

一种基于方钢管骨架的壁板成型模具

胡江波, 薛向晨, 梁宪珠

(中航复合材料有限责任公司, 北京 101300)

[摘要] 针对大型飞机机身复合材料壁板试验件,从模具的刚度要求、使用要求、成本要求等方面确定了模具设计边界条件;为了满足模具设计的边界条件要求,提出了一种基于方钢管骨架的壁板成型模具。在进行模具设计时,首先对比各种常用模具材料的优缺点并最终确定模具采用“INVAR”钢材料;然后介绍了模具的结构布局和结构尺寸参数,并通过有限元模拟的方法,对模具的整体刚度和起吊工况的强度进行了模拟计算。计算结果表明模具的整体刚度较好,能够满足设计要求。从模具整体刚度和模具重量两方面与框架式隔板模具对比,方钢管骨架的壁板成型模具具有更大的优势。

关键词: 复合材料;壁板成型工装;框架式模具;方钢管骨架;低成本

A Square Steel-Pipe Frame Mould for Composite Panel Forming

HU Jiangbo, XUE Xiangchen, LIANG Xianzhu

(AVIC Composite Company, Beijing 101300, China)

[ABSTRACT] Aimed at a large-opening specimen of composite fuselage panel from some kind of aircraft, the boundary conditions of mould design were determined from the aspects of stiffness requirement, use requirement and cost requirement of mould. In order to meet the boundary condition requirements of mould design, a square steel-pipe frame mould for composite panel forming was proposed. In the design of the mould, at first the mould material “INVAR” steel was determined with comparing the advantages and disadvantages of a variety of commonly-used mould materials. Then the structure layout and structure dimension parameters of the mould were introduced. By means of finite element simulation, the overall stiffness of the mould and the strength of the lift-condition were simulated and calculated. The calculation results show that the overall stiffness of the die is good and can meet the design requirements. Compared with traditional sheet-steel frame mould from the overall stiffness of the mould and the weight of the mould, the square steel-pipe frame mould has greater advantages in composite panel forming.

Keywords: Composite; Panel process tooling; Frame mould; Square steel-pipe frame; Low cost

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.13.070

飞机复合材料构件是在一次或数次工艺过程中成型的,其结构形状和尺寸靠模具保证^[1]。随着复合材料构件尺寸越来越大,复合材料构件成型模具也相应增大,对于模具的要求也越来越高。本文针对某型飞机的机身壁板大开口试验件,提出了一种方钢管骨架的壁板成型模具,并按照模具设计的思路介绍了该成型模具,还将本文提出的方钢管骨架壁板成型模具与传统纵横向框架式模具从模具整体刚度和成本两方面进行了比较。

1 模具技术要求

飞机复合材料模具的技术要求主要是根据设计部门提出的复合材料结构技术要求(结构尺寸、型面精度

等)、复合材料结构的成形工艺、模具使用要求和成本等共同确定。

某大型飞机的机身壁板试验件(以下简称机身壁板),其外廓尺寸为6m×4m(弦长)×0.8m(圆弧深度),壁板由帽型长桁与蒙皮共胶接而成,壁板如图1所示。

1.1 型面轮廓度、粗糙度和波纹度

模具的型面轮廓度为±0.30mm;模具的型面粗糙度 R_a 为1.6μm;模具的型面波纹度为0.125mm/250×250mm。

1.2 刚度要求

机身壁板的固化在热压罐中进行,若模具自身刚度不足,会导致壁板的制造超差。因此模具设计时必须保

证模具有足够的整体刚度,具体要求为:模具在自由状态下的自重引起的变形不大于 0.5mm。

1.3 使用要求

- (1) 模具要满足蒙皮自动铺叠的技术要求;
- (2) 模具要满足长桁在蒙皮上的胶接定位要求;
- (3) 模具要满足壁板固化后的脱模要求;
- (4) 模具在 200℃ 环境下反复使用应不发生变形,型面温差 $\leq 5^\circ\text{C}$;
- (5) 模具保证起吊搬运不发生塑性变形。

1.4 成本要求

模具设计的成本主要考虑以下两方面:

