文章编号:1000-8055(2023)00-20220481-07

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220481

# 蠕变-疲劳耦合作用下推力室内壁结构损伤分析

王红建1,王 超1,施 蔚1,杜大华2

(1. 西北工业大学 航空学院,西安 710072;2. 中国航天科技集团有限公司 西安航天动力研究所,西安 710100)

**摘** 要:可重复使用液体火箭发动机能大幅降低航天运输成本,其中推力室内壁结构的循环使用寿命 是影响可重复使用性能的关键因素。基于 Chaboche 随动强化模型和 Norton 蠕变模型建立推力室内壁材料的 本构方程;采用瞬态热-力耦合分析方法,获得推力室各工况下的温度场与应力-应变分布;通过 Lagneborg 累 积损伤法建立损伤模型,其中考虑了蠕变-疲劳的耦合作用,以预测内壁结构损伤及循环寿命。研究结果表 明:推力室内壁结构损伤形式以低周疲劳损伤和蠕变-疲劳耦合损伤为主,其中低周疲劳损伤占比 65.8%,蠕 变-疲劳交互作用损伤占比 29.8%,因此为了准确预测推力室内壁结构的循环使用寿命,需考虑结构在蠕变-疲 劳耦合损伤作用下的影响因素。

关键 词: 推力室; 低周疲劳; 高温蠕变; 交互损伤; 寿命预测
 中图分类号: V434<sup>+</sup>.24
 文献标志码: A

# Damage analysis of thrust chamber wall structure under the creep-fatigue interaction

WANG Hongjian<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>, SHI Wei<sup>1</sup>, DU Dahua<sup>2</sup>

School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
 Xi'an Aerospace Propulsion Institute,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The reusable liquid rocket engine can greatly reduce the cost of space transportation. One of the key factors for the reusable performances is cyclic life of inner wall structures of thrust chamber. The constitutive equations of wall materials of the thrust chamber were established based on Chaboche kinematic hardening model and Norton creep model. The temperature fields and stress-strain distributions of the thrust chamber under various working conditions were obtained by employing the analysis of transient thermo-mechanical coupling; the damages and cyclic life of the inner wall structure were investigated by Lagneborg cumulative damage model by considering the coupling effects of creep and fatigue. The investigation showed that the key patterns of damage in wall structures of thrust chamber were low-cyclic fatigue and creep-fatigue interaction damage with low-cycle fatigue damage ratio 65.8%, and creep-fatigue interaction damage ratio 29.8%. Therefore, in order to accurately predict the cycle life of thrust inner wall structures, the influencing factors of structures under the action of creep-fatigue interaction damage should be considered.

**Keywords:** thrust chamber; low-cyclic fatigue; high temperature creep; interactive damage; life prediction

收稿日期:2022-07-04

引用格式: 王红建, 王超, 施蔚, 等. 蠕变-疲劳耦合作用下推力室内壁结构损伤分析[J]. 航空动力学报, 2023, 39(X): 20220481. WANG Hongjian, WANG Chao, SHI Wei, et al. Damage analysis of thrust chamber wall structure under the creep-fatigue interaction[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 39(X): 20220481.

作者简介: 王红建(1968-), 男, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要从事结构失效与抗疲劳设计技术研究。

通信作者:王超(1998-),男,硕士生,主要从事结构失效与抗疲劳设计技术研究。E-mail: wangc\_@mail.nwpu.edu.cn

目前,各国都在大力研制先进可重复使用液体火箭,以此降低航天运营成本。液体火箭发动机的关键结构是推力室,该结构工作中会承受高温、高压和强力热冲击等复杂极端载荷,易于发生结构失效<sup>[1-2]</sup>。因此研究推力室结构失效机理以及循环寿命具有重要的理论和工程实际意义<sup>[3-4]</sup>。

