

# 高超声速飞行器结构热-声振耦合动力学研究进展

刘聪<sup>1,2</sup> 吴臣武<sup>1</sup>

(1 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

**摘要:** 高超声速飞行器服役环境十分复杂, 气动热、气动力和强噪声等多种环境载荷的共同作用, 给飞行器结构安全性带来了巨大挑战; 尤其在极致追求结构轻量化设计和实现时, 热-声振耦合效应将会十分显著。本文大致总结了国内外高超声速飞行器热-声振耦合动力学研究的主要进展, 归纳了在典型热、声及其耦合环境作用下飞行器结构的动力学响应, 梳理了动态载荷环境结构动力学建模、计算方法和实验分析方法, 描述了结构热-声振耦合动力学理论基础, 并探讨了高超声速飞行器结构热-声振耦合动力学研究的重要方向。

**关键词:** 高超声速飞行器; 热-声振耦合; 结构响应; 实验分析; 数值模拟

中图分类号: V411 文献标识码: A 文章编号: 1006-3919(2022)04-0001-08

DOI: 10.19447/j.cnki.11-1773/v.2022.04.001

## Research Progress on Thermal-Acoustic Vibration Coupling Dynamics of Hypersonic Aircraft Structures

LIU Cong<sup>1,2</sup> WU Chen-Wu<sup>1</sup>

(1 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2 Schoole of Engineering Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The service environment of hypersonic aircraft is very complex. The combined action of various environmental loads such as aerodynamic heat, aerodynamic force and strong noise has brought great challenges to the structural safety of the aircraft. In particular, the vibration-acoustic coupling effect will be very significant for the extremely light-weighted aircraft structures. This paper roughly summarizes the main progress of the research on the thermal-acoustic-vibration coupling dynamics of hypersonic vehicles, summarizes the dynamic response of the aircraft structure under the action of typical thermal, acoustic and their coupled environments, and sorts out the dynamic structure of the dynamic load environment. Models, calculation methods and experimental analysis methods are classified to investigate the structural thermal-acoustic-vibration coupling dynamics, and the important directions of the research on the structural thermal-acoustic-vibration coupling dynamics of hypersonic vehicles are discussed.

**Key words:** Hypersonic aircraft; Thermal-acoustic vibration coupling; Structural response; Experiment analysis; Numerical simulation

### 0 引言

钱学森先生在 1946 年首先提出高超声速飞行(hypersonic)的概念<sup>[1]</sup>, 在这一理论的指导下, 飞行速度超过 5 马赫的高超声速飞行器应运而生。相较于传统飞行器而言, 高超声速飞行器拥有速度更快、机动性更强、突防能力更高等优势, 成

为了各个国家争夺空间主动权的重要环节。美国近年来逐步认识到高超声速技术领域的巨大潜力, 逐渐增加了高超声速飞行器项目的研发投入, 大力发展高超声速先进技术, 计划开展多项高超声速武器系统的研发工作, 并将高超声速技术列入 2022 年《关键和新兴技术(CET)清单》, 力争实现跨越式发展<sup>[2]</sup>; 俄罗斯在高超声速技术有着

收稿日期: 2022-02-21; 修回日期: 2022-04-28

基金项目: 中国科学院 A 类先导项目(XDA17030100, XDA17030200)

作者简介: 刘聪(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 热结构动力学; (100190)北京市北四环西路 15 号.

较为明显的领先优势，近期也在稳步推进相关型号飞行器的研制进程，确保自己的非对称战略优势；其他国家也陆续加入高超声速竞赛当中。

高超声速飞行器以高马赫数的速度进行飞行时，会时刻处于高温、强噪声干扰的复杂环境中，服役条件极端恶劣<sup>[3]</sup>。由超高速引起结构表面温度升高的现象被称为“气动加热效应”，如航天飞机穿越大气层时，头部和机翼前缘在激波的冲击下，结构表面温度甚至能达到 2000℃左右，其余部件的表面温度也会大幅度升高，在高温下如何保持飞行器结构不被破坏并正常飞行是一个极具挑战性的难题<sup>[4-6]</sup>。除了处于高温环境之中，很多部件还会承受高强噪声载荷的作用，发动机产生的噪声可以达到 180dB<sup>[7]</sup>。在热、噪声两种动态载荷的耦合作用下，结构动力学响应的不确定性会大幅增加<sup>[8-9]</sup>。在飞行器的设计中，结构轻量化是核心任务，但是轻量化设计意味着需要使用更少的材料和更合理的结构设计来应对高超声速飞行器飞行过程中复杂的动态载荷，因此极端复杂的服役环境对高超声速飞行器结构安全性提出了非常高的要求。为了解决这类难题，迫切需要开展高超声速飞行器结构在极端复杂环境下动力学响应问题的研究。

文章重点关注在热、声等动态环境载荷下高超声速飞行器结构的动力学响应问题，分析仿真模拟的研究方法，梳理多场耦合响应分析的研究进展，为进一步研究提供文献依据和理论支撑。

