

国内航空钣金装备技术 现状与发展

Current and Development Status of Sheet Metal Equipment and Technology in Chinese Aviation Industry

北京航空制造工程研究所 侯红亮 余肖放 曾元松



侯红亮

工学博士, 研究员, 主要从事铝合金、钛合金以及耐热超合金等材料的钣金加工技术及装备研究, 先后承担了国防“973”、国家自然科学基金、武器装备预先研究“十五”和“十一五”项目等, 发表论文 60 余篇。

航空钣金装备技术是一项重要的国防关键技术, 是航空制造技术升级的重要基础, 对于促进航空产品的升级换代, 提高产品性能, 缩短研制周期具有重要支撑作用。国内航空钣金装备技术经过几十年的发展, 其设计与制造水平有了长足的进步, 形成了一套完整的体系, 为航空工业关键零部件的生产提供了重要支撑, 但

随着航空工业的发展, 钣金零件的大型化和整体化趋势愈来愈明显, 大型化也是航空钣金装备发展趋势之一, 而一些大型钣金装备也是欧美等国限制我国引进的机电产品, 因此, 大型航空钣金装备必须走自主开发之路。

我国航空钣金装备在设计与制造方面仍与国外有较大差距, 还不能完全满足航空工业发展的需求。

航空钣金零件的显著特点是大型化、集成化和轻量化, 主要包括板类零件和回转类零件, 板类零件主要是蒙皮、壁板以及一些多层结构, 用来达到保证飞机的气动性能和降低重量的目的; 回转类零件主要是发动机机匣、导管等。航空钣金结构零件对于提高飞机和发动机性能发挥了重要的作用, 其制造技术强烈依赖于航空钣金装备的研发水平, 航空钣金装备为钣金成形技术的实现提供了平台, 同时, 航空钣金新工艺、新技术也促进了装备的发展。

航空钣金装备服务于钣金成形技术的要求, 航空钣金零件的特点也决定了其装备具有大型化和专用化特点, 航空钣金装备主要有蒙皮拉形设备、喷丸成形设备、超塑成形设备、

热蠕变成形设备、旋压成形设备以及管件成形与连接设备等。随着航空技术的发展, 现代飞机对可靠性、效率比、服役性能等提出了更高的要求。一方面, 钣金结构件的整体化和复杂化趋势越来越明显, 新结构不断涌现; 另一方面, 新材料的应用也呈增加的趋势, 这不仅给钣金成形技术本身提出了新课题, 而且也为航空钣金装备的发展提供了源动力。航空钣金成形装备在新材料与新工艺研究、新结构与新机研制过程中发挥着越来越重要的作用。

航空钣金装备技术的发展

1 蒙皮拉形设备

蒙皮拉形设备是飞机蒙皮成形的关键设备, 按其作用原理可分为台动式拉形机和台钳双动式拉形机两类。台动式拉形机用于横向拉形, 台钳双动式拉形机则主要用于纵向

拉形。蒙皮加工的成形力主要由拉形机钳口的运动产生,同时还涉及模具的垂直运动,相对于其他冲压工艺来讲,拉形参数及运动方式更为复杂。我国航空工业传统的蒙皮拉形机多是20世纪五六十年代从原苏联引进或自行设计制造的。前苏联的P0-250型蒙皮纵拉成形机

