含开口复合材料柱面壳压缩性能

阎崇年 范 舟 程小全 郦正能

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 实验研究了含开口补强三分之一弧长复合材料柱面壳结构的压缩行为. 测试的开口补强件在开口处最终发生屈曲破坏,其最终屈曲载荷为 65.922 kN. 利用 ABAQUS 有限元软件建立相应有限元模型研究其屈曲行为,将屈曲破坏形式及载荷的计算结果与实验结果进行比较,证明所建立的模型正确有效. 研究结果表明:在不补强情况下,随着开口面积增加,压缩屈曲载荷并非完全递减,而是在某一个开口面积范围内具有极大和极小值;在补强情况下,如果开口面积一定,屈曲载荷与开口高度成正比,与开口宽度成反比. 因此,在设计和工艺允许的情况下,应尽量增加开口高度.

关 键 词: 柱面壳; 开口; 压缩; 屈曲分析

中图分类号: TB 33

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)07-0920-05

Compressive behaviour of composite cylindrical shell with open hole

Yan Chongnian Fan Zhou Cheng Xiaoquan Li Zhengneng

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The compressive behavior of one-third composite cylindrical shell with opening reinforcement was studied under a compress load. The reinforced specimen was tested and failed in buckling at 65.922 kN near the open hole. A finite element model was established in ABAQUS to investigate the buckling behavior of the composite cylindrical shell. The computational results and experimental results of buckling failure mode and buckling load were compared to verify the validity of the finite element model. The results show that as opening area increases, the buckling load of the shell without reinforcement does not decrease progressively. However, in a certain range of opening area, the structure gets maximum and minimum buckling load values. While in the case of reinforcement, with the opening area being constant, the buckling load is in direct proportion with opening height, and is in inverse proportion with opening width. To considering design and workmanship, opening height should be increased.

Key words: composite cylindrical shell; open; compression; buckling analysis

在复合材料结构设计中,应尽量将结构设计成完整件,但是由于飞行器的维护、修理方面的要求,不可避免地需要在表面设计开口.

国内外对复合材料柱壳结构的研究比较多,文献[1-2]利用有限元素法分别对平面布与单向带铺层制成以及三维编织复合材料柱壳进行了压缩性能分析,得到了提高柱壳结构压缩性能的最佳铺层方式. 文献[3]还就复合材料柱壳铺层顺序对屈曲载荷的影响进行了优化,提出了比传统遗传算法更优的优化算法. 文献[4]进行了含孔圆柱轴压缩屈曲和孔形优化的研究,采用参数映射法研究了不同长径比、径厚比以及椭圆位置对受轴向压缩载荷的圆柱壳的屈曲载荷的影响. 文献[5-6]利用解析法研究了环向分层损伤简单铺层复合材料柱面壳的屈曲问题. 文献[7-10]利用有限元素法对含裂纹复合材料开口结构

收稿日期: 2011-07-13; **网络出版时间**: 2012-06-29 20:22

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120629.2022.011.html

作者简介: 阎崇年(1970-),男,辽宁大连人,博士生,ycn2885@163.com.

的压缩屈曲性能进行了研究,提出了有效的结构补救方法. 文献[11]采用有限元和解析方法研究了碳纤维增强聚合物基复合材料修补空心柱体结构的屈曲分析,结果表明碳纤维增强聚合物基复合材料对提高受压结构载荷效果明显. 目前,对含开口复合材料柱壳结构中开口尺寸对结构强度的影响研究较少.

本文就含开口复合材料柱壳结构的压缩性能进行研究,首先计算分析未开口完整件柱壳和开口补强后柱壳的压缩屈曲载荷,并与实验结果对比,验证所建模型的正确性. 然后利用该有限元模型分析两种结构情况:①在无开口的完整件上开不同尺寸的矩形开口,考虑结构在开口不补强情况下,柱壳结构屈曲载荷的变化,得出屈曲载荷与开口面积的关系;然后对比要满足结构上留有 120 mm × 180 mm 的矩形开口,直接开口与开口后补强两种情况下屈曲载荷的差异,并对补强效果进行评估. ②研究补强结构在相同的开口面积下,开口尺寸与柱壳结构屈曲载荷的关系,对提高结构屈曲强度的开口方式进行探讨. 本文的分析方法和结果可为柱壳结构开口设计提供一定参考.

