

气动条带式喷丸成形技术

Aerodynamic Banded Shot Peen Forming Technology

西 北 工 业 大 学 杨永红 张贤杰 王俊彪
西安飞机工业(集团)有限责任公司 许春林 乔明杰

[摘要] 提出气动条带式喷丸成形方法成形大型复杂型面机翼壁板,根据壁板外形曲面曲率和厚度分布,采用“整体分条,单条分区”的方法对壁板进行条带式喷丸成形。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。上述技术均在 ARJ21 大型超临界机翼壁板上获得了工程应用。

关键词: 喷丸成形 条带喷丸 机翼壁板

[ABSTRACT] A method of aerodynamic banded shot peen forming is proposed to form large wing skin panels with complex profile. The panel is integral subdividing into bands and subregions in band to carry out shot peen forming according to the contour curvature and thickness distribution. The shot peen forming parameters are determined by fundamental experiments with panel specimens, the geometric model of panel blank is obtained with optimized feature mapping method, and the shot peen forming deformation amount is increased with prestress method. The above-mentioned banded shot peen forming method is applied in the large supercritical wing skin panels of ARJ21.

Keywords: Shot peen forming Banded shot peen Wing skin panel

随着对民机速度和经济性等要求的提高,飞机设计已经从以往的直纹面翼型发展到复杂双曲率超临界翼型,因此传统的按直线抛丸的方法已不能满足大型超临界机翼壁板成形的要求。数控叶轮式抛丸设备所形成的热区为散射长方形形状,长度为 1m,有效长度约为 600mm,无法通过运动坐标的联动准确走出斜线或曲线形式的喷丸路径;而数控气动式喷丸机,喷嘴喷丸热区为直径在 $\phi 50\text{mm}$ 左右的圆形,喷嘴能够通过机床运动坐标联动包络形成各种形状的喷丸轨迹,从而能够适应复杂外形曲面机翼壁板成形的需要。Brian Harburn 和 John C Miller^[1]最早采用分区喷丸的方法成

形波音飞机壁板,但采用的是叶轮抛丸的方式。K P Hornauer 和 W Kohler^[2]在成形 ARIANE 5 H-155 低温推进剂燃料箱的球形舱盖时已初步运用了条带喷丸的思想。尚建勤等对条带喷丸中条带间隔对成形效果影响进行了研究^[3];康小明研究了窄条喷丸的数值模拟方法^[4]。本课题对条带喷丸成形问题进一步研究,提出了“整体分条,单条分区”的条带式喷丸成形方法,对机翼壁板气动条带式喷丸成形基础试验、板坯计算建模、喷丸路径规划、预应力喷丸成形以及气动条带式喷丸在 ARJ21 超临界壁板成形上的应用进行了研究。

1 气动条带式喷丸成形基础试验

喷丸机床的结构差异以及不同喷嘴、不同弹丸等因素都会影响喷丸成形效果,因此,需对喷丸机进行成形基础试验,以确定喷丸条带的有效宽度和单元试验件成形规律,为确定壁板喷丸成形的工艺参数提供依据。

1.1 喷丸条带有效宽度

采用条带喷丸时,条带有效宽度同样受各种工艺参数的影响。使用单个喷嘴进行条带喷丸成形时,影响喷丸条带有效宽度的主要因素有喷嘴直径、弹丸流量、喷丸距离、喷射角度、喷丸气压及弹丸规格等。

为揭示弹丸流量、喷丸距离、喷丸气压及弹丸规格等因素对条带喷丸有效宽度的影响,需进行组合试验。本研究采用规范化正交表进行试验方案规划,其特点是:每个因素的水平出现次数相同;任意两个因素水平的不同搭配出现次数相同;可以通过较少次数的试验发现不同因素对试验结果的影响程度和不同因素的最优组合^[5]。

试验中采用喷丸强度来评价有效宽度,具体作法是按某一饱和曲线上 100%覆盖率的喷丸参数喷丸一组紧密排布的 Almen 试片,通过测量 Almen 试片的喷丸强度,将公差范围在 $\pm 0.038\text{mm}$ 以内的 Almen 试片形成的区域视为等强度区,在此区域内的所有试片宽度及间距之和称为喷丸条带有效宽度,所用工具如图 1 所示。这样确定的喷丸条带有效宽度不但有利于后续

