

壁板自动钻铆行为及变形分析技术综述^{*}

Deformation Analysis and Application of Automatic Riveting for Wing Panel

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 张开富 杨殿国 李原 程晖 张军

[摘要] 国外航空企业已经大量配备了自动钻铆系统,并广泛应用于飞机装配过程中。国内部分企业虽已经购买了自动钻铆设备,但是在应用过程中正在探索自动钻铆工艺参数优化、铆接过程微小变形控制等问题。本文从自动钻铆的工艺流程出发,分别从理论分析、有限元分析和试验分析3个角度,总结了自动钻铆过程中铆钉和薄壁件的应力应变分析方法,并对各种方法的优劣性进行了分析,最后以复合材料结构件铆接为背景,提出针对复合材料干涉铆接需要解决的关键问题。

关键词: 自动钻铆 应力应变分析 铆钉 壁板

[ABSTRACT] Over the last years, automatic riveting systems are widely used in the aircraft assembly of the foreign aerospace industries. Chinese aerospace companies have purchased automatic riveting equipment, but there are several problems need to be solved, such as the parameter optimization and controlling of the small variation in the process of automatic riveting. Based on the process flow of the automatic riveting, the analysis methods of stress and strain in rivet and sheet metals are summarized respectively. Key problems for interference-fit riveting of composite material are also represented.

Keywords: Automatic riveting Analysis of stress and strain Rivet Panel

由于具有工艺过程简单、连接强度稳定可靠、检查和排除故障容易、能够适应于结构复杂的各种金属和非金属材料之间的连接等优良特性,钻铆连接已经成为飞机产品装配中主要的连接方式,广泛地应用于飞机薄壁件的连接^[1]。伴随着对飞机制造效率及精度需求的不断提升,以自动钻铆系统为代表的自动化连接设备在飞机装配过程中得到了大量的应用,进而促使我国航空铆接技术得到了突飞猛进的发展,在飞机装配过程中出现了大量新型的铆钉结构(如无头钉、钛合金铆钉)、铆接形式(湿装配、干涉装配)和方法(液压铆、电磁铆等)。新结构与新工艺的出现极大地提升了装配精度与强度,

但是也导致原有的经验数据及工艺参数不再可用。

影响铆接件质量的工艺参数很多,有铆接力、铆钉几何尺寸、铆钉与被铆接件的材料、被铆接件铆钉孔的尺寸公差等^[2]。众多工艺参数最终目标都是保证壁板的精度、强度以及寿命,而其中的基础都是铆接过程的应力应变分析。若铆钉在铆接过程中,应变量少,压缩不充分,会导致连接过程中铆钉的松动脱落,影响飞机的使用寿命;若在铆钉孔周围所产生的残余应力远远超出强化连接所需的残余应力,则会导致铆钉孔周围应力集中和裂纹的出现,这将大大降低飞机的安全性能与寿命;同时壁板的应变量大,会使蒙皮局部下陷,径向伸长,使蒙皮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,降低飞机的空气动力学性。因此为了提升我国飞机数字化装配水平,必须要对大型壁板自动钻铆过程应力应变进行分析,而目前常见的方法有有限元分析法和试验分析法,其针对不同的接头形式,在特定的工艺流程基础上,分别对铆钉及壁板在铆接过程中的应力应变进行分析,本文将对目前较常用的方法分别展开讨论。

1 自动钻铆工艺流程分析

自动钻铆系统结构多样、连接方法多样,但单对铆接过程而言,按照铆钉的结构形式,可以分为无头铆钉铆接工艺和有头铆钉铆接工艺2种,其相关工艺流程如图1所示。

无论是有头钉还是无头钉,其主要流程都包括:夹持、制孔、放钉、铆接和卸载,不同之处在于有头钉铆接时需要进行镗窝操作,而在无头铆钉成型后为保证外形,需要对表面进行铣平。因此,对于有头钉和无头钉而言,其顶杆和相关壁板由于结构形式不同,在铆接阶段会导致铆钉的膨胀、壁板孔的挤压状态不同,进而导致连接过程中应力应变的不同,影响壁板的成型精度、强度及使用寿命。

