

项目名称:	大型轻质、高强筒形构件旋压设备与工艺
主要完成人:	李志强 李继贞 韩冬 刘旭东 王海涛 关大力 刘德贵 杨延涛 李初晔 魏建华
主要完成单位	中国航空制造技术研究院 西安航天动力机械有限公司 浙江大学

项目简介

固体火箭发动机筒体是战略导弹和运载火箭的关键构件。筒体尺寸越大，装药量越多，射程和运载能力越大。筒体精度越高，弹体飞行姿态控制精度越高，打击精度和入轨精度越高。

战略导弹和运载火箭发动机筒体的制造亟需大型强力旋压设备。旋压是固体火箭发动机金属筒体最有效的整体成形方法，我国原有的旋压设备无法满足需求，西方国家明令禁止出口到我国，必须立足自主研发。

大型强力旋压设备与工艺研制面临受力失衡、变形失稳、成形失准三大挑战。在“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项的支持下，项目团队突破了旋压成形工艺、设备结构设计、精确协同控制等技术瓶颈，研制出成套大型立式强力旋压设备与工艺，实现了大尺寸高强材料固体火箭发动机筒体的高精度整体成形，主要技术创新包括：

(1) 发明了动态错距旋压工艺。通过三旋轮运动轨迹的动态控制，避免了传统错距旋压引起的芯模与筒体受力失衡，进而解决了局部开裂、表面损伤和变形不均匀等问题，并提出了基于壁厚监测的动态错距旋压工艺闭环控制方法，完成了 $\Phi 2400\text{mm} \times 4000\text{mm}$ 筒形构件的制造。

(2) 提出了大型立式强力旋压设备的新结构。构建了三立柱与横梁预应力连接的顶部开敞框架结构，克服了设备刚度和工作空间的矛盾，解决了旋压过程中强力集中载荷引起的设备框架变形失稳问题。集成了主轴耦合的顶出机构和基于均化载荷的卸料装置，提高了旋压过程的可靠性与稳定性。

(3) 发明了旋压力自适应协同控制方法。提出了基于线性液压驱动的电液伺服控制和多轴协同数字控制技术，发明了旋压力自适应协同控制方法，通过旋压过程中力、变形和进给比的自适应补偿与调整，解决了大尺寸薄壁筒体成形失准问题，实现了超高强度钢筒体壁厚误差 $< 0.15\text{mm}$ ，直径误差 $< 0.4\text{mm}$ ，直线度偏差 $< 1.0\text{mm}$ 。

本项目曾获中国机械工业科学技术一等奖，获得授权发明专利 8 项、软件著作权 7 项，发表论文 9 篇，编制企业标准 2 项。经专家组鉴定，项目总体达到国际先进水平，其中旋压力协同控制技术和动态错距旋压成形技术达到国际领先水平。

项目研制的大型立式强力旋压设备与工艺已应用于战略导弹固体火箭发动机筒体和大型加油机铝合金油箱筒体的批量生产，为我国发展新一代武器装备提供了技术保障，具有重大的军事意义；应用于长征十一号运载火箭固体发动机筒体和大型生箔机阴极辊钛合金筒体的生产，为我国民用航天事业和电子产业发展提供了技术支撑，具有重要的社会和经济效益。项目形成的大型立式强力旋压设备与工艺的全套解决方案，为更大规格旋压设备的研制奠定了技术基础，进而提升了我国关键制造装备的自主保障能力。2016 年至今，累计产值 5.2 亿元。

客观评价

1. 鉴定意见

2018年1月26日，中国航空学会在西安组织召开“大型轻质、高强筒形构件旋压设备与工艺”科技成果鉴定会。由**胡正寰院士担任主任，钟掘、段正澄、谭建荣、侯晓五位院士等专家组成的鉴定委员会**认为，该项目技术难度大、集成度高、创新性强，具有多项自主知识产权。成果已应用于战略导弹和固体运载火箭等战略武器的研制生产，具有重大的军事意义和显著的社会效益。该项目**总体达到国际先进水平，其中旋压力协同控制技术和同步进给—动态在线错距旋压成形技术达到国际领先水平。**

