



现代航空科技学术专著

AVIATION
TECHNICAL BASES
SCIENCE



现代飞机机翼壁板数字化喷丸成形技术

杨永红 吴建军 乔明杰 著

西北工业大学出版社

西北工业大学现代国防科技学术文库

现代飞机机翼壁板 数字化喷丸成形技术

杨永红 吴建军 乔明杰 著



西北工业大学出版社

【内容简介】 本书系统地阐述了现代飞机机翼壁板数字化喷丸成形技术与实际应用。全书共分5章,内容包括绪论、现代飞机机翼壁板板坯制备技术、现代喷丸成形设备及其性能试验设计、现代飞机机翼壁板数字化喷丸成形工艺设计以及现代飞机机翼壁板外形数字化检测技术。

本书是为从事飞行器制造的工程技术人员、科学研究人员编写的,同时也适用于大专院校有关专业的教学。

图书在版编目(CIP)数据

现代飞机机翼壁板数字化喷丸成形技术/杨永红,吴建军,乔明杰著. —西安:西北工业大学出版社,2012.8

ISBN 978-7-5612-3443-3

I. ①现… II. ①杨…②吴…③乔… III. ①机翼—飞机壁板—数字化—表面精整—喷丸 IV. ①V224

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 203077 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:www.nwpup.com

印刷者:陕西向阳印务有限公司

开本:787 mm×960 mm 1/16

印张:15.5

字数:196 千字

版次:2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

定价:48.00 元

序 一

技术创新不仅是企业生存与发展的内在需求,也是企业提升竞争力,树立品牌价值,获得持续快速发展的关键所在。随着改革发展的不断推进,中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司正面临关键战略转型期。如何提升企业核心竞争力,更好地融入世界航空产业链,不仅是技术创新需要研究和解决的重要课题,也是企业赋予技术从业人员和各级管理者的重要使命和任务。

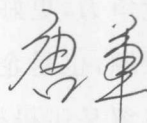
机翼是飞机机体制造的关键,突出“机翼制造”特色是中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司的发展战略。而与机翼相关的壁板喷丸成形技术长期被国外垄断并对我国封锁,是制约国内民机发展的关键瓶颈之一。国外以波音和空客为代表的现代民用飞机机翼壁板均采用喷丸成形技术,而我国自主研发的新支线客机机翼也采用先进超临界翼型,因此快速发展和提升现代大型机翼壁板喷丸成形技术成为提高国内航空制造技术水平的关键之一。

机翼壁板喷丸成形技术是一项复杂的系统工程,它不仅涉及数模展开、数控加工、喷丸工艺和外形检测等工艺过程,而且每个过程又包括策划、研究、试验和生产等诸多环节。中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司从20世纪60年代初期就开始对喷丸成形技术进行试验研究,至今已历经几代人的不懈耕耘、勇于创新、集智攻关,累积了丰富的经验和知识,并先后在Y7系列、飞豹系列、MA系列及ARJ21飞机等多个型号中获得应用,形成了具有自主知识产权、特色鲜明、科学系统的工艺技术体系,成为世界上掌握此项技术的

II 现代飞机机翼壁板数字化喷丸成形技术

几个少数公司之一,有效地提升了企业的核心竞争力。

作为技术创新的主体,中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司通过产学研结合模式攻克了以 ARJ21 飞机为代表的现代飞机机翼壁板数控喷丸成形技术。《现代飞机机翼壁板数字化喷丸成形技术》一书是航空制造行业持续推进技术创新的一个典范,它凝聚了研究团队的心血,该书的出版填补了我国在大型超临界机翼整体壁板数控喷丸成形技术方面的空白,展示了中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司的大中型民用飞机机翼壁板工程化制造能力,以及其形成的技术研究体系也为我国大飞机研制提供了重要的技术保障。



