



国外航空钣金专用制造技术与装备发展*

Manufacturing Technology and Equipments for Aircraft Sheet Metal

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 李小强 李东升
中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司技术中心 杜宝瑞



李小强

北京航空航天大学讲师、硕士生导师,2010年北航博士后出站。主要从事飞机先进制造工艺与装备技术、材料精密塑性成形工艺与装备技术研究。目前主持总装预研,国家自然科学基金,航空科学基金以及沈飞、成飞、上飞企业合作等多个项目。作为主要参加人参与了大型客机制造科研攻关,863、国家科技支撑计划等10多项科研课题。

航空钣金零件的制造除采用通用的方法外,还有本行业独特的工艺技术,随之产生了相应的钣金专用制造装备。本文给出了蒙皮拉形、柔性多点切边、镜像铣削型材拉弯、橡皮成形、喷丸成形、蠕变时效成形、充液成形、热冲压成形和超塑成形/扩散连接等航空钣金专用制造技术与装备的国外最新进展。

飞机钣金制造技术是航空制造工程的重要组成部分,是使飞机能同时获得高结构效率和优良性能的基础制造技术之一,也是飞机制造工程的支柱工艺之一。飞机钣金制造技术水平是一个国家飞机制造技术水平和能力的主要标志。

钣金零件构成飞机机体的框架和气动外形,零件尺寸不一、形状复杂、选材各异、品种繁多,有严格的重量控制和一定的使用寿命要求。航空制造业对成形后零件的机械性能

有确定的指标要求,与其他行业的钣金零件相比技术要求高,制造难度大。

航空钣金零件的制造除采用通用的方法外,还有本行业独特的工艺技术,随之产生了相应的钣金专用制造装备。本文给出了蒙皮拉形、柔性多点切边、镜像铣削型材拉弯、橡皮成形、喷丸成形、蠕变时效成形、充液成形、热冲压成形、超塑成形/扩散连接等航空钣金专用制造技术与装备的国外最新进展。

* “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项课题(2013ZX04001-041)资助。

各种钣金制造技术与装备

1 拉伸成形技术与装备

拉形工艺主要用于成形飞机外表双曲蒙皮零件。拉形工艺主要分为两种：包覆拉形和拉包成形。前者主要用于成形简单曲率蒙皮零件，具体工艺过程如下：将毛料包覆在模具上，然后进行补拉。后者主要用于成形型材和复杂形状蒙皮。这种情况下，毛料首先预拉，然后恒力包覆，等零件完全包覆模具后，施加补拉。

国外数控蒙皮拉形机基本可以分为4类：横拉机、纵拉机、纵横合一综合拉形机以及转臂式拉形机。典型的如法国ACB公司生产的FET型纵横拉机，其最大成形力可达到2500t，它有4个独立水平油缸和4个独立垂直油缸，控制一对夹钳进行板材拉伸。法国ACB公司FEL纵拉机的最大成形力达到 $2 \times 1000t$ ，其夹钳包括多个夹钳块，每个夹钳块可以相对转动，以使夹钳顺应零件端面外形，设

备如图1所示。美国Cyril-Bath公司VTL型纵横合一综合拉形机除既可进行横向拉伸成形，又可进行纵向拉伸成形外，还可以通过更换夹钳实现型材的拉弯成形。L&F公司生产的转臂式拉形机如图2所示。

美国的MIT、DARPA、Northrop Grumman Corp和Cyril Bath Corp从1999年开始合作开展的柔性模具多点蒙皮拉形技术项目，研制出一套台面尺寸为 $121cm \times 182cm$ 的工程化应用的柔性模具系统，从2002年开始该套系统即开始在美国某空军修理厂进行工程验证，2004年8月结束。所开发的全套技术包括柔性模具本体、模具曲面自动生成和优化系统、数字控制系统、成形过程数值模拟和优化系统以及非接触光学外形检测系统等。目前，波音公司已正式购买了两套该柔性模具系统，见图3。

2 柔性多点夹持切边技术与装备

吸盘式柔性夹持切边技术是采用离散的带真空吸盘的立柱阵列拟

合零件的三维外形，即以点代面，精确牢固地夹持零件、立体定位，与龙门式五坐标数控蒙皮铣切设备配套使用，实现蒙皮外形边缘的立体精确切边、化铣刻线等。与传统的工艺方法相比，优点如下：可数字控制并定位模块化的真空吸盘立柱，生成与零件曲面完全符合并均匀分布的吸附点阵；零件外形发生变化，工装外形和布局可自动调整；实现数字化精确切边，保证零件互换、避免装配中二次修边。西班牙MTorres等公司开发了这样的设备，图4为柔性夹持精确切边。