铆接过程实际就是在受外力作用下铆钉头形成墩头的过程。铆钉头部受到外部压力,发生墩粗,形成墩头,钉杆发生塑性形变,铆钉杆膨胀、变粗,这种膨胀对孔径产生压力,使得孔径扩张,因此在成型过程中铆

^{*} 国家“863”计划项目(2007AA041903)、西北工业大学基础研究基金项目(CJ201032)资助。

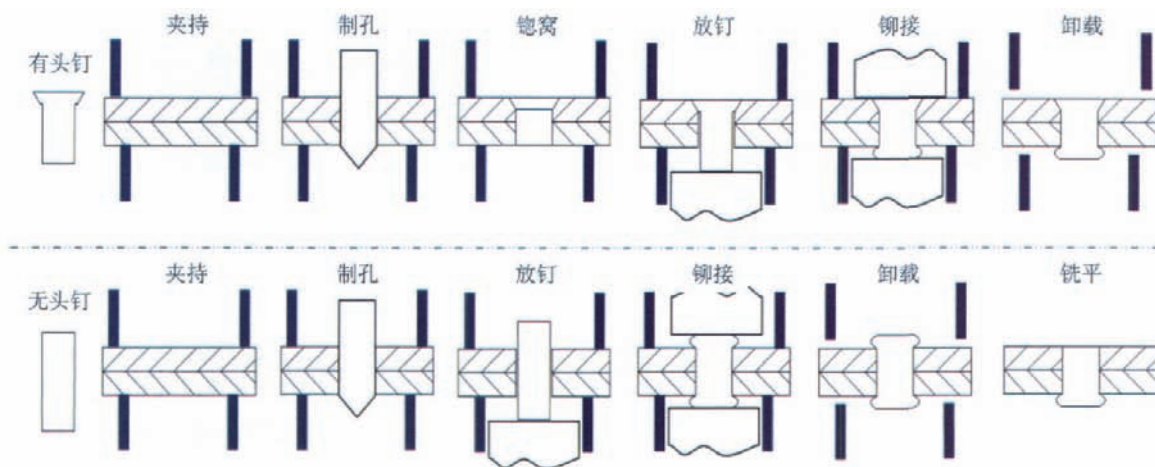


图1 自动钻铆工艺流程
Fig.1 Process of automatic riveting

接参数的选取稍有不妥,铆钉便会发生以下常见缺陷:(1)沉头铆钉头凹进零件表面;(2)沉头铆钉头突出零件表面过大;(3)铆钉头与钉窝之间有间隙;(4)钉杆在钉头下墩粗,铆钉头与零件有间隙;(5)铆钉墩头直径过小;(6)铆钉墩头高度过小;(7)铆钉头或墩头被打伤、有切痕、有裂纹;(8)墩头呈喇叭形;(9)墩头偏斜;(10)钉杆在孔内弯曲。因此需要对围绕有头铆钉和无头铆钉自动钻铆过程中的应力应变进行详细的分析。

2 自动钻铆过程应力应变分析方法

对壁板的自动钻铆过程而言,参与零件有2类:(1)连接件(铆钉);(2)被连接件(壁板、长桁等),铆钉在施铆力的作用下发生塑性变形,完成连接过程,但铆钉的塑性变形能进一步影响到壁板,造成装配产品的进一步变形,因此对自动钻铆过程的应力应变分析包含了对铆钉和壁板的应力应变分析。国内外专家学者针对铆钉本身及壁板的应力应变情况采用有限元、弹塑性力学、试验等方法进行了大量的研究。

2.1 铆钉应力应变分析

铆接过程中,铆钉杆受压铆力作用形成墩头,该过程中伴随着较大的塑性变形。影响铆钉变形的参数主要有铆钉长度、铆钉直径、铆钉孔直径和压铆力等。不正确的参数选择会在孔周围产生过大的残余应力,导致应力集中和初始裂纹的产生,同时引起墩头的不规则变形,导致铆钉松动、脱落。围绕铆钉在成型过程中的变形问题,常见的分析方法主要包括基于弹塑性力学的理论分析、有限元仿真分析与试验分析。

