

文章编号: 1001- 2486(2010) 02- 0007- 05

# 背部进入式舱外航天服穿脱口铰链配置优化研究\*

周仕明, 李道奎, 唐国金

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**应用有限元方法对内压作用下舱外航天服穿脱口密封结构进行了受力分析, 针对服装泄压后穿脱口残余内力和变形过大问题, 建立了铰链配置优化模型, 得到了一种更为合理的铰链配置方案。研究结果表明, 对舱外航天服这类几何结构不规则压力容器, 优化铰链配置可以改善结构内力分布, 减小由结构发生局部塑性变形而引起的结构残余内力。

**关键词:** 舱外航天服; 密封结构; 结构分析; 有限元法

中图分类号: V475.1 文献标识码: A

## Optimization of Configuration of the Hatch Closure Hinges of the Rear Entry Spacesuit Used for EVA

ZHOU Shi-ming, LI Dao-kui, TANG Guo-jin

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Based on the finite element method, the strength and stiffness of spacesuit hatch closure under internal pressure are calculated. The optimization model of the hinges configuration is established to reduce residual internal force of the hinges. An improvement configuration of the hinges is obtained. The results demonstrate that the optimal configuration of the hinges of the irregular shaped pressure vessel can reduce the residual internal force as a result of the structural plastic deformation.

**Key words:** spacesuit; closure structure; structure analysis; finite element method

用于穿脱航天服并使其密封的结构是航天服的穿脱口。背部进入式舱外航天服穿脱口由躯干结构背部开口、背包结构和铰链组成。其中躯干结构背部开口是航天服的舱口, 用于航天员“进出”航天服, 背包结构是航天服的密封舱舱门, 如图 1 所示。躯干与背包一般通过铰链来连接。根据背部开口尺寸和形状的不同, 铰链的配置位置和数量也有所不同, 如美国 Mark-II 航天服穿脱口<sup>[1]</sup> (图 2) 采用 4 个铰链连接(2 个作为门轴), 俄罗斯 Orlan-DMA 航天服穿脱口<sup>[2]</sup> (图 3) 采用 10 个铰链进行连接(4 个作为门轴)。

航天服工作状态下内部将承受 30kPa~ 40kPa 余压作用<sup>[3]</sup>, 属低压容器结构, 结构设计时为在保证密封性和结构强度的情况下使结构质量达到最小, 一般允许加载时结构局部区域发生塑性变形。采用该方法设计带来的问题是结构泄压后, 穿脱口产生残余内力和变形, 从而增加穿脱口开门和关门难度, 因此如何从结构设计上减小残余内力和残余变形成为工程中的一个重要问题。

某型号舱外航天服穿脱口铰链采用的是等距离配置, 在进行静力学分析时发现, 各铰链受力差异较大。据此分析, 本文试图通过优化铰链配置改善铰链受力分布, 从而减小结构残余内力, 使穿脱口开门更容易。本文首先建立了服装整体结构有限元模型, 对结构充压和泄压过程中铰链受力和穿脱口结构变形进行了详细分析, 然后以泄压后铰链残余内力最小为目标建立了铰链配置优化模型, 并对优化结果进行分析讨论, 所得结论具有重要的工程应用价值。

\* 收稿日期: 2009- 09- 08

基金项目: 国家部委资助项目(513270301); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(2006998002); 国防科学技术大学科研计划项目(JC06- 01- 01)