3 镜像铣削技术与装备

镜像铣削工艺采用2个同步运动的6轴头保证镜像随动法向支承和法向铣削。

该工艺可以精准控制不同厚度蒙皮壁板的加工深度；采用专用MAP软件将激光扫描实际形面与零件CATIA数模比对，生成刀具和支承头空间曲面运动路径—零件加工

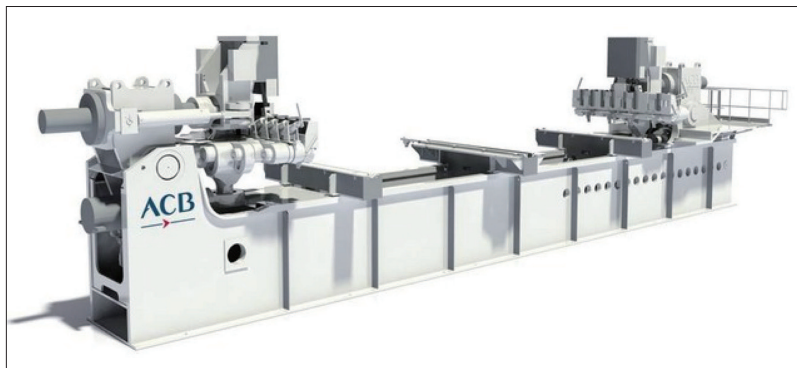


图1 FEL型蒙皮纵拉机

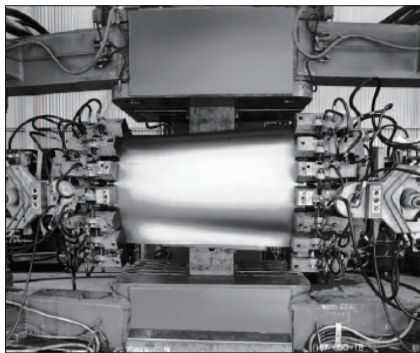


图2 转臂式拉形机

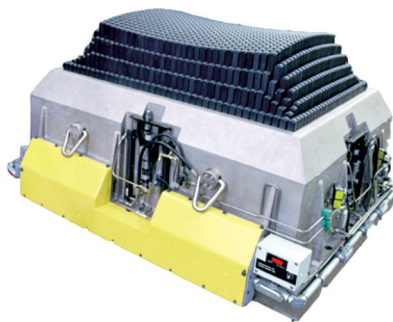


图3 柔性多点拉形模具



图4 柔性夹持精确切边

程序,对蒙皮拉形公差进行必要补偿;实现蒙皮轮廓、孔、槽、开窗和凹穴等精准定位加工;随动支承头由程序和压力传感器控制,无运动滑伤;一套柔性定位工装和可翻倾柔性周边夹持系统,可适应各种规格蒙皮壁板,保证工件空间定位和夹持刚性,保形准确;蒙皮两侧均可加工(转台旋转180°自动换面,无需重新装夹蒙皮);立式装夹和卧铣有利排屑和散热,防止蒙皮热变形;上下料便捷不需停机。

镜像铣削系统专门设计用于加工机头机身蒙皮/壁板:弧高可达1200mm;小曲率加工(角度达100°);周边轮廓夹持和曲面双侧刚性定位确保加工时无变形。目前该系统已经开始在空客公司应用。图5为采用镜像铣削加工的A320机身下部中央蒙皮,图6为典型的镜像铣削机床。

4 拉弯技术与装备

拉弯主要用于成形飞机上带曲率板弯或挤压型材零件。拉弯的基本原理是在毛料弯曲的同时施加切向拉力以克服内侧的起皱及改善截面内的应力分布以减少回弹,提高外形精度。

型材拉弯机可以分为转臂式、转台式、台动式3种,目前在航空工业转臂式拉弯机应用最广泛。法国ACB、美国Cyril Bath生产的转臂式拉弯机如图7所示,其最大拉伸力可以达到200t。

