

铆接变形及其有限元分析*

Rivet Deformation and Its FE Analysis

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 刘平 张开富 李原

[摘要] 采用理论分析和数值分析相结合的方式,系统地分析了压铆过程应力应变情况;将压铆过程划分为5个阶段,分析每个阶段的金属流动和受力情况;借助于ANSYS/LS-DYNA模拟压铆过程,得到铆钉和铆接件的应力应变分布情况和变化规律。

关键词: 铆接 变形分析 数值模拟 有限元法

[ABSTRACT] Numerical analysis and theory analysis are presented to research the stress and strain of rivet during squeeze riveting. The whole process is divided into five stages, and the metal flow and force squeeze status are analyzed in every stage. Using ANSYS/LS-DYNA, the squeeze riveting process is simulated, and the strain and stress distribution and the variation law on the rivet and workpiece are given.

Keywords: Rivet Deformation analysis Numerical simulation FE method

飞机制造中铆接装配占有十分重要的地位,据估算,飞机装配劳动量约占整个飞机制造劳动量的40%~50%,其中铆接劳动量约为30%,随着对飞机性能要求的不断提高,迫使人们重视铆接质量,使其适应质量稳定、生产速率高、疲劳寿命长的要求。

在飞机行业中,法国的B. Langrand等^[1]对铆接过程进行了研究,分析了铆接基于FE模型和材料疲劳特性模型特征的数值过程,测量了在准静态和动态条件下应变速度的影响,提出考虑铆钉材料的非线性因素^[2]。M. R. Urban等^[3]对旋翼飞机机身结构中使用的普通铆接的误差传播进行了测试和分析。Billy Kelly等^[4]仿真了一个铆钉的安装过程,研究了轴对称模型下铆钉安装仿真的FE模型,精确预测了铆接成形过程中的力。V. Blanchot等人^[5]建立部分、轴对称和3D三种可调整数值模型来仿真铆钉连接。国内的铆接研究主要集中在电磁铆接方面,研究了电磁铆接的工艺

方法和数值模拟过程^[6]。西北工业大学的曹增强^[7-9]等主要研究电磁铆接,介绍了一种用于不开敞部位大直径铆钉铆接的方法——应力波铆接;并针对电磁铆接方法,对不同铆钉材料在不同加载速率下的变形进行了微观研究,发现了镢头中出现的绝热剪切带与加速速率相关。葛建峰、杨军^[10-11]进行了电磁铆接过程的数值模拟研究。

我国对于铆接数值模拟方面的研究尚属起步阶段。随着数字化技术发展,及其在铆接技术中的拓展应用,证明了进行铆接过程的数值模拟是提高连接质量、减少研究费用和节约研究时间的有效途径。

1 铆接变形分析

在铆接外力的作用下,铆钉发生塑性形变,铆钉杆膨胀、变粗,这种膨胀对孔径产生径向压力,使得孔径扩张。

在镢头形成过程中,对于板不同方向的应力作用造成的铆接件变形主要表现在两个方面:一方面是铆接处铆接件的局部下陷;另一方面是铆接件的径向伸长。

(1)板件的局部受力可能造成两种方式的变形:一种是铆接件的向下凹陷,如图1所示^[12];另一种是两个铆钉之间板材的间隙,如图2所示。

铆接件的下陷不仅使铆接结构变得具有脆性,而且使得蒙皮表层曲面的连续性、光滑性受到影响。

铆接件由于孔径扩张产生的局部变形,在铆接件中留下了残余应力和挤压裂纹,增加了铆接结构的脆性。铆接过程中产生的微小裂纹会影响结构的疲劳性能。

(2)铆接件的径向伸长是由于受到沿Z轴方向的压力或冲击力,铆钉镢粗产生径向应力造成的;同时,

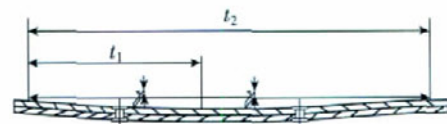


图1 蒙皮下凹

Fig.1 Recess on skin

* 国家“863”计划 CIMS 项目(2006AA04Z137),西北工业大学翱翔之星计划资助。

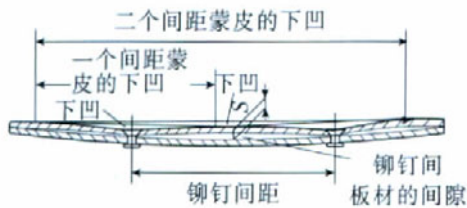


图2 两个铆钉之间板材的间隙
Fig.2 Gap of sheets between 2 rivets

铆钉镦头对于孔径周围的板面产生 Z 方向的压力。因此,在铆接的夹紧工具松开后,板在 XY 平面上发生延展,在 Z 方向上出现一定的翘曲(图3,设铆接件处于 XY 平面内,铆钉的轴向为 Z 方向)。

