

DOI: 10.11918/202506022

考虑蠕变的变后掠翼柔性蒙皮光滑特性分析

杨广¹, 纪桂欣¹, 王建东², 肖洪¹, 郭宏伟¹, 王国庆³

(1. 宇航空间机构全国重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150001; 2. 中国兵器工业集团航空弹药研究院有限公司, 哈尔滨 150030; 3. 北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 为满足剪切式变后掠翼在变形过程中的光滑连续性需求, 提出了一种表层采用预拉伸硅橡胶作为维形层的柔性蒙皮结构。为保证该蒙皮在机翼后掠角变化范围内保持光滑连续, 开展该蒙皮光滑褶皱临界剪切角研究。首先, 基于表征蠕变行为的三参数固体模型及量纲归一化的分析方法, 建立硅橡胶表层的黏弹性预测模型。其次, 依据最小应力准则, 建立了考虑硅橡胶表层黏弹性的临界模型, 完成预拉伸柔性蒙皮临界剪切角的求解, 并提出求解临界剪切角的经验公式。最后, 采用有限元方法对不同预拉伸量的蒙皮临界剪切角进行了仿真分析, 通过沿 x 方向和 y 方向施加位移产生拉伸变形, 沿对角线方向施加旋转和位移产生剪切变形。研究结果表明, 在大拉伸应变范围内, 硅橡胶表层的黏弹性模型能够准确地描述硅橡胶静态蠕变行为, 考虑硅橡胶表层黏弹性的预拉伸柔性蒙皮光滑性临界剪切角模型具有较高的精度; 预拉伸量与硅橡胶表层的蠕变特性对临界剪切角具有显著影响, 双向拉伸有利于提高蒙皮的抗褶皱能力, 从而在变后掠过程中保持表面光滑性。理论预测结果与仿真结果、实验结果吻合良好, 对剪切式变形后掠翼的工程应用具有较大价值。

关键词: 变后掠翼; 柔性蒙皮; 橡胶蠕变; 硅橡胶表层; 临界剪切角

中图分类号: V211.41+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2026)04-0174-08

Analysis of smooth characteristics of flexible skin for variable-sweep wing considering creep

YANG Guang¹, JI Guixin¹, WANG Jiandong², XIAO Hong¹, GUO Hongwei¹, WANG Guoqing³

(1. National Key Laboratory of Aerospace Mechanism (Harbin Institute of Technology), Harbin 150001, China;
2. Norinco Group Air Ammunition Research Institute Co., Ltd., Harbin 150030, China;
3. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: To meet the requirement of smooth continuity during the deformation process of the shear-type variable-sweep wing, this paper proposed a flexible skin structure using pre-stretched silicone rubber as the shape-maintaining surface layer. To ensure that the skin maintains smooth continuity within the variation range of the wing sweep angle, this paper investigated the critical shear angle for skin smoothness and wrinkling. First, based on a three-parameter solid model characterizing creep behavior and a dimensionless normalization analysis method, this paper established a viscoelasticity prediction model of the silicone rubber surface layer. Second, according to the minimum stress criterion, this paper established a critical model considering the viscoelasticity of the silicone rubber surface layer, completed the calculation of the critical shear angle of the pre-stretched flexible skin, and proposed an empirical formula for solving the critical shear angle. Finally, this paper simulated and analyzed the critical shear angles of skins with different pre-stretching amounts using the finite element method, generated tensile deformation by applying displacements along the x and y directions, and generated shear deformation by applying rotation and displacement along the diagonal direction. The results indicate that within a large tensile strain range, the viscoelastic model of the silicone rubber surface layer can accurately describe the static creep behavior of the silicone rubber, and the critical shear angle model for the smoothness of the pre-stretched flexible skin considering the viscoelasticity of the silicone rubber surface layer has high accuracy; the pre-stretching amount and the creep characteristics of the silicone rubber surface layer have a significant impact on the critical shear angle, and biaxial stretching is beneficial to improve the anti-wrinkling ability of the skin, thereby maintaining surface smoothness during the variable-sweep process. The theoretical prediction results agree well with the simulation results and experimental results, which has great value for the engineering application of the shear-type variable-sweep wing.

Keywords: variable-sweep wing; flexible skin; rubber creep; silicone rubber surface layer; critical shear angle

收稿日期: 2025-06-10; 录用日期: 2025-07-11; 网络首发日期: 2026-03-23

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20260323.1135.002>

基金项目: 国家自然科学基金(52405013); 航天进入减速与着陆技术实验室开放基金(EDL19092401); 机器人技术与系统全国重点实验室(哈尔滨工业大学)预研课题(SKLR202412B)

作者简介: 杨广(1992—), 男, 助理研究员; 郭宏伟(1980—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 肖洪, xiaohong@hit.edu.cn

变后掠翼可以通过改变后掠角来兼顾宽速域飞行器的高低速气动性能,一直是航空航天技术领域的热点^[1-2]。传统的旋转式变后掠翼(如F-111、F-14等),通过改变翼根枢轴的旋转角度来实现后掠角的改变^[3-4]。为了使变后掠翼具有更好的变形尺度和气动性能,近年来研究人员提出了新型的剪切式变后掠翼^[5-6]。剪切式变后掠翼相比于旋转式变后掠翼变形面积更大并且气动性能更优异。然而由于剪切式变后掠翼骨架发生剪切变形,变形蒙皮同样需要随之剪切变形。为满足机翼气动性能要求,剪切变形蒙皮需要在剪切变形过程中满足气动表面光滑连续、面内低刚度和面外高刚度^[7]。

