

大型飞机整体壁板喷丸成形延展变形分析

彭艳敏¹, 陈金平¹, 杨亮¹, 王永军²

(1. 中航飞机股份有限公司西安飞机分公司, 西安 710089;

2. 西北工业大学机电学院, 西安 710072)

[摘要] 针对基于喷丸成形的大型飞机机翼整体壁板延展变形问题, 从影响整体壁板喷丸延展变形的因素出发, 通过对整体壁板喷丸成形展向应变的理论计算和实测延展数据对比, 得出整体壁板喷丸成形加工环节的延展变形规律。

关键词: 整体壁板; 喷丸成形; 延展变形; 残余应力

Study on Elongation After Shot Peen Forming for Integral Panel of Large Aircraft

PENG Yanmin¹, CHEN Jinping¹, YANG Liang¹, WANG Yongjun²

(1. AVIC Xi'an Aircraft Branch, Xi'an 710089, China;

2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] Aiming at the elongation problem of the integral panel of large aircraft based on shot peen forming, this article from the factors influencing the integral panel elongation deformation in shot peen forming, through the comparison of theoretical calculation of wingspan shot peen forming strain and experimental data of elongation deformation, elongation law of integral panel in shot peen forming is concluded.

Keywords: Integral panel; Shot peen forming; Extension deformation; Residual stress

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.09.097

大型整体壁板结构件的制造水平已经成为现代先进民用飞机设计制造领域的一个重要标志, 针对这种具有复杂外形和结构的整体壁板零件的成形技术就成为现代先进飞机的关键制造技术之一^[1]。

目前, 国内飞豹、枭龙、歼 10、ARJ21、C919 等飞机机翼整体壁板均采用喷丸成形加工工艺^[2]。喷丸成形是利用高速金属弹丸撞击金属板材的表面, 使受撞击的表面及其下一层金属产生塑性变形而延伸, 从而引起受喷表面的面积加大带动内层材料拉伸, 逐步使板材达到要求外形的一种成形方法^[2-5], 图 1 为喷丸成形原理示意图。

1 整体壁板喷丸成形工艺的特点

喷丸成形技术是 20 世纪 50 年代初伴随着飞机整体壁板的应用, 在喷丸工艺的基础上发展起来的一项有发展前景的工艺方法, 它是飞机制造中成形整体壁板和整体厚蒙皮零件的主要方法之一。

一方面, 整体壁板加工目前最常用的流程是先通过三维 CAD 工程软件将壁板三维数模进行展开计算, 建

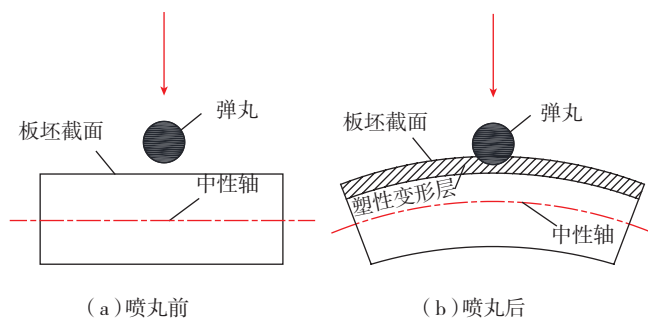


图1 喷丸成形原理

Fig.1 Principle of shot peen forming

立整体壁板板坯工艺模型, 然后通过 NC 数控机床加工出整体壁板实物板坯, 最后采用喷丸成形工艺将其成形至飞机气动要求所规定的外形形状^[6]。图 2 为大型飞机机翼整体壁板的制造流程示意图, 与传统的直接采用五坐标数控机床进行加工的方法相比, 此方法板坯数控加工三坐标数控机床即可满足要求, 并且切削量相对较小, 节约成本; 另外喷丸成形过程中的强化工艺, 可使整体壁板类零件的抗疲劳特性得到提高^[6]。

另一方面,整体壁板喷丸成形,是将整体壁板板坯工艺2D模型转化为真实3D零件的过程。因为整体壁板制造环节中会产生永久变形,既有弹性变形,又有塑性变形。大量弹丸在板料表面上产生无数凹坑,压痕之间相互重叠,便可以使一定深度的表层材料产生延伸,从而引起受喷表面积加大,使金属板料产生弯曲变形。另外,因喷丸工艺过程存在反复的试喷和人工校形的现象,喷丸成形后壁板沿展向和弦向存在不同程度的延展变形,进而导致壁板的尺寸发生变化,使得加工出来的壁板超差。板坯的切削加工、喷丸现场温度、喷丸参数和成形工艺等多方面因素,以及材料内部残余应力分布状态的影响,导致壁板在喷丸成形工艺环节的变形范围大,难以有效控制。图3为喷丸成形过程的壁板板坯延展示意图。