具有良好的人机界面,可以对台面和夹钳的运动进行连续控制,可以成形复杂蒙皮零件,为提高蒙皮制造水平和改善蒙皮质量创造了良好的硬件环境。

北京航空制造工程研究所六七十年代先后研制了ML-1、ML-2系列的蒙皮拉形机,装备于一

北京航空航天大学在拉形机的结构设计、运动仿真和系统控制方面开展了大量的研发工作,研制了国内首台数控蒙皮拉形试验机,最大拉形力为1000kN,拉形零件毛坯最大尺寸为1600mm×800mm,蒙皮拉形过程中实现了拉伸油缸和上顶油缸的位移和速度精确控制,系统采用电液伺服阀控制,并且通过光栅返回油缸的运动位移,通过拉线式编码器测量夹钳的摆动和俯仰角度,应用力传感器测量拉伸力和上顶力的大小,系统通过对电液伺服阀、电气系统和液压系统的控制驱动试验机各油缸运动,同时将采集到的位移和力的数据传送给上位机,构成一个闭环控制系统,实现对数控蒙皮拉形试验机的位移控制和力控制。针对国产的ML-2蒙皮拉形机,华中科技大学采用可编程程序控制器和示教/再现技术对传统蒙皮拉形机实现了数字化控制。

2 喷丸成形设备

喷丸成形设备是成形飞机大型整体壁板的专用装备,按照弹丸的加速方式可分为喷丸和抛丸两种,前者利用压缩空气加速弹丸,后者则利用电、气、液等驱动的叶轮系统离心力加速弹丸。喷丸设备和抛丸设备的特点见表1。

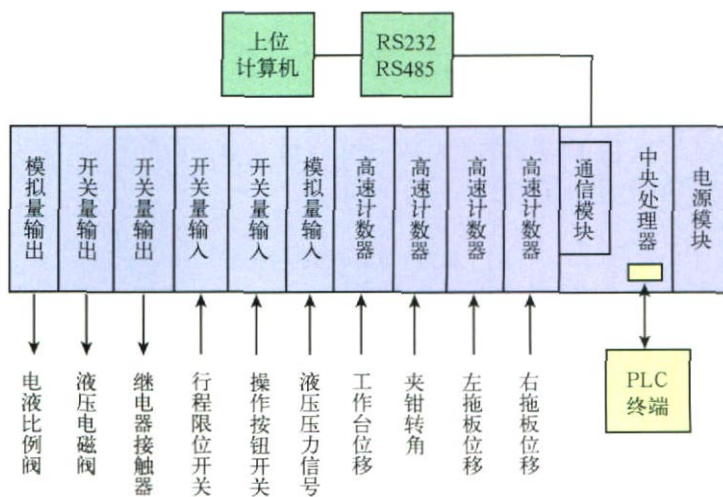
由于抛丸技术在加工飞机整体



可以成形单、双和变曲度蒙皮件,最大拉力2700kN,加工板材尺寸为8000mm×2200mm×6mm。这些设备控制方式一般为手动,存在着自动化程度低、控制精度差、生产效率低以及操作人员工作强度大等问题,蒙皮零件的成形质量不仅受各种工艺条件因素的影响,与操作人员的技术水平和熟练程度关系也很大,因而零件的一致性、重复性差,质量难于保证。

些航空主机厂并应用于飞机蒙皮的研制与生产。随着国内设计、制造和控制水平的提高,一些科研院所和高校一方面自行设计制造蒙皮拉形机,以满足实际生产的需要;另一方面,针对传统蒙皮拉形机进行了数控改造,以期在生产中发挥更大的作用。

20世纪80年代中后期以来,我国陆续从法国阿尔斯通-ACB、美国RYRIL-BATH公司引进了一些蒙皮拉形机,如FET600T、FET1200T、FEL2×350T、VTL1000等。从法国引进的FET-1200蒙皮拉形机的最大拉力为12000kN,采用计算机数控技术和电液伺服技术实现自动控制。国外的拉形机性能稳定可靠,操作方便,液压系统稳定,故障少,且专业化程度高,呈系列化,并



ML-2拉形机控制系统原理框图



RX-1热成形压机

壁板时的有效性,在某些场合甚至是唯一有效的方法,欧美等国先后研制了专用的抛丸成形设备,用于壁板的成形加工。第一批抛丸成形设备是在喷丸强化设备基础上稍加改造而成的,随着各国研究人员对喷丸成形技术的认识,为了挖掘其工艺和设备潜力,对喷丸设备的弹丸加速系统、弹丸循环系统、喷头或工件位移机械化和喷嘴结构等方面进行了大量改进,并实现了NC或CNC控制。国内只有北京航空制造工程研究所自行研制SPW-1、JKQ-001、SPW-2、SPW-3等型号的喷丸设备,见表2。目前国内应用的喷丸成形设备仍以国外引进为主。

