

DOI: 10.7652/xjtuxb201801017

采用局部-整体映射模型的壁板铆接变形预测

常正平¹, 王仲奇¹, 张津铭¹, 王志敏¹, 康永刚¹, 罗群²

(1. 西北工业大学机电学院, 710072, 西安; 2. 西安飞机工业(集团)有限责任公司, 710089, 西安)

摘要: 针对现有壁板铆接变形预测方法预测精度低、计算周期长的问题,提出了一种采用局部-整体映射模型的壁板铆接变形预测方法。依据壁板装配工艺流程分析,确定了引起壁板铆接变形的主要原因;结合增扩自由度法,解决了壁板铆接体-壳连接建模中的应力不协调问题,并用于构建壁板铆接局部-整体映射模型;基于局部-整体映射模型,将钉孔周围复杂的应力应变状态传递到壁板整体薄壳模型上,实现了壁板铆接变形预测。计算结果表明:在十钉铆接结构中,与全实体动态铆接模型相比,单钉的平均计算时间从 55 min 降为 15 min,变形分布与大小基本相同;某壁板变形预测结果与实验结果相比,测量点的最大变形值偏差为 0.062 mm,平均偏差为 0.01 mm,相关性系数为 0.898。该模型显著提高了计算效率,且具有有效性,为进一步铆接变形的控制研究提供了理论依据。

关键词: 飞机壁板;铆接变形;局部-整体映射模型;数值模拟;铆接实验

中图分类号: V262.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)01-0115-08

Prediction of Riveting Deformation of Aircraft Panel Using Local-Global Mapping Approach

CHANG Zhengping¹, WANG Zhongqi¹, ZHANG Jinming¹,
WANG Zhimin¹, KANG Yonggang¹, LUO Qun²

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Xi'an Aircraft Industrial (Group) Co. Ltd., Xi'an 710089, China)

Abstract: A novel prediction method of riveting deformation of aircraft panels is proposed to solve the problems of low prediction accuracy and long calculation time in existing prediction methods. Through the analysis on the panel assembly process, the major causes of the panel deformation are identified. Combining with the DOF expanding method, the additional stress arising in the normal connection method is avoided. Then the method is used to establish a local-global mapping model. Based on this model, the complex stress-strain state around the rivet hole is transferred to the thin shell model of panel in a relatively simple way. Finally, the prediction of riveting deformation of large panel is achieved. The results show that, compared with dynamic explicit finite element model, the average calculation time of a single rivet is decreased from 55 minutes to 15 minutes, and the deformation distribution and magnitude of ten-rivet structure are basically identical. Comparing the predicted results with experimental results of a aircraft panel,

收稿日期: 2017-06-15。 作者简介: 常正平(1989—),男,博士生;王仲奇(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375396);中航工业产学研资助项目(cxy2014XGD07);陕西省自然科学基金资助项目(2016JM5011)。

网络出版时间: 2017-11-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20171106.1409.004.html>

the deviation of maximum deformation values is 0.062 mm, the deviation of average deformation values is 0.01 mm, and the correlation coefficient between them is 0.898. The proposed method improves the computational efficiency and is proved effective. This study may provide a theoretical basis for the control of riveting deformation.

Keywords: aircraft panel; riveting deformation; local-global mapping model; numerical simulation; riveting experiment

薄壁结构的装配变形分析与预测是薄壁件装配领域的重要研究方向,壁板作为飞机薄壁结构的重要组成部分,其装配准确度直接影响了飞机的外形尺寸和飞行性能,也一直是学术界关注的重点。

美国密歇根大学 Liu 等于 1997 年首次提出了针对薄壁零件焊接装配的变形预测模型^[1],将装配过程分为定位、夹紧、连接和回弹 4 个阶段,该单工位模型仅考虑了零件制造偏差引起的弹性装配变形,Hu 后续研究了并行装配和串行装配模式对变形传递的影响^[2]。基于单工位偏差模型,Camelio 等建立了柔性零件多工位装配变形传递模型^[3],应用状态空间模型表示多工位装配过程,将变形传递过程看作线性时变离散系统,众多学者根据上述理论开展了大量薄壁件装配研究^[4-5]。但上述装配变形均建立在小变形、线弹性假设,且不考虑连接过程对变形影响的基础上。

在薄壁件焊接变形预测中,最早考虑了连接过程对整体装配变形的影响^[6]。李娅娜等采用局部-整体映射法^[7],将局部残余塑性应变存储在宏单元中,按规定的焊接顺序映射到焊缝,实现了大型焊接结构的变形预测。借鉴焊接变形局部-整体的计算思路,其他机械连接方式也多采用该思路进行变形预测。Masters 提出了局部-整体映射模拟方法^[8],将自冲铆接过程引起的局部塑性变形映射到全局模型中。Ni 基于有限元方法,将铆接局部变形通过局部模型节点加载位移实现,提出了一种天线结构的整体装配偏差分析架构^[9]。在壁板铆接方面,理论解析主要集中于压铆力建模^[10]和孔壁应力应变分析^[10-11],但铆接过程属于复杂非线性过程,理论分析具有一定的局限性。实验方法多用于铆接结构的机械性能^[12]、疲劳寿命^[13]的研究,但成本较高。随着有限元理论不断完善和计算机性能的提高,数值模拟已成为壁板铆接分析中广泛采用的实用方法。Cheraghi 等利用数值方法分别研究了铆接力、铆钉长度、铆钉直径、钉孔间隙和铆接顺序、铆钉间距对铆接质量、残余应力的影响^[14-15]。

