

热流环境下薄壁连接结构随机振动 响应数值计算

刘爽, 沙云东*

(沈阳航空航天大学 航空发动机学院, 沈阳 110136)

摘要: **目的** 研究薄壁连接结构在热流冲击和随机振动环境下的应力响应特性。**方法** 基于非线性大挠度振动理论进行薄壁结构高温随机振动响应分析, 同时开展热振联合试验。根据试验验证的计算分析方法及热-流-固耦合理论, 开展薄壁连接结构在热流冲击环境中的随机振动响应分析。**结果** 基频误差均小于4%, 轴向应力误差均小于2.4%。**结论** 随着温度升高, 薄壁连接结构应力响应峰值向左移动, 应力响应曲线趋势不发生改变。流速在100~140 m/s时, 对薄壁连接结构应力响应趋势的影响较小, 随着流速的增大, 结构应力相应数值有小幅增加。振动量级与薄壁连接结构轴向应力呈正相关, 且振动量级增加, 结构应力数值变化明显, 在150~450 °C对结构轴向应力的影响占主导地位。

关键词: 薄壁连接结构; 热流固耦合; 随机振动; 应力分布; 模态频率; 试验验证

中图分类号: V214.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)03-0053-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.03.007

Random Vibration Response Numerical Calculation of Thin-walled Connection Structures under Heat Flux Environment

LIU Shuang, SHA Yundong*

(School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the stress response characteristics of thin-walled connection structures under thermal shock and random vibration environments. A high-temperature random vibration response analysis of thin-walled structures was carried out based on the nonlinear large deflection vibration theory, while combined thermal-vibration tests were conducted simultaneously. A random vibration response analysis of thin-walled connection structures in the thermal shock environment was performed based on the verified calculation and analysis method and the heat-flux-solid coupling theory. The base frequency error was less than 4%, and the axial stress error was less than 2.4%. With the increase in temperature, the peak of the stress response of the thin-walled connection structure shifts to the left, and the stress response trend remains unchanged. The flow rate within the range of 100-140 m/s has a relatively small influence on the stress response trend of the thin-walled connection structure. As the flow rate increases, the corresponding value of the structural stress increases slightly. The vibration level is posi-

收稿日期: 2024-10-10; 修订日期: 2024-12-13

Received: 2024-10-10; Revised: 2024-12-13

基金项目: 中国航发产学研合作项目(HFZL2018CXY017)

Fund: China Aviation Industry Cooperation Project(HFZL2018CXY017)

引文格式: 刘爽, 沙云东. 热流环境下薄壁连接结构随机振动响应数值计算[J]. 装备环境工程, 2025, 22(3): 53-61.

LIU Shuang, SHA Yundong. Random Vibration Response Numerical Calculation of Thin-walled Connection Structures under Heat Flux Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(3): 53-61.

*通信作者(Corresponding author)

tively correlated with the axial stress of the thin-walled connection structure. Moreover, as the vibration level increases, the structural stress changed significantly. The temperature range of 150-450 °C plays a dominant role in influencing the axial stress of the structure.

KEY WORDS: thin-walled connection structure; heat-flux-solid coupling; random vibration; stress distribution; modal frequency; experimental verification

在航空发动机结构领域存在大量的薄壁连接结构, 这些结构工作时经常处于热流冲击环境中^[1-3]。在实际的工程应用场景中, 薄壁连接结构可能会受到各种复杂载荷的耦合作用, 从而产生随机振动^[4-5]。当这些复杂载荷的耦合作用导致的随机振动频率与结构的固有频率相匹配时, 该结构就可能出现共振现象^[6]。长时间处于共振状态的薄壁连接结构可能会在应力集中区域产生裂纹^[7], 出现疲劳失效现象, 导致发动机使用寿命减少, 生产及维修成本增加。因此, 本文针对薄壁连接结构高温热流下随机振动响应问题进行研究。

从 20 世纪开始, 国内外学者针对热载荷、气动载荷及随机振动载荷耦合作用下薄壁结构应力响应问题进行了大量的深入研究。由于材料特性和边界条件存在较大差异, 使得对热-流-振耦合薄壁结构应力响应分析有很大难度。国外学者 Vaicaitis 等^[8-9]采用了 Galerkin 法与 Monte carlo 法相结合的方式, 对金属材料以及复合材料的非线性响应问题进行了深入研究。然而, 在超高声速飞行条件下, 复合材料的非线性响应幅值表现为非高斯分布, 峰值不遵循 Rayleigh 型分布规律。Stephens^[10]采用有限元法对人造卫星蒙皮结构的随机振动动态响应进行了分析, 并提出了相应的计算方法模型, 但尚需进一步的试验验证。Keheo 等^[11-12]利用激光测振仪对铝板结构在 475 °F (246.11 °C) 条件下均匀加热、非均匀加热及瞬态加热的热弹性振动进行了测试, 获得了热结构模态频率与模态振型。瞬态测试结果表明, 在瞬态分析中考虑热应力是很重要的。Lee^[13-14]通过 EL (等效线性化) 方法, 对薄板在热屈曲状态下进行了动力学响应计算, 结果是非线性的, 并对薄板位移与应变之间的关系进行了统计分析, 但对于不对称位移还需继续分析。国内王琰等^[15]对发动机叶片进行了随机振动和正弦振动 2 种振动疲劳试验, 得出在等均方根应力水平下, 叶片的随机振动疲劳寿命要小于正弦振动。韩增尧等^[16]首次尝试在宽带随机载荷激励下的响应预示研究, 其中低频采用有限元方法, 高频采用 SEA 法, 但还需在有限元模型和 SEA 模型的正确性考核等方面继续深入研究。吴大方等^[17-19]创建了一个可以在超高温环境中进行热模态分析的热振联合试验系统, 还需要在结构的热振响应规律方面进行仿真与试验计算。沙云东等^[20-24]运用 FEM/BEM 耦合理论研究了薄壁结构的非线性动力学响应问题, 并对薄壁结构