推力室内壁结构在高温及循环应力作用下, 会因低周疲劳和蠕变,发生壁面减薄和局部凸起 现象(狗室效应)<sup>[5]</sup>,严重影响推力室的安全运行。 Miller<sup>16</sup> 基于有限元与 Manson 通用斜率方程分析, 研究发现疲劳损伤的累积是推力室结构失效的主 要原因。Cook等<sup>[7]</sup>不仅考虑疲劳损伤,还分析了 蠕变效应对推力室寿命的影响,认为总损伤应包 含疲劳损伤和蠕变损伤两部分,并通过线性累计 损伤法(LDS)计算损伤及寿命预测。郭冰彬<sup>[8]</sup> 基于铝合金材料试验研究发现蠕变、疲劳存在交 互作用并揭示其微观机理,即当疲劳裂纹与蠕变 损伤晶界相遇时,疲劳裂纹与蠕变孔洞会相互促 进,形成交互作用。Sung等<sup>[9]</sup>在疲劳、蠕变线性 累计损伤的基础上提出了蠕变-疲劳交互作用模 型,通过等温的蠕变和疲劳试验,建立了线性损 伤分数模型。该方法考虑了两者的耦合损伤,但 并未给出耦合损伤的定量描述。孙冰与 Riccius 等[10-11] 则是从揭示其他失效形式方面进行研 究,在考虑低周疲劳和蠕变条件下,增加了推力 室多循环棘轮损伤分析,同样利用线性累计损伤 法预测寿命。虽然该方法也提高了推力室寿命预 测精度,但这三种损伤之间也可能存在耦合关系, 因此建立耦合损伤计算模型是提高寿命预测精度 的必经之路。Lagneborg 等<sup>[12]</sup> 针对奥氏体不锈钢 材料提出一种蠕变-疲劳耦合代数模型,以计入两 者耦合条件下的损伤累积。这种方法表达直观, 计算简单,为推力室寿命预测提供了思路。

综上,推力室内壁结构寿命预测多采用损伤 线性累积方法进行预估,而结构中各种损伤通常 并非独立,即存在一定的交互影响<sup>[13]</sup>。因此本文 提出一种考虑蠕变-疲劳耦合作用的寿命预测模 型以提高对推力室循环寿命的预测精度。

# 1 推力室结构模型和分析方法

#### 1.1 几何模型

本文基于液氧/甲烷火箭发动机推力室为研 究对象,其内壁材料为银锆铜合金 Narloy-Z,外壁 为电镀镍,结构具有周期对称性。在力学建模时 取冷却通道的 1/2 以提高计算效率。试验表明推 力室喉部内壁为失效危险部位,故取该部位附近 结构进行建模,并对模型截面典型位置编号 *P*<sub>1</sub>、 *P*<sub>2</sub>、*P*<sub>3</sub>、*P*<sub>4</sub>、*P*<sub>5</sub>作为分析考察点,如图 1 所示。网 格划分见图 2。





Fig. 2 Throat sector finite element model

# 1.2 材料本构模型

对推力室进行损伤分析及寿命预测,必须构 建能够准确反映材料性能的本构方程。推力室在 循环加载下的包辛格效应和棘轮现象可通过 Chaboche 非线性随动硬化模型来描述。该模型通过 引入多级背应力描述变形过程中屈服面移动,因 此可准确模拟循环应力-应变特性<sup>[14]</sup>,其表达式如 下:

$$\begin{cases} d\alpha = \sum_{i=1}^{N} d\alpha_{i} \\ d\alpha_{i} = \frac{2}{3} C_{C,i} d\varepsilon^{p} - \gamma_{i} \alpha_{i} \sqrt{\frac{2}{3}} d\varepsilon^{p} : d\varepsilon^{p} \end{cases}$$
(1)

式中N为独立的背应力张量的数目; α<sub>i</sub>为背应力 张量的第 i 个分量; ε<sup>p</sup>为塑性应变; C<sub>c,i</sub>为初始随 动硬化模量(MPa); γ<sub>i</sub>为随动硬化模量随塑性应 变的增加而下降的变化率。 本研究采用 Chaboche 三级背应力非线性随动硬化模型。该模型参数可通过材料拉伸应力-