作者简介: 周仕明(1981-), 男, 博士生。

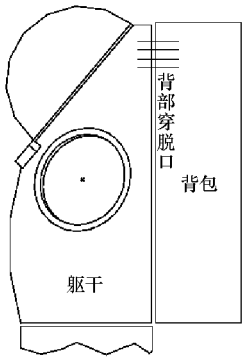


图1 背部进入式穿脱口示意图  
Fig.1 Sketch map of rear entry suits



图2 美国 Mark-III 舱外服  
Fig.2 Mark-III rear entry suits



图3 俄罗斯 Orlan-DMA 舱外服  
Fig.3 Orlan-DMA rear entry suits

## 1 有限元模型

在内压作用下, 舱外航天服实质上是一个形状复杂的压力容器, 因此各构件间相互作用对结构整体内力分布影响较大, 显然将穿脱口密封结构取出单独进行受力分析是不合理的。为准确分析穿脱口密封结构受力, 本文采用 MSC/PATRAN 建立了某型号舱外航天服有限元模型, 如图 4 所示。服装主要由铝制躯干和背包两部分组成。躯干背部和背包的开口边缘为工字型加强筋结构, 称为躯干边框和背包边框, 两边框间通过 10 个合金钢铰链连接, 如图 5 所示, 两边框和铰链共同构成了服装穿脱口密封结构。穿脱口高 720mm, 宽 420mm。用有限元建模时, 将躯干壳体、背包壳体简化为 QUAD4 壳板单元, 将铰链简化为梁单元, 铰链与边框连接处加强筋用 HEXA 体单元来模拟, 并利用 REB2 多点约束单元模拟连接件与边框的连接。模型中所用材料属性如表 1, 计算时采用线性强化弹塑性本构模型。

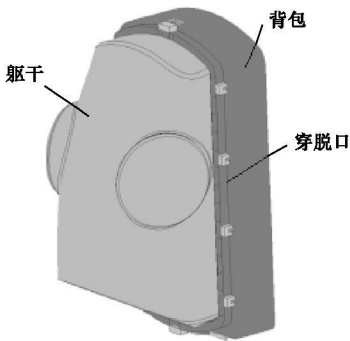


图4 舱外航天服有限元模型  
Fig.4 Finite element model of spacesuit

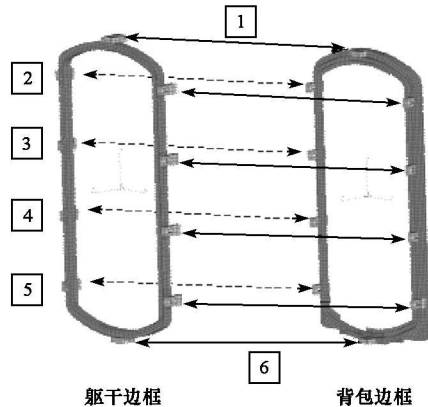


图5 穿脱口密封结构有限元模型  
Fig.5 Finite element model of the hatch closure hinges

表1 材料属性表

Tab.1 The property of material

材料名称	弹性模量 (MPa)	泊松比	屈服极限 (MPa)	强度极限 (MPa)	断裂伸长率 $\delta_5$ (%)
铝合金	69 000	0.33	150	355	10
合金钢	210 000	0.3	735	885	12

## 2 静力分析

对舱外航天服进行气密性检查时, 将内部余压加至 60kPa, 保压 5min 后泄压到 0kPa。由于结构左右对称, 因此在进行有限元计算分析时取 1/2 模型, 并固支胸部安装点。为表述方便, 将铰链按如图 5 所

示进行编号。

采用 MSC.Nastran 软件包 106 非线性求解器进行有限元分析, 分 20kPa、40kPa、60kPa、0kPa 四种工况求解, 即计算过程中依次将内压由 0kPa 经 20kPa、40kPa 最后加压到 60kPa, 然后再卸载到 0kPa。求解过程中考虑结构材料非线性和几何非线性, 分析结果见表 2 和图 6。

表 2 边框铰链平均拉力和最大拉力

Tab. 2 The maximize tension and average tension of hinges

压力 $P$ (kPa)	20	40	60	0
平均受力 $F_{mean}$ (N)	944.04	1732.17	2478.1	26.41
最大受力 $F_{max}$ (N)	1809.37	3238.04	4515.8	43.03
铰链位置	5号	5号	5号	3号
最大受力与平均受力比	1.9166	1.8694	1.8223	1.6293

注: 铰链设计载荷 8000N

由计算结果可知, 从传力路径来看, 在内压作用下, 铰链

链受力不均, 穿脱口侧面中间铰链受力最小, 侧面上下端铰链受力最大。图 6 为不同压力水平下各铰链受力。从图中可发现两条规律, 第一, 60kPa 压力作用下, 2 号和 5 号铰链承力最大, 3 号和 4 号铰链承力较小, 但在服装卸载后, 3 号和 4 号铰链承力保持较高水平, 说明中间铰链配置是影响卸载后铰链受力峰值的关键; 第二, 主要承力件所受力与服装内压变化成正比。表 2 给出了不同压力水平下铰链平均受力和最大受力计算结果, 比较可知, 连接件最大受力接近平均受力两倍, 说明各铰链受力差异较大, 结构传力路径不尽合理, 此外铰链最大残余内力为 43N, 试验表明该水平内力会导致使用时穿脱口开启和锁闭困难。

