

强力旋压成形技术在航空领域的新进展

New Progress of Power Spinning Technology in Aeronautics

中航工业北京航空制造工程研究所 李继贞 刘德贵 王健飞



李继贞

中航工业北京航空制造工程研究所研究员,中航工业特级专家、中航工业基础技术研究员首席专家,全国旋压学术委员会副主任委员。长期致力于旋压设备和工艺研究,累计研发各类旋压设备 30 余台,开发航空航天各类装机件 40 余种。取得各种专利 7 项,获集团公司、国防科技进步奖 9 项。在复杂结构零件强力旋压、难变形材料旋压以及大型筒体精密流动旋压等领域的研究处于国内领先。

强力旋压成形及其优势

强力旋压作为近代塑性加工中的一种新工艺,在生产薄壁高精度回转体零件方面具有明显优势:

旋压成形技术在成形壁薄、质轻、高强度、高精度、良好的抗疲劳性能的回转体零部件上的工艺优势不可替代。航空航天产业促进了旋压技术的工艺深化,给专用旋压设备的研制提供了契机。旋压产品的大规模生产对旋压机床的精度、功能性、可靠性及自动化程度提出了更高的要求,强力旋压技术在航空航天制造领域的地位将会越来越重要。

(1) 强力旋压后材料的强度和硬度比母材提高了约 35%~45%,因此强力旋压能有效地减小零件的设计壁厚、减轻重量,其疲劳性能也能显著提高。

(2) 强力旋压属于整体成形技术,成形的零件没有母线焊缝,因此零件整体性能提高,尤其是疲劳寿命能显著提高。

(3) 强力旋压的无切削加工,提高材料利用率,降低生产成本。

(4) 由于减薄率较大,强力旋压能有效地检验母材中的冶金缺陷,而这些缺陷用超声波等其他无损检测方法时效果非常不明显甚至根本无法进行。

(5) 强力旋压零件的尺寸公差和形位公差较小。

(6) 强力旋压属于半模成形,不需要成套模具,因而模具费用和制造周期大大降低。

(7) 强力旋压属于局部成形,虽然接触面上单位压力很大,但旋轮与工件的接触面积很小,因此总变形力和机床吨位相对于其他压力加工方式来说很低。

(8) 强力旋压属于轴向拉延成形,变形区材料处于二向或者三向压应力状态,因而可以达到较高的变形程度。

基于以上的优点,特别是强力旋压后零件的强度、硬度和抗疲劳性能

的提高,强力旋压技术在航空航天领域的零部件制造中得到了广泛应用。

强力旋压技术在航空制造技术中的应用

旋压成形技术已经在航空航天制造领域取得了广泛应用。在飞机上,各种机头罩、副油箱、进气道、气瓶、拉杆、滑轨、作动筒都已经采用旋

压成形(图1)。在发动机上,螺旋桨桨帽、机匣、唇口、进气锥、喷管、喷口等(图2)也部分采用旋压成形工艺。这类零部件结构复杂、材料特殊、尺寸偏大,采用旋压成形工艺后,提高了结构部件的整体性,减少了焊缝和零件变形,减少了手工校形的工作量,更重要的是,由于旋压后材料强度增加,可以降低零件的设计壁厚,

从而降低整机的重量,提高了整机的可靠性。

副油箱的强力旋压成形最具技术优势。副油箱长2~3m,传统制造工艺是分瓣成形,然后焊接,分瓣数量在6瓣以上,因此,整个副油箱焊缝数量在十几道,焊接变形大,还需要大量的校形工序,工作量大,制造周期长。将副油箱从中间分成左右对称的两部分,采用强力旋压工艺,用厚板经两次成形,然后在中间焊接,将原来的十几道焊缝减少为一道,大大提高了副油箱的精度和整体强度,降低了制造周期和工装制造费用。