2. 课题验收结论

2015年12月1日，“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项实施管理办公室组织技术专家对承担的“大型数控强力旋压机”课题（课题编号：2011ZX04002-141）进行了验收，验收专家组认为课题完成了合同任务书规定的研究内容，达到了合同书规定的考核指标；该项目研制了大型数控强力旋压设备，并在西安航天动力机械厂实现了低碳钢、超高强度钢筒体产品的生产应用；提交的验收材料完整齐全，符合验收要求。

2013年9月2日，中国航空制造技术研究院（原北京航空制造工程研究所）研制的“大型立式CNC强力旋压机”在现场通过了西安航天动力机械有限公司（原西安航天动力机械厂）的用户验收。用户认为该设备结构简洁、布局合理、功能齐全、便于维护、强度高、刚性好、具有同步进刀、错距旋压、旋压力动态显示、操作智能化、旋压力自动调节等特点，**特别是旋压力自动调节功能目前属国内外同类产品首创，填补了旋压工艺上的空白。**设备静态精度、动态精度和同步精度符合技术要求，机械、电子及液压系统运行正常工作稳定，各项功能正常，旋压出的零件，满足要求。

3. 检验报告结论

国家机床质量监督检验中心于2014年12月24日至12月26日，根据GB 17120-2012、GB 5226.1-2008、Q/CYJSB0005-2013、Q/CYJSB0006-2013等标准和《大型数控强力旋压机》科技重大专项课题任务合同书等，对其研制的编号为KZ11230111601的SY-100L型大型数控强力旋压机进行了委托检验，**所检项目符合标准、科技重大专项课题任务合同书等要求。**

4. 用户评价

设备用户单位西安航天动力机械有限公司在应用证明中评价：“大型立式CNC强力旋压机”自2013年9月交付至今，主要用于大型薄壁回转体筒体旋压成形研制与生产，多年的使用证明该设备运行稳定、性能可靠，完全满足生产需求。我单位利用该设备完成了数百件超高强度钢战略导弹和运载火箭固体发动机筒体的研制，旋压成形的筒体精度高、尺寸一致性好、质量稳定，产品合格率提高了32%，制造周期缩短了41%，获得了非常好的技术经济效益。利用该设备完成了航空大型加油机油箱铝合金筒体和生箔机阴极辊钛合金筒体的生产，经济效益显著。

5. 曾获科技奖励

2018年度，该项目获中国机械工业科学技术一等奖。

应用情况和效益

(1) 应用情况

项目研制的大型强力旋压设备是旋压成形类大型基础制造装备从无到有突破的具体体现，填补了我国大型数控强力旋压机的战略空白。该设备 2013 年 9 月在西安航天动力机械有限公司投入使用，四年多的使用证明，该设备运行可靠、性能稳定，旋压成形零件的精度高、质量稳定，完全能够满足设计的各项技术指标要求。

该设备在战略导弹固体火箭发动机和固体运载火箭发动机筒体的生产中得到了应用，应用于直径 2000mm 的高强钢筒体的批量生产。旋压成形筒体的强度、精度和使用可靠性得到大幅度提高，产品合格率提高了 32%，制造周期缩短了 41%，具有重要的军事效益，同时取得了显著的社会和经济效益。

该设备应用于大型加油机油箱铝合金筒体的生产，实现了直径 2400mm 铝合金薄壁筒体的整体成形。

该设备应用于大型生箔机阴极辊钛合金筒体的生产，

主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用技术	应用及规模	应用起止时间	单位联系人/电话
1	西安航天动力机械有限公司	旋压设备与旋压工艺	超高强度钢、铝合金、钛合金筒体批量生产	2013 年 9 月至今	杨延涛 13991839215

(2) 推广应用情况

大型强力旋压设备和旋压工艺在航空发动机的机匣类零件、航天运载工具的筒体零件、船舶潜艇的大型压力容器等武器装备零部件制造方面具有广泛的应用前景，在核反应堆的回转构件、化工高压容器和其他民用领域压力容器的制造方面亦具有较高的推广价值。通过拓展设备和技术的应用领域，可实现大直径、高性能筒体制造产业的装备升级和更新换代。