从结构变形来看, 穿脱口结构中上部向服装胸背向凸起, 结构发生翘曲变形, 如图 7 所示, 结构变形随压力增大而增大, 在 60kPa 时, 结构最大位移为 1.98mm, 服装泄压后结构最大位移为 0.763mm。事实上经有限计算得到的位移不能够准确反应穿脱口结构变形量, 必须进行后处理, 为此, 本文以到背包边框变形后的外缘线的距离和最小为准则拟合得到一平面 Plane1, 定义背包边框外缘节点到该平面的最大距离 MaxD 减去到该平面的最小距离 MinD (负值) 为穿脱口的平面度, 用平面度表征穿脱口结构变形量, 如图 8 所示。经计算得到穿脱口结构在 60kPa 内压作用下的平面度为 2.11mm, 服装泄压后的平面度为 0.056mm。由于穿脱口密封结构设计允许平面度为 10mm, 故结构残余变形对结构气密性影响有限。

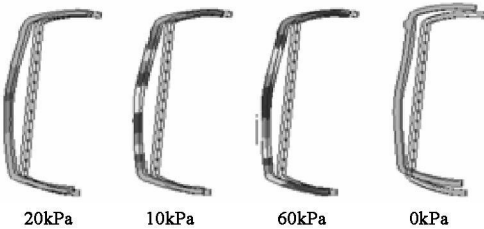


图 7 穿脱口结构位移示意图

Fig. 7 Displacement of the hatch closures structure

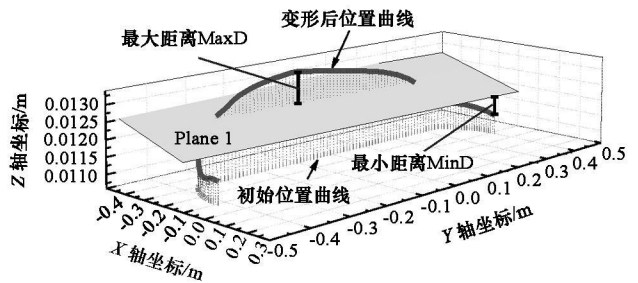


图 8 平面度定义示意图

Fig. 8 Planeness definition

### 3 优化设计

从穿脱口铰链结构的静力学分析结果可知, 舱外航天服充压和泄压时, 穿脱口铰链受力不均, 并且泄压后残余内力较大, 将影响穿脱口开启和关闭, 因此需要对铰链配置进行优化。

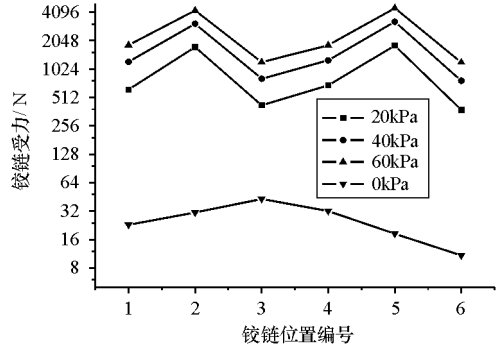


图 6 铰链拉力变化曲线图

Fig. 6 Tension of hinges curves

### 3.1 目标函数与设计变量

本文的优化目标是通过优化铰链的配置,在不增加结构质量的前提下,改进结构性能,减小铰链卸载后的最大内力  $F_{\max}$ ,即表2中0kPa时的内力值。从图5和表2可知,2号铰链和5号铰链位于穿脱口结构拐角处,且为主要承力结构,1号和6号位于穿脱口结构上下端,处于结构对称轴上,并且服装卸载后这4个铰链受力较小,反之,3号铰链和4号铰链,服装加载时受力相对较小,而卸载时受力较大,故将3号铰链和4号铰链配置作为设计变量。为此,建立A、B两个优化模型,A优化模型以3号和4号铰链安装位置  $x_1$ 、 $x_2$  为设计变量,如图9(a)。B优化模型不安装4号铰链,以3号铰链安装位置  $x_1$  为设计变量,如图9(b)所示。图9中深色圆点为铰链初始设计位置。两模型数学表达式为

$$A: \begin{cases} \min F_{\max}(x_1, x_2) \\ \text{s. t. } -200\text{mm} \leq x_1 \leq 0\text{mm} \\ 0\text{mm} \leq x_2 \leq 200\text{mm} \end{cases} \quad B: \begin{cases} \min F_{\max}(x_1) \\ \text{s. t. } -150\text{mm} \leq x_1 \leq 150\text{mm} \end{cases}$$

