

大型立式强力旋压机的研制

Research of Vertical Power Spinning Machine

中航工业北京航空制造工程研究所 王雅君 林春庭 李继贞

[摘要] 航空、航天和兵器工业的迅猛发展,迫切需要能加工大口径、高强度、特种合金材料的高精度、薄壁管形件的旋压机床。为满足国内用户需求,开发研制了100T立式强力旋压机床,为重型强力旋压机的研制做出有益探索。

关键词: 强力旋压 立式 数控 电-液伺服

[ABSTRACT] With the development of aeronautic technology, aerospace technology and weapon industry, the high-accuracy spinning machine that can spin the high strength special alloy materials into the thin tubular work-piece with large-diameter is strongly demanded. In order to meet the need of domestic customers, the research and development about spinning machine is carried out and finally the 100T Vertical Power Spinning Machine is manufactured. The success of research and development of high-accuracy spinning machine makes a great contribution to our military industry.

Keywords: Power spinning Vertical spinning CNC Electric-hydraulic servo

旋压技术是现代先进制造技术的重要组成部分,为塑性加工技术的一个重要分支,是综合了锻造、挤压、拉伸、弯曲、环轧和滚压等多种特点的一种少切削的先进加工技术,是局部连续塑性成形工艺,具有高柔性、低成本等优点,是适合多种金属材料快速成形高精度薄壁类空心回转体零件的先进制造技术,在航天、航空、兵器、化工、机械、电子和核工业等制造业中都得到了广泛的应用。

在普通旋压技术的基础上迅速发展起来的强力旋压加工技术,被认为是制造薄壁空心筒形结构件最有效的制造技术之一。通过强力旋压,不但能有效地改变毛坯的形状、尺寸和性能,同时还可显著地改变其壁厚(减薄)。由于强力旋压加工工艺的先进性、经济性和实用性,且该工艺具有变形力小,工装简单,加工表面粗糙度低,节约原材料等诸多特点而得到了快速发展,并已日趋成熟,已经成为金属压力加工中的一个新的领域,在许多方面是机械切削加工技术所不能相比的,因而受到

制造业高度关注和重视。

随着我国航空、航天、火箭、导弹、兵器等军事工业和通用机械、汽车等民用工业的迅猛发展,对大型数控强力旋压机床的需求极为迫切,而西方工业发达国家都将此类设备列为战略性物资严加管理,严禁向我国出口。为此,大力发展金属强力旋压加工工艺,开发研制高档数控强力旋压机床,对满足国内军民工业需求,推动我国旋压加工技术发展和打破西方工业发达国家技术垄断等都将具有特殊的重要意义。

1 我国大型数控旋压机床发展与应用现状

最近20年来,旋压成形加工技术得到创新性持续发展与进步,无论在机床设计制造、基础理论与旋压工艺研究,以及工程应用技术研究等方面都有很大的发展,出现了许多新型高精度数控旋压机床和滚返式旋压机床,并迅速得到广泛工业应用,目前正向着系列化和标准化方向发展。诸如美国、德国、日本、西班牙和加拿大等工业发达国家已生产出先进的标准化程度很高的系列化数控旋压设备,这些旋压设备已基本定型,旋压工艺稳定,产品规格品种齐全,应用范围日益广泛。如世界著名的旋压机床制造厂家德国LEIFELD公司的ST系列强力旋压机床可作为一典型实例。该公司ST系列强力旋压机床,功率强劲,适用于制造高精度薄壁空心筒形结构件,能旋压长度超过10m的工件,管/筒壁厚最大可减少90%以上。其新近推出的ST 650 H 9100-4RS,具有可变的成形加工长度、高的制造质量、应用的灵活性和生产的经济性(如旋压加工34CrMo4材料管形结构件,每小时可加工两根以上),工件正向旋压成形长达9m,反向旋压成形长达13m以上,最大轴向行程9100mm,可承载重达4t之工件。又如美国最大400T双轮立式旋压机可对任意合金筒形件进行加工,对某些精密件收口壁厚公差可达 $\pm 0.38\text{mm}$,表面粗糙度 $Ra3.2$ 。日本东芝机械公司的高效旋压机将液压仿形与数控相结合来热旋各种形状的高压气瓶。目前,国际先进水平的大型数控强力旋压机床,可旋压最大直径6m的零件,旋轮压力可高达到数百吨。

