

一种基于 Femap & NX Nastran 的剪切梁开孔前后应力对比分析

弓朋岗

(中航飞机汉中飞机分公司强度研究所 陕西 汉中 723000)

摘要: 在飞行器结构设计中, 为了让操纵杆或操纵钢索、液压管道、电线电缆等通过或达到减重的目的, 经常需要在机身结构的壁板、腹板上开孔, 由此引起开孔区局部应力增大。开孔区的应力分布复杂, 本文以传统工程方法为依据, 结合 Femap & NX Nastran 有限元法, 给出剪切梁开孔前后的应力对比分析。

关键词: Femap & NX Nastran; 剪切梁; 应力

1 概述

现代飞行器在进行结构设计时, 机翼等多墙结构剪切梁由于结构尺寸及工艺等原因, 不可能制造出有效的张力场梁, 通常设计成由上下缘条和腹板组成的众多小载荷剪切梁。这类小载荷剪切梁可以省去腹板加强补偿件, 转而采用在腹板上制作标准有凸缘的典型减重孔, 该方式不仅达到了加强局部开孔区强度的要求, 同时也达到了减重要求。这样的结构形式不仅在满足强度、刚度条件下能最大程度减重, 更方便于机翼、垂尾内部的管道、电缆的布置。但是孔的存在使剪切梁的应力分布将发生变化, 导致某些强度安全区域可能变的不再安全, 本文将以简单小载荷剪切梁为例, 结合工程法和有限元法, 给出开孔前后的应力区域对比分析及总结。

2 剪切梁结构及有限元模型

机翼等多墙结构内部剪切梁普遍由上、下缘条、腹板组成, 通常上、下缘条与腹板之间以单排或双排铆钉等紧固件连接, 为了减重或者方便拉杆、钢索、管道、电线电缆等通过而需要开孔。作为对比分析, 开孔前的剪切梁和开孔后的剪切梁仅在于孔的区别, 本文仅给出带有标准凸缘典型减重孔的剪切梁, 见图 1。

减重孔直径均 $D=50\text{ mm}$, 孔间距 $L=100\text{ mm}$, 缘条长度 $L_{\text{缘条}}=200\text{ mm}$, 上、下缘条间距 $H=100\text{ mm}$, 腹板厚度 $\delta=2\text{ mm}$, 腹板、缘条材料均为 2A12, 破坏强度 $\sigma_b=390\text{ MPa}$, 弹性模量 $E=70560\text{ MPa}$, 泊松比 $\mu=0.3$ 。

剪切梁的有限元模型基于下列假设:

- ①缘条为主承力结构, 只考虑轴力;
- ②腹板仅承受剪应力;

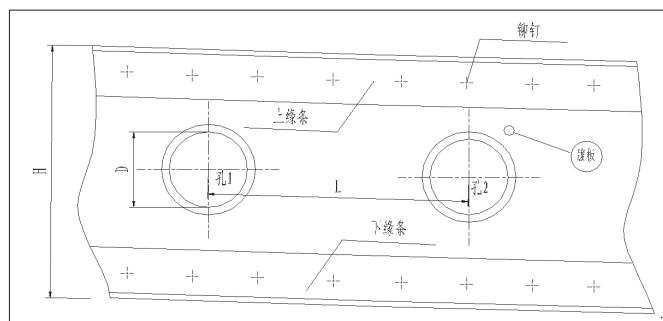


图 1 开孔后剪切梁

③腹板上的剪应力不随厚度变化。

Femap & NX Nastran 作为一款功能强大的有限元处理软件, 在后处理方面能力强大, 方便汇总各种应力数据, 故本文采用该有限元软件建立有限元模型, 简化及边界条件: 腹板简化为剪切板元 (板元四周增加虚杆元), 上、下缘条简化为梁元 (惯性矩无限大), 左端简支约束, 剪切梁右端如图所示施加载荷 $P_{\text{总}}=1000\text{ N}$, 并对开孔区进行适当的调整, 有限元模型如图 2 (开孔前的剪切梁模型未示意)。

