特约来稿

飞机舱门密封系统的仿真分析与优化设计

姚文心,徐鸣遥,袁永平

(沈阳航空航天大学 民用航空学院,辽宁 沈阳 110136)

摘要:对飞机舱门(简称舱门)密封系统进行仿真分析,通过正交试验对密封带的结构和材料进行优化设计。结果表明:密封带的截面圆角半径对舱门密封系统的应力产生影响,密封带的截面圆角半径为3.5 mm时舱门密封系统的压缩应力量小,最大接触应力最大;密封带的内部增强织物能同时提高舱门密封系统的压缩应力与最大接触应力,但对压缩应力的影响较小;密封带采用35U硅橡胶材料时舱门密封系统的压缩应力与最大接触应力最小,密封带采用75U硅橡胶材料时舱门密封系统的压缩应力与最大接触应力量大接触应力量大;舱门密封系统的压缩应力与最大接触应力随着密封带的硅橡胶材料邵尔A型硬度的增大而增大。当密封带的截面圆角半径为3.5 mm、采用邵尔A型硬度为50度的55U硅橡胶材料、内部有增强织物时,舱门密封系统的密封性能最优。

关键词:舱门密封系统;密封带;截面圆角半径;增强织物;硅橡胶材料;密封性能
 中图分类号:TQ336.4⁺2
 文章编号:1000-890X (2023) 08-0563-07
 文献标志码;A
 DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2023.08.0563



飞机舱门(简称舱门)密封系统对飞机的整体 性能起着至关重要的作用。目前,飞机的性能飞 速提升,而舱门密封的设计仍比较传统^[1-2],常见的 舱门密封系统的结构如图1所示。因此,舱门密封 的设计仍有很大的进步空间,需要不断地创新。 随着密封形式的不断发展完善,舱门密封会变得 更加安全可靠、更能满足时代要求^[3-5]。近年来, 国内外一些学者对舱门密封系统的结构进行了研 究,期望得到更加安全可靠的舱门密封系统。王 楠⁶⁶依据可靠性原理,对舱门密封装置进行了试 验研究,总结了舱门密封结构参数对其密封性能 的影响。渠涛等^[7]研究了在不同条件下,不同截 面形状的舱门密封带的性能,推荐了不同结构的 舱门密封装置。马莹^[8]对各种载荷作用下舱门密 封结构的位移进行了研究。马超^[9]对舱门密封形 式及材料进行了研究。王增辉^[10]对舱门密封带进 行了仿真分析,研究了织物材料和舱内增压对舱



门密封带的压缩应力和接触应力的影响。H. YAN 等^[11]基于多体动力学和弹性理论,建立了增加摩擦 载荷的刚柔体模型。B. F. GOULARTE等^[12]研究了 作用在舱门弹性密封件上的压力。T. ROMING^[13] 研究了内外两层密封结构及降低两层密封结构间 压力的减压装置。

基金项目: 辽宁省教育厅青年科技人才"育苗"项目(JYT19026); 沈阳航空航天大学博士科研启动项目(18YB32)

作者简介:姚文心(1999一),女,辽宁丹东人,沈阳航空航天大学本科学生,主要进行密封系统的学习和研究。

E-mail:1415510014@qq. com

引用本文:姚文心,徐鸣遥,袁永平.飞机舱门密封系统的仿真分析与优化设计[J].橡胶工业,2023,70(8):563-569.

Citation: YAO Wenxin, XU Mingyao, YUAN Yongping. Simulation analysis and optimization design of sealing system of aircraft cabin door[J]. China Rubber Industry, 2023, 70 (8): 563-569.