2.1.1 铆钉应力应变的理论分析

(1) 压铆力和墩头形状间的理论关系。

合适的压铆力的选取是墩头成形的关键。压铆力

的选取与铆钉尺寸、铆钉类型、铆接设备的类型、板料厚度以及气压等紧密相关。铆接过程变化的非线性,使得得到压铆力和墩头形状之间的经验关系变得相当困难。美国卫奇塔州立大学的相关学者对铆接过程作出如下假设:(1)铆钉和铆钉孔之间的间隙为零;(1)铆接中没有材料进入钉孔内,即墩头由伸出壁板部分的铆钉材料生成。在此基础上,结合塑性变形时的应力应变关系 $\sigma_{sq} = K(\epsilon_s)^n$,得到压铆力和墩头直径、墩头高度之间的理论关系^[3]:

$$F_{sq} = \frac{1}{4} \pi D^2 K [21n(D_0/D)]^n \quad (1)$$

$$\text{或 } F_{sq} = \frac{1}{4} \pi D^2 K [\ln(H/H_0)]^n \quad (2)$$

通过有限元分析可以看出,墩头直径的理论结果和仿真结果相差较大。这是因为,理论计算时将墩头近似地看成圆柱体,而实际上墩头是桶状的。但是,两者的平均值符合得很好,误差控制在5%以内。与此同时,荷兰代尔夫特大学的学者也对压铆力的公式进行了推导,通过测量墩头的尺寸,证实此公式可用于预测飞机铆接结构的压铆力,适当增大压铆力还可有效提高铆接接头的疲劳寿命^[3]。

(2) 铆钉的应力应变理论分析。

在式(1)和式(2)的基础上,卫奇塔州立大学的学者对铆接变形的解析问题进行过探讨,作了简单的弹性假设和理想的弹塑性材料假设,得到铆钉的径向和轴向应力理论公式^[4]:

$$\sigma_r = -p_r = \left[\Delta r_0 - \delta r_0 + \frac{\nu}{E} [(r_0 + \delta r_0) \sigma_{z1} - (r_0 + \Delta r_0) \sigma_{z2}] \right] / \left[\frac{1+\nu}{E} (r_0 + \delta r_0) + \frac{1-\nu}{E} (r_0 + \Delta r_0) \right], \quad (3)$$

$$\sigma_z = \frac{[R_c^2 - (r_0 + \Delta r_0)^2]}{\pi(r_0 + \Delta r_0)^2} \cdot p_z \quad (4)$$

上述铆钉的轴向应力 σ_z 是沿轴向的平均应力,切向应力 σ_r 沿轴向大小不变,这是由前面所做的假设引导的。但从生产实践的经验可知,铆钉的径向和轴向应力沿轴向都是不均匀的,而针对此问题,目前尚没有出现合适的解决方法。

目前,在国内外各大航空制造企业广泛使用的用于描述变形的模型是 Malinin 根据小弹塑性变形理论提出的。俄国学者 Shishkin 在此基础上获得了铆钉在压铆力作用下的分布压力 q_0 (式(5))并根据铆钉的边界条件,得到铆钉径向和切向应力与分布压力 q_0 的关系式(式(6))^[5]:

$$q_0 = \frac{\sigma(S)_1}{\sqrt{3}} \left(2\lambda_1 \ln\left(\frac{C}{r}\right) + (1 - \lambda_1) \left(\frac{C}{r}\right)^2 + \lambda_1 \right) \quad (5)$$

$$\sigma_{r(2)}(a) = \sigma_{t(2)}(a) = -q_0 \quad (6)$$

根据 Mises 强度理论和 Hooke 定律,得到 Mises 应力 s_i 和 Mises 应变 e_i 的理论计算公式,如式(7)和式(8)所示,其中的参数定义见文献[6]。

$$\sigma_{i(2)} = \lambda_2 \sigma(S)_2 + \varepsilon_{i(2)}(1 - \lambda_2)E_2 \quad (7)$$

$$\varepsilon_{i(2)} = 2(\omega + z/r) \quad (8)$$

2.1.2 铆钉应力应变的有限元分析

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。法国科技大学的学者提出了3种适用于沉头铆钉铆接过程的有限元模型:切片模型、轴对称模型和对称模型,并对压铆过程中铆钉的应力应变进行了分析。其中,切片模型是由四边形单元组成的 15° 扇形区域,见图 2(a)。轴对称模型仅存在一个半剖面,软件在计算中使用了大量的轴对称公式,并且只能用于模拟轴对称的载荷条件,见图 2(b)。对称模型是 3D 模型,利用结构的对称性将模型的规模减半,见图 2(c)^[6]。

