

# 国内外航空喷丸技术与装备发展

## Development of Shot Peening Technology and Equipment in Aviation Industry

中航飞机股份有限公司西安飞机分公司 张 炜 曹 亮 高国强 张万瑜  
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 孙宝龙



张 炜

西飞公司喷丸厂厂长,长期从事喷丸技术研究,参与了国内多个重要型号关键技术攻关,解决了制约我国先进飞机喷丸成形及强化的瓶颈技术难题。

喷丸是利用高速弹丸流对金属构件表面进行撞击,使构件表面产生塑形变形层并引入残余压应力,以提高零件的疲劳性能和改变零件的表面状态。喷丸技术是飞机机翼整体壁板成形以及飞机结构件强化的有效方法,并且在喷丸过程中不需要专门模具。按照应用范围可分为喷丸

近年来,国内外喷丸技术发展迅速,以激光喷丸、超声喷丸及高压水喷丸为代表的新方法、新技术相继出现,使得喷丸技术的应用领域和范围更加广泛,能够满足现代航空、航天等高精尖制造领域对喷丸技术的多样化需求。

成形和喷丸强化两种工艺方法(图1)。喷丸成形又可分为单面喷丸和双面喷丸,另外按照喷丸成形前构件是否引入弹性预加载荷可以分为自由状态喷丸和预应力喷丸<sup>[1]</sup>。预应力喷丸是通过机械预应力夹具,使工件处于单向预拉应力条件下,随后在具有拉应力的表面进行喷丸,当预应力被释放后,喷丸表面沿预应力方向的压应力要大于与其正交的另一方向。

近年来,随着计算机技术和数字化技术的迅速发展,对喷丸技术的研究和应用都起到了很大的推动作用,使得喷丸技术的应用范围更广,不仅仅是飞机大型机翼整体壁板、火箭大型整体结构舱体等大型整体件,其他具有复杂外形结构的航空航天结构件也得到了很大的发展。另外,喷

丸技术的自动化程度和精度也取得了长足发展,在欧洲空间组织运载火箭阿丽亚娜5号(图2)以及空中客车公司的A380的大型机身整体壁板的成形技术方面上都应用了自动化喷丸技术,省去了繁琐的人工校形工作,在保证成形质量和精度的同时,显著地提高了喷丸效率<sup>[2-3]</sup>。

随着ARJ和C919相关型号的研制和应用,我国的喷丸技术研究已经处于较高水平,攻克了多项喷丸关键技术。

### 喷丸技术研究现状

喷丸技术可以追溯到19世纪70年代,美国人Benjamin Chew Tilghman发明了冷硬铸铁喷丸技术。早期的喷丸技术主要用于工件的表面清理和强化,使工件的表面层残留



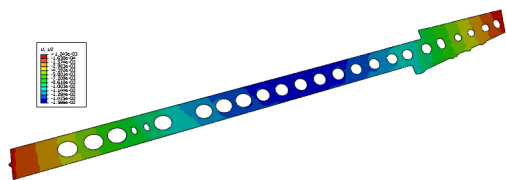


图4 整体壁板应变分布有限元模拟结果

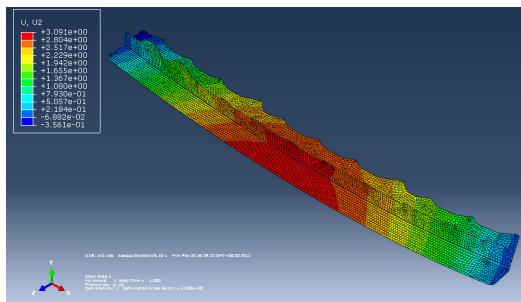


图5 机翼缘条结构件喷丸强化变形模拟结果



图6 西飞公司喷丸成形设备

以及加厚蒙皮喷丸技术难题；使用陶瓷丸喷丸强化技术提高了产品的表面质量并减小了薄壁结构件的变形问题；使用旋片喷丸强化技术解决了复杂半封闭区域喷丸强化难题。突破了多个型号机翼研制的重大关键技术，为国产大飞机的顺利研制做出了贡献(图7)。

### 喷丸装备技术的发展

喷丸装备在航空企业主要用于飞机整体壁板的成形和飞机结构件的强化,按照用途可以分为喷丸成形设备和喷丸强化设备。伴随着各国技术人员对喷丸技术的深入探索,喷丸设备也由早期的机械式喷丸机逐步过渡到数控式喷丸机,相应的弹丸