### 1 高超声速飞行器的气动热和结构温升问题

随着技术手段的进步，高超声速飞行器能够以超过 5 马赫的飞行速度进行长时间的飞行，这时高速气流会在飞行器周围出现复杂流动现象，高速气流由于剧烈的激波压缩作用及气体与结构之间存在的粘性摩擦作用，气体的动能不可逆的向热能转化使气体温度升高，高温气体通过热辐射和对流换热等方式对飞行器结构表面进行加热<sup>[10-11]</sup>，“热障”问题成为当前飞行器设计必须突破的一道难关。

为了降低“气动加热效应”对高超声速飞行器结构带来的危害，研究人员进行了许多尝试。Tahani 等人将之前高超声速飞行器的尖锐前缘改进行成钝头体设计，通过实验结果与数值结果的相互验证，证明这一结构设计可以将壁面温度降低

15%、阻力减小 60%<sup>[12]</sup>，极大缓解了结构表面的气动加热问题<sup>[13]</sup>，如今钝头体的结构设计已经成为航空航天领域的共识。经过长期的实践证明，采用热防护（TPS）系统也是保护飞行器避免高温烧蚀行之有效的方案，并且是轻量化设计、可重复使用的关键，最早在运载火箭、航天飞机上广泛应用<sup>[14]</sup>。现在热防护材料种类繁多，热防护设计也在不断地演化，夹层结构成为了备受关注的研究热点，以便热防护层更加轻质高效<sup>[15]</sup>。

### 2 飞行器结构的热振动力学问题

在“气动加热效应”的作用下，高超声速飞行器结构表面的温度会急剧升高，材料会由于温度的变化引起自身物性参数的变化，进而使结构产生热变形，影响气动布局和整体的承载能力，不均匀的温度分布会引起结构的热应力，严重的会使结构发生破坏，对结构的热防护性能、整体的刚度都是很大考验。飞行器在复杂飞行环境中极易发生热屈曲、破坏等问题<sup>[16-18]</sup>，经过多次飞行事故，有学者认识到温度对结构动力学存在很大的影响，开始深入研究温度场对航空航天领域的简单结构如梁、板的热模态特性<sup>[19-21]</sup>。1993 年 Heeg 的研究首先提出，结构表面的温度从常温增加到 2700℃高温可以使飞行器结构的固有频率降低 30%<sup>[22]</sup>。翼、舵等结构由于在飞行器设计中占有的独特地位，机翼在高温下的振动响应问题尤为引人关注。NASA Dryden 研究中心在 X-37 尾翼上安装耐高温的加速度传感器，得到在环境温度达到 500℃时的结构振动信号<sup>[23]</sup>，并且开展了高超声速飞行器热防护结构的一系列验证性试验。苑凯华等通过数值模拟方法得到了舵面结构在多场耦合环境作用下的响应结果，研究指出多场环境下结构响应变化非常明显，证明了在进行动力学分析时必须要考虑“气动加热效应”<sup>[24]</sup>。总的来说，温度对结构动力学问题的影响可归纳为：温度升高导致材料力学性能下降会使结构特征频率减小，而由于温度不均匀分布产生的热应力对结构特征频率的影响趋势并不能确定<sup>[25]</sup>。

### 3 飞行器结构的声振动力学问题

高超声速飞行器在飞行过程中时刻处于噪声环境的作用之中，环境中噪声载荷的来源如图 1 所示。分为设备产生的噪声和飞行器外形与空气

相互作用产生的气动噪声<sup>[26]</sup>。在高强度的噪声载荷作用下,飞行器很容易出现屈曲、破坏等失稳行为,噪声载荷对飞行器的安全性构成极大威胁。

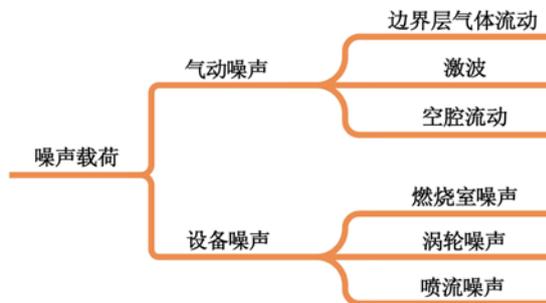


图1 声载荷的来源

Fig.1 The source of acoustic load

高超声速飞行器的声振动力学分析是研究结构对声载荷激励的响应,本质上噪声载荷是一种随机载荷,飞行器的动载荷识别也是一个重要的研究方向<sup>[27]</sup>。对于随机声载荷的处理,现有研究当中将指定频率范围、幅值服从高斯分布的有限带宽高斯白噪声代替随机声载荷施加到结构表面。张国军等以 X-43A 高超声速飞行器作为研究对象,最终的数值模拟结果与噪声试验结果都得到了相似的结论:宽频噪声环境中,低阶模态振动才是结构内响应噪声的主频率<sup>[28]</sup>。

20 世纪以来,诸多研究人员针对板的声载荷响应开展了相关研究,近年来随着计算软件和试验硬件的提升,以加筋板、薄壁结构等为研究对

象的数值模拟和噪声试验技术飞速发展<sup>[29-31]</sup>。当前在实验中施加噪声载荷的设备是行波管,具有结构简单、频谱均匀,常用来复现高超声速飞行器外部所受声场环境,如今越来越多的飞行器成型后要通过噪声试验的检验,噪声试验技术在未来高超声速飞行器研究中会扮演着更加重要的角色<sup>[7,32]</sup>。

