酯泡沫塑料、吸声泡沫玻璃和泡沫金属等^[7]。

共振吸声材料的吸声机理是使空气与声波共同振动,当声波的频率接近系统的固有频率时,振幅急剧增大,此时吸声作用最为明显。共振吸声结构包含了:单个共振器、穿孔板共振吸声结构、狭缝共振吸声结构、微穿孔板共振吸声结构、薄板共振吸声结构和膜状材料等^[8],最典型的共振吸声结构为亥姆霍兹(Helmholtz)吸声共振器。

目前,在整流罩应用方面主要研究的吸声材料及结构有吸声毡、玻璃棉、三聚氰胺泡沫、Helmholtz共鸣器等(表1)。

表1 国外整流罩先进降噪材料及结构^[9]

Tab. 1 Advanced noise reduction fairing materials and structures abroad^[9]

型号	国家	整流罩材质	降噪材料
德尔塔-4型	美国	复合材料	
		金属	硅粘合热处理玻璃纤维声毡
		复合材料	
阿特拉斯-5型	美国	金属	泡沫板
		复合材料	Helmholtz 共鸣器+聚酰胺泡沫
阿丽亚娜-5型	欧洲	碳蜂窝/铝面板夹层	三聚氰胺泡沫板
H-2A	日本	金属	玻璃纤维声毡

1.1.1 吸声毡

吸声毡是整流罩内部最初使用的降噪材料,主要成分包括棉絮、玻璃纤维等,可有效降低400 Hz频段以上噪声。W. O. HUGHES等^[10]采用棉絮、玻璃纤维等进行新型吸声毡的开发研究,设计了一个携带有效载荷的仿真全尺寸整流罩,通过混响室试验证实了吸声毡能够有效改善整流罩内部的声振环境,降低有效载荷的振动响应,节省了昂贵的电源改造支出,顺利完成了Cassini土星探测器的飞行任务,随后吸声毡陆续应用于Titan IV的后续任务中。波音公司通过热处理玻璃纤维的工艺手段制备吸声毡,并安装在德尔塔IV型的整流罩上^[11]。宋海洋采用铺满内壁的方式对比研究了5种纤维材料的降噪效果,总体降噪效果最好的是纤维毡,声腔总声压级可降低3.5 dB,高频段的声压级可降低4.3 dB以上^[12]。图1为整流罩内新型声毡实物图^[13]。

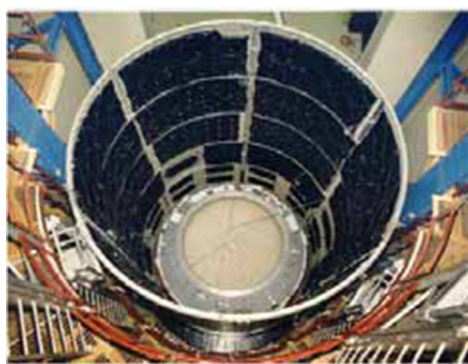


图1 整流罩内新型声毡^[13]

Fig. 1 Novel acoustic blanket in fairing^[13]

1.1.2 玻璃棉

玻璃棉属于玻璃纤维的一种,是将玻璃熔融后借助外力吹制式甩成的絮状细纤维材料^[14]。纤维内部纵横交错,存在大量微小的孔隙^[15](图2),因此具有良好的吸声和绝热性能。玻璃棉具有质轻、热导率低、耐腐蚀和吸声系数高等优点,作为吸声材料在

工程上得到广泛应用。作为多孔吸声材料,玻璃棉的吸声特性是建立在匀质材料基础上,并由结构参数决定的,因此需保持材料的整体均匀性。在低频范围内,玻璃棉的吸声系数随厚度增加而增加,但在整流罩实际应用中对其厚度有一定限制,因此玻璃棉多用于高频范围的降噪。

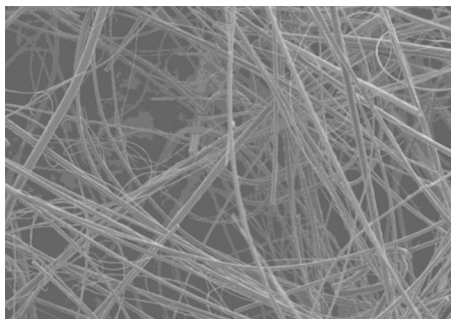


图2 玻璃棉内部微观形貌^[15]