表1 抛丸和喷丸设备的特点

设备类型	弹流稳定性	弹流动能	效率	机动性
喷丸设备	弹流稳定性取决于压缩空气质量和气压稳定程度	弹丸尺寸及喷射速度小,弹流动能弱	弹丸射流覆盖区尺寸小,效率低	机动性较好,可在零件的任何地方实现扫描射流
抛丸设备	弹流稳定性高,弹流速度取决于驱动机构的旋转频率	弹流动能大,速度可达100m/s,弹径为4~5mm	弹丸射流覆盖区尺寸大,抛丸器效率高	机动性较差,工艺潜能小,不能成形复杂程度较高的零件

3 超塑成形设备

超塑成形(SPF)及超塑成形/扩散连接(SPF/DB)是一种低成本、高效益、近无余量的成形与连接技术,可以加工其他方法无法加工的多层空心结构。该技术已成为一种推动现代航空航天结构设计概念发展和突破传统钣金成形方法的先进制造技术,展示出巨大的技术经济效益。超塑成形设备是实现SPF及SPF/DB技术的专用装备,可以通过改造通用压力机的方法来制作,

国内主要通过改造通用压机用于SPF和SPF/DB的试验研究,即在通用液压机的基础上,自行设计制造加热系统、气源系统和控制系统。北京航空制造工程研究所先后对1000kN、3000kN和5000kN通用液压机进行了改造,并利用这些设备开展了大量的试验研究和生产。本世纪初,随着国内设计和研究人员对钛合金SPF和SPF/DB结构的深入认识,SPF/DB结构在航空领域的应用数量和水平不断提高,现有的设

表2 北京航空制造工程研究所研制的喷丸成形与强化设备

设备型号	SPW-1	JKQ-001	SPW-2	SPW-3
设备外形尺寸 (长×宽×高)/mm	15000×7000×11000	1500×6500×11000	37000×8600×9000	8000×7000×3500
抛丸室尺寸 (长×宽×高)/mm	5000×3500×3000	5200×6500×3500	6500×5800×3500	3000×2000×2000
最大工件尺寸/mm	8000×1500×500	φ3000	16000×1500×500	1400×1000
最大流量/(kg·min ⁻¹)	200	200	150	20
控制系统	工控机+PLC	PLC	工控机+PLC	西门子数控系统

也可以制造专用的SPF设备。美、法、英都有专业的SPF设备制造公司,法国的ACB是一家较大的钣金设备制造公司,为多家航空企业研制了多台专业SPF设备,曾于1994年研制了一台28000kN的SPF设备,台面尺寸2290mm×5350mm。英国CHESTER公司生产的部分SPF设备见表3,美国的MURDOCK、WHITE等公司也生产了多台SPF设备。

备远远不能满足科研生产的需要,各主机厂所先后从欧美等国引进了多台SPF专用设备。SPF/DB专用设备在功能上可以实现气压、背压管理和成形控制的计算机管理,通过仪表显示和监控整个成形过程,并采用电阻加热平台。

4 热成形压机

热成形压机主要用于难变形板料的冲压拉伸成形。某些材料的室温塑性低,成形性能差,难以在室温下成形,须加热到一定的温度以提高其塑性,获得较高的变形能力,钛合金、高温合金等材料的成形就有这种要求。具备这种能力的设备在原理上与室温冲压拉伸设备有相似之处,但需要增加加热系统,其热成形机是双动液压机和电炉的有机结合体。