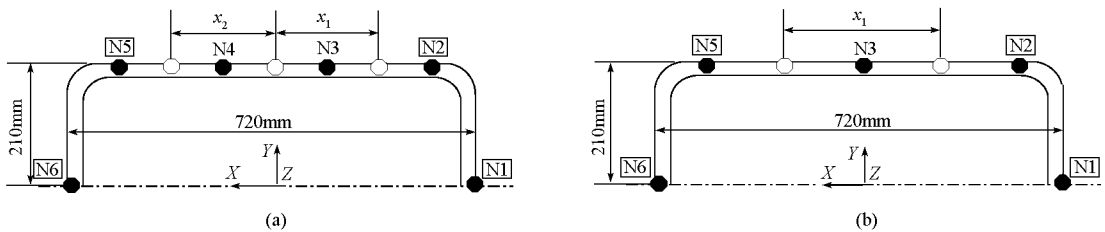


图9 结构优化模型变量定义示意图

Fig. 9 The variable definition of structural optimization model

### 3.2 优化方法

直接基于有限元模型对铰链配置进行优化存在两个方面的困难,一方面铰链与穿脱口连接关系复杂,难以根据铰链配置实现自动化建模,另一方面服装内压作用下静力学分析问题属材料非线性和几何非线性问题,优化过程中存在程序难以收敛、计算量过大等问题。为解决这两方面问题,本文应用响应面法<sup>[5]</sup>(RSM)和序列二次规划法<sup>[6]</sup>(SQP)进行优化设计。响应面法可根据少量的有限元分析结果生成响应面函数,通过优化生成的响应面函数即可得到结构优化设计结果。因此与遗传算法、粒子群算法等<sup>[7]</sup>优化算法相比,响应面法计算时间少、效率高、易于实现。

为构建响应面模型,采用正交设计表L16(4<sup>5</sup>)和L7产生需要的样本点。在生成响应面后,应用SQP对其进行优化。一般来说,应用响应面法得到的最优结果与实际结果都存在误差,需要对误差进行评估。常用判定系数  $R^2$  来表征误差大小。

$$R^2 = 1 - \frac{S_E / (N - p - 1)}{S_T / (N - 1)} \quad 0 \leq R^2 \leq 1$$

其中,  $S_E = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$  为误差平方和,  $S_T = \sum (y_i - \bar{y})^2$  为总平方和,  $y_i$  是由有限元分析得到的目标函数值,  $\hat{y}_i$  是由响应面函数得到的目标函数值,  $\bar{y}$  是  $y_i$  的平均值,  $N$  为有限元分析次数,  $p$  为设计变量数。

模型精度的评估标准为:当  $R \leq 0.8$  时,说明模型精度不足,需要进一步提高,反之,说明模型精度满足要求<sup>[8]</sup>。

## 4 优化结果

图10和图11给出了基于正交设计表L16(4<sup>5</sup>)和L7得到的模型目标函数值响应面,经计算各响应面判定系数均大于0.8。应用SQP法优化响应面得到A模型和B模型目标函数最小值分别为29.07N和30.69N,位置分别如图10和图11中的圆点所示。根据最优点设计变量值建立有限元模型,经计算得到A模型和B模型目标函数最小值分别为29.73N和31.25N,详细结果如表3所示。

