

某浮空器抓手结构力学性能仿真与试验^{*}

张 平^{1,2}, 王平安^{1,2}

- (1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥 230088;
2. 国家级工业设计中心, 安徽 合肥 230088)

摘 要:浮空器抓手结构对维持囊体在外载荷下的平衡与稳定起关键作用。文中提出了一种基于褶皱仿真的浮空器抓手结构力学性能分析方法。以尾翼梯形抓手为研究对象,建立其有限元模型与主要力学参数。对尾翼抓手在面内拉伸载荷下的变形机理进行了分析。根据梯形抓手的成形特点,分析了结构典型的破坏方式并预测了破坏载荷。开展了抓手结构破坏试验,从膜面变形、破坏位置和破坏载荷方面验证了仿真方法的有效性。文中的分析方法和结果可以为提升现阶段浮空器抓手的设计效率和设计质量提供技术基础。

关键词:浮空器;抓手结构;薄膜结构;褶皱仿真;破坏试验

中图分类号:V214 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-5300(2016)05-0030-04

Simulation and Experiment of Mechanical Properties of Load Patch Structure of an Aerostat

ZHANG Ping^{1,2}, WANG Ping-an^{1,2}

- (1. The 38th Research Institute of CETC, Hefei 230088, China;
2. National Industrial Design Center, Hefei 230088, China)

Abstract: The load patch structure of aerostat plays a key role in keeping balance and stabilization of the hulls under external loads. One method for the mechanical properties analyses of the aerostat load patch structure based on wrinkling simulation is proposed in this paper. A finite element model of a trapezoid empennage load patch is established and its main mechanical parameters are given. Then, simulation analysis is carried out for the deformation mechanism under in-membrane tensile load of the trapezoid load patch. According to the forming manner of the load patch, typical failure modes of the structure are analyzed and corresponding failure loads are predicted. Finally, damage tests for the load patch structure are carried out to verify the effectiveness of the simulation method from aspects of membrane surface deformation, damage position and failure load. The proposed analysis method and its results could provide technical basis for enhancing the efficiency and quality of current aerostat load patch design.

Key words: aerostat; load patch structure; membrane structure; wrinkling simulation; damage test

引 言

抓手结构是浮空器的重要连接部件,通过抓手结构的传力,可以实现对浮空器其他部件的固定与操控,有效提高结构稳定性和抵抗外载荷能力。未来先进浮空器要求在长航时、多任务环境下都具有良好的稳定性和安全性^[1],要求抓手结构必须在复杂恶劣环境下

具备稳定良好的使用性能。

浮空器抓手结构属于一种编织薄膜结构^[2-3],在复杂外载荷环境下可能引起结构的失效或破坏。目前针对抓手结构的仿真分析在工程上通常将其简化为连接单元,而对抓手结构本身的设计主要通过试验方法。由于设计成本限制,有限的试验数据难以形成规律性的设计指导。因此,发展抓手结构的精细仿真分析方

^{*} 收稿日期:2016-07-09

法对提高抓手结构设计质量乃至浮空器的使用安全具有重要意义。

本文提出了一种基于褶皱仿真的浮空器抓手结构力学性能分析方法。通过建立典型浮空器抓手结构的力学模型,将基于薄壳理论的膜结构褶皱分析方法应用到抓手模型的力学分析中,获得抓手结构在面内拉伸载荷下的变形和破坏方式,并给出相应的预测破坏载荷。相关结果得到了梯形抓手强度试验验证。本文的分析方法为抓手结构的精细设计与优化提供了一种便捷有效的仿真技术途径。

1 薄膜结构的褶皱仿真方法

薄膜结构是一种具有很小弯曲刚度,只承受面内拉应力的一种膜结构^[4-5]。因此,膜面在张紧状态下,一旦受到压缩容易产生面外变形,形成褶皱。工程上根据膜面某点的主应力水平(假设 σ_1 和 σ_2 分别为最大和最小主应力),可以简单地对膜面受力状态进行判断,即张紧状态($\sigma_2 > 0$)、褶皱状态($\sigma_1 > 0$ 且 $\sigma_2 \leq 0$)和松弛状态($\sigma_1 \leq 0$)。