美国CIRIL BATH公司与钛合金制造商RTI国际金属公司合作开

发了热拉弯成形机床,用于钛合金挤压和板弯型材的成形。热成形后的零件再通过机械加工得到最后形状。这种工艺方法减少了钛合金的用量,而且得到的零件残余应力小,精确度高。图8所示为成形的零件。

5 橡皮成形技术与装备

橡皮成形技术包括橡皮垫成形技术和橡皮囊成形技术两种。橡皮垫成形过程中,半模(凸模或凹模)与毛料放置于工作台上,工作台进入液压机。橡皮垫(多层橡皮)及其容框固定于液压机上端,工作台对橡皮垫施加压力。在高压下的橡皮垫表



图5 A320机身下部中央蒙皮

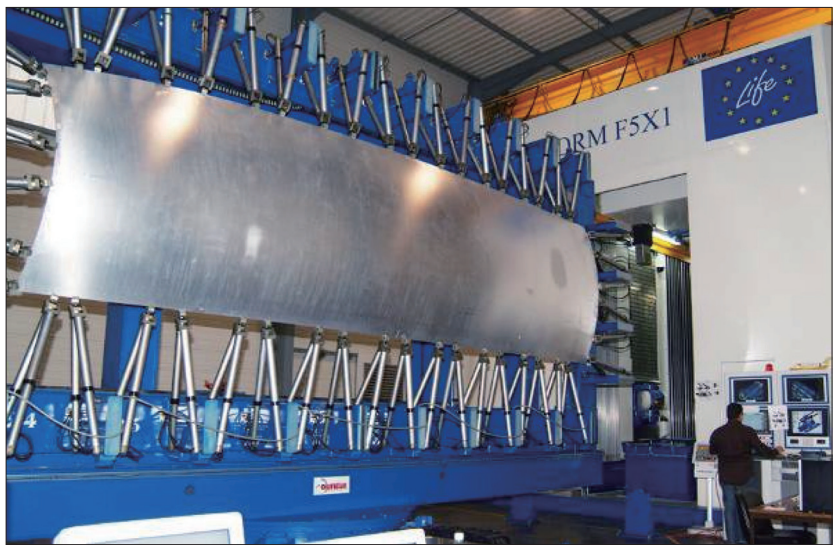


图6 镜像铣削机床



图7 转臂式拉弯机



图8 热拉弯成形的零件



图9 橡皮垫成形机床

现出流体特性,对零件全表面施加均匀的压力。

法国 ACB 公司、美国 Cyril Bath 公司生产的橡皮垫成形机床如图 9 所示,最大吨位达到 12500t,最大成形压力达到 100MPa。

橡皮囊成形液压机的容框和

工作台组成一密封的空间。成形模、毛料、和作通用半模的橡皮都放在此空间中。装在容框内的作通用半模用的橡皮已不是一迭实心橡皮,而是由一块厚橡皮(外胎)和一个装满油的橡皮囊(也常称内胎)两部分组成。向囊内通入高压油,高压油将使橡皮囊膨胀,从而迫使橡皮外胎充满工作台内的所有空间,把毛料包贴在成形模上。卸压后,需把工作台拉出机床框架,才能更换毛料和模具。

橡皮囊成形又可分为凸模成形、凹模成形和切边等工艺。凸模和凹模成形就是让橡皮囊相当于凹模或凸模,让工作台上的模具充当凸模或凹模。切边工艺是让模具的边角更尖锐,同时拉伸的深度要足够,这样就可以进行切边工艺。瑞典 AVURE 公司生产的橡皮囊液压机床如图 10 所示,其工作台面最大达到 1.8m × 4m,成形压力最大达到 140MPa。

6 喷丸成形技术与装备

喷丸成形技术是利用高速弹丸流撞击金属板材的表面,使受撞击的表面及其下层金属材料产生塑性变形而延伸,从而逐步使板材发生向受喷面凸起或凹下的弯曲变形而达到所需外形的一种成形方法。如果零件曲率过大,自由喷丸无法成形其外形,就需要预应力喷丸。喷丸成形过程如图 11 所示。

