

文章编号: 1674-8190(2024)05-001-15

飞行器结构热声疲劳问题研究进展

张玉杰^{1,2}, 孙仁俊^{1,2}, 李斌¹

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(2. 航空工业第一飞机设计研究院 强度设计研究所, 西安 710089)

摘要: 高超声速飞行器表面结构, 如发动机叶片、内涵道及其排气道等暴露在高温强噪声复合环境中, 容易出现热声疲劳损伤问题, 因此, 结构热声疲劳问题引起了广泛关注。热声疲劳研究对增强这类结构的耐久性和可靠性具有重要意义。本文总结了国内外在飞行器结构热声疲劳领域的研究现状, 阐述了在热声疲劳理论研究、仿真分析和试验技术方面所取得的进步。从时间维度回顾了国外自 20 世纪 70 年代至今在结构热声疲劳领域的研究情况; 按研究单位分类介绍了国内科研院所和高等院校在该领域所开展的工作。在此基础上分析了飞行器结构热声疲劳研究所面临的技术难点问题, 指出了尚需进一步研究的方向。

关键词: 热声载荷; 振动响应; 高温声疲劳; 寿命估算; 薄壁; 热噪声试验

中图分类号: V216.4⁺³

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.05.01

Research advances in thermal-acoustic fatigue problems of aircraft structures

ZHANG Yujie^{1,2}, SUN Renjun^{1,2}, LI Bin¹

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Department of Strength Engineering Research, AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: The structures of hypersonic vehicle surfaces, engine blades, internal ducts and exhaust ducts may generate thermal-acoustic fatigue damage because of high temperature and high-intensity noise environments. Thus, it is of significance to study the thermal-acoustic fatigue problems for improving the durability and reliability of such structures. Thermal-acoustic fatigue problems of aircraft structure have received widespread attention. In this paper, the research status of thermal-acoustic fatigue problems and the research progress during the theoretical research, simulation analysis and experimental technology of thermal-acoustic fatigue are summarized both at home and abroad. The research status of structural thermal-acoustic fatigue in foreign countries is reviewed from the 1970s to the present from a time perspective. The work carried out by domestic research institutes and higher education institutions in this field is introduced according to the classification of research units. On this basis, the technical difficulties are analyzed and the further development is proposed during the research on thermal-acoustic fatigue of aircraft structures.

Key words: thermal-acoustic load; vibration response; high temperature acoustic fatigue; life estimation; thin-walled panel; thermal-acoustic testing

收稿日期: 2024-02-18; 修回日期: 2024-05-20

通信作者: 张玉杰(1985-), 男, 博士研究生, 高级工程师。E-mail: zhyj0501222@sina.com

引用格式: 张玉杰, 孙仁俊, 李斌. 飞行器结构热声疲劳问题研究进展[J]. 航空工程进展, 2024, 15(5): 1-15.

ZHANG Yujie, SUN Renjun, LI Bin. Research advances in thermal-acoustic fatigue problems of aircraft structures[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(5): 1-15. (in Chinese)

0 引言

随着航空航天技术的迅猛发展,飞行器热声耦合环境下的结构疲劳问题愈加突出。热声载荷作用下疲劳寿命预测是当前高超声速飞行器、先进隐身飞机等结构设计的关键技术之一。对于高超声速飞行器而言,由于其飞行环境十分苛刻,蒙皮、发动机机匣、火焰筒壁板和涡轮叶片等结构会受到高温及强噪声环境影响,热防护层表面温度甚至高达1 600 °C以上,总声压级可达180 dB^[1],在这种严酷环境作用下,结构疲劳寿命将大幅降低。

先进隐身飞机通常采用扁平升力体布局,将进气道和发动机排气道内置,排气道结构在发动机尾流高温、强噪声载荷作用下,其完整性和耐久性受到严重考验,容易出现振动响应大、应力水平高等问题,进而导致管壁结构开裂或连接件失效。例如,在B-2飞机的使用维护中,美国空军在多架飞机发动机排气口后面的钛合金面板上,发现了长短不一的裂缝,有的不到1 in(1 in=0.025 4 m),有的则长达9 in^[2]。1996年5月,B-2机队因其中一架飞机发现尾喷管固定件裂纹而停飞8天,期间检查了所有飞机的喷管固定件,更换了故障件^[3]。

目前国内外学者和工程技术人员针对飞行器热声疲劳问题开展了大量的理论分析、数值仿真和试验研究,研究对象主要包括高超声速飞行器热防护或薄壁结构,发动机叶片、燃烧室或排气道结构等,涵盖金属材料和复合材料,形成了一些有效的分析方法和试验技术。本文通过整理归纳飞行器热声疲劳相关文献资料,总结国内外在该领域的研究现状,并指出目前结构热声疲劳问题研究所面临的技术难点和后续发展方向。

1 国外研究现状

国外在结构热声疲劳领域的研究起步较早,目前已取得较为丰硕的研究成果,本节将按时间维度对国外研究进展进行论述。

自20世纪70年代起,国外研究人员就开始探索航空航天金属薄壁结构在热声环境下的动态响应和疲劳的分析与试验问题^[4]。1973年,Hieken等^[5]总结了美国空军飞行动力实验室关于高温声疲劳的试验方法,包括:声模拟、热模拟、试验件安装、设备及其测试条件。1974年,Schneider^[6]提出一套分析和试验程序用以确定高温和强噪声环境下结构声疲劳设计准则,采用大变形板理论建立

简支弯曲板的动态响应公式,并完成典型飞机结构的高温(316 °C)随机声疲劳试验。1982年,Maekawa^[7]为了估计蒙皮结构的声疲劳寿命,利用蒙特卡洛法开展壁板非线性响应分析,运用流变学模型开展局部应力—应变仿真,说明了热屈曲效应对声疲劳寿命的影响。1985年,Soovere^[8]开展了高温对整体加筋石墨环氧平板声疲劳影响的研究,包括不同加筋壁板和温度的声疲劳对比试验,对已有声疲劳分析方法进行评价。Jacobson^[9]开展了复合材料壁板的热声疲劳分析和试验,用以评估垂直/短距起降(V/STOL)飞机机身复合材料壁板结构的设计方案,对带有石墨环氧蒙皮的平板和多加筋微曲板结构进行了设计、分析、制造和试验,试验总声压级约为163.5 dB。1987年,美国弗吉尼亚大学、NASA兰利研究中心和空军怀特试验室联合实施了毕业生教育计划项目(NASA Grant NAG-I-838),持续开展了热声疲劳问题研究并取得了一定的成果^[10]。1989—1990年,Anamet试验室开发了一套计算程序用于预测金属和复合材料结构壁板在复杂动载荷(声、气动力、热环境)下的寿命和可靠性,为新一代飞机在严酷声、气动力和热环境下的非线性特性预估奠定了基础^[11]。1990年,Ng等^[12]编制了用于分析飞机结构热响应的简化程序,开展了铝板在热辐射和基础激励下的试验,根据理论和试验结果推断了热屈曲板声响应的重要特征。Leung等^[13]利用全息量度和温度测定技术研究了热—声场的耦合机理,重点关注与声强相关的热传导率、声驻波场的固有频率和重力效应。

1991年,Ng等^[14]研制了一套热声疲劳设备用以研究屈曲铝板在热和声载荷下的随机响应,将板暴露在声压级为160 dB和温度为121 °C的环境中,分析了热边界条件对板的温度分布、屈曲变形、共振频率和随机响应的影响。1993年,Lee^[15]通过研究发现,高温下板壳振动特性的分析必须考虑三种热效应:一是由于均匀板温度导致的整体膨胀;二是表面温度变化引起的局部膨胀;三是沿厚度方向温度梯度引起的热矩;前两种热效应会增加影响热屈服的刚度,第三种会对热载荷产生影响。1992年,为了开展空天飞机或其他高速飞机部件的热声疲劳试验,NASA兰利中心研制了一套热声疲劳试验设备(TAFA),属于切向入射高强行波管,可实现加温至1 093 °C,同时总声压级可达168 dB^[16]。1993年,Jacobs等^[17]对陶瓷基复

