

仿豆天蛾幼虫充气薄膜管弯曲特性研究

陈东辉^{1,2} 刘伟^{1,2} 吕建华^{1,2} 常志勇^{1,2} 佟金^{1,2}

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要: 受豆天蛾幼虫体壁结构有较强的抗弯稳定性启发, 设计了仿生充气管, 以提高其弯曲特性。制作豆天蛾幼虫体壁组织切片, 观察其体壁与附近肌肉组织的连接方式以及肌肉组织的分布形式, 以此为依据设计了加筋充气管。通过有限元仿真和试验分析了普通充气管和加筋充气管在不同压力下的弯曲特性, 获得了不同充气压力下横向载荷-位移关系曲线以及充气管弯曲极限载荷与充气压力的关系曲线。结果表明: 在所选压力范围内, 充气管的极限载荷与充气压力呈正比, 加强筋的存在提高了充气管的弯曲特性, 同时仿真结果表明, 45°加载时加筋充气管的抗弯能力较0°加载时更强, 两者均高于无加强筋时的抗弯能力。

关键词: 豆天蛾幼虫; 仿生设计; 充气管; 弯曲特性; 有限元分析

中图分类号: TB17; Q811.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)07-0399-06

Bending Characteristics of Inflatable Tube Bioinspired from *Clanis bilineata* Larva

CHEN Donghui^{1,2} LIU Wei^{1,2} LÜ Jianhua^{1,2} CHANG Zhiyong^{1,2} TONG Jin^{1,2}

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: The body wall structure of *Clanis bilineata* larva exhibits a strong stability under bending load. This characteristic prompted the development of a new inflatable tube to improve the stability under bending load. The *Clanis bilineata* larva was chosen to observe the connection between its body wall and nearby muscle tissues, as well as the distribution of these tissues, by using the tissue section technique. The *Clanis bilineata* larva can be simplified as a telescopic cylinder with folds and depressions. A large number of axial muscle tissues were found on the inner cylinder, which were uniformly distributed near the cylinder and divided into several sections in the axial direction. Between adjacent sections, a close connection to the body wall was formed. The distribution of the circular muscle tissues was relatively dense, and the distribution in the reticular structure enhanced the mechanical strength of the whole insect body and improved the stability of the structure. This structure simultaneously became a barrier to reduce impact from the outside world on the internal organs and ensured the normal physiological activities of the *Clanis bilineata* larva. Inspired by this, an inflatable tube with reinforcing ribs was designed. Simulation using the finite element method and experimentation were employed to analyze the bending characteristics of the inflatable tube with and without reinforcing ribs under different pressures. Results indicated that the ultimate load of both inflatable tubes was increased linearly with the increase of pressure; the existence of reinforcing ribs can improve the bending characteristics of the tube, at the same time, the simulation results showed that the bending capacity of inflatable tube with reinforcing ribs was stronger when loading at 45° angle than that at 0° angle, both of which were higher than that without reinforcing ribs.

Key words: *Clanis bilineata* larva; bionic design; inflatable tube; bending characteristics; finite element analysis

收稿日期: 2017-03-20 修回日期: 2017-05-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701102)、中国博士后科学基金第九批特别项目(2016T90256)、第57批中国博士后科学基金面上项目(2015M571367)和吉林省科技发展计划项目(20150520075JH)

作者简介: 陈东辉(1961—),男,教授,博士,主要从事农业机械化工程及工程仿生设计研究,E-mail: dhchen@jlu.edu.cn

通信作者: 常志勇(1980—),男,高级工程师,主要从事农业机械化工程及工程仿生设计研究,E-mail: zychang@jlu.edu.cn

引言

充气薄膜管(以下简称充气管)结构具有质量轻、可折叠、成型快且有较强跨越能力和良好抗震能力等优点,在航空航天、军事反恐、农用无人机机翼设计等领域有着广泛的应用^[1-6]。它利用膜内外的压差作为膜材施加预应力,使膜面能承受一定的外界载荷^[7-9],通过充气的方式使用相对较少的材料获得了较大的结构承载能力。

