

大推力氢氧发动机关键制造技术

孙纪国¹, 何学青², 阳代军², 郑孟伟¹, 徐坤和²

(1. 北京航天动力研究所, 北京 100076; 2. 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

摘 要: 为了满足大推力、大尺寸 220 tf 补燃循环氢氧发动机的研制需求, 针对补燃氢氧发动机推力室、预燃室、涡轮泵、阀门、管路等组合件, 开展大推力氢氧发动机的工艺攻关, 采用旋压成形、扩散钎焊、惯性摩擦焊、增材制造、粉末冶金、精密铸造等工艺技术, 实现了 220 tf 补燃循环氢氧发动机复杂构件的制造; 针对 220 tf 补燃循环氢氧发动机超大、超重零部件, 开展高精装配技术研究, 采用自动化装配、数字化装配及自动测量与定位等工艺技术, 实现了超大超重零部件的精密装配。通过工艺技术研究, 研制出首台 220 tf 补燃循环氢氧发动机工程样机, 提高了我国氢氧发动机整体制造水平, 满足了我国新一代运载火箭的研制需求。

关键词: 新一代运载火箭; 氢氧发动机; 关键制造技术; 精密装配; 工程样机

中图分类号: V463 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2022)02-0117-10

Key manufacturing technology for large thrust LH₂/LOX cycle engine

SUN Jiguo¹, HE Xueqing², YANG Daijun², ZHENG Mengwei¹, XU Kunhe²

(1. Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China;

2. Capital Aerospace Machinery Corporation Limited, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to meet the needs of large thrust and large size 220 tf staged combustion cycle LH₂/LOX engine, the research on process and technology of LH₂/LOX engine was carried out for thrust chamber, precombustion chamber, turbopump, valve, pipeline and other systems of LH₂/LOX engine. The key components of 220 tf staged combustion cycle LH₂/LOX engine were manufactured by using spinning forming, diffusion brazing, inertia friction welding, additive manufacturing, powder metallurgy and precision casting and other processes. The research on high precision assembly technology was carried out for the large and heavy components of the 220 tf thrust LH₂/LOX staged combustion cycle engine, the precision assembly of the large and heavy components was realized by using automatic assembly, digital assembly, automatic measurement, positioning and other process. Through the process and technology research, the first engineering prototype of 220 tf high-pressure staged combustion cycle LH₂/LOX engine was successfully developed, which improved the overall manufacturing level of LH₂/LOX engine and met the development requirements of a new generation of launch vehicle.

收稿日期: 2022-01-18; 修回日期: 2022-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(U1537212)

作者简介: 孙纪国(1966—), 男, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机设计。

Keywords: a new generation of launch vehicle; LH₂/LOX engine; key manufacturing technology; precision assembly; engineering prototype

0 引言

随着人类探索太空的不断深入,世界各国将越来越多的探索目标瞄准了更加遥远的深空,大力发展大推力重型运载火箭是实施太空发展战略的必要保证,可以有效地拓展航天产业发展空间、大幅提升进入空间能力、促进航天科技整体水平提高,进一步增强中国在国际社会的政治影响力,提高综合国力,有着重要的战略意义^[1-3]。“航天发展,动力先行”已成为世界各航天大国的成功经验,我国现有运载火箭发动机推力偏低,无法满足新一代运载火箭动力系统的要求^[4],因此开展了 220 tf 补燃氢氧发动机的研制。220 tf 补燃氢氧发动机的推力为国内现役最大推力氢氧发动机的 3 倍多,220 tf 大推力补燃氢氧发动机工况恶劣,承受大应力、大承载、超高温、超低温、强烈振动、剧烈冲刷、富氢环境等,对发动机部件和组件性能提出了更高的要求。220 tf 补燃氢氧发动机推力室燃烧室压力高、热流大,需要研制高换热效率和长寿命的推力室身部;220 tf 补燃氢氧发动机喷管面积比、出口直径和轴向长度均是目前最大的,需要研制超大尺寸高性能喷管延伸段;为了满足高内压、超低温或高温使用环境下壳体的性能,需要研制大尺寸高温合金和钛合金复杂壳体结构精密成形^[5-7],发动机研制技术跨度与难度大,给我国基础工业水平带来了新的挑战。因此,必须针对 220 tf 补燃氢氧发动机推力室、预燃室、涡轮泵、阀门、管路等组合件开展制造技术攻关。

制造工艺技术是 220 tf 级补燃氢氧发动机研制的关键技术之一^[8-9],主要包括大尺寸推力室身部内壁成形技术、大尺寸身部内外壁连接技术、大尺寸再生冷却喷管制造技术、高强度涡轮盘制造技术、大尺寸零件近净成形粉末冶金技术、大尺寸结构的增材制造成形技术、大尺寸壳类结构精密铸造技术、大尺寸空间管路成形与连接技术、大尺寸高压组件精密装配技术等 9 项研究内容。通过工艺技