#### 4 飞行器结构的热-声振耦合动力学问题

在高超声速飞行器的分析过程中,如果将声、热两种不同的环境分开,就无法真实的模拟出实际的情况,由于气动加热产生的高温与声载荷的耦合作用往往会呈现出更加复杂的响应特性。在真实的物理环境中,温度的升高会影响结构的材料性能和结构刚度,使得高超声速飞行器结构的固有特性发生改变,在宽频载荷的激励下会激发结构的多阶模态,极易产生断裂、屈曲、跳变等问题,尤其是高超声速飞行器大规模应用了轻质薄壁结构,在热、声载荷的耦合作用下往往会表现出更加复杂的非线性响应,薄壁结构的动力学响应问题成为当今研究的热点<sup>[33-35]</sup>。

国外首先从航天飞机的研发中遭遇的问题出发,为了更好的进行结构设计, Behnke 利用有限元计算方法研究了具有代表性的波纹腹板热防护结构在热、气动、声耦合载荷作用下的响应,计算结果如图 2 所示<sup>[36]</sup>。

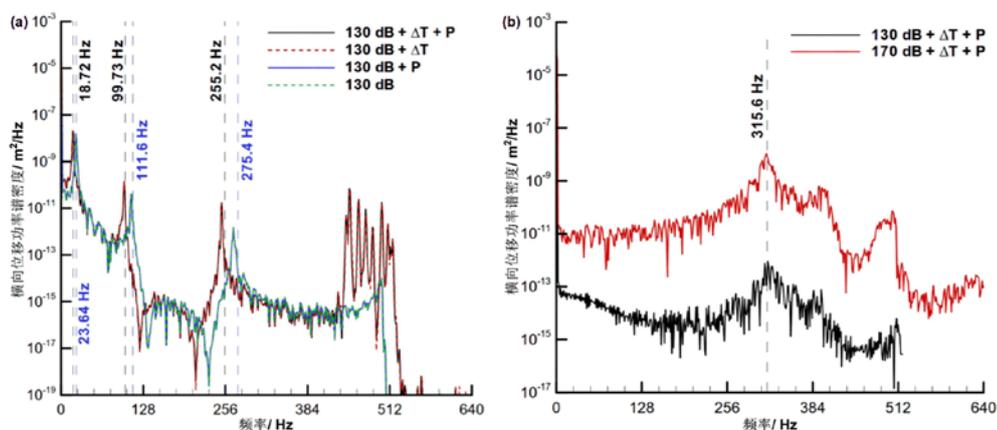
图2 金属基热防护系统的耦合响应<sup>[36]</sup>

Fig.2 Coupled responses of Metal-Based thermal protection systems

NASA Langley 研究中心的 Ng 等利用热噪声试验完成对薄壁结构在不同温度和不同声压级作用下的响应分析,研究发现加热板的声响应增

加或减少取决于热屈曲的大小和声荷载激发快速穿越运动的能力<sup>[37,38]</sup>。随着高超声速飞行器上新材料的使用,新型复合材料板的结构响应问题也

引起一些学者的关注。Jeyaraj 等人结合有限元和边界元方法,借助有限元软件得到各向同性板、纤维增强复合材料板和多层粘弹性夹层板在热环境下的振动声响应特性<sup>[39-41]</sup>。Huang Lin 对形状记忆合金材料在颤振边界、后屈曲和系统响应中所起的抑制作用进行了研究,分析了在热-声耦合场作用下复合材料板的非线性动力学特性和颤振特性<sup>[42]</sup>。

在国内围绕结构在热声耦合载荷下的响应问题研究虽然起步较晚,但成果颇为丰硕。西安交通大学李跃明教授团队完成了许多工作,杨雄伟、耿谦等以 X-43A 高超声速飞行器为研究对象建

立有限元模型,利用有限元-统计能量分析方法对结构在高温环境下宽频声振特性进行仿真,并进一步探究了热应力对于声振特性的影响<sup>[43,44]</sup>。北京强度环境研究所对热噪声环境下飞行器结构的响应问题开展了一系列的研究。吴振强等在温度为 200~600℃、噪声为 156~165dB 的范围内开展了 C/SiC 复合材料壁板的动态响应试验,并搭建一套热噪声试验装置,热噪声试验系统的工作原理如图 3 所示<sup>[45]</sup>。程昊等采用结构有限元法与声学有限元法相结合的方法,对热噪声试验结果进行了数值模拟验证,计算了在热载荷和高强度声载荷作用下板的随机响应结果<sup>[46]</sup>。