在高温下的随机振动响应进行了分析。国内外学者对于薄壁结构在热流冲击下的随机振动响应研究已经有了很丰富的研究成果。本文在吸取国内外学者的研究成果基础上, 基于非线性大挠度振动理论开展薄壁结构在热载荷及随机振动载荷下应力响应分析, 进行薄壁结构的热振联合试验, 验证此计算分析方法的可行性。基于试验验证的计算分析方法及热、流、固耦合理论开展薄壁连接结构在热载荷、气动载荷及随机振动载荷下响应分析, 探究其应力响应规律。

1 理论方法

1.1 非线性大挠度振动控制方程

考虑温度变化产生的热应力对结构的影响, 在胡克定律中加入温度项来分析应力和应变。当考虑温度变化时, 广义胡克定律表示为:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y) + \alpha T(x, y, z) \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x) + \alpha T(x, y, z) \\ \gamma_{xy} = \frac{1}{G}\sigma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E}\sigma_{xy} \end{cases} \quad (1)$$

式中: G 表示 x 轴与 y 轴间夹角变化的剪切弹性模量, $G = E/[2(1+\mu)]$; E 表示弹性模量; μ 表示泊松比; $T(x, y, z)$ 表示结构上任意点 (x, y, z) 处的温度函数; α 表示材料的热膨胀系数。

使用简化的线性关系表示 z 方向的温度变化:

$$T(x, y, z) = \bar{T}(x, y) + z\theta(x, y) \quad (2)$$

式中: $\bar{T}(x, y)$ 表示板中面温度, $\bar{T}(x, y) = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} T(x, y, z) dz$; $\theta(x, y)$ 表示 z 方向的温度梯度。

不考虑薄板中非线性温度变化。根据式 (1) 推导各向同性结构的应力-应变关系:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} [\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y - (1+\mu)\alpha T(x, y, z)] \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} [\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x - (1+\mu)\alpha T(x, y, z)] \\ \tau_{xy} = 2G\varepsilon_{xy} = \frac{E}{1+\mu}\varepsilon_{xy} = G\gamma_{xy} \end{cases} \quad (3)$$

z 方向薄壁结构力的平衡方程为:

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2 N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + f = 0 \quad (4)$$

结合随机振动载荷, 热载荷等对薄壁结构的影响, 得到薄壁结构在温度变化下的非线性大挠度振动控制方程:

$$\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \rho h \xi \frac{\partial w}{\partial t} + D \nabla^4 w + D \alpha (1 + \mu) \nabla^2 \theta = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (5)$$

式中: ξ 为阻尼系数; D 为弯曲刚度; ∇ 为双调

和算子, $\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$ 。

1.2 热流固耦合理论分析

结合热-固耦合理论及流-固耦合理论的数值计算方法, 可以得到以下能量方程:

$$U^e = \frac{1}{2} \int_{V^e} \boldsymbol{\varepsilon}_E^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_T dV = \frac{1}{2} \int_{V^e} (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_T)^T \mathbf{D} (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_T)_E dV \quad (6)$$

$$\frac{\partial U^e}{\partial \{\delta\}} = 0 \quad (7)$$

式中: U^e 为单元弹性能; $\boldsymbol{\varepsilon}_E$ 为弹性应变矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为总应变矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}_T$ 为热应变矩阵; \mathbf{D} 为单元弹性矩阵。

将式 (6) 和 (7) 联立可以得到热载荷下结构控制方程, 见式 (8)。

$$\mathbf{K} \{\delta\} = \mathbf{Q}_T \quad (8)$$

式中: $\{\delta\}$ 表示单元节点位移; \mathbf{K} 表示结构刚度矩阵; \mathbf{Q}_T 表示结构气动热载荷矩阵。

再结合气动力载荷矩阵 \mathbf{Q}_P 得出热流固耦合的最终控制方程:

$$\mathbf{K} \{\delta\} = \mathbf{Q}_T + \mathbf{Q}_P \quad (9)$$

2 数值仿真与热振试验验证

本文参考《发动机叶片及材料振动疲劳试验方法》中有典型应力集中部位的薄壁结构为试验件进行计算分析与热振试验。试验件为质量均匀的薄壁板, 厚度为 1.5 mm, 几何尺寸如图 1 所示。试验件选取工程中常用的 GH188 材料作为研究对象, 不同温度下 GH188 材料的属性参数见表 1。

