

大型客机机翼壁板喷丸成形 延展问题研究与分析

Study on Elongation After Shot-Peen Forming for Wing Skin Panel of
Large Aircraft

西北工业大学陕西省数字化制造工程技术研究中心 王永军 陈龙辉
西安飞机国际航空制造股份有限公司 乔明杰 杨亮 陈金平 高国强 曹亮



王永军

副教授、博士,研究方向为金属塑性成形、复合材料成形、计算机集成制造、成形设备数控技术。曾主持和参加研究课题 20 余项,发表论文 30 余篇,获得发明专利 5 项,获省部级二等奖 1 项,三等奖 1 项,获省级教学成果一等奖 1 项。

喷丸成形是大型飞机机翼壁板的主要成形工艺之一,其工艺过程复杂、影响因素多,需反复试喷及人工校正,并且成形后壁板有不同程

本文通过对数控加工、温度变化以及喷丸成形等壁板制造的各个阶段对壁板延展量的主要影响因素、计算方法及测量方法的论述,提出了壁板喷丸成形延展量计算的关键技术及解决途径,对提高大飞机壁板成形精度、缩短研制周期、降低研制成本具有重要意义。

度的延展,随着机翼壁板长度的加大,由于积累效应的影响,延展量的问题在大型飞机壁板研制中越来越突出。延展量的精确计算与补偿修正技术已成为制约我国大型飞机研制的关键技术问题之一。

机翼壁板既是构成飞机气动外形的重要组成部分,同时也是主要承力构件,在飞机制造中一直处于关键地位^[1]。喷丸成形工艺是机翼下壁板的主要成形工艺方法^[2-3]。

波音公司(Boeing),洛克希德·马丁公司(Lockheed Martin),金属改进公司(Metal Improvement Company),空中客车公司(AirBus)在大型壁板喷丸成形方面能够做到较高的成形精度。曾元松等^[4]在 ARJ21 机翼壁板喷丸成形方面取得

了多项技术突破,杨永红等^[5]通过基础试验确定了壁板喷丸工艺参数,利用特征优化映射方法获得了壁板板坯几何模型,采用预应力方法提高了条带喷丸成形变形量。同时,国内外有众多学者在喷丸成形数值模拟方面也取得了大量的研究成果。弹丸打击模拟方面, Meguid 等^[6]首先研究了单个弹丸撞击过程的有限元模拟,然后提出了 4 弹丸的对称碰撞模型^[7]。随着计算技术的发展,模拟弹丸的个数在逐渐增加,从而可以模拟工艺参数对残余应力分布的影响规律。在等效载荷模拟方面,李源等^[8]根据喷丸过程的特点,分析了弹丸与工件之间的平均接触应力的变化规律,对喷丸过程的不同阶段进行划分,推导了

等效载荷的表达式。并采用静力等效的方法对阵列模型的残余应力进行了预测。曾元松^[9]通过对 Almen 试片施加等效热载荷进行数值模拟,建立了等效热载荷与喷丸成形各个参数之间的关系。胡凯征^[10]使用等效静态载荷温度场来模拟喷丸成形的变形过程,通过反复施加温度场来模拟喷丸强度,从而把一个复杂的动态冲撞过程近似地转化为一个静态加载过程。Wang.T^[11-14]基于温度法模拟研究了板件实际的喷丸变形。

目前,随着国内 ARJ 和大飞机的研制和应用,壁板喷丸成形的许多关键技术已逐步解决,但大尺寸机翼壁板在喷丸成形后产生的纵向延展问题,不仅其总长度不能满足要求,并且各个肋位也不符合要求。直接影响了后续机翼装配,无法满足无余量装配要求,需要通过多个 1:1 模拟试验件的实测数据总结其延展规律,进行板坯补偿修正,导致研制成本高、周期长这一急需解决的问题。

大型飞机机翼壁板的制造流程

如图 1 所示,首先根据 3D 设计数模,进行数模展开计算;其次根据展开料数模,进行板坯数控加工;而后进行喷丸成形,成形出符合要求的壁板后,进行自动铆接装配;最后进行翼盒的装配。整个过程需要较长的工艺准备和制造时间。