为满足剪切变形蒙皮的需求,国内外众多研究人员进行了相关研究。Keihl等^[8]提出了基于形状记忆聚合物的剪切变形蒙皮,但该蒙皮剪切变形过程中表面不光滑而且温度控制复杂难以应用。Yu等^[9]和Grant等^[10]均设计了可应用于剪切变形的分段叠片式刚性滑蒙皮,但该类蒙皮面板间相对滑动导致其密封性和光滑度都比较差。Olympio等^[11]和Ashghian等^[12]设计并优化了一种上层预张紧面板下层蜂窝结构的复合柔性蒙皮,该蒙皮可实现光滑剪切变形,但是其面内刚度较大,产生大变形时易发生应力集中降低蒙皮使用寿命。蒋华毅等^[13]针对变后掠翼柔性蒙皮面外刚度不足问题,提出内嵌支撑梁的复合结构设计,建立面外弯曲参数化模型,并揭示了关键结构参数对承载性能的影响规律。Yu等^[14]提出了一种倾斜变形蒙皮模块设计,通过利用剪切变形中的拉应力抑制起皱,并基于能量法建立了临界起皱角度理论预测模型,深入研究了初始夹角对蒙皮起皱变形范围的影响规律。Kölbl等^[15]提出一种无需弹性体的层状各向异性双轴变形蒙皮结构(layered morphing skin, LMS),通过刚-柔组合设计实现面内大变形能力和面外高刚度。封

铮等^[16]提出了一种基于可变平行四边形机构的剪切变后掠机翼及其纤维增强柔性蒙皮设计,实现了结构可变性与气动承载性能的有效协同。Bai等^[17]提出一种基于剪切变形理论的柔性蒙皮剪切变后掠翼刚度建模方法,并通过剪切加载实验和静态加载实验验证其模型的准确性。值得注意的是,研究人员尚未从理论层面对剪切变形蒙皮的光滑性及其褶皱形成机制进行深入探讨。

本文提出一种柔性橡胶预拉伸蒙皮结构,该蒙皮表层采用预拉伸硅橡胶作为维形结构以保证在机翼后掠角变化范围内该蒙皮具备光滑连续特性。基于剪切式变后掠翼光滑连续变形需求和最小应力准则,判定预拉伸柔性蒙皮光滑与褶皱临界状态,完成预拉伸柔性蒙皮临界剪切角的求解,并通过仿真及实验验证理论结果的正确性。为了增加硅橡胶表层的临界剪切角模型的准确性,考虑了硅橡胶表层黏弹性,该模型能够准确地预测其应力-应变关系以及静态蠕变行为。通过对临界剪切角分析,实现对蒙皮光滑性能边界的分析,对剪切式变形后掠翼的工程应用具有较大价值。

1 预拉伸柔性蒙皮

针对飞行器高低速兼顾的需求,本文提出了一种基于平行四边形胞元拓展而成对角剪切变后掠翼,通过平行四边形胞元的剪切实现机翼后掠角的变化,其结构如图1所示。为满足蒙皮变形过程中光滑连续的要求,并且可以承受气动载荷维持气动外形,通过上层预拉伸硅橡胶和下层碳纤维条叠加设计出新型的预拉伸柔性蒙皮。碳纤维条两端连接销钉,随着平行四边形框架的剪切变形,销钉带动碳纤维条转动起到支撑硅橡胶表层作用,而且降低了剪切变形所需驱动力。

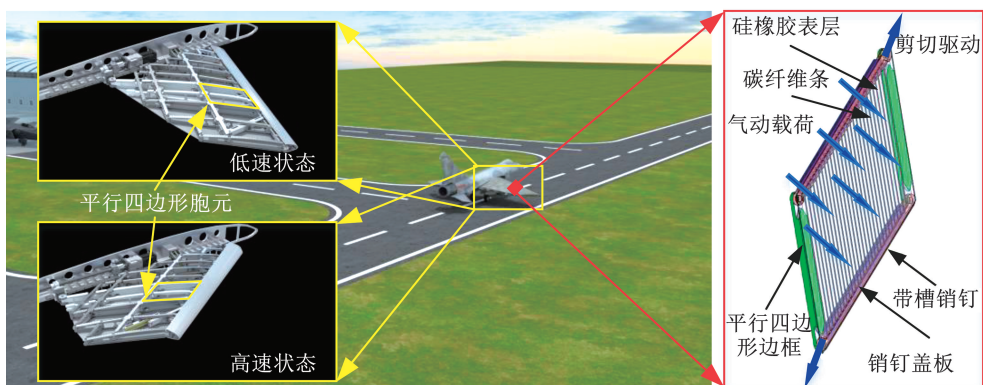


图1 基于平行四边形胞元的对角剪切式变后掠翼

Fig. 1 Diagonal shear-type variable-sweep wing based on parallelogram cells

预拉伸硅橡胶表层采用耐高温硅橡胶材料,通过双向预拉伸后黏接到平行四边形边框上,实现蒙皮与框架的连接。随着平行四边形框架的剪切变形,在后掠角变化范围内,硅橡胶表层维持气动表面光滑连续。为了分析预拉伸柔性蒙皮光滑与褶皱的临界状态,即临界剪切角,选取蒙皮单胞元由初始状态、预拉伸状态,以及剪切变形状态的变形过程,如图 2 所示。