充气管的弯曲特性一直是研究人员着重关注的问题,弯曲载荷过大将导致结构发生屈曲进而失去稳定性^[10]。充气管主要通过3种方法来提高结构的承载性能:①采用新型膜材以提高薄膜自身的抗弯强度,使结构产生更大的膜面刚度^[11-13]。②应用网格增强的方法,使用等效弹性模量和泊松比分析其承载能力^[14-16]。③添加附属结构以提高结构承载能力,主要采用的方法是在外部覆盖绳索,降低蒙皮应力,使充气结构得以承受更大的气压,从而获得更高的承载性能^[17-18]。前两种方法可归类为通过膜材本身强度的增大来获得更高的承载能力,而第3种方法属于附属结构对充气管承载能力的加强,但存在接触不紧密等问题^[19]。因此,提高膜材本身强度的基础上设计更为合理薄膜加强结构为充气管设计的优化方向。

豆天蛾幼虫的身体结构与充气膜结构在原理上极其类似。幼虫纵横交错的肌肉组织与表皮相连,起到加强筋的作用,使得幼虫身体的刚度得到加强。豆天蛾幼虫的这种结构特性对充气膜结构设计提供了思路。本文通过模仿豆天蛾幼虫肌肉组织对表皮的加强作用,设计一种具有加强筋结构的充气管结构,分析其抗弯性能,以期为加强筋充气管的设计提供依据。

1 豆天蛾幼虫体壁剖面结构

选取豆天蛾(*Clanias bilineata*)幼虫为研究对象,试验样本采集自山东省临沂市。如图1所示,豆天蛾幼虫体长60~90 mm,有3对胸足,4对腹足,1对尾足,身体分节,呈筒状。将幼虫分别沿红线和绿线位置切开,制作其轴向和环向的组织切片样本,使用体视显微镜(ZEISS, Stereo Discovery. V20)来观察其体壁剖面结构。

1.1 轴向体壁剖面结构

图2是轴向体壁附近组织截面图,放大倍数为7.5倍。浅粉色带状结构为豆天蛾幼虫的体壁,呈波纹状,波峰与波谷之间的高度约0.6 mm,在用肉眼观察幼虫时,这种波纹状的特征即为其体表的褶

皱。距离体壁约2 mm的暗红色物质为肌肉组织,从图中可以明显观察到这些肌肉组织呈纤维状,约3~5根。

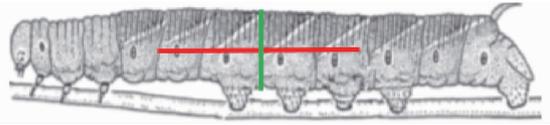


图1 豆天蛾幼虫

Fig.1 *Clanias bilineata* larva

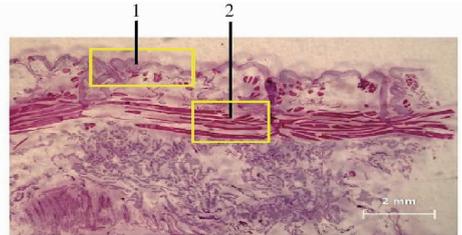


图2 体壁附近组织截面图

Fig.2 Sectional drawing of a tissue near axial body wall

1. 体壁 2. 轴向肌肉组织

放大20倍,如图3所示。将环向肌肉组织的横截面简化为圆形,直径为0.1~0.2 mm。体壁凹陷深度约2 mm,这种凹陷结构使得豆天蛾幼虫的身体有很强的伸缩性,该区域是相邻体节的连接处,环向肌肉组织主要分布在此处,每个体节长度为4~6 mm。

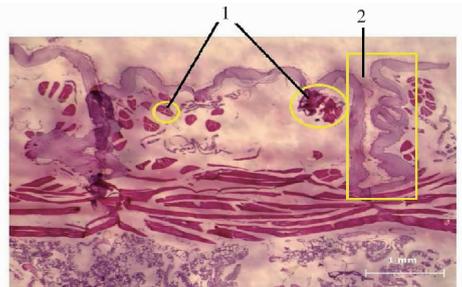


图3 体壁附近组织截面图(轴向)

