

航空结构型材压损应力的 数值仿真分析方法研究

Study of Simulating Crippling Failure Stress for Civil Aircraft Structure Shapes

李 真 刘国方 张卫文 / Li Zhen Liu Guofang Zhang Weiwen

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘 要:

采用非线性有限元分析软件 ABAQUS 对型材压损破坏形式以及承载能力进行了分析,在分析中考虑了材料非线性、几何非线性。有限元分析结果与试验结果对比表明,仿真分析结果可以准确地模拟型材压损破坏形式及承载能力,该仿真分析方法可以用于飞机设计工作。

关键词:压损;非线性有限元;材料非线性;几何非线性

[Abstract] The nonlinear finite element analysis software ABAQUS is used to simulate the crippling failure of shapes and their loading capabilities. Material nonlinearity and geometry nonlinearity are taken into account during analysis. Comparison between simulation results and test results shows that the simulation analysis can be used to simulate failure modes and loading capabilities accurately, and the simulation method can be used in the airplane structure design.

[Key words] Crippling; Nonlinear Finite Element Analysis; Material Nonlinearity; Geometry Nonlinearity

0 引言

飞机结构主要承受拉伸、压缩、剪切载荷。机身上壁板、机翼下壁板主要承受拉伸载荷;机身下壁板、机翼上壁板主要承受压缩载荷。对于承受拉伸载荷的结构部位,静强度许用值为考虑钉孔减缩系数后的材料许用值;对于承受压缩载荷的结构部位,静强度许用值不仅与材料许用值相关,还与构件剖面形式和长度相关。

构件受压的破坏形式,根据有效长度分为三种破坏形式。在长柱范围内,属于弹性弯曲失稳破坏(又称柱失稳),采用欧拉公式计算;在中长柱范围,属于塑性失稳破坏,工程上一般采用约翰逊抛物线方程计算,承载能力与型材压损强度和长细比有关;在短柱范围内,属于塑性压缩破坏,即压损破坏。飞机结构中使用的长桁、横梁、立柱等型材,一般为中短柱或短柱,因此准确地确定型材的压损应力,对于确定结构许用值、减轻结构重量、提高结构

效率有着重要的意义。

在压损破坏形式中,型材元件在低于破坏载荷时首先发生局部失稳,其横剖面会出现局部扭曲变形,然后型材的弯角支撑已发生局部失稳的结构部位而继续承载,当弯角处的应力超过型材材料的屈服应力时,型材不能继续承受载荷而破坏,在破坏载荷作用下,型材剖面上的平均应力称为压损应力。

在飞机设计中,一般采用工程方法对型材的压损强度进行计算,常用的工程方法有角元法^[1]、切割法^[2]、板元法^[3]。工程方法具有计算快捷、方便、计算结果可靠等优点,但工程方法得到的许用值偏保守,通常达 10% 以上。此外,工程方法主要适用于一些常见的剖面形式,如“工”型、“Z”型、“T”型、“L”型等剖面。对于特殊剖面形式,如有圆头加强凸缘的剖面,以及圆弧型剖面如“2”型剖面,工程方法就不再适用。

近年来,非线性有限元技术得到了长足的发展,可以很好地解决材料非线性、几何非线性、边界

条件非线性等复杂的非线性问题,本文采用著名的商用非线性分析软件 ABAQUS 对型材压损问题进行了分析,得到型材的破坏形式以及承载能力。与试验结果对比表明,仿真结果与试验结果吻合很好。

1 数值仿真

分析的型材模型为某型飞机机身长桁,分为“T”型长桁和“Z”型长桁,试验件高度均为 96mm。“T”型长桁的材料为 7075-T6,截面尺寸如图 1 所示;“Z”型长桁的材料为 7075-T6511,截面尺寸如图 2 所示。

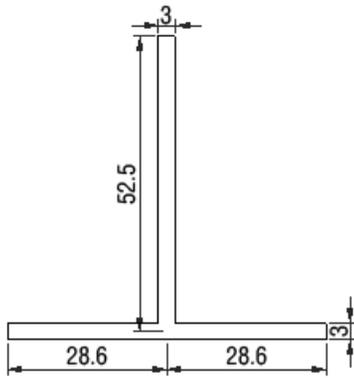


图 1 “T”型长桁横截面示意图

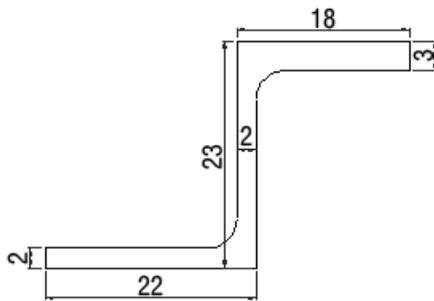


图 2 “Z”型长桁横截面示意图

型材压损破坏形式与材料应力应变特性、型材的剖面形式有关,用 ABAQUS 软件进行数值模拟时,考虑材料非线性和几何非线性。

“Z”型长桁有限元模型示意图如图 3 所示,单元尺寸约为 1mm,单元类型为四节点四边形单元 S4 (A 4-node doubly curved general-purpose shell, finite membrane strains)。“T”型长桁有限元模型示意图如图 4 所示,单元尺寸约为 1mm,单元类型为四节点四边形单元 S4。