(3) 经济效益和社会效益

大型数控强力旋压机是我国航空、航天、核工业、船舶工业发展所必需的基础制造装备，一直属于西方国家对我国的禁运项目，也是长期制约我国军工事业尤其是航空航天零部件加工技术发展进步的瓶颈之一。本项目的研制成功，是在国家科技重大专项支持下，旋压成形类大型基础制造装备从无到有突破的具体体现，可为大型薄壁回转体以及大型压力容器壳体类零件提供大型数控强力旋压设备与旋压工艺等全套解决方案，填补我国大型数控强力旋压机的战略空白，也标志着我国在大型薄壁回转体金属结构件制造技术领域的研制水平达到新的高度，为我国国防工业发展和国民经济发展提供技术支撑，具有显著的军事和社会效益。

项目研制的大型立式强力旋压设备与工艺已应用于战略导弹固体火箭发动机筒体和大型加油机铝合金油箱筒体的批量生产，为实现战略武器的自主保障能力和提升战斗机作战半径及打击能力提供了核心技术，为我国发展新一代武器装备提供了技术支撑，具有重大的军事意义。应用于长征十一号运载火箭固体发动机筒体和大型生箔机阴极辊钛合金筒体的生产，为我国民用航天事业和电子产业发展提供了技术支撑。2016 年至今，累计产值 5.2 亿元，具有重要的社会 and 经济效益。

项目研制的大型强力旋压设备和工艺可推广应用于航空、核工业、船舶工业、汽车行业大型薄壁回转体零件的制造，推动旋压结构件在大飞机、飞机发动机和大型压力容器上的应用，具有巨大的经济效益。

大型强力旋压设备和工艺属于典型的军民两用技术，项目成果在武器装备研制和民用领域中的成功应用，对于推动我国高端装备及制造技术的军民融合发展具有重要的意义。

主要知识产权和标准规范等目录

知识产权(标准)类别	知识产权(标准)具体名称	国家(地区)	授权号(标准编号)	授权(标准发布)日期	证书编号(标准批准发布部门)	权利人(标准起草单位)	发明人(标准起草人)	发明专利(标准)有效状态
发明专利	错距旋压筒形件的工艺方法	中国	ZL201310210281.9	2015年4月8日	第1626482号	中国航空工业集团公司北京航空制造工程研究所	李继贞、刘德贵、关大力、张宁、王健飞等	有效
发明专利	用于大型立式旋压机的卸料装置及方法	中国	ZL201310261545.3	2015年4月8日	第1625584号	中国航空工业集团公司北京航空制造工程研究所	刘旭东、王海涛、李中凯	有效
发明专利	异步错距旋压加工方法	中国	ZL201510939283.0	2017年8月29日	第2603140号	西安航天动力机械厂	曹学文、写旭、杨延涛、牟少正、罗卉等	有效
发明专利	一种反旋成形圆筒的壁厚监测装置及监测方法	中国	ZL201310278339.3	2015年9月23日	第1797220号	西安航天动力机械厂	龚军善、杨延涛、赵琳瑜、杨建峰、王军锋等	有效
发明专利	一种用于筒形件旋压的套管模具及其使用方法	中国	ZL201510864489.1	2017年4月12日	第2441711号	西安航天动力机械厂	温树斌、杨延涛、郭强、杨琴文、张岩等	有效
发明专利	一种对轮旋压工装	中国	ZL201310676320.4	2015年12月2日	第1871137号	西安航天动力机械厂	曹学文、杨延涛、张立武、韩冬、李增辉等	有效
发明专利	一种实现液压机超低速稳定运行的电液控制系统	中国	ZL201510330259.7	2016年9月28日	第2248510号	浙江大学	魏建华、张强、熊义、冯瑞琳	有效
发明专利	基于伺服阀并联的大流量高频响电液振动装置及控制方法	中国	ZL201110127418.5	2013年5月1日	第1189915号	浙江大学	魏建华、方锦辉、孔晓武	有效
软件著作权	大型数控强力旋压机人机界面监控软件V1.0	中国	2014SR084772	2014年6月24日	软著登字第0754016号	中国航空工业集团公司北京航空制造工程研究所		有效
软件著作权	大型数控强力旋压机工艺数据库软件 V1.0	中国	2014SR084762	2014年6月24日	软著登字第0754006号	中国航空工业集团公司北京航空制造工程研究所		有效

