

火箭发动机装配残余应力产生机理与调控方法研究

李 享 张卫华 陈慕琪 冯 超 李朝扬

首都航天机械有限公司 北京 100076

摘 要：火箭发动机薄壁精密构件在装配过程中易产生结构形变与约束堆积问题，残余应力的动态演化会持续干扰装配精度与结构稳定性，诱发各类装配失衡隐患。常规装配模式难以适配应力动态变化特征，无法有效管控应力蓄积与扩散状态。本文结合精密装配作业全流程，系统梳理残余应力的表现形式、分布特征与演化规律，剖析多因素耦合作用下的应力生成机制，构建适配装配工况的应力调控理论逻辑与落地路径，有效改善精密装配过程中的应力富集问题。

关键词：火箭发动机；精密装配；残余应力；应力演化；应力调控

引言：火箭发动机结构具备构型复杂、装配精度严苛的技术特点，构件对接、紧固限位等工序产生的内部应力，会长期留存于结构内部形成残余应力。应力的无序堆积与动态释放，会改变构件微观结构状态，破坏装配成型精度与结构受力平衡，影响动力装备整体工作品质。结合装配作业特征厘清残余应力的形成规律，搭建适配精密工况的调控方式，能够规整结构受力状态，提升火箭发动机装配作业的精密化与规范化水平。

1 火箭发动机装配残余应力基本特征

1.1 发动机精密装配应力的表现形式

火箭发动机各类结构构件普遍采用高强度薄壁合金材料加工制成，整体构型复杂、尺寸精度严苛，装配流程包含构件对位、限位安置、压紧固定等多项精细工序。外力作用与结构约束变动会让构件内部产生不同程度的应力蓄积，最终形成留存于结构内部的残余应力。精密装配场景中，残余应力可划分为形变应力、挤压应力与约束应力三类核心形态^[1]。形变应力产生于构件姿态调整与位置校准阶段，外力干预引发结构微观形变，内部晶体排布出现错位紊乱，应力随之封存于构件内部。挤压应力集中出现在构件对接紧固环节，端面压紧、螺栓锁紧等操作会对接触区域施加持续载荷，造成局部应力聚集。约束应力源于装配定位结构的硬性限制，空间边界的固定状态会束缚结构自由形变，促使内部应力逐步堆积。各类应力形态贯穿装配全过程，是干扰精密装配质量的关键结构因素。

1.2 装配残余应力的分布特点

火箭发动机装配产生的残余应力不存在均匀规整的分布状态，整体呈现不均匀排布、局部集中聚集的特

点。构件对接端面、螺栓紧固点位、异形弯折部位是应力富集的核心区域，这类结构位置受力集中、约束条件复杂，应力堆积程度更为突出。构件平整的主体区域受力状态平稳，应力数值更低，分布状态更为舒缓。装配工序推进过程中，结构约束条件持续调整，应力排布状态也会随之发生动态改变。局部富集的应力会缓慢向周边均质结构扩散传导，重塑构件整体的应力排布格局。不同结构位置的应力幅值、扩散范围存在明显差异，造就了装配后结构应力分布的差异化特征。

1.3 残余应力对装配状态的影响方式

残余应力长期留存于构件内部，会持续影响火箭发动机构件的结构稳定状态，干扰精密装配的成型效果。蓄积的内部应力会随时间逐步缓释，诱发细微的结构形变，破坏装配完成后构件的姿态稳定性。轻微的结构形变即可改变构件对接间隙与空间姿态，打破预设的装配成型标准。应力缓释带来的微观结构调整，会让已完成定位的构件产生微量位移，削弱各部件之间的匹配贴合精度。长期应力作用会打破结构原始受力平衡，逐步降低整体装配结构的稳定性，引发装配状态失衡问题，难以维持火箭发动机精密装配的质量标准。

2 火箭发动机装配残余应力成因与演化规律

2.1 构件结构形变带来的应力生成成因

火箭发动机各类精密构件在加工成型后，内部结构会留存初始微观缺陷与应力孔隙，结构整体无法维持绝对均匀的受力状态。装配作业开展阶段，构件需要根据装配标准完成姿态校正与位置微调，外部载荷会作用于构件表层结构，推动微观结构发生重塑调整。薄壁构件的刚度水平较低，外力作用下极易产生不可逆的轻微形

变, 结构内部晶体排布随之发生改变。形变产生的结构位移无法自主恢复, 多余受力能量留存于构件内部, 形成初始残余应力。结构形变幅度会随装配调校力度产生变化, 形变产生的应力大小, 也会根据构件材质、结构厚度以及形变位置呈现出不同的生成状态。