薄膜结构褶皱现象的有限元仿真以薄壳理论为基础^[6-7],通过薄壳单元的弯曲刚度特性,反映膜面的屈曲和褶皱特性。在商业软件ABAQUS中,通过对膜面初始状态的特征屈曲分析,提取结构的主要屈曲模态,再通过引入尺寸缺陷(一般取薄膜厚度)的方式将该屈曲模态引入实际加载分析中,获得最终膜面的变形与应力结果。具体分析流程如图1所示。

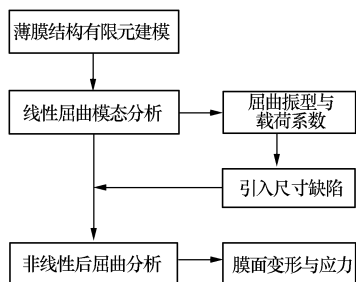


图1 薄膜结构的褶皱仿真分析流程

2 梯形抓手结构的变形分析

2.1 有限元建模

梯形抓手是连接浮空器尾翼与主囊体的常见抓手形式之一。通过在囊体布上预留切缝,采用热合工艺将抓手布、囊体布和密封布连接在一起。在ABAQUS软件中建立某浮空器尾翼梯形抓手的仿真模型,如图2所示。模型主要参数包括抓手布的宽度 w 、厚度 t 和长度 m ,囊体布的长度 L 和宽度 W ,密封布的长度 l 和

宽度 h ,以及囊体布表面受内压产生的拉伸预应力 σ 。

薄膜布材料的弹性模量取 $E=10\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.4$,撕裂破坏强度约为 310 MPa 。建模采用具有弯曲刚度的薄壳单元,边界条件选择将囊体布边界 $S_1 \sim S_4$ 的 x 、 y 、 z 方向的平动自由度约束。

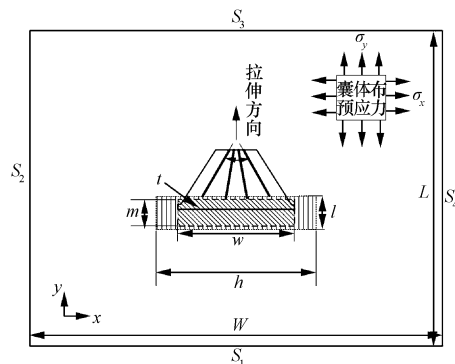


图2 抓手结构的模型及主要参数

2.2 面内拉伸下的变形

面内拉伸状态是浮空器抓手的一种受力形式,对梯形尾翼抓手仿真模型受面内拉伸载荷下的屈曲模态进行分析。在该步分析中,只需施加较小的载荷,此处按目标载荷缩比,取拉伸载荷为 1 kN 。另外取囊体布表面的预应力 $\sigma_x = \sigma_y = 1\text{ MPa}$,得到抓手膜面的屈曲振型和对应的屈曲载荷系数,如图3所示。抓手模型的1阶屈曲模态表现为在抓手布下方的囊体布表面出现了局部凹陷,对应的载荷系数为 0.33 。

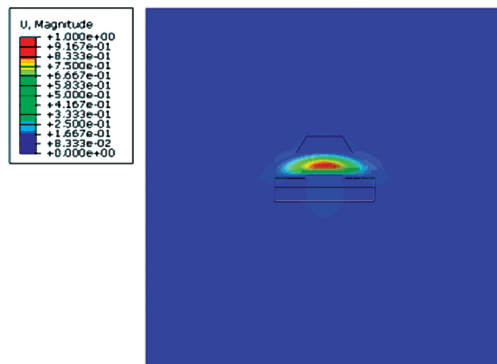


图3 面内拉伸下抓手结构的1阶屈曲模态

提取屈曲模态分析结果,并通过膜面厚度方向的缺陷引入后屈曲分析中。在该步分析中,拉伸载荷取目标值 20 kN ,囊体布表面无预应力。得到抓手结构的变形结果,并根据主应力对囊体布的膜面变形状态进行大致划分,如图4所示,区域①为褶皱状态,区域②为张紧状态,区域③为松弛状态。

以抓手布与囊体布连接切缝的中点为膜面变形代表点,给出该点的面内拉伸方向和面法线方向的位移-载荷曲线,如图5所示。抓手结构在面内拉伸载荷作用下,抓手布与囊体布膜面存在褶皱现象,面内拉伸

