

不同孔径金属腹板稳定性及补强措施分析

孙 阔

(中国直升机设计研究所, 景德镇 333001)

文 摘 针对金属腹板在不同开孔直径下的剪切稳定性,采用有限元弹性屈曲分析方法进行研究。并为补偿开孔后稳定性的损失,探讨了常用的加强环、法兰的加强方式在不同开孔尺寸下的加强效果。结果表明:金属腹板的稳定性随开孔直径的增加呈下降趋势,增加法兰翻边高度和厚度提高腹板稳定性的效果明显,当翻边高16 mm,法兰厚度1.5 mm时补强效果最好。这是由于增加法兰翻边高度和厚度相当于提高了开孔周边的刚度,而刚度对腹板稳定性有显著的影响。

关键词 孔径,金属腹板,稳定性,补强措施

中图分类号:V258

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.04.006

Analysis on Stability and Reinforcement Measures of Metal Web With Different Diameters

SUN Kuo

(China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001)

Abstract In this paper, the finite element elastic buckling analysis method was used to study the shear stability of metal webs with different opening diameters. In order to compensate for the loss of stability after opening, the reinforcement effects of common reinforcement rings and flanges under different hole sizes were discussed. The results show that the stability of metal web decreases with the increase of hole diameter. The effect of increasing flange flanging height and thickness to improve web stability is obvious. When the flanging height is 16 mm and the flange thickness is 1.5 mm, the reinforcement effect is the best. This is because the increase of flange flanging height and thickness is equivalent to the increase of stiffness around the opening, and stiffness has a significant impact on web stability.

Key words Diameters, Metal webs, Stability, Reinforcement measures

0 引言

在直升机机体结构中,由于管路穿行、电缆铺设的需要,经常要在框、梁的腹板开设大量过线孔,甚至有些开孔方式已经超出了规范的适用范围。或者为了减轻机体的质量需要在框、梁腹板上开设减轻孔。而腹板上一旦开孔,就会在开孔边缘区域产生应力集中现象,同时也会降低腹板的剪切稳定性^[1]。应力集中会引起孔边局部裂纹,裂纹的扩展会导致周围结构的破坏,而腹板失稳会使腹板翘曲,改变载荷的传力路径,也会引起附近结构的破坏^[2]。因此,为了保证腹板结构开孔后的强度不被减弱,必须合理地设计开孔形式,确定开孔位置及补强措施等^[3]。目前,国内外有许多学者致力

于对金属腹板结构开孔的研究,并获得实际应用。如薄晓莉等^[4]对整体机加的开孔环形加强方案进行了研究,总结了环形加强边的宽度与厚度对腹板剪切稳定性的影响。任慧龙等^[5]主要采用了复变函数解析法、有限元分析方法和光弹性试验法对比分析了孔边应力集中的问题,得出了最佳开孔形式及开孔位置。谢琪等^[6]对开孔腹板的各种补强措施的孔边应力进行了有限元分析研究,对比了各种补强措施的孔边应力分布、补强效果、工艺等。乔鹏远等^[7]对费氏空腹桁架理论进行了修正,能够快速计算孔边最大正应力,并提高了计算精度。上述研究分别从开孔位置、补强形式等方面对开孔后的应力及腹板稳定性做了很多分析,得到许多有

收稿日期:2021-9-19

基金项目:国家863计划[先进直升机技术(2012AA112201)]

第一作者简介:孙阔,1990年出生,硕士,工程师,主要从事直升机结构静力学分析工作。E-mail:sunkuo9979@126.com

用的结论,但对于不同开孔孔径、不同补强措施与腹板稳定性的关系没有做系统的研究,在实际工程应用中存在一定的局限性。本文将开展剪切载荷作用下金属腹板不同开孔直径的稳定性研究,按照“等强度修理”的原则^[8]进行补强设计,建立不同孔径的有限元模型,包括开孔补强前及不同补强措施的模型,利用弹性屈曲分析方法对孔边应力及屈曲系数进行研究,归纳总结出其与开孔直径变化的规律。