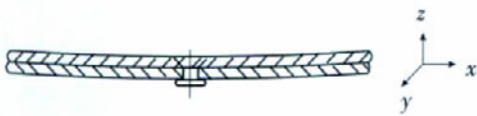


图3 铆接时的坐标
Fig.3 Coordinate during riveting

在飞机蒙皮上,铆接是大量使用的连接方式,每一次铆接造成的微小误差在一定方向上累积,通过装配尺寸链传递给封闭环,会导致装配超差,给飞机的精准装配带来挑战。因此,研究铆接过程的应力应变分布、铆钉及铆接件的变形,对提高飞机机体结构的装配精度、进行无余量装配都有重要意义。

2 物理模型的建立

为了确保飞机的精准装配和使用寿命,在进行压铆受力分析之前,除了进行连续性假设、匀质性假设、初应力为零和体积力为零假设以外,还需增加以下假设:

- 各向同性假设:假设铆钉和铆接件的材料为各向同性的;
- 在常温下施铆;
- 施铆用的冲头和顶铁的变形相对于铆钉的变

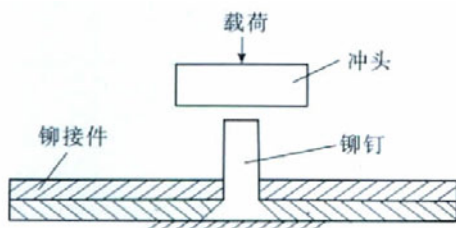


图4 压铆物理模型
Fig.4 Physical model of squeeze riveting

形来说是很微小的,假设冲头和顶铁是理想刚体,在施铆过程中不发生变形。

在此不考虑夹具对于铆接的影响,简化压铆的过程,建立压铆示意图如图4所示。

3 压铆过程阶段划分

针对沉头铆接的简化模型,分析其压铆过程。设冲头初速度为0,整个压铆过程由冲头接触铆钉开始,到铆钉发生塑性变形,完全成形为止。整个过程可划分为5个阶段:

(1)阶段1。此阶段从冲头接触铆钉开始,随着位移的增长,压铆力逐渐增大,使得铆钉开始发生变形,钉杆整体镦粗。当钉杆接触到铆接件时,这个阶段结束。此阶段只涉及到铆钉的变形,压力尚未传递到铆接件,不考虑铆接件的受力变形。

(2)阶段2。此阶段从铆钉杆接触铆接件的边缘开始,随着冲头位移的增加,铆钉与孔内壁接触区域开始变大,直到应力在铆接件厚度上均匀分布,阶段2就结束了。

此时镦粗的铆钉杆与铆孔的圆周面充分接触,尚未形成镦头,铆钉中的金属以向下流动为主,近似于挤压型的金属流动。如图5所示,在钉杆与孔周的接触面,扩张力 f' 的方向垂直于钉杆与孔周接触面的方向,摩擦力 f 的方向是与铆钉轴线平行的作用点所在处的接触面的切线方向。

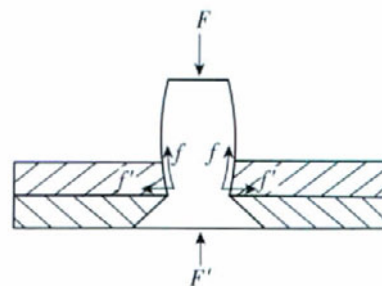


图5 铆钉钉杆受力示意图
Fig.5 Forces on rivet rod

(3)阶段3。随着冲头位移的增加,铆钉头部开始局部镦粗,形成镦头,并接触到铆接件的金属板面。铆钉头与铆接件之间接触区域的摩擦力使金属流动发生改变,同时铆接件因为受到镦头的压力开始发生变形。当镦头达到目标尺寸后,冲头停止移动。

在此阶段,铆接件不仅在孔周围受到铆钉膨胀带来的压力,而且铆钉镦头开始接触到铆接件,受到镦

头的压力作用和铆头延展带来的摩擦力作用。接触面包括铆钉铆头和铆接板的接触、铆钉和孔之间的接触等。设此时铆钉杆中的金属向下流动已趋于饱和,向两侧的金属流动为主要流动方式,如图6所示。