(1) 模具材料成本。

模具材料成本主要与材料价格和模具重量相关。在模具原材料确定的情况下,模具材料成本与模具重量直接相关,而模具重量是由模具的结构设计决定的。因此设计时要求刚度在保证使用和温度场均匀的情况下,要求模具重量尽可能轻,从而达到降低成本的目的。

(2) 模具制造成本。

模具制造主要采用焊接、数控加工和钳工修配等工艺来实现^[2]。模具结构的复杂程度和精度在很大程度上会决定模具制造时所花费的工时,从而影响模具的制造成本。因此设计时要求结构尽量简单,便于制造。

2 模具设计

2.1 材料选择

常用的模具材料及其基本参数如表 1 所示。其中,铝合金的热膨胀系数最大,远远大于碳纤维复合材料;

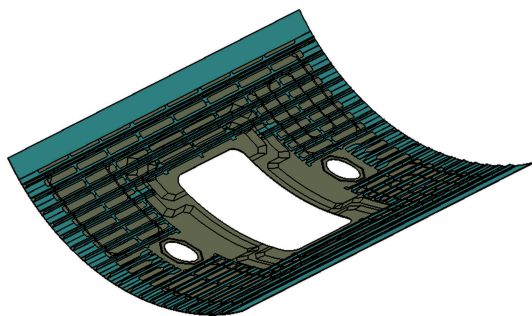


图1 某大型飞机机身复合材料壁板
Fig.1 Composite panel of a large aircraft fuselage

而“INVAR”钢与碳纤维复合材料的热膨胀系数最接近。为了保证机身壁板制造时受热膨胀系数不匹配的影响最小,模具设计时采用“INVAR”钢材料^[3]。

2.2 模具结构设计

(1) 模具外廓尺寸。

一般来讲,成型模具的外廓尺寸是在复合材料构件外廓尺寸的基础上增加一定的余量得来。机身壁板的外廓尺寸为 6m×4m,结合模具设计经验将成型模具型面外廓尺寸定为 7.1m×4.6m。成型模具的高度需要满足蒙皮自动铺叠的限高要求,因此机身壁板成型模具高度定为 1.441m,模具型面最低处距离模具底部距离为 0.436m。

(2) 模具结构布局。

成型模具采用凹模形式,模具主体分为 3 层:最上层为蒙皮面板,采用厚钢板焊接而成;最下层为基础框架,采用方钢管焊接而成;蒙皮面板与基础框架之间为隔板层,由纵、横向布置的隔板组成,隔板采用厚钢板焊接而成,隔板上靠近蒙皮一侧均布半圆形通风孔,成型模具结构布局如图 2 所示^[4-11]。

(3) 模具截面构型。

成型模具典型截面如图 3 所示。

(4) 模具结构尺寸。

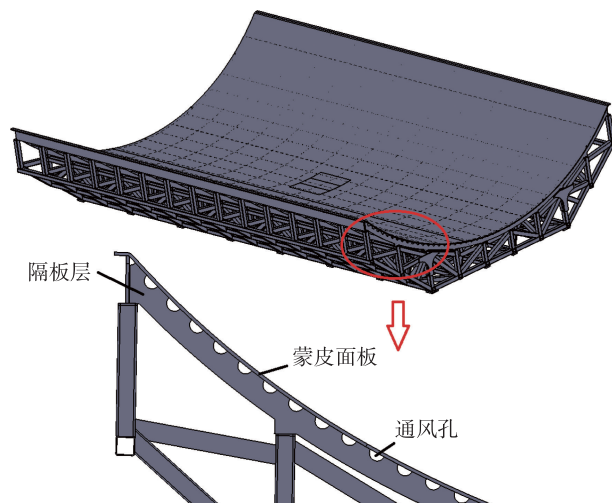


图2 成型模具结构布局
Fig.2 Structure layout of mould

表1 常用模具材料基本参数表

Table 1 Common mold material parameter table

材料	密度 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	拉伸强度 / MPa	弹性模量 / GPa	比热容 / ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	热膨胀系数 / (10^{-6}C^{-1})
铝合金	2700	400	70	900	24
低碳钢	7800	600	206	450	12.1
INVAR 钢	8200	450	140	510	2.2
碳纤维复合材料	1500	900	900	879	3.6