主要完成人

姓名：**李志强**

排名：1

行政职务：院长

技术职称：研究员

工作单位：中国航空制造技术研究院

对本项目技术创造性贡献：是创新点 2 和创新点 3 的主要完成人，提出了创新的大型立式旋压设备结构方案，细化设备技术要求和可旋压成形的零件精度要求，完成项目从设计、制造、装配到工艺试验的总体策划。提出了旋压过程三个旋轮受力动态感知、旋轮位置实时分析、进给比动态调整自主决策、误差补偿的精准执行，实现了大型筒体构件壁厚和直径等尺寸的精确控制。

曾获国家科技奖励情况：2008 年度“飞机整体壁板数控喷丸成形技术研究”项目获得国家科学技术进步二等奖，排名 6，证书编号 2008-J-24202-2-09-R06。

姓名：**李继贞**

排名：2

行政职务：无

技术职称：研究员

工作单位：中国航空制造技术研究院

对本项目技术创造性贡献：是创新点 1 和创新点 2 的主要发明人，发明了同步进给-动态错距旋压的工艺方法，解决了旋压成形过程起旋阶段旋轮受力不平衡的问题。负责超高强度钢筒形构件强力旋压成形工艺方案制定和旋压试验的实施，制定合理旋压成形参数，实现大直径筒体的高精度成形。负责铝合金筒形构件强力旋压工艺方案制定，解决旋压过程中材料急剧硬化导致开裂的问题。

曾获国家科技奖励情况：无

姓名：**韩冬**

排名：3

行政职务：副总经理

技术职称：研究员

工作单位：西安航天动力机械有限公司

对本项目技术创造性贡献：是创新点 1 的主要完成人，提出了旋压工装新的设计方法，负责超高强度钢筒体旋压成形工艺路线制定，负责作业指导书的编制，参与超高强度钢筒体强力旋压成形试验过程，实现大直径筒形件的高精度旋压成形。

曾获国家科技奖励情况：无

姓名：**刘旭东**

排名：4

行政职务：无

技术职称：研究员

工作单位：中国航空制造技术研究院

对本项目技术创造性贡献：是创新点 2 的主要完成人，完成总体结构方案设计，完成总体结构模型设计及结构优化设计。完成设备总图设计及地基图设计，完成立柱部件设计。

曾获国家科技奖励情况：无

姓名：**王海涛**

排名：5

行政职务：无

技术职称：高级工程师

工作单位：中国航空制造技术研究院

对本项目技术创造性贡献：是创新点2的主要完成人，发明了用于大型立式旋压机的卸料装置及方法。作为项目主管设计和现场装配总负责，协调各方面技术工作的同时，全面负责项目零部件的加工制造、总体装配、整机调试、技术改进等工作。负责编写制订了《大型数控强力旋压机》地方标准和集团标准，为重型旋压装备的研发提出了依据、规范和要求。。

曾获国家科技奖励情况：无

姓名：关大力

排名：6

行政职务：无

技术职称：研究员

工作单位：中国航空制造技术研究院

对本项目技术创造性贡献：是创新点3的主要完成人，创建了“人机界面监控软件”、“加工过程数据记录软件”、“多媒体信息库软件”、“工艺数据库软件”4项控制软件，负责电气设计、电气安装、电气调试、维修服务等技术工作，协同工艺人员实现了两项旋压工艺控制的重大技术创新。