我国的旋压加工技术基本上始于20世纪60年代

初,经过几十年的努力,开发研制成功一些旋压加工设备,使得旋压加工技术应用日益广泛。20世纪90年代初之前,国产旋压机床主要为基于液压仿形技术为主,20世纪90年代之后才开始进行数字控制技术的旋压机床开发研制,产品多为中小规格中低档范畴,在旋压推力、回转直径、零件长度、控制精度、自动化水平和设备可靠性等许多方面和与国际先进水平相比都存在有较大差距,远不能适应我国国民经济发展和军事业发展的需要。特别是在基础理论、旋压工艺和工程应用技术研究方面至今仍然是一个薄弱环节,这已成为影响我国高中档数控旋压设备使用效率和旋压加工技术进一步推广应用的制约因素。

最近10多年来,通过产品引进、消化、吸收和创新,国产数控旋压成形设备制造技术已取得了突破性进展,国内一些数控旋压成形设备制造商和研究所开发研制出新型数控强力旋压机床,其精度和性能都已接近或达到了国外先进水平。但在高档大型数控强力旋压机床设备设计制造、工程应用技术领域与国际先进水平相比仍有较大差距,远不能适应我国国民经济发展和国防事业发展的迫切需求。

虽然近些年来我国陆续从国外引进了多台数控旋压机床,但多为小型旋压机床(其加工直径大多在650mm以下,单轮推力在300kN以下),远无法满足国内航天、航空和兵器制造业用户对能加工口径大于800mm以上大型数控强力旋压机床的迫切需求。

因此,大型数控强力旋压机床已成为制约我国军事业,尤其是航天航空各种大型薄壁空心筒形结构件加工的瓶颈之一,开发研制具有自主知识产权的高档大型数控强力旋压机床不仅可以增强旋压工艺技术的开发能力,而且对于增强国防安全和提高威慑能力都将具有重要意义,国家《装备产业技术进步和技术改造投资方向(2010年)》也已将高档大型数控强力旋压机床研制作为重点大力支持的领域。

中航工业北京航空制造工程研究所在多年成功开发研制数控强力旋压机床技术积累的基础上,为满足航天工业总公司下属某制造企业急需一台大型数控强力旋压机床来满足型号产品生产的需求,开发研制了一台立式三旋轮100T大型数控强力旋压机床(为叙述方便后文将之简称为100T强旋机),为国内在重型旋压设备研制方面做出有益的探索。

2 大型立式强力旋压机的开发研制

2.1 整体结构布局设计

开发研制的100T强旋机适用于超高强度钢、不锈钢及有色金属等材料工件,可用于工件直径范围为

1800~2500mm、最大工件长度为2500~4000mm的薄壁空心筒形工件的强力旋压加工。根据加工对象零件结构的特点,机床整体结构设计采用了典型的立式、三旋轮120°均布结构,并由3个立柱、3个横向滑枕、3个纵向滑板、工作台和立柱底座等部件组成,采用组合式整体框架结构,见图1。从图1可看出,该机床设计机构紧凑,造型美观。待旋压加工工件套在芯模上,通过T型螺栓固定在工作台面上,而功率为627kW的主轴电机与减速箱装配后再与主轴箱相连接,为工作台旋转提供动力,其工作旋转速度为10~100r/min。横向滑枕与纵向滑板装配组成一个运动系统,3个运动系统分别安装在3个立柱上,立柱固定在底座上。