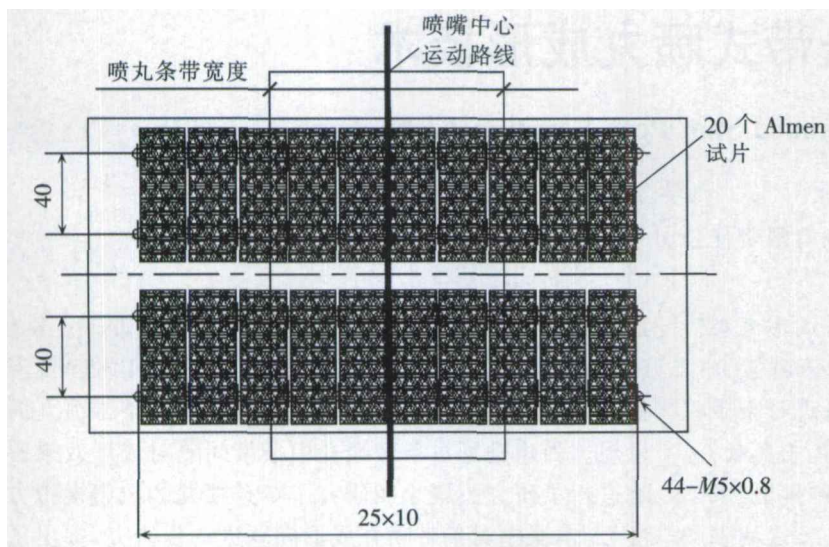


图1 确定条带有效宽度的工具

Fig.1 Tool for insuring available band width

大型壁板喷丸路径间距的确定，而且如果将多个喷嘴按相邻中心距与所测有效宽度相等的方法排布就可成倍扩大一次喷丸的有效宽度，发挥机床多个喷嘴的作用，提高条带喷丸成形的效率。

表1所示为在弹丸流量、喷射气压和弹丸规格不变时采用不同喷丸距离测定单喷嘴喷丸条带有效宽度的试验结果。

表1 不同喷丸距离下条带的有效宽度*

喷射距离/mm	100	300	500	700
有效宽度/mm	28	50	75	90

* 试验条件:弹丸 ASH460,喷射气压 0.30MPa,弹丸流量 12 kg/min。

试验时，首先利用标准 Almen 试片建立饱和曲线，确定喷丸强度和机床各工艺参数之间的关系，并用等强度方法确定喷丸条带的有效宽度，得出影响条带宽度的主要因素。表1中试验数据表明，影响条带有效宽度的显著因素是喷丸距离，而弹丸流量、喷射气压和弹丸规格对条带宽度影响很小。

1.2 单元件试验

单元件试验的主要目的是建立喷丸强度与特定材料单元件厚度、成形曲率的关系，为设计大型壁板喷丸成形工艺参数提供基本参考数据。

机翼壁板厚度一般在2~17mm之间，壁板内表面带有各种孔、长桁对接凸台等加强结构，在成形工艺参

数设计中全面考虑外形曲率和厚度将会使喷丸成形工艺设计变得十分复杂。本研究中将壁板按照“曲率半径为主，厚度为辅”的方法分成若干区域，同一区域内的喷丸强度相同。

依据 ARJ21 飞机外翼上下翼面壁板选材和厚度分布情况，条带喷丸成形基础试验板件材料分别选取 7055T7751 和 2324T39 两种规格，厚度分别选取了 2、4、6、8、10 和 12mm 等 6 种规格。按照双曲率壁板喷丸成形的需要分别进行了单面弯曲喷丸试验和双面延展喷丸试验。对试验件进行编号，设计制造专用曲率仪和标准对照块进行试验数据采集，试验采用的基本思路为反复迭代法。试验步骤为：

(1)单元试验件编号后，用游标卡尺测量试件厚度，精确到 0.02mm；

(2)在 300mm×200mm 的等厚试板上，划出宽度中心线和长度四等分线；

(3)按与选定喷丸强度对应的喷丸工艺参数和机床速度 v ，沿宽度中心线使用单个喷嘴进行条带喷丸；

(4)在试件长度三等分线和两端共 4 个位置用弧高仪分别测量挠度；

(5)在测量完的试板上沿长度方向分别划出与两个宽度边沿距离为 50mm 的两条平行线，作为下两个条带喷丸的路径；

(6)以划出的两条线为条带中心线使用单个喷嘴按相同喷丸条件分别进行两次条带喷丸。在第一次喷丸后，用弧高仪分别在长度三等分线和两端共 4 个位置测量试板上两个喷丸条带有效宽度范围内的弧高值；在第二次喷丸后，用弧高仪在同样位置测量试板上三个喷丸条带有效宽度范围内的弧高值。

2 板坯计算建模与喷丸路径规划技术

壁板板坯计算建模与喷丸路径规划是影响壁板制造周期及喷丸成形质量的两个重要工艺问题。板坯模型是平面壁板加工的依据，超临界翼型曲面是一种不可展曲面，需根据喷丸变形特点对平面板坯形状与结构进行优化。研究中采用了基于特征优化映射的壁板板坯计算与建模方法^[9]，得到了 ARJ21 壁板平面板坯几何模型。经试验验证，采用该方法计算得到的板坯成形后可直接装机，无需修配。

