

盒式可重构工装结构刚度分析*

Stiffness Analysis of the Box Joint-Based Reconfigurable Tooling

南京航空航天大学机电学院 张桂书 安鲁陵 刘怡冰 张朋真
 中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 刘雁冰
 南京工程学院机械学院 蒋麒麟

[摘要] 盒式可重构工装作为一种新型的飞机部件装配工装,在性能和成本等方面与常规刚性型架相比具有较大优势。应用有限元技术分析工装结构刚度,可避免骨架刚度不均、局部刚度不足等问题,使其结构更为合理。首先分析影响结构刚度的主要因素,然后利用有限元分析方法,对其结构尺寸、螺栓连接参数等进行定量分析,给出确定结构尺寸和螺栓连接预紧力取值范围的原则与方法,为工装设计人员提供参考。

关键词: 盒式可重构工装 刚度 尺寸参数 螺栓预紧力

[ABSTRACT] The box joint-based reconfigurable tooling has obvious advantages in terms of performance and cost compared with the conventional rigid jig. It has drawn the attention of the tooling designers. The application of finite element analysis can avoid uneven distribution and local inadequacy of tooling stiffness, and be helpful to obtain more reasonable structure. In this paper, the main factors influencing the stiffness are studied. Then the structural sizes and bolt connection parameters are analyzed quantitatively with finite element analysis method. The principle and method to determine the structural sizes and pretightening force are given, which provide references for tooling designers.

Keywords: Box joint-based reconfigurable tooling Stiffness Dimension parameter Bolt pretightening force

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S2.127

设计制造适用于零部件柔性定位、夹紧,骨架结构连接件可重用的工装,可缩短工装研制周期,降低制造成本,提高装配生产率。2006年瑞典的Delfoi公司与Linkoping大学合作,结合模块化和可重构技术,

提出了基于盒式连接的低成本可重构工装(Affordable Reconfigurable Tooling, ART),简称盒式可重构工装^[1],它借助盒式连接框架,在框架梁上通过安装各种定位夹持器,利用激光跟踪仪精确定位,完成对工件的定位和夹紧,实现产品装配。

目前,盒式可重构工装已在国外航空企业得到应用和发展。2009年,空客公司在柔性盒式可重构项目中建立了首个BoxJoint^[2](盒式连接可重构工装),如图1所示。该工装首次应用于复合材料翼盒装配,通过利用激光跟踪仪将模块化定位夹持器快速定位、夹紧的优势,实现复合材料构件装配。文中还对骨架连接结构的受力形式进行了分析,通过静载试验研究了梁在载荷作用下的挠度变化和残余变形,提出了应对残余变形的办法。



图1 盒式可重构工装BoxJoint

Fig.1 Box joint-based reconfigurable tooling BoxJoint

在国内,郑联语^[3]对盒式可重构工装进行了较为系统的研究,总结了盒式连接的基本结构、典型模块及特点,分别阐述了盒式连接工装的若干关键技术。

蔡志为^[4]对基于盒式连接的工装,就如何快速搭建工装型架提出了快速配置的方法,在CATIA中开发了其快速配置系统,帮助工装设计人员快速地完成可重构柔性工装的配置,对可重构柔性工装快速设计进行了进

* 上海飞机制造有限公司关键技术攻关项目(SAMC14-JS-15-002);国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金项目(SAMC13-JS-15-021);南京航空航天大学青年科技创新基金(NS2012103);国防基础科研项目(A0520132008)资助。

一步研究。

工装刚度是保持装配件的空间位置准确度及其稳定性的重要基础,为了保证型架具有足够的刚度,应用有限元技术,可避免骨架刚度不均、局部刚度不足等问题,使其结构更为合理。因此,本文以装配复合材料翼盒的盒式可重构工装为例,首先,建立有限元分析模型,接着结合实际装配状态,分析其结构刚度。考虑工装自重和装配工作过程两种情况下,分析型材变形是否满足装配刚度要求;针对工装局部连接结构的螺栓连接预紧力,分析它对局部连接结构刚度的影响。

1 盒式可重构工装结构有限元分析模型

盒式可重构工装结构复杂,标准连接件种类较多,其结构由方形空心型钢材和标准连接件组成,如图2所示。建模过程中,需按照有限元建模准则^[5],明确载荷在结构中的主要传递路径,合理取舍和简化构件,根据分析目标的不同,确定模型网格的大小和疏密,最终实现工装结构合理化建模。