综上所述,当前对于壁板铆接的研究主要集中

于铆接结构的机械性能、残余应力、疲劳寿命等方面,对壁板铆接变形则较少涉及。焊接、自冲铆接过程不同于壁板铆接,其装配变形预测中采用的局部-整体方法对壁板铆接变形研究具有一定的借鉴意义。本文结合增扩自由度方法,用于解决壁板体-壳连接建模中的应力不协调问题,并依此方法构建铆接局部-整体映射模型,将铆接过程形成的固有变形传递到被连接件上。通过比较十钉预测模型和全实体动态模型的计算结果,以及壁板预测结果和实验结果,表明提出的壁板铆接变形预测方法能有效提高计算效率且具有有效性。

1 壁板装配工艺流程分析

为提高壁板铆接质量的稳定性,以自动钻铆系统为代表的自动化连接设备广泛应用于壁板装配。壁板装配过程一般分为预装配和钻铆阶段,预装配阶段主要是将蒙皮和长桁等零件通过工艺螺栓连接起来,形成初始壁板。完成预装配后的壁板移至钻铆托架上重新定位,按照数控程序进行钻铆连接。壁板预装配阶段和钻铆阶段均涉及定位、夹紧、制孔、连接和释放过程,其中制孔、连接通常包含在一个步骤中,可总结为 2 阶段-8 状态流程^[4]。

蒙皮和长桁在预装配阶段通过工艺螺栓固连在一起,限制了两者在后续装配过程中的相对移动。由于壁板壁薄、刚性弱,钻铆阶段多种铆钉安装是形成壁板装配变形的主要来源,零件制造误差、产品和工装之间的定位误差也会引起壁板的弹性变形。为了着重分析铆接过程引起的装配变形,本文在建模过程中将零件模型、定位条件假定为理想状态,不考虑制孔过程引起的变形。

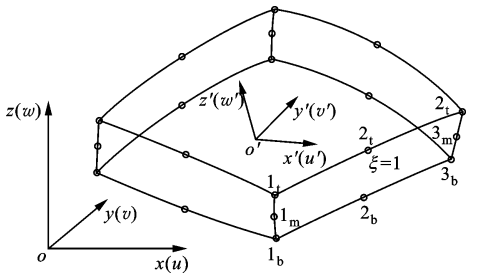
2 壁板铆接体-壳连接建模

铆接过程属于金属塑性流动问题,是非线性显著的。壁板在装配阶段往往安装成百上千的铆钉,针对每个安装过程进行动态仿真则费时费力。铆接后,钉孔周围处于复杂的三向应力状态,在离钉孔轴线约 $2.5R$ 处(R 为钉孔半径),壁板近似处于平面

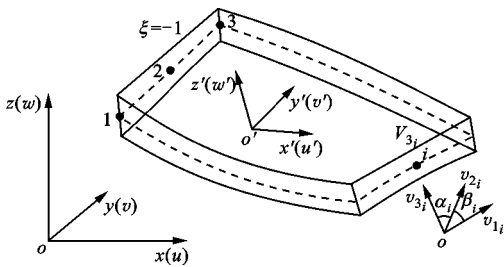
应力状态^[12]。由于钉孔受不均匀挤压,壁板会出现纵向伸长和弯曲现象,壳单元能较好的模拟这一点,在应力状态复杂的钉孔周围则采用实体单元进行模拟。因此,采用体-壳连接方法,即局部-整体映射模型来预测安装过程中的变形传递,可提高铆接变形计算效率。

建立于薄壳理论的退化壳元对位移场函数提出如下假设^[16]:①中面的法线变形后仍保持为直线,但不再是变形后壳体的中面法线;②中面法线上的线段在壳体变形前后长度不变;③忽略中面法线方向上的正应力。

一般体-壳联结示意如图 1 所示,交界面为 $\xi=1$ 、 $\xi=-1$ 面。为便于描述, $\xi=1$ 上的节点用 i_t, i_m, i_b ($i=1, 2, 3$) 表示,分别布置在顶面、中面和底面上,它们的节点位移参数是 u_i, v_i, ω_i ($i=1_t, 1_m, 1_b, \dots, 3_b$); $\xi=-1$ 面上的节点用 $1, 2, 3$ 表示,它们的节点位移参数是 $u_i, v_i, \omega_i, \alpha_i, \beta_i$ ($i=1, 2, 3$)。设壳元节点 1 和 $1_t, 1_m, 1_b$ 3 个节点组成的棱相连。单元中 u_i, v_i, ω_i 是节点在总体坐标系内的位移分量, α_i, β_i 是联结节点 $1_t, 1_b$ 的向量 v_{3i} 绕与之相互垂直的两个向量 v_{1i}, v_{2i} 的转动。