Fig. 2 Micro-morphology of glass wool^[15]

蒋峻楠对比了玻璃棉、矿棉、毛毡的降噪效果,玻璃棉的密度仅有其他两种的三分之一,但降噪量却提高了1.5 dB,展现出良好的降噪效果^[16]。宋海洋通过VA one仿真分析了玻璃棉铺覆在整流罩内部的高频降噪效果,在2~4 kHz下声压级的降低量达13.7 dB^[5],在高频段内展现出不俗的降噪效果。

1.1.3 三聚氰胺泡沫

三聚氰胺泡沫是高性能有机泡沫材料,以微波发泡工艺制备,内部呈三维网络结构,如图3所示,开孔率高达99%^[17]。Mahnke于1985年首次提出可实际应用的三聚氰胺泡沫生产工艺^[18],后经国内外专家学者改良完善,日渐成熟。三聚氰胺泡沫材料具有轻质、柔韧性强等优点,且在高频范围内较其他多孔材料具有更为优良的吸声性能^[19],是整流罩内理想的高频降噪材料。

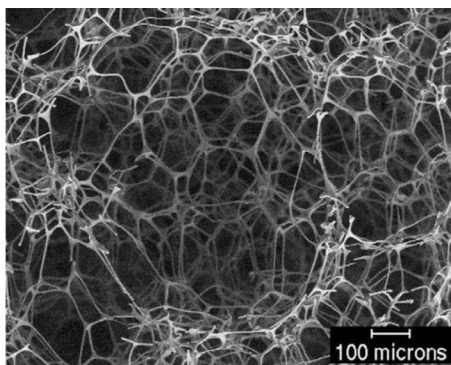


图3 三聚氰胺泡沫内部微观形貌^[17]

Fig. 3 Micro-morphology of melamine foam^[17]

欧空局将德国巴斯夫(BASF)生产的Basotect TG三聚氰胺泡沫作为降噪材料铺覆在Ariane5火箭整流罩的内壁上^[20],瑞士Contraves Space公司将其应

用在有效载荷整流罩的头部,均取得良好的降噪效果,NASA也将其列入可供未来大型运载火箭选择的降噪材料清单中^[21]。我国的“绿寰宇”系列三聚氰胺泡沫也已经投入大量资金进行产品生产和降噪方面的研究。程修妍^[22]通过流阻测试、孔隙率测试及阻抗管试验,获得了三聚氰胺泡沫的声学参数,通过统计能量分析模型发现了50 mm厚的三聚氰胺泡沫在1~2 kHz内降低声压级可达15 dB,在中高频段表现出优异的降噪性能。荣吉利等^[23]依据内衬理论,通过仿真和声学测试讨论了在圆柱声腔内衬三聚氰胺泡沫的降噪效果,结果表明三聚氰胺泡沫仍具有一定的低频降噪能力,降噪量在4~8 dB之间,但低频降噪效果次于中高频。

1.1.4 亥姆霍兹共鸣器

亥姆霍兹共鸣器为单孔共振吸声结构,密闭的空腔通过狭长的颈部与外部相通,由于其独特的声学结构,在航天领域的低频降噪中取得了良好的效果。如图4所示,亥姆霍兹共鸣器大多为铝合金制成,整体结构为杯状底部和号筒状顶部,之间经卷边连接。号筒的喉部和内腔连接,号筒的开口与外界相通,喉部与开口相连为圆滑的曲面。其可在低频段的特定频率降噪,如共振频率和整流罩内声波频率相匹配时,较多声波可进入共鸣器通过声辐射将声能传递到声腔,此期间声能在亥姆霍兹共鸣器中消耗,达到低频降噪的效果^[24]。以便尽可能降低质量,亥姆霍兹共鸣器普遍采用大面积的薄壁结构,共振频率变化受其颈长和壁厚参数的共同作用。亥姆霍兹共鸣器的数量、频率和安装位置也会影响其降噪性能^[25]。