合材料试件和全尺寸壁板进行了试验分析,以验证运用试件高温随机疲劳数据和有限元仿真技术预估全尺寸板热一声疲劳试验结果的可行性,在超过 538 °C 的温度下完成了静载荷试验、低频疲劳试验、试件随机疲劳试验和全尺寸壁板声疲劳试验,结果表明该技术能够预测声疲劳失效时间。Blevins 等^[18]通过热—振—声分析指出,高超声速飞行器壁板承受的温度超过 1 480 °C、总声压级超过 170 dB,发动机噪声和激波冲击引起的载荷是跨大气层飞行器壁板的设计载荷。Rizzi^[19]回顾了 NASA 兰利中心关于高超声速飞行器结构动态响应和声疲劳的试验研究,包括试验设备能力和试验结果。1994 年, Vaicaitis^[20]针对空天飞机热防护结构,采用时域蒙特卡洛法分析了板壳结构的非线性响应和声疲劳问题。1995 年, Mei 等^[21]研究了层合板在声热组合载荷下随机响应的时域分析方法,利用冯·卡门大变形理论建立应变和位移的关系,建立了一种综合冯·卡门应变和一阶剪切变形板理论的有限元模型,说明了不同工况下的数值计算结果。1996 年, Murphy 等^[22-23]针对热声激励下的动态响应问题,运用 9 阶空间模态、非理想边界条件并引入初始缺陷建立了一种理论模型,基于多种参数(时间历程、功率谱密度和自相关函数)分析响应特征,在参数空间内采用跳变和非跳变的边界分割区域表征跳变振荡的可能性,探讨了单频声和随机声作用下板的非线性特征,开展了固支矩形板在热载荷和强声激励下动态跳变的试验,理论与试验结果相吻合,验证了所提模型的可行性。国外 20 世纪 70—90 年代的热声疲劳试验发展历程如图 1 所示。



图1 国外热声疲劳试验发展历程
Fig. 1 Development history of foreign thermoacoustic fatigue test

21 世纪以来,国外针对热声疲劳的研究热度不减。2000 年, Chilakamarri 等^[24]建立随机疲劳损伤累积模型以研究板在高热和强声载荷下的随机跳变响应,根据跳变直线与安全设置边界的交点估计失效疲劳时间。Mei 等^[25]回顾了飞机壁板非线性随机振动的分析方法,提出了一种有效的有限元模态公式用来预计壁板在强声压水平和高温下的响应,分析了模态数目、网格尺度、积分步长对响应计算精度的影响。2003 年, Dhainaut 等^[26]提出了一种有限元法来预测各向同性材料或复合材料薄壁板在强噪声载荷和高温环境下的非线性随机响应,利用层合板理论和冯·卡门大变形关系式推导各向异性层合板在声—热组合载荷下的非线性运动方程,对比了已有的线性和非线性算法,分析了非线性模态刚度矩阵和随机载荷的仿真精度。美国亚利桑那州大学提出一种新的概率密度函数参数化模型^[27-29],用来预估飞机壁板结构在强随机声激励和定常热效应下的疲劳寿命。2008 年, Ibrahim 等^[30]研究了形状记忆合金混合复合材料板在热和随机声载荷作用下的动态响应和热屈曲,分析了形状记忆合金纤维嵌入、声压级和环境温度对壁板响应的影响。2009 年,美国罗尔工业公司、麦道公司和科学应用国际公司开展了高超声速飞行器结构热—振—声载荷和疲劳项目研究,第一阶段评估了高超声速飞行器的不同布局,识别出高温和振动声载荷导致的潜在疲劳问题;第二阶段针对一种通用的弯曲翼身升力体飞行器开展研究,结果表明气动声是机身过渡段、安定面和喷管外壳等壁板结构的设计载荷^[1]。该项目所研究的高超声速飞行器表面的温度分布和总声压级分布如图 2~图 3 所示。

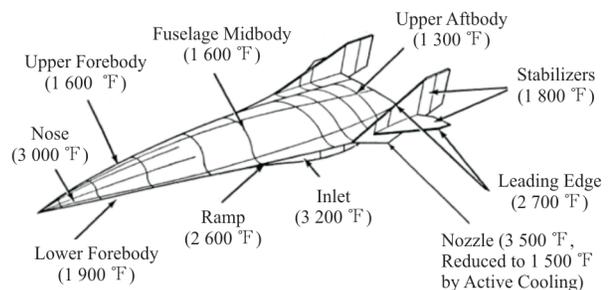
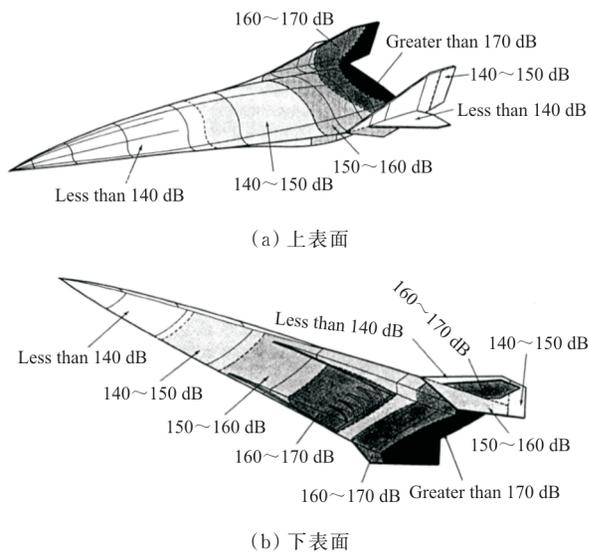
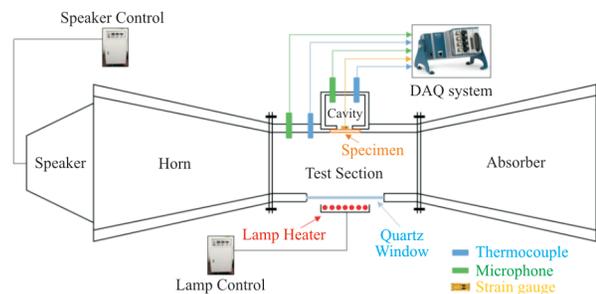


图2 表面温度分布^[1]
Fig. 2 Skin surface temperature distribution^[1]

图3 上下表面总声压级分布^[1]Fig. 3 Overall sound pressure levels distribution on upper surface and lower surface^[1]

2010年,ATA公司在Wright-Patterson空军试验室的委托下,利用Abaqus软件开展了高超声速飞行器在脉动压力作用下壁板的跳变屈曲研究,捕捉到了两种稳定屈曲平衡位置之间的跳变响应现象^[31]。Ibrahim等^[32]针对热声载荷作用下功能梯度材料板结构的非线性随机响应,建立一套非线性有限元模型,根据一阶剪切变形板理论、冯·卡门几何非线性和虚功原理推导出控制方程,采用Newton-Raphson迭代法和Newmark隐式积分算法计算每个时间步长下的动态响应,并研究体积分数指数、温度、声压水平对板响应的影响。2013年,波音公司和美国空军研究实验室(AFRL)开展了用于高超声速飞行器设计的产品结构分析方法研究,重点是识别和确定目前高超声速飞行器结构响应和寿命预测在设计环境、高温材料行为和分析手段上存在的不足。该项目的第一阶段通过分析高超声速基准飞行器在典型飞行阶段设计载荷和热环境、热和应力,识别出其中的技术难点;第二阶段通过对四种飞行器壁板进行详细设计和分析,证实这些技术难点^[33]。2018年,Picelli等^[34]通过形状优化提出了声-热载荷条件下结构的设计方法,仿真分析了两边固支钛合金梁在声压140 dB试验风洞中的响应,研究发现热-声非线性耦合效应主要影响高频段响应。近年来,韩国忠南大学的Kim等^[35-38]针对高超声速飞行器声

热问题,开展了蒙皮和壁板结构在热声载荷下性能和疲劳寿命分析与试验。采用一阶剪切变形板理论(FSDT)、冯·卡门几何非线性公式并兼顾复合材料薄板和厚板特性来构建结构模型,运用一阶活塞理论建立超声速气流引起的气动载荷,利用零均值、非均匀幅值的高斯白噪声压力表征随机声载荷,开展了不同载荷工况下的非线性动力学分析。他们还设计加工了一套用于模拟热声载荷的试验设备,如图4所示,开展了钛合金试验件的热声疲劳试验,通过对比试验结果和有限元分析结果验证了分析模型的有效性。

图4 热声疲劳试验装置示意图^[38]Fig. 4 Schematic of thermal acoustic fatigue apparatus^[38]

从国外研究现状来看,通常运用FSDT、层合板理论和冯·卡门大变形公式来建立结构数学模型;仿真或试验温度可达2 000 °C,总声压级在175 dB以内;研究对象涉及飞行器金属(铝、钛)和复合材料(石墨环氧、陶瓷基、功能梯度)等结构;分析结果包括热屈曲、热模态、热响应和热疲劳等。此外,国外注重热声响应与疲劳分析工具的开发和专用试验设备的研制,典型的热声试验设备如图5所示;并且先后成立了多个热声疲劳研究项目,支持了该技术领域的快速发展。