术研究,完成了首台 220 tf 级补燃氢氧发动机工程样机的研制^[10],该发动机设计总高约 6 m、单机质量约 4.8 t,为我国大推力运载火箭的研究奠定了坚实基础。

1 大尺寸推力室身部内壁成形技术

1.1 Cu-Cr-Zr 合金饼材制造技术

Cu-Cr-Zr 合金具有较好的高温强度、导热等综合性能,推力室身部内壁选用了 Cu-Cr-Zr 合金材料^[11-13]。由于身部尺寸和工作压力的大幅提高,身部内壁成形用 Cu-Cr-Zr 合金饼材的尺寸也大幅增加,同时对 Cu-Cr-Zr 合金饼材的质量控制也提出了更高的要求。因此,通过合理的合金元素配比,保证了材料具有良好高温性能及良好电导率和热导率;通过合理的成形和热处理工艺设计,保证了生产过程的稳定和材料的综合性能^[14-16],研制出大尺寸推力室内壁旋压用锻造 Cu-Cr-Zr 合金饼材,该 Cu-Cr-Zr 合金饼材时效后相对电导率大于 85 % IACS,如图 1 所示。



图 1 Cu-Cr-Zr 合金锻造饼材

Fig. 1 Forged Cu-Cr-Zr alloy disc

1.2 推力室身部内壁旋压成形技术

推力室身部内壁选用了旋压成形技术,其身部内壁型面为复杂的超大空间曲面形式,收缩比大、精度要求高,成形难度大^[17-18]。通过分析 Cu-Cr-Zr 合金材料的塑性成形特性^[15-16],获得了大型曲母线 Cu-Cr-Zr 合金构件整体旋压成形工艺。如图 2 所示,采用“锥形强旋→柱段成形→普旋收筒→筒形

强旋→母线成形”的工艺方案,实现了大尺寸 Cu-Cr-Zr 合金身部内壁的旋压成形。

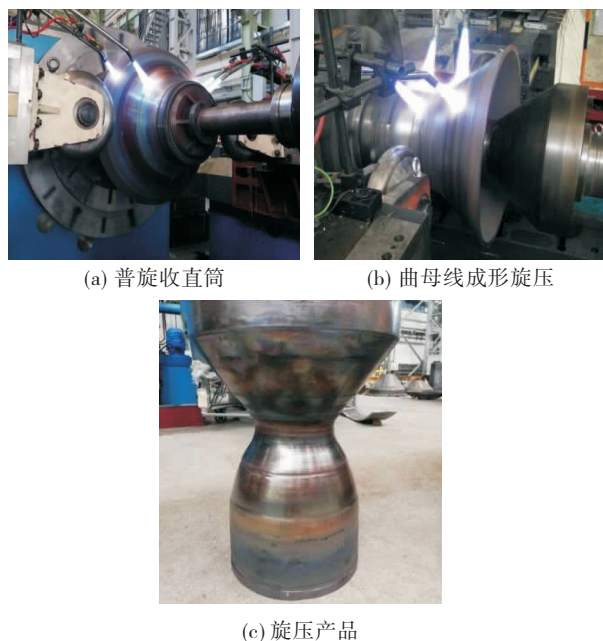


图2 Cu-Cr-Zr 合金旋压成形及产品

Fig. 2 Product and spinning forming of Cu-Cr-Zr alloy

1.3 身部内壁高精度铣槽加工技术

推力室身部内壁冷却通道尺寸的精度决定了身部热防护的效果,特别是内壁的厚度直接决定了身部内壁寿命,影响发动机推力室的冷却可靠性,剩余壁厚均匀是判断喷管的热防护是否可靠的重要指标^[19-20]。身部内壁沟槽采用了铣削加工工艺,通过立式装夹铣槽加工,解决了大尺寸内壁传统卧式铣加工变形难题,实测内壁剩余壁厚 0.66 ~ 0.91 mm,满足了发动机的热防护使用要求^[21],如图3所示。



(c) 沟槽内壁成品图

图3 立式装夹铣槽技术

Fig. 3 Process of milling slot with vertical clamping

2 大尺寸身部内外壁连接技术

推力室身部制造方式主要有“铣槽式内壁 + 电铸镍外壁”和“铣槽式内壁 + 扩散(钎)焊外壁”两种工艺方法^[10,22-24]。两种工艺方法均有利弊,我国现役的氢氧发动机广泛采用的是电铸工艺技术,该工艺生产周期较长,通常需 4 ~ 6 个月;对于扩散钎焊技术,铜合金内壁经过钎焊后,导致内壁强度降低。针对大推力氢氧推力室身部,进行了两种工艺方法研究。

2.1 推力室身部内外壁电铸技术

如图4所示,通过优化电铸工艺参数、增加辅助阳极和阴极屏蔽、优化填料配比等,提高电流强度和电阻分布的均匀性,从而提高推力室身部电铸速度和实现推力室身部的快速电铸,产品性能符合技术指标要求,可保证发动机的使用性能^[23]。