图4 亥姆霍兹共鸣器

Fig. 4 Helmholtz resonator

美国洛克希德马丁公司研制的宇宙神V运载火箭整流罩通过铺设亥姆霍兹共鸣器达到了降噪的目的,我国研制的亥姆霍兹共鸣器已达到单频降噪5.5 dB的效果,为新一代运载火箭整流罩低频降噪提供了解决方案。谌相宇通过有限元仿真分析了安装位置和共振频率对亥姆霍兹共鸣器降噪性能的影响,

结果表明,其最优安装位置为声腔声压响应的峰值位置,若将其安装于谷值位置则基本无降噪效果^[9]。多个亥姆霍兹共鸣器共同使用时,共振频率不同时的降噪性能要优于共振频率相同时。

1.2 阻尼材料

阻尼材料是发挥其大阻尼系数的特点,利用减缓结构的振动进行降噪。阻尼材料大体上可分为自由阻尼和约束阻尼,如图5所示^[26]。自由阻尼结构由外侧的阻尼层和内侧的基层组成,阻尼层为黏弹性阻尼材料,与基层之间不存在任何约束力作用。自由阻尼结构在受外力时,阻尼层通过拉伸变形抵御外力作用。这种阻尼结构的制造工艺过程简单,而且成本低廉,是目前我国在工业噪声振动控制领域中普遍采用的阻尼降噪技术。约束阻尼结构是在自由阻尼的最外层增加高刚度的约束层材料。在受外力时,约束阻尼同时承受剪应力和应变,由于约束层材料的强度大,可通过其剪切形变来消耗能量,减振降噪效果优于自由阻尼。

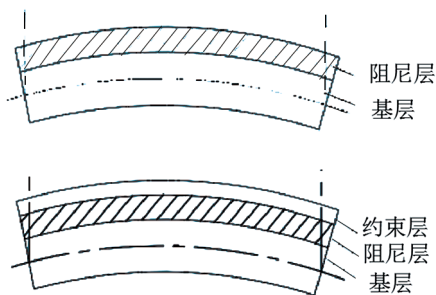


图5 阻尼结构^[26]

Fig. 5 Damping structure^[26]

目前降噪效果良好的约束阻尼层为丁基橡胶阻尼板,丁基橡胶的分子链结构中具有较多的侧甲基,在受到外力时,分子链间摩擦生热较多,其因子损耗模量更大,在阻尼材料中具有较为优异的降噪性能。由2 mm丁基橡胶阻尼层和0.08 mm铝箔组成的约束层,在整流罩圆柱段铺覆完全后300 Hz以上频段的降噪量为5 dB左右^[27]。陈钊用T54阻尼涂料作为阻尼层,AL6061铝合金作为约束层,组成了约束阻尼结构,仿真分析可得在20~500 Hz的低频段内总声压级可降低2 dB^[26],具有一定的低频降噪效果。

由于阻尼材料的密度远大于吸声材料,大幅使用会增加整流罩的结构质量,从而降低了有效载荷比,且其在全频域的降噪效果较吸声材料差,因此在整流罩降噪材料领域的单独使用受到一定限制,但有望利用其结构减震的特性与其他降噪材料组合使用。

2 声场分析方法

验证吸声材料对整流罩降噪性能的影响,最理想的途径是进行飞行试验,但发射火箭需耗费巨资且短期内难以实现,因此需要通过等效的方式来预测整流罩内真实的声振环境,为设计可靠的降噪材料方案提供理论依据,主要的研究方法分为仿真分析和缩比模型试验法。

在仿真分析中,由于整流罩上载荷分布的频谱范围较广,因此常用方法为将频谱划分为低、中、高三个频段各自进行研究。在低频段内,系统结构的动力学参数都较为稳定,结构和声腔的模式密度低,因此有限元和边界元法比较适用;在高频段下,动力学参数存在随机波动性,结构和声腔模式密度较高,因此统计能量法适用于此^[28];而在中频段内,子系统的模式密度不均一,采用单一研究方法较难处理分析,此类问题一般采用混合法进行分析。