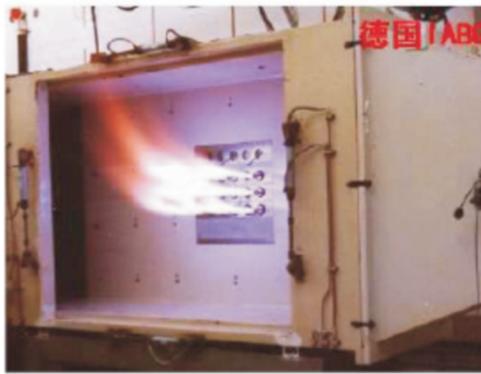
(a) 美国 NASA Langley



(b) 美国 AFRL



(c) 英国 BAE



(d) 德国 IABO

图5 国外热声试验设备^[39]Fig. 5 Foreign thermal acoustic facilities^[39]

2 国内研究现状

国内在结构热声疲劳领域的研究虽然起步较晚,但进展迅速,本节分单位对研究现状进行论述。

北京强度环境研究所的吴振强等^[39]在20世纪90年代初期开展了火箭底遮板热噪声环境的气动模拟试验,考核结构在热噪声组合环境下结构的完整性,积累了许多宝贵的经验。中国船舶科学

研究中心的程昊等^[40]为了研究不同边界条件对壁板结构动力学特性的影响,分别针对螺栓、盖板等不同安装条件开展热模态试验,分析安装边界对复合材料壁板热模态参数的影响。刘宝瑞等^[41]建立了复合材料舵结构热噪声试验系统热分析模型,实现了热噪声试验系统中导热、辐射、自然对流、强迫对流等多种传热方式的综合高效分析。吴振强等^[42]总结了高速飞行器热噪声载荷和热防护结构特点,阐述了热噪声强度问题,归纳了热噪声试验的进展,在常温和热环境下开展了典型C/SiC平板噪声激励下振动响应和失效试验,获得了复合材料平板的振动响应规律,揭示了热噪声载荷下陶瓷基复合材料壁板的失效机理。张部声等^[43]以某型钛铝合金航空发动机叶片为对象,研究了叶片高温高周振动疲劳实验时应力监测、高频激励等问题。张正平在2020年出版了专著《飞行器结构热噪声强度基础》^[44],从载荷环境特点、高温结构动力学特性与响应分析、失效机理、试验技术、疲劳寿命预示和动强度设计等方面进行综合论述,对高超声速飞行器结构设计具有重要应用价值。

20世纪末,中国飞机强度研究所的葛森等^[45-47]提出一种在振动台上增加加热装置来测试材料高温声疲劳S-N曲线的方法,论述了飞机发动机部位常用典型壁板结构的高温声疲劳试验,给出了GH140材料典型壁板结构的试验结果。21世纪以来,张维等^[48]采用顺序耦合法分析了典型金属翼盒结构在热环境下的随机振动响应,获得了振动模态、功率谱密度响应和均方根应力等计算结果,与试验结果在低频段吻合较好,在高频段存在一定误差,并探讨了误差产生的原因。邹学锋等^[49]构建了一套基于多系统集成与控制的“热—力—振动—噪声”多场试验方法与平台,试验结果表明,多场联合环境下结构的响应水平较高,更容易发生破坏,同时验证了多场联合试验技术的可行性和有效性。周红卫等^[50]基于非线性模态降阶法(NLROM)研究了薄板结构在热声联合载荷下的振动响应,并对比了NLROM与商业软件Abaqus的求解精度和效率;另外,该科研团队还开展了简化喷管结构的仿真分析和试验验证,分别完成室温和450℃下的试验,利用Abaqus对试验状态进行分析,结果表明:室温环境下,模态频率分析结果与试验结果基本吻合,振动响应的相

对误差小于 15%；热声环境下振动响应受温度分布影响显著，在假设的温度分布下，模态频率和振动响应的分析结果与试验结果的相对误差均小于 15%^[51]。

北京卫星环境工程研究所的 Yao Z M 等^[52-53]设计了一套用于模拟热—声—振耦合载荷的试验装置，如图 6 所示，根据应变试验数据研究了热—声—振耦合下的响应特征；利用 Ansys-workbench 软件建立考虑声—振耦合和材料参数受温度影响的有限元模型，计算压气机叶片的应力和应变频率响应，计算结果和试验结果基本吻合，该项工作有助于揭示叶片在热—声—振耦合载荷下的失效机理。

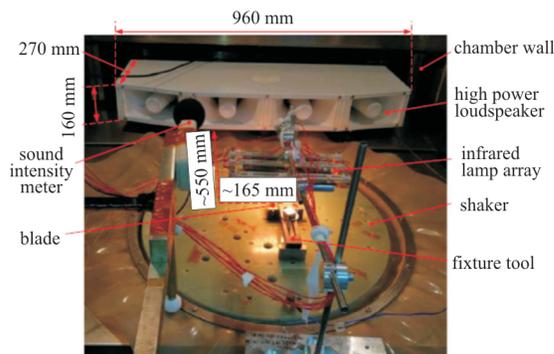


图 6 热—声—振耦合试验装置^[53]

Fig. 6 Thermo-acoustic-vibration-combined test equipment^[53]

中国航发研究院的张东明等^[54]提出了一种用于航空发动机涡轮叶片在高温(900 °C)下振动疲劳试验的新方法，由电感应加热法施加高温环境，由电磁振动台施加振动载荷，解决了电感应加热法实施过程中的一系列问题。Yu W J 等^[55]提出一种控制导向模型，模拟了高超声速飞行器热防护系统试验中的热传导动力学问题，该模型适用于在可加热行波管中的热—声疲劳试验，有利于理解声学 and 热动力学复杂的耦合机理。魏巍等^[56]以航空发动机的燃烧室火焰筒为研究对象，分析了其振动特性和声学特性，获得了其在常温常压和高温高压下的结构与声学模态特性，火焰筒声学振动模态主要包括轴向振动、周向振动以及两种振动形式的叠加，且在高温高压环境下声学模态频率明显提高，结构模态与声学模态存在耦合，导致火焰筒壁面出现共振疲劳损坏。

北京机电工程研究所的王晓飞等^[57]以典型 C/SiC 蒙皮骨架构件为试验对象，利用行波管开展热

声试验，揭示了热声复合环境下构件的失效模式，验证了构件的热声环境适应性。该行波管热声试验系统如图 7 所示，主要包括行波管、加热系统、监测系统 etc。



图 7 行波管热声试验系统^[57]

Fig. 7 Progressive wave tube thermal-acoustic test system^[57]

在国内高校中，沈阳航空航天大学对热—声—固耦合问题的研究较为丰富和深入。其中，艾延廷教授团队^[58-68]针对航空发动机燃烧室，开展了热—声—固耦合试验装置设计、结构振动响应计算、热—声—结构耦合特性仿真分析与试验研究，对发动机燃烧振荡机理及其抗热—声—固耦合疲劳设计具有重要的应用参考价值。该团队完成了燃烧室结构段试验件的声激励空腔模态试验，试验件及试验现场布置如图 8 所示。



(a) 试验件

(b) 试验现场布置

图 8 燃烧室结构段试验件和试验现场^[63]

Fig. 8 Specimens for testing and overall layout^[63]

沙云东教授团队^[69-106]自 2007 年以来对航空薄壁结构在热声耦合环境下的振动特性、动态响应和疲劳寿命分析与验证开展了大量研究，涵盖金属材料(2024-T3 型铝合金^[72,77]、GH188^[95-96])和复合材料(C/C^[70]、石墨环氧树脂基^[71]、C/SiC^[91])。采用结构—声耦合理论^[84]，利用工程分析方法^[69]、等价线性化方法^[81]、PDE/Galerkin 方法^[73]、扩展非

线性时域 Monte Carlo 法^[74]、FEM 法^[83,101]和 FEM/BEM 耦合方法^[89,94]等求解动态响应,依据 von Karman 大挠度理论,建立薄壁结构在热声载荷环境下的非线性挠度方程^[75,80],揭示了预屈曲和后屈曲区域应力的变化规律^[87,93]。基于 Miner 线性累积损伤理论^[76,97],利用概率密度法^[78]、雨流计数法^[79,82]、功率谱密度法^[92]等估算疲劳寿命,研究平均应力模型的适用性^[85,89]和敏感参数的影响规律^[104-106]。开展“舌头板”薄壁结构^[86,98]和 GH188 板^[88,99]的热声疲劳试验以及典型元件的热振疲劳试验^[103],得到了超耐热合金薄壁结构在 450 °C 下的 S-N 曲线^[100],验证了热声响应与疲劳寿命计算方法和模型的有效性^[102]。高温合金 GH188 平板结构热声试验现场如图 9 所示,由行波管施加声激励,由加热灯箱施加热载荷,测量了试验件的动态应变和加速度响应。

