

# 中国航天运载器舱段铆接技术发展现状及发展趋势研究

王洋, 于炳涛, 王树华\*, 李富晖, 王岩, 马强

首都航天机械有限公司, 北京

收稿日期: 2024年5月11日; 录用日期: 2024年6月22日; 发布日期: 2024年6月30日

## 摘要

中国航天运载器舱段铆接技术经过近十几年的飞速发展, 现与国外先进航空、航天舱段铆接技术的差距不断缩小, 但一些关键技术指标如铆接技术的工艺性、系统性、稳定性、柔性方面仍存在着较大差距。本文通过对中国航天运载器舱段铆接技术的发展现状及发展趋势的研究, 对比了国内、外航天技术的差距及未来发展的技术路线, 为中国航天舱段铆接行业的发展提供有益借鉴。

## 关键词

航天运载器, 铆接技术, 发展现状, 发展趋势, 研究

## Research on the Development Status and Development Trend of Riveting Technology of China Space Launch Vehicle Segment

Yang Wang, Bingtao Yu, Shuhua Wang\*, Fuhui Li, Yan Wang, Qiang Ma

Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing

Received: May 11<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 22<sup>nd</sup>, 2024; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

After the rapid development of China's space launch vehicle segment riveting technology in the past decade, the gap between China's space launch vehicle segment riveting technology and foreign advanced aviation and aerospace riveting technology has been greatly reduced, but there are still large gaps and barriers in some key technical indicators such as manufacturability, systemization, stability and flexibility of riveting technology. Through the analysis of the development status and devel-

\*通讯作者。

文章引用: 王洋, 于炳涛, 王树华, 李富晖, 王岩, 马强. 中国航天运载器舱段铆接技术发展现状及发展趋势研究[J]. 国际航空航天科学, 2024, 12(2): 132-144. DOI: 10.12677/jast.2024.122015

opment trend of China's space launch vehicle segment riveting technology, this paper comprehensively analyzes the gap between domestic and foreign space technology and the technical route for future development, providing a reference for the development of China's space segment riveting industry.

## Keywords

Space Launch Vehicle, Riveting Technology, Development Status, Development Trend, Research

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 中国航天运载器舱段铆接技术发展现状分析

近年来,中国航天运载器舱段铆接技术发展脚步紧跟国外航空、航天铆接技术发展路径,各科研生产单位、高校进行了大量航天运载器舱段铆接技术研究,基本解决了铆接中大量依靠手工操作、产品质量一致性差、制造效率低、噪声污染严重等问题[1]。航天运载器舱段自动铆接技术已成熟应用,能够广泛布局,同时我国航天运载器舱段产品制造能力和水平的提升推进了制造模式的升级,通过自动铆接技术向纵深挖潜,逐步衍生出舱段装配生产线柔性制造模式[2],使铆接技术更趋系统化、柔性化、流水化、精细化。但在装配工艺设计、装备发展质量、精益化生产和智能化发展等方面仍存在较大差距。

### 1.1. 国外先进铆接装配技术领域发展现状分析

目前,国外航空、航天企业在舱段铆接装配领域广泛采用先进铆接装配技术。如波音、空客等先进飞机制造商在零件制造、壁板组件装配、部段总装中大量应用先进数控装备,提升机身装配质量和效率[3]。在装配工艺设计方面,以SPACEX为代表的国外先进火箭公司快速迭代了多种颠覆性设计方案和技术[4]。

在装配工艺设计方面,SpaceX火箭公司“超重-星舰”采用低成本不锈钢、无整流罩一体化设计、低成本重量轻的隔热瓦,模块化设计方案、全箭仅用一型发动机,两级完全重复使用等多种颠覆性设计方案和技术,有效降低了研制、生产和使用成本,提高了生产效率和可靠性。经分析,“超重-星舰”可将进入地球轨道的成本降低到每千克百美元级别以下。SpaceX火箭公司使用大量不锈钢材料进行火箭壳体的制造并成功进行了可重复使用验证,见图1,大大降低了火箭制造成本、研制周期,国际竞争力急剧提高[5],严重冲击了火箭舱段传统工艺设计理念,各国持续发展的铝合金薄壁加筋铆接及铝合金整体成型工艺均面临前所未有的挑战与技术路线选择所产生的转型风险。