曾获国家科技奖励情况：无

姓名：刘德贵

排名：7

行政职务：无

技术职称：高级工程师

工作单位：中国航空制造技术研究院

对本项目技术创造性贡献：是创新点1的主要完成人，提出了旋压过程旋轮轨迹控制方法，负责大直径超高强度钢筒形件旋压工艺参数优化，提高旋压零件的尺寸精度。完成了大直径铝合金薄壁筒体旋压成形工艺试验，解决了旋压过程中开裂、起皱等问题，实现飞机油箱筒体的整体、高精度成形。

曾获国家科技奖励情况：无

姓名：杨延涛

排名：8

行政职务：无

技术职称：高级工程师

工作单位：西安航天动力机械有限公司

是创新点1的主要完成人，提出了异步错距旋压和筒体壁厚检测方法，提出了旋压成形新的工装设计方法，参与制定超高强度钢筒形件强力旋压成形工艺方案，完成大型筒体旋压工艺试验。

曾获国家科技奖励情况：无

姓名：李初晔

排名：9

行政职务：无

技术职称：高级工程师

工作单位：中国航空制造技术研究院

对本项目技术创造性贡献：是创新点 2 的主要完成人，提出形质灵敏度优化技术，对旋压机的主要部件进行材料密度拓扑优化，提高了材料利用效率和结构性能。提出了参数化多约束大型旋压设备建模方法，建立起新产品从概念设计阶段到全参数性能优化阶段的快速、自动分析。提出节点定向位移耦合技术，在静力学范畴内将接触面间的非线性约束问题分解为线性问题，提高了大型旋压设备的计算和设计效率。

曾获国家科技奖励情况：无

姓名：**魏建华**

排名：10

行政职务：无

技术职称：教授

工作单位：浙江大学

是创新点 3 的主要完成人，开发了基于分段模型补偿电液控制技术、液压动态平衡技术解决了大惯量重力负载下大型强力数控旋压机长行程精确伺服控制和高频往复运动控制难题，负责大型数控强力旋压机液压伺服系统自主开发设计制造、装配调试，实现大型多轴液压系统高精度控制。

曾获国家科技奖励情况：2012 年度“盾构装备自主设计制造关键技术及产业化”项目获得国家科学技术进步一等奖，排名 5，证书编号 2012-J-216-1-01-R05。

主要完成单位及创新推广贡献

单位名称：**中国航空制造技术研究院**

单位贡献：2016年8月，中国航空工业集团公司以北京航空制造工程研究所为基础，组建了中国航空制造技术研究院（以下简称制造院）。制造院主要开展以航空武器装备为主的航空材料、制造工艺、专用装备等基础应用和工程转化研究，为飞机、发动机研制和航空工厂的技术改造提供先进制造技术和工艺装备。同时为航天、电子、兵器、交通、船舶等领域提供先进制造技术。制造院共承担9项、参加8项国家“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项的研究，为提升我国高档数控机床基础能力和国产化研制能力作出突出贡献。制造院自60年代末在国内率先开展旋压工艺与装备的研究，开发了单旋轮、双旋轮、三旋轮的卧式、立式系列化旋压设备共计50余台套，广泛应用于航空、航天、汽车等领域。制造院作为第一完成单位，负责项目总体技术方案制定及技术内容的实施。针对高强度、大尺寸、高精度固体火箭发动机筒体旋压成形难题，与用户单位和高校协同攻关，发挥产学研用和集成创新的优势，发明了动态错距旋压工艺，创建了大型立式强力旋压设备新结构，提出了旋压力自适应协同控制方法，研制出大型立式强力旋压设备，实现了 $\Phi 2400\text{mm}\times 4000\text{mm}$ 超高强度钢筒体的高精度成形。该完成单位的项目团队围绕旋压成形设备和工艺发表了学术论文9篇，获发明专利授权2项，获得软件著作权7项。