应变数据得到,通过拟合处理,得到不同温度下 模型参数如表1所示。

	表1 不同温	昰度下 Chaboche	e 模型参数
Table 1	Chaboche mode	el parameters at	different temperatures

温度/K	$C_{\rm C,1}/\rm{MPa}$	C <sub>C,2</sub> /MPa	C <sub>C,3</sub> /MPa	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$
27.15	5 762.8	13 657	18 812	137	596	2 085.8
295.15	21 326	4 041	15 118	1884	118	393.2
533.15	19 970	86 348	18 219	354	12 290	1 617.3
811.15	20 940	2 629.7	20 941	1 091	123	1 090.9

采用 Norton 蠕变本构模型描述材料的黏塑 性特性,该模型考虑了时间、应力及温度等参数 的作用,其方程见式(2)。

$$\dot{\bar{\varepsilon}}_{cr} = C_{N,1} \sigma^{C_{N,2}} e^{-C_{N,3}/T} \qquad (C_{N,1} > 0)$$
 (2)

式中*σ*为等效应力(MPa); *C*<sub>N,1</sub>、*C*<sub>N2</sub>、*C*<sub>N3</sub>为蠕变 材料参数,可通过不同温度与不同应力水平下的 蠕变试验数据拟合得到; *T*为蠕变温度(K)。

对材料不同温度和应力水平下的蠕变试验数 据<sup>[15]</sup>进行曲线拟合,得到 Norton 蠕变本构模型参 数如表 2 所示。

# 表 2 Norton 蠕变模型参数 Table 2 Norton creep model parameters

温度/K	<i>C</i> <sub>N,1</sub>	$C_{\rm N,2}$	<i>C</i> <sub>N,3</sub>
293~773	0.974 26	1.763 9	11 529
773~923	$2.745 \times 10^{15}$	0.8713	11 579
923~1073	$1.098 \times 10^{17}$	0.904 3	11 593

#### 1.3 边界条件与载荷条件

推力室工作循环包括预冷(0~5s)、热试 (5~25s)、后冷(25~50s)和松弛(50~1050s) 四个阶段,初始温度为环境温度(295.15K)。在 热试阶段,对燃气侧壁面与冷却通道壁面采用第 一类边界条件,其边界温度由耦合传热计算得 到,即

$$T = \overline{T} \qquad (\forall x \in \Gamma_{\rm h}, \forall x \in \Gamma_{\rm c}) \qquad (3)$$

式中T为流热耦合计算得到的耦合面温度。

在预冷、后冷和松弛阶段,燃气侧壁面、冷却 通道壁面和推力室外壁面采用对流换热边界条 件,即:

$$h_{\rm f}(T_{\rm bulk} - T_{\rm wall}) = \boldsymbol{n} \cdot \lambda \nabla T_{\rm wall} \qquad (\forall x \in \Gamma_{\rm c}) \quad (4)$$

对称边界面采用绝热和位移对称条件,即:

$$\boldsymbol{q} \cdot \boldsymbol{n} = 0 \qquad (\forall x \in \Gamma_{\text{sym}}) \tag{5}$$

 $\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{u} = 0 \qquad (\forall x \in \Gamma_{\text{sym}}) \tag{6}$ 

式中 $\Gamma_h$ 为燃气与内壁耦合边界; $\Gamma_c$ 为冷却剂与冷 却通道耦合边界; $h_f$ 为表面传热系数(W/(mm<sup>2</sup>·K));  $T_{bulk}$ 为流体主流温度(K); $T_{wall}$ 为壁面温度(K); $\lambda$ 为固体导热系数;n为壁面外法线矢量;q为热流 (W/mm<sup>2</sup>);u为位移向量; $\Gamma_{sym}$ 为对称边界面。

参考文献 [16] 中流热耦合计算得到的耦合壁 面压力分布和温度分布作为热-力耦合仿真的内 壁燃气侧壁面压力载荷和面温度载荷条件。冷却 通道壁面施加的压力载荷如图 3 所示。