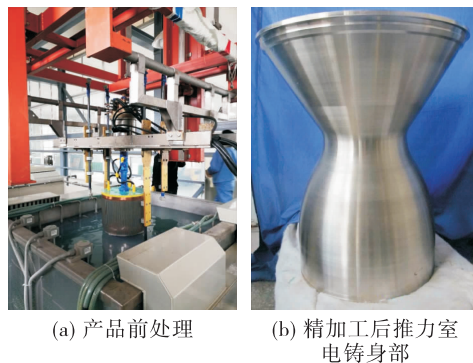


图4 电铸推力室身部

Fig. 4 Electroforming thrust chamber body

2.2 推力室身部内外壁钎焊技术

推力室身部内壁材料为 Cu-Cr-Zr 合金、外壁材

料为 GH4169 合金,内外壁材料通过扩散钎焊工艺结合在一起形成冷却通道^[25],如图 5 所示。

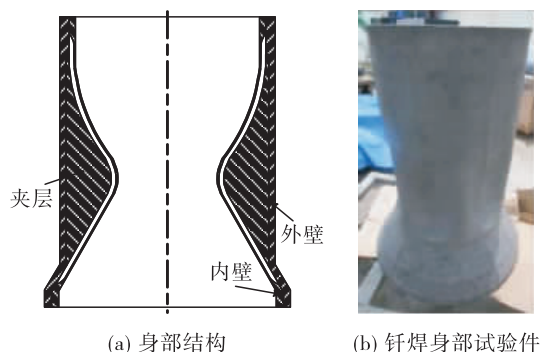


图 5 Cu-Cr-Zr/GH4169 扩散钎焊身部

Fig. 5 Cu-Cr-Zr/GH4169 diffusion brazed thrust chamber body

通过扩散焊结构优化设计、扩散焊接头力学性能研究,以及系列平板、圆柱模盒和大尺寸带型面产品的工艺试验,确定了 Cu-Cr-Zr/GH4169 扩散钎焊工艺方案及参数,试验件液压试验强度达到 60 MPa。研究结果表明,Cu-Cr-Zr 合金经过正常扩散钎焊后,强度下降明显,需要采取措施提高 Cu-Cr-Zr 合金钎

焊接头的强度。

3 大尺寸再生冷却喷管制造技术

再生冷却喷管是补燃氢氧发动机的重要组成部分^[19,22],F150 双相不锈钢具有良好的钎焊性能和低温韧性,适合作为氢氧发动机喷管外部材料^[26],其内壁材料选用不锈钢 1Cr18Ni9Ti,采用内壁铣槽、外壁直接套接结构扩散钎焊制造工艺^[27]。

$\phi 2.5$ m 全尺寸补燃氢氧发动机再生冷却喷管外壁为 F150 不锈钢、内壁为 1Cr18Ni9T 沟槽结构,根据喷管内外壁的结构尺寸进行下料,采用滚弯成形工艺制成锥筒,利用激光焊接将锥筒拼接成整体,然后通过模具胀形形成内外曲母线型面,在内壁上铣槽,将内外壁封焊装配在一起,最后进行真空压力扩散钎焊^[28-29],焊接成整体喷管,扩散钎焊发动机喷管产品液压强度达到 34 MPa,满足了研制要求,如图 6 所示。首件产品液流试验数据表明冷却通道的压降超过设计指标,在工程研制阶段需要对降低冷却通道流阻进行工艺攻关,以满足设计的要求。