1 有限元分析方法可靠性评估

机身腹板主要承受面内剪切载荷,因此开孔处腹板可看作长、宽各 200 mm 的矩形剪切板,腹板材料 2A12,厚度 1.2 mm。校核金属矩形平板剪切稳定性的计算方法为:

$$\tau_{ij} = \frac{K_s \pi^2 E}{12(1 - \mu_e^2)} \left(\frac{\delta}{b}\right)^2 \quad (1)$$

式中, τ_{ij} 为临界应力, K_s 为剪切临界应力系数, E 为材料的弹性模量, μ_e 为材料的弹性泊松比, δ 为板厚, b 为矩形较短边^[9]。

$$a=200 \text{ mm}, b=200 \text{ mm}, \delta=1.2 \text{ mm}。$$

边界条件为,四边铰支, $K_s=9.34$ 。

$$\tau_{ij} = \frac{K_s \pi^2 E}{12(1 - \mu_e^2)} \left(\frac{\delta}{b}\right)^2 = \frac{9.34 \times \pi^2 \times 68000 \times (1.2/200)^2}{12 \times (1 - 0.3^2)} = 20.66 \text{ MPa}$$

$$Q_{ij} = \tau_{ij} \delta = 20.66 \times 1.2 = 24.79 \text{ N/mm}$$

由以上工程算法得出开孔前的腹板许用剪流为 24.79 N/mm。

在 MSC. Patran 中建立开孔前腹板承受面内剪切载荷的有限元模型,经 MSC. Nastran 计算,当腹板最大剪流为 24.6 N/mm 时,模态 1 特征向量云图如图 1 所示, factor=1.0046,腹板处于失稳临界状态。

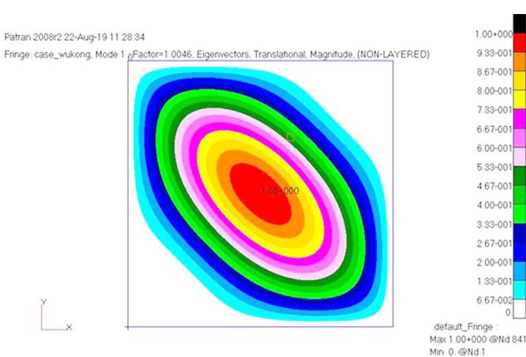


图 1 开孔前腹板的模态 1 特征向量云图

Fig. 1 Modal 1 eigenvector nephogram of web before opening

综合以上工程算法及有限元分析方法计算结果,可知有限元分析方法计算结果相较工程算法计算结果误差在 1% 以内,且有限元分析方法偏保守,因此可以认定有限元分析方法有效,计算结果正确可靠。

2 开孔加强前稳定性及应力分析

— 40 —

在腹板有限元模型中进行开孔,开孔直径占腹板宽度 10%~80%,施加临界剪力 24.6 N/mm,得到各个孔径的屈曲系数和孔边应力水平如表 1 所示,屈曲系数与开孔直径占比的关系图如图 2 所示,孔边应力与开孔直径占比的关系图如图 3 所示。从图 2 中可以看出,随着开孔半径的增大,屈曲系数呈逐渐降低的趋势,即腹板稳定性越来越差,下降趋势符合拟合曲线方程: $y=1.11864-0.02016x+7.01407 \times 10^{-5}x^2+3.4596 \times 10^{-7}x^3, R^2=0.99961$ 。

表 1 开孔加强前屈曲系数及孔边应力

Tab. 1 Buckling coefficients and hole edge stresses before opening reinforcement

开孔直径占比/%	开孔半径 r/mm	屈曲系数	孔边应力 σ /MPa
10	10	0.921	77.3
20	20	0.753	89.8
30	30	0.587	106
40	40	0.442	130
50	50	0.326	168
60	60	0.238	224
70	70	0.175	324
80	80	0.129	593