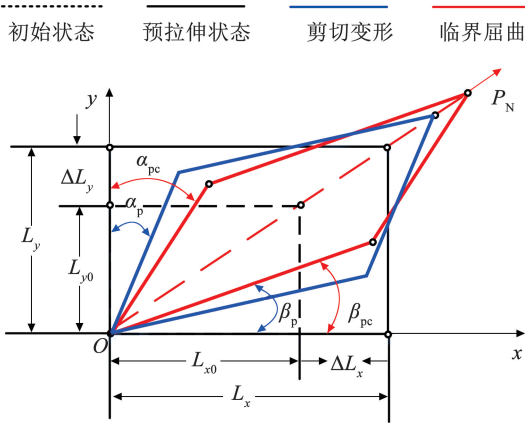


图 2 预拉伸柔性蒙皮预紧和剪切变形过程

Fig. 2 Pre-tension and shear deformation process of pre-stretched flexible skin

变形过程中涉及到的几何变量有:蒙皮胞元初始长度 L_{x0} 、蒙皮胞元初始宽度 L_{y0} ;蒙皮胞元长度方向预拉伸量 ΔL_x 、蒙皮胞元宽度方向预拉伸量 ΔL_y ;蒙皮胞元长度 L_x 、蒙皮胞元宽度 L_y ;硅橡胶表层厚度 t_s 、宽度方向剪切角 α_p 、宽度方向临界剪切角 α_{pc} ;长度方向剪切角 β_p 、长度方向临界剪切角 β_{pc} ;蒙皮总剪切角 θ_p ($\theta_p = \alpha_p + \beta_p$),蒙皮总临界剪切角 θ_{pc} ($\theta_{pc} = \alpha_{pc} + \beta_{pc}$)。

2 蒙皮临界剪切角预测公式

在小剪切变形状态下,预拉伸蒙皮结构是光滑的。随着剪切角的增加,预拉伸蒙皮结构的表面力学特性发生变化,直至失稳出现屈曲褶皱。准确的起皱标准对于确定预拉伸蒙皮结构是否光滑至关重要。预拉伸蒙皮结构相对厚度(厚度/平面尺寸)可

$$\begin{cases} u_p = 0, v_p = 0, & x = 0, y = 0 \\ u_p = L_x \cos \beta_p - L_{x0}, v_p = L_x \sin \beta_p, & x = L_x, y = 0 \\ u_p = L_y \sin \alpha_p, v_p = L_y \cos \alpha_p - L_{y0}, & x = 0, y = L_y \\ u_p = L_x \cos \beta_p + L_y \sin \alpha_p - L_{x0}, v_p = L_x \sin \beta_p + L_y \cos \alpha_p - L_{y0}, & x = L_x, y = L_y \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_p 为硅橡胶 x 方向变形, v_p 为硅橡胶 y 方向变形。

预拉伸硅橡胶表面的应变可以表示为拉伸变形应变和剪切变形应变之和。同时由于硅橡胶是一种

近似为薄膜结构,可以按照薄膜力学特性进行分析。基于张力场理论^[18-21]蒙皮褶皱标准:使用主应力(主主应力 σ_1 和次主应力 σ_2)、主应变(主主应变 ε_1 和次主应变 ε_2),以及二者相结合的方式评估蒙皮的状态(褶皱、松弛、拉紧),判据详见表 1。

表 1 蒙皮褶皱判断标准

Tab. 1 Judgment criteria for skin wrinkling

判断准则	拉紧	褶皱	松弛
应力-应变	$\sigma_2 > 0$	$\varepsilon_1 > 0, \sigma_2 \leq 0$	$\varepsilon_1 \leq 0$

由于预拉伸蒙皮结构的弯曲刚度很小,抵抗面外变形的能力较低,所以可以根据张力场理论忽略其面外刚度。蒙皮产生褶皱的临界状态时,蒙皮中次主应力为零。对预拉伸正交各向异性蒙皮中任一点的临界剪切角度进行计算需要对其热力学性能进行分析,即最小主应力与最大主应变。采用混合准则评估应力状态如下:

$$\sigma_{p2} \leq 0, \varepsilon_{p1} > 0 \quad (1)$$

式中: σ_{p2} 为预拉伸蒙皮结构次主应力, ε_{p1} 为预拉伸蒙皮结构主主应变。 σ_{p2} 、 ε_{p1} 的应力-应变定义如下:

$$\begin{cases} \sigma_{p2} = \frac{\sigma_{px} + \sigma_{py}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{px} - \sigma_{py}}{2}\right)^2 + \tau_{pxy}^2} \\ \varepsilon_{p1} = \frac{\varepsilon_{px} + \varepsilon_{py}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{px} - \varepsilon_{py}}{2}\right)^2 + \frac{1}{4}\gamma_{pxy}^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_{px} 为硅橡胶 x 方向应力, σ_{py} 为硅橡胶 y 方向应力, τ_{pxy} 为硅橡胶剪切应力, ε_{px} 为硅橡胶 x 方向应变, ε_{py} 为硅橡胶 y 方向应变, γ_{pxy} 为硅橡胶剪切应变。

当预拉伸蒙皮结构表层的硅橡胶次主应力为零时,预拉伸蒙皮结构处于平滑到褶皱的临界状态。这种状态下蒙皮所剪切的角即为临界剪切角。考虑预拉伸蒙皮结构单元承受面内剪切载荷,在剪切载荷作用下从初始矩形状态剪切变形为平行四边形。预拉伸硅橡胶蒙皮四边被固定,其剪切单元边界条件为上下左右四边缘固支,四边形对角线的拉伸产生剪切变形。蒙皮单元的变形可以表示为

黏弹性材料,其力学性能与加载载荷、加载频率,以及环境温度等因素密切相关,尤其是在预拉伸状态下这些因素会导致柔性蒙皮产生较大蠕变进而影响其光滑特性,因此需要在其预拉伸状态下考虑蠕变