Figure 1. SpaceX's "supergrade-starship" welded with stainless steel

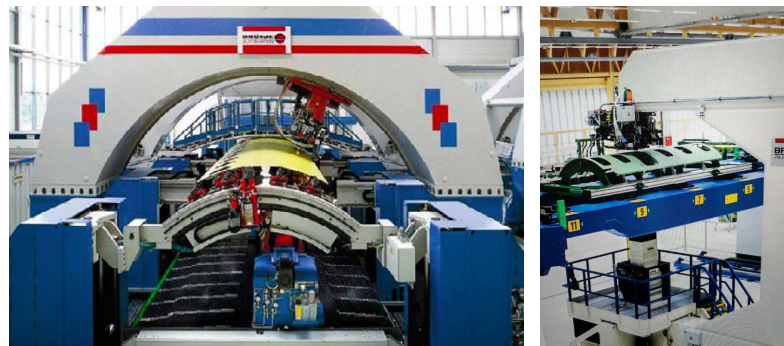
图1. SpaceX火箭公司“超重-星舰”采用不锈钢材料焊接

在自动铆接装配技术方面，机器人应用成熟可靠，如 KUKA 公司与波音公司携手研发“机身自动直立装配系统”，见图 2，2020 年成功应用于波音 777X 型客机装配过程。显著提升了装配自动化水平，实现了机器人在机身前后内外部协同作业，每天能够精确完成 60,000 个紧固件的钻孔和铆接工作，极大地提高了飞机装配安全性、装配质量以及生产效率[6]。



**Figure 2.** Automatic upright assembly system of fuselage  
**图 2.** 机身自动直立装配系统

铆接专机应用向柔性、流水式发展，如空客公司 BRötJE-Automation 自动铆接系统，见图 3，它具有蒙皮壁板集成装配单元(IPAC)和 C 型钻铆机，该系统具有自动定位、离线编程和软件示教等多种功能，可实现装配件精确定位、自动制孔、高效铆接，提高了飞机装配自动化水平，能够兼容产品多达十余种，架前预定位和架上自动铆接同步进行，提高设备利用率近 30% [7]。



**Figure 3.** BRötJE's C-frame drilling and riveting machine and automatic wall panel drilling and riveting system  
**图 3.** BRötJE 的 C 框架型钻铆机与壁板自动钻铆系统

在自动化辅助装配方面，德国弗劳恩霍夫研究所将机器人固定在直线导轨上，机器人与末端执行器之间安装了六维力传感器以实现牵引示教，操作人员省力、自由地拖拽机器人及末端执行器定位到铆接位置，启动末端执行器控制按钮完成自冲铆接操作[8]；德国宝捷公司也对协作机器人辅助安装螺钉进行了研究，最大程度地减少了有限空间人工操作的劳动强度[9]。

在机器人智能化方面，加州大学研发出利用深度神经网络学习抓取任意不规则物体的机械臂，抓取精度达 99%。MIT 研发团队利用机械臂/摄像头/传感器，结合深度神经网络，研发可以定位、抓取“任意物体”，并分类堆放到指定位置的机器人。研发了“object-agnostic”抓取算法，基于过去抓取记录学习，优选抓取方式。抓取后，从不同角度拍照，匹配最优算法，识别物体，堆放到该类物体所属堆放地点[10]。



## 1.2. 国内先进铆接装配技术领域发展现状分析

装配工艺设计方面,国内近年也逐渐对标外国火箭公司开展火箭复用相关技术,栅格舵系统在火箭上升阶段紧贴级间段侧壁减小阻力,再入大气层阶段完成解锁、展开、转动等精密动作[11]。因此,开发高精度、高协调度要求可回收级间段展开式栅格舵结构精密装配技术,见图 4,实现复杂、多层次配合结构的各接口协调对接,为中国首次“栅格舵分离体落区安全控制”提供了技术保障,同时也为后续助推器及子级可控回收、软着陆、重复使用等技术奠定基础。



Figure 4. Expansion grid rudder structure of recyclable interstage segment  
图 4. 可回收级间段展开式栅格舵结构

火箭舱段可重复使用技术为亚轨道和地球轨道低成本近轨布网及补充发射任务奠定基础[12]。回收舱段产品结构件修复技术涉及回收舱清理、检测,维修技术研究,形成对接协调关系的恢复、材料性能的检查及恢复、舱段寿命的管理、判定标准的制定等整套方案,重点对协调对接关系损伤、标准件损伤、零组件变形损伤、机械件损伤等典型损伤模式研究并积累经验,预计可以节省制造成本 70%,减少生产周期 60%,图 5 为回收舱体。



Figure 5. Recovery module  
图 5. 回收舱体

近年来,国内在飞机自动钻铆技术方面的研究全面展开,ARJ21与C919生产线代表国内民机制造的最先进水平,机器人钻铆系统具有高度的灵活性和成本优势,是传统飞机自动钻铆系统的有益补充,机器人钻铆系统在飞机制造业中的应用逐步增多。但与国外先进水平相比较,总体应用成熟度、智能化程度均存在较大差距。国内的制造单位需要加快研究,研制更高技术水平和实用性的机器人钻铆系统[13]。