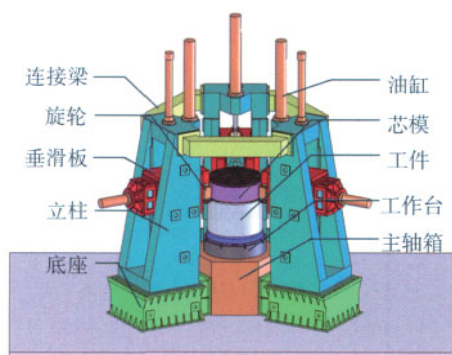


图1 机床主体示意图

Fig.1 Spinning machine diagram

主轴箱、底座和立柱采用整体铸钢件或焊接件,连接梁与立柱具有足够的强度和刚度,以保证在重负荷运行时的工作稳定可靠。在最大负荷下,其退让量(旋轮工作面与芯模间的最小间隙与旋后工件厚度的差值)应小于0.5mm。

3个旋轮在纵向和横向进给均采用全闭环控制,位置检测采用分辨率为0.001mm的高精度光栅尺,采用液压驱动,因而可提供高驱动力。旋轮纵向工作行程可达2500mm,旋轮横向工作行程达400mm,100T强旋机设备控制系统采用先进的西门子840D数控系统。3个旋轮纵向移动或横向移动,通过功能强大的840D数控系统可实现同步运动控制,并且在纵、横向均可实现正反两方向进行快速/慢速进给,同时可实现等效于两轴联动的旋轮纵横向联动控制。

2.2 有限元计算与结构优化

由于数控旋压机的运动形式和数控金属切削加工机床相类似,通常参照金属切削机床的设计方法进行数控旋压机设计,在小吨位旋压机上一般不存在问题。但是对大型强力旋压机床而言,其主轴轴向与径向的受力状态恶劣,如该100T强旋机纵向推力700kN/轮,旋轮横向推力1000kN/轮,导致对机床主轴轴向与径向承载能

力的要求远远大于普通金属切削机床,这是强旋机设计难点所在,为此需要在强旋机整体结构与关键零部件结构设计中充分考虑这种影响,并进行相应的优化设计。

2.2.1 有限元模型参数化

参数化是结构优化和多工况、变结构快速分析的前提。为实现快速标准化的分析,在 ANSYS 环境下对旋压机各零件结构进行参数化控制,图 2 为立式强立 CNC 旋压机全参数化有限元模型,任意改变某一变量或变量组合可快速形成一新的计算方案。

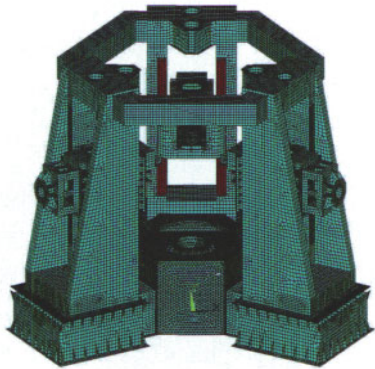


图2 立式强力CNC旋压机的全参数化有限元模型

Fig.2 Finite element model of vertical power CNC spinning machine

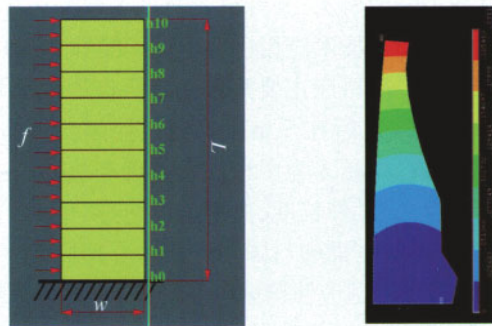
2.2.2 旋压机整体框架结构优化

优化设计是一种搜寻最优设计方案的技术,是现代设计方法的重要内容之一,旋压机设计过程中自始至终贯穿了优化设计的思想,比如旋压机立柱断面可以简化为图 3 (a) 承受均布荷载的梁结构,通过优化确定立柱的最佳形状和最优材料分布。悬臂梁承受均布载荷,在重量不增加的前提下,以变形极小化为目标,优化梁各处高度 $h_0, h_1, h_2, \dots, h_{10}$ 的最佳分布,图 3 (b) 为经参数优化后得到的立柱形状,与原始结构相比,优化后立柱重量未变,但变形从 0.55mm 减小到 0.23mm。图 4 为旋压机原始结构与最终优化结构对比,在保证旋轮退让量小于 0.5mm 前提下优化后旋压机总重量仅为原始结构重量的 56%,优化效果非常明显。