2.1 热振数值仿真计算

设定试验件开孔一侧为根部, 将试验件根部进行固支约束, 另一侧为头部, 中间有凹陷的部分为颈部,

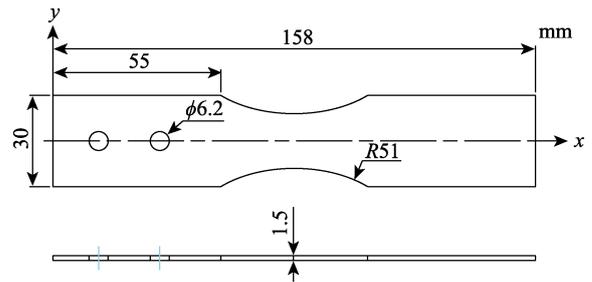


图 1 试验件结构尺寸

Fig.1 Structural dimensions of test piece

表 1 GH188 材料参数

Tab.1 Material parameters of GH188

$t/^\circ\text{C}$	E/GPa	μ	$\gamma/(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\kappa/(\text{W}\cdot\text{m}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$
150	199	0.307	12.2	9 090	16.2
300	184	0.313	12.9	9 090	18.5
450	170	0.320	13.7	9 090	20.1
600	156	0.326	14.4	9 090	27.1

颈部为应力集中区域。建立的有限元模型如图 2 所示。对试验件进行计算分析, 加载频率范围为 70~95 Hz 的平谱随机振动激励, 以加速度 PSD 形式加载, 加载方式如图 3 所示。随机振动载荷见表 2。试验温度为 450 °C, 对照温度为 25 °C。本文只研究试验件 x 轴方向响应应力, 后文简称为轴向应力。当 t 为 25、450 °C 时, 试验件前 6 阶模态频率见表 3。



图 2 试验件有限元模型

Fig.2 Finite element model of test piece

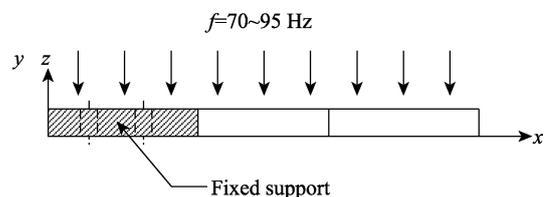


图 3 随机振动载荷加载方式

Fig.3 Loading method of random vibration load

表 2 随机振动载荷

Tab.2 Random vibration load

随机振动量级/g	频率范围/Hz	PSD/($\text{g}^2\cdot\text{Hz}^{-1}$)
2.0	70~95	0.159 3
2.4	70~95	0.229 4
2.8	70~95	0.312 3
3.2	70~95	0.407 9
4.0	70~95	0.637 4

表3 薄壁结构模态频率
Tab.3 Modal frequencies of thin-walled structures

$t/^\circ\text{C}$	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶	6阶
25	87.2	625.7	651.7	1 178.0	1 808.0	2 593.6
450	81.0	565.7	586.5	1 065.1	1 634.8	2 528.7

由表3可知,随环境温度升高,由于试验件根部固支约束,头部自由的边界条件下会产生较大的自由度,结构未发生热屈曲现象,处于屈曲前状态,且随着温度升高,试验件基频随之降低。试验件随机振动响应曲线频率范围选择70~2 500 Hz。为检验应力集中的具体位置,观察温度为25、450℃,振动量级为2.4g、3.2g时试验件的等效应力云图,如图4所示。

由图4可以看出,应力集中区域多为颈部,后文

中危险位置均取用颈部危险点。在同一振动量级下,由25℃升高为450℃时,应力变化10 MPa左右。在同一环境温度下,振动量级由2.4g升高为3.2g时,应力变化在60 MPa左右。根据计算数据可知,在25~450℃,随机振动对试验件应力响应的影响更明显。试验件在不同温度及振动量级下的轴向应力响应频谱曲线如图5所示,轴向应力响应峰值见表4。

由图5及表4可得,振动量级显著影响轴向应力响应的峰值,但并不影响结构响应频率,环境温度在一定程度上影响轴向应力响应峰值,并且对结构响应频率的影响较大。轴向应力与振动量级的变化呈正相关趋势,振动量级由2.0g升高至4.0g过程中,轴向应力提升了86.2%,最大响应应力为276.98 MPa。环境温度由25℃升高至450℃过程中,结构1阶响应频率降低了6.2 Hz。