特性对拉伸变形应变的影响:

$$\begin{cases} \varepsilon_{px} = \varepsilon_{rx} + \varepsilon_{sx} - (\varepsilon_{cx}(t) - \varepsilon_{cx}(0)) \\ \varepsilon_{py} = \varepsilon_{ry} + \varepsilon_{sy} - (\varepsilon_{cy}(t) - \varepsilon_{cy}(0)) \\ \gamma_{pxy} = \gamma_{rxy} + \gamma_{sxy} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ε_{rx} 为预拉伸硅橡胶 x 方向预拉伸应变, ε_{sx} 为预拉伸硅橡胶 x 方向剪切应变, ε_{ry} 为预拉伸硅橡胶

y 方向预拉伸应变, ε_{sy} 为预拉伸硅橡胶 y 方向剪切应变, $\varepsilon_{cx}(t)$ 为预拉伸硅橡胶 x 方向蠕变应变, $\varepsilon_{cy}(t)$ 为预拉伸硅橡胶 y 方向蠕变应变, γ_{rxy} 为预拉伸硅橡胶预拉伸时产生的剪切应变, γ_{sxy} 为预拉伸硅橡胶剪切变形时产生的剪切应变, t 为蠕变发生时间。拉伸变形应变和剪切变形应变表示如下:

$$\begin{cases} \varepsilon_{rx} = \frac{\Delta L_x}{L_{x0}}, \varepsilon_{ry} = \frac{\Delta L_y}{L_{y0}}, \gamma_{rxy} = 0 \\ \varepsilon_{sx} = -\frac{(L_{x0} + \Delta L_x)(1 - \cos \beta_p)}{L_{x0}}, \varepsilon_{sy} = -\frac{(L_{y0} + \Delta L_y)(1 - \cos \alpha_p)}{L_{y0}} \\ \gamma_{sxy} = \tan\left(\arctan\left(\frac{(L_{x0} + \Delta L_x) \sin \beta_p}{L_{x0}}\right) + \arctan\left(\frac{(L_{y0} + \Delta L_y) \sin \alpha_p}{L_{y0}}\right)\right) \end{cases} \quad (5)$$

其中,剪切角度 α_p 和 β_p 均可被总剪切角 θ_p 表示。

其中:

$$\begin{cases} \alpha_p = \arctan\left(\frac{L_x}{L_y}\right) - \arcsin\left(\frac{L_x \cos \theta_p}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2 + 2L_x L_y \sin \theta_p}}\right) \\ \beta_p = \arctan\left(\frac{L_y}{L_x}\right) - \arcsin\left(\frac{L_y \cos \theta_p}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2 + 2L_x L_y \sin \theta_p}}\right) \end{cases}$$

$$C_{r11} = \frac{E_s}{1 - \nu_s^2}$$

$$C_{r12} = \frac{E_s \nu_s}{1 - \nu_s^2}$$

$$C_{r22} = \frac{E_s}{1 - \nu_s^2}$$

$$C_{r66} = \frac{E_s}{2(1 + \nu_s)}$$

由于硅橡胶为各向同性材料,其内部每一点在任意方向上的弹性性能都相同,故独立的弹性系数只有2个,而且硅橡胶厚度与蒙皮单元平面内尺寸相比很小,挠度沿厚度方向变化被忽略,利用应变势能密度公式可以将弹性橡胶材料的本构方程简化为

$$\begin{bmatrix} \sigma_{px} \\ \sigma_{py} \\ \tau_{pxy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{r11} & C_{r12} & 0 \\ C_{r12} & C_{r22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{r66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{px} \\ \varepsilon_{py} \\ \gamma_{pxy} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: E_s 为硅橡胶弹性模量, ν_s 为硅橡胶泊松比。将式(4)与式(6)代入式(1),可以得到以下方程:

$$\begin{aligned} & \left(C_{r11} \left(\frac{L_x \cos \beta_{pc}}{L_{x0}} - 1 - (\varepsilon_{cx}(t) - \varepsilon_{cx}(0)) \right) + C_{r12} \left(\frac{L_y \cos \alpha_{pc}}{L_{y0}} - 1 - (\varepsilon_{cy}(t) - \varepsilon_{cy}(0)) \right) \right) \times \\ & \left(C_{r12} \left(\frac{L_x \cos \beta_{pc}}{L_{x0}} - 1 - (\varepsilon_{cx}(t) - \varepsilon_{cx}(0)) \right) + C_{r22} \left(\frac{L_y \cos \alpha_{pc}}{L_{y0}} - 1 - (\varepsilon_{cy}(t) - \varepsilon_{cy}(0)) \right) \right) = \\ & \left(C_{r66} \tan\left(\arctan\left(\frac{L_x \sin \beta_{pc}}{L_{x0}}\right) + \arctan\left(\frac{L_y \sin \alpha_{pc}}{L_{y0}}\right)\right) \right)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

通过求解式(7)即可得到预拉伸蒙皮结构的临界剪切角。从式(7)可以看出,预紧橡胶蒙皮中产生褶皱的临界剪切角度与初始预拉伸量以及材料的刚度矩阵有关,通过提高蒙皮的初始应力,提高初始预拉伸量可以增大该点的临界剪切角度,即延缓了该点处蒙皮褶皱的产生,增加了蒙皮抵抗面外变形的能力。同时,材料蠕变性能对预紧橡胶蒙皮中产生褶皱的临界剪切角度有一定的影响,降低材料的黏弹性可以提高蒙皮的临界剪切角度与稳定性。

料硅橡胶的蠕变,其线性黏弹性描述的已经比较完善。目前线性黏弹性描述中常采用:标准线性固体模型、Burgers模型,以及广义Maxwell模型等线性机械模型。其中Burgers模型由Maxwell模型与Kelvin模型串联而成,能够较准确地表征该黏弹性材料的蠕变,因此本文采用Burgers模型描述硅橡胶线性黏弹性,Burgers模型其结构如图3所示。