Fig.3 Sectional drawing of a tissue near axial body wall

1. 环向肌肉组织 2. 体壁凹陷

1.2 环向体壁剖面结构

将环向样本放大7.5倍,如图4a所示。在体壁内侧2 mm附近有呈环状均匀分布的肌肉组织群,该环的宽度约1 mm,这正是图2所示的轴向肌肉组织的横截面。将图4a中线框区域进一步放大至20倍,如图4b所示,可以清晰地看到环向肌肉,它在端部与体壁紧紧连接在一起。

通过以上对豆天蛾幼虫组织切片的观察,还原出其体壁及附近肌肉组织的分布情况,把豆天蛾幼虫简化成一个圆柱状有褶皱的可伸缩筒体,筒体的内侧分布着大量的轴向和环向肌肉群,它们靠近筒体均匀地分布,在轴向上分成若干节,相邻2节之间紧密连接,这种网状结构的肌肉组织使得整个虫体

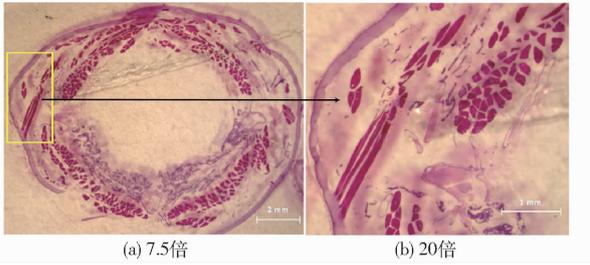


图 4 体壁附近组织截面图(环向)

Fig. 4 Sectional drawing of a tissue near circumferential wall

结构的强度加强,提高了虫体结构的稳定性。

2 试验设计

2.1 充气管设计

豆天蛾幼虫的身体结构为一种膜结构,体壁是表面的薄膜材料,体内一定压力的液体等同于膜结构内的压力气体,肌肉组织则起到加强筋的作用。模仿幼虫的这种结构特性,设计加筋充气管,并传统充气管进行对比试验,分析加筋充气管的抗弯稳定性。

试验中设计的加筋充气管所用的薄膜材料为聚乙烯薄膜,弹性模量为 269 MPa,泊松比为 0.418,加强筋所用的材料为橡胶,弹性模量为 5.02 MPa,泊松比为 0.481。橡胶加强筋粘贴在塑料薄膜载片上,轴向 4 条,环向 3 条,充气薄膜管成型后直径为 57.614 mm,长度为 400 mm,如图 5 所示。

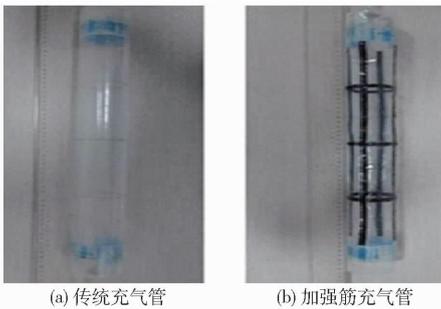


图 5 充气管示意图

Fig. 5 Sketches of inflatable tube

2.2 充气管有限元仿真

使用 ANSYS 软件中的 shell181 单元来模拟试验中的塑料薄膜材料,使用 beam189 单元来模拟橡胶材料。薄膜的划分在圆周方向平均分为 16 份,轴向平均分为 80 份;每个环向加强筋平均分为 16 份,轴向加强筋平均分为 80 份;采用耦合节点自由度的方法模拟加强筋与薄膜之间的粘贴。得到传统充气管的有限元模型如图 6a 所示,对于加筋充气管而言,其薄膜部分与普通充气管一致,其内部的加强筋网络如图 6b 所示。