#### 1.4 寿命预测模型

基于 Miner 线性累计损伤理论的寿命预测模型为

$$D_{\rm f} + D_{\rm cr} = 1 \tag{7}$$

式中*D*<sub>f</sub>为疲劳损伤;*D*<sub>cr</sub>为蠕变损伤。当疲劳和蠕变损伤总和为1时,结构发生失效。

线性累积损伤方程会高估循环寿命<sup>[17]</sup>。Lagneborg 损伤模型由于考虑了蠕变-疲劳耦合项,因 此对循环寿命预测会更准确。损伤模型如下:

$$\begin{cases} D_{\rm f} = \sum_{i=1}^{n} N_i / N_{\rm fi} \\ D_{\rm cr} = \sum_{i=1}^{n} t_i / t_{\rm cri} \\ D_{\rm f-cr} = H \left( \sum_{i=1}^{n} N_i / N_{\rm fi} \times \sum_{i=1}^{n} t_i / t_{\rm cri} \right)^{\frac{1}{2}} \\ D_{\rm f} = D_{\rm f} + D_{\rm f-cr} + D_{\rm cr} \end{cases}$$
(8)

式中N<sub>i</sub>为给定载荷下的实际蠕变-疲劳周次;N<sub>fi</sub>为 对应载荷下的纯疲劳失效循环数;t<sub>i</sub>为第i个周次 的拉伸保载时间(s);t<sub>cri</sub>为第i个周次对应应力水 平下的蠕变断裂时间(s);D<sub>f-cr</sub>为交互作用累计损 伤;D<sub>t</sub>为总损伤;H为交互系数。H=0表明蠕变 疲劳未交互作用;H>0表征正交互作用;H<0表 征负交互作用。系数*H*值的大小显示了蠕变与疲劳的耦合程度。

交互系数H需要通过蠕变-疲劳交互试验确 定<sup>[18]</sup>。基于疲劳试验可建立 Manson-Coffin 方程 得到纯疲劳循环次数 $N_i$ 与应变的关系;利用蠕变 试验建立 Norton 蠕变模型,选择 Monkman-Grant 蠕变寿命预测公式得到纯蠕变寿命 $t_{cr}$ <sup>[19]</sup>;基于蠕 变-疲劳交互试验建立一定应变条件下保载时间 $t_i$ 与循环次数 $N_i$ 的关系曲线,并可求得蠕变损伤 $D_{cr}$ ; 将上述三种试验所得关系代入式(9),可最终求出 交互系数H。

$$D_{\rm f} + H (D_{\rm f} \times D_{\rm cr})^{\frac{1}{2}} + D_{\rm cr} = 1$$
 (9)

基于以上公式,H的计算结果如表3所示。

表 3 交互作用系数计算表 Table 3 Interaction coefficient calculation table

总应变范围/%	蠕变-疲劳失效 循环数	蠕变-疲劳失效 保载时间/s	疲劳损伤	蠕变损伤	交互作用 系数H	蠕变-疲劳 交互损伤
2.6	102	30 600	0.403 2	0.1547	1.771 2	0.442 4
2.6	75	22 500	0.296 4	0.113 7	3.213 4	0.589 9
0.9	262	78 600	0.224 1	0.3342	1.614 2	0.441 8
0.9	317	95 100	0.271 2	0.404 4	0.980 1	0.324 6

计算结果表明,不同应变下的交互系数不同, 利用指数形式拟合表中数据得到蠕变-疲劳交互 作用系数计算式:

$$H = 0.918 \mathrm{e}^{0.384\,1\Delta\varepsilon_{\mathrm{t}}} \tag{10}$$

式中Δε<sub>t</sub>为应变范围(%)。

循环寿命由总损伤计算,见式(11):

$$N = \frac{1}{4D_{\rm t}} \tag{11}$$

其中系数4为安全系数以保证结构具有足够的安 全裕度。

# 2 结果分析与寿命预测

#### 2.1 结果分析

图 4 为一个循环内瞬态热分析结果。该温度 场结果数据以相应时间步对应的边界条件加载到 结构分析模块中,作为结构分析中的温度载荷。

由图 4(b)温度场结果可知,推力室壁最高温 度位于喉部内壁上游截面的 P<sub>4</sub>点(位置参见图 1), 最高温度达到 747.09 K。但因为推力室的再生冷 却循环作用,使得推力室外壁温度很低,因此喉 部附近推力室内外壁之间的温度梯度很大(约 596.48 K), 而距离喉部较远的区域, 其内壁温度 相对较低, 内外壁间的温度差相比喉部区域要小 很多, 因此 P<sub>4</sub> 点区域是可能的危险位置, 需要重 点考虑其结构强度。