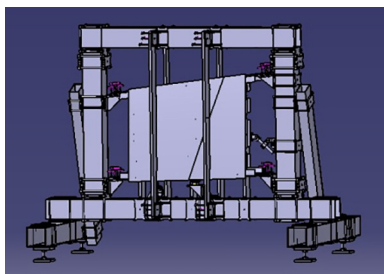


图2 盒式可重构工装模型

Fig.2 Box joint-based reconfigurable tooling model

由于工装连接结构是通过螺栓预紧力产生压紧力使零件可靠地连接在一起,在给定螺栓预紧力的情况下,连接结构依靠型材和标准件之间的结合面固定在一起,有限元模型中对其采用绑定约束的形式,实现力的传递。

依据上述工装骨架型材变形的两种情况可知,载荷的施加主要分为两个步骤,一是先对模型施加自身的重力载荷;二是在装配工作过程中,施加工作载荷。构建有限元模型时,首先要根据工装自身重力方向,建立合适的坐标系,便于重力载荷和工作载荷的施加,接着完成对工装底部采取完全固定的约束。

网格划分针对应力和位移变化较大且需要得到比较详细结果的重要部位,单元网格细密一些,应力和位移变化较小,不重要的部位,单元网格粗一些。有限元分析模型中,型材结构进行了较细的单元网格划分,采用单元 C3D8R (八结点线性六面体单元),如图3所示。

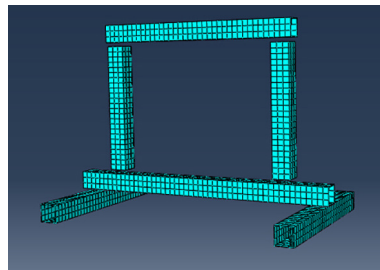


图3 型材网格划分

Fig.3 Profile meshing

2 盒式可重构工装结构刚度影响因素分析

2.1 影响可重构工装刚度的主要因素

(1) 型材截面形状和几何尺寸参数。

适用于可重构工装型材连接的截面形状主要为矩形和方形截面,截面面积相同,惯性矩不一定相同且对于矩形空心型钢材,截面形状相同,平放的惯性矩则大于竖放的惯性矩。所以,针对产品尺寸外形和空间要求,选取形状合理的截面,提高型材梁自身的弯曲刚度。

型材截面几何尺寸,参数选择过大,满足工装装配工作载荷下的变形要求,但很可能造成刚度分布不均、局部过剩的问题,且不利于工装的减重;参数选择过小,又会造成工装结构刚度不足,难以保证在装配工作载荷下的刚度。应综合分析工装结构自身载荷和装配工作过程中的两种情况,满足两种状态下的变形都不超出允许的变形范围,使工装结构尺寸参数选择合理化。

(2) 螺栓连接预紧力。

工装骨架是型材和连接标准件通过螺栓连接预紧力产生压紧力组合在一起的,预紧力过大或过小都将影响局部连接结构的性能。预紧力过大,在不对螺栓合理选型的情况下,螺栓拉力超过许用拉力的0.6~0.7倍^[6],从而使螺栓失效。另外,预紧力过大会使盒式连接结构应力超出所能承受的范围,导致局部连接结构发生塑性变形,对于屈服应力为250MPa的型材梁来说,可能会首先发生失稳而失效;预紧力过小,结合面之间没有产生足够的压紧力,一方面导致结合面没有足够的摩擦力,来克服结构整体滑移,另一方面在工作载荷下,满足不了界面不分离条件,导致结构连接结合界面分离,使工装失去装配功能。

(3) 结构连接形式。

盒式连接骨架与焊接骨架的区别之一,就是用一系列的标准型材和连接件构造装配型架。连接部分没有焊接,用螺栓连接的形式使其连接结构形式具有多样性,同时也具有不同的受力形式,如图4(a)所示双盒连接和图4(a)所示T型连接结构形式,在一个梁受力的状态下,双盒连接结构就会产生一个附加的偏心力

矩,增加了结构的变形量。所以,在实际选择中可以根据有限元结构变形分析和具体的装配要求,选择所需的连接结构。

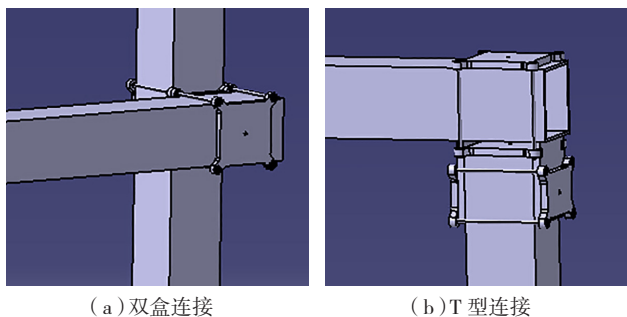


图4 连接形式
Fig.4 Joint type

2.2 截面几何尺寸参数分析

按照上述所建立的有限元分析模型,针对工装自重和装配工作过程中的两种情况,分析型材梁变形。首先,对型材截面尺寸为 $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的方形空心型材工装模型进行分析,由图 5 可知变形最大处分别在梁跨度比较大的底座下纵梁,接着选取底座下纵梁底面特征线分析其变形趋势如图 6 所示,在自重情况下,下纵梁变形量最大不超过 0.1mm ;在装配过程情况下,下纵梁变形量不超过 0.14mm 。