纵向加强筋共有 4 条,均匀分布,横向载荷的施

加方向可能会影响加强筋的加强效果。因此规定,横向载荷的方向指向纵向加强筋时为 0° 加载,指向两条纵向加强筋与横截面交点连线的中点时为 45° 加载,在研究加筋充气管弯曲特性的过程中探讨横向载荷加载方向对其承载特性的影响。

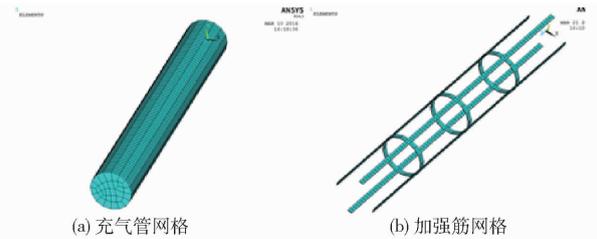


图 6 有限元模型

Fig. 6 Finite element models

2.3 充气管弯曲试验

试验中主要的仪器和设备包括 MTS (C43.104) 型电子万能试验机(量程 1 000 N,精度 0.1 N)和气压表(量程 40 kPa,精度 0.1 kPa)。

试验中各物品的布置如图 7 所示,充气管两端用端盖密封,在一端施加横向载荷,另一端盖中心开通孔,与压力表和打气筒连接,支管上的换向阀控制打气筒支路开闭,同时保证压力表始终可监测充气管内气体压力。整个试验在室温下进行,温度变化带来的影响忽略不计。装置连接好后安装在电子万能试验机上,试验机横梁上升速度为 100 mm/min,试验充气压力分别为 5、7、9、11、13 kPa,每个压力下做 3 次重复试验,获得不同充气压力下的弯曲加载曲线。

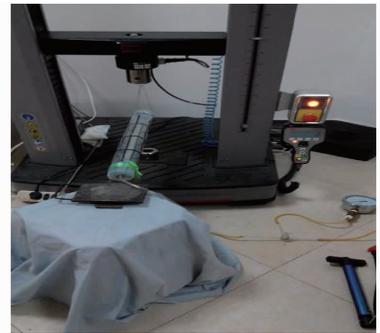


图 7 充气管横向弯曲加载照片

Fig. 7 Picture of inflatable tube under transverse loading

3 结果与讨论

3.1 充气管仿真结果

因 11 kPa 压力下充气管状态较稳定且承受应力较大,方便观察,故以 11 kPa 的充气压力为例对仿真结果进行分析。图 8 为 0° 加载时加筋充气管的应力云图,应力云图中靠近固定端区域的应力均为负值,说明这些区域承受压应力^[20],褶皱在这些区域出现,越靠近充气管的固定端,弯矩越大,褶皱

也越明显;而远离固定端受弯矩影响较小,主要受充气压力的拉应力,这些区域不出现褶皱。

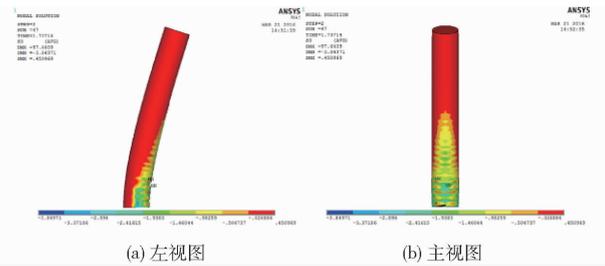


图8 0°加载时加筋充气管应力云图

Fig. 8 Stress nephograms of inflatable tube with reinforcing ribs under loading at 0° angle

加筋充气管45°加载和普通充气管的应力分布情况与之类似,为比较三者之间的区别,在仿真结果的载荷子步中挑选横向载荷近似相等时3种情况下的应力云图,对其褶皱区域做进一步分析。