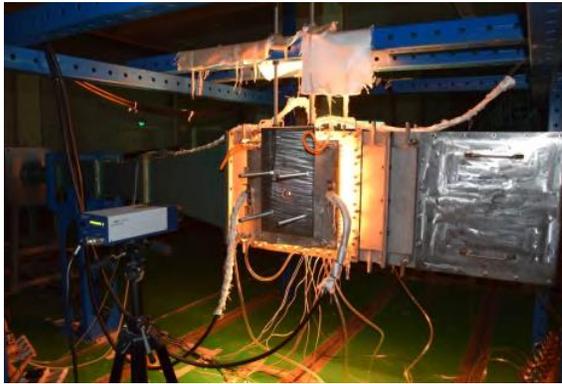


图9 GH188平板热声试验现场^[88]
Fig. 9 Thermal-acoustic test of GH188 plane^[88]

国内其他一些高校也对结构热—声—振问题开展了研究,包括:中国科学技术大学、西北工业大学、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、北京理工大学、东南大学、南昌航空大学等。中国科学技术大学的王晨^[107-109]针对典型结构的热—声—振耦合及疲劳失效问题,探究如何获取较高精度的耦合损耗因子,利用有限元法、统计能量法分析了高温环境对铝合金壁板声振响应和疲劳寿命的影响,结果表明热效应下铝合金材料的疲劳特性是影响壁板疲劳寿命的关键因素。西北工业大学贺尔铭教授团队^[110-113]研究了薄壁结构在热声载荷下的非线性振动响应和疲劳寿命、功能梯度材料(FGM)板三维层合模型及热—噪声载荷下的动态响应、考虑后屈曲的二维 C/SiC 复合材料板热振动特性、高温环境下二维正交编织 C/SiC 复合材

料壁板振动模态演化规律等。哈尔滨工业大学的曹登庆教授团队^[114-116]、于开平教授团队^[117]开展了弹性支承复合材料壁板热振研究、热声载荷下螺栓连接复合材料壁板非线性振动响应分析、高速飞行器热防护结构振动疲劳分析等,建立了一种弹性约束复合材料层合板在热声载荷下非线性随机响应的预测方法,总结出一套基于有限元法并且适合工程应用的建模、响应分析以及疲劳寿命预计的流程。哈尔滨工程大学的崔晓航^[118]根据热载荷、离心载荷和压力载荷等多轴载荷作用时的不同情况,分析了燃气轮机叶片的振动,获得其激振许用循环次数和涡轮叶片的疲劳寿命,以及不同载荷工况对叶片疲劳寿命的影响规律;林叶丰^[119]依据冯·卡门几何非线性理论,采用有限元法研究了薄壁结构的热屈曲现象,在此基础上分析了热屈曲对结构振动特性的影响,计算了热声耦合环境下结构的非线性动态响应,研究发现温度升高及声载荷增强会显著增大动态响应位移和应力,导致结构疲劳寿命大幅降低。北京理工大学的刘刘教授团队^[120-121]、雷娟棉教授团队^[122]针对高超声速飞行器开展了热环境下热防护结构动响应行为研究、热环境下薄板随机动响应统计行为研究及疲劳寿命预测,建立了一套相似换算定律,利用超声速风洞试验预测由壁面脉动压力和热载荷引起的结构振动。东南大学的周亚东^[123-124]研究了变温条件下和热声振耦合环境下陶瓷基复合材料薄壁结构的疲劳寿命预计技术,结合理论和仿真手段开展热声疲劳分析方法、声疲劳的频率效应、薄壁结构件的设计等问题研究,发现了复合材料薄壁结构热声振疲劳的一些特有现象和规律。南昌航空大学的刘文光教授团队^[125-127]针对考虑温度影响下结构振动疲劳寿命估算、热环境下飞行器壁板的振动疲劳分析、FGM 壳的振动特性及裂纹扩展分析等问题开展了研究,发现热膨胀应力和温度梯度导致的弯曲应力是影响结构振动疲劳寿命的主要因素。

从国内研究现状来看,在方法层面主要继承了国外热声分析理论,通常采用商用有限元软件(Abaqus、Nastran 或 Ansys)开展结构热声相关问题的仿真分析;仿真或试验温度在 1 000 °C 左右,总声压级可达 165 dB 以上;研究对象主要为金属或复合材料元件级或组件级(壁板、叶片)结构;尚未查到有关热声响应与疲劳分析软件及大型热声试

验专用设备的公开报道。

3 总结与展望

从上述文献综述来看,为了促进高精尖航空航天装备(高超声速飞行器、空天飞机、隐身飞机、先进发动机等)的发展,热声环境下结构疲劳问题自 20 世纪 70 年代起一直是研究的热点。研究者们不断提出新的理论方法,开发新的分析工具,研制新的试验设备,完善设计与评估体系。相信随着科技的进步,热声疲劳分析技术会向着精度和效率更高的方向发展,试验验证技术也会向着适用范围更广的方向进步。同时也应看到,国内相比国外在技术水平上仍然存在一定的差距,主要包括:缺少理论方法的突破,结构热声耦合理论和疲劳损伤模型等主要依据国外已有理论;暂无自主研发的成熟度较高的分析工具,仿真分析往往借助国外商用工程软件;缺乏大型可满足工程需求的热声疲劳试验设备,例如英、美、俄等国的热声试验设施试验段尺寸可达 1.2 m,而国内试验平台相对较小^[128];实际应用中的结构多场耦合设计评估体系也不完善,需要在型号研制、标准规范、专业发展方面多加探索^[128]。因此,我国亟需大力发展热声疲劳理论研究、仿真分析和试验技术。

尽管国内外的研究人员及研究机构针对结构的热响应计算与疲劳寿命预测已经做了大量研究并发表了许多具有建设性的研究成果,但仍有一些关键问题需要解决,主要包括:1) 在理论方面,关注热对结构刚度影响的研究较多,而对热致阻尼、热梯度效应以及热声疲劳失效模式和机理的探索不够;2) 在仿真方面,针对热力固耦合、热流固耦合、热声固耦合、热振固耦合的数值模拟已实现,但符合工程需求的多场耦合仿真以及综合损伤评定技术成熟度仍显不足;3) 在试验方面,通常开展元件、壁板组件或部件局部结构的热声疲劳试验,尚缺少大型全尺寸结构的试验研究。

为了解决目前飞行器热声疲劳分析与验证所面临的实际工程问题,建议后续针对以下方面开展进一步的研究:1) 精准预测热声动态载荷,以实现热环境下复杂流场的高精度预测,为编制热声载荷谱提供输入;2) 编制热声疲劳载荷谱,探索基于损伤等效的多工况热声载荷谱的归一谱和疲劳试验加速谱,为结构热声疲劳分析和验证提供输

入;3) 持续深化多场耦合分析技术,提升非正常与非线性分析理论,建立更加精细与高效的一体化模型;4) 预计承载薄壁结构热声耦合损伤,辨识复杂薄壁结构的热声疲劳失效模式和机理,构建准确高效的寿命预估模型;5) 建立常用航空航天材料以及新材料的高温动态疲劳性能数据库,为预计结构热声疲劳寿命提供基础数据;6) 研制大尺寸高热强声(尺寸 2 m 级、声压级 180 dB、温度 2 000 °C)耦合环境模拟装置,以支持大型飞行器结构在极端热声环境下的疲劳损伤演化试验;7) 关注整个服役期内飞行器金属结构或复合材料结构所面临热环境的差异(中温、高温、超高温),建立适用于不同温度范围的热—声—振等多场疲劳评估技术。

参考文献

- [1] BLEVINS R D, BOFILIOS D, HOLEHOUSE I, et al. Thermo-vibro-acoustic loads and fatigue of hypersonic flight vehicle structure: AFRL-RB-WP-TR-2009-3139 [R]. Ohio: Air Force Research Laboratory, 2009.
- [2] 扬子晚报. B-2 轰炸机大半开了裂[EB/OL]. (2002-03-21)[2024-02-18]. <https://news.sina.cn/sa/2002-03-21/detail-ikkntiak6964493.d.html>. Yangtze Evening News. Most of B-2 bomber cracked[EB/OL]. (2002-03-21)[2024-02-18]. <https://news.sina.cn/sa/2002-03-21/detail-ikkntiak6964493.d.html>. (in Chinese)
- [3] 百度文库. 诺斯罗普 B-2“幽灵”轰炸机的诞生[EB/OL]. (2008-02-23)[2024-02-18]. <https://wk.baidu.com/view/cc7207fb657d27274b73f242336c1eb91b339b?pcf=2.html>. Baidu Wenku. The birth of Northrop B-2 'Spirit' stealth bomber [EB/OL]. (2008-02-23)[2024-02-18] <https://wk.baidu.com/view/cc7207fb657d27274b73f242336c1eb91b339b?pcf=2.html>. (in Chinese)
- [4] 艾思泽. 热—声—流—固耦合作用下薄壁结构疲劳寿命预估[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019. AI Size. Fatigue life prediction of thin-wall structures under thermal-acoustic-flux-solid interaction [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019. (in Chinese)
- [5] HIEKEN M H, NOONAN W E, SHROYER E F. Sonic fatigue test methods at elevated temperatures: AFFDL-TR-73-8[R]. US: Air Force Flight Dynamics Laboratory, Air Force Systems Command, Wright-Patterson Air Force Base, 1973.
- [6] SCHNEIDER C W. Acoustic fatigue of aircraft structures at elevated temperatures: AFFDL-TR-73-155 [R]. Bethesda: Lockheed-Georgia Company, 1974.