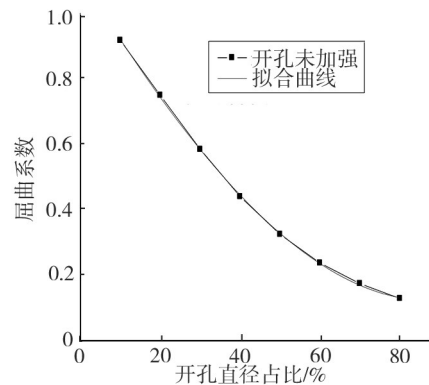


图 2 屈曲系数与开孔直径占比的关系

Fig. 2 Relationship between buckling coefficients and ratios of opening diameters

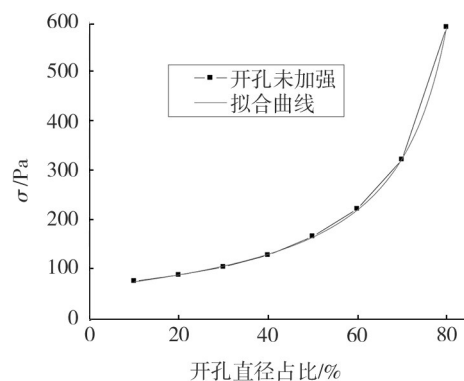


图 3 孔边应力与开孔直径占比的关系

Fig. 3 Relationship between hole edge stresses and ratios of opening diameters

通过图3可知,孔边产生应力集中,应力水平呈指数上升,上升趋势符合拟合曲线方程: $y=(0.01627-5.4969\times 10^{-4}x^{0.74805})^{-1}$, $R^2=0.99987$,腹板材料为2A12,强度极限为390 MPa,由图中可知,为避免孔边应力超出材料强度极限,开孔直径占比不宜超过70%。

3 开孔加强方案分析

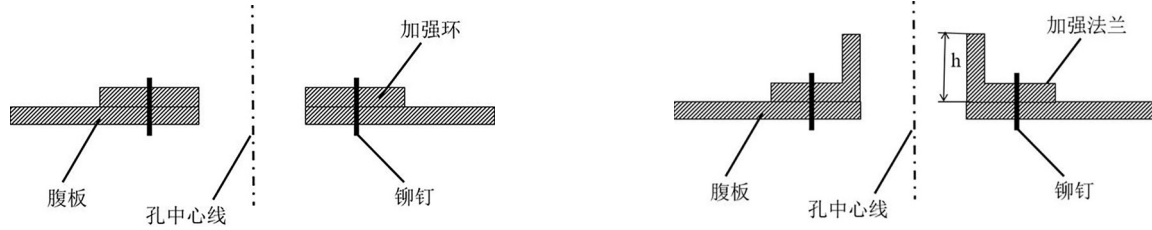


图4 补强结构截面示意图

Fig. 4 Section diagram of reinforcement structure

表2 开孔加强后的屈曲系数

Tab. 2 Buckling coefficients after opening reinforcement

开孔直径占比/%	翻边高度 h/mm(厚度 1.2 mm)				翻边高度 h/mm(厚度 1.5 mm)			
	0	8	12	16	0	8	12	16
10	1.016	1.104	1.109	1.112	1.068	1.138	1.143	1.145
20	0.908	1.088	1.105	1.120	0.988	1.183	1.202	1.217
30	0.732	1.038	1.068	1.096	0.816	1.179	1.219	1.249
40	0.570	0.954	0.992	1.022	0.646	1.110	1.167	1.211
50	0.432	0.859	0.903	0.934	0.498	1.035	1.106	1.157
60	0.327	0.779	0.830	0.870	0.387	0.965	1.043	1.091
70	0.244	0.665	0.731	0.771	0.294	0.858	0.959	1.021
80	0.187	0.581	0.650	0.694	0.230	0.756	0.859	0.928