喷丸成形板坯延展量的主要影响因素

整体壁板的成形精度要求较

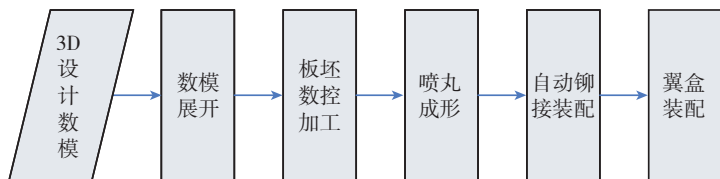


图1 大型飞机机翼壁板的制造流程示意图

高,关系到壁板的装配性能及装配后的力学性能,而壁板的成形精度主要包括壁板型面精度以及壁板的尺寸精度。导致壁板尺寸延展的因素非常多,主要有温度变化引起的板坯尺寸变化,板坯数控加工过程中的尺寸延展以及喷丸成形过程中的尺寸延展。

1 温度变化对板坯延展量的影响

由于壁板体积较大,而且壁板材料与空气的比热容不同,壁板板坯的升温降温比壁板所在环境的升降温较为迟缓,即壁板板坯和其所在环境温度也有差异,如图 2 所示。壁板多为变厚度板坯,厚度不同受温度影响也不同,板厚面积大的位置,壁板温度随环境温度变化慢,而板薄面积小的位置,变化快。因而其热胀现象导致的变形也比较复杂。

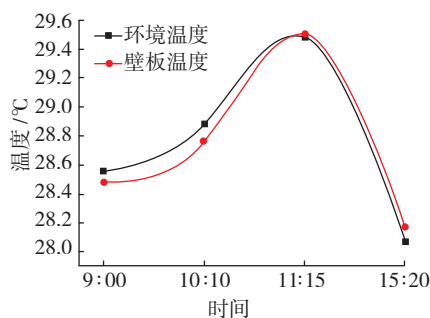


图2 壁板温度随环境温度的变化

由于材料的热胀冷缩,当壁板所在的环境温度发生变化时,其尺寸也会改变。以铝合金为例,其热膨胀系数为 $2.3 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,对 10m 长的板坯,温度升高 $10 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时板坯延展量可通过下式进行计算:

$$2.3 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 10\text{m} \times 10 \text{ } ^\circ\text{C} = 2.3 \times 10^{-3} \text{m}.$$

该部分延展量在整个板坯的延展量中所占比例较大,影响也较为

明显。

温度对壁板延展量的影响主要表现为以下方面:(1)机械加工、喷丸成形以及装配车间的环境温度有差异;(2)由于壁板从板坯加工到装机周期较长,有时可能跨越好几个季度,季度之间温度有差异;(3)由于壁板尺寸大、温度不均匀,一旦产生了塑性变形,就会出现不可逆的变形问题,即使随着环境温度的降低,壁板也不会回到升温前的形状。

2 数控加工对板坯延展量的影响

机翼壁板属于薄壁结构件,板坯自身刚度较差。在数控加工过程中板坯在切削残余应力的作用下,会产生翘曲和延展。而残余应力的产生是一个复杂的过程,包括刀具状态、切削参数、机床刚度及切削热等因素。

为了有效解决该问题,可在传统切削研究的基础上开展残余应力的测量与模拟研究。建立以试验为基础的等效模拟技术,在理论研究的基础上加大对实用性的研究开发力度。

3 喷丸成形及强化对板坯延展量的影响

喷丸成形是壁板成形的主要手段,也是壁板成形的关键环节。通过有效地设置喷丸轨迹和参数,并辅助以预应力弯曲,可以得到符合要求的壁板型面。成形过程主要以单面喷丸为主,以壁板型面为主要目标,而强化则多采用双面喷丸,以提高壁板的疲劳寿命为主要目的。这两个阶段都会导致壁板板坯的延展,但是延展形式不同,如图 3 所示。