20220481-4





推力室结构具有薄壁柱状特点,由环向应力 导致的环向应变是影响推力室寿命的主要因素<sup>[20]</sup>。 单循下结构各阶段环向应变分布如图 5。

在松弛阶段,热载荷和机械载荷均已卸载,应 力、应变逐渐减小。由于结构发生了塑性变形, 因此卸载后内壁出现残余拉应力,且最大残余拉



应变出现在喉部下游截面 P<sub>3</sub> 点处, 如图 5(d)所示。 残余应变对应循环后的损伤程度, 因此 P<sub>3</sub> 点区域 为推力室的危险位置。

对推力室喉部附近区域分别取三个截面以考察这些部位的损伤及寿命,如图 6。其中截面1 为最高温度点所在截面,截面2为推力室典型位置(喉部截面),截面3为应变最大点所在截面。

由于篇幅限制,这里展示截面1不同阶段环 向应变分布以及该截面上考察点P<sub>4</sub>点在一个循 环过程中的应力分量变化,如图7、图8所示,其 他截面及考察点数据趋势与之类似。

在预冷阶段,内壁温度相对于外壁下降迅速 导致内外壁出现温差,并且内壁热膨胀系数大于 外壁,其收缩受到外壁阻止而出现较大环向拉应 力,导致 P<sub>4</sub>点产生环向拉应变和径向压应变;热 试阶段在燃气温度与压力载荷作用下,P<sub>4</sub>点各应 变分量急剧变化,导致 P<sub>4</sub>点环向和轴向受压,而 径向产生较大拉应变;在后冷阶段,内壁温度快 速降低而外壁温度降低缓慢,使得内壁环向再次 受拉,并产生较大塑性应变;松弛阶段后 P<sub>4</sub>点产 生残余环向和轴向拉应变,因此低周循环下内壁 壁厚会不断减薄,并可能导致内壁材料失稳出现 鼓包现象。



由图 7 可知, 整个循环中, 截面上 P3 点应变



图 8 截面 1 上  $P_4$  点单循环各应变分量变化 Fig. 8 Variation of each strain component in a single cycle at point  $P_4$  on section 1 第39卷

最大; P<sub>4</sub>点(P<sub>3</sub>、P<sub>4</sub>点位置参考图 1)是燃气与内 壁耦合界面上的点, 其温度较高, 且与 P<sub>3</sub>点之间 温度梯度较大。因此 P<sub>3</sub>、P<sub>4</sub>点均为危险点, 需对 它们进行重点考察。

#### 2.2 损伤与寿命预测结果

基于文中第1.4节公式,各考察点损伤计算 及寿命预测值分别见表4与表5。

分析表 2、表 3 可得,本文模拟的推力室结构 最低寿命在温度最大截面 P<sub>4</sub>点处,对应的寿命预 测值为 64 次,其中低周疲劳损伤占比 65.8%,蠕 变损伤占比 4.4%,蠕变-疲劳交互作用损伤占比 29.8%。低周疲劳损伤和蠕变-疲劳交互作用损伤 占比较大,是推力室结构失效的主要损伤形式。