本工作运用Abaqus有限元分析软件和 Solidworks三维建模软件,对舱门密封系统进行仿 真分析,得到其压缩应力和最大接触应力;利用数 学主成分分析法对舱门密封系统从结构和材料两 方面进行正交试验,建立试验对照组,进行仿真试 验,对比分析舱门密封系统的影响因子对其密封 性能的影响程度,并对密封带进行优化设计。

1 三维建模

本工作选取某型号的飞机前货舱舱门结构 作为研究对象^[14],为在有限元分析中既能节省迭 代计算时间,又能保证实际结构不发生改变,且 对分析结论不产生较大的偏差,利用Solidworks 软件建立了舱门、密封带和机身的三维模型,如 图2所示。



图2 舱门密封系统的三维模型

Fig. 2 3D model of sealing system of cabin door

为进一步提高分析效率,对舱门密封系统模型进行了切片简化处理。

2 有限元仿真分析

2.1 模型分析

舱门密封系统的有限元模型如图3所示。其中,舱门和机身均为结构钢材料,弹性模量为70 GPa,泊松比为0.29;密封带截面形状均一,内部为 空心结构,材料为硅橡胶材料。

在Abaqus软件中修改模型、定义装配件及其 接触相互作用、设置载荷和边界条件,提交有限元 分析结果。其中,模型划分网格为C3D8H单元(八 节点线性六面体单元),具体网格划分参数如表1 所示^[15]。

2.2 分析结果

计算完成后,先点击作业按钮,再点击提交求 解界面的结果按钮,进入可视化模块进行结果查 看,得到舱门密封结构的应力云图和位移云图,分 别如图4和5所示。



图3 舱门密封系统的有限元模型 Fig.3 Finite element model of sealing system of cabin door

表1 舱门密封系统的各部件网格划分参数 Tab.1 Mesh division parameters of components of sealing system of cabin door

部件名称	最小边长/mm	最大边长/mm	单元个数
舱门	0.092	0.154	2 900
机身	0.247	0.512	4 928
密封带	0.109	0.413	4 032



图4 舱门密封系统的应力云图 Fig.4 Mises nephogram of scaling system of cabin door



图5 舱门密封系统的位移云图 Fig.5 Displacement nephogram of sealing system of cabin door

3 舱门密封系统的优化设计

舱门密封带的结构和材料(包括橡胶材料和 增强织物等)是其密封系统的气密性的主要影响 因素,本工作选取舱门密封带的结构和材料作为 研究对象。借鉴国外舱门密封带的设计经验(密 封带厚度为0.8~3.0 mm)^[13],本工作取密封带的

厚度为0.8 mm。

3.1 参数设置

舱门密封系统的设计参数包括密封带的截面 圆角半径(因子A)、橡胶材料邵尔A型硬度(因子 B)、橡胶材料属性(因子C)、有无增强织物(因子 D)和压缩位移(因子E)。研究中,在保持舱门密封 系统其他参数不变的情况下,调节其中一个参数, 观察其对舱门密封性能的影响。其中,关闭舱门 所需的力定义为压缩应力,其大小决定了关门所 需推力的大小;舱门密封系统的密封效果。舱门密封 系统承受的压缩应力越小,关闭舱门所需推力越 小;舱门密封系统承受的最大接触应力越大,舱门 密封系统的密封性能越好。

对舱门密封带的各设计参数进行有限元仿真 分析,得到对应舱门密封系统的压缩应力和最大 接触应力数据,从而得出优化结论。

舱门密封系统的正交试验设计参数见表2。

表2 舱门密封系统的正交试验设计参数 Tab. 2 Orthogonal experimental design parameters of sealing system of cabin door

		8							
水平 -	因子								
	A/mm	B/g	С	D	<i>E</i> /mm				
1	2.9	30	35U ¹⁾	有	0.5				
2	3.1	35	$55\mathrm{U}^{\mathrm{D}}$	无	1.0				
3	3.3	40	$75U^{1)}$		1.5				
4	3.5	45			2.0				
5	3.7	50			2.5				
6	3.9	55			3.0				
7	4.1	60			3.5				
8		65			4.0				
9		70			4.5				
10		75			5.0				