3 蒙皮黏弹性特性分析

目前对黏弹性材料长期蠕变性能预测的方法有:时间-温度或时间-应力-温度等效原理法、经验公式法和元件模型法^[22-24]等。对于纯聚合物材

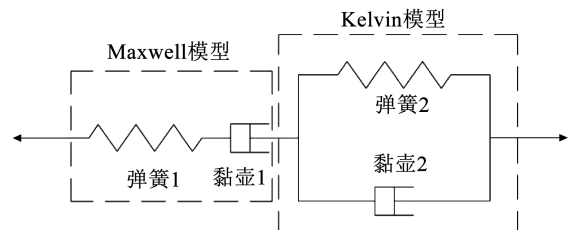


图3 硅橡胶黏弹性 Burgers 模型

Fig. 3 Viscoelastic Burgers model of silicone rubber

Burgers 模型的蠕变应变由弹簧瞬时弹性应变、Kelvin 延迟弹性应变,以及阻尼牛顿黏性流动应变组成,其本构模型可表示为

$$\sigma + \frac{\eta_1 E_1 + \eta_1 E_3 + \eta_2 E_1}{E_1 E_3} \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_3} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_3} \ddot{\varepsilon} \quad (8)$$

式中: η_2 为 Kelvin 模型的黏壶阻尼系数, E_3 为 Kelvin 模型中的弹簧模量, $\dot{\sigma}$ 为外应力 σ 关于蠕变时间的二阶导数, $\ddot{\varepsilon}$ 为总应变 ε 关于蠕变时间的二阶导数。在恒定应力 σ_0 作用下,材料蠕变应变可表示为

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_3} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_3 t}{\eta_2}\right) \right] \right\} \quad (9)$$

为了求解蠕变应变表达式,利用搭建的静态硅橡胶蠕变实验平台进行蠕变性能测试,通过实验拟合其未知参数,其结构如图 4 所示。实验用硅橡胶为预拉伸蒙皮结构所用橡胶,蠕变试样尺寸为 230 mm × 210 mm,实验温度为室温 20 ℃,加载力为 60 N。采用激光位移传感器对硅橡胶试件的变形量进行检测,以 LK-Navigator 软件实时采集蠕变数据,对硅橡胶试件进行多次测量求平均值。

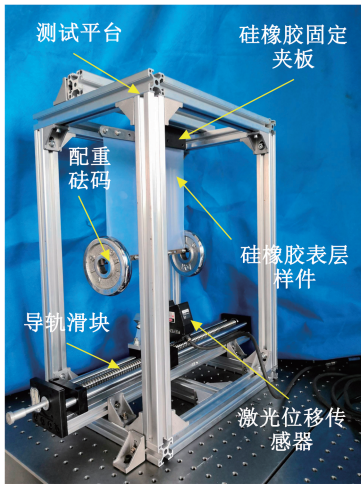


图 4 硅橡胶蠕变实验平台

Fig. 4 Creep test platform for silicone rubber

图 5 为硅橡胶蠕变曲线拟合结果。由图 5 可以看出,随着时间的延长,在拉力作用下硅橡胶发生了蠕变,基于 Burgers 模型对硅橡胶变拉力蠕变实验结果进行非线性拟合,计算得到 Burgers 模型的黏弹性参数见表 2。随着蠕变时间的延长,Burgers 模型蠕变应变近似呈线性增大,与实验结果吻合性好,能够比较准确地描述柔性蒙皮硅橡胶的非线性蠕变行为。

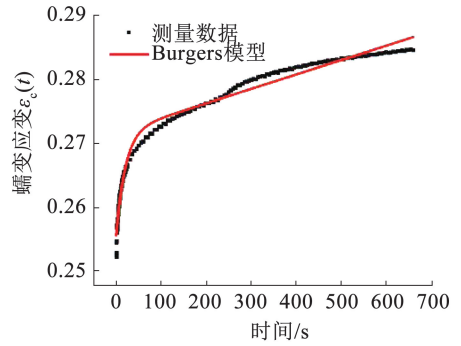


图 5 硅橡胶蠕变曲线拟合结果

Fig. 5 Fitting results of creep curve for silicone rubber

表 2 拟合硅橡胶黏弹性参数及相关系数

Tab. 2 Fitted viscoelastic parameters and correlation coefficients of silicone rubber

E_1 /MPa	E_3 /MPa	η_1 /(MPa·s)	η_2 /(MPa·s)	R^2
1.118	17.674	12 674.177	365.591	0.989

4 蒙皮光滑性验证

4.1 仿真验证

为了验证柔性橡胶预拉伸蒙皮结构的临界剪切角、剪切驱动力和平面外刚度理论模型的准确性,使用有限元分析软件 ANSYS 进行数值仿真验证。预拉伸硅橡胶蒙皮与下方的碳纤维支撑结构黏接,并一起固定在四边形框架内。模型中使用的材料均为各向同性材料特性,并使用壳单元开发了全尺寸模型。预拉伸蒙皮结构的拉伸变形是通过沿 x 方向和 y 方向施加位移产生的,其剪切变形是通过沿对角线方向施加旋转和位移产生的。

有限元模型如图 6 所示,碳纤维条的弹性模量为 $E_{pc} = 96.67$ MPa、泊松比为 $\nu_{pc} = 0.307$,基于橡胶材料的 Yeoh 模型未考虑蠕变,预拉伸硅橡胶材料的性能根据实验测试拟合参数设定为 $C10 = 0.16$ 、 $C20 = 0.11$,泊松比为 $\nu_s = 0.48$ 。