长桁一端约束自由度 123,长桁另一端约束自由度 12,施加自由度 3 的强制位移,模拟试验机均匀加载。“Z”型长桁材料为 7075-T6511,“T”型长

桁材料为 7075-T6,材料非线性形态采用 Ramberg-Osgood 模型表示,材料属性如表 1 所示。

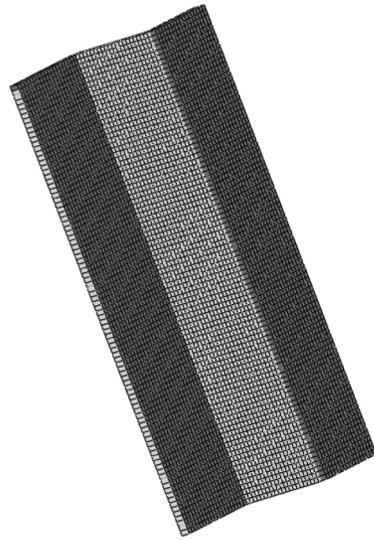


图 3 “Z”型长桁有限元模型示意图

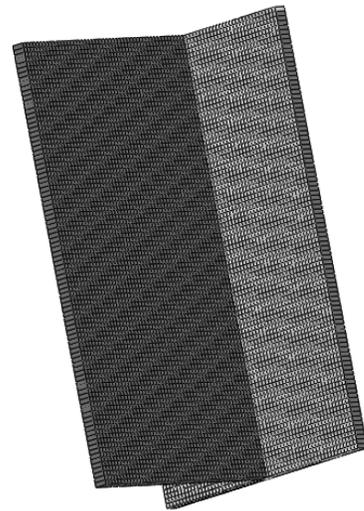


图 4 “T”型长桁有限元模型示意图

表 1 材料属性

| 杨氏模量 /MPa | 泊松比 | 屈服应力 /MPa | Exponent | Yield offset |
|-----------|------|-----------|----------|--------------|
| 73 723 | 0.33 | 509.8 | 26 | 0.289 2 |

求解采用‘Static general’模块进行。“Z”型长桁、“T”型长桁破坏变形结果分别见图 9、图 11。长桁在压缩载荷作用下,长桁缘条首先发生变形,长桁拐角处应力增大,仍可以继续承载;待长桁拐角处应力超过材料屈服极限后,长桁承载能力达到最大值;此时长桁还可以继续承载,但承载能力会变小,腹板发生较大的塑性变形,长桁的拐角处也发生塑性变形。

加载载荷与位移曲线见图 5、图 6,加载载荷为

施加自由度3约束的支反力,随着结构变形的增大,达到长桁的最大承载能力,随后长桁的承载能力逐渐减小。根据两条曲线,得到“Z”型长桁的最大承载能力为67.7kN,“T”型长桁的最大承载能力为106.4kN。

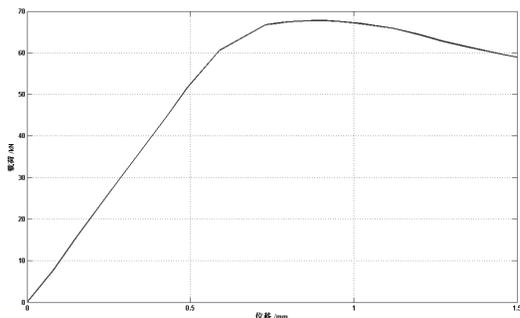


图5 “Z”型长桁载荷-位移曲线

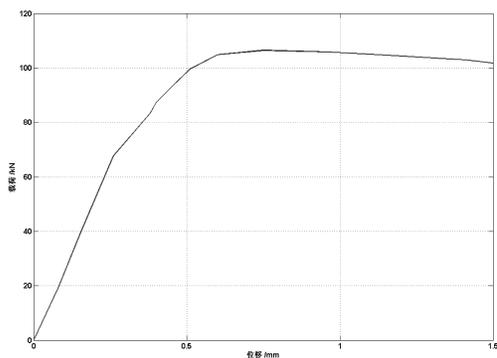


图6 “T”型长桁载荷-位移曲线

2 试验介绍及结果

对仿真的模型进行试验研究,考虑试验破坏载荷的分散性,“Z”型、“T”型长桁试验件各为4件。

试验在1000kN静力/疲劳试验机上进行,试验件两端没有采用夹具加载,直接在试验机平台上加载。试验照片如图7所示。为保证试验件加载均匀,在正式试验前,进行2次30%预估破坏载荷调试,保证试验件上粘贴应变片的测量值均匀。