2.2 装配约束匹配带来的应力累积成因

火箭发动机整体装配体系包含大量定位限位结构、对接密封结构与紧固连接结构, 多重约束条件会对构件形成固定限制作用。构件装配对位过程中, 部分结构尺寸与标准装配参数存在细微偏差, 强行匹配装配标准会让构件处于受限受力状态。各类紧固结构施加的压紧载荷会持续作用于对接区域, 让局部结构长期处于受压或受拉状态。约束条件对构件形变空间的限制作用, 会让受力产生的形变能量无法正常释放, 逐步堆积在结构内部。各类装配约束层层叠加, 持续加剧应力堆积程度, 最终形成稳定留存的装配残余应力。

2.3 装配工序扰动带来的应力演变成因

火箭发动机装配由多道连续工序组成, 不同作业环节的操作方式、施力位置与施力力度存在明显区别, 会对构件应力状态形成持续扰动。前期工序产生的结构形变与应力分布状态, 会被后续装配工序持续改变。紧固、对位、限位等操作带来的外力扰动, 会打破前期形成的结构受力平衡, 诱发新的应力生成。工序推进过程中, 构件受力点位不断变化, 应力生成位置与应力幅值也会持续更新^[2]。零散的工序扰动会持续改变结构受力格局, 让残余应力始终处于动态生成与调整的状态。

2.4 多因素耦合下残余应力的演化规律

结构形变、约束匹配与工序扰动等各类因素相互交织, 共同主导装配残余应力的整体演化进程。单一因素作用下的应力变化幅度相对有限, 多因素交织作用会大幅提升应力变化的复杂程度。装配初期, 应力以局部单点聚集为主要表现形式, 分布范围相对集中。随着装配工序持续推进, 局部应力会逐步向周边结构扩散, 完成全域范围的应力重新排布。装配作业结束后, 结构外部载荷完全消除, 内部留存的残余应力会进入缓慢缓释阶段, 逐步趋于稳定状态, 形成最终的结构应力分布格局。

3 装配残余应力调控理论与技术逻辑

3.1 残余应力疏导的理论逻辑

火箭发动机装配产生的残余应力处于封闭蓄积状态时, 会持续改变构件微观结构状态, 逐步破坏装配结构的稳定性能。应力疏导依托结构力学基本原理开展, 通

过改变构件局部受力条件, 打破原有封闭的应力蓄积状态, 实现无序应力的有序释放与分散。应力疏导不追求完全消除结构内部应力, 而是对高度集中的应力点位进行分散化解, 弱化局部应力富集带来的结构形变隐患。通过调整构件约束边界与受力条件, 引导内部蓄积的应力逐步向外扩散, 重构均匀稳定的结构受力体系。整套理论围绕应力转移、分散与缓释展开, 适配精密装配构件的结构特性, 能够从本源上降低残余应力对装配精度的干扰, 为后续调控技术落地提供理论支撑。

3.2 精密装配应力平衡的适配原则

精密装配场景下的应力平衡构建, 需要适配火箭发动机构件的结构属性与装配工艺标准, 遵循科学严谨的适配准则。应力调控作业不得破坏构件原有结构形态与装配成型状态, 所有调控手段都需要服务于装配精度与结构稳定性的提升。应力平衡构建需兼顾局部区域与整体结构的受力状态, 避免单一区域应力优化后, 其他部位出现新的应力富集问题。调控尺度需要匹配航天精密装配的严苛要求, 把控应力释放与结构约束的适配关系, 防止过度调控引发的次生形变问题。平衡适配原则贯穿应力调控全过程, 规范各类调控方式的实施尺度, 保障调控作业具备可行性与严谨性。

3.3 残余应力主动调控的技术思路

残余应力主动调控区别于被动应对的处理模式, 以提前干预、前置调控为核心技术导向, 从装配全流程入手管控应力生成与累积过程。结合装配各工序的应力生成特征, 在构件对位、紧固、限位等关键环节植入调控手段, 从源头减少应力的大量蓄积。针对结构形变、约束匹配、工序扰动等不同成因引发的应力问题, 设置差异化的调控处置方式, 提升技术手段的针对性。通过优化工序操作方式、调整结构约束强度、规范构件受力状态, 持续削弱应力生成条件。主动调控模式可以有效降低后期应力集中缓释带来的装配偏差, 让结构受力状态始终维持在可控范围。

3.4 应力动态制衡的适配逻辑

火箭发动机装配工序持续推进的过程中, 结构受力状态始终处于动态变化之中, 静态调控方式难以适配复杂的应力演化场景。应力动态制衡以装配全过程的应力变化规律为依据, 适配不同工序阶段的应力分布特征, 构建动态化的受力平衡体系。结合各工序的扰动特点, 实时调整结构约束状态与受力条件, 抵消新增应力带来的结构失衡问题。动态制衡逻辑注重工序之间的衔接适配, 化解多因素耦合作用下的应力无序演化问题, 持续