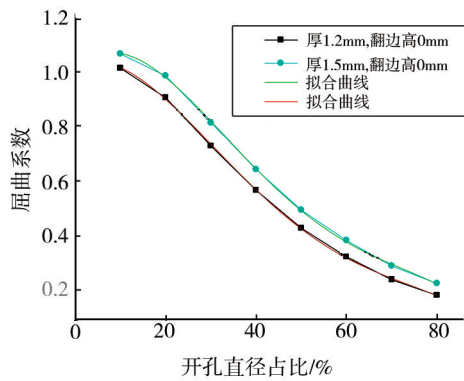


图5 翻边0 mm法兰加强屈曲系数与开孔直径占比关系
Fig. 5 Relationship between buckling coefficients reinforced by 0 mm flange and ratios of opening diameters

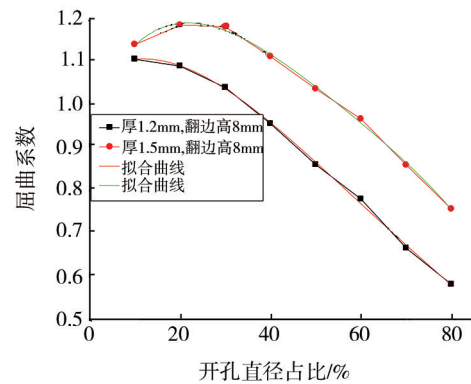


图6 翻边8 mm法兰加强屈曲系数与开孔直径占比关系
Fig. 6 Relationship between buckling coefficients reinforced by 8 mm flange and ratios of opening diameters

通过图5~图8可以看出,随着开孔直径的增加,加强环加强的腹板屈曲系数呈下降趋势,且下降明显,厚1.2 mm的法兰加强的腹板屈曲系数也呈下降趋势,下降较缓慢,而厚1.5 mm的法兰加强的腹板屈曲系数呈现先增加后下降的趋势,在开孔直径占比为30%时屈曲系数达到最高点,这是由于当开孔

直径占比小于30%时,孔周围的铆钉因间距的限制排布的数量较少,使法兰与腹板的贴合不够紧密,因此加强效果并不明显。

由表2中数据可知,在同一开孔直径占比及相同补片厚度下,以30%占比补片1.2 mm厚为例,未加强时屈曲系数0.587,翻边高0 mm时,屈曲系数

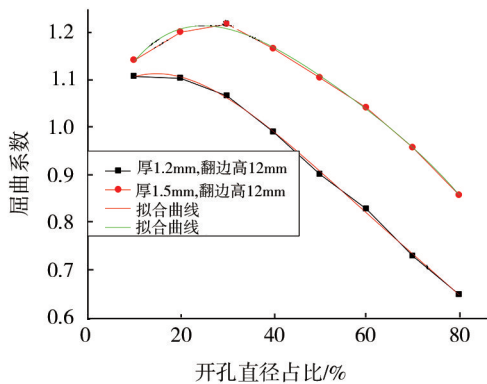


图7 翻边12 mm 法兰加强屈曲系数与开孔直径占比关系
Fig. 7 Relationship between buckling coefficients reinforced by 12 mm flange and ratios of opening diameters

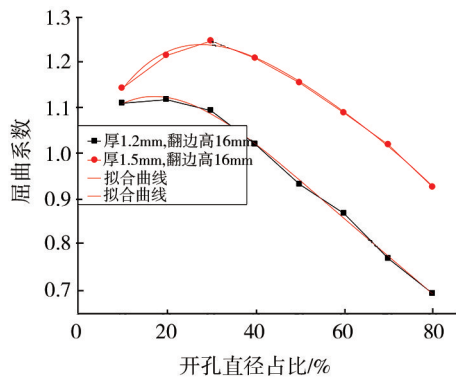


图8 翻边16 mm 法兰加强屈曲系数与开孔半径关系
Fig. 8 Relationship between buckling coefficients reinforced by 16 mm flange and ratios of opening diameters