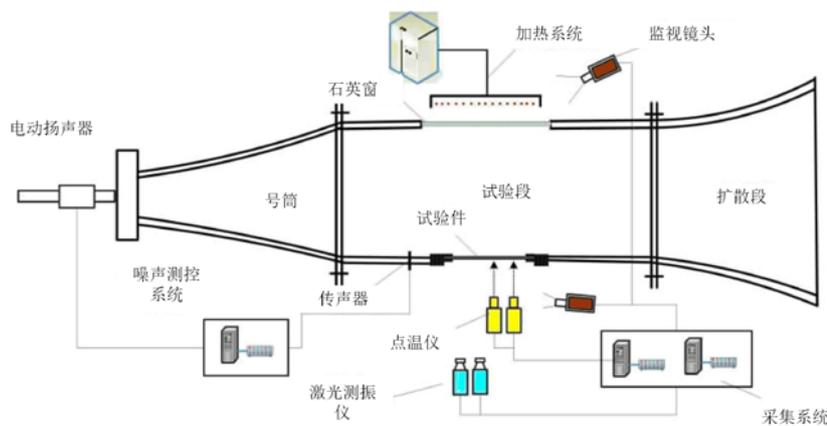


图 3 热噪声试验系统示意图<sup>[45]</sup>

Fig.3 Schematic diagram of thermal acoustic test system

另外,沙云东等从发动机燃烧室噪声激励响应的问题出发,运用有限元、边界元等方法对热、声载荷作用下金属薄壁结构和 C/SiC 复合材料壁板的非线性随机响应进行了细致的研究,以理论分析为基础结合试验分析,得到了不同工况下结构后屈曲的振动响应,并且引入“势能阱”的概念来揭示跳变响应产生的机理<sup>[47-51]</sup>。贺尔铭等基于时域分析方法,研究了薄板梁在热/声载荷作用下的非线性响应特性<sup>[52]</sup>。杨炎等以典型薄壁盒为研究对象,利用热振动声学的分析方法,建立了理论基础和数值模拟流程,利用在表面施加平面波以及单极子和偶极子点声源两种不同的形式进行结果验证,取得了较为理想的成果<sup>[53]</sup>。王晨等基于体积能量分析方法得到铝合金金属壁板的高频声振响应特性与温度的变化关系,弥补当前研究当中只关注结构中低频声振响应的不足,对高超声速飞行器的设计工作起到了很好的参考作用<sup>[54]</sup>。邹学锋以高声强噪声行波管为平台,外部用

石英灯加热器提供温度场环境,发展复合环境的精确加载与控制,分别以舵面结构、四边筒支钛合金壁板为研究对象,开展时域响应变化特征的研究,壁板结构的计算结果如图 4 所示<sup>[55,56]</sup>。

结合上面论述可知,当前研究中多是将飞行器的结构简化,或将温度、噪声等因素分离开,存在温度不够高、噪声强度较低等缺点。但必须清楚地认识到,高温引起的材料与结构的非线性关系、复杂的温度分布和高强度噪声的耦合对真实状态有很大影响,忽略了这些复杂的耦合作用将导致研究结果与实际中结构的响应不一致。此外,从研究对象上讲,薄壁结构、金属壁板等简单结构现有的研究成果较多,但复杂结构由于其自身非线性程度较高,实验分析方法和数值仿真技术手段还不成熟,暂时还没有系统性的研究成果,对高超声速飞行器整体结构、多场耦合等方面的研究尚需进一步深入。

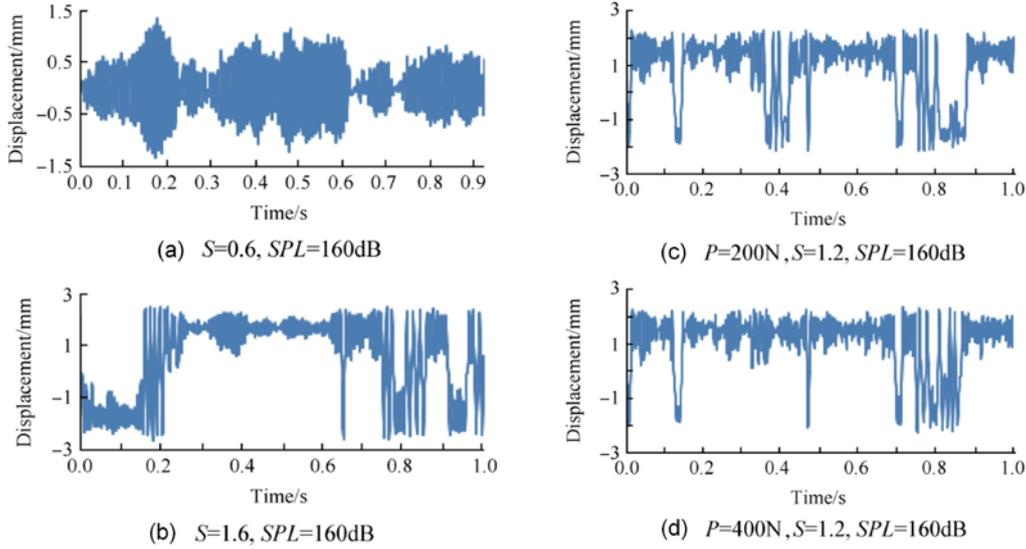
图4 钛合金壁板不同工况下时域结果<sup>[56]</sup>

Fig.4 Time domain results of titanium alloy panels under different working conditions