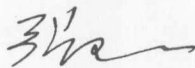
2012 年 4 月

唐军 中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司总经理。

序 二

随着对民机舒适性、经济性要求的不断提高,现代民用飞机机翼已经从传统直纹面发展到了复杂双曲率超临界翼型,对现有机翼整体壁板制造的技术要求提出了严峻的挑战。

《现代飞机机翼壁板数字化喷丸成形技术》一书围绕以新支线飞机为代表的现代先进民用飞机机翼整体壁板制造流程,以大量系统性工艺试验为基础,结合技术改造,以生产实际应用为牵引,通过在理论计算和技术提升上的创新和突破,对现代民用飞机机翼整体壁板数模展开、数控加工、数控喷丸成形及相关专用工装设计制造等关键技术进行了深入分析和讨论,重点论述了机翼壁板板坯制备技术、现代喷丸成形设备及其性能试验设计、现代飞机机翼壁板数字化喷丸成形工艺设计以及现代机翼壁板外形数字化检测技术等内容。全书内容翔实深入,理论与实践并重,反映了研究工作所取得的重要成果以及所具备的大中型民用飞机机翼整体壁板工程化制造能力。此外,该书发挥产、学、研各方优势,采用理论与实际相结合的研究思路,特色显著,是科研与工程人员的一本有益的参考书籍。



2012 年 4 月

前 言

喷丸是采用大量金属、玻璃或者陶瓷制球形弹丸高速喷射金属材料表面的一种金属表面冷加工过程。喷丸的打击作用可以提高金属的疲劳强度和抗腐蚀应力,这就是比较常见的喷丸强化。当对金属板料进行喷丸时,可以发现除强化功能外板料会发生弯曲,基于此在 20 世纪 50 年代产生了喷丸工艺的另一个重要应用——喷丸成形(peen forming)。

喷丸成形技术具有生产效率高、适用范围广等显著优势,成形出的壁板表现出了优异的服役性能,因此喷丸成形已成为许多支线飞机及波音、空客等大型干线飞机机翼壁板成形的首选方法。但由于成形机理的复杂性以及成形过程中诸多因素的影响,喷丸成形工艺参数的选择在较大程度上仍然依靠大量试验和操作经验,耗时耗资。飞机机翼壁板喷丸成形技术长期以来一直是制约国内大型飞机研制的关键制造技术,如何将目前在较大程度上依靠试验和经验进行的喷丸成形工艺发展为一套具有柔性化和智能化的数字化喷丸成形技术一直是国内同行们共同努力的方向。

“十一五”期间,中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司联合国内有关科研院所在国家科技支撑计划等项目的支持下,对现代飞机机翼壁板喷丸成形关键技术进行了系统深入的研究和工程应用,取得了大量的研究成果。因此,对其中的工艺与技术进行系统的总结、提炼和推广,对于推动我国现代

飞机机翼壁板喷丸成形技术的进一步发展具有重要意义。

目前,国内有关在大中型飞机机翼壁板数控喷丸成形技术方面的论著甚少。本书重点论述了机翼壁板板坯制备技术、数控喷丸成形设备及其性能试验设计、现代飞机机翼壁板数字化喷丸成形工艺设计以及现代飞机机翼壁板外形数字化检测技术等内容。在论述中基本概念与工艺并重,以利于在生产 and 科研实践中能具体应用。

本书由杨永红、吴建军和乔明杰编写,由中航工业飞机公司何胜强总工程师审定。此外,在编写中还参阅了有关文献和资料,在此一并谨致诚挚的谢意。

本书是为从事飞行器制造的工程技术人员、科学研究人员编写的,同时也适用于大专院校有关专业的教学。

由于水平有限,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正。

著 者

2011 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 机翼壁板成形在全机研制中的地位	2
1.3 壁板几何特征分析	3
1.4 新型喷丸成形技术	6
第 2 章 现代飞机机翼壁板板坯制备技术	20
2.1 理想变形理论及有限元单元插值函数	20
2.2 基于理想成形理论的曲面展开技术	27
2.3 展开软件设计思路及编程实现	44
2.4 关键技术研究是实现	55
2.5 整体壁板高效切削和变形控制	66
第 3 章 现代喷丸成形设备及其性能试验设计	78
3.1 喷丸成形设备	79
3.2 数控喷丸成形设备性能试验设计	88
第 4 章 现代飞机机翼壁板数字化喷丸成形工艺设计	119
4.1 条带喷丸成形工艺设计与应用	119

II 现代飞机机翼壁板数字化喷丸成形技术

4.2 基于温度场的喷丸成形工艺数值模拟	133
4.3 预应力喷丸成形技术	168
第5章 现代飞机机翼壁板外形数字化检测技术	182
5.1 大型复杂曲面测量技术	185
5.2 数字化检测系统方案	192
5.3 数字化检测系统的实现	220
参考文献	234