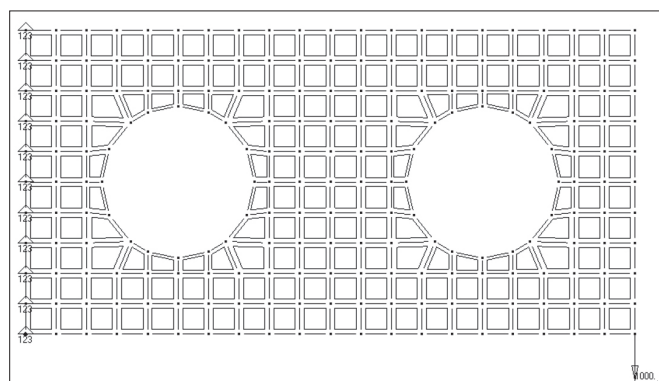


图 2 开孔后剪切梁有限元模型

3 开孔前、后剪切梁的结果对比

3.1 缘条的内力

对于开孔前剪切梁上、下缘条的轴力, 传统工程法以缘条最右端为原点建立数轴, 以图 1 中向左为 X 轴正向, 则上、下缘条轴力计算如下:

$$N=Q_{\text{总}} X/H \quad 0 < X < L$$

按公式计算, 上缘条最大轴力 $N=2000\text{ N}$, 下缘条最小轴力 $N=-2000\text{ N}$, 均发生在约束端根部。

开孔前剪切梁上、下缘条的轴力, 模型计算结果与传统工程法相比比较吻合, 轴力按线性变化。开孔后剪切梁, 上、下缘条的轴力虽然仍在最左端最大, 但由于孔的存在, 轴力已非线性变化, 此变化相对于无开孔的剪切梁缘条而言, 差距较小, 缘条的应力不会因为开孔而有显著的变化。

以缘条最右端为原点建立数轴, 图 1 中向左为 X 轴正向, 以 20 mm 为间距, 开孔前、后剪切梁上、下缘条的轴力汇总如下。

开孔前上缘条轴力: $46.55\text{ N}, 171.43\text{ N}, 351.84\text{ N}, 566.78\text{ N}$,

798.84 N, 1035.7 N, 1270.44 N, 1500.53 N, 1725.81 N, 1945.21 N;

开孔前下缘条轴力: -66.63 N, -224.38 N, -427.41 N, -649.98 N, -877.68 N, -1102.99 N, -1332.69 N, -1535.99 N, -1742.76 N, -1939.58 N;

开孔后上缘条轴力: -0.12 N, 82.02 N, 368.22 N, 621.08 N, 774.73 N, 942.07 N, 1148.89 N, 1497.64 N, 1777.8 N, 2066.33 N;

开孔后下缘条轴力: -2.47 N, -66.61 N, -386.39 N, -716.39 N, -900.31 N, -1033.66 N, -1200.32 N, -1523.35 N, -1793.07 N, -2092.92 N。

3.2 腹板的内力

3.2.1 开孔前、后剪切梁腹板周边应力

对于无开孔的剪切梁,其本身即为典型的长方形剪切梁,按照工程算法,剪切梁腹板区域周边的剪流相同,这是一个自身平衡的载荷系统,在 $P_{总}=1000\text{ N}$ 的作用下,再无其他载荷系统,即:

$$q=q_1=q_2=q_3=q_4$$

按工程法,如果没有开孔,那么剪切梁腹板各边剪流将相等: $q=1000/100=10\text{ N/mm}$

按 Femap & NX Nastran 软件有限元模型计算结果,开孔后腹板各边剪应力:

长边剪应力区间为 $5\text{ MPa} < \tau < 6\text{ MPa}$,最大剪应力 $\tau_{max}=5.9\text{ MPa}$,最小剪应力 $\tau_{min}=5.0\text{ MPa}$,平均剪应力 $\tau=5.45\text{ MPa}$,板厚 $\delta=2\text{ mm}$, $q_{平均}=5.45 \times 2=10.9\text{ N/mm}$;短边剪应力区间为 $4\text{ MPa} < \tau < 6\text{ MPa}$,最大剪应力 $\tau_{max}=5.5\text{ MPa}$,最小剪应力 $\tau_{min}=4.4\text{ MPa}$,平均剪应力 $\tau=4.95\text{ MPa}$,板厚 $\delta=2\text{ mm}$, $q_{平均}=4.95 \times 2=9.9\text{ N/mm}$;有限元模型计算结果表明长边剪应力略微变大,短边剪应力略微变小,腹板的剪应力并不会因为开孔而有显著的变化。