方钢管框架成型模具结构尺寸如表 2 所示。

(5) 模具刚度校核。

采用 CATIA 软件自带的 Generative Structural Analysis 模块对模具刚度进行校核,选取软件自带的 OCTREE 六面体单元对模型进行有限元划分,有限元数量为 208271 个。载荷只考虑模具重量,约束条件为两种:四角支撑和三角支撑,约束定位为约束所有自由度。模

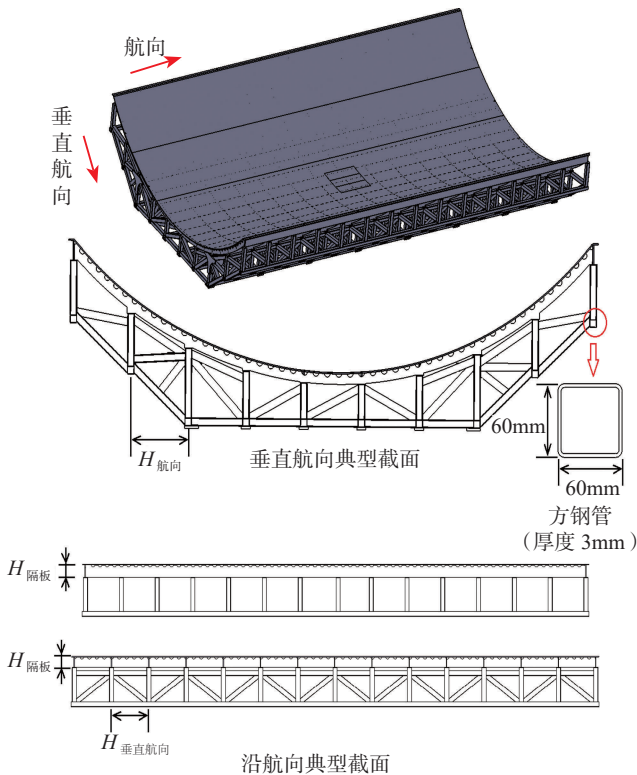


图3 成型模具截面构型

Fig.3 Section configuration of mould

表2 方钢管框架成型模具结构尺寸

Table 2 Structure size of square steel-pipe frame mould

序号	模具参数	尺寸/mm
1	$H_{\text{垂直航向}}$	500
2	$H_{\text{航向}}$	507
3	蒙皮面板厚度	10
4	隔板厚度	10
5	$H_{\text{隔板}}$	100
6	方钢管厚度	3
7	方钢管截面尺寸	60×60
8	通风孔半径	25
9	通风孔间距	100

拟结果如图 4 所示。从计算结果可知:仅考虑模具自重作用,在四点支撑条件下,模具最大变形位于模具中间位置,大小约为 0.0378mm;在三点支撑条件下,模具最大变形位于未支撑处,大小约为 0.176mm,说明成型模具的整体刚度较好,能够满足使用的要求。

采用 CATIA 软件自带的 Generative Structural Analysis 模块对模具起吊工况进行校核,有限元网格划分与整体刚度校核时一致。载荷考虑极限状态:即 4 个吊点处均承受与模具自重相同的载荷。模拟结果如图 5 所示。从计算结果可知:考虑在极限条件下起吊模具,模具承受的最大应力为 43.7MPa,远低于材料的屈服强度,说明模具在起吊时不会发生塑性变形。