图9为3种情况下的褶皱区域应力云图的局部放大图。由图9a和图9b对比可看出,普通充气管的褶皱以环向形式分布,越靠近固定端褶皱越深,应力(负值)的绝对值也越大;相比之下,加筋充气管应力云图应力的绝对值略小,其弯褶程度较小,但是其褶皱的扩展范围比普通充气管要大,原因是加强筋的存在一方面分担了薄膜承载的应力,另一方面它能够协助薄膜应力的扩散,使得褶皱区域膜面应力相对均匀化,褶皱的深陷程度减弱。以上对比结果说明加强筋对褶皱产生了抑制作用,对整个结构起到了加强效果。由图9a和图9c对比可看出,对于加筋充气管而言,0°加载和45°加载这2种情况下的褶皱分布情况基本相同,45°加载时,褶皱的深陷程度减弱,而其褶皱范围相比于0°加载时略小,45°加载比0°加载时的承载能力更强。

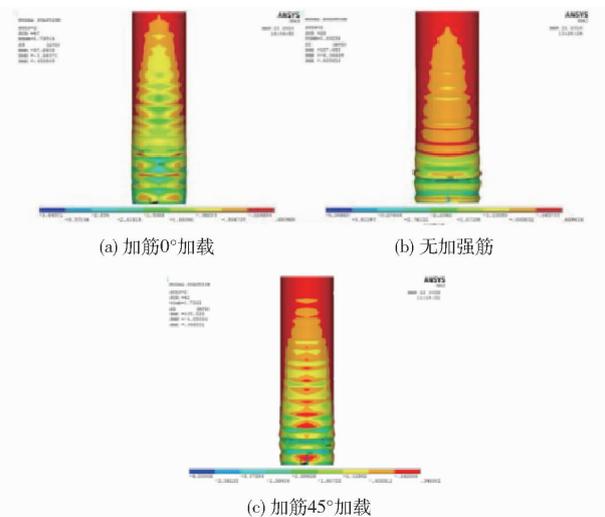


图9 褶皱区域局部视图

Fig. 9 Local views of fold region

对于加强筋而言,它们分担了一部分薄膜承受

的载荷,如图10所示,弯曲程度大的位置对应的是薄膜褶皱的集中区,这些位置压应力较大,与薄膜的应力状态吻合,这恰恰说明了加强筋对薄膜承载的分担作用。0°加载时,压应力主要分布在出现弯褶一侧的1条加强筋上;而45°加载时,弯褶一侧的2条加强筋都在承载,且压应力对称分布。

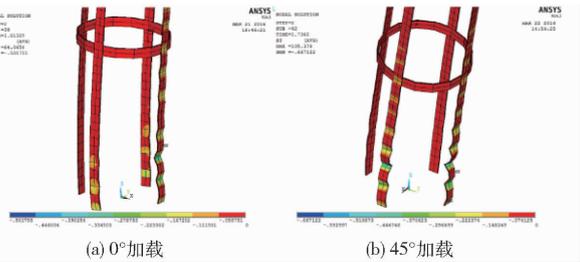


图10 加强筋应力云图

Fig. 10 Stress nephograms of reinforcing ribs

充气管端部受横向载荷作用时,弯褶一侧母线上各点的横向位移反映了褶皱深陷情况。如图11所示,从有限元分析结果中提取充气管弯褶一侧母线轴向位置上各点的横向位移。由图11a可知,整体来看3种情况的趋势基本一致,横向位移均在靠近固定端的位置上有一定的波动,这种波动在距离固定端超过120 mm之后基本消失,轴向各个位置的横向位移变化趋于平稳,说明褶皱已经基本消失。波动区域反映出充气管的褶皱分布情况,可见褶皱主要集中在距离固定端0~120 mm的位置上,超过这一范围,几乎不存在横向位移的波动。此外,横向位移由大到小为无加强筋充气管、0°加载时的加筋充气管和45°加载时的加筋充气管。由图11b所示的局部视图可知,3种情况下充气管的横向位移在0~60 mm的位置上波动较大,无加强筋充气管在20~40 mm的位置上甚至有较为剧烈的震荡,在25 mm附近褶皱最深,可达-4 mm。而有加强筋充气管的横向位移波动则相对较小,0°加载时,在10~20 mm和50~60 mm的位置上有2~3 mm左右的波动;45°加载时,横向位移波动最小,主要集中在15、30、45 mm这3个位置上。可见加强筋使得褶皱区得到很好的分散,这种量化分析进一步说明了加强筋对充气管弯曲过程中褶皱的抑制作用,提高了其抗弯特性,但是其抗弯特性受到载荷施加方向的影响,45°加载时的弯褶程度小于0°加载情况。