发射系统和喷头及工件运动系统也发生了变化,各国也先后研制出了不同型号的喷丸设备。

国外在喷丸设备研制方面起步较早,处于垄断地位。德国 KSA 公司为满足空客 A380 飞机整体壁板的喷丸成形需求,联合瑞士喷丸设备制造商 Baiker 公司研制出了目前世界上喷丸室最大的数控喷丸设备<sup>[6]</sup>,其自动化程度较高,在喷丸过程中不需要繁琐的人工校形工作,该设备的喷丸室长 13.5m,宽 4.5m,高 6.0m(图 8),可喷丸成形的最大组件尺寸 11000 × 3100 × 1500mm<sup>3</sup>,定位精度达 0.1mm。

荷兰 Straaltechniek International B.V. 设计和生产了机器人数控喷丸设备,该设备的弹丸种类和尺寸可根据使用者的具体需求进行选择,弹丸流量控制精确,并且实现多喷嘴,全自动化的高效率喷丸作业。

德国 ROSLER 公司是欧洲先进的数控喷丸强化设备的代表,提供具有加强筋条的整体壁板喷丸强化设备(图 9),零件在储存室和喷丸强化室之间采用先进的自动化控制技术,使得整个喷丸强化过程的效率更高

和生产更加灵活。另外,ROSLER 公司还提供其他类型的航空结构件喷丸强化设备,开发了湿式喷丸强化设备(图 10)以及干式喷丸强化设备<sup>[7]</sup>。湿式喷丸强化设备具有一个多漏斗系统用于玻璃丸的清洁与分选。喷丸介质为玻璃弹丸与水按一定的比例混合,通过具有高耐磨性的泵将丸料/水混合液通过喷头喷出,湿式喷丸具有能够使用非常细小的弹丸,且无粉尘、碎片少、表面夹杂风险小的优点。

法国 SONATS 公司在超声喷完技术方面做了大量研究,研发了超声喷丸技术(STRESSONIC)及相应的超声喷丸设备,并在自动化方面也做了大量研究,提高了生产率,减少了喷丸周期,对喷丸参数进行实时控制,可以有效地防止操作错误,降低成本。

国内的喷丸设备研制工作主要集中在北京航空制造工艺研究所,先后研制出了 SPW-1、SPW-2、SPW-3 等型号的喷丸设备,以 SPW-3 为例<sup>[8]</sup>,该设备外形尺寸 8000 × 7000 × 3500mm<sup>3</sup>,主要用于零件表面喷丸强化,采用西门子数控系统,具有控制准确、强化重复性好的优点,强化过程中使用双喷嘴玻璃弹丸,可喷丸强化零件的最大尺寸为 1000 × 800mm<sup>2</sup>。