对具体的壁板,不仅外型面存

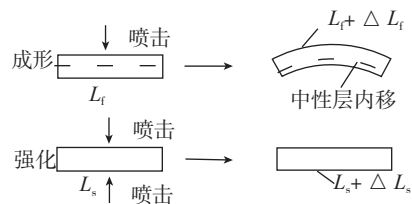


图3 成形和强化过程的板坯延展示意图

在展向和弦向曲率,而且其延着展向的包络面也存在着中性层的展向曲率,如图4所示。

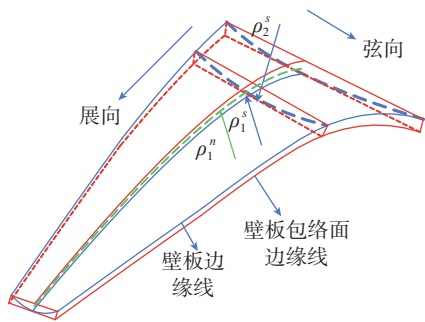


图4 壁板边缘线、包络线及一点的曲率半径示意图

图4中, ρ_1^s 为壁板外型面在展向的曲率半径, ρ_2^s 为弦向的曲率半径, ρ_1^n 为包络体中性层展向曲率半径。

壁板的延展有展向和弦向之分。由于弦向尺寸较小,延展量不明显;而展向尺寸大,延展量明显。

喷丸成形是导致壁板延展的主要因素,严重影响其装配性能,喷丸成形壁板的延展量不可忽视。

4 测量误差的影响

由于壁板尺寸较大,目前可用的测量喷丸成形板坯延展量的方法有激光测量、三坐标测量、样板测量和应变片测量。但是对于大壁板,上述测量方法均有其局限性,需要综合运用或开发新的壁板延展测量方法。

喷丸成形板坯延展量计算方法

由于影响壁板喷丸延展量的因素多、关系复杂,需要综合考虑才能建立较为准确的延展量计算方法。主要有解析计算、有限元分析和基于试验测量的计算3类方法。

1 解析计算

如图3、图4所示,喷丸成形时,受喷表层产生塑性变形,面积加大并带动内层的材料产生拉伸。当弹丸脱离板件的表面以后,材料发生弹性回复,表层和内层材料同时收

缩。但是,表层材料收缩后有永久伸长^[15],导致喷丸成形板料延展。板料受弹丸喷击后产生的塑性变形区深度计算公式已由英国曼彻斯特大学的 Al-Hassani 给出^[16]。

通过计算弹丸在板料表层形成的塑性变形层的深度以及残余应力大小,再结合板料厚度及零件的形状,通过弹塑性力学理论计算求得板料的喷丸后各处中性层位置,从而计算得到壁板的应变,再根据应变积分计算得到壁板的延展量,其主要计算过程如图5所示。