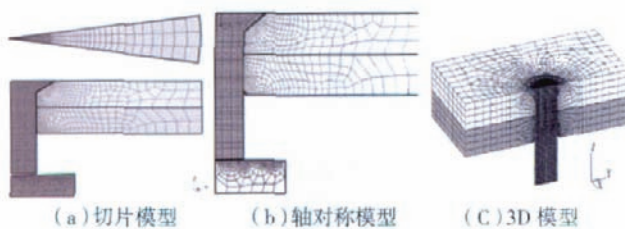


图2 铆接过程的有限元模型
Fig.2 FE model of riveting process

上述模型可大大减少模型的规模和计算时间,但是模型中并未考虑铆钉和钉孔的间隙对铆钉应力应变

的影响。鉴于此,美国密歇根大学的相关专家利用 3D 有限元模型研究初始间隙和夹持应力对铆钉位移和应力场的影响^[7]。在此基础上,佐治亚理工学院的研究考虑铆钉和钉孔的初始间隙,针对铆钉的应力分布,提出一种三维非线性有限元分析模型,表示因铆钉安置引起的应力的不均匀分布。并提出了一种三钉铆接模型,用于观察初始间隙和多个铆钉共同作用下的铆钉应力分布^[8]。

2.1.3 铆钉变形的试验分析

在铆接过程中,铆钉存在较大的塑性变形,这给铆钉的应力应变试验分析造成了很大的困难。因此,铆接的应力应变试验主要是以试验件的上、下壁板为对象进行的。现今的铆钉试验大都研究的是压铆力 F 和铆头直径 D 、铆头高度 H 之间的关系。荷兰代尔夫特大学学者^[3]采用图 3 所示的铆接试验件,两平板通过 10 对铆钉实现连接。在该试验件中,每一对铆钉采用不同的压铆力进行铆接。利用数显卡尺对形成的铆头直径和高度进行测量,所得测量结果可用于验证压铆力 F 和铆头直径 D 、铆头高度 H 之间的关系式的正确性。针对铆钉变形,波兰科技大学的学者也采用图 3 所示的铆接试验件,其中直径 D 指桶形铆头直径的最大值。

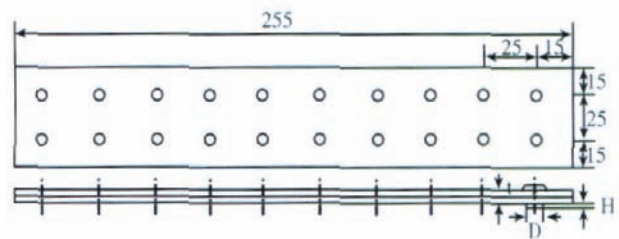


图3 铆接试验件——采用10对铆钉连接两平板
Fig.3 Testpieces with ten pairs of rivets

2.2 壁板应力应变分析

对壁板而言,分析其铆接过程应力应变的方法大体可以分为理论分析、有限元分析和模拟、试验研究3大类。其中试验研究、有限元分析和模拟在实际生产过程中已取得非常丰富的成果。

2.2.1 壁板应力应变理论分析

铆接过程中,壁板随铆钉一起产生弹塑性膨胀。由于壁板铆钉孔周围的材料发生弹塑性变形,几何非线性、材料非线性、边界非线性问题都非常突出,这使得建立壁板应力、应变的精确理论解析模型难度非常大。目前的理论分析方法主要有塑性力学法、主应力法、能量法(包括功平衡法、上限法、下限法)^[9-10]等。无论哪种方法,都是在引入一些简化条件之后的近似解法。