注:1)牌号。

根据仿真分析结果,提取密封带的压缩位移 为0.5~5 mm时的舱门密封系统的压缩应力和最 大接触应力,分析密封带内部增强织物及橡胶材 料属性对舱门密封性能的影响;同时提取密封带 的压缩位移为5 mm时舱门密封系统的压缩应力和 最大接触应力,分析密封带的截面圆角半径及橡 胶材料邵尔A型硬度对舱门密封性能的影响。

3.2 优化方法

改变密封带的截面圆角半径和在密封带内层 加入一层增强织物,研究密封带结构对舱门密封性 能的影响;选择35U,55U和75U三种牌号硅橡胶材料,研究密封带的橡胶材料属性对舱门密封性能的影响;选取10种邵尔A型硬度的硅橡胶材料,分析密封带的橡胶材料硬度对舱门密封性能的影响。 利用Matlab平台对试验数据进行处理,分析舱门密 封系统的影响因子对舱门密封性能的影响程度,并 对舱门密封系统进行优化。

4 舱门密封系统设计参数的影响分析

4.1 因子A对舱门密封性能的影响

选择邵尔A型硬度为70度的35U硅橡胶材料、 内部有增强织物的密封带,改变因子A(分别为 2.9,3.1,3.3,3.5,3.7和3.9 mm,对应试验方案为 A1—A6),对密封带结构进行有限元仿真分析,结 果如表3所示。

表3 因子A对舱门密封性能的影响 Tab.3 Influence of factor A on sealing performances of

cabin doors								
项	目							
		A1	A2	A3	<i>A</i> 4	A5	<i>A</i> 6	
压缩应	力	2.404	2.405	2.374	2.352	2.462	2.381	
最大接触应力		0.632	0.758	0.756	0.761	0.726	0.631	

从表3可以看出,因子4为3.5 mm时舱门密封 系统的压缩应力最小,最大接触应力最大,因此因 子4为3.5 mm时关闭舱门最省力,且舱门密封效果 最好。

4.2 因子D对舱门密封性能的影响

依据表2的设计参数,采用缩减有限元仿真 模型法,设置试验组如下:保证因子A(3.5 mm) 不变,改变因子C(分别为35U,55U,75U),在内 部无增强织物时因子与水平的试验组合分别为 A4C1D2,A4C2D2,A4C3D2,在内部有增强织物时 因子与水平的试验组合分别为A4C1D1,A4C2D1, A4C3D1。进行有限元仿真分析后,得到各试验组 合舱门密封系统的压缩应力和最大接触应力分别 如表4和5所示,利用Matlab平台对试验数据进行可 视化处理,各试验组合舱门密封系统的压缩应力 和最大接触应力曲面分别如图6和7所示。

从图6可以看出:舱门密封系统的压缩应力 存在两个曲面,上曲面为密封带内部有增强织物 时舱门密封系统的压缩应力,下曲面为密封带内 部无增强织物时舱门密封系统的压缩应力;与密

MPa

表4 各试验组合舱门密封系统的压缩应力分析结果 Tab.4 Compression stress analysis results of sealing systems of cabin doors for various experimental combinations

				various ex		combination	15			1011 0
试验组合										
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
A4C1D2	0.0670	0.132 6	0.178 8	0.244 3	0.3164	0.3728	0.3957	0.4165	0.4369	0.4616
A4C2D2	0.0986	0.1952	0.2718	0.363 0	0.4663	0.5491	0.5847	0.6252	0.662 9	0.6943
A4C3D2	0.1874	0.3709	0.4954	0.6790	0.8843	1.042 0	1.105 0	1.1560	1.2190	1.2790
A4C1D1	0.113 2	0.1839	0.2268	0.2583	0.306 6	0.3596	0.3911	0.4107	0.4404	0.4757
A4C2D1	0.1363	0.232 3	0.2899	0.3359	0.4029	0.4763	0.5165	0.5413	0.5894	0.6322
A4C3D1	0.2024	0.3739	0.4703	0.5497	0.6709	0.7882	0.8785	0.9168	0.9798	1.045 0