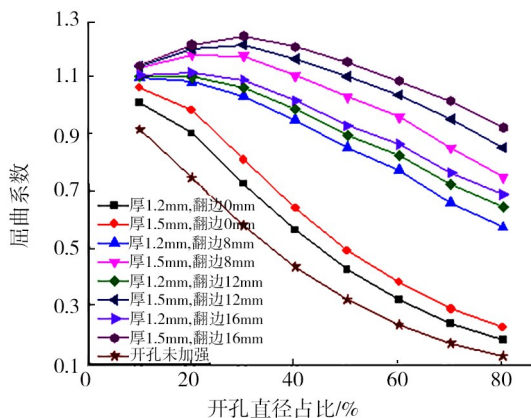


图9 开孔加强后屈曲系数与开孔直径占比关系
Fig. 9 Relationship between buckling coefficients of opening reinforcement and ratios of opening diameter

0.732,与未加强比提高了24.7%,翻边高8 mm 时屈曲系数1.038,提高了76.8%,翻边高12 mm 时屈曲系数1.068,提高了81.9%,翻边高16 mm 时屈曲系数1.096,提高了86.7%,可以说明腹板稳定性与翻边高度有关,带翻边比不带翻边的稳定性显著提高,而当翻边高度继续增加时稳定性并没有明显提高;另外,在同一开孔直径占比及相同翻边高度下,以20%占比、翻边高8 mm 为例,未加强时屈曲系数为

0.753,法兰厚度为1.2 mm 时屈曲系数为1.088,与未加强比提高了44.5%,法兰厚度为1.5 mm 时屈曲系数为1.183,提高了57.1%,可以说明腹板的稳定性与加强法兰的厚度有关,增加厚度可以有效提高腹板的稳定性。增加法兰翻边高度和厚度相当于提高了开孔周边的刚度,使开口周边腹板不会发生翘曲,显著提高了腹板的稳定性;另外,开孔附近腹板剪应力增加,形成壁板剪滞效应^[10],提高开孔周边刚度可以减少剪滞区,避免应力集中的发生,从而使载荷可以得到有效的传递,结构不会发生破坏。

通过图9可以发现,法兰的补强效率明显高于加强环,补强效果最好的是翻边高16 mm,法兰厚度1.5 mm。

通过对每种加强方案下的屈曲系数拟合曲线的求解,可以得到屈曲系数等于1即达到临界稳定时的开孔直径占比,结果如图10所示,从图中可知,对于某实际开孔大小,可以找到与其适用的加强方案,为今后的工程应用提供参考。另外,从图在中还可以看出,当开孔直径与腹板宽度比例超过72%时,已经没有有效的加强措施可以使腹板的稳定性满足屈曲系数大于1的要求,即开孔直径占比不宜超过72%。

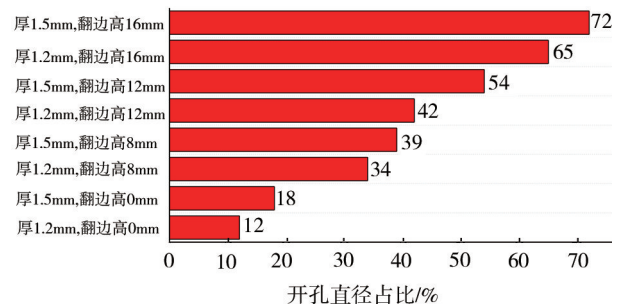


图10 不同开孔直径占比下加强方案

Fig. 10 Strengthening scheme under different proportions of opening diameters

4 结论

以直升机金属腹板为研究对象,主要通过理论计算及数值仿真的方法对其在开孔后受到面内剪切载荷作用下的整体稳定性进行了研究。对理论计算和数值仿真两种方法计算的开孔前临界剪力进行了对比分析,主要研究了腹板稳定性随开孔直径大小变化的趋势,各种开孔补强措施对腹板稳定性的影响,研究结果表明:

(1)理论计算和数值仿真方法得到的结果误差在1%以内,且数值仿真方法偏保守,验证了数值仿真分析方法的可行性;

(2)金属腹板的稳定性随开孔直径的增加呈下降趋势,开始下降迅速,后来下降缓慢;

(3)带翻边的法兰比不带翻边的加强环提高腹

板稳定性的效果明显,增加加强环或者法兰的厚度也可有效提高腹板的稳定性;

(4)总结了各开孔补强措施对应的临界开孔直径占比,结合孔边应力及稳定性可知开孔直径不宜超过腹板宽度的70%。在允许的范围内,可以根据实际开孔大小以最小质量为代价找到最适用的补强措施,对以后的腹板开孔相关研究有一定的指导意义。

参考文献

[1] 葛俊波,张世联,郑轶刊. 横梁腹板开孔剪切稳定性加强方式[J]. 舰船科学技术,2014,36(9):60-64.

GE Junbo, ZHANG Shilian, ZHENG Yikan. Measures to enhance the buckling strength of perforated beam webs under shear loading [J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(9): 60-64.

[2] 颜凯,鲜章林. 基于原机结构的机身大开口补强设计[J]. 机械工程师,2020(3):66-68.

YAN Kai, XIAN Zhanglin. Reinforcement design for large opening of original fuselage structure [J]. Mechanical Engineer, 2020(3):66-68.

[3] 张隽华. 超规范要求的主要构件腹板开孔设计研究[J]. 中国海洋平台,2013,28(1):18-23.

ZHANG Juanhua. Research on the design of web openings on primary members exceeding rule requirements [J]. China Offshore Platform, 2013, 28(1):18-23.

[4] 薄晓莉. 整体环形加强开孔剪切板的稳定性分析[J]. 中国科技信息,2016(18):77-79.

BO Xiaoli. Stability analysis of integrally annular reinforced perforated shear plate [J]. China Science and Technology Information, 2016(18):77-79.

[5] 任慧龙,娜日萨,宋竞正,等. 强梁腹板特殊开孔应力

分析与补强方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2003,24(2):128-131.

REN Huilong, NA Risa, SONG Jingzheng, et al. Study of stress concentration and reinforcement for special holes in webs of web beams [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2003, 24(2):128-131.

[6] 谢琪,何菲菲,朱加刚,等. 实肋板腹板开孔应力分析与补强措施[J]. 船海工程,2015,44(2):61-63.

XIE Qi, HE Feifei, ZHU Jiagang. On stress analysis near the hole of plate floor and the strengthening methods [J]. Ship & Ocean Engineering, 2015, 44(2):61-63.

[7] 乔鹏远,袁昱超,薛鸿祥,等. 基于空腹桁架理论的船体结构腹板开孔强度简化分析方法[J]. 舰船科学技术,2020,42(4):31-35.

QIAO Pengyuan, YUAN Yuchao, XUE Hongxiang, et al. Research on simplified analysis method for web openings strength of hull structure based on vierendeel truss theory [J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(4):31-35.

[8] 吴元莅,郝际平. H型钢翼缘开洞措施研究[J]. 建筑结构,2011,41(SI):954-957.

WU Yuanli, HAO Jiping. Research on flange openings of H-steel beam [J]. Building Structure, 2011, 41(SI):954-957.

[9] 解思适,等. 飞机设计手册第九册[M]. 航空工业出版社,2001.

XIE Sishi, et al. Aircraft design manual 9 [M]. Aviation Industry Press, 2001.

[10] 王玉,薛应举,谷迎松. 大型运输机机身大开口结构强度设计方法[J]. 机械科学与技术,2015,34(7):1144-1148.

WANG Yu, XUE Yingju, GU Yingsong. Strength design of fuselage structure for large scale aero-transport with large opening [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(7):1144-1148.