- [7] MAEKAWA S. On the sonic fatigue life estimation of skin structures at room and elevated temperatures[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1982, 80(1): 41-59.
- [8] SOOVERE J. The effect of acoustic/thermal environments on advanced composite fuselage panels[J]. *Journal of Aircraft*, 1985, 22(4): 257-263.
- [9] JACOBSON M J. Sonic fatigue of advanced composite panels in thermal environments[J]. *Journal of Aircraft*, 1983, 20(3): 282-288.
- [10] MEI C. Prediction of response of aircraft panels subjected to acoustic and thermal loads; no report number, Old Dominion University: 23529-0247[R]. Norfolk: Dominion University, 1992.
- [11] ARNOLD R R, VAICAITIS R. Nonlinear response and fatigue of surface panels by the time domain Monte Carlo approach: WRDC-TR-3081[R]. [S. l.]: Anamet Laboratories Inc., 1992.
- [12] NG C, WENTZ K. The prediction and measurement of thermoacoustic response of plate structures[C]// 31st Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Long Beach, CA, USA: AIAA, 1990: 988-991.
- [13] LEUNG E W, BAROTH E, CHAN C K, et al. Thermal acoustic interaction and flow phenomenon[C]// AIP Conference Proceedings. Monterey, California (USA): AIP, 1990: 1-10.
- [14] NG C F, CLEVENSON S A. High-intensity acoustic tests of a thermally stressed plate[J]. *Journal of Aircraft*, 1991, 28(4): 275-281.
- [15] LEE J. Large-amplitude plate vibration in an elevated thermal environment[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1993, 46(11S): S242-S254.
- [16] CLEVENSON S A, DANIELS E F. Capabilities of the thermal acoustic fatigue apparatus: NASA-TM-104106[R]. Washington D. C.: NASA, 1992.
- [17] JACOBS J, GRUENFELDER C, HEDGECKOCK C. Thermal-acoustic future fatigue of ceramic matrix composite materials[C]// 34th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. La Jolla, CA, USA: AIAA, 1993: 1319-1328.
- [18] BLEVINS R D, HOLEHOUSE I, WENTZ K R. Thermoacoustic loads and fatigue of hypersonic vehicle skin panels[J]. *Journal of Aircraft*, 1993, 30(6): 971-978.
- [19] RIZZI S. Experimental research activities in dynamic response and sonic fatigue of hypersonic vehicle structures at NASA Langley Research Center[C]// 31st Aerospace Sciences Meeting. Reno, NV, USA: AIAA, 1993: 383-397.
- [20] VAICAITIS R. Nonlinear response and sonic fatigue of National Aerospace Space Plane surface panels[J]. *Journal of Aircraft*, 1994, 31(1): 10-18.
- [21] MEI C, MOORTHY J. Numerical simulation of the nonlinear response of composite plates under combined thermal and acoustic loading: NASA-CR-197426[R]. Hampton: NASA, 1995.
- [22] MURPHY K D, VIRGIN L N, RIZZI S A. Characterizing the dynamic response of a thermally loaded, acoustically excited plate[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 196(5): 635-658.
- [23] MURPHY K D, VIRGIN L N, RIZZI S A. Experimental snap-through boundaries for acoustically excited, thermally buckled plates[J]. *Experimental Mechanics*, 1996, 36(4): 312-317.
- [24] CHILAKAMARRI K B, LEE J. Thermal-acoustic fatigue damage accumulation model of random snap-throughs[C]// 8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability. South Bend: PMC, 2000: 1-6.
- [25] MEI C, DHAINAUT J M, DUAN B, et al. Nonlinear random response of composite panels in an elevated thermal environment: AFRL-VA-WP-TR-2000-3049[R]. Norfolk: Old Dominion University, 2000.
- [26] DHAINAUT J M, GUO X Y, MEI C, et al. Nonlinear random response of panels in an elevated thermal-acoustic environment[J]. *Journal of Aircraft*, 2003, 40(4): 683-691.
- [27] KIM K, YANG B, MIGNOLET M P. Fatigue Life prediction of panels subjected to thermo-acoustic loading[C]// SDM-51: Plate Dynamic Problems. Norfolk, Virginia: ARC, 2003: 1-9.
- [28] CHEN P C, GAO X W, LIU D. Rapid fatigue life projection for thermal and acoustic loads: AFRL-VA-WP-TR-2003-3063[R]. [S. l.]: Zona Technology Inc., 2003.
- [29] RADU A, KIM K, YANG B, et al. Prediction of the dynamic response and fatigue life of panels subjected to thermo-acoustic loading[C]// 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference. Palm Springs, California, USA: AIAA, 2004: 1557.
- [30] IBRAHIM H H, TAWFIK M, NEGM H M. Thermoacoustic random response of shape memory alloy hybrid composite plates[J]. *Journal of Aircraft*, 2008, 45(3): 962-970.
- [31] MISKOVISH R S, SHAH D P. Predicting snap-through of a thin-walled panel due to thermal and acoustic loads[C]// 2010 SIMULIA Customer Conference. San Diego, California: ATA Engineering, 2010: 1-15.
- [32] IBRAHIM H H, YOO H H, TAWFIK M, et al. Thermoacoustic random response of temperature-dependent functionally graded material panels[J]. *Computational Mechanics*, 2010, 46(3): 377-386.
- [33] TZONG G T, LIGUORE S L. Verification studies on hypersonic structure thermal/acoustic response and life prediction methods[C]// 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Boston, Massachusetts: AIAA, 2013: 1664-1682.

- [34] PICELLI R, KIM H A. Design optimization of an aircraft structure considering thermal-acoustic loads[C]// 2018 Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Atlanta, Georgia, USA: AIAA, 2018: 3883-3901.
- [35] KIM Y N, PARK J S, GO E S, et al. Nonlinear random response analyses of panels considering transverse shear deformations under combined thermal and acoustic loads [J]. Shock and Vibration, 2018(1): 15-31.
- [36] GO E S, KIM M G, KIM I G, et al. Fatigue life prediction in frequency domain using thermal-acoustic loading test results of titanium specimen[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(10): 4015-4024.
- [37] LEE H B, KIM Y N, CHOI I J, et al. Nonlinear dynamic responses of shear-deformable composite panels under combined supersonic aerodynamic, thermal, and random acoustic loads[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2020, 21(3): 707-722.
- [38] GO E S, KIM M G, MOON Y S, et al. Experimental study on dynamic behavior of a titanium specimen using the thermal-acoustic fatigue apparatus[J]. Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 2020, 48(2): 127-134.
- [39] 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, REN Fang, ZHANG Wei, et al. Research advances in thermal-acoustic testing of aircraft structures [J]. Missiles and Space Vehicles, 2010(2): 24-30. (in Chinese)
- [40] 程昊, 张正平, 李海波, 等. 边界条件对壁板结构热噪声试验影响研究[C]// 第十届动力学与控制学术会议论文集. 成都: 中国力学学会, 2016: 249-250.
CHENG Hao, ZHANG Zhengping, LI Haibo, et al. Study on the influence of boundary conditions on thermal noise testing of wall plate structures [C]// Proceedings of the 10th Conference on Dynamics and Control. Chengdu: CSTAM, 2016: 249-250. (in Chinese)
- [41] 刘宝瑞, 孔凡金, 程昊, 等. 热噪声试验条件下复合材料舵结构热变形分析[C]// 第三届中国国际复合材料科技大会. 杭州: 中国复合材料学会, 2017: 16-19.
LIU Baorui, KONG Fanjin, CHENG Hao, et al. Thermal deformation analysis of composite rudder structures under thermal noise test conditions [C]// The 3rd China International Conference on Composite Materials Technology. Hangzhou: Chinese Society for Composite Materials, 2017: 16-19. (in Chinese)
- [42] 吴振强, 任方, 程昊, 等. 陶瓷基复合材料薄壁结构热噪声强度问题研究[C]// 第二十一届全国复合材料学术会议. 呼和浩特: 中国航空学会, 2020: 50.
WU Zhenqiang, REN Fang, CHENG Hao, et al. Research on the thermal noise intensity of thin wall structure of ceramic matrix composite material [C]// The 21st National Conference on Composite Materials. Hohhot: CAAC, 2020: 50. (in Chinese)
- [43] 张部声, 祝济之, 史剑, 等. 某型钛铝合金航空发动机叶片高温高周振动疲劳实验[J]. 航空动力学报, 2020, 35(6): 1169-1175.
ZHANG Busheng, ZHU Jizhi, SHI Jian, et al. Test of vibration fatigue for the TiAl alloy aeroengine blade at high temperature and high cycle [J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(6): 1169-1175. (in Chinese)
- [44] 张正平. 飞行器结构热噪声强度基础[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
ZHANG Zhengping. Fundamentals of thermal noise intensity in aircraft structure [M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [45] 葛森, 曹琦, 邵闯, 等. 一种获得高温声疲劳 S-N 曲线的新方法[J]. 航空学报, 1997, 18(1): 75-77.
GE Sen, CAO Qi, SHAO Chuang, et al. New method for obtaining sonic fatigue S-N curves at elevated temperature [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1997, 18(1): 75-77. (in Chinese)
- [46] 葛森, 曹琦, 邵闯, 等. 飞机壁板结构的高温声疲劳试验方法[J]. 实验力学, 1997, 12(4): 109-114.
GE Sen, CAO Qi, SHAO Chuang, et al. Testing method for the sonic fatigue of aircraft panel structure at elevated temperature [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1997, 12(4): 109-114. (in Chinese)
- [47] 葛森. 飞机壁板高温声疲劳特性分析[D]. 西安: 西北工业大学, 1999.
GE Sen. Analysis of high temperature acoustic fatigue characteristics of aircraft panels [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1999. (in Chinese)
- [48] 张维, 邹学锋, 万春华. 热环境下薄壁结构随机振动响应分析[J]. 工程与试验, 2017, 57(4): 17-21, 73.
ZHANG Wei, ZOU Xuefeng, WAN Chunhua. Random vibration response analysis of thin-walled structure in thermal environment [J]. Engineering & Test, 2017, 57(4): 17-21, 73. (in Chinese)
- [49] 邹学锋, 郭定文, 燕群, 等. 飞行器结构热/力/振动/噪声多场试验方法与工程实践[C]// 中国航空学会声学分会 2020 年度线上学术交流会议论文集. 北京: 中国航空学会, 2020: 57.
ZOU Xuefeng, GUO Dingwen, YAN Qun, et al. Multi-field test method and engineering practice for thermal vibration and noise of aircraft structure [C]// 2020 Online Academic Exchange Meeting of the Acoustic Branch of the Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Beijing: CSAA, 2020: 57. (in Chinese)
- [50] 周红卫, 燕群, 邹学锋, 等. 热声联合载荷作用下薄板几何非线性振动分析方法研究[C]// 中国航空学会声学分会 2020 年度线上学术交流会议论文集. 北京: 中国航空学会, 2020: 52-53.