表5 各试验组合舱门密封系统的最大接触应力分析结果 Tab.5 Maximum contact stress analysis results of sealing systems of cabin doors for various experimental combinations

				various e	xperimental	combination	18			MPa
试验组合	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
A4C1D2	0.0403	0.0622	0.115 0	0.115 6	0.1319	0.1392	0.1437	0.1581	0.164 9	0.173 8
A4C2D2	0.0576	0.0886	0.163 5	0.168 2	0.1917	0.1973	0.203 8	0.232 5	0.2397	0.255 8
A4C3D2	0.1138	0.1731	0.3223	0.3277	0.3722	0.3854	0.3899	0.4423	0.4678	0.4849
A4C1D1	0.1052	0.2359	0.325 2	0.3266	0.3309	0.3563	0.3978	0.4203	0.4436	0.4516
A4C2D1	0.113 3	0.268 5	0.3733	0.3922	0.4291	0.4548	0.4798	0.5083	0.5158	0.5165
A4C3D1	0.1273	0.2953	0.4100	0.4358	0.5069	0.5091	0.5928	0.5925	0.6092	0.7018



图6 各试验组合舱门密封系统的压缩应力曲面 Fig. 6 Compression stress surfaces of sealing systems of cabin doors for various experimental combinations

封带内部无增强织物时舱门密封系统相比,密封 带内部有增强织物时舱门密封系统的压缩应力较 大,故密封带内部有增强织物时舱门密封系统的 关门力有所增大;随着密封带压缩位移的增大,上 下两曲面逐渐靠近,呈相合趋势,故密封带内部是 否有增强织物对舱门密封系统的压缩应力影响很 小,因此密封带的结构优化时内部是否增加增强 织物以其最大接触应力结果为准。

从图7可以看出:舱门密封系统的最大接触应 力存在两个曲面,上曲面为密封带内部有增强织 物时舱门密封系统的最大接触应力,下曲面为密



图7 各试验组合舱门密封系统的最大接触应力曲面 Fig.7 Maximum contact stress surfaces of sealing systems of cabin doors for various experimental combinations

封带内部无增强织物时舱门密封系统的最大接触 应力;与密封带内部无增强织物时舱门密封系统 相比,密封带内部有增强织物时舱门密封系统的 最大接触应力明显增大,使得舱门密封性能有所 提升。

密封带内部有增强织物使舱门密封系统所受的压缩应力有所增大,但由于影响较小,可以忽略不计。与密封带内部无增强织物相比,密封带内部有增强织物对舱门密封系统的最大接触应力影响较大,舱门密封系统的最大接触应力明显增大,密封性能显著提升,故密封带应采用内部有增强

织物的优化设计。

4.3 因子C对舱门密封性能的影响

利用Matlab平台对表4和5中的数据进行精 细化处理,因子C对舱门密封系统的压缩应力和 最大接触应力的影响分别如图8和9所示,其中 35U+ZC表示密封带为35U硅橡胶材料、内部有 增强织物,其余类同。



图8 因子 C对舱门密封系统压缩应力的影响 Fig. 8 Influence of factor C on compression stresses of sealing systems of cabin doors





从图8可以看出:舱门密封系统的压缩应力随 着密封带的压缩位移的增大而增大;密封带内部 有增强织物时舱门密封系统的压缩应力最大的试 验组合为C3D1,最小的试验组合为C1D1,即密封 带内部有增强织物并采用35U硅橡胶材料时舱门 密封系统的压缩应力最小。

从图9可以看出:舱门密封系统的最大接触

应力随着密封带的压缩位移的增大而增大;密封带内部有增强织物时舱门密封系统的最大接触应力最大的试验组合为C3D1,最小的试验组合为C1D1,即密封带内部有增强织物并采用75U硅橡胶材料时舱门密封系统的最大接触应力最大。

综上可知,在密封带内部有增强织物并采用 35U硅橡胶材料时舱门密封系统的压缩应力最小, 而密封带内部有增强织物并采用75U硅橡胶材料 时舱门密封系统的最大接触应力最大,考虑舱门 压力与密封效果的共同要求,密封带采用55U硅橡 胶材料。