3.2 弯曲试验结果

以充气压力为11 kPa为例,对于普通充气管,其弯曲特性曲线如图12所示。从图中可以看出,横向位移约在45 mm前,载荷随横向位移的变化近似线性,随后在45~55 mm范围内经历了短暂的非线

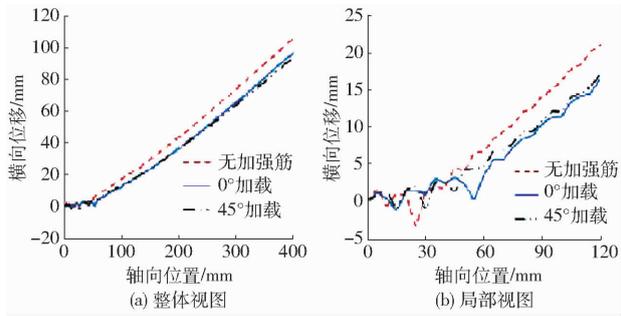


图 11 弯褶一侧母线位置各点横向位移

Fig. 11 Lateral displacements of points on side of bent pleat bus

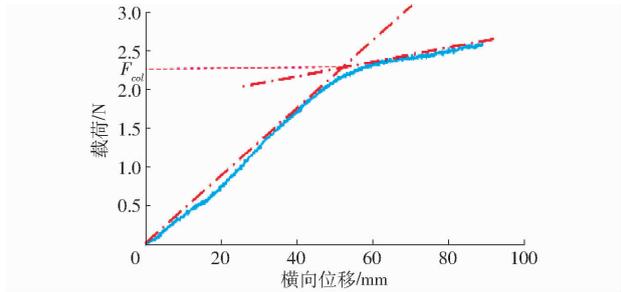


图 12 充气管横向弯曲加载曲线

Fig. 12 Curves of transverse loading

性段,这时载荷-位移曲线的斜率逐渐减小,在这一区间内,充气管达到了极限弯矩。对图中数据作如下处理:将曲线的 2 个线性段对应的数据点分别进行曲线拟合,得到 2 个线性拟合方程,方程对应的曲线如图中 2 条倾斜点划线,2 条线交点的纵坐标即为充气管弯曲过程中的极限载荷 F_{col} 。拟合方程联立求解得到此时的极限载荷为 2.223 N。

图 13 所示为不同压力下的载荷-位移曲线。达到极限载荷之前,类似于悬臂梁端部承受横向载荷的特征,每一条曲线线性段的斜率基本相同,说明试验范围内,充气管的抗弯刚度不随充气压力的变化而变化。对曲线中的数据进行同样的处理,得到极限载荷,每个充气压力下做 3 组重复试验,取平均值,结果如表 1 所示。

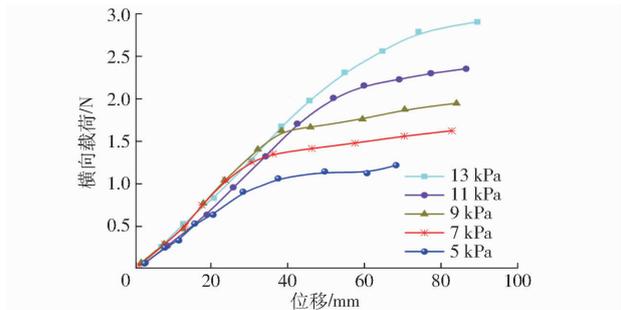


图 13 普通充气管不同压力下弯曲加载曲线

Fig. 13 Curves of transverse loading of ordinary inflatable tube under different pressures