规整构件内部的应力分布格局。这套适配逻辑可以适配精密装配的动态作业场景,维持装配全过程的结构受力稳定,保障发动机管路及整体结构的装配品质。

4 火箭发动机装配残余应力调控实施路径

4.1 装配姿态精准对位的应力抑制方式

火箭发动机精密装配作业中,姿态对位精度直接决定构件受力状态,粗放的对位操作会迫使构件产生被动形变,催生大量初始残余应力。精准对位作业依托结构设计基准开展,严格依照精密装配工艺标准规范构件空间姿态与位置参数。细化空间调校维度,严控构件水平倾角、端面平行度、空间偏移量等关键装配指标,杜绝强行校正带来的结构性畸变。精细化调校模式能够让构件在自然受力状态下完成对接匹配,大幅减少外力干预造成的局部形变。薄壁异形构件抗形变能力较弱,细微的对位偏差都会造成受力不均,逐步引发应力堆积^[3]。通过规范前期对位流程、细化调校标准、严控装配偏差,可以从作业源头削弱应力生成条件,减少初始应力蓄积体量,为后续装配工序营造稳定的结构受力基础,降低后期应力治理的作业难度。

4.2 装配约束分步匹配的应力缓释方式

整体一体式紧固匹配模式会让构件短时间承受集中载荷,受力状态突变容易引发瞬时应力堆积,加剧结构内部受力失衡。分步约束匹配模式摒弃传统紧固思路,采用循序渐进的作业方式完成结构对接与限位固定。拆分整体紧固作业流程,逐级调整结构约束强度,让构件受力状态平缓过渡,预留微观结构自适应调整空间。受力缓冲过程能够让前期积累的局部应力逐步释放、缓慢消散,避免应力长期封存于单一结构区域。针对对接端面、螺栓连接点位、异形弯折等应力高发区域,分步匹配可以均匀分散受力点位,重构更为均衡的结构受力体系。循序渐进的约束调控模式,能够有效化解集中载荷带来的应力富集问题,持续优化构件内部应力分布状态,提升结构受力均匀性。

4.3 装配工序标准化的应力管控方式

装配工序缺乏统一标准时,人工操作差异、施力无序、工序错乱等问题会持续扰动结构受力状态,诱发无序应力演化,加重装配全过程的应力紊乱问题。工序标准化管控模式针对各作业环节的工艺特征,建立统一规范的作业准则,明确各工序的施力范围、操作顺序与调

校尺度。杜绝盲目施力、过度调校、随意对位等不规范作业行为,减少人为因素带来的受力扰动。梳理工序衔接阶段的隐患问题,优化工序流转逻辑,弱化工序切换带来的结构受力突变。标准化作业体系能够稳定各环节的应力生成幅度,让应力演化过程具备规律可循。规范的流程管控可以逐步削弱多工序叠加带来的应力累积效应,实现装配全流程应力的常态化管控,维持结构受力状态的稳定性。

4.4 装配状态动态制衡的应力优化方式

火箭发动机装配全程处于动态变化状态,工序推进、约束调整、结构形变都会持续改变内部应力格局,静态管控手段无法适配持续变化的装配工况。装配状态动态制衡的应力优化方式,依托应力演化规律搭建全过程调控体系,适配不同装配阶段的应力变化特征。持续监测装配过程中的结构受力变化,根据工况状态微调约束条件与受力布局,抵消新增应力带来的结构失衡问题。针对多因素耦合引发的复杂应力变化,动态调整调控尺度,化解无序应力扩散造成的装配隐患。及时修正局部应力富集问题,持续规整全域应力分布状态。动态化的优化手段能够适配精密装配的动态作业需求,稳定装配后期的结构受力平衡,进一步提升火箭发动机整体装配结构的稳定性与精密性。

结束语

装配残余应力的生成与演化,是影响火箭发动机精密装配质量的重要内在因素,多工序扰动与结构约束耦合会持续加剧应力分布的无序性。依托应力形成机理与演化特点搭建针对性调控逻辑,从装配姿态、约束匹配、工序规范、动态制衡多个维度优化管控方式,可有效化解应力富集带来的结构隐患,持续规整构件内部受力格局,稳固火箭发动机精密装配的整体质量与结构稳定性。

参考文献

- [1] 张家川,徐志刚,王军义,等. 固体火箭发动机对接装配密封圈应力在线预测方法 [J]. 固体火箭技术,2023,46(2):287-296.
- [2] 陈振林,朱宇航,马振一,等. 火箭贮箱装配焊接连续模拟及焊接顺序优化 [J]. 焊接,2026(1):76-82.
- [3] 宋虎,杨富宁,吴英彪. 液体火箭发动机翻转对接工装的设计 [J]. 机械制造,2024,62(8):1-7,24.