4.4 因子A和B综合分析

将各因子整合进行分析,在密封带内部有增强织物条件下,改变因子4和B对舱门密封系统进行有限元仿真分析。因子4和B对舱门密封系统的 压缩应力曲面和最大接触应力曲面的影响分别如 图10和11所示。

从图10可以看出:曲面颜色随着密封带的硅 橡胶材料邵尔A型硬度的增大而逐渐变浅,代表 舱门密封系统的压缩应力随着密封带的硅橡胶 材料邵尔A型硬度的增大而逐渐增大;曲面颜色 随着密封带的截面圆角半径的变化而变化不明 显,但密封带的截面圆角半径为3.5 mm时曲面颜 色最深,代表密封带的截面圆角半径为3.5 mm时 舱门密封系统的压缩应力最小。

从图11可以看出:曲面颜色随密封带的硅橡



图10 因子A和B对舱门密封系统压缩应力曲面的影响 Fig. 10 Influence of A and B factors on compression stress surface of sealing system of cabin door







胶材料邵尔A型硬度的增大而逐渐变浅,代表舱门 密封系统的最大接触应力随着密封带的硅橡胶材 料邵尔A型硬度的增大而逐渐增大;随着密封带的 截面圆角半径变化,曲面颜色变化不一,但密封带 的截面圆角半径为3.5 mm时舱门密封系统的最大 接触应力最大。

综上可知,随着密封带的硅橡胶材料邵尔A 型硬度的增大,舱门密封系统的压缩应力和最大 接触应力均增大,兼顾舱门密封系统的关门力和 密封效果,本工作选择密封带的硅橡胶材料的邵 尔A型硬度为50度。在密封带的截面圆角半径为 3.5 mm时舱门密封系统的压缩应力最小,最大接 触应力最大,故密封带的最佳截面圆角半径为3.5 mm。

优化后舱门密封系统的三维模型及应力云 图分别如图12和13所示。



图12 优化后舱门密封系统的三维模型 Fig. 12 3D model of optimized sealing system of cabin door



图13 优化后舱门密封系统的应力云图 Fig. 13 Mises nephogram of optimized sealing system of cabin door

5 结论

本工作利用Abaqus软件对舱门密封系统进行 仿真分析,运用Matlab平台对试验数据进行处理、 绘出图像,分析密封带的截面圆角半径、橡胶材料 硬度和属性以及内部增强织物对舱门密封性能的 影响,结果得出当密封带的截面圆角半径为3.5 mm、采用邵尔A型硬度为50度的55U硅橡胶材料、 内部有增强织物时,舱门密封系统的密封性能最 优。

参考文献:

[1] 郭永明. 飞机舱门密封结构的气密可靠性分析与研究[J]. 数字通 信世界,2016(5):267.

GUO Y M. Analysis and research on airtightness reliability of aircraft hatch sealing structure[J]. Digital Communication World, 2016(5): 267.

- [2] 詹卫东. 直升机舱门密封设计[J]. 智富时代,2018,400(10):249.
 ZHAN W D. Sealing design of helicopter cabin doors[J]. The Fortune Times,2018,400(10):249.
- [3] 徐锦锦. 舱门密封件接触行为仿真分析[J]. 科技视界, 2018(16): 202, 211.

XU J J. Simulation analysis of contact behavior of hatch seals[J]. Science & Technology Vision, 2018 (16) :202,211.

- [4] 王增辉,高飞,吴海弟. 基于Abaqus-Isight的飞机舱门密封件的联 合优化设计[J]. 民用飞机设计与研究,2022(2):7-14.
 WANG Z H, GAO F, WU H D. Joint optimization design of aircraft door seals based on Abaqus-Isight[J]. Civil Aircraft Design and Research,2022(2):7-14.
- [5] 王薇. 浅谈民用飞机舱门密封结构的气密可靠性[J]. 科技致富向导,2014(17):313.