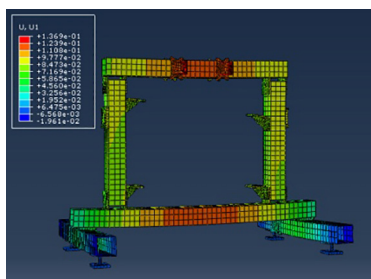


图5 梁型材变形云图
Fig.5 Deformation of beam

改变工装型材截面尺寸,对截面尺寸参数为 $160\text{mm} \times 160\text{mm}$ 的型材下纵梁进行分析,如图 7 所示。厚度为 6mm 时,在自重情况下,下纵梁最大变形量不超过 0.188mm ;在装配过程情况下,下纵梁变形量在 0.204mm 左右。厚度为 8mm 时,在自重情况下,下纵梁最大变形量不超过 0.171mm ;在装配过程情况下,下纵梁变形量在 0.190mm 之内。

由上述分析可知,型材截面尺寸参数为 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 的型材,在工装自重和装配工作过程两种情况下,下纵梁变形比较平缓、刚度较均匀,满足工装刚度要求,但对于一般精度要求的型架来说,精度有些偏高,且不适合经济性的要求。由此,可知工装截面尺

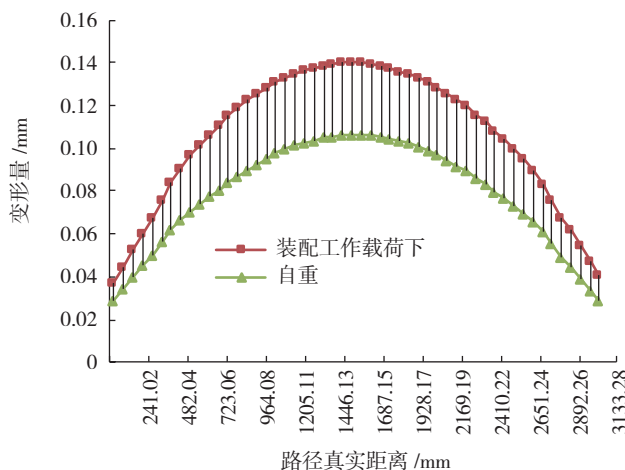


图6 型材截面 $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 6\text{mm}$ 下纵梁刚度
Fig.6 Beam stiffness ($200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 6\text{mm}$)

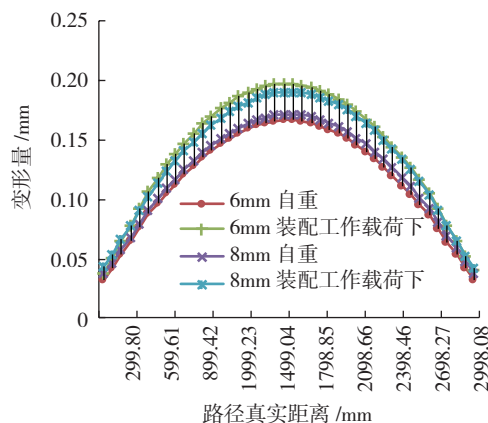


图7 型材截面 $160\text{mm} \times 160\text{mm}$ 下纵梁刚度
Fig.7 Beam stiffness ($160\text{mm} \times 160\text{mm}$)

寸选择偏大,不是合理的选择。

对于型材截面尺寸参数为 $160\text{mm} \times 160\text{mm}$ 的型材,下纵梁厚度增为 8mm 时,在装配过程情况下,下纵梁变形量在 0.190mm 之内,满足工装刚度要求。因此,在型材截面尺寸参数为 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 的型材和截面尺寸参数为 $160\text{mm} \times 160\text{mm}$ 的型材都能满足工装的刚度要求时,在考虑空间要求的情况下,应尽量减少工装重量。

2.3 螺栓连接预紧力分析

通过上述预紧力对连接结构影响分析,确定合适的螺栓预紧力保证工装连接结构刚度尤为重要。本文以定位接头连接结构为例,其装配工作情况下的工作载荷为 150N ,在满足结构不发生整体滑移和结合界面不分离的条件下,分析预紧力作用下的连接结构变形如图 8 所示,基于理论计算所得的预紧力大小,以螺栓 30% 拧紧误差(采用控制拧紧力矩的方法紧固螺栓时,预紧力值的离散性比较大,其误差可达到 35%^[7])为增量,分别对预紧力 1875N 、 2437.5N 、 3168.7N 进行分析,由图 9 可