2.2.3 主轴部件结构设计优化技术

100T 强旋机的主轴驱动采用直流变频调速器驱动直流电机,并通过减速箱取得大扭矩和实现工作台回转,见图 5。

旋压机选用功率为 627kW 的直流电动机作为主轴回轮的主动动力源,通过西门子公司 6RA70 系列全数字直流调速装置来控制直流电机的启动、运行、制动及电机的运行状态的监控与参数数据采集。采用独立的电机控制柜系统,既可以独立操作与监控,也可通过总线与数控系统相连接,实现远程操作、参数修改与状态



(a) 初始立柱形状及定义的优化变量 (b) 参数优化后的立柱形状

图3 定义的优化变量及优化后的立柱形状

Fig.3 Optimized variable and shape of column after parameter optimization

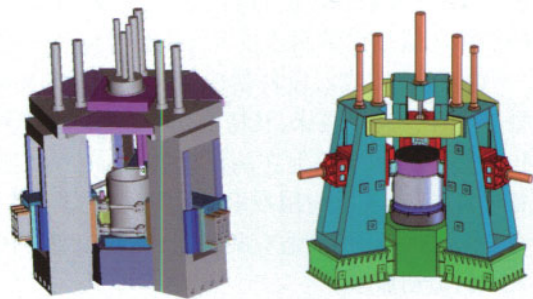


图4 旋压机原始结构与最终优化结构

Fig.4 Initial configuration and optimized configuration of spinning machine

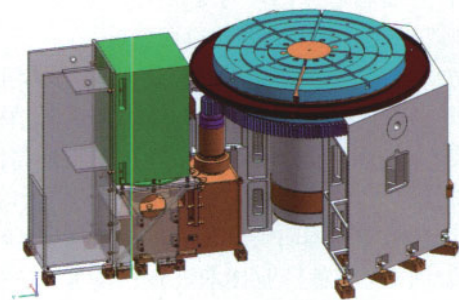


图5 主轴传动示意图

Fig.5 Spindle axis drive diagram

监控。直流电机与减速箱装配后与主轴箱相连接,带动工作台旋转实现正反点动、正反连续转动。

减速箱通过机械齿轮可实现两级换档,达到调整变速范围的目的(低速/高速)。通过直流调速装置在每个变速范围内又可实现无级变速,以满足不同直径的产品对主轴转速的不同要求。通过有限元计算优化主轴箱的结构设计,满足重载状态下对工作台的精度要求。