(a) 高精度的 20 节点等参实体元



(b) 8 节点超参壳元

图 1 体-壳连接示意图

为建立两个单元节点位移参数之间的约束方程,首先将各个节点位移参数转换到局部坐标系 v_{1i}, v_{2i}, v_{3i} 中,其转换关系为

$$\begin{bmatrix} u'_i \\ v'_i \\ \omega'_i \end{bmatrix} = \lambda^T \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ \omega_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

其中 u'_i, v'_i, ω'_i 是沿 v_{1i}, v_{2i}, v_{3i} 的位移分量,且

$$\lambda^T = [v_{1i} \quad v_{2i} \quad v_{3i}] = \begin{bmatrix} l_{1i} & l_{2i} & l_{3i} \\ m_{1i} & m_{2i} & m_{3i} \\ n_{1i} & n_{2i} & n_{3i} \end{bmatrix} \quad (2)$$

节点位移参数转换到局部坐标系后,对体元来讲, $(1_t, 1_m, 1_b)$ 3 个节点共有 9 个自由度 $\{u'_{1_t} \quad v'_{1_t} \quad \omega'_{1_t}\}^T, \{u'_{1_m} \quad v'_{1_m} \quad \omega'_{1_m}\}^T, \{u'_{1_b} \quad v'_{1_b} \quad \omega'_{1_b}\}^T$, 壳节点 1 有 5 个自由度 $\delta'_1 = \{u'_1 \quad v'_1 \quad \omega'_1 \quad \alpha_1 \quad \beta_1\}^T$ 。

根据壳体理论基本假设,变形后两类单元在界面仍保持贴合,即节点 $1_t, 1_b$ 的连线绕节点 1_m 发生相对转动,变形后仍为直线,并和壳元在转动 α_1, β_1 后相协调。按照一般连接方法可得约束方程^[16]。交界面上的 14 个位移参数之间存在约束方程,它们只有 5 个是独立的。如果选择 $u'_1, v'_1, \omega'_1, \alpha_1, \beta_1$ 作为独立的位移参数,则体元的 9 个位移参数 $(u'_{1_t} \quad v'_{1_t} \quad \omega'_{1_t}), (u'_{1_m} \quad v'_{1_m} \quad \omega'_{1_m}), (u'_{1_b} \quad v'_{1_b} \quad \omega'_{1_b})$ 和独立参数之间存在转换关系。

约束方程中引入了壳单元中的假设②,将导致与 Surana 过渡元同样的结果,即强制的法向约束力会产生不合理的附加应力,在法向变形比较大时,这种效应比较明显。为此,蔡提出了一种改进连接方法^[17],考虑了壳元节点的法向变形,实现了体壳的良好连接,这是一种增扩自由度法。

在一般的体-壳连接中,产生附加应力现象的根本原因是在基本假设②引入了体元或过渡元的位移模式,引入了过强的法向约束,为此做出新的如下假设:①壳体中面法线变形后仍为直线,但不再是变形后壳体的中面直线段,这与前述基本假设①一致;②壳元节点处中面法线段由中面分开的两部分可以独立地发生伸缩变形,这一点放弃了基本假设②。

根据新的假设,引进 2 个新的自由度来描述节点处法线段的伸缩变形, Δh_{11} 为壳元节点 1 处法线段中面以上部分的伸长, Δh_{21} 为壳元节点 1 处法线段中面以下部分的伸长,则改进后的约束方程为

$$\begin{bmatrix} u'_{1_t} \\ v'_{1_t} \\ \omega'_{1_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{t_i}{2} l_{11} & -\frac{t_i}{2} l_{21} \\ 0 & 1 & 0 & \frac{t_i}{2} m_{11} & -\frac{t_i}{2} m_{21} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{t_i}{2} n_{11} & -\frac{t_i}{2} n_{21} \end{bmatrix} \delta'_k + \Delta h_{11} \begin{bmatrix} l_{31} \\ m_{31} \\ n_{31} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} u'_{1_m} \\ v'_{1_m} \\ \omega'_{1_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \delta'_k \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} u'_{1_b} \\ v'_{1_b} \\ \omega'_{1_b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -\frac{t_i}{2}l_{11} & \frac{t_i}{2}l_{21} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{t_i}{2}m_{11} & \frac{t_i}{2}m_{21} \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{t_i}{2}n_{11} & \frac{t_i}{2}n_{21} \end{pmatrix} \delta'_k - \Delta h_{21} \begin{pmatrix} l_{31} \\ m_{31} \\ n_{31} \end{pmatrix} \quad (5)$$