2.1 有限元方法

有限元方法是将具有无限自由度的整个系统离散为有限自由度的若干单元,通过定义边界条件、耦合方式等条件后组集得到空气域和结构域的矩阵方程,求解得到声场和结构的动态响应^[29]。该方法对于处理结构较为简单、模式密度较低且系统结构动力学参数易于界定的组合系统十分有效^[30],因此常被用于整流罩低频降噪技术领域的研究。陈钊^[26]采用有限元方法,在整流罩内的低频段开展声振分析,进行了结构模态、声腔模态和声固耦合模态分析。结果显示,随着频率的升高,声压分布逐渐趋于均匀,在某些频率下表现为混响,模式密度渐渐升高,在模态局部振型波动渐趋剧烈。整流罩低频噪声领域的常用的有限元分析过程如下。

(1)建立结构及声腔有限元模型。首先建立整流罩的三维结构模型,主要涉及划分网格和赋予单元属性,如图6所示,分割网格时要明确单元的尺寸和限定单元的质量^[27]。声学单元一般采用体单元,而结构单元一般采用壳单元。另外在声学分析的过程中,要涉及声波在模型内的反射、折射和衍射行为。

(2)结构模态分析。结构模态是机械结构的特性,模态分析可用于分析整流罩的结构振动,每阶模态都有其相对应的固有频率、阻尼比和模态振型。将建立的整流罩有限元模型进行模态计算,通常整流罩的柱段和前锥振动最大,随着频率的升高,局部振型变化加剧。

(3)声腔模态分析。整流罩内声学模态频率和振型是声学结构的特性。整流罩声腔处于特定的频率会引发共鸣现象。若整流罩的声腔模态和结构模态一致,将出现共振现象,由此产生较大噪声。将划

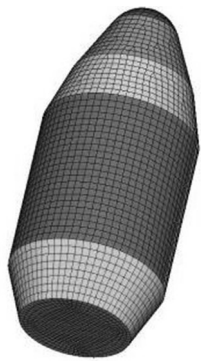


图6 整流罩结构有限元网格划分^[27]

Fig. 6 Finite element mesh generation of fairing structure^[27]

分好的声腔模型进行声腔模态计算,随着频率的升高,声腔模态表现为局部振型变化加剧。

(4)耦合模态分析。当整流罩结构振动时会出现声压,同时声音传播也会对整流罩结构形成作用力,从而使结构和声场达成耦合关系。计算声固耦合时,需要首先定义结构面单元和声腔网格包络面的耦合关系,其次定义网格的映射关系。

(5)整流罩内低频声场响应分析。在整流罩施加相应噪声激励后,可以计算出整流罩内的声压分布,设置场点即可得到声腔内的任何一点的声压值。

2.2 统计能量法

高频段模态密度较高,有限元计算且复杂程度大幅增加,因此采用统计能量法计算。统计能量分析方法运用统计模态的原理,用振动能量来量化振动波,借助系统振动波和模态的联系进行声学系统和结构振动动力学研究^[31]。与有限元方法不同,统计能量法无须将结构划分为大量的若干单元,统计能量法从时间平均、频率平均、空间平均等统计角度计算子系统间的能量流传递、各子系统的能量响应^[32],其可以有效处理中高频域结构模态密集的问题。分析模型的特征值分别是模态密度、耦合损耗因子、内损耗因子、输入功率等。

20世纪80年代,NASA通过统计能量法成功预示了声场中飞行器的振动响应,后续统计能量法陆续被用于分析阿特拉斯和土星IV等整流罩的声振环境。孙目^[33]依照某铝蜂窝夹层结构整流罩的结构参数建立了其统计能量分析模型,并对此整流罩进行了声学试验,仿真结果与试验的误差小于3 dB。证明应用统计能量分析方法进行高频声振环境预示具有可行性。统计能量法在整流罩高频降噪领域的分析过程如下:

(1)整流罩结构及声腔模型的建立,根据整流罩结构建立整流罩的结构子系统和声腔子系统,如图7所示,并定义结构的约束^[26];

(2)定义材料属性建立连接,给每个子结构定义

具体的材料属性,并将结构子系统和声腔子系统连接起来使能量传递能够两者间有效进行;

(3)施加激励,输入相应的声压与频率,施加外部激励。

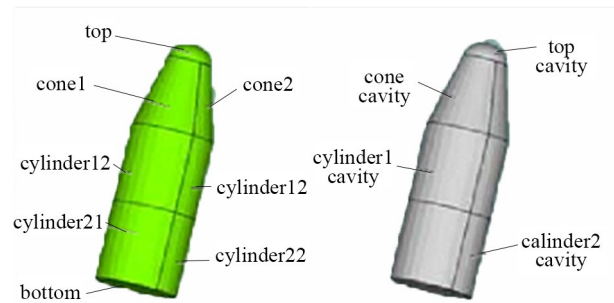


图7 整流罩的结构子系统和声腔子系统^[26]