第 1 章 绪论

1.1 引言

喷丸成形是 20 世纪 50 年代初伴随着飞机机翼整体壁板的应用,在喷丸强化工艺的基础上发展起来的一种工艺方法。整体壁板不但强度高,而且平面尺寸大,飞机工厂原有的闸压机、滚弯机以及拉形机已不能满足成形的需要。

喷丸成形可以定义为一种无模(不需要模具和压力机)冷加工金属成形工艺,作为成形工具的金属弹丸流按照设计好的喷丸密度模型撞击金属表面以形成特殊形状。具有足够动能的一次撞击可以在表面层特定的体积内引起局部的塑性变形,喷丸成形包含的大量撞击作用集合起来就会产生一个延伸的塑性层,从而使板料弯曲。除了成形效果外,板厚方向不规则的塑性变形同时可以导致残余应力和表面强化,这些都对成形后零件的机械性能非常有益。随着喷丸成形工艺的发展,特别是航空制造工业的机翼整体壁板制造中,喷丸成形在全世界被广泛地研究和应用于整体结构成形。目前,这一工艺已成为制造机翼壁板不可替代或者首选的成形方法。与其他机翼成形生产工艺相比,喷丸成形具有制造成本低、适应现代飞机设计特点、有益于成形后部件的性能等优点。

1.2 机翼壁板成形在全机研制中的地位

以新支线飞机为代表的现代先进民用飞机机翼整体壁板制造流程如图 1.1 所示,工程设计的 3D 数模必须先展开成 2D 平面模型,通过数控加工由金属厚板加工出平板坯,再采用喷丸成形方法还原到设计要求的理论外形,最后进行长桁铆接装配。

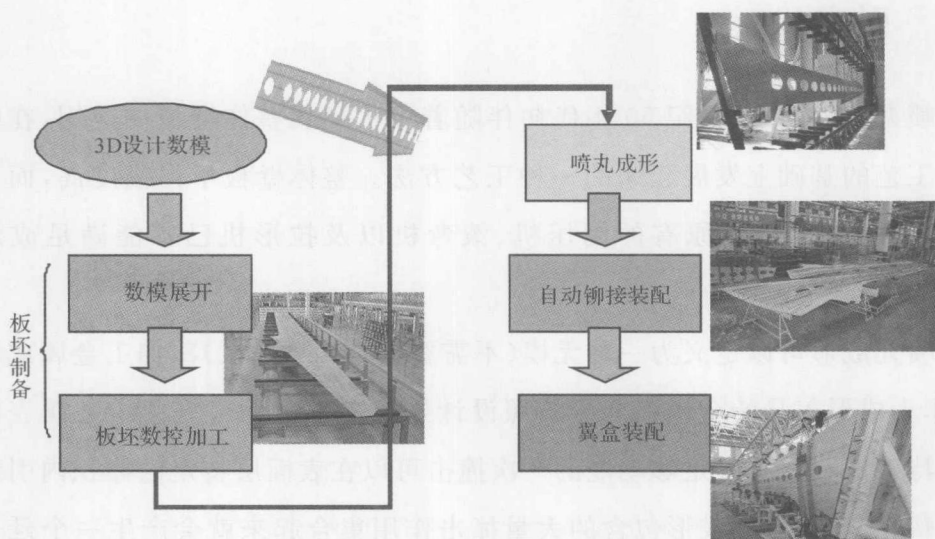


图 1.1 机翼整体壁板制造流程

现代飞机机翼壁板的研制过程是,以大量系统性试验为基础,通过在理论计算和技术提升上的创新和突破,掌握现代民用飞机机翼整体壁板在数模展开、数控加工、数控喷丸成形、自动钻铆、电磁铆接及相关专用工装设计制造等关键技术,重点攻克壁板数控高效加工、数控喷丸成形及自动钻铆等技术难题,形成拥有自主知识产权的机翼制造核心技术。

机翼是飞机机体结构制造的核心,机翼整体壁板是构成飞机气动外形的重要构件,现代机翼制造技术已成为衡量一个国家航空制造技术水平的重要标志之一。随着对民机舒适性、经济性要求的不断提高,现代民用飞机机翼已经从传统直纹面翼型发展到了复杂双曲率超临界翼型,现有制造技术能力根本不能满足大型超临界机翼整体壁板制造的要求。波音、空客等飞机制造厂家长期以来一直致力于现代民用飞机机翼整体壁板制造技术的研究。而国内对喷丸成形技术的研究长期受型号、设备、基础理论等的影响,在新支线ARJ21飞机之前没有根本性的突破。