这些约束方程释放了壳元节点对相邻体元在法线方向的约束,能够满足体元法线方向的变形要求,因而将不再导致附加应力的出现。

3 壁板铆接变形预测模型

壁板变形主要因铆钉和钉孔在铆接过程中的相互作用引起,故铆接后孔周的能量分布可用于衡量变形。每个单元的能量 J 和应变 ϵ 服从 $J = \int_V E \epsilon^2$, 其中 V 为实单元体积, E 为弹性模量。孔周变形是孔周应变的耦合作用结果,且与自由度约束相关,所以,孔周节点变形可选为应变能的指标^[9],则铆接等效变形可在孔周节点加载位移实现。壁板装配涉及多种规格的铆钉,且每种规格的铆钉安装工艺参数不同。铆钉几何参数和工艺参数确定了孔周的能量分布,针对各类规格的铆钉,进行动力学显式分析,存储孔周节点对应的变形数据。对具有相同规格铆钉的安装过程,则在静力学分析中直接调用存储的变形数据进行加载,计算流程如图2所示。

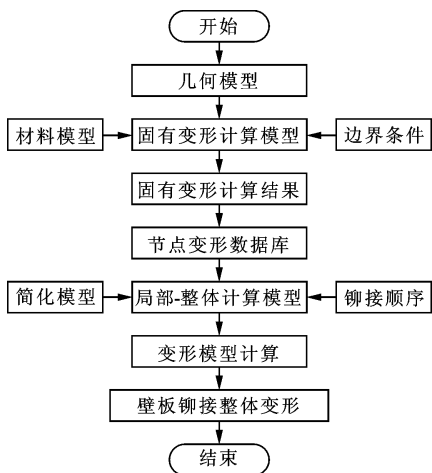


图2 壁板铆接变形计算流程

3.1 固有变形计算模型

固有变形计算模型用于计算各类规格铆钉铆接时,钉孔周围节点的变形分布信息,并存入节点变形库。本文以无头铆钉连接为例,依据连接过程,建立铆接动力学显式计算模型。

为了精确计算钉孔周围的变形情况,分析过程

采用三维有限元模型,模型如图3所示。铆钉是直径为6.35 mm、长度为20.64 mm的无头铆钉,蒙皮和长桁厚度均为4.5 mm,钉孔直径为6.5 mm。铆钉和被连接件分别为2117-T4、7075-T651铝合金,材料性能参数见文献[18]。铆模和压力脚设为刚体,铆钉和被连接件划分为C3D8R单元。通过模型分割,在变形较大的铆钉和孔周采用加密网格,实现细节分析,其余部分网格较粗,提高分析的效率。约束上下铆模、下压力脚沿 z 向之外的自由度,用于加载压铆力和夹紧力,上压力脚和被连接件端面完全约束,铆钉和被连接件截面处于对称约束状态。铆接过程分为3个步骤,加载步用于铆钉成形,保持步铆模处于停止状态,卸载步用于铆模、压力脚回撤。

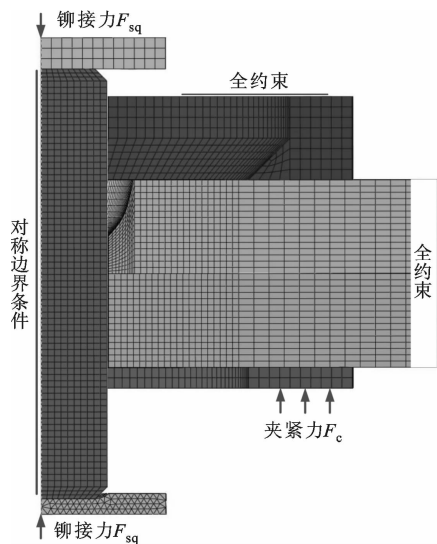


图3 固有变形有限元计算模型

为验证固有变形计算模型,通过压铆试验,比较铆头成形后的几何尺寸、连接件的剖面形状,表明所建立的变形计算模型能够有效模拟无头铆钉成形过程^[18],钉孔应力-应变分布如图4所示。由图4可知,钉孔周围处于复杂的三向应力状态,当远离钉孔一定距离时,轴向应力(S22)接近于0,可近似认为处于平面应力状态,这是因成形铆头对钉孔挤压仅限于钉孔周围有限区域。对应力状态复杂的区域,应利用体元进行建模,提高计算精度;而对处于平面应力状态的区域,可通过壳元进行模拟,以提高计算效率。残余塑性应变仅存在于钉孔的附近,因此塑性变形区仅限于距孔中心为 $2R$ 范围内。