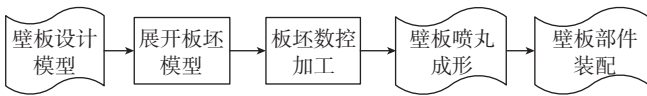


图2 整体壁板制造流程图

Fig.2 Flow chart of integral panel manufacture

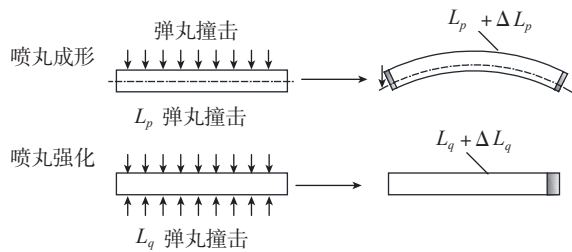


图3 喷丸成形板坯延展

Fig.3 Panel elongation of shot peened forming

随着机翼翼型的复杂化以及整体壁板几何尺寸的加大,壁板加工存在延展积累效应的影响,喷丸延展的问题成为大型飞机壁板研制中的瓶颈问题^[7-8]。整体壁板加工过程延展变形量的精确计算与板坯补偿修正技术已成为我国大型飞机研制首要解决的关键技术难题,其对机翼制造以及整机的研制都起着决定性的作用。

对于整体壁板喷丸成形延展变形量补偿方法, Douglas Moore^[9]在《喷丸成形技术在民用飞机机翼壁板中的应用》一文中提及到喷丸成形过程中会产生壁板延展变形,使得壁板长度增长,在15m的范围内存在6mm左右的延展变形。西北工业大学王永军等^[7]针对整体壁板制造环节的不同阶段,数控加工因素、环境温度变化以及喷丸成形等对壁板延展量的主要影响因素、计算方法及分析测量方法进行阐述,提出了壁板喷丸成形延展量计算的关键技术及解决方案。西北工业大学陈龙辉采^[10]用有限元等效模拟的方法,模拟分析了某个大型壁板在喷丸成形过程的延展规律,为补偿修正提供了

有价值的参考。中航飞机股份有限公司西安飞机分公司从2005年开始在研制新支线ARJ21飞机和大型客机C919等型号的机翼整体壁板时,引入喷丸成形工艺方法,并成立专业攻坚团队,通过喷丸成形后的延展数据,成功修正机翼弦向延展误差,取得较好的装机效果。

2 整体壁板喷丸成形延展理论计算

壁板喷丸成形后存在沿展向和沿弦向两个方向的延展变形,而喷丸成形后的延展数据表明:沿展向的延展变形是弦向的数倍,弦向延展变形在壁板加工误差范围之内,符合整体壁板加工公差要求,因此,本文仅讨论沿展向的应变。假设沿翼展方向的应变为 $\Delta\varepsilon$,塑性变形层深度为 Δt ,塑形变形层面积为 A_{out} ,单位截面的残余应力层面积为 A_{in} ,壁板截面之间的单位长度 L_i ,截面零件平均厚度 t ,截面零件平均宽度 b ,如图4所示。

$$\Delta\varepsilon = \sum \frac{A_{out}\sigma_s}{A_{in}E} \times L_i \quad (1)$$

式中, $A_{in}=t \cdot b$, $A_{out}=2\Delta t \cdot b$,因此,

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon &= \sum \frac{A_{out}\sigma_s}{A_{in}E} \times L_i = \sum \frac{2\Delta t \cdot b \cdot \sigma_s}{tb \cdot E} \times L_i \\ &= \sum \frac{2\Delta t \cdot \sigma_s}{t \cdot E} \times L_i \end{aligned} \quad (2)$$

取塑性变形层深度 $\Delta t=0.2\sim 0.4\text{mm}$,喷丸残余应力为 $\sigma_s=200\sim 260\text{MPa}$,弹性模量 $E=72000\text{MPa}$,通过式(2)得出整体壁板喷丸成形延展理论变形量,如表1所示。图5为喷丸成形延展变形量趋势图。