方向的变形随载荷变化呈线性,而面法线方向的变形具有明显的非线性。

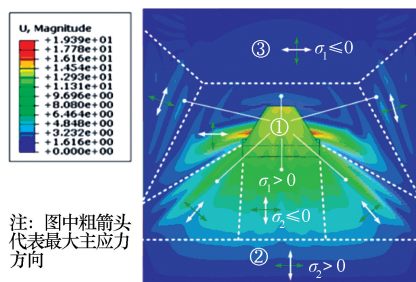


图4 面内拉伸下抓手结构的变形分布

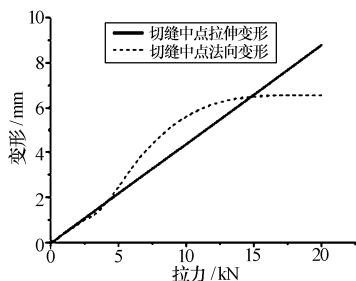


图5 面内拉伸下抓手结构的位移-载荷曲线

3 梯形抓手的破坏分析及载荷预测

根据梯形抓手结构的成形方法,面内拉伸载荷下,抓手布与囊体布的热合边界、密封布与囊体布的热合边界都是可能发生撕裂失效的位置。对这两种破坏情况下的抓手结构进行应力分析,并根据应力-载荷关系预测相应的破坏载荷。

3.1 抓手布失效及破坏载荷

当抓手布由2层布热合而成时,在抓手布与囊体布切缝连接处,抓手布的实际受拉厚度只有1层,在整个膜面受拉变形过程中,该位置容易成为最大应力位置。

图6给出了抓手布与囊体布切缝连接处只有1层布受力的梯形抓手应力云图,对应的拉力为20 kN。可以看出相对于整个膜面,抓手布和囊体布切缝连接区域、囊体布与密封布热合边界的应力水平显著较高,最大应力位于抓手布上与囊体布切缝连接区域的中间褶皱处。

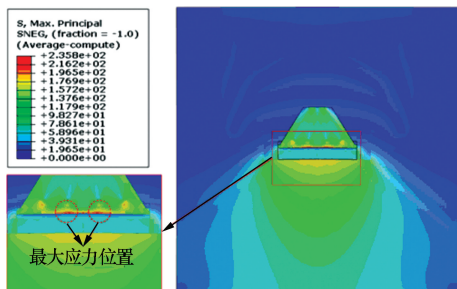


图6 单层抓手布受力下的结构应力云图

提取最大应力位置的单元积分点的平均应力,给出最大主应力随载荷的变化曲线,如图7所示。可以看出在单层抓手布受力下,抓手布与囊体布切缝连接处的最大应力随面内拉伸载荷变化基本呈线性。抓手布的撕裂强度约为310 MPa,由此预测单层抓手布受力下,梯形抓手面内拉伸的破坏载荷约为26 kN。

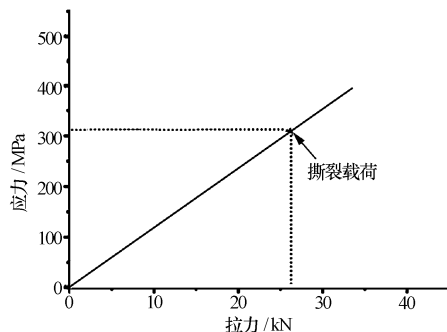


图7 单层抓手布受力下结构最大应力-载荷曲线

3.2 囊体布失效及破坏载荷

在不改变梯形抓手成形方法的条件下,增加抓手布受力面厚度可以提高抓手布与囊体布切缝连接区域的强度。例如,在原抓手布的内部再热合1层布,使得抓手布的实际受拉厚度增加至2层。

图8给出了抓手布与囊体布切缝连接处有2层布受力的梯形抓手应力云图,对应的拉力为20 kN。可以看出囊体布与密封布热合边界的应力水平较图6显著下降,最大应力位于囊体布上与密封布热合边界线中间位置。