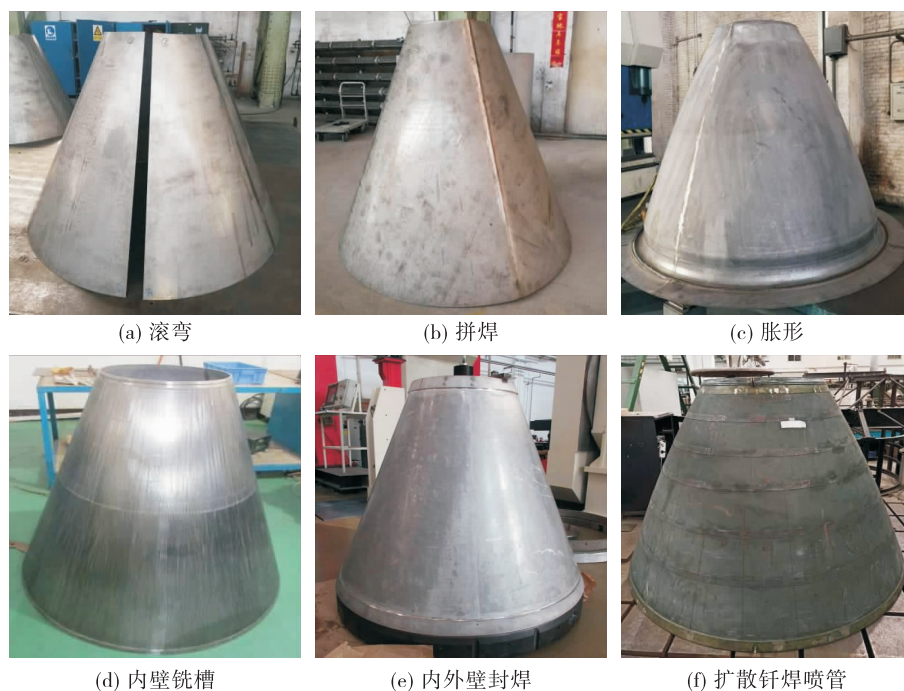


图 6 喷管扩散钎焊工艺流程

Fig. 6 Diffusion brazing process of nozzle

4 高强度涡轮盘制造技术

4.1 涡轮盘扭曲叶片加工成形技术

目前,国内外涡轮盘均采用电火花加工^[19,30-32],差距在于国外采取组合加工方法来提高加工效率,国内加工带叶冠涡轮盘叶片仅是单一的采用电火花加工,加工效率比较低。涡轮一般为带冠扭曲叶片设计,采用多轴联动数控电火花加工技术,将左右组合电极设计成一体结构,如图 7 所示。采用组合电极技术将加工时间从 1 个月缩短至 15 天^[32-33]。

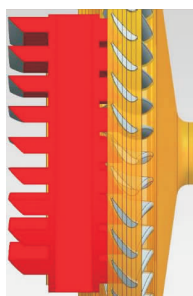


图 7 组合电极加工状态

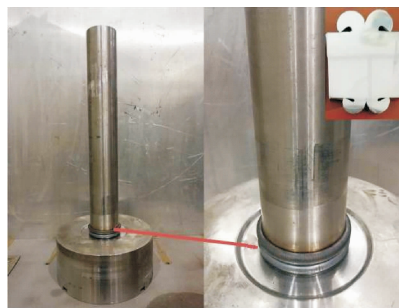
Fig. 7 Processing states for the combination electrode

4.2 盘轴惯性摩擦焊技术

惯性摩擦焊在国内航天领域内应用较少,惯性摩擦焊接技术能使发动机用氢、氧转子组件等盘轴类产品结构设计和工艺简化,有效提高动平衡精度要求^[34-35]。同时惯性摩擦焊接头的综合性能优良,产品性能更加稳定可靠。如图 8 所示,采用惯性摩擦焊技术将涡轮的盘和轴进行固相连接,连接接头的拉伸力学性能和高温持久性能均满足技术要求,着色检测和超声检测合格,焊接接头解剖分析焊缝内部无未焊合、裂纹等焊接缺陷。



(a) 惯性摩擦焊机



(b) 涡轮盘轴组件惯性摩擦焊接接头

图 8 惯性摩擦焊机及涡轮盘轴焊接接头

Fig. 8 Inertia friction welding machine and turbine disk-shaft welding joint

5 大尺寸零件近净成形粉末冶金技术

220 tf 氢氧发动机氢泵叶轮的尺寸是国内现有的最大的氢氧涡轮泵的 1.4 倍,轮缘线速度高,涡轮排气压力和温度也大幅提升,常规铸造成型的复杂流道壳体无法满足使用工况要求^[36-37],因此采用粉末冶金+热等静压致密化近净成形工艺,开发出符合要求的钛合金叶轮和高温合金壳体。

5.1 钛合金叶轮

如图 9 所示,通过扫描结果证明近净成型的粉末冶金叶轮满足设计参数指标要求,参加热试验证明钛合金粉末冶金叶轮性能满足设计和使用要求^[38]。



图 9 钛合金叶轮

Fig. 9 Titanium alloy impeller

5.2 GH4169 涡轮排气壳体

如图 10 所示,在实现了涡轮排气壳体、预燃室弯头三通、推力室燃气顶盖等复杂流道壳体 GH4169 粉末冶金技术的产品化,化学成分和力学性能满足指标要求,经 X 射线、荧光检查和表面质量检查未见缺陷,不存在 GH4169 材料常见的碳化

物、 δ 相和 Laves 相,组织均匀,并参加了热试车考核。



(a) 氧涡轮排气壳体

(b) 氢涡轮排气壳体

图 10 氧涡轮和氢涡轮排气壳体

Fig. 10 Oxygen and hydrogen turbopump exhaust housing

6 大尺寸结构的增材制造成形技术

6.1 空间结构激光选区熔化成形技术

补燃氢氧推力室头部有四底三腔复杂喷嘴结构,预燃室有变径弯脖与多通结构,氧主涡轮泵有双吸泵壳体结构,预压涡轮泵中存在中空设计的复杂壳体结构,阀门为实现缓开缓关和泄出等功能集成也存在多层套筒的复杂壳体结构,这些结构采用传统铸造工艺难度大、成品率低,锻件机加方案则难以实现,因此新型的复杂结构激光选区熔化成型增材制造技术成为这些复杂组件结构的理想方案^[20,39]。采用了基于热应力合理分布的“岛型随机扫描”法,缓解了大尺寸构件的应力累积现象,保证了大尺寸变截面弯管的成形质量^[40]。