单位名称：**西安航天动力机械有限公司**

单位贡献：西安航天动力机械有限公司在强力旋压工艺技术与产品应用方面一直处于国内领先地位，在大型超高强度金属壳体旋压成形技术、大型复杂薄壁构件精密旋压、钛合金和铝合金复杂构件旋压成形和技术开发、民用大型无焊缝钛筒以及大型封头旋压成形等工程应用研究方面具备突出的技术优势和鲜明的国防特色。公司多次承担国家级航天科技集团公司重大工艺技术攻关项目。“大型轻质、高强筒形构件旋压设备与工艺”项目是“大型数控强力旋压机”重大科技专项课题的研究成果。在该课题研究过程中，西安航天动力机械有限公司全程参与了该设备的设计、制造、安装和调试，并组织实施了大型超高强度钢筒形件立式旋压工艺实验研究，改进完善了大型超高强度钢筒形件立式旋压工艺、工装参数优化方案，形成了相关工艺文件及标准；同时，公司组织实施的大型立式旋压大型超高强度钢筒形件在战略、宇航运载型号上应用的评审活动，并顺利通过评审，为该旋压设备与相关工艺最终应用奠定了坚实基础。

单位名称：**浙江大学**

单位贡献：浙江大学，作为我国流体动力和机电系统领域一流的教学科研基地和研究机构，瞄准国家重大战略和学科发展前沿，开展科学研究和科技服务工作，承担并完成了一大批国家级项目和企事业单位委托开发项目，在国家重大基础研究计划、重大工程任务及支撑行业发展的关键技术研究方面取得了丰硕的成果。在和中国航空制造技术研究院合作完成的“大型数控强力旋压机”重大科技专项课题中，浙江大学所研制的具有自主知识产权的液压伺服控制系统是大推力高精度旋压设备各工艺动作的主要执行单元，是大型轻质高强筒形构件旋压设备完成大直径薄壁筒形构件高精度旋压成形的硬件基础。在该项目中，浙江大学针对大型轻质高强筒形构件旋压设备，攻克了重型数控旋压设备液压伺服控制系统自主设计制造关键技术。开发了分段建模及基于模型补偿控制技术、液压动态平衡技术、动态阻尼调节技术，解决了大型旋压设备大惯量重力负载下高精度伺服控制、大行程多轴协同电液伺服控制、复杂工况诊断及应急处理等一系列关键技术难题。在实现数控旋压设备高精度平稳运动控制的同时，提高了高刚度重载荷重型机床整机可靠性，奠定了旋压工艺方法创新的基础。项目的研究成果先后应用于国内多台自主研发的大型高端强力旋压设备，满足航空航天、船舶、核工业、化工等行业大型薄壁回转体零件的制造需要，推动旋压结构件在大飞机、飞机发动机、导弹和大型压力容器上应用。

完成人合作关系说明

与李继贞（第二完成人）共同参与“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项（04 专项）大型数控强力旋压机（2011 ZX04002-141）项目的立项和实施，共同参与设备设计方案论证、工艺开发、工艺验证。

与韩冬（第三完成人），共同参与“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项（04 专项）大型数控强力旋压机（2011 ZX04002-141）项目的立项和实施，共同参与实施了工艺验证。

与刘旭东（第四完成人），共同参与“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项（04 专项）大型数控强力旋压机（2011 ZX04002-141）项目的立项和实施，共同完成旋压设备企业编制的编制，共同参与设备设计方案论证。

与王海涛（第五完成人），共同参与“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项（04 专项）大型数控强力旋压机（2011 ZX04002-141）项目的立项和实施，共同完成旋压设备企业编制的编制，共同参与设备研制。

与关大力（第六完成人），共同参与“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项（04 专项）大型数控强力旋压机（2011 ZX04002-141）项目的立项和实施，共同完成旋压控制软件的编制，共同参与设备研制。

与刘德贵（第七完成人），共同参与“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项（04 专项）大型数控强力旋压机（2011 ZX04002-141）项目的立项和实施，共同参与实施了工艺开发和工艺验证。

与杨延涛（第八完成人），共同参与实施了大型薄壁筒体旋压成形工艺验证。

与李中凯（第九完成人），共同参与“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项（04 专项）大型数控强力旋压机（2011 ZX04002-141）项目的立项和实施，共同参与设备研制。

与李初晔（第十完成人），共同参与大型立式强力旋压设备结构与研制。