

SPF/DB 三层筒形回转结构与承载分析研究

Research on Design and Analysis of SPF/DB Three-Sheet Tubular Structure

中航工业北京航空制造工程研究所 韩晓宁 邵杰 白雪飘 邓璇

[摘要] 提出 SPF/DB 三层筒形回转结构设计方法,采用优选结构参数实现 SPF/DB 三层筒形回转结构内部详细设计。对应结构设计结果,建立三层筒形回转结构有限元模型,并对结构承载分析结果进行了讨论。

关键词: SPF/DB 筒形结构 工艺约束 有限元分析

[ABSTRACT] The method of structure design for the SPF/DB three-sheet tubular structure is discussed. Based on the method, a typical SPF/DB tubular structure is designed and its Finite Element Analysis (FEA) model is built. Finally, FEA results of the SPF/DB tubular structure are discussed.

Keywords: SPF/DB Tubular structure Process constraint Finite element analysis

近年来,随着武器装备技战术指标的提高,以超塑成形/扩散连接(SPF/DB)工艺为代表的先进轻质、高效结构制造技术在航空、航天等领域的应用不断扩大,应用结构已由非承力、次承力的平面、简单构件发展到具有曲面、复杂内外形的主承力构件,如导弹进气道、壳体等筒形回转结构(图1)。相对传统蒙皮-骨架焊接结构,SPF/DB三层筒形回转结构具有整体性好、零件数少、减重效益高等优势^[1-2],但 SPF/DB 工艺与筒形结构相结合产生的回转结构筋格、空腔详细设计及其制造等技术问题对该结构的研制和应用提出了挑战。国外已经针对 SPF/DB 空心夹层筒形回转结构的设计和制造工艺开展了深入研究,申请了结构成形技术专利并应用到导弹壳体和飞机起落架等结构制造中,而国内研究基本空白。由于 SPF/DB 成形工艺中筋格分布密度、立筋角度、蒙皮/立筋厚度配比等结构参数直接影响最终构件的表面质量、结构成形性以及承载能力,因此,满足成形工艺要求和承载能力要求的 SPF/DB 空心夹层筒形回转结构设计是决定筒形零件可否制造并满足使用要求的前提^[3]。

本文针对 SPF/DB 三层筒形回转结构设计和承载分析问题,分析了 SPF/DB 三层筒形回转结构成形特点及工艺约束,在此基础上完成了设计参数选取和结构详细设计,并采用有限元方法对设计结构进行了承载能力