1　实　验

1.1　试　件

完整件为三分之一弧长(120°)的柱形壳,外径 257 mm,高 608 mm,柱壳厚度为 1.6 mm. 在壳体周向 30°与 90°以及高度 196 mm 与 392 mm 位置处,有宽为 10 mm 的"井"字形筋条,加强筋厚度为 2 mm. 柱壳左右两侧有前后各 8 mm 厚,20 mm宽,588 mm 高的加强筋,用来防止柱壳受压时在较低载荷作用下发生破坏. 为了对比成型工艺,分别用热压罐和 RTM 成型工艺各做一件. 完整件实物如图 1 所示. 开口件除了在筋条围成的口框中央有高 170 mm、宽 230 mm 的矩形开口外,结构参数与完整件相同,且采用 RTM 工艺成型. 为了提高开口件的屈曲强度,柱壳内表横纵筋条围成的矩形范围内(图 1)用一个补片加强. 补片中央开有高 120 mm、宽 180 mm 的矩形开口,补片边缘和筋条边缘相接触,补片与蒙皮搭接采用二次胶结,最终形成开口补强件(图 2). 此外为缓解矩形开口直角处的应力集中效应,改直角为半径 15 mm 的圆角. 同样,补片中央矩形开口的圆角半径也为 15 mm. 最终柱壳所用材料及其力学性能在表 1 中列出,表 2 所示为蒙皮、筋条、加强筋和补片的铺层方式.



图 1　完整件(内表面)实物图



柱面外表面　　柱面内表面

图 2　开口补强件实物图

表 1　柱壳铺层材料及其力学性能

材料	E_{11}/ GPa	E_{22}/ GPa	G_{12}/ GPa	μ_{12}	t/mm
碳纤维单向布 T300/6808	117	8	3	0.3	0.16
碳纤维单向布 T300/6808	117	8	3	0.3	0.125
碳纤维织物 G814/6084	63	63	4.1	0.06	0.24

表 2　柱壳材料属性及铺层角度

结　构	材　料	铺层方式	层　数
蒙皮	碳纤维单向布 T300/6808(0.160 mm)	$[45/-45/0_2/90]_s$	10
纵向筋条	碳纤维单向布 T300/6808(0.125 mm)	$[45/-45/0_2/45/-45/0/90]_s$	16
横向筋条	碳纤维单向布 T300/6808(0.125 mm)	$[-45/45/90_2/-45/45/90/0]_s$	16
两侧加强筋	碳纤维单向布 T300/6808(0.125 mm)	$[45/-45/0_2/45/-45/0/90/90/0/-45/45/0_2/-45/45/45/-45/0_2/45/-45/0]_s$	64
补片	碳纤维织物 G814/6084	$[0_{11}]$	11

1.2　加载与应变测量

实验全部在 INSTRON 8802 材料试验机上进行,应变数数据采集使用北航研制的 BYZ-2 应变仪. 根据受载实际情况,试验件应当承受压缩载荷,因此考虑设计上下两个夹具(图 3)给予夹持,方便试验机的加载端施加压缩载荷. 加载过程采用载荷控制,初始预载荷为 -1 kN,应变仪清零,加载速度 -0.5 kN/s. 同时为了验证 ABAQUS 建

模的有效性,实验前在结构 14 处特定位置上贴有应变片,在实验加载过程中记录应变,将真实应变与有限元模型对应载荷下应变值做比较,以此验证有限元模型的正确性. 所有试件由航天科工集团第 306 所生产.

1.3 实验结果与分析

开口补强件的屈曲载荷为 65.922 kN,最终破坏在开口的左侧,如图 4 所示. 从图中可以看出,开口造成了传力路径的改变,引起了开口两侧结构的应力集中,使得该处最容易发生失稳.



图 3 上下两端加载夹具



图 4 开口件屈曲破坏图

2 理论建模

2.1 有限元建模

利用 ABAQUS 软件建立原始未开口完整件模型和开口补强柱壳模型,模型的每一个区域都采用四节点壳单元. 未开口完整件共划分 7 760 个单元,开口补强模型共划分 13 600 个单元. 图 5、图 6 分别为未开口柱壳和开口补强柱壳的网格划分图.

边界条件:下端固支,上端耦合边界的 x,y 方向的位移. 加载方式:上端单位弧长上加单位力. 每个试件的边界条件和加载方式都相同.