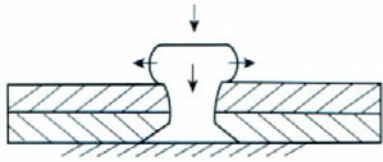


图6 铆头形成和金属的流动

Fig.6 Upset head forming of rivet and flow of metal

(4)阶段四。冲头位移减小,载荷降低。但铆钉铆头仍然与冲头相接触,铆钉弹性回复。

(5)阶段五。冲头离开铆钉,压铆过程结束。

4 压铆过程的数值分析

针对压铆过程进行模拟,观察压铆过程的应力应变状况。整个有限元仿真设置过程包括模型建立、定义单元类型、网格划分、材料定义、part定义、接触摩擦处理、载荷施加和边界条件的确定。采用在ANSYS中进行建模和前处理,再用LS-DYNA求解的思路。模型尺寸如图7所示。

模型是规则的。关于显示计算方式,由于局部细化对计算结果影响不大,故采用映射网格划分。在计算过程中,由于材料变形属于大变形,所以网格可能会发生畸变,针对这种情况,需要对铆钉、铆接件的模型进行自适应划分,通过对LS-DYNA的关键字文件中的PARTS DEFINITIONS部分的关键字*control_adaptive来设置自适应网格划分的参数。

铆钉材料为7050,铆接件材料为2024-T351铝合金,冲头和顶铁是理想刚体,具体材料参数如表1所示,表中描述的是在常温下的铝合金的机械性能。

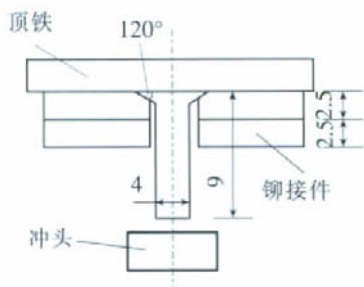


图7 模型尺寸图

Fig.7 Model dimensions

表1 材料机械性能

铝合金		2024-T351	7050
载荷种类		拉伸	拉伸
弹性性能	E/MPa	74 000	74 000
	ν	0.33	0.32
	$\rho/(\text{g}\cdot\text{mm}^{-3})$	0.002 8	0.002 8
塑性性能	A/MPa	325	455
	B/MPa	470	510

表中, E 为杨氏模量, ν 为泊松比, ρ 为密度, A 为屈服强度, B 为拉伸强度。

接触面之间均存在摩擦,文献[5]中认为摩擦对于最终结果的影响微小,故设置固定值即可,设定摩擦系数 $k_f=0.2$ 。

压铆过程的载荷主要来自于冲头的向下移动,冲头移动的时间-位移关系基本满足正弦定律^[9],如图8所示。

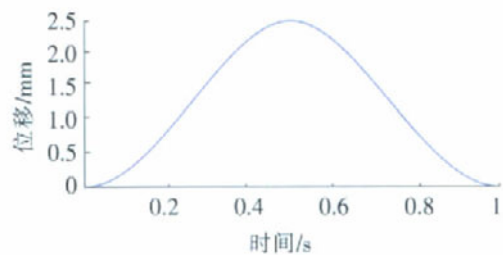


图8 冲头移动时间与距离的关系

Fig.8 Relation between the ram moving time and distance

经过LS-DYNA的计算,得到压铆最终阶段的应力分布情况,见图9。

为了得到铆接件的变形情况,在上铆接件边缘取节点,图10展示了节点在X方向和Y方向的位移,经过0.5s的压铆后,铆接件在X方向有0.02mm的伸

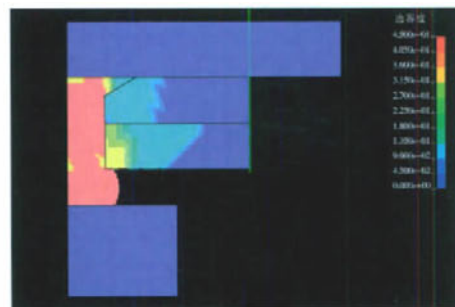


图9 压铆应力分布

Fig.9 Stress distribution during squeeze riveting

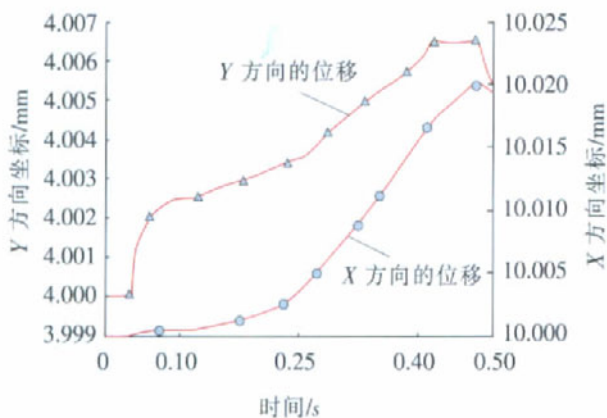


图 10 铆接件边缘节点在 X 方向和 Y 方向的位移
Fig.10 Displacement of nodes on riveted sheet edge in X and Y directions