## 5 热-声振耦合动力学问题的理论基础

对于任意结构, 通过耦合控制方程<sup>[57]</sup>, 联立平衡方程即可求解

$$\begin{aligned} \nabla^2 T - \frac{1}{k} \frac{dT}{dt} - \mu \frac{d\varepsilon_{kk}}{dt} &= 0 \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} + \alpha(T - T_0) \delta_{ij} \\ q_r(\vec{R}_j) &= q(\vec{R}_j) + \int_s \dot{\omega}(\vec{R}_0) G(\vec{R}_j | \vec{R}_0) dS(\vec{R}_0) \\ \sigma_{ji,j} + f_i &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

但对于复杂结构来说, 方程组中未知量较多, 相互作用关系复杂, 求解难度很大。因此, 在复杂结构中通常采用离散化的有限元分析方法, 结构的振动方程通常可以表示为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{0} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{M}$  是质量矩阵,  $\mathbf{C}$  是阻尼矩阵,  $\mathbf{K}$  是刚度矩阵。

在结构处于热环境时, 结构总的刚度矩阵可以表示为<sup>[58]</sup>

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_T + \mathbf{K}_\sigma \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{K}_T$  表示在某一温度下的结构刚度矩阵,  $\mathbf{K}_\sigma$  表示由于温度引发的热应力刚度矩阵。

$$\mathbf{K}_T = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D}_T \mathbf{B} d\Omega \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{K}_T \mathbf{D}_T$  表示材料参数随温度变化的弹性矩

阵,  $\mathbf{B}$  表示结构几何矩阵

$$\mathbf{K}_\sigma = \int_{\Omega} \mathbf{G}^T \mathbf{\Gamma} \mathbf{G} d\Omega \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{G}$  表示形函数矩阵,  $\mathbf{\Gamma}$  表示结构的热应力矩阵。

噪声载荷的常规处理方法是将其作为外激励, 此时声压载荷的有限元表达式为<sup>[28]</sup>

$$\sum_{e=1}^{n_{se}} \left( \int_{\Omega_{se}} (N_s^T n^e P) d\Omega \right) = \left( \sum_{e=1}^{n_{se}} \left( \int_{\Omega_{se}} (N_s^T n_a N_a) d\Omega \right) \right) p_i \quad (6)$$

式(6)中  $N_s^T$  表示相邻节点的振动形函数,  $n_{se}$  表示接触面的网格数量,  $\Omega_{se}$  表示沿接触面  $\Omega$  的单元面积,  $p_i$  表示已有的节点声压向量,  $n^e$  表示结构网格的法向量,  $N_a$  表示待求节点的声压形函数,  $n_a$  表示声场单元的法向量。

于是, 声载荷作用下的结构动力学方程将会变为

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{C} + \mathbf{K}) \mathbf{u} + \mathbf{L}_C p_i = \mathbf{F}_s \quad (7)$$

$$\mathbf{L}_C = - \left( \sum_{e=1}^{n_{se}} \left( \int_{\Omega_{se}} (N_s^T n_a N_a) d\Omega \right) \right) \quad (8)$$

$\mathbf{F}_s$  为结构负载,  $\mathbf{L}_C$  描述作用在结构上的声压的耦合刚度矩阵。

由公式(3)、(7)可知, 最终热噪声环境下结构动力学方程为

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{C} + (\mathbf{K}_T + \mathbf{K}_\sigma)) \mathbf{u} + \mathbf{L}_C p_i = \mathbf{F}_s \quad (9)$$

## 6 热-声振耦合动力学未来研究趋势

在未来的研究当中,应当立足于新一代高超声速飞行器的性能需求,突破现有认知和理论限制,发展和完善飞行器结构设计、新型材料应用、仿真模拟技术、试验和应用等理论、方法和手段。对于本文着重关注的高超声速飞行器结构在热-声振耦合动力学问题,要从关注结构在极端环境载荷下的力学行为,转变到强化认知环境及其与材料的耦合作用机制上,关注未来可能出现的更加复杂的结构和飞行器系统的系列问题,实现较为系统的技术体系,为高超声速飞行器的研发工作提供更加合理地解决方案<sup>[59]</sup>。在高超声速飞行器热噪声结构响应研究的发展过程中,新型材料与结构的力学行为、多场耦合试验模拟技术、多场耦合分析技术和极端环境测试技术等方向逐渐成为研究的前沿问题。

1) 新型材料与结构的力学行为。当前新型材料和结构设计在飞行器轻量化设计当中起到了关键作用,但是现有研究并没有开展新材料、结构的多场耦合研究,对新材料和结构在复杂服役环境下的动力学响应问题认识不够,亟需开展在热声耦合环境下新型材料与结构响应的研究,建立热、声环境下材料和结构失效准则。