图 5 未开口完整件模型网格划分图

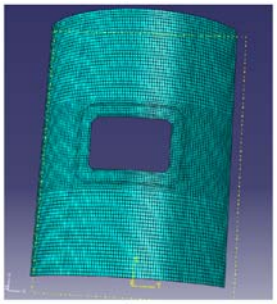


图 6 开口补强件模型网格划分图

2.2 屈曲载荷的计算

利用 ABAQUS 有限元软件计算:

计算未开口完整件的屈曲模态和频率,得到频率为 283.04,则屈曲载荷

$$P_{\max} = 1\ \text{kN/m} \times 0.257\ \text{m} \times 283.04 \times \frac{2}{3}\pi = 152.34\ \text{kN}$$

这与实验结果 153.937 kN(热压罐工艺)和 143.259 kN(RTM 工艺)分别相差 1.03% 和 6.34%,误差在可以接受的范围内. 图 7 所示为完整件屈曲模态图(一阶).

从图 7 可以看出中央偏上为危险区,这与真实结构破坏结果较为吻合,由此可以证明建立的未开口完整件有限元模型是准确可信的.

同理在 ABAQUS 软件中计算开口补强件的屈曲模态和频率,得到频率为 135.50,屈曲载荷

$$P_{\max} = 1\ \text{kN/m} \times 0.257\ \text{m} \times 135.5 \times \frac{2}{3}\pi = 72.47\ \text{kN}$$

这与实验结果 65.922 kN 的误差为 5.28%,在工程上为可以接受的误差. 图 8 所示为开口补强件屈曲模态图(一阶). 从图中可以看出,开口的两侧为危险区域,与图 4 中的实际失稳区域相吻合.

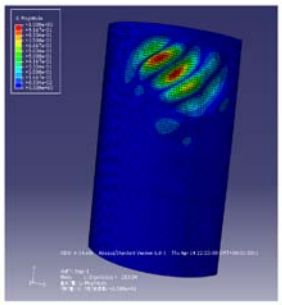


图 7 完整件屈曲模态图

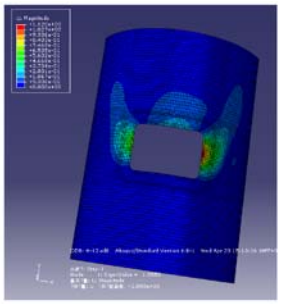


图 8 口补强件屈曲模态图

表 3 给出了开口补强件在加载到 30 kN 时,柱壳实际测量应变值和计算得到的应变值. 从表中可以看出,实际应变与理论计算的误差不大. 综上所述,建立的开口的柱壳有限元模型是准确可信的.

表 3 关键点应变计算值与实验值对比表

应变片编号	计算值	实验值	相对误差/%
1	-213	-263	19.01
2	-321	-371	13.47
3	-258	-224	15.18
4	887	1 124	21.08
5	-98	-134	26.87
6	903	861	4.88
7	1 452	1 326	9.50
8	-698	-739	5.55
9	-1 103	-1 041	5.96
10	-187	-222	15.77
11	-2 289	-2 142	6.86
12	-1 289	-1 138	13.27
13	-23	-38	39.73
14	89	66	34.85

3　开口情况对柱壳压缩屈曲载荷的影响

3.1　开口尺寸对完整件结构的影响

利用 ABAQUS 建立好的完整件有限元模型,改变开口尺寸,并且开口尺寸不超过横纵筋条围成的口框总面积(48 174 mm^2),分别计算对应的屈曲载荷,表 4 中列出了多种开口情况下的计算结果. 通过情况 4 和情况 5 对比可以看出,固定开口高度,增加开口宽度,会使结构的屈曲载荷下降;情况 7 和情况 8 对比看出,固定开口宽度,增加开口高度,也会使结构的屈曲载荷下降. 所以结构的屈曲载荷是与开口面积大小相关的,换而言之,屈曲载荷是开口面积的函数,将开口面积占总面积百分比和屈曲载荷输入 origin 软件,将离散点进行曲线拟合,其拟合函数为

$$F(x) = A_0 + A_1X + A_2X^2 + A_3X^3 + A_4X^4 \quad (1)$$

表 4　不同开口尺寸对应的屈曲载荷

情况	开口高度/mm	开口宽度/mm	占总面积百分比/%	屈曲载荷/kN
1	40	60	4.85	71.847
2	60	90	10.91	50.752
3	80	120	19.71	37.475
4	100	150	31.02	29.783
5	100	160	33.39	28.96
6	118	177	43.36	26.703
7	120	180	44.85	26.640
8	125	180	46.96	26.123
9	128	192	51.09	26.948
10	130	195	52.71	27.162
11	140	210	61.19	28.963
12	150	225	70.31	31.130
13	152	228	72.21	31.39
14	154	231	74.13	31.525
15	156	234	76.08	31.510
16	160	240	80.05	30.955
17	166	249	86.20	28.946
18	186	256.6	99.60	24.439

注:编号 1 的圆角半径为 10 mm,其他都为 15 mm.