知,结构定位面定位孔圆心的空间位移量随着预紧力的增加而增大,且由图 8 可知,型材有向内部凹陷变形的趋势,容易发生失稳。

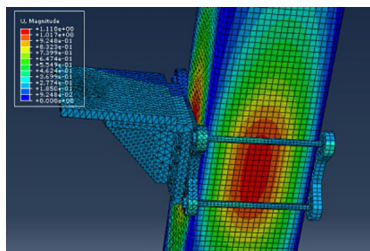


图8 定位接头变形云图

Fig.8 Deformation of location joint

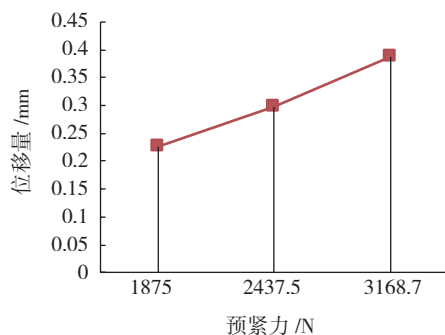


图9 不同预紧力下的定位接头定位孔位移量

Fig.9 Locating hole displacement under different pre-tightening forces

由上述分析可知,螺栓连接预紧力增大,局部连接结构的变形量也随之增大,结构连接处型材自身发生显著变形,随着预紧力的增加,型材所受应力增加,将导致局部刚度不足而失效。因此,连接螺栓预紧力在满足结构所需最小预紧力的情况下,考虑螺栓拧紧误差,建议维持在最小预紧力和螺栓许用拉力的 0.6~0.7 倍之间。

通过上述工装骨架结构形式、截面形状选择方式以及尺寸参数定量分析和预紧力大小确定方法,完成工装设计过程中结构形式、截面形状和尺寸参数的确定,解决骨架安装过程中预紧力施加的问题,最终确定工装设计方案。对工装进行制造,采用定位孔初定位的方式,连接骨架,利用测力矩扳手,给螺栓连接结构施加定力矩,完成工装安装,接着通过激光跟踪仪对定位件进行定位,以实现产品装配,如图 10 所示。

3 结论

(1) 型材截面尺寸参数选择可以通过有限元的定量分析,满足工装的结构刚度,依据型材变形分布和变形量的大小,实现型材截面尺寸参数的合理选择,使设计人员在设计中,尽可能地避免结构刚度不均,局部刚度过剩等问题,结构形式趋于合理化,满足工装设计要



图10 工装安装现场

Fig.10 Tooling assemble

求。

(2) 通过螺栓连接预紧力对工装局部结构刚度的影响分析,在满足结构不发生整体滑移和结合界面不分离的情况下,预紧力增大,连接结构的变形也随之增大,且型材影响较大,工装设计时,通过理论计算和有限元相结合的方式,合理控制预紧力的取值范围,避免预紧力过大而产生连接结构空间位移较大、局部刚度不足、型材失稳等现象。

参考文献

- [1] KIHLMAN, HENRIK. Affordable automation for airframe assembly: Developing of key enabling technologies. Diss. Linköping, 2005.
- [2] HELGOSSON P, OSSBAHR G. Modular and configurable steel structure for assembly fixtures. SAE, 2010.
- [3] 郑联语, 王建华. 盒式连接可重构柔性工装技术及应用展望. 航空制造技术, 2013(18):26-31.
- [4] 蔡志为, 王艺玮, 郑联语. 盒式连接可重构柔性工装配置与分析系统. 航空制造技术, 2013(8):64-74.
- [5] 孙侠生. 民用飞机结构强度刚度设计与验证指南. 北京: 航空工业出版社, 2012: 535-538.
- [6] 濮良贵, 陈国定, 吴立言. 机械设计. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [7] 郑劲松. 发动机缸盖螺栓 拧紧工艺与试验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

(责编 宇军)

(上接第 126 页)

理模式,降低了弯管建模、模具设计、运动仿真、力学仿真、数控编程、结果分析及管形质量评估的工作难度。

在软件中进行弯管模具辅助设计、弯管成形仿真计算时,可通过“模具参数查询、工艺参数查询”模块实时查询和获取导管工艺知识数据库已积累的模具参数和工艺参数,使弯管工艺设计与实际工艺条件结合的更加紧密,以达到工艺仿真更好指导实际生产的作用。

(责编 大漠)