本书针对现代飞机机翼壁板制造流程中的板坯制备和喷丸成形,以理论为基础,结合大量试验,重点研究现代民用飞机机翼整体壁板的数控喷丸成形与工艺优化问题。这对于形成现代民用飞机机翼整体壁板工程化批量制造能力,提高我国大型民用飞机制造实力,加速成为世界航空强国的步伐意义重大。

1.3 壁板几何特征分析

飞机机翼壁板所具有的复杂外形难以由几何模型或实物模型上用目测或简单的测量手段观测分析得出完整的几何性质,而掌握壁板外形曲面几何性质是实现壁板数字化喷丸成形的基础。

1.3.1 飞机机翼壁板工艺特征

作为直接构成气动外形的机翼壁板具有下述工艺特征。

1. 复杂的双曲面外形

除具有弦向机翼曲面外,外翼上、下壁板均有较小范围的展向气动折弯和较大范围的展向弯曲,形成具有马鞍形和双凸形的复杂双曲面外形。其外形

完全来自风洞试验,尤其是新支线 ARJ21 飞机机翼下后壁板,其外形由来自风洞试验外形部分和经过修形后外形部分拼接而成,集中体现超临界机翼外形的典型特点。

2. 复杂的结构

基于等强度结构设计原理,壁板厚度呈双向斜削,从机翼前梁向后壁板厚度增加。以新支线飞机为例,从翼根到 8 肋厚度增加,从 8 肋到翼尖厚度减小,8 肋处最厚,厚度为 11.8 mm,翼尖端头厚度最薄为 2 mm;另外,下壁板带有加厚凸台和尺寸为 400 mm×250 mm 左右的椭圆形油箱口盖 21 个,在翼梢部分加厚凸台与蒙皮厚度之比达到 4 倍,并具有贯穿翼展全长的加强条带。

3. 较大的几何尺寸

机翼整体壁板沿展向一般贯穿机翼全长,弦向分成若干块,因此壁板几何尺寸较大,最大宽度在 2.2 m 左右,长度 13 m 左右。

4. 严格的表面完整性要求

民机机翼疲劳寿命和外观质量要求高,壁板喷丸成形后,需要进行表面喷丸强化和手工修磨。

1.3.2 自由曲面 Gauss 曲率云纹图分析技术

对制定喷丸成形工艺有重要影响的几何曲率包括曲面在任意一点的截面线曲率、主曲率以及 Gauss 曲率。截面线曲率是分析壁板外形曲面设计控制元素的重要方法,由此可以给出设计详细喷丸参数的设计依据,并对成形效果进行评价。主曲率,即极值曲率,则与条带喷丸的弯曲作用对应,可以此为基础生成壁板弯曲喷丸路径。Gauss 曲率综合反映了曲面在空间中的弯曲状态,如同向双曲、异向双曲等,为放料喷丸及喷丸路径的修正提供

了依据。

壁板外形曲面在空间中的弯曲状态对于确定喷丸参数有重要的影响。比如,同向双曲和异向双曲的喷丸路径截然不同,而零 Gauss 曲率曲面只需沿零曲率方向喷丸即可实现成形。因此,分析壁板外形曲面在空间中的弯曲状态,使喷丸成形工艺设计者了解壁板弯曲情况,对于工艺设计人员设计喷丸路径与工艺参数有重要作用。Gauss 曲率云纹图可以比较清楚地反映自由曲面在空间中的弯曲状态。

在一般情况下,设有一张正则的三维欧氏空间曲面 S ,其参数化方程为

$$r = r(u, v) \quad (1.1)$$

且设 $r(u, v)$ 存在连续的二阶偏导数 r_{uu}, r_{uv}, r_{vv} 。则 Gauss 曲率可表示为

$$K = k_1 k_2 = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} \quad (1.2)$$