最终绘得开口面积与屈曲载荷曲线如图 9 所示. 从图中可看出,当固定开口的宽高比,增大开口过程中,屈曲载荷首先快速下降,当开口增大到口框面积的 40.91% 时,屈曲载荷降到一个极小值点 26.37 kN,之后开始回升,当开口增大到口框面积的 73.53% 时,屈曲载荷达到一个极大值点 30.79 kN,然后又快速下降,当开口增大到筋条边缘时,屈曲载荷降到最小值. 同时也可以看出,开口导致的强度降低是十分严重的,在这种情况下如果不予适当开口补强,在满足实际开口 120 mm × 180 mm 尺寸下,结构的屈曲载荷仅为原完整件屈曲载荷的 27.49%,也就是说开口使得原完整件的强度下降了 82.51%. 此开口结构在工程上是无法满足设计要求的,因此结构如需开口必须要予以补强. 而最终的补强形式可以将开口结构的屈曲载荷回升到完整件屈曲载荷的 47.56%,相对于不补强情况的屈曲载荷提高了近一倍,补强效果比较理想.

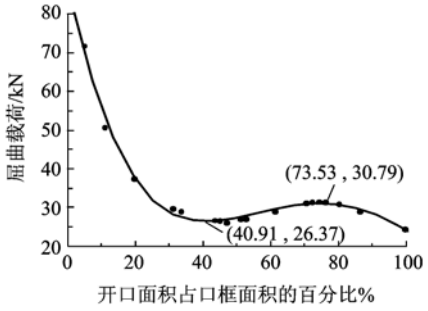


图 9　开口面积与屈曲载荷曲线

3.2　开口面积不变时开口尺寸对补强结构的影响

利用 ABAQUS 有限元软件,保证真实结构(加补片)开口面积 21 600 mm^2(宽度 180 mm × 高度 120 mm)不变的条件下,通过改变宽度和高度,探究该结构屈曲载荷变化规律,从而对开口形式提出改进. 在建立模型之前,考虑结构在实际应用中会有一个宽 230 mm,高 170 mm 的口盖与该开口补强件进行螺钉连接,保证结构在工作时处于密封状态. 而补片裸露在该柱壳外侧的宽 25 mm 的矩形环(如图 10 白线区域所示),就是作为将来连接时的安装平面. 为了使研究有意义,首先规定矩形环的宽度 25 mm 不变,这一方面保证了在每个开口形式之下,对于使用同一尺寸的螺钉,都能保证其安装区域的强度,不至于出现螺钉孔挤压破环的情况;另一方面保证变量数量,使结构屈曲载荷只是开口宽和高的函数,这样利于进行对比分析.



图 10　口盖安装区间图

此外,还需考虑到在结构中,开口不能超过横向筋条和纵向筋条围成的矩形(见图 1),则开口高度的极限值为 136 mm,而开口宽度的极限值为 209 mm. 最终计算的有限元结果如表 5 所示. 屈曲

载荷与开口高度关系曲线如图 11 所示. 从图 11 中可以看出:在相同开口面积下,开口高度越大,其屈曲载荷越大,反之可以推出,开口宽度越大,其屈曲载荷越小. 为了提高结构的屈曲载荷,可以从改变开口高度入手. 但从工艺角度而言,开口高度是不能取到极限值 136 mm 的,因为要预留一定的补片的粘接宽度. 所以综合考虑,可以得出结论:相同开口面积下,结构屈曲强度与开口高度成正比,与开口宽度成反比. 在设计与工艺允许的条件下,尽量增大开口宽度,可以使结构在相同开口面积下得到最大屈曲载荷.