在航空领域技术引进方面,引进国外先进机翼装配自动制孔、大部段自动化对接等技术以提升制造能力。如成飞、沈飞引进了G2000自动钻铆系统,应用到C919壁板装配上;陕飞、商飞引进了德国Brotje公司自动钻铆设备;西飞引进了EI公司研制的E7000自动电磁铆接装配系统用于ARJ21机翼壁板装配[14]-[16]。

在航空领域自主研发方面,国内制造单位都在进行自动化铆接技术及生产线配置技术研究并逐步推广应用,在大型运输机研制过程中也采用了国产自动制孔设备,如机翼前缘和后梁采用了西北工业大学机器人制孔系统[17]。随着计算机技术飞速发展,自动化钻铆技术已从单台数控钻铆机向多台自动钻铆机、铆钉传送装置、真空吸屑装置、传感控制装置等组成计算机集成控制的柔性自动装配系统方向发展[18]。

在国内航天领域方面,国内各航天制造单位开展自动钻铆技术及装备研发,突破了多项自动钻铆关键技术,研发了多种自动钻铆专机系统及柔性机器人系统。如上海航天技术研究院、四川航天技术研究院均逐步具备了筒体、锥体自动铆接能力[19]。中国运载火箭技术研究院研发了各直径筒体自动铆接系统、壁板柔性自动铆接系统等,开发了一条复合材料舱段数字化装配生产线,实现舱段型面检测及分析、零件自动装配及预连接、环槽铆钉自动钻铆等功能,国内研究进展全面且迅速。

在机器人工作区域先进识别技术、路径精细化设计技术方面,通过仿真试验摸索机械臂工作范围边界,得出不同产品直径、中框高度的产品的最佳机械臂工作范围边界,提高机械臂新结构的柔性和适应性[20],图6为 $\Phi 3350$ 机器人自动钻铆系统。

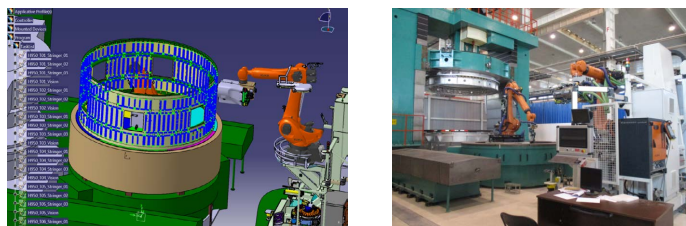


Figure 6.  $\Phi 3350$  robot automatic drilling and riveting system  
图 6.  $\Phi 3350$  机器人自动钻铆系统

在复杂壳段先进自动铆接精细化编程技术方面,通过吸收、合并的路径,摸索运行路径的局部耦合、摸索压缩空转的方法,最终形成精细化、合理的程序,极大地减少了程序运行的时间,为铆钉种类庞杂、数量大、结构复杂的壳段编程提供了先进、高效、精细化的工具[21],图7为程序运行路径规划示意图。

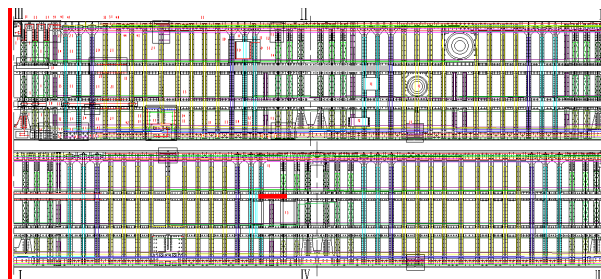


Figure 7. Program running path planning diagram  
图 7. 程序运行路径规划示意图

在箭载仪器支架智能化装配技术方面，通过设计微型智能化生产线，集成自动预连接、自动钻孔划窝、送钉铆接、支架自动抓取、识别调姿、喷码等功能，解决了传统零组件装配工艺劳动强度大、重复性强、噪音大等问题，提高装配效率 2 倍以上，图 8 为仪器支架的智能化装配系统。



**Figure 8.** Intelligent assembly system of instrument stents  
**图 8.** 仪器支架的智能化装配系统

在复合材料整流罩柔性自动化装配技术方面，突破复合材料整流罩部段的自动钻铆工艺，实现窗口在位铣切，预装配与正式钻铆流水化作业，提高生产效率、质量一致性。杜绝玻璃钢蒙皮易产生分层、劈裂质量风险，降低噪声污染，避免玻璃钢粉尘对操作人员身体带来的伤害，图 9 为复合材料整流罩的自动化装配系统。



**Figure 9.** Automated assembly system of composite fairing  
**图 9.** 复合材料整流罩的自动化装配系统

在流水式柔性布局技术方面，舱段自动钻铆装配生产线实现了多工位流水线生产，利用预装配平台实现多种产品架下预装配与架上大面积自动钻铆工作并行作业，实现架下预装配、架上自动钻铆、架下装配并行流水作业，设备利用效率接近 100%，见图 10。同时，逐步形成基于产品成组化装配的制造单元稳定性配置技术，通过产品对象整合，结合工位间高精度对接技术开发与应用，形成稳定可靠的制造单元，显著提升了作业的稳定性和可靠性。