热成形压机主要结构形式有蚌壳式(翻转式)、C型、框架式和四柱

表3 英国CHESTER公司生产的部分SPF设备

吨位 /kN	平台尺寸 / mm	生产年份	使用厂家
4000	2438×1219	1977	Spuerform UK Worcester England
1000	915×610	1986	Sperform USA Riverside California
4500	2438×1219	1986	Sperform USA Riverside California
15500	2438×1829	1988	General Dynamics Corp. Fort Worth Texas
24000	2438×1219	1988	McDonnell Douglass Corp. St. Louis Missouri
30000	2350×3050	1989	British Aerospace Military Div. Preston
2000	2000×1000	1991	Rolls Royce PLC Barnoldsiwick
5200	1300×1200	1992	Hurel Dubois Meudon la Foret, France

式几种,其中蚌壳式结构现已很少采用,主要原因是由于其温度损失大,难于保温。美国的SHERIDAN-GRAY公司分别于1958年和1965年研制了首台专用蚌壳式和C型热成形压机,随后又生产了数台蚌壳式和C型结构压机分别安装于DOUGLAS、NORTHROP和BOEING公司。此外,美国的MURDOCK、瑞典的ASEA和法国ACB等公司先后研制了C型和框架式热成形压机。我国热成形压机的研制始于70年代初期,1970年由北京航空制造工程研究所研制成功首台C型结构RX-1专用热成形压机,随后国内其他单位也根据生产需要研制了一批热成形压机,见表4。

80~90年代期间,热成形压机的研制基本处于停滞状态。本世纪初,随着钛合金钣金结构应用数量和水平的提高,国内先后从美国MURDOCK公司和法国的ACB公司引进多台热成形压机,为提升国内钛合金钣金结构的制造水平发挥了积极作用。

5 旋压成形设备

20世纪60年代初,为了解决某些产品的成形问题,部分军工部门(主要是航空航天领域)开始应用旋压技术加工诸如飞机副油箱、发动机燃烧室等产

品,开始采用自制的非常简单的旋压设备加工成形制品。基于这种现状,航空、航天、兵器和机械工业部门先后研制了多台旋压设备,在一定程度上解决了某些关键零件的加工问题。北京航空制造工程研究所是国内率先开展旋压设备研制的单位,先后研制了PX系列普通旋压机床和SY系列强力旋压机床,共计30余台。随后,北京有色金属研究总院、北京航空航天大学、西安重型机械研究所、青海重型机床厂、福建机械科学研究所、长春兵器五十五所、武汉重型机床厂等单位也有各自的旋压设备问世,大多为简单的机械或液压仿形机床,结构形式多为卧式双旋

轮,最大吨位为600kN,可旋压最大零件直径2400mm。由于受到国内当时制造业整体水平和设计水平的限制,这些设备普遍存在一些问题,表现为:可靠性差,机床故障多;液压元器件质量不稳定,跑冒滴漏现象严重;机床操作系统落后,致使旋压工艺不连续,制品质量低;设计与工艺人员欠缺充分交流与沟通,有些机床功能不够完善。

鉴于国内旋压设备存在的问题,20世纪70年代末至今,各部门陆续引进几十台国外旋压机床,大多由西班牙、德国、美国、俄罗斯、意大利等国家制造,机床的性能稳定可靠,操作方便,液压系统稳定,故障少,且专业化程度高,呈系列化。同时,通过对引进机床的使用、消化与吸收,加之国内制造业水平和控制水平的提高,旋压机的设计、制造以及性能水平均有了大幅度提升。近年来,北京航空制造工程研究所、长春设备工艺研究所和北京航空航天大学现代技术研究所等单位在总结过去研制经验的基础上,瞄准国际水平,运用先进的设计方法与理念,采用了SIMENS840D和BOSCH比例伺服阀控制系统、伺服油缸驱动、光栅位置反馈、滚动导轨导向和交流变频