6.1.1 弯头和多通

采用激光选区熔化成型增材制造工艺技术成形弯头和多通,材料为 GH4169,经过液压试验和气密试验考核,满足使用要求,如图 11 所示。



(a) 弯头

(b) 四通



(c) 三通组件

图 11 弯头、三通、四通及其组件

Fig. 11 Elbow, T-branch, four way connection and its components

6.1.2 喷嘴

采用激光选区熔化成型增材制造工艺技术制造发动机喷嘴,其力学性能、液压和气密试验满足要求,如图 12 所示。

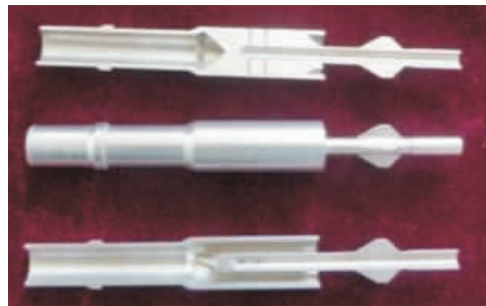


图 12 两种喷嘴产品

Fig. 12 Two types of injection elements

6.1.3 壳体结构

完成了 15 种阀门壳体及涡轮泵零件等的激光选区熔化成型,通过了各类液压气密试验考核,多台产品参加了热试车,如图 13 所示。



(a) 壳体

(b) 涡轮盘

图 13 复杂壳体结构增材制造技术的应用

Fig. 13 Additive manufacturing technology for complex shell parts

6.2 回转体高温合金电弧增材成形

采用自主研制集成的电弧熔丝增材制造技术系统^[41],如图14所示,成形高温合金用冷金属过渡模式(CMT),试验用丝材为 $\phi 1.0\text{ mm}$ 的高温合金熔化极气体保护焊丝。通过研究锥形壳体最佳成形策略和变截面结构路径规划方法,获得了高温合金电弧增材制造内部质量、组织性能、成形精度等控制技术,进行了扩散段等结构的试制。



图14 电弧增材制造系统及产品

Fig. 14 Products and system of wire + arc additive manufacturing

7 大尺寸壳类结构精密铸造技术

220 tf 氢氧发动机有高温合金和钛合金精密铸件。这些铸件形状复杂、壁厚相差悬殊,凝固过程中补缩困难,易产生缩孔、疏松等缺陷^[42-43]。针对高温合金和钛合金铸件,开展了大尺寸复杂壳类结构精密铸造技术研究,获得了大推力氢氧发动机铸件高质量成形、高尺寸精度控制、高表面质量成形等技术,铸件质量达到 GJB 2896A - 2007 规定的 I 类 B 级规定要求,尺寸精度要求达到 GB 6414 - 1999 规定的 CT6 级。

采用熔模精密铸造技术,完成大推力氢氧发动机 10 多种高温合金精密铸件的成形,如图 15 所示。

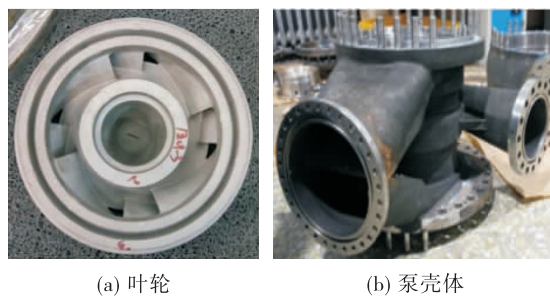


图15 高温合金精密铸件

Fig. 15 Superalloy precision casting

采用石墨型/可溶型芯 + 离心浇铸和热等静压工艺技术,完成了多种钛合金材料精密铸件的成形,如泵进出口壳体、级间壳体等,如图 16 所示。

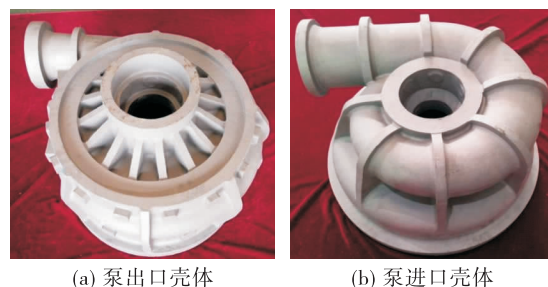


图16 钛合金合金精密铸件

Fig. 16 Titanium alloy precision casting

8 大尺寸空间管路成形与连接技术

220 tf 补燃氢氧发动机管路压力相比于 YF-77 发动机大幅提高,管材厚度也有所提升。管路系统是运载火箭的生命线,为保证工作安全性,迫切要求实现便捷装配的轻量化整体多弯管路构件^[10]。