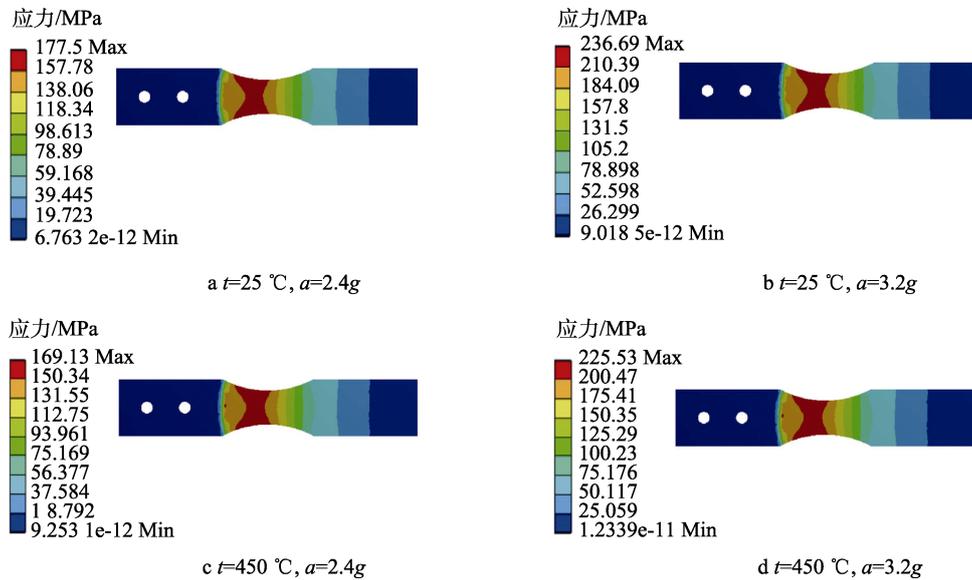


图4 试验件等效应力响应
Fig.4 Equivalent stress response of test piece

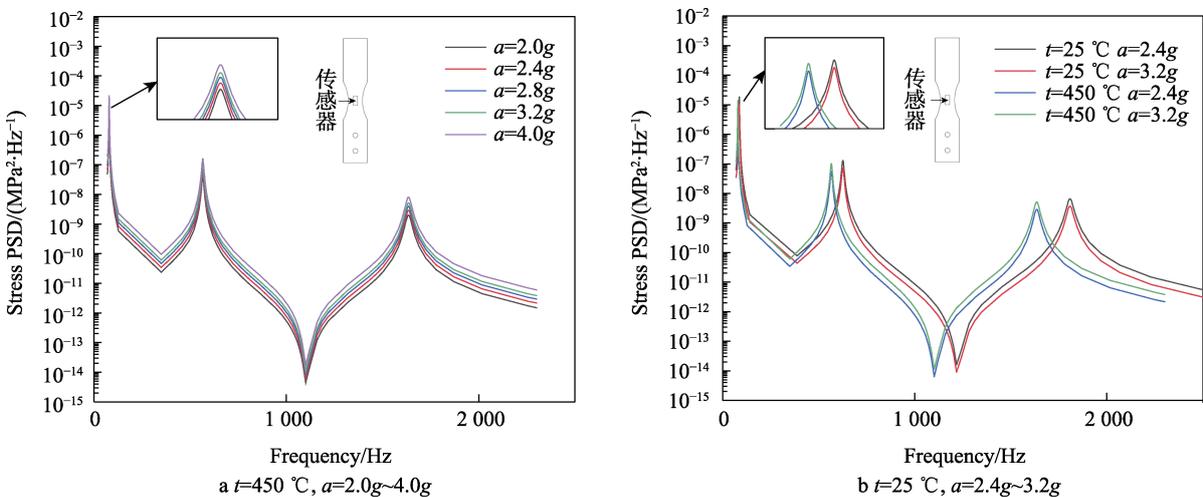


图5 热振载荷下试验件危险位置处应力响应
Fig.5 Stress response of dangerous position of test piece under thermal and vibration loads

表 4 热振载荷下试验件轴向应力峰值
Tab.4 Axial stress peak of test piece under thermal and vibration loads

a/g	$t/^\circ\text{C}$	1 阶响应频率/Hz	轴向应力峰值/MPa
2.0	450	78.9	148.75
2.4	450	78.9	185.77
2.8	450	78.9	204.85
3.2	450	78.9	219.95
4.0	450	78.9	276.98
2.4	25	85.1	168.97
3.2	25	85.1	218.03

2.2 热振试验验证

为验证上文计算分析方法,设计并制作了同尺寸试验件,开展了不同温度及随机振动量级的响应试验。试验工况见表 5,试验件如图 6 所示。

表 5 试验工况
Tab.5 Test operating conditions

试验工况	a/g	$t/^\circ\text{C}$
1	2.0	450
2	2.4	450
3	2.8	450
4	3.2	450
5	4.0	450
6	2.4	25
7	3.2	25