Fig. 7 Structural subsystem and acoustic cavity subsystem of fairing^[26]

2.3 混合法

有限元方法和统计能量法分别专用于分析低频段和高频段,而介于两种方法有效工作区间的之间的中频段较为复杂,同时存在长波变形确定性子系统和短波变形非确定性子系统。因此低频有限元方法和高频统计能量法都不能完全实现对复杂组合系统的准确分析。针对此问题,中频振动问题的理论及应用研究应运而生^[34]。

2005年,SHORTER,LANGLEY基于波动理论,提出了一种有针对性解决中频声振问题的FE-SEA法。这种混合方法把系统根据边界性质划分为确定性子系统和统计性子系统。统计性子系统的响应可视为两种波场的叠加,一是统计性子系统与确定性子系统在其连接处产生的“直接场”,二是行进波在边界多次反射后形成的“混响场”。因此,系统总体响应可以看作确定性子系统、统计性子系统的直接场受外部激励引起响应和统计性子系统混响场受混响荷载引起响应的累积。该方法通常将低频且模态密度较小的结构建为有限元模型,高频且模态密度密集的结构建为统计能量模型。胡迪科^[35]用FE-SEA法建立了在中频域下的整流罩模型,对整流罩内有效载荷的噪声环境和随机振动响应作出分析。对比了不同材质整流罩的降噪效果,结果显示在低频段复合材料的隔声效果较好,在高频段铝合金的隔声效果较优。

2.4 等效实验法

实验作为振动噪声控制过程中重要的一环,可以最直观地从测试数据中发现问题,验证仿真模型的正确性,选择最优的声学材料的铺覆降噪方案。但直接将全尺寸整流罩作为试验对象进行分析需要

耗费很多资源难以实现,因此先建立整流罩的缩比模型,分析其固有声振特征,研究不同降噪材料的降噪原理及效果,最终在真实整流罩上进行降噪试验。其中研究降噪材料特性的方法主要包括混响室法和阻抗管法。

混响室噪声环境实验是研究噪声性能的重要实验方法。如图8所示,实验系统包括:整流罩缩比模型、声源系统、声学测试系统^[27]。整流罩缩比模型应放置在密闭的场所进行实验,在其外表面安装多个传声器用于测试内外声场数据,声源需与整流罩有一定的距离,使得到达整流罩表面的声波趋于平稳,可视为声波近似均匀地辐射到整流罩表面,此时传声器的数据保持稳定,该密闭场所符合混响室的试验条件。杨树涛^[36]在4 000 m³的混响室中进行整流罩上的降噪材料研究,在内壁铺覆泡沫和芳纶棉材料进行降噪试验,结果显示在500 Hz以上的中高频段的声压级可降低5~10 dB,与两种材料的吸声系数测试数据规律吻合,证明了混响室实验的可行性。

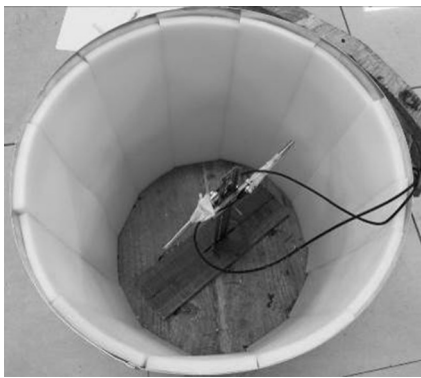


图8 混响室法进行整流罩缩比件的降噪试验^[27]
Fig. 8 Noise reduction test of fairing scale parts by reverberation chamber method^[27]