3.2 局部-整体映射模型

在飞机结构建模中,一般用板壳单元模拟蒙皮,梁单元模拟长桁。应用平面三角形壳单元几何模型描述薄壁件弹性变形成力学模型^[19],提高了薄壁件变

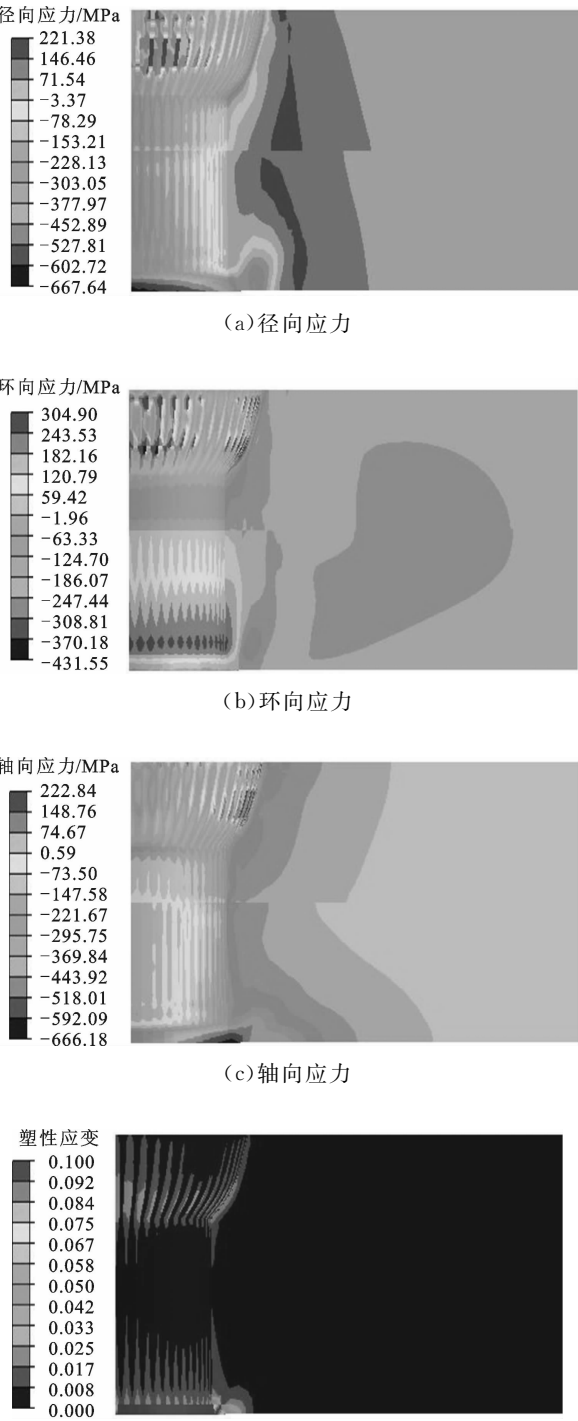


图 4 应力-应变分布结果

形的计算效率。本文主要考虑铆接局部变形对壁板整体变形的影响,为便于建模,整体模型均采用壳单元,有限元模型如图 5 所示。

薄壁结构中经常含有不规则倒角、圆角、槽和加强凸台等结构,在整体建模时,忽略倒角、圆角和槽等对整体刚度影响较小的结构。将加强凸台等效为一张均匀薄板,其厚度为一个等效厚度,该厚度保证

结构具有与原结构相同的刚度^[19]。在有限元软件中沿曲面法线制孔较难,故在 CATIA 中利用 MBD 模型中紧固件点位投影到零件表面,求出钉孔法线,进而求得整体模型中的孔位并进行制孔。

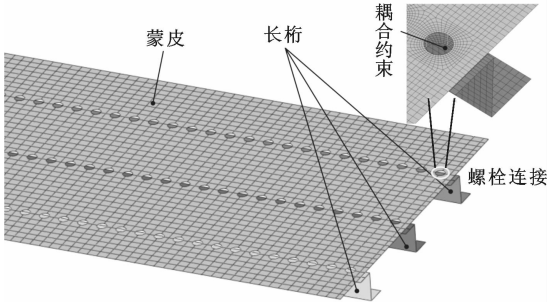


图 5 壁板整体有限元模型

壁板装配中除了铆钉连接外,还涉及螺栓连接。建模时采用运动螺栓孔耦合关系,限制零件间的相对位移,允许相对转动。铆接过程中局部采用三维实体模型,用于表征孔周的复杂应力状态,三维实体模型和整体壳模型,即局部-整体模型通过多点约束方程实现连接,约束定义如图 6 所示。多点约束方程对弹性范围内的变形传递更精确,因此文中选择局部-整体映射模型的连接节点位置处于弹性变形范围内,即距钉孔中心轴线的距离为 $2.5R$ 。

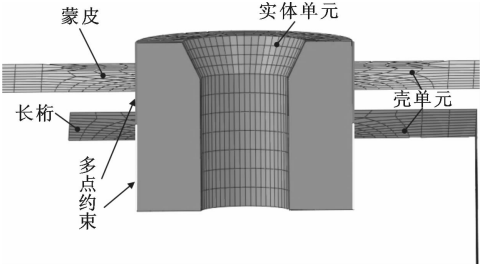


图 6 局部-整体映射模型约束定义

固有变形计算模型得到的节点变形信息包含节点位置和节点位移,同类规格的铆钉采用相同的节点位移加载。壁板一般带有一定的曲率,钉孔法线在坐标系中的方向随着铆接点位发生变化,节点载荷转换如图 7 所示,法线 1、法线 n 表示两相距为 s 的钉孔,但其工艺参数一样,因此只需对节点载荷进行转换。同类型铆钉局部模型通过阵列进行建模,其实例名称不同,但节点信息相同,因此可直接加载节点库中的位移数据,即

$$\mathbf{M} = \mathbf{A}\mathbf{L} + \mathbf{s} \tag{6}$$
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & -\cos\beta \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{L}$ 为节点库中的位移载荷; $\mathbf{M}$ 为当前加载节点的位移载荷; $\mathbf{A}$ 为转换矩阵; α 、 β 和 γ 分别表示钉孔法线与坐标系在 x 、 y 和 z 方向的夹角。