(6) 与传统纵横向框架式模具相比的优势。

对于本文的机身壁板,采用传统纵横向框架式模具结构布局进行成型模具设计,模具结构尺寸见表 3,模具结构如图 6 所示。

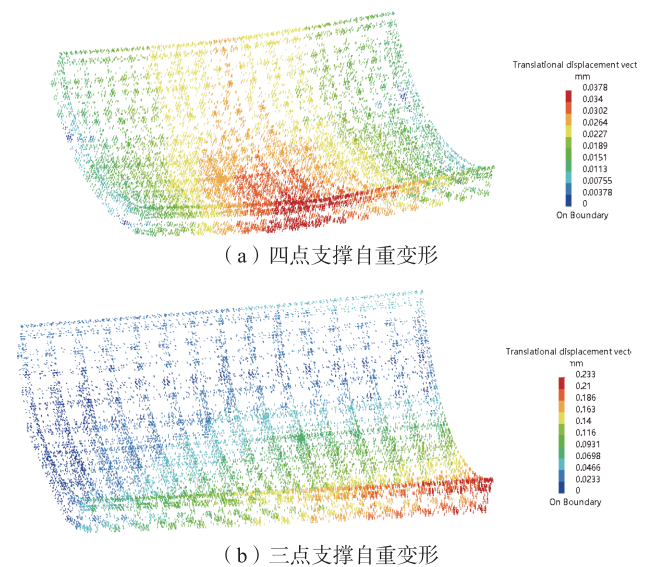


图4 方钢管框架成型模具刚度分析模拟结果

Fig.4 Simulation results of stiffness analysis of square steel-pipe frame mould

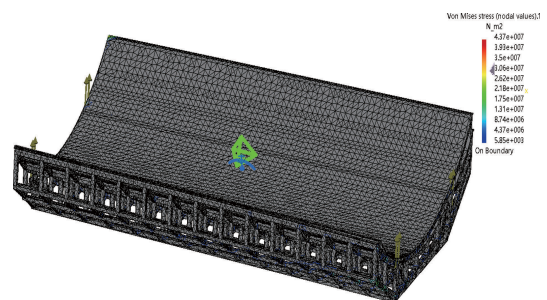


图5 方钢管框架成型模具起吊工况强度分析结果

Fig.5 Analysis results of lift-condition strength of square steel-pipe frame mould

采用 CATIA 软件自带的 Generative Structural Analysis 模块对框架式模具刚度进行初步校核,有限元单元和载荷约束条件与方钢管框架成型模具完全一致,网格数量为 104324 个。模拟结果如图 7 所示。从模拟计算结果可知:仅考虑模具自重作用,在四点支撑条件下,模具最大变形位于模具中间位置,大小约为 0.233mm;在三点支撑条件下,模具最大变形位于未支撑处,大小约为 2.83mm。