	表 4 各考察点损伤计算
Table 4	Damage calculation for each inspection poin

考察点	等效应变 范围/%	单次循环 疲劳损伤/10 <sup>-4</sup>	单次循环 蠕变损伤/10 <sup>-4</sup>	交互乘积项	单次循环 交互损伤/10 <sup>-4</sup>
1- <i>P</i> <sub>3</sub>	0.742	3.532 3	1.321 1	1.220 6	2.711 5
$1 - P_4$	1.673	25.510	1.706 6	1.745 3	11.516
$2 - P_3$	0.746	3.621 9	1.366 8	1.222 5	2.720 0
2- <i>P</i> <sub>4</sub>	1.617	24.213	1.746 9	1.707 7	11.106
3- <i>P</i> <sub>3</sub>	0.697	3.008 4	1.1868	1.1998	2.267 1
3- <i>P</i> <sub>4</sub>	1.330	14.925	1.724 1	1.530 0	7.761 2

#### 表 5 各考察点寿命预测值

 Table 5
 Life expectancy at each inspection point

 考察点	等效应变 范围/%	单次循环 总损伤/10 <sup>-3</sup>	Ν	疲劳损伤 占比/%	蠕变损伤 占比/%	交互损伤 占比/%
1-P <sub>3</sub>	0.742	3.026 0	330	46.7	17.4	35.9
$1 - P_4$	1.673	15.493	64	65.8	4.4	29.8
2- <i>P</i> <sub>3</sub>	0.746	3.083 5	324	47.0	17.7	35.3
2- <i>P</i> <sub>4</sub>	1.617	14.826	67	65.3	4.7	30.0
3- <i>P</i> <sub>3</sub>	0.697	2.584 9	386	46.5	18.4	35.1
3- <i>P</i> <sub>4</sub>	1.330	9.764 0	102	61.1	7.1	31.8

# 3 结 论

本文基于非线性随动强化模型和蠕变模型建 立液体火箭发动机推力室内壁结构的循环本构模 型;利用瞬态热-力耦合分析,结合蠕变-疲劳交互 作用的损伤模型,对推力室结构寿命进行预测。 主要结论有:

 1)预冷、热试和后冷阶段状态的转变导致内 壁结构材料应变的剧烈变化,一次循环内其各应 变分量均经历了两次交变。

2) 推力室内外壁最大温度梯度在喉部内壁

上游附近;最大拉、压应力分别在该位置处的预 冷、后热阶段。推力室内壁在燃气与冷却剂的热-力载荷循环作用下,内壁结构会逐渐减薄,甚至 会失稳凸起,并最终导致结构失效。

3)提出了一种考虑推力室内壁结构蠕变-疲 劳耦合损伤的分析方法。研究表明推力室结构损 伤以疲劳损伤与蠕变-疲劳交互损伤为主,其中疲 劳损伤为 65.8%,蠕变损伤为 4.4%,蠕变-疲劳交 互作用损伤为 29.8%。由于考虑了耦合损伤,循 环寿命预测精度得到有效提高,该方法也为新型 液体火箭发动机的抗疲劳寿命设计提供了参考。

# 参考文献:

- [1] 丁兆波,孙纪国.推力室内壁热结构寿命预估及延寿技术 研究[J].推进技术,2013,34(8):1088-1094.
   DING Zhaobo, SUN Jiguo. Studies on life-prediction and life-enhancing technology for regenerative cooling channel[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(8):1088-1094. (in Chinese)
- [2] 丁兆波,王珏.氢氧推力室內壁用铜合金疲劳及蠕变性能研究[J].航天制造技术, 2021(5): 30-34, 39.
  DING Zhaobo, WANG Jue. Experimental study on fatigue and creep properties of LOX/LH2 thrust chamber copper alloy liner wall[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2021(5): 30-34, 39. (in Chinese)
- [3] 张绿云,曲晶,龙雪丹,等. 2018年国外航天运载器发展分析[J].导弹与航天运载技术, 2019(1): 36-39, 44.
   ZHANG Lvyun, QU Jing, LONG Xuedan, et al. Review of world launch vehicle in 2018[J]. Missiles and Space Vehicles, 2019(1): 36-39, 44. (in Chinese)
- [4] 朱坤,杨铁成,周宁.从低成本角度探讨航天运载器技术发展路线[J].飞航导弹, 2021(6): 1-6, 13.
  ZHU Kun, YANG Tiecheng, ZHOU Ning. Discussion on the development route of space launch vehicle technology from the perspective of low cost[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(6): 1-6, 13. (in Chinese)
- [5] RICCIUS J, HAIDN O, ZAMETAEV E. Influence of time dependent effects on the estimated life time of liquid rocket combustion chamber walls[R]. AIAA 2004-3670, 2004.
- [6] MILLER R. Low-cycle fatigue analysis of a cooled copper combustion chamber[R]. AIAA 74-1079, 1974.
- [7] COOK R, COFFEY G. Space shuttle orbiter engine main combustion chamber cooling and life[R]. AIAA TP73-1310, 1973.
- [8] 郭冰彬. 铸造铝合金压蠕变与低周疲劳耦合特性研究与应用[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
  GUO Bingbin. Study on the coupling characteristics of compression creep and low cycle fatigue of cast aluminum and it's application[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [9] SUNG I K, ANDERSON W. A subscale-based rocket combustor life prediction methodology[R]. AIAA 2005-3570, 2005.
- [10] 孙冰,丁兆波,康玉东.液体火箭发动机推力室内壁寿命预 估[J].航空动力学报,2014,29(12):2980-2986.
   SUN Bing, DING Zhaobo, KANG Yudong. Life prediction of liq-