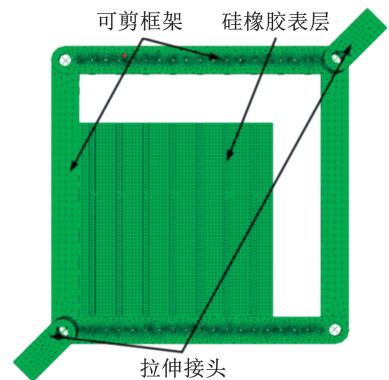


图 6 预拉伸柔性蒙皮有限元模型

Fig. 6 Finite element model of pre-stretched flexible skin

剪切驱动力的有限元仿真重点关注蒙皮结构在

剪切变形中对角拉力的变化,预拉伸蒙皮结构在剪切变形过程中的平面外变形如图7所示。当剪切角为零时,平面外变形等于零。随着剪切角的增大,平

面外变形增大,但数值较小。当剪切角增大到临界剪切角时,预拉伸蒙皮结构会产生褶皱,其平面外变形会立即增大。

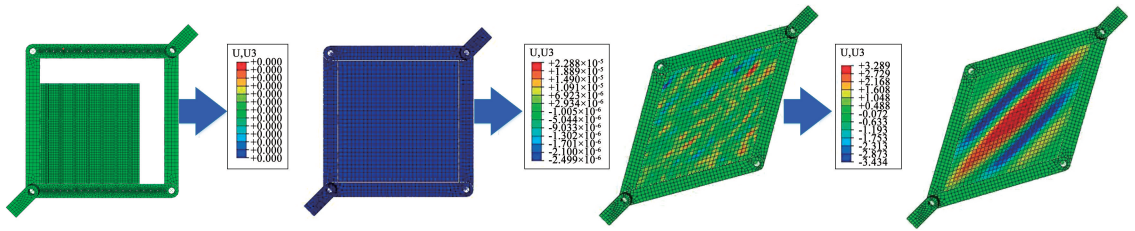


图7 仿真与实验变形模式对比

Fig. 7 Comparison of deformation modes between simulation and experiment

对不同预拉伸量蒙皮的临界剪切角进行仿真,仿真结果如图8所示。仿真结果与未考虑蠕变的理论预测之间有很好的—致性,证明了混合准则与剪切变形板理论相结合的有效性。然而,仿真结果相比理论结果偏小,因为理论模型中未考虑硅橡胶材料的超弹性和双向拉伸的耦合效应。

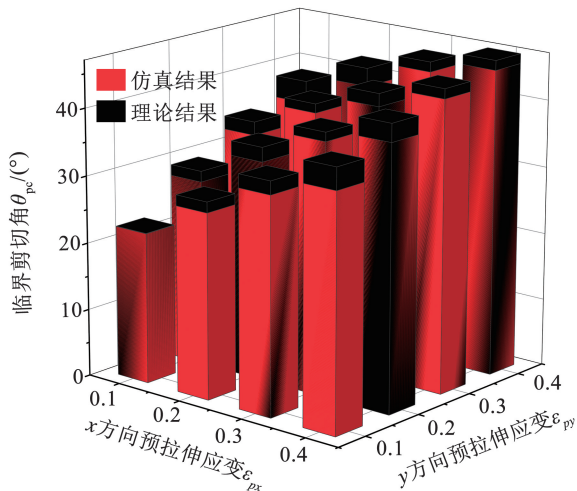


图8 临界剪切角理论与仿真结果的比较

Fig. 8 Comparison of theoretical and simulation results for critical shear angle

4.2 实验结果验证

为了进一步验证剪切驱动力与临界剪切角理论结果的准确性,对蒙皮剪切驱动力与临界剪切角进行实验验证,实验装置如图9所示。实验装置采用黏接预拉伸蒙皮结构的刚性平行四边形框架模拟平行四边形单元,将框架卡盘安装在平行四边形框架的对角转轴上,调整电子拉力实验机的钳口锁紧框架。通过改变电子拉力实验机钳口间距,对预拉伸蒙皮结构进行剪切,同时测量钳口间距和拉伸力曲线,测量结果由拉伸机数据采集系统记录并保存。在剪切变形过程中,采用双目高速相机拍摄蒙皮剪切变形时面外变化图像,根据图像判断蒙皮褶皱的临界剪切角。

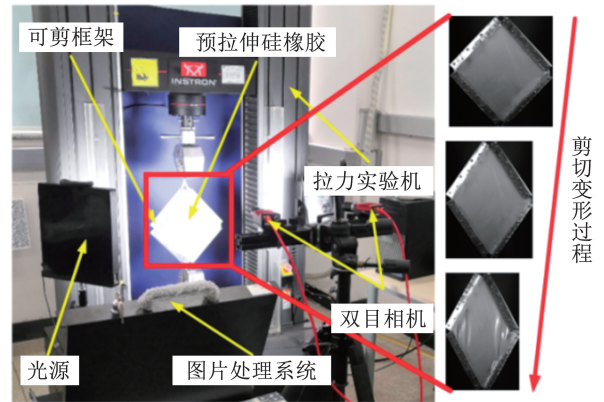


图9 预拉伸蒙皮结构的临界剪切角与剪切驱动力测试装置
Fig. 9 Test device for critical shear angle and shear driving force of pre-stretched skin structure

剪切临界剪切角实验结果见表3。由表3可以看出,理论结果与实验结果基本相符合,误差为13.1%,验证了理论模型的正确性,误差主要由双向拉伸不均匀以及压接不均匀导致。

表3 临界剪切角理论与实验结果对比

Tab. 3 Comparison of theoretical and experimental results for critical shear angle

蒙皮预拉伸量	理论结果	实验结果1	实验结果2	实验结果3
$\Delta L_x/L_{x0} = 0.2,$	34.84	30.90	30.30	31.10
$\Delta L_y/L_{y0} = 0.2$				

5 参数分析及讨论

图10显示了柔性蒙皮单元($a_{p0} = 20\text{ mm}$ 、 $b_{p0} = 40\text{ mm}$ 、 $h_{p0} = 2\text{ mm}$ 、 $t_{ps} = 2\text{ mm}$ 、 $L_x = 200\text{ mm}$ 、 $L_y = 200\text{ mm}$ 、 $t = 0\text{ s}$)在 x 方向预拉伸量 $\Delta L_x/L_{x0}$ 和在 y 方向预拉伸量 $\Delta L_y/L_{y0}$ 对预拉伸蒙皮结构临界剪切角的影响。由图10可以看出,随着 x 方向预拉伸量与 y 方向预拉伸量的增加,蒙皮单元临界剪切角增大。此外还可以看出, x 方向预拉伸量 $\Delta L_x/L_{x0}$ 和 y 方向预拉伸量 $\Delta L_y/L_{y0}$ 之间的差异越小,在总预拉伸量相同的条件下临界剪切角度越大。故与单向拉伸相比,双向拉伸更容易满足光滑性的要求而且总拉伸量更低。