表4 20世纪70年代国内生产的热成形压机概况

型号与型式	工作台尺寸 / mm	压力 / kN	行程 / mm	工作温度 / °C	设计制造单位	制造年份
RX-1 C型	1300×760	1000	700	800	北京航空制造工程研究所	1970
RX-2 C型	1000×900	1000	650	850	北京航空制造工程研究所	1978
YPYJ-100 双柱式	1360×1000	100	400	800	上海锻压机床厂	1975
YPJP-60 双柱式	1350×1300	60	400	800	上海锻压机床厂	1976
DRT- I 闸压式	450×600	22	200	800	南京航院	1976
DRT- II 框架式	600×700	100	600	900	南京航院	1978
RY-K1 框架式	1600×700	500	160	700	洪都机械厂	1978
RY-K2 四柱式	1200×1000	250	1000	800	松陵机械厂	1981
RC1-400 四柱式	600×800	400	500	850	红安机械公司	1979
RY-C1 四柱式	1400×1100	100	700	850	昌河机械厂	1981

调速等先进技术,推出新一代国产 CNC 强力旋压机床,实现了国产旋压机的升级换代,其最大设备吨位为 600kN,整机性能达到了国际水平。

航空钣金装备技术的现状

目前,国内航空钣金装备以引进设备为主、国内研制为辅。引进设备的性能稳定可靠,操作方便,故障少,且专业化程度高,呈系列化,基本可以满足国内航空钣金件的制造要求。同时,随着国内设计方法和手段的进步以及整体制造水平和控制水平的提高,加之元器件采购的国际化及其系统开放性,并通过对引进机床的使用、消化与吸收,国内航空钣金装备的设计、制造以及性能水平均有了大幅度的提升,具备了各种航空钣金装备的研发能力和制造条件,具体体现在以下几个方面:

(1) 随着对钣金成形理论研究的深入以及有限元技术的发展,设计方法和手段的不断完善,可以实现对主要承载部件的精确建模和有限元分析,使其结构布局以及结构的材料和应力分布更趋合理,提高了设备的可靠性。

(2) 国内结构件(特别是大型结构件)的制造能力和加工精度显著提高,设备的整机精度也显著提高。以旋压机为例,其横向定位精度 $0.012 \sim 0.015\text{mm}$, 重复定位精度 $0.008 \sim 0.010\text{mm}$, 纵向定位精度 $0.012 \sim 0.020\text{mm}$, 重复定位精度 $0.006 \sim 0.012\text{mm}$, 主轴径向跳动 $0.010 \sim 0.020\text{mm}$, 主轴端面跳动 $0.010 \sim 0.020\text{mm}$ 。

(3) 国内外控制系统较为成熟,主要有德国 SIEMENS、法国 NUM、日本 FANUC 以及国内的中

国珠峰数控公司、北京航天数控系统公司、华中数控公司、沈阳高档数控国家工程研究中心研制的控制系统,可根据设备精度、驱动电机功率和用户要求进行选择。同时,国外控制系统不仅针对用户需求开发了专用模块,而且具有良好的开放性,用户可以根据自己的设计要求进行二次开发,完全可以满足航空钣金装备的控制要求。如 SIEMENS 公司的 840D 系统内嵌了专用于电液伺服的驱动模块,设有多项可调参数,如 PID 前馈控制、死区补偿、摩擦力、非线性补偿等,并可以通过友好的人机界面方便地进行修改与设置,与所选用的伺服阀和油缸相匹配,为系统的动/静态特性的调试带来了方便。

(4) 航空钣金装备的驱动系统主要有液压驱动、机械驱动和电机直接驱动几种,这些驱动系统与其他装备行业相一致,其设计理论与方法、制造技术较为成熟。特别是国内的液压系统的“跑、冒、滴、漏”现象基本解决,液压元器件质量大为提高,有些高品质元器件也可以通过国际化采购,伺服油缸的制造精度也大为提高,可以满足航空钣金装备的系统