试验件在承受压缩载荷过程中,随着载荷增大,长桁的缘条首先出现局部失稳,弯角处继续承载,当弯角处应力超过材料屈服极限时,结构承载能力达到最大值,此时结构塑性变形较小;结构还可以继续承载,但承载能力变小,结构塑性变形逐渐增大。“Z”型长桁和“T”型长桁的试验件破坏照片如图8、图10所示,该破坏形式属典型的压损破坏形式,长桁缘条出现严重的塑性变形,弯角处也有弯曲形变。

试验结果见表2,“Z”型长桁的最小破坏载荷为

69.2kN,最大破坏载荷为71.6kN,平均破坏载荷为70kN;“T”型长桁的最小破坏载荷为123.9kN,最大载荷为127.6kN,平均破坏载荷为125.8kN;两项试验数据的分散性不大。



图7 “T”型、“Z”型长桁试验件安装照片

表2 压损试验结果

| 试件编号 | 破坏载荷 / kN | 平均破坏载荷 / kN |
|--------|-----------|-------------|
| “Z”型长桁 | 69.4 | 70.0 |
| | 69.8 | |
| | 69.2 | |
| | 71.6 | |
| “T”型长桁 | 123.9 | 125.8 |
| | 126.2 | |
| | 127.6 | |
| | 125.5 | |



图8 “Z”型长桁典型试验破坏照片

3 试验结果与仿真结果对比

“Z”型长桁的仿真变形破坏结果与试验变形破坏结果吻合很好,见图8、图9。“T”型长桁的仿真变形破坏结果与试验变形破坏结果吻合也很好,见图10、图11。这充分表明,有限元仿真可以准确地模拟型材的压损破坏形式。



图9 “Z”型长桁有限元分析变形图

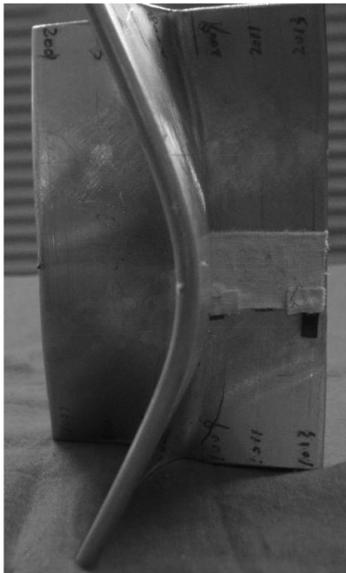


图10 “T”型长桁典型试验破坏照片

“Z”型、“T”型长桁的仿真承载能力与试验承载能力的比较结果见表3。“Z”型长桁仿真结果比试验结果略小,仿真结果偏保守3.3%;“T”型长桁,仿真结果的保守量略大,为15.3%。表明有限元仿真可以较为准确地模拟型材的压损承载能力,并且仿真结果略为保守。

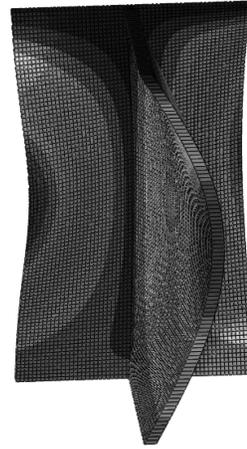


图11 “T”型长桁有限元分析变形图

表3 仿真与试验承载能力对比

| | 仿真结果 /kN | 试验结果 /kN | 仿真/试验 |
|--------|----------|----------|-------|
| “Z”型长桁 | 67.7 | 70.0 | 96.7% |
| “T”型长桁 | 106.4 | 125.8 | 84.6% |

4 结论

本文所列两种典型剖面型材的有限元仿真结果与试验结果的对比表明:

(1)长桁的仿真变形破坏结果与试验变形破坏结果吻合很好,表明有限元仿真可以准确地模拟型材的压损破坏形式;

(2)长桁的仿真承载能力比试验承载能力略小,表明有限元仿真可以较为准确地模拟型材的压损承载能力,并且仿真结果略为保守。

上述对比结果表明,有限元仿真结果可以有效地、准确地模拟型材的压损破坏形式,该方法可以用于飞机设计分析工作。在飞机设计中对于采用工程分析方法计算过于保守的结构部位、工程方法难以分析的型材剖面形式,可以考虑采用此仿真方法进行分析。

参考文献:

- [1] Needham, R. A. The Ultimate Strength of Aluminum Alloy Formed Structural Shapes in Compression[J]. Jour. Aero. Sci. Vol.21 April 1954
- [2] Gerard, G. The Crippling Strength of Compression Elements[J], Jour. Aero. Sci., Vol.25, Jan. 1958.
- [3] 飞机设计手册总编委会. 飞机设计手册第9册:载荷、强度和刚度[M]. 北京:航空工业出版社,2001.