**Figure 10.** Pipelined flexible layout technique  
**图 10.** 流水式柔性布局技术



在金属舱段机器人自动装配生产线技术方面，突破了基于三维视觉扫描的舱段误差分析与修正、基于CATIA/DELMIA的金属舱段机器人自动钻铆仿真分析与工艺流程优化、视觉训练与上位机数据库管理等技术。通过生产线的物料自动输送系统准确识别零件，通过机械臂抓取准确定位零件，通过自动铆接保证铆钉成型一致性，通过边钻铆边吸消除多余物风险[22]，图11为金属舱段机器人自动装配技术示意图。



**Figure 11.** Automatic robot assembly technology of metal cabin  
**图 11.** 金属舱段机器人自动装配技术

在铆钉材料及结构改进方面，随着航空航天技术的发展以及7系列高强铝合金的逐渐应用，7050制铆钉由于其较高的强度、刚度以及耐腐蚀性能等特点，未来将逐步取代常规2系列铝合金铆钉，见图12。同时，现阶段自动铆接设备实现铆钉的排钉、输送、夹持、插钉等工序的自动化，但铆钉尾部结构为棱边，插钉入钉孔时易和钉孔内壁干涉而卡钉而压伤产品。航天领域制定了7系列高强度铝合金材料的铆钉标准，验证了优化后的铆钉在改善自动钻铆性能方面的优越性并已应用[23]。



**Figure 12.** 7050 chamfered rivets  
**图 12.** 7050 倒角铆钉

非金属材料舱段高质量自动化装配技术方面，突破了复合材料舱段自动化钻铆装配流程设计技术、钛合金铆钉复合材料/铝合金夹层低损伤伺服压铆试验技术、复合材料蒙皮舱口自动铣削技术、异型中框自动铆接技术。解决了复合材料蒙皮手工钻铆性差、存在粉尘污染、手工铆接噪声问题，提高了生产效率和质量，设备见图13。

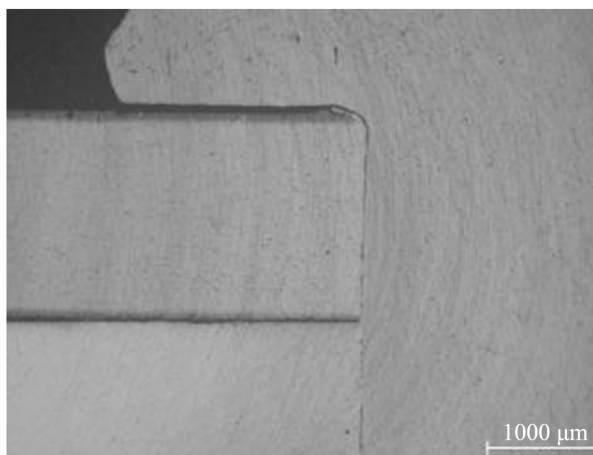


**Figure 13.** Automatic riveting technology of composite tank  
**图 13.** 复合材料舱段自动铆接设备

在铝锂合金等易脆断材料自动铆接技术方面，铝锂合金比铝合金桁条延伸率低，铆接性能差，手工气动锤击铆接力不稳定，铆接过程中铆钉杆成型挤压铆钉孔，铆钉孔受力膨胀容易产生裂纹，将自动钻铆技术应用于铝锂合金产品，解决手工钻铆出现裂纹的难题，摸索出最优进程位置、冲压力等钻铆工艺参数，排除手工钻铆参数不稳定的因素，节省大量因钻铰孔复杂工序及反复检查工作所耗费的人工和时间成本，使得产品质量稳定性和装配效率显著提升，铝锂合金手工铆接桁裂纹形貌见图 14，铝锂合金自动铆接提高铆接质量见图 15。



**Figure 14.** Hand riveted truss crack morphology of Al-Li alloy  
**图 14.** 铝锂合金手工铆接桁裂纹形貌



**Figure 15.** Automatic riveting of Al-Li alloy to improve riveting quality  
**图 15.** 铝锂合金自动铆接提高铆接质量

## 2. 中国航天运载器舱段铆接技术发展趋势分析

在国家航天运载器高密度、高可靠性发射、新产品研制等任务需求牵引下，航天运载器舱段产品制造能力和水平得到跨越提升。 $\Phi 2.25\sim 5$  m 箭铆接舱段产品自动铆接技术基本攻克； $\Phi 1.4\sim 2.3$  m 整体机加舱段产品自动装配技术实现“0”的突破，自动铆接能力覆盖了金属、非金属材料筒体、锥体、壁板等，产能实现大幅提升。逐步形成单元、流水式生产，初步探索智能制造模式。未来结合信息化手段和数字化仓储物流系统、过程检测数据采集系统构建，实现智能化铆接装配事业部建设[24]-[26]。我国航天运载器舱段铆接专业技术发展路线图见图 16。