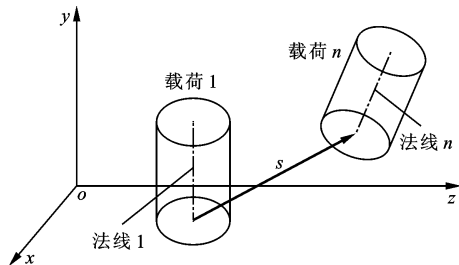


图7 节点载荷转换

为考虑铆接顺序的影响,将当前铆接点位前的应力应变场通过预应力场设置加载到当前铆接分析步中,以分析步顺序设置实现铆接顺序的加载,直至整体模型计算完毕。

4 结果和讨论

为验证采用局部-整体映射模型的壁板铆接变形预测方法的计算精度和效率,本文将其计算结果与全实体动态有限元模型(单排十钉、双排十钉)的模拟结果进行对比。另外,还将某壁板试验件的计算结果和实验结果进行对比,以确定预测模型的有效性。文中试验利用 Creaform 手持式激光扫描仪 HandySCAN 700™(测量精度为 0.03 mm,分辨率为 0.05 mm)在铆接前后扫描壁板,将前后扫描结果通过 Geomagic 软件进行处理,得到壁板铆接过程引起的变形。

4.1 十钉铆接预测模型

单排十钉试片尺寸为 305 mm × 40 mm × 2 mm,双排十钉试片尺寸为 180 mm × 75 mm × 2 mm,铆钉为 $\Phi 4$ mm × 9 mm 的平头铆钉,建立相同尺寸规格的三维有限元模型,借用连续计算模型进行计算^[20]。预测模型和连续计算模型得出的变形分布和大小非常接近,为进一步比较两模型在一些测量点处的 z 向变形值,本文在十钉计算模型的中线沿长度方向均匀选取 11 个测量点,比较结果如图 8 所示。

4.2 壁板铆接预测模型

某型飞机的壁板试验件,由一块蒙皮和 3 根长桁组成,壁板外形尺寸为 1 034 mm × 442 mm。壁板在铆接过程中通过卡板定位,理论上卡板与壁板

为面接触,由于存在制造误差,其实际接触为点接触类型,在壁板预测模型构建时,从壁板与卡板的每个理论接触面中离散的选择卡板与长桁的接触点作为定位点,以限制壁板的法向移动,同时在壁板两端边界处添加位移和转动约束,限制壁板沿纵向的移动和绕长桁的旋转,该定位方式如同薄壁件中常用的 N-2-1 定位。铆接顺序选择为按长桁依次铆接,首先将每个长桁与蒙皮通过两端的螺栓连接,剩下的铆接点位从右到左按顺序铆接完毕。一次性去除边界条件较难收敛,故边界条件逐步释放,直至边界条件完全去除。在壁板模型中均布选择 15 个测量点,比较实验测量结果和预测模型的计算结果,测量点变形量比较如图 9 所示。

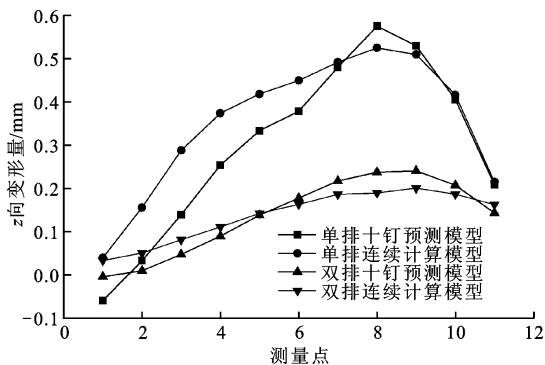


图8 十钉模型测量点变形量比较

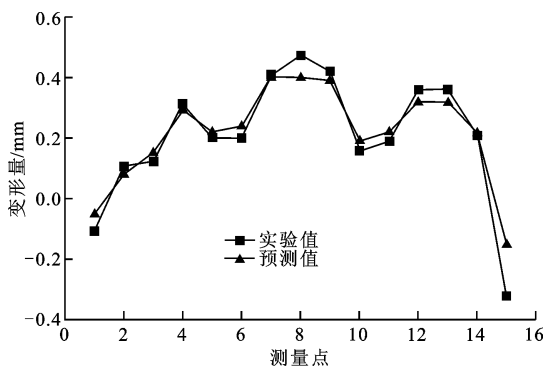


图9 壁板模型测量点变形量比较

4.3 结果讨论

文中所建预测模型与全实体有限元模型计算得到的铆接变形分布基本相同,但边界处的变形略有不同。这是因为局部-整体建模时,忽略了距钉孔较远处 S22 方向的应力,所处区域的变形量级较小,对整体变形的影响也较小。在单排十钉模型中,预测模型和三维计算模型在测量点处的最大量变形量分别为 0.576、0.526 mm,测量点中变形量的最大差异为 0.15 mm。在双排十钉模型中,预测模型和三维计算模型在测量点处的最大变形量为 0.24、0.20