德国 KSA 公司与瑞士 Baiker AG 合作为 Airbus 提供了世界上最



图10 橡皮囊液压成形机床

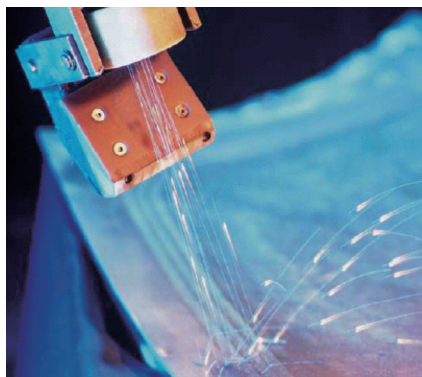


图11 喷丸成形过程



图12 世界上最大喷丸成形机床

大的喷丸成形机床,见图12。其喷丸室尺寸为 $13.5\text{m} \times 4.5\text{m} \times 6\text{m}$,可成形 $11\text{m} \times 3.1\text{m} \times 1.5\text{m}$ 尺寸的零件。搭载喷丸头的机器人在6个自由度上的定位精度是 0.1mm 。

7 蠕变时效成形技术与装备

20世纪80年代中期,由洛克威尔公司和美国空军联合开发了蠕变时效成形技术(亦称时效应力松弛成形技术),并应用于飞机机翼上、下壁板的制造中。

蠕变时效成形过程同时包含了应力松弛和人工时效过程。应力松弛用于产生永久变形,减少成形后的回弹量,提高贴模度;人工时效过程能够提高金属材料的抗拉强度、屈服强度和硬度,增加材料的疲劳寿命。由于时效成形过程中变形应力水平低,设备工装具有柔性和通用性,且成本低,成为解决厚蒙皮或壁板类大型复杂钣金零件精密成形有效的工艺方法。

空客公司采用蠕变时效成形技术,成形世界上最大商用客机A380的机翼壁板,壁板长 33m 、宽 2.8m 、厚度从 3mm 至 28mm ,双曲气动外形设计,装配容差要求控制在 $0\sim 1\text{mm}$ 之间,压力 0.85MPa ,温度 150°C , 24h 生产一件外形合格的机翼壁板。其采用的热压罐(图13)有 300t 重,直径 6m ,长度 42m ,长度方向包括9个独立控制的加热单元,以保证在整个热压罐内温度控制误差在 3°C 以内。

8 充液成形技术与装备

根据成形对象不同,充液成形可分为管材充液成形与板材充液成形两种工艺。图14通过三通管成形过程说明了管材充液成形工艺,其实质过程就是管材在轴向进给和液压胀形的协调作用下成形出所需零件。

德国SCHULER等公司等开发了专用的管材液压胀形装备。

板材充液成形又可分为主动充液成形和被动充液成形。意大利MURARO等公司开发了专用的主动

充液成形机床如图15所示。

被动充液成形过程如图16所示。瑞典APT等公司开发了专用的被动充液成形机床,见图17。

9 热冲压成形技术与装备

热冲压成形工艺分为非等温热冲压工艺和等温热冲压工艺。非等温热冲压工艺指只加热模具或只加热板料的成形工艺。而等温热冲压

指模具和板料都加热到同一温度,然后进行成形的工艺。后者在航空领域应用非常广泛。法国ACB、美国CYRILBATH、ACCUDYNE等公司都制造这种专用热成形装备,见图18。