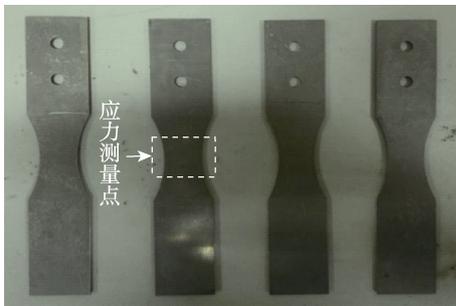


图 6 试验件
Fig.6 Test piece

将试验件根部通过螺栓与振动台进行固支约束,在试验件颈部安装应变片及热电偶,试验件安装方法如图 7 所示。温度载荷由负反馈调节的石英灯阵加



图 7 试验件安装方式
Fig.7 Installation of test pieces

载,通过热电偶对试验件表面温度进行控制,并通过振动台加载随机振动载荷。

由于外在因素影响,试验结果具有一定的随机性,故在相同试验条件下对多个试验件同时进行试验,取数值相近的实验结果,保证试验结果的可靠性,试验结果见表 6。由表 6 可得,在 $t=450^\circ\text{C}$ 下,振动量级从 2.0g 升高至 4.0g,轴向应力从 151.44 MPa 增加至 270.24 MPa,提高了 78.4%,基频的变化范围不超过 2 Hz,故振动量级对轴向应力的影响明显,对基频的影响较小。振动量级为 2.4g 时,环境温度由 25°C 升高至 450°C ,轴向应力增加了 16.64 MPa;振动量级为 3.2g 时,环境温度由 25°C 升高至 450°C ,轴向应力增加了 9.61 MPa。由此可得,在本文所选取载荷范围内,振动量级对轴向应力的影响显著,并且温度在一定程度上对轴向应力产生了影响。

表 6 试验结果
Tab.6 Test results

a/g	$t/^\circ\text{C}$	基频/Hz	轴向应力/MPa
2.0	450	82.9	151.44
2.4	450	84.9	190.03
2.8	450	83.6	208.13
3.2	450	83.4	223.95
4.0	450	82.6	270.24
2.4	25	89.5	173.39
3.2	25	88.9	214.34

为验证此计算分析方法的可行性,取振动量级为 3.2g 时 25°C 和 450°C 的计算结果与试验结果作比较,见表 7。由表 7 可知, $t=25^\circ\text{C}$ 时,轴向应力响应误差为 1.69%,基频误差为 1.91%; $t=450^\circ\text{C}$ 时,轴向应力误差为 1.79%,基频误差为 2.99%,说明此计算方法可行有效。

表 7 计算与试验数据对比
Tab.7 Comparison of calculation and test data

$t/^\circ\text{C}$	基频/Hz			轴向应力/MPa		
	仿真结果	试验结果	误差/%	仿真结果	试验结果	误差/%
25	87.2	88.9	1.91	218.03	214.34	1.69
450	80.9	83.4	2.99	219.95	223.95	1.79

3 热流环境下薄壁连接结构随机振动响应分析

薄壁连接结构大量存在于航空发动机部件中,如隔热防振屏、尾喷管等热端部件,常见的金属部件的连接方式主要包括焊接、螺栓连接、铆接、焊接加螺栓、胶接等^[25]。焊接、铆接等属于永久性连接,不便于进行多次试验,故选择螺栓连接方式将 2

个试件通过螺栓连接形成 1 个薄壁连接结构，在螺栓连接位置进行固支约束。采用文中第 2 节验证的计算分析方法，对模拟真实工况环境下的薄壁连接结构进行响应分析。由于薄壁连接结构两端为自由边界，螺栓预紧力对结构模态及应力结果影响非常小，可忽略不计，故本结构不考虑螺栓预紧力。参照航空发动机的实际工作环境，选取温度为 150、300、450 °C，流速为 100、120、140 m/s 等工况，分别进行薄壁连接结构热振响应计算。基于热-流-固耦合计算方法建立高温高速流场，气流方向及进气方式如图 8 所示。对薄壁连接结构施加随机振动激励，激励方式同 2.1 节。当温度为 150、450 °C，流速为 100、140 m/s 时，薄壁连接结构温度分布云图如图 9 所示。

由图 9 可以看出，在本文所选取载荷范围内，环境温度及气流流速对结构温度分布变化规律的影响

很小，入口端受到热流冲击温度最高，结构边缘受气流冲击后温度从边缘部分向中心部分传递。当温度为 150、300、450 °C，振动量级为 2.0g~4.0g 时，薄壁连接结构的振动响应如图 10 所示。薄壁连接结构在各工况下应力集中部位的轴向应力见表 8。