- ZHOU Hongwei, YAN Qun, ZOU Xuefeng, et al. Research on geometric nonlinear vibration analysis method of thin plate under combined thermo-acoustic load[C]// 2020 Online Academic Exchange Meeting of the Acoustic Branch of the Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Beijing: CSAA, 2020: 52-53. (in Chinese)
- [51] ZHOU H W, XIE L, GUO D W, et al. Analysis and experimental validation for a simplified flame tube subjected to combined thermal-acoustic loadings [M]. Singapore: Springer Singapore, 2021: 669-678.
- [52] YAO Z M, HUANG S Q, YANG J, et al. Experimental research on thermal-acoustic-vibration coupling effects of thin-walled blades [C]// 2019 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE). Zhangjiajie, China: IEEE, 2019: 161-166.
- [53] HUANG S Q, YAO Z M, LIU S W, et al. Experimental and simulation study on the response characteristics of engine blades under thermo-acoustic-vibration load [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2020, 142(4): 041013.
- [54] 张东明, 柳恩杰. 航空发动机涡轮叶片高温振动疲劳试验的新方法[J]. 航空发动机, 2005, 31(1): 18-21.
ZHANG Dongming, LIU Enjie. A new approach of the vibration endurance test at high temperature for engine turbine blade [J]. Aeroengine, 2005, 31(1): 18-21. (in Chinese)
- [55] YU W J, WANG X F, HUANG X. Dynamic modelling of heat transfer in thermal-acoustic fatigue tests [J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 71: 675-684.
- [56] 魏巍, 袁巍, 武昌耀. 某航空发动机环形燃烧室火焰筒振动与声学特性研究[C]// 第五届空天动力联合会议. 南京: 中国科协, 2020: 2285-2291.
WEI Wei, YUAN Wei, WU Changyao. Research on the vibration and acoustic characteristics of a toroidal combustor flame tube in an aeroengine [C]// The 5th Joint Conference on Aerospace Power. Nanjing: CAST, 2020: 2285-2291. (in Chinese)
- [57] 王晓飞, 王圣刚, 麻连净. 一种典型C/SiC构型件的热噪声声适应性试验研究[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(1): 46-49.
WANG Xiaofei, WANG Shenggang, MA Lianjing. Experimental research of thermal-acoustic adaptability of a typically-configured C/SiC specimen [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(1): 46-49. (in Chinese)
- [58] 潘宏刚, 艾延廷, 王成军. 航空发动机燃烧室模型热—声—固耦合试验装置设计研究 [J]. 科技信息, 2010(30): 526.
PAN Honggang, AI Yanting, WANG Chengjun. Design and study of thermal-acoustic-solid coupling test equipment for aeroengine combustion chamber model [J]. Science & Technology Information, 2010(30): 526. (in Chinese)
- [59] 郭晓玲. 声激励下的燃烧室模型结构振动响应计算[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.
GUO Xiaoling. Response calculation of the combustion chamber structure vibration under the acoustic excitation [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013. (in Chinese)
- [60] 艾延廷, 王昌旭, 郭晓玲. 燃烧室结构—声耦合特性研究 [J]. 中国机械工程, 2014, 25(15): 2008-2012.
AI Yanting, WANG Changxu, GUO Xiaoling. Vibro-acoustic coupling analysis of combustion chamber [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(15): 2008-2012. (in Chinese)
- [61] 艾延廷, 韩雷, 王昌旭. 燃烧室热—声—结构耦合特性研究 [J]. 机械设计与制造, 2014(12): 258-261.
AI Yanting, HAN Lei, WANG Changxu. Research on the characteristics of thermal-acoustic-structural coupling in a combustion chamber [J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(12): 258-261. (in Chinese)
- [62] 艾延廷, 韩雷, 许星元, 等. 燃烧室热—声—结构耦合数值研究 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(5): 155-161.
AI Yanting, HAN Lei, XU Xingyuan, et al. Numerical investigation of thermal-acoustic-structural coupling in combustion chamber [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(5): 155-161. (in Chinese)
- [63] 艾延廷, 刘晓振, 王成军, 等. 燃烧室热—声—固耦合数值模拟研究 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(6): 301-307.
AI Yanting, LIU Xiaozhen, WANG Chengjun, et al. Numerical investigation of thermal-acoustic-structural coupling in combustion chamber [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(6): 301-307. (in Chinese)
- [64] 刘晓振. 燃烧室热—声—固耦合数值模拟与试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2017.
LIU Xiaozhen. Numerical simulation and experiment investigation of thermal-acoustic-structural coupling in combustion chamber [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2017. (in Chinese)
- [65] 臧也. 燃烧室热—声—固耦合研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
ZANG Ye. Study on thermal-acoustic-structural coupling in combustion chamber [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018. (in Chinese)
- [66] 臧也, 田晶, 张凤玲, 等. 燃烧室热—声激励及响应的模拟研究 [J]. 沈阳航空航天大学学报, 2018, 35(2): 10-16.
ZANG Ye, TIAN Jing, ZHANG Fengling, et al. Simulation study on thermoacoustic excitation and response of combustion chamber [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2018, 35(2): 10-16. (in Chinese)
- [67] CHINA N P U, GUAN P, AI Y T, et al. Study on thermal-acoustic-structural performance of aeroengine combustor based on coupled-field technology [C]// Proceedings of Global Power & Propulsion Society. Beijing: GPPS, 2019: 1-6.