10 超塑成形/扩散连接技术与装备

某些材料在一定的温度、一定的变形速率以及一定的组织条件下会发生超塑性现象,即其延伸率可达



图13 热压罐

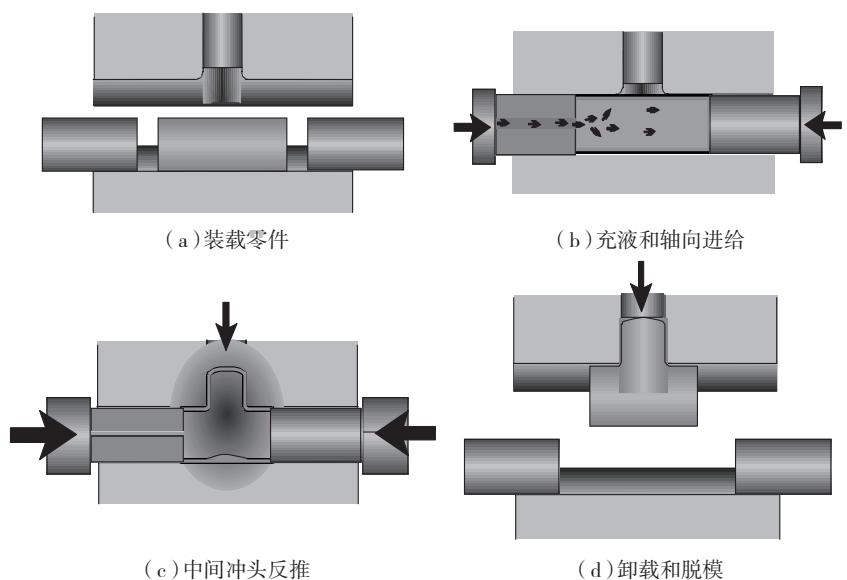
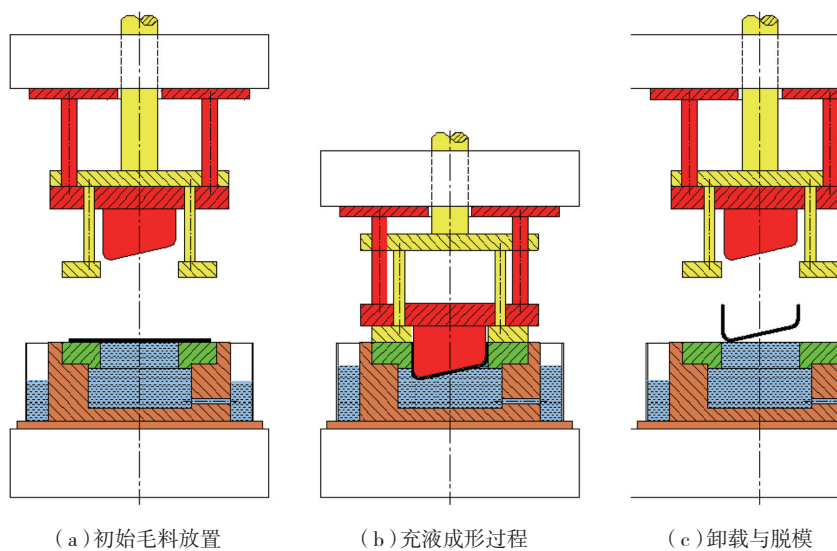


图14 三通管充液成形过程



图15 主动充液成形设备



(a) 初始毛料放置

(b) 充液成形过程

(c) 卸载与脱模

图16 被动充液成形过程

到百分之几百到几千。航空领域应用的超塑成形一般指超塑气胀成形,即通过精确控制氩气进给量,在高温下使金属薄板发生超塑性变形。法国ACB、美国CYRILBATH、ACCUDYNE等公司都制造这种专用超塑成形装备。

超塑成形 / 扩散连

接(SPF/DB)组合工艺则是利用材料在超塑性状态下良好的固态粘合性能而发展起来的一种组合工艺技术,它能在零件超塑成形的同时完成零件某些部位的扩散连接,从而形成出形状十分复杂的高性能整体构件。该技术的实现改变了传统飞行器结构件所使用的铆接、螺接、胶接等形式,降低了零件整体重量,使复杂薄壁零件整体化,缩短了制造周期,提高了零件整体性能。

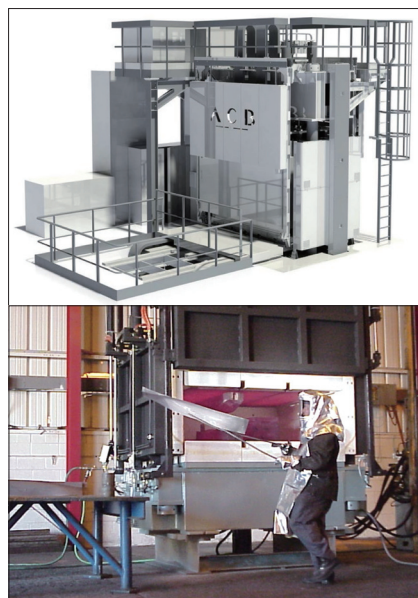


图18 热冲压成形装备



图17 被动充液成形设备

结束语

随着国内新一代战机、大型客机、大型军用运输机的研制,对先进钣金制造技术与装备的需求增多。而上述钣金制造装备基本由欧美等国几家公司垄断,国内缺乏相应的设计制造能力。这种情况导致国外装备售价高昂,国内大型航空制造企业只能购买1~2台,根本无法满足工厂实际生产需求;而小型航空制造企业更是无力购买。由于缺乏先进装备,先进的工艺技术无法实施,国内航空制造水平无法进一步提升。因此实现上述先进钣金制造技术与装备的自主研发已经迫在眉睫。

(责编 良辰 深蓝)