长,在 Y 方向有 0.006 5mm 的上翘幅度。可见,铆接件在 X 方向的位移在 $t=0.25\text{s}$ 之前增长缓慢,在铆钉镦头形成的时期快速增长;Y 方向的位移在铆钉镦头形成开始之前为零,在镦头形成的初期快速增长,然后缓慢增长。

在铆接件孔壁边缘取一节点,得到其位移随时间在 X 方向的位移变化情况(见图 11),可见铆孔在压铆的过程中被扩张。

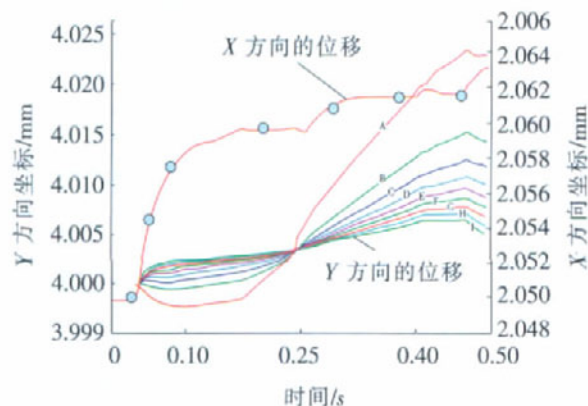


图 11 孔周节点在施铆过程的 X 方向和 Y 方向的位移

Fig.11 Displacement of nodes on hole periphery in X and Y directions during riveting

在铆接件上从孔周开始按照一定距离取 9 个节点(A、B、C、D、E、F、G、H、I,见图 11),输出其在施铆过程中在 Y 方向的位移变化情况,铆接件都出现了不同程度的上翘变形;而且在此过程中,孔周处铆接件先下陷,后上翘,在图 11 中表示出了孔边缘的金属在镦头延展过程中产生“内翘”的状况。

通过有限元模拟可以看出:(1)压铆过程应力主要集中在铆钉与孔边缘的接触部分和沉头铆钉的头部与铆钉杆的连接处;(2)在压铆过程中,孔周处铆接件会发生先下陷后会上翘的情况,即在孔边缘的金属先受到镦头形成的压力产生下陷,然后由于摩擦力作用出现“内翘”状态;(3)压铆力在压铆第 2 阶段时会出现极值,在压铆第 3 阶段处于最大值。

5 结束语

本课题在建立简化沉头铆接的压铆过程的物理模型基础上,对铆接过程进行阶段划分,针对各个阶段分析了铆钉和铆接件的受力情况;结合理论分析和数值模拟的方法,分析其应力应变状况。研究结果对铆接工艺的改进具有参考价值,并为铆接件的矫形设计提供了理论基础。

参 考 文 献

- [1] Markiewicz E, Langrand B E, Deletomb E, et al. Analysis of the riveting process forming mechanisms. International Journal of Materials & Product Technology, 1998(13): 123-145.
- [2] Langrand B, Riveted joints embrittlement—validation of riveting process FE model, ONERA-Lille Report 98/01, 1998.
- [3] Urban M R. Analysis of the fatigue life of riveted sheet metal helicopter airframe joints. International Journal of Fatigue, 2003(25): 1 013-1 026.
- [4] Billy Kelly, Colm Costello, FEA modelling of setting and mechanical testing of aluminum blind rivets. Materials Processing Technology, 2004, 153-154: 74-79.
- [5] Blanchot V, Daidie A. Riveted assembly modelling: study and numerical characterisation of a riveting process, Materials Processing Technology, 2006, 180: 201-209.
- [6] 航空制造工程手册总编委会. 航空制造工程手册(飞机分册). 航空工业出版社,1993.
- [7] 樊战亭,曹增强. 基于 PLC 的电磁铆接设备控制系统. 机床与液压,2005(11): 108-110.
- [8] 曹增强,余公藩. 新型应力波铆接设备研制中若干问题探讨. 机械设计,1998,15(3):13-14.
- [9] 曹增强,余公藩. 不同加载速率下铆钉材料变形研究. 西北工业大学学报,2000,18(1):27-30.
- [10] 葛建峰. 电磁铆接工艺研究[D]. 西安:西北工业大学,2005.
- [11] 杨军. 低电压电磁铆接过程数值模拟研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2004.
- [12] 俞汉清,陈金德. 金属塑性成形原理. 北京:机械工业出版社,2002.

(责编 悠然)