### 新型喷丸技术研究

近几年来,随着机械制造各个领域对喷丸技术需求的多样化发展,对



图7 西飞喷丸成形壁板实物

喷丸过程实现的方式也呈现出了多样性,不再拘泥于传统的高速弹丸流冲击方式,涌现了一些新型的喷丸技术,比较有代表性的有:激光喷丸技术、超声喷丸技术及高压水喷丸技术。

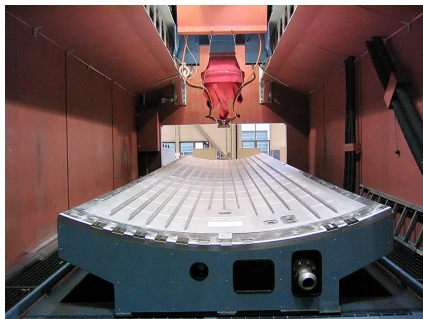


图8 世界上喷丸室最大的数控喷丸设备



图9 大型数控喷丸强化设备

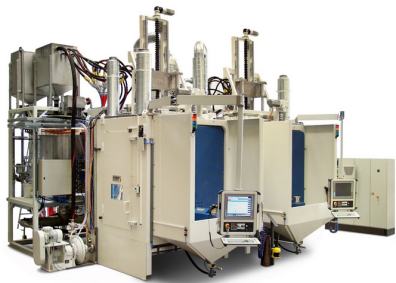


图10 湿式喷丸强化设备

## 1 激光喷丸技术

1961年美国人J.E.Michaels首先发现脉冲激光的冲击效应,随后开展了激光喷丸技术研究。激光喷丸是通过激光器产生脉冲激光束穿过透明的约束层作用到金属表面的吸收层上,吸收层吸收激光能量后发生气化,气化后的蒸汽继续吸收激光的能量形成等离子体,产生平面冲击波,作用到工件表面并向内传播,冲击压力大于材料动态屈服强度而使材料发生塑性变形,在成形区域产生残余压应力,塑性变形层的深度以及形成的残余压应力值都明显大于常规喷丸技术,可以大幅提高金属零件的强度、耐磨性、耐腐蚀性和疲劳寿

命<sup>[9-10]</sup>。

激光喷丸技术是材料表面改性及塑性变形的一项新技术,由于激光喷丸的塑性变形层较深,可用于常规喷丸难以成形的大型飞机中厚度整体壁板的喷丸成形,对航空制造业的发展将产生重大推动作用。另外,激光能量等相关参数和喷丸路径可以实现精确控制,零件的成形精度更高,表面质量更好。因此,激光喷丸技术是一种绿色精密成型技术。

## 2 超声喷丸技术

超声喷丸技术是利用超声波发生器产生的超声波使弹丸室内的弹丸或者振动工具头上的撞针产生机械振动而撞击工件表面,从而实现工件表面的喷丸处理。超声喷丸介质分为弹丸和撞针两种。在发达国家,超声喷丸技术已经大量应用于航空航天等高精尖领域。1996年,法国SONATS公司开始超声喷丸技术研究,并在随后的国际喷丸大会上展示了其研发的超声喷丸技术及相应的超声喷丸设备。SONATS公司在超声喷丸自动化方面也做了大量研究<sup>[11-12]</sup>,并应用于自动化超声喷丸成形。

超声喷丸产生的残余压应力值较大,应力层也较深,可以用于传统喷丸难以处理的较厚板料的喷丸处理。超声喷丸结束后不需要对弹丸进行收集、清洗,可多次循环利用,而且超声喷丸设备操作简便易行,受零件外形限制较小,可以实现复杂形状零件的喷丸处理。

## 3 高压水喷丸技术

2000年日本东京大学的Hitoshi Soyama提出高压水喷丸技术,其原理是通过喷嘴向静水环境中喷射高压高速水射流,高压高速水射流与周围静水相互作用会在水射流周围产生强烈的空化现象,产生的空化气泡群撞击到工件表面时发生破裂及溃灭后会产生微射流和极高的冲击波压力,作用到零件表面产生塑性变形

并形成残余压应力层<sup>[13-14]</sup>,起到改变零件的表面状态以及提高金属零件的强度、耐磨性、耐腐蚀性和疲劳寿命的作用。

与传统喷丸技术相比,高压水喷丸得到的零件疲劳强度更高,表面粗糙度值更小,高压水喷丸技术以其特有的技术优势必将会引起国内外学者广泛关注和深入研究。

## 结束语

近年来,国内外喷丸技术发展迅速,以激光喷丸、超声喷丸及高压水喷丸为代表的新方法、新技术相继出现,使得喷丸技术的应用领域和范围更加广泛,能够满足现代航空、航天等高精尖制造领域对喷丸技术的多样化需求。

喷丸技术的发展必将促进相关喷丸设备的迅速发展,大型整体壁板及整体结构件的喷丸需求,使得喷丸设备趋向于大型化、自动化、智能化。

我国在喷丸技术研究方面起步较晚,和国外发达国家相比,还有一定的差距。目前,国内先进大型数控喷丸设备均从国外引进,将会限制国内先进喷丸工艺技术的发展。因此,应整合高校、科研院所及相关企业资源,加大研究力度,自主开发先进大型数控喷丸设备,打破国外技术垄断。

在新型喷丸技术方面,虽然国内学者已经开展了激光喷丸、超声喷丸及高压水喷丸相关技术的研究,但是,许多方面仍处在机理探索及试验阶段,距离工程应用的要求还有很大差距,因此,必须加快国内在相关工艺技术研究,满足国内航空航天制造领域对喷丸技术的多样化需求与发展。

本文共有参考文献14篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)