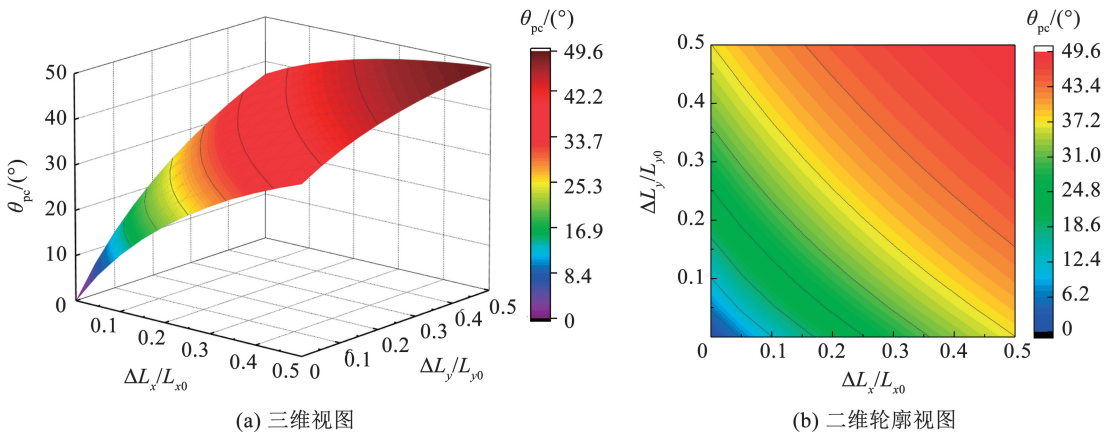


图 10 预拉伸柔性蒙皮长度方向预拉伸量和宽度方向预拉伸量对临界剪切角的影响

Fig. 10 Effect of pre-stretching amounts in length direction and width direction of pre-stretched flexible skin on critical shear angle

研究表明,预拉伸量与硅橡胶表层的蠕变特性对临界剪切角具有显著影响,双向拉伸有利于提高蒙皮的抗褶皱能力,从而在变后掠过程中保持表面光滑性。

为了使本文预拉伸蒙皮更方便工程应用,归纳总结式(1)~(9)并进一步简化,提出如下所示的考虑橡胶蠕变的临界剪切角 θ_{pc} 求解经验公式:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{1 - v_s^2} \sqrt{\left(\frac{L_x \cos \beta_{pc}}{L_{x0}} + \frac{v_s L_y \cos \alpha_{pc}}{L_{y0}} - \Delta \varepsilon(t) (1 + v_s) \right) \times \left(\frac{v_s L_x \cos \beta_c}{L_{x0}} + \frac{L_y \cos \alpha_c}{L_{y0}} - \Delta \varepsilon(t) (1 + v_s) \right)} - \\ & \frac{L_x L_{y0} \sin \beta_{pc} + L_{x0} L_y \sin \alpha_{pc}}{2(1 + v_s) (L_{x0} L_{y0} - L_x L_y \sin \alpha_{pc} \sin \beta_{pc})} = 0 \\ & \alpha_{pc} = \arctan \left(\frac{L_x}{L_y} \right) - \arcsin \left(\frac{L_x \cos \theta_{pc}}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2 + 2L_x L_y \sin \theta_{pc}}} \right) \\ & \beta_{pc} = \arctan \left(\frac{L_y}{L_x} \right) - \arcsin \left(\frac{L_y \cos \theta_{pc}}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2 + 2L_x L_y \sin \theta_{pc}}} \right) \\ & \Delta \varepsilon(t) = 1 + \varepsilon(t) - \varepsilon(0) = 1 + \sigma_0 \left\{ \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_3} \left[1 - \exp \left(-\frac{E_3 t}{\eta_2} \right) \right] \right\} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

虽然建立的模型在较大范围内预测精度良好,但仍存在一些局限:1)理论模型采用了线性黏弹性假设,未能全面覆盖材料在高应变速率下的非线性行为;2)仿真中未充分考虑温度场对材料性能的影响,实际应用中热耦合效应可能导致预测误差。此外,碳纤维支撑结构在多轴剪切耦合过程中的受力状态未被细致建模,后续研究可进一步引入复合材料结构力学分析以提高整体系统的预测能力。未来的研究可进一步探索以下方向:1)引入多场耦合模型,研究温度、湿度等环境因素对蠕变行为及临界剪切角的影响;2)结合高精度超材料或主动控制层,提高柔性蒙皮的变形可控性与响应速度。

皮临界剪切角的理论模型,用于判断蒙皮保持光滑变形的临界状态,并进一步建立了考虑硅橡胶材料黏弹性影响的改进临界剪切角理论模型。

3)通过有限元仿真结果和实验测试的变形测量结果,验证了所建立的包括考虑蠕变的理论模型具有较高的准确性。

4)基于理论模型对预拉伸柔性蒙皮临界剪切角进行的参数分析表明,蒙皮的光滑性与预拉伸量密切相关,临界剪切角随预拉伸量的增加而显著增大。

参考文献

6 结论

1)本文提出了一种适用于剪切式变后掠翼的预拉伸柔性蒙皮方案,该蒙皮能够在剪切变形过程中保持平滑变形并承受空气动力载荷。

2)基于张力场理论建立了通用预拉伸柔性蒙

[1] BARBARINO S, BILGEN O, AJAJ R M, et al. A review of morphing aircraft [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(9): 823. DOI: 10.1177/1045389x11414084
 [2] SOFLA A Y N, MEGUID S A, TAN K T, et al. Shape morphing of aircraft wing: status and challenges [J]. Materials & Design, 2010, 31(3): 1284. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.09.011
 [3] HUEBSCH W W, HAMBURG S D, GULER R W. Aircraft