(1) 主应力法。

主应力法的一般思路是:假设壁板在变形过程中主

应力方向不变,对基元板块列应力平衡微分方程和屈服方程联立求解。传统的主应力方法不考虑几何方程,只是以体积不变定律来代替几何变形条件,精确度受到影响。佐治亚理工学院学者基于主应力方法,利用理想弹塑性材料假设和平面应变假设,得到壁板铆钉孔周围材料弹性变形阶段的应力分布模型^[11]:

$$\sigma_r = -p \left(\frac{r}{R_0} \right)^{-2},$$

$$\sigma_\theta = p \left(\frac{r}{R_0} \right)^{-2},$$

式中, r 是钉孔周围材料与钉孔中心的距离, R_0 为钉孔初始半径, p 为铆钉孔的径向应力。

随着铆钉孔周围压力 p 的增大,当壁板材料的应力超过其屈服应力 σ_y 时,铆钉孔周围的材料就有一部分发生塑性变形。设弹塑性分界圆柱面半径为 r_y ,其塑性变形阶段的应力分布公式为^[11]:

径向应力:

$$\sigma_r = -p + \sigma_y \ln \left(\frac{r}{R_0} \right), \quad R_0 \leq r \leq r_y;$$

$$\sigma_r = -\frac{\sigma_y}{2} \left(\frac{r_y}{r} \right)^2, \quad r > r_y;$$

切向应力:

$$\sigma_\theta = (\sigma_y - p) + \sigma_y \ln \left(\frac{r}{R_0} \right), \quad R_0 \leq r \leq r_y;$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_y}{2} \left(\frac{r_y}{r} \right)^2, \quad r > r_y;$$

这种理论模型的不足:模型中没有考虑材料应变硬化效应的影响,忽略了壁板厚度方向上铆钉孔的变形。

(2) 塑性力学方法。

塑性力学方法的具体思路是:沿主应力方向建立坐标系,然后再建立平衡微分方程、几何方程、物理方程等3个方面的基本方程,再加上适当的边界条件,即构成数学模型,通过对此模型的求解,获得壁板应力与应变的分布。由于金属塑性成形问题的复杂性,不同的人从不同的角度提出了大量的方程,特别是几何方程和物理方程。这些方程的应用条件、分析目的、精确程度也各不相同,而且对3方面方程联立求解时涉及大量的数学运算,有时要得到理论精确解甚至是不可能的^[12]。俄国学者 Shishkin^[5] 基于弹塑性小变形假设,分别计算了施加铆接力和卸载铆接条件下,无头铆钉铆接壁板时(如图4所示)接触压力的计算方法,推导了计算壁板塑性变形区域的数学公式,并在此基础上推导了壁板残余应力分布的表达式,但在计算时没有考虑摩擦力对应力应变分布的影响。

(3) 上、下限法。

上、下限法的主要求解思路是:根据金属流动模式

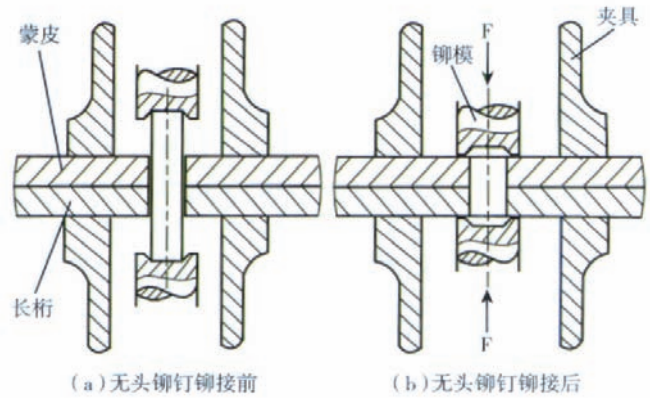


图4 Shishkin的无头铆钉铆接过程示意图
Fig.4 Riveting process of headless rivet by Shishkin

和解题需要设计动可容速度场,利用塑性理论中的几何方程确定应变速率场和速度场,求出总消耗功率最小(大)的独立变量,进而求解上、下限载荷,其力学基础是虚功原理。该方法的不足之处是在求解过程中设计尽可能接近真实情况的动可容速度场比较困难。

2.2.2 壁板应力应变有限元仿真分析

早在20世纪90年代,有限元仿真与模拟技术就被应用到薄壁件铆接应力应变分析过程中。该方法是通过有限元仿真软件建立二维、三维或轴对称模型对铆接过程进行仿真模拟,进而得到铆接过程中铆钉和壁板的应力、应变数值。典型的有限元仿真过程如图5所示。