8.1 管件弯曲成形技术

研究管材弯曲成形过程中造成失稳起皱、壁厚过度减薄甚至拉裂、截面扁化严重和表面划伤等缺陷的内部机理,优化调节弯管过程中的芯轴直径、芯轴前移量及角度回弹补偿量等工艺参数^[44-46],获得了表面无裂纹、挤伤、超标的压痕和褶皱以及椭圆度、减薄量和空间形状尺寸符合设计值的各种规格高温合金管件。对小弯曲半径管件,采用热模压工艺技术获得了合格的管件产品,液压试验超过 60 MPa,如图 17 所示。

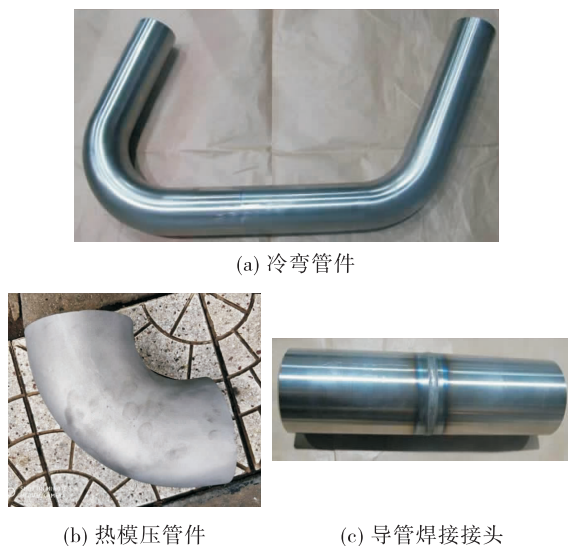


图 17 典型的弯管件和焊接接头

Fig. 17 Typical pipe fittings and welding joint

8.2 导管焊接技术

通过开坡口的方式、采用小电流两次焊的方式实现了 GH4169 高温合金厚壁导管的焊接,得到了内外成形良好的焊缝,X 射线检查满足 I 级焊接接头标准要求,通过了液压、气密考核,焊缝性能得到母材强度 90% 以上。

8.3 管件的试验考核

如图 18 所示,进行了 5 种 GH4169 高温合金导管生产,零件装配在发动机试验装置上,通过了氢涡轮泵与预燃室联动试验、氧涡轮泵与预燃室联动试验以及发动机半系统试验的考核。

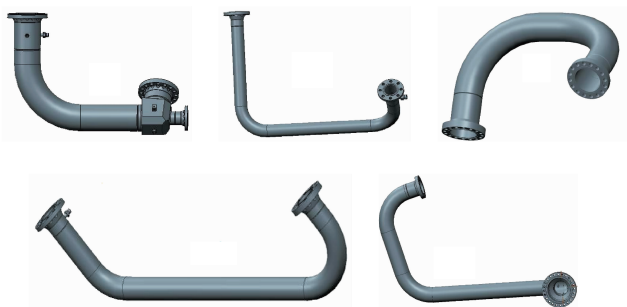


图 18 5 种 GH4169 高温合金导管

Fig. 18 Five kinds of GH4169 superalloy pipes

9 大尺寸高压组件精密装配技术

220 tf 补燃氢氧发动机结构尺寸和质量参数是国内现役氢氧发动机的几倍,组件的结构复杂程度

大幅增加,装配精度要求也大幅提高。现有氢氧发动机的手工装配模式已不适应 220 tf 发动机的总装和组件装配的需要,因此,将自动化装配、数字化装配及自动测量与定位等先进技术引入发动机装配中,探索大尺寸高压复杂组件的精密装配^[47-50]。

9.1 涡轮泵精密装配技术

220 tf 补燃循环氢氧发动机结构极为复杂、尺寸质量巨大、装配要求极高的涡轮泵组件,应用先进的液压助力设备、辅助吊装工艺和数字化装配系统,解决了大推力涡轮泵的装配工艺,完成了在技术上具有代表性的氢、氧主涡轮泵装配,如图 19 所示。

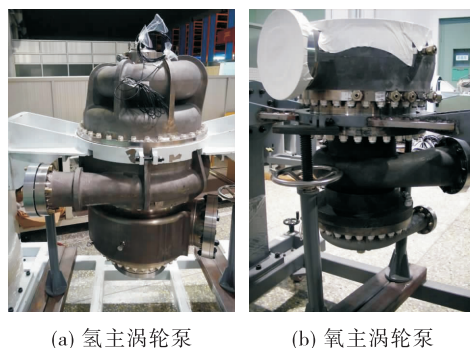


图 19 涡轮泵数字化精密装配技术

Fig. 19 Digital precision assembly technology for turbopump

9.2 发动机精密装配技术

针对发动机整机,通过数字化模拟装配,有效预示了实际装配中可能遇到的安装顺序、装配干涉、人机干扰、操作空间不佳等问题,指导各类装配工装设计,优化了装配工艺;与此同时开展了三维扫描测量、自动力矩加载、助力机械臂辅助装配等技术在 220 tf 级发动机应用的预先研究工作;2021 年 7 月完成了首台 220 tf 级发动机工程样机的装配,如图 20 所示。