- [68] 杨光, 田晶, 艾延廷, 等. 热声激励下燃烧室热声固耦合特性数值研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2019, 36(3): 14-21.
YANG Guang, TIAN Jing, AI Yanting, et al. Numerical study on thermoacoustic of combustion chamber subjected to thermoacoustic excitation[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2019, 36(3): 14-21. (in Chinese)
- [69] 张春月, 沙云东, 苏志敏. 航空薄壁结构高温声疲劳应力工程分析方法[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2007, 24(1): 9-12.
ZHANG Chunyue, SHA Yundong, SU Zhimin. An analytical method response for the aircraft thin-wall structure in a combined thermal-acoustic environment [J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2007, 24(1): 9-12. (in Chinese)
- [70] 蒋娜娜, 沙云东, 鲍冬冬. 碳/碳复合材料薄壁结构在热声载荷作用下的动态响应[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2012, 29(3): 16-20.
JIANG Nana, SHA Yundong, BAO Dongdong. Dynamic response of C/C composite thin-walled structure under thermo-acoustic loadings [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2012, 29(3): 16-20. (in Chinese)
- [71] 鲍冬冬, 沙云东, 蒋娜娜. 复合材料薄壁结构在热声载荷作用下的非线性动态响应特性分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2013, 30(1): 39-42, 65.
BAO Dongdong, SHA Yundong, JIANG Nana. Analysis of nonlinear dynamic response of composite thin-walled structure under thermo-acoustic loadings [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2013, 30(1): 39-42, 65. (in Chinese)
- [72] 沙云东, 魏静, 高志军, 等. 热声激励下金属薄壁结构的随机疲劳寿命估算[J]. 振动与冲击, 2013, 32(10): 162-166, 197.
SHA Yundong, WEI Jing, GAO Zhijun, et al. Random fatigue life prediction of metallic thin-walled structures under thermo-acoustic excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(10): 162-166, 197. (in Chinese)
- [73] 沙云东, 魏静, 高志军, 等. 热声载荷作用下薄壁结构的非线性响应特性[J]. 航空学报, 2013, 34(6): 1336-1346.
SHA Yundong, WEI Jing, GAO Zhijun, et al. Nonlinear response characteristics of thin-walled structures under thermo-acoustic loadings[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(6): 1336-1346. (in Chinese)
- [74] 揭晓博. 热声载荷下复合材料薄壁结构非线性响应特性研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2014.
JIE Xiaobo. Research on nonlinear response characteristics of composite thin-walled structure subjected to thermo-acoustic loading[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2014. (in Chinese)
- [75] 朱林. 热声载荷下高温合金薄壁结构动态应力计算与分析[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2014.
ZHU Lin. Dynamic stress calculation and analysis of high temperature alloy thin-walled structures under thermo-acoustic loads[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2014. (in Chinese)
- [76] 蒋娜娜, 魏静, 鲍冬冬, 等. 薄壁结构在热声环境中随机疲劳寿命的估算[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2013, 30(1): 15-19.
JIANG Nana, WEI Jing, BAO Dongdong, et al. Fatigue life prediction of thin-walled structure under thermo-acoustic loadings [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2013, 30(1): 15-19. (in Chinese)
- [77] SHA Y D, WEI J, GAO Z J, et al. Nonlinear response with snap-through and fatigue life prediction for panels to thermo-acoustic loadings[J]. Journal of Vibration and Control, 2014, 20(5): 679-697.
- [78] 沙云东, 朱林, 栾孝驰, 等. 带有温度梯度的热载荷与声载荷作用下薄板动态响应[J]. 振动与冲击, 2014, 33(18): 102-109.
SHA Yundong, ZHU Lin, LUAN Xiaochi, et al. Dynamic response of thin plates under thermal loadings with temperature gradient and acoustic loadings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(18): 102-109. (in Chinese)
- [79] 冯飞飞. 热声载荷下复合材料薄壁结构随机疲劳寿命估算[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2014.
FENG Feifei. Estimation of the random fatigue life of composite thin-walled structures under thermo-acoustic Loadings [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2014. (in Chinese)
- [80] SHA Y D, ZHENG X Y. Response analysis of thin-walled structure under non-uniform temperature field and acoustic loads[C]// Proceedings of the 2015 International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics. Zhengzhou, China: Atlantis Press, 2015: 1-15.
- [81] 冯飞飞, 沙云东, 张国治, 等. 热声载荷下复合材料薄壁结构的随机疲劳寿命估算[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2015, 32(4): 24-29, 66.
FENG Feifei, SHA Yundong, ZHANG Guozhi, et al. Random fatigue life estimation of composite thin-walled structures under thermo-acoustic loadings [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2015, 32(4): 24-29, 66. (in Chinese)
- [82] 张国治, 沙云东, 朱林, 等. 热声载荷作用下薄壁壳结构非线性响应及疲劳寿命估算[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2015, 32(3): 18-24, 36.
ZHANG Guozhi, SHA Yundong, ZHU Lin, et al. Nonlinear response and fatigue life estimation of thin-shell structures under thermo-acoustic loads[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2015, 32(3): 18-24, 36. (in Chinese)
- [83] 朱林, 王晓飞. 热声载荷下高温合金薄壁结构非线性动态响应特性[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(3): 252-259.

- ZHU Lin, WANG Xiaofei. Characteristics of nonlinear dynamic response of high temperature alloy thin-walled structures under thermo-acoustic loadings [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2015, 32(3): 252-259. (in Chinese)
- [84] SHA Y D, WANG J. Nonlinear vibration response analysis and experimental verification of thin-walled structures to thermal-acoustic excitations [C]// *Proceedings of the 2016 4th International Conference on Machinery, Materials and Information Technology Applications*. Xi'an, China: Atlantis Press, 2016: 901-910.
- [85] SHA Y D, ZHU L, JIE X B, et al. Nonlinear random response and fatigue life estimation of curved panels to non-uniform temperature field and acoustic loadings [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2016, 22(3): 896-911.
- [86] 沙云东, 王建, 赵奉同, 等. 高温环境下薄壁结构声疲劳失效验证技术研究 [J]. *装备环境工程*, 2016, 13(5): 17-24. SHA Yundong, WANG Jian, ZHAO Fengtong, et al. Acoustic fatigue failure verification technology of thin-walled structure under high temperature environment [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2016, 13(5): 17-24. (in Chinese)
- [87] SHA Y D, WANG J. Nonlinear response analysis and experimental verification for thin-walled plates to thermal-acoustic loads [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(6): 1919-1930.
- [88] 王建, 沙云东. 薄壁结构在热声载荷下的疲劳寿命分析与试验验证 [J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2017, 30(3): 11-15, 5. WANG Jian, SHA Yundong. Fatigue life analysis and experimental verification of thin-walled structures under thermal-acoustic loads [J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2017, 30(3): 11-15, 5. (in Chinese)
- [89] 王建, 沙云东. 热声环境下薄壁加筋结构的振动响应研究与疲劳寿命分析 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(8): 71-79. WANG Jian, SHA Yundong. Vibration response research and fatigue life analysis of reinforced panels in thermal-acoustic environment [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(8): 71-79. (in Chinese)
- [90] 沙云东, 王建, 赵奉同, 等. 热声激励下高温合金薄壁结构振动响应试验验证与疲劳寿命预测 [J]. *推进技术*, 2017, 38(8): 1847-1856. SHA Yundong, WANG Jian, ZHAO Fengtong, et al. Vibration responses experimental verification and fatigue life prediction of superalloy thin-walled structures under thermal-acoustic excitations [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(8): 1847-1856. (in Chinese)
- [91] 白文君, 沙云东, 李华山, 等. 热声载荷下 C/SiC 层合薄板动态响应分析及寿命预测 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(10): 76-83. BAI Wenjun, SHA Yundong, LI Huashan, et al. Dynamic response analysis and fatigue life prediction of C/SiC thin laminated plate under thermal-acoustic loadings [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(10): 76-83. (in Chinese)
- [92] 王建, 沙云东, 赵奉同, 等. 热声载荷下薄壁开孔结构振动响应与寿命预估 [J]. *航空发动机*, 2017, 43(3): 24-31. WANG Jian, SHA Yundong, ZHAO Fengtong, et al. Vibration response analysis and fatigue life prediction of thin-walled structures with opening under thermo-acoustic loads [J]. *Aeroengine*, 2017, 43(3): 24-31. (in Chinese)
- [93] 沙云东, 王建, 赵奉同, 等. 热声载荷下薄壁结构振动响应试验验证与疲劳分析 [J]. *航空动力学报*, 2017, 32(11): 2659-2671. SHA Yundong, WANG Jian, ZHAO Fengtong, et al. Vibration response experimental verification and fatigue analysis of thin-walled structures to thermal-acoustic loads [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(11): 2659-2671. (in Chinese)
- [94] 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, 232. SHA Yundong, 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, 232. (in Chinese)
- [95] 栾孝驰, 胡翼飞, 沙云东, 等. 高温环境下薄壁结构声激励响应及疲劳分析与试验验证 [J]. *航空动力学报*, 2018, 33(11): 2561-2572. LUAN Xiaochi, HU Yifei, SHA Yundong, et al. Acoustic excitation response and fatigue life analysis and test verification of thin-walled structure under high temperature environment [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(11): 2561-2572. (in Chinese)
- [96] 沙云东, 胡翼飞, 胡增辉. 薄壁结构高温随机振动疲劳分析方法有效性验证 [J]. *推进技术*, 2018, 39(6): 1386-1395. SHA Yundong, HU Yifei, HU Zenghui. Random vibration fatigue analysis method valid verification of thin-walled structure under high temperature environment [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(6): 1386-1395. (in Chinese)
- [97] 王建, 沙云东, 杜英杰, 等. 热声复合环境下薄壁锥壳结构响应计算与疲劳寿命预估 [J]. *装备环境工程*, 2018, 15(12): 91-97. WANG Jian, SHA Yundong, DU Yingjie, et al. Response calculation and fatigue life prediction of thin-walled conical shell structures under thermal-acoustic complex environment [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, 15(12): 91-97. (in Chinese)
- [98] 栾孝驰, 沙云东, 胡翼飞. 稳态高温环境下薄壁结构声疲劳分析与试验验证 [J]. *战术导弹技术*, 2018(6): 35-43. LUAN Xiaochi, SHA Yundong, HU Yifei. Thin-walled