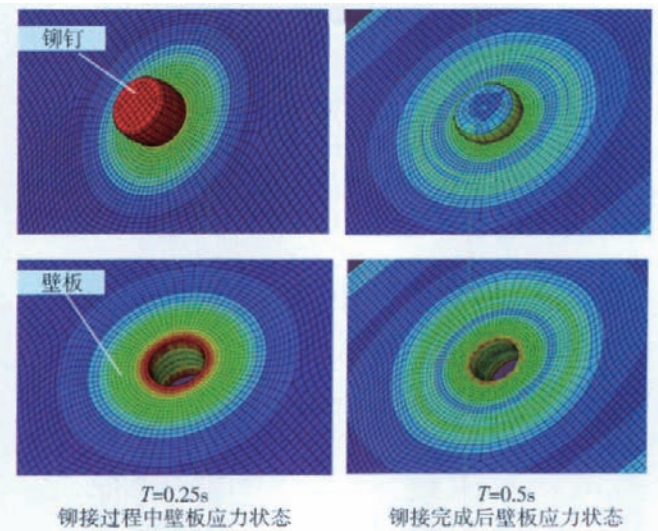


图5 壁板应力应变有限元仿真分析示意图
Fig.5 FEA result of stress and strain of panel riveting

荷兰代尔夫特理工大学的学者基于线性弹塑性材料假设,利用 Patran 进行预处理,利用 ABAQUS 有限元软件研究分析了不同铆接条件下沉头铆钉和无头铆钉的应力、应变及残余应力分布问题。通过应力应变分

析指出:利用铆接力可控的设备可以更精确地控制铆接过程。具体结论如下^[13]:

(1) 无头铆钉铆接壁板。

随着铆接力的增大,孔周围接触面的切向残余应力由拉应力变为压应力。在远离孔的部位拉应力增加。在孔壁上产生有残余压应力,但是并不是沿板厚方向均匀分布。最大的残余压应力产生在远离孔壁的位置上。

(2) 沉头铆钉铆接壁板。

根据有限元仿真结果可知具有沉头孔的壁板相对于没有沉头孔的壁板在铆接后钉孔的变形量相对较小。因此,沉头铆钉孔周围的残余应力相对较小。

但本方法的研究局限于材料属性和残余应力分布区域的限制,而没有在实际生产中更好地推广应用。在此基础上法国学者对上述方法的材料属性进行了改进,利用三维实体有限元仿真和试验的方法,研究了在静载荷和动载荷条件下应变速率对铆接成形过程的影响。确定了铆钉和壁板在铆接过程中的材料弹塑性行为以及破坏机理。通过对比分析指出,在有限元仿真中考虑材料的非线性因素是很有必要的^[14]。同时对铆接成形过程进行有限元仿真分析,为了在不影响仿真结果的基础上,减小模型尺寸,节约计算时间,获得铆接中的应力、应变分布问题,对铆接有限元模型和参数进行优化,得到的结果合理地改进了铆钉成形的有限元模型,达到了节约运算时间的目的^[6]。

有限元仿真与模拟分析方法的优点在于不需要做具体的试验,如果参数设定合理,可以得到具有实际应用价值的仿真结果,是减少研究费用和节约研究时间的有效途径。但这种方法对模拟参数的设定要求较高,而且缺乏理论深度,必须辅助理论计算结果或试验结果为依据,才能验证仿真结果的准确性和实用性;由于铆接中涉及大的塑性变形,为了得到较精确的计算结果,需要对有限元网格进行细化,这样求解时间也就越长,且当铆钉尺寸改变时需重新计算。

2.2.3 壁板变形的试验分析

通过对特定材料和尺寸的试验件进行铆接试验,试验分析方法能够得到较为精确的试验数据,能比较准确地反映出试验条件下的应力、应变状态。

波兰军事科技大学学者完成了拉伸载荷条件下单铆钉试验件结构的疲劳试验,建立了单搭接单铆钉结构形式的三维有限元仿真模型,分析了铆接后壁板铆钉孔周围材料的位移,研究了不同摩擦系数下铆钉和铆钉孔的相对位移和应力、应变分布问题^[15]。