混响室法测得的是无规入射吸声系数,要求较大面积的测试样品,而阻抗管法可精确测试材料的法向入射吸声系数和法向声阻抗率,且试样面积较小,容易制作,便于对材料吸声特性的快速研究。国际标准化组织ISO制定了阻抗管法的ISO10534-2^[37],测试声学材料的吸声系数和阻抗。如图9所示,阻抗管法实验系统由阻抗管、信号发生器、放大器、声源、传声器和频率分析器组成,主要采用传递函数测量法计算^[38],先选定阻抗管中的两点进行声压测试,再计算两点之间的传递函数,由此获取声学材料的吸声系数。王远通过阻抗管法测量了泡沫、岩棉、玻璃棉等吸声材料的垂直入射吸声系数^[39],得出吸声材料的垂直入射吸声系数随频率升高而增大,在高频段吸声性能最佳。

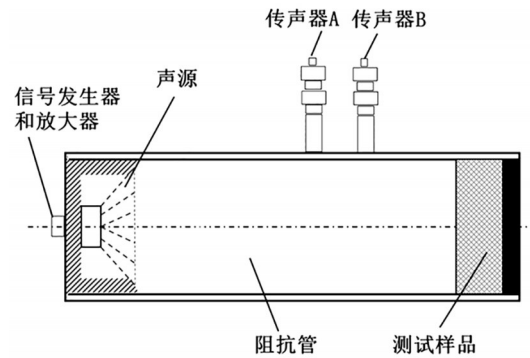


图9 阻抗管法测试原理^[38]

Fig. 9 Test principle of impedance tube method^[38]

3 结语

本文对国内外运载火箭整流罩降噪材料的降噪原理、工程应用等进行了总结分析,并对各个频段下降噪材料的选择和分析方法及过程进行了详细阐述。目前在整流罩高频降噪领域中吸声材料降噪效果明显,在低频降噪领域中亥姆霍兹共鸣器吸声结构表现优异;声场分析方法常采用有限元法和统计能量法分别分析低频和高频段,采用混合法分析中频段。

国外在整流罩降噪技术方面的研究比较成熟,针对整流罩的材质已经有了相应的降噪材料设计方案,在部分运载型号中已经经过验证并批量使用。国内在整流罩降噪方面的研究起步较晚,在该领域和发达国家仍有一定差距,降噪材料的方案可行性还处于论证阶段。随着我国火箭运载能力的逐渐提升,对改善整流罩内声振环境的重视度也与日俱增。基于当下的研究状况和日后的发展方向,对整流罩降噪材料研究的建议如下。

(1) 发掘新型降噪材料。降噪材料种类繁多,材料基本性能和结构的各异也造成了其在降噪领域机理和效果的差异。目前成熟的降噪材料虽然众多,但都不能完全满足宽频降噪的需求,因此发掘有潜力的新型降噪材料,可为整流罩降噪方面的选材提供有力参考,对整流罩的降噪技术研究意义重大。

(2) 探究降噪材料的协同使用方案。火箭在执行发射任务时,整流罩的声振环境较为复杂,产生的噪声频段极广,采用个别降噪材料很难满足各个频段降噪的要求,不能将其在全频段的降噪效果最大化。将多孔吸声材料、共振吸声材料、阻尼材料等组合使用,设计合理的组合比例和铺覆结构能实现全频段的大幅降噪。同时,针对整流罩的材质及有效载荷的特殊需求,灵活选择相适应的降噪材料,实现对整流罩内声场环境的有效改善。

(3) 开展真实全尺寸整流罩的噪声实验研究。

大量的仿真分析研究为实际工程应用提供了理论支撑和指导方案,但即使再精确的仿真分析也会和实际情况有所误差,开展全尺寸整流罩的噪声实验能最大程度上还原火箭飞行过程中的噪声环境,是验证降噪材料设计方案的最有效办法,也为后续整流罩降噪方面的改良和优化提供直观的指导价值。

参考文献

[1] 马兴瑞,于登云,韩增尧,等. 星箭力学环境分析与实验技术研究进展[J]. 宇航学报,2006,27(3):323-331.

MA X R, YU D Y, HAN Z Y, et al. Research progress of mechanical environment analysis and test technology of satellite and rocket [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(3):323-331.

[2] 荣吉利,范博超,程修妍,等. 火箭整流罩声振环境缩比特性研究[J]. 宇航学报,2019,40(8):870-877.

RONG J L, FAN B C, CHENG X Y, et al. Research on scaling characteristics of sound-vibration environment of rocket fairing [J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(8):870-877.