- morphing technologies[M]//Innovation in aeronautics. Amsterdam: Elsevier, 2012; 37. DOI: 10.1533/9780857096098.1.37
- [4] RODRIGUEZ A. Morphing aircraft technology survey [C]//45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston: AIAA, 2007; 1258. DOI: 10.2514/6.2007-1258
- [5] ANDERSEN G, COWAN D, PIATAK D. Aeroelastic modeling, analysis and testing of a morphing wing structure [C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston: AIAA, 2007; 1734. DOI: 10.2514/6.2007-1734
- [6] BOWMAN J, SANDERS B, CANNON B, et al. Development of next generation morphing aircraft structures [C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston: AIAA, 2007; 1730. DOI: 10.2514/6.2007-1730
- [7] THILL C, ETCHES J, BOND I, et al. Morphing skins [J]. The Aeronautical Journal, 2008, 112 (1129): 117. DOI: 10.1017/s0001924000002062
- [8] KEIHL M M, BORTOLIN R S, SANDERS B, et al. Mechanical properties of shape memory polymers for morphing aircraft applications [C]//Smart Structures and Materials 2005: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies. San Diego: SPIE, 2005; 143. DOI: 10.1117/12.600569
- [9] YU A, XI Fengfeng, MOOSAVIAN A, et al. Design of a sliding morphing skin with segmented rigid panels [J]. Journal of Aircraft, 2018, 55(5): 1985. DOI: 10.2514/1.C034711
- [10] GRANT D, ABDULRAHIM M, LIND R. Flight dynamics of a morphing aircraft utilizing independent multiple-joint wing sweep [C]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 2006; 6505. DOI: 10.2514/6.2006-6505
- [11] OLYMPIO K R, GANDHI F, ASHEGHIAN L et al. Design of a flexible skin for a shear morphing wing [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(17): 1755. DOI: 10.1177/1045389x10382586
- [12] ASHEGHIAN L, REICH G, ENKE A, et al. Shear morphing skins-simulation and testing of optimized design [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(9): 945. DOI: 10.1177/1045389x11411120
- [13] 蒋华毅, 丁江民, 肖洪, 等. 变后掠翼柔性复合蒙皮面外弯曲性能建模与验证 [J]. 大连交通大学学报, 2022, 43(2): 73
JIANG Huayi, DING Jiangmin, XIAO Hong, et al. Modeling and verification of out-of-plane bending performance of flexible composite skin of variable sweep wing [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2022, 43(2): 73. DOI: 10.13291/j.cnki.djdxac.2022.02.013
- [14] YU Jinrui, MA Jiayao. Design and shear analysis of an angled morphing wing skin module [J]. Applied Sciences, 2022, 12(6): 3092. DOI: 10.3390/app12063092
- [15] KÖLBL M, ERMANNI P. Structural design and analysis of an anisotropic, bi-axially morphing skin concept [J]. Aerospace Science and Technology, 2022; 107292. DOI: 10.1016/j.ast.2021.107292
- [16] 封铮, 李辉, 徐志伟. 剪切变后掠角变体机翼结构及柔性蒙皮设计研究 [J]. 航空科学技术, 2024, 35(5): 93
FENG Zheng, LI Hui, XU Zhiwei. Research on shear variable sweep wing structure and flexible skin design [J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(5): 93. DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.05.008
- [17] BAI Yue, YANG Guang, XIAO Hong, et al. An efficient stiffness analysis model based on shear deformation theory for flexible skin shear variable-sweep wing [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(10): 445. DOI: 10.1016/j.cja.2024.02.015
- [18] RODDEMAN D G, DRUKKER J, OOMENS C W J, et al. The wrinkling of thin membranes; part I — theory [J]. Journal of Applied Mechanics, 1987, 54(4): 884. DOI: 10.1115/1.3173133
- [19] RODDEMAN D G, DRUKKER J, OOMENS C W J, et al. The wrinkling of thin membranes; part II — numerical analysis [J]. Journal of Applied Mechanics, 1987, 54(4): 888. DOI: 10.1115/1.3173134
- [20] RAIBLE T, TEGELER K, LÖHNERT S, et al. Development of a wrinkling algorithm for orthotropic membrane materials [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005, 194(21/22/23/24): 2550. DOI: 10.1016/j.cma.2004.07.045
- [21] JARASJARUNGKIAT A, WÜCHNER R, BLETZINGER K U, et al. A wrinkling model based on material modification for isotropic and orthotropic membranes [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2008, 197(6/7/8): 773. DOI: 10.1016/j.cma.2007.09.005
- [22] 林松, 高庆, 李映辉, 等. 丁基橡胶粘弹性材料的非线性蠕变行为 [J]. 机械工程材料, 2007, 31(7): 35
LIN Song, GAO Qing, LI Yinghui, et al. Nonlinear creep behavior of viscoelastic material butyl rubber [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2007, 31(7): 35. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3738.2007.07.011
- [23] 王宝珍, 胡时胜, 周相荣, 等. 不同温度下橡胶的动态力学性能及本构模型研究 [J]. 实验力学, 2007, 22(1): 1
WANG Baozhen, HU Shisheng, ZHOU Xiangrong. Research of dynamic mechanical behavior and constitutive model of rubber under different temperatures [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(1): 1. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2007.01.001
- [24] ZACHARATOS A, KONTOU E. Nonlinear viscoelastic modeling of soft polymers [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(26): 42141. DOI: 10.1002/app.42141

(编辑 张红)