从模具重量和模具刚度方面比较,方钢管骨架模具和传统纵横向框架式模具对比结果见表 4。

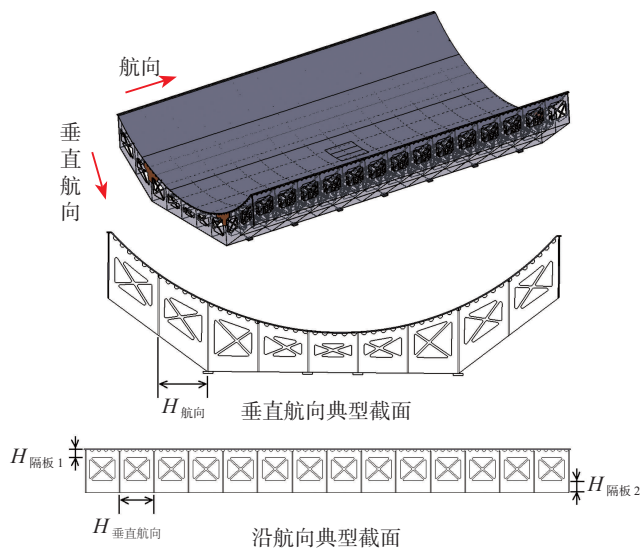


图6 传统纵横向框架式模具
Fig.6 Traditional sheet-steel frame mould

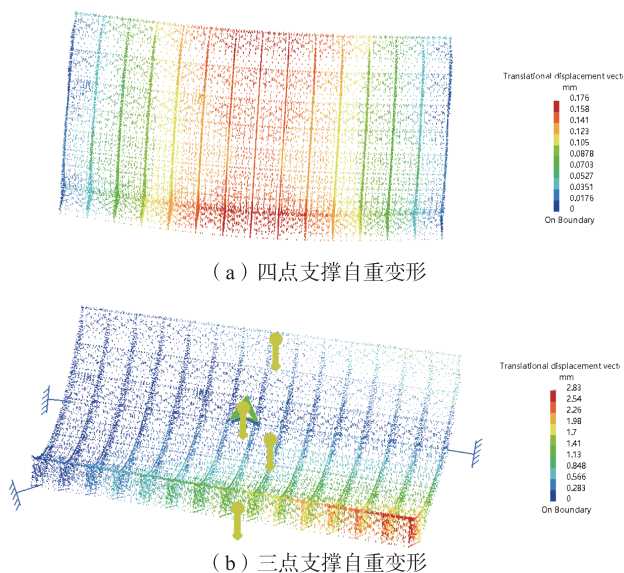


图7 传统纵横向框架式模具刚度分析模拟结果
Fig.7 Simulation results of stiffness analysis of traditional sheet-steel frame mould

从表 4 可知:在模具的外廓尺寸相同的条件下,方钢管骨架模具比传统纵横向框架式模具重量轻了 474.909kg,可以显著降低模具原材料成本。分析两种结构形式的整体刚度,分别模拟四点支撑和三点支撑条件下两种模具自重下的最大变形,方钢管骨架模具在两种工况下的最大变形均大大优于传统纵横向框架式模具。因此,从模具重量和模具刚度方面,方钢管骨架模具比传统纵横向框架式模具具有更大的优势,因此机身壁板成型模具最终确定采用方钢管骨架模具。

3 结果与讨论

制造完成的机身壁板成型模具如图 8 所示。

3.1 型面轮廓度、粗糙度和波纹度

在检测平台上将模具自由放置,采用专用设备和仪器分别检测模具型面轮廓度、粗糙度和波纹度,检测结果见表 5。

表3 传统纵横向框架式模具结构尺寸
Table 3 Structure size of conventional lateral frame mould

序号	模具参数	尺寸/mm
1	$H_{\text{垂直航向}}$	500
2	$H_{\text{航向}}$	507
3	蒙皮面板厚度	10
4	隔板厚度	10
5	开口宽度	382
6	$H_{\text{隔板1}}$	100
7	$H_{\text{隔板2}}$	170

表4 两种结构形式成型模具比较

Table 4 Comparison of two kinds of structure forms toolings

序号	项目	方钢管骨架模具	传统纵横向框架式模具
1	模具重量/kg	7633.684	8108.593
2	四点支撑最大变形/mm	0.0378	0.233
3	三点支撑最大变形/mm	0.176	2.83

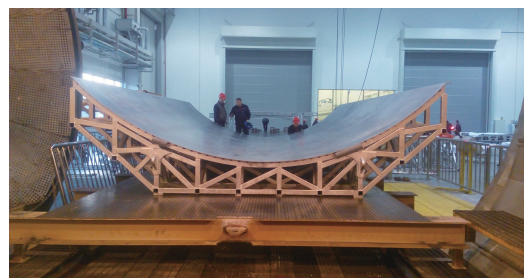


图8 机身壁板成型模具
Fig. 8 Fuselage plate forming mould

表5 机身壁板固化模具型面检测结果

Table 5 Fuselage wainscot moulding surface curing test results

项目	型面设计精度	型面实测精度
轮廓度/mm	±0.3	满足 ±0.3
粗糙度 R_a /mm	1.6	不超过 1.6
波纹度/mm	0.125/250×250	满足 0.125/250×250

3.2 模具重量和原材料成本

制造完成后的模具重量为 7600kg, 理论重量为 7633.684kg, 二者基本相同。与传统纵横向框架式模具相比, 方钢管骨架模具可减少原材料用量 474.909kg。按照“INVAR”钢原材料价格 110 元/kg 计算, 方钢管骨架模具可节约原材料成本约 5.2 万元。

3.3 试用效果

(1) 模具在热压罐中 180~200℃ 温度条件下完成了工艺件和正式件制造等工作, 未发现有变形和焊缝开裂等问题, 模具的型面精度、结构刚度和定位基准仍然准确可靠, 达到预期效果。