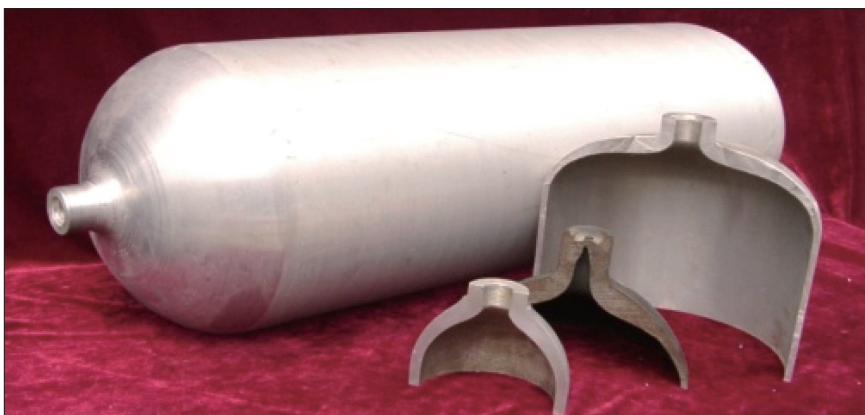
飞机上有各种各样的气瓶,形状有球形、柱形。这些气瓶工作压力都很高,有些高达45MPa,为了满足这个压力要求而又降低气瓶重量,这些气瓶的结构都是金属材料内衬外部缠绕复合材料,金属内衬有不锈钢、钛合金和铝合金。球形和柱形气瓶内衬传统的制造方法是锻造机加,即锻造一个壁厚为30mm左右的筒形毛坯,经数控加工,最后零件的壁厚1.5~2.5mm,材料利用率约为3%,材料浪费严重,加工周期长,制造成本高。由于锻造壁厚大,内部组织经常出现不均匀等情况,机械加工又破坏了金属纤维流向的完整性,降低了产品的疲劳寿命。气瓶内衬采用强力旋压成形,板材毛坯经1~2次强力旋压成形,即可获得所需要的形状和尺寸,大大减少甚至取消了机械加工,提高了内衬产品寿命;对于柱形气瓶,辅助以普通旋压收口工艺,还可以做到气瓶内衬的整体成形,整个气瓶内衬取消了焊缝,材料利用率也可达90%以上。



(a) 旋压成形的套筒、球形气瓶



(b) 旋压成形副油箱



(c) 整体旋压成形的铝合气瓶内衬

图1 旋压成形零件在飞机上的应用

钛合金、高温合金等难变形材料的旋压成形

几十年来,旋压材料集中在低碳钢、不锈钢、铝及其合金等有色金属,



(a) 旋压成形的螺旋桨桨帽



(b) 旋压成形的飞机发动机唇口

图2 旋压成形零件在飞机发动机上的应用

随着航空航天事业的高速发展,对钛合金、高温合金等其他难变形材料强力旋压的需求逐渐增多。由于钛合金常温塑性较差、变形抗力很大,在室温条件下进行强力旋压加工极为困难,国内曾对 TC4、Ti-15-3 等材料进行过室温强力旋压试验研究,但由于 TC4 室温下的低塑性及各工艺参数的综合影响,试验件均存在开裂或其他严重缺陷。

钛合金材料采用热旋压(图3),克服了钛合金常温下的变形抗力巨大的难题,零件回弹严重,解决了材料加工硬化严重且很难消除等问题,可以实现钛合金薄壁回转体零件的中小批量稳定生产。飞机发动机和导弹中有很多钛合金筒形、锥形件及其它异形件,以往都是用卷筒焊接的



图3 钛合金加热旋压成形过程

方法成形,如某型号部件现在是用厚度为 1.2mm 的 TC1 板材卷焊成形;如果用 TC4 代替 TC1,可使工件获得更好的强度和耐热性能,同时因为强度的增加可以减小设计壁厚,达到减重的目的;其次,用强力旋压工艺代替卷焊成形难变形的 TC4,避免了母线焊缝带来的缺陷,也使材料晶粒细化、强度提高,从而可以进一步减小壁厚、减轻重量。目前,在一些型号中,为了满足降低重量和超音速飞行对耐热性的要求,已经开始考虑用钛合金的旋压件来取代原来的铝合金及高强度钢旋压件。

高温合金大都是固溶强化镍基抗氧化合金,在 900℃ 以下具有良好的塑性和中等的热强度,适宜制造在 900℃ 以下长期工作的发动机主燃烧室、加力燃烧室零部件(图4)以及导向叶片等。但该材料常温下的变形抗力较大,零件回弹严重,对高



图4 旋压成形高温合金发动机机匣

温合金薄壁回转体零件,传统的卷焊及锻造机加方式存在强度低、可靠性差、浪费材料等缺点,采用旋压成形可以有效避免这些缺点。在高温合金强力旋压时要密切关注材料的组织性能特点,合理安排强力旋压工序,通过对坯料进行恰当的退火工序得到适合旋压