[3] GASS M C, KARAS J C, DUNBAR D R, et al. Atlas launch system mission planner's guide atlas V addendum [M]. California, Usa: International Launch Services, 1999.

[4] GRIFFIN S, LANE S, LEO D. Innovative vibro-acoustic control approaches in space launch vehicles [C]. Inter-noise and Noise-control Congress and Conference Proceedings, Nice: Institute of Noise Control Engineering, 2000:3583-3590.

[5] 宋海洋,于开平,韩敬永. 大型运载火箭整流罩减振降噪问题研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2014 (3): 16-19.

SONG H Y, YU K P, HAN J Y. Noise and vibration reduction analysis of large launch vehicle fairing [J]. Missiles and Space Vehicles, 2014 (3): 16-19.

[6] 马大猷. 噪声与振动工程控制手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002.

MA D Y. Handbook of noise and vibration engineering control [M]. Beijing: China Machine Press, 2002.

[7] 吕玉恒,王庭佛. 噪声与振动控制设备及材料选用手册[M]. 北京:机械工业出版社,1999:133-134.

LV Y H, WANG T F. Noise and vibration control equipment and material selection manual [M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 133-134.

[8] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础[M]. 南京:南京大学出版社,2001.

DU G H, ZHU Z M, GONG X F. Fundamentals of Acoustics [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2001.

[9] 谌相宇. 基于三聚氰胺泡沫和Helmholtz共鸣器的整流罩降噪技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2020.

CHEN X Y. Noise reduction inside launch vehicle fairing using melamine foam and helmholtz resonator [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2020.

[10] HUGHES W O, MCNELIS A M, HIMELBLAU H. Investigation of acoustic fields for the Cassini spacecraft: reverberant versus launch environments [C]. 5th AIAA/CEAS 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2023年 第6期

Aeroacoustics Conference and Exhibit, Washington, USA, May 10-12, 1999.

[11] ANON. Delta-IV payload planner's guide [M]. Washington: The Boeing Company, 1999.

[12] 宋海洋. 大型运载火箭整流罩结构减振降噪问题研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

SONG H Y. Noise and vibration reduction analysis of large launch vehicle fairing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[13] Recent advances in vibroacoustics [R]. NASA-GRC 2004.

[14] 钟祥瑞,罗小华,冬利. 覆面层对玻璃棉吸声性能的影响[J]. 应用声学,1998(4):41-43.

ZHONG X Z, LUO X H, DONG L. Effect of covering layers on the sound absorptive property of a fiber glass board [J]. Journal of Applied Acoustics, 1998(4):41-43.

[15] 杨勇. 轻质层状玻璃纤维棉毡及其复合结构隔声性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.

YANG Y. Sound insulation of lightweight-layered glass fiber felt and corresponding composite structure [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

[16] 蒋峻楠. 基于FE-SEA混合法的列车结构噪声预测及降噪研究[D]. 南昌:华东交通大学,2018.

JIANG J N. Research on structure noise prediction and noise reduction of train based on FE-SEA hybrid method [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2018.

[17] JAOUEN L, RENAULT A, DEVERGE M. Elastic and damping characterizations of acoustical porous materials: available experimental methods and applications to a melamine FOAM [J]. Applied Acoustics, 2008, 69(12): 1129-1140.

[18] MAHNKE H, WOERNER F P, WEBER H, et al. Resilient FOAM based on a melamine-formaldehyde condensate [P]. US 4540717 A1985-09-10.

[19] 杭祖圣,蒋凡顺,居法银,等. 三聚氰胺泡沫的制备及应用研究进展[J]. 热固性树脂,2010,25(4):44-52.

HANG Z S, JIANG F S, JU F Y, et al. Advances in preparation and application of melamine foam [J]. Thermosetting Resin, 2010 (4):44-52.

[20] PEREZ E. Ariane 5 user's manual, issue 5, rev 1 [M]. EVRY: Arianespace, 2010.

[21] MCNELIS A M, HUGHES W O, MCNELIS M E. NASA engineering and safety center (NESC) enhanced melamine (ML) foam acoustic test (NEMFAT) [Z], 2014.

[22] 程修妍,荣吉利,谌相宇,等. 多孔材料在整流罩内中高频降噪的应用与优化研究[J]. 宇航学报,2018,39(4):383-391.