表 5 同开口面积下不同开口尺寸柱壳屈曲载荷

序号	开口高度/mm	开口宽度/mm	屈曲载荷/kN
1	104.85	206	60.95
2	108	200	63.79
3	113.68	190	67.16
4	120	180	72.93
5	125.58	172	73.99
6	131.7	164	80.86
7	133	162.41	82.36

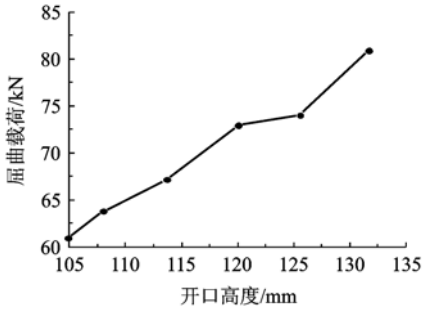


图 11 开口高度与屈曲载荷曲线

4 结 论

1) 结构在不补强的情况下开口,随着开口面积增加,结构屈曲载荷总趋势是递减的,但非单调递减,而是在某一个开口面积区域内有极大值 30.79 kN 和极小值 26.37 kN.

2) 如果开口结构不补强,在 180 mm × 120 mm 的开口下,结构的屈曲载荷将会下降 82.51%,如果不给予适当的补强,结构将会无法承受设计要求的外载荷.

3) 结构在补强情况下,屈曲载荷可以回升到原完整件屈曲载荷的 47.56%,相对于不补强情况的 27.49% 提高了近一倍,补强效果理想.

4) 在开口补强结构中,相同的开口面积条件下,结构的屈曲强度与开口宽度成反比,与开口高度成正比. 在考虑工艺允许的条件下,尽量增大开口宽度,可以使结构在相同开口面积下获得最大屈曲载荷.

参考文献 (References)

[1] 李钟海,程小全,杨琨,等. 复合材料柱面壳压缩性能分析[J]. 复合材料学报,2011,28(1):206 - 210
Li Zhonghai, Cheng Xiaoquan, Yang Kun, et al. Composite properties analysis of composite cylindrical shell [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(1): 206 - 210(in Chinese)

[2] 李致敏. 三维编织复合材料圆柱壳轴压下的屈曲分析[J]. 强度与环境,2007,34(4):123 - 127
Li Zhimin. Buckling analysis of three dimensional braided composite cylindrical shells under axial compression [J]. Structure and Environment Engineering, 2007, 34(4): 123 - 127(in Chinese)

[3] Tan Qiang, Liao Xiaoyun, Gao Zhan. Stacking sequence optimization of laminated composite cylinder shell for maximal buckling load [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(4): 156 - 162

[4] 张苗苗,王丹,张卫红. 带孔圆柱壳轴压屈曲与孔型优化[J]. 科学技术与工程,2011,11(9):56 - 61
Zhang Miaomiao, Wang dan, Zhang Weihong. Buckling analysis and shape optimization of cylinder shells with holes under axial compression[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 21(4): 156 - 162(in Chinese)

[5] 杨金花,傅衣铭. 具脱层复合材料层合圆柱壳的屈曲分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2005,32(5):34 - 39
Yang Jinhua, Fu Yiming. Buckling Analysis of Composite Laminated Cylindrical Shell with Delamination [J]. Journal of Hunan University: Natural sciences, 2005, 32(5): 34 - 39(in Chinese)

[6] Tafreshi Azam. Efficient modeling of delamination buckling in composite cylindrical shell under axial compression [J]. Composite Structures, 2004, 64 (3/4): 511 - 520

[7] 李钟海,程小全,张纪奎. 开口复合材料柱壳屈曲与补救有限元分析[J]. 应用力学学报,2011,28(2):172 - 176
Li Zhonghai, Cheng Xiaoquan, Zhang Jikui. Finite element analysis of buckling and salvage of a composite cylindrical shell with an open hole [J]. Chinese Journal Applied Mechanics, 2011, 28(2): 172 - 176(in Chinese)

[8] Vaziri A. On the buckling of cracked composite cylindrical shells under axial compression [J]. Composite Structures, 2007, 80(1): 152 - 158

[9] Christos C C, Minnetyan L. Defect/damage tolerance of pressurized fiber composite shells [J]. Composite Structures, 2001, 51(2): 159 - 168

[10] Chamis C C, Minnetyan L. Defect/damage tolerance of pressurized fiber composite shell [J]. Composite Structures, 2001, 51(2): 159 - 168

[11] 王蔓,白瑞祥,杨继新. 碳纤维增强聚合物基复合材料修补空心柱体结构的屈曲分析[J]. 大连工业大学学报,2010,2(4):234 - 239
Wang Man, Bai Ruixiang, Yang Jixin. Bucking analysis of hollow cylinder structure strengthened with CFRP laminates [J]. Journal of Dalian Institute of Light Industry, 2010, 2(4): 234 - 239(in Chinese)

(编 辑:李 晶)