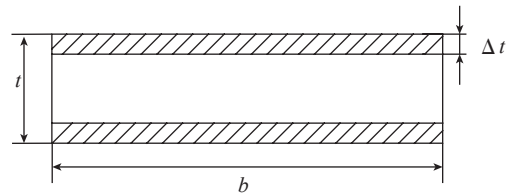


图4 截面参数说明

Fig.4 Parameters of cross section

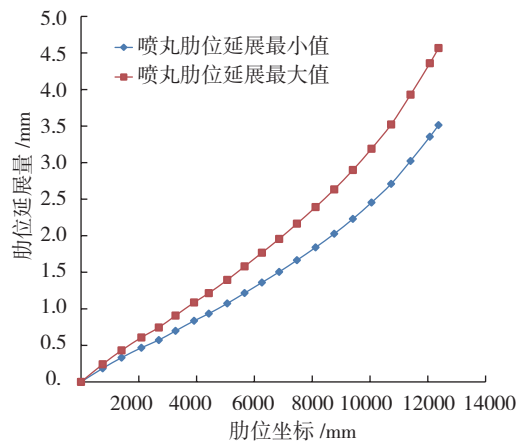


图5 喷丸成形延展理论变形量趋势图

Fig.5 Elongation deformation trend chart of shot peened forming

表1 整体壁板喷丸成形延展理论变形量部分数据

mm

肋位	肋坐标	肋位平均厚度	肋位间距	肋位间最小变形量	肋位间最大变形量	喷丸最小延展量	喷丸最大延展量
1#	—	—	—	0	0	0	0
2#	749.585	8.981	749.585	0.185	0.241	0.185	0.241
3#	1402.611	9.947	653.027	0.146	0.190	0.331	0.431
4#	2089.134	11.202	686.523	0.136	0.177	0.468	0.608
5#	2692.720	12.759	603.586	0.105	0.137	0.573	0.744
6#	3269.796	10.256	577.076	0.125	0.163	0.698	0.907
7#	3913.660	10.358	643.864	0.138	0.180	0.836	1.087
8#	4421.468	11.496	507.808	0.098	0.128	0.934	1.214
9#	5061.840	10.194	640.372	0.140	0.181	1.074	1.396
10#	5662.107	9.385	600.267	0.142	0.185	1.216	1.581
11#	6262.301	9.254	600.194	0.144	0.187	1.360	1.768
12#	6857.367	9.123	595.066	0.145	0.188	1.505	1.956
13#	7472.380	8.540	615.013	0.160	0.208	1.665	2.164
14#	8117.377	8.186	644.998	0.175	0.228	1.840	2.392
15#	8762.374	7.694	644.997	0.186	0.242	2.026	2.634
16#	9407.370	7.044	644.996	0.203	0.265	2.230	2.899
17#	10052.365	6.394	644.996	0.224	0.291	2.454	3.190
18#	10732.358	5.915	679.993	0.255	0.332	2.709	3.522
19#	11402.349	4.752	669.991	0.313	0.407	3.023	3.930
20#	12072.326	4.501	669.977	0.331	0.430	3.354	4.360
21#	12370.384	4.150	298.058	0.160	0.207	3.513	4.567

3 整体壁板喷丸成形延展试验验证

整体壁板喷丸成形完后,水平放置在检验型架构架样板工装上,测量标定点的坐标值,对比产品数模,得到喷丸延展变形量。图6为整体壁板检验型架构架样板工装示意图。

整体壁板喷丸成形延展变形试验条件:

(1)测量对象:整体壁板喷丸成形完成后将放置在检验样板工装。

(2)测量设备:激光跟踪仪。

(3)测量方法:利用整体壁板翼根部、最远端的两个定位耳片孔在检验型架构架样板工装上定位,用沙袋压平整体壁板,保证与检验型架构架样板工装外形检测

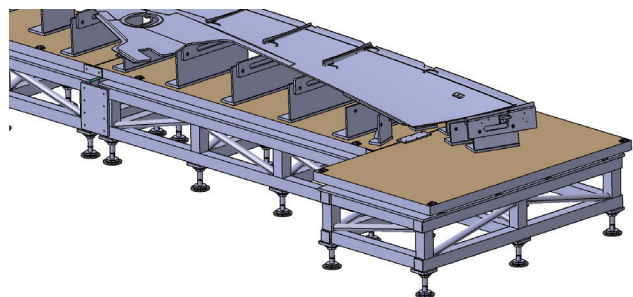


图6 整体壁板喷丸成形检验工装

Fig.6 Inspection tooling of integral panel by shot peen forming

面贴合。

(4)测量内容:整体壁板喷丸成形肋位置坐标值、外形线坐标值、测量环境(温度、湿度)等。

将经整理的壁板的测量数据(如表2)和整体壁板部分测量数据导入工装坐标系,计算肋位处延展变形量,图7为整体壁板肋位处延展数据。

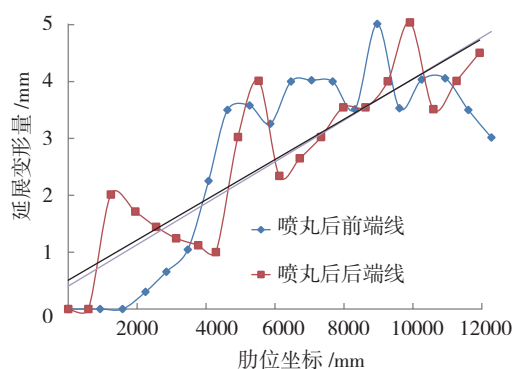


图7 整体壁板喷丸成形实测延展趋势图

Fig.7 Elongation deformation trend chart of integral panel by shot peen forming

4 结论

通过对整体壁板喷丸成形翼展方向应变的理论计算数据和成形后实测延展数据对比,除因测量方法和人为因素导致数据个别肋位测量数据偏差较大以外,理论

表2 整体壁板喷丸成形激光测量数据

mm

肋位	理论肋位距离		喷丸后测量肋位距离		喷丸后延展量	
	前端线	后端线	前端线	后端线	前端线	后端线
1#	—	—	—	—	—	—
2#	925.0498	585.196	925.0498	585.2	0	0
3#	1577.625	1239.17	1577.625	1241.2	0	2.015
4#	2243.823	1946.61	2244.124	1948.3	0.301	1.714
5#	2849.774	2550.83	2850.43	2552.3	0.656	1.445
6#	3469.592	3132.16	3470.637	3133.4	1.045	1.245
7#	4073.082	3770.26	4075.336	3771.4	2.254	1.121
8#	4621.421	4283.77	4624.923	4284.8	3.502	1.001
9#	4621.421	4283.77	4624.923	4284.8	3.502	1.001
10#	5262.241	4924.32	5265.82	4927.3	3.579	3.025
11#	5863.016	5524.67	5866.275	5528.7	3.259	4.014
12#	6463.675	6124.91	6467.677	6127.2	4.002	2.341
13#	7059.188	6720.03	7063.211	6722.7	4.023	2.651
14#	7674.66	7335.11	7678.661	7338.1	4.001	3.025
15#	8320.144	7980.19	8323.658	7983.7	3.514	3.547
16#	8965.627	8625.26	8970.641	8628.8	5.014	3.547
17#	9611.109	9270.33	9614.641	9274.3	3.532	4.006
18#	10256.59	9915.41	10260.62	9920.4	4.035	5.041
19#	10937.08	10595.5	10941.14	10599	4.058	3.515
20#	11607.57	11265.6	11611.07	11270	3.501	4.012
21#	12278.03	11935.6	12281.05	11940	3.017	4.507

注:测量状态为喷丸成形后,测量温度 18.1℃,测量相对湿度 47.9%。

计算的数据与实测值趋势基本吻合。可以得出整体壁板喷丸成形的延展变形的基本规律,其理论计算方法可以运用在喷丸成形前的整体壁板展开环节,增加延展量预修正补偿,对降低喷丸成形后延展变形有一定的实际参考意义。对于类似整体壁板喷丸成形的研究起到了很好的借鉴作用,提高了壁板类零件的质量和批量生产能力。特别是对飞机整体壁板类的大型壁板的加工,降低延展变形的不确定性,缩短壁板研制周期和降低成本,具有一定的指导意义。

参考文献

[1] 曾元松,黄遐.大型整体壁板成形技术[J].航空学报,2008,29(3):721-727.
 ZENG Yuansong, HUANG Xia. Forming technologies of large integral panel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3):721-727.
 [2] 尚建勤,曾元松.喷丸成形技术及未来发展与思考[J].航空制造技术,2010(16):27-29.
 SHANG Jianqin, ZENG Yuansong. Shot forming technology and its development trend and thinking[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(16):27-29.
 [3] 王明涛,曾元松,黄遐.大尺寸弹丸喷丸成形 2024-T351 铝合金表面质量研究[J].航空制造技术,2012(5):92-94.
 WANG Mingtao, ZENG Yuansong, HUANG Xia. Research on surface

quality of 2024-T351 aluminum alloy by shot peen forming with large ball[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(5):92-94.

[4] BHUVARAGHAN B, SRINIVASAN S M, MAFFEO B, et al. Shot peening simulation using discrete and finite element methods[J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41(12):1266-1276.

[5] MEGUID S A, SHAGAL G, STRANART J C, et al. Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1999, 31(3):179-191.

[6] 陈金平,党建卫.大型双曲率高筋整体壁板展开关键问题分析[J].航空制造技术,2015(1):64-65.

CHEN Jinping, DANG Jianwei. Analysis of key problems during spread-modeling on large dual-curvature integral panel with high ribs[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(1):64-65.

[7] 王永军,陈龙辉,乔明杰,等.大型客机机翼壁板喷丸成形延展问题研究与分析[J].航空制造技术,2012(17):32-35.

WANG Yongjun, CHEN Longhui, QIAO Mingjie, et al. Study on elongation after shot-peen forming for integral panel of large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(17):32-35.

[8] 杜建钧,周建忠,张兴权,等.金属板料的机械喷丸成形与激光喷丸成形技术[J].电加工与模具,2006(1):4-8.

DU Jianjun, ZHOU Jianzhong, ZHANG Xingquan, et al. Shot peen forming and laser peen forming technologies of sheet metal[J]. Electromachining & Mould, 2006(1):4-8.

(下转第105页)