2) 多场耦合试验模拟技术。试验模拟最重要的是能够模拟真实服役环境,研究如何在地面试验中实现气动力、气动热、振动、噪声等环境载荷的加载,从而加强试验环境模拟能力,深入开展响应与破坏机制的研究,建立起外部环境特性的数据库,用于仿真模拟和飞行试验的对比验证,通过耦合实验数据预测结构响应结果。多场耦合仿真模拟技术。重点关注在多场耦合仿真模拟技术当中计算效率不足、计算精度差等问题,发展高效、精确、合理的计算方法,集成多学科优化,开展系统性的研究。尤其是国内仿真软件竞争力不足,工业软件长期受制于国外商业软件,更应该独立自主开发一体化设计平台,通过对照地面试验和飞行试验数据,建立结构响应的数据库,可以大大缩短研发周期,降低研究成本。

3) 极端环境测试技术。重点开展创新性极端环境测试技术和方法的研究,提高在极端热、声环境当中结构表面声压分布、热流、位移、应变等参数的测试精度,获取足够的动载荷数据,为

地面试验模拟和多场耦合仿真模拟提供参数支撑。

## 参 考 文 献

- [1] Tsien H-S. Similarity laws of hypersonic flows [J]. *Journal of Mathematics and Physics*, 1946, 25(1-4):247-251.
- [2] Moses P L, Rausch V L, Nguyen L T, et al. NASA hypersonic flight demonstrators-overview, status, and future plans [J]. *Acta Astronautica*, 2004, 55(3/9):619-630.
- [3] 黄华, 刘毅, 赵增亮, 等. 临近空间环境对高速飞行器影响分析与仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(9): 2230-2233. [Huang Hua, Liu Yi, Zhao Zengliang, et al. Simulation of influence of near space atmosphere on supersonic vehicle[J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(9):2230-2233.]
- [4] Binner J, Porter M, Baker B, et al. Selection, processing, properties and applications of ultra-high temperature ceramic matrix composites, UHTCMCs-a review [J]. *International Materials Reviews*, 2020, 65(7): 389-444.
- [5] Purwar A, Basu B. Thermo-structural design of ZrB<sub>2</sub>-SiC-based thermal protection system for hypersonic space vehicles [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2017, 100(4):1618-1633.
- [6] 杨亚政, 杨嘉陵, 方岱宁. 高超声速飞行器热防护材料与结构的研究进展 [J]. *应用数学和力学*, 2008(1):47-56. [Yang Yazheng, Yang Jialing, Fang Daining. Research progress on the thermal protection materials and structures in hypersonic vehicles[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2008(1): 47-56.]
- [7] 张卫红, 冯秉初, 冯道军. 噪声试验技术在高超声速巡航飞行器研制中的应用前景 [J]. *强度与环境*, 2011, 38(1):31-35. [Zhang Weihong, Feng Bingchu, Guo Daojun. The advanced research on application of acoustic test technology in developing hypersonic cruise missile[J]. *hypersonic cruise missile*, 2011, 38(1):31-35.]
- [8] Eason T G, Spottswood S.A Structures perspective on the challenges associated with analyzing a reusable hypersonic platform[C]. *proceedings of the 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2013.
- [9] Liu L, Guo Q, He T. Thermal-acoustic fatigue of a multilayer thermal protection system in combined extreme environments [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 2014(8): 1-18.
- [10] Anderson J D. *Hypersonic and high temperature gas dynamics*, second edition [M]. 2006.
- [11] 吴子牛, 白晨媛, 李娟, 等. 高超声速飞行器流动特征分析 [J]. *航空学报*, 2015, 36(1):58-85. [Wu Ziniu, Bai Chenyuan, Li Juan, et al. Analysis of flow characteristics for hypersonic vehicle[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2015, 36(1): 58-85.]
- [12] Tahani M, Karimi M S, Motlagh A M, et al. Numerical investigation of drag and heat reduction in hypersonic spiked blunt bodies [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2013, 49(10):1369-1384.