加拿大学者 Gang Li 分别对单搭接单铆钉、单搭接三铆钉结构(如图6所示),在3种水平的铆接力条件下,考虑了弹塑性本构关系、几何非线性特性、非线性接触

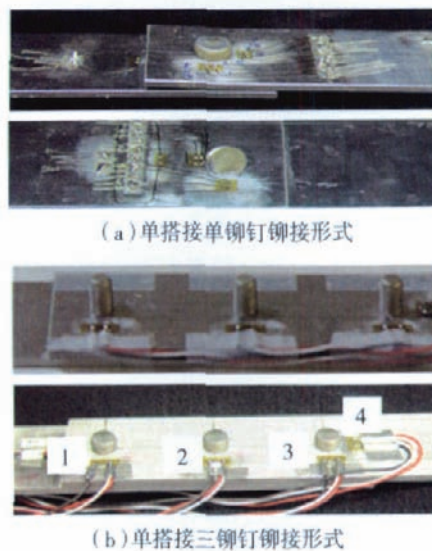


图6 Gang Li的铆接试验过程

Fig.6 Riveting experiments of Gang Li

等条件,研究了壁板铆接过程中钉孔周围应力、应变的变化情况,并利用应变片测定应力变化,并结合有限元仿真结果进行实例验证,结果表明有限元仿真结果与试验结果符合的较好^[16]。

采用试验方法来分析铆接形位和变形量的不足之处在于耗费的时间较长,费用较高,而且受试验条件的限制。目前测定壁板应力的主要方法是通过在铆接试验件表面沿不同方向分别布置电子应变片,结合相关软件,通过应变数值计算相应应力数值的大小,由于铆接结构的特殊性,应变片只能布置在试验件的外表面,这就使得测定的壁板应力值有一定的偏差,但通过试验方法测定的应力、应变结果仍最接近于真实的应力应变大小。因此通过试验方法得到的应力、应变结果是理论计算以及有限元仿真分析结果的依据和基础。

3 对复合材料铆接的思考

对飞机产品而言,设计一件尽可能轻的“外衣”正在成为世界飞机制造业的趋势,预计将于2010年问世的A350超宽客机,其高性能轻质结构将达62%,成为空客公司第一架全复合材料机翼飞机。轻质“外衣”不仅能有效克服自重与安全的矛盾,还能大幅降低飞机能耗,波音787飞机采用复合材料的机身舱段和机翼,减轻主体结构重量50%,与同载重客机相比,节省燃料20%以上;A380飞机复合材料的比重已达23%,首架飞机每位乘客的百公里能耗不到3L,比竞争机型的能耗低12%;A350飞机的百公里能耗预计只有2.5L/人。在飞机制造中,装配连接质量直接影响飞机结构抗疲劳性能与可靠性,干涉铆接是机械装配连接中一种采用铆钉作为连接件的过盈配合性质先进连接技术,这种连接将

在铆接孔壁和结构件与铆接头接触表面形成紧密连接和紧固力,在不改变结构设计、不提高材料品级的前提下有效地提高产品的耐久性、密封性和可靠性。对于复合材料结构件,由于复合材料延伸率小、层压板层间强度低、抗冲击能力差等原因,一般认为不宜进行铆接连接,但由于铆接成本低、工艺简单、易实现自动化装配,国内外对承压力大的复合材料结构件一直采用铆接连接。特别是在上世纪 80 年代,美国道格拉斯公司的研究表明,复合材料结构件采用干涉铆接能够大幅提高接头强度、提高飞机使用寿命^[17]。

复合材料结构件干涉铆接使结构疲劳寿命增益的关键在于理想的干涉量、干涉均匀性和理想的紧固力等。对于干涉量,它一般会对复合材料结构件铆接孔壁的干涉区域造成微裂纹损伤,这种微裂纹在结构服役过程中将出现裂纹扩展、疲劳失效断裂等,导致复合材料结构件寿命和可靠性降低;而干涉量小又会造成间隙配合。对于干涉均匀性,铆钉在铆接作用力下膨胀,膨胀形成的干涉量可能出现不均匀现象,不均匀的干涉将使铆钉和复合材料结构件铆接孔壁接触受力不均匀,在结构服役过程中将出现应力、挤压力等不均匀分布在铆接孔,而出现应力、挤压力等局部集中、局部快速疲劳现象,对复合材料结构连接可靠性和疲劳寿命产生严重影响。对于紧固力,紧固力是保证复合材料结构件牢固连接的基础,紧固力因铆接头锁紧、挤压结构件表面而产生,紧固力产生是可能对复合材料结构表面造成挤压损伤,影响复合材料结构服役能力,产生不损伤复合材料结构表面而能够牢固连接的理想的紧固力非常关键。因此,研究探索干涉铆接理想干涉量、干涉均匀性和理想紧固力与复合材料铆接结构件的材质特性(如构件材质、连接界面形貌、热膨胀系数等)、机械特性(接头结构形式、铆接过程、损伤缺陷等)、力学特性(抗拉、抗剪、应力分布、疲劳寿命、断裂形式等)的内在联系及其映射关系是复合材料干涉铆接结构件得到深入应用的基础和关键。