CHENG X Y, RONG J L, CHEN X Y, et al. Analysis and optimization for medium and high frequency noise attenuation of rocket fairings with porous material [J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(4):383-391.

[23] 荣吉利, 谌相宇, 赵瑞, 等. 火箭整流罩内降噪装置低频声学性能仿真[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(10): 991-995.

RONG J L, CHEN X Y, ZHAO R, et al. Simulation on the low-frequency acoustic performance of noise attenuation device in launch vehicle fairings [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(10): 991-995.

[24] 马大猷. 亥姆霍兹共鸣器[J]. 声学技术, 2002, 21(Z1): 2-3.

MA D Y. Helmholtz resonator [J]. Technical acoustics, 2002, 21(Z1): 2-3.

[25] NAIR S U, SHETE C D, SUBRAMONIAM A, et al. Experimental and computational investigation of coupled resonator-cavity systems[J]. Applied Acoustics, 2010, 71(1): 61-67.

[26] 陈钊. 火箭整流罩内声场分析及降噪技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

CHEN Z. Analysis of rocket fairing's acoustic field and research of noise reduction technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[27] 潘力. 圆柱形声腔减振降噪的实验测试与仿真分析[D]. 柳州: 广西科技大学, 2016.

PAN L. Experimental test and simulation analysis of vibration and noise reduction of cylindrical cavity [D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2016.

[28] 邹元杰, 韩增尧, 张瑾. 航天器全频域力学环境预示的主要方法[C]. 全国结构振动与动力学学术研讨会论文集, 振动与噪声协会, 2011: 74-84.

ZHOU Y J, HAN Z Y, ZHANG J. Main methods for predicting the mechanical environment of spacecraft in full frequency domain [C]. Proceedings of the National Symposium on Structural Vibration and Dynamics, Vibration and Noise Association, 2011.

[29] STRANG G, FIX G J. An analysis of the finite element method [M]. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1973.

[30] 纪琳. 中频振动分析方法—混合模型解析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

JI L. Intermediate frequency vibration analysis method - hybrid model analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.

[31] 宋继强. 商用车驾驶室内中高频噪声的分析预测与控制[D]. 吉林: 吉林大学, 2010.

SONG J Q. Analysis forecast and control of the mid-high

frequency noises for commercial vehicle cab [D]. Jilin: Jilin University, 2010.

[32] 姚德源, 王其政. 统计能量分析原理及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.

YAO D Y, WANG Q Z. Principles and applications of statistical energy analysis [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1995.

[33] 孙目, 潘忠文. 卫星整流罩噪声环境预示与降噪设计[J]. 导弹与航天运载技术, 2008, (4): 6-10.

SUN M, PAN Z W. Noise environment prediction and anti-acoustic design of payload fairing [J]. Missiles and Space Vehicles, 2008, (4): 6-10.

[34] LUO W J, LEI X, SONG L L. The analysis of vibration for high-speed train-ballastless track-bridge base on a hybrid fe-sea method; proceedings of the proceeding of the 2012 international conference on automobile and traffic science [C]. Materials and Metallurgy Engineering, F, 2012 [C]. Atlantis Press.

[35] 胡迪科, 沈林, 柳征勇, 等. 新一代运载火箭整流罩全频域声振分析及隔声降噪研究[J]. 上海航天, 2016, (S1).

HU D K, SHEN L, LIU Z Y, et al. Vibro-acoustic and noise reduction analysis in full frequency-domain of a new launch vehicle fairing[J]. Aerospace Shanghai, 2016, (S1).

[36] 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.

[37] International organization for standardization. ISO10534-2 acoustic-determination of sound absorption coefficient and impedance tubes-Part 2: transfer function method [S]. [S. l.]: ISO, 1998: 8-12.

[38] 袁健, 林胜, 贺才春. 阻抗管中吸声系数的传递函数测量法[J]. 噪声与振动控制, 2006(1): 68-70

YUAN J, LIN S, HE C C. Transfer function method of sound absorption coefficient in impedance tubes [J]. Noise and Vibration Control, 2006(1): 68-70

[39] 王远. 混响室和阻抗管法测试材料吸声系数关系研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2015.

WANG Y. Study on relationship of material's absorption coefficient between reverberation chamber method and impedance tube method[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2015.