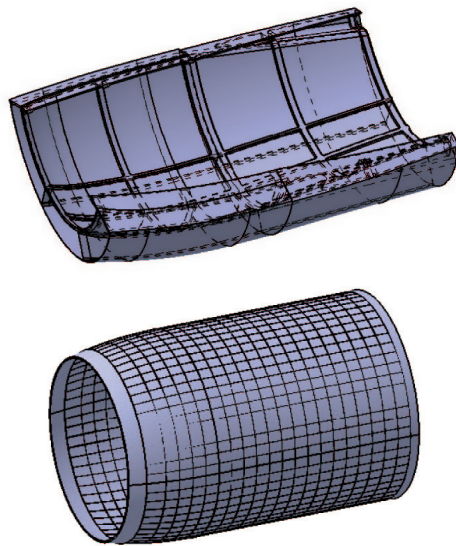


图1 典型导弹回转结构

Fig.1 Typical tubular structure of missiles

分析。

1 成形特点及工艺约束

SPF/DB 三层筒形回转结构与传统 SPF/DB 三层平板结构成形原理类似,如图2所示。结构成形中,在惰性气体的吹胀作用下,两外层面板和中间层芯板同时变

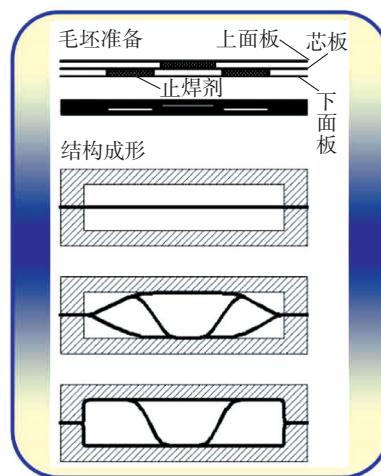


图2 SPF/DB三层结构成形过程

Fig.2 Forming process of SPF/DB three-sheet structure

形,面板贴模形成蒙皮,芯板拉伸形成立筋。实际成形中,芯板在受拉伸的同时反作用于面板连接处一个与面板变形方向相反的拉力,若此时面板无足够刚度而受拉失稳并伸长,则导致最终结构件贴合模具后表面出现褶皱。作为影响SPF/DB三层结构成形质量的主要问题,表面褶皱主要与结构参数(包括扩散连接宽度、面板厚度、芯板厚度、立筋角度等)有关,还受成形工艺参数与方法、板坯材料状态等影响,其中经验数据见表1。

表1 SPF/DB三层结构保证表面成形质量的经验数据

面板/芯板厚度比 X	$1 \leq X < 2$	$2 \leq X < 3$	$3 \leq X < 4$	$X \geq 4$
立筋夹角 $\alpha / (^\circ)$	≥ 75	≥ 65	≥ 45	≥ 36

SPF/DB三层筒形回转结构设计目标是在给定外形和载荷条件下,刚度、强度满足设计要求,结构重量最轻,约束条件是成形质量和工艺可达性;结构形式和参数定义是结构设计的主体和关键^[4]。根据轴对称外形及成形工艺特点,SPF/DB三层筒形回转结构选用立筋周向布置、轴向延伸的结构形式,完整的立筋截面结构定义需要6个设计参数,见图3,其中 T_1 为内层面板厚度; T_2 为外层面板厚度; T_3 为中间层芯板厚度; T_4 为成形立筋厚度; L_d 为扩散连接长度; α 为成形角度。

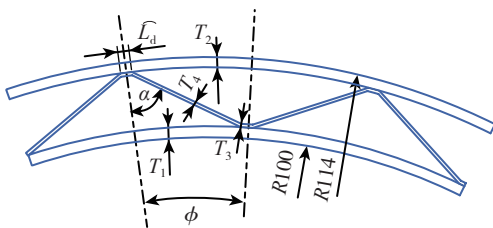


图3 三层筒形回转结构设计参数

Fig.3 Design parameters of SPF/DB three-sheet tubular structure

约束条件包括:

- (1) $T_4 \geq 0.3\text{mm}$ (实际意义为保证成形后芯板完整、不破裂,且有一定强度);
- (2) T_1/T_3 与 α 的关系符合表1(实际意义为保证成形后内层面板表面光滑、无褶皱);
- (3) T_2/T_3 与 α 的关系符合表1(实际意义为保证成形后外层面板表面光滑、无褶皱);
- (4) $L_d \geq 1$ (实际意义为,保证结构可成形,且有一

表2 筒形结构内外型面参数 mm

结构参数	空腔外径 R	空腔内径 r	端头厚度 T	总长 L	空腔长度 L_k
数值	114	100	4	210	180

定连接强度);

(5) $T_4 = f_1(T_1, T_2, T_3, \alpha, R, r)$ (实际意义为芯板厚度为非独立参数,可由内、外层板厚度、成形前中间层芯板厚度、扩散连接长度、成形角度以及筒形结构内外径计算得到);

(6) $f_2(T_1, T_2, T_3, \alpha, R, r) = \phi = 360^\circ / 2n, n=1, 2, 3, \dots$ (实际意义为单根立筋对应的圆心角 ϕ 为非独立参数, 2ϕ 应可被 360° 整除,以保证立筋成对,连续、对称排布)。