喷丸路径是喷丸成形的重要参数之一,准确的喷丸路径有利于壁板的成形,不良的喷丸路径会对壁板成形带来负面影响,甚至无法成形出壁板形状。研究中采用了基于极小曲率等值线的方法来设计超临界翼型壁板弦向喷丸路径。成形试验表明,结合放料喷丸以及一定的手提喷丸校形,可以成形出复杂外形壁板。

3 预应力条带喷丸成形

预应力喷丸成形是指在预应力夹具上对板件进行预先弹性弯曲,然后在板件的受拉表面进行喷丸的成形方法。试验表明,预应力喷丸可以有效地提高喷丸成形极限。ARJ21 飞机下翼面壁板厚度尺寸较大且分布不均匀,不施加预应力时,成形困难;施加预应力后,至少可使成形曲率增大 30%。研究中设计了柔性预应力夹具以适应不同尺寸、不同外形壁板喷丸成形施加预应力的需要。

4 应用情况

本研究提出的气压式条带喷丸成形技术在 ARJ21 大型超临界机翼壁板成形中的应用大致可分以下 3 个部分:(1)通过几何分析和相关计算规划喷丸路径,并得到各主要结构点上的曲率和厚度分布;(2)按条带喷丸成形基础试验数据将壁板分成若干等强度区,并确定不同区域内的初始喷丸参数;(3)按设置的初始喷丸参数首先进行最具有外形特征的局部模拟件喷丸成形试验,根据试验结果,进一步优化和改进喷丸路径和工艺参数,最后进行 1:1 全尺寸试验件喷丸成形试验。

ARJ21 飞机外翼上翼面壁板由上后壁板和上前壁板构成,材料均为 7055T7751,壁板厚度较薄,曲率变化较平缓,在自由状态下采用条带喷丸成形方法完成了成形。

ARJ21 飞机下翼面由前、中和后 3 块壁板组成,材料为 2324T39,壁板较厚,曲率变化剧烈,为提高成形能力,采用预应力夹具使壁板在弹性范围内的预弯状态下进行条带喷丸成形,获得了满足要求的壁板外形。

5 结束语

试验研究了大型壁板气动条带式数控喷丸成形技术,对大型复杂型机翼壁板提出“整体分条,单条分区”的条带式喷丸成形工艺方法,并将其应用于 ARJ21 大型超临界机翼壁板成形。成形试验和生产应用表明,气动条带式喷丸成形方法能够成形复杂型面机翼壁板。

参 考 文 献

- [1] Harburn B, Miller J C. Shot peen forming of compound contours: US, 4329862[P]. 1982.
- [2] Hornauer K P, Kohler W. Development of the peen forming process for spherical shaped components. Proceedings of the Fourth International Conference on Shot Peening, 1990: 585-594.
- [3] 尚建勤,刘学明,王超,等. 喷丸条带间隔对喷丸成形影响的试验研究. 航空制造技术, 2001(3): 44-46.
- [4] 康小明. 窄条喷丸成形的数值模拟. 航空学报, 2002, 23(1): 94-96.
- [5] 栾军. 现代试验设计优化方法. 上海: 上海交通大学出版社, 1995.
- [6] 张贤杰, 王俊彪, 王关峰. 基于特征映射的超临界机翼整体壁板坯快速建模技术研究. 机械科学与技术, 2006, 25(10): 1 209-1 211.

(责编 钟元)

(上接第 85 页)

3 结束语

在 5-UPS/PRPU 概念机模型的基础上,建立了其虚拟样机。由于样机采用真实尺寸进行实体建模,因此基于该样机模型,可非常方便地进行样机的设计优化工作。在并联机床虚拟样机的设计中,通常要进行较多的装配干涉检查和设计修改,故建议采用具备参数化功能的造型设计软件,同时还需要注意与工程分析建模设计环境之间具有直接的接口,以便于模型数据的直接转换,避免因间接转换可能造成的数据错误。

参 考 文 献

- [1] 汪劲松,李铁民,段广洪. 并联构型装备的研究进展及若干关键技术. 中国工程科学, 2002, 4(6): 63-70.
- [2] 周凯. 虚拟轴数控机床的虚实映射联动控制. 中国机械工程, 1998, 9(3): 16-18.
- [3] Romdhane L. Design and analysis of a hybrid serial-parallel manipulator. Mechanism and Machine Theory, 1999(34): 1 037-1 055.
- [4] Neugebauer R, Schwaar M, Ihlenfeldt S. New approaches to machine structures to overcome the limits of classical parallel structures. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51(1): 293-296.
- [5] 韩海生,黄田,周立,等. 虚拟环境下并联机床建模与仿真. 制造技术与机床, 2000(1): 19-20.
- [6] 冯培锋,陈扼西,江化娜,等. 基于 Pro/E 的 6-HTS 并联机床虚拟样机参数化实体建模. 工程图学学报, 2004(3): 130-33.

(责编 孟十)