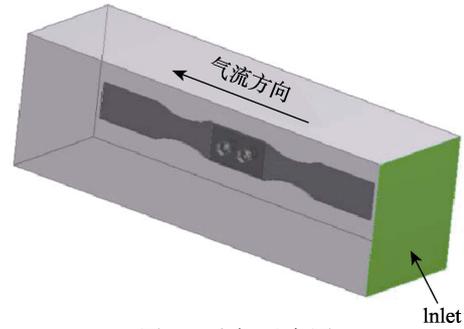


图 8 流场示意图
Fig.8 Flow field diagram

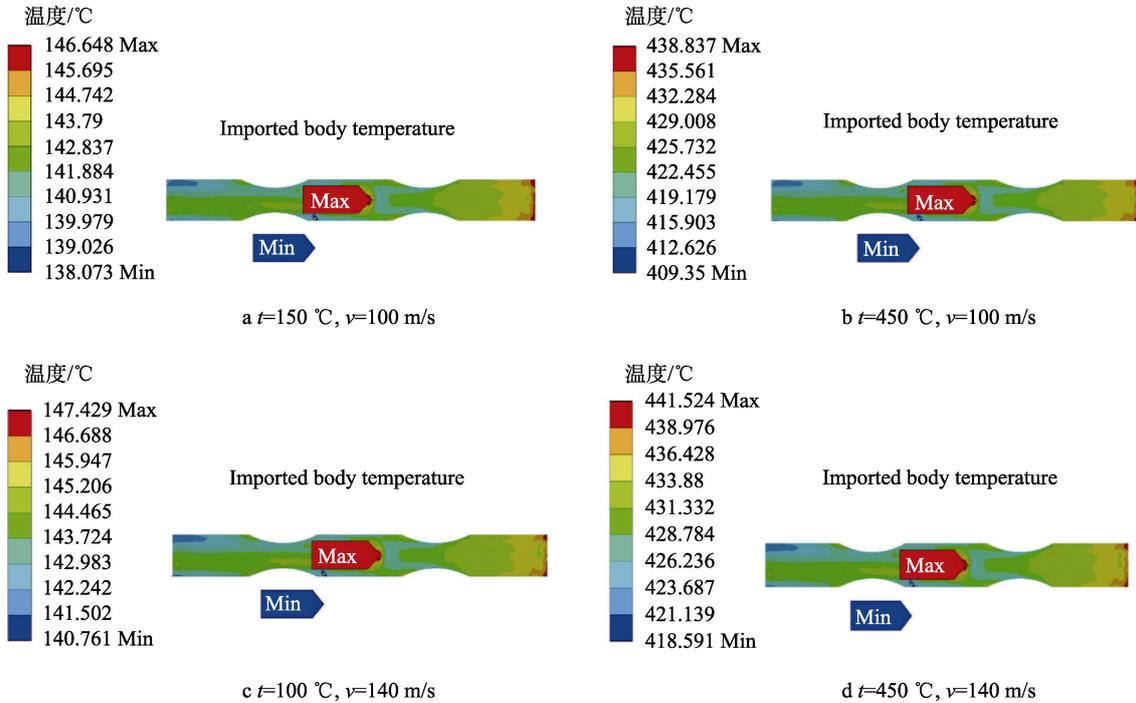


图 9 热流冲击下薄壁连接结构温度云图
Fig.9 Temperature contour of thin-walled structure under thermal shock

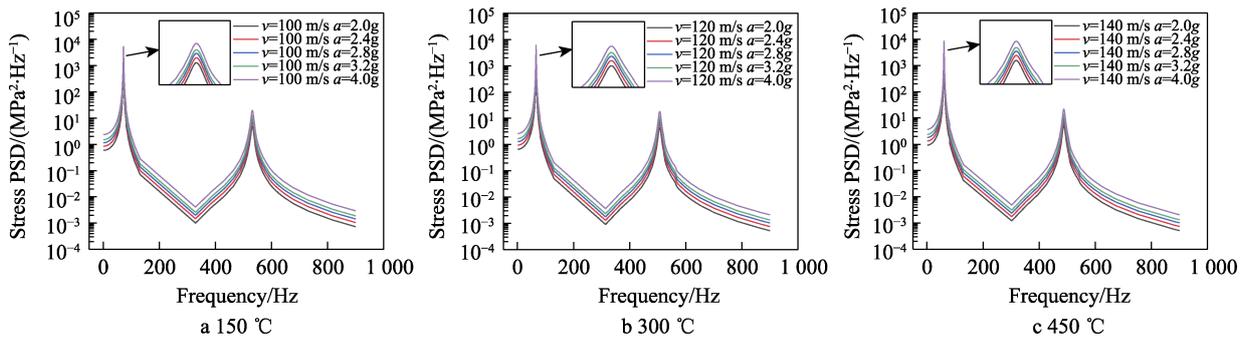


图 10 热流冲击下薄壁连接结构随机振动应力响应
Fig.10 Randomvibration stress response of thin-walled structure under thermal shock

表 8 薄壁连接结构轴向应力
Tab.8 Axial stress of thin-walled structure

a/g	t=150 °C			t=300 °C			t=450 °C		
	v=100 m/s	v=120 m/s	v=140 m/s	v=100 m/s	v=120 m/s	v=140 m/s	v=100 m/s	v=120 m/s	v=140 m/s
2.0	74.53	78.04	82.75	76.12	82.89	83.06	77.57	82.78	87.45
2.4	89.44	93.65	99.30	92.54	99.47	99.67	93.08	99.34	104.94
2.8	104.35	109.27	115.86	107.97	116.06	116.29	108.21	115.91	122.44
3.2	119.26	124.88	132.41	123.40	132.64	132.91	124.12	132.47	139.93
4.0	149.08	156.10	165.52	154.25	165.8	166.14	155.16	165.59	174.92