- panel structure acoustic fatigue analysis method experimental verification under steady state high temperature environment [J]. *Tactical Missile Technology*, 2018(6): 35-43. (in Chinese)
- [99] 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. (in Chinese)
- [100] WANG J, ZHAO F T, SHA Y D, et al. Fatigue life research and experimental verification of superalloy thin-walled structures subjected to thermal-acoustic loads [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(2): 598-608.
- [101] 沙云东, 艾思泽, 赵奉同, 等. 高速热流下薄壁结构声振响应分析及寿命预估[J]. *航空学报*, 2020, 41(2): 223327.
SHA Yundong, AI Size, ZHAO Fengtong, et al. Vibro-acoustic response analysis and fatigue life prediction of thin-walled structures with high speed heat flux [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(2): 223327. (in Chinese)
- [102] 张家铭. 航空薄壁结构非线性动力学分析与疲劳寿命预估 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2020.
ZHANG Jiaming. Nonlinear dynamic analysis and fatigue life prediction of aviation thin-walled structures [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2020. (in Chinese)
- [103] 沙云东, 艾思泽, 张家铭, 等. 热流环境下薄壁结构随机振动响应计算与疲劳分析[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(7): 1402-1412.
SHA Yundong, AI Size, ZHANG Jiaming, et al. Random vibration response calculation and fatigue analysis of thin-walled structures under heat flux environment [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(7): 1402-1412. (in Chinese)
- [104] 栾孝驰, 胡翼飞, 沙云东, 等. 薄壁结构在热—声—流动载荷作用下疲劳寿命预估[J]. *机械设计与制造*, 2020(2): 279-283, 287.
LUAN Xiaochi, HU Yifei, SHA Yundong, et al. Fatigue life prediction of thin-walled structures under thermal-acoustic-fluid loads [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(2): 279-283, 287. (in Chinese)
- [105] 张家铭, 沙云东, 艾思泽. 高温声载荷下火焰筒结构动力学响应特性分析[J]. *机械制造与自动化*, 2020, 49(6): 101-105.
ZHANG Jiaming, SHA Yundong, AI Size. Analysis of dynamic response characteristics of flame tube structures under acoustic loading and high temperature [J]. *Machine Building & Automation*, 2020, 49(6): 101-105. (in Chinese)
- [106] 沙云东, 杨延泽, 唐晓宁. 高温升环境下热端部件薄壁连接结构声疲劳强度分析与试验验证[J]. *推进技术*, 2022, 43(11): 342-354.
SHA Yundong, YANG Yanze, TANG Xiaoning. Acoustic fatigue strength analysis and experimental verification of thin-walled connection structures with hot sections under high temperature rise environment [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(11): 342-354. (in Chinese)
- [107] 王晨. 热效应对高频声振响应与疲劳寿命影响研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
WANG Chen. Study on the influence of thermal effect on high frequency acoustic vibration response and fatigue life [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [108] 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, 926.
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, 926. (in Chinese)
- [109] 王晨, 燕群, 陈海波, 等. 温度效应对壁板响应及疲劳寿命影响研究[J]. *计算机仿真*, 2019, 36(6): 68-72.
WANG Chen, YAN Qun, CHEN Haibo, et al. Influence of temperature effect on dynamic response and fatigue life of panel [J]. *Computer Simulation*, 2019, 36(6): 68-72. (in Chinese)
- [110] 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, 168.
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, 168. (in Chinese)
- [111] 贺尔铭, 胡亚琪, 张钊, 等. FGM板三维层合模型及热—噪声载荷下的动态响应研究[J]. *航空学报*, 2013, 34(6): 1293-1300.
HE Erming, HU Yaqi, ZHANG Zhao, et al. 3-D laminated model and dynamic response analysis of FGM panels in thermal-acoustic environments [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(6): 1293-1300. (in Chinese)
- [112] 贺尔铭, 陈兵, 张忠, 等. 考虑后屈曲的2D C/SiC复合材料板热振动分析[J]. *强度与环境*, 2016, 43(4): 49-56.
HE Erming, CHEN Bing, ZHANG Zhong, et al. Modal analysis of 2D C/SiC composite panels in thermal environment considering post buckling [J]. *Structure & Environment Engineering*, 2016, 43(4): 49-56. (in Chinese)
- [113] 贺尔铭, 陈兵, 曹存显. 高温环境下二维正交编织C/SiC复合材料壁板振动模态演化[J]. *航空学报*, 2017, 38(7): 220553.

- HE Erming, CHEN Bing, CAO Cunxian. Vibration mode evolution of 2D woven C/SiC composite panels in hot environment [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(7): 220553. (in Chinese)
- [114] 黄俊涛. 弹性支承复合材料壁板热振研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- HUANG Juntao. Study on thermal vibration of composite wallboard with elastic support[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [115] 彭佳琦. 热声载荷下螺栓连接复合材料壁板非线性振动响应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- PENG Jiaqi. Nonlinear vibration response analysis of bolted composite wallboard under thermoacoustic load [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [116] WANG Y L, CAO D Q, PENG J Q, et al. Nonlinear random responses and fatigue prediction of elastically restrained laminated composite panels in thermo-acoustic environments [J]. *Composite Structures*, 2019, 229: 111391.
- [117] 石乃文. 高速飞行器热防护结构振动疲劳分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- SHI Naiwen. Vibration fatigue analysis of thermal protection structure of high-speed aircraft [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [118] 崔晓航. 涡轮叶片热强度及疲劳寿命分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- CUI Xiaohang. Thermal strength and fatigue life analysis of turbine blades[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017. (in Chinese)
- [119] 林叶丰. 热噪声载荷作用下薄壁结构振动特性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- LIN Yefeng. Analysis of vibration characteristics of thin-walled structures under thermal noise load[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)
- [120] 吕冰洋. 热环境下热防护结构动响应行为研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- LYU Bingyang. Study on dynamic response behavior of thermal protection structure in thermal environment [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [121] 任健. 热环境下薄板随机动响应统计行为研究及疲劳寿命预测[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
- REN Jian. Study on statistical behavior of random dynamic response of thin plates in thermal environment and fatigue life prediction [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [122] ZHAO X J, CHEN H B, LEI J M, et al. A scaling procedure for measuring thermal structural vibration generated by wall pressure fluctuation [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(4): 815-825.
- [123] 周亚东, 吴邵庆, 李彦斌, 等. 变温条件下热结构的声疲劳寿命评估[J]. *工程力学*, 2015, 32(10): 220-225.
- ZHOU Yadong, WU Shaoqing, LI Yanbin, et al. Acoustic fatigue life assessment of hot structures under variable temperature conditions [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(10): 220-225. (in Chinese)
- [124] 周亚东. 热声振环境下复合材料薄壁结构疲劳评估问题研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- ZHOU Yadong. Study on fatigue evaluation of composite thin-walled structures under thermoacoustic vibration environment [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [125] 王佳莹. 考虑温度影响下结构振动疲劳寿命估算[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- WANG Jiaying. Estimation of structural vibration fatigue life considering temperature influence [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2012. (in Chinese)
- [126] 刘文光, 严斌, 郭隆清, 等. 热环境下飞行器壁板的振动疲劳分析[J]. *失效分析与预防*, 2014, 9(1): 1-5.
- LIU Wenguang, YAN Cheng, GUO Longqing, et al. Analysis on vibration fatigue of aircraft panel under thermal environment [J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2014, 9(1): 1-5. (in Chinese)
- [127] 严斌. 热环境下FGM壳的振动特性及裂纹扩展分析[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- YAN Cheng. Vibration characteristics and crack propagation analysis of FGM shell in thermal environment [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015. (in Chinese)
- [128] 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.
- ZOU Xuefeng, PAN Kai, YAN Qun, et al. Overview of dynamic strength of hypersonic vehicle structure in multi-field coupling environment [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2020, 31(12): 3-15. (in Chinese)

(编辑:马文静)