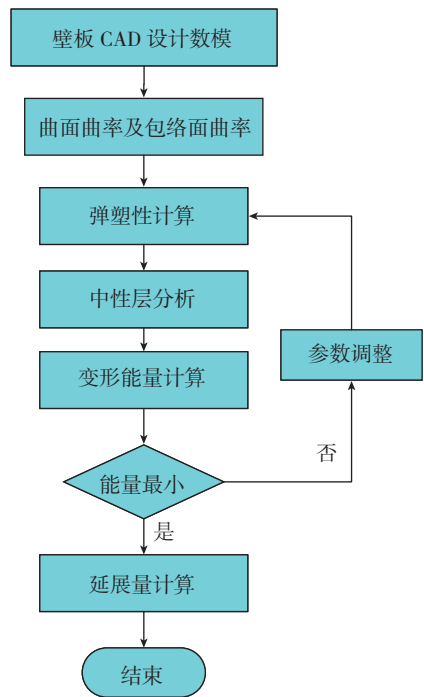


图5 解析计算过程

由于壁板结构复杂,喷丸成形过程复杂,解析计算的精度很难达到实用的要求,需要结合其他方法及实际经验进行修正。

2 有限元分析

喷丸成形数值模拟是一种建立在数值计算基础上的虚拟试验^[17],可以节省原材料、降低成本。

目前喷丸成形的数值模拟工作主要集中于残余应力的模拟,而针对喷丸成形延展量的模拟研究相对较少。

通过有限元模拟壁板喷丸延展量的过程图6所示。

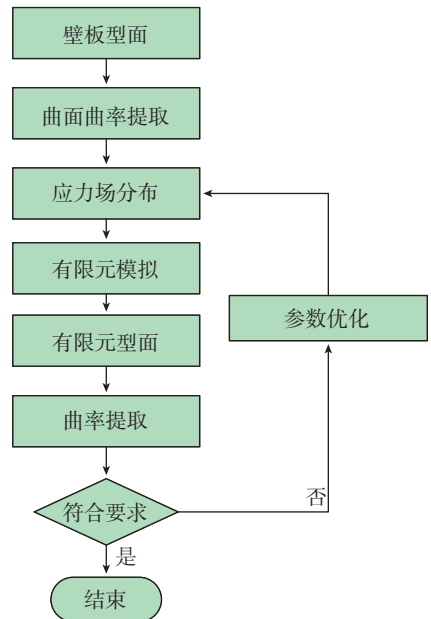


图6 喷丸成形延展量模拟过程

图7为采用应力等效的加载方式对喷丸成形进行数值模拟,模拟过程主要分为两个阶段。首先通过等效加载在板料表面诱导应力,该应力分布即等效为板料喷丸后在板料表面产生的残余应力;然后再通过释放约束来模拟板料变形。通过数据提取得到模拟结果的成形弧高、成形半径以及成形后的延展量。有限元加载等效应力可通过建立标准板的模拟与试验两者之间等效关系得到。

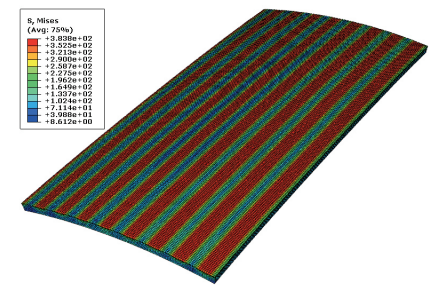


图7 喷丸成形数值模拟

3 试验测量

由于壁板尺寸大、弹性变形大、累积误差大,很难实现精确测量。传统的测量方法主要有激光测量、三坐

标测量、样板测量和应变片测量。

然而,传统的应变片测量在壁板喷丸成形延展量测量中也可应用,在壁板的指定位置使用应变片跟踪壁板的应变,再结合弹塑性理论和壁板的正面应变分布并计算出壁板的延展量。采用应变片测量方法需要做好以下几个方面。

(1) 测点分布。

测点数量和分布需要结合壁板的形状及曲率分布情况进行安排,太少则无法全面地反映壁板的应变分布,太多则工作量大,还会影响喷丸成形效果。

曲率大处变形大,因此应加大测点密度;厚度有明显变化处也应有测点分布;而曲率小的部分则可适当减少测点以提高试验效率。

(2) 测量方式选择。

由于喷丸成形工艺的特殊性,无法对壁板成形过程进行动态跟踪,常用的动态应变仪很难使用;另外壁板零件尺寸大,需要的测点较多,所有测点跨度较大,采用静态应变测量也非常困难,而采用机械式应变仪在该问题中有良好的应用。

(3) 测点保护措施。

测点贴上应变片后,喷丸成形过程中将随壁板进入喷丸成形设备,既不能让应变片受弹丸的直接喷击以免应变片被破坏,又必须让壁板的变形良好地传递到应变片上。可考虑采用小面积、多层、多种材质的保护膜进行应变片的隔离保护工作。

(4) 壁板温度测量。

如前文所述,温度对壁板延展量有较大的影响,故进行测量时必须记录壁板温度。目前大部分温度测量以壁板所在的环境温度为主,但由于壁板体积较大,较其所在环境温度变化迟缓,故应测量壁板板坯的实际温度。可采用实体温度测量设备对壁板板坯进行温度测量并与应变数据采集同时进行。