2 结构设计

某筒形结构内外型面(沿周向1/4剖切段)如图4所示,两侧端头为实体边,中间区域可设计为SPF/DB三层回转结构,详细结构参数见表2。

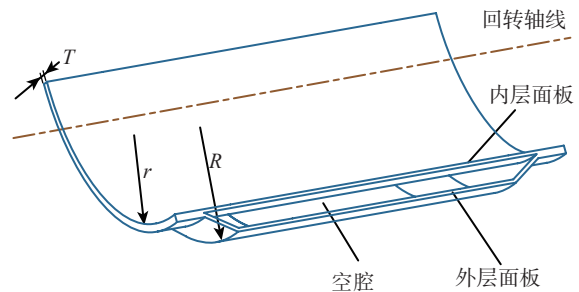


图4 典型筒形结构内外型面(沿周向1/4剖切段)

Fig.4 Internal and external surfaces of tubular structure (1/4 part in peripheral direction)

基于工艺约束条件,本文中选取一组典型三层筒形回转结构设计参数,如表3所示。实际设计中可由 T_1 、 T_2 、 T_3 、 L_d 和 ϕ 开展结构定义, T_4 、 α 可根据完成的设计图形量取获得。根据 ϕ 值可知,该筒形内、外面板间共分布有16对立筋。

表3 筒形结构内部结构参数

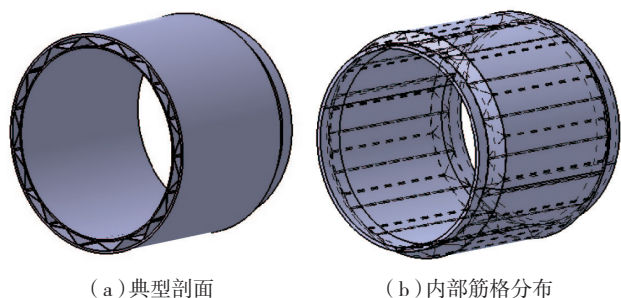
结构参数	T_1/mm	T_2/mm	T_3/mm	T_4/mm	L_d/mm	$\alpha / (^\circ)$	$\phi / (^\circ)$
数值	1.7	1.7	0.6	≈ 0.53	2.0	≈ 56.6	11.25

采用商用CAD软件CATIA进行SPF/DB三层筒形回转结构的内部详细设计,设计结果如图5所示。

3 应力与变形分析

根据CATIA模型建立由实体和板壳构成的有限元分析模型,其中面板和内部筋条以壳单元表征,两侧端头部分采用实体单元表征。采用商用有限元前处理软件HyperMesh进行网格划分,如图6所示。

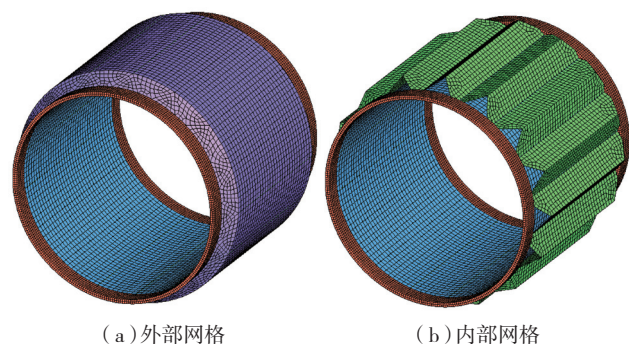
采用商用有限元分析软件ABAQUS计算筒形结构在内表面承受气动压力工况下的承载能力。有限元分



(a) 典型剖面 (b) 内部筋格分布

图5 SPF/DB三层筒形回转结构设计结果

Fig.5 Design result of SPF/DB three-sheet tubular structure



(a) 外部网格 (b) 内部网格

图6 SPF/DB三层筒形回转结构网格模型

Fig.6 Mesh model of SPF/DB three-sheet tubular structure

析参数选取如下:

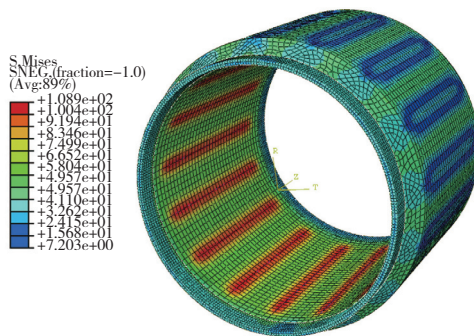
- 材料参数: TC4 钛合金, 线弹性材料模型, 常温条件下, $E=110\text{GPa}$, $\mu=0.34$, $\sigma_s=830\text{MPa}$; Mises 屈服准则。
- 实体与壳连接: 采用耦合的约束方式将壳与实体连接 (Shell to Solid)。
- 边界条件: 筒形结构一侧端面固定。
- 载荷形式: 室温下, 沿着筒体内表面法向施加均布载荷, 内表面压力 1.6MPa 。

通过有限元方法计算 SPF/DB 三层筒形回转结构中立筋对结构强度和刚度的加强效果, 最大 Mises 应力及径向位移计算结果如图 7 及表 4 所示。

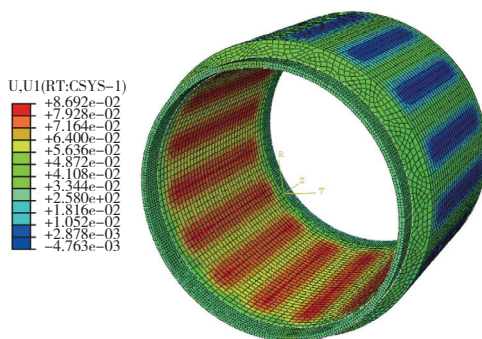
应力分析结果表明, 最大应力出现筒形结构内表面的立筋-面板连接处, 最大径向位移出现在筒形结构内表面相邻两处立筋-面板连接的中间位置。实际工况下, 筒形结构内部受到均匀压应力, 立筋对内层面板起到支撑加强作用, 内表面两处立筋-面板连接的中间区域面板, 承载形式类似为两端固支、中间受压, 因此, 固支位置应力最高、中心位置位移最大。

表4 SPF/DB三层筒形回转结构承载能力计算结果

载荷	计算结果	
	最大应力 /MPa	最大径向位移 /mm
均布内压, 1.6MPa	108.9	0.087



(a) Mises 应力云图



(b) 径向位移云图

图7 载荷1.6MPa时SPF/DB三层筒形回转结构应力、位移分布云图

Fig.7 Stress and displacement results of SPF/DB three-sheet tubular structure under 1.6MPa internal pressure

4 结论

本文分析了工艺约束对 SPF/DB 三层筒形回转结构设计参数的要求, 提出了结构设计参数, 研究了此类结构的有限元建模方法, 在此基础上完成了给定外形条件下的筒形结构设计和承载能力计算, 研究表明:

(1) 采用结构设计参数的工艺约束建模实现了 SPF/DB 三层筒形回转结构可成形性的数学表达, 该方法可推广应用于其他 SPF/DB 三层结构形式的详细设计;

(2) 后续可利用本文提出的筒形结构工艺约束建模和有限元分析方法, 通过选取不同结构设计参数并开展结构承载能力对比研究, 实现筒形结构的优化设计。

参考文献

- [1] 曹运红. 钛合金成型工艺在飞航导弹上的应用研究. 飞航导弹, 2002(7): 50-60.
- [2] 曹运红. 铸造技术在飞航导弹上的应用. 飞航导弹, 1996(4): 49-56.
- [3] Shao J, Han X N, Chen K, et al. Structural optimization and verification for SPF/DB process. Material Science Forum, 2010, 148-149: 1705-1709.
- [4] 杨剑秋, 王延荣. 基于正交试验设计的空心叶片结构优化设计. 航空动力学报, 2010, 26(2): 376-384.

(责编 良辰)