(2) 在热压罐中使用, 模具型面各点温差 <5℃。

(3) 模具能够满足蒙皮自动铺叠、长桁胶接定位等的要求。

(4) 制造的机身壁板试验件变形较小, 型面精度满足装配要求。

4 结论

(1) 复合材料机身壁板成型模具采用方钢管骨架的结构形式, 从有限元模拟结果可知模具整体刚度和强度能够满足设计要求, 制造结果表明该模具能够满足实际使用的要求。

(2) 方钢管骨架的成型模具与框架式隔板模具相比, 重量更轻, 整体刚度更好, 具有较大的优势。

参考文献

[1] 梁宪珠. 复合材料垂直安定面固化模具的设计和制造[J]. 航空制造技术, 1998, 41(6): 32-33.
LIANG Xianzhu. Design and manufacture of curing mould for composite vertical stabilizer structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1998, 41(6): 32-33.
[2] 刘招娣. 大型薄壁 Invar 钢复合材料模具制造技术[J]. 电加工与模具, 2009(1): 47-50.
LIU Zhao di. Manufacturing process of large-sized and thin-walled Invar mold[J]. Electrical Processing and Moulds, 2009(1): 47-50.

[3] 包耳, 王华琪, 杨仁德, 等. 常用模具材料的合理选择[J]. 金属加工, 2008(3): 34-37.

BAO Er, WANG Huaqi, YANG Rende, et al. Reasonable selection of common mould materials[J]. Metal Processing, 2008(3): 34-37.

[4] 王雯, 鲍益东, 樊胜宝, 等. 框架式复材成型模具轻量化设计方法[J]. 航空制造技术, 2018, 61(23/24): 82-86.

WANG Wen, BAO Yidong, FAN Shengbao, et al. Lightweight design method of frame molding die for composite materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(23/24): 82-86.

[5] 晏冬秀, 刘卫平, 黄钢华, 等. 复合材料热压罐成型模具设计研究[J]. 航空制造技术, 2012, 55(7): 49-52.

YAN Dongxiu, LIU Weiping, HUANG Ganghua, et al. Design study for composites autoclave forming mould[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(7): 49-52.

[6] 王霖, 程杰, 苏佳智, 等. 浅析复合材料框架式成型模具设计技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(12): 100-104.

WANG Lin, CHENG Jie, SU Jiayun, et al. Analysis of composites frame molding mould design technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(12): 100-104.

[7] 张铨, 梁宪珠, 胡江波, 等. 拓扑优化在框架式模具结构选型中的应用[J]. 航空制造技术, 2012, 55(9): 62-63.

ZHANG Cheng, LIANG Xianzhu, HU Jiangbo, et al. Application of topology optimization in structure selection of frame mould[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(9): 62-63.

[8] 岳广全, 张博明, 杜善义, 等. 热压罐成型工艺所用框架式模具的变形分析[J]. 复合材料学报, 2009, 26(5): 148-152.

YUE Guangquan, ZHANG Boming, DU Shanyun, et al. Geometrical deformations of the framed-mould in autoclave processing for composite structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(5): 148-152.

[9] 章令晖, 李甲申, 韩宇, 等. 复合材料成型模具研究进展[J]. 航天制造技术, 2013(1): 13-17.

ZHANG Linghui, LI Jiashen, HAN Yu, et al. The progress of research on composite forming mould[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013(1): 13-17.

[10] 王永贵, 梁宪珠. 热压罐工艺的成型压力对框架式模具温度场的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(4): 70-76.

WANG Yonggui, LIANG Xianzhu. The influence of molding pressure in autoclave technics on temperature field of frame tooling[J]. Fiber Rein-Forced, 2009(4): 70-76.

[11] 张富官, 安鲁陵, 李汝鹏. 复合材料构件成型模具的参数化设计[J]. 宇航材料工艺, 2008(6): 10-14.

ZHANG Fuguan, AN Luling, LI Rupeng. Parameterized design of molding tool for composite component[J]. Aerospace Materials & Technology, 2008(6): 10-14.

通讯作者: 胡江波, 硕士、工程师, 研究方向为复合材料, E-mail: benHJB625@126.com。

(责编 大漠)