(5) 壁板厚度测量。

目前的飞机壁板多为变厚度壁板,而不同厚度下的延展量不同,可以采用超声测厚仪对壁板的厚度进行测量并与测点位置对应。

(6) 测量数据处理。

壁板喷丸延展量测量试验得到的数据主要有应变值、温度值和厚度值,需要结合弹塑性成形理论对其进行综合分析,并得到壁板的延展量。

目前,西北工业大学和西飞国际正在就壁板喷丸成形延展量的计算及补偿技术开展相关的研究工作,并首次采用应变片对 C919 机翼壁板的延展量进行跟踪测量,在壁板的正反面对应位置规划测点,采用机械式应变仪对喷丸过程的不同阶段的应变值进行采集,同时进行壁板厚度和壁板温度的测量,对壁板喷丸前后产生的应变进行分析,从而得出壁板喷丸延展量及温度因素产生的影响(图 8)。

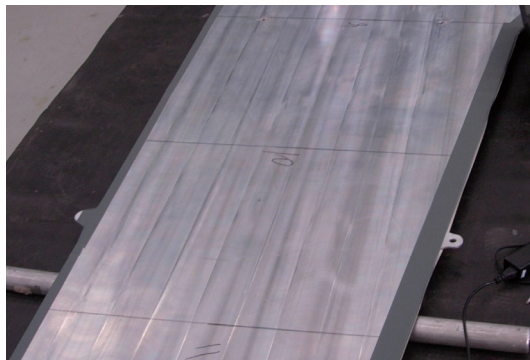


图8 机翼整体壁板

结束语

本文通过对数控加工、温度变化以及喷丸成形等壁板制造的各个阶段对壁板延展量的主要影响因素、计算方法及测量方法的论述,提出了壁板喷丸成形延展量计算的关键技术及解决途径,对提高大飞机壁板成形精度、缩短研制周期、降低研制成本具有重要意义。

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 - 飞机钣金工艺. 北京: 航空

工业出版社,1992.

[2] 曾元松,黄遐. 大型整体壁板成形技术. 航空学报,2008,29(3):721-727.

[3] 曾元松. 喷丸成形技术在民用飞机整体壁板研制中的应用. 航空制造技术,2008(1):54-55.

[4] 曾元松,尚建勤,许春林. ARJ21 飞机大型超临界机翼整体壁板喷丸成形技术. 航空制造技术,2007(3):38-41.

[5] 杨永红,张贤杰,王俊彪. 气动条带式喷丸成形技术. 航空制造技术,2008(2):91-93.

[6] Meguid S A, Shagal G, Stranart J C. Finite element modelling of shot-peening residual stresses. Journal of Materials Processing Technology,1999(92/93):401-404.

[7] Meguid S A, Shagal G, Stranart J C. Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses. Finite Elements in Analysis and Design,1999,31:179-191.

[8] 李源,雷丽萍,曾攀. 基于静力等效的喷丸工艺数值模拟. 塑性工程学报,2011,18(3):70-74.

[9] Zeng Y. Finite element simulation of shot peen forming. ICSP-8,2002:554-560.

[10] 胡凯征. 基于温度场的喷丸成形数值模拟及工艺参数优化[D]. 西安:西北工业大学,2006.

[11] Wang T,Platts M J.A computer-aided blank design method for the peen forming process. Journal of Materials Processing Technology,2002,122:374-380.

[12] Wang T, Platts M J, Levers A. Finite element impact modelling for shot peen forming. ICSP-8,2002:540-546.

[13] Wang T, Platts M J, Levers A. A process model for shot peen forming. Journal of Materials Processing Technology,2006,172(2):159-162.

[14] Wang T, Platts M J, Wu J. The optimisation of shot peen forming processes. Journal of Materials Processing Technology,2008,206(1/3):78-82.

[15] 李国祥. 喷丸成形. 北京:国防工业出版社,1982.

[16] Al-Hassani S T S. The shot peening of metals, mechanics and structure.SAE Paper,1982.821452.

[17] 张贤杰. 喷丸成形工艺参数优化计算研究[D]. 西安:西北工业大学,2008.

(责编 深蓝)