- [13] Khalid M, Juhany K A. Heat alleviation studies on hypersonic re-entry vehicles [J]. *Aeronautical Journal*, 2018, 122(1257):1673-1696.
- [14] Blosser M L. Development of metallic thermal protection systems for the reusable launch vehicle [J]. *American Institute of Physics*, 1997:1125-1144.
- [15] Le V T, Ha N S, Goo N S. Advanced sandwich structures for thermal protection systems in hypersonic vehicles: A review [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 226:109301.
- [16] 陈浩宇, 王彬文, 宋巧治, 等. 高超声速飞行器热颤振研究现状与展望 [J]. *航空工程进展*, 2022, 13(1):19-27.[Chen Haoyu, Wang Binwen, Song Qiaozhi, et al. Research progress and prospect of thermal flutter of hypersonic vehicles[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2022, 13(1):19-27.]
- [17] Xie W H, Peng Z J, Meng S H, et al. Thermal stress analysis of the FGLCS in hypersonic vehicles: Their application to fuel injection struts in scramjets [J]. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 2017, 99:157-165.
- [18] Sedlack M A, Deane S, Felemban B, et al. Testing and modeling of thermomechanical buckling fatigue in combined extreme environments [C]. 2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference.
- [19] Ribeiro P, Manoach E. The effect of temperature on the large amplitude vibrations of curved beams [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 285(4-5):1093-1107.
- [20] Lan S, Wu D, Wang Y, et al. Experimental Study on the thermal/vibration characteristics for a plate structure made of high-temperature-resistant nickel-based stainless steel [C]. *proceedings of the Materials Science Forum*, F, 2016.
- [21] Malekzadeh P, Shahpari S, Ziaee H. Three-dimensional free vibration of thick functionally graded annular plates in thermal environment [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(4):425-442.
- [22] Heeg J, Zeiler T, Pototzky A, et al. Aerothermoelastic analysis of a naspdemostrator model [J]. 34th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 1993:617-627.
- [23] Spivey N D. High-temperature modal survey of a hot-structure control surface [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2011.
- [24] 苑凯华, 程萌. 高超声速气动/热/结构多场耦合分析 [J]. *战术导弹技术*, 2017(5):41-45.[Yuan Kaihua, Cheng Meng. Aerodynamic/thermal/structural coupling analysis of hypersonic flight vehicles[J]. *Tactical Missile Technology*, 2017 (5):41-45.]
- [25] 纪科星, 宋宏伟, 黄晨光. 温度场与应力场对主动冷却发动机振动模态的影响[J]. 2010.
- [26] 杨澜, 康昌玺, 李亮, 等. 基于高速飞行器的气动噪声影响及试验方法 [J]. *真空与低温*, 2018, 24(2):133-136.[Yang Lan, Kang Chang-Xi, Li Liang, et al. The research actuality of aerodynamic noise and acoustic test technology for the super-speeding flight vehicle[J]. *Tactical Missile Technology*, 2018, 24(2):133-136.]
- [27] 王磊, 刘亚儒, 胥涵颖. 多源不确定性下的飞行器动载荷识别研究进展 (英文) [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 38(2):271-287.
- [28] 张国军, 闫云聚, 李鹏博. 飞行器结构噪声致振试验及声振耦合响应分析 [J]. *应用数学和力学*, 2013, 34(11):1157-1164.[Zhang Guojun, YAN Yunju, LI Pengbo. Noise-induced vibration experiment of aircraft structure and vibro-acoustic coupling response analysis [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2013, 34(11):1157-1164.]
- [29] Xin-gang L, Liang-xuan Y, Yutong C, et al. The failure mechanism of a 2D-C/SiC panel structure under strong acoustic loading [J]. *New Carbon Materials*, 2019, 34(4): 373-381.
- [30] Zhao D, Squicciarini G, Ferguson N S. The acoustic response of stiffened plates[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019.
- [31] Spottswood S M, Bebermiss T J, Eason T G, et al. Exploring the response of a thin, flexible panel to shock-turbulent boundary-layer interactions [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 443:74-89.
- [32] 刘泽锋, 单雪利, 于田霖, 等. 行波管与混响室噪声试验等效转换方法研究 [J]. *环境技术*, 2021, 39(5):132-138.[Liu Zefeng, Shan Xueli, Yu Tianlin, et al. Research on the equivalent conversion method for progressive wave tube and reverberation chamber noise test[J]. *Mental Technology*, 2021, 39(5):132-138.]
- [33] 邹学锋, 潘凯, 燕群, 等. 多场耦合环境下高超声速飞行器结构动强度问题综述[J]. *航空科学技术*, 2020, 31(12):3-15.[Liu Zefeng, Shan Xueli, Yu Tianlin, et al. Research on the equivalent conversion method for progressive wave tube and reverberation chamber noise test[J]. *Environmental Technology*, 2020, 31(12): 3-15.]
- [34] 吴振强, 任方, 张伟, 等. 飞行器结构热噪声试验的研究进展[J]. *导弹与航天运载技术*, 2010(2):24-30.[Wu Zhenqiang, RenFang, Zhang Wei, et al. Research advances in thermal-acoustic testing of aircraft structures[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2010(2):24-30.]
- [35] 郭静, 吴振强, 张伟, 等. 热噪声复合环境下飞行器结构动响应预示技术研究进展[J]. *强度与环境*, 2014, 41(6):1-10. [Guo Jing, Wu Zhenqiang, Zhang Wei. Review of study on prediction of dynamical response for aircraft structure under a combination of thermal and acoustic environments[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2014, 41(6):1-10.]
- [36] Behnke M, Sharma A, Przekop A, et al. Thermal-acoustic analysis of a metallic integrated thermal protection system structure[C]. *proceedings of the 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 18th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference*, 2010.
- [37] Ng C. Nonlinear and snap-through responses of curved panels to intense acoustic excitation [J]. *Journal of Aircraft*, 1989, 26(3): 281-288.
- [38] Ng C F, Clevenson S A. High-intensity acoustic tests of a thermally stressed plate [J]. *Journal of Aircraft*, 1991, 28(4):275-281.