mm,测量点中变形量的最大差异为 0.048 mm,与三维连续计算模型相比,预测模型具有较高的计算精度。

文中使用的电脑配置为 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2630 v3, 2.4 GHz, 内存为 64 GB, 在三维连续计算模型中, 每个铆钉安装过程的平均计算时间约为 55 min, 随着铆钉数量的增加, 平均计算时间也在不断增加。利用文中所建立的预测方法, 每个铆钉安装过程的平均计算时间不足 15 min, 可知采用局部-整体映射模型后, 计算效率有了很大提高。

壁板铆接预测模型得到的变形分布与实验测量结果相似。该壁板在铆接后中间凸起, 两端下凹, 即出现弯曲变形; 同时, 在实验变形分布中得出壁板在 4 个角上的变形不同, 即出现了一定的扭曲变形, 但相较于弯曲变形, 扭曲变形较小。预测模型在靠近边界位置的变形值小于测量值, 这是因为预测模型的边界条件与实际边界条件存在差异, 其扭曲变形不十分明显。壁板实验值和预测值最大分别为 0.474、0.412 mm, 相差 0.062 mm。由于在预测模型中没有考虑零件制造偏差、定位偏差及制孔力的作用, 预测值在整体上小于测量值。比较两组数据的相关性, 其相关度为 0.898, 表明该模型具有良好的预测能力。

5 结 论

本文以飞机壁板为例, 预测了大尺寸薄壁结构在铆接过程中产生的变形, 在总结国内外相关研究成果的基础上, 建立了铆接装配局部-整体映射模型, 并通过十钉结构仿真计算、大尺寸壁板铆接数值模拟和实验验证了该模型的计算效率和有效性, 并得出以下结论:

(1) 利用增扩自由度方法, 解决了壁板铆接体-壳建模中出现的应力不协调问题^[17], 为构建局部-整体映射模型提供了理论依据;

(2) 基于固有变形计算模型, 分析了铆接后孔边的应力应变分布, 确定了塑性半径区的范围, 利用体-壳连接建模方法, 构建了针对铆接过程的局部-整体映射模型, 提出了壁板铆接变形预方法;

(3) 通过与十钉结构动态有限元模型计算结果比较得出, 所建预测模型有效提高了计算效率, 且计算精度较高;

(4) 通过某型壁板铆接的变形实验, 验证了壁板铆接变形预测模型的有效性。

参考文献:

- [1] LIU S C, HU S J. Variation simulation for deformable sheet metal assemblies using finite element methods [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 1997, 119(3): 368-374.
- [2] HU S J, KOREN Y. Stream-of-variation theory for automotive body assembly [J]. CIRP Annals: Manufacturing Technology, 1997, 46(1): 1-6.
- [3] CAMELIO J, HU S J, CEGLAREK D. Modeling variation propagation of multi-station assembly systems with compliant parts [J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(125): 673-681.
- [4] CHENG H, LI Y, ZHANG K F, et al. Variation modeling of aeronautical thin-walled structures with multi-state riveting [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2011, 30(2): 101-115.
- [5] 侯东旭. 飞机柔性零件装配偏差的统计分析技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [6] TSIRKAS S A, PAPANIKOS P, PERICLEOUS K, et al. Evaluation of distortions in laser welded ship-building parts using local-global finite element approach [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2003, 8(2): 79-88.
- [7] 李娅娜, 谢素明, 兆文忠. 基于“局部-整体”映射有限元的大型焊接结构变形仿真研究 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(8): 40-44.
LI Yana, XIE Suming, ZHAO Wenzhong. Deformation simulation of large welding structure based on “local-global” finite element method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(8): 40-44.
- [8] MASTERS I, FAN X, ROY R, et al. Modelling distortion induced in an assembly by the self-piercing rivet process [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part B Journal of Engineering Manufacture, 2011, 226(2): 300-312.
- [9] NI J, TANG W, XING Y, et al. A local-to-global dimensional error calculation framework for the riveted assembly using finite element analysis [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2016, 138(3): 031004.
- [10] 常正平, 王仲奇, 王斌斌, 等. 基于镦头不均匀变形的压铆力建模 [J]. 航空学报, 2016, 37(7): 2312-2320.
CHANG Zhengping, WANG Zhongqi, WANG Binbin, et al. Riveting force computation model based on formed head inhomogeneous deformation [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(7): 2312-2320.