如图 14 所示。充气压力与极限载荷呈现明显的线性关系, R^2 达到 0.985, 拟合结果可以接受。

表 1 普通充气管不同充气压力下的极限载荷

Tab. 1 Limit load of ordinary inflatable tube under different pressures

充气压力/ kPa	极限载荷/N			平均值/ N	标准差/ N
	第 1 组	第 2 组	第 3 组		
5	0.98	1.08	1.05	1.04	0.05
7	1.40	1.37	1.40	1.39	0.02
9	1.70	1.66	1.65	1.67	0.03
11	2.18	2.25	2.24	2.22	0.04
13	2.58	2.63	2.61	2.61	0.03

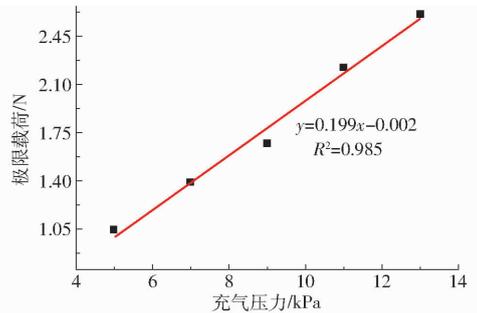


图 14 普通充气管充气压力与极限载荷关系的拟合结果

Fig. 14 Polynomial fitting result of pressure - limit load of ordinary inflatable tube

加强筋充气管的试验过程与普通充气管相同,得到不同充气压力下的加载曲线如图 15 所示。与图 13 普通充气管弯曲特性曲线相比,曲线趋势较为接近。

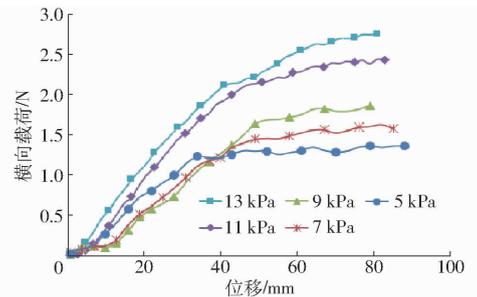


图 15 加筋充气管不同压力下的弯曲加载曲线

Fig. 15 Curves of transverse loading of inflatable tube with reinforcing ribs under different pressures

用同样方法获得加筋充气管充气压力与极限载荷之间的关系,如图 16 所示,与普通充气管情况相同,呈现出线性趋势,然而当充气压力超过 10 kPa 时极限载荷反而小于相同条件下普通充气管的结果。

出现这种情况的原因是加工工艺的限制,加强筋的末端与充气管的端盖之间存在 2 ~ 3 mm 的间距,这使得充气管刚度在固定端附近存在一个突变,应力集中,对于普通充气管,距离固定端稍远的位置

对充气压力和极限载荷平均值进行拟合,结果

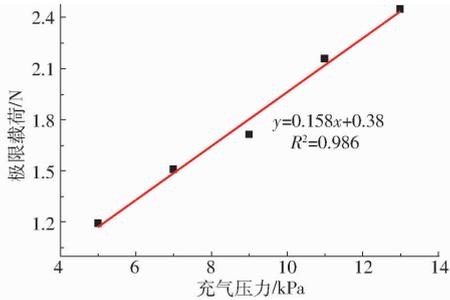


图 16 加筋充气管充气压力与极限载荷关系的拟合结果

Fig. 16 Polynomial fitting result of pressure - limit load of inflatable tube with reinforcing ribs

尚可分担部分应力。当充气压力较小时应力集中效果弱于加强筋的增强效果,整体呈现加强效果;充气压力较大时应力集中效果强于加强筋的增强效果,整体呈现削弱效果。

4 结论

(1) 豆天蛾幼虫体壁与其附近的肌肉组织组成的系统对其身体的稳定性有明显的加强作用,受这一特性的启发,设计了加筋充气管。

(2) 弯曲特性仿真中,使用节点耦合自由度的方法添加加强筋,分析了加强筋提高充气管承载能力的机理,结果表明,横向载荷在 45° 加载时,极限载荷比 0° 加载时略大,二者均显著高于无加强筋时的极限载荷。