稳定性以及动/静态特性要求。

(5) 国内航空钣金制造技术经过几十年的研究与探索,工艺方法与理论不断完善,特别是航空钣金数字化制造也取得了初步成果,积累了丰富的工艺经验与诀窍,为航空钣金装备的参数与结构优化、改造与改型奠定了坚实的基础。

国内航空钣金装备技术的进步不仅强烈依赖于设计水平和制造水平的提高,而且与其专业化程度等诸多因素有关,与国外相比仍有不小的差距,其原因大致有:

(1) 国外航空钣金设备制造公司专业化程度高,有一支专业化的设计队伍,形成了一整套的设计、制造与调试体系;国内没有像通用压力机那样形成专业化的生产厂家,仅是个别科研院所针对航空钣金的需求开展了一些研制工作,研究和单位人员分散,工艺适应性较差,产品集成化程度较低,不利于航空钣金设备整体水平的提高。

(2) 国内航空钣金设备水平受到一些关键部件的制约,如超塑成形设备和热成形设备的金属平台和陶瓷平台、喷丸成形设备的弹丸流量控





SPW-2喷丸成形设备

制器以及大型构件的加工等。

航空钣金装备技术展望

随着航空工业的发展,钣金零件的大型化和整体化趋势愈来愈明显,大型化也是航空钣金装备发展趋势之一,而一些大型钣金装备也是欧美等国限制我国引进的机电产品,因此,大型航空钣金装备必须走自主开发之路。同时,国内航空钣金装备的研制与生产基本上根据用户要求而定,各单位甚至同一单位研制的设备没有形成系列,不同型号设备参数范围或相互重叠过多,或差距过大,没有形成合理的级差,不利于钣金设备整体水平的提高。

针对航空工业发展过程出现的新技术、新工艺以及新材料与新结构,一方面,要不断改进现有设备,以提高设备的加工能力,如通过在热成形设备上增加侧缸,可以实现一些空间钣金构件的成形;另一方面,要充分利用新技术与新工艺来促进新装备的研发,多点成形就是一个例证。

大型板类三维曲面的成形通常要采用模具成形或手工制造方式来实现,模具成形时,一个产品的生产往往需要数十套甚至数百套模具,模具的设计制造与调试等需要投入大

量的费用,而且生产准备周期很长。尤其在小批量、多品种的大型板类生产中,模具费用和生产周期的问题更为突出。有些小批量的大型板材制品不得不采用落后的手工成形方式。为了解决这个问题,提出了多点成形概念,其基本思想是将传统的整体模具离散成一系列规则排列、高度可调的基本体(或称冲头),在整体模具成形中,板材由模具曲面来成形,而多点成形中则由基本体群冲头的包络面(或称成形曲面)来完成,这是一种能够迅速适应产品更新换

代、自动化程度高、适应性广的新成形技术。多点成形机正是为了适应多点成形技术而发展的先进制造设备,是以计算机辅助设计、辅助制造和辅助测试(CAD/CAM/CAT)技术为主要手段的高技术集成系统。

结束语

钣金设备涉及蒙皮拉形设备、喷丸成形设备、超塑成形设备、热成形设备、旋压成形设备、压弯成形设备以及管材成形与连接设备。国内航空钣金装备经过40多年的发展,设计水平和制造水平明显提高,钣金设备的品种逐渐趋于完备,特别是随着国际化采购渠道的畅通,设计理念和方法的进步,国内个别的航空钣金设备基本接近国际水平,且具有良好的性价比,具备了参与国际竞争的能力与水平。但从总体来看,国内航空钣金设备的技术水平无疑仍存在明显的差距,远不能满足航空工业发展的需要。因而,为加速航空钣金装备技术的进步,需要设计、制造、工艺等各方协调一致,统筹高校、科研院所和企业各方资源,制定行业规划,建立专业的研发基地,这样必定会有利于航空钣金装备整体水平的提高。

(责编 晓霏)



FCC-250热成形压机