4 结束语

本文从铆钉结构出发,介绍了无头钉和有头钉的自动钻铆工艺流程,并总结了铆钉成型过程中因参数选取不当引起的常见缺陷;分别以铆钉和薄壁件为对象,从理论分析、有限元分析和试验分析 3 个角度出发,总结和比较了各种铆接过程应力应变分析方法及其优缺点;提出了复合材料干涉铆接亟待解决的关键性问题。

开展壁板自动钻铆连接行为及变形量分析技术的研究,有助于解决自动钻铆工艺参数优化、变形控制等问题,从而实现自动钻铆稳定高效地生产。在提高装配质量和效率等方面,特别是在大批量生产中,自动钻铆

与手工铆接相比具有很大的优势。随着自动钻铆相关关键问题的不断解决,自动钻铆将在我国飞机装配过程中得到越来越广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册(飞机装配分册). 北京:航空工业出版社,1993.
- [2] Cheraghi S.Hosseini. Effect of variations in the riveting process on the quality of riveted joints. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 39 (11-12): 1 144-1 158.
- [3] De Rijck J J M, Homan J J, Schijve J, et al. The driven rivet head dimensions as an indication of the fatigue performance of aircraft lap joints. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(12): 2 208-2 218.
- [4] LI Y J. An analysis of riveting process by theoretical, nonlinear finite element and experimental methods [D]. Kansas:The Wichita State University, 1998.
- [5] Shishkin S S. Computation of the contact load in a rivet bond. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2010, 39(1): 43-46.
- [6] Blanchot V, Daidie A. Riveted assembly modeling: Study and numerical characterisation of a riveting process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 180(1-3): 201-209.
- [7] Iyer K, Rubin C A, Hahn G T. Influence of Interference and Clamping on Fretting Fatigue in Single Rivet-Row Lap Joints. *Journal of Tribology*, 2001, 123(4): 686-698.
- [8] Atre, Johnson W S. Analysis of the effects of interference and sealant on riveted lap joints. *Journal of Aircraft*, 2007, 44(2): 353-364.
- [9] 胡世光,陈鹤峥,李东升. 钣金冷压成形的工程解析. 北京:北京航空航天大学出版社,2009.
- [10] 徐春,张驰,阳辉. 金属塑性成形理论. 北京:冶金工业出版社,2009.
- [11] Park JH, Atluri S N. Fatigue growth of multi-cracks near a row of fastener-holes in a fuselage lap-joint. *Computational Mechanics*, 1993, 13(3): 189-203.
- [12] 冲模设计手册编写组. 冲模设计手册. 北京:机械工业出版社,2006.
- [13] Muller R P. An experimental and analytical investigation on the fatigue behavior of fuselage riveted lap joints [D]. Delft: Delft University of Technology, 1995.
- [14] Langrand B, Deletombe E. Riveted joint modeling for numerical analysis of airframe crashworthiness. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2001, 38(1): 21-44.
- [15] Szymczyk E, Derewońko A, Jaachimowicz J. Analysis of displacement and stress distributions in riveted joints. III European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering C.A.,2006,6(5-8): 434-435.
- [16] Li G, Shi G Q, Nicholas C. Bellinger. Studies of residual stress in single-row countersunk riveted lap joints. 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Confer 18-21 April 2005, Austin, Texas.
- [17] Cao Z Q, Cardew-Hall M. Interference-fit riveting technique in fiber composite laminates. *Aerospace Science and Technology*, 2006 (10): 327 - 330.

(责编 泰山)