uid rocket engine thrust chamber liner wall[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(12): 2980-2986. (in Chinese)

- [11] RICCIUS J, ZAMETAEV E, HAIDN O. Comparison of 2D and 3D structural FE-analyses of LRE combustion chamber walls[R]. AIAA 2006-4368, 2006.
- [12] LAGNEBORG R, ATTERMO R. The effect of combined low-cycle fatigue and creep on the life of austenitic stainless steels[J]. Metallurgical Transactions, 1971, 2(7): 1821-1827.
- [13] 谭晓惠,马建中,刘宇杰,等. 316不锈钢蠕变-疲劳交互作 用试验研究[J]. 核动力工程, 2013, 34(1): 140-145.
  TAN Xiaohui, MA Jianzhong, LIU Yujie, et al. Experimental study on creep/fatigue interaction correlation[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, 34(1): 140-145. (in Chinese)
- [14] 彭鸿博,张宏建.金属材料本构模型的研究进展[J].机械工程材料, 2012, 36(3): 5-10,75.
  PENG Hongbo, ZHANG Hongjian. Research development of the constitutive models of metal materials[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012, 36(3): 5-10,75. (in Chinese)
- [15] ELLIS D, MICHAL G M. Mechanical and thermal properties of two Cu-Cr-Nb alloys and NARloy-Z[R]. NASA-CR-198529, 1996.
- [16] 康玉东,孙冰. 燃气非平衡流再生冷却流动传热数值模拟
  [J]. 推进技术, 2011, 32(1): 119-124.
  KANG Yudong, SUN Bing. Numerical simulation of regeneraive cooling flow and heat transfer with nonequilibrium flow[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(1): 119-124. (in Chinese)
- [17] 陈立佳, 王中光, 田继丰, 等. 镍基高温合金的蠕变-疲劳交 互作用行为及寿命预测[J]. 航空材料学报, 1998, 18(3): 1-7, 15.

CHEN Lijia, WANG Zhongguang, TIAN Jifeng, et al. Creep fatigue interaction behavior of a nickel based superalloy and lifetime prediction[J]. Journal of Aeronautical Materials, 1998, 18(3): 1-7, 15. (in Chinese)

- [18] 杜大华,王珺,王红建,等.液体火箭发动机涡轮盘低周疲劳寿命预测[J].火箭推进,2020,46(6):13-21.
  DU Dahua, WANG Jun, WANG Hongjian, et al. Low cycle fatigue life prediction of a liquid rocket engine turbine disk[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(6): 13-21. (in Chinese)
- [19] WILSHIRE B. New high-precision creep procedures for accurate life extension of plant[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1989, 39(1/2): 73-82.
- [20] PIZZARELLI M. An algebraic model for structural and life analysis of regeneratively-cooled thrust chambers[J]. Journal of Propulsion and Power, 2020, 36(2): 191-201.

(编辑:陈 越)