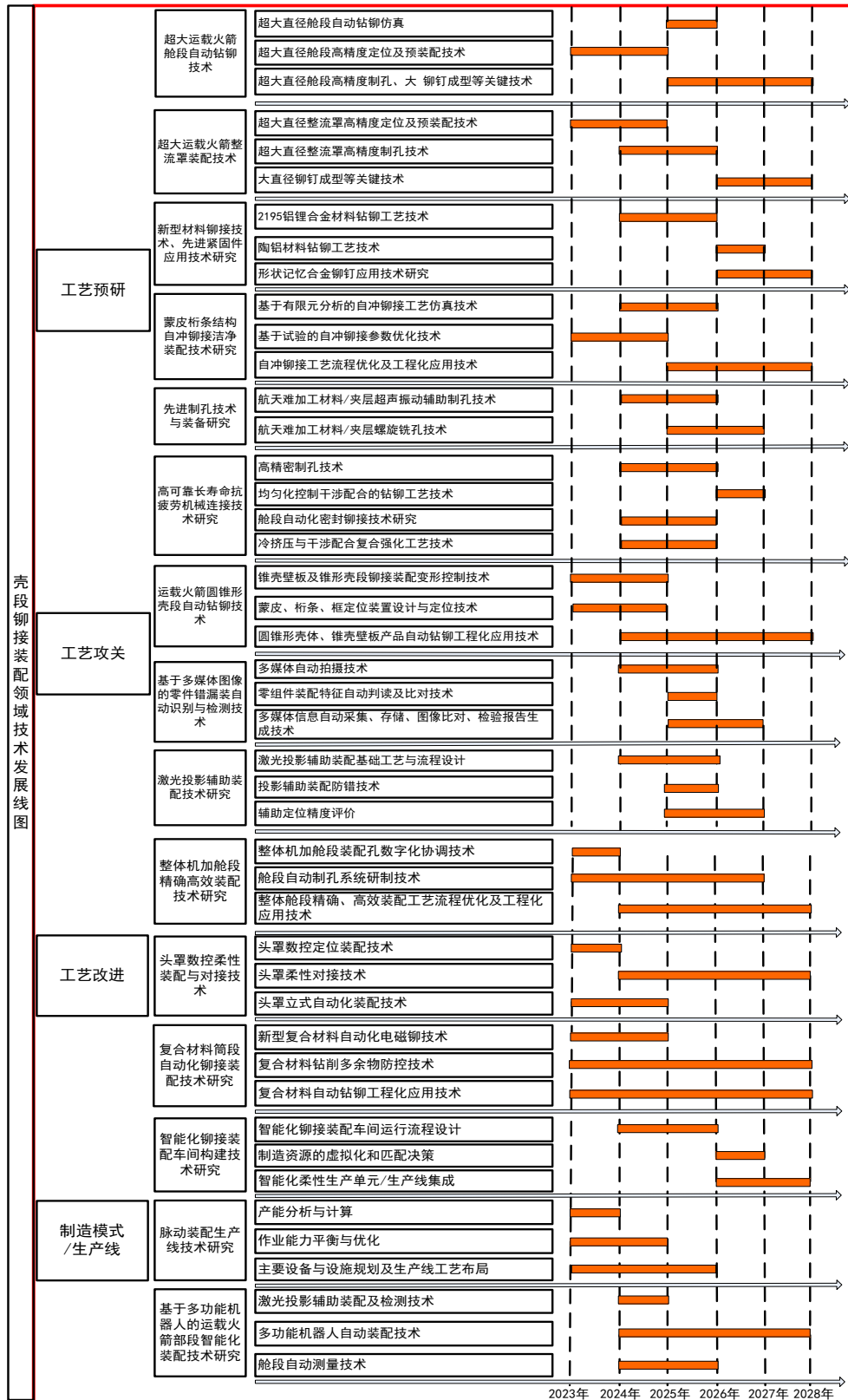


Figure 16. Development roadmap of space vehicle segment riveting expertise in China  
 图 16. 我国航天运载器舱段铆接专业技术发展路线图