- [39] Jeyaraj P, Ganesan N, Padmanabhan C. Vibration and acoustic response of a composite plate with inherent material damping in a thermal environment [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 320(1-2):322-338.
- [40] Jeyaraj P, Padmanabhan C, Ganesan N. Vibration and acoustic response of an isotropic plate in a thermal environment [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2008, 130(5).
- [41] Jeyaraj P, Padmanabhan C, Ganesan N. Vibro-acoustic behavior of a multilayered viscoelastic sandwich plate under a thermal environment [J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2011, 13(5):509-537.
- [42] Lin H, Shao C, Cao D. Nonlinear flutter and random response of composite panel embedded in shape memory alloy in thermal-aero-acoustic coupled field [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 100:105785.
- [43] 杨雄伟,李跃明,耿谦.基于混合 FE-SEA 法的高温环境飞行器宽频声振特性分析[J]. *航空学报*,2011,32(10):1851-1859.[Yang Xiongwei, Li Yueming, Geng Qian. Broadband vibro-acoustic response of aircraft in high temperature environment based on hybrid FE-SEA[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(10):1851-1859.]
- [44] 耿谦,李跃明,杨雄伟.热应力作用下结构声-振耦合响应数值分析[J]. *计算力学学报*, 2012, 29(1):99-104.[Geng Qian, Li Yueming, Yang Xiongwei. Vibro-acoustic numerical analysis of thermally stressed aircraft structure[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2012, 29(1): 99-104.]
- [45] 吴振强,张正平,李海波,等. C/SiC 壁板热噪声复合环境动态响应试验研究 [J]. *实验力学*, 2015, 30(6): 741-748.
- [46] Cheng H, Li H B, Zhang W, et al. Dynamic response analysis of an aircraft structure under thermal-acoustic loads [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 744.
- [47] 沙云东,郭小鹏,廖连芳,等. 随机声载荷作用下的复杂薄壁结构 Von Mises 应力概率分布研究[J]. *振动与冲击*,2011, 30(1):137-141.[Sha Yundong, Guo Xiaopeng, Liao Lianfang, et al. Probability distribution of Von Mises stress for complex thin-walled structures undergoing random acoustic loadings[J]. *Journal of Vibration and Shock* , 2011, 30(1): 137-141.]
- [48] 沙云东,王建,骆丽,等.热声载荷作用下金属薄壁结构的振动响应与试验验证[J].*振动与冲击*,2017,36(20):218-224.[ShaYundong, Wang Jian, Luo Li, et al. Vibration responses analysis and experimental verification of metallic thin-walled structures to thermal-acoustic loadings[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017,36(20): 218-224.]
- [49] 沙云东,朱付磊,赵奉同,等. 热声载荷下薄壁板行波管疲劳分析与试验研究 [J]. *推进技术*, 2019, 40(8):1876-1886. [Sha Yundong, Zhu Fulei, Zhao Fengtong, et al. Fatigue analysis and experimental research for thin-walled plates under thermoacoustic loading in traveling wave tube[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(8):1876-1886.]
- [50] Wang J, Huang Z, Sha Y, et al. Thin-walled structure acoustic excitation response and fatigue life investigation in high temperature [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 127.
- [51] 李纪永,李舜酩,沙云东.热-噪声载荷作用下薄壁结构非线性动态响应分析 [J]. *机械科学与技术*, 2012, 31(7):1128-1131.[Li Jiyong, Li Shunming, Sha Yundong, et al. Analysis of nonlinear dynamic response of thin-wall structure under thermo-acoustic loading [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, 31(7): 1128-1131.]
- [52] 贺尔铭,刘峰,胡亚琪,等. 热声载荷下薄壁结构非线性振动响应分析及疲劳寿命预测 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(24): 135-139.[He Erming, Liu Feng, Hu Yaqi, et al. Nonlinear vibration response analysis and fatigue life prediction of a thin-walled structure under thermal-acoustic loading[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(24): 135-139.]
- [53] Yang Y, Wu C-W. Coupling analysis for the thermo-acoustic-vibration response of a thin-walled box with acoustic excitations [J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2016, 4(5): 423-429.
- [54] 王晨,陈海波,王用岩,等.温度效应对铝合金壁板高频声振疲劳寿命的影响研究[J].*应用力学学报*,2018,35(4):701-708.[Wang Chen, Chen Haibo, Wang Yongyan, et al. Thermal effect on the fatigue life of aluminum panel under high-frequency acoustic excitation[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2018,35(4):701-708.]
- [55] 邹学锋,郭定文,潘凯,等. 综合载荷环境下高超声速飞行器结构多场联合强度试验技术 [J]. *航空学报*, 2018, 39(12):240-250.[Zou Xuefeng, Guo Dingwen, Pan Kai, et al. Test technique for multi-load combined strength of hypersonic vehicle structure under complex loading environment[J].*Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(12): 240-250.]
- [56] 邹学锋,郭定文,张昕,等. 声/热/静联合载荷下钛板结构响应特性研究 [J]. *推进技术*, 2019, 40(5):1136-1143.[Zou Xuefeng, Guo Dingwen, Zhang Xin, et al. Study on response characteristics of titanium panel under combined thermal/acoustic/static loadings[J]. *Journal of Propulsion Technology*,2019,40(5): 1136-1143.]
- [57] 李跃明,耿谦. 热结构的声振特性 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [58] 贺旭东,吴松,张步云,等. 热应力对机翼结构固有频率的影响分析 [J]. *振动测试与诊断*, 2015, 35(6):1134-1139.
- [59] 中国科学院编. 中国学科发展战略•新型飞行器中的关键力学问题[M]. 北京: 科学出版社, 2018.