的毛坯,结合工艺试验和计算机数值模拟技术及理论分析,优化旋压工艺流程和工艺参数;分析成品件的组织性能。总结高温合金的旋压成形工艺参数与成品零件的几何形状和组织性能之间的规律。高温合金材料在旋压过程中加热温度的控制尤为重要,旋压温度过低,零件不贴模,且材料变形抗力特大,在毛坯板料边缘容易出现裂纹等缺陷,甚至毛坯拉裂,导致毛坯报废。

国内对镁合金的旋压成形进行了初步探索。镁合金的晶体结构是密排六方结构,滑移面少,室温下塑性成形困难。目前,镁合金的成形以铸造为主、尤其是压铸,成形零件的形状简单、尺寸精度低。但镁合金在再结晶温度以上塑性成形性能显著提高,由于成形的温度范围很窄,旋压成形又是在开敞的大空间下进行,所以,镁合金的旋压成形难度更大,更具有挑战性。国内对镁合金的旋压成形进行了初步工艺摸索,探索出镁合金旋压成形最佳的预热温度、成形温度,对不同温度下镁合金的减薄率、旋轮进给速度、旋压机床主轴转速进行了工艺试验,总结出不同成形温度对镁合金机械性能的影响规律,不同温

度、不同成形工艺参数对镁合金显微组织的影响。

钛铝合金是越来越成熟、应用越来越多的新型材料。这类材料,在航空发动机上得到了初步应用。Ti₂AlNb 是一种先进材料,该合金是近十几年开发的 TiAl 基金属间化合物,该合金比高温钛合金具有更高的使用温度、抗蠕变性能和高温强度,其密度和热膨胀系数显著低于镍基高温合金,是高性能发动机首选耐高温轻质材料。这类材料的常温塑性低,必须在高温下成形,且成形的温度范围比较窄,加温及控温难度大。这类零件目前的成形方法主要是锻造机加成形,材料浪费情况严重,对零部件的组织性能的提高也无益,国内对这类材料的旋压成形工艺进行了探索,对旋压温度、旋压后材料的组织性能进行了测定,为该类材料薄壁回转体零件在发动机上的广泛应用打下了良好基础。

我国旋压设备研制现状

我国的旋压设备制造历史应该追溯到 20 世纪 60 年代,鉴于当时的历史条件,旋压机床都是液压仿形的,控制精度较低,所采用电器、液压控制元件性能差,机床的整体性能及可靠性低。对于一些形状复杂、加工工序道次多、走刀轨迹复杂的零件,液压仿形旋压机床就暴露出加工效率低和其他一些功能上的缺陷。不过这类机床最大的特点就是经久耐用、抗冲击震动、抗负荷过载能力强,能够适用各种恶劣的工况,经过不断地维修整改,这些机床现在有不少仍在承担着大量的科研生产任务,30 多年来为我国的航空航天事业做出了贡献。

20 世纪 90 年代末期,随着计算机技术的发展,随着各种进口元器件的大量采用,在综合吸收已经研制开发旋压设备的基础上,设计制造出集国际上最先进的数控系统、液压系

统、机械及各种元气件于一身的旋压设备,国产旋压设备完成了由液压仿形到全数字控制的转变。这些设备的特点表现在以下几方面:

(1) 数控系统广泛采用国际上最先进、最流行的数控系统如西门子 840D,控制轴数多,控制精度高,性能稳定可靠。

(2) 液压系统采用伺服阀或比例伺服阀,频响高,全闭环控制。尤其是比例伺服阀,综合了比例阀和伺服阀的优点,成为数控旋压机床电—

液转换的最理想的控制元件。

(3) 主轴系统采用交流变频或直流调速,变频器采用进口元件,能够做到恒线速度控制。

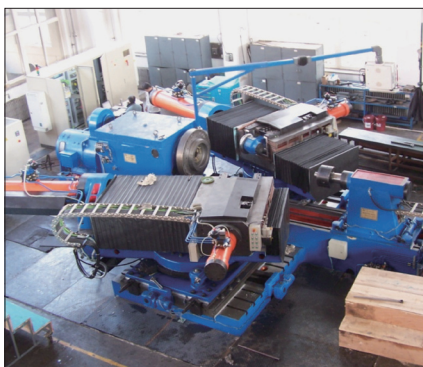
(4) 采用进口主轴轴承,进口滚动导轨等旋转传动部件,提高了整个设备的精度和可靠性。