- [11] ZENG C, LIAO W H, TIAN W. Influence of initial fit tolerance and squeeze force on the residual stress in a riveted lap joint [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(9): 1643-1656.
- [12] RANS C, STRAZNICKY P V, ALDERLIESTEN R. Riveting process induced residual stresses around solid rivets in mechanical joints [J]. Journal of Aircraft, 2012, 44: 323-329.
- [13] 王宇波, 余路, 洪华舟, 等. 自动钻铆连接件疲劳性能分析 [J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(s1): 52-55.
WANG Yubo, YU Lu, HONG Huazhou, et al. Fatigue analysis of components produced by automatic drilling and riveting [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(s1): 52-55.
- [14] CHERAGHI S H. Effect of variations in the riveting process on the quality of riveted joints [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(11): 1144-1155.
- [15] AMAN F, CHERAGHI S H, KRISHNAN K K, et al. Study of the impact of riveting sequence, rivet pitch, and gap between sheets on the quality of riveted lap joints using finite element method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(1): 545-562.
- [16] 王勛成. 有限单元法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 378-439.
- [17] 蔡洪能, 王雅生, 闵行. 有限元分析中体元和壳元的连接 [J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(9): 76-79.
CAI Hongneng, WANG Yasheng, MIN Hang. Connection of brick element and shell element in finite element analysis [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(9): 76-79.
- [18] CHANG Z P, WANG Z Q, ZHANG J M, et al. Investigation of riveting parameters influence on the riveted joints deformation during slug rivet installation [C] // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, USA: ASME, 2016: V002T02A027.
- [19] 程免翀, 武殿梁, 鲍劲松. 支持薄壁结构交互装配变形仿真的力学模型研究 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(9): 128-134.
CHENG Huanchong, WU Dianliang, BAO Jinsong. Mechanical model of thin-wall part elastic deformation for interactive assembling simulation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(9): 128-134.

- [20] CHANG Z P, WANG Z Q, JIANG B, et al. Modeling and predicting of aeronautical thin-walled sheet metal parts riveting deformation [J]. Assembly Automation, 2016, 36(3): 295-307.

[本刊相关文献链接]

- 倪妮, 孙中国, 陈啸, 等. 单液膜气泡聚并和连接过程的移动粒子半隐式法数值模拟. 2017, 51(12): 156-162. [doi: 10.7652/xjtuxb201712023]
- 田红亮, 董元发, 钟先友, 等. 圆锥微凸体在粗糙表面接触分析中的应用. 2017, 51(11): 71-78. [doi: 10.7652/xjtuxb201711011]
- 闫凯, 张静, 寇子明. 一种大转角柔性铰链的设计与分析. 2017, 51(11): 87-96. [doi: 10.7652/xjtuxb201711013]
- 蒙雁琦, 胡改玲, 温琳鹏, 等. 区域分割的亚像素相位立体匹配算法. 2017, 51(10): 33-38. [doi: 10.7652/xjtuxb201710006]
- 李超超, 向建华, 王慧敏. 汽车保险杠系统吸能盒结构参数对低速碰撞下吸能特性的影响. 2017, 51(10): 77-81. [doi: 10.7652/xjtuxb201710013]
- 韩江涛, 张英杰, 李程辉, 等. 面向光学三维测量的非均匀条纹生成方法. 2017, 51(8): 12-18. [doi: 10.7652/xjtuxb201708003]
- 罗斌, 朱子才, 陈花玲, 等. 离子液体型离子聚合物金属复合材料的封装及变形性能. 2017, 51(8): 122-127. [doi: 10.7652/xjtuxb201708020]
- 戴明亮, 万心勇, 彭熠, 等. 新型热处理工艺对搅拌摩擦焊接头性能的影响. 2017, 51(8): 136-141. [doi: 10.7652/xjtuxb201708022]
- 李法敬, 高建民, 史晓军, 等. 电主轴轴心冷却用环路热虹吸管的传热特性. 2017, 51(7): 90-97. [doi: 10.7652/xjtuxb201707014]
- 李响, 周幼辉, 童冠. 类蜂窝结构的内面冲击特性研究. 2017, 51(3): 80-86. [doi: 10.7652/xjtuxb201703014]
- 康跃然, 史晓军, 高建民, 等. 一种新型轴芯冷却电主轴的热特性分析. 2017, 51(1): 13-18. [doi: 10.7652/xjtuxb201701003]
- 侯俊才, 魏旭星, 段浩, 等. 交流电场对高压下甲烷/空气预混稀燃火焰的影响. 2017, 51(1): 31-37. [doi: 10.7652/xjtuxb201701006]
- 康跃然, 史晓军, 高建民, 等. 多参量耦合的电主轴热特性建模及分析. 2016, 50(8): 32-37. [doi: 10.7652/xjtuxb201608006]
- 陈永会, 张学良, 温淑花, 等. 粗糙表面弹塑性接触连续光滑指数函数模型与法向接触刚度研究. 2016, 50(7): 58-67. [doi: 10.7652/xjtuxb201607010]

(编辑 赵炜)