## 2.1. 柔性辅助装配技术前景分析

针对传统自动铆接非标专机、机器人机型无法到达且对自动化有强烈需求的装配场景，国外研究发展起步较早，我国柔性辅助装配技术研究逐步跟进，辅助装配技术见图 17。



Figure 17. Auxiliary assembly  
图 17. 辅助装配

- 1) 协作机器人柔性辅助钻孔技术研究，针对去除量大且操作空间有限、非径向孔等复杂工况，操作者与辅助机器人配合制孔，提高制孔效率、灵活性、自动化覆盖率[27]；
- 2) 协作机器人柔性辅助螺接技术研究，目前航空领域高锁螺栓、环槽铆钉、单面自动螺接已取得进展，未来研发适应航天运载器舱段自动螺接末端执行器并探索协作机器人柔性辅助螺接技术，实现一键自动制孔、送钉、螺接、施加力矩、防松[28]；
- 3) 协作机器人柔性辅助装配高精度零组件，针对大量依靠工装定位器定位的支架，操作者利用辅助机器人配合定位；自动化预装配技术也是极具发展潜力的技术方向[29]；
- 4) 鳄式自动铆接技术，在框、桁、蒙皮、角片连接等较小喉深区实现高柔性、狭小空间、大批量自动铆接[30]。

## 2.2. 航天领域可重复使用铆接壳段连接及成型紧固件长期贮存技术前景分析

国内外航天领域复用技术发展迅猛，相应复用舱段连接形式需适应再入飞行各个阶段工况，目前国内航空业具备更多技术储备和应用场景，随着国内航天系统应用场景增加，未来开展复用飞行器铆接接头疲劳性能研究是一个发展方向。同时，适应航天领域的可重复使用的不锈钢壳体低成本连接工艺技术研究也具备发展潜力[31]。

随着产品系统的可靠性要求越来越高，设计贮存寿命也逐渐增长，铆钉出现失效可能会导致整个系统出现重大事故。开展加速老化试验找到铆钉失效的模式和机理，为预防和解决失效问题提供理论支撑[32]。

## 2.3. 自动单侧自冲摩擦铆焊工艺技术前景分析

传统手工及自动铆接工艺方法已不能适应日益激增的狭深、批产产品任务，需研发自动单侧自冲摩擦铆焊工艺。上海交通大学首先对自冲摩擦铆焊工艺进行研究，工艺优势：摩擦热软化材料，获得无开裂铆接头；铆钉不穿透下层工件，属高可靠密封连接；形成机械-固相复合连接，提升接头性能。该技术具备无预制孔、具备密封性、不产生多余物、无噪声、铆接效率为 10 颗/min 等优势，与自动铆接执行机构结合后，铆接成型质量一致性强，成型精度可以进入 0.5 mm 级别区间。各科研生产单位、高校均涉猎此项研究[33] [34]。自冲摩擦铆焊工艺铆接类型见图 18。

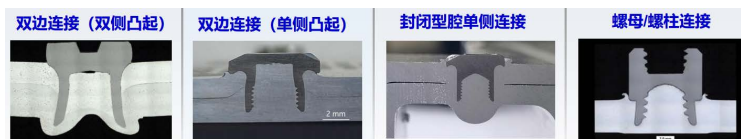
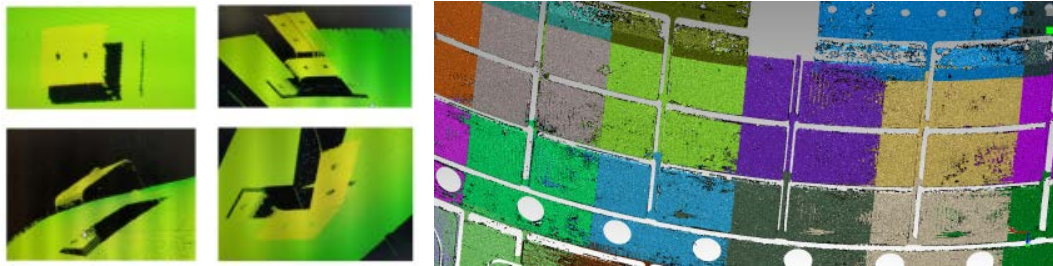


Figure 18. Self-punching friction riveting welding process type of riveting  
图 18. 自冲摩擦铆焊工艺铆接类型

## 2.4. 航天运载器舱段零件自动识别检测技术前景分析

航天运载器舱段产品结构多为蒙皮框桁结构、铆接壳段及网格加筋结构，舱段上装大量仪器电缆支架、托板螺母和攻丝孔等接口，装配位置和数量准确性对飞行可靠性至关重要，因此航天运载器舱段零件自动识别检测技术具有较好的发展前景[35]。使用 3D 相机对壳段产品信息自动采集见图 19。