(5) 光栅尺、位移传感器、旋转编码器等多种位移、位置反馈元件也采用国际高精度和高可靠性的品牌。

由于采用了国际上最先进的数控系统、液压系统、机械传动及控制



(a) 双旋轮旋压设备



(b) 三旋轮旋压设备



(c) 单旋轮旋压设备



图5 近几年我国研制的各类旋压设备

元件,结合自身的机械加工优势,国产旋压机床的整体水平已经达到国际 21 世纪初的水平。国产旋压机床的这种制造模式与国际上其他旋压机生产厂商是一致的,并且和进口旋压设备相比国产旋压机床具有价格优势、维修及售后服务优势、工艺服务优势。

20 多年来,我国共设计制造各类数控旋压机床百余台(图 5)。其中包括单旋轮普通旋压机床、双旋轮普通-强力旋压机床;三旋轮强力旋压机床;各类专用旋压机床如立式皮带轮旋压机床,铝合金气瓶、钢质气瓶收口专用旋压机床,封头成形旋压机床,风机零件成形翻边专用旋压机床,滚珠旋压机床及内旋压专用旋压机床。机床的加工范围为直径 $\phi 50\sim 2600\text{mm}$,可成形零件高度最大达 5m;就旋压机床的最重要参数径向旋压力来讲,单个旋轮的最大推力已经达到 1000kN。

大型立式数控强力旋压机床

随着飞行速度的提高、巡航里程的增大以及射程的提高,航空航天产业对零部件的规格要求越来越大,强力旋压机床的成形零件直径、旋轮推力、中心距等要求越来越大。国家在

制定“高档数控机床与基础制造技术”重大专项时,将大型立式数控强力旋压设备列入其中。

大型数控强力旋压机床与国内现有设备相比较具有以下特点:

(1)旋压机床的回转直径比目前我国已有旋压机床明显增加,回转直径达 2600mm,增加了旋压成形零件的加工范围;

(2)旋轮推力增大,我国现有旋压设备旋轮推力为 600kN,本项目研制旋压机床旋轮推力 1000kN;

(3)目前我国现有旋压机床大多为卧式结构,本项目研制旋压机床为立式结构,使得旋压机床主轴受力更加合理;

(4)全数字控制,控制方式先进,控制精度高,旋压机床的轴向、径向运动全闭环控制,并带有视频监控。

大型数控强力旋压机床的研制难点在于不但要有大型压力机床的巨大压力,还要有数控机床的高精度。大型数控强力旋压机不但具有大驱动扭矩及 1000kN 旋压力,而且其静态精度和动态精度指标达到高档数控机床的水平,可加工零件直径达到 2600mm,主轴转速 20~100r/min,回转直径可达 2600mm,设备总重量 600t 左右,高度约 13m,占地面积 18m × 20m。该设备也是亚洲最

大的旋压机床,该设备的成功研制将整体提高我国薄壁筒形零件的制造能力。

在大型立式数控强力旋压机的研制过程中解决了以下关键技术:超大吨位结构件强度与刚度分析、设计优化技术;大型数控强力旋压机液压伺服闭环驱动控制技术;数控系统中多轴液压驱动位置闭环同步控制;坐标零点、电液零点、活塞零点的位置定位。

大型立式数控强力旋压机的研制过程历时多年,期间还解决了主轴箱体铸造成型及机械加工技术、大型构件焊接技术、高精度大型主轴加工等现实问题,于 2012 年底机电液联合调试成功(图 6),并成功旋压出直径 2m 高 3m、壁厚 4mm 的超高强度钢大型筒体零件,所有精度指标均满足技术任务书要求。

大型数控强力旋压设备的研制成功打破了国外同类技术封锁,标志着我国大型高精度数控压力加工设备的设计制造迈上了一个新台阶。

展 望

旋压技术起源于我国,发展在欧洲。几十年来,我国的旋压工艺和旋压设备和发达国家存在不小的差距。但近 20 年来,随着航空航天产业的发展,我国在复杂型面和结构零件的旋压、难变形材料的旋压、高精度大型数控强力旋压设备的研制等各方面都取得了长足的进步,缩小了与发达国家的技术差距。旋压成形技术在成形壁薄、质轻、高强度、高精度、良好的抗疲劳性能的回转体零部件上的工艺优势不可替代。航空航天产业促进了旋压技术的工艺深化,给专用旋压设备的研制提供了契机。旋压产品的大规模生产对旋压机床的精度、功能性、可靠性及自动化程度提出了更高的要求,强力旋压技术在航空航天制造领域的地位将会越来越重要。 (责编 深蓝)



图6 1000kN大型立式数控旋压机及其加工的零件