(3) 弯曲试验表明,充气管的极限载荷与充气压力呈正比。同时对比普通充气管和加筋充气管的极限载荷,证实了加强筋对充气管抗弯能力的增强效果。试验所得的载荷-位移曲线与仿真曲线趋势相同,褶皱分布情况基本一致。

参 考 文 献

- CADOGAN D P, LIN J K. Inflatable solar array technology [C] // 37th Aerospace Science Meeting and Exhibit, AIAA - 99 - 1075, 2013.
- GUAN F L, DAI L, XIA M. Pretension optimization and verification test of double-ring deployable cable net antenna based on improved PSO [J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 32(1): 19 - 25.
- 肖潇, 关富玲. 空间薄膜结构展开分析模型研究综述 [J]. 南华大学学报: 自然科学版, 2015(3): 103 - 110.
XIAO Xiao, GUAN Fuling. Study on analysis model of deployable space membrane structure [J]. Journal of University of South China: Science and Technology, 2015(3): 103 - 110. (in Chinese)
- MIYAZAKI Y, UCHIKI M. Deployment dynamics of inflatable tube [C] // 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA - 2002 - 1254, 2002.
- DAI L, GUAN F L. Shape-sizing nested optimization of deployable structures using SQP [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(7): 2915 - 2920.
- 胡惠琴, 张百平. 膜材建筑 [J]. 建筑学报, 1994(5): 37 - 42.
HU Huiqin, ZHANG Baiping. Membrane structures [J]. Architectural Journal, 1994(5): 37 - 42. (in Chinese)
- 陈志华. 多姿多彩的充气膜结构 [J]. 建筑知识, 2000(4): 30 - 33.
CHEN Zhihua. The colorful inflatable membrane structure [J]. Architectural Knowledge, 2000(4): 30 - 33. (in Chinese)
- HIGUCHI K, WATANABE K, WATANABE A, et al. Design and evaluation of an ultra-light extendible mast as an inflatable structure [C] // 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA - 2006 - 1809, 2006.
- PUIG L, BARTON A, RANDO N. A review on large deployable structures for astrophysics missions [J]. Acta Astronautica, 2010, 67(1): 12 - 26.
- BREIVIK N L, WATSON J J, AMBUR D R. Buckling of long, thin inflatable cylinders loaded in axial compression [C] // 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA - 2003 - 1841, 2003.
- 张其林. 索和膜结构 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- 周涛. 二维网格复合材料点阵结构及其刚度与强度分析 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
ZHOU Tao. Analysis of stiffness and strength of two-dimension grid composite lattice structures [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- KABCHE J P, PETERSON M L, DAVIDS W G. Effect of inflation pressure on the constitutive response of coated woven fabrics used in airbeams [J]. Composites: Part B, 2011, 42(3): 526 - 537.
- ALLRED R E, HOYT A E, MCELROY P M, et al. UV rigidizable carbon-reinforced isogrid inflatable booms [C] // 43th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA - 2002 - 1202, 2002.
- SCARBOROUGH S E, CADOGAN D P. Elevated temperature mechanical characterization of isogrid booms [C] // 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA - 2003 - 1824, 2003.
- LIN J, SAPNA G, SCARBOROUGH S, et al. Inflatable rigidizable isogrid boom development [C] // AIAA Conference, 2002.
- BAGINSKI F. Simulating clefts in pumpkin balloons [J]. Advances in Space Research, 2010, 45(4): 473 - 481.
- FUKE H, IZUTSU N, AKITA D, et al. Progress of super-pressure balloon development; a new "Tawara" concept with improved stability [J]. Advances in Space Research, 2011, 48(6): 1136 - 1146.
- 杜振勇. 充气梁弯皱特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
DU Zhenyong. Research on bending-wrinkling characteristics of inflated beams [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- 聂毓琴, 孟广伟. 材料力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.