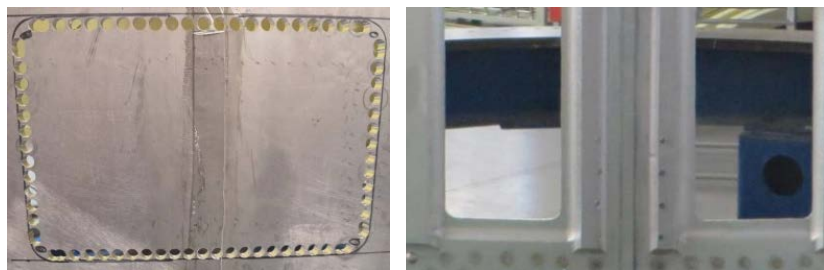
**Figure 19.** Automatic collection of shell segment product information using 3D camera  
**图 19.** 使用 3D 相机对壳段产品信息自动采集

## 2.5. 航天运载器舱段铆接装配事业部智能化发展模式前景分析

相比于国外航空、航天生产模式发展路线，我国生产模式需进一步革新。未来发展趋势涉及智能化铆接装配事业部运行流程设计、制造资源虚拟化和匹配决策、智能化柔性生产生产线集成等方面。结合信息化手段和数字化仓储物流系统、过程检测数据采集系统构建，开展典型智能化铆接装配事业部构建研究，结合产品铆接装配全生命周期信息化管理，最终建成一个集智能化仓储、物流、装配、管理为一体的智能铆接装配事业部[36]。

## 2.6. 航天运载器舱段原位钻铣技术前景分析

航天运载器舱段存在大量在装配体状态下的材料去除工作，如大直径、厚度通孔钻制，异型舱口铣切等，传统方法为手工制备，随着各科研生产单位自动铆接能力提升，利用自动钻铣设备进行原位钻铣技术是降低成本、提高质量的新手段[37] [38]。航天运载器舱段原位钻铣技术见图 20。

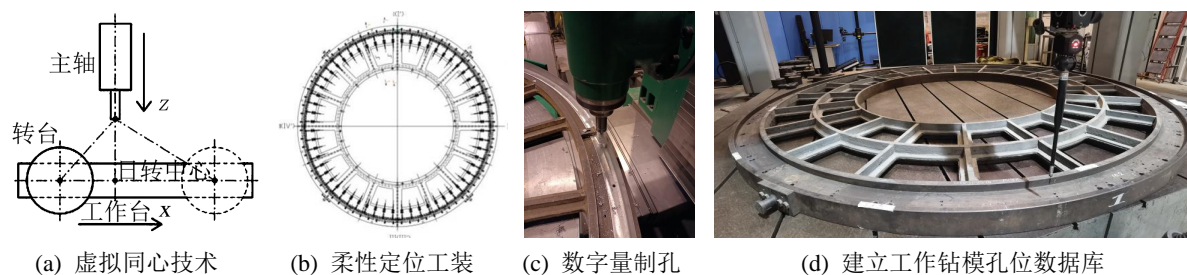


**Figure 20.** *In-situ* drilling and milling technology of space vehicle segment  
**图 20.** 航天运载器舱段原位钻铣技术

## 2.7. 基于实体钻模的航天运载器舱段数字量协调技术前景分析

未来基于实体钻模的航天运载器舱段数字量协调技术的广泛使用可以使各科研生产单位摆脱实体钻模的束缚。总结从定位基准、加工精度、协调精度等方面一整套对接孔数字协调通用要求。加快以数字量传递为核心的数字化设计、制造技术的发展，提高对接孔加工效率和协调精度，产品合格率、对接孔的一致性得到提升[39] [40]。数字量协调技术见图 21。





**Figure 21.** Digital quantity coordination technique  
**图 21.** 数字量协调技术

### 3. 结论

中国航天运载器舱段铆接技术经历了飞速发展,拉近了与国外航空、航天铆接技术的差距,但发展的工艺性、系统性、成熟度、智能化方面均存在不小差距。本文通过对中国航天运载器舱段铆接技术的发展现状及发展趋势的研究,综合阐释了国内、外航天技术的差距及未来发展的方向,为国内航天运载器舱段铆接行业的未来发展提供思路。