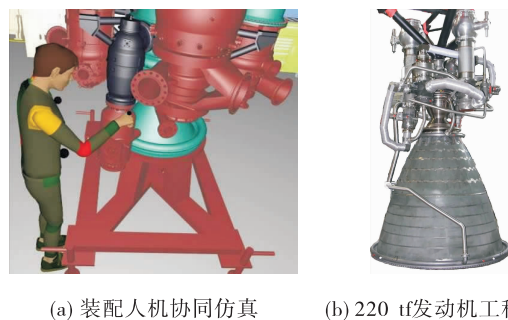


图 20 220 tf 发动机精密装配技术

Fig. 20 Precision assembly technology for 220 tf engine

10 结语

通过工艺技术研究攻关,获得了大尺寸推力室身部内壁成形、大尺寸身部内外壁连接、大尺寸再生冷却喷管制造、高强度涡轮盘制造、大尺寸零件近净成形粉末冶金、大尺寸结构的增材制造成形、大尺寸壳类结构精密铸造、大尺寸空间管路成形与连接及大尺寸高压组件精密装配等工艺技术,研制的220 tf补燃氢氧发动机推力室、预燃室、涡轮泵、阀门等组合件参加了相关试验,完成了首台220 tf级补燃氢氧发动机工程样机的制造,为我国大推力运载火箭的研制奠定了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 何巍,刘伟,龙乐豪.重型运载火箭及其应用探讨[J]. 导弹与航天运载技术,2011(1):1-5.
- [2] 王辉,张宇.重型运载火箭控制系统关键技术探讨[J]. 航天控制,2013,31(6):22-26.
- [3] 张绿云,龙雪丹,黄长梅,等.国外新一代重型运载火箭发展分析[J]. 国际太空,2021(5):26-31.
- [4] 张小平,丁丰年,马杰.我国载人登月重型运载火箭动力系统探讨[J]. 火箭推进,2009,35(2):1-6.
ZHANG X P, DING F N, MA J. Scheme of Chinese manned lunar rocket and its propulsion system[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2009, 35(2):1-6.
- [5] 刘欣,王国庆,李曙光,等.重型运载火箭关键制造技术发展展望[J]. 航天制造技术,2013(1):1-6.
- [6] 林奔,黄超,马云龙,等.重型运载火箭结构材料选材方案研究与启示[J]. 轻合金加工技术,2020,48(6):14-18.
- [7] 郑大勇,张卫红,石文靓.未来大推力氢氧发动机方案初步探讨[J]. 导弹与航天运载技术,2012(1):1-6.
- [8] 郑孟伟,岳文龙,孙纪国,等.我国大推力氢氧发动机发展思考[J]. 宇航总体技术,2019,3(2):12-17.
- [9] 郑大勇,陶瑞峰,张玺,等.大推力氢氧发动机关键技术及解决途径[J]. 火箭推进,2014,40(2):22-27.
ZHENG D Y, TAO R F, ZHANG X, et al. Study on key technology for large thrust LO_x/LH_2 rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014, 40(2):22-27.
- [10] 宋德坤.重型运载火箭220吨级发动机完成首台工程样机生产:标志着该发动机关键阶段研制工作圆满完成[N]. 中国航天报,2021-07-30(1).
- [11] 邹鹤飞,徐坤和,张芹梅,等.运载火箭氢氧发动机推力室内壁用铜合金材料研究进展[J]. 航空制造技术,2015,58(S2):50-56.
- [12] GROH H C, ELLIS D L, LOEWENTHAL W S. Comparison of GRCo-84 to other Cu alloys with high thermal conductivities[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, 17(4):594-606.
- [13] 丁兆波,李怡.国外大推力氢氧推力室制造技术现状与趋势[J]. 航天制造技术,2012(2):1-4.
- [14] 李仁庚.高强高导 Cu(Cr)Zr 系合金微结构设计调控[D]. 大连:大连理工大学,2019.
- [15] HUANG Y C, LI M, MA C Q, et al. Flow behaviour constitutive model of CuCrZr alloy and 35CrMo steel based on dynamic recrystallization softening effect under elevated temperature[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(6):1550-1562.
- [16] 郭利平,何学青,阳代军,等. Cu-0.5Cr-0.1Zr 合金热压缩变形行为[J]. 金属热处理,2021,46(9):180-187.
- [17] RUSSELL C, CARTER R, ELLIS D, et al. Friction stir welding of GR-cop 84 for combustion chamber liners[C]//45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2004.
- [18] 王兴坤.难变形金属筒形件热强旋成形机理及工艺参数优化[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [19] 丁新玲.液体火箭发动机制造技术发展现状[J]. 航天制造技术,2005(6):13-17.
- [20] 罗巍,张晗翌,矫慧,等.液体火箭发动机推力室快速制造技术[J]. 航天制造技术,2020(5):60-65.
- [21] 侯亚娟,毕凯,董礼,等.大推力氢氧发动机铜合金内壁数控加工技术[J]. 工具技术,2021,55(3):72-75.
- [22] 丁兆波,孙纪国,路晓红.国外典型大推力氢氧发动机推力室技术方案综述[J]. 导弹与航天运载技术,2012(4):27-30.
- [23] 赵子俊.推力室外壁高效电铸制造基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.
- [24] 单黎波,金作花,贺云龙,等.液体火箭发动机钎焊、扩散焊质量检测技术研究[J]. 火箭推进,2009,35(6):47-51.
SHAN L B, JIN Z H, HE Y L, et al. Testing techniques of brazing and diffusion welding quality of Liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2009, 35(6):47-51.
- [25] 邱惠中.先进钎焊技术在航天器上的应用[J]. 宇航材

- 料工艺, 2000, 30(3):11-13.
- [26] 宋定延, 沈素云, 黄群. F150 钢钎焊性能研究[J]. 宇航材料工艺, 1988, 18(3):39-45.
- [27] FINT J, KUCK F, SCIORELLI F. Development of channel wall nozzles for use on liquid propellant rocket engine[C]//41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2005.
- [28] 邹鹤飞, 李雪飞, 庞伟强, 等. $1\text{Cr}_{18}\text{Ni}_9\text{Ti}$ 扩散钎焊接头组织及性能[J]. 焊接, 2019(12):42-45.
- [29] 林志峰, 陈志凯, 邢斌, 等. 钎焊温度对 GH4169/ $1\text{Cr}_{18}\text{Ni}_9\text{Ti}$ 接头组织和性能影响研究[J]. 焊接, 2017(8):25-28.
- [30] TROLLHEDEN S, BERGENLID B, PALMNAS U, et al. Turbopump turbines developed by volvo [C]//40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2004.
- [31] 刘晓, 康小明, 赵万生. 带叶冠整体式涡轮盘的多轴联动数控电火花加工[J]. 航空制造技术, 2009, 52(2):100-102.
- [32] 张昆, 杨一明, 申泮, 等. 双级带叶冠涡轮盘电火花加工电极优化设计[J]. 电加工与模具, 2018(4):18-19.
- [33] 张昆, 白淳, 吕琳, 等. 大栅距等锥形带叶冠涡轮盘电火花加工电极优化设计[J]. 电加工与模具, 2016(6):23-24.
- [34] 罗键, 陈欢, 刘姗姗. 惯性摩擦焊接头特性的研究现状[J]. 焊接, 2017(1):13-17.
- [35] 赵强, 祝文卉, 邵天巍, 等. 惯性摩擦焊在航空发动机转子制造中的应用[J]. 航空动力, 2019(5):41-44.
- [36] 王博. 粉末冶金 FGH4169 高温合金的制备、组织、力学性能及热加工性能研究[D]. 长沙:中南大学, 2014.
- [37] 张绪虎, 徐桂华, 孙彦波. 钛合金热等静压粉末冶金技术的发展现状[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(6):6-10.
- [38] 李一平, 龚焱, 崔潇潇, 等. 粉末冶金 Ti-5Al-2.5Sn ELI 合金稳定性分析[J]. 钛工业进展, 2019, 36(3):22-25.
- [39] GRADL P R, GREENE S E, PROTZ C, et al. Additive manufacturing of liquid rocket engine combustion devices: a summary of process developments and hot-fire testing results [C]//2018 Joint Propulsion Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2018.
- [40] 董鹏, 梁晓康, 赵衍华, 等. 激光增材制造技术在航天构件整体轻量化制造中的应用现状与展望[J]. 航天制造技术, 2018(1):7-11.
- [41] 李权, 王福德, 王国庆, 等. 航空航天轻质金属材料电弧熔丝增材制造技术[J]. 航空制造技术, 2018, 61(3):74-82.
- [42] 宋浩, 韩冬, 赵军, 等. 钛合金熔模精密铸造技术的发展现状[J]. 铸造, 2020, 69(12):1304-1311.
- [43] 谢秋峰. K4169 合金涡轮壳铸件精密铸造工艺研究[D]. 沈阳:东北大学, 2012.
- [44] 李光俊, 罗铮, 袁胜, 等. 连续多弯导管成形仿真系统开发与应用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(18):43-47.
- [45] 郭建军, 杨立乐, 戴钦, 等. 薄壁弯管成形工艺分析及弯管模设计[J]. 模具工业, 2021, 47(3):18-21.
- [46] 刘琪. 薄壁管材小弯曲半径成形技术研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2018.
- [47] 刘东, 李岩松, 王璐. 基于三维数字样机的运载器装配工艺规划技术[J]. 装备制造技术, 2020(4):116-118.
- [48] 刘东, 徐鹤洋. 可视锥碰撞检测理论在虚拟装配中的研究[J]. 中国科技信息, 2019(6):90-91.
- [49] 吴昊夫, 默静飞, 王贺. 螺栓自动拧紧技术在阀门产品装配中的应用[J]. 阀门, 2013(4):18-21.
- [50] 窦海霞, 胡新平, 韩朕. 虚拟装配技术应用探索[J]. 计算机应用, 2008(5):38-41.