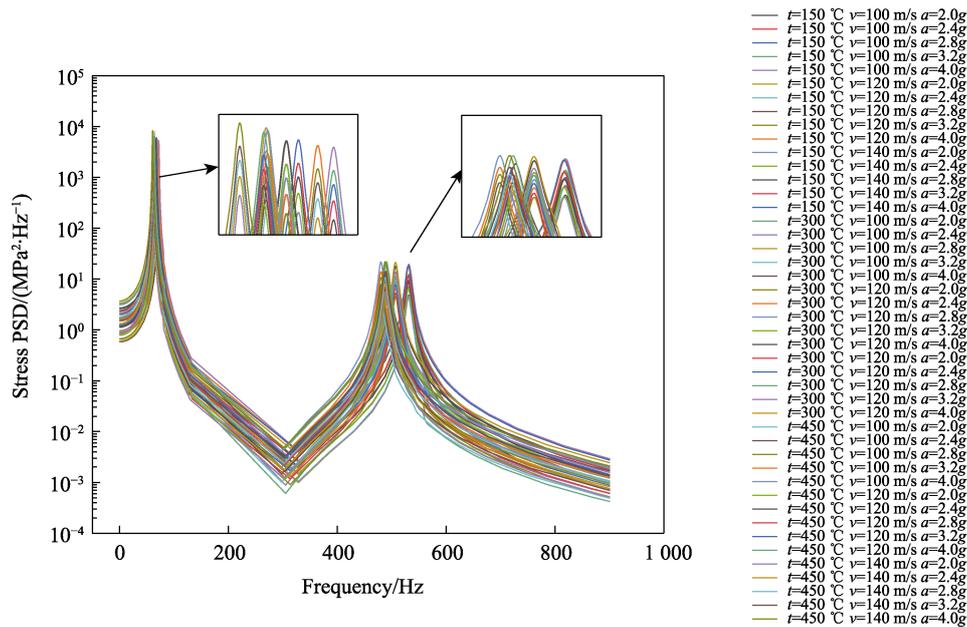


图 11 薄壁连接结构应力响应
Fig.11 Stress response of thin-walled structure

由图 10 和表 8 可以看出, 环境温度相同时, 薄壁连接结构随机振动应力响应规律相同。当振动量级为 2.0g、v=100 m/s 时, t 由 150 °C 升至 450 °C, 轴向应力从 74.53 MPa 提高到 83.06 MPa, 增加了 8.53 MPa, 温度升高对结构轴向应力有小幅影响。当 t=150 °C、v=100 m/s 时, 振动量级由 2.0g 升至 4.0g, 轴向应力从 74.53 MPa 提高到 149.08 MPa, 增加了 74.55 MPa, 故随着振动量级的增大, 其轴向应力变化明显。由图 10 可以看出, 流速在 100~140 m/s 时, 对结构应力响应变化规律的影响较小。当 t=150 °C、振动量级为 2.0g 时, 流速从 100 m/s 提高到 140 m/s, 轴向应力从 74.53 MPa 提高到 82.75 MPa, 增加了 8.22 MPa, 故随着流速的增加, 结构轴向应力略有增大。结果表明, 温度在 150~450 °C 时, 随机振动载荷对薄壁连接结构轴向应力的影响占主导地位。

当温度为 150、300、450 °C, 流速为 100、120、140 m/s, 振动量级为 2.0g~4.0g 时, 薄壁连接结构的应力响应曲线如图 11 所示。可以看出, 在不同工况下, 同一试验件的随机振动应力响应曲线趋势基本相同。随着气流温度升高, 结构刚度下降, 结构基频降

低, 响应应力峰值逐渐向左移动。

4 结论

1) 本文以有明显应力集中区域的试验件为研究对象, 建立了有限元模型进行计算分析。将数值仿真分析结果与试验数据进行比较发现, 基频误差均小于 4%, 轴向应力误差均小于 2.4%, 说明此计算分析方法可行有效。

2) 根据薄壁连接结构在热流冲击条件下的温度云图可以看出, 在本文所选取载荷范围内, 环境温度及气流流速对结构温度分布变化规律影响较小, 入口端受到热流冲击温度最高, 结构边缘受气流冲击后温度从边缘部分向中心部分传递。

3) 薄壁连接结构高温热流下随机振动应力响应计算分析表明, 随着温度升高, 薄壁连接结构应力响应峰值向左移动, 应力响应趋势不发生改变。流速在 100~140 m/s 时, 对薄壁连接结构应力响应趋势的影响较小。随着流速的增大, 结构应力相应数值有小幅增加。振动量级与薄壁连接结构轴向应力呈正相关,

且振动量级增加, 结构应力数值变化明显, 在 150~450 °C 对结构轴向应力的影响占主导地位。

参考文献:

- [1] WEBER Y, BOWERS D. Advancements in Exhaust System Technology for the 21st Century[C]// Proceedings of 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Cleveland: AIAA, 1998.
- [2] 张家铭, 沙云东, 艾思泽. 热流环境下航空发动机短环火焰筒动力学响应特性分析[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(1): 136-139+146.
ZHANG J M, SHA Y D, AI S Z. Dynamioshise Analysis of Short Annular Flame Fube of Aeroengine in Heat Flow Environment[J]. Machine Building and Automation, 2021, 50(1): 136-139.
- [3] 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 Y D, YANG Y Z, TANG X N. 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.
- [4] 张栋, 薛淑艳, 宁献文, 等. 大推力发动机高温隔热屏设计及优化研究[J]. 航天器环境工程, 2017, 34(4): 350-354.
ZHANG D, XUE S Y, NING X W, et al. Design and Optimization of High Temperature Heat Shield for Large Thrust Engines[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2017, 34(4): 350-354.
- [5] 杨玫. 随机声激励下火焰筒振动响应分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
YANG M. Study on Vibration Response Analysis Method of Flame Tube under Random Acoustic Excitation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [6] 韩清凯, 翟敬宇, 张昊. 机械动力学基础及其仿真方法[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2017.
HAN Q K, ZHAI J Y, ZHANG H. Fundamentals of Mechanical Dynamics and Its Simulation Method[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2017.
- [7] 张阿舟. 实用振动工程-3-振动测量与试验[M]. 北京: 航空工业出版社, 1997.
ZHANG A Z. Practical Vibration Engineering -3- Vibration Measurement and Test[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1997.
- [8] VAICAITIS R. Nonlinear Response and Sonic Fatigue of National Aerospace Space Plane Surface Panels[J]. Journal of Aircraft, 1994, 31(1): 10-18.
- [9] VAICAITIS R, KAVALLIERATOS P. Nonlinear Response of Composite Panels to Random Excitation[R]. US: AIAA, 2001.
- [10] STEPHENS V M. A2100 Commercial Satellites Integrated Mechanical Analysis[R]. Newport Beach: Lockheed Martin Missiles & Space Sunnyvale, 1997.
- [11] KEHOE M, SNYDER H T. Thermoelastic Vibration Test Techniques[R]. Washinton: NASA, 2023.
- [12] SNYDER H T, KEHOE M. Determination of the Effects of Heating on Modal Characteristics of an Aluminum Plate with Application to Hypersonic Vehicles[R]. Washinton: NASA, 1991.
- [13] LEE J. Displacement and Strain Histograms of Thermally Buckled Composite Plates in Random Vibration[C]// 37th Structure, Structural Dynamics and Materials Conference. Salt Lake City: AIAA, 1996.
- [14] LEE J. Displacement and Strain Statistics of Thermally Buckled Plates[J]. Journal of Aircraft, 2001, 38(1): 104-110.
- [15] 王琰, 郭定文. 航空发动机转子叶片的声振疲劳特性试验[J]. 航空动力学报, 2016, 31(11): 2738-2743.
WANG Y, GUO D W. Experiment on Acoustic Vibration Fatigue Properties of the Aero-Engine Rotor Blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(11): 2738-2743.
- [16] 韩增尧, 曲广吉. 航天器宽带随机振动响应分析[J]. 中国空间科学技术, 2002, 22(1): 24-30.
HAN Z Y, QU G J. Wide-Band Random Vibration Response Prediction Study of the Spacecraft Structures[J]. Chinese Space Science and Technology, 2002, 22(1): 24-30.
- [17] 吴大方, 王岳武, 蒲颖, 等. 高超声速飞行器复合材料翼面结构 1100°C 高温环境下的热模态试验[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 323-331.
WU D F, WANG Y W, PU Y, et al. Thermal Modal Test of Composite Wing Structure in High-Temperature Environments up to 1100 °C for Hypersonic Flight Vehicles[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 323-331.
- [18] 吴大方, 赵寿根, 潘兵, 等. 高速飞行器中空翼结构高温热振动特性试验研究[J]. 力学学报, 2013, 45(4): 598-605.
WU D F, ZHAO S G, PAN B, et al. Experimental Study on High Temperature thermal-Vibration Characteristics for Hollow Wing Structure of high-Speed Flight Vehicles[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(4): 598-605.
- [19] 沙云东, 郭小鹏, 张军. 基于应力概率密度和功率谱密度法的随机声疲劳寿命预估方法研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(1): 162-165.
SHA Y D, GUO X P, ZHANG J. Random Sonic Fatigue Life Prediction Based on Stress Probability Density and Power Spectral Density Method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(1): 162-165.
- [20] 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.
SHA Y D, WEI J, GAO Z J, 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.
- [21] 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 Y D, HU Y F, HU Z H. 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.
- [22] 过玉卿, 龙靖宇. 改进雨流计数法及其统计处理程序[J]. *武汉钢铁学院学报*, 1987, 10(1): 22-28.
- GUO Y Q, LONG J Y. An Improved Rain Flow Counting Method and Computer Programming of Its Statistic Treatment[J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 1987, 10(1): 22-28.
- [23] 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 Y D, AI S Z, ZHANG J M, 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.
- [24] 沙云东, 艾思泽, 张家铭. 金属薄壁结构在高速流动下热声响应特性分析方法[J]. *机械设计与制造*, 2023(3): 165-170.
- SHA Y D, AI S Z, ZHANG J M. Thermal Acoustic Response Analysis Method for Metal Thin-Walled Structures under High-Speed Flow[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2023(3): 165-170.
- [25] 邹家生. 材料连接原理与工艺[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- ZOU J S. Principle and Technology of Material Connection[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004.