式中 k_1 ——曲面法曲率的极大值;

k_2 ——曲面法曲率的极小值。

$$E = r_u^2$$

$$F = r_u r_v$$

$$G = r_v^2$$

$$L = nr_{uu}$$

$$M = nr_{uv}$$

$$N = nr_{vv}$$

由式(1.2)可以计算曲面各处的 Gauss 曲率,并以等值线的形式表示在外形曲面上。

1.3.3 机翼外形曲面弦控线分析技术

在机翼分析技术中,经常采用外形面上的弦控线来分析机翼的变形情

况。机翼在展向的弯曲情况则直接决定了机翼的复杂情况。如果展向接近为直线,则机翼接近为直纹面,其变形情况也较为简单;而如果展向是变曲率的空间曲线,则机翼将具有复杂变双曲外形。

工程分析计算中,常要对壁板在弦控截面线和展向长桁轴截线上的弯曲情况做详细的分析,并给出相关的数据。图 1.2 所示是根据气动设计时所采用的控制线和翼肋轴线所取的上、下壁板展向弯曲分析线。

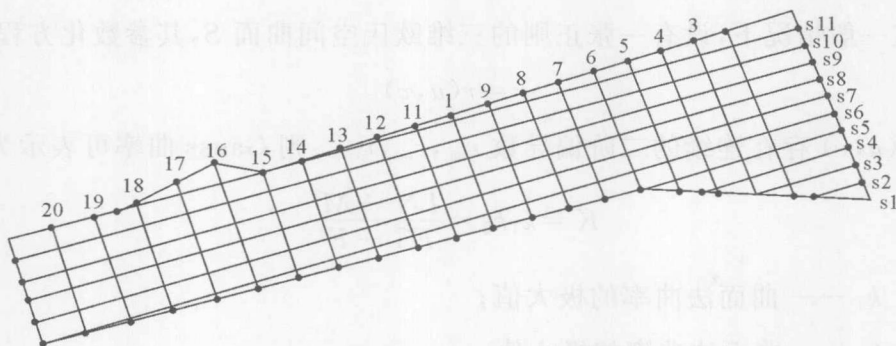


图 1.2 展向弯曲分析线

1.4 新型喷丸成形技术

1.4.1 激光喷丸

激光喷丸(Laser Peening)成形技术大约在 1965 年首次提出。其基本原理(见图 1.3)是采用高频、高功率、短脉冲激光束冲击放于约束层下的表面涂有半透明烧蚀材料的工件表面,激光脉冲穿过约束层而被烧蚀层吸收,并在约束层上产生等离子云,在 $10 \sim 100 \text{ ns}$ 内等离子快速膨胀,在工件表面上产生 $1 \sim 10 \text{ GPa}$ 的压力,并形成平面激波,当冲击波的峰值压力超过被处理材料动态屈服强度时,材料表层就产生应变硬化,残留巨大的压应力,从而使工件表

层产生塑性变形。

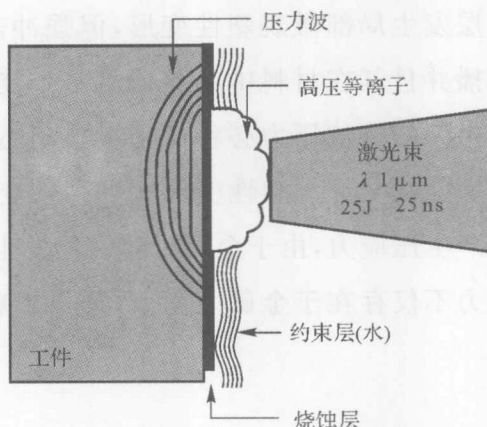


图 1.3 激光喷丸的原理^[1]

烧蚀层表面覆盖的约束层的作用是限制汽化,提高脉冲压力和作用时间。激光冲击处理过程中,约束层是决定约束方式的主要因素,目前使用的约束层主要有固态介质和液态介质。固态介质分为固态硬介质和固态软介质。固态硬介质(如光学玻璃)的优点是对激光能量吸收少,缺点是只适合对平面表面强化,而且冲击时会产生爆破碎片,难以防护和清理;固态软介质对非平面表面的冲击处理可以做到很好的贴合,但固态软介质材料(如有机材料)对红外激光吸收率普遍较高并容易被击穿,其应用还有待进一步研究和完善。液态介质水是最为经济的约束介质,水约束又分为静水约束和流水约束两种方式。静水在吸收层汽化过程中容易受到污染,并且冲击波会使水表面波动,影响下一次冲击工艺;流水在高精确处理中需要一定的时间以获得平整的界面,从而影响到激光冲击频率的提高。

对激光喷丸成形技术的研究除了使金属表面形成应变硬化层外,激光喷