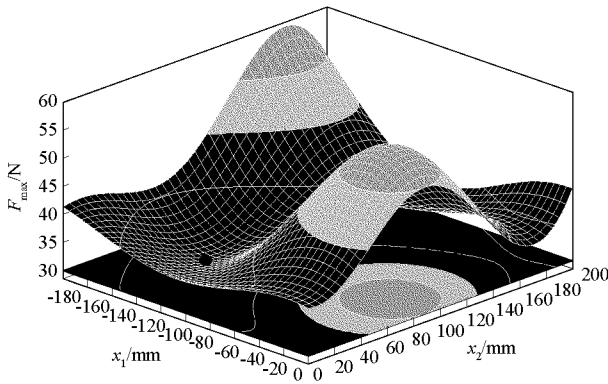


图 10 A 优化模型响应面  
Fig. 10 Response surface of A model

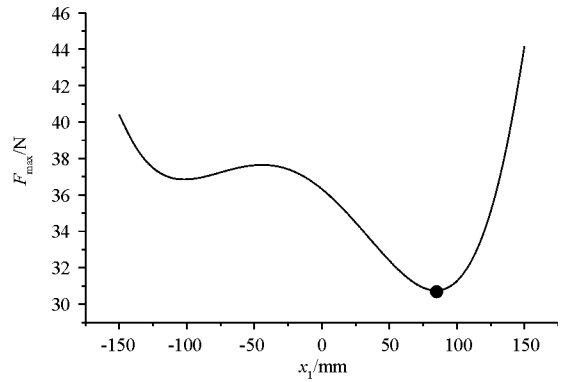


图 11 B 优化模型响应曲线  
Fig. 11 Response surface of B model

表 3 铰链配置优化结果

Tab. 3 Optimum values of configuration of the hinges configuration

铰链配置方案	铰链平均内力		铰链最大内力		穿脱口平面度			
	$x_1$ (mm)	$x_2$ (mm)	$F_{mean}$ (N)	$F_{max}$ (N)	60kPa	0kPa		
初始设计	-100	100	2478.10	26.41	4515.80	43.03	2.1	0.056
A 模型	150.83	65.09	2638.82	24.58	4412.70	29.73	2.1	0.058
B 模型	84.94	-	3108.75	18.40	4428.57	31.25	2.2	0.064

比较表 3 中优化结果可知, 与初始设计相比, A 模型 60kPa 内压作用下和服装泄压后, 铰链最大内力分别下降 2.28% 和 30.91%, 平均内力分别提高 6.49% 和下降 6.93%, 穿脱口平面度基本不变; B 模型, 铰链最大内力分别下降 1.93% 和 27.38%, 平均内力分别提高 25.45% 和下降 30.33%, 穿脱口平面度分别提高 5% 和 14.29%。

以服装泄压后铰链最大残余内力最小为目标, A 模型优于 B 模型, 但考虑到 B 模型比 A 模型铰链数少, 从而可减轻结构质量, 降低制造成本, 在满足穿脱口闭锁操作力和结构刚度的情况下, B 模型铰链配置方案更佳。

## 5 结论

- (1) 背部进入式舱外航天服穿脱口结构铰链受力差别明显, 设计时不能按平均受力进行强度计算;
- (2) 服装侧面中间铰链加载时受力相对较小, 卸载后受力相对较大, 其是影响卸载后铰链残余内力峰值大小的关键因素。
- (3) 对铰链配置进行优化可改善铰链内力分布, 在对气密性影响较小的情况下, 有效减小服装泄压后铰链的残余内力。

本文所得结果为舱外航天服穿脱口结构铰链设计提供了重要的理论指导, 同时文中优化设计方法可应用于其它不规则压力容器铰链、螺栓等结构配置优化中。

## 参考文献:

- [1] Graziosi D, Ferl J, Splawn K. An Examination of Spacesuit Entry Types and the Effect on Suit Architecture[C]//Space 2004 Conference, AIAA 2004-5969, 2004.
- [2] Abramov I P. The Experience in Operation and Improving The Orlan-type Space Suits[J]. Arm Astronurico, 1995(1): 1-12.
- [3] Abramov I P, Moiseyev N, Stoklitsky A. Concept of Space Suit Enclosure for Planetary Exploration[C]//SAE Conference, No 2001-01-2168, 2001.
- [4] Ferl J, Hewes L, et al. System Considerations for an Exploration Spacesuit Upper Torso Architecture[C]//SAE International Conference on Environmental Systems, 2006.
- [5] 桂劲松, 康海贵. 结构可靠度分析的响应面法及其 MATLAB 实现[J]. 计算力学学报, 2004(6): 683-687.
- [6] 王薇, 徐以凡, 赖炎连. 一类非单调搜索的 SQP 算法[J]. 运筹学学报, 1998(2): 56-63.
- [7] 陈宁, 黎子芬, 陈金柱. 五种智能算法解决最大分割问题分析与比较[J]. 海军航空工程学院学报, 2009(4): 447-452.
- [8] Koyama T, Yamakawa H. Structural Optimization for Improvement of Train Crashworthiness[C]//10th AIAA/ISSMO Conference, AIAA 2004-4353, 2004.