3.2.2 开孔后剪切梁腹板孔边应力

按工程法,为了弥补扩大孔或间隔密的孔和铆钉所造成的损失,应当计算净剪应力。两孔之间腹板处的净剪应力:

$$\tau_{孔间}=q \times L / [(L-D) \times \delta]$$

代入前文相关数值, $\tau_{孔间}$ —工程法 $=10\text{ MPa}$;有限元模型计算结果 $\tau_{孔间}$ —有限元法 $=11.56\text{ MPa}$ 。

按工程法,有孔处腹板的净垂直截面处净剪应力:

$$\tau_{垂直}=q \times H / [(H-D) \times \delta]$$

代入前文相关数值, $\tau_{垂直}$ —工程法 $=10\text{ MPa}$;有限元模型计算结果孔1周围 $\tau_{垂直}$ 平均—有限元法 $=10.5\text{ MPa}$;孔2周围 $\tau_{垂直}$ 平均—有限元法 $=10.88\text{ MPa}$ 。

以上两处典型部位的净剪应力,工程算法均与有限元模型计算结果吻合的比较好。但是,开孔后剪切梁腹板剪应力最严重处并非以上两处,以孔中心为原点,1点、5点、7点、11点方向剪应力最大。

孔1对应位置点应力值: 21.32 MPa, 13.6 MPa, 18 MPa, 17.9 MPa;

孔2对应位置点应力值: 17.14 MPa, 15.82 MPa, 26.46 MPa, 16.87 MPa。

4 对比分析及总结

通过开孔前、后剪切梁做对比,简单归纳几点总结如下:

(1) 对于部件模型,剪切梁应当细化,模型中应体现出开孔;对于整体模型,往往涉及到的相关剪切梁无法细化,对此,应按工程法去计算开孔区的强度问题,并根据计算结果来确定是否需要开孔区进行加强;传统工程算法虽然与有限元算法较吻合,但在条件允许的情况下,有限元法更准确,便捷,效率;

(2) 和开孔前相比,开孔后的剪切梁上、下缘条轴力会略微变大,且不再按线性变化,应力变化的程度和孔的大小成比例关系,简单可以理解为腹板开孔越大,腹板损失刚度越大,缘条相对腹板刚度比例变大,缘条应力越大,但其最大轴力依然存在于距离加载点最远的约束点处;

(3) 开孔前剪切梁四周剪流相等,腹板总体剪应力均匀;开孔后剪切梁腹板四周剪流不再相等,相比开孔前,四边剪流甚至变小;然而由于孔的存在,载荷沿新的边界传递,开孔区将出现应力突变;

(4) 开孔越小,对剪切梁整体的影响越小;开孔越大,对剪切梁整体影响越大,当开孔足够大时,腹板可能会出现失稳,此时须在腹板上增加补偿件,加强腹板稳定性;剪切梁的开孔范围以及大小应尽量在满足设备安装、减重等要求的前提下保证强度、刚度要求,若开孔后影响强度、刚度,则仅对剪切梁开孔区进行补偿加强,补偿加强的方法通常有以下几种:

- ①在开口周围设置适当的框架构件;
- ②在开孔周围设置加强板或整体加强凸缘;
- ③采用有凸缘的标准圆孔(本文所采用的即为此种加强方式)。

5 结语

随着飞行器对先进设备的需求骤增,机身内部管道、设备必然越来越多,飞行器重量必然也随之骤增,这就要求飞行器在设计时能必需根据上述要求进行适应性设计——便捷、轻量化。本文作者仅从自己所属专业出发,简单给出了剪切梁开孔前后的对比分析及结论,以便读者在遇到上述剪切梁问题时能方便处理。

参考文献:

- [1] 罗旭,赵明宇, Femap & NX Nastran 基础及高级应用[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [2] 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.
- [3] 牛春匀. 实用飞机结构和工程设计[M]. 北京:航空工业出版社,2008.
- [4] 刘洪文. 材料力学 I [M]. 北京:高等教育出版社,2004.