2.3 大型立式强力旋压机液压驱动及其控制技术

由于旋压机的重载特性,旋轮座的径向驱动力和轴向驱动力很大,只能采用液压驱动方式;采用数控控制方式来满足机床旋压加工的高精度要求。

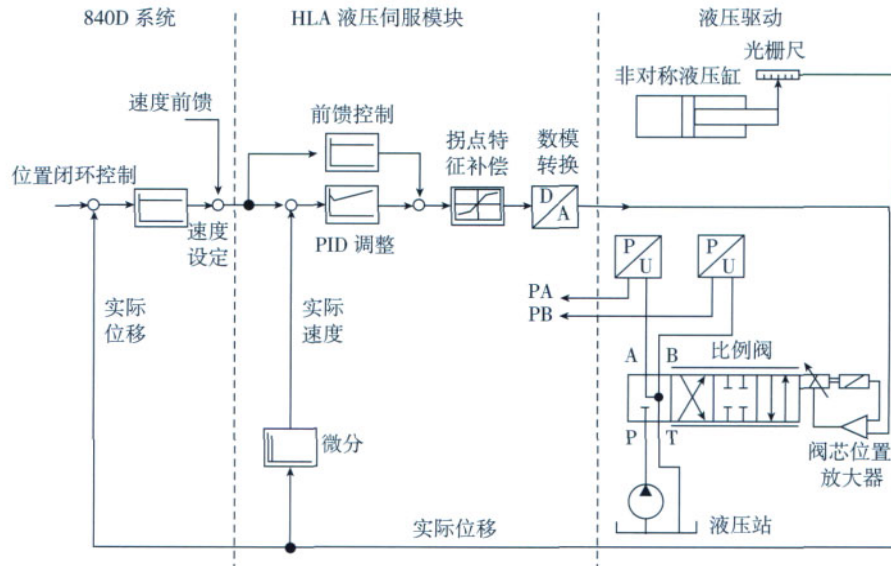


图6 电-液伺服控制原理示意图

Fig.6 Electric-hydraulic servo control system diagram

2.3.1 控制系统的设计

100T 强旋机电控采用西门子公司 840D 高档数控系统,由于其采用模块化结构设计,配置灵活且方便。系统内置 S7-300 PLC 系统,通过模块化的输入/输出模块,实现开关量和模拟量的采集和控制。针对液压驱动方式中液压油的不可压缩性导致系统刚性差、电液控制非线性、液压元件频响低等特性,西门子 840D 数控系统配置了 HLA (线性液压驱动) 模块,专为电-液伺服驱动方式设有可调整参数,如 PID 前馈控制、液压死区补偿、非线性补偿、重力补偿等,可通过友好的人机界面方便地进行设置与修改,与选用的伺服阀和油缸相匹配,比较容易达到动/静特性的要求。图 6 所示为电-液伺服驱动控制原理示意图。

旋轮的纵向和横向进给均采用闭环控制,位置检测采用高精度的光栅尺,分辨率可达到 0.001 mm,在采用全闭环位置控制和速度控制前提下,采取提高检测的分辨率以及调节放大器 PID 参数的方法,在保证系统稳定的条件下,可提高系统的控制精度。3 个旋轮在横向和纵向上都可以单独运行,也可以同步运行。

2.3.2 液压系统的设计

针对旋压机 3 个旋轮座的位置控制要求,液压设计中分别采用 3 套液压系统进行控制,每套液压系统都包括一个旋轮的纵向和横向位置伺服系统(包括横向和纵向各自的截止阀、比例伺服阀、伺服油缸和光栅尺等),由一个单独的柱塞式变量泵提供动力源。每套液压系统中油缸的参数都经过流量和强度核准计算、仿真分析及计算。

2.3.3 辅助系统的设计

100T 强旋机辅助系统主要包括:

- (1) 3 个旋轮的横向和纵向位置伺服系统的先导油由一个单独的柱塞式变量泵提供,以保证控制稳定。
- (2) 对于纵向位置,在每个伺服油缸的出口配置了液控单向阀以防止停机时下滑。
- (3) 专门设计了旋轮座平衡液压系统以抵消旋轮座的自重对伺服控制精度的影响。
- (4) 设计了专门的液压机构以保证在紧急停机状况下旋轮在横向位置后退以保护旋轮、芯模和工件。
- (5) 为旋轮横向和纵向的运动设计了大流量的润滑系统以保护驱动系统。
- (6) 设计了多功能操作控制台,控制台上配有西门子的人机界面、九思易的触摸屏工控机,以及多个视频监控监视器,实现了旋压机床的操作控制、故障诊断、动态监控和视频监控等功能,方便了设备的使用、观察以及旋压加工过程的监控。
- (7) 为旋轮设计了主动自旋转功能以避免在旋压开始时损伤旋轮和工件表面。

3 结束语

我国工业生产,尤其是航空、航天、兵器事业的迅速发展,越来越多的零部件需要采用旋压工艺成形,国内对大型数控强力旋压机床的需求旺盛,专用旋压机需求量大,多功能旋压机应用广泛,特殊用途旋压机有待进一步开发,研制的 100T 立式强力旋压机在这方面做出了有益的探索,为从事旋压机设计开发者具有借鉴意义。

(责编 晓立)