WANG W. Discussion on the airtight reliability of the door sealing structure of civil aircraft[J]. Keji Zhifu Xiangdao, 2014 (17) : 313.

[6] 王楠. 某型飞机舱门机构优化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.

WANG N. Optimization research on the door organization of a certain type of aircraft[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2018.

[7] 渠涛,柳荣,董弋锋,等.飞机舱门橡胶密封件动摩擦性能实验研究[J].工程力学,2020,37(7):247-256.

QU T, LIU R, DONG Y F, et al. Experimental study on dynamic friction performances of rubber seals for aircraft doors[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37 (7) :247–256.

- [8] 马莹. 飞机舱门密封设计研究[J]. 价值工程,2011,30(28):29-30.
 MA Y. Study on design of the aircraft hatch seal[J]. Value Engineering,2011,30(28):29-30.
- [9] 马超. 民用飞机舱门常用密封带的选择分析[J]. 飞机设计,2016, 36(1):57-60.

MA C. Design and analysis of commercial aircraft door common seal[J]. Aircraft Design, 2016, 36 (1):57-60.

[10] 王增辉. 飞机舱门密封带的仿真分析[J]. 特种橡胶制品, 2017, 38(5): 56-59, 64.

WANG Z H. Simulation analysis of airplane door sealing strip[J]. Special Purpose Rubber Products, 2017, 38 (5) : 56-59,64.

[11] YAN H, GAO X H, DONG Y F, et al. Increment frictional loading

analysis for high–lift devices with seals [J]. Journal of Aircraft, 2021, 58 (2) : 1–9.

- [12] GOULARTE B F, ZATKO V, LION A, et al. Elastomeric door seal analysis under aircraft cabin pressure[J]. Journal of Rubber Research, 2021, 24 (2): 301–318.
- [13] ROMING T. Aircraft with door seal arrangement[P]. USA: USP 8091831B2,2012-01-10.
- [14] 王春伟,郑明贵,操芹,等. 乘用车尾门密封条的压缩仿真分析[J]. 橡胶工业,2022,69(1):23-27.
 WANG C W, ZHENG M G, CAO Q, et al. Compression simulation analysis of tailgate sealing strip for passenger cars[J]. China Rubber Industry,2022,69(1):23-27.
- [15] 刘伟,刘志群,赵晓博,等.飞机舱门密封结构的气密可靠性研究[J].材料工程,2012(4):47-51.

LIU W, LIU Z Q, ZHAO X B, et al. Air-tight reliability analysis of aero-port seal structure[J]. Journal of Materials Engineering, 2012 (4):47-51.

收稿日期:2023-03-28

Simulation Analysis and Optimization Design of Sealing System of Aircraft Cabin Door

YAO Wenxin, XU Mingyao, YUAN Yongping (Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: The sealing system of aircraft cabin door (referred to as cabin door) was simulated and analyzed, and the optimization design of the structure and material of the sealing strip was carried out through orthogonal experiments. The results showed that the section fillet radius of the sealing strip had a significant impact on the stress of the sealing system of cabin door. When the section fillet radius was 3.5 mm, the maximum contact stress of the sealing system was the highest, and the compression stress was the lowest. The internal reinforcement fabric of the sealing strip could simultaneously increase the compression stress and maximum contact stress of the sealing system of cabin door, but had little effect on the compression stress. When the sealing strip was made of 35U silicone rubber material, the compression stress and maximum contact stress of the sealing system of cabin door were the smallest, and when the sealing strip was made of 75U silicone rubber material, the compression stress and maximum contact stress of the sealing system of cabin door were the smallest, and when the sealing strip was made of 75U silicone rubber material, the compression stress and maximum contact stress of shore A hardness of the sealing stress increased with the increase of Shore A hardness of the sealing erformance of the sealing system of cabin door was the best.

Key words: sealing system of cabin door; sealing strip; section fillet radius; reinforcement fabric; silicone rubber material; sealing performance