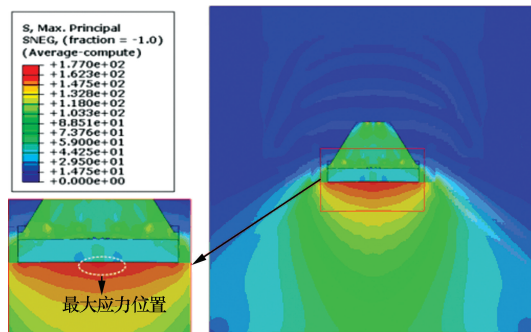


图8 双层抓手布受力下的结构应力云图

图9所示为双层抓手布受力下梯形抓手的最大主应力随载荷的变化曲线。可以看出囊体布与密封布热合边界线上的最大应力随面内拉伸载荷变化呈线性。囊体布的撕裂强度约为310 MPa,由此预测双层抓手布受力下,梯形抓手面内拉伸的破坏载荷约为35 kN。

4 梯形抓手强度试验验证

针对囊体切缝处单层抓手布受力和双层抓手布受

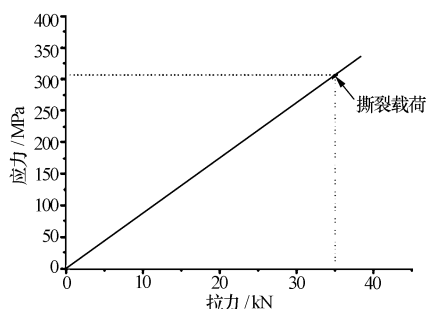


图9 双层抓手布受力下结构最大应力-载荷曲线

力的两种梯形抓手结构,开展面内拉伸破坏试验。将试验件的破坏方式、破坏位置以及破坏载荷与对应的仿真结果进行比较,如图10和图11所示。

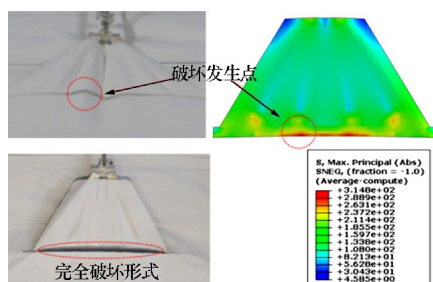


图10 单层抓手布受力下仿真与试验对比

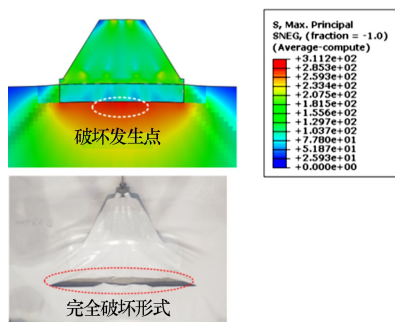


图11 双层抓手布受力下仿真与试验对比

结果显示,试验中两种抓手结构的膜面变形与仿真结果一致性良好,破坏形式均为撕裂破坏,破坏位置与仿真结果也完全一致。对于破坏载荷,仿真预测数值高于试验结果,单层抓手布受力下仿真比试验高约8%,双层抓手布受力下仿真比试验高约6%。

5 结束语

文中针对浮空器柔性结构,提出了一种基于褶皱分析的仿真技术,并以梯形抓手为研究对象,揭示了其在面内拉伸载荷下的变形机理和破坏方式。

开展了梯形抓手面内拉伸破坏试验,观察到的结构变形、破坏位置和破坏载荷验证了仿真方法的有效性,可以采用该方法提高抓手结构设计质量。

参考文献

- [1] 侯东兴,刘东红. 浮空器在军事斗争中的应用及发展趋势[J]. 航空兵器, 2006(3): 60-64.
- [2] 田越,肖尚明. 平流层飞艇囊体材料的发展现状及关键技术[J]. 合成纤维, 2013, 42(4): 11-15.
- [3] 颜标. 浮空器囊体材料力学性能实时测定[J]. 实验科学与技术, 2012, 10(1): 27-30.
- [4] 赵腾飞. 拉伸薄膜褶皱力学行为的数值研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [5] 李云良. 空间薄膜褶皱及其动态特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [6] TOMITA Y, SHINDO A. Onset and growth of wrinkles in thin square plates subjected to diagonal tension[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1988, 30(12): 921-931.
- [7] FRIEDL N, RAMMERSTORFER F G, FISCHER F D. Buckling of stretched strips[J]. Computers & Structures, 2000, 78(1): 185-190.

张平(1985-),男,博士,工程师,主要研究方向为智能蒙皮设计、复合材料力学。

声 明

为适应我国信息化建设,扩大本刊以及作者的知识信息交流渠道,本刊已被封面上的数据库全文收录,其作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性付给。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊申明,本刊将作适当处理。