### 参考文献

- [1] 郭文彧. 中美商业航天发展脉络对比分析[J]. 航天工业管理, 2022(10): 37-43.
- [2] 孙来燕. 中国航天的发展战略和重点领域[J]. 中国工程科学, 2016(10): 7-12.
- [3] 喻龙. 飞机自动钻铆技术研究现状及其关键技术[J]. 航空制造技术, 2017(9): 16-20.
- [4] Barton, E. (2014) G12 Automatic Fastening Launch Vehicle. *SAE Technical Papers*, 4, 15-21. <https://doi.org/10.4271/2014-01-2263>
- [5] 楼阿莉. 国内外自动钻铆技术的发展现状及应用[J]. 航空制造技术, 2015(6): 50-52.
- [6] Dillhoefer, T. (2017) All Electric Fastening System. *SAE Technical Papers*, 4, 24-29.
- [7] Mehlenhoff, T. (2009) Automated Fastening of Aircraft Cargo Door Structures with Standard Articulating Robot System. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2009-01-3157>
- [8] 于渊. 锥体壳段壁板自动钻铆技术研究及应用[J]. 航空精密制造技术, 2021(1): 40-43.
- [9] 杜兆才. 机器人钻铆系统研究现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2020(4): 26-31.
- [10] 费军. 自动钻铆技术的发展现状及应用分析[J]. 航空制造技术, 2011(6): 42-44.
- [11] 刘连喜. 无头铆钉自动钻铆工艺试验研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(1): 77-82.
- [12] 邓峰. MPAC 自动钻铆机[J]. 航空制造技术, 2010(6): 26-29.
- [13] 王珉. 飞机数字化自动钻铆系统及其关键技术[J]. 航空制造技术, 2013(1/2): 80-83.
- [14] 潘伟涛. 钢铝异种材料自冲铆接工艺研究与参数优化[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [15] 何冠中. 铝钢异种金属平模自冲摩擦铆焊工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2023.
- [16] 吴小丹. 铝钢异种金属 SPR 铆接工艺及裂纹形成机理研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [17] DeVlieg, R. (2010) Applied Accurate Robotic Drilling for Aircraft Fuselage. *International Journal of Aerospace*, 3, 180-186. <https://doi.org/10.4271/2010-01-1836>
- [18] 杨保华. 中国商业航天的实践与探索[J]. 中国航天, 2018(1): 6-10.
- [19] 毕海亮. 2018 年商业发射服务产业趋势[J]. 中国航天, 2019(7): 10-14.
- [20] DeVlieg, R. (2009) Robotic Trailing Edge Flap Drilling System. *SAE Technical Paper*. <https://doi.org/10.4271/2009-01-3244>
- [21] DeVlieg, R. (2011) High-Accuracy Robotic Drilling/Milling of 737 Inboard Flaps. *SAE International Journal of Aerospace*, 4, 73-79. <https://doi.org/10.4271/2011-01-2733>
- [22] 张宏剑. 运载火箭机构技术发展研究[J]. 航空精密制造技术, 2023(6): 1-9.

- 
- [23] Smith J. (2013) Integrated Hole and Countersink Inspection of Aircraft Components. SAE Technical Paper. <https://doi.org/10.4271/2013-01-2147>
- [24] DeVlieg, R. (2008) One-Up Assembly with Robots. SAE Technical Paper. <https://doi.org/10.4271/2008-01-2297>
- [25] 范新中, 肖耘. 飞船整流罩纵向解锁机构设计与动力学[J]. 宇航学报, 2019, 19(5): 87-93.
- [26] Olsson, T. (2010) Cost-Efficient Drilling Using Industrial Robots with High-Bandwidth Force Feedback. *Robotics and Manufacturing*, **26**, 24-38. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2009.01.002>
- [27] 孙为钢. 中国航天商业发射服务的实践与展望[J]. 中国航天, 2017(7): 6-9.
- [28] 王黎明. 数字化自动钻铆技术在飞机制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2008, 51(11): 42-45.
- [29] 王健. 机器人钻铆系统研究现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2015, 58(4): 26-31.
- [30] Logemann, T. (2016) Mobile Robot Assembly Cell (RACe) for Drilling and Fastening. SAE Technical Paper. <https://doi.org/10.4271/2016-01-2078>
- [31] 卜泳. 飞机结构件的自动化精密制孔技术[J]. 航空制造技术, 2009, 52(24): 61-64.
- [32] Mueller-Hummel, P. (2012) New Concept on Drills up to 5/8'' (16 mm) for One Shot Robot Application. SAE Technical Paper. <https://doi.org/10.4271/2012-01-1865>
- [33] Atkinson, J. (2007) Robotic Drilling System for 737 Aileron. SAE Technical Paper. <https://doi.org/10.4271/2007-01-3821>
- [34] 曾广商. 我国载人运载火箭伺服机构技术发展分析[J]. 载人航天, 2013, 19(4): 3-6.
- [35] 贾丰胜. 航天产品质量问题数据应用研究[J]. 质量与可靠性, 2022(6): 2-9.
- [36] Barton, E. (2017) Drivmatic Automatic Fastening System with Single Robot Positioner. SAE Technical Paper. <https://doi.org/10.4271/2017-01-2078>
- [37] Waurzyniak, P. (2015) Aerospace Automation Stretches Beyond Drilling. *Manufacturing Engineering*, **154**, 73-86.
- [38] Frommknecht, A. (2017) Multi-Sensor Measurement System for Robotic Drilling. *Robotics*, **47**, 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.01.002>
- [39] 周源泉. 中国长征系列运载火箭的可靠性分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2002(2): 2-4.
- [40] 王小军. 运载火箭发展与结构